

# Descobertas independentes por caminhos diferentes: o caso da lei da reversão espectral (1848-1859)

Oswaldo Pessoa Jr. \*

## 1 INTRODUÇÃO

Ao se estudar uma área da história da ciência, o historiador às vezes tece considerações sobre “o que poderia ter ocorrido, caso algo não tivesse acontecido”. Tais considerações são chamadas de enunciados “contrafactuais”. O presente trabalho se insere em um projeto (iniciado em Pessoa, 2000) que procura explorar os caminhos possíveis (factuais e contrafactuais) disponíveis para a evolução da ciência. Isso é feito exprimindo-se a evolução da ciência por meio de *modelos causais probabilísticos*, envolvendo unidades de conhecimento científico que recebem o nome de “avanços” ou “realizações” (Pessoa, 2004). De maneira geral, o objetivo do método é adquirir uma noção de quais são as possibilidades históricas na evolução da ciência, para que assim possamos tentar explicar *porque* a ciência evoluiu de uma certa maneira e não de outra.

Como exemplo de como a explicação de um episódio na história da ciência pode ser expressa em um modelo causal, examinamos anteriormente o caso do nascimento da ciência do magnetismo (Pessoa, 2005; Pessoa, 2006b). Trata-se de um caso de desenvolvimento independente, ocorrido na China e na Europa, em que um *mesmo* caminho foi trilhado de maneira independente em dois contextos diferentes, até que a não transposição de um gargalo fez a ciência do magnetismo estagnar na Europa. Por contraste, consideremos neste artigo uma outra situação em que dois caminhos *distintos* levaram a um mesmo avanço, que funcionou como um gargalo para o nascimento da Velha Teoria Quântica.

## 2 A LEI DA REVERSÃO ESPECTRAL

Consideremos a descoberta independente da lei de que um meio absorve os mesmos comprimentos de luz ou de radiação térmica que ele emite. Esta constatação é às vezes chamada de “lei de reversão espectral”, pois variando-se as condições experimentais de um gás, uma linha de emissão de luz pode se reverter em uma linha de absorção. Atualmente, esta propriedade é mais conhecida como “lei de radiação de Kirchhoff”, pois Gustav Robert Kirchhoff a enunciou em outubro de 1859, tendo-a demonstrado matematicamente em dezembro daquele ano e, de forma mais geral, em janeiro de 1860 (ver Siegel, 1976, pp. 577-583). De maneira mais precisa, esta lei diz que, se considerarmos radiação eletromagnética de um mesmo comprimento de onda  $\lambda$ , emitida a uma mesma temperatura  $T$ , então para quaisquer dois corpos 1 e 2 (feitos de quaisquer materiais), as razões entre as taxas de emissão  $E$  e de absorção  $A$  são as mesmas:

$$\frac{E_1(\lambda, T)}{A_1(\lambda, T)} = \frac{E_2(\lambda, T)}{A_2(\lambda, T)} \quad (1)$$

Uma outra maneira usada por Kirchhoff para enunciar esta lei foi definindo uma função  $e(\lambda, T)$ , interpretada como a emissividade  $E$  de um “corpo negro” feito de um certo material, ou seja, de um

\* Departamento de Filosofia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. Endereço: Av. Prof. Luciano Gualberto, 315, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: opessoa@usp.br.

corpo que absorve toda radiação incidente, de forma que  $A = 1$ . A lei de Kirchhoff implica que  $e(\lambda, T)$  é uma “função universal”, que tem o mesmo valor para qualquer corpo do Universo. O seu trabalho levaria a diversos desdobramentos experimentais e teóricos que culminariam com o nascimento da Teoria Quântica.

É interessante, porém, que uma versão da lei anunciada por Kirchhoff em outubro de 1859 já havia sido publicada pelo físico experimental escocês Balfour Stewart, em março de 1858. Seu enunciado era menos geral, pois se referia apenas à radiação térmica (infravermelha), sendo que só em março de 1860 ele a estenderia para a luz visível. Além disso, sua derivação matemática da lei era inferior àquela que Kirchhoff apresentaria 1½ anos depois (ver Siegel, 1976, pp. 583-587). Entende-se assim que o trabalho de Kirchhoff tenha tido maior impacto nas gerações seguintes, mas isso não retira os méritos do escocês. Um estudo da controvérsia sobre prioridade que se seguiria entre britânicos e alemães é apresentada por Daniel Siegel (1976, pp. 587-600).

O que nos interessa neste trabalho é descrever os caminhos trilhados pelos dois cientistas até a descoberta de que, para cada comprimento de onda, absorção e emissão são proporcionais, ou seja, de que se um corpo absorve bem (ou mal) em um certo comprimento de onda, ele irradiará bem (ou mal) neste mesmo comprimento de onda (supondo as mesmas temperaturas). Os dois cientistas trilharam caminhos bastante diferentes, com Stewart fazendo experimentos no campo da radiação infravermelha, e Kirchhoff se concentrando na espectroscopia de luz visível. Neste último campo, por sinal, a lei da reversão espectral fora mencionada em publicações de dois outros cientistas, Léon Foucault (1848) e Anders Ångström (1853).

