



Estruturas conceituais e estratégias de investigação: modelos representacionais e instanciais, analogias e correspondência

Valter ALNIS BEZERRA



RESUMO

São discutidas, neste artigo, determinadas estratégias de investigação científica que têm em comum as características de estar fundadas sobre as noções de *modelo* e de depender de um contraponto entre duas ou mais estruturas. São focalizadas três dessas estratégias científicas. Analisa-se, primeiramente, a modelagem, tal como entendida usualmente na ciência. Para isso, distinguem-se duas noções de modelo: a noção lógica ou instancial e a noção prototeórica ou representacional. Ao mesmo tempo em que são assinaladas as diferenças entre as duas acepções do termo, procura-se também compreender de que maneira elas estão relacionadas. Em particular, para investigar a relação (entre estruturas e realidade) de modelagem representacional é preciso invocar a relação (entre estruturas e estruturas) de modelagem lógica. A análise dos modelos também contribui para elucidar a relação de adequação empírica entre as teorias científicas e os dados, por meio da noção de subestrutura empírica ou modelo de dados. São consideradas, em segundo lugar, as analogias. O seu funcionamento é aqui analisado em termos de modelos e isomorfismos parciais, o que permite capturar a ideia de uma tradução dos problemas e de suas soluções em domínios de investigação diferentes. Destaca-se o papel importante desempenhado pelas analogias no pensamento científico de Maxwell (que também atribuía lugar de destaque aos modelos). Em terceiro lugar, discute-se o princípio de correspondência, que historicamente desempenhou um papel notável na primeira fase da teoria quântica. São identificadas duas formas, de teor diferente, que o princípio assumiu na teoria quântica, sendo ambas elucidadas em termos de modelos. Para contextualizar a discussão sobre o princípio de correspondência, e também para exemplificar as características dos modelos representacionais, dedica-se aqui uma atenção especial ao modelo atômico de Bohr-Sommerfeld.

PALAVRAS-CHAVE • Modelo. Analogia. Estrutura. Prototeoria. Modelos de dados. Princípio de correspondência.

INTRODUÇÃO

Neste texto, nosso interesse está principalmente centrado em determinadas estratégias cognitivas racionais de investigação científica que têm em comum duas características principais:

- (i) estão fundadas sobre alguma noção de *modelo*;
- (ii) dependem, para sua aplicação, e mesmo para a sua definição, de *um contraponto entre duas ou mais estruturas*.

São focalizadas, em particular, três estratégias cognitivas: os modelos representacionais ou prototeorias, as analogias e o princípio de correspondência. Inicialmente, são consideradas e distinguidas as duas grandes concepções de *modelo*; por um lado, a concepção lógica, dita instancial (aqui também denominada modelo tipo II), e, por outro, a concepção dita representacional (modelo tipo I), de modelo como uma *prototeoria*, que envolve idealizações, aproximações e simplificações, bem como uma maior tolerância para com a presença de inconsistências. Ao mesmo tempo em que são assinaladas as diferenças entre as duas noções de modelo, procura-se também compreender de que maneira elas estão relacionadas entre si. Em particular, para a compreensão da relação de modelagem tipo I é necessário invocar a relação de modelagem tipo II. Os modelos lógicos são indispensáveis também para pensar a *adequação empírica de teorias*, quando entram em cena os *modelos de dados* e a relação de isomorfismo parcial. Toda essa análise é realizada sob a perspectiva da metateoria estruturalista (que se vincula à família dos chamados enfoques semânticos).

As concepções de modelo tipo I e tipo II são então aplicadas à tarefa de elucidar o funcionamento de outra importante estratégia de solução de problemas na ciência: as *analogias*, caracterizadas por uma tradução ou transferência de informação entre domínios de investigação distintos. Alguns casos exemplares de pensamento analógico, encontrados na história da ciência moderna, são apresentados (especialmente as analogias utilizadas por Maxwell durante a elaboração da teoria do campo eletromagnético, episódio inserido dentro do período de declínio da imagem mecanicista de natureza). O funcionamento das analogias é elucidado em termos de isomorfismo parcial entre modelos, que permite dar conta das noções de analogia positiva, negativa e neutra.

Um caso, que ilustra de forma expressiva várias características dos modelos representacionais e, ao mesmo tempo, permite contemplar outro tipo de estratégia de investigação, é o modelo atômico de Bohr-Sommerfeld (B-S). Em particular, voltamos a atenção para um dispositivo que caracteriza o desenvolvimento do modelo B-S e de parte significativa da teoria quântica (tanto a antiga quanto a nova): o chamado *princípio de correspondência*, que estabelece como critério para o desenvolvimento da teoria quântica a existência de certas relações com as teorias clássicas. Identificam-se duas formas principais do princípio de correspondência: uma versão numérica-assintótica e uma estrutural-formal. O teor e os modos de aplicação do princípio de correspondência são analisados à luz das considerações feitas sobre os modelos e as analogias. O princípio de correspondência, na forma numérica, pode ser entendido como uma

relação entre os modelos de dados relevantes para diferentes teorias e, na sua forma estrutural, como uma relação que se estabelece diretamente entre os modelos lógicos das teorias envolvidas.

I MODELOS INSTANCIAIS E MODELOS REPRESENTACIONAIS

Em primeiro lugar, cabe distinguir e confrontar, de um lado, a noção de modelo mais corrente na ciência (dita representacional) e, de outro, o conceito de modelo em sua acepção usada na lógica e metamatemática (dito instancial). A exploração e o desenvolvimento da distinção entre os diferentes tipos de modelos têm uma história longa, que remonta pelo menos ao famoso texto de Patrick Suppes, “Uma comparação dos significados e dos usos do termo ‘modelo’ na matemática e nas ciências empíricas” (cf. Suppes, 1960).

Um modelo no sentido 1 (o tipo mais comumente aludido na ciência) é melhor entendido como uma teoria *aproximada* ou *simplificada* ou que se vale de *idealizações* ou, ainda, uma estrutura preditiva/descritiva na qual a condição de consistência interna é relaxada, vale dizer, onde se atribui ao valor cognitivo da consistência um peso menor. Em outras palavras, podemos dizer que se trata de uma *prototeoria*, aproveitando o termo proposto por Batista (cf. 2004).¹ Faremos referência aos modelos dessa espécie como modelos *representacionais*.

Pode-se distinguir vários tipos de modelos representacionais, tais como: (a) os modelos concretos ou físicos, que procuram reproduzir em um suporte material algo da configuração geométrica e das proporções do objeto original (por exemplo, uma esfera armilar, um planetário, um protótipo em escala para ensaios em túnel de vento, uma maquete arquitetônica); (b) modelos icônicos ou simbólicos (por exemplo, um mapa de linhas de metrô, um fluxograma de processo); (c) modelos estruturais (por exemplo, modelo de hibridação de orbitais, modelo nuclear de camadas, modelo de dupla hélice do DNA); (d) modelos de mecanismo (por exemplo, modelo de Ising para transições de fase, modelos de percepção visual e de visão computacional); (e) modelos numéricos (por exemplo, modelo de predador-presa, modelos numéricos de previsão do tempo, modelos epidemiológicos, modelo de circulação global da atmosfera [GCM]); (f) modelos conceituais/formais, que estipulam um sistema de relações entre um pequeno número de conceitos fundamentais, passível de ser formulado por meio de um conjunto de postulados de caráter geral. Dentro deste último tipo, podemos ci-

¹ Nos modelos, a função explicativa e o importe ontológico são substancialmente menores do que nas teorias científicas típicas.

tar por exemplo, o modelo cosmológico Lambda-CDM (*cold dark matter*), os modelos de estrutura e evolução estelar (incluindo o modelo esfericamente simétrico quase-estático, ou “modelo solar padrão”), os modelos simbólicos de cognição, o modelo biopsicossocial de doença (de Engel-Millon), os modelos de bandas eletrônicas em física da matéria condensada (como o modelo de Hubbard), e uma vasta variedade de modelos em macro e microeconomia. Um outro exemplo célebre de modelo conceitual/formal é o chamado “modelo padrão” na física das partículas elementares, que é curiosamente formado pela superposição, não inteiramente consistente, de três *teorias* quânticas do campo: a eletrodinâmica quântica, baseada no grupo de simetria $U(1)$, a teoria eletrofraca de Weinberg-Salam, baseada no grupo $U(1) \times SU(2)$, e a cromodinâmica quântica, baseada no grupo $SU(3)$.

