

CONSIDERAÇÕES SOBRE AS TEORIAS DAS CORES DE NEWTON E DE GOETHE

Valdemar W. Setzer

www.ime.usp.br/~vwsetzer

DOI: 10.13140/RG.2.2.23079.36006 – Esta versão: 30/5/24

1. Introdução

Este artigo teve origem em um *e-mail* comentando alguns aspectos das teorias da luz de Newton e das cores de Goethe, que enviei ao interessante *Boletim Dia e Noite*, editado por alunos de astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), a respeito de artigos publicados no Boletim. Em resposta, um dos editores do boletim convidou-me para escrever um artigo de no máximo 400 palavras para ser publicado. Comecei a escrever o artigo, e numa primeira versão ele já tinha cerca de 900 palavras. Aí desisti de me limitar às 400 palavras, e à medida que vinham as ideias, eu o ia aumentando. A primeira versão quase final não tinha nenhuma estrutura, de modo que decidi reorganizar tudo, dividindo os tópicos em seções, e aproveitei para inserir mais texto e figuras. Como esse artigo está bem presente em minha mente, tenho tido com frequência novas ideias do que colocar nele, de modo que é interessante o leitor usar sempre a última versão.

Este artigo está organizado como segue. Inicialmente é tratada a teoria da luz de Newton, que foi baseada em uma experiência extremamente particular, usando prismas de seção transversal triangular, convidando-se o leitor a fazer suas próprias experiências com um prisma. Em seguida é apresentado um breve histórico de como Goethe chegou à sua teoria, e como esta generalizou as experiências básicas de Newton. São também apresentados vários aspectos da teoria de Goethe, como o círculo das cores, as cores complementares, as sombras coloridas, a pós-cor e a origem das cores, com comentários sobre o método científico de Goethe e sobre outras áreas da pesquisa científica e da aplicação prática da sua teoria.

Todas as traduções de trechos citados e de títulos de livros ou de artigos são livres.

2. A teoria da luz de Newton

Newton (1643-1727) publicou sua teoria da luz incolor ou branca em seu livro *Opticks* de 1/4/1704, com 2ª edição em 1717 [ver a referência]. Nele, ele estabelece uma teoria formal, com definições, axiomas, proposições e teoremas. No entanto, ele partiu de uma experiência extremamente particular. Na Prop II, Theor. II. Exper. 3, ele a descreve da seguinte maneira (*sic*):

“In a very dark Chamber, at a round Hole, about one third Part of an Inch broad, made in the Shut of a Window, I placed a Glass Prism, whereby

the Beam of the Sun's light might be refracted upwards toward the opposite Wall of the Chamber, and there form a colour'd Image of the Sun."

(A propósito, note-se que provavelmente naquela época escrevia-se em inglês como o alemão até hoje: com os substantivos com inicial maiúscula.)

Portanto, Newton partiu de um determinado feixe de claridade (no caso, a luz do Sol) imersa em escuridão (a sua sala escura).

As cores descritas nessa experiência são as 7 normalmente citadas, que podem ser vistas em um arco-íris, na sequência, vermelho, laranja, amarelo, verde, azul claro, azul escuro e violeta.

É interessante notar que posteriormente denominou-se o furo na janela sólida como um *Foramen exiguum*, um orifício diminuto. No entanto, ele não era nada pequeno: 1/3 de polegada equivale a um pouco mais do que 8 mm, isto é, poderia ter sido bem menor. Newton faz um erro nesse capítulo do livro:

"Now the different Magnitude of the hole in the Window-shut, and different thickness of the Prism where the Rays passed through it, and different inclinations of the Prism to the Horizon, made no sensible changes of the length of the Image. Neither did the different matter of the Prisms make any. ..."

Todos esses fatores influenciam na imagem que se obtém passando um feixe de luz por um prisma, em ambiente escuro, não só na extensão da imagem como nas próprias cores assim produzidas. Isso pode ser facilmente constatado usando-se um prisma colocado com seu eixo na horizontal e se observando através dele as figuras abaixo, prestando-se atenção às cores que aparecem nas fronteiras entre o preto e o branco, ignorando-se outras cores que aparecem em outras transições de traços pretos com o fundo branco, e variando a distância do prisma para as figuras e sua rotação vertical. As faixas brancas fazem o papel do orifício usado pelo Newton. É preciso encontrar a inclinação correta do prisma para se ver a dispersão nas cores, pois com certas inclinações em relação ao olho e ao objeto observado ele funciona como um espelho – usado em certos binóculos para acertar a imagem, que seria invertida sem o prisma.

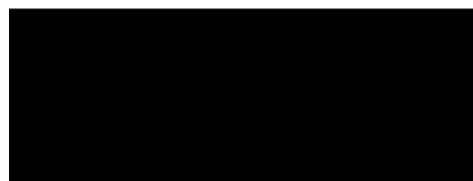
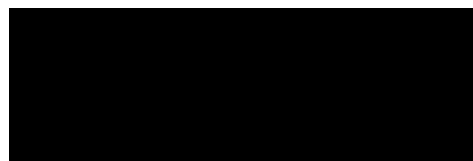


Fig 1a

Fig1b



Fig 1c



Fig 1d

O material do prisma e os ângulos de sua seção transversal triangular também alteram as imagens.

Essas mesmas experiências podem ser feitas com folhas de papel branco e preto, fazendo o papel de claridade e escuridão, respectivamente. Pegue-se uma folha de papel branco, e duas de papel preto (p.ex. capas de plástico usadas para montar cadernos em espiral). Colocando-se as folhas pretas, com bordas paralelas, sobre o papel branco e olhando-se a faixa branca com um prisma, com seu eixo paralelo às bordas da faixa, veem-se as cores da dispersão. Afastando-se as folhas pretas, como na fig. 1a, deixando um feixe relativamente largo de branco e se o olhando pelo prisma, veem-se do lado de uma das folhas pretas, no sentido da faixa branca, vermelho, laranja e amarelo. Do outro lado da faixa branca, vê-se violeta, azul escuro e azul claro (o amarelo e o azul claro ficam do lado da faixa branca pois são cores claras, ao contrário do vermelho e do violeta, que são escuras, ao lado do preto). Note-se que as cores de um lado da faixa branca são bem simétricas às do outro lado. Aproximando as duas folhas pretas, diminuindo a largura do feixe branco, num certo ponto o azul claro vai tocar o amarelo. Quem sabe esse efeito é produzido olhando-se a fig. 1b ou 1c; nelas, pode-se também alterar a distância o prisma, sempre perto do olho, para a tela do vídeo. Estreitando a faixa branca um pouco mais, há sobreposição do azul claro com o amarelo. Aparece o verde – a sobreposição de cores-luz ('cores-luz' em contraposição às 'cores-pigmento', das tintas) amarela com azul claro dá verde, como não poderia deixar de ser. São as 7 cores do arco-íris, vistas por Newton em seu experimento particular. Aproximando mais ainda as folhas pretas, num certo ponto aparecem apenas as cores do RGB (vermelho, verde, azul, das iniciais em inglês)! Talvez a fig. 1d dê esse efeito. Assim, segundo Newton, a luz "branca" é composta das 7 cores ou só de RGB?

