

A estrutura conceitual da revolução química¹

Paul Thagard²

Tradução:
Marcos Rodrigues da Silva e Miriam Giro

Resumo: Este artigo investiga as mudanças conceituais revolucionárias que ocorreram quando a teoria do flogisto de Stahl foi substituída pela teoria do oxigênio de Lavoisier. Utilizando técnicas extraídas da inteligência artificial, o artigo descreve os estágios cruciais no desenvolvimento conceitual de Lavoisier, de 1772 até 1789. Em seguida, é esboçada uma teoria computacional da mudança conceitual de modo a explicar a descoberta de Lavoisier da teoria do oxigênio e a substituição da teoria do flogisto.

1 Introdução. Via de regra, o conhecimento científico se desenvolve de forma lenta, com acréscimos graduais de novas leis e novos conceitos. Por vezes porém, quando a totalidade dos sistemas de conceitos e de leis é substituída por outros conceitos e outras leis, a ciência sofre mudanças conceituais dramáticas. Em analogia às transformações políticas, tais mudanças são denominadas *revoluções científicas* (Cohen 1985; Kuhn 1970). Embora muitos historiadores e filósofos da ciência tenham enfatizado a importância das revoluções científicas, ocorreram poucas análises detalhadas da natureza de tais mudanças. Como as revoluções conceituais ocorrem? Como pode surgir um novo esquema conceitual e como ele pode substituir um esquema conceitual antigo? O que são esses

¹ Este artigo é uma tradução de “The Conceptual Structure of The Chemical Revolution”, publicado originalmente em *Philosophy of Science*, número 57, p. 183-209, 1990. Todos os direitos do artigo pertencem à revista *Philosophy of Science*, editada pela University of Chicago Press. O *copyright* do artigo original é de 1990, da Philosophy of Science Association. Os tradutores agradecem a Paul Thagard e a Philosophy of Science a permissão para esta tradução. [NT.]

² Sou grato a Susan Brison, Lindley Darden, Phillip Johnson-Laird, Trevor Levere, Michael Mahoney e a dois referêes anônimos pelos comentários valiosos. As conversas com Nancy Nersessian, Gregory Nowak e Michael Ranney foram igualmente muito úteis.

esquemas conceituais cuja transformação é tão fundamental para o desenvolvimento científico?

Este artigo investiga as estruturas e os mecanismos que podem contribuir para uma compreensão da revolução química, na qual a teoria de Lavoisier da combustão do oxigênio substituiu a teoria do flogisto de Stahl. As ferramentas analíticas empregadas derivam da *inteligência artificial* (AI), cujo sub-campo *conhecimento representacional* sugere estruturas complexas para descrever esquemas conceituais e cujo sub-campo *aprendizagem mecânica* sugere os mecanismos de aprendizagem por meio dos quais tais esquemas possam ser desenvolvidos. Podemos, utilizando os conceitos da AI, investigar episódios científicos particulares com perguntas tais como: Qual era a estrutura detalhada dos esquemas conceituais antes, durante e depois da mudança ter ocorrido? Quais eram os mecanismos por meio dos quais estas mudanças ocorreram? Isto é, quais eram os processos cognitivos dos cientistas que experienciaram a revolução conceitual?

A substituição da teoria do flogisto pela teoria do oxigênio é um exemplo extraordinário de mudança conceitual radical. Em 1772, quando Lavoisier começou a formar suas concepções, a teoria dominante na química era a teoria do flogisto de Stahl (1723/1730). Por volta de 1789, quando Lavoisier publicou seu *Traité* (Lavoisier 1789), a maioria dos químicos se deslocou para a teoria do oxigênio de Lavoisier, que fornecia uma explicação bastante diferente daquela que era dada pela teoria do flogisto para os fenômenos da combustão, da calcinação e da respiração. Enquanto a teoria de Lavoisier defendia que a combustão, a calcinação (por exemplo, na ferrugem) e a respiração estavam envolvidas na absorção de oxigênio, a teoria do flogisto mantinha que todos estes processos envolviam remoção de flogisto. Eu descreverei a estrutura conceitual do sistema de Stahl e, por meio de quatro estágios diferentes de seu desenvolvimento, a estrutura conceitual do sistema de Lavoisier. Esta descrição revela os tipos de mudanças necessários para a construção de um novo esquema conceitual. Eu apresentarei o início de uma explicação tanto de como Lavoisier desenvolveu seu

sistema revolucionário quanto de como ele substituiu o sistema do flogisto.

2 Representação dos conceitos. De modo a simplificar os vários tipos de inferências e modelar os processos cognitivos em humanos, pesquisadores em inteligência artificial e psicologia cognitiva têm desenvolvido uma variedade de técnicas de representação (Brachman e Levesque (1985) é uma coleção de muitos textos importantes; Barr e Feigenbaum (1981) contém um bom exame). Estas técnicas têm aparecido sob os títulos de *redes semânticas*, *sistemas de estrutura*, e, de forma mais geral, *linguagens de representação de conhecimento*. Não pretendo aqui defender qualquer sistema particular de representação de conhecimento. Em vez disso, vou extrair, de uma variedade de sistemas, os aspectos que parecem mais relevantes para representar os estágios das revoluções conceituais.

Um esquema conceitual pode ser analisado como uma rede de nós, com cada nó correspondendo a um conceito e cada linha na rede correspondendo a uma ligação entre conceitos. Por exemplo, a Figura 1 fornece um pequeno fragmento de uma rede conceitual referente a animais. Os nós conceituais são marcados pelos nomes nas elipses. Esta rede utiliza cinco tipos de ligações:

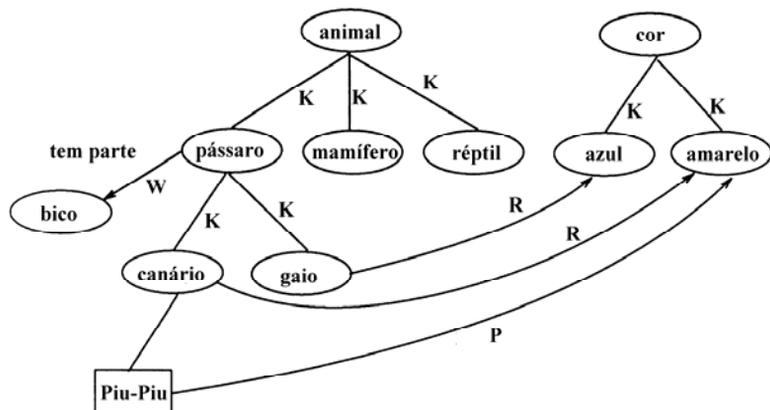


Figura 1. Parte de um framework conceitual para animais.

1. Ligações de *tipos*, marcadas por linhas retas rotuladas como ‘K’. Estas ligações indicam que um conceito é um tipo de outro: por exemplo, canário é um tipo de pássaro, e pássaro é um tipo de animal.
2. Ligações de *instâncias*, marcadas por linhas retas rotuladas como ‘I’. Estas indicam que algum objeto particular, marcado não por uma elipse mas por uma caixa, é uma instância de um conceito: Piu-Piu é um canário. A rede deixa claro que Piu-Piu é também um animal.
3. Ligações de *regra*, marcadas por linhas curvas terminadas com flechas e rotuladas como ‘R’. Elas expressam relações gerais (ainda que nem sempre universais) entre conceitos; por exemplo, que os canários têm cor amarela.
4. Ligações de *propriedade*, marcadas por linhas curvas terminadas com flechas mas rotuladas como ‘P’. Elas indicam que um objeto tem uma propriedade tal como: Piu-Piu é amarelo.
5. Ligações de *parte-todo*, marcadas por linhas retas terminadas com flechas e marcadas como ‘W’. Elas indicam que um todo tem uma dada parte: um bico é uma parte de um pássaro.

Uma análise geral das relações parte-todo foi recentemente oferecida por Winston, Chaffin e Herrmann (1987). Para uma interessante discussão da importância das relações parte-todo na descoberta biológica, ver Darden e Rada (1988). Relações e outros predicados de ordem superior podem também ser expressos dentro de redes conceituais, pois podemos extrair linhas para indicar, por exemplo, que amarelo é mais claro do que azul.

Note que estas ligações podem originar dois tipos de hierarquias. Ligações de tipo e de instância compõem um tipo, como no exemplo: Piu-Piu é uma instância de canário, que é um tipo de pássaro, que é um tipo de animal. Embora isto não esteja evidente na figura, as relações de parte-todo podem também estabelecer hierarquias, por exemplo, a de que uma unha é uma parte de um dedo, que é parte de uma mão, que é parte de um braço, que é parte de um corpo. Lingüistas (Cruse 1986) e psicolingüistas (Miller e

Johnson-Laird 1976) têm enfatizado a importância destes tipos de hierarquia para a organização do léxico mental. Veremos abaixo que a organização hierárquica é crucial para a compreensão da mudança conceitual revolucionária.

O lógico imediatamente perceberia que a Figura 1 não contém informação que não possa ser representada no cálculo de predicados de primeira ordem. Ligações de tipo e ligações de regra podem ser codificadas por generalizações universais tais como (x) (*canário* $(x) \rightarrow$ *pássaro* (x)), e ligações de instância e ligações de propriedade podem ser codificadas por sentenças atômicas tais como *pássaro* (*Piu-Piu*). Contudo, de uma perspectiva computacional, as ligações têm uma importância que transcende a informação que elas expressam: elas podem tornar possíveis *procedimentos* diferentes dos que estão associados ao cálculo de predicados. Assim, embora os sistemas de representação de conhecimento da AI possam ser *expressivamente* equivalentes aos sistemas baseados na lógica, eles não precisam ser *procedimentalmente* equivalentes. A distinção entre sistemas de equivalência expressiva e de equivalência procedimental e a tese de que as técnicas da AI vão além dos sistemas lógicos são defendidas alhures (Thagard 1984, 1988).