Faremos a seguir um breve relato desses dois caminhos.

### 3 ESPECTROSCOPIA DE LUZ VISÍVEL

Em 1672, Isaac Newton usou um prisma para examinar o espectro colorido da luz solar. O uso de um prisma para decompor a luz só foi continuado em meados de século XVIII, com o escocês Thomas Melvill, que faleceu precocemente em 1753 com apenas 27 anos. Melvill descobriu que quando diferentes substâncias se tornam incandescentes, elas emitem uma luz de cor característica que, quando passada por um prisma, forma um espectro com linhas discretas. A linha mais forte era uma linha amarela, presente em quase qualquer substância (Woolf, 1964, pp. 628-630).

Em 1802, William Wollaston estudava o quanto diferentes substâncias transparentes produzem refração (a mudança de trajetória de um raio ao passar de um meio para outro) e dispersão (a separação de luz branca em diferentes cores, formando um espectro), e para isso passou a luz do Sol por uma fenda de 1/20 de polegada, mais fina do que o orifício circular usado por Newton. Ao examinar o espectro resultante, colocando um prisma de vidro *flint* (vidro com alto índice de refração devido à adição de óxido de chumbo) defronte do olho, percebeu algumas linhas escuras no espectro de arco-íris da luz solar (Pearson & Ihde, 1951, p. 267; Woolf, 1964, pp. 621-622).

Este estudo foi aprofundado em 1814 por Joseph Fraunhofer, de Munique. O jovem Fraunhofer adquirira um excelente conhecimento técnico para a fabricação de lentes, recebendo do suíço Pierre Guinand seus segredos para a fabricação de vidros transparentes de densidade uniforme e sem estrias, e passou a produzir prismas e lentes de qualidade superior. Com o intuito de estudar as propriedades ópticas de diversos vidros usados como lentes, analisou a refração da linha amarela das chamas por meio de um sensível equipamento que combinava um prisma (feito do vidro a ser estudado), um teodolito, para a medição precisa de ângulos, e um telescópio de 25 mm. Ao analisar a luz solar, redescobriu as linhas escuras e mapeou centenas delas. Descobriu também que a linha amarela das chamas era na verdade duas linhas próximas, e que elas se encontravam exatamente nas posições de duas linhas escuras do espectro solar, que havia nomeado “linhas D” (Jenkins, 1970, pp. 142-143). A origem dessas linhas escuras do espectro solar só seria esclarecida por Kirchhoff, utilizando a lei da reversão espectral.

A partir de 1822, John Herschel e Henry Fox Talbot levaram adiante a análise espectral de chamas. Outra técnica, introduzida por Charles Wheatstone em 1834, consistia da análise do espectro de metais presentes nos eletrodos de um arco voltaico de carbono.

Em 1856, William Swan comprovou que as linhas D são provenientes do elemento sódio. Esta identificação demorou em acontecer por causa da dificuldade de se purificar as substâncias químicas. Um passo decisivo para esta comprovação foi o uso do chamado “bico de Bunsen”, pelo alemão Robert Bunsen e seu aluno inglês Henry Roscoe, em torno de 1855 (Faraday já havia preparado semelhante equipamento em 1827, ver Partington, vol. 4, 1964, p. 288). Tratava-se de uma chama de elevada temperatura e baixa luminosidade que introduzia um espectro de fundo muito menor do que o de outras chamas, devido à correta mistura de gás de carvão e de ar, o que levava à combustão quase completa do carbono presente no gás.

Em 1848, trabalhando com um arco voltaico, Léon Foucault fazia uma comparação entre as emissões luminosas das linhas D no arco e as linhas escuras do espectro solar. Fazendo a luz solar passar pelo meio emissor de luz, observou um fenômeno curioso: em determinadas situações, as linhas escuras do sol se tornavam ainda mais escuras ao passar pelo meio emissor! Foucault concluiu, então, que o mesmo meio que *emite* seletivamente as linhas D tinha a propriedade de *absorver* seletivamente as mesmas linhas, constituindo o primeiro enunciado da lei de reversão espectral.

Este mesmo fenômeno de escurecimento das linhas D solares foi observado por William Thomson (futuro Lord Kelvin) em 1854, mas ele considerou que o escurecimento das linhas D solares fosse um efeito psicológico, como uma ilusão de óptica, conforme transparece em uma carta a George Stokes (Siegel, 1976, pp. 571-2).

Em Estocolmo, em fevereiro de 1853, Ångström enunciou claramente a lei de reversão espectral, comparando o espectro solar com o de metais em um arco voltaico. Fundamentou esta conclusão a partir da teoria de ressonância de Euler (Maier, 1970, p. 166).

