



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

(UNIRIO)

JAKLER NICHELE NUNES

IRREVERSIBILIDADE E FILOSOFIA DA NATUREZA:
a conciliação de Boltzmann entre o Mecanicismo e a Termodinâmica

RIO DE JANEIRO

2024



JAKLER NICHELE NUNES

IRREVERSIBILIDADE E FILOSOFIA DA NATUREZA:
a conciliação de Boltzmann entre o Mecanicismo e a Termodinâmica

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Faculdade de Filosofia do Centro de Ciências Humanas e Sociais da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Filosofia.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Petrônio da Costa Araújo

Rio de Janeiro

2024

N972i Nunes, Jakler Nichele
Irreversibilidade e Filosofia da Natureza: a
conciliação de Boltzmann entre o Mecanicismo e a
Termodinâmica / Jakler Nichele Nunes. - Rio de
Janeiro, 2024.
62 f.

Orientador: Rodolfo Petrônio da Costa Araújo.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro,
Graduação em Filosofia, 2024.

1. Irreversibilidade. 2. Filosofia da Natureza.
3. Ludwig Boltzmann. 4. Teorema-H. I. Araújo,
Rodolfo Petrônio da Costa, orient. II. Título.

JAKLER NICHELE NUNES

IRREVERSIBILIDADE E FILOSOFIA DA NATUREZA:
a conciliação de Boltzmann entre o Mecanicismo e a Termodinâmica

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Faculdade de Filosofia do Centro de Ciências Humanas e Sociais da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Filosofia.

Aprovado em: 13 / 08 / 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rodolfo Petrônio da Costa Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - UNIRIO.

Prof. Dr. Écio Elvis Pisetta
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - UNIRIO.

Prof. Dr. João Alberto Mesquita Pereira
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - UNIRIO.

AGRADECIMENTOS

Recomeçar a jornada acadêmica no campo da Filosofia só foi possível graças ao apoio irrestrito de pessoas queridas que compreendem a importância de se construir um patrimônio intelectual. Essas pessoas acreditam que este bem imaterial pode expandir os horizontes da nossa interpretação da realidade e nos fortalecer como agentes de transformação do mundo. Após quase vinte anos de uma trajetória profissional que abarcou a engenharia, o ensino e a pesquisa universitária na área de exatas – com algumas peculiaridades que alguns sabem –, retornar aos bancos escolares para um curso de graduação revelou-se uma jornada terapêutica. Experimentei o renascimento do vigor da primeira juventude. A diferença foi a inexorável maturidade que o tempo cronológico trouxe: ela proporcionou um aproveitamento intelectual mais profundo e significativo do que na jornada anterior.

Primeiramente, agradeço àquela que aceitou ser minha companheira desde 2007, Cíntia da Silva Telles Nichele, e que sempre valorizou esse novo capítulo da minha jornada existencial-intelectual. Sem seu inestimável apoio, essa aventura na Filosofia talvez não teria sido possível. Foram cerca de cinco anos de dedicação intensa, com praticamente todas as noites comprometidas, assim como no mestrado e no doutorado em Engenharia. Como um prêmio para o final dessa primeira parte da nova caminhada, fomos agraciados com algo de difícil qualificação: a espera da pequena Helena, que desde já nos desafia ao nobre papel de educadores e, pela primeira vez, ao de pai e de mãe.

Da mesma forma, expressei minha profunda gratidão aos meus pais, Ageu e Luzia, que sempre estimularam meus estudos e jamais desvalorizaram a aquisição de um livro, mantendo estantes cheias de volumes em casa. Este ambiente fecundo foi, sem dúvida, a base que culminou neste projeto de formação. Estendo meus agradecimentos a todos os familiares pela compreensão quanto às ausências e por todo o suporte neste período. Em especial, agradeço à minha sogra, Dra. Julia, pelas muitas manifestações de carinho materializadas no suporte à logística diária, e aos Telles e seus agregados pelo ambiente sempre aprazível e acolhedor. Entre eles, destaco o Prof. Fernando Telles, filósofo kant-popperiano, que sempre nos instigou ao exercício da razão.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Rodolfo Petrônio da Costa Araújo, por desenvolver na UNIRIO, em especial nas suas disciplinas, um ambiente fértil para a discussão de temas ligados à Filosofia da Ciência e à Filosofia da Natureza. Sua atuação como professor, marcada pelo rigor, sistematicidade, dedicação e compromisso com a formação sólida de seus alunos,

sempre aliada à afabilidade, foi fundamental para este projeto. Fruto das iniciativas do Prof. Rodolfo, também expresso minha gratidão aos membros do GEFONT – Grupo de Estudo de Filosofia e Ontologia da Natureza. Em especial, aos professores Écio Elvis Pisetta, diretor da Faculdade de Filosofia, Jarbas de Mesquita Neto e João Alberto Mesquita Pereira, pelas discussões provocativas e enriquecedoras, que fomentaram reflexões que transcenderam o currículo de graduação. Igualmente, agradeço aos professores Eduardo Vieira da Cruz, Dario Alves Teixeira Filho e Anna Hartmann por suas aulas que conjugaram o senso de desafio e de inspiração, que são fundamentais ao labor filosófico.

Agradeço à direção e ao corpo técnico da Faculdade de Filosofia pelo incansável esforço em prover processos, meios e infraestrutura adequados para a realização do curso, especialmente durante o desafiador período da pandemia de COVID-19. Manifesto, também, minha gratidão ao Governo Federal, em especial ao Ministério da Educação, pela manutenção de uma estrutura de ensino público e de qualidade no Brasil, livre e laica, apesar de todas as restrições financeiras e ameaças contra ela. Registro aqui meu compromisso de buscar oportunidades para retribuir todo o apoio recebido, contribuindo para a continuidade e fortalecimento da UNIRIO.

“Em nenhum outro lugar senão nas ciências naturais confirma-se menos o princípio de que o caminho direto é o mais curto.”

Ludwig Boltzmann, na conferência
A Segunda Lei da Teoria Mecânica do Calor,
pronunciada na Academia Imperial de Ciências (1886).