3 Alterando redes conceituais. Se um esquema conceitual consiste de uma rede de nódulos com ligações tais como aquelas descritas, então a mudança conceitual consiste no acréscimo ou supressão de nódulos e ligações. As mudanças mais comuns envolvem o acréscimo de:

1. Novos nódulos de conceito. Exemplo: o novo conceito “avestruz”.
2. Novas ligações de tipo entre nódulos de conceito. Exemplo: canários são répteis.
3. Novas ligações de regra entre nódulos de conceito. Exemplo: canários têm a cor azul.

As mudanças surgem mais em grupos do que isoladamente. Por exemplo, o acréscimo do nódulo de conceito para avestruz seria

acompanhado do acréscimo de uma ligação de tipo de “avestruz” para “pássaro”, do acréscimo de ligações de instância de “avestruz” para vários nódulos de objetos representando avestruzes particulares, e do acréscimo de ligações de regra entre “avestruz” e nódulos de conceitos tais como “pernas longas”.

Mas nem todos os acréscimos e supressões são igualmente importantes. As mudanças mais dramáticas envolvem o acréscimo de novos conceitos, bem como de novas ligações de regra e de tipo, nas quais os novos conceitos e ligações *substituem* os da antiga rede. Podemos distinguir, por um lado, a substituição de um esquema conceitual e, por outro – se algumas das ligações anteriores permanecem, indicando que os novos conceitos e ligações ocupam um papel no novo esquema, papel este que é similar ao ocupado no antigo – as simples supressões e acréscimos neste esquema conceitual. Embora uma revolução conceitual possa envolver uma substituição dramática de uma parte substancial de um esquema conceitual, a continuidade é preservada pela permanência de ligações com outros conceitos. Mudanças dramáticas seriam mais visíveis nas hierarquias de conceitos que podem ser construídas a partir de relações de tipo e de parte-todo. Estas hierarquias fornecem um suporte que arranja e organiza outros conceitos. Portanto, mudanças nas relações de tipo e de parte-todo geralmente envolvem uma reestruturação de esquemas conceituais que é qualitativamente diferente do mero acréscimo ou supressão de nódulos e ligações.

Até aqui, nada afirmei acerca dos possíveis mecanismos para acréscimo de novos nódulos e ligações, mas retornarei a esta questão após mapear as mudanças conceituais que ocorreram no desenvolvimento da química desde o flogisto até o oxigênio.

4 A teoria do flogisto de Stahl. Um relato detalhado da revolução química diagramaria todos os estágios do desenvolvimento das idéias, partindo da teoria do flogisto até a teoria mais desenvolvida do oxigênio, de Lavoisier. Concentrar-me-ei, contudo, nos que parecem ser os estágios mais importantes do desenvolvimento das

idéias, fornecendo algo como uma fotografia das estruturas conceituais em períodos particulares. Estas fotografias necessariamente registrarão apenas parte da organização dos sistemas conceituais, evidenciando os fragmentos mais importantes das teorias do flogisto e do oxigênio, a saber, aqueles que dizem respeito à combustão e calcinação (oxidação).

A teoria do flogisto se originou com Georg Stahl, embora ele tenha extraído, de forma contundente, as idéias de seu professor Johann Becher (Partington 1961). Stahl seguiu Becher ao divergir da visão tradicional aristotélica dos quatro elementos: terra, ar, fogo e água. A Figura 2 apresenta um fragmento do sistema conceitual de Stahl, baseado principalmente em Stahl (1723/1730), mas também em Partington (1961) e Leicester e Krickstein (1952). Stahl afirma que os corpos podem ser divididos naqueles que são princípios simples e naqueles que são compostos. A palavra inglesa '*principle*', aqui, é um pouco enganadora pois, diferentemente do latim '*principium*' e do francês '*principe*', ela não conota imediatamente algo que é básico e indivisível. Os princípios de Stahl, grosso modo, são como nossos elementos, substâncias básicas das quais os compostos são feitos, embora alguns sejam definidos mais em termos de função ativa do que de substância. Os princípios simples abrangem a água e a terra, e são de três tipos: o princípio vitrificável, o princípio liquidificável e o princípio inflamável, ou flogisto. Um "misto" é um corpo que consiste de princípios simples, ao passo que um composto pode consistir de mistos. As propriedades dos compostos são explicadas em termos dos princípios que eles contêm. O enxofre, por exemplo, queima porque contém o princípio inflamável, o flogisto. Na Figura 2, as linhas retas indicam ligações de tipo, e a linha curva com flecha é uma ligação de regra que expressa a regra de que os compostos com flogisto queimam. Por razões de clareza, omiti outras numerosas ligações, por exemplo, as ligações de parte-todo que indicariam que o enxofre consiste de princípios vitrificáveis, liquidificáveis e de flogisto.

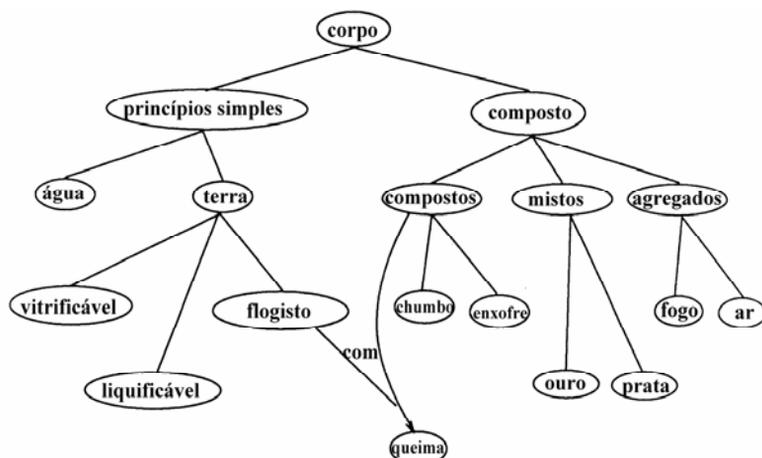


Figura 2. Fragmento da rede conceitual de Stahl, 1723.

Uma descrição completa do esquema conceitual de Stahl também mostraria as ligações de regra que tornavam a teoria do flogisto capaz de explicar a calcinação e a respiração. Em contraste com nossa atual visão de que os metais combinam com o oxigênio para produzir minérios metálicos (óxidos), a teoria do flogisto sustentava que os minérios são mais simples do que os metais. Quando os minérios são aquecidos, o flogisto da queima do carvão combina com eles para produzir metais. A calcinação, assim como a ferrugem do ferro, é o resultado da perda do flogisto dos metais. A respiração tem o efeito de remover flogisto do corpo para o ar, de modo que, se o ar estiver saturado de flogisto pela combustão ou respiração, a respiração posterior torna-se impossível (Conant 1964, p. 70). Assim, o esquema conceitual de Stahl era bastante amplo e fornecia um *framework* explicativo para muitos fenômenos importantes. Apesar de suas diferenças radicais em relação ao sistema atual de química, que é em grande parte baseado na obra de Lavoisier, devemos reconhecer o poder e a extensão do sistema de Stahl, bem como sua esquisitice. Stahl discute, por exemplo, a pedra filosofal dos alquimistas. Seu esquema conceitual sugere que a convertibilidade de compostos como o chumbo em mistos como o ouro seria apenas uma questão de obter a combinação correta de princípios.

5 Lavoisier, 1772. De acordo com Guerlac (1961), o interesse de Lavoisier pela combustão começou em 1772, quando ele tinha 29 anos de idade. A teoria do flogisto dominava a discussão química tanto no continente quanto na Inglaterra. Eu descreverei como Lavoisier se afastou da teoria do flogisto, chegando, nos anos de 1780, a uma altamente desenvolvida teoria do oxigênio que foi a base da química moderna. Meu objetivo aqui não é fornecer uma narrativa histórica (ver Holmes (1985), para um relato muito esclarecedor), mas antes analisar a estrutura conceitual do desenvolvimento das idéias de Lavoisier. Esta análise é um exame preliminar para o desenvolvimento de uma explicação computacional de como a bem desenvolvida rede conceitual que Lavoisier possuía em 1789 poderia ter evoluído. O registro histórico sugere a investigação dos seguintes estágios:

1. As concepções iniciais de Lavoisier, por volta de 1772.
2. As concepções em desenvolvimento de Lavoisier, por volta de 1774.
3. As concepções desenvolvidas de Lavoisier, por volta de 1777.
4. A teoria do oxigênio completa de Lavoisier, por volta de 1789.

A atenção nestes estágios torna possível observar, a partir da vaga idéia de que o ar poderia ser absorvido na calcinação e na combustão, o avanço de Lavoisier até uma alternativa contundente à teoria de Stahl.

Guerlac (1961) argumenta que dois fenômenos decisivos foram fontes, em 1772, do interesse de Lavoisier na combustão e na calcinação e na perspectiva de que o oxigênio combina com substâncias em ambos processos. A primeira fonte era a de que, quando os metais são colocados em ácidos, ocorre efervescência. Isto sugeriu a Lavoisier que o ar contido nos metais estava sendo liberado. Em uma nota escrita em agosto de 1772, Lavoisier escreve: “Uma efervescência não passa de uma liberação do ar que, de alguma forma, estava dissolvido em cada um dos corpos” (Guerlac 1961, p. 214, tradução de Thagard). A segunda fonte, para a qual Guerlac possui evidência mais circunstancial, era a publicação de Guyton de Morveau, que mostrava conclusivamente, pela primeira vez, que os objetos ganham peso na calcinação. Em outra nota de

agosto de 1772, Lavoisier afirma que “uma série de experimentos parece mostrar que o ar entra de forma considerável na composição dos minerais” (Guerlac 1961, p. 215, tradução de Thagard).