Cada tipo de modelo seleciona e salienta usualmente uma determinada classe de aspectos do sistema modelado, ao mesmo tempo em que conscientemente ignora outros.² Por exemplo, no modelo em escala, tem-se uma preocupação prioritária com o formato exterior do objeto e suas propriedades aerodinâmicas ou estéticas; no mapa de linhas do metrô, o interesse está nas relações topológicas de conectividade entre as estações e as linhas, não nas distâncias exatas entre elas. No presente texto, iremos considerar apenas os modelos representacionais dos tipos (c), (d), (e) e (f), que admitem formulação em alguma linguagem codificada tal como a matemática.³

Por outro lado, um modelo no sentido II (metamatemático ou lógico) é uma *interpretação verdadeira de um conjunto de enunciados*. Ou seja, trata-se de uma estrutura que confere *significado* às sentenças e também *satisfaz* as sentenças. Essa noção de modelo é a usual em lógica, e pode ser expressa em termos formais, permitindo elucidar as relações entre a linguagem, por um lado, e os objetos ou construtos, por outro (cf.

² É importante ressaltar que os tipos de modelos não são excludentes: é possível que um mesmo modelo apresente características de mais de um tipo. Por exemplo, o modelo mecânico do éter com células vorticais de Maxwell (cf. 2003b [1862]) pode ser considerado um modelo estrutural, na medida em que propõe uma estrutura celular para o meio etéreo eletromagnético, mas também um modelo de mecanismo, na medida em que propõe um mecanismo para explicar as ações eletromagnéticas envolvendo cargas, correntes, forças eletromotivas e o “estado eletrotônico”; e é ainda um modelo conceitual, na medida em que auxiliou Maxwell a determinar a forma das equações matemáticas fundamentais que regem o eletromagnetismo. O modelo atômico de Bohr-Sommerfeld (sobre o qual falaremos mais adiante) pode ser considerado um modelo estrutural, na medida em que propõe uma estrutura para o átomo, e um modelo mecanista, na medida em que propõe um mecanismo físico para a emissão e absorção de radiação, mas também um modelo conceitual, pois coloca em posição central o postulado da quantização do momento angular e, posteriormente, a condição geral de quantização para os sistemas periódicos. Os modernos pacotes de software de química quântica (considerando a estrutura eletrônica) e de modelagem molecular (que consideram o átomo todo como a menor unidade estrutural) constituem modelos estruturais, na medida em que determinam estruturas geométricas para as moléculas, e também modelos numéricos, na medida em que obtêm tais estruturas calculando soluções aproximadas para as equações relevantes (as quais, por sua vez, valem-se de diversos tipos de aproximações).
³ Falaremos adiante sobre um outro tipo de modelo, os chamados *modelos analógicos*.

Sant'anna, 2003; Van Dalen, 2004; Hodges, 1997); para nossos propósitos atuais, bastará aqui falar em termos informais. Dado que a ideia presente na noção lógica de modelo é precisamente a de ser um exemplo, um caso ou uma instância de uma estrutura abstrata geral, essa noção de modelo pode também ser chamada de *instancial*.

Um exemplo da noção de modelo instancial é proporcionado pelo conjunto dos números naturais usuais, que é um modelo do sistema de axiomas denominado aritmética de Peano. Outro exemplo é dado pelos inúmeros *grupos* estudados em matemática, em física, na ciência cognitiva etc., que são modelos do sistema de axiomas que define o que é um grupo, isto é, dado um conjunto não-vazio dotado de uma operação binária, devem ser obedecidos três axiomas: o da associatividade, o da existência do elemento neutro e o da existência do elemento inverso de cada elemento. Ainda outro exemplo seria proporcionado pelo seguinte sistema de axiomas: (A₁) para quaisquer duas retas, há no máximo um ponto pertencente às duas; (A₂) para quaisquer dois pontos, há exatamente uma reta que os contém; (A₃) em cada reta, há pelo menos dois pontos. Embora simples, o sistema admite entre seus modelos tanto um conjunto de retas ordinárias da geometria euclidiana quanto a famosa “geometria dos três pontos”, que parece à primeira vista bem menos intuitiva (cf. Van Fraassen, 2007, cap. 3).

As duas acepções do termo “modelo” diferem entre si no seguinte sentido: na primeira acepção, a mais comum, dizer que «X é um modelo de Y» significa que X é a representação (simbólica, teórica, abstrata) de uma classe de objetos Y (fenômenos, objetos ou processos físicos). Já na segunda acepção, dizer que «X é um modelo de Y» significa que os modelos X são objetos (formais) que têm em comum o fato de serem instâncias ou realizações de um mesmo sistema axiomático Y. A distinção entre os modelos de tipo I (representacional) e os modelos de tipo II (metamatemático) afirma, em outras palavras, que os modelos no sentido I (representacional) falam sobre *aquilo que acontece no mundo*.⁴ Ou seja, no mundo *cumprir-se* (ou, pelo menos, deveria cumprir-se) *aquilo que diz o modelo X* (supondo que seja um modelo adequado). Por outro lado, os modelos X no sentido II (metamatemático) são as *estruturas nas quais se cumpre* o que diz a teoria Y. Outra maneira de destacar a diferença entre as duas acepções é pensar que, na acepção científica, o modelo está em uma relação “um-muitos” com os fenômenos, ao passo que, na acepção metamatemática, os modelos estão em uma relação “muitos-um” com o sistema de axiomas. Essas relações estão ilustradas na Figura 1 a seguir:

4. A expressão “falar sobre o que acontece no mundo” pode ser interpretada de maneira minimal, como adequação empírica (o que bastaria para um anti-realista) ou de maneira mais forte (como desejaria um realista). Não tomaremos aqui partido na controvérsia realismo/anti-realismo.

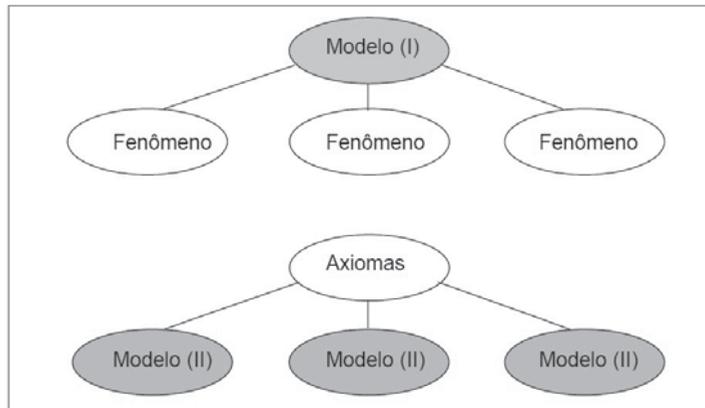


Figura 1. Unidade e multiplicidade nos modelos de tipo I e de tipo II.

Normalmente, uma série de perguntas de caráter metodológico coloca-se diante de qualquer construtor de modelos representacionais: (a) quando optar por um *modelo* e quando optar por uma *teoria*? (b) quais idealizações é lícito empregar? (c) que aproximações e simplificações se deve utilizar? (d) sob que condições pode ocorrer (se é que pode) uma “migração” de um modelo para uma teoria? (e) sob que condições se pode tolerar racionalmente (se é que se pode) a presença de inconsistências internas em um sistema teórico? (f) sob que condições se pode tolerar racionalmente o uso concomitante de modelos diferentes? Pode-se conjecturar sobre se o trabalho com os modelos requer um leque de atitudes cognitivas diferentes das atitudes proposicionais tradicionais que se pode tomar em relação às crenças (aceitar, crer, rejeitar, justificar etc.) e com relação às teorias (aceitar, endossar, adotar, refutar etc.). O registro cognitivo em que se dá o trabalho com os modelos está mais próximo do “contexto prospectivo” (*context of pursuit*) proposto por Laudan (cf. 1977) do que do “contexto da aceitação” (*context of acceptance*). A desenvoltura com que os cientistas costumam transitar entre modelos diferentes, incompatíveis entre si e formulados com muito maior rapidez do que as teorias, é um dos fatores que impressionaram um autor como Ronald Giere (cf. 1999a), levando-o a propor uma visão evolucionária da ciência, que dispensa a noção de “leis da natureza” e coloca em destaque o papel das estruturas cognitivas humanas na construção do conhecimento científico. O resultado é uma imagem da ciência muito menos *theory-centric* e muito mais *model-based*.

As distinções traçadas já nos colocam em condição de esboçar uma visão do papel que é desempenhado pelos modelos de tipo II no encontro entre a teoria — ou a prototeoria — e a realidade. O encontro não ocorre diretamente, como se poderia supor, entre as hipóteses ou leis, de um lado, e os fenômenos, de outro; situação que, de

resto, nos colocaria diante de problemas epistemológicos extremamente difíceis acerca da constituição da base empírica.⁵ Trata-se, na realidade, de um *encontro entre estruturas*, mais precisamente, entre modelos: um modelo da estrutura teórica e um modelo de dados (cf. Suppes, 1962; Giere 1999b; French 2009).