NUNES, Jakler Nichele. **Irreversibilidade e Filosofia da Natureza: a conciliação de Boltzmann entre o Mecanicismo e a Termodinâmica**. 2024. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Filosofia) - Departamento de Filosofia, Centro de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

RESUMO

O presente trabalho propõe uma análise da teoria da irreversibilidade a partir dos trabalhos do físico austríaco Ludwig Boltzmann e sua relação com a filosofia da natureza. A noção de irreversibilidade emergiu no campo das ciências no século XIX, especialmente no âmbito das investigações sobre o calor que culminaram na Segunda Lei da Termodinâmica, em um contexto científico profundamente influenciado pelo mecanicismo. Boltzmann, fundamentando-se no atomismo, buscou reconciliar o mecanicismo com a emergente Termodinâmica, notabilizando-se por seu trabalho de 1872, em que deduziu a irreversibilidade a partir de leis mecânicas reversíveis. A irreversibilidade da natureza, que desafiava o paradigma mecanicista vigente, encontrou assim a sua justificativa. Este estudo, estruturado em parte como uma pesquisa bibliográfica genealógica, traça a trajetória de Boltzmann para revelar aspectos da evolução do conceito de irreversibilidade, desde seus precursores como Bailly até os avanços do próprio Boltzmann, situando sua teoria no contexto das questões filosóficas cruciais sobre o tempo, a causalidade e a estrutura da realidade. A monografia revisita os principais trabalhos de Boltzmann sobre irreversibilidade, analisa conceitos fundamentais de sua física e identifica críticas à sua teoria no curso da história. Além disso, estabelece paralelos entre os princípios boltzmannianos e a tradição filosófica, ampliando as implicações filosóficas da irreversibilidade. Críticas contemporâneas e posteriores, incluindo as de Karl Popper e John Earman, são sumarizadas. Em conclusão, evidencia-se que a teoria de Boltzmann sobre irreversibilidade, apesar das críticas e desafios enfrentados ao longo dos anos, permanece como um marco na interseção entre física e filosofia. Sua abordagem estatística não apenas ofereceu uma explicação robusta para um fenômeno aparentemente contraditório, mas também proporcionou um ponto de partida fecundo para reflexões filosóficas mais amplas sobre a natureza da temporalidade e da ordem no universo físico.

Palavras-chave: Irreversibilidade. Ludwig Boltzmann. Filosofia da Natureza. Atomismo. Segunda Lei da Termodinâmica.

NUNES, Jakler Nichele. **Irreversibility and Philosophy of Nature: Boltzmann's conciliation of Mechanicism and Thermodynamics**. 2024. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Filosofia) - Departamento de Filosofia, Centro de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

ABSTRACT

The present work proposes an analysis of the theory of irreversibility based on the works of Austrian physicist Ludwig Boltzmann and its relation to the philosophy of nature. The notion of irreversibility emerged in the field of sciences in the 19th century, especially within investigations on heat that culminated in the Second Law of Thermodynamics, in a scientific context deeply influenced by mechanicism. Boltzmann, grounded in atomism, sought to reconcile mechanicism with the emerging Thermodynamics, notably through his 1872 work where he deduced irreversibility from reversible mechanical laws. Nature's irreversibility, challenging the prevailing mechanistic paradigm, found its justification. This study, structured in part as a genealogical bibliographic research, traces Boltzmann's trajectory to uncover aspects of the evolution of irreversibility's concept, from precursors like Bailly to Boltzmann's advancements, situating his theory among crucial philosophical questions on time, causality, and the structure of reality. The monograph revisits Boltzmann's key works on irreversibility, analyzes fundamental concepts of his physics, and identifies critiques of his theory throughout history. Furthermore, it draws parallels between Boltzmann's principles and the philosophical tradition, expanding the philosophical implications of irreversibility. Contemporary and subsequent critiques, including those by Karl Popper and John Earman, are summarized. In conclusion, Boltzmann's theory of irreversibility, despite facing criticisms and challenges over the years, remains a landmark at the intersection of physics and philosophy. His statistical approach not only provided a robust explanation for an ostensibly contradictory phenomenon but also served as a fertile starting point for broader philosophical reflections on the nature of temporality and order in the physical universe.

Keywords: Irreversibility. Ludwig Boltzmann. Philosophy of Nature. Atomism. Second Law of Thermodynamics.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.2	Objetivos	13
1.3	Método de Trabalho	14
2	ALGUMAS NOTAS BIOGRÁFICAS RELEVANTES	16
2.1	Infância e juventude pré-universitária (1844 – 1863)	17
2.2	Formação na Universidade de Viena (1863 – 1869)	17
2.3	Produção intensa na Universidade de Graz (1869 – 1890)	18
2.4	Crises e maturidade - Universidades de Munique e de Viena (1890 – 1906) ...	20
3	SÍNTESE HISTÓRICA DO CONCEITO DE IRREVERSIBILIDADE: OS DESENVOLVIMENTOS DE BAILLY (1777) A BOLTZMANN (1872)	22
3.1	A fase pré-boltzmanniana	22
3.2	As articulações do conceito durante a primeira fase do trabalho de Boltzmann	25
3.3	Comentários gerais sobre a perspectiva científica de Boltzmann	28
4	A FÍSICA DA IRREVERSIBILIDADE EM BOLTZMANN	30
4.1	Espaço de fases	30
4.2	Ergodicidade	32
4.3	Mecanicismo	33
4.4	Reversibilidade e irreversibilidade	35
4.5	O Artigo de 1872	41
5	IRREVERSIBILIDADE E CAUSAÇÃO: UMA APROXIMAÇÃO A ARISTÓTELES	44
6	OPOSIÇÕES À IRREVERSIBILIDADE DE BOLTZMANN	49
6.1	As críticas dos contemporâneos de Boltzmann	49
6.2	As críticas de Karl Popper e John Earman	52
7	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

*Sed fugit interea, fugit irreparabile tempus*¹
(Virgílio em *Geórgicas*, Livro III, v. 284)

Dentre as várias intuições possíveis que resultam das experiências cotidianas, uma delas se relaciona com a identificação de um limite estruturante imposto sobre os processos que se dão na realidade concreta: a impossibilidade de retorno no tempo. O ser humano, tão acostumado a experimentar a realidade a partir de projeções espaço-temporais, percebe que, distintamente do espaço, explorável nos dois sentidos em cada direção possível, a experiência do tempo se dá apenas em um sentido. Isso significa que a experiência humana sobre a natureza a percebe como irreversível no tempo. Uma taça de cristal que se quebra ao cair no chão, o alimento que é ingerido e processado pelo organismo, a movimentação geológica do planeta, o crescimento de uma criança, a combustão de uma folha de papel e a dispersão de uma gota de corante em um recipiente com um solvente adequado são exemplos de fenômenos que se desenvolvem no tempo e que a experiência cotidiana sugere que não poderiam ser retornados ao ponto de partida (CERCIGNANI, 1998, p. 1).