A Figura 3 retrata o que eu conjeturo como sendo o segmento relevante da rede conceitual de Lavoisier naquele período. Ar, óxidos e metais são três tipos de substâncias, como a figura representa por meio de linhas retas. Linhas curvas representam a regra de que os óxidos de cálcio efervescentes (doravante: óxidos) produzem ar e de que os metais ganham peso quando oxidam. Para explicar essas regras, Lavoisier conjectura que os óxidos poderiam conter ar, formando a regra rotulada ‘contém?’. As linhas pontilhadas exibem uma relação explicativa, indicando que a hipótese de que os óxidos contêm ar pode servir para explicar tanto por que os cálcios efervescem quanto por que os metais ganham peso na calcinação. Lavoisier certamente não podia supor possuir uma teoria do oxigênio neste momento, apenas uma vaga idéia de que a presença do ar nos minerais poderia explicar alguns fenômenos intrigantes.

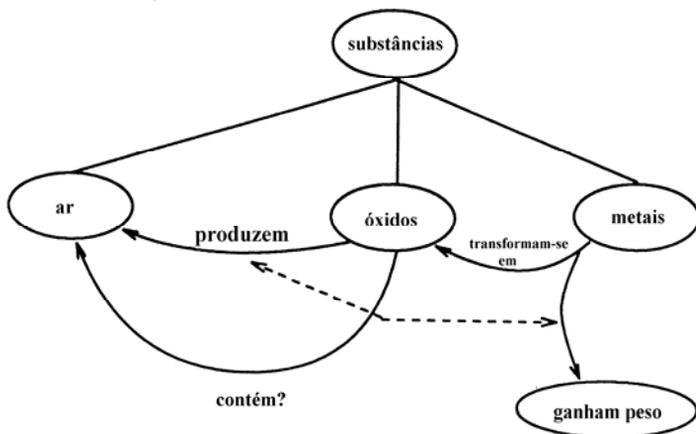


Figura 3. Fragmento da rede conceitual de Lavoisier, 1772.

6 Lavoisier, 1774. Em setembro de 1772, Lavoisier conduziu seus célebres experimentos com a combustão do fósforo e do enxofre. Ele descobriu que o que resultava da combustão pesava mais do que as substâncias originais. Em nota lacrada à Academia Francesa de

Ciências, em novembro de 1772, Lavoisier afirma que “esta descoberta me parece uma das mais interessantes desde Stahl” (Guerlac 1961, p. 228, tradução de Thagard), e sugere que o aumento de peso na calcinação e na combustão deve ter a mesma causa: a presença de ar.

Em janeiro de 1774 Lavoisier publicou um detalhado relatório de experimentos relevantes dele e de outros em seus *Opuscules Physiques et Chymiques* (tradução inglesa de 1776; Lavoisier 1774/1970). Este volume relata experimentos envolvendo a calcinação, a combustão e a dissolução de minerais, como o calcário, que confirmam a existência de um “fluido elástico flexível” no cálcario, nos álcalis e nos óxidos metálicos. Lavoisier não é muito claro se este fluido é uma parte do ar ou o próprio ar; ele fala de “um fluido elástico de um tipo particular que se mistura ao ar” (Lavoisier 1774/1970, p. 340), mas suspende o juízo no que diz respeito à relação deste fluido com o ar atmosférico. Numa dissertação lida na Academia em 1775, incluída como apêndice da tradução inglesa de 1776, ele afirma “que o princípio que se une aos metais durante sua calcinação, que aumenta seu peso e que os leva ao estado de oxidação, não é nem as partes constitutivas do ar, nem o ácido particular difundido na atmosfera; é o próprio ar sem divisão” (Lavoisier 1774/1970, p. 408). Portanto, em 1774 e no início de 1775, a estrutura da rede conceitual de Lavoisier é como, grosso modo, se exhibe na Figura 4. Note-se que este é um pequeno fragmento da estrutura exibida nos *Opuscules*, nos quais, por exemplo, minerais como o calcário recebem muita atenção.

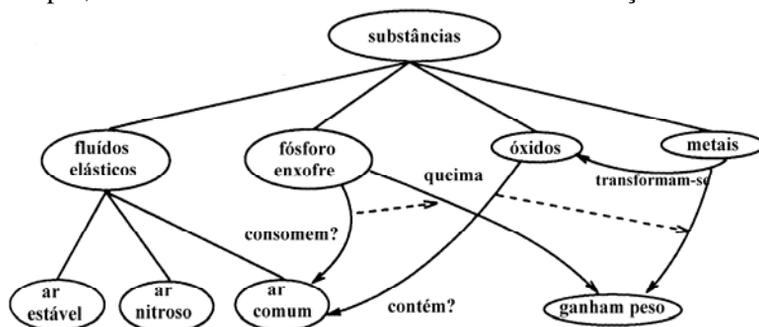


Figura 4. Fragmento da rede conceitual de Lavoisier, 1774-75.

Os acréscimos apresentados na Figura 4 em relação à Figura 3 são os novos resultados da combustão do fósforo e do enxofre. Estas substâncias ganham peso na combustão, assim como os metais ganham peso na calcinação. Agora Lavoisier possui uma parte da estrutura da posterior teoria do oxigênio: ele explica a combustão, a calcinação e outros fenômenos por meio da suposição da presença do ar nos minerais. Mas ainda falta-lhe uma idéia mais clara do que é este ar. Além disso, ele ainda não está muito confiante de que possui uma vigorosa alternativa à teoria do flogisto de Stahl, pois afirma que o atual estado de conhecimento sobre a calcinação e a redução não nos permite decidir entre a sua e a interpretação do flogisto [acerca destes eventos mencionados], e que a opinião de Stahl talvez seja compatível com a sua (Lavoisier 1774/1970, p. 324-325). Em 1776, Lavoisier admite em correspondência que, freqüentemente, tem mais confiança nas idéias do eminente teórico inglês do flogisto – Joseph Priestley –, do que em suas próprias idéias (Holmes 1985, p. 60).

7 Lavoisier, 1777. Entretanto, por volta de 1777, Lavoisier desenvolveu uma magnífica e mais clara alternativa à teoria do flogisto. Em muitas dissertações lidas na Academia naquele ano, ele descreve o “ar puro” ou “ar eminentemente respirável”, como um dos ingredientes do ar atmosférico. Os avanços na técnica experimental permitiram a Scheele, Priestley e Lavoisier isolar este ingrediente. Priestley, fiel à teoria do flogisto, denominou-o “ar desflogistizado”: a combustão e a respiração funcionam tão bem neste ar porque seu flogisto foi removido. Mas Lavoisier estava agora convencido de que o agente na combustão e na calcinação era uma parte separada do ar. A versão final da monografia de Lavoisier de 1778 (ver Lavoisier 1774/1970, Apêndice) difere de forma notável da versão anterior. A conclusão do que eu citei acima, da página 408, fica assim: “que o princípio que se une aos metais durante sua calcinação, que aumenta seu peso e que os leva ao estado de óxidos, nada mais é do que a *porção do ar mais salubre e mais puro*” (Lavoisier 1862, v. 2, p. 123, tradução e itálicos de Thagard).

A Figura 5 mostra o fragmento pertinente do esquema conceitual de Lavoisier de 1777. Seu enunciado mais sistemático das suas idéias naquela época está em sua “Mémoire sur la combustion en général” (Lavoisier 1862, p. 225-233); traduções inglesas podem ser encontradas em Knickerbocker (1962) e em Leicester e Klickstein (1952). Lavoisier lista quatro tipos de ar: eminentemente respirável, atmosférico, fixo e *mophette* (nitrogênio). Lavoisier descreve como a combustão e a calcinação estão sujeitas às mesmas leis e como elas podem receber uma explicação comum por meio da consideração do ar puro como o corpo verdadeiramente combustível. (A respiração é discutida em outra dissertação do mesmo ano.) Embora ele critique os seguidores de Stahl pelo fracasso em isolar o flogisto e sugira que a existência de uma hipótese alternativa possa enfraquecer o sistema de Stahl em suas bases, ele não se sente suficientemente seguro para rejeitar a teoria do flogisto imediatamente. Ele conclui afirmando:

Ao atacar aqui a doutrina de Stahl, não é minha intenção substituí-la por uma teoria rigorosamente demonstrada, mas apenas por uma hipótese que me parece ser mais provável, mais conforme às leis da natureza, e que parece envolver explicações menos artificiais e menores contradições. (Knickerbocker 1962, p. 134)

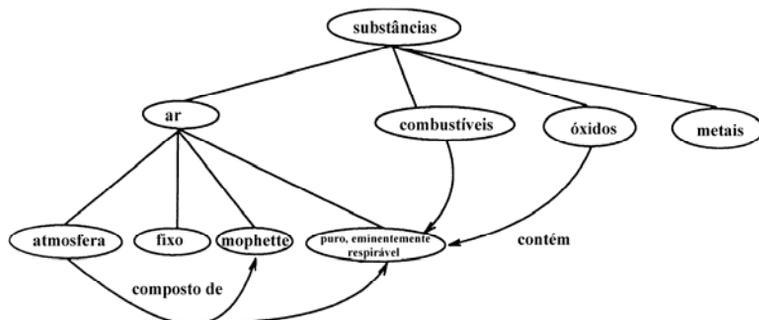


Figura 5. Fragmento da rede conceitual de Lavoisier, 1777.

8 A teoria aperfeiçoada de Lavoisier: os anos de 1780. Por volta de 1783, contudo, Lavoisier deixa os escrúpulos de lado e arrasa a teoria de Stahl em suas “Réflexions sur la Phlogistique” (Lavoisier

1862, p. 623-655). Utilizando o termo que ele cunhou em 1780, Lavoisier agora se refere ao ar puro ou ar eminentemente respirável como “princípio do oxigênio”. O termo “oxigênio” deriva das palavras gregas para “formador de ácidos”, refletindo a crença de Lavoisier, subvertida algumas décadas depois – com a decomposição do ácido hidrolórico – de que todos os ácidos contêm oxigênio.