Kirchhoff repetiu o experimento em 1859, sem conhecer em detalhes a publicação de Foucault, e também se surpreendeu pelo escurecimento das linhas solares. Ao contrário do francês, no entanto, ele foi além. Usou o espectro contínuo de uma lâmpada de calcário (*lime light*, desenvolvida em 1823; ver Partington, vol. 3, 1962, p. 725) e tentou observar linhas escuras ao passar a luz da lâmpada por uma chama com sódio: percebeu que isso só funcionava para uma chama mais fria, obtida com a mistura de álcool e água. Isso sugeriu para ele que a temperatura tinha um papel importante nesse tipo de fenômeno. Inspirado por resultados conhecidos (ver seção seguinte) para a emissão total de radiação (ou seja, em todos os comprimentos de onda), mas incorporando a 1ª lei da termodinâmica (conservação de energia), derivou a lei de que um meio absorve os mesmos comprimentos de luz ou de radiação térmica que ele emite, ou seja, obteve sua função universal  $e(\lambda, T)$ , conforme mencionado na seção anterior.

Além de Foucault, Ångström e Kirchhoff, outros cientistas que chegaram perto da lei de reversão espectral, além de Thomson e Stokes, teriam sido William Hallows Miller e John Tyndall (Pearson & Ihde, 1951, p. 270).

#### 4 PESQUISAS SOBRE RADIAÇÃO TÉRMICA

Em 1791, o suíço Pierre Prévost utilizou a noção de calórico (fluido imponderável de calor) para formular sua “teoria das trocas”. Numa situação de equilíbrio, todos os corpos de um sistema isolado têm a mesma temperatura (satisfazendo a 2ª lei da termodinâmica, que na época não havia sido ainda formulada); por outro lado, há uma conservação de calórico (exprimindo a 1ª lei da termodinâmica, a ser formulada só a partir de 1842). Assim, concluiu Prévost, um corpo que absorve muito calórico tem que emitir muito calórico. Isso é o que de fato foi observado por John Leslie, em 1804, ao constatar que um bom absorvedor, como a fuligem negra, era também um bom emissor de calor radiante, ao passo que um mau absorvedor, como um metal polido, era também um mau emissor. A medição da

radiação térmica emitida e absorvida era feita por termômetros, e foi desta maneira que, em 1800, o grande astrônomo William Herschel (pai de John) descobriu a existência de radiação infravermelha (Woolf, 1964, pp. 622-625).

O estudo desta radiação se intensificou na década de 1830, após o desenvolvimento da termo-pilha pelos italianos Leopoldo Nobili e Macedonio Melloni. O princípio deste detector era o "termopar", ou seja, a junção de dois metais cujas pontas estão a temperaturas diferentes, gerando uma corrente elétrica proporcional à diferença de temperatura.

Tal fenômeno da termo-eletricidade fora descoberto em Berlim pelo estoniano Thomas Seebeck em 1821, ao medir com um galvanômetro rudimentar uma corrente em um anel composto de dois semicírculos metálicos, feitos de bismuto e cobre, com uma das junções aquecidas. Montagens experimentais em que os pares termo-elétricos de Seebeck eram montados em série, alternando as junções quentes e frias, foram introduzidas por Ørsted e Fourier em 1823. Esta montagem foi aperfeiçoada por Nobili, em 1829, que acoplou o sistema ao galvanômetro astático, que ele próprio introduzira em 1825, e que atingia uma alta sensibilidade devido à anulação do efeito do campo magnético da Terra por meio de uma segunda agulha magnetizada. O "termomultiplicador" de Nobili era extremamente sensível a diferenças de temperatura de corpos em contato com os termopares. No ano seguinte, Melloni sugeriu a Nobili adaptar o detector para a medição de radiação, resultando em um instrumento que evitava dois problemas do termômetro: sua resposta lenta e pequena, e a absorção de radiação pelo vidro do bulbo. O detector de termopilha de Nobili & Melloni (1831) era sensível à presença de uma pessoa localizada a 10 metros (Barr, 1960, pp. 45-46).

Com o detector de termopilha, Melloni (1834) mostrou que a radiação térmica tinha diferentes "descrições", que seriam análogas às cores da luz visível, com diferentes comprimentos de onda, e James Forbes (1836), da Universidade de Edimburgo, mostrou que a radiação térmica tinha estados de polarização. Em 1835, André-Marie Ampère passou a defender que a radiação térmica e a luz visível tinham a mesma natureza ondulatória, diferindo apenas quanto ao seu comprimento de onda. Esta conclusão só passou a ser aceita de forma consensual após a observação de franjas de interferência da radiação infravermelha por Armand Hippolyte Fizeau & Léon Foucault, em 1847 (Barr, 1960, p.48).

Foi no laboratório de Forbes que Balfour Stewart realizou seus estudos sobre radiação, publicados em março de 1858. Confeccionou amostras de diferentes materiais, como sal gema, vidro e mica, além de uma amostra preparada com fuligem de carvão, que, por ser o melhor absorvedor, pelas observações de Leslie seria também o melhor emissor de radiação térmica, sendo assim usado como padrão de referência. As amostras, quando aquecidas a 100°C, serviam de emissor de radiação, e as mesmas amostras eram usadas como filtro, antes da incidência da radiação na termopilha. Stewart notou que um filtro de sal gema absorvia 25% da radiação emitida pela fuligem de carvão, mas absorvia 68% quando o emissor era o próprio sal gema. Ou seja, o sal gema emite radiação de uma "qualidade" peculiar, e é bastante opaco para esta mesma qualidade de radiação. Isso ocorria também para os outros materiais. Desta observação, concluiu que "a absorção de uma placa é igual à sua radiação, e isto ocorre para toda descrição de calor". A novidade de Stewart foi restringir a conclusão de Ritchie, de que "a absorção é igual à emissão", para cada comprimento de onda da radiação, fato que não observou diretamente, mas que inferiu a partir da noção de "qualidade" da radiação (Siegel, 1976, pp. 575-577).

