

Este arquivo contém o texto completo do seguinte trabalho:

MARTINS, Roberto de Andrade. Mayer e a conservação da energia. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* (6): 63-95, 1984.

Este arquivo foi copiado da biblioteca eletrônica do Grupo de História e Teoria da Ciência <<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>> da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), do seguinte endereço eletrônico (URL):

<<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-18.pdf>>

Esta cópia eletrônica do trabalho acima mencionado está sendo fornecida para uso individual, para fins de pesquisa. É proibida a reprodução e fornecimento de cópias a outras pessoas. Os direitos autorais permanecem sob propriedade dos autores e das editoras das publicações originais.

---

This file contains the full text of the following paper:

MARTINS, Roberto de Andrade. Mayer e a conservação da energia. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* (6): 63-95, 1984.

This file was downloaded from the electronic library of the Group of History and Theory of Science <<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>> of the State University of Campinas (UNICAMP), Brazil, from following electronic address (URL):

<<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-18.pdf>>

This electronic copy of the aforementioned work is hereby provided for exclusive individual research use. The reproduction and forwarding of copies to third parties is hereby forbidden. Copyright of this work belongs to the authors and publishers of the original publication.

## ARQUIVO

### MAYER E A CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

ROBERTO DE A. MARTINS\*

*Instituto de Física — Universidade Estadual de Campinas*

#### I. A Obra de Mayer

Foi na década de 1850 que a lei da conservação da energia passou a ser aceita como um dos princípios fundamentais da Física. Para se chegar a isso, foi necessário o trabalho de muitos pesquisadores que contribuíram de diferentes formas para a elaboração da teoria e sua fundamentação experimental. Essa história é extremamente rica e complexa, e não pode ser totalmente descrita no âmbito de um único artigo. Aqui, apresentaremos apenas alguns aspectos dessa história, centralizando nossa atenção na obra de Julius Robert Mayer (1814-1878), conhecido como um dos proponentes da lei da conservação da energia. Começaremos descrevendo a evolução das idéias de Mayer, e depois estudaremos os trabalhos de Joule e de outros autores que contribuíram igualmente para o estabelecimento dessa lei.<sup>1</sup>

Mayer era filho de um farmacêutico de Heilbronn, e sob sua influência estudou medicina, tendo recebido seu título em 1838. Foi na prática dessa profissão que Mayer chegou à concepção do princípio da conservação da energia. Isso pode parecer estranho, mas Helmholtz, outro médico que ajudou a desenvolver a lei da conservação da energia, esclarece este ponto:

"Ora, à primeira vista, parece muito notável e curioso que mesmo fisiólogos

\* Pesquisador subvencionado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

<sup>1</sup> Há muitos livros bem documentados a respeito da história da conservação da energia. Veja-se, por exemplo: Planck, Max, *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*. Leipzig: Barth, 1913; Mach, Ernst, *History and Root of the Principle of Conservation of Energy*. Chicago: Open Court, 1911; Hiebert, Erwin N. *The Historical Roots of the Principle of Conservation of Energy*. Madison: University of Wisconsin Press, 1962; Meyerson, Émile, *Identité et Réalité*. Paris: J. Vrin, 1951. Ver as bibliografias: Brown, Theodore M., "Resource letter EEC-1 on the evolution of energy concepts from Galileo to Helmholtz", *American Journal of Physics* 33 (1965), pp. 759-965; Hesse, Mary, "Resource letter PhM-1 on philosophical foundations of classical mechanics", *American Journal of Physics* 32 (1964), pp. 905-911. Sobre Mayer: Heimann, P. M. "Mayer's concept of 'force'", *Historical Studies in the Physical Sciences* 7 (1976), pp. 277-296. Há uma biografia, acompanhada por traduções de seus principais trabalhos, em: Lindsay, Robert B. *Julius Robert Mayer: Prophet of Energy*. Oxford: University Press, 1973.

pudessem chegar a tal lei. Parece mais natural que ela fosse detectada por filósofos naturais ou engenheiros, como o foi na Inglaterra; mas existe, realmente, uma íntima conexão entre as questões fundamentais da engenharia e as questões fundamentais da fisiologia com a conservação da (energia)."<sup>2</sup>

Vejamos, então, como um problema fisiológico conduziu Mayer a este tema. Pouco tempo após se formar, Mayer viajou a Paris, e terminou por empregar-se e embarcar em um navio holandês que viajava para a Batávia. A viagem completa durava 110 dias, e durante esse tempo a pressão de trabalho era reduzida. No verão de 1840, estando o navio no porto de Surabaya, a noroeste de Java, Mayer estava empenhado em sangrar alguns europeus, e observou que "o sangue tirado da veia do braço possuía, quase sem exceção, uma cor vermelha brilhante surpreendente."<sup>3</sup>

Em sua experiência médica na Europa, Mayer estava acostumado a observar que o sangue *arterial* era muito vermelho, e que o sangue das veias era mais escuro; agora, ele notava que o sangue venoso era muito semelhante ao arterial. É claro que centenas de outros médicos já teriam observado isso, sem por esse motivo serem levados a qualquer conclusão importante. Mas o fenômeno chamou fortemente a atenção de Mayer, e ele tentou explicar por qual razão o sangue de um europeu em Java podia ser diferente do sangue de um europeu na Europa.

Mayer conhecia a teoria de Lavoisier a respeito do calor animal. Segundo esta teoria, o aquecimento dos animais é o resultado de um processo de combustão ou oxidação: o sangue arterial conduz a todas as partes do organismo o oxigênio, que reage nos tecidos, produzindo gás carbônico que é transportado

<sup>2</sup> Helmholtz, Hermann. "On the application of the law of the conservation of force to organic nature". *Notices of the Proceedings at the Meetings of the Members of the Royal Institution of Great Britain* 3 (1861), pp. 347-357, p. 352. Reproduzido em: Helmholtz, Hermann. *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1895, vol. 3, pp. 565-580, p. 573. Note-se que nesta época não se utilizava o termo "energia" atualmente empregado; utilizava-se as expressões "força" ou "poder". Neste artigo, utilizaremos em geral o termo moderno "energia", ou às vezes, "força", ou "poder", como sinônimos.

<sup>3</sup> Mayer, J. R., "Remarks on the mechanical equivalent of heat". *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) suppl. 25 (1863), pp. 493-522, à pág. 498; tradução parcial de: Mayer, Julius Robert, *Bemerkungen über das mechanische Aequivalent der Wärme*. Heilbronn C. Drechsler, 1851.

pelo sangue venoso até os pulmões.<sup>4</sup> Mayer considerou que a diferença entre a cor do sangue arterial e venoso seria devida à diferença entre seus conteúdos de oxigênio e gás carbônico. Ora, segundo Mayer, "para que o corpo humano possa ser mantido a uma temperatura uniforme, o *desenvolvimento* de calor dentro dele deve manter uma relação quantitativa com o calor *perdido* pelo corpo — deve depender, portanto, da temperatura do meio ambiente; portanto a produção de calor e o processo de oxidação, assim como a *diferença de cor dos dois tipos de sangue*, devem ser globalmente menores nas zonas tórridas do que em regiões temperadas."<sup>5</sup>

Assim, Mayer explicava a diferença entre a cor do sangue venoso observado em europeus nos trópicos, e de europeus na Europa. Mas o encadeamento de idéias não parou aí. Mayer continuou a pensar a respeito da origem e dos efeitos produzidos pelo calor corporal. A fonte do calor, como se sabia na época, era o alimento absorvido pelo organismo. Mas a quantidade de calor que pode ser produzida pela combustão de uma determinada quantidade de matéria orgânica é limitada; e, se o alimento assimilado pelo organismo sofre uma oxidação completa, antes de ser eliminado, então ele produz no organismo todo o desprendimento de calor de que é capaz — nem mais, nem menos do que isso. Mas um ser vivo pode produzir calor de duas formas: uma, diretamente, pelo seu calor corporal; outra, produzindo atrito, que é capaz de gerar mecanicamente calor, através de seus órgãos. Mas Mayer considera que mesmo um organismo vivo é incapaz de gerar calor a partir do nada. Por isto, ele é levado a admitir que o calor *total* produzido por um ser vivo (isto é, a soma do calor corporal com o calor produzido mecanicamente pelo organismo) deve corresponder ao calor gerado por oxidação dos alimentos naquele ser vivo. Mas, nesse caso, o calor gerado pelos efeitos mecânicos do ser vivo deve ser limitado pela sua capacidade

<sup>4</sup> Antes do surgimento da teoria de Lavoisier, ainda se acreditava na teoria de Aristóteles, segundo a qual a respiração era um processo de refrigeração do organismo. Helmholtz (nota 2) descreve mais detalhadamente a teoria de Lavoisier: Os animais vivos ingerem pela alimentação substâncias combustíveis, e absorvem oxigênio do ar, pela respiração. Depois, o organismo vivo devolve ao ambiente gás carbônico (na respiração), água e uréia (na urina), principalmente. Como o peso do animal adulto é quase constante, praticamente todo alimento assimilado pelo organismo foi transformado nesses produtos — o que representa um processo de oxidação quase completo. Ora, se os alimentos fossem queimados na presença do ar, eles produziriam praticamente esses mesmos produtos, e além disso uma certa quantidade de calor. O que acontece em um organismo vivo? Pelo menos uma parte deste calor aparece como calor do animal. Dulong e Despretz fizeram experiências em que comprovaram que o calor emitido por animais vivos em repouso é quase igual ao calor que seria obtido pela combustão direta dos alimentos que eles ingerem, sendo a diferença inferior a 10%. No caso dos seres humanos, as primeiras pesquisas bem controladas de medida de calor produzido, trabalho realizado e energia química consumida por seres humanos, foram realizadas em 1857-8 por Hirn, e estão descritas detalhadamente em: Hirn, G.-A. *La Thermodynamique et l'Étude du Travail chez les Êtres Vivants*. Paris: Bureau des Revues, 1887.

<sup>5</sup> Mayer (nota 3), pp. 499-500.

de realizar esforço mecânico, e esta, por sua vez, pelo calor que pode ser gerado pelo alimento. Mayer conclui que "o calor produzido mecanicamente pelo organismo deve manter uma relação quantitativa invariável para com o trabalho gasto em sua produção."<sup>5</sup> Mas esse resultado deve ser válido, não só para organismos vivos, mas para qualquer tipo de processo da natureza. Portanto, Mayer conclui que o calor produzido através de uma ação mecânica qualquer é proporcional ao trabalho empregado.

Após essa primeira concepção de suas idéias, Mayer dedicou-se a fundamentá-las e a dar-lhes uma forma convincente. Em fevereiro de 1841 Mayer retornou a Heilbronn, e no dia 16 de junho do mesmo ano ele enviou a Poggendorff, editor da revista *Annalen der Physik und Chemie*, um trabalho com o título: "Über quantitative und qualitative Bestimmung der Kräfte" ("Sobre a determinação quantitativa e qualitativa das forças").<sup>6</sup> Este trabalho não foi aceito para publicação, por motivos muito bem fundamentados, segundo Oettingen.<sup>7</sup> Mayer era profundamente ignorante a respeito da mecânica, e seu artigo continha muitos erros sobre conceitos básicos: queda livre, adição vetorial de forças, etc.

Mayer não desanimou; tendo melhorado seus conhecimentos físicos, escreveu uma nova versão de seu trabalho — agora, um artigo bastante curto — e o enviou para Liebig, o famoso químico, editor da revista *Annalen der Chemie und Pharmacie*. Desta vez, o artigo foi aceito. Esta é a primeira publicação de Mayer, produzida em 1842, e cuja tradução apresentamos ao final deste artigo.<sup>8</sup>

Pode-se descrever o conteúdo deste primeiro trabalho publicado de Mayer da seguinte maneira: ele está propondo um novo conceito — o conceito de "força" — e mostrando como esse conceito pode ser aplicado à física. As "forças" de Mayer são coisas que podem assumir diferentes formas, mas cuja quantidade não varia, e que se distinguem da matéria por não possuírem peso. Quando uma força muda de forma, diz-se que sua primeira forma é a causa da segunda forma; e, como a quantidade de "força" não varia, Mayer pode aplicar a esses fenômenos o princípio da igualdade das causas e dos efeitos.

Entre os exemplos de "forças", Mayer cita aquilo que, em termos atuais,

<sup>5</sup> Mayer (nota 3), pp. 499-500.

<sup>6</sup> Este primeiro trabalho de Mayer foi encontrado após a morte de Poggendorff, e editado sob forma de fac-símile por Zöllner. Mais tarde, esse trabalho foi incluído na edição de obras completas de Mayer: Mayer, Julius Robert, *Die Mechanik der Wärme in gesammelten Schriften* (ed. Jakob Weyrauch). Stuttgart: Cotta, 1893; Mayer, Julius Robert, *Kleine Schriften und Briefe nebst Mitteilungen aus seinem Leben* (ed. Jakob Weyrauch). Stuttgart: Cotta, 1893.

<sup>7</sup> Ver as Notas de A. von Oettingen, editor de: Mayer, [Julius] Robert, *Die Mechanik der Wärme — zwei Abhandlungen*. Leipzig: Wilhelm Engelmann, 1911, pp. 80-90, esp. p. 81.