A posição de Lavoisier é apresentada nos parágrafos iniciais:

Na série de dissertações que eu tenho apresentado à Academia, tenho revisto os principais fenômenos da química, enfatizando os que acompanham a combustão e a calcinação dos metais e, de modo geral, todas as operações onde há absorção e fixação do ar. Tenho deduzido todas estas explicações de um princípio simples, o de que o ar puro, ar vital, é composto de um princípio particular que lhe pertence e forma sua base, e que eu denominei *princípio do oxigênio*, associado com a matéria do fogo e do calor. Ao se admitir este princípio as principais dificuldades da química parecem desaparecer e todos os fenômenos seriam explicados com uma simplicidade impressionante.

Mas se tudo é explicado de modo satisfatório na química sem a ajuda do flogisto, só isto já tornaria infinitamente provável que este princípio não exista. (Lavoisier 1862, v. 2, p. 623, tradução de Thagard)

Esta citação mostra que Lavoisier havia rejeitado completamente a teoria do flogisto. Ela torna igualmente claro que seu conceito de oxigênio difere do nosso na medida em que o gás oxigênio não era em si mesmo um elemento. Ao invés, era um composto do “princípio do oxigênio” (como para Stahl, “princípio”, aqui, significa básico e original) e da matéria do fogo e do calor. Por volta de 1789, quando Lavoisier publicou seu manual, *Traité Élémentaire de Chimie*, ele se referiu à substância do fogo e do calor como “calórico”. Assim como os teóricos do flogisto assumiam que os objetos que queimam devem conter um princípio inflamável, Lavoisier pressupôs, de 1772 em diante, que o ar deve conter um princípio de calor para explicar por que a combustão produz calor. O

ar, ao invés das substâncias combustíveis, era a fonte do calor. A substância calórica foi aceita até o desenvolvimento de uma teoria cinética do calor no século seguinte. A Figura 6 mostra parte da estrutura conceitual do último sistema de Lavoisier (Lavoisier 1789). O oxigênio é agora um elemento que se encontra junto da luz, do calórico e dos recentemente descobertos gases hidrogênio e nitrogênio. Os óxidos são produzidos pela oxidação dos metais e objetos não metálicos queimam quando combinam com o oxigênio para produzir luz e calor. A comparação da Figura 6 com as Figuras 2 e 3 mostra a ocorrência de uma mudança conceitual substancial que reestruturou o esquema conceitual da química por meio de alterações significativas nas relações de tipo. A próxima seção revela que existiram igualmente mudanças importantes nas relações parte-todo.

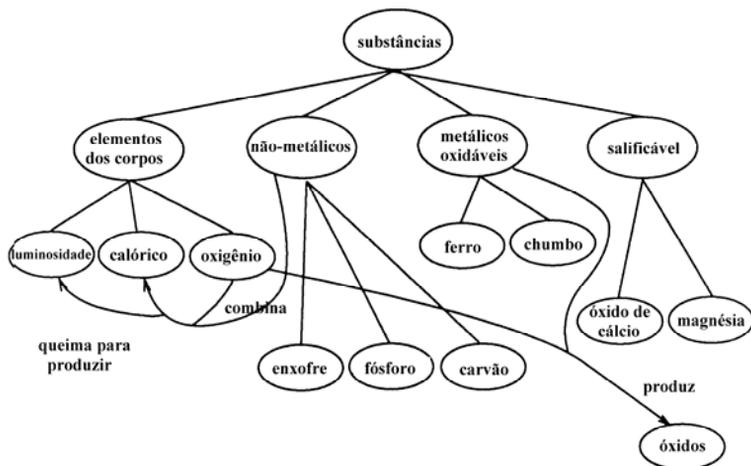


Figura 6. Fragmento da rede conceitual de Lavoisier, 1789.

Para resumir o desenvolvimento do sistema conceitual de Lavoisier, é instrutivo focar dois aspectos: o desenvolvimento do conceito de oxigênio e o grau de confiança que Lavoisier tinha no seu sistema como um todo. Em 1772, Lavoisier tinha apenas uma vaga idéia de que o ar pudesse combinar com os metais. Por volta de

1774, ele possuía muito mais evidências de que isto era verdadeiro, mas ainda não era muito claro se era o ar ou uma parte do ar que se combinava. Por volta de 1777, ele sabia que uma porção eminentemente respirável do ar era responsável pela combinação com os metais, e por volta dos anos de 1780 ele tinha imaginado o ar como um elemento que constituía parte da atmosfera. Nesta época, ele abandonou algumas idéias vagas acerca da relevância do ar para a calcinação e para a combustão (1772, 1774) em favor de uma hipótese que ele claramente percebia como uma rival à teoria do flogisto (1777), ou seja: em favor de uma teoria bem acabada que tornava dispensável a teoria do flogisto (1783). Eu tentarei agora esboçar uma teoria da mudança conceitual que possa explicar transformações como estas.

9 Em direção à uma teoria da mudança conceitual. Uma teoria da mudança conceitual que explique adequadamente revoluções conceituais deve ter vários componentes. Em primeiro lugar, ela deve ser capaz de descrever os mecanismos pelos quais os descobridores dos novos esquemas conceituais, tais como Lavoisier, podem construir seus novos sistemas por meio da criação de novos nódulos e ligações. Em segundo lugar, ela deve explicar como o novo esquema conceitual pode substituir o antigo, assim como a teoria do oxigênio substituiu a teoria do flogisto. Em terceiro lugar, ela deve fornecer uma explicação de como os outros membros da comunidade científica podem se familiarizar e aceitar o esquema conceitual recentemente construído.

Explicações de mudança científica podem ser, grosso modo, divididas em teorias de *acumulação* e teorias da *gestalt*. Nas perspectivas cumulativistas, um novo esquema conceitual se desenvolve simplesmente pelo acréscimo de novos nódulos e ligações. Uma tal teoria seria inadequada para o caso de Lavoisier, pois ela negligenciaria a intensidade com a qual as idéias foram reorganizadas. Os velhos conceitos, tais como o de flogisto, foram descartados, e um novo e completo sistema de modelos explicativos foi desenvolvido. Em 1787, Lavoisier e seus colegas propuseram um sistema completamente revisado da nomenclatura química que

substancialmente sobrevive até hoje. E, como as velhas idéias foram abandonadas e uma nova organização conceitual foi proposta, mais do que uma nova terminologia estava envolvida. Isto é evidente tanto na grande diferença entre as ligações de tipo nas Figuras 2 e 6, quanto na diferença das ligações de parte-todo das perspectivas de Stahl e Lavoisier. A Figura 7 contrasta a perspectiva da teoria do flogisto, na qual os óxidos e o flogisto são constituintes dos metais, com a perspectiva da teoria do oxigênio, na qual os metais e o oxigênio são constituintes dos óxidos. A transformação de um esquema conceitual do flogisto para um esquema conceitual do oxigênio é muito mais complexa do que o mero acréscimo de um nódulo para oxigênio e do que da eliminação de um nódulo para flogisto, pois outros nódulos relacionados são também afetados. As relações parte-todo dos conceitos de metal e de óxido mudaram de forma contundente, indo do óxido como uma parte de um metal, para um metal sendo parte de um óxido. Portanto a revolução química envolveu a reorganização de conceitos, bem como o acréscimo e a substituição dos mesmos.

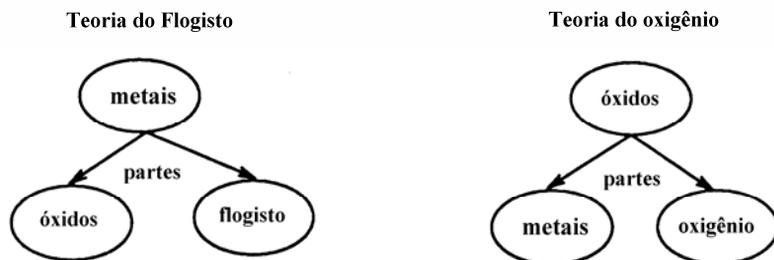


Figura 7. Mudança nas relações parte-todo.

De forma convincente, Kuhn (1970) criticou as teorias cumulativistas do crescimento científico. Seus “paradigmas” eram, entre outras coisas, radicalmente diferentes dos sistemas conceituais. Kuhn vinculou a mudança conceitual a mudanças gestálticas do tipo que ocorrem nos fenômenos perceptuais como o cubo de Necker, na Figura 8, no qual ou a face ABCD ou a face EFGH podem ser vistas como frontais. Ele utiliza o fato de Priestley nunca ter aceitado a

teoria do oxigênio como uma evidência para a incomensurabilidade de paradigmas.

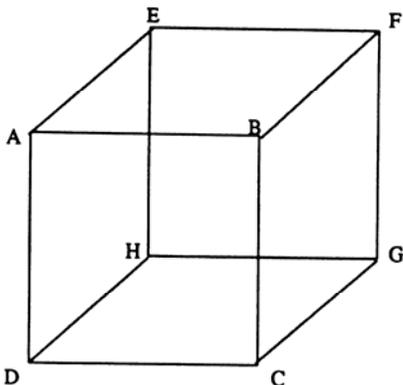


Figura 8. O cubo de Necker.

Pensar as mudanças na vertente de mudanças gestálticas tem a vantagem, em relação às teorias cumulativistas, de levar a sério o grau de reorganização conceitual que ocorre nos desenvolvimentos científicos importantes. Mas isto torna muito difícil compreender como a mudança conceitual ocorre. Vimos que Lavoisier não mudou completamente para o novo *framework* até por volta de 1777. Holmes (1985, p. 107) registra que, mesmo naquela época, Lavoisier acautelava-se nos rascunhos de seus manuscritos ao usar o termo “ar desflogistizado” de Priestley, que ele já havia descartado. Ao examinar apenas a rede conceitual de Stahl e a rede final de Lavoisier, parece que alguma mudança gestáltica ocorreu, mas a compreensão de como Lavoisier obteve sua concepção desenvolvida não pode omitir considerações acerca dos passos menores que ele deu em 1772, 1774 e 1777.

