

ALBERT EINSTEIN E OS ESTUDOS PRÉ-RELATIVISTAS

CONDIÇÕES DE EMERGÊNCIA E CONSEQUÊNCIAS DA SUA ANÁLISE CRÍTICA
DOS FUNDAMENTOS CINÉTICOS DA TERMODINÂMICA*

Apesar de apontado como o cientista responsável pela ruptura operada na ciência newtoniana, nomeadamente nas concepções de espaço e de tempo, limitando-se, normalmente, o conhecimento do físico a este feito, Albert Einstein desenvolveu outros estudos antes da formulação da teoria da relatividade restrita de 1905, nomeadamente estudos no âmbito da termodinâmia. É nosso propósito, como o título indica, apresentar as condições de emergência que presidiram à elaboração, por parte de Einstein, de uma análise crítica dos fundamentos cinéticos da termodinâmica, apontando, simultaneamente, os caminhos abertos por tal análise.

As primeiras publicações de Albert Einstein, que datam de 1901-1902, visavam o estudo da natureza das forças moleculares mediante a aplicação da hipótese atômica na explicação da capilaridade e dos fenómenos em soluções salinas¹. O artigo de 1901 pautava-se por

* Trabalho realizado para o seminário orientado pela Senhora Prof.^a Doutora Maria Manuel Araújo Jorge, no âmbito do Mestrado em Filosofia Moderna e Contemporânea.

¹ Cf. Albert Einstein, [1901], "Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen", *Ann. Phys.*, 4, 1901, pp. 513-523; tr. In., "Conclusions Drawn from the Phenomena of Capillarity", em *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. II, Princeton, Princeton University Press, 1989, Doc. 1, pp. 1-11 (designado, adiante, pela sigla CpAE). Albert Einstein, [1902a], "Über die thermodynamische Theorie der Potentialdifferenz zwischen Metallen und vollständig dissocierten Lösungen ihrer Salze und über eine elektrische Methode zur Erforschung der Molekularkräfte", *Ann. Phys.*, 4, 1902, pp. 798-814; tr. In., "On the Thermodynamic Theory of the Difference in Potentials between Metals

uma busca de princípios² –, projecto ambicioso e que maravilhou Einstein: «É um sentimento glorioso», escreveu a Grossmann, um amigo seu, alguns meses após ter concluído o artigo, «reconhecer a unidade de um fenómeno complexo que surge à primeira vista como um conjunto de entidades distintas»³.

No artigo de 1901, concluído em Dezembro de 1900⁴, dedicando-se de imediato ao desenvolvimento de uma «ideia fabulosa que permitirá aplicar a teoria das forças moleculares também aos gases», como escreveu a Mileva Maric, aquela que viria a ser a sua primeira mulher⁵. Redigiu também um segundo artigo onde estendia a sua teoria das forças moleculares à explicação de fenómenos em soluções salinas, mostrando, mais tarde, desinteresse por estes primeiros trabalhos⁶.

É entre 1902 e 1904 que publica três estudos sobre os fundamentos da mecânica estatística⁷ – a *teoria estatística da mecânica clássica*, como a designava⁸ –, sendo o artigo de 1902, na

and Fully Dissociated Solutions of Their Salts and on an Electrical Method for Investigating Molecular Forces”, em CpAE, vol. II, Doc. 2, pp. 12-29.

² Cf. Albert Einstein, [1901], p. 515; tr. In., p. 3. A este propósito White e Gribbin observam que «Einstein baseou os seus cálculos na ideia de que as forças entre as moléculas obedecem a uma lei universal semelhante à lei da gravidade. Actualmente sabemos que estas forças, apesar de serem essencialmente eléctricas, dependem, entre outras coisas, da dimensão das moléculas e que a natureza da atracção entre as moléculas num líquido ou gás (ou até num sólido, que resulta no mesmo) é muito mais complexa do que a lei da gravidade de Newton». (Michael White, John Gribbin, [1993], *Einstein. A Life in Science*, London, Simon & Schuster, rev. ed., 1994, p. 48.)

³ Albert Einstein, carta a Marcel Grossmann de 14 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 100, p. 165.

⁴ Albert Einstein, [1901], p. 523; tr. In., p. 11.

⁵ Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 15 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 101, p. 166; tr. Fr. em *Lettres d'Amour et de Science*, Paris, Éditions du Seuil, 1993, Lettre 28, pp. 88-89 (designado, adiante, pela sigla LAS).

⁶ Cf. Albert Einstein, [1902a], pp. 798-814; tr. In., pp. 12-29.

⁷ De facto, em 1907 Einstein envia a Johannes Stark todas as suas publicações, acompanhadas de uma carta onde especifica: «juntamente envio-lhe todas as minhas publicações, à excepção dos meus dois primeiros trabalhos, que não têm qualquer valor, e de algumas notas publicadas em resposta a outros artigos». (Albert Einstein, carta a Johannes Stark de 7 de Dezembro de 1907, tr. In. em CpAE, vol. V, Doc. 66, p. 46; tr. Fr. em *Œuvres Choisies d'Albert Einstein*, tome I, Paris, Éditions du Seuil, Éditions du CNRS, 1989, p. 72 (designado, adiante, pela sigla CEAÉ).

⁸ Cf. Albert Einstein, [1902b], “Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik”, *Ann. Phys.*, 9, 1902, pp. 417-433; tr. In., “Kinetic Theory of Thermal Equilibrium and of the Second Law of Thermodynamics”, em CpAE, vol. II, Doc. 3, pp. 30-47. Albert Einstein, [1903], “Eine

óptica de Max Born, uma verdadeira «redescoberta de todos os elementos essenciais da mecânica estatística»⁹.

Apesar de reconhecer os importantes contributos de Maxwell e Boltzmann, Einstein afirma logo na introdução que, até à data, ninguém foi capaz de proceder a uma derivação probabilística das condições de equilíbrio térmico e da segunda lei da termodinâmica, propondo-se a fornecer o elo que faltava à cadeia de provas iniciada por Boltzmann¹⁰. De facto, escreveu, ainda que tenham sido

Theorie der Grundlagen der Thermodynamik”, *Ann. Phys.*, 11, 1903, pp. 170-187; tr. In., “A Theory of the Foundations of Thermodynamics”, em CpAE, vol. II, Doc. 4, pp. 48-67; tr. Fr. (parcial), “Une Théorie des fondements de la thermodynamique”, em CcAE, tome I, pp. 18-28. Albert Einstein, [1904], “Zur Allgemeinen molekularen Theorie der Wärme”, *Ann. Phys.*, 14, 1904, pp. 354-362; tr. In., “On the General Molecular Theory of Heat”, em CpAE, vol. II, Doc. 5, pp. 68-77; tr. Fr., “Théorie moléculaire générale de la chaleur”, em CcAE, tome I, pp. 29-35.

⁹ Este interesse pelos fundamentos da física estatística será uma constante na sua produção científica: cf., a título de exemplo, Albert Einstein, Ludwig Hopf, [1910a], “Über einen Satz der Wahrscheinlichkeitsrechnung und seine Anwendung in der Strahlungstheorie”, *Ann. Phys.*, 33, 1910, pp. 1096-1104; tr. In., “On a Theorem of the Probability Calculus and Its Applications in the Theory of Radiation”, em CpAE, vol. III, Doc. 7, pp. 211-219. Albert Einstein, Ludwig Hopf, [1910b], “Statistische Untersuchung der Bewegung eines Resonators in einem Strahlungsfeld”, *Ann. Phys.*, 33, 1910, pp. 1105-1115; tr. In., “Statistical Investigation of Resonator’s Motion in a Radiation Field”, em CpAE, vol. III, Doc. 8, pp. 220-230. Albert Einstein, [1910c], “Theorie der Opaleszenz von homogenen Flüssigkeiten und Flüssigkeitsgemischen in der Nähe des kritischen Zustandes”, *Ann. Phys.*, 33, 1910, pp. 1275-1298; tr. In., “The Theory of the Opalescence of Homogeneous Fluids and Liquid Mixtures near the Critical State”, em CpAE, vol. III, Doc. 9, pp. 231-249. Albert Einstein, [1911d], “Zum gegenwärtigen Stande des Problems der spezifischen Wärme”, *Verban.*, 1914, pp. 330-352; “Diskussion”, *Verban.*, 1914, pp. 352-361; tr. In., “On the Present State of the Problem of Specific Heats”, “‘Discussion’ Following Lecture ‘The Present State of the Problem of Specific Heats’”, em CpAE, vol. III, Docs. 26-27, pp. 402-425, 426-437; tr. Fr. (parcial), “L’état actuel du problème des chaleurs spécifiques”, “Discussion du rapport de M. Einstein”, em CcAE, tome I, pp. 120-122, 122-125. Albert Einstein, [1915], “Theoretische Atomistik”, em *Die Kultur der Gegenwart. Ihre Entwicklung und ihre Ziele*. Paul Hinneberg, ed. Part 3, sec. 3, vol. I, *Physik*, Emil Warbug, ed. Leipzig: B. G. Teubner, 1915, pp. 251-263; tr. Ing., “Theoretical Atomism”, em CpAE, vol. IV, Doc. 20, pp. 232-245. Albert Einstein, [1916a], “Strahlungs-Emission und -Absorption nach der Quantentheorie”, *Verban.*, 18, 1916, pp. 318-323; tr. In., “Emission and Absorption of Radiation in Quantum Theory”, em CpAE, vol. VI, Doc. 34, pp. 212-216. Albert Einstein, [1916b], “Zur Quantentheorie der Strahlung”, *Physikalische Gesellschaft Zürich. Mitteilungen*, 18, 1916, pp. 47-62; tr. In., “On the Quantum Theory of Radiation”, em CpAE, vol. VI, Doc. 38, pp. 220-233.

¹⁰ Max Born, [1949], “Einstein’s Statistical Theories”, em Paul Arthur Schilpp

«grandes os desenvolvimentos que a teoria cinética do calor teve no domínio da teoria do gás, a ciência da mecânica ainda não foi capaz de produzir fundamentos adequados para a teoria geral do calor, já que ainda não foi bem sucedida na derivação das leis do equilíbrio térmico e da segunda lei da termodinâmica usando apenas as equações da mecânica e cálculos de probabilidade, embora as teorias de Maxwell e Boltzmann se tenham aproximado deste objetivo»¹¹.

Ora, o artigo de 1902 pretende, nas palavras do próprio físico, «preencher esta lacuna»¹², mediante a derivação da segunda lei da termodinâmica a partir das equações gerais da mecânica e da teoria das probabilidades.

1. Modelo cinético de Boltzmann

Esboçada por Sadi Carnot em 1850 e formulada, em 1865, por Rudolf Clausius, a segunda lei da termodinâmica determina o crescimento irreversível da degradação da energia num sistema termodinâmico isolado, isto é, a diminuição irreversível da aptidão do calor para se transformar e realizar trabalho, tendo Clausius designado esta variável macroscópica de *entropia*. À primeira lei da termodinâmica, que reconhecia na energia uma entidade indestrutível, já que «a energia do universo é constante», juntava-se agora uma segunda, «a entropia do universo aumenta até um

(ed.), [1949a], *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Illinois, Open Court, 7th pr., 1997, p. 164 (designado, adiante, pela sigla AEp-s).