<sup>8</sup> Mayer, J. R., "Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur", *Annalen der Chemie und Pharmacie* 42 (1842), pp. 233-240. Reimpresso, com omissão de dois parágrafos, em: Mayer (nota 7), pp. 3-8.

designaríamos por: energia cinética; energia potencial gravitacional; calor; energia química. Mayer procura estabelecer que o calor produzido pelo atrito de dois sólidos é proporcional ao trabalho mecânico utilizado; sugere que nas máquinas a vapor há uma conversão de calor em trabalho; e calcula, a partir das propriedades dos gases, o valor do equivalente mecânico do calor, chegando a um valor numérico que pode ser expresso como :  $1 \text{ cal} = 3,6 \text{ J}$ . Mayer não tenta explicar o calor como uma forma de movimento, mas adota uma concepção muito mais geral: ele admite que o calor, o movimento (energia cinética) e a força de queda (energia potencial) são diferentes formas de uma mesma coisa, mas que essa coisa — a “força”, em abstrato — não é propriamente nenhuma dessas três coisas. Esta é uma concepção muito semelhante ao nosso conceito moderno de energia. Mayer estava muito mais próximo da metodologia utilizada na termodinâmica do que alguns outros autores, como Helmholtz. Este, como muitos outros autores da época, tinha uma visão mais mecanicista, e preocupava-se com a elaboração de modelos microscópicos dos fenômenos físicos. A termodinâmica propriamente dita utiliza uma abordagem fenomenológica, e apenas trata de relações entre grandezas macroscópicas mensuráveis.

Ao se ler o primeiro artigo de Mayer, é importante notar que há componentes apriorísticos ao lado de outros empíricos. Por um lado, Mayer enfatiza, como um princípio filosófico — portanto não-empírico, e não passível de teste — a idéia de que alguma coisa deve se conservar, nas transformações físicas. Ele justifica essa idéia a partir dos princípios metafísicos de que “nada pode surgir do nada”, “nenhuma coisa pode se transformar no nada”, e “a causa é igual ao efeito”. Mais especificamente, Mayer afirma que *duas* coisas independentes se conservam nos fenômenos: por um lado, a matéria; por outro lado, algo que corresponde a nosso conceito de energia: a força.

Esta idéia apriorística de que algo deve se conservar nos fenômenos é um importante princípio, que teve papel fundamental em vários episódios da história da ciência.<sup>9</sup> Já na filosofia grega, procurava-se algo imutável por trás do mundo dos fenômenos, e isso gerou, entre outras idéias férteis, o modelo atômico.<sup>10</sup> Na ciência clássica, a idéia de que o movimento deveria ser indestrutível produziu, em primeiro lugar, o conceito de “quantidade de movimento” (massa

<sup>9</sup> Sobre este tema, veja-se a magnífica obra de Émile Meyerson (nota 1).

<sup>10</sup> Na teoria atomística de Epicuro, conforme exposta por Lucrecio, isto aparece de forma muito clara. Para introduzir a idéia de coisas imutáveis (os átomos) subjacentes aos fenômenos, Lucrecio utiliza os aforismos “nihil de nihil gigni” (I, 150) e “nihil ad nihilum interire” (I, 215), ou seja: nada surge do nada, e nenhuma coisa pode se transformar no nada. Lucrecio, *De la Nature*, trad. por Ernoud, A. Paris: Belles Lettres, 1978.

multiplicada por velocidade) de Descartes,<sup>11</sup> e a lei da inércia;<sup>12</sup> depois, o conceito de "força viva" de Leibniz (de onde saiu nosso conceito moderno de energia cinética).<sup>13</sup> Examinando-se as obras desses autores, verifica-se que Descartes e Leibniz utilizam uma base apriorística para suas propostas, da mesma forma que Mayer.

Essa idéia de que alguma grandeza (ou várias) deve se conservar nos fenômenos físicos foi também um ponto de partida básico para Lavoisier, no estabelecimento da lei da conservação da massa: contrariamente ao que a tradição empiricista ensina, em seus trabalhos mais antigos Lavoisier *utilizou* a lei da conservação da massa, ao invés de tentar testá-la experimentalmente; e manteve sua crença nela, mesmo em casos em que observava uma variação de massa nas reações químicas.<sup>14</sup> Não se deve estranhar que Kant tenha procurado dar uma justificativa apriorística para esse princípio,<sup>15</sup> ou que Herbert Spencer tenha adotado o princípio da conservação da energia como um dos princípios evidentes de sua filosofia da natureza.<sup>16</sup>

<sup>11</sup> Nos *Princípios da Filosofia* (segunda parte, artigos 35-44), Descartes propõe o princípio de que Deus mantém no universo uma quantidade constante de movimento; onde "movimento" representa uma quantidade proporcional à massa e à velocidade. Ver: Descartes, René, *Principiorum Philosophiae*, em: *Oeuvres de Descartes*, ed. por Adams, Charles e Tannery, Paul. Paris: J. Vrin, 1965, vol. VIII-1, pp. 61-67; ou: Descartes, René, *Principes de la Philosophie*, em: *Oeuvres de Descartes*, ed. por Adams, Charles e Tannery, Paul. Paris: J. Vrin, 1971, vol. IX-II, pp. 83-89. Ver também: Bohn, "Historic notes on the conservation of energy", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) 28 (1864), pp. 311-314.

<sup>12</sup> A lei da inércia pode ser considerada como um caso particular da lei da conservação do movimento.

<sup>13</sup> Leibniz apresenta o princípio da conservação da "força viva" em muitos de seus escritos, ao criticar o conceito cartesiano de quantidade de movimento. Veja-se, por exemplo, os artigos 17 e 18 do *Discurso de Metafísica*, e a carta de 4/7/1686 a Arnaud, assim como as notas bibliográficas de le Roy, em Leibniz, G. W. *Discours de Méta-physique et Correspondance avec Arnaud*, ed. por le Roy, G. Paris: J. Vrin, 1970, pp. 53-55, 114-124, 232-236. Consulte-se também o artigo "Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii", publicado por Leibniz em 1686 na *Acta Eruditorum*, e traduzida em: Leibniz, G. W. *Oeuvres*, ed. por Prenant, Lucy. Paris: Aubier Montaigne, 1972, vol. I, pp. 159-161. Sobre Leibniz, ver também: Lindsay, R. B. "The concept of energy and its early historical development", *Foundations of Physics* 1 (1971), pp. 383-393.

<sup>14</sup> Veja-se os artigos de Lavoisier: "Sur la nature de l'eau et sur les expériences par lesquelles on a prétendu prouver la possibilité de son changement en terre", *Mémoires de l'Académie des Sciences* (1770), p. 73; "Analyse du mémoire sur l'augmentation du poids des métaux par la calcination", *Histoire de l'Académie des Sciences* (1774), p. 20; *Oeuvres de Lavoisier*. Paris: Imprimerie Impériale, 1862, vol. II, pp. 1-28, 97-121.

<sup>15</sup> Ver a *Crítica da Razão Pura* (A 182, B 224): Kant, Immanuel, *Crítica de la Raison Pure*, trad. por Tremesaygues, A. e Picaud, B. Paris: Presses Universitaires de France, 1975, p. 177.

<sup>16</sup> Spencer, Herbert, *A System of Synthetic Philosophy*, vol. I: *First Principles*. Osnabrück: Otto Zeller, 1966. Parte 2, caps. 6-8, pp. 149-181.

No entanto, não se pode identificar a lei científica da conservação da energia com vagas afirmações de que algo se conserva na natureza. Esta lei científica se distingue do princípio metafísico por indicar uma relação quantitativa entre grandezas mensuráveis. Apenas quando se sabe como medir cada uma das formas de energia torna-se possível um teste experimental da existência de uma relação constante entre as quantidades das várias formas de energia que se convertem umas nas outras. No trabalho de Mayer encontramos esses dois aspectos, enquanto que no de Grove ou no de Faraday falta esse elemento.<sup>17</sup>

O primeiro trabalho de Mayer não teve repercussão. Algum tempo depois, ele redigiu um novo trabalho, mais longo, em que examinava mais detalhadamente as várias formas de energia, e os fenômenos conhecidos em que se observava a transformação de cada um dos tipos nos outros. Enviou-o novamente aos *Annalen*; o trabalho foi recusado, com a polida desculpa de que havia muitos artigos de química aguardando espaço para publicação. Mayer acabou por imprimi-lo por conta própria, sob a forma de um livreto.<sup>18</sup>

Em 1846, Mayer envia à Academia francesa de ciências um trabalho em que utiliza suas idéias para tentar explicar a produção do calor solar: Mayer propõe que a queda de meteoritos sobre o Sol produziria uma grande quantidade de calor, capaz de produzir o aquecimento de sua superfície — uma idéia que mais tarde será desenvolvida por Lord Kelvin.<sup>19</sup> A Academia encaminhou o trabalho primeiramente a uma comissão formada por Pouillet e Babinet; depois, a uma outra comissão formada por Arago e Cauchy.<sup>20</sup> As comissões não consideraram o trabalho digno de publicação. Assim, em 1848, Mayer publica, novamente por sua própria conta, uma versão deste trabalho.<sup>21</sup> Em 1851, Mayer publica sua quarta memória, que nada de importante adiciona às precedentes.<sup>22</sup>

Entretanto, haviam sido publicados os primeiros trabalhos de Joule, e isto

<sup>17</sup> Mais adiante serão descritas as contribuições de Grove e de Faraday sobre este tema.

<sup>18</sup> Mayer, Julius Robert. *Die Organische Bewegung in ihren Zusammenhänge mit dem Stoffwechsel*. Heilbronn: C. Drechsler, 1845; reimpresso em: Mayer (nota 7).

<sup>19</sup> Thomson, W. "On the mechanical energies of the solar system", *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 21 (1854), pp. 63-80; reproduzido em *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) 8 (1854), pp. 410-430. Ver também: James, Frank A. J. L. "Thermodynamics and the sources of solar heat, 1846-1862", *British Journal for the History of Science* 15 (1982), pp. 155-181.

<sup>20</sup> Ver as notas sobre o trabalho recebido, em: *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* 23 (1846), pp. 220 e 544.

<sup>21</sup> Mayer, J. R. *Beiträge zur Dynamik des Himmels, in populärer Darstellung*. Heilbronn: C. Drechsler, 1848. Traduzido por H. Dubus: Mayer, J. R. "On celestial mechanics", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) 25 (1863), pp. 241-248, 387-409, 417-428.

<sup>22</sup> Mayer, Julius Robert, *Bemerkungen über das mechanische Aequivalent der Wärme*. Heilbronn: C. Drechsler, 1851.

deu início a uma controvérsia que amargurou a vida de Mayer, levando-o a uma tentativa de suicídio.

## II. Joule e Mayer

O primeiro trabalho de Joule diretamente ligado ao estudo da conservação da energia data de 1843 — o ano seguinte à publicação do primeiro artigo de Mayer. Ele apresentou este trabalho no dia 21 de agosto de 1843 na reunião da *British Association for the Advancement of Science*, em Cork.<sup>23</sup> O tema básico deste trabalho é o estudo do calor que surge em fenômenos eletromagnéticos. Entre outras coisas, Joule determina experimentalmente que o calor gerado na bobina de um eletroímã é proporcional ao quadrado da corrente elétrica que a percorre — o primeiro estudo quantitativo do “efeito Joule”. Ele mostra também que em um dínamo ou motor elétrico há uma relação entre o calor produzido pelas correntes elétricas e o trabalho gerado ou consumido. Suas primeiras medidas mostraram que o aquecimento de uma libra de água a 1°F era equivalente ao trabalho mecânico capaz de erguer 896 libras à altura de um pé — ou seja, um resultado correspondente a  $1 \text{ cal} = 4,8 \text{ J}$ . Em outras medidas descritas no mesmo artigo, os resultados apresentam uma ampla oscilação, entre 3,2 J/cal e 5,5 J/cal. Como observa muito bem Meyerson,<sup>24</sup> resultados tão incertos não eram muito adequados como provas empíricas da existência de uma relação *constante* entre trabalho e calor.

Na versão publicada de seu artigo, em um *P.S.*, Joule acrescenta uma referência às experiências de Rumford relativas à produção de calor por atrito,<sup>25</sup> como evidências de que o trabalho mecânico pode se transformar em calor.<sup>26</sup> Diz também haver realizado uma experiência de medida do aquecimento de água que passa através de tubos finos, sob pressão, tendo observado seu aquecimento, e calculando que um trabalho capaz de erguer 770 libras à altura de um pé era capaz de aquecer de 1°F uma libra de água ( $1 \text{ cal} = 4,1 \text{ J}$ ) — um

<sup>23</sup> Joule, J. P. “On the calorific effects of magneto-electricity and on the mechanical value of heat”, *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (3) 23 (1843), pp. 263-276, 347-355, 435-443. Ver também: Jones, G. “Joule’s early researches”, *Centaurus* 13 (1968), pp. 198-219. Há uma edição completa dos trabalhos de Joule: *The Scientific Paper of James Prescott Joule*. Londres: Physical Society, 1884; *Joint Scientific Papers of James Prescott Joule*. Londres: Physical Society, 1887.

<sup>24</sup> Meyerson (nota 1), p. 213.

<sup>25</sup> Mais adiante comentaremos sobre o trabalho de Rumford.

<sup>26</sup> Neste artigo, utilizo o termo “calor” em seu sentido impreciso, como era utilizado no início do século passado, e não no moderno sentido mais estrito de uma forma de energia que flui entre dois corpos como consequência de uma diferença de temperatura. Embora atualmente seja bem sabido que não se pode falar sem contradição com a termodinâmica sobre “o calor *contido* em um corpo”, espero que o uso pouco técnico deste termo, aqui, não produza confusões.

resultado semelhante ao obtido pelos outros métodos. Logo em seguida, Joule observa:

“Não perderei tempo repetindo e estendendo essas experiências, pois estou seguro de que os grandes agentes da natureza são *indestrutíveis*, pelo *fiat* do Criador; e que quando se gasta poder mecânico, obtém-se *sempre* um calor exatamente equivalente.”<sup>27</sup>

Joule discute ainda o problema da geração do calor nos animais, e sugere que para uma mesma ação química ocorrida no organismo vivo, o calor desenvolvido será maior se ele estiver parado do que se estiver realizando um esforço mecânico; e discute também, através de um modelo ingênuo, a produção de calor nas reações químicas. Apesar dessa preocupação em generalizar suas idéias, em quase todos os seus artigos Joule estuda apenas problemas bem específicos, e apenas em um trabalho de 1847 descreve de uma forma mais ampla e coerente o princípio geral de conservação.<sup>28</sup>

De acordo com o testemunho do próprio Joule,<sup>29</sup> a apresentação deste trabalho na reunião da *British Association* não suscitou interesse. As experiências de Joule não eram muito simples de ser interpretadas, e os efeitos observados eram muito pequenos — às vezes, apenas centésimos de grau — e variáveis.