As teorias de acumulação simples ou de *gestalt* têm também dificuldade em explicar a mudança conceitual para aqueles que acompanham o descobridor na aceitação de um novo *framework* conceitual. Na revolução química, a mudança conceitual radical não ocorreu apenas para Lavoisier, mas para a maioria dos químicos e físicos. Por volta de 1796, muitos cientistas na Inglaterra, bem como

na França, tinham adotado a teoria do oxigênio (Perrin 1988). Priestley, que sustentou a teoria do flogisto até sua morte em 1804, era uma grande exceção. Kuhn (1970) sugere, seguindo uma nota de Planck, que uma perspectiva científica revolucionária só triunfa porque seus oponentes morrem. Mas a narrativa de Perrin mostra que, nos vinte anos após 1775, virtualmente toda a comunidade científica se convertera ao novo sistema de Lavoisier.

Um dos últimos grandes proponentes da teoria do flogisto foi Richard Kirwan, que publicou uma defesa da teoria do flogisto em 1784. A tradução francesa do *Essay on Phlogiston* de Kirwan foi publicada em 1788, com as respostas de Lavoisier e de seus colaboradores inseridas entre os capítulos. (Ver a segunda edição inglesa, Kirwan (1789/1968).) Estas respostas eram fascinantes porque mostram Lavoisier e outros criticando, de forma sistemática, as tentativas de Kirwan de defender a teoria do flogisto. Claramente a disputa racional era possível e, por volta de 1792, Kirwan também capitulou à teoria do oxigênio. A mudança conceitual radical não é fácil, mas não é tampouco impossível.

Precisamos de uma teoria da mudança conceitual que evite a fraqueza das perspectivas cumulativista e de *gestalt* e que explique a mudança conceitual revolucionária em Lavoisier e seus seguidores. As idéias da inteligência artificial podem ser de grande auxílio para a construção de uma tal teoria. Eu esboçarei explicações computacionais tanto do *desenvolvimento* quanto da *substituição* dos esquemas conceituais para os descobridores e também para os seguidores de um novo esquema conceitual a partir da instrução de um descobridor. Uma teoria completa da mudança conceitual deve explicar quatro fenômenos:

1. O desenvolvimento por meio da descoberta, na qual alguém compõe uma nova rede conceitual, como Lavoisier fez entre 1772 e 1777.

2. A substituição por meio da descoberta, quando a nova rede conceitual substitui completamente a antiga, como aconteceu com Lavoisier por volta de 1777.
3. O desenvolvimento por meio da instrução, quando alguém que não o descobridor se familiariza com a nova rede conceitual por terem lhe falado sobre ela.
4. A substituição por meio da instrução, quando alguém que não o descobridor adota a nova rede conceitual e abandona a antiga.

Os fenômenos 1 e 3 se adaptam bem às teorias da acumulação, ao passo que os fenômenos 2 e 4 estão na esfera das teorias da *gestalt*. Para desenvolver uma teoria geral, descreverei os mecanismos computacionais que mostram como estas mudanças conceituais podem ocorrer. (Uma defesa geral da aplicabilidade deste tipo de metodologia computacional/psicológica para a filosofia da ciência é feita alhures: Thagard (1988).)

Os mecanismos que serão descritos devem ser compreendidos como parte da psicologia dos indivíduos, mas é fácil perceber que eles possuem também conseqüências sociológicas. Uma revolução científica ocorre apenas quando uma comunidade científica como um todo adota uma nova rede conceitual. A revolução química ocorreu porque Lavoisier foi bem sucedido na construção de uma nova rede conceitual que ele transmitiu por meio da instrução, de início para seus colegas e em seguida para toda a comunidade científica.

10 O desenvolvimento de esquemas conceituais por meio da descoberta. Como se desenvolve uma rede conceitual da forma como se desenvolveu a de Lavoisier, de 1772 a 1789? Nos estágios iniciais deste desenvolvimento, Lavoisier, sem dúvida, era capaz de pensar dentro do *framework* flogístico, pois ele delineia explicações stahlianas de alguns dos fenômenos que estava investigando (Lavoisier 1774/1970). Portanto, claramente, ele tolerava a rede

conceitual do flogisto e poderia aplicá-la, ainda que estivesse a desenvolver uma alternativa. Não obstante, ele desenvolveu o novo *framework* conceitual da teoria do oxigênio utilizando suas próprias descobertas e de outros pesquisadores. Devemos considerar agora como os novos conceitos e as conexões entre eles podem ser formados.

Felizmente, a pesquisa computacional sobre a indução já sugere mecanismos para que isto funcione. O ramo da inteligência artificial denominado *machine learning* oferece uma literatura, que cresce rapidamente, sobre formação de conceitos e regras (ver, por exemplo, Michalski, Carbonell e Mitchell 1983, 1986; Holland, Holyoak, Nisbett e Thagard 1986). Os novos conceitos podem ser formados por uma variedade de métodos *bottom-up* (conduzidos por dados) e *top-down* (guiados por teorias). Não posso, aqui, tentar examinar a diversidade dos métodos disponíveis mas, como reforço, posso, em vez disso, discutir os mecanismos do tipo implementado no programa PI de inteligência artificial (“PI” significa “processo de indução” e pronuncia-se “*pie*”). Ver Thagard e Holyoak 1985; Holland, Holyoak, Nisbett e Thagard 1986, cap. 4; Thagard 1988). PI implementa a idéia central do *framework*, planejada por Holland e outros (1986), de que a indução deve ser pragmática, ocorrendo no contexto da solução de problema para garantir relevância aos objetivos do aprendiz. Existe um número infinito de conceitos triviais que um aprendiz pode formar; mas, para a eficácia do processamento, é crucial não desordenar o sistema com nódulos como “carro-azul-do-Japão-com-amortecedor-e-placa-[de]-New-Jersey”.

Em PI, novos conceitos são formados a partir dos antigos quando as combinações das características mostram-se relevantes para operações de solução de problemas do sistema. Por exemplo, PI forma o conceito teórico de uma onda sonora após postular que sons são ondas para explicar por que os sons se propagam e refletem. A combinação conceitual “onda sonora” é interessante ao sistema porque ela não é simplesmente a soma de som e onda, já que ondas

de água, a fonte do conceito relevante de onda, movimentam-se mais propriamente em planos únicos do que em vários planos, como faz o som. Os métodos PI de formação de conceito mostram como novos nódulos similares aos que estão nos *frameworks* conceituais, tais como os de Lavoisier, podem ser formados de modo pragmaticamente forçado. Por volta de 1777, ele tinha formado um novo conceito de “ar puro” ou “ar eminentemente respirável”, que depois foi renomeado de “oxigênio”. Este nódulo tem, obviamente, grande valor pragmático, pois, associadas a ele, encontram-se numerosas regras altamente preditivas a respeito das propriedades de um tal ar: ele garante a combustão e a respiração melhor do que o ar ordinário, e parece, para Lavoisier, ocupar um papel nos ácidos. Os experimentos conduzidos em 1775 e 1776 mostram a utilidade de um novo conceito de ar eminentemente respirável, diferenciado do ar comum. (Para uma discussão psicológica da diferenciação de conceito, ver Smith, Carey e Wiser (1985).)

No sistema amadurecido de Lavoisier, o gás oxigênio consiste no princípio do oxigênio mais o calórico. O princípio do oxigênio é uma entidade teórica, não separável em si mesmo. Em PI, tais conceitos teóricos podem ser formados por combinação conceitual, como mostra o exemplo da “onda sonora”. Não posso, agora, sustentar que o conceito de oxigênio de Lavoisier foi desenvolvido com a utilização dos mecanismos do modelo PI, pois a demonstração desta tese exigiria pesquisas históricas ainda mais detalhadas, além da simulação computacional em PI dos desenvolvimentos mencionados. Mas pelo menos está claro como mecanismos, como estes de PI, podem contribuir para a formação de novos nódulos como o de oxigênio. Podemos conjecturar que Lavoisier combinou os conceitos “ar” e “puro” por causa dos significados anteriores destes conceitos e das propriedades das amostras de gás às quais o conceito era aplicado: as chamas queimavam de forma mais brilhante e os animais sobreviviam mais tempo nelas. Os conceitos e regras existentes têm como

conseqüência a formação de novos conceitos, que então produzem a formação de novas regras.

Dada a presença de nódulos apropriados, como são estabelecidas as ligações entre eles? No caso da química, as ligações apropriadas parecem ser regras gerais como:

R1: O enxofre ganha peso quando queima.

R2: Óxidos contêm ar.

Embora à primeira vista estas duas regras pareçam ser muito similares, mecanismos bastante diferentes são exigidos para formá-las. Claramente, R1 é uma generalização de observação experimental, baseada nos experimentos que Lavoisier realizou em setembro de 1772. Lavoisier obteve uma amostra de enxofre, realizou cuidadosos experimentos com lentes poderosas, e concluiu que o enxofre ganha peso ao queimar (Guerlac 1961). A generalização – a formação de enunciados gerais cuja forma mais simples é “Todos os A são B” – tem sido muito investigada no campo da *machine learning* (ver, por exemplo, Langley, Simon, Bradshaw e Zytkow (1987)). Em PI, a generalização leva em conta não apenas o número de instâncias que garante a generalização, mas também o conhecimento anterior da variedade de tipos de coisas envolvidas. Parece que Lavoisier não precisou de muitas amostras de enxofre para chegar à sua generalização, pois ele esperava – a partir do conhecimento anterior acerca das substâncias e da combustão – que sua amostra fosse representativa do enxofre em geral.