Essa percepção sobre a irreversibilidade dos processos na natureza já havia se integrado à reflexão humana desde a antiguidade. Tanto é que na *Teogonia* de Hesíodo, o titã *Cronos* é apresentado como o pai que devora os seus filhos. Mais tarde, Heráclito em seu tratado *Sobre a Natureza* tem em seus versos algumas ideias que podem ser associadas a uma percepção de irreversibilidade. Por exemplo, “Não se pode entrar duas vezes no mesmo rio” e também “(O Sol é) novo todos os dias” (BORNHEIM, 2000). Contudo, apesar dessas percepções, as leis da física, que se desenvolveram na tradição científica mecanicista e matematizada desde o período da renascença com Galileu, apresentam uma limitação intrínseca: elas são simétricas com relação ao sentido do tempo. Isso significa que elas não contêm nenhum impedimento para a reversibilidade temporal e, em consequência, as condições iniciais de um fenômeno poderiam ser retomadas apenas invertendo o sinal do tempo dos processos em desenvolvimento.

Foi apenas no século XIX que, pela primeira vez, alguém se ocupou de apresentar as razões (ou oferecer uma explicação convincente) da irreversibilidade. Trata-se de Ludwig Eduard Boltzmann (Viena, 1844 – Duino, 1906), reconhecido como um dos físicos mais importantes que atuaram no cenário da revolução científica experimentada na transição do

¹ Mas entretanto ele foge, foge o tempo irrecuperável.

século XIX para o XX. Em termos gerais, uma de suas mais marcantes contribuições foi o lançamento das bases, junto de J. W. Gibbs (1839–1903) e J. C. Maxwell (1831–1879), para o estabelecimento da Mecânica Estatística (BALIAN, 1991, p. 4-5), a área da física voltada para a investigação de fenômenos e propriedades de sistemas macroscópicos a partir de uma perspectiva fundamentada em propriedades dos entes materiais microscópicos constitutivos da realidade, ou de forma mais específica, em propriedades atômicas e moleculares (McQUARRIE, 2000, p. 1). Neste campo da Física, lida-se com problemas que remetem a questões importantes sobre a estrutura da realidade concreta e que permitem um intercâmbio reflexivo com a Filosofia da Natureza, Filosofia da Ciência, Metafísica e outras áreas da filosofia relacionadas a estas (SKLAR, 1993). Boltzmann foi um personagem importante nesse intercâmbio. Tanto que não é exagero chamá-lo de filósofo, algo que foi reconhecido até por seus críticos, como Karl Popper em sua autobiografia (POPPER, 1986, p. 165-166).

Dentre os três fundadores da Mecânica Estatística, Boltzmann foi aquele com atuação filosófica mais proeminente. Fruto de seu trabalho filosófico, foi indicado, em 1903, para suceder Ernst Mach (1838–1916) na cátedra de Filosofia da Ciência na Universidade de Viena (CERCIGNANI, 1998, p. 191). A pesquisa sobre sua biografia indica que Boltzmann se dedicou mais intensamente à filosofia nos seus últimos anos de vida, embora seu interesse tenha voltado para a reflexão filosófica desde 1880 (VIDEIRA, 1992, p. 2,4). Nesse esforço, voltou-se para questões filosóficas ligadas à ciência e ao conhecimento, gerando trabalhos que foram publicados em 1905 em *Populäre Schriften*, parcialmente traduzidos para o inglês (BOLTZMANN, 1974) e também para o português (BOLTZMANN, 2004). Contudo, seus escritos de natureza estritamente filosófica foram significativamente menos profícuos na filosofia do que a sua obra científica, já que esta fomenta uma reflexão necessária sobre a estrutura da realidade concreta (DE GROOT, 1974, p. IX).

Boltzmann foi um dos protagonistas do seu tempo a fazer uso da perspectiva atomicista para explicar os fenômenos físicos macroscópicos. A partir dessa base de reflexão sobre a constituição da natureza, sua fama se deveu, primordialmente, a duas teorias quase que simultaneamente desenvolvidas. A primeira envolve sua interpretação da noção de *entropia* como uma grandeza calculável a partir da flexibilidade configuracional de um sistema no nível microscópico e das probabilidades associadas a essa flexibilidade. No âmbito dessa discussão, ele conseguiu demonstrar que mesmo os sistemas formados por partículas que obedecem a leis mecânicas reversíveis – invariantes sob uma mudança na direção do tempo – evoluem no tempo em uma direção preferencial que faz com que a entropia nunca decresça. Com esse resultado, foi justificada a partir de uma base mais elementar – a natureza

atômico-molecular da realidade – a irreversibilidade dos fenômenos (DE GROOT, 1974, p. IX-X). A segunda teoria que lhe roçou fama duradoura envolve a possibilidade de tratar várias propriedades físicas de um sistema constituído por um grande número de partículas, como um gás, a partir de funções de distribuição de probabilidade referentes à localização dos átomos, às suas velocidades e às colisões entre eles. Nessa teoria, Boltzmann reuniu suas três principais bases de trabalho: o atomismo, o mecanicismo e a estatística (DE GROOT, 1974, p. X-XI).