Dois anos mais tarde, ou seja, ao mesmo tempo em que Mayer editava seu segundo trabalho, Joule publica um artigo onde estuda as variações de temperatura produzidas na compressão e dilatação dos gases.<sup>30</sup> Através de experiências de difícil reprodução, Joule obtém um valor médio de 798 libras-pé como equivalentes ao aquecimento de uma libra de água de 1°F. Neste artigo Joule mostra também que o ar, ao se dilatar sem realizar trabalho, não sofre variação apreciável de temperatura — um resultado que já fora obtido muito antes, por Gay-Lussac, mas que Joule desconhecia.

No mesmo ano, Joule publica sua primeira descrição da famosa experiência de agitação de água através de pás.<sup>31</sup> Os primeiros resultados eram muito variá-

<sup>27</sup> Joule (nota 23), p. 442.

<sup>28</sup> Joule, J. P. “On matter, living force, and heat”, impresso em: *The Scientific Papers...* (nota 23), pp. 265-276. Reproduzido em: Watson, E. C. “Joule’s only general exposition of the principle of conservation of energy”, *American Journal of Physics* 15 (1947), pp. 383-390.

<sup>29</sup> *Joint Scientific Papers...* (nota 23), p. 215. Cfr. Watson (nota 28).

<sup>30</sup> Joule, J. P. “On the changes of temperature produced by the rarefaction and condensation of air”, *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (3) 26 (1845), pp. 369-383.

<sup>31</sup> Joule, J. P. “On the existence of an equivalent relation between heat and the ordinary forms of mechanical power”, *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (3) 27 (1845), pp. 205-207.

veis, mas em 1847, Joule começa a obter resultados muito mais consistentes.<sup>32</sup> Ele publica então um artigo na revista da Academia francesa de ciências.<sup>33</sup>

Joule apresentou esse novo trabalho na reunião da *British Association for the Advancement of Science* de 1847, em Oxford. Na ocasião, o presidente da seção pediu que Joule apenas desse uma versão verbal de suas experiências, ao invés de ler sua comunicação, pois havia pouco tempo disponível. Mesmo assim, a exposição de Joule impressionou favoravelmente alguns dos presentes, entre os quais William Thomson (posteriormente conhecido como Lord Kelvin).<sup>34</sup> O apoio de Thomson foi muito importante na aceitação dos resultados de Joule.

O artigo de Joule publicado na França provocou imediata reação. Séguin, sobrinho de Montgolfier, autor de um livro sobre estradas de ferro e máquinas a vapor,<sup>35</sup> publicou um artigo onde dizia já ter chegado, antes de Joule, a resultados muito semelhantes, pelo cálculo do trabalho realizado na expansão do vapor d'água; mas que não os publicara porque aguardava que experiências positivas viessem confirmá-las.<sup>36</sup>

Um ano depois, a mesma revista publica uma carta de Mayer.<sup>37</sup> No estilo de sua carta transparece claramente a indignação de Mayer, que não conseguira a publicação de seu artigo apresentado à Academia francesa, e que vê agora o trabalho de Joule publicado, com a sanção de um comitê que incluía o mesmo

<sup>32</sup> Joule, J. P. "On the mechanical equivalent of heat, as determined by the heat evolved by the friction of fluids", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (3) 31 (1847), pp. 173-176.

<sup>33</sup> Joule, J. P. "Expériences sur l'identité entre le calorique et la force mécanique. Détermination de l'équivalent par la chaleur dégagée pendant la friction du mercure", *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* 25 (1847), pp. 309-311.

<sup>34</sup> Ver: Watson (nota 28).

<sup>35</sup> Séguin, Marc: *De l'Influence des Chemins de Fer et de l'Art de les Tracer et de les Construire*. Paris: Blanchard, 1839.

<sup>36</sup> Séguin, M. "Note à l'appui de l'opinion émise par M. Joule, sur l'identité du mouvement et du calorique", *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* 25 (1847), pp. 420-422.

<sup>37</sup> Mayer, J. R. "Sur la transformation de la force vive en chaleur, et réciproquement", *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* 27 (1848), pp. 385-387.

Pouillet<sup>38</sup> que havia recusado seu trabalho.

Nesta carta, Mayer tenta estabelecer sua prioridade na descoberta das transformações mútuas de poder mecânico em calor, e afirma ter sido o primeiro a calcular o equivalente mecânico do calor. Desconhecendo o conjunto dos trabalhos de Joule, e pensando que o inglês só havia investigado a relação entre calor e poder mecânico, Mayer enfatiza que em seu próprio trabalho havia também estudado transformações de poderes magnéticos, elétricos, químicos, etc.

Joule responde com uma carta<sup>39</sup> onde se refere a seus trabalhos de 1841,<sup>40</sup> para tentar estabelecer sua prioridade sobre Mayer. Mas nesses trabalhos, em que Joule estudava certas propriedades de reações químicas, não havia qualquer enunciado da lei da conservação da energia, em toda a sua generalidade, nem qualquer avaliação do equivalente mecânico do calor. Esses trabalhos de 1841, em resumo, não antecipam o trabalho de Mayer. Em sua carta, Joule faz uma breve descrição de todos os seus trabalhos, e afirma que não tinha qualquer conhecimento dos artigos de Mayer.<sup>41</sup>

Joule faz também uma forte acusação: a de que o cálculo de Mayer do equivalente mecânico do calor parte do pressuposto de que o calor específico de um gás não depende de sua densidade, e que, na época em que Meyer escrevera seu primeiro artigo, todos acreditavam no contrário:

<sup>38</sup> Pouillet era bem conhecido, na época, por sua medida da radiação emitida pelo Sol: Pouillet, C. S. M. "Mémoire sur la chaleur solaire, sur les pouvoirs rayonnants et absorbants de l'air atmosphérique, et sur la température de l'espace", *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* 7 (1838), pp. 24-65. Cfr. Kidwell, P. A. "Prelude to solar energy: Pouillet, Herschel, Forbes and the solar constant", *Annals of Science* 38 (1981), pp. 457-476. Pouillet era defensor da teoria do calórico, e apesar de haver aprovado a publicação do artigo de Joule, ele ainda descreve em 1853 o aquecimento dos gases comprimidos como uma consequência da variação do calor específico do ar com sua densidade: Pouillet, C. S. M., *Éléments de Physique Expérimentale*, 6.<sup>a</sup> edição. Paris: 1853, vol. 2, p. 583; cfr. Hirn, G. A. *Théorie Mécanique de la Chaleur*, 3.<sup>a</sup> edição. Paris: Gauthier-Villars, 1875, vol. 1, p. 135.

<sup>39</sup> Joule, J. P. "Sur l'équivalent mécanique du calorique", *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* 28 (1849), pp. 132-135.

<sup>40</sup> Joule, J. P. "On the heat evolved by metallic conductors of electricity, and in the cells of a battery during electrolysis", *The London, Edingurgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (3) 19 (1841), pp. 260-277. Ver: Forrester, J. "Chemistry and the conservation of energy: the work of James P. Joule", *Studies in the History and Philosophy of Science* 6 (1975), pp. 273-313.

<sup>41</sup> Há suspeitas de que Joule conhecesse o primeiro trabalho de Mayer, pois encontrou-se em seus manuscritos uma tradução de vários artigos dos *Annalen der Chemie und Pharmacie*, de 1842 e 1843, inclusive o próprio artigo de Mayer. Embora não se possa afirmar com certeza de que época seriam esses manuscritos, pode-se pelo menos afirmar que devem ser anteriores aos artigos de 1847. Sobre este problema, ver: Mendoza, E. e Cardwell, D. S. L. "On a suggestion concerning the work of J. P. Joule", *British Journal for the History of Science* 14 (1981), pp. 177-180.

"... A opinião geral, de acordo com as experiências dos senhores de la Rive e Marcet, era de que o calor específico de um gás varia com a pressão à qual está submetido; de onde se segue que a conclusão não fundamentada do sr. Mayer, que não estava em concordância com os fatos conhecidos nessa época, não deveria chamar a atenção dos sábios."<sup>42</sup>

E após comentar ligeiramente os trabalhos de Rumford, Davy e Séguin, Joule conclui ironicamente:

"De acordo com esses fatos, todos apreciarão a sagacidade do sr. Mayer em predizer as relações numéricas que seriam estabelecidas entre o calor e o poder; mas não se pode negar, creio, que eu tenha sido o primeiro a demonstrar a existência do equivalente mecânico do calor, e que tenha fixado seu valor numérico por experiências incontestáveis."<sup>43</sup>

Mayer responde pouco depois,<sup>44</sup> esclarecendo que seus cálculos eram apoiados na famosa experiência de Gay-Lussac<sup>45</sup> que mostrava que o calor específico de um gás não se alterava pela rarefação, ao se expandir no vácuo; e que portanto

<sup>42</sup> Joule (nota 39), p. 134. Joule não indica a referência dos trabalhos a que se refere. Talvez ele tivesse em mente os artigos publicados por esses autores na década de 1820: de la Rive, A. e Marcet, J., "Expériences relatives au froid produit par l'expansion des gaz", *Annales de Chimie et de Physique* (2) 23 (1823), pp. 209-216; *idem*, "Recherches sur la chaleur spécifique des gaz", *Annales de Chimie et de Physique* (2) 35 (1827), pp. 5-34; *idem*, "Nouvelles recherches sur la chaleur spécifique des gaz", *Annales de Chimie et de Physique* (2) 41 (1829), pp. 78-92. Nesses artigos, os autores medem o calor específico de gases, a várias pressões, e indicam que o calor específico diminui à medida que a pressão diminui; no entanto, lendo-se com cuidado o artigo, nota-se que eles estão se referindo ao calor específico *volumétrico* (ou seja: medido em cal/cm<sup>3</sup>.°C, e não em cal/g.°C). Ora, é claro que se o calor específico "volumétrico" for proporcional à pressão, o calor específico "mássico" será constante, o que está de acordo com a suposição de Mayer, e com nossos conhecimentos atuais. As medidas de Marcet e de la Rive não permitem concluir qual a relação entre pressão e calor específico "volumétrico", mas não estão em contradição com a suposição de Mayer.

<sup>43</sup> Joule (nota 39), p. 135.

<sup>44</sup> Mayer, J. R. "Réclamation de priorité contre M. Joule, relativement à la loi de l'équivalence du calorique", *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* 29 (1849), p. 534.

<sup>45</sup> Gay-Lussac, M. "Premier essai pour déterminer les variations de température qu'éprouvent les gaz en changeant de densité, et considération sur leur capacité pour le calorique", *Mémoires de Physique et de Chimie de la Société d'Arcueil* 1 (1807), pp. 180-203. Costabel afirma que Gay-Lussac repetiu de modo aperfeiçoado esta experiência, em 1820: cfr. Costabel, P. "Le "calorique du vide" de Clément et Desormes (1812-1819)", *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 21 (1968), pp. 3-14. No entanto, no artigo citado por Costabel, vê-se que Gay-Lussac está estudando a expansão de um *espaço evacuado*, e não a expansão de um gás em um espaço evacuado; a conexão com o trabalho de 1807 é apenas indireta. Ver: Gay-Lussac, M. "Sur le calorique du vide", *Annales de Chimie et de Physique* (2) 13 (1820), pp. 304-308. Ver, também: Prevost, P. "Note occasionée par celle de M. Gay-Lussac sur le calorique du vide", *Annales de Chimie et de Physique* (2) 31 (1826), pp. 429-432.

ele tinha uma boa base para seus cálculos.<sup>16</sup> Mayer assim conclui seu artigo:

"De resto, estou persuadido de que o sr. Joule realizou suas descobertas sobre o calor e a força sem conhecer as minhas, e os numerosos méritos desse ilustre físico inspiram-me uma grande estima; mas creio que estou em meu direito repetindo que fui eu quem primeiro publicou, no ano de 1842, a lei da equivalência do calórico e da força viva, com sua expressão numérica."<sup>17</sup>

Mas a controvérsia não terminou aí. Na Inglaterra, Tait e Kelvin assumiram a defesa da prioridade de Joule, procurando diminuir a importância da obra de Mayer; Tyndall, por outro lado, empenhou-se na defesa da validade do trabalho de Mayer.<sup>18</sup> Em 1863, Mayer escreve uma carta a Tyndall, agradecendo seu apoio; nesta carta, refere-se aos artigos publicados nas *Comptes Rendus*, e indica que, como Joule não havia respondido à sua última carta, deve ter concordado com ela. Tyndall publica parte da carta,<sup>19</sup> e Tait e Joule reagem violentamente,<sup>20</sup> reafirmando que Mayer não tinha base alguma para seus cálculos. Joule chega ao ponto de sugerir que Mayer mentiu ao dizer que se baseou nos resultados da experiência de Gay-Lussac:

"Não fui capaz de consultar o primeiro volume das *Mémoires d'Arcueil*, que contém a descrição da experiência de Gay-Lussac; mas é seguro que seu resultado, conforme descrito pelo sr. Mayer, não foi acolhido ou

<sup>16</sup> Sobre a base experimental que justificava o cálculo de Mayer, ver: Hutchinson, Keith, "Mayer's hypothesis: a study of the early years of thermodynamics", *Centaurus* 20 (1976), pp. 279-304.