A generalização a partir dos dados experimentais é crucial para a formação de uma importante categoria de regras científicas, mas não seria suficiente para a formação de leis teóricas que iriam além do que foi observado. A química do século dezoito – para não mencionar a física moderna – possuía conceitos que pretendiam referir-se a um grande número de entidades postuladas. O estoque de Lavoisier abrangia o princípio do oxigênio e do calórico; o flogisto,

efetivamente, era a entidade teórica preeminente de seus oponentes. Na física moderna temos os *quarks* e outros constituintes subatômicos postulados da matéria. As regras envolvendo conceitos teóricos que se referem a entidades inobserváveis não podem ser derivadas de generalizações empíricas, pois não possuímos instâncias observadas a partir das quais se possa generalizar.

Para a formação de regras que forneçam ligações com conceitos teóricos, precisamos de um mecanismo diferente, que denominei *regra da abdução* (Thagard 1988, cap. 4). Pierce (1931-1958) cunhou o termo “abdução” para se referir à formação de hipóteses explicativas. Seu esquema geral era:

A evidência intrigante E deve ser explicada.

A hipótese H explicaria E .

Portanto, talvez H .

Este esquema, contudo, não parece uma possível fonte de descobertas, pois dá a impressão de que H já esteja constituído na segunda premissa. Mas a abdução em PI não tem tal problema pois, utilizando uma representação similar à do cálculo de predicados para suas regras, podemos inferir o seguinte:

A evidência intrigante $G(a)$ deve ser explicada, ou seja, por que a é um G . A regra $(x) (Fx \rightarrow Gx)$ está disponível, isto é, todos os F são G .

Portanto, talvez $F(a)$, isto é, a pode ser F .

Um tal esquema pode ser aplicado à argumentação original de Lavoisier. Recorde-se que, no verão de 1772, suas especulações de que os óxidos continham ar poderiam estar baseadas em dois fenômenos: a efervescência e o ganho de peso na calcinação. Para uma porção particular de metal m , portanto, podemos imaginá-lo tentando explicar por que m efervesce e ganha peso durante a calcinação. Obtemos então a seguinte abdução:

Explicar: *efervesce* (m)

Regra: *contém* (x, ar) \rightarrow *efervesce* (x)

Hipótese abductiva: *contém* (m, ar)

Uma forma similar de argumento poderia fazer uso da regra de que se algo é acrescentado a uma substância então ela ganha peso, em conjunto com a informação adicional de que o pedaço de metal estava circundado pelo ar durante a calcinação, para abduzir que o pedaço de metal contém ar após a calcinação. A regra de abdução, portanto, é antes a *generalização a partir de hipóteses abduzidas* do que a generalização a partir de instâncias observadas. A partir da hipótese duplamente abduzida de que *m* contém ar, podemos generalizar que todas as instâncias deste tipo de metal contém ar.

Portanto percebemos em princípio como as ligações na forma de regras podem ser estabelecidas por generalização a partir de experimentos e a partir da formação de hipóteses teóricas. Os mecanismos até aqui discutidos são os mecanismos de aprendizagem geral que se aplicam a qualquer domínio no qual as instâncias são encontradas e os fatos devem ser explicados. O caso da química sugere, contudo, que heurísticas especiais podem ser úteis para a formação de regras gerais. Langley e outros (1987, p. 228) propõem a heurística:

COMPONENTES DE INFERÊNCIA

Se A e B reagem para formar C,

ou se C se decompõe em A e B,

então se infere que C é composto de A e B.

Exemplos específicos do raciocínio que parece instanciar esta heurística podem ser encontrados em Lavoisier (1774/1970). Contudo, a postulação do flogisto por parte de Stahl, bem como os princípios liquidificáveis e vitrificáveis dos minerais, poderiam ser compreendidos como a aplicação de uma heurística diferente:

PRINCÍPIO DE INFERÊNCIA

Se A tem uma característica importante C,
então A contém um princípio P que é responsável por C.

Esta heurística tem um tom não-moderno, mas Lavoisier parece ter usado algo parecido ao propor o calórico (o princípio do calor) e o princípio do oxigênio.

A heurística COMPONENTES DE INFERÊNCIA está no centro da análise de Langley e outros (1987) acerca do desenvolvimento das teorias do flogisto e do oxigênio (ver também Zytkow e Simon 1986; Rose e Langley 1986). Mas é importante reconhecer que ela é bastante guiada por dados para descrever a formação daquelas teorias. Ela opera com *inputs* como:

(*inputs* de reação [carvão, ar] *outputs* [flogisto, cinza, ar])
(*inputs* de reação [cal vermelha do mercúrio] *outputs* [mercúrio, oxigênio])

Estas descrições são altamente teóricas, pois incluem referências ao flogisto e ao oxigênio, que eram entidades teóricas não observadas diretamente em quaisquer experimentos. COMPONENTES DE INFERÊNCIA, portanto, não modelam a descoberta das teorias do flogisto e do oxigênio, mas modelam apenas um estágio posterior, depois que os conceitos cruciais de flogisto e de oxigênio foram formados. Para formar tais conceitos, mais mecanismos guiados por teoria são exigidos, tais como combinação conceitual, abdução e a heurística PRINCÍPIO DE INFERÊNCIA.

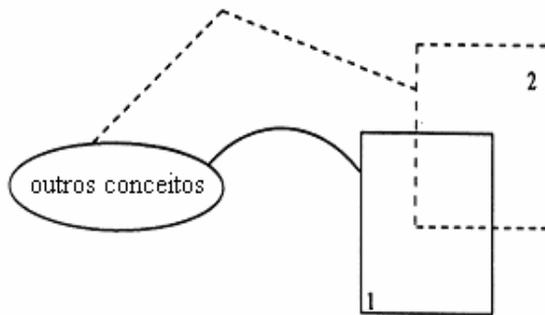
Novos esquemas conceituais, tais como os de Lavoisier, podem ser desenvolvidos utilizando-se mecanismos de descoberta tais como formação de conceito, generalização, regra da abdução e heurística especial. Como tais estruturas podem substituir estruturas rivais é uma questão distinta.

11 Substituição por meio da descoberta. Como uma nova rede conceitual substitui uma existente? Esta substituição não pode simplesmente ser o caso de acrescentar novas proposições e substituir as antigas. As redes conceituais funcionam como totalidades integradas para produzir explicações. A supressão da teoria do flogisto não foi consumada pela rejeição de nódulos ou ligações particulares, mas pelo desafio à estrutura inteira e pela sua substituição por aquilo que em 1777 era uma alternativa bem desenvolvida. Teorias de acumulação são adequadas para construir uma nova rede: a discussão da seção anterior poderia ser considerada parte de uma teoria computacional da acumulação. Mas elas não explicam como sistemas inteiros podem ser substituídos.

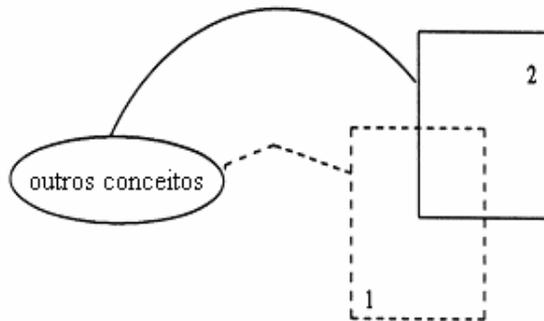
Teorias de *gestalt* parecem mais plausíveis para a substituição, pois elas permitem que uma rede inteira de relações possa, imediatamente, emergir em uma posição nova. Mas elas têm falhado em dizer como a nova rede pode ser construída e como a substituição pode ocorrer. Como uma forma rica de metáfora gestaltista considere-se a Figura 9. O estágio (a) mostra uma rede conceitual 1 com ligações para outros conceitos. O estágio (b) mostra uma nova rede conceitual 2 formada parcialmente ao fundo, também com ligações com outros conceitos. Que outros conceitos estejam vinculados a ambas as redes colide com a sugestão de Kuhn de que, nas revoluções científicas, “o mundo muda”. Embora Priestley e Lavoisier tivessem esquemas conceituais bastante diferentes em 1777, eles estavam de acordo acerca de muitas técnicas experimentais e observações. Assim, mesmo uma mudança conceitual revolucionária ocorre contra um *background* de conceitos que tem relativa estabilidade. Finalmente, na Figura 9, o estágio (c) mostra a rede 2 completamente desenvolvida e chegando ao primeiro plano, de modo que a rede 1 vai se desfazendo gradualmente. Ela não desaparece: Lavoisier poderia falar a linguagem do flogisto quando isto fosse necessário. A questão chave a ser respondida é: o que faz com que a rede 2 ocupe o primeiro plano?



(a) rede conceitual antiga



(b) nova rede parcialmente construída



(c) a nova rede substitui a antiga

Figura 9. Como uma nova rede supera uma rede antiga.

Uma resposta computacional possível está baseada na regra de competição. Holland (1986) descreve os sistemas de regras nos quais as regras têm *forças* que variam no tempo dependendo do grau

de contribuição delas à performance do sistema. Similarmente, PI atribui força crescente a regras que figuraram significativamente na solução de problemas. Muitos fenômenos cognitivos podem ser compreendidos em termos de como as regras com forças diferentes entram na *competição* umas com as outras (Holland, Holyoak, Nisbett e Thagard 1986). Nos sistemas computacionais, a própria dedução deve ser constringida pragmaticamente de modo a garantir que a dedução obtida seja relevante para os objetivos do sistema. A lógica formal contém, por exemplo, a regra da adição: p para inferir p ou q . Mas qualquer humano ou qualquer computador que usasse esta regra dedutivamente válida com displicência rapidamente se atrapalharia com teoremas inúteis. Ao decidir que regras aplicar, a utilidade é tão importante quanto a probabilidade, e a força da regra captura aspectos de ambas as noções.