A seguir, utilizando a teoria das trocas, Stewart derivou este resultado de maneira teórica. Quando Kirchhoff publicou a derivação da mesma lei, em dezembro de 1859, e ficou sabendo das semelhantes conclusões de Stewart, passou a criticá-lo (com certa razão) por ser pouco rigoroso em sua derivação e por não ter feito uma adequada comprovação experimental. Stewart só estenderia seus resultados para a luz visível em um artigo de fevereiro de 1860.

## 5 QUESTÕES CONTRAFACTUAIS

Vimos que a lei de reversão espectral foi encontrada a partir de dois caminhos independentes, ambos com um forte componente empírico, mas envolvendo domínios diferentes da realidade física: espectroscopia de luz visível e radiação infravermelha.

Por que os dois resultados surgiram mais ou menos ao mesmo tempo? Terá sido uma coincidência, ou os amadurecimentos concomitantes das duas áreas foram devidos a um mesmo conjunto de causas?

A seguir, dividiremos cada caminho em processos causais intermediários, ligados em série (desprezamos assim a conjunção de causas). Cada um desses processos pode ser representado por uma função de distribuição (Fig. 1), que descreve o tempo de surgimento de um avanço a partir de outro, em uma coleção de mundos possíveis. Em Pessoa (2006b), argumentamos que uma distribuição exponencial (Fig. 1b) se aplica bem a processos exploratórios, como a busca astronômica de um planeta. Já uma composição de distribuições exponenciais fornece uma distribuição que pode ser aproximada por uma distribuição gama (Fig. 1c).

## 6 RITMO DOS AVANÇOS EM ESPECTROSCOPIA ÓPTICA

O trabalho de Thomas Melvill com análise química de chamas (avanço A1), em 1752, não envolveu nenhuma técnica que não estivesse disponível na época de Newton. Ele poderia ter sido feito por um pesquisador tão genial quanto Melvill em 1700, ao passo que a não repetição de seus experimentos antes do século XIX indica que ele poderia ter sido realizado pela primeira vez em 1800. Não é exagero especular que Melvill poderia ter descoberto as raíais escuras do espectro solar se não tivesse morrido precocemente aos 27 anos, quando, segundo o historiador Harry Woolf (1964, p. 628), “estava claramente no caminho de grande descoberta na ciência”.

Escolhemos como data inicial do modelo causal o ano de 1750. Neste ano, imaginamos que cem cópias levemente diferentes do Universo foram geradas (ver Pessoa, 2006a, para mais detalhes desta fantasia), e supomos que em todas Melvill realizou sua descoberta em 1752. Supomos, porém, que em 80% dos mundos Melvill não teria morrido precocemente e teria continuado suas investigações experimentais, e talvez em um quarto desses teria descoberto as linhas escuras do espectro solar (avanço A2). Assim, na Fig. 1a, em um quinto dos mundos possíveis essa descoberta teria se dado antes de 1785. O que de fato aconteceu, em nosso mundo, é que Wollaston chegou a A2 não por influência de A1, mas inspirado pela descoberta de Herschel. Supomos, então, que na maioria (80%) dos mundos possíveis a descoberta de A2 se deu em torno da data de 1802, com uma dispersão de  $\pm 5$  anos. A distribuição resultante tem um valor médio em 1796, com desvio padrão de  $\pm 16$  anos (Fig. 1a).

Uma vez feitas as descobertas A1 e A2, bastaria alguém explorar os dois fenômenos para perceber que muitas das linhas escuras do espectro solar se encontram na mesma posição que as raíais luminosas das substâncias químicas, em especial as linhas D (avanço A3). Isso, porém, requereria um espectrômetro preciso, como o que Fraunhofer construiu em 1814. Supondo que a fabricação deste equipamento estava “madura” na época, ignoramos seu efeito em nossa estimativa de probabilidades. Supomos então que da conjunção de A1 e A2 se seguiria A3, segundo uma distribuição exponencial, com valor médio em 1814 (ver Figura 2b).