Diante desse quadro inicial, o presente trabalho se detém a analisar a questão da irreversibilidade na obra de Boltzmann e delinear de forma introdutória algumas de suas implicações filosóficas. A relevância do estudo se baseia no fato de que o paradoxo estabelecido entre a percepção de irreversibilidade e a estrutura das leis físicas leva a questões importantes. Por exemplo, 1) trata-se apenas de uma limitação das leis da natureza em descreverem a realidade? – um problema sobre as ciências. 2) A irreversibilidade é um fenômeno que emerge a partir de determinadas condições físicas? – um problema sobre a natureza. 3) A irreversibilidade da natureza evidencia alguma propriedade profunda da realidade concreta? – um problema metafísico. 4) Trata-se de uma consequência inevitável da realidade? – um problema lógico. 5) Ela seria uma ilusão provocada na mente humana em função de uma dificuldade de lidar com o tempo? – um problema epistemológico. Esse conjunto de perguntas sugere que o problema da irreversibilidade constitui um tema multidisciplinar no contexto da filosofia. Não é certo que Boltzmann tenha refletido sobre elas. Pelo menos sua obra científica e filosófica não indica isso. O mais provável é que não o tenha feito, principalmente devido ao viés antimetafísico do seu contexto intelectual (BOLTZMANN, 1905, p. 341-342).

Fato é que a teoria de Boltzmann quanto à irreversibilidade gerou fortes reações contrárias, mas até hoje ela não foi superada. Daí a importância de se revisitar a obra do físico vienense, enfatizando especificamente o tema da irreversibilidade, sob uma perspectiva da Filosofia da Natureza.

1.1 Objetivos

Diante do quadro exposto, o presente trabalho tem por objetivo geral revisitar o conceito de irreversibilidade com base na reflexão desenvolvida por Ludwig Boltzmann com vistas a delinear alguns de seus desdobramentos para a Filosofia da Natureza. Para isso os seguintes objetivos específicos podem ser elencados:

- a) identificar na obra de Boltzmann os principais trabalhos que lidam com o conceito de irreversibilidade;
- b) revisitar os principais conceitos fundamentais da física de Boltzmann para compreender a ideia de irreversibilidade;
- c) identificar os principais opositores da proposta de irreversibilidade de Boltzmann;
- d) estabelecer paralelos entre a física boltzmanniana e reflexões delineadas na tradição filosófica por outros autores que permitem ampliar as implicações filosóficas da irreversibilidade; e
- e) elencar contribuições para o delineamento de uma filosofia da natureza a partir de Boltzmann.

1.2 Método de Trabalho

Nesta pesquisa, estruturada como uma pesquisa bibliográfica, o primeiro passo abrangeu uma pesquisa biográfica sobre Ludwig Boltzmann com o objetivo de compreender o desenvolvimento da formação, atuação profissional e contextos existenciais do físico que desembocaram na constituição da noção de irreversibilidade. Em seguida, buscou-se reconstituir uma trilha histórica de quase cem anos que antecedeu o trabalho de Boltzmann de 1872, que é aquele em que ele insere a questão da irreversibilidade no contexto de sua teoria de base atomista. Em continuidade, foram apresentados conceitos de física julgados úteis para se compreender o conjunto da obra boltzmanniana, mas fugindo de uma matematização inconveniente para um texto de filosofia, e nesse contexto foi apresentado o trabalho de 1872. Por fim, foram apresentadas as oposições à noção de irreversibilidade de Boltzmann que se destacaram no curso da história do tema.

Em termos bibliográficos, nosso método de investigação foi, em certa medida, genealógico. Nesse esforço, algumas referências, como Blackmore (1995) e Cercigiani (1998), se destacam pelo elevado cuidado no manejo de referências, servindo de guias para desvelar as relações internas na obra de Boltzmann e relações com outros autores, sejam eles desenvolvedores da teoria, ou críticos que se apresentaram no contexto da história. Em língua portuguesa, destacou-se o trabalho do professor A. Pereira Júnior (1997) que ampliou o escopo das busca de referências que enriqueceram a compreensão do tema, permitindo o estabelecimento de interfaces mais contemporâneas.

De maneira não sistemática, foram encontrados alguns artigos, que suportam esparsamente algumas das ideias aqui contidas, embora tenhamos a plena consciência de que

haveria muitos outros que também seriam de grande valia para a presente pesquisa. Todavia, por questões de tempo, não foram suficientemente explorados para ampliar a discussão aqui revisitada. Durante a pesquisa, como um embrulho que se abre aos poucos, a riqueza do tema foi se revelando a este autor, que fez da própria pesquisa um guia pessoal para a continuidade das investigações.

2 ALGUMAS NOTAS BIOGRÁFICAS RELEVANTES

Minha aversão pela filosofia foi incidentalmente compartilhada por quase todos os investigadores da natureza. Perseguiu-se toda ornamentação metafísica, procurando exterminá-la radicalmente.

Todavia, essa atitude não perdurou.

(Ludwig Boltzmann em *Uma Conferência Inaugural sobre Filosofia da Natureza, Zeit*, 1903)

Apesar da grandiosidade de Boltzmann na história das ciências, em especial na Física, sua biografia não tem o mesmo apelo popular como a de Isaac Newton ou a de Albert Einstein. Em parte, isso pode ser justificado por algumas características do ambiente em que Boltzmann viveu e desenvolveu sua atividade. Muitos daqueles que se tornaram grandes na ciência foram seus contemporâneos na Europa de meados do século XIX até o início do século XX. Seria difícil exaltar alguns em detrimento de outros, ainda mais considerando as fortes relações entre tantos pesquisadores pertencentes a um período tão rico intelectualmente. Ao longo de sua vida, Boltzmann foi autor de cerca de 150 artigos abrangendo diferentes campos da física, matemática e epistemologia (DE GROOT, 1974, p. 267-277; DAHMEN, 2006). Todavia, é preciso reconhecer uma peculiaridade de Boltzmann: ele se distingue no seu tempo por integrar um conjunto bem mais limitado, formado por aqueles que poderiam ser chamados de cientistas filósofos (VIDEIRA, 2004).