Portanto, a experiência geral é ter uma faixa branca suficientemente larga para deixar o branco entre as cores, aparecendo a dispersão nas bordas entre a luz e a escuridão, ou entre o claro e o escuro. O resto é caso particular, facilmente compreendido pela superposição de cores-luz. Assim, Newton partiu de uma situação bem particular para derivar toda a sua teoria, cujo cerne seria o fato de a luz incolor ou branca ser composta de "todas as cores". Na verdade, seriam apenas as 7 cores do arco-íris que, em realidade, não têm fronteiras distintas, pois as transições são contínuas.

Todos os experimentos feitos hoje com luz baseiam-se fundamentalmente na situação particular da experiência de Newton, usando-se certos feixes de luz imersos em escuridão, atravessando um prisma ou um reticulado.

3. O *experimentum crucis* de Newton

Partindo de seus experimentos particulares, Newton formulou a teoria (atenção, não é um fato científico, é uma interpretação, é uma teoria!) de que a luz incolor ou branca é composta das cores do arco-íris. É errado dizer que ela seria composta de "todas as cores". Segundo ele, cada cor tem um grau diferente de refração (refrangibilidade), e com isso o prisma decompõe a luz incolor ou branca em suas diferentes componentes. Em seu livro, na Prop. II, Teor. II, ele escreveu: "The Light of the Sun consists of Rays differently Refrangible." Nas suas experiências ele sempre usou feixes de luz do Sol passando por prismas, em um quarto escuro, isto é, usou feixes de claridade imersos em escuridão.

No final de um interessante artigo publicado no *Am. Journal of Physics*, Torger Holtsmark [1970] escreveu: "A contradição fundamental envolvida na terminologia newtoniana parece ser a seguinte: Newton pensou que ele explicou a existência de um espectro por meio de um modelo físico da luz, ao passo que de fato ele usou as imagens do espectro para explicar um possível modelo físico da luz."

Para demonstrar que as cores resultantes de seu experimento eram "puras", não podiam ser decompostas, Newton elaborou o que ficou sendo conhecido como o *experimentum crucis* (Prop. II, Theor. II, Exper. 6), em que ele usou dois prismas. Isolando uma cor produzida pelo primeiro prisma, sempre no quarto escuro, ele notou que o segundo prisma não a decompunha, isto é, ela seria "pura". Ver mais detalhes no item 7 abaixo. Veremos adiante como Goethe criticou esse resultado.

4. Surge Goethe

Goethe, conhecido por sua extraordinária obra literária e poética foi, no entanto, um grande observador científico, por exemplo tendo descoberto o osso intermaxilar. Seu método científico inicia com uma observação totalmente isenta por parte do investigador, isto é, o pesquisador deve observar um fenômeno e descrevê-lo sem que sofra

interferência de suas ideias preconcebidas. Seria uma "observação pura"; com isso, seu método é fenomenológico. Segundo ele, o observador deveria aguardar para que o próprio fenômeno revelasse algo de sua natureza.

Um exemplo típico que contraria esse método foi a teoria da evolução de Darwin pela seleção natural. Ele imaginou algo extremamente simples, facilmente compreensível fisicamente, daí o poder persuasivo de sua teoria: os indivíduos mais adaptados ao meio ambiente sobrevivem melhor e, com isso, deixam mais descendentes, que herdam suas características e vão se adaptando cada vez mais conforme o passar das gerações. Darwin não estava presente nos passos da evolução para comprovar sua teoria que, portanto, no sentido de Goethe, não era fenomenológica. Hoje existem várias evidências dessa seleção dos mais adaptados, como no caso de pássaros que emigraram entre ilhas, bactérias que se tornam mais resistentes a antibióticos etc. No entanto, é preciso reconhecer que ninguém acompanhou ou acompanha os dois fatores que levam à seleção: as mutações genéticas (neodarwinismo) quando elas ocorrem e, no caso de animais, o encontro de um casal para haver a seleção. No entanto, quase todos os cientistas ficam referindo-se à evolução neodarwiniana para justificar alterações anatômicas e fisiológicas ao longo do tempo. Pior ainda, usam o mesmo raciocínio em várias áreas, como para evoluções sociais, o denominado "darwinismo social", como por exemplo para explicar as consequências do racismo estrutural no Brasil. Uma possível extensão da teoria darwiniana é a de que nem todas as mutações e encontros de casais foram aleatórias, como largamente assumido nos meios científicos e acadêmicos. Com isso, pode-se admitir que a evolução tinha um objetivo, chegar ao ser humano, claramente um pináculo da evolução. Isto é, pelo menos parcialmente a evolução teria sido dirigida. Um objetivo é totalmente excluído no darwinismo clássico, baseado na aleatoriedade. Além disso, um objetivo transcenderia o mundo físico.

Já que foi falado em darwinismo, é interessante notar que Darwin não foi o único a formular a teoria da seleção natural. O famoso biólogo e naturalista britânico Alfred Russel Wallace (1823-1913) tinha desenvolvido a mesma teoria em paralelo a Darwin. Ambos publicaram artigos a respeito no mesmo número do *Journal of the Proceedings of the Linnean Society*, em 1858, cf. a excelente biografia de Darwin por Johannes Hemleben [1976, p. 101]. No entanto, em geral Russel Wallace é ignorado. Quantos estudantes de ensino médio aprenderam que a teoria da seleção natural é devida a Darwin e Russel Wallace, e não só ao primeiro? Talvez isso seja devido ao fato de o segundo, por ser espiritualista (ele era espírita não religioso; indo dar cursos de biologia nos EUA acabou dando cursos também de mediunismo), declarou que a seleção natural não devia ser aplicada aos seres humanos, e isso foi suficiente para se ignorar todo o resto. Aliás, isso já tinha sido expresso por Pascal (1623-1662): "É perigoso apontar

demais o parentesco do ser humano com o animal, sem ao mesmo tempo reconhecer a sua grandeza.” [p. 153]. Curiosamente, Darwin era teísta [p. 150]. Sobre Russel Wallace, ver nas referências o artigo da Wikipedia [Wallace].

A evolução neodarwiniana tornou-se praticamente um dogma nos meios acadêmicos e científicos. Um outro exemplo de dogma é justamente a teoria de Newton de que a luz incolor ou branca é a composição das 7 cores do arco-íris (ou do contínuo entre elas).