¹¹ Numa carta a Grossmann, Einstein refere-se ao trabalho de Boltzmann como sendo o estímulo para o desenvolvimento de um artigo: «Ultimamente estive absorvido no trabalho de Boltzmann sobre a teoria cinética dos gases e nestes últimos dias escrevi um pequeno artigo que fornece o elo da cadeia de provas que ele iniciou». (Albert Einstein, carta a Marcel Grossmann [de 6] de Setembro de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 122, p. 181.) Para Stachel, esta afirmação deve referir-se a um primeiro trabalho de Einstein dedicado ao tema e apenas parte terá sido aproveitada, nomeadamente para os parágrafos 8-10 deste artigo de 1902. (Cf. John Stachel (ed.), [1989b], «Einstein on the Foundations of Statistical Physics», em *The Collected Papers of Albert Einstein*, [documentary edition], vol. II, Princeton, Princeton University Press, 1989, Editorial Note, footnote 51, p. 48 (designado, adiante, pela sigla CpAEde).

¹² Albert Einstein, [1902b], p. 417; tr. In., p. 30.

máximo.¹³, existindo deste modo, num sistema fechado, uma irreversibilidade da degradação da qualidade da energia, não obstante a manutenção da sua quantidade, prevista pela primeira lei¹⁴.

Nos finais do século XIX, a Física conhecia assim, contra as transformações mecânicas da dinâmica do século XVII, uma dissociação dos conceitos de conservação e reversibilidade, já que a estas transformações reversíveis (reduzíveis ao movimento da matéria no espaço), próprias da ciência clássica, cuja descrição dinâmica, baseada na simplicidade dos comportamentos elementares (das trajetórias), definia o encadeamento determinista das causas e dos efeitos, se opunham agora as irreversíveis, próprias da termodinâmica, que afirmava um crescimento irreversível da entropia, conflito expresso na tensão entre atomistas e energistas.

O conceito de *entropia*, pelo menos na forma em que a termodinâmica clássica o introduziu, não explicava o sentido dos fenómenos naturais, confinando-se ao nível macroscópico e vendo-se impossibilitado de, num quadro mecanicista, os explicar com base no movimento das partículas materiais. Ora, é a mecânica estatística que vem assegurar a relação, aparentemente impossível, entre o mundo observável e o mundo atómico, conferindo uma descrição sintética a cada macroestado, sendo este fruto de diferentes configurações.

Ludwing Boltzmann, face ao desenvolvimento da teoria cinética dos gases – a aplicação particular da mecânica estatística ao estado gasoso da matéria –, que identificava o calor com a velocidade média dos seus elementos constituintes¹⁵, pontos materiais animados

¹³ Cf. Albert Einstein, [1902b], p. 417; tr. In., p. 30.

¹⁴ Rudolf Clausius, *Ann. Phys.*, CXXV, 1865, p. 353, cit. por Ilya Prigogine, [1996], *La Fin des Certitudes*, Paris, Éditions Odile Jacob, 1996, p. 27.

¹⁵ Como explica Edgar Morin, «o primeiro princípio da termodinâmica reconhece na energia uma entidade indestrutível, dotada dum poder polimorfo de transformações (energia mecânica, eléctrica, química, etc.). Assim, este princípio oferece ao universo físico uma garantia de auto-suficiência e de eternidade para todos os seus movimentos e trabalhos.

O segundo princípio, esboçado por Carnot e formulado por Clausius (1850), introduz a ideia, não de perda – que contradiria o primeiro princípio – mas de *degradação* da energia». (Edgar Morin, [1977], *La Méthode 1. La Nature de la Nature*, Paris, Éditions du Seuil, 1977, pp. 34-35.)

de velocidade, afirmava, na busca de uma «melhor *imagem* dos fenômenos»¹⁶, a necessidade de uma concepção atomista na descrição dos fenômenos termodinâmicos¹⁷.

Para demonstrar que as leis termodinâmicas poderiam pressupor uma representação atômica da matéria, debruçou-se sobre populações de moléculas e introduziu o conceito de *probabilidade* como princípio explicativo, definindo a entropia em função do número de estados, ou seja, o número de possíveis configurações microscópicas assumidas pelas moléculas, o que lhe permitiu interpretar a entropia como um aumento da desordem molecular.

Assim, na conhecida experiência dos recipientes (*A* e *B*) conectados por um canal, o estado mais provável deste sistema será aquele que é realizado por um maior número de configurações. À dissimetria inicial do conjunto de moléculas reunidas no recipiente *A*, por exemplo, seguir-se-á, mediante uma equilibrção progressiva,

Também Joël de Rosnay especifica que «os dois princípios da termodinâmica só se aplicam a sistemas fechados, isto é, a recintos através dos quais não possa haver nenhuma transferência de energia, de informação ou de matéria. O Universo, na sua totalidade, pode ser considerado como um circuito ou um recinto deste tipo, o que permite aplicar-lhe os dois princípios seguintes:

– O primeiro princípio estabelece que a *quantidade* total de energia do Universo se mantém *constante* (princípio da conservação da energia).

– O segundo princípio diz que a *qualidade* dessa energia se degrada de maneira *irreversível* (princípio da degradação da energia).

(Joël de Rosnay, [1975], *Le Macroscopie. Vers une vision globale*, Paris, Éditions du Seuil, 1975, p. 150.)

¹⁶ Como explicam Einstein e Infeld, a teoria cinética pretendia explicar o fenômeno do calor em função do choque entre as partículas: «De acordo com tal teoria, um gás não passa da congregação de enorme número de partículas ou *moléculas*, que se movem em todas as direcções, colidindo entre si e mudando a direcção do movimento a cada colisão. Deve existir uma velocidade média das moléculas, como numa grande cidade existe uma média de idade ou de riqueza. Haverá, portanto, uma média de energia cinética por partícula (...). Assim, dentro deste ponto de vista, o calor não é uma forma especial de energia diferente da energia mecânica, mas simplesmente a energia cinética do movimento molecular». (Albert Einstein, Leopold Infeld, [1938], tr. In., *The Evolution of Physics*, New York, Simon & Schuster, s/d, pp. 55-56; tr. Fr., *L'Évolution des Idées en Physique*, Paris, Flammarion, 1948, pp. 60-61; tr. Port., *A Evolução da Física*, Lisboa, Edição «Livros do Brasil», s/d, pp. 58-59.)

¹⁷ L. Boltzmann, *Theoretical Physics and Philosophical Problems*, Dordrecht and Boston, ed. N. McGuinness, Reidel, 1974, cit. por Françoise Balibar, [1992], *Einstein 1905. De l'éther aux quanta*, Paris, Presses Universitaires de France, 1^{re} éd., 1992, p. 92.

um estado macroscópico de máxima simetria, isto é, um nivelamento das diferenças criadas pelas condições iniciais, sendo este estado de equilíbrio, onde as variáveis macroscópicas caracterizadoras do sistema não variam no tempo, o estado mais provável de um sistema¹⁸. Definindo uma população de N moléculas concentradas no recipiente A , poderemos conhecer as repartições possíveis entre A e B : se N corresponder a um conjunto de 8 moléculas, existem oito formas diferentes de colocar uma molécula no recipiente B e as restantes 7 em A , existindo 70 maneiras diferentes de repartição por A e B , variando o número de configurações possíveis em função do número de moléculas¹⁹. A evolução mais provável deste sistema será precisamente para o estado de equilíbrio, para uma equipartição das moléculas entre A e B , situação verificada em qualquer sistema fechado, o que nos permite inferir que, quaisquer que sejam as condições iniciais, um sistema fechado evoluirá, provavelmente, para um estado microscópico que, ao nível do macro, corresponde a um máximo de simetria, cessando a evolução macroscópica irreversível do sistema. Teremos então um estado de equilíbrio expresso numa distribuição igualitária das moléculas pelos recipientes, ainda que se dêem algumas flutuações inevitáveis²⁰.

É a este nível que encontramos a diferença entre o princípio

¹⁸ Num discurso de Boltzmann, pronunciado em 1899, sobre a necessidade do atomismo na ciência natural, podemos ler: «Apresento-me a vós como um reaccionário, como alguém que se deixou arrastar e que guardou todo o seu entusiasmo para as boas e velhas doutrinas clássicas, contra os homens de hoje». (Cit. por Françoise Balibar, [1992], p. 93.)

¹⁹ Como explica Yehuda Elkana, «na terminologia de Boltzmann o princípio do aumento da entropia significa que o sistema, que não está em equilíbrio, evoluirá no tempo segundo a direcção de um estado mais provável, atingindo o equilíbrio deverá sofrer flutuações em torno do estado mais provável. Pode dizer-se que no modelo de Boltzmann o sistema *gastará mais tempo no estado mais provável* (ou na sua vizinhança) do que em qualquer outro estado». (Yehuda Elkana, Y. Ben-Menahen, [1993], «Entropia», em Fernando Gil (coor.), [1993], *Enciclopédia Einaudi*, Lisboa, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, 1993, vol. xxiv, p. 398; designado, adiante, pela sigla EnE.)

²⁰ «Uma população N de partículas está dentro de uma caixa dividida em dois compartimentos iguais. A questão que se coloca é a de conhecer a probabilidade das diversas repartições possíveis das partículas entre os compartimentos, isto é, a probabilidade de encontrar N_1 partículas no primeiro compartimento (e $N_2 = N - N_1$ no segundo).

clássico e o princípio estatístico do aumento de entropia. Se aquele, porque postula um necessário aumento da entropia, tem um carácter teleológico²¹, este, porque estatístico, afirma a transição para uma distribuição mais provável, admitindo, portanto, desvios. «De acordo com o princípio clássico», explica Elkana, «a entropia deve aumentar e qualquer observação da diminuição da entropia contradiz a lei. Contudo, a versão estatística da lei prediz somente o aumento, em média, da entropia. Um sistema isolado entregue a si próprio aproximar-se-á *em média* da distribuição mais provável e terá flutuações, e, ocasionalmente, pode ocorrer uma transição para um estado de menor probabilidade, e mais, demonstra-se que isto pode acontecer»²².

Se Maxwell, com a noção de colisão, se havia limitado à

A análise combinatória permite calcular o número de maneiras como cada repartição diferente das N partículas pode ser efectuada. Assim, se $N = 8$, existe uma única maneira de colocar as oito partículas numa só metade; ao contrário, já existem oito maneiras diferentes de colocar uma partícula numa das metades e as outras sete na segunda; e a repartição igual das oito partículas entre as duas metades pode ser realizada de $8!/4!4! = 70$ maneiras diferentes (onde $n! = 1.2.3... (n-1).n$). De maneira similar, qualquer que seja N , pode definir-se um *número de combinações*, P , obtendo-se o número de maneiras de realizar uma repartição particular $N1, N2$: $P(N1, N2) = N!/N1!N2!$.