Para os interesses desta pesquisa, julgou-se conveniente recolher alguns fragmentos da trajetória existencial do cientista vienense para reconstruir parte de sua visão de mundo e identificar algumas bases de sua reflexão. Para revisitar sua biografia, foram utilizadas obras de referência importantes que são exploradas neste capítulo para recuperar alguns cenários dos ambientes em que o físico desenvolveu seus trabalhos que lidaram o tema da irreversibilidade. Em especial, destacam-se as obras de Blackmore (1995), Cercigiani (1998), (Lindley, 2016), a tese e alguns trabalhos de Videira (1992) – sendo esses em língua portuguesa –, a coletânea de trabalhos organizados por Cohen e Thirring (1973) e os trabalhos de Brush (1970). Tais obras, que formaram a base para este capítulo, permitem identificar 4 fases bem distintas na trajetória de Ludwig Boltzmann, que viveu 62 anos:

- a) 1ª fase: infância e juventude pré-universitária (1844 – 1863);
- b) 2ª fase: formação na Universidade de Viena (1863 – 1868);
- c) 3ª fase: produção intensa na Universidade de Graz (1869 – 1888); e
- d) 4ª fase: crises e maturidade - Universidades de Munique e de Viena (1888 – 1906).

Para o tema da irreversibilidade, a segunda e a terceira fase foram os períodos mais relevantes. Justamente por isso, mais esforço foi dedicado aqui à descrição dessas fases. A primeira e a última fase serão apresentadas sucintamente, servindo como uma moldura para o quadro geral que se pretende compor.

2.1 Infância e juventude pré-universitária (1844 – 1863)

Boltzmann nasceu na capital do Império Austro-Húngaro, Viena, sendo o primogênito dos três filhos de um casal formado por um agente fiscal protestante do governo austríaco e por uma jovem católica de origem rica. Após sua família se mudar para a cidade de Wels e, posteriormente, para Linz, ingressou na escola secundária local, o tradicional *Akademisches Gymnasium*. O talento de Boltzmann para o exercício intelectual já se evidenciava desde os primeiros anos escolares, destacando-se como primeiro colocado da turma em todos os anos, exceto por um, e demonstrando grande entusiasmo por matemática e ciências. Nessa escola, pode receber uma preparação muito boa para a educação superior, comparável à que recebiam os estudantes da Europa com vocação para a área de humanidades nos anos 1960.

Sua adolescência foi marcada por reveses muito significativos. Aos 15 anos, perdeu seu pai em consequência de uma tuberculose e, logo após, seu irmão em função de uma pneumonia. Sua manutenção na escola foi fruto do esforço de sua mãe para compensar o prejuízo financeiro e emocional daquelas perdas. Coincidentemente, no mesmo ano do falecimento do seu pai, foi lançado *A Origem das Espécies*, de Charles Darwin, obra que influenciou marcadamente sua visão de mundo ao longo de toda a vida.

2.2 Formação na Universidade de Viena (1863 – 1868)

Em 1863, aos 19 anos, ingressou na Universidade de Viena, onde se especializou em Matemática e Física. O Instituto de Física daquela universidade, fundado por Christian Doppler, experimentava o vigor típico de uma juventude institucional, já que havia sido aberto apenas 14 anos antes do ingresso de Boltzmann. O currículo dos cursos de Matemática e de Física exigia a matrícula em disciplinas da Faculdade de Filosofia. Há registros de que Boltzmann tenha cursado dez disciplinas na área de Filosofia (WILSON, 1993).

Durante esse período foi particularmente influenciado por Petzval (1807-1891), Ettinghausen (1796-1878), Joseph Stephan (1835-1893) e Josef Loschmidt (1821-1895). Àquele tempo, a aposta no atomismo e o uso da teoria atômica eram, segundo os dados

disponíveis, intensos na capital austríaca, de modo que o ambiente era propício para uma adesão rápida de Boltzmann a essa perspectiva sobre a física da realidade concreta (BLACKMORE, p. 1).

Seu primeiro artigo científico, intitulado *Sobre o Movimento da Eletricidade em Superfícies Curvas* (BOLTZMANN, 1865), foi publicado aos 21 anos. Esse trabalho foi fruto de um problema discutido durante as aulas de Stefan em que Boltzmann se deparou com a resposta errada de um livro publicado àquela época e que ele se sentiu impelido a publicar a solução. Naquele mesmo ano, o alemão Rudolf Clausius, publicara mais um de seus trabalhos referente ao que chamamos hoje de 2ª Lei da Termodinâmica, em que delineou o conceito de entropia (CLAUSIUS, 1865). Esse mesmo físico-matemático, já havia sugerido alguns anos antes uma relação entre calor e energia cinética das moléculas (CLAUSIUS, 1857), algo que seria considerado uma aberração para a predominante comunidade de experimentalistas da época. Esses trabalhos de Clausius influenciaram significativamente a reflexão científica de Boltzmann.

No ano seguinte, 1866, concluiu seu doutorado², com mais um trabalho publicado, *Sobre o significado mecânico da segunda proposição fundamental da teoria do calor* (BOLTZMANN, 1866), sendo o primeiro efetivamente relevante quanto ao tema da irreversibilidade na sua jornada científica. Em 1867 se tornou professor assistente em Viena, e, em 1868, recebeu sua *Habilitação*, que lhe outorgava a possibilidade da docência universitária.

2.3 Produção intensa na Universidade de Graz (1869 – 1890)

Sua primeira posição profissional foi na Universidade de Graz, em 1869, na cátedra de Física-Matemática, permanecendo ali até 1873. A Universidade de Graz estava em franco desenvolvimento de modo a atingir a posição de universidade mais importante da Europa àquele tempo. Na fase inicial da sua carreira profissional, pode interagir com outros cientistas destacados, como Maxwell, Kirchhoff (1824-1887), Lorentz (1853-1928), Helmholtz (1821-1894), Clausius (1822-1888), Ostwald (1853-1932) e John Strutt, o Lord Rayleigh (1842-1919), sucessor de Maxwell. Desde cedo desenvolveu uma brilhante e promissora carreira acadêmica, mantendo sua proficiência em matemática, em um ambiente de intensa produtividade científica. No terceiro ano da sua atuação em Graz, em 1872, publicou o seu

² Àquele tempo, na Universidade de Viena não era exigida uma tese para a outorga do título de doutor. Essa exigência passou a vigorar a partir de 1872/1873 (CERCIGIANI, 1998, p. 6).

artigo mais relevante para a discussão de interesse desta pesquisa intitulado *Estudos adicionais sobre o equilíbrio térmico de moléculas de gás* (BOLTZMANN, 1872).