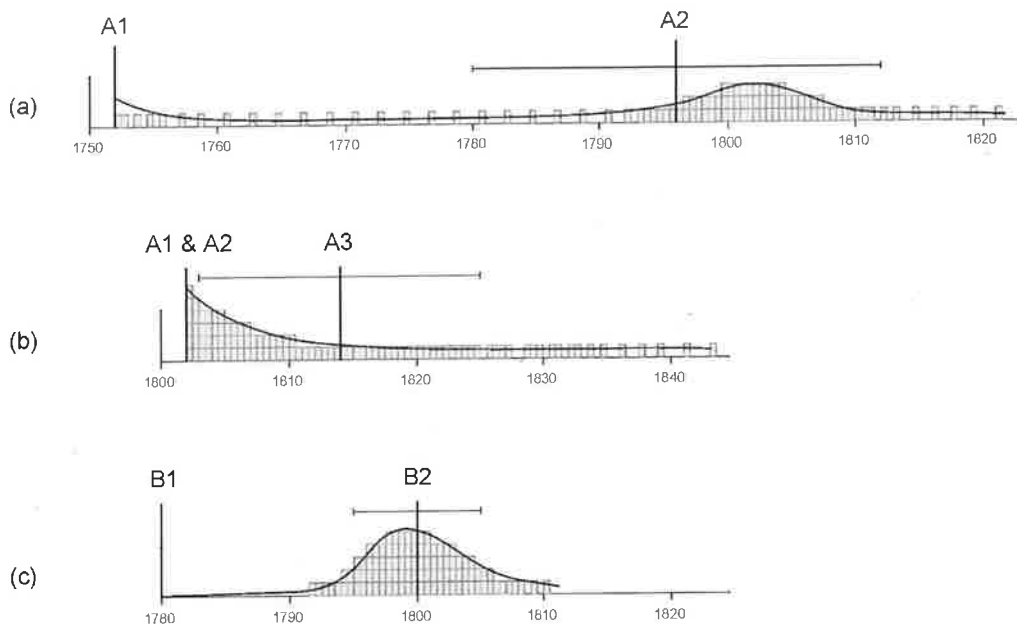
A partir do conhecimento de que há uma coincidência entre as linhas D do espectro solar e do espectro de substâncias químicas (avanço A3), demorou em torno de 34 anos para que os cientistas justapusessem os dois espectros e percebessem que a chama ou arco voltaico contendo sódio escurece ainda mais as raíais escuras do Sol (avanço A4). Este passo envolveu vários avanços intermediários, o que sugere o uso de uma distribuição gama, ilustrada na Fig. 1c. Neste caso, para estimar o valor médio e o desvio padrão da curva, aproveitamos o fato de esta descoberta ter sido feita independentemente por Foucault (1848), Ångström (1853), Kelvin (1854) e Kirchhoff (1859). Podemos também adicionar

um quinto mundo possível, aquele em que um cientista chegaria a esta descoberta algum tempo depois (como se afirmou que poderia acontecer), digamos em 1862. Com esses cinco dados, o valor médio é 1855 e o desvio padrão é  $\pm 5$  anos.

Com a observação A4, Foucault, Ångström e Kirchhoff imediatamente perceberam que isso implicava a lei de reversão espectral, ou seja, que cada meio emite bem e absorve bem radiação térmica e luz de mesmo comprimento de onda (avanço A5). No entanto, Kelvin não deu esse salto, por achar que o efeito de escurecimento seria psicológico. Essa situação pode ser representada por uma distribuição exponencial de dispersão pequena.

Calculando a composição (ou convolução) dos quatro processos causais probabilísticos, a distribuição resultante é indicada na Fig. 2a. Ela representa uma estimativa do ano em que a lei da reversão espectral teria sido descoberta, pelo caminho da espectroscopia óptica, a partir da situação factual em 1750. O valor médio para o ano gira em torno de 1850, com uma dispersão de  $\pm 20$  anos.

Notamos que este valor calculado está abaixo da média em que A5 de fato ocorreu, apesar de acima da descoberta de Foucault. Este valor médio mais baixo ocorre apenas por causa da curva da Fig. 1a, cujo valor médio está bem abaixo do ano em que Wollaston fez sua descoberta.



**Figura 1:** Exemplos de distribuições de probabilidade usadas no presente trabalho, com indicação do valor médio e desvio padrão. (a) Combinação de uma distribuição gama e de uma exponencial. (b) Distribuição exponencial. (c) Distribuição gama.

## 7 RITMO DAS TÉCNICAS EM RADIAÇÃO TÉRMICA

Vimos que a área da espectroscopia óptica, entre 1750 e 1860, não teve seu ritmo ditado pelas inovações técnicas, mas sim por outros fatores ainda não claramente identificados, ligados talvez à institucionalização da prática científica e ao acaso. Já a área da radiação infravermelha dependeu fortemente da termopilha, cuja construção se seguiu aos avanços da instrumentação em eletricidade. Assim, o ritmo de desenvolvimento deste caminho depende da data de surgimento da pilha eletroquímica de Alessandro Volta e da descoberta do processo de conversão entre eletricidade e magnetismo, por Hans Christian Ørsted.

Para compararmos o caminho da radiação térmica com o da espectroscopia óptica, usamos a mesma data como ponto de partida, 1750. O ponto de partida para a descoberta de Volta foi a descoberta de Luigi Galvani, em 1780, de que a medula espinhal ou outro nervo de uma rã, quando pressionada por um gancho de latão contra uma rede de ferro, gera contrações musculares. Após vinte anos, Volta chegou a sua pilha eletroquímica.