Um modelo de dados é uma estruturação dos dados, dentre as muitas possíveis; é uma dentre muitas “possíveis realizações dos dados”, na expressão de Suppes. Um modelo de dados no sentido suppesiano é um modelo de tipo instancial (tipo II), onde o que é instanciado é o sistema de enunciados que expressam os dados, bem como os parâmetros que definem os contextos experimentais nos quais eles foram obtidos (por exemplo, calibração dos instrumentos, sensibilidade, resolução, ruído no sinal etc.). Exemplos de modelos de dados seriam: um banco de dados relacional, uma tabela, um gráfico bidimensional (eventualmente com uma curva ajustada a eles), um gráfico tridimensional (eventualmente com uma superfície ajustada), um histograma etc. Cada uma dessas realizações dos dados pressupõe certos processos de seleção (como a exclusão dos famosos “pontos fora da curva”, com base em critérios de significância), filtragem de ruídos, eliminação de sinais espúrios, teoria do tratamento estatístico, teoria da montagem experimental etc. Algumas dessas formas serão mais adequadas que outras para determinados fins. A noção de modelo de dados visa capturar a ideia de que, na ciência, as teorias não são confrontadas com dados experimentais ou observacionais “puros”: os dados são apresentados sempre concatenados, correlacionados, selecionados.⁶ Isso faz justiça à afirmação, já fartamente reiterada por numerosos autores na filosofia contemporânea da ciência, de que o fato científico é uma construção, sempre impregnada de pressuposições teóricas.⁷

O encadeamento entre as várias estruturas, no confronto entre teoria/realidade, se dá basicamente tal como esquematizado no diagrama da Figura 2 a seguir.

5 Como mostra o debate Neurath-Schlick-Carnap-Popper sobre a base empírica nos anos 1930.

6 A relação entre a realidade e os modelos de dados poderia eventualmente ser pensada como mais complexa, comportando diferentes níveis que mediam entre esses dois extremos, formando uma verdadeira *hierarquia* de modelos (cf., para um esboço, Suppes, 1962; para detalhes, Woodward, 1989). Porém, para os nossos propósitos presentes, a colocação dos modelos teóricos e modelos de dados já é suficiente.

7 Um exemplo extremo dessa situação é proporcionado pela física de altas energias no final do século XX e início do XXI, onde cada dia de operação de um grande detector instalado em um acelerador de partículas de grande porte gera uma quantidade imensa de dados (da ordem de petabyte), que passam por um processo computacional maciço de “redução”, até serem resumidos a apenas algumas centenas de eventos considerados “relevantes”, que serão então analisados detidamente.

termos não-teóricos. Além disso, a grande vantagem desse enfoque é que podemos pensar que os termos são “teóricos” e “não-teóricos” *em relação a T*. A teoricidade é *sempre relativa a uma dada teoria*. Um termo pode ser teórico em relação a uma teoria T (T-teórico) e não ser teórico em relação a outra teoria T’ (isto é, ser T’-não-teórico). A questão passa, assim, por um deslocamento importante: a teoricidade passa a ser vista como uma propriedade *metodológica e estrutural*, não mais como uma propriedade epistemológica.¹⁰

A formulação precisa do critério de teoricidade é devida a Sneed, e pressupõe a noção de *procedimento de determinação* de um conceito, que vem a ser um modo de determinar se um conceito aplica-se ou não a um dado objeto e, caso se trate de um conceito quantitativo (uma grandeza), determinar o valor daquela grandeza. Informalmente, a ideia básica do critério de teoricidade é que um conceito é *teórico em relação a T*, se todos os procedimentos de determinação conhecidos para esse conceito pressupõem a aplicabilidade e validade de T, e *não-teórico em relação a T*, se existem procedimentos de determinação independentes de T, isto é, que não pressupõem a validade de T. Em outras palavras, um conceito é teórico em relação a T, se é *próprio* do arsenal conceitual dessa teoria, se é *introduzido* por ela, em outras palavras, se é um conceito “novo”; e é *não-teórico em relação a T*, se o conceito está disponível *previamente a T*, foi introduzido por outra teoria ou, em outras palavras, se é um conceito “antigo”. Note-se que *não há nenhuma conexão intrínseca entre ser “T-não-teórico” e ser “observacional”*.

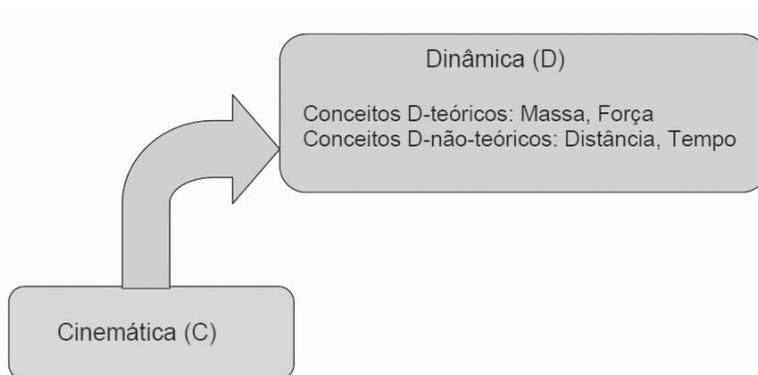


Figura 3. Exemplo de termos T-teóricos e T-não-teóricos na mecânica.

¹⁰ Por sua vez, a distinção “observacional/não-observacional” pode continuar a ser pensada, seja como uma questão epistemológica (cf. Carman & Fernández, 2004) ou, como sugere Van Fraassen, como uma questão empírica, que nem mesmo pertence ao escopo da filosofia (Van Fraassen, 2007 [1980], Cap. 3, § 7).

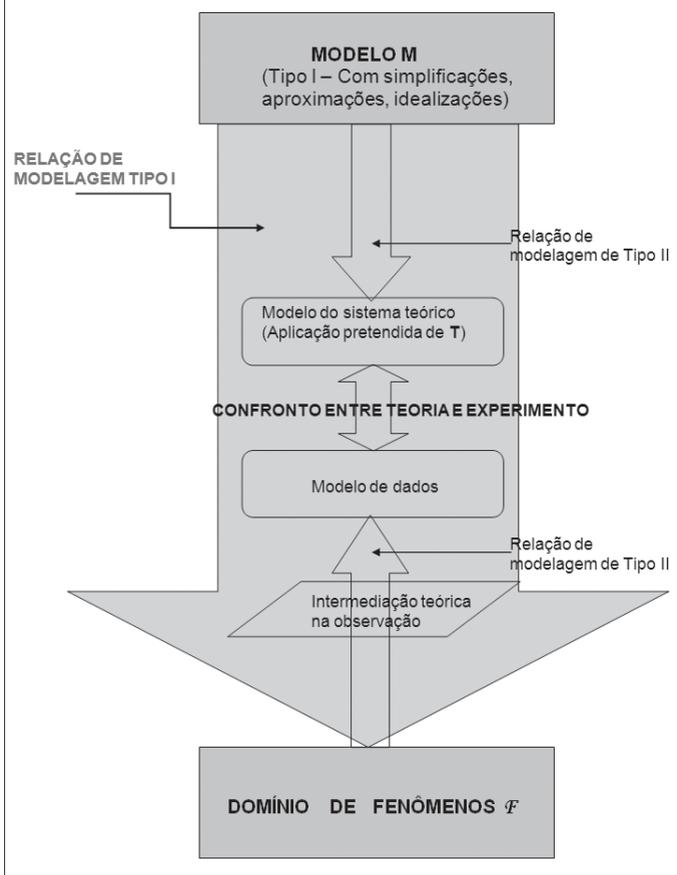


Figura 4. A relação de modelagem tipo I em termos da relação de modelagem tipo II.

Elaborando um pouco mais o diagrama apresentado anteriormente na figura 2, podemos compreender melhor de que maneira os modelos tipo I (representacionais) requerem o concurso de modelos tipo II (lógicos). A relação de modelagem de tipo I pressupõe, define-se em termos da noção de modelo de tipo II. No diagrama da Figura 4 a seguir, M pode ser uma teoria ou uma prototeoria.

Na realidade, se levarmos em conta tanto a pluralidade de modelos que podem estar associados à estrutura teórica quanto, por outro lado, a multiplicidade de modelos de dados que estão associados a cada um dentre os vários experimentos relevantes para uma dada teoria, a interface teoria-experimento (ou modelo representacional-experimento), representada na figura 4, teria uma “estrutura fina” mais complexa, tal como a que se acha esquematizada na figura 5:

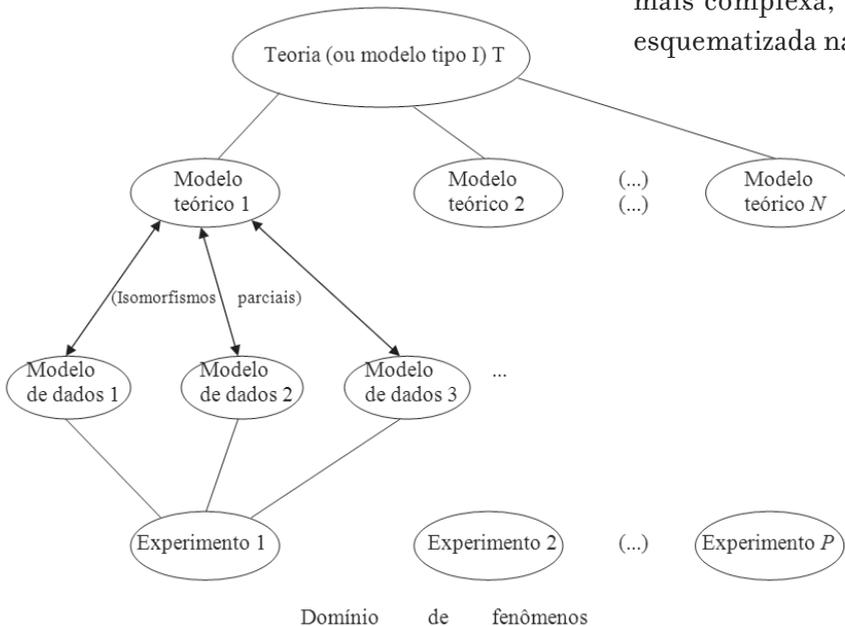


Figura 5. “Estrutura fina” do encontro entre modelos da teoria e modelos de dados.