Para uma dada população, o número de combinações é tanto mais elevado quanto menor for a diferença entre $N1$ e $N2$: será máximo quando a população estiver igualmente repartida entre as duas metades. É de notar que, quanto maior for N , mais se acentua a diferença entre os números de combinações correspondentes aos diversos modos de repartição. ((Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, [1979], *La Nouvelle Alliance*, Paris, Éditions Gallimard, 1979, pp. 139-140. A este propósito, cf. também Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, [1993b], “Equilíbrio/desequilíbrio”, em *EnE*, vol. xxvi, p. 52.)

²¹ Sobre o assunto, cf. Marcelo Alonso, Edward J. Finn, [1972], tr. Port., *Física – um curso universitário*, vol. I, São Paulo, Editora Edgard Blücher, Ltda., 1972, pp. 437-439. «Para retomar o exemplo de partida», continuam Prigogine e Stengers, «qualquer que seja a repartição inicial, a evolução do sistema acabará por levá-lo à equipartição $N1 = N2$. Esses estado porá fim à evolução macroscópica irreversível do sistema; claro que as partículas não cessarão de passar de uma metade à outra, mas como passarão em média e em cada instante *tanto num sentido como no outro*, os seus movimentos já só poderão provocar *flutuações*, inevitáveis, contínuas, porém pequenas e sujeitas a uma regressão rápida em volta de $N1 = N2$. (Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, [1979], p. 141.)

²² «A lei clássica do aumento de entropia é uma lei com carácter *teleológico*: interpreta a direcção de realização dos fenómenos como resultado de uma tendência na natureza no sentido do aumento da entropia. O tipo de causalidade envolvido

descrição (estatística) do estado de equilíbrio de um sistema, já que o seu principal objecto de estudo era a distribuição da energia, Boltzmann procurava, para além do estado de equilíbrio, a descrição da evolução do sistema para esse estado, acabando por transitar do modelo estatístico para uma visão probabilística²³.

Desde 1866 que tinha a intenção de «dar uma prova completamente geral da segunda lei da teoria do calor, bem como descobrir o teorema correspondente em mecânica»²⁴, apresentando, em 1872, não só a equação que define a entropia em função do número de configurações possíveis assumidas pelas moléculas – $S = k \log W$, em que S representa a entropia total do sistema, k (constante de Boltzmann²⁵) exprime a relação entre a teoria clássica e a teoria estatística e $\log W$ a probabilidade termodinâmica –, mas também o teorema H , uma generalização do conceito de entropia a todos os estados dinâmicos e que descreve o efeito das colisões sobre as posições e velocidades das moléculas²⁶.

Boltzmann, com o teorema H , reduzia a irreversibilidade à dinâmica, os macrossistemas termodinâmicos à mecânica das partículas. Mas se inicialmente, como salienta Abraham Pais, atribuiu um carácter absoluto à segunda lei, considerando que H nunca poderia aumentar²⁷, a objecção de Johann Joseph Loschmidt, em 1876, relativa à incompatibilidade entre o macro e o micro, entre a evolução irreversível dos sistemas termodinâmicos e as leis reversíveis da mecânica a que as moléculas estão sujeitas, foi imprescindível para o reconhecimento da dificuldade de uma simples redução da termodinâmica à mecânica estatística. Segundo

nesta interpretação dos fenómenos é intencional, tem esta finalidade». (Yehuda Elkana, Y. Ben-Menahen, [1993b], p. 397.)

²³ Yehuda Elkana, Y. Ben-Menahen, [1993b], p. 398.

²⁴ Cf. Girolamo Ramunni, [1990], “L’atomisme: du débat philosophique à la naissance de structures professionnelles”, em Fernando Gil (coord.), [1990], *Controvérsias Científicas e Filosóficas*, Lisboa, Editorial Fragmentos, 1990, p. 240.

²⁵ L. Boltzmann, *Wiener Berichte*, 53, 195, 1866, cit. por Abraham Pais, [1982], ‘*Subtle is the Lord...*’. *The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford, Oxford University Press, 12th imp., 1997, p. 61.

²⁶ Apesar de ser designada de «constante de Boltzmann», k foi introduzida pela primeira vez por Planck, em 1900, na fórmula relativa à distribuição de equilíbrio térmico da radiação do corpo negro. (Cf. Abraham Pais, [1982], p. 60.)

²⁷ Cf. Ana Isabel Simões, [1990], “La polémique entre Boltzmann et Zermelo sur l’interprétation statistique de la seconde loi de la thermodynamique”, em Fernando Gil (coord.), [1990], p. 204.

Loschmidt, procedendo-se a uma inversão do sentido das velocidades das moléculas, o modelo cinético de Boltzmann não seria válido, já que, do ponto de vista dinâmico, as colisões, em sentido inverso, fariam o sistema voltar ao seu estado inicial, dando-se, numa clara violação da segunda lei da termodinâmica, uma evolução *antitermodinâmica*²⁸.

Boltzmann salientou, então, a subtil distinção entre o nível macroscópico e o nível microscópico: aquele, caracterizado por um número de variáveis, resulta das diferentes configurações microscópicas, pelo que, apesar de os microestados serem, de facto, realizáveis um número infinito de vezes – porque, afinal, as moléculas estão sujeitas às leis reversíveis da mecânica –, os macroestados que representam a maior fracção de microestados é que se prestarão à observação; logo, observar-se-á uma aproximação ao estado de equilíbrio ou de maior entropia.

Deste modo, devido à impossibilidade de irreversibilidade ao nível do microscópico, já que as leis da mecânica são reversíveis, invariantes mediante uma inversão temporal, o aumento de entropia não terá um carácter de necessidade, como postulava o princípio clássico, mas tão só de probabilidade.

A teoria de Boltzmann permite explicar a entropia em função da evolução da distribuição das velocidades, durante a qual a grandeza H decresce, até se atingir o equilíbrio maxweliano. Todavia, a interpretação do princípio de Boltzmann apresentava, como explica Michel Paty, algumas dificuldades: «por um lado, a probabilidade que aí figura era geralmente considerada como uma simples função matemática, ligada ao estado de um dado sistema físico. Por outro, o princípio de Boltzmann era, do ponto de vista físico, muito mais rico em implicações do que aquelas consideradas até à altura (...): era necessário dar uma significação física, e não apenas matemática, à probabilidade»²⁹.

Era esta a «lacuna» que, segundo Einstein, faltava preencher para que o princípio de Boltzmann pudesse ser elevado ao estatuto de princípio geral da Física: derivar das equações da mecânica e

²⁸ Cf. Abraham Pais, [1982], p. 61.

²⁹ Sigamos a explicação de Pais: «Consideremos um grande número de partículas que se movem de acordo com condições iniciais integralmente especificadas e sujeitas às leis newtonianas convencionais, invariantes face a uma inversão temporal. Suponhamos que H decresce no decurso do tempo. Então, para

cálculos de probabilidade as leis do equilíbrio térmico e a segunda lei da termodinâmica³⁰.

2. Einstein e a reinterpretação estatística da probabilidade

Desde pelo menos o Verão de 1899 que Einstein se interessou pelo trabalho de Boltzmann³¹, tendo cedo manifestado a Mileva Maric confiança nos princípios em que se baseava a sua teoria: «estou plenamente convencido de que os princípios sobre os quais repousa a (...) teoria [de Boltzmann] estão correctos, o que significa que estou convencido de que, no caso dos gases, lidamos com massas pontuais discretas de grandeza finita bem determinada, que se movem de acordo com certas condições»³².

Sem dúvida que o físico estava familiarizado com algum do trabalho de Boltzmann, que considerava «magnífico»³³, tendo mesmo sido fundamental para o desenvolvimento do seu artigo de 1901, dedicado, recordemos, ao estudo da natureza das forças intermoleculares em função do fenómeno da capilaridade (Einstein lia a obra *Vorlesungen über Gastheorie*, onde Boltzmann discutia este fenómeno). Se a 10 de Setembro de 1899 Einstein manifestava a Mileva a intenção de estudar a *Gastheorie* de Boltzmann³⁴, numa carta de 13 de Setembro de 1900 o físico mostrava-se maravilhado com este trabalho, que ainda estava a ler³⁵, escrevendo uma carta seis

um segundo sistema que difira do primeiro apenas no que respeita ao facto de as condições iniciais serem reversíveis temporalmente, H deve crescer no decurso do tempo. Por conseguinte, a lei do aumento de entropia não pode ser uma lei absoluta». (Abraham Pais, [1982], pp. 61-62.)

³⁰ Michel Paty, [1997], *Albert Einstein ou la création scientifique du monde*, Paris, Société d'édition Les Belles Lettres, 1997, p. 41.

³¹ Cf. Albert Einstein, [1902b], p. 417; tr. In., p. 30.

³² Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 10 de Setembro de 1899, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 54, p. 133; tr. Fr. em LAS, Lettre 10, p. 53.

³³ Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 13 de Setembro de 1900, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 75, p. 149; tr. Fr. em LAS, Lettre 21, pp. 73-74.

³⁴ É mais uma vez a correspondência com Mileva Maric que nos dá esta indicação: «O [trabalho de] Boltzmann é magnífico. Estou mesmo a acabá-lo». (Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 13 de Setembro de 1900, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 75, p. 149; tr. Fr. em LAS, Lettre 21, p. 73.)

³⁵ Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 10 de Setembro de 1899, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 54, p. 133; tr. Fr. em LAS, Lettre 10, p. 53.

dias depois dizendo que havia acabado de «estudar todo o Boltzmann»³⁶. No ano seguinte releu o trabalho: a 30 de Abril de 1901 escrevia a Mileva Maric: «De momento estou a estudar de novo a teoria dos gases de Boltzmann (...). Eu penso que este livro, de uma maneira geral, merece ser estudado com mais atenção»³⁷. Em Junho de 1902, Einstein concluía um artigo dedicado a preencher a «lacuna» deixada por Boltzmann³⁸. Segundo Martin Klein, Einstein conheceu parte do trabalho de Boltzmann, nomeadamente o referente ao método estatístico, mas não teve conhecimento de alguns dos seus primeiros artigos, publicados na *Wiener Berichte*³⁹. Esta observação é pertinente porque, num trabalho de 1868, o físico adianta timidamente uma definição de probabilidade, em termos de tempo permanência, que Einstein, sem o saber, irá desenvolver em 1903⁴⁰.

A teoria cinética causava-lhe, por esta altura, como reconheceu mais tarde, uma grande impressão⁴¹. Todavia, e não obstante a admiração que tinha pela teoria de Boltzmann, a sua «lacuna», como referiu no artigo de 1902, estava no facto de não ser «suficientemente focada na comparação com a realidade», como havia confessado a Mileva⁴², de ser uma *imagem* e não uma realidade, falha que

³⁶ Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 13 de Setembro de 1900, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 75, p. 149; tr. Fr. em LAS, Lettre 21, pp. 73-74.