Voltando a Goethe, o famoso físico Herman Helmholtz (1821-1894) em uma palestra de 1853 [1889], conta a descrição que Goethe fez de como se interessou pelos prismas e a origem das cores. No final de sua excelente edição da teoria das cores de Goethe [Goethe 1971], Ruprecht Mattatei tem um capítulo “Sobre a confissão do autor”, transcrevendo uma seleção do que Goethe escreveu sobre a história da teoria das cores, no fim de um de seus livros. Goethe revela várias passagens interessantes de sua vida. Na de Nº 7 ele conta a história relatada por Helmholtz. Como curioso observador científico, ele queria estudar a teoria da luz de Newton, que tinha aprendido na universidade, e pediu emprestado uma caixa com alguns prismas a um amigo, o *Hofrath* [conselheiro da corte] Bütter, da cidade de Jena, perto de Weimar, a cidade de Goethe. Deixou esses prismas de lado, até que o amigo, cansado de pedir os prismas de volta, enviou uma carta com um mensageiro para buscá-los. Na frente do mensageiro, Goethe pegou um prisma e olhou através dele pela primeira vez. Apontando para uma parede, verificou que não havia dispersão em cores, o que o deixou desapontado; no entanto, percebeu que havia dispersão sempre que havia fronteira de cores entre ou em objetos. “Os batentes da janela, contra a luz do dia nublado, apresentavam as cores mais intensas.” Nesse momento ele teve uma inspiração de que as fronteiras entre cores eram fundamentais para o aparecimento das cores em um prisma, e que “por meio de um instinto ouvi uma voz de que a teoria de Newton estava errada”. O caso da parede branca foi um erro de Goethe, conforme apontado por Helmholtz [1889], mas não prejudicou o que Goethe pesquisou posteriormente. Ele não devolveu os prismas e começou a fazer suas experiências, que culminaram em seu livro *Farbenlehre* [Teoria das cores], de 1810 [1980; ver também excertos em 1971 – esta obra com muitos comentários e pranchas coloridas –, 1992 e 2011]. Sobre a teoria das cores de Goethe, ver as referências Ott [1979], Pedrosa [1982], Proskauer [1968] e, também, o interessantíssimo e detalhado vídeo, em inglês, do físico Pehr Sall, onde ele documenta extremamente bem as experiências relatadas por Goethe, não só com prismas. É interessante que essas experiências jamais foram contestadas.

No trabalho citado de Helmholtz, que procura diminuir a importância científica de Goethe, considerando-o principalmente como poeta, ele analisa não só a teoria das cores, mas outras pesquisas de Goethe,

como os estudos anatômicos (que levaram à sua descoberta do osso intermaxilar) e à sua conhecida metamorfose das plantas, de 1790 [Goethe 2020]. Sobre a obra científica de Goethe em geral, ver [Steiner 1984].

O erro de Goethe quanto ao estranhar que o prisma não produzia dispersão de cores ao se olhar para uma parede branca é explicado por Helmholtz pelo fato de que cada partícula da parede produz a dispersão, mas as suas vizinhas também, havendo então a composição das cores produzindo o branco. Do ponto de vista da teoria de Goethe, nesse caso não há dispersão pois não há transição de cores, ou, como será visto, uma transição entre uma cor mais clara e outra mais escura. Nota-se que a explicação de Helmholtz parte de um reducionismo, a existência de partículas, ao contrário da de Goethe, como ficará claro adiante.

5. Goethe generaliza Newton

Como foi visto, as experiências de Newton lidavam com um feixe de luz de certo diâmetro, imerso em escuridão, passando por um prisma. Goethe generalizou (1) para feixes de luz de diâmetros quaisquer; e (2) para feixes de escuridão imersos em luz. Assim, Goethe mostrou que Newton tinha elaborado toda sua teoria baseando-se em um caso muito particular. O caso (1) já foi descrito no item 2 acima, usando-se uma faixa branca ladeada por faixas pretas, em uma tela de vídeo ou por uma folha branca embaixo de duas pretas, variando-se a largura da faixa branca.

O caso (2) pode ser verificado por qualquer pessoa, usando as cores branco em lugar da claridade, e preto em lugar da escuridão. As figuras abaixo mostram faixas pretas entre partes brancas, a situação dual (em termos de claro e escuro) das experiências de Newton.