As histórias possíveis da descoberta de Galvani, na falta de maiores informações, podem ser representadas por uma curva gaussiana centrada em 1780 e com desvio padrão de  $\pm 10$  anos, já que não havia impedimento técnico para que esta descoberta se realizasse 10 anos antes. O caminho desta descoberta até a invenção da pilha eletroquímica (B2) envolveu vários passos intermediários, tomados especialmente na Itália, por Volta e Fabroni. Assim, ela pode ser representada por uma distribuição gama, com média 1800 (ano da invenção de Volta) e desvio padrão estimado de  $\pm 5$  anos.

A próxima grande descoberta ligada aos fenômenos elétricos foi a realizada por Ørsted, em 1820, de que uma corrente elétrica faz girar um ímã próximo (B3). Esta descoberta não necessitava de uma corrente elétrica muito intensa, e é de certa forma surpreendente que ela não tenha sido realizada antes. O próprio Ørsted planejou investigar os efeitos do galvanismo sobre ímãs em 1812. Assim, podemos especular que a distribuição de probabilidade entre B2 e B3 tenha um valor médio diferente de 1820, digamos 1817, com um desvio padrão de  $\pm 5$  anos. Isso está representado pela distribuição gama da Fig. 1c.

A descoberta de Ørsted teve uma influência imediata por toda a Europa, especialmente na França. Um dos principais desdobramentos de sua descoberta foi fornecer um instrumento de medição de correntes elétricas, o galvanômetro. Em 1821, um galvanômetro rudimentar permitiu que Seebeck descobrisse o fenômeno da termo-eletricidade (B4). Essa influência causal pode ser representada pela distribuição exponencial, onde escolhemos colocar o valor médio em 1822, pois a descoberta de Seebeck parece ter-se dado de forma particularmente rápida.

O avanço seguinte que nos interessa foi a fabricação do detector de radiação baseado na termopilha (avanço B5), obtido em 1831 por Nobili & Melloni, após várias etapas. Novamente representamos este processo por meio de uma distribuição gama, com valor médio em 1831 e dispersão estimada de  $\pm 3$  anos.

A termopilha (avanço B5) foi uma das causas necessárias para os experimentos de Stewart, que resultou na sua lei de reversão espectral para a radiação térmica (avanço B6). O caminho de B5 para B6 teve algumas etapas intermediárias, mencionadas na seção 4, mas essas já tinham sido atingidas em 1840, após os trabalhos de Melloni e Forbes. Isso sugere que podemos antecipar o valor médio da distribuição entre B5 e B6 em pelo menos cinco anos, de forma que o valor médio se colocaria em 1853, com desvio padrão em torno de  $\pm 7$  anos.

A composição desses seis processos resulta em uma distribuição para B6, a partir de 1750, com valor médio em 1852 e desvio padrão de  $\pm 13$  anos, ilustrada na Fig. 2b.

## 8 O CÁLCULO DE COMPOSIÇÕES DE PROCESSOS CAUSAIS

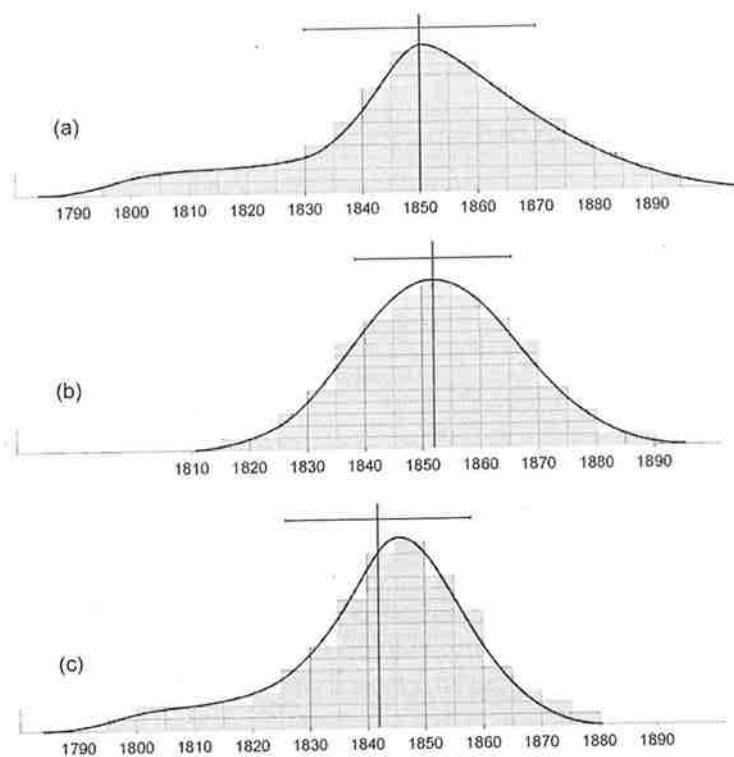
Na Fig. 1, apresentamos três tipos diferentes de curvas de distribuição de probabilidades para o surgimento de um avanço a partir de outro. Cada pequeno retângulo representaria um dentre cem mundos possíveis, e os cálculos de composição dos processos causais foram feitos a partir dessa amostra discreta, que se aproxima da curva contínua da figura. A forma de tais funções de distribuição é importante para se atribuírem valores de probabilidades para a ocorrência de um determinado avanço dentro de um intervalo de tempo (Pessoa, 2006b). No entanto, verificamos que o cálculo de composição pode ser feito a partir apenas do valor médio de cada distribuição, e de cada desvio padrão. O valor médio da função convoluta (obtida após a composição) é a soma dos valores médios das distribuições componentes. E o cálculo do quadrado do desvio padrão convolutivo é feito somando-se os

quadrados dos desvios padrão individuais. Essas propriedades prometem facilitar o cálculo de probabilidades em grandes redes de avanços.