³⁷ Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 19 de Setembro de 1900, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 76, p. 150; tr. Fr. em LAS, Lettre 22, p. 74. Em Outubro desse mesmo ano falava nos resultados que descobrira recentemente através deste físico. (Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 3 de Outubro de 1900, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 79, p. 152; tr. Fr. em LAS, Lettre 23, p. 77.)

³⁸ Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 30 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 102, p. 168; tr. Fr. em LAS, Lettre 29, p. 91.

³⁹ Albert Einstein, [1902b], p. 417; tr. In., p. 30

⁴⁰ Cf. Martin J. Klein, [1982], "Fluctuations and Statistical Physics in Einstein's Early Work", em Gerald Holton, Yehuda Elkana (ed.), [1982a], *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives: the centennial symposium in Jerusalem*, New York, Dover Publications, Inc., 1997, p. 40.

⁴¹ Cf. Abraham Pais, [1982], p. 62. Só em 1909 é que Einstein referencia pela primeira vez alguns dos trabalhos de Boltzmann anteriores à *Gasttheorie*. (Cf. Albert Einstein, [1909a], "Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems", *Phys. Zeit.*, 10, 1909, p. 187; tr. In., "On The Present Status of the Radiation Problem", em CpAE, vol. II, Doc. 56, p. 360.)

⁴² Efectivamente, escreveu Einstein recordando os seus tempos de estudante: «o facto da teoria estatística da mecânica clássica permitir deduzir as leis fundamentais da termodinâmica – aquilo que Boltzmann havia conseguido no essencial – foi algo que me impressionou imenso». (Albert Einstein, [1946], "Autobiographisches", em

encontrava o seu fundamento na natureza das *probabilidades*, na interpretação boltzianna de W , que surgia apenas como uma simples função matemática. Por isso, mais tarde, em 1905, dirigiu nestes termos a crítica à contagem das configurações: «No cálculo da entropia pelos métodos da teoria molecular, a palavra ‘probabilidade’ é utilizada num sentido que não se conforma com a definição que lhe é dada na teoria de probabilidades. Em particular, ‘casos de igual probabilidade’ são muitas vezes hipoteticamente definidos em circunstâncias em que os modelos teóricos utilizados são suficientemente precisos para permitir uma dedução, e não uma asserção hipotética»⁴³.

De facto, Boltzmann determinava o estado de um sistema pela admissão da equiprobabilidade das configurações, ou seja, supunha *a priori* que todas as configurações capazes de realizar um determinado estado são igualmente prováveis, representando W o número de probabilidade termodinâmica do estado. Ora, tal admissão carecia, na óptica de Einstein, de uma melhor explicitação, pelo que, em vez de interpretar a probabilidade em função das configurações moleculares, o físico, na busca de uma «comparação com a realidade»⁴⁴ e esperando, como ele escreveu, «eliminar uma dificuldade lógica que ainda bloqueia a implementação do princípio de Boltzmann»⁴⁵, passa a caracterizar a probabilidade em termos de frequência no tempo.

É no artigo de 1903 que procede a esta interpretação do conceito de probabilidade de um estado macroscópico, trabalho que, depois de muitas revisões e correcções, o deixou completamente satisfeito⁴⁶, apesar de, como salientam Martin Klein e Abraham Pais⁴⁷,

AEp-s, pp. 18, 20; tr. In., “Autobiographical Notes”, em AEp-s, pp. 19, 21; tr. Fr., “Éléments autobiographiques”, em CEAE, tome v, p. 26.)

⁴³ Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 30 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 102, p. 168; tr. Fr. em LAS, Lettre 29, p. 91.

⁴⁴ Albert Einstein, [1905a], “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”, *Ann. Phys.*, 17, 1905, p. 140; tr. In., “On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light”, em CpAE, vol. II, Doc. 14, p. 94; tr. Fr., “Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière”, em CEAE, tome I, p. 46.

⁴⁵ Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 30 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 102, p. 168; tr. Fr. em LAS, Lettre 29, p. 91.

⁴⁶ Albert Einstein, [1905a], p. 140; tr. In., p. 94; tr. Fr., p. 46.

não obstante possuir uma demonstração logicamente correcta, assentar na consideração errónea de que «as distribuições mais prováveis seguir-se-ão às menos prováveis, isto é, que W aumenta sempre até que a distribuição se torne constante e W atinja um máximo»⁴⁸.

Claro que tal admissão requeria também ela uma demonstração, como observou Paul Hertz: «Se se assume, como Einstein, que as distribuições mais prováveis seguir-se-ão às menos prováveis, introduz-se um pressuposto que não é nada evidente por ele próprio e requer demonstração»⁴⁹. Einstein reconheceu esta falha e escreveu em 1911, referindo-se ao artigo de 1903, que «já então a minha derivação não me satisfazia»⁵⁰ – consideração estranha quando confrontada com a correspondência trocada na época com Michele Besso, em que se mostrava «totalmente satisfeito» com o trabalho⁵¹ –, tendo, um mês antes desta resposta, reconhecido que «o princípio de Boltzmann de facto adquire algum conteúdo independente de qualquer teoria elementar se se assumir e generalizar a partir da cinética molecular a proposição que a irreversibilidade dos fenómenos físicos é só aparente», aceitando que o «sistema, *provavelmente*, passa a estados de maior probabilidade quando ocorre estar num estado de probabilidade relativamente baixo»⁵².

⁴⁷ É numa carta a Michele Besso que Einstein tece estas considerações: «Anteontem, segunda-feira, depois de muitas revisões e correcções, acabei o meu trabalho. Agora o artigo é completamente claro e simples, pelo que estou totalmente satisfeito com ele». (Albert Einstein, carta a Michele Besso [de 22] de Janeiro de 1903, tr. In. em CpAE, vol. v, Doc. 5, p. 7; tr. Fr. em *Correspondance 1903-1955*, Paris, Hermann, 1979, Lettre 01, p. 3 (designado, adiante, pela sigla Ebe) e em CEAE, tome I, p. 27.)

⁴⁸ Cf. Martin J. Klein, [1982], p. 41 e Abraham Pais, [1982], p. 67.

⁴⁹ Albert Einstein, [1903], p. 184; tr. In., p. 63.

⁵⁰ Paul Hertz, [1910], «Über die mechanischen Grundlagen der Thermodynamik», *Ann. Phys.*, 33, 1910, p. 552, cit. por John Stachel (ed.), em CpAEd, vol. II, Doc. 4, p. 96, footnote 17.

⁵¹ Albert Einstein, [1911b], «Bemerkungen zu den P. Hertz'schen Arbeiten: 'Über die mechanischen Grundlagen der Thermodynamik'», *Ann. Phys.*, 34, 1911, p. 175; tr. In., «Comments on P. Hertz's Papers: 'On the Mechanical Foundations of Thermodynamics' », em CpAE, vol. III, Doc. 10, p. 250.

⁵² Cf. Albert Einstein, carta a Michele Besso [de 22] de Janeiro de 1903, tr. In. em CpAE, vol. v, Doc. 5, p. 7; tr. Fr. em EBe, Lettre 01, p. 3 e em CEAE, tome I, p. 27.

Neste artigo de 1903, Einstein, em vez de utilizar, como havia feito Boltzmann, argumentos *a priori* no cálculo das probabilidades, considera que é o movimento natural do sistema que determina as probabilidades dos seus variados estados, sendo a probabilidade de um estado definida, então, como a fracção de qualquer intervalo de tempo que o sistema demora naquele estado, no curso da sua evolução no tempo⁵³.

Com esta original interpretação da probabilidade⁵⁴, o princípio de Boltzmann conduzia a novas consequências físicas. Por isso, se nos artigos de 1902 e 1903 define temperatura e entropia em condições de equilíbrio térmico e desenvolve o teorema da equipartição⁵⁵, no artigo de 1904, considerado uma adenda ao do ano anterior⁵⁶, estabelece, não só novos processos para determinar a constante de Boltzmann, como também calcula, em função da temperatura e da energia média de um sistema, a média destas flutuações, isto é, o desvio do quadrado dos erros, dando, simultaneamente, uma interpretação física à constante *k*. Como explica Françoise Balibar, «a mecânica estatística, porque é estatística, funciona com valores médios; mas ela permite também conhecer os erros em relação a estes valores médios, ou melhor, os valores médios dos quadrados destes erros – aquilo que habitualmente se designa pela expressão ‘erro padrão’. Este erro padrão deve ser interpretado como uma medida das *flutuações* da grandeza considerada em torno do seu valor médio, isto é, uma medida das flutuações do sistema em torno da sua posição de equilíbrio»⁵⁷.

⁵³ Albert Einstein, [1910c], p. 1276; tr. In., p. 232 (itálico nosso).

⁵⁴ Cf. Martin J. Klein, [1967], “Thermodynamics in Einstein’s Thought”, *Science*, 157, 1967, p. 511.

⁵⁵ A originalidade desta interpretação tem alguns limites, porque, como vimos, Boltzmann já se teria aproximado dela.

⁵⁶ Na introdução do artigo de 1903 podemos ler: «Mostrei num estudo publicado há pouco tempo que os princípios de equilíbrio térmico e o conceito de entropia podem ser derivados a partir da teoria cinética do calor. É natural que se levante agora o problema de se saber se a teoria cinética é verdadeiramente indispensável para obter os fundamentos da teoria do calor, ou se hipóteses de tipo mais geral são suficientes. No presente artigo será demonstrada a pertinência desta segunda possibilidade e indicado o tipo de considerações que nos permitem atingir este objectivo». (Albert Einstein, [1903], p. 170; tr. In., p. 48; tr. Fr. (parcial), p. 18.)

⁵⁷ É, de facto, nestes termos que Einstein apresenta o artigo de 1904: «Apresento aqui uma adenda ao artigo que publiquei o ano passado». (Albert Einstein, [1904], p. 354; tr. In., p. 68; tr. Fr., 29.)

Ora, a constante k dá a média desses erros, a escala de ocorrência das flutuações, pelo que, concluiu Einstein, «a constante absoluta k determina a estabilidade térmica do sistema»⁵⁸.

O físico procedia, assim, a uma redução mecânico-estatística dos conceitos e princípios-base da termodinâmica, conferindo um sentido original à fórmula de Boltzmann: por um lado, W deixa de ser uma permutabilidade para representar verdadeiramente uma probabilidade⁵⁹, já que W , outrora baseada em suposições, é estabelecida agora mediante uma «comparação com a realidade»⁶⁰, sendo as probabilidades dos diversos estados do sistema determinadas pelo seu próprio movimento natural (no tempo); por outro, a constante de Boltzmann, porque determina a estabilidade térmica do sistema, adquire um sentido físico. Como escreveu Einstein, «a relação agora encontrada é particularmente interessante porque não contém qualquer quantidade reminescente das suposições nas quais a teoria é baseada»⁶¹.