<sup>17</sup> Mayer (nota 44).

<sup>18</sup> Veja-se a longa série de artigos sobre o problema de prioridade no estabelecimento da primeira lei da termodinâmica, publicados por esses autores na revista *Philosophical Magazine*, de 1862 a 1865. Por economia de espaço, forneceremos apenas a indicação do volume (ano) e página inicial: Tyndall, J. 24 (1862) 64; 173; 25 (1863) 220; 368; 26 (1863) 65; 28 (1864) 25; 29 (1865) 218. Thomson, W. 25 (1863) 429. Tait, P. G. 25 (1867) 263; 429; 26 (1863) 144; 28 (1864) 288; 29 (1865) 55. Joule, J. P. 24 (1862) 121. 173; 28 (1864), 150. Tyndall escreveu um livro popular, traduzido para vários idiomas, e que teve um importante papel na divulgação do nome de Mayer: Tyndall, John, *Heat Considered as a Mode of Motion*. Londres, 1863. Ver também: Lloyd, J. T. "Background to the Joule-Mayer controversy", *Notes and Records of the Royal Society* 25 (1970), pp. 210-225; Daub, E. E. "The hidden origin of the Tait-Tyndall controversy", *Proceedings of the XIV International Congress of History of Science*, vol. 2, pp. 241-244.

<sup>19</sup> Tyndall, J. "Remarks on Professor Tait's last letter to Sir David Brewster", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) 26 (1863), pp. 65-67. Nas páginas 66-67 encontra-se um extrato da carta de Mayer, datada de 31/5/1863.

<sup>20</sup> Tait, P. G. "On the conservation of energy", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) 26 (1863), pp. 144-145; Joule, J. P. "On the dynamical theory of heat", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) 26 (1863), pp. 145-147.

lembrado pelo mundo científico, de tal forma que Regnault e eu próprio fomos considerados pelos outros, e consideramo-nos, os pesquisadores originais deste assunto. Além disso, pode-se perceber a partir dos trabalhos do sr. Mayer que ele nada sabia desta experiência de Gay-Lussac ao escrever sua famosa memória de 1842...<sup>51</sup>

Ora, sabe-se atualmente com segurança que Joule foi injusto: em 1841, ou seja, *antes* de publicar seu primeiro artigo, Mayer já se referia às experiências de Gay-Lussac, e outras experiências relevantes com gases, conforme prova sua correspondência.<sup>52</sup>

Retornemos um pouco a 1847. Neste ano, em que os trabalhos de Joule começam a ser mais conhecidos, aparece o magnífico trabalho de Helmholtz sobre a conservação da energia.<sup>53</sup> Ao contrário de Joule e Mayer, Helmholtz possui um bom conhecimento (embora não completo) do trabalho de outros pesquisadores; e tem uma capacidade e preocupação de fornecer uma visão teórica aprofundada, detalhada e unificada de todos os processos de transformação de energia — começando pela mecânica, e aprofundando-se nos processos térmicos e eletromagnéticos. Helmholtz refere-se a Joule (cujos resultados experimentais, no entanto, lhe parecem pouco precisos), mas não se refere a Mayer, embora descreva cálculos de Holtzmann<sup>54</sup> que se assemelham muito aos de Mayer.

Na reedição de seu trabalho, em 1881,<sup>55</sup> Helmholtz adiciona uma série de notas. Em uma delas, ele se refere aos dois primeiros trabalhos de Mayer, afirmando não conhecê-los em 1847. Helmholtz inclina-se mais favoravelmente aos trabalhos de Joule do que aos de Mayer, e desenvolve longas considerações

<sup>51</sup> Joule (nota 50), p. 146.

<sup>52</sup> Cartas de Mayer a Baur, publicadas em Mayer, *Kleine Schriften...* (nota 6), pp. 130-132, 145-146, 152-154; cfr. Kuhn, T. S., "The caloric theory of adiabatic compression", *Isis* 49 (1958), pp. 132-140, p. 132, nota 1.

<sup>53</sup> Helmholtz, Hermann, *Ueber die Erhaltung der Kraft — eine physikalische Abhandlung*. Berlin: G. Reimer, 1847. Este trabalho foi originalmente apresentado diante da Sociedade de Física de Berlim, em 27 de julho de 1847. Há uma tradução completa da primeira edição, por John Tyndall: Helmholtz, H. "On the conservation of force: a physical memoir", *Taylor's Scientific Memoirs* (2) 1 (1853), parte 2, pp. 114-162. Sobre o trabalho de Helmholtz, ver: Elkana, Y. "Helmholtz's *Kraft*", *Historical Studies in the Physical Sciences* 2 (1970), pp. 263-298; Clark, P. "Elkana on Helmholtz and the conservation of energy", *British Journal for the Philosophy of Science* 27 (1976), pp. 165-176.

<sup>54</sup> Holtzmann, *Ueber die Wärme und Elasticität der Gase und Dämpfe*. Mannheim, 1845; cfr. Helmholtz (nota 53), p. 33.

<sup>55</sup> Helmholtz, Hermann, *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1882, vol. 1, pp. 12-75. Reimpresso em: *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, n.º 1: Helmholtz, H. *Über die Erhaltung der Kraft*. Leipzig: Wilhelm Engelmann, 1915.

metodológicas que foram publicadas por Tait, sob a forma de uma carta,<sup>56</sup> em defesa da prioridade de Joule, e minimizando a importância de Mayer.

Com relação a toda essa controvérsia, Sarton<sup>57</sup> chega à conclusão de que Tyndall tinha melhor compreensão e maior generosidade do que seus adversários, e que não se pode negar a Mayer a prioridade na formulação da primeira lei da termodinâmica.

Essas controvérsias, e a falta de reconhecimento por seu trabalho, deprimiram muito Mayer, que tentou suicídio, e foi depois internado em um asilo para alienados mentais, sendo rapidamente esquecido. O próprio Liebig, que apoiara a publicação do primeiro artigo de Mayer, referiu-se a ele, em 1858, como se ele já tivesse morrido.<sup>58</sup> Mayer chegou a sair do sanatório, mas não foi capaz de realizar novas contribuições à ciência, tendo falecido em 1878. As revistas científicas não publicaram seu necrológio.

### III. Uma descoberta múltipla

Embora antigamente se desse muita ênfase ao problema de prioridade, tentando-se descobrir quem foi o primeiro a propor determinada idéia, atualmente admite-se que grande parte das descobertas científicas são feitas independentemente por várias pessoas, isto é, são descobertas múltiplas.<sup>59</sup>

O surgimento da lei da conservação da energia já foi estudado por Kuhn como um caso de descoberta simultânea por uma dúzia de cientistas independentes.<sup>60</sup> O trabalho de Kuhn é interessante, mas tem o defeito de tender a enfatizar o paralelismo e a semelhança entre várias propostas, deixando de lado as importantes diferenças entre os problemas estudados por esses doze autores, a metodologia por eles utilizada, a conceituação adotada e a base empírica utilizada em cada um dos casos. Essas diferenças foram posteriormente enfatizadas por Elkana.<sup>61</sup> Vamos nos limitar aqui a abordar rapidamente apenas alguns dos predecessores ou contemporâneos de Mayer que propuseram igualmente alguma

<sup>56</sup> Helmholtz (nota 55), p. 71. Carta publicada em: Tait, P. G., *Sketch of Thermodynamics*. Edimburgo, 1868.

<sup>57</sup> Sarton, G. "The discovery of the law of conservation of energy", *Isis* 13 (1929), pp. 18-34.

<sup>58</sup> Sarton (nota 57), p. 22.

<sup>59</sup> Sobre descobertas múltiplas na ciência, ver Merton, R., "Singletons and multiples in scientific discovery", *Proceedings of the American Philosophical Society* 105 (1961), pp. 420-486.

<sup>60</sup> Kuhn, T. S. "Energy conservation as an example of simultaneous discovery", em: Clagett, M. (ed.) *Critical Problems in the History of Science*. Madison: University of Wisconsin Press, 1959, pp. 321-356.

<sup>61</sup> Elkana, Y. "The conservation of energy: a case of simultaneous discovery?" *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 23 (1970), pp. 31-60.

idéia associada à lei da conservação da energia. Mais uma vez, repetimos que não é possível aqui esgotar o assunto, e que o leitor interessado deverá consultar a bibliografia indicada, a fim de completar as informações desta curta descrição.

A lei da conservação da energia contém, como caso particular, a transformação mútua de calor e energia mecânica.<sup>62</sup> No caso de muitos autores, este foi o ponto de partida que levou à lei geral da conservação da energia, e pode-se considerar que, uma vez estabelecido este ponto, não era difícil aplicar a mesma idéia a outras conversões energéticas. Por isto, muitas vezes se supõe que os trabalhos de Rumford e de Davy<sup>63</sup> no final do século XVIII já haviam fornecido uma boa base para a primeira lei da termodinâmica. Rumford havia mostrado que, na perfuração de canhões, surge uma grande quantidade de calor, e que era difícil explicar esse surgimento como simples efeito do corte do metal, pois continuava a surgir calor mesmo quando a broca estava gasta e quase não cortava mais o metal. Por outro lado, Humphry Davy alegava que havia conseguido fundir pelo atrito mútuo dois pedaços de gelo, e era também difícil explicar esse fato sem se admitir a transformação de energia mecânica em calor.

No entanto, a história não é tão simples. Era possível interpretar as experiências de muitas formas diferentes, e por isso grande parte dos cientistas continuou a admitir uma conservação do calórico, ao invés de aceitar uma transformação de trabalho em calor.<sup>64</sup>

Mesmo para aqueles que queriam admitir a produção de calor pelo atrito, não era claro qual modelo se deveria adotar para o calor. Por um lado, descobriu-se que o calor podia se propagar pelo vácuo, e acabou-se chegando à idéia

<sup>62</sup> Novamente é importante indicar que, aqui, utilizo a palavra "calor" de um modo pré-termodinâmico. As experiências de transformação de trabalho em "calor" são, muitas vezes, experiências em sistemas que procuram ser adiabáticos, e portanto o que se estuda é a variação da energia interna do sistema, e não calor que entra ou sai do sistema. Ver nota 26.

<sup>63</sup> Thomson, Benjamin (count of Rumford), "An inquiry concerning the source of the heat which is excited by friction", *Philosophical Transactions of the Royal Society* 88 (1798), pp. 80-102, uma lâmina, p. 286. Há uma edição recente das obras completas de Rumford: *The Collected Works of Count Rumford*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1968. Davy, Humphry, "An essay on heat, light, and the combinations of light", em: Beddoes, Thomas, *Contributions to Physical and Medical Knowledge, Principally from the West of England*, 1799; reimpresso em: *The Collected Works of Humphry Davy*, ed. por Davy, John. Nova York: Johnson Reprint, 1972, 9 vols., vol. 2, pp. 1-86. Sobre Rumford, e a fase pré-Mayer, veja-se: Brown, Sanborn C., *Benjamin Thomson — Count Rumford*. Oxford: Pergamon Press, 1967. Olson, Richard G. "Count Rumford, Sir John Leslie, and the study of the nature and propagation of heat at the beginning of the nineteenth century", *Annals of Science* 26 (1970), pp. 273-304; Langley, S. P. "The history of a doctrine", *American Journal of Science* (3) 37 (1889), pp. 1-23.

<sup>64</sup> Ver. por exemplo: Lilley, S. "Attitudes to the nature of heat about the beginning of the nineteenth century", *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 27 (1948), pp. 630-639; Fox, Robert, *The Caloric Theory of Gases, from Lavoisier to Regnault*. Oxford: Clarendon Press, 1971.

de que o calor radiante e a luz eram entidades muito semelhantes; então, pelo menos no vácuo, o calor seria constituído por algum tipo de ondas.

Costuma-se atribuir a Melloni o estabelecimento da identidade entre a natureza das radiações térmicas e a luz. Na verdade, isto é uma simplificação histórica. A situação não era completamente clara, e o próprio Melloni, em 1835, afirmava ter produzido por meio de filtragem um tipo de luz esverdeada que não produzia efeito térmico algum, mesmo quando fortemente condensada por lentes; e sugeria que era possível obter-se independentemente luz e calor radiante de mesmo índice de refração, o que parecia mostrar que se tratava de entidades distintas.<sup>65</sup>

Além de não ser clara a situação experimental, a teoria era ainda mais delicada. Se o calor radiante era um tipo de onda, ele deveria continuar a possuir a mesma natureza dentro dos corpos materiais. Mas então, por que motivo ele se propagava tão lentamente, quando comparado com os outros tipos de ondas: som e luz? E por que motivo as equações de propagação do calor não obedeciam às equações de propagação de ondas? Este era o principal problema teórico do modelo ondulatório do calor. Surgiram várias tentativas de solução, e Cauchy, por exemplo, procurou derivar as equações da condução de calor de Fourier a partir das equações de onda.<sup>66</sup>

Ampère propôs uma interessante solução.<sup>67</sup> A idéia de Ampère é mais ou menos a seguinte: em um fluido homogêneo, a propagação de ondas não pode se assemelhar à propagação do calor; mas em um meio constituído por uma parte homogênea, dentro da qual estão distribuídos sistemas descontínuos com densidade superior à do meio, a vibração desses sistemas pode se espalhar por eles segundo uma lei semelhante à da propagação do calor. Ampère identifica o calor à energia cinética de vibração dos átomos, e compara esses átomos vibrantes a uma rede de diapasões de mesma frequência distribuídos no ar. Por meio deste modelo, ele mostra que se poderia explicar as leis de condução do calor.