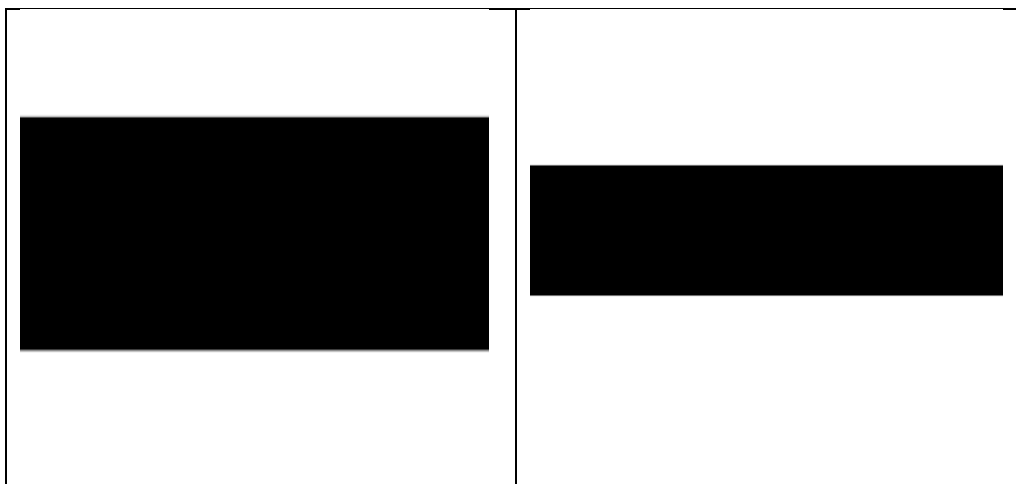


Fig. 2a

Fig. 2b

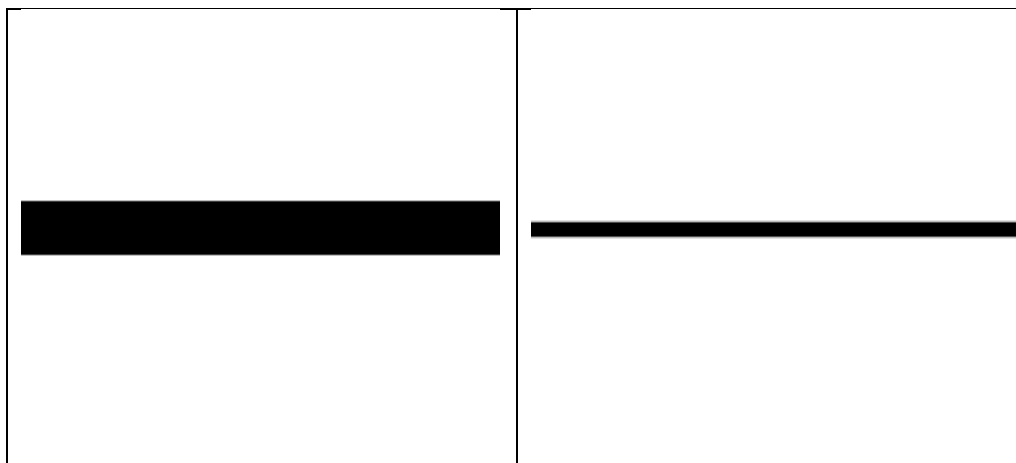


Fig. 2c

Fig. 2d

Olhando-se essas figuras com o prisma na horizontal, podem-se notar as dispersões de cores nas bordas superior e inferior das faixas pretas. Analogamente aos casos das faixas brancas das figs. 1a-1d, pode-se pegar uma folha de papel preto e duas de papel branco sobre a primeira, formando uma faixa preta. É a situação dual da feita com uma faixa branca. Se a faixa preta for bem larga, como na fig. 2a, olhando-se-a pelo prisma vê-se a situação dual em relação à faixa branca, da fig. 1a. Aparece uma faixa preta com as cores mais escuras, vermelho e violeta, na fronteira com a parte branca. No caso da faixa branca da fig. 1a, ao lado da faixa e para dentro dela apareciam as cores mais claras, amarelo e azul claro. Na fig. 2a as cores são invertidas, novamente com as cores mais claras perto da parte branca, e as escuras perto da parte preta. Aproximando-se as folhas brancas, diminuindo a faixa preta, chega um momento em que o vermelho toca o violeta. Aproximando-se ainda mais as folhas brancas, o vermelho sobrepõe-se ao violeta, aparecendo a maravilhosa cor magenta (*pink* em inglês), denominada por Goethe de *Pfirsichblüte* (flor de pessegueiro). Goethe denominou o magenta de "cor complementar" do verde (ver o item 6 abaixo). Nessa situação, em lugar das 7 cores do arco-íris tem-se, partindo da fronteira com uma folha branca, azul claro, azul escuro, violeta, magenta, vermelho, laranja e amarelo. Assim, o azul claro é complementar do vermelho, e assim por diante.

Aproximando-se ainda mais as folhas brancas, diminuindo a altura da faixa preta, em um certo ponto aparecem apenas três cores: o violeta (ciano), o magenta e o amarelo, abreviadas em inglês por CMY as cores complementares (segundo Goethe) das obtidas na faixa branca bem estreita. Talvez a fig. 2d apresente esse efeito.

As figs. 1a-d e 2a-d foram geradas com o MS Power Point criando-se duas telas. Uma delas com dois retângulos horizontais preenchendo toda a tela de preto, mas deixando uma faixa branca horizontal entre eles. Na outra tela, foi inserido apenas um retângulo preto horizontal no meio da tela branca. O eixo do prisma deve ser mantido na

horizontal. Com isso pode-se variar a altura do retângulo branco na primeira tela, e do preto na segunda, e observar as situações descritas para as folhas de papel.

Usando o Power Point, podem-se fazer experiências muito interessantes, por exemplo, em lugar de retângulos pretos, preenchê-los com tons de cinza. Ver-se-á que continuará havendo a mesma dispersão da luz ou da escuridão nas cores descritas, só que essas cores estarão um pouco apagadas, precisamente como descrito por Goethe. Na primeira tela, em lugar de uma faixa branca deixada entre os retângulos pretos, pode-se criar mais um retângulo para representar a faixa. Usando-se os três retângulos, pode-se preenchê-los com várias cores, e notar que sempre haverá alguma dispersão de cores na fronteira entre duas cores diferentes, como foi observado por Goethe, notando-se que essas duas cores influenciam a intensidade das cores obtidas através do prisma.

A figura seguinte mostra a situação da segunda tela (faixa preta, correspondendo a um feixe de escuridão imerso em claridade) numa foto tirada com um celular quase encostado em um prisma de ângulos de 60° ; a curvatura foi produzida pela lente. Infelizmente as cores são distorcidas; por exemplo, na parte inferior não se vê bem a transição do amarelo para o vermelho passando pelo laranja.

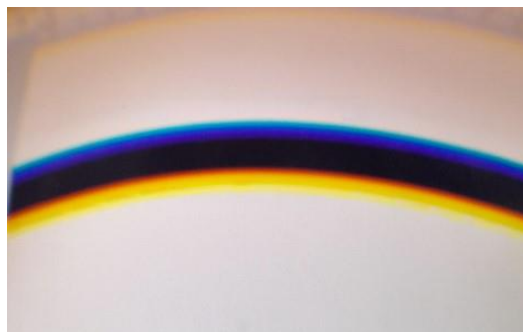


Fig. 3

A fig. 4, copiada do excelente vídeo de PehrSall, mostra as situações de transição do escuro para o claro apresentadas na figura da esquerda, e à direita o resultado como produzido por um prisma, inclusive, embaixo, o resultado com feixes muito finos.

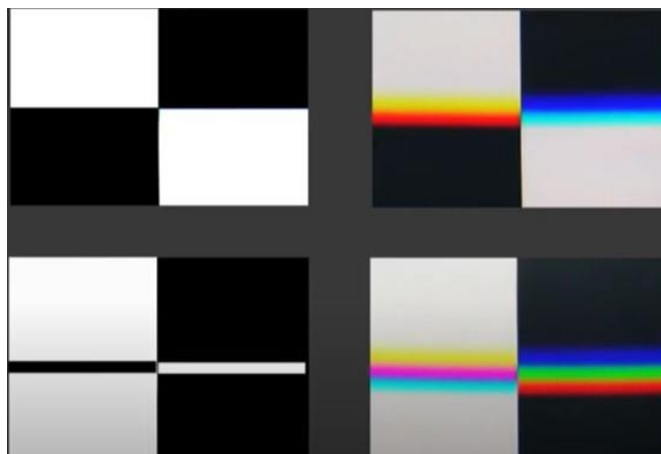


Fig. 4

É importante notar que numa tela de vídeo a cor resultante da mistura de cores-luz vermelha, verde e ciano (cada uma com intensidade máxima, 255 no código de intensidades de 0 a 255 representados no computador em um *byte* para cada uma das três cores) não é realmente branca, tendo um tom de cinza claro.

Usando-se uma tela produzida no Power Point, pode-se obter uma variação quase contínua das alturas das faixas, notando-se no primeiro caso o que acontece ao se diminuir progressivamente a altura da faixa branca, e no segundo caso a da faixa preta.

6. Uma aplicação da teoria de Goethe

Uma aplicação interessante da teoria de Goethe são as cores usadas em monitores de vídeo e em impressoras. Nas telas de monitores de vídeo são usadas como cores básicas RGB e nas impressoras as cores complementares CMY. Com a teoria de Goethe pode-se compreender por que são usadas essas cores. No caso das telas, tem-se cores que são claras sobre o fundo escuro, a tela sem luz – o preto é produzido pela ausência das três cores do RGB (valor 0 para os três *bytes* dessas cores). No caso das impressoras, tem-se a situação dual: cores que são escuras em relação ao papel branco. Usando-se as cores básicas em cada caso, obtém-se um efeito melhor.

Note-se, no entanto, que a mistura das 7 cores-luz do arco-íris não dá o branco, dá um cinza claro. A composição das cores-luz do RGB também dá um tom um pouco acinzentado. A composição de cores do CMY deveria dar um preto, mas o resultado é meio acinzentado. Por isso, além do preço, nas impressoras usa-se um cartucho com tina preta, além de cartuchos com as três cores do CMY.

Nas páginas do jornal "O Estado de São Paulo" aparecem no lado esquerdo de cada folha dupla 4 quadradinhos superpostos, de cima para baixo com as cores azul claro, magenta, amarelo e preto respectivamente. Agora o leitor pode compreender o mistério desses quadradinhos. Provavelmente durante a impressão alguém (ou um

sistema automático) fica verificando se essas cores estão adequadas, pois em caso contrário as fotos e letras coloridas não iriam ficar bem.