Quando o encontro entre a teoria (ou o modelo representacional) e a realidade é “bem sucedido”? Nas perspectivas de racionalidade científica usuais, entende-se que um modelo de tipo 1 (prototeoria) ou uma teoria precisa exibir em certa medida um *valor cognitivo* que é a *adequação empírica* (embora esse não deva ser o único valor que a teoria ou prototeoria precisa instanciar; muitos outros valores cognitivos podem estar em jogo simultaneamente). À luz das relações consideradas acima, podemos imaginar que a relação fundamental na adequação empírica das teorias científicas seja a existência de *isomorfismo* entre o modelo teórico e o modelo de dados (cf. Van Fraassen, 2007 [1980], p. 91, 122). Notemos que o isomorfismo pode ser uma relação forte demais para ser exigida das estruturas, no caso da adequação empírica. Uma relação convenientemente mais fraca é a de *isomorfismo parcial*, definida como um isomorfismo entre as chamadas *estruturas parciais* (cf. Bueno, 1999; Bueno, French & Ladyman, 2002). Esta noção logra capturar de maneira precisa a ideia informal de que apenas uma *parte* de uma estrutura deve ser tomada como relevante em determinadas relações entre estruturas. A relação de adequação empírica pode ser formulada, então, nos seguintes termos:

AE: Uma subestrutura empírica de T é isomorfa (ou parcialmente isomorfa) a um modelo de dados relevante para T.

Vale salientar que, para dar conta dos casos em que os modelos da teoria e os modelos de dados possuem cardinalidade diferente, pode-se invocar, em vez da noção de isomorfismo parcial, a noção de *homomorfismo* parcial (cf. Bueno, French & Ladyman, 2002).¹¹

2 AS ANALOGIAS NA CIÊNCIA

As analogias constituem uma estratégia de investigação sumamente importante dentro do conjunto de ferramentas usuais da pesquisa científica. Veremos que o funcionamento das analogias pode ser consideravelmente esclarecido utilizando a noção de modelo. Um exemplo elementar, que coloca, entretanto, em relevo os aspectos cen-

¹¹ A hierarquia de estruturas mencionada anteriormente na nota 8 admite uma formulação natural em termos de estruturas parciais (cf. Bueno, 1999, p. 66-7). Nessa hierarquia, cada nível possuiria “mais estrutura”, por assim dizer, do que o nível imediatamente inferior e, assim, veicularia mais informação sobre os objetos do domínio. Porém, penso que se deve exercer uma certa cautela *filosófica* diante da mera possibilidade *lógica* de postular um sem-número de níveis intermediários. Que sentido epistemológico ou metodológico teria falarmos, digamos, em dez níveis de modelos intermediários? Trata-se de impedir que essa hierarquia seja subdividida e complicada excessivamente ou, pior, recaia em um regresso infinito, tema que já preocupou os pensadores da “base empírica” nos anos 1930.

trais da analogia na ciência, é proporcionado pela relação que se pode estabelecer entre duas instâncias do oscilador harmônico: um circuito oscilante LC e um sistema massa-mola, como representado no diagrama a seguir.

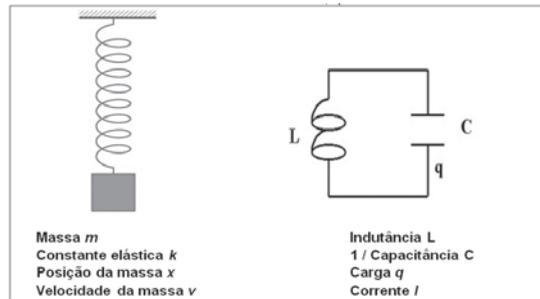


Figura 6. O sistema 1 é um oscilador mecânico massa-mola.

A analogia que se estabelece é entre o sistema 1 e o sistema 2, que é um circuito oscilante LC.

Os dois sistemas, embora possuam constituições físicas totalmente diferentes, apresentam uma similaridade formal no que diz respeito às equações que descrevem os seus comportamentos, como ilustrado na figura 7, a seguir. Ambas as equações possuem soluções que apresentam comportamento oscilatório.

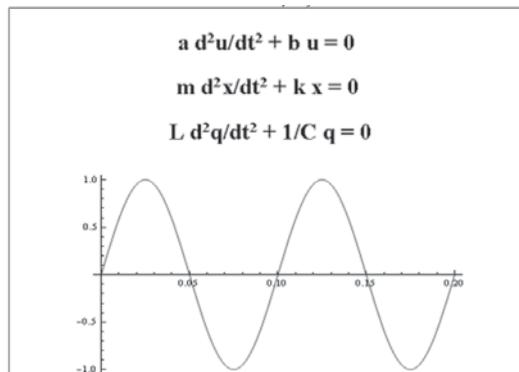


Figura 7. Similaridade formal entre as equações do sistema 1 e do sistema 2.

O processo da analogia é fundamentalmente o seguinte. A analogia científica vale-se de um trânsito de ida e volta entre dois domínios de investigação diferentes. A solução ao problema científico original — sendo indisponível ou insatisfatória uma solução por “primeiros princípios” — é buscada em uma solução que já seja conhecida para um problema correspondente em um âmbito de investigação diferente. Ocorre, assim, uma transferência de informação de um domínio para outro. O processo encontra-se ilustrado no diagrama a seguir, no qual os dois domínios são indicados como A e B.

O sistema B nos ajuda a encontrar uma solução para um problema colocado no sistema A, mas também existem aspectos do sistema B que não pretendemos ou não desejamos transportar de volta para A. Os termos *analogia positiva* e *analogia negativa* procuram expressar a ideia informal que há aspectos em que a analogia “funciona” ou “se aplica” e aspectos em que isso não ocorre ou, em outras palavras, propriedades que são compartilhadas pelas descrições dos dois domínios e propriedades que não o são. O termo *analogia neutra* expressa a ideia de que há aspectos acerca dos quais simplesmente não se sabe, até o momento, se eles são ou não compartilhados pelos dois sistemas (cf. Hesse, 2001).

Vejamos o que disse Maxwell — um entusiasta da estratégia das “analogias físicas” na ciência — de forma sucinta em uma conferência de 1870:

Ora, uma ilustração verdadeiramente científica é um método para capacitar a mente a apreender alguma concepção ou lei em um ramo da ciência, colocando diante dela uma concepção ou lei de um ramo diferente da ciência, e direcionando a mente para apropriar-se da forma matemática comum às ideias correspondentes nas duas ciências, deixando de fora dessa descrição, por enquanto, a diferença entre as naturezas físicas dos fenômenos reais (Maxwell *apud* Turner, 1955, p. 227).

E de novo Maxwell, em 1856, no primeiro de seus três grandes artigos em que formula a teoria do eletromagnetismo moderno:

Devemos, portanto, descobrir algum método de investigação que permita à mente, a cada passo, dispor de uma concepção física clara, sem comprometer-se com nenhuma teoria fundada na ciência física da qual aquela concepção é tomada de empréstimo, de modo que ela não seja nem afastada do assunto na busca de sutilezas analíticas, nem levada para além da verdade por uma hipótese predileta.

Para obter ideias físicas sem adotar uma teoria física, devemos familiarizar-nos com a existência de analogias físicas. Por analogia física quero dizer aquela semelhança parcial entre as leis de uma ciência e as de outra, que faz com que cada uma delas ilumine a outra (Maxwell, 2003a [1856], p. 156).