Embora em alguns modelos mecânicos do calor, como no de Ampère, indique-se claramente que o calor corresponderia à energia cinética (ou, mais exatamente, à "força viva") dos átomos ou moléculas, o que permitiria deduzir uma

<sup>65</sup> Melloni, M. "Observations et expériences relatives à la théorie de l'identité des agents qui produisent la lumière et la chaleur rayonnante", *Annales de Chimie et de Physique* (2) 59 (1835), pp. 418-426. Ver também: Brush, S. G. "The wave theory of heat", *British Journal for the History of Science* 5 (1970), pp. 145-167.

<sup>66</sup> Cauchy, A. "Mémoire où l'on montre comment une seule et même théorie peut fournir les lois de propagation de la lumière et de la chaleur", *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* 9 (1839), pp. 283-288.

<sup>67</sup> Ampère, A. M. "Note sur la chaleur et sur la lumière considérées comme résultant de mouvement vibratoire", *Annales de Chimie et de Physique* (2) 58 (1835), pp. 432-444.

conexão quantitativa entre o calor gerado e o trabalho consumido em um fenômeno, em outros modelos a ligação entre calor e grandezas mecânicas era diferente. Um caso interessante aparece no trabalho publicado por Mohr em 1837. O artigo de Mohr foi publicado 5 anos antes do trabalho de Mayer, na mesma revista, e é às vezes descrito como sendo uma antecipação das idéias de Mayer.<sup>68</sup> Neste artigo, Mohr fala sobre os trabalhos de Melloni, e baseando-se neles afirma que o calor só pode ser um tipo de vibração de alta frequência. Mas, a partir dessa idéia básica, acrescenta uma série de suposições errôneas.

Segundo Mohr, o calor é um tipo de força, pois ele é capaz de vencer a coesão dos corpos, que é uma força. Note-se que ele utiliza a palavra "força" no sentido newtoniano, e não como sinônimo de energia. Mohr indica que, se a água é aquecida a volume constante, um aumento de temperatura de 1°C produz um aumento de pressão de 97 atmosferas, e que portanto 1°C = 97 atm. Ora, essa identificação de temperatura com pressão só teria sentido se todos os materiais tivessem um aumento de pressão de 97 atmosferas para cada grau de aumento de temperatura; mas isso não ocorre, e a igualdade de Mohr não tem sentido.

Em outro ponto, Mohr afirma que "a temperatura é o número de vibrações que um corpo faz em um dado tempo", e daí deduz consequências totalmente erradas, interpretando erroneamente o aquecimento produzido na compressão dos gases. Uma análise detalhada do artigo de Mohr evidencia que ele estava muito longe da concepção da conservação da energia. No entanto, Tait, o grande adversário de Mayer, traduziu e publicou este artigo de Mohr,<sup>69</sup> e acrescentou ao seu final uma nota extremamente provocante: Tait considera o trabalho de Mohr como mais notável do que o de Mayer, e adiciona:

"De modo muito singular, Mayer não se refere [a este artigo], embora seu primeiro artigo tão elogiado tenha aparecido apenas cinco anos mais tarde na mesma revista. Ele [o artigo de Mohr] contém, sob forma consideravelmente superior, quase tudo o que é correto no artigo de Mayer; e, embora contenha muitos enganos, ele evita alguns dos maiores erros cometidos por Mayer, especialmente sua falsa analogia e seu raciocínio *a priori*. . . O próprio processo para determinar o equivalente mecânico do calor pelos dois calores específicos do ar, pelo qual Mayer recebeu louvor tão extraordinário em alguns cantos. . . é aqui expresso muito mais claramente do que o foi por Mayer cinco anos mais tarde."<sup>70</sup>

<sup>68</sup> Mohr era um dos editores dos *Annalen der Pharmacie*, ao lado de Justus Liebig e Emanuel Merck. Em 1837 Mohr publicou um longo trabalho, intitulado "Jahresbericht über neue Entdeckungen und Erweiterungen im Gebiete der Pharmacie und der dahin einschlagenden Wissenschaften, für das Jahr 1837; von Dr. Mohr". O artigo relevante é uma parte deste trabalho. Ver: Mohr, Friedrich, "Ansichten über die Natur der Wärme", *Annalen der Pharmacie* 24 (1837), pp. 141-147.

<sup>69</sup> Mohr, R. "Views of the nature of heat", trad. por Tait, *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (5) 2 (1876), pp. 110-114.

<sup>70</sup> Tait, em: Mohr (nota 69), p. 114.

As afirmações de Tait são falsas, e sua insinuação (na primeira frase reproduzida acima) de que Mayer teria utilizado o trabalho de Mohr, sem citá-lo, é absurda, pois suas idéias são completamente diferentes. Mohr de modo algum antecipa o processo utilizado por Mayer no cálculo do equivalente mecânico do calor. Não foi a vontade de adicionar uma informação histórica útil, mas uma raiva cega, e a vontade de diminuir o brilho do trabalho de Mayer, que motivou esta nota de Tait.

Deixando de lado o caso mais estrito das relações entre calor e energia mecânica, pode-se dizer que a idéia da transformabilidade de um tipo de coisa em outra, na física, foi apontada por vários autores, antes e depois do surgimento do primeiro trabalho de Mayer. Faraday, por exemplo, tendo realizado pesquisas nas áreas de eletrostática, eletricidade voltaica, magnetismo, química, e outros, estudou inúmeros fenômenos de conversão de um desses tipos de coisas em outras, e teve um vislumbre da lei de conservação da energia. Faraday propôs em 1835 a idéia de que se podia estabelecer um padrão quantitativo de equivalência entre "forças" químicas e elétricas — ou seja, um "equivalente químico da eletricidade", que não seria menos importante do que o equivalente mecânico do calor. Nos anos seguintes, Faraday sugere algo ainda mais geral, afirmando que as "forças" são indestrutíveis, embora interconvertíveis, e que todas elas são derivadas da eletricidade.<sup>71</sup> Suspeita-se até que as idéias de Faraday tenham influenciado Joule, que, como vimos, iniciou seu trabalho estudando reações químicas e fenômenos eletromagnéticos, e que devia estar a par do trabalho de Faraday.

Embora se possa ver em certas frases de Faraday uma antecipação da lei da conservação da energia, é importante notar que o próprio Faraday não fazia uma distinção clara entre grandezas intensivas, como a temperatura e a força (no sentido newtoniano), e grandezas extensivas, como massa e energia.<sup>72</sup> Apenas se pode aplicar a idéia de conservação a grandezas extensivas, mas Faraday não havia compreendido isso. Faraday utilizava, como Mayer, a expressão "a causa é igual ao efeito", mas aplicava-a para descrever a igualdade entre ação e reação (3.ª lei de Newton), e não para indicar a igualdade entre as quantidades de uma coisa que se transforma em outra. Por isso, não se pode dizer que Faraday tenha antecipado as idéias de Mayer.

Algo semelhante pode ser afirmado a respeito de William Grove. Este físico apresentou no mesmo ano da publicação do primeiro artigo de Mayer uma conferência na *London Institution* em que propunha a idéia de possibilidade de conversão mútua de todos os tipos de "forças". No ano seguinte, apresentou

<sup>71</sup> Gooding, D. "Metaphysics versus measurement: the conversion and conservation of force in Faraday's physics", *Annals of Science* 37 (1980), pp. 1-29.

<sup>72</sup> Sobre a diferença entre grandezas intensivas e extensivas, ver, por exemplo: Campbell, N. R. *Foundations of Science*. Nova York: Dover, 1957.

uma série de conferências sobre o assunto, e em 1846 publicou um livro que se tornou muito popular.<sup>73</sup>

As idéias expostas por Grove eram mais qualitativas do que quantitativas, e por isso assemelhavam-se muito às de Faraday. Em alguns pontos, Grove adota uma atitude reducionista, como a de Joule e Helmholtz, e pretende explicar todos os fenômenos da natureza a partir da mecânica; em outros pontos nega a existência de um tipo particular de "força" que possa ser considerada a mais importante ou a causa de todas as outras, já que todo tipo de "força" pode ser convertido em um outro. A idéia geral era fértil, mas ao tentar quantificar sua proposta Grove incorria em erros grosseiros, como o de considerar que o calor gerado pelo atrito de um corpo seria proporcional à diminuição da velocidade daquele corpo.<sup>74</sup>

Embora o trabalho de Grove tenha tido um importante papel na popularização da conservação das "forças", pode-se dizer que ele estava longe de compreender claramente a idéia dessa "força", e da natureza de um princípio de conservação.

Pode parecer que a visão aqui apresentada é muito parcial, por negar o valor de todos os outros proponentes da lei da conservação da energia, e enfatizar exageradamente o papel de Mayer. Por isto, como contra-exemplo, vale a pena indicar a existência de um obscuro dinamarquês que pode ser considerado um rival à altura de Mayer. Seu nome, pouco conhecido, é Ludwig August Colding.<sup>75</sup>

O primeiro trabalho apresentado publicamente por Colding data de 1845. Neste ano, ele apresentou à Academia Dinamarquesa de Ciências uma memória onde descreve idéias semelhantes às de Mayer, sobre a conservação e convertibilidade da energia, e também resultados de experiências sobre o calor produzido por atrito. A idéia que Colding toma como ponto de partida é muito curiosa, e pode parecer pouco científica:

"Já que as forças são seres espirituais e imateriais, e já que são entidades que só conhecemos por seu domínio sobre a natureza, essas entidades devem ser sem dúvida muito superiores a toda coisa material existente; e como é evidente que é apenas pelas forças que se exprime a sabedoria que percebemos e admiramos na natureza, esses poderes devem estar relacionados com o próprio poder espiritual, imaterial e intelectual que dirige o progresso da natureza. Mas se assim é, torna-se impossível conceber que essas forças sejam coisas mortais e percíveis. Sem dúvida alguma, portanto, elas devem

<sup>73</sup> Grove, William Robert. *On the Correlation of Physical Forces*. Londres, 1846. Ver: Cantor, G. N. "William Robert Grove, the correlation of forces, and the conservation of energy". *Centaurus* 19 (1975), pp. 273-290.

<sup>74</sup> Na verdade, para uma força de atrito constante, o calor gerado seria proporcional ao espaço percorrido, ou à variação do *quadrado* da velocidade do corpo.

<sup>75</sup> Dahl, P. F. *Ludwig Colding and the Conservation of Energy*. Nova York, 1972.

ser encaradas como absolutamente imperecíveis... Todas as vezes que uma força parece se aniquilar realizando um trabalho mecânico, químico ou de qualquer outra natureza, ela apenas se transforma, e reaparece sob uma nova forma, onde ela conserva toda a sua grandeza primitiva."<sup>76</sup>

Colding indica que essa idéia lhe ocorreu em 1839, ao estudar o teorema da conservação das "forças" mecânicas. Mas Colding esperou até ter uma confirmação experimental de suas idéias, antes de publicá-las; pois, em 1840, ao explicar suas idéias a Oersted,<sup>77</sup> foi aconselhado a abordar um estudo experimental antes de expor suas concepções.

No trabalho apresentado em 1843, Colding utiliza suas idéias para interpretar o calor desenvolvido ou absorvido na compressão ou expansão de gases, líquidos e sólidos,<sup>78</sup> mas apenas de forma qualitativa. Colding cita também a seu favor as experiências de produção de calor por atrito, de Rumford, Haldat, Morosi e outros; e realiza ele próprio experiências quantitativas de transformação de trabalho mecânico em calor, utilizando superfícies de latão em atrito com vários outros materiais: latão, zinco, chumbo, ferro, madeira e tecido. Colding varia a pressão e a velocidade do movimento, e em experiências repetidas cerca de 200 vezes verifica a existência de uma relação constante entre a energia mecânica perdida e o calor desenvolvido. As medidas iniciais apresentadas por Colding em 1843 davam uma relação de  $3,4 \text{ J} = 1 \text{ cal}$  — um resultado semelhante ao de Mayer. Mais tarde, graças a uma verba da Sociedade Real de Copenhague, Colding construiu um aparelho aperfeiçoado com o qual realizou experiências mais precisas; e publicou outros trabalhos, onde estudava as má-

<sup>76</sup> Colding, L. A. "On the history of the principle of conservation of energy", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) 27 (1864), pp. 56-64; esta carta de Colding foi traduzida por M. Verdet: Colding, M. A. "Lettre aux rédacteurs du *Philosophical Magazine* sur l'histoire du principe de la conservation de l'énergie", *Annales de Chimie et de Physique* (4) 1 (1864), pp. 466-477. O trabalho original de Colding, escrito em dinamarquês, foi apresentado em 1843, mas só foi publicado muitos anos depois: Colding, L. A. "Nogle Sretninger om Kraefterne", *Videnskabers Selskabs Skrifter Kjøbenhavn (Copenhagen)* 1 (1856), pp. 1-20.

<sup>77</sup> Hans Christian Oersted é bem conhecido por sua descoberta da ação de correntes elétricas sobre a agulha das bússolas. Oersted também já possuía idéia de uma correlação entre todas as forças da natureza, e certamente não ficou escandalizado com as estranhas idéias metafísicas de Colding, pois ele próprio havia escrito um livro intitulado *A Alma na Natureza*. Ver: Hirn (nota 38), p. 121. Sobre estes aspectos de Oersted, veja-se: Stauffer, C. "Speculation and experiment in the background of Oersted's discovery of electromagnetism", *Isis* 48 (1957), pp. 33-50.

<sup>78</sup> Na verdade, um líquido sólido comprimido não sofre um aquecimento proporcional ao trabalho de compressão, pois uma parte do trabalho fica armazenado sob a forma de energia potencial elástica. Uma mola de aço comprimida, por exemplo, não se aquece. Colding parecia não notar claramente a diferença entre os processos que ocorrem nos vários estados da matéria. A respeito do estudo experimental da questão, no início do século XIX, pode-se consultar: Colladon e Sturm, "Sur la compression des liquides", *Annales de Chimie et de Physique* (2) 36 (1827), pp. 113-159, 225-257.

quinas a vapor, assim como a evolução do sistema solar e da vida. É curioso também que Colding parece ter tido um vislumbre do princípio de degradação da energia.