7. Newton-claro e Newton-escuro

Pelo que foi visto, se Newton tivesse usado um feixe de escuro imerso em claridade, em lugar de um feixe de luz imerso em escuridão, ele teria feito toda a sua teoria, mas com as cores complementares.

No final do interessante artigo citado no item 3, Holtsmark [1970] escreveu: "A contradição fundamental envolvida na terminologia newtoniana parece ser a seguinte: Newton pensou que ele explicou a existência de um espectro por meio de um modelo físico da luz, ao passo que de fato ele usou as imagens do espectro para explicar um possível modelo físico da luz."

Vale a pena notar que todas as experiências relatadas no *Opticks* podem ser feitas com as situações duais, usando-se feixes de escuro imersos em luz, obtendo-se as "cores complementares", segundo a teoria de Goethe.

O interessante livro de André Bjerke [1961] contém uma tabela, mostrando as situações duais, com duas colunas, denominadas "*Licht-Newtons 'Optik'* [óptica do Newton-luz]" e "*Dunkel-Newtons 'Opakik'* [opáquica do Newton-escuro]", onde ele mostra na primeira coluna 10 exemplos do livro de Newton e, ao lado, na segunda coluna, a mesma formulação do Newton mas trocando a luz pela escuridão, e as cores pelas suas complementares [pp. 86-88]. Vale a pena citar a primeira linha dessa tabela, como exemplo (a tradução é do livro de Bjerke, que resume o trecho correspondente do *Opticks*):

Primeiro teorema:

"Luzes, que são diferentes nas cores, mostram também diferentes refrações, com transições graduais." Zinabre [vermelho] é a que é menos refratada, violeta a mais refratada.

Primeiro teorema:

"Sombras, que são diferentes nas cores, mostram também diferentes refrações, com transições graduais." Azul claro é a cor menos refratada, amarelo a mais refratada

Uma dessas dualidades traz o *experimentum crucis* (ver o item 3 acima), em que Newton usou dois prismas com eixos ortogonais, mostrando que no segundo não havia dispersão do feixe de luz reduzido a uma das cores do espectro, querendo provar que essas cores não eram compostas por outras. Durante muito tempo essa experiência foi uma dor de cabeça para os goethianistas que pesquisavam a teoria das cores, pois com um feixe de escuridão incidindo sobre o primeiro prisma, o segundo prisma decompunha as

cores complementares. André Bjerke [1961] relata que o problema aparecia pois o feixe de escuridão incidindo sobre o primeiro prisma usava um ambiente de claridade, ao passo que sobre o segundo prisma a cor isolada era imersa em escuridão, misturando a situação do Goethe no primeiro prisma, com a do Newton no segundo prisma. Ele foi resolvido imergindo-se em claridade cada cor produzida pelo feixe de escuro depois de passar pelo primeiro prisma, e aí ela não se decompunha. Isto é, a teoria de Goethe é coerente se as mesmas condições são preservadas ao longo de todas as experiências.

Na referida tabela, Bjerke apresenta o *experimentum crucis* e seu dual:

Sexta experiência:

“Experimentum crucis.

Experimento objetivo: uma pequena imagem *clara* com fundo *escuro* é refratada por um prisma. Um fino feixe colorido do espectro luminoso é selecionado por meio de um pequeno furo em um anteparo, que é colocado no caminho da luz, à frente do prisma. O feixe colorido passa por um novo pequeno furo em um anteparo Nº 2, depois por um prisma Nº 2 – colocado em paralelo com o primeiro – e é projetado sobre um terceiro anteparo. Com esse arranjo consegue-se “captar” um feixe de luz colorida – entre dois pontos da câmara [quarto] escura. (dois “furos na escuridão”). O feixe que incide sobre o prisma Nº 2, tem um certo ângulo de incidência. Girando-se agora o prisma Nº 1 sobre seu eixo, diferentes feixes monocromáticos são projetados – a no prisma Nº 2 e nele refratados – sempre com o mesmo ângulo de incidência. No anteparo final aparecem os diferentes feixes coloridos em diferentes posições: o feixe verde é mais refratado do que o vermelho, o violeta mais do que o verde”

Sexta experiência:

“Experimentum crucis.

Experimento objetivo: uma pequena imagem *escura* com fundo *claro* é refratada por um prisma. Um fino feixe colorido do espectro de escuridão é selecionado, enquanto com a ajuda de dois projetores (luz branca) bloqueia-se a parte restante do espectro. O feixe colorido passa por um prisma Nº 2 – colocado em paralelo com o primeiro – e é captado por um anteparo. Com esse arranjo consegue-se “manter” um feixe de luz colorida – entre dois pontos da câmara clara. (dois “furos na luz”). O feixe que incide sobre o prisma Nº 2, tem um certo ângulo de incidência. Girando-se agora o prisma Nº 1 sobre seu eixo, diferentes feixes monocromáticos são projetados – no prisma Nº 2 e nele refratados – sempre com o mesmo ângulo de incidência. No anteparo final aparecem os diferentes feixes coloridos em diferentes posições: o feixe magenta é mais refratado do que o azul claro, o amarelo mais do que o magenta.

Vale a pena mencionar uma citação do artigo de T. Holtsmark [1970]: “Em princípio, Newton poderia ter chegado aos mesmos modelos físicos se ele tivesse trabalhado sistematicamente com aberturas invertidas, isto é, em condições de uma ‘sala iluminada’, mas nesse caso ele teria chegado a uma outra terminologia de cores.”

No fim do item 2, foi mencionado que Newton considerava a luz incolor ou o branco como compostos pelas cores do arco-íris. Considerando a experiência com a dispersão de um feixe de escuro por um prisma, seria necessário concluir, analogamente, que a escuridão é composta pelas cores complementares à do arco-íris. Isso contraria as teorias de que a luz às vezes se comporta como partícula (por exemplo, a luz de uma estrela sendo atraída por astros de grande massa), às vezes como onda eletromagnética. A respeito desse segundo aspecto, note-se que ‘onda’ é um conceito da mecânica clássica, newtoniana. Ela não deve ser aplicada nem a fenômenos atômicos, onde a teoria clássica não se aplica, nem à luz. Em particular, uma onda propaga-se por atração e repulsão de moléculas, como em uma corda fixa em uma ponta e balançada na outra, ou nas ondas de um lago onde se atira uma pedra. No entanto, as tais ‘ondas’ eletromagnéticas propagam-se no vácuo, onde teoricamente não há partículas para se atraírem ou se repelirem. O correto seria usar a terminologia ‘irradiação eletromagnética’, e não ‘onda eletromagnética’. Uma irradiação eletromagnética comporta-se como onda quando interage com a matéria, como é o caso da experiência da ‘dupla fenda’, feita em 1801 por Thomas Young (1773-1829) – ver *Double-slit experiment* na Wikipedia. Nessa experiência, declarar, como é o usual, que a luz se comporta como onda *antes* das duas fendas não é um fato científico, é no máximo uma suposição científica – na verdade, não se deveria dizer nada sobre a natureza da luz antes da interação com as fendas. É interessante notar que a luz é invisível; ela se torna visível quando interage com a matéria.