Em 1873, deixou Graz para um período de quase quatro anos na Universidade de Viena, em que atuou como professor de Matemática. Essa mudança provocou um afastamento temporário entre ele e sua amiga Henriette E. von Aigentler, uma jovem física de origem nobre, órfã, que provavelmente foi a primeira mulher a estudar na Universidade de Graz. Ao fim do período em Viena, em 1876, retornou a Graz para se casar com Henriette³.

Boltzmann e Henriette permaneceram em Graz até 1890, tendo cinco filhos. Há quem considere que o núcleo duro das contribuições de Boltzmann à Física se deram até 1877, de forma que, após esse período, o físico tenha passado a se dedicar a um refinamento e à superação de desafios teóricos e filosóficos de sua teoria. Todavia, foi nesse período que Boltzmann também se tornou reconhecido como um professor profícuo, produzindo conteúdos que mais tarde se tornaram a maioria de seus livros. Svante Arrhenius (1859-1927) e Walther Nernst (1864-1941), laureados com o Prêmio Nobel em 1903 e 1920, respectivamente, foram seus alunos em Graz. Além disso, em 1878 Boltzmann se tornou decano da Faculdade e, em 1881, conselheiro do governo.

Seu primeiro artigo com conteúdo filosófico significativo publicado nesse contexto, em 1886, aos 42 anos, em meio a um período especialmente conturbado de sua vida. Boltzmann experimentou as perdas de sua mãe (1885), de seu filho mais velho de apendicite aos 11 anos (1889) e de sua irmã (1890), levando-o a um quadro de “neurastenia”, segundo seus próprios termos, ou depressão nos termos atuais, que se agravou consideravelmente em meados da década de 1890, impactando profundamente sua vida dali em diante. O ano de 1885 foi especialmente marcado por ser um ano de “silêncio”: não escreveu nenhum artigo científico e nem se tem registro de nenhuma correspondência. Em meio a isso tudo, foi admitido na Academia Imperial de Ciências em 1885, foi agraciado com a reitoria da Universidade de Graz durante o período de 1887 a 1888 e tornou-se conselheiro da corte em 1889.

Ao tempo da reitoria de Viena, foi obrigado a tomar algumas medidas disciplinares duras contra os alunos da universidade, principalmente por estar sendo observado de perto pela administração central de Viena e pelo imperador. Tais medidas foram necessárias porque o representante estudantil desapareceu com o busto do imperador austríaco de um dos salões

³ Henriette teve de enfrentar muitas resistências do seu tempo para conseguir uma posição profissional. Embora tivesse tentado por diversas vezes ministrar aulas em Graz, mesmo que de forma extra-oficial, conseguiu autorização apenas como professora de nível equivalente ao ensino médio, a partir de 1874 (FERREIRA, 2024).

da faculdade, além de mobilizar os estudantes com discursos contra o imperador. Isso o levou a um estado de tensão permanente que aprofundaram suas crises.

2.4 Crises e maturidade - Universidades de Munique e de Viena (1890 – 1906)

O falecimento do filho de Boltzmann causou-lhe um sentimento de desterritorialização que o levou a sair de Graz, sendo logo admitido na Universidade de Munique. Permaneceu lá de 1890 a 1894 mantendo-se como um professor destacado. Contudo, Boltzmann articulou um retorno a Viena por volta de 1894, em parte encorajado por sua esposa e também por perceber que àquele tempo a Bavária não oferecia pensões a professores aposentados. Candidatou-se, portanto, à vaga do seu antigo professor Stefan, falecido em 1893, tal qual Ernst Mach, que abriu mão da vaga ao saber que Boltzmann também estava concorrendo. Pode-se dizer que em 1894 Boltzmann era o cientista austríaco mais destacado de forma que os preparativos para recebê-lo em Viena e convencê-lo a ficar foram impressionantes. A Faculdade de Filosofia chegou a cancelar uma cátedra de Físico-Química, para aumentar o salário de Boltzmann. Foi-lhe também prometida a pensão completa em caso de incapacidade para o trabalho, tendo em conta os períodos anteriores de serviço na Áustria.

Boltzmann adorava participar de conferências científicas, algo que fazia com regularidade, porque pensava que os cientistas tinham grande interesse em suas contribuições para a teoria cinética dos gases em geral e por sua interpretação estatística da segunda lei da termodinâmica. Em especial, a conferência anual da Associação Britânica para o Avanço da Ciência, de 1894, fomentou a uma rica contribuição de cartas para a revista *Nature* entre os anos 1894 e 1895 sobre suas teorias, incluindo críticas contundentes. Em uma dessas críticas, o famoso matemático Ernst Zermelo, assistente de Max Planck, insistiu que a “física deveria escolher entre a segunda lei da termodinâmica e a interpretação mecânica da natureza”. Porém mais tarde, o próprio Planck reconheceu o mérito de algumas ideias de Boltzmann, tendo usado algumas delas para entender a radiação do corpo negro que resultou na primeira versão da teoria quântica em 1900.

Porém, a decepção de Boltzmann com Viena se deu ao descobrir que a universidade tinha muitos docentes e poucos alunos. Um ano depois, Mach conseguiu ser admitido também em Viena, diminuindo ainda mais a oferta de alunos a Boltzmann. Mach, embora também fosse um exímio professor, era violentamente hostil à visão atomística da natureza, divulgando uma ciência sem “pressupostos” e “moderna” em contraste com a “velha ciência mecanística” de Boltzmann. Esse ambiente aprofundou a depressão de Boltzmann levando-o a

pensar que a solução seria sair de Viena para encontrar uma posição melhor. Para mantê-lo na universidade, o ministro o liberou para um período de afastamento na Clark University em Massachussets, nos Estados Unidos (1899). Durante esse período tentou uma posição em Leipzig junto a Ostwald, mas não se adaptou àquela universidade e à cidade. Tanto que pela primeira vez tentou suicidar-se.