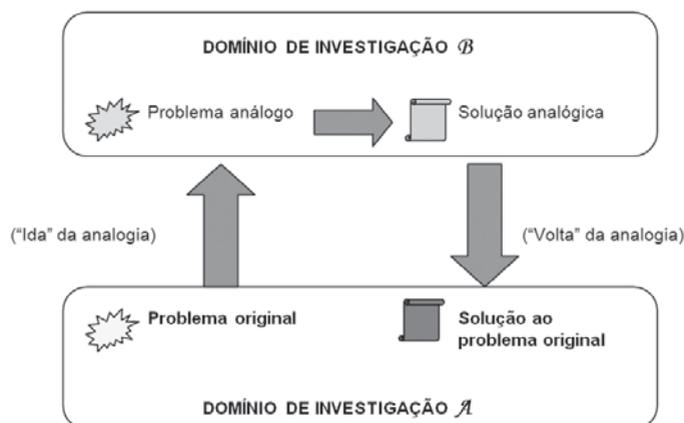


Figura 8. O processo da analogia.

Na introdução do mesmo artigo, Maxwell exemplifica com a analogia entre a força de atração segundo o inverso do quadrado da distância e a condução de calor:

As leis da condução de calor nos meios uniformes parecem, à primeira vista, estar entre as mais diferentes que há daquelas relativas à atração, no que diz respeito a suas relações físicas. As quantidades que nelas ocorrem são *temperatura*, *fluxo de calor*, *condutividade*. A palavra *força* é estranha ao tema. E, contudo, constatamos que as leis matemáticas do movimento uniforme do calor nos meios homogêneos são idênticas, na forma, àquelas das atrações que variam inversamente com o quadrado da distância. Temos apenas que usar *fonte de calor* em vez de *centro de atração*, *fluxo de calor* em vez de *efeito acelerador da atração* em um ponto qualquer, e *temperatura* em vez de *potencial*, e a solução para um problema sobre a atração vê-se transformada em uma solução a um problema sobre o calor.

Ora, supõe-se que a condução de calor ocorra através de uma ação entre as partes contíguas de um meio, ao passo que a força de atração é uma relação entre corpos distantes; e, contudo, se nós nada soubéssemos além daquilo que se acha expresso nas fórmulas matemáticas, não haveria nada a distinguir um conjunto de fenômenos do outro (Maxwell, 2003a [1856], p. 157).

Para investigar os fenômenos elétricos e magnéticos, Maxwell adota a noção física de “linhas de força” de Faraday, e propõe uma analogia hidrodinâmica:

Usualmente, tem-se começado a investigação das leis dessas forças supondo, logo de saída, que os fenômenos são devidos às forças atrativas ou repulsivas atuando entre determinados pontos. No entanto, podemos obter uma visão diferente do assunto, que seja mais adequada às nossas investigações mais difíceis, adotando, por definição, que as forças aqui tratadas podem ser representadas em magnitude e direção pelo movimento uniforme de um fluido incompressível.

Proponho, então, em primeiro lugar, descrever um método pelo qual o movimento de tal fluido possa ser claramente concebido; em segundo lugar, seguir as consequências da pressuposição de certas condições de movimento, e indicar a aplicação do método a alguns dos fenômenos menos complicados da eletricidade, do magnetismo e do galvanismo; e, finalmente, mostrar de que maneira, através de uma extensão desses métodos, e com a introdução de uma outra ideia devida a Faraday, as leis das atrações e ações indutivas dos ímãs e correntes podem ser claramente concebidas, sem fazer quaisquer suposições com respeito à natureza física da eletricidade, nem tampouco acrescentar qualquer coisa àquilo que já foi provado pelo experimento (Maxwell, 2003a [1856], p. 159).

Porém, é de notar que Maxwell demonstra tomar grande cuidado no sentido de não atribuir à analogia um maior importe ontológico:

Não se deve supor que a substância de que aqui se trata possua nenhuma das propriedades dos fluidos ordinários, exceto as de liberdade de movimento e resistência à compressão. Não é nem mesmo um fluido hipotético que está sendo introduzido para explicar os fenômenos reais. Trata-se meramente de uma coleção de propriedades imaginárias, que pode ser utilizada a fim de estabelecer certos teoremas na matemática pura, de uma maneira mais inteligível a muitas mentes, e mais aplicável aos problemas físicos, do que aquela em que se utilizam apenas os símbolos algébricos (Maxwell, 2003a [1856], p. 160).

E, mais adiante, Maxwell faz referência a sua expectativa de implementar uma noção de algo como uma *embodied mathematics* (“matemática corporificada” ou “reificada” ou “materializada”):

Neste esboço das teorias elétricas de Faraday, tal como elas se apresentam de um ponto de vista matemático, não posso fazer mais do que simplesmente enunciar os métodos matemáticos pelos quais creio que os fenômenos elétricos podem ser melhor compreendidos e reduzidos a cálculos; e meu objetivo foi apresentar à mente as ideias matemáticas sob uma forma reificada [*embodied*], como sistemas de linhas ou superfícies, e não como meros símbolos, que nem transmitem as mesmas ideias, nem se adaptam facilmente aos fenômenos a serem explicados (Maxwell, 2003a [1856], p. 187.).

Vemos que, para Maxwell, as analogias são encaradas principalmente como uma estratégia de invenção (evitamos aqui usar o termo “descoberta”). É justo supor que a analogia em Maxwell é uma etapa do caminho, não é o destino em si. O objetivo final de Maxwell, virtuose da física matemática que era, consistia em chegar, ao fim e ao cabo, a uma formulação matematizada das leis referentes àquele domínio de investigação.

De posse da distinção entre modelos representacionais e instanciais traçada na seção 1, podemos agora mapear a relação de analogia na ciência em termos das noções de modelo tipo I e tipo II. A ideia de “similaridade formal” entre as equações de um domínio de investigação e as de outro é capturada com maior precisão pela noção de isomorfismo entre estruturas, e a solução de problemas em ambos os domínios pressupõe que exista um certo grau de adequação empírica em ambos. A relação fundamental para a existência de uma analogia é, então:

AN: Existe um isomorfismo (ou isomorfismo parcial) entre os modelos da teoria cujo domínio é A e os modelos da teoria cujo domínio é B.

O encadeamento resultante pode ser ilustrado pela figura 9, a seguir.

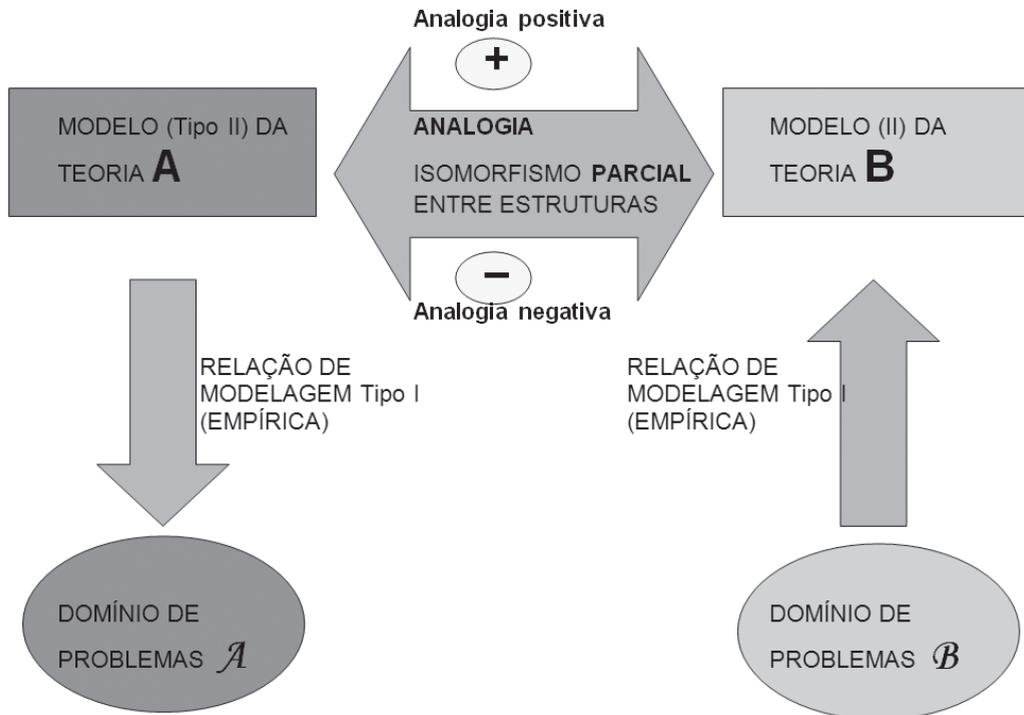


Figura 9. Estrutura da analogia em termos de modelos.

As noções de analogia positiva, negativa e neutra, acima mencionadas, também podem receber uma formulação precisa utilizando-se o conceito de *isomorfismo parcial*. Isso vai ao encontro da pretensão expressada por French & Ladyman (cf. 2003, p. 34) de capturar tanto as relações interteóricas “horizontais”, entre as quais incluímos a analogia, quanto as relações “verticais” entre a teoria e os modelos de dados, que vimos na seção anterior.