8. O círculo das cores

Goethe criou um “círculo das cores”, em que cada cor é colocada em um setor circular. Cores opostas (no mesmo diâmetro) são as que ele denominou de cores complementares. A figura seguinte é um dos círculos das cores do *Farbenlehre*. Notem-se as cores complementares nos diâmetros.

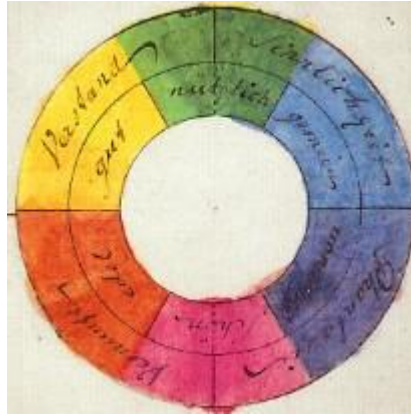


Fig. 5

Cores complementares são muito usadas pelos pintores para representar contrastes. Aliás, o interesse de Goethe pelas cores adveio de seu interesse pela pintura, anterior ao caso do prisma relatado no item 4.

9. A falácia do “disco de Newton”

Uma experiência muito comum feita em escolas é o “disco de Newton”, onde as 7 cores do arco-íris são pintadas como setores circulares em um disco de madeira. Um rasgo na borda desse círculo, preso por um eixo, permite que um barbante passe nele e num outro disco com uma manivela. Assim, o disco com as cores pode ser girado, e o professor, triunfante, diz algo como: “Vejam como o Newton estava correto: a superposição de todas as cores dá o branco!” Em primeiro lugar, o resultado visto pelos alunos não é realmente branco, mas cinza claro – e em geral o professor dá a desculpa que as cores não são puras. Em segundo, não houve superposição das cores no disco. O que houve é um efeito produzido pela retina: ela é que sobrepõe as cores.

10. As sombras coloridas

Outro fenômeno estudado por Goethe e que, segundo Israel Pedrosa em seu excelente livro [1982], já tinha sido examinado por Leonardo da Vinci (1452-1519), é o das sombras coloridas, muito frequentes, mas que em geral passam despercebidas para quem não as conhece. Ott e Proskauer [1979] dedicaram um livro inteiro a elas. Para vivenciá-las, podem-se usar dois focos de luz, por exemplo com duas luminárias de mesa (lâmpadas de cabeceira), ou uma só e usar a luz ambiente, desde que esta produza sombras em objetos, ou, melhor, a luz do dia vinda de alguma abertura, como uma janela, sem que o Sol incida sobre a experiência. Um dos focos de luz deve ser tapado com um celofane transparente colorido, e o outro, para equilibrar a luminosidade, não deve ser muito claro (daí o interesse em usar a luz de um dia nublado, ou cerrar suficientemente a janela). Coloque-se um objeto na frente dos focos, de modo que ele produza duas sombras, uma de cada foco de luz. Ajustando a intensidade dos focos (por

exemplo, afastando-se ou aproximando as luminárias), a sombra produzida pelo foco colorido (e iluminada um pouco pelo outro foco claro) ficará colorida, mas com a cor complementar à do foco colorido, isto é, se o foco colorido for verde, a sombra fica magenta, e vice-versa. Se o foco colorido for azul, a sombra fica amarelada ou alaranjada, e vice-versa, e assim por diante. No crepúsculo, quando luzes dos postes estão acesas, pode-se observar esse fenômeno. Se a luz dos postes for azulada, ver-se-á uma sombra de algum objeto colorida com a cor amarelada ou alaranjada. Se a luz dos postes for amarelada, ver-se-á a sombra azulada. Se a luminária com luz colorida for amarelada, a luz fraca do dia produzirá uma sombra azulada, e assim por diante. Poder-se-ia pensar que esse fenômeno é subjetivo, produzido pelo sistema visual de cada pessoa. No entanto, experimente-se tirar uma foto, e ver-se-á a sombra colorida nitidamente. Nas figuras seguintes, tiradas com uma câmera Panasonic Lumix DMC-ZS30, foi usada uma lâmpada de cabeceira (com luz um pouco amarelada), do lado esquerdo do objeto, coberta por papel colorido transparente. Como segunda fonte, incolor, foi usada a luz do dia por detrás do objeto, entrando por uma janela ajustando-se a persiana para dar o melhor efeito da sombra colorida. Na fig. 6a, a lâmpada foi coberta com papel amarelo, na 6b com papel verde, e na 6c com papel azul, como se pode ver pelas cores ao redor dos objetos (mas não atrás em relação à luz da lâmpada). Notem-se as sombras do objeto, colorida respectivamente com azul, magenta e amarela, as cores complementares à da luz colorida da lâmpada, segundo a teoria de Goethe. As cores foram um pouco distorcidas pela câmera e certamente o são pela tela onde este texto está exibido.



Fig. 6a



Fig. 6b



Fig. 6c

Note-se que quase na vertical, abaixo do objeto, a cor produzida pelo foco colorido é mais intensa do que no resto (à esquerda do objeto). Isso se deve ao fato de que no resto a luz do dia apagava um pouco a cor produzida pelo foco colorido.

11. A pós-cor

É interessante notar que a *Farbenlehre* de Goethe começa com o que ele denominou de "cores fisiológicas", como a pós-cor, isto é, ele introduz o observador em sua teoria, que assim é uma teoria humanista. Sobre a pós-cor, olhando-se fixamente para uma figura colorida bem iluminada, durante algum tempo, e depois a cobrindo com

uma folha branca, ou se a retirando e deixando branco em lugar dela, com meia luz, sem mover os olhos, veem-se as cores complementares segundo Goethe (uma maneira de se descobrir, dada uma cor, qual é a sua cor complementar). Na internet, procure-se por *after image*, com várias sugestões de experimentos. A próxima figura mostra a bandeira do Brasil nas cores complementares. Ela foi alinhada à esquerda para se a olhar bem fixamente em um de seus pontos (especialmente no centro), por vários segundos, e depois se olhar para a direita dela, vendo-se a bandeira em suas cores normais (obviamente, as cores dependem da resolução da tela).



Fig. 7

Essa é uma experiência subjetiva-objetiva. Claramente as cores tipo pós-cor são criadas pelo sistema visual de cada pessoa que tem esse sistema sadio (algumas pessoas têm dificuldade em enxergar as pós-cores), mas todas as pessoas relatam “ver” as mesmas cores.

12. A origem das cores segundo Goethe

Dentro de sua veia poética, Goethe afirmou que as cores aparecem na luta da luz com a escuridão. Para ele, a escuridão tinha uma qualidade própria. Brevemente, ele constatou que se um meio turvo com fundo escuro é iluminado de lado, esse meio aparece azulado. Se um meio turvo é iluminado por trás dele por uma fonte de luz, o meio aparece amarelado, tendendo para o vermelho conforme o aumento da turbidez. Isso pode ser constatado com fumaça de cigarro e uma fonte de luz lateral e fundo escuro, ou essa fonte por detrás da fumaça.