A Fig. 2 (a e b) apresenta uma comparação entre as estimativas de aparecimento da lei da reversão espectral a partir do caminho da espectroscopia óptica e da radiação térmica, referentes à data inicial de 1750. A primeira tem como valor médio  $1850 \pm 20$  anos, ao passo que o caminho da radiação térmica tem valor médio  $1852 \pm 13$  anos.

Se concebêssemos cem mundos criados a partir de 1750, nossas estimativas diriam que em torno de 51% deles a descoberta ocorreria primeiro na área de espectroscopia óptica, e em 48% deles na área de radiação térmica (um pouco menos que 1% ocorreria no mesmo ano). Na história factual, a observação de Foucault em 1848 colocaria nosso mundo na primeira classe.

A Fig. 2c apresenta uma curva de distribuição do ano em que a descoberta da lei de reversão espectral ocorreria, se considerássemos um caminho ou o outro. No caso da disjunção, calculamos no computador a distribuição resultante a partir das distribuições das Figs. 2a e 2b. O valor médio da distribuição resultante é  $1842 \pm 16$  anos.



**Figura 2:** Curvas de distribuição da descoberta da lei da reversão espectral, a partir de 1750. (a) Caminho da espectroscopia óptica. (b) Caminho da radiação térmica. (c) Disjunção das curvas anteriores, ou seja, distribuição da descoberta por qualquer caminho.

## 9 CONCLUSÃO

Examinamos os dois caminhos históricos que levaram, de maneira independente, à descoberta da lei da reversão espectral. Uma diferença notada entre esses dois caminhos é que aquele envolvendo pesquisa em radiação térmica é fortemente dependente de técnicas eletrodinâmicas (efeito termo-elétrico, galvanômetro astático), ao contrário do caminho envolvendo espectroscopia óptica. Assim, pode-se dizer que o ritmo dos avanços em radiação térmica foi ditado, até 1840, principalmente pelas



técnicas associadas aos instrumentos científicos, especialmente detectores.

Julgamos que este ritmo poderia ter se adiantado com a antecipação da descoberta de Orsted (numa média de 3 anos, levando em conta as diferentes histórias possíveis a partir de 1750), apesar de termos adiado em 1 ano a média da descoberta de Seebeck do efeito termo-elétrico. No entanto, a contribuição mais forte para a antecipação da lei da reversão espectral para o infravermelho ocorreria no período após 1840, e julgamos que em média a descoberta de Stewart poderia ter ocorrido 5 anos antes.

O ritmo na espectroscopia óptica não foi inicialmente marcado por questões técnicas, justificando que tenhamos antecipado (conservadoramente) a média da descoberta de Wollaston em 6 anos. Após o desenvolvimento das técnicas ópticas por Fraunhofer, o ritmo de desenvolvimento da área de espectroscopia não sofreu mais atrasos.