O termo “modelo analógico” é encontrado com certa frequência em história e filosofia da ciência. Podemos agora acrescentar esse tipo de modelo à taxonomia esboçada na seção 1, que já incluía os tipos (a)-(f). À luz da análise aqui apresentada, pode-se dizer que um modelo analógico será aquele modelo representacional no qual a própria formulação ou construção da estrutura de postulados resulta de um processo de elaboração que emprega analogias.

3 O PRINCÍPIO DE CORRESPONDÊNCIA

O modelo de Bohr-Sommerfeld, peça principal do programa de pesquisa da antiga teoria quântica, foi proposto inicialmente por Bohr na grande trilogia de artigos intitulada “Sobre a constituição dos átomos e moléculas” (Bohr, 1979 [1914]). No modelo de Bohr, os sistemas atômicos são vistos como *análogos a sistemas planetários*, como os elétrons negativamente carregados descrevendo órbitas circulares ao redor do núcleo com carga positiva, sujeitos a um potencial coulombiano.¹² Um aspecto crucial a notar é que, no modelo de Bohr, existem inconsistências entre: (i) a mecânica clássica, (ii) a eletrodinâmica clássica, (iii) o postulado de quantização e (iv) o postulado da estabilidade. Pois, de acordo com o modelo, o elétron, apesar de sujeito a uma força atrativa de tipo coulombiano, e apesar de submetido a uma aceleração enquanto descreve sua órbita circular em redor do núcleo, não emite radiação nem perde energia — o que causaria o seu colapso em direção ao núcleo (conforme prevê a eletrodinâmica clássica) —, mas, ao contrário, irradia apenas durante as transições entre estados. De outro lado, ao passo que os estados estáveis são supostos como regidos pelas leis da mecânica clássica, o modelo postula que apenas um subconjunto enumerável das órbitas é permitido (a saber, aquelas cujo momento angular é um múltiplo inteiro de $h/2\pi$), diferentemente do que seria previsto pela mecânica clássica, onde todos os raios orbitais seriam permitidos. Além disso, o modelo não pressupõe que as transições entre estados sejam necessariamente regidas pela mecânica clássica. Ademais, o modelo não provê nenhuma explicação causal para a ocorrência das transições, nem se pronuncia sobre as probabilidades de transição; algo que só começaria a ser trabalhado por Einstein (cf. 1968 [1917]). Portanto, o modelo de Bohr, de tipo representacional, possui o perfil típico de uma prototeoria, tal como discutida na seção 1.

Não obstante, com base nos postulados do modelo, acrescido das hipóteses auxiliares e das condições iniciais, é possível derivar a fórmula geral para a frequência da radiação emitida durante uma transição entre dois níveis quaisquer (onde m , e são, respectivamente, a massa e a carga em módulo do elétron, h é a constante de Planck, n é a frequência da radiação e n_i e n_f são, respectivamente, os níveis inicial e final da transição):

$$\nu = (2\pi^2 m e^4 / h^3) (1/n_f^2 - 1/n_i^2),$$

¹² Os postulados originais de Bohr, em número de cinco, são apresentados conjunta e explicitamente apenas no final da última parte da trilogia (Bohr, 1979 [1913]).

fórmula esta que engloba *todas as séries espectrais* do Hidrogênio. Também é possível encontrar expressões para o raio da órbita e a energia do elétron em função de n , bem como o valor da energia no estado fundamental ($E = -13,6 \text{ eV}$).

Em meados da década de 1910, Arnold Sommerfeld entra em cena como um dos principais (senão o principal) desenvolvedor do programa de Bohr. Em 1918 — mesmo ano em que Bohr publica a sua segunda trilogia, “Sobre a teoria quântica das linhas espectrais” —, Sommerfeld publica a primeira edição de “Estrutura atômica e linhas espectrais” (*Atombau und Spektrallinien*).¹³ Sommerfeld irá introduzir a *condição de quantização geral*, da qual o postulado de quantização de Bohr é um caso particular, que será uma precursora dos comutadores na moderna teoria quântica. Sommerfeld também propõe as órbitas elípticas, em vez de circulares, e introduz as correções relativísticas requeridas pela elevada velocidade dos elétrons, o que lhe permite modelar, pela primeira vez, a *estrutura fina* dos espectros.

Apesar da inconsistência nos fundamentos, o programa da antiga teoria quântica logrou apresentar inúmeros e esplêndidos êxitos preditivos, como: (a) duas séries espectrais já conhecidas em 1913 (Balmer, Paschen); (b) três séries espectrais que só seriam descobertas depois (Lyman, Brackett e Pfund); (c) a série de Pickering-Fowler, originada pelo Hélio;¹⁴ (d) extensão a outros íons monoelétrônicos como o He^+ e o Li^{++} ; (e) configuração eletrônica dos átomos mais pesados, até $Z=24$ (Cromo); (f) a explicação das periodicidades 8 e 18 na tabela periódica (cf. Bohr, 1979 [1913]); (g) descoberta do elemento Háfnio ($Z=72$) em 1922; (h) o resultado do experimento de Franck-Hertz em 1914; (i) tentativas de explicação dos efeitos Stark e Zeeman; (j) a estrutura fina dos espectros.

Foi com base no modelo de Bohr-Sommerfeld e com base no princípio de correspondência, parte da heurística positiva do programa, que se lançou a teoria da radiação de Bohr, Kramers e Slater, referida como teoria BKS (cf. 1968 [1924]), que, por sua vez, daria origem à teoria de Kramers da dispersão. A teoria BKS da radiação pode ser considerada o “elo perdido” entre a antiga teoria quântica e a nova mecânica quântica de Born, Heisenberg, Jordan, Dirac e Pauli (cf. Bezerra, 2003). O desenvolvimento da teoria BKS e as aplicações do modelo de Bohr-Sommerfeld pressupuseram o princípio de correspondência (aqui, correspondência com a teoria clássica da radiação). É para esse princípio que nos voltamos agora.

¹³ Tive acesso a duas edições posteriores, bastante diferentes entre si, na medida em que retratam momentos bem distintos dentro do desenvolvimento da teoria quântica: a segunda é a edição inglesa baseada na terceira edição alemã (cf. Sommerfeld, 1928) e a terceira é a edição inglesa baseada na quinta edição alemã (cf. Sommerfeld, 1934).

¹⁴ Explicada por Bohr em uma nota publicada em 1913, utilizando a massa reduzida.

Pode-se distinguir duas grandes fases, de caráter marcadamente diferente, no uso do princípio de correspondência no contexto da teoria quântica. Na fase I, correspondente à formulação empregada na antiga teoria quântica, o princípio de correspondência é interpretado em termos do comportamento *no limite de números quânticos grandes*. Nos textos introdutórios usuais, o princípio de correspondência é apresentado como um mero limite assintótico clássico, de tipo formal, obtido quando a transição acontece entre níveis muito altos, $n \rightarrow \infty$, ou mais precisamente:

$$\begin{aligned} &\text{O limite onde } n_f \rightarrow \infty \text{ e } \Delta n \rightarrow 0 \text{ (ou seja, } \Delta n/n \ll 1) \\ &\text{e também } h \rightarrow 0 \end{aligned}$$

Nesse limite, a frequência n da radiação emitida tende à frequência clássica, que é a frequência orbital do elétron. Certamente, fazer a constante de Planck (h) “tender a zero” é um expediente puramente formal, sem interpretação física plausível.¹⁵ De todo modo, é importante apreciar que esta leitura *não é fiel ao desenvolvimento histórico*.

No desenvolvimento histórico da teoria quântica, o princípio de correspondência cedo passou a ser considerado um importante *princípio heurístico*; o que fica patente na segunda trilogia de Bohr (cf. 2005 [1918]). Nas trilogias de Bohr de 1913 e 1918 e em outros artigos pertencentes à era da antiga teoria quântica, o princípio de correspondência *não é encarado como um mero limite formal* que seria imposto às equações *depois* que elas já estivessem formuladas, para aferir se elas são “bem comportadas”. Ele tem uma função muito mais *construtiva* do que isso. Nas palavras de James Cushing (cf. 1982, p. 13) e de Van der Waerden (cf. 1968, p. 8), é fundamentalmente o princípio de correspondência que permite produzir sistematicamente expressões quânticas (a expressão às vezes usada em inglês é *guess*, que poderíamos traduzir por “dar um palpite” ou simplesmente “chutar”), através de um processo de generalizar as expressões clássicas para as intensidades das linhas espectrais, as frequências e polarizações da radiação. É ainda interessante notar que, em “Sobre a constituição dos átomos e moléculas”, durante a derivação original da fórmula para as séries espectrais, Bohr *não utiliza* a condição de quantização do momento angular $L = mvr = nh/2\pi$ (que afirma que o produto da massa do elétron pela velocidade e pelo raio da órbita deve ser igual a um múltiplo inteiro de $h/2\pi$), como se faz nos livros-texto atuais. No curso daquela demonstração, ele se vale de uma forma do princípio de correspondência (cf. Bezerra, 2003, apêndice).