Assim se pode compreender por que o céu é azul – a atmosfera, o meio turvo, é iluminada pelo Sol e o fundo é totalmente escuro. No nascer ou no pôr do Sol, este está por detrás da atmosfera, como se fosse mais densa, e o Sol adquire as cores do amarelo para o vermelho conforme ele se aproxima do horizonte. Os astronautas disseram que a Terra era azul. Não, essa é a cor assumida pela atmosfera iluminada de lado pelo Sol, tendo por detrás o fundo escuro do solo ou dos mares. Há explicações para esses fenômenos usando reflexão, refração e difração da luz nas partículas da atmosfera: o violeta e o azul seriam mais dispersos, espalhando-se mais, predominando sobre as outras

cores; no nascer e no pôr do Sol o caminho da luz na atmosfera é maior, diminuindo a luz azulada, restando mais luz do amarelo para o vermelho. Mas são explicações teóricas muito mais complexas, que não podem ser vivenciadas como no caso da fumaça, e por exigirem o conceito abstrato de partículas da atmosfera. Na teoria de Goethe, não há necessidade de entender uma teoria: a própria vivência é a explicação.

Mais um exemplo que está na *Farbenlehre*: a chama de uma vela tem uma seção azulada na sua parte inferior. O gás perto da vela, emitido pela cera ou parafina, forma um meio turvo, e é iluminado pela chama amarela superior. Colocando-se um papel ou objeto preto por detrás da vela, o azul fica intenso. Colocando um papel branco por detrás, o azul torna-se fraco. Esses efeitos não ocorrem em uma chama azulada (combustão completa) de um fogão a gás, mostrando que nesse caso o azul é a própria cor da chama.

Um outro fenômeno examinado por Goethe e que pode ser vivenciado, é o fato de que montanhas ao longe parecerem azuladas. Novamente, tem-se um fundo escuro atrás da atmosfera iluminada de lado pelo Sol ou pela luz do dia.

Esses são exemplos da "luta" entre a claridade e a escuridão. Já houve demonstração de que dentro de um prisma, devido à refração ocorre o mesmo efeito de sobreposição de claridade com escuridão em meio turvo (o vidro do prisma), daí a dispersão nas cores. As bordas de um feixe de luz imerso em escuridão produzem dentro de um prisma as cores como Goethe as descreveu, em termos de meio turvo com luz do lado (escuridão predominando), ou com luz por detrás do meio (luz predominando) [Proskauer 1991]. De fato, na entrada de um feixe largo de luz (como nas figs. 1a e 1b) em um prisma, é importante considerar que a parte escura em volta do feixe também 'penetra' no prisma. Devido à primeira refração, de um lado esse feixe penetra na parte escura que o fundo, e o material do prisma faz o papel do meio turvo, que é iluminado pela parte luminosa do feixe, produzindo o aparecimento das cores 'frias', azuladas. Na outra borda do feixe, este se afasta interiormente da parte escura, produzindo o efeito do meio turvo do prisma ser iluminado por detrás, aparecendo as cores 'quentes', do amarelo para o vermelho.

O essencial dessa teoria é que deve haver fronteira entre claro e escuro, inclusive entre cores mais claras e cores mais escuras. Sempre que há uma transição dessas, haverá o aparecimento das cores devido à sua dispersão em um prisma. No entanto, no caso de cores "puras", como as usadas por Newton em seu *experimentum crucis* (cf. itens 3 e 7 acima), inclusive estendido para uma cor imersa em escuridão (v. item 7, o Newton-escuro), há a dispersão no segundo prisma, pois neste há a interação do feixe de luz com escuridão, ou feixe de escuridão com claridade. No entanto, Goethe percebeu que nesse caso a cor do feixe colorido ou do ambiente colorido predominava sobre as

outras, que ficam quase imperceptíveis. Ele também explicou o aumento da imagem do tamanho do feixe colorido, devido à dispersão natural acrescida à própria cor do feixe – ou o dual no caso de feixe de escuro.

É interessante notar que a teoria de Goethe serve para explicar inclusive os espectros de substâncias, como mostrado por Gerhard Ott [1970] no caso das linhas espectrais do mercúrio e do hélio.

Sobre a natureza da luz, este artigo não poderia deixar de citar o extraordinário livro *Cathing the Light*, de Arthur G. Zajonc [1993], contendo várias considerações sobre a teoria das cores de Goethe.

13. Fenômenos primordiais

Um outro aspecto do método de Goethe é considerar-se que alguns fenômenos são primordiais (*Urphänomene*), não podendo ser reduzidos. Para ele, a luz e a escuridão são exemplos desses fenômenos. Bjerke [1961] formula da seguinte maneira, em tradução livre: “Reduzida a uma fórmula curta, a lei para os fenômenos primordiais de Goethe pode ser expressa da seguinte maneira: Luz, modificada pela escuridão, produz as cores quentes [vermelho, laranja e amarelo]; escuridão modificada pela luz, produz as cores frias.” Relembre-se o que foi descrito acima para a experiência com fumaça de cigarro, os efeitos na atmosfera e o que se passa dentro de um prisma.

14. Considerações finais

Como foi visto, o caso do Newton é extremamente particular. Mas é ele que é usado nos experimentos com cores, espectros etc., com prismas ou reticulados: feixes de branco ou luz clara em ambiente escuro, como as estrelas – bem ao gosto do Newton, que era astrônomo. Ele fez o erro de dizer no *Opticks* (Prop, VII, Theor. VI) que lentes sempre produzem aberração cromática (uma lente convexa faz o papel de dois prismas em contato com um de seus lados; uma côncava, o papel de dois primas unidos por uma aresta), o que atrasou em 50 anos o aparecimento das lentes acromáticas: a primeira patente para essas lentes data de 1758. Aliás, Newton inventou o telescópio que leva seu nome substituindo a lente da objetiva (a que aponta para os objetos) por um espelho parabólico no fundo do telescópio. Esse espelho concentra a luz em um pequeno espelho que a reflete para a lente ocular, do lado do telescópio, perto do olho do observador. Com isso ele eliminou a aberração cromática produzida pela objetiva.

Apesar de a teoria de Newton ser derivada de um caso muito especial (feixe fino de luz clara imerso em escuridão), se se fica nessa situação, ela é coerente, e por isso ela é usada. Mas não reflete a realidade geral. Em minha opinião a teoria de Goethe, muito mais extensa do que está sendo apresentado aqui, também é coerente, e não foi refutada satisfatoriamente até hoje, pelo menos nas muitas publicações que

estudei. Dennis L. Sepper [2002] escreveu um interessante livro comparando as duas teorias.

Note-se que a teoria de Newton é reducionista, partindo de um caso extremamente particular, método típico da ciência corrente. Um dos métodos científicos de Goethe [Steiner 1984, 2016; Zajonc 1976] é partir sempre do caso mais geral, e explicar o particular tendo o geral como pano de fundo.