Suponhamos que as forças das regras que fornecem as ligações entre os conceitos possam ser intensificadas por meio do uso bem sucedido destas regras. No contexto científico, o sucesso consiste principalmente em fornecer explicações. Uma explicação é uma cadeia de associações e inferências que produzem uma resposta desejada (para uma discussão da explicação como um processo computacional, ver Thagard (1988)). Quando uma explicação é bem sucedida, as ligações que a tornaram possível podem todas ser fortalecidas. O uso freqüente de uma rede conceitual em explicações aumentaria gradualmente a força de todas as suas regras, de uma forma tal que as explicações pudessem se tornar mais fortes do que as regras na rede existente. É neste ponto que o estágio (b) da Figura 9 apresenta o caminho para o estágio (c), como o resultado de regras mais fortes emergindo e dominando. Isto parece ser o que aconteceu no caso de Lavoisier. Em 1776, ele ainda estava pensando em termos de flogisto. Mas, por volta de 1777, o sucesso explicativo de sua rede baseada no ar eminentemente respirável era tão evidente que as ligações em sua rede eram mais fortes do que as ligações em sua antiga rede. Esta substituição de um esquema conceitual por outro recentemente desenvolvido ocorre se o novo esquema obtém aplicações suficientes de solução de problemas de modo que suas

regras tornam-se mais fortes do que as regras do esquema antigo. Esta transformação pode ser um processo inconsciente que ocorre de forma lenta. As ligações antigas não são descartadas: elas simplesmente tornam-se fracas o suficiente para que não mais figurem nos processos mentais do descobridor.

Esta explicação da regra da competição da teoria da substituição tem alguma plausibilidade, mas não explica o caráter holístico das mudanças em sistemas conceituais. Os cientistas não têm de usar repetidamente regras particulares para construir os sistemas conceituais, e as regras não são construídas isoladamente umas das outras. Em vez disso, elas podem causar mudanças dramáticas em esquemas conceituais quando um conjunto de hipóteses aparecer a elas como um todo que possui mais *coerência explicativa* do que outro. Alhures desenvolvi uma teoria da coerência explicativa que está implementada num programa conexionista de computador chamado ECHO, que avalia a coerência das hipóteses com relação à evidência e com relação a hipóteses alternativas (Thagard 1989; Thagard e Nowak 1988; a aparecer; Ranney e Thagard, 1988). O ECHO foi aplicado ao argumento de Lavoisier de 1783 contra a teoria do flogisto, ao argumento de Darwin da evolução pela seleção natural, e a diversos outros exemplos extraídos da ciência passada e recente e do raciocínio cotidiano. Infelizmente, as restrições de espaço não permitem, aqui, a recapitulação de como, de acordo com esta teoria da coerência explicativa, podem ser feitos julgamentos holísticos de aceitabilidade. Posso apenas afirmar que ECHO mostra como novas redes conceituais podem substituir, de forma holística e racional, redes conceituais antigas.

12 Desenvolvimento e substituição por meio da instrução. O desenvolvimento conceitual de Lavoisier exigiu tanto o desenvolvimento da teoria do oxigênio quanto o aumento da coerência no ponto onde ela eclipsava a teoria do flogisto. Da mesma forma, os cientistas que aprendem acerca do novo

framework por meio da instrução precisam tanto adquiri-lo quanto fortalecê-lo no ponto no qual ele pode tomar a dianteira.

Adquirir nódulos e ligações por meio da instrução é mais fácil do que adquiri-los por meio da descoberta. Novos conceitos podem ser apreendidos por comunicação verbal: um teórico do flogisto poderia apreender “gás eminentemente respirável” a partir da convivência ou a partir dos escritos de Lavoisier ou de seus colegas. As regras que um descobridor teria de adquirir por generalização ou abdução podem simplesmente ser comunicadas a outra pessoa, que ficaria livre do esforço inicial de formá-las. Lavoisier, com efeito, não descobriu por si só todas as leis empíricas que se encaixavam em seu novo sistema; mas poderia, por meio da instrução, adquirir resultados cruciais como o de que os metais ganham peso na calcinação.

Como os descobridores, aqueles que adquirem uma rede conceitual por meio de instrução têm de integrar e fortalecer a rede antes que ela possa ser inteiramente usada. A educação não é fácil. Apresentar conceitos e regras para alguém por meio da repetição é menos importante do que desenvolver esta informação numa forma organizada que possa ser aplicada. Impor uma rede conceitual à ciência exige que os cientistas desenvolvam regras e procedimentos que sejam suficientemente reforçados e coerentes para substituir regras existentes que, de outro modo, teriam precedência.

O mecanismo mais importante pelo qual este fortalecimento se estabelece é o argumento *científico*. Seria ingênuo supor que argumentos convencem as pessoas diretamente. Raramente, em uma questão complexa e importante, você pode simplesmente dizer a alguém: aqui estão as premissas que você aceita, e com isto segue-se a conclusão, portanto aceite-a. Sempre existem respostas disponíveis para argumentos. Mas disto não se segue que um argumento seja fútil! Pois pelo processo de argumento e de posterior reflexão sobre ele, pode-se chegar à revisão das forças das ligações conceituais, permitindo a um esquema alternativo tomar a dianteira. Os tipos de argumentos que Lavoisier deu em favor de sua teoria em 1777 e 1783, assim como as respostas a defensores [da teoria do flogisto]

como Kirwan, tiveram grande efeito e conduziram à conversão geral. Os argumentos acerca do sucesso explicativo da teoria do oxigênio e da fraqueza da teoria do flogisto conduziram muitos cientistas da época a aceitar a primeira. O desenvolvimento por meio de instrução, apontando os nódulos e ligações exigidos, não era suficiente: as pessoas tinham de usar a nova rede o suficiente para reforçar suas ligações no ponto onde ela poderia tomar a dianteira. Os químicos que resistiram às idéias de Lavoisier, não obstante, repetiram seus experimentos e portanto adquiriram partes de seu esquema conceitual. Perrin (1988) registra que levou muitos anos para as pessoas passarem da oposição para a aceitação das idéias de Lavoisier. Na minha explicação, estes anos foram gastos construindo a nova rede e reforçando suas ligações de modo a que a nova rede parecesse mais coerente do que a antiga. A reorganização conceitual das hierarquias de tipo e de parte-todo levou tempo.

Isto mostra como a mudança conceitual é possível, mas também torna claro por que ela pode ser muito difícil. Lavoisier lutou durante anos para construir o edifício conceitual que se transformou na teoria do oxigênio. Não é surpreendente que algumas vezes leve anos para que defensores do flogisto, como Kirwan, se convertam. Por que Priestley não fez a mudança conceitual? Em 1796, Priestley publicou suas *Considerations on the Doctrine of Phlogiston*, na qual criticou a “teoria anti-flogística” por estar baseada em poucos experimentos que também poderiam ser explicados pela teoria do flogisto. Priestley, claramente, estava consciente dos argumentos dos teóricos do oxigênio, pois ele (ironicamente?) dedica seu panfleto aos colaboradores sobreviventes de Lavoisier que tinham escrito as respostas a Kirwan! Os argumentos de Priestley são muito fracos, e demonstram desconhecimento de alguns experimentos que tinham sido realizados, mas não parecem ser muito diferentes dos tipos de argumentos a respeito de dados e teorias usados por Lavoisier. Ihde (1980, p. 84) registra que Priestley hesitou na direção das idéias de Lavoisier na metade de 1780, mas voltou para a posição do flogisto por causa de James Watt. Como qualquer outra nova teoria, a teoria

do oxigênio tinha problemas internos que a tornavam aberta à crítica. Priestley (1796) reconhecia que o peso do flogisto nunca tinha sido estabelecido, mas apontava que o mesmo era verdadeiro com relação ao calórico de Lavoisier.

Minha explicação de por que Priestley nunca se tornou um teórico do oxigênio é dupla. Em primeiro lugar, como um teórico preeminente do flogisto, ele possuía a rede conceitual mais elaborada para a teoria do flogisto e, tendo-a usado mais do que os outros, apreciava sua coerência com mais intensidade. Em segundo lugar, ele nunca usou, de forma suficiente, a rede do oxigênio, e não avaliou que ela era mais coerente do que a teoria do flogisto. Kirwan, em contraste, por meio do exercício de argumentar contra os teóricos do oxigênio, conseguiu perceber que o sistema de explicações oferecido pela teoria do oxigênio era mais coerente do que aquele oferecido pela perspectiva que ele inicialmente defendeu.

Outras explicações da resistência à mudança de teoria são possíveis. Kunda (1987) mostrou que a motivação pode conduzir as pessoas a resistir a conclusões que as tornariam infelizes. Bebedores de café, por exemplo, são menos propensos a aceitar a evidência de que o café causa doenças. Entretanto não temos evidência de que de que a obstinação de Priestley de aceitar a teoria do flogisto tenha sido motivada por objetivos pessoais.

A Figura 10 resume os mecanismos que postulei para explicar as mudanças conceituais em Lavoisier e naqueles que alcançaram o *framework* conceitual do oxigênio a partir de Lavoisier. O desenvolvimento por meio da descoberta exige mecanismos para formação de conceito, generalização, e formação de hipóteses tais como aquelas que estão sendo investigadas em PI e em outros programas *learning machine*. A substituição de um sistema inteiro de conceitos e regras ocorre em virtude de princípios de coerência explicativa que podem ser implementados por um algoritmo para selecionar conjuntos de hipóteses coerentes. Aqueles que adquirem um sistema conceitual a partir de seu descobridor devem, em primeiro lugar, construir, por meio da instrução e do uso, um conjunto integrado de conceitos e regras; em segundo lugar

devem perceber, por meio da argumentação, sua coerência explicativa.

	descoberta	instrução
desenvolvimento	formação de conceitos	termos introducidos
	generalização	experimentos relatados
	formação de hipóteses	hipóteses defendidas
substituição	uso da nova rede revela sua coerência explicativa	os argumentos dos defensores da nova rede revelam sua coerência explicativa

Figura 10. Mecanismos de mudança conceitual.