Nota-se que no trabalho de Colding, como no de Mayer, há o aspecto marcante da *generalidade* da idéia, aliado a uma concepção quantitativa e à busca de um valor numérico para o fator de conversão do trabalho em calor. Pode-se dizer que os trabalhos de Colding são muito semelhantes ao de Mayer, em nível e em alcance, e apresentados quase ao mesmo tempo. Note-se ainda que, ao contrário do que ocorreu nos casos de Joule e Mayer, os trabalhos de Colding produziram muito boa impressão em seus ouvintes, como se pode inferir a partir da dotação em dinheiro para o prosseguimento de seus estudos; talvez isso tenha sido devido ao apoio de Oersted. De qualquer forma, se não houvesse o problema da barreira idiomática, e se a Dinamarca fosse naquela época um centro cultural mais influente, Colding talvez fosse tão citado nos livros históricos e didáticos quanto Mayer e Joule.

Por fim, vale a pena mencionar que Sadi Carnot, cujo livro publicado em 1824, *Sobre o poder motriz do fogo*,<sup>79</sup> apresenta a primeira proposta da segunda lei da termodinâmica, redigiu antes de sua morte (em 1832) uma série de notas manuscritas (publicadas postumamente, muito mais tarde)<sup>80</sup> em que apresenta uma antecipação da primeira lei da termodinâmica, e calcula para o equivalente mecânico do calor um valor igual ao proposto por Mayer, e baseado no mesmo raciocínio.<sup>81</sup> Se Carnot houvesse publicado essas notas durante sua vida, ele poderia ter sido considerado o pai de toda a termodinâmica.

<sup>79</sup> Carnot, Sadi, *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu, et sur les Machines Propres à Développer cette Puissance*. Paris: Bachelier, 1824.

<sup>80</sup> Ver: Mendoza, E. "Contribution to the study of Sadi Carnot and his work", *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 12 (1959), pp. 377-396. As notas manuscritas de Carnot foram entregues à Academia de Ciências de Paris em 1878, pelo seu irmão: Carnot, H. "Lettre accompagnant l'envoi d'une nouvelle édition des "Réflexions sur la puissance motrice du feu" par Sadi Carnot, et de divers manuscrits du même auteur", *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences (Paris)* 87 (1878), pp. 967-969. As notas foram parcialmente publicadas na reedição do livro de Carnot: Carnot, Sadi, *Réflexions...* Paris: Gauthier-Villars, 1878, p. 89. Há uma tradução em inglês do livro de Carnot, com uma seleção de suas notas manuscritas: Carnot, Sadi, *Reflections on the Motive Power of Fire and other Papers on the Second Law of Thermodynamics*, ed. por Mendoza, E. Nova York: Dover, 1960. As notas foram publicadas de forma completa em: Picard, Emile (ed.), *Sadi Carnot, Biographie et Manuscrit*. Paris: Gauthier-Villars, 1927. Há também uma reprodução completa das notas na reedição do livro de Carnot pela editora Blanchard (Paris) em 1953.

<sup>81</sup> Ulrich, Hoyer, "How did Carnot calculate the mechanical equivalent of heat?" *Centaurus* 19 (1975), pp. 207-219.

## OBSERVAÇÕES SOBRE AS FORÇAS DA NATUREZA INANIMADA\*

JULIUS ROBERT MAYER

O objetivo destas linhas é procurar a resposta à pergunta: o que devemos entender por "forças",<sup>1</sup> e como elas se relacionam entre si. Enquanto o nome *matéria* é usado para indicar objetos com propriedades bem definidas como o peso e o preenchimento do espaço, associa-se de preferência ao nome *força* o conceito do desconhecido, inexplorável, hipotético. Uma tentativa de tornar o conceito de força tão preciso quanto o de matéria, e designar assim apenas objetos de pesquisa válida, e as consequências que daí seguem, não deverão ser mal acolhidas pelos que gostam de uma concepção sobre a natureza clara e livre de hipóteses.

\* *Nota editorial:* Este artigo apareceu originalmente sob o título "Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur", em *Annalen der Chemie und Pharmacie* 42 (1842), pp. 233-240. A tradução aqui publicada é de Roberto de Andrade Martins. Todas as notas são do tradutor.

<sup>1</sup> Mayer utiliza aqui a palavra alemã "Kraft", cuja tradução, em um texto moderno de física, seria "força"; e, em traduções inglesas e francesas realizadas no século passado, traduziu-se "Kraft" por "force": Mayer, J. R. (trad. G. C. Foster) "Remarks on the Forces of Inorganic Nature", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) 24 (1862), pp. 371-377; Verdet, M. "Fragments d'un mémoire de M. J.-R. Mayer, de Heilbronn, ayant pour titre: Remarques sur les forces de la nature inanimée", *Annales de Chimie et Physique* (3) 34 (1852), pp. 501-503. Também aqui será utilizada a tradução de "Kraft" por "força". No entanto, é importante assinalar que pela palavra "Kraft" Mayer quer indicar algo muito diferente de nosso conceito atual de força, ou do conceito newtoniano que nada tem a ver com o conceito de Mayer. A posição de Mayer aparece mais claramente em dois trabalhos posteriores: Mayer, Julius Robert, *Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel*. Heilbronn: C. Drechsler, 1845; reimpresso, juntamente com o primeiro artigo de Mayer, em: Mayer [Julius] Robert, *Die Mechanik der Wärme — zwei Abhandlungen*. Leipzig: Wilhelm Englemann, 1911. Mayer, Julius Robert, *Bemerkungen über das mechanische Äquivalent der Wärme*. Heilbronn: C. Drechsler, 1851. Parcialmente traduzido por G. C. Foster: Mayer, J. R. "Remarks on the mechanical equivalent of heat", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) suppl. 25 (1863), pp. 493-522. Nestes trabalhos, Mayer diz que aqueles que edificaram a mecânica abstraíram da experiência de puxões e empurrões o conceito de força ("Kraft"); e que, por causa desse uso em mecânica, as outras ciências também adotaram a gravidade como modelo de "Kraft". Mas isso originou, segundo Mayer, confusões entre coisas distintas; e por isso Mayer propõe para a palavra "Kraft" um outro uso, que torna impossível, por exemplo, chamar o peso de um corpo pelo nome "Kraft". Na verdade, Mayer está seguindo a tradição de Leibniz, criador do conceito de "força viva" ( $mv^2$ ), correspondente, em nossa atual terminologia, ao dobro da energia cinética. Poderíamos utilizar a tradução "energia", mas isso seria uma violação histórica, pois o termo "energia" só adquiriu um significado preciso, em física, dez anos após a publicação do artigo de Mayer, pela influência de Rankine e Kelvin: Rankine, W. J. M. "On the general law of the transformation of energy", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4) 5 (1853), pp. 106-117; Rankine, W. J. M. "On the phrase 'potential energy', and on the definition of physical quantities", *ibidem* (4) 33 (1867), pp. 88-92. Na verdade, na época de Mayer, faltava uma terminologia adequada para exprimir o que ele queria dizer, e por isso ele utilizou uma palavra utilizada na época de muitos

Forças são causas, e por isso aplica-se totalmente a elas o princípio: *Causa aequat effectum*.<sup>2</sup> Se a causa  $c$  tem o efeito  $e$ , então  $c = e$ ; se  $e$  é novamente a causa de um outro efeito  $f$ , então  $e = f$ , e assim por diante:  $c = e = f \dots = c$ . Em uma corrente de causas e efeitos, como se torna claro pela natureza de uma igualdade, nenhum elo ou parte de um elo pode tornar-se nulo. Nós chamaremos esta primeira propriedade de todas as causas de *indestrutibilidade*.

Se a causa dada  $c$  produziu um efeito  $e$  igual a si, então, por isso mesmo,  $c$  deixou de existir:  $c$  se transformou em  $e$ ; se após a produção de  $e$ , restasse ainda uma parte de  $c$  ou ela inteira, então esta causa restante deveria ainda corresponder a outro efeito, e assim o efeito [total] de  $c$  deixaria em geral de corresponder a  $e$ , o que é contrário à suposição de que  $c = e$ . Assim, como  $c$  se torna  $e$ ,  $e$  se torna  $f$ , etc., devemos considerar essas grandezas como diferentes formas de manifestação de um mesmo objeto. A capacidade de assumir diferentes formas é a segunda propriedade essencial de todas as causas. Associando as duas propriedades, podemos dizer: Causas são objetos (quantitativamente) *indestrutíveis* e (qualitativamente) *mutáveis*.

Encontram-se na natureza duas classes separadas de causas, entre as quais não ocorrem interconversões, conforme mostra a experiência. Uma classe é constituída pelas causas que possuem as propriedades de ponderabilidade e impenetrabilidade — as [formas de] matéria; a outra, pelas causas às quais faltam essas últimas propriedades — as forças, também chamadas *imponderáveis*

modos diferentes e conflitantes, e deu-lhe um significado preciso. Agora, no século XX, ao traduzir o termo "Kraft" de Mayer por "força", estamos correndo o risco de evocar na mente dos leitores uma série de associações incompatíveis com o argumento de Mayer. Por isso, pessoalmente, eu preferiria traduzir "Kraft" por uma palavra um pouco mais vaga e sem significado moderno preciso, tal como "poder". A palavra "poder" é uma das traduções de "Kraft" indicadas nos dicionários, e teria em minha opinião a vantagem de permitir invocar um significado mais amplo e obscuro, como o que Mayer queria indicar. No entanto, acatamos aqui a tradução de "Kraft" por "força", seguindo a sugestão de Zeljko Loparić, que leu e aconselhou algumas mudanças na primeira versão desta tradução.

<sup>2</sup> "A causa é igual ao efeito" (em latim, no original). Esta é uma fórmula famosa, popularizada pelos escolásticos, e cuja idéia remonta a Aristóteles. Na sua *Física*, Aristóteles estuda o problema filosófico da existência da transformação. Consideremos por exemplo um homem que se torna músico (*Física* 1.7); num certo sentido, aquilo que se transformou sobreviveu através do processo, pois o homem continua um homem quando se torna músico; num outro sentido, aquilo que existia não sobrevive, pois a falta de musicalidade desapareceu. "Traçando tais distinções, pode-se perceber a partir de um exame dos vários casos de transformação . . . que, como dizemos, deve sempre existir alguma coisa subjacente, a saber, aquilo em que ocorreu a mudança, e que isto, embora sempre uma unidade, não tem forma constante." (190a 13-15). Por isto, haveria sempre, de acordo com Aristóteles, algo constante em toda transformação, e que seria a *matéria*: "Pois minha definição de matéria é esta: o substrato primário de cada coisa, a partir do qual ela vem a ser sem qualificação, e que persiste no resultado." (192a 31-33). De acordo com a classificação aristotélica de causas, portanto, é apenas com relação à *causa material* que se pode afirmar que a causa é igual ao efeito. Ver: *The Works of Aristotle*, trad. Ross, W. D. Oxford: Clarendon Press, 1970, vol. II — *Physica*.

por essa propriedade negativa indicada. As forças são, portanto: *objetos indestrutíveis, mutáveis, imponderáveis*.

Utilizaremos primeiramente a matéria para estabelecer um exemplo de causas e efeitos. O gás explosivo,  $H + O$ , e a água  $HO$ ,<sup>3</sup> relacionam-se como causa e efeito, portanto  $H + O = HO$ . Mas de  $H + O$ ,  $HO$ , vem também calor além de água, representado por *cal.*; este calor deve igualar-se a uma causa  $x$ ; temos portanto:  $H + O + x = HO + cal.$ ;<sup>4</sup> pode-se agora perguntar se  $H + O = HO$  realmente, e  $x = cal.$ , e não por exemplo  $H + O = cal.$ , e  $x = HO.$ , do que também poder-se-ia obter a igualdade acima indicada, e assim em muitos outros casos. Os defensores do Flogístico reconheciam a igualdade entre *cal* e  $x$ , a que chamavam Flogístico, e deram assim um grande passo avante, mas confundiram-se em seguida em um sistema de erros, pois colocavam  $-x$  no lugar de "O", obtendo assim, por exemplo,  $H = HO + x$ .

A química, cujo objetivo é desenvolver igualdades que representem as conexões causais entre [tipos de] matéria, ensina-nos que da matéria como causa surge matéria como efeito; mas com igual direito pode-se também dizer que da força como causa corresponde uma força como efeito. Como  $c = e$ , e  $e = c$ , é pouco natural chamar um membro da igualdade de *força*, e ao outro de *efeito da força*, ou *fenômeno*, e associar conceitos diferentes às expressões *força* e *fenômeno*; portanto, em resumo: se a causa é matéria, o efeito também o é; se a causa é força, o efeito também é uma força.<sup>5</sup>

Uma causa que realiza o levantamento de uma carga é uma força; seu efeito, *a carga erguida*, é também igualmente uma força; de modo mais geral pode-se exprimir isso assim: *uma distância espacial entre objetos ponderáveis é uma força*;<sup>6</sup> como esta força produz a queda dos corpos, chamamo-la de *força de que-*

<sup>3</sup> Mayer utiliza aqui a fórmula  $HO$ , ao invés de  $H_2O$ , para a água. Historicamente, como se sabe, Dalton propôs para a água exatamente este tipo de composição: um átomo de hidrogênio, e um átomo de oxigênio em cada molécula. A fórmula  $HO$  foi aceita durante muito tempo pelos químicos, embora em 1814 Berzelius já tenha sugerido substituí-la por  $H_2O$ . Aparentemente, Mayer não estava ciente dessa "nova" proposta. Sobre este assunto, veja-se: Coward, H. F. "John Dalton", *Journal of Chemical Education* 4 (1927), pp. 22-37; Partington, J. R. *A Short History of Chemistry*. Londres: Macmillan, 1951, especialmente pp. 153-214.