É interessante notar que o método de Goethe é qualitativo, ao contrário do método de Newton, que usou os índices de refração. Arthur G. Zajonc [1976] cita um conhecido trecho de Lord Kelvin (o dos graus Kelvin de temperatura), de 1891, dizendo que só se conhece algo quando se pode medi-lo e expressá-lo em números; em caso contrário, não se tem ciência mas, no máximo, um "começo de conhecimento"; veja-se também essa citação na biografia de Kelvin na Wikipedia, nas referências.

Quando o geral é vivenciado pelo ser humano, e a ciência é qualitativa, ela se torna humana, isto é, o ser humano consegue relacionar-se mais profundamente com ela. Em caso contrário, ela se torna meramente intelectual, abstrata, pelo menos quando à compreensão, apesar de poder ter aplicações práticas.

Goethe considerava que sua teoria das cores foi sua obra mais importante. No entanto, por ter desenvolvido um método científico diferente do usual, ele não recebeu a devida atenção como cientista, sendo sempre enormemente admirado como poeta e escritor. Sobre a obra científica do Goethe, ver o livro de Rudolf Steiner [1984], que foi justamente o editor dessa obra para a Deutsche Nationalliteratur [Literatura Nacional Alemã] uma edição completa das obras de Goethe

O fato é que até hoje a física não sabe o que é a luz, e todos os experimentos são feitos na sua interação com a matéria, isto é, com algo com pelo menos alguma escuridão!

Agradecimento

Agradeço a Lincon Cosme Ribeiro, formado em física e fazendo mestrado em ciência da computação na USP, por algumas sugestões relevantes quanto à redação. A Rogério Y. Santos por uma melhoria no título deste artigo.

Referências

Bjerke, A. *Neue Beiträge zu Goethes Farbenlehre* [Novas contribuições para a teoria das cores de Goethe. Stuttgart: Freies Geistesleben, 1961.

Goethe, J.W. von. *Goethes Farbenlehre – ausgewählt und erläutert von Rupprecht Matthaei* [A teoria das cores de Goethe – seleção e explicação de Ruppert Matthei]. Ravensburg: Otto Maier, 1971.

Goethe, J.W. von. *Farbenlehre* [Teoria das cores]. 3 vols. Stuttgart: Freies Geistesleben, 1980. *Theory of Colours*. Trad. C.L. Eastlake. Cambridge: MIT

Press, 1980, disponível em (acesso em 10/4/24):
<https://www.gutenberg.org/cache/epub/50572/pg50572-images.html>

Goethe, J.W. von. *Doutrina das Cores*. Apresentação, seleção e tradução de M. Giannotti. São Paulo: Nova Alexandria, 1993.

Goethe, J.W. von. *Contribuições para a óptica (parte I) & O experimento como mediador entre objeto e sujeito*. Trad. E. Possebon. São Paulo: Antroposófica, 2011.

Goethe, J.W. von. *A metamorfose das plantas*. Trad. F.M. Nolasco. São Paulo: Edipro, 2020. Também na trad. de F. Zimpel, L. Viotti, G. Köllert e J. Cardoso. São Paulo: Antroposófica, 3ª ed. 1997.

Helmholtz, H. L.F. von. *Goethes naturwissenschaftliche Arbeiten* [Os trabalhos científicos de Goethe]. New York: Henn, Holt, 1889. „On Goethe’s scientific researches. Trad. H.W. Eve. in *Herman von Helmholtz Popular Scientific Lectures*, Kleine, M. (ed.). New York: Dover 1962. Acesso em 10/4/24:
<https://archive.org/details/popularscientifici0000herm/page/n7/mode/2up>

Hemleben, J. *Darwin in Selbstzeugnissen und Bilddokumenten* [Darwin em depoimentos próprios e imagens de documentos. Reinbeck: Rowolt Taschenbuch: 1968, reimpressão de 1976.

Kelvin, Lord. Biografia na wikipedia. Acesso em 8/4/24:
https://en.wikipedia.org/wiki/Lord_Kelvin

Holtzmark, T., “Newton’s Experimentum Crucis Reconsidered.” *Am.J. of Physics* 38 (10), Oct. 1970, pp. 1229-1235. Acesso em 22/11/20:
<http://aapt.scitation.org/doi/pdf/10.1119/1.1976014>

Newton, I. *Opticks or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflectionin & Colors of Light*. New York, Dover 1979. Acesso em 22/11/20:
<http://www.gutenberg.org/ebooks/33504>

Ott, G. *Die Herleitung der Linienspektren de Quecksilbers und des Heliums nach der Forschungsmethode Goethes – Ein Beitrag zum Nachweiss der Fruchtbarkeit goethenistischer Denkmethode* [Dedução das linhas espectrais do mercúrio e do hélio segundo o método de pesquisa de Goethe – Uma contribuição para a comprovação do resultado frutífero do método cognitivo (ideativo) de Goethe]. Dornach: Goethe Farbenstudio, 1970.

Ott, G. e H.O. Proskauer. *Das Rätsel des Farbigen Schattens* [O enigma da sombra colorida]. Basel: Zbinden, 1979.

Pedrosa, I. *Da cor à cor inexistente*. Rio de Janeiro: Léo Cristiano, 1982.

PehrSall. Excelente vídeo sobre Goethe e a sua teoria das cores (várias partes, consecutivas). Acesso em 8/4/24:
<https://www.youtube.com/watch?v=QnfVIENcHbU>

Pós-cor (com ilustrações para experimentar). Acesso em 24/11/20:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Afterimage>

Proskauer, H.O. *Zum Studium von Goethes Farbenlehre* [Para o estudo da teoria das cores de Goethe]. Basel. Zbinden, 1968.

Proskauer, H.O. e A. Hartung. *Zur Verteidigung von Goethes Farbenlehre* [Para uma defesa da teoria das cores de Goethe]. Dornach: Goethe-Farbenstudio, 1991.

Sepper, D.L. *Goethe contra Newton. Polemics and the project for a new science of color*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

Steiner, R. *A obra científica de Goethe*. GA 2. Trad. R. Lanz. São Paulo: Antroposófica, 1984. Em inglês (acesso em 11/4/24): https://rsarchive.org/Books/GA001/English/MP1988/GA001_index.html

Steiner, R. *O método cognitivo de Goethe – Linhas básicas para uma gnosiologia da cosmovisão goethiana*. GA 2. Trad. B. Callegaro e J. Cardoso. São Paulo: Antroposófica, 2ª ed. 2016. Em inglês (acesso em 11/4/24): https://rsarchive.org/Books/GA002/English/AP1940/GA002_index.html

Wallace, A.R. Artigo da Wikipedia, acesso em 11/4/24: https://pt.wikipedia.org/wiki/Alfred_Russel_Wallace

Zajonc, A.G. *Goethe's theory of color and scientific intuition*. Am.J. of Physics Vol. 44, Nº 4, April 1976, pp. 327-333. Acesso em 11/4/24: <https://www.arthurzajonc.org/wp-content/uploads/2015/11/Goethes-theory-of-color-and-scientific-intuition.pdf>

Zajonc, A.G. *Catching the light – The entwined history of Light and Mind*. New York: Oxford University Press, 1993.