Na terminologia da seção 1 deste artigo, podemos descrever o funcionamento do princípio de correspondência na primeira fase dizendo que a relação de correspon-

¹⁵ Tal como acontece também com outro limite, frequentemente apresentado em livros-texto, onde se faz a velocidade da luz c “tender a infinito”, para recuperar as transformações de Galileu a partir das transformações de Lorentz.

dência ocorre entre os *modelos de dados* da antiga teoria quântica e os *modelos de dados* da *eletrodinâmica clássica*. Não se trata ainda de uma relação entre os modelos teóricos. Trata-se de uma relação entre as subestruturas empíricas. Poderíamos dizer, acompanhando Honner (1987, p. 61), que o princípio de correspondência, na fase I, “relaciona os cálculos clássicos e os cálculos quânticos através de um casamento forçado entre teorias incompatíveis”. O que não impede, como vimos, que o princípio desempenhe uma função heurística.

Na fase II da história do princípio de correspondência, que coincide com a formulação adotada na nova mecânica quântica, ele acabou por transformar-se em um princípio metodológico geral e de importância central, recebendo uma reformulação abstrata, em consonância com o enfoque abstrato que predomina na mecânica quântica moderna a partir de Dirac e Von Neumann. Nessa fase, o princípio visa agora possibilitar a tradução das equações clássicas (com vetores, escalares e funções reais) em equações de tipo quântico (com operadores hermitianos e funções complexas), por meio de um “dicionário” de correspondências tais como:

$$\begin{aligned} \mathbf{q} \text{ (variável canônica)} &\Rightarrow \mathbf{q} \text{ (operador),} \\ \mathbf{p} \text{ (variável)} \mathbf{p} &= -i\hbar\nabla \text{ (operador),} \\ \text{Brackets de Poisson } \{x, y\} &\Rightarrow \text{comutadores } -i\hbar[\mathbf{x}, \mathbf{y}] \end{aligned}$$

Nas expressões acima, os símbolos em negrito denotam operadores. Novamente, o objetivo é gerar expressões quânticas a partir das expressões clássicas, porém o caminho adotado é agora inteiramente outro. A relação de correspondência é estabelecida entre os *modelos* da mecânica quântica e os *modelos* da mecânica clássica. Trata-se de uma relação entre estruturas, não apenas entre valores numéricos, somada a uma *reinterpretação* dos construtos dentro de um novo sistema conceitual (ao qual se associa uma nova estrutura). Os pais da mecânica quântica tinham bastante presente essa proposta de uma relação profunda entre a teoria clássica e a teoria quântica. Bohr costumava referir-se à teoria quântica como sendo uma “generalização racional” da teoria clássica (cf. Honner, 1987, seção 2.8; Bokulich & Bokulich, 2005), sendo esta última referência rica em citações e referências aos textos de Bohr. O próprio título do artigo fundador de Heisenberg deixa clara essa vinculação: “*Reinterpretação* quântica das relações cinemáticas e mecânicas” (*Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*; Heisenberg, 1968 [1925]).

Finalmente, pode-se conjecturar acerca do seguinte aspecto. Pode-se indagar em que medida o apego de Bohr ao princípio de correspondência – que estabelece, de uma forma ou de outra, uma conexão entre o quântico e o clássico – tem relação com sua postura epistemológica, já sobejamente discutida na literatura. De acordo com a

visão de Bohr, o domínio clássico ocupa um lugar inalienável e desempenha um papel indispensável até mesmo para uma compreensão quântica da realidade. A linguagem ordinária e os conceitos clássicos (para Bohr estes últimos seriam um “refinamento” dos primeiros) seriam inescapáveis, na medida em que indispensáveis para comunicar as descrições dos fenômenos e para expressar os resultados dos experimentos. Na interpretação bohriana, toda cadeia de instrumentos de medição dos fenômenos atômicos e subatômicos possui, como último elo, um sistema de caráter clássico, de natureza causal. As descrições dos ponteiros, medidores, instrumentos, registros de eventos etc. seriam, em última análise, efetuadas no modo clássico de descrição, contexto no qual o papel do “*quantum* de ação” pode ser negligenciado, e onde faz sentido falar em posições, momentos e trajetórias bem definidas. Daí a importância do princípio de correspondência para estabelecer uma espécie de ponte entre os domínios clássico e quântico. Porém, não haveria espaço aqui para fazer mais do que meramente mencionar tal possibilidade (cf., por exemplo, Honner, 1987, seção 2.8; Bokulich & Bokulich, 2005). Explorar os desdobramentos de tal conjectura interpretativa é tarefa que deve ficar para outro momento.

CONCLUSÃO

Os modelos de tipo I (representacional) — que utilizam simplificações, idealizações e aproximações, e nos quais a condição de coerência é enfraquecida — e as analogias — que se valem da transposição entre domínios de aplicação — incluem-se entre as estratégias de investigação mais úteis da ciência. Vimos que os modelos de tipo II (lógico ou instancial) são indispensáveis para entender o funcionamento dos modelos representacionais e, além disso, permitem compreender com maior precisão como se dá o encontro entre o sistema teórico (seja ele modelo ou teoria) e a realidade. Modelos e analogias podem ser vistos, segundo J. T. Cushing (cf. 1982), como fazendo parte do “contexto da descoberta”, e poderíamos supor que também pertencem ao chamado “contexto prospectivo” de Laudan. O compromisso ontológico é mitigado no registro de “prospecção” do domínio de investigação, haja vista a desenvoltura com que os cientistas, semelhantes a “oportunistas inescrupulosos”, no dizer célebre de Einstein (cf. 1949, p. 684), utilizam livremente modelos e analogias de proveniências diferentes, mesmo naquelas situações em que ainda não se acham em condições de explicitar de maneira coerente a estrutura e/ou aceitar a ontologia de uma teoria específica.

As análises aqui feitas sobre a atuação dos modelos representacionais, o funcionamento das analogias, a anatomia da relação teoria-realidade e a operação do princípio de correspondência vinculam-se ao enfoque da metateoria estruturalista, e sugere-

rem que esta proporciona um caminho fértil para a abordagem de questões como essas. Em vista da análise aqui apresentada, penso que não se sustentam duas críticas levantadas por Mary Hesse (uma importante estudiosa dos modelos e analogias, bem como uma importante historiadora da física) à concepção semântica ou modelo-teórica em filosofia da ciência. A primeira crítica é no sentido de que “a concepção semântica de teorias pouco acrescenta de interesse filosófico ao tópico dos modelos em si, e nada às questões epistemológicas levantadas”, e a segunda, de que “uma fraqueza ainda maior da concepção semântica está na sua aceitação tácita da distinção feita no hipotético-dedutivismo entre termos teóricos e observacionais” (Hesse 2001, p. 302). Quanto à primeira, esperamos ter mostrado que, ao contrário, o enfoque semântico/estruturalista pode contribuir significativamente para elucidar o funcionamento dos modelos prototeóricos em termos de modelos lógicos. Com relação à segunda, vimos que a metateoria estruturalista opera uma completa reformulação e re colocação do problema, além de dar uma nova interpretação à sua solução.

Os princípios de correspondência, como o da antiga teoria quântica e da moderna mecânica quântica — que operam baseados nos modelos de tipo II: modelos de dados no primeiro caso e modelos teóricos no segundo —, também fazem parte do arsenal de estratégias cognitivas à disposição dos cientistas. Os princípios de correspondência, entendidos em termos de estruturas, não precisam necessariamente implicar uma forma de *realismo convergente* na ciência, uma vez que o comprometimento ontológico pode ser mitigado, eles podem ser utilizados em um plano heurístico e prospectivo. A questão da escolha por alguma das teses disponíveis sobre o estatuto cognitivo da ciência (realismo estrutural, instrumentalismo etc.) não poderia ser abordada nos limites deste trabalho. A principal lição de caráter geral que podemos tirar do estudo panorâmico das estratégias de investigação científica talvez seja a de que os modelos, as analogias e a correspondência fazem parte da rica “biodiversidade” do sistema do conhecimento científico, que ultrapassa, em muito, a imagem de uma ciência estruturada apenas em leis e teorias. E tais estratégias aumentam indubitavelmente a flexibilidade e o alcance da racionalidade científica, dando-lhe a capacidade de explorar uma ampla gama de possibilidades de elaboração do conhecimento.☞

AGRADECIMENTOS. Partes de versões anteriores deste trabalho foram apresentadas no IX Colóquio de Epistemologia da Universidade São Judas Tadeu (São Paulo, SP), em Junho de 2010, e no IV Seminário de História e Filosofia da Ciência, na Universidade Estadual de Santa Cruz (Ilhéus, BA), em Setembro de 2010. No primeiro caso, agradeço à Profa. Sônia Dion pelo convite e ao público do Colóquio pelas discussões. No segundo caso, agradeço à Profa. Marisa Donatelli pelo convite e pelo apoio, bem como aos Profs. Osvaldo Pessoa Jr. e Eduardo Barra pelos comentários, que muito me ajudaram a aperfeiçoar o texto.