<sup>4</sup> No original, encontramos a equação  $H + O + x = H + cal$ , o que parece ter sido um descuido de Mayer ou erro tipográfico da revista. As traduções e edições posteriores corrigem este erro.

<sup>5</sup> Este parágrafo do artigo de Mayer, assim como o parágrafo anterior, não foram incluídos em uma reedição do artigo, na série *Ostwald's Klassiker der exakten Wissenschaften*, n.º 180: Mayer, Julius Robert, *Die Mechanik der Wärme (zwei Abhandlungen)*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1911, pp. 1-8.

<sup>6</sup> Em linguagem atual, diríamos: uma distância multiplicada por uma força é uma energia. A linguagem física utilizada por Mayer é bastante confusa, e não corresponde ao estado da ciência de sua época.

da. Força de queda e queda, e ainda de modo mais geral, força de queda e movimento, são forças que se relacionam como causa e efeito, forças que se transformam uma na outra, duas formas diferentes de manifestação de um mesmo objeto. Por exemplo: uma carga parada no chão não é uma força: ela não é nem causa de um movimento, nem do levantamento de uma outra carga; mas ela se transforma nisto [em uma força] na medida em que é erguida acima do solo; a causa — a distância entre uma carga e a Terra — e o efeito — a quantidade do movimento gerado — estão em uma relação de igualdade, como ensina a mecânica.<sup>7</sup>

Como se considera a gravidade [*Schwere*] como causa da queda, fala-se de uma força da gravidade [*Schwerkraft* = peso] e assim se confunde os conceitos de força e de propriedade;<sup>8</sup> falta a toda propriedade justamente aquilo que cada força deve essencialmente possuir, a *união* de indestrutibilidade e mutabilidade; por isso, entre uma propriedade e uma força, entre gravidade e movimento, não é possível estabelecer a igualdade que seria necessária em uma relação causal corretamente concebida. Se dermos à gravidade o nome de força, pensar-se-á então em uma causa que, sem diminuir, produz efeito, sustentando-se assim portanto representações *errôneas* sobre as conexões causais das coisas. Para que um corpo possa cair, seu levantamento é não menos necessário do que sua gravidade, e por isto não se deve atribuir a queda do corpo apenas à última.<sup>9</sup>

O objetivo da mecânica é desenvolver as igualdades existentes entre força de queda e movimento, movimento e força de queda, e entre os diversos movimentos; lembraremos aqui apenas um ponto: a grandeza  $v$  da força de queda é diretamente proporcional à grandeza  $m$  da massa e de sua elevação  $d$  — colocan-

<sup>7</sup> Ao se referir a "quantidade de movimento", ou simplesmente "movimento", Mayer se refere àquilo que Leibniz chamou de "força viva", ou melhor ainda, àquilo que atualmente denominamos "**energia cinética**". O "poder de queda" corresponde à nossa atual "energia potencial gravitacional". Utilizando nossa linguagem moderna, poderíamos dizer:  $mgh$  (peso multiplicado pela altura, ou energia potencial) =  $mv^2/2$  (energia cinética produzida na queda do objeto).

<sup>8</sup> Segundo Mayer, o peso ("*Schwerkraft*") não deveria ter este nome, pois a palavra "*Schwerkraft*" indica obviamente um tipo de *Kraft* (força). Porém, o peso de um objeto não se *transforma* em seu movimento de queda, e portanto o uso do princípio de igualdade entre causa e efeito (utilizado aqui como um princípio metacientífico, ou metanomológico) impede o uso da idéia de que o peso é uma *causa* da queda. Ao invés de uma *causa* (no sentido de *força*), o peso seria, segundo Mayer, apenas uma *propriedade*. Em seu trabalho de 1845 (ver Nota 1), Mayer esclarece que a força não é causa do movimento, mas é a causa da aceleração.

<sup>9</sup> Ou seja: a força de queda provém conjuntamente do peso e da altura, e por isso é natural igualá-la ao produto dessas duas grandezas.

do-se o raio da Terra =  $\infty$ :<sup>10</sup>  $v = md$ . Se a elevação  $d = 1$  da massa  $m$  gera nesta massa o movimento de velocidade final  $c = 1$ , teremos também  $v = mc$ ; mas a partir das relações conhecidas que existem entre  $d$  e  $c$ , tem-se que  $mc^2$  é a medida do poder  $v$  para outros valores de  $d$  ou  $c$ ; portanto,  $v = md = mc^2$ ; descobrimos que a lei da conservação das forças vivas se fundamenta na lei geral da indestrutibilidade das causas.<sup>11</sup>

Em inúmeros casos vemos um movimento cessar, sem que ele tenha produzido um outro movimento, ou um levantamento de um peso; mas uma força que existiu não pode se tornar nula, e sim apenas transformar-se em uma outra forma [de força], e pode-se conseqüentemente perguntar: que outras formas pode assumir a força que aprendemos a conhecer como força de queda e movimento? Apenas a experiência pode nos fornecer informação sobre isso. Para tornar a experimentação conveniente, devemos seleccionar instrumentos que possam produzir realmente uma cessação do movimento e que sejam o mínimo possível alterados pelos objetos pesquisados. Friccionemos por exemplo duas placas metálicas entre si, e observaremos o desaparecimento do movimento, e em contraposição veremos o aparecimento de calor; pergunta-se agora apenas se o movimento é a causa do calor. Para nos assegurarmos dessa relação, devemos esclarecer a questão: nos inúmeros casos em que o calor aparece quando há desaparecimento do movimento, não terá o movimento um outro efeito além da produção de calor, e o calor uma outra causa além do movimento?

Ainda não se desenvolveu uma tentativa séria de apontar os efeitos do movimento que cessa; sem querer excluir de antemão as hipóteses que possivelmente serão apresentadas, faremos a este respeito apenas a observação de que não se pode colocar como regra que este efeito seja uma alteração do estado de agregação

<sup>10</sup> Se o raio da Terra não é considerado infinito, é preciso levar em conta que o peso de um objeto varia com sua altura; e, nesse caso, já não vale a relação simples de proporcionalidade entre energia potencial e altura. Note-se que, aqui, Mayer confunde os conceitos de peso e massa. Ao invés de  $v = md$ , deveríamos ter  $v = mgd$ , ou  $v = pd$ . Como ficará mais claro adiante, Mayer na verdade só se preocupa com proporcionalidades, em suas fórmulas mecânicas.

<sup>11</sup> Este trecho, bastante confuso, poderia talvez ser assim reescrito: Pode-se escolher como unidade de velocidade aquela que é adquirida por um corpo que cai de uma altura unitária; o movimento gerado nessa queda será proporcional à massa  $m$  que cai, e dependerá da velocidade  $c$ ; a medida do movimento produzido nesta queda poderia a priori ter a forma  $v = mc$ , ou  $v = mc^2$ , ou  $v = mc^3$ , ou alguma outra combinação de  $m$  e  $c$ ; sabemos apenas que o conceito utilizado impõe que essa medida do movimento cresça com a massa e a velocidade. Mas, se  $c = 1$ , temos que, numericamente,  $mc = mc^2 = mc^3$ , etc. O problema é saber, para outras velocidades, qual a fórmula que deve ser usada. A partir da experiência, verifica-se que, para outros valores de  $d$  e de  $c$ , temos  $c^2$  proporcional a  $d$ . Atualmente, escreveríamos:  $v = mgd = mc^2 \cdot 2$ . Mayer omite a aceleração da gravidade  $g$ , e o fator 2 da energia cinética. Podemos desculpá-lo levando em conta que ele está apenas preocupado com a proporcionalidade das grandezas, na fórmula. Em todas as suas equações podemos supor que está implícita uma constante a ser determinada:  $v = k_1 md = k_2 mc^2$ .

dos corpos em movimento que se atritam, etc.<sup>12</sup> Se temos que é necessária uma certa quantidade de movimento  $v$  para converter uma matéria atritada  $m$  em  $n$ , então é preciso que  $m + v = n$ , e que  $n = m + v$ , e pela reconversão de  $n$  em  $m$ , deve surgir  $v$  de novo, sob alguma forma.<sup>13</sup> Pelo atrito longamente continuado entre duas placas metálicas podemos gradualmente destruir uma enorme quantidade de movimento; mas poderemos pensar em encontrar sequer um traço do poder desaparecido no pó metálico recolhido, e querer recuperá-lo daí? Repeitimos, o movimento não pode se transformar em nada, e movimentos opostos, ou negativos, não podem ser colocados = 0; tampouco podem surgir do nada movimentos contrários, ou uma carga elevar-se por si mesma.

Sem reconhecimento de uma conexão causal entre movimento e calor, tampouco se pode dar conta do movimento por acaso desaparecido, nem se pode esclarecer sem isso a origem do calor. Ele não surge acompanhando a diminuição de volume dos corpos que se atritam.<sup>14</sup> Conhecidamente pode-se derreter dois pedaços de gelo pelo atrito mútuo em um espaço sem ar;<sup>15</sup> mas pergunte-se agora se por

<sup>12</sup> Quando se martela um objeto ou se serra uma peça de madeira, o efeito imediatamente visível do esforço empregado é uma alteração da forma, ou ruptura, ou mudança do estado de divisão do corpo. Mas Mayer procura mostrar que não se pode interpretar essas mudanças como o efeito do desaparecimento do movimento, e utiliza em seu argumento, mais uma vez, o princípio de igualdade entre causa e efeito.

<sup>13</sup> Mayer supõe implicitamente que toda transformação das "forças" é reversível. Na verdade, aceitamos atualmente a existência de fenômenos que são irreversíveis, apesar de neles haver conservação de energia. A associação entre as idéias de *conservação* e *reversibilidade* é bastante natural, embora não necessária. Veja-se sobre esse tema a obra: Meyerson, E. *Identité et Réalité*. Paris: J. Vrin, 1951.

<sup>14</sup> Os defensores da doutrina do calórico explicavam o aquecimento produzido quando se comprime um gás, afirmando que a redução de volume do gás levava a uma diminuição de seu poder de reter calor (ou seja, uma redução da capacidade térmica), e que por isso uma parte do calórico contido no corpo era expulsa dele pela compressão. Neste parágrafo, Mayer procura mostrar que não é possível utilizar uma explicação desse tipo para o aquecimento produzido por atrito. Mas, na verdade, os defensores do calórico possuíam boas explicações também para o calor que surge no atrito. Ver, sobre este assunto, o interessante artigo: Brown, S. C. "The Caloric Theory of Heat". *American Journal of Physics* 19 (1951), pp. 367-373.

<sup>15</sup> Mayer aqui se refere, provavelmente, às experiências realizadas em 1799 por Humphry Davy, e que ainda hoje são citadas incorretamente em um enorme número de livros didáticos e históricos. Ao contrário da versão comum, segundo a qual Davy teria fundido dois pedaços de gelo por atrito no vácuo, Andrade mostrou que a experiência descrita por Davy foi realizada na presença de ar, e que mesmo assim dificilmente se pode acreditar que foi fundida uma quantidade apreciável de gelo, sendo absurda a deserção que o próprio Davy fornece dos resultados. Veja-se: Andrade, E. N. da C. "Two historical notes". *Nature* 135 (1935), pp. 359-360.

uma compressão inaudita pode-se transformar gelo em água?<sup>16</sup> Como o autor descobriu, a temperatura da água se eleva por uma forte agitação. A água aquecida (de 12° a 13°C) tem após a agitação um volume maior do que antes; de onde vem agora a quantidade de calor que através de repetidas agitações no mesmo aparelho pode ser produzida com a freqüência que se deseja? <sup>17</sup> A hipótese das vibrações térmicas sugere a lei de que o calor seja o efeito do movimento,<sup>18</sup>

<sup>16</sup> Na verdade, contrariamente ao que Mayer acreditava, é possível transformar gelo em água por compressão, sem atrito. Mas apenas em 1849 esse efeito foi previsto teoricamente por James Thomson, e demonstrado experimentalmente no ano seguinte por seu irmão: Thomson, J. "Theoretical considerations on the effect of pressure in lowering the freezing point of water", *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 16 (1849), pp. 5-75; Thomson, W. (Lord Kelvin), "Experiments on the effect of pressure in lowering the freezing-point of water", *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (3) 37 (1850), pp. 123-131; reproduzido em Thomson, W. *Mathematical and Physical Papers*. Cambridge: Cambridge University Press, 1882, vol. I, pp. 156-164.

<sup>17</sup> Mayer não indica, nem neste artigo nem em outros de seus escritos, o modo como realizou sua experiência. Mas em seu trabalho "Die organische Bewegung..." (Nota 1), Mayer descreve uma outra observação associada a esta: em uma fábrica de papel, ele estudou a agitação mecânica, em grandes recipientes, da massa de papel com água. Em cada um dos quatro recipientes que ele observou, havia cerca de 600 kg dessa mistura. A temperatura ambiente era de 15°, e a mistura dos cilindros estava inicialmente a uma temperatura inferior à ambiente. A mistura de água e papel demorava de 32 a 40 minutos para passar de 14 a 16°C (temperaturas bem próximas, ligeiramente acima e abaixo da temperatura ambiente, de tal forma que a condução de calor do ambiente ou para o ambiente pudesse ser considerada praticamente nula). Mayer indica que esse aquecimento era devido a uma potência mecânica aplicada de cerca de 3.16 cavalos-força, e a partir de seus dados obtém-se que a produção de uma caloria exigiu cerca de 3.5 J de trabalho. As primeiras experiências quantitativas de agitação de água e medida de seu aquecimento foram publicadas por Joule e Colding, e há suspeitas de que Joule leu o artigo de Mayer antes de planejar seu experimento: Mendoza, E. e Cardwell, D. S. L. "On a suggestion concerning the work of J. P. Joule". *The British Journal for the History of Science* 14 (1981), 177-180.