Em 1901, Boltzmann foi vitimado com um AVC, que o levou a se aposentar. No ano seguinte, retornou a Viena em 1902, e continuou trabalhando no contexto de uma nova realidade. O Instituto de Física da universidade sofreu grandes cortes financeiros e sua saúde se deteriorou bastante, em especial sua visão. Boltzmann passou a sofrer fortes ataques de asma, angina e enxaqueca em função de estafa laboral. Nessa época, em Viena, Boltzmann se tornou um professor destacado por suas aulas de filosofia. Isso o levou a pensar que a Filosofia era a sua vocação verdadeira. O fragmento abaixo revela, sua relação com a Filosofia nessa época:

Minha aversão pela filosofia foi então incidentalmente compartilhada por quase todos os investigadores da natureza. Perseguiu-se toda ornamentação metafísica, procurando exterminá-la radicalmente. Todavia, essa atitude não perdurou. A metafísica parece exercer uma magia irresistível sobre o espírito humano, que, apesar de todas as tentativas fracassadas de levantar o véu da mesma, não perde as forças. O instinto para o filosofar nos parece ser inevitavelmente inato. Não apenas Robert Mayer, que foi um filósofo dos pés a cabeça, mas também Maxwell, Helmholtz, Kirchhoff, Ostwald e muitos outros se sacrificaram a ela de boa vontade, reconhecendo suas questões como as mais elevadas, de modo que ela é hoje, uma vez mais, a rainha das ciências. (BOLTZMANN, 1903)

Sua saúde, no entanto, não acompanhou esse novo ímpeto. Passou a sofrer de síndrome maniaco-depressiva junto de frequentes ideações suicidas. Ainda assim, sua energia para o trabalho parecia inesgotável. Tanto que em 1905, viajou para os Estados Unidos para ministrar trinta aulas em uma escola de verão na Universidade da Califórnia em Berkeley.

Mas foi em 1906, que sua história chegou ao fim. Passando alguns dias de férias com sua esposa e sua filha mais nova em Duino na Itália, na véspera de voltar a Viena para começar o período de aulas, Boltzmann, em 5 de setembro, o vienense nascido na época do Carnaval, comete suicídio por enforcamento. Detalhes desta última fase da sua vida, com trechos de cartas e depoimentos de seus contemporâneos podem ser encontrados em Cercigiani (1998).

3 SÍNTESE HISTÓRICA DO CONCEITO DE IRREVERSIBILIDADE: OS DESENVOLVIMENTOS DE BAILLY (1777) A BOLTZMANN (1872)

Visando recuperar sucintamente o desenvolvimento da noção de irreversibilidade anterior a Boltzmann, revisitou-se a história do conceito até cerca de 100 anos antes do trabalho central do físico para os nossos interesses, o artigo de 1872. Essa retomada permitiu reconhecer com mais clareza o ambiente científico formador do jovem Boltzmann, no sentido de se identificar sua contribuição específica e disruptiva para o tema. Para esse esforço, o trabalho de Hollinger e Zenzen (1985) foi marcadamente relevante.

O capítulo se estrutura em três seções: na primeira, as noções sobre a irreversibilidade serão apresentadas num horizonte de 1777 a 1866, período anterior à fase de atuação científica de Boltzmann; a segunda, abrangendo o período entre 1866 até 1872, que se encerra no artigo central para esta pesquisa; e a terceira, que contém um breve comentário sobre algumas direções adotadas por Boltzmann quanto ao método científico.

3.1 A fase pré-Boltzmanniana

Embora a percepção sobre a irreversibilidade na natureza já tivesse sido objeto de reflexão desde a antiguidade, as abordagens sobre esse conceito limitaram-se, até o início da modernidade, a uma abordagem qualitativa, referindo-se a um comportamento geral do mundo natural. Um passo maior foi dado ao longo da modernidade, relacionando a noção de irreversibilidade principalmente ao tema do calor. De fato, já havia uma noção clara de que o calor flui dos corpos quentes para os frios, e jamais ao contrário, muito antes da Termodinâmica se consolidar como uma ciência formal em meados do século XIX.

Algumas das primeiras investigações sistemáticas sobre calor relacionaram-se a estudos geológicos envolvendo a descrição do comportamento de gêiseres, vulcões e rochas ígneas. Desses estudos resultou uma teoria de resfriamento gradual do planeta, assim como, uma ideia de morte térmica do universo (BAILLY, 1777). Daí o cenário para um debate que se estenderia até o século XIX, no âmbito da teoria geofísica. De um lado, com James Hutton, uma teoria cíclica na qual os continentes eram destruídos e reformados, tendo como mecanismo propulsor os fogos centrais da Terra. Do outro, com John Hunter e John Murray, a proposta teórica baseada na observação de que o calor se difunde por todo um corpo até atingir uma temperatura uniforme. O ponto significativo sobre esses debates é que eles levaram a tentativas de formular equações de fluxo de calor.

No início do século XIX, Biot (1804) propôs uma lei geral para o fluxo de calor baseada na diferença de temperatura entre os dois corpos. Em 1808, Joseph Fourier (1808), cujos trabalhos estabeleceram a base para a teoria moderna de condução de calor, expressou claramente o caráter irreversível do fluxo de calor. As equações de Fourier apresentavam uma distinção importante com relação às equações da mecânica newtoniana: elas não eram simétricas em relação ao tempo - passado e futuro seriam estruturalmente distintos. Isso fez com que alguns cientistas identificassem nessa proposta teórica uma contradição de base, enquanto outros não viram motivos para restringir a mecânica newtoniana a sistemas que não têm dissipação ou experimentam forças dissipativas.

Nessa mesma época, em 1803, John Dalton, na Inglaterra, apresentou o seu trabalho *Absorção de gases pela água e outros líquidos* em que ele estabeleceu os princípios básicos da sua teoria atômica retomando as hipóteses dos gregos atomistas de Leucipo e Demócrito. Em 1808, uma versão mais ampla e sistemática da abordagem atomicista de Dalton se estabeleceu em sua obra *Um novo sistema de filosofia química* (DALTON, 1808).