13 Conclusão. Esbocei uma teoria da mudança conceitual com a intenção de explicar os desenvolvimentos revolucionários tanto dos descobridores quanto dos que, subsequentemente, adotaram idéias científicas revolucionárias. Muito precisa ser feito para explicar melhor a teoria; em especial, como integrar os mecanismos para o desenvolvimento por meio de descoberta e como ajustar a força das regras com as quais se determina a coerência explicativa da hipótese. A generalidade da teoria deve ser questionada. Estes mecanismos de desenvolvimento e de substituição aplicam-se a outros episódios revolucionários na história da ciência, tais como aqueles associados aos nomes de Copérnico, Newton, Darwin e Einstein? Investigações preliminares sugerem que a mudança conceitual, nestes casos, envolveu igualmente alterações substanciais nas hierarquias de tipo e/ou de parte-todo. As perspectivas de Copérnico implicavam que a terra, ao invés de ser um planeta *sui generis*, era um tipo de planeta. Darwin não apenas

mostrou que os humanos são um tipo de animal, mas mudou fundamentalmente a noção de “tipo”, completando, com considerações da descendência evolucionária, os julgamentos de similaridade. Einstein nos deu uma nova forma de pensar as relações parte-todo, substituindo as noções cotidianas de espaço e de tempo pelo conceito de espaço-tempo. A revolução nas ciências da terra alterou decisivamente as idéias acerca da crosta da terra, com os continentes e o fundo do mar concebidos como *tipos* de crosta flutuante ao invés de *partes* de uma crosta imóvel (Thagard e Nowak, a aparecer).

Num nível diferente, minha teoria da mudança conceitual se aplica ao desenvolvimento das idéias nas crianças? Carey (1985) sugeriu que as crianças passam por uma reestruturação fundamental de suas idéias biológicas durante a idade dos 4 aos 10 e ela compara, de forma explícita, esta reestruturação com as revoluções científicas. Brewer (1987) investe em especulações semelhantes acerca da aprendizagem da astronomia pelas crianças. McCloskey (1983) descreve a dificuldade das crianças (e de alguns adultos) em avaliar a física newtoniana por causa da teoria do *impetus*. Se estas mudanças nos indivíduos são de fato análogas à mudança revolucionária na ciência, então uma teoria das revoluções conceituais poderia muito bem ser aplicada às pessoas em geral, bem como aos cientistas nas aflições da revolução. (Ver também Nersessian e Resnick(1989).)

As teses deste artigo, contudo, não vão além da revolução química. Eu esquematizei seus principais estágios e esbocei os mecanismos computacionais de um tipo potencialmente adequado para explicar o desenvolvimento das idéias de Lavoisier e seus seguidores. Os diagramas conceituais foram utilizados para transmitir a complexidade da organização dos conceitos de Stahl e de Lavoisier, e a conseqüente dificuldade, ainda que não a impossibilidade, da movimentação de um *framework* para outro. O resultado é uma perspectiva que não subestima a magnitude da mudança conceitual revolucionária na química, mas, não obstante, percebe-a como surgindo a partir dos mecanismos computacionais

especificáveis em operação nas mentes de Lavoisier e de outros que abandonaram a teoria do flogisto em favor da teoria do oxigênio.

Referências

- BARR, A. and FEIGENBAUM. E. (1981), *Handbook of Artificial Intelligence*. v. 1. Los Altos: Kaufmann.
- BRACHMAN. R., and LEVESQUE. H. (eds.) (1985), *Radings in Knowledge Representation*. Los Altos, CA: Morgan Kaufmann.
- CAREY, S. (1985), *Conceptual Change in Childhood*. Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press.
- COHEN. I. B. (1985), *Revolution in Science*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- CONANT. J. (1964), *Harvard Case Histories in Experimental Science*, v. 1. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- CRUSE. D. (1986), *Lexical Semantics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- DARDEN. L., and RADA, R. (1988), "Hypothesis Formation Using Part-Whole Interrelations". in D. HELLMAN (ed.), *Analogical Reasoning*. Dordrecht: Reidel. p. 341-375.
- GUERLAC, H. (1961), *Lavoisier-The Crucial Year*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- HOLLAND, J. H. (1986), "Escaping Brittleness: The Possibilities of General Purpose Machine Learning Algorithms Applied to Parallel Rule-based Systems", in R. S. MICHALSKI. J. G. CARBONELL, and T. M. MITCHELL, (eds.), *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*, v. 2. Los Altos: Kaufmann, p. 593-623.
- HOLLAND, J., HOLYOAK, K., NISBEU, R., and THAGARD, P. (1986), *Induction: Processes of Inference, Learning, and Discovery*. Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press.
- HOLMES, F. (1985), *Lavoisier and the Chemistry of Life*. Madison, WI: University of Wisconsin Press.
- IHDE, A. (1980), "Lavoisier and Priestley", in L. KIEFT and B. WILLEFORD (eds.), *Joseph Priestley*. Lewisburg, PA: Bucknell University Press, p. 62-91.

- KIRWAN, R. (1789/1968), *An Essay on Phlogiston and the Constitution of Acids*. New impression of second English edition. London: Cass.
- KNICKERBOCKER, W. (1962), *Classics of Modern Science*. Boston: Beacon.
- KUHN, T. (1970), *Structure of Scientific Revolutions* (2nd edn.). Chicago: University of Chicago Press.
- KUNDA, Z. (1987), "Motivation and Inference: Self-serving Generation and Evaluation of Causal Theories", *Journal of Personality and Social Psychology* 53: 636-647.
- LANGLEY, P., SIMON, H., BRADSHAW, G., and ZYTKOW, J. (1987), *Scientific Discovery*. Cambridge, MA: Bradford Books/MIT Press.
- LAVOISIER, A. (1862), *Oeuvres*. 6 vols. Paris: Imprimerie Impériale.
- _____. (1774/1970), *Essays Physical and Chemical*. Trans. by Thomas Henry of *Opuscules Physiques et Chimiques*. 1774. Second English edition. London: Cass.
- _____. (1789), *Traite Élémentaire de chimie*.
- LEICESTER, H., and KRICKSTEIN (1952), *A Source Book in Chemistry*. New York: McGraw-Hill.
- McCLOSKEY, M. (1983), Intuitive Physics. *Scientific American* 24: 122-130.
- MICHALSKI, R., CARBONELL, J., and MITCHELL, T. (eds.) (1983), *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach*. Palo Alto: Tioga.
- _____. (1986), *Machine Learning*. Volume II. (eds.) Los Altos: Morgan Kaufmann.
- MILLER, G., and JOHNSON-LAIRD, P. (1976), *Language and Perception*. Cambridge: Cambridge University Press.
- NERESSIAN, N., (1988), "Conceptual Change in Science and in Science Education", *Syllthese* 80, 163-183.
- NERESSIAN, N., and RESNICK, L., (1989), "Comparing Historical and Intuitive Explanations of Motion: Does Naive Physics

Have a Structure?", *Proceedings of the Eleventh Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, p. 412-418.

PARTINGTON, J. (1961), *A History of Chemistry*. 4 vols. London: Macmillan.

PEIRCE, C. (1931-1958), *Collected Papers*. 8 vols. Edited by C. Hartshorne, P. Weiss, and A. Burks. Cambridge, MA: Harvard University Press.

PERRIN, C. (1981), "The Triumph of the Antiphlogisticians", in H. Woolf (ed.), *The Analytic Spirit*. Ithaca: Cornell University Press, p. 40-63.

_____. (1988), "The Chemical Revolution: Shifts in Guiding Assumptions", in A. DONOVAN, L. LAUDAN, R. LAUDAN (eds.), *Scrutinizing Science: Empirical Studies of Scientific Change*. Dordrecht: Kluwer, p. 105-124.

PRIESTLEY, J. (1796/1929), *Considerations on the Doctrine of Phlogiston. and the Decomposition of Water*. Princeton: Princeton University Press.

RANNEY, M., and THAGARD, P. (1988), "Explanatory Coherence and Belief Revision in Naive Physics". *Proceedings of the Tenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, p. 426-432.

ROSE, D., and LANDLEY, P. (1986), "Chemical Discovery as Belief Revision", *Machine Learning* 1, p. 423-452.

SMITH, C., CAREY, S., and WISER, M. (1985), "On Differentiation: A Case Study of the Development of the Concepts of Size, Weight, and Density", *Cognition* 21: 177-237.

STAHL, G. (1723/1730), *Philosophical Principles of Universal Chemistry*. Trans. by Peter Shaw of *Fundamenta Chymiae*, 1723. London: John Osborn and Peter Longman.

THAGARD, P. (1984), "Frames, Knowledge, and Inference", *Synthese* 61: 233-259.

_____. (1988), *Computational Philosophy of Science*. Cambridge, MA: The MIT Press/Bradford Books.

_____. (1989), "Explanatory Coherence". *Behavioral and Brain Sciences* 12: 435-467.

- _____. (1990), "Concepts and Conceptual Change", *Synthese*.
- THAGARD, P., and HOLYOAK, K. (1985), "Discovering the Wave Theory of Sound: Induction in the Context of Problem Solving". *Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Los Altos: Morgan Kaufmann. p. 610-612.
- THAGARD, P., and NowAk, G. (1988), "The Explanatory Coherence of Continental Drift", in A. FINE and J. LEPLIN (eds.), *PSA 1988*, v. 1. East Lansing, Mich.: Philosophy of Science Association, p. 118-126.
- _____. (forthcoming), "The Conceptual Structure of the Geological Revolution", in I. SHRAGER and P. LANGLEY (eds.), *Computational Models of Discovery and Theory Formation*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- VOSNIADOU, S., and BREWER, W. (1989), "The Concept of the Earth's Shape", unpublished manuscript, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- WINSTON, M., CHAFFIN, R., and HENMANN, D. (1987), "A Taxonomy of Part-Whole Relations", *Cognitive Science* 11: 417-444.
- ZYTKOW, J. and SIMON, H. (1986), "A Theory of Historical Discovery: The Construction of Componential Models", *Machine Learning* 1: 107-137.