<sup>18</sup> Nesta frase obscura, Mayer parece querer enfatizar a diferença entre suas idéias e anteriores propostas de interpretação do calor como movimentos microscópicos das partículas materiais de um corpo. Tal idéia era bem conhecida, e é exposta claramente, por exemplo, por Lavoisier e Laplace, em um artigo publicado em 1780: "Na hipótese que examinamos, o calor é a força viva que resulta dos movimentos insensíveis das moléculas de um corpo: ela é a soma dos produtos da massa de cada molécula pelo quadrado de sua velocidade." Lavoisier e Laplace. "Mémoire sur la chaleur". *Mémoires de l'Académie des Sciences* (Paris), (1780), p. 355. reimpresso em: *Oeuvres de Lavoisier*. Paris: Imprimerie Impériale, 1862, vol. II, pp. 283-333, esp. p. 286.

mas não sugere essa relação causal em todo seu alcance, apenas coloca maior peso em oscilações irregulares.<sup>19</sup>

Se está agora acertado que em muitos casos (*exceptio confirmat regulam*)<sup>20</sup> não se pode encontrar o surgimento de qualquer outro efeito do movimento desaparecido, exceto calor; e para o calor que surge, nenhuma outra causa, exceto o movimento: então a partir daí é preferível supor que o calor surge do movimento, do que supor uma *causa* sem efeito ou um efeito sem causa; assim como o químico, ao invés de ver desaparecer *H* e *O*, e água surgir, sem indagar e sem tentar esclarecer o modo como isso ocorre, estabelece uma conexão entre *H* e *O* por um lado, e água por outro lado.

A conexão natural existente entre força de queda, movimento e calor pode ser compreendida claramente do seguinte modo. Sabemos que aparece calor quando as partículas materiais isoladas de um corpo se aproximam umas das outras;<sup>21</sup> aumento de densidade gera calor; ora, aquilo que se aplica às menores partículas e às pequenas distâncias entre elas, deve também aplicar-se às grandes massas e espaços mensuráveis. A queda de uma carga é uma verdadeira redução do volume da Terra, e deve também seguramente estar conectada ao calor que aí aparece; esse calor deve ser exatamente proporcional à grandeza da carga e sua altura. A partir dessa consideração é-se conduzido de forma simples e completa à igualdade já descrita entre força de queda, movimento e calor.

Contudo, assim como da conexão existente entre força de queda e movimento não se pode concluir que a natureza da força de queda seja movimento, tampouco se pode chegar a essa conclusão para o calor.<sup>22</sup> Nós preferimos muito ao contrário concluir que para que possa surgir calor, o movimento — seja um [movimento]

<sup>19</sup> Antes do desenvolvimento da termodinâmica, existiam várias teorias ondulatórias sobre o calor, em que ele era considerado um movimento semelhante ao som. Rumford, por exemplo, tinha uma doutrina desse tipo: Goldfarb, S. J. "Rumford's theory of heat: a reassessment". *The British Journal for the History of Science* 10 (1977), pp. 25-36; Brown, S. C. "Count Rumford's concept of Heat", *American Journal of Physics* 20 (1952), pp. 331-334. Como esta era a opinião predominante dos que se opunham à teoria do calórico, não está claro o motivo pelo qual Mayer se refere a oscilações irregulares. Por outro lado, note-se que Mayer não adota um modelo mecânico para o calor; ao contrário, sua teoria é fenomenológica. Ao invés de dar maior peso a um modelo, Mayer enfatiza a relação causal.

<sup>20</sup> "A exceção confirma a regra" — em latim, no original. Mayer tinha uma especial predileção por máximas em latim, de sabor escolástico. Em outros trabalhos, ele utiliza o princípio "*Ex nihilo nil fit*" ("Nada pode ser produzido do nada"), e outras fórmulas semelhantes.

<sup>21</sup> Aqui, Mayer parece estar se referindo ao resultado, bem conhecido na época, de experiências de aquecimento de gases por compressão, realizadas por Gay-Lussac em 1807. Sobre o papel dessas experiências no surgimento da termodinâmica, veja-se: Kuhn, T. S. "The caloric theory of adiabatic compression", *Isis* 49 (1958), pp. 132-140.

<sup>22</sup> Aqui aparece claramente a posição não mecanicista de Mayer. Ele admite a existência de uma variedade de tipos distintos de "forças" interconvertíveis; nenhum tipo é fundamental, e um não é redutível ao outro.

simples, ou vibratório, como a luz, o calor radiante, etc. — deve cessar de ser movimento.

Se força de queda e movimento são equivalentes ao calor, o calor também deve naturalmente ser igual a movimento e força de queda. Como o calor aparece como efeito de diminuição de volume e cessação de movimento, assim também o calor desaparece como causa quando aparecem seus efeitos: movimento, aumento de volume, erguimento de uma carga.

Na roda d'água, à custa da diminuição de volume continuamente sofrida pelo corpo da Terra devida à queda da água, surge movimento, e desaparece depois, trazendo uma importante quantidade de calor; ao contrário disso a máquina a vapor serve para decompor o calor em movimento ou erguimento de carga. Uma locomotiva com seu comboio é comparável a um aparelho de destilação; o calor aplicado sob a caldeira sai como movimento, e este se deposita de volta nos eixos das rodas como quantidade de calor.<sup>23</sup>

Concluimos nossas teses, que resultam necessariamente do princípio *causa aequat effectum*, e que estão em perfeita harmonia com todos os fenômenos da natureza, com uma consequência prática. Para a resolução das equações estabelecidas entre força de queda e movimento é preciso determinar através de um experimento o espaço de queda para um tempo determinado, para o primeiro segundo, por exemplo;<sup>24</sup> de forma semelhante, para a resolução das equações existentes entre força de queda e movimento por um lado, e por outro lado calor, deve-se responder à pergunta, de quão grande seja a quantidade de calor correspondente a uma determinada quantidade de força de queda de movimento. Por exemplo, podemos determinar a que altura devemos erguer um determinado peso acima do solo da Terra para que seu poder de queda seja equivalente ao aquecimento de um igual peso de água de 0° a 1°C. Que uma tal equivalência esteja realmente fundamentada na natureza, pode-se considerar como o *résumé*<sup>25</sup> do que precedeu.

Pela aplicação das leis estabelecidas às relações de calor e volume dos gases encontra-se que o abaixamento do mercúrio que comprime um gás iguala-se à quantidade de calor liberada pela compressão e segue-se daí — sendo o índice de proporcionalidade das capacidades [térmicas] do ar atmosférico sob pressão

<sup>23</sup> Esta descrição que Mayer apresenta da *transformação* de calor em movimento não era, de forma alguma, comum na sua época. Carnot, por exemplo, supunha que todo o calor fornecido ao vapor, na caldeira, era depois transmitido pelo vapor à atmosfera: o calor não era, segundo Carnot, transformado em trabalho. No entanto, havia já um precedente: Séguin, Marc, *De l'Influence des Chemins de Fer et de l'Art de les Tracer et de les Construire*. Paris: Blanchard, 1839, pp. 382-403.

<sup>24</sup> Ver Nota 11. Na equação  $k_1.md = k_2.mc^2$ , a relação entre a velocidade adquirida e a altura percorrida na queda não pode ser prevista *a priori*: é preciso determinar uma constante empírica (a aceleração da gravidade), através de medidas.

<sup>25</sup> Em francês no original.

constante e sob volume constante = 1,421.<sup>26</sup> que o abaixamento de um peso de uma altura de aproximadamente 365 m corresponde ao aquecimento de um igual peso de água, de 0° a 1°.<sup>27</sup> Compare-se com estes resultados as realizações de nossas melhores máquinas a vapor, e ver-se-á que apenas uma parte medíocre do calor aplicado sob a caldeira se transformou realmente em movimento ou erguimento de carga; e isto pode servir como justificação para a procura de outra forma vantajosa de produção de movimento, ao invés do desperdício da diferença química entre C e O.<sup>28</sup> a saber: pela transformação da eletricidade, produzida por meio químicos, em movimento.

APENDICE:

*O cálculo do equivalente mecânico do calor*<sup>29</sup>

Para calcular a correspondência entre calor e efeito mecânico, Mayer começa por indicar que, de acordo com as experiências de Gay-Lussac, um gás que se expande no vácuo não sofre alteração de temperatura; e que, portanto, a simples expansão de um gás nem altera seu calor específico nem altera seu estado térmico. Mas também se sabia que um gás, ao se expandir sob pressão, diminui de temperatura. Essa redução de temperatura seria devida a uma transformação de calor em trabalho de expansão. E isso explicaria igualmente o motivo da diferença entre o calor absorvido por um gás para se aquecer quando o aquecimento é realizado a pressão constante (e o gás se dilata), ou a volume constante. No primeiro caso, o calor fornecido não só aumenta a temperatura do gás, mas também produz um efeito mecânico. No segundo caso, o calor fornecido só aumenta a temperatura do gás, pois ele não se dilata e não realiza trabalho. A diferença entre os dois calores específicos estará portanto relacionada com o trabalho realizado.

<sup>26</sup> O raciocínio desenvolvido aqui por Mayer de forma extremamente concisa, foi apresentado de forma mais elaborada em seu segundo trabalho publicado. "Die organische Bewegung..." (Nota 1). Reproduzimos o argumento de Mayer no Apêndice ao presente artigo.

<sup>27</sup> O resultado obtido por Mayer, convertido a unidades modernas, corresponde a um valor de 3,6 J/cal para o equivalente mecânico do calor; o valor atualmente aceito é de aproximadamente 4,2 J/cal. A diferença não é devida a um erro de cálculo ou de princípio, e sim aos dados inexatos disponíveis na época e utilizados por Mayer.

<sup>28</sup> Mayer fala em "diferença química" sem esclarecer o que isso significa. Mayer provavelmente faz uma analogia entre a atração química entre os átomos de dois reagentes e a atração gravitacional entre um corpo e a Terra. Nos dois casos, o "poder" disponível seria proporcional à distância entre os átomos, ou então entre o corpo e a Terra), e talvez Mayer tenha utilizado esta imagem para referir-se à "diferença química". Note-se que Mayer considera que as máquinas térmicas desperdiçam o poder disponível, e que máquinas elétricas (na época, uma simples curiosidade científica) seriam mais eficientes. De fato, nos atuais motores elétricos, o aproveitamento da energia é muito melhor do que nos motores térmicos.

<sup>29</sup> O argumento aqui apresentado é uma versão um pouco modificada do cálculo apresentado por Mayer no seu trabalho "Die organische Bewegung..." (Nota 1).

Para se aquecer de 1°C um grama de ar, a *volume constante*, é necessário fornecer-lhe um calor  $x$ . Para aquecer este mesmo ar de 1°C, a *pressão constante*, será preciso fornecer-lhe um calor  $x + y$ , onde  $y$ , a diferença entre os dois calores absorvidos, é equivalente ao trabalho realizado pelo gás ao se dilatar. Se  $P$  é o peso que comprime o gás, e esse peso se ergue a uma altura  $h$  pela dilatação do gás, então  $y = P.h$ .

Um centímetro cúbico de ar a 0°C e pressão de 76 cm de mercúrio (ou seja: pressão atmosférica normal), tem uma massa de 0,0013 g.<sup>300</sup> Uma variação de temperatura de 1°C produzirá uma variação de volume de 1/274 de seu volume inicial. Se imaginarmos que este centímetro cúbico de ar está em um prisma com base igual a 1 cm<sup>2</sup>, ele se dilatará 1/274 cm. Podemos imaginar que a atmosfera que pressiona o ar corresponde a uma coluna de mercúrio de base igual a 1 cm<sup>2</sup>, e cuja massa será igual a 1033 g. Portanto, o ar, aquecido de 1°C, a pressão constante de uma atmosfera, ergue 1033 g de mercúrio a uma altura de 1/274 cm. Portanto, o trabalho  $y$  realizado na expansão do ar é igual ao erguimento de 1033 g a uma altura de 1/274 cm.

O calor específico do ar a pressão constante é 0,267 vezes o calor específico da água. Para se aquecer de 1°C um cm<sup>3</sup> de ar (com massa igual a 0,0013 g) deve-se portanto empregar o mesmo calor que para aquecer de 1°C uma massa de água igual a 0,0013 x 0,267 g, ou seja, 0,000347 cal.

De acordo com as medidas de Dulong, a razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a volume constante para o ar ( $x + y/x$ ) é 1,421. Portanto, se o centímetro cúbico de ar tivesse sido aquecido a volume constante, o calor necessário seria igual ao que é gasto para se aquecer 0,000347 g/1,421 de água à mesma temperatura, ou seja, 0,000244 g de água. A diferença é de 0,000347 - 0,000244 = 0,000103. Portanto, esse calor (0,000103 calorias em nossa linguagem atual) é utilizado na expansão do ar, e portanto para erguer 1033 g de mercúrio a uma altura de 1/274 cm. Transformando as unidades, Mayer calcula que uma caloria (um "grau de calor") corresponde ao erguimento de um grama a uma altura de 367 m ou 1130 pés.

Para convertermos esse resultado em unidades atuais, basta considerar  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ , e obtém-se que uma caloria é equivalente, de acordo com os cálculos de Mayer, a 3,6 J. Se utilizássemos o mesmo procedimento de cálculo, utilizando dados numéricos atuais, obteríamos o valor atualmente aceito para o equivalente mecânico do calor: 1 cal = 4,2 J.

<sup>300</sup> Todos os dados numéricos utilizados neste apêndice são exatamente os empregados por Mayer, e não coincidem com os atualmente aceitos.