Apesar de ter sempre reconhecido a funcionalidade do princípio de Boltzmann⁶², Einstein derivou assim, independentemente de Josiah Willard Gibbs, a equação para as flutuações de energia⁶³, invertendo o raciocínio de Boltzmann: se este, mediante uma análise do microscópico, havia chegado a uma expressão para a entropia, a uma descrição do macroscópico, Einstein usa a informação sobre a entropia para deduzir a natureza da probabilidade⁶⁴, pensando esta em sentido fenomenológico. Como explica Max Born referindo-se à equação $S = k \log W$, «com esta fórmula, Boltzmann pretendia expressar a quantidade física S em termos de quantidade combinatória W , obtendo por contagem todas

⁵⁸ Françoise Balibar, [1992], pp. 98-99.

⁵⁹ Albert Einstein, [1904], p. 360; tr. In., p. 75; tr. Fr., p. 34.

⁶⁰ Cf. Françoise Balibar, Olivier Darrigol, Bruno Jech, [1989c], «Les fondements cinétiques de la thermodynamique», em CEAe, tome 1, p. 12.

⁶¹ Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 30 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 102, p. 168; tr. Fr. em LAS, Lettre 29, p. 91.

⁶² Albert Einstein, [1904], p. 360; tr. In., p. 75; tr. Fr., 34.

⁶³ Albert Einstein, carta a Michele Besso de 11 de Setembro de 1911, tr. In. em CpAE, vol. v, Doc. 283, p. 205; tr. Fr. em EBe, Lettre 4, pp. 19-20.

⁶⁴ Em 1902 Josiah Willard Gibbs havia derivado também ele a equação para a energia das flutuações, ainda que de uma forma diferente e com um alcance mais restrito, assim como o fez Boltzmann. Em 1911 Einstein referiu que «se tivesse

as configurações possíveis dos elementos atômicos do conjunto estatístico. Einstein inverte este processo: parte da conhecida função S para obter uma expressão para a probabilidade que pode ser usada como pista para a interpretação dos elementos estatísticos⁶⁵. Foi neste sentido que o físico, em resposta a Lorentz, observou mais tarde: «o que caracteriza a minha posição é que se usa a probabilidade (temporal) de um estado específico de uma forma puramente *fenomenológica*. Neste sentido, tem-se a vantagem de não se basear a análise em qualquer teoria particular, por exemplo, a mecânica estatística»⁶⁶.

Einstein procurou, então, uma aplicação desta reinterpretação estatística da probabilidade, sendo, para tal, necessário um caso em que o movimento molecular e o seu carácter estatístico pudessem ser observados. Apesar de ter indicado no artigo de 1904 a radiação do corpo negro como exemplo óptimo para a confirmação das hipóteses teóricas aí avançadas⁶⁷ – algo que lhe permitiu abrir caminho para uma nova e revolucionária interpretação –, publica, em 1905, um artigo, onde não só mede as flutuações de um sistema, como também, para lá da explicação do movimento Browniano, demonstra a realidade dos átomos e moléculas⁶⁸.

3. Para uma demonstração da realidade dos átomos e moléculas

Observado em 1827 pelo botânico escocês Robert Brown, o movimento Browniano, como ficou posteriormente conhecido, consiste no movimento errático que as moléculas, quando suspensas

conhecimento do livro de Gibbs na altura, não tinha publicado estes artigos, mas tinha-me limitado a esclarecer apenas alguns aspectos», reiterando, em 1946, o seu desconhecimento em relação a estas investigações: «as pesquisas de Boltzmann e de Gibbs, que já tinham sido publicadas e que esgotavam este assunto, não me eram familiares (...)». (Albert Einstein, [1911*b*], p. 175; tr. In., p. 250 e Albert Einstein, [1946], p. 46; tr. In., p. 47; tr. Fr., p. 35.) As primeiras referências ao trabalho de Gibbs fá-las Einstein apenas em 1909. (Cf. Albert Einstein, [1909*a*], p. 186; tr. In., p. 359.)

⁶⁵ Cf. Abraham Pais, [1982], p. 73.

⁶⁶ Max Born, [1949], p. 167.

⁶⁷ Albert Einstein, [1911*a*], p. 357; tr. In., p. 430. (Itálico na tradução inglesa, mas não existente no original.)

⁶⁸ Cf. Albert Einstein, [1904], pp. 360-362; tr. In., pp. 75-77; tr. Fr., pp. 34-35.

num líquido, executam, tendo Poincaré visto neste fenómeno, por aparentemente implicar a transformação do calor em movimento, uma violação da segunda lei da termodinâmica. Após evidenciar o valor prático do princípio de Carnot, escreveu Poincaré: «Mas eis que a cena muda. O biólogo, armado com o seu microscópio, observou, há bastante tempo, nas suas preparações, movimentos desordenados das pequenas partículas em suspensão; é o movimento browniano. Ele pensou de imediato tratar-se de um fenómeno vital, mas em breve notou que os corpos inanimados dançam com não menos ardor do que os outros; entregou então o assunto aos físicos. Infelizmente, os físicos desinteressaram-se durante muito tempo desta questão; direccionamos a luz para iluminar a preparação microscópica, pensaram eles; a luz não se dirige sem calor, e daí as irregularidades de temperatura e a existência no líquido de correntes interiores que produzem os movimentos de que falamos.

M. Gouy teve a ideia de os olhar mais de perto e viu, ou pensa ter visto, que esta explicação é insustentável, que os movimentos se tornam mais vivos quanto mais pequenas são as partículas, mas que não são influenciados pelo modo como são iluminados. Então, se os movimentos não cessam, ou melhor, renascem sem cessar, sem recorrerem a uma fonte exterior de energia, em que é que devemos acreditar? Não devemos por causa disto renunciar à conservação da energia, mas vemos, perante os nossos olhos, que ora o movimento se transforma em calor por fricção, ora, inversamente, o calor se transforma em movimento, e isto sem que nada se perca, pelo que o movimento dura sempre. Isto contradiz o princípio de Carnot.⁶⁹

Perante tal análise, seremos, obviamente, tentados a reconhecer aqui uma violação da segunda lei da termodinâmica, já que, aceitando a transformação do calor em movimento «sem que nada se perca», atentamos contra o princípio da degradação da energia. Todavia, a noção de colisão aliada ao reconhecimento da existência das moléculas do líquido foram os elementos mais significativos na

⁶⁹ Cf. Albert Einstein, [1905b], “Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen”, *Ann. Phys.*, 17, 1905, pp. 549-560; tr. In., “On the Movement of Small Particles Suspended in Stationary Liquids Required by the Molecular-Kinetic Theory of Heat”, em *CpAE*, vol. II, Doc. 16, pp. 123-134; tr. Fr., “Mouvement des particules en suspension dans un fluide au repos, comme conséquence de la théorie cinétique moléculaire de la chaleur”, em *CEcAE*, tome I, pp. 55-64.

tentativa de explicação deste movimento aleatório de natureza macroscópica, destes «movimentos dos pequenos corpos inanimados suspensos», como os caracterizou Einstein⁷⁰, considerando que o movimento aleatório das moléculas suspensas no líquido é resultante das colisões com as moléculas constituintes desse líquido.

No ano de 1905, Einstein publica um total de quatro artigos⁷¹ e podemos dizer que é neste ano que se concretiza a bifurcação timidamente anunciada no artigo de 1904: por um lado, enquanto *clássico*, dedica-se à explicação do movimento Browniano⁷²; por outro, enquanto *revolucionário*, debruça-se sobre a interpretação da radiação do corpo negro mediante a introdução da hipótese de quanta de luz⁷³, tudo isto possibilitado pela reinterpretação estatística da probabilidade boltzianna, que condicionará não só as suas investigações sobre a teoria molecular, mas também a sua teoria da radiação e as suas críticas ulteriores à interpretação quântica⁷⁴.

⁷⁰ Cf. Henri Poincaré, [1904], “L’état actuel et l’avenir de la physique mathématique”, em Henri Poincaré, [1905], *La Valeur de la Science*, Paris, Flammarion, 1994, chap. 8, p. 131.

⁷¹ Albert Einstein, carta a Conrad Habicht [de 18 ou 25] de Maio de 1905, tr. In. em CpAE, vol. v, Doc. 27, p. 20.

⁷² Cf. Albert Einstein, [1905a], pp. 132-148; tr. In., pp. 86-103; tr. Fr., pp. 39-53. Albert Einstein, [1905b], pp. 549-560; tr. In., pp. 123-134; tr. Fr., pp. 55-64. Albert Einstein, [1905c], “Elektrodynamik bewegter Körper”, *Ann. Phys.*, 17, 1905, pp. 891-921; tr. In., “On the Electrodynamics of Moving Bodies”, em Albert Einstein *et al.*, [1913], tr. In., *The Principle of Relativity*, New York, Dover Publications, Inc., 1952, pp. 35-65 e em CpAE vol. II, Doc. 23, pp. 140-171; tr. Fr., “Sur l’électrodynamique des corps en mouvement”, em CEAE, tome II, pp. 31-58; tr. Port., “Sobre a electrodinâmica dos corpos em movimento”, em Albert Einstein *et al.*, [1913], tr. Port., *O Princípio da Relatividade*, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 4.ª ed., 1989, pp. 47-86. Albert Einstein, [1905d], “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? ”, *Ann. Phys.*, 18, 1905, pp. 639-641; tr. In., “Does the Inertia of a Body Depend upon its Energy Content?”, em Albert Einstein *et al.*, [1913], tr. In., pp. 67-71 e em CpAE, vol. II, Doc. 24, pp. 172-175; tr. Fr., “L’inertie d’un corps dépend-elle de son contenu en énergie?”, em CEAE, tome II, pp. 60-62; tr. Port., “A inércia de um corpo será dependente do seu conteúdo energético?”, em Albert Einstein *et al.*, [1913], tr. Port., pp. 87-90.

⁷³ O físico referiu-se, mais tarde, a estes estudos do «movimento browniano e outros assuntos relacionados (os fenómenos de flutuações)» como sendo estudos «essencialmente fundados na mecânica molecular clássica». (Albert Einstein, [1946], p. 46; tr. In., p. 47; tr. Fr., p. 35.)

⁷⁴ Cf. Jacques Merleau-Ponty, [1993], *Einstein*, Paris, Flammarion, 1993, p. 118.

É também neste *annus mirabilis* que conclui a sua dissertação de Doutoramento. Já em Outubro de 1900 se mostrara interessado em trabalhar a área da termoelectricidade para efeitos de Doutoramento⁷⁵, sob orientação do Prof. Heinrich Friedrich Weber⁷⁶, tendo desistido por considerar Weber responsável pela sua rejeição na candidatura a um cargo na Universidade de Göttingen⁷⁷. Pediu então orientação a Alfred Kleiner⁷⁸, apresentando à Universidade de Zurique, a 23 de Novembro de 1901, a sua dissertação, dedicada às forças moleculares, onde a teoria dos gases de Boltzmann e o trabalho de Drude sobre a teoria eléctrica dos metais eram analisados⁷⁹.