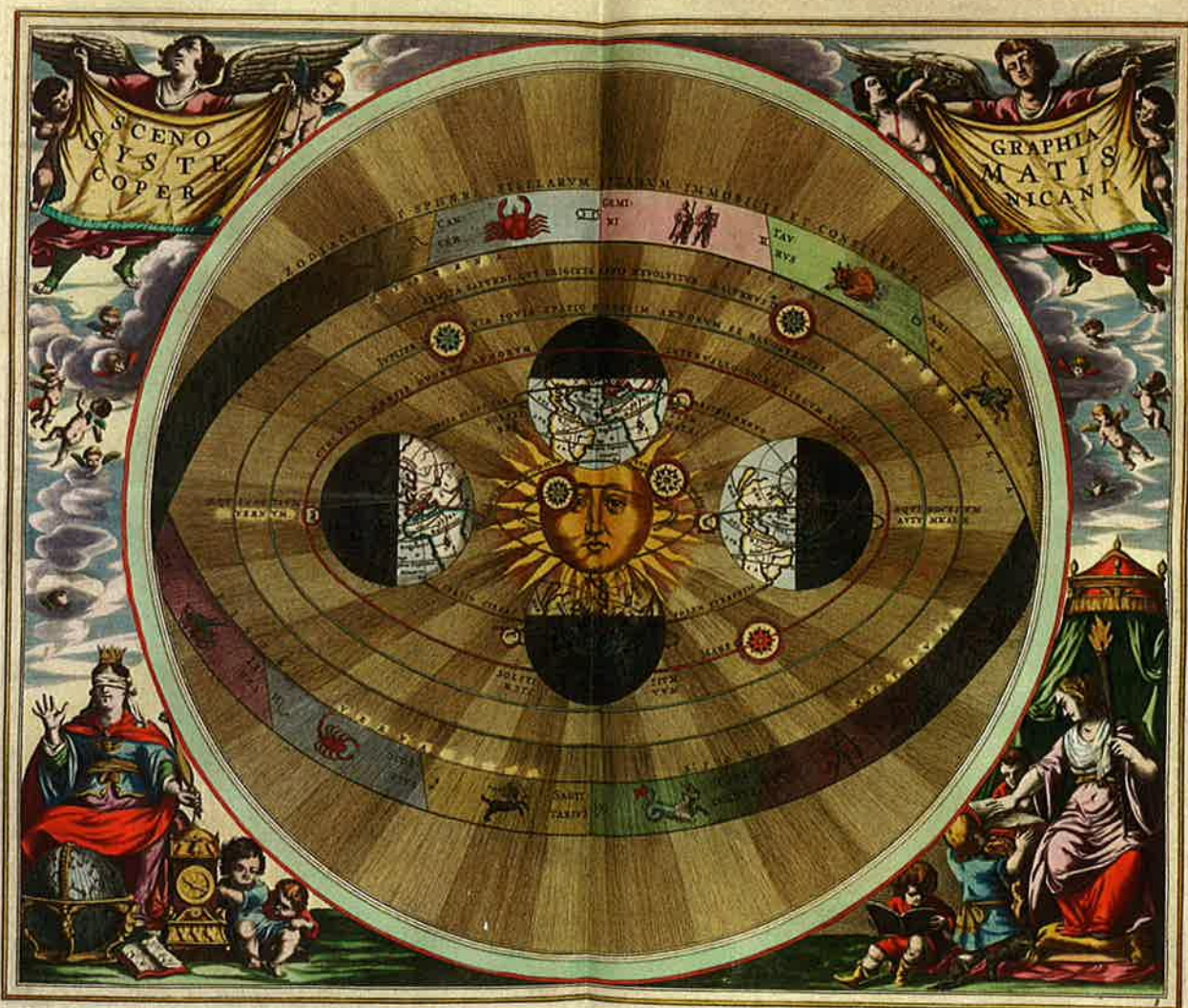
Em suma, acabamos atribuindo atrasos semelhantes para os dois campos, resultando em curvas com médias próximas na Fig. 2. A metodologia de histórias contrafactuais está ainda sendo explorada, e não pretendo que o presente estudo sirva de argumento a seu favor. Se ela se mostrar útil, será provavelmente para redes extensas, onde a habilidade intuitiva do ser humano é mais limitada. O progresso obtido no presente trabalho foi a constatação de que não é preciso trabalhar com funções de distribuição para calcular a composição de causas, bastando para isso o valor médio e o desvio padrão associado a cada processo causal. No entanto, até onde pudemos perceber, a avaliação de situações de disjunção de causas (Fig. 2c) não possui semelhante simplificação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARR, E. Scott. Historical survey of the early development of the infrared spectral region. *American Journal of Physics* **28**: 42-54, 1960.
- JENKINS, Reese V. Fraunhofer, Joseph. Vol. 5, pp. 142-144, in: GILLISPIE, Charles Coulston (org.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1970.
- MAIER, C.L. Ångström, Anders Jonas. Vol. 1, pp. 166-167, in: GILLISPIE, Charles Coulston (org.). *Dictionary of scientific biography*. New York: Charles Scribner's Sons, 1970.
- PARTINGTON, James R. *A history of chemistry*. London: Macmillan. Vol. 3, 1962. Vol. 4, 1964.
- PEARSON, Tillmon H. & IHDE, Aaron J. Chemistry and the spectrum before Bunsen and Kirchhoff. *Journal of Chemical Education* **28**: 267-271, 1951.
- PESSOA JR., Osvaldo. Histórias contrafactuais: o surgimento da física quântica. *Estudos Avançados* **14** (39): 175-204, 2000.
- . Unidades de conhecimento na teoria da ciência. *Philosophos* (Goiânia) **9**: 207-224, 2004.
- . Causal models in the history of science. *Croatian Journal of Philosophy* **5** (14): 263-274, 2005.
- . Progresso científico visto da perspectiva das histórias contrafactuais. Pp. 165-181, in: STEIN, Sofia I. A.; KUIAVA, Evaldo A. (orgs.). *Linguagem, ciência e valores*. Caxias do Sul: Educs, 2006 (a).
- . Computation of probabilities in causal models of history of science. *Principia* (Florianópolis) **10** (2): 109-124, 2006 (b).
- SIEGEL, Daniel M. Balfour Stewart and Gustav Robert Kirchhoff: two independent approaches to "Kirchhoff's radiation law". *Isis* **67** (4): 565-600, 1976.
- WOOLF, Harry. The beginnings of astronomical spectroscopy. Pp. 619-634, in: COHEN, I. Bernard; TATON, René (orgs.). *L'aventure de la science* (Mélanges Alexandre Koyré, vol. 1). Paris: Hermann, 1964.

# Filosofia e História da Ciência no Cone Sul

Seleção de Trabalhos do 5º Encontro



Editores:

Roberto de Andrade Martins, Cibelle Celestino Silva,  
Juliana Mesquita Hidalgo Ferreira, Lilian Al-Chueyr Pereira Martins