Valter ALNIS BEZERRA

Professor Doutor do Centro de Ciências Naturais e Humanas,
Universidade Federal do ABC, Brasil.
valter.bezerra@ufabc.edu.br

ABSTRACT

In the present article some strategies of scientific inquiry are discussed which have a pair of features in common: first, they are based on the notions of model, and second, they depend on a counterpoint between two or more structures. Three strategies of this kind are considered. First, I consider modeling in the usual scientific sense. In order to do this, one distinguishes between two notions of model: the logical or instantial one, and the proto-theoretical or representational one. While the differences between both senses of the term are highlighted, an attempt is also made to understand the sense in which the two are related to one another. In particular, in order to investigate the structure-reality relationship of representational modeling, one needs to invoke the structure-structure relationship of logical modeling. The analysis of models contributes also to clarify the relational nature of empirical adequacy between scientific theories and data, through the notion of empirical substructure or model of data. Second, analogies are considered. Their operation is analyzed here in terms of models and partial isomorphisms, which allows one to grasp the idea of a translation of problems (and their solutions) across distinct domains of inquiry. The important role played by analogies in the thought of Maxwell (who also notably valued models) is highlighted. Third, I discuss the principle of correspondence, which historically played a remarkable role in the first period of quantum theory. The principle acquired two distinct forms, different in meaning, both of which can be clarified through the use of models. The Bohr-Sommerfeld model of the atom receives special attention, both in order to provide a context for discussing the principle of correspondence, and to exemplify the features of representational models as well.

KEYWORDS • Model. Analogy. Structure. Proto-theory. Models of data. Correspondence principle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALZER, W. & MOULINES, C. U. (Ed.). *Structuralist theory of science: focal issues, new results*. Berlim: Walter de Gruyter, 1996.
- BALZER, W.; MOULINES, C. U. & SNEED, J. D. *An architectonic for science: the structuralist program*. Dordrecht: D. Reidel, 1987.
- BATISTA, I. L. O ensino de teorias físicas mediante uma estrutura histórico-filosófica. *Ciência & Educação*, 10, 3, p. 461-76, 2004.
- BEZERRA, V. A. *Schola quantorum: progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica*. Parte I: desenvolvimento histórico, 1913-1925. *Scientiae Studia*, 1, 4, p. 463-517, 2003.
- BOHR, N. *Sobre a constituição de átomos e moléculas*. Lisboa: Calouste Gulbenkian, 1979 [1913].
_____. *On the quantum theory of line-spectra*. Mineola/New York: Dover, 2005 [1918].
- BOHR, N.; KRAMERS, H. A. & SLATER, J. C. The quantum theory of radiation. In: VAN DER WAERDEN, B. L. (Ed.). *Sources of quantum mechanics*. New York: Dover, 1968. p. 159-76.

- BOKULICH, P. & BOKULICH, A. Niels Bohr's generalization of classical mechanics. *Foundations of Physics*, 35, 3, p. 347-71, 2005.
- BUENO, O. What is structural empiricism? Scientific change in an empiricist setting. *Erkenntnis*, 50, p. 59-85, 1999.
- BUENO, O.; FRENCH, S. & LADYMAN, J. On representing the relationship between the mathematical and the empirical. *Philosophy of Science*, 69, p. 497-518, 2002.
- CARMAN, C. C. & FERNÁNDEZ, M. P. Gen: ¿teórico y observacional? Términos T-teóricos y términos T-observacionales. In: MARTINS, R. A. et al. (Ed.). *Filosofia e história da ciência no cone sul: 3o. Encontro*. Campinas: AFHIC, 2004. p. 102-9.
- CARRILHO, M. M. (Ed.). *Epistemologia: posições e críticas*. Lisboa: Gulbenkian, 1991.
- CUSHING, J. T. Models and methodologies in current theoretical high-energy physics. *Synthese*, 50, p. 5-101, 1982.
- DÍEZ, J. A. & LORENZANO, P. (Ed.). *Desarrollos actuales de la metateoría estructuralista: problemas y discusiones*. Bernal: Universidad Nacional de Quilmes, 2002.
- EINSTEIN, A. On the quantum theory of radiation. In: VAN DER WAERDEN, B. L. (Ed.). *Sources of quantum mechanics*. New York: Dover, 1968 [1917]. p. 63-77.
- _____. Remarks concerning the essays brought together in this co-operative volume. In: SCHILPP, P. A. (Ed.). *Albert Einstein: philosopher-scientist*. Evanston/Illinois: The Library of Living Philosophers, 1949. p. 665-88.
- FRENCH, S. *Ciência*. Porto Alegre: Artmed, 2009.
- FRENCH, S. & LADYMAN, J. Remodelling structural realism: quantum physics and the metaphysics of structure. *Synthese*, 136, p. 31-56, 2003.
- GIERE, R. N. *Science without laws*. Chicago/London: University of Chicago Press, 1999a.
- _____. Using models to represent reality. In: MAGNANI, L. et al. (Ed.). *Model-based reasoning in scientific discovery*. New York: Kluwer/Plenum, 1999b. p. 41-57.
- HANSON, N. R. Observação e interpretação. In: MORGENBESSER, S. (Ed.). *Filosofia da ciência*. São Paulo: Cultrix/EDUSP, 1975. p. 125-38.
- HEISENBERG, W. Quantum-theoretical reinterpretation of kinematic and mechanical relations. In: VAN DER WAERDEN, B. L. (Ed.). *Sources of quantum mechanics*. New York: Dover, 1968 [1925]. p. 261-76.
- HESSE, M. B. Models and analogies. In: NEWTON-SMITH, W. H. (Ed.). *A companion to the philosophy of science*. Oxford: Blackwell, 2001. p. 299-307.
- HODGES, W. *A shorter model theory*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- HONNER, J. *The description of nature: Niels Bohr and the philosophy of quantum physics*. Oxford: Clarendon Press, 1987.
- LAUDAN, L. *Progress and problems: towards a theory of scientific growth*. Berkeley: University of California Press, 1977.
- MAGNANI, L. et al. (Ed.). *Model-based reasoning in scientific discovery*. New York: Kluwer/Plenum, 1999.
- MARTINS, R. A. et al. (Ed.). *Filosofia e história da ciência no cone sul: 3o. Encontro*. Campinas: AFHIC, 2004.
- MAXWELL, J. C. On Faraday's lines of force. In: _____. *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Mineola/New York: Dover, 2003a [1856]. v. 2, p. 155-229.
- _____. On physical lines of force. In: _____. *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Mineola/New York: Dover, 2003b [1862]. v. 2, p. 451-513.
- MORGENBESSER, S. (Ed.). *Filosofia da ciência*. São Paulo: Cultrix/EDUSP, 1975.
- NAGEL, E.; SUPPES, P. & TARSKI, A. (Ed.). *Logic, methodology and philosophy of science*. Stanford: Stanford University Press, 1962.
- NEWTON-SMITH, W. H. (Ed.). *A companion to the philosophy of science*. Oxford: Blackwell, 2001.

- PUTNAM, H. O que as teorias não são. In: CARRILHO, M. M. (Ed.). *Epistemologia: posições e críticas*. Lisboa: Gulbenkian, 1991. p. 299-326.
- SANT'ANNA, A. S. *O que é um axioma*. Barueri: Manole, 2003.
- SCHILPP, P. A. (Ed.). *Albert Einstein: philosopher-scientist*. Evanston/Illinois: The Library of Living Philosophers, 1949.
- SNEED, J. D. *The logical structure of mathematical physics*. Dordrecht: D. Reidel, 1971.
- SOMMERFELD, A. *Atomic structure and spectral lines*. 2 ed. London: Methuen, 1928.
- _____. *Atomic structure and spectral lines*. 3 ed. New York: E. P. Dutton, 1934. v. 1.
- STEGMÜLLER, W. *The structure and dynamics of theories*. New York: Springer, 1976.
- SUPPES, P. A comparison of the meaning and uses of models in mathematics and the empirical sciences. *Synthese*, 12, p. 287-301, 1960.
- _____. Models of data. In: NAGEL, E.; SUPPES, P. & TARSKI, A. (Ed.). *Logic, methodology and philosophy of science*. Stanford: Stanford University Press, 1962. p. 252-61.
- TURNER, J. Maxwell on the method of physical analogy. *British Journal for the Philosophy of Science*, 6, 23, p. 226-38, 1955.
- VAN DALEN, D. *Logic and structure*. 4. ed. Berlin: Springer, 2004.
- VAN DER WAERDEN, B. L. (Ed.). *Sources of quantum mechanics*. New York: Dover, 1968.
- VAN FRAASSEN, B. C. *A imagem científica*. São Paulo: Editora da Unesp/Discursos Editoriais, 2007 [1980].
- WOODWARD, J. Data and phenomena. *Synthese*, 79, 3, p. 393-472, 1989.