Apesar de este trabalho não ter chegado até nós, é na correspondência privada de Einstein que encontramos o maior número de informações. A Marcel Grossmann, a quem pretendia dedicar a sua dissertação⁸⁰, mostrava, em Abril de 1901, o seu grande

⁷⁵ Cf. Michel Paty, [1996], "Einstein", em Jacques Bersani (dir.), [1996], *Encyclopædia Universalis*, tome VIII, Paris, 1996, p. 37 (designado, adiante, pela sigla EnU).

⁷⁶ Encontramos, pela primeira vez, este interesse pela termoelectricidade numa carta a Mileva Maric datada de 10 de Outubro de 1899: «Tenho estudado imenso e completei as minhas considerações sobre o estudo das leis básicas da termoelectricidade». (Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 10 de Outubro de 1899, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 58, p. 136; tr. Fr. em LAS, Lettre 12, p. 57.)

⁷⁷ Cf. "Questionnaire for Municipal Citizenship Applicants", em CpAE, vol. I, Doc. 82, p. 154.

⁷⁸ Sobre a candidatura de Einstein, cf. Albert Einstein, carta a Otto Wiener de 9 de Março de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 90, p. 158 e carta a Wilhelm Ostwald de 19 de Março de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 92, p. 159. Sobre a possível influência de Weber na rejeição de Einstein, cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 23 de Março de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 93, p. 159; tr. Fr. em LAS, Lettre 24, p. 78; carta a Mileva Maric de 27 de Março de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 94, p. 160; tr. Fr. em LAS, Lettre 25, p. 81 e carta a Marcel Grossmann de 14 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 100, p. 165.

⁷⁹ Cf. Mileva Maric carta a Albert Einstein de inícios de Novembro de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 123, p. 181; tr. Fr. em LAS, Lettre 42, pp. 106 e carta a Albert Einstein de 13 de Novembro de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 124, p. 182; tr. Fr. em LAS, Lettre 43, p. 108.

⁸⁰ Sobre o contacto de Einstein com o trabalho de Drude, cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric [de após 16 de Abril] de 1898, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 41, p. 125; tr. Fr. em LAS, Lettre 3, p. 44. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 4 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 96, p. 162; tr. Fr. em LAS, Lettre 26, p. 84. Albert Einstein, carta a Mileva Maric [de 10 de Abril] de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 97, p. 163; tr. Fr. em LAS, Lettre 27, p. 86. Albert Einstein, carta a Mileva Maric

interesse pelo tema das forças moleculares⁸¹, o objecto de estudo dos seus primeiros artigos: «tenho algumas ideias esplêndidas que de momento apenas necessitam da incubação adequada. Agora estou certo de que a minha teoria das forças atractivas atómicas pode também ser alargada aos gases, sendo assim possível obter sem grande dificuldade a constante característica de quase todos os elementos. Isso também fará com que o problema da relação íntima entre as forças moleculares e as forças de acção à distância newtonianas fique muito mais próximo da sua solução»⁸². Também neste ano, em Novembro, Mileva Maric escrevia à sua amiga Helene Savic: «Albert escreveu um estudo magnífico que apresentou como

[de 28] de Maio de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 111, p. 174; tr. Fr. em LAS, Lettre 36, pp. 98-99. Albert Einstein, carta a Mileva Maric [de 4] de Junho de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 112, p. 174; tr. Fr. em LAS, Lettre 37, p. 100. Albert Einstein, carta a Mileva Maric [de 7] de Julho de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 114, p. 176; tr. Fr. em LAS, Lettre 38, p. 101. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 8 de Julho de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 115, p. 176; tr. Fr. em LAS, Lettre 39, p. 102. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 17 de Dezembro de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 128, p. 187; tr. Fr. em LAS, Lettre 37, p. 115.

⁸¹ É na correspondência privada que manifesta a intenção de dedicar a sua dissertação a Marcel Grossmann, algo que efectivamente fez em 1905. (Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 19 de Dezembro de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 130, p. 188; tr. Fr. em LAS, Lettre 47, p. 116 e Albert Einstein, [1906b], “Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen”, Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Philosophischen Doktorwürde der Hohen Philosophischen Fakultät (Mathematisch-naturwissenschaftliche Sektion) der Universität Zürich, 1905, em *Ann. Phys.*, 19, 1906, p. 289; tr. In., “A New Determination of Molecular Dimensions”, Dissertation toward the degree of Doctor of Philosophy granted by the Faculty of Philosophy (Department of Mathematics and Natural Sciences) of the University of Zurich, 1905, em CpAE, vol. II, Doc. 15, p. 104.)

⁸² Este interesse deve ter surgido pela primeira vez por volta de 1898, altura em que Einstein frequentou o curso de física leccionado por Heinrich Weber. Na sebeta elaborada pelo professor, podemos ler, na secção intitulada «Calor de evaporação de um líquido – D) Formação de vapor saturado», a seguinte nota lateral de Einstein: «Investigar! Férias». Segundo McCormach, esta observação de Einstein é a primeira manifestação do seu interesse pelo problema das forças moleculares. (Cf. Heinrich Weber, [1897-8], “Vorlesungen über Physik von Weber”, em CpAEde, vol. 1, Doc. 37, p. 130; tr. In., “H. F. Weber’s Lectures on Physics”, em CpAE, vol. 1, Doc. 37, nota lateral de Einstein, p. 77; cf. Russell McCormach, [1970], “Einstein, Lorentz and the Electron Theory”, *Historical Studies in the Physical Sciences*, 2, 1970, p. 43, cit. por John Stachel (ed.) em CpAEde, vol. 1, Doc. 37 [Heinrich Weber, [1897-8], *Vorlesungen über Physik von Weber*], p. 130, footnote 101; cf. também a este propósito John Stachel (ed.), [1987a], “Einstein as a Student of Physics, and His Notes on H. F. Weber’s Course”, em CpAEde, vol. 1, Editorial Note, pp. 60-62.)

dissertação. Provavelmente terá o doutoramento dentro de alguns meses (...). [O trabalho] trata de investigações das forças moleculares nos gases mediante o recurso a vários fenómenos conhecidos⁸³.

Da correspondência trocada entre Einstein e Mileva, sabemos que a sua tese de Doutoramento abordava o trabalho de Drude, apresentando, provavelmente, objecções à sua teoria dos electrões nos metais⁸⁴, e o de Boltzmann, tendo Einstein manifestado a Mileva o desejo de enviar a este último «a parte do trabalho que se refere ao seu livro»⁸⁵.

Apesar de todo este entusiasmo, Einstein retirou a tese em Fevereiro do ano seguinte⁸⁶, ou por sugestão de Kleiner, para evitar controvérsias com Boltzmann, já que o trabalho deste era também objecto de crítica⁸⁷, ou talvez por não conseguir uma confirmação

⁸³ Albert Einstein, carta a Marcel Grossmann de 14 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 100, pp. 165-166.

⁸⁴ Mileva Maric, carta a Helene Savic de 23 de Novembro/Dezembro de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 125, p. 183.

⁸⁵ Apesar de Einstein ser um entusiasta da teoria de Drude, que explicava os fenómenos térmicos e eléctricos nos metais tendo por base uma concepção atomista da electricidade, considerando-o um «homem genial», via algumas dificuldades na sua explicação do magnetismo, observando, contudo, que ele estava no «bom caminho». Teria, no entanto, duas objecções à sua teoria, mas a natureza das objecções não é conhecida. (Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 4 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 96, p. 162; tr. Fr. em LAS, Lettre 26, p. 84. Albert Einstein, carta a Mileva Maric [de 10 de Abril] de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 97, p. 163; tr. Fr. em LAS, Lettre 27, p. 86. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 8 de Julho de 1901, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 115, p. 176; tr. Fr. em LAS, Lettre 39, p. 102. A este propósito, cf. também John Stachel (ed.), [1987c], «Einstein on Thermal, Electrical, and Radiation Phenomena», em CpAEde, vol. 1, Editorial Note, pp. 236-237.)

⁸⁶ Albert Einstein, carta a Mileva Maric [de 8] de Fevereiro de 1902, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 136, p. 192; tr. Fr. em LAS, Lettre 50, p. 122. Já em 1901, aquando da redacção do seu primeiro artigo científico, Einstein havia enviado uma cópia a Boltzmann, segundo informa a carta de Mileva a Helene Savic: «Albert redigiu um artigo de física que provavelmente será publicado em breve nos *Annalen der Physik*. Nem imaginas como estou orgulhosa do meu querido. Não se trata de um artigo qualquer: é um artigo muito importante que trata da teoria dos líquidos. Também enviámos um manuscrito a Boltzmann, e gostaríamos de saber a sua opinião; esperemos que ele nos escreva». (Mileva Maric, carta a Helene Savic de 20 de Dezembro de 1900, tr. In. em CpAE, vol. 1, Doc. 85, p. 155.)

⁸⁷ Cf. Albert Einstein, recibo, com a data de 1 de Fevereiro de 1902, de 230 fr. devolvidos pela Universidade de Zurique, por motivo de desistência da dissertação de Doutoramento, em CpAE, vol. 1, Doc. 132, p. 190.

experimental dos resultados teóricos aí alcançados⁸⁸. Não obstante, o interesse pelas forças moleculares prolongou-se por 1903⁸⁹, tendo, em 1911, publicado um último artigo sobre o assunto, ainda que sem fazer qualquer referência aos seus primeiros trabalhos dedicados ao tema⁹⁰.

Agora, em 1905, ano em que publica o artigo sobre o movimento Browniano, apresenta a tese dedicada, não às forças moleculares, como eram os seus interesses em 1900-1901, mas a um novo processo para a determinação das dimensões das moléculas.

Esta dissertação, terminada a 30 de Abril⁹¹ e, portanto, anterior ao artigo sobre o movimento Browniano, que foi concluído em Maio desse ano⁹², surge, na óptica de Abraham Pais, como um estudo fundamental para o desenvolvimento deste último artigo: «Em minha opinião», esclarece, «a tese está a par do artigo sobre o movimento Browniano. De facto, em alguns aspectos – não em todos –, os resultados sobre o movimento Browniano são subprodutos do

⁸⁸ É esta a interpretação que Rudolf Kayser fez da atitude de Einstein. (Cf. Rudolf Kayser, [1930], *Albert Einstein: A Biographical Portrait*, New York, Albert and Charles Boni, 1930, p. 69, cit. por John Stachel (ed.), [1989d], “Einstein’s Dissertation on the Determination of Molecular Dimensions”, em *CpAEde*, vol. II, Editorial Note, p. 175, footnote 47.)

⁸⁹ Einstein conclui, mais tarde, o seu artigo de 1902 escrevendo: «sinto necessidade de me desculpar por delinear aqui um plano insuficiente para uma investigação laboriosa sem contribuir para a sua solução experimental; mas não estou em posição de o fazer». (Albert Einstein, [1902a], p. 814; tr. In., p. 29.) Segundo Stachel, esta observação evidencia o motivo que terá levado Einstein a retirar a tese, já que, na altura, as dissertações apresentadas à Universidade de Zurique possuíam, maioritariamente, um carácter experimental. (Cf. John Stachel (ed.), [1989d], p. 175.)

⁹⁰ Este interesse é evidenciado na sua correspondência com Michele Besso. Em Janeiro desse ano referia: «já a seguir vou-me ocupar das forças moleculares dos gases»; e em Março lamentava: «estou a ter grandes dificuldades na recolha do material para o meu trabalho sobre as forças moleculares». (Albert Einstein, carta a Michele Besso [de 22] de Janeiro de 1903, tr. In. em *CpAE*, vol. V, Doc. 5, p. 8; tr. Fr. em *EBe*, Lettre 01, p. 4 e em *CEAE*, tome I, p. 27 e carta a Michele Besso de 17 de Março de 1903, tr. In. em *CpAE*, vol. V, Doc. 7, p. 12; tr. Fr. em *EBe*, Lettre 03, p. 10.)

⁹¹ Albert Einstein, [1911a], “Bemerkung zu dem Gesetz von Eötvös”, *Ann. Phys.*, 34, 1911, pp. 165-169; tr. In., “Comment on Eötvös’s Law”, em *CpAE*, vol. III, Doc. 12, pp. 328-331.

⁹² Cf. Albert Einstein, [1906b], p. 305; tr. In., p. 122. Apesar de concluída nesta data, a dissertação apenas foi apresentada a 22 de Julho de 1905. (Cf. A. Kleiner, H. Burkhardt, “Expert Opinion by Alfred Kleiner and Heinrich Burkhardt on Einstein’s Dissertation”, em *CpAEde*, vol. V, Doc. 31, p. 36, footnote 2.)

trabalho de tese. Isto explica porque é que o artigo sobre o movimento Browniano foi recebido pelos *Annalen der Physik* em 11 de Maio de 1905, apenas onze dias depois da tese ter sido concluída.⁹³

Na sua dissertação, Einstein, depois de reconhecer que ainda não havia sido possível «ultrapassar os obstáculos que impedem o desenvolvimento de uma detalhada teoria cinético-molecular dos líquidos»⁹⁴, traça como objectivo proceder a uma determinação das dimensões das moléculas, não em função da teoria cinética dos gases, mas mediante a observação das moléculas suspensas num líquido⁹⁵, adiantando um novo processo para determinar as dimensões moleculares⁹⁶.

Pouco tempo depois de a concluir, publica então um artigo «Sobre o movimento das partículas em suspensão num fluido em repouso requerido pela teoria cinética do calor»⁹⁷. Não se trata, portanto, de um movimento observado, mas de um movimento que é requerido por, consequência necessária da teoria cinética do calor, propondo-se o físico demonstrar «que, segundo a teoria cinético-molecular do calor, corpos de tamanho visível ao microscópio suspensos num líquido devem, como resultado da agitação termodinâmica das moléculas, realizar movimentos de tal magnitude que podem facilmente ser detectados por um microscópio»⁹⁸,

⁹³ Cf. Albert Einstein, [1905*b*], p. 560; tr. In., p. 134; tr. Fr., p. 64.

⁹⁴ Abraham Pais, [1982], p. 89.

⁹⁵ Albert Einstein, [1906*b*], p. 289; tr. In., p. 105.

⁹⁶ Cf. Albert Einstein, [1906*b*], p. 289; tr. In., p. 105.

⁹⁷ Foi um aluno seu, Jean Perrin, quem, em 1908, confirmou os resultados teóricos de Einstein. A este propósito, cf. Albert Einstein, [1911*c*], «Berichtigung zu meiner Arbeit: 'Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen' », *Ann. Phys.*, 34, 1911, pp. 591-592; tr. In., «Correction to My Paper: 'A New Determination of Molecular Dimensions' », em CpAE, vol. III, Doc. 14, pp. 336-337.

⁹⁸ É efectivamente este o título do artigo: Albert Einstein, [1905*b*], «Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen», *Ann. Phys.*, 17, 1905, pp. 549-560; tr. In., «On the Movement of Small Particles Suspended in Stationary Liquids Required by the Molecular-Kinetic Theory of Heat», em CpAE, vol. II, Doc. 16, pp. 123-134; tr. Fr., «Mouvement des particules en suspension dans un fluide au repos, comme conséquence de la théorie cinétique moléculaire de la chaleur», em CÉAE, tome I, pp. 55-64.

⁹⁹ Cf. Albert Einstein, carta a Carl Seeling de 15 de Setembro de 1952, cit por John Stachel (ed.), [1989*b*], p. 42, footnote 14.

acrescentando que, possivelmente, estes movimentos são idênticos ao designado movimento molecular Browniano¹⁰⁰.

No fundo, depois de ter interpretado, com os trabalhos de 1902 a 1904, a probabilidade como a fracção de intervalo de tempo que o sistema permanece naquele estado ao longo da sua evolução, e deduzir daí que as flutuações das quantidades físicas calculáveis correspondem a ocorrências reais e observáveis, Einstein conclui que o movimento Browniano terá de resultar de tais flutuações¹⁰¹. «Se é realmente possível observar o movimento aqui discutido, juntamente com as leis que se espera a que obedeça», escreveu o físico na introdução ao artigo, «então a termodinâmica clássica não pode continuar a ser vista como estritamente válida para os corpos, inclusive para aqueles observáveis ao microscópico, e uma rigorosa determinação do tamanho real dos átomos se torna possível. Inversamente, se a previsão destes movimentos se mostrar errada, este facto será um forte argumento contra a concepção cinético-molecular do calor»¹⁰².

Assim, se este movimento for observado¹⁰³, a termodinâmica clássica sofre um rude golpe; se o movimento Browniano não existir, se as flutuações não se derem conforme o previsto, o conceito de corpo microscópico sujeito às leis da mecânica terá de ser abandonado¹⁰⁴.

¹⁰⁰ Cf. Albert Einstein, [1905*b*], p. 549; tr. In., p. 123; tr. Fr., p. 55.

¹⁰¹ De facto, na introdução ao artigo, Einstein apresenta algumas reservas, não identificando categoricamente, devido à sua ignorância em relação a este assunto, tais movimentos com o movimento Browniano: «É possível que os movimento aqui discutidos sejam idênticos ao chamado “movimento molecular Browniano”, escreveu, «todavia, os meus conhecimentos relativos a isto são tão imprecisos que não posso formar uma opinião definitiva sobre este assunto». Também na autobiografia o físico refere: «descobri que, segundo a teoria atomista, deveria existir um movimento observável das partículas microscópicas em suspensão, sem saber que existia já há bastante tempo observações relativas ao movimento Browniano». (Albert Einstein, [1905*b*], p. 549; tr. In., p. 123; tr. Fr., p. 55. Albert Einstein, [1946], p. 46; tr. In., p. 47; tr. Fr., p. 36.)

¹⁰² Cf. Michel Paty, [1996], p. 39.

¹⁰³ Albert Einstein, [1905*b*], p. 549; tr. In., p. 123; tr. Fr., pp. 55-56.

¹⁰⁴ A 18 de Maio previa que, «segundo a teoria molecular do calor, corpos de magnitude 1/1000 mm suspensos num fluido devem desempenhar um conjunto de movimentos, decorrentes do movimento térmico». (Albert Einstein, carta a Conrad Habicht [de 18 ou 25] de Maio de 1905, tr. In. em CpAE, vol. v, Doc. 27, p. 20; tr. Fr. em CEcAE, tome 1, p. 36.)

Com este artigo – que, já o vimos, na óptica de Abraham Pais é uma anotação à tese de Doutorado¹⁰⁵, até porque, como escreveu o seu próprio autor, permite a «determinação do tamanho real dos átomos»¹⁰⁶, tema central da sua dissertação¹⁰⁷ – Einstein procurava, numa altura em que o seu «principal objectivo era encontrar factos que garantissem o melhor possível a existência de átomos de um tamanho finito determinado»¹⁰⁸, uma «comparação com a realidade»¹⁰⁹, vendo naquilo que julgava ser o movimento Browniano um fenómeno acessível à experiência, por forma a desenvolver e demonstrar a ideia-chave do artigo de 1904¹¹⁰: fixar uma escala molecular de magnitudes em função de flutuações observáveis¹¹¹. É que, explica Françoise Balibar, «os estudos experimentais anteriores

¹⁰⁵ Sobre este assunto seguir-se-ão mais três artigos: Albert Einstein, [1906a], “Zur Theorie des Brownschen Bewegung”, *Ann. Phys.*, 19, 1906, pp. 371-380; tr. In., “On the Theory of the Brownian Motion”, em CpAE, vol. II, Doc. 32, pp. 180-191. Albert Einstein, [1907b], “Theoretische Bemerkung über die Brownsche Bewegung”, *Zeit. Elektr.*, 17, 1907, pp. 41-42; tr. In., “Theoretical Remarks on Brownian Motion”, em CpAE, vol. II, Doc. 40, pp. 229-231. Albert Einstein, [1908b], “Elementare Theorie der Brownschen Bewegung”, *Zeit. Elektr.*, 14, 1908, pp. 235-239; tr. In., “Elementary Theory of Brownian Motion”, em CpAE, vol. II, Doc. 50, pp. 318-328. Em 1907 discursou sobre o assunto e apresentou dois artigos relacionados com o tema: Albert Einstein, [1907c], “Her A. Einstein spricht ‘Über die Natur der Bewegungen mikroskopisch kleiner, in Flüssigkeiten suspendierter Teilchen’”, *Naturforschende Gesellschaft Bern. Mitteilungen*, 1038, 1907; tr. In., “Mr. A. Einstein speaks ‘On the nature of the movements of microscopically small particles suspended in liquids’”, em CpAE, vol. II, Doc. 43, p. 235; Albert Einstein, [1907a], “Über die Gültigkeitsgrenze des Satzes vom Thermodynamischen Gleichgewicht und über die Möglichkeit einer neuen Bestimmung der Elementarquanta”, *Ann. Phys.*, 22, 1907, pp. 569-572; tr. In., “On the Limit of Validity of the Law of Thermodynamic Equilibrium and on the possibility of a New Determination of the Elementary Quanta”, em CpAE, vol. II, Doc. 39, pp. 225-228; Albert Einstein, [1908a], “Eine neue elektrostatische Methode zur Messung kleiner Elektrizitätsmengen”, *Phys. Zeit.*, 9, 1908, pp. 216-217; tr. In., “A New Electrostatic Method for the measurement of Small Quantities of Electricity”, em CpAE, vol. II, Doc. 48, pp. 312-315. Em 1909, num encontro em Salzburgo a 20 de Setembro, voltou a referir-se ao tema: Albert Einstein *et al.* [1909b], “Diskussion”, *Phys. Zeit.*, 10, 1909, 779-780; tr. In., “‘Discussion’ following lecture version of Henry Siedentoft, ‘On Ultramicroscopic Images’”, em CpAE vol. II, Doc. 58, p. 377.

¹⁰⁶ O autor usa mesmo a expressão «scholium». (Cf. Abraham Pais, [1982], pp. 95-96.)

¹⁰⁷ Albert Einstein, [1905b], p. 549; tr. In., p. 123; tr. Fr., p. 56.

¹⁰⁸ Cf. Albert Einstein, [1906b], p. 289; tr. In., p. 105.

¹⁰⁹ Albert Einstein, [1946], p. 46; tr. In., p. 47; tr. Fr., p. 36.

¹¹⁰ Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 30 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. I, Doc. 102, p. 168; tr. Fr. em LAS, Lettre 29, p. 91.

¹¹¹ Cf. Albert Einstein, [1904], pp. 354-362; tr. In., pp. 68-77; tr. Fr., 29-35.

sobre o movimento browniano não tinham permitido encontrar qualquer regularidade, simplesmente porque ninguém, antes de Einstein, havia tido a ideia de estudar a característica a que Einstein dava mais importância: o deslocamento quadrático médio das moléculas (dito de outra forma, a sua flutuação em torno de uma posição média) em função do tempo»¹¹².

E, efectivamente, seguindo esta hipótese teórica lançada em 1904 e na busca da sua confirmação, Einstein encontra a solução para o problema do movimento Browniano, concluindo que, embora a velocidade das partículas suspensas no fluido seja inobservável, o efeito das suas deslocações sucessivas irregulares, resultante das colisões das moléculas constituintes do fluido, pode ser observado com o auxílio de um microscópio, sendo tal fenómeno uma das melhores provas directas a favor da realidade dos átomos e das moléculas¹¹³. Neste processo, Einstein consegue relacionar a difusão com o desvio quadrático médio das partículas, flutuação esta que, explica Merleau-Ponty, «se torna aparente no caso do movimento Browniano, manifestando na experiência o carácter estático, e portanto flutuante, do equilíbrio, carácter oculto nos casos geralmente considerados pela mecânica estatística»¹¹⁴.

Estamos em 1905, o *annus mirabilis* de Albert Einstein. Até aqui referimos um total de seis artigos científicos¹¹⁵. Os dois primeiros, dedicados às forças moleculares, pouco valor tinham para o seu autor¹¹⁶; nos de 1902-1904 procede a uma análise crítica dos fundamentos da termodinâmica com o objectivo de determinar as propriedades termodinâmicas de qualquer sistema macroscópico, formando estes três artigos¹¹⁷ uma «ponte, paralela à de Gibbs, entre o trabalho de Boltzmann e a abordagem moderna à mecânica

¹¹² Cf. Martin J. Klein, [1967], p. 513.

¹¹³ Françoise Balibar, Olivier Darrigol, Bruno Jech, [1989b], “Le mouvement brownien”, em CEAe, tome 1, p. 54.

¹¹⁴ Cf. Gerald J. Whitrow, [1967], *Einstein: the man and his achievement*, New York, Dover Publications, Inc., 1973, p. 8.

¹¹⁵ Jacques Merleau-Ponty, [1993], p. 122.

¹¹⁶ Cf. Albert Einstein, [1901], pp. 513-523; tr. In., pp. 1-11. Albert Einstein, [1902a], pp. 798-814; tr. In., pp. 12-29. Albert Einstein, [1902b], pp. 417-433; tr. In., pp. 30-47. Albert Einstein, [1903], pp. 170-187; tr. In., pp. 48-67; tr. Fr. (parcial), pp. 18-28. Albert Einstein, [1904], pp. 354-362; tr. In., pp. 68-77; tr. Fr., pp. 29-35. Albert Einstein, [1905b], pp. 549-560; tr. In., pp. 123-134; tr. Fr., pp. 55-64.

¹¹⁷ Cf. Albert Einstein, carta a Johannes Stark de 7 de Dezembro de 1907, tr. In. em CpAE, vol. v, Doc. 66, p. 46; tr. Fr. em CEAE, tome 1, p. 72.

estatística», considera Stachel¹¹⁸. Este último artigo, de 1905, é a «comparação com a realidade»¹¹⁹ para a confirmação da hipótese lançada no artigo de 1904.

Em 1905, ano em que conclui a sua dissertação de Doutoramento, o físico conhece, graças à original elaboração teórica dos princípios-base da termodinâmica feita até então, uma nova linha de investigação: à *clássica*, cuja continuidade é efectivada no artigo sobre o movimento Browniano, e que se prolongará até 1908, altura da última publicação sobre o assunto, junta-se agora uma *revolucionária*, inaugurada com o artigo dedicado à interpretação das leis da radiação negra mediante a hipótese de quanta de luz¹²⁰.

Chegados a este ponto, algo será já possível adiantar quanto ao âmbito da investigação einsteiniana: sem dúvida que ela se insere na problemática dos físicos do seu tempo, em que a representação mecanicista e atomista da matéria, baseada nas leis newtonianas, onde as massas e as forças são os seus elementos necessários, é a dominante. Contudo, a hipótese atómica apresentava, por esta altura, algumas resistências, principalmente por parte dos partidários da corrente energista, como por exemplo Wilhelm Oswald¹²¹. Também Ernest Mach não aceitava passivamente a realidade dos átomos, admitindo, todavia, o carácter heurístico e a utilidade didáctica do atomismo¹²², enquanto Boltzmann, pelo contrário, assumia-se como um «reaccionário, como alguém que se deixou arrastar e que guardou todo o seu entusiasmo para as boas e velhas doutrinas clássicas»¹²³, algo que agradava a Einstein, que, abraçando a teoria de Boltzmann, estava «convencido de que, no caso dos gases, lidamos com massas pontuais discretas de grandeza finita bem determinada, que se movem de acordo com certas condições»¹²⁴.

¹¹⁸ Mais tarde, Einstein também tendeu a desvalorizar estes artigos devido aos estudos de Gibbs. (Cf. Albert Einstein, [1911b], p. 175; tr. In., p. 250 e Albert Einstein, [1946], p. 46; tr. In., p. 47; tr. Fr., p. 35.)

¹¹⁹ John Stachel (ed.), [1989b], p. 47.

¹²⁰ Cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 30 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. i, Doc. 102, p. 168; tr. Fr. em LAS, Lettre 29, p. 91.

¹²¹ Cf. Albert Einstein, [1905a], pp. 132-148; tr. In., pp. 86-103; tr. Fr., pp. 39-53.

¹²² Cf. Ilya Prigogine e Isabelle Stengers, [1993a], “Energia”, em EnE, vol. xxvi, p. 11.

¹²³ Cf. John Stachel (ed.), [1989a], “Einstein on Brownian Motion”, em CpAEde, vol. II, Editorial Note, p. 207 e A. Spartzani, [1993a], “Átomo e Molécula”, em EnE, vol. xxiv, p. 424.

¹²⁴ L. Boltzmann, *Theoretical Physics and Philosophical Problems*, Dordrecht and Boston, ed. N. McGuinness, Reidel, 1974, cit. por Françoise Balibar, [1992], p. 93.

Einstein, que conhecia quer parte do trabalho de Boltzmann, quer os trabalhos de Oswald e Mach¹²⁵, assume, logo nos seus primeiros artigos, o pressuposto da existência dos átomos e moléculas e se desde cedo encontramos, quer na sua correspondência privada, quer nos objectivos a que se propõe nos artigos, um grande interesse pela teoria estatística da mecânica clássica, o artigo dedicado ao movimento Browniano, além de ser uma das melhores provas a favor da realidade dos átomos e moléculas – demonstração que, na opinião do próprio físico, «suportou, simultaneamente, a mecânica como fundamento da física e da hipótese atómica», permitindo convencer «numerosos cépticos»¹²⁶ –, foi um elemento indispensável não só para o reconhecimento da probabilidade nas leis naturais, como também para a evidenciação das limitações da teoria cinética, iniciando-se, assim, da parte de Einstein, um afastamento «da rigorosa ortodoxia mecanicista», para usar a expressão de Merleau-Ponty¹²⁷. «Lendo estes artigos», opinou Max Born em 1949, «é-se inclinado a acreditar que, por esta altura, o aspecto estatístico da física era preponderante no pensamento de Einstein; no entanto, ao mesmo tempo, ele trabalhava na relatividade, onde a causalidade rigorosa reina»¹²⁸.

Daniel Duarte de Carvalho

¹²⁵ Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 13 de Setembro de 1900, tr. In. em CpAE, vol. i, Doc. 75, p. 149; tr. Fr. em LAS, Lettre 21, pp. 73-74.

¹²⁶ Sobre o conhecimento dos trabalhos de Boltzmann, cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 10 de Setembro de 1899, tr. In. em CpAE, vol. i, Doc. 54, p. 133; tr. Fr. em LAS, Lettre 10, p. 53. Carta a Mileva Maric de 13 de Setembro de 1900, tr. In. em CpAE, vol. i, Doc. 75, p. 149; tr. Fr. em LAS, Lettre 21, pp. 73-74. Carta a Mileva Maric de 19 de Setembro de 1900, tr. In. em CpAE, vol. i, Doc. 76, p. 150; tr. Fr. em LAS, Lettre 22, p. 74. Carta a Mileva Maric de 30 de Abril de 1901, tr. In. em CpAE, vol. i, Doc. 102, p. 168; tr. Fr. em LAS, Lettre 29, p. 91. Albert Einstein, [1902b], p. 417; tr. In., p. 30. Sobre o trabalho de Wilhelm Ostwald, cf. Albert Einstein, carta a Wilhelm Ostwald de 19 de Março de 1901, tr. In. em CpAE, vol. i, Doc. 92, p. 159. Sobre Mach, cf. Albert Einstein, carta a Mileva Maric de 10 de Setembro de 1899, tr. In. em CpAE, vol. i, Doc. 54, p. 133; tr. Fr. em LAS, Lettre 10, p. 53.

¹²⁷ Albert Einstein, [1946], p. 18; tr. In., p. 19; tr. Fr., p. 25.

¹²⁸ Jacques Merleau-Ponty, [1993], p. 233.

¹²⁹ Max Born, [1949], p. 166.

RESUMO

Antes do trabalho, de 1905, sobre a teoria da relatividade restrita, Albert Einstein trabalhou a área da Termodinâmica, procedendo a uma análise crítica dos seus fundamentos. Abordar as condições de emergência desta análise e apontar, simultaneamente, os caminhos por ela abertos, nomeadamente para a explicação do movimento Browniano e para os desenvolvimentos da radiação do corpo negro mediante a introdução da hipótese de *quanta* de luz, é o nosso propósito.

ABSTRACT

Before his work, in 1905, on the theory of relativity, Albert Einstein made a critical discovery within the foundation of Thermodynamics. It is our purpose to present the emergence of these significant findings and simultaneously point out the direction taken toward the explanation of the Brownian motion and the development of black mass radiation through the introduction of the *quanta* light hypothesis.

RÉSUMÉ

Avant les recherches, de 1905, sur la théorie de la relativité restrict, Albert Einstein a travaillé sur la thermodynamique, en faisant une analyse critique de ses fondements. C'est notre propos s'aborder les conditions d'émergence de cette analyse et d'indiquer, simultanément, les chemins qu'elle a ouverts, en ce qui concerne à l'explication du mouvement brownien et aux développements de la radiation du corps noir face à l'introduction de l'hypothèse de *quanta* de lumière.