Pouco tempo depois, a formulação de H. von Helmholtz para o princípio da conservação da energia em termos de forças entre partículas pontuais e o irrompimento da teoria cinética dos gases por Clausius e Maxwell fomentaram a visão do mecanicismo newtoniano como essencial e fundamentalmente reversível no tempo. Em 1824, Carnot estabeleceu os primeiros enunciados que resultariam mais tarde na 2ª Lei da Termodinâmica investigando a eficiência de máquinas térmicas e que, segundo Boltzmann, poderia ser enunciada aproximadamente desta forma:

O trabalho e a energia cinética visível podem transformar-se mutuamente sem limitação, do mesmo modo que ambos podem converter-se em calor sem condição alguma. No entanto, a transformação inversa, do calor em trabalho, não pode ser realizar ou somente pode de maneira parcial. (BOLTZMANN, 1886)

Por volta de 1830, Charles Lyell iniciou uma especulação geofísica baseada na hipótese de que as características geológicas do presente são o resultado de causas físicas atualmente operantes. Analisando o tempo em que se davam os processos geológicos, estimou que a Terra teria uma idade da ordem de milhões de anos. A esse tempo, o antigo problema sobre a constância do calor interno da Terra ainda se mantinha como foco de debate. Na década de 1840, William Hopkins, argumentou que os dados astronômicos existentes sobre a trajetória do sistema Terra-Lua-Sol exigiam que a crosta terrestre fosse muito mais espessa levando a um afastamento da ideia dos “fogos centrais” do planeta, de forma que os geólogos passaram a se dedicar mais às relações entre mudanças geográficas e climáticas. No entanto, Hopkins

ainda acreditava que o resfriamento da Terra é relevante se for considerada uma escala de tempo suficientemente longa. A ideia de que haveria uma irreversibilidade global não poderia ser refutada por nenhuma evidência de uniformidade a curto prazo.

Ao longo da década de 1840 e, culminando na década de 1850, o debate chegou a um nível de complexidade muito alto. Nesse cenário surgiu William Thomson, o Lord Kelvin, cujo tutor foi Hopkins. Sendo um físico-teórico brilhante, desde cedo, ele foi reconhecido como o especialista britânico na teoria de condução de calor de Fourier. Sua dissertação inaugural em Glasgow aplicou a equação de Fourier ao problema da distribuição de calor dentro da Terra. Isso culminou nas suas declarações (THOMSON, 1852):

- 1) *Há atualmente no mundo material uma tendência universal para a dissipação de energia mecânica.*
- 2) *Qualquer restauração de energia mecânica, sem mais do que um equivalente de dissipação, é impossível em processos materiais inanimados, e provavelmente nunca é afetada por meio de matéria organizada, seja ela dotada de vida vegetal, ou sujeita à vontade de um ser animado.*

Entre 1852 e 1865 a discussão acerca do conceito de irreversibilidade seguiu um caminho sinuoso entre muitas publicações, dentre as quais participou com destaque Rudolf Clausius. A teoria de Carnot, conhecida havia cerca de 30 anos, não foi assumida prontamente por Clausius ou Thomson, já que “dissipação” e “desperdício” eram termos compreensíveis apenas de maneira vaga, de forma que não se distinguiam claramente da ideia de irreversibilidade. Por exemplo, a mistura de dois tipos de moléculas a temperatura constante, um exemplo fundamental de processo irreversível, nem sequer foi mencionada por Thomson quando listou exemplos de processos dissipativos. Faltavam ainda um princípio de conservação de energia e uma compreensão acerca da convertibilidade entre calor e trabalho mecânico para articular mais claramente um princípio de irreversibilidade. No início dos anos 1850, os avanços conceituais se deram apenas com formulações quantitativas baseadas em modelos mais gerais do comportamento dos gases.

Nesse contexto, em 1854, Clausius, desenvolvendo a teoria de processos cíclicos para gases, distinguiu os processos “reversíveis” – que podiam ser executados ao contrário –, daqueles não reversíveis. Pela primeira vez, a irreversibilidade foi associada a uma grandeza quantitativa, representada por \mathcal{A} , que envolvia as temperaturas de funcionamento desses processos cíclicos e as quantidades de calor envolvidas. Ele foi capaz de mostrar que $\mathcal{A} = 0$ para qualquer processo cíclico reversível apelando para um princípio de irreversibilidade da seguinte forma: se $\mathcal{A} < 0$, então o calor estaria passando de um corpo mais frio para um mais

quente sem compensação e se $\mathcal{N} > 0$ e o ciclo é reversível, ele poderia ser revertido novamente, produzindo um \mathcal{N} negativo, violando o princípio de que o calor nunca pode passar de um corpo mais frio para um mais quente sem alguma outra mudança simultânea e conectada (CLAUSIUS, 1854).

Em 1865, Clausius aprimorou suas ideias e introduziu o termo “entropia” que permitiu uma descrição simples da direcionalidade dos processos cósmicos: “a entropia do universo tende ao máximo”. Esse enunciado se tornou o mais consagrado da 2ª Lei⁴ da Termodinâmica. Nesse ponto, a intuição de Clausius transbordava dos fenômenos de transmissão de calor para algo vinculado à estrutura da realidade concreta. Contudo, é importante destacar que o trabalho de Clausius não ofereceu nenhuma teoria satisfatória sobre a origem da irreversibilidade. Recordemos que a esse tempo, Boltzmann ainda era um estudante em Viena e esses resultados e percepções representavam o estado da arte da discussão.

Em paralelo ao desenvolvimento da noção de entropia, desenvolviam-se na física estudos que buscavam descrever o comportamento da matéria como uma consequência dos fenômenos moleculares. O estado gasoso foi enfatizado nessas investigações, chegando-se a resultados bastante compatíveis com os comportamentos macroscópicos conhecidos. Nesse ambiente de reflexão, o calor – fundamental para os termodinamicistas –, por exemplo, foi objeto de reflexão no sentido de se buscar uma associação deste ao movimento molecular, sendo tal movimento considerado de diferentes maneiras: liberdade absoluta, vibração periódica regular, velocidade constante até se atingir as irregularidades microscópicas das paredes do recipiente. A novidade desses estudos foi a incorporação de métodos estatísticos muito simples à descrição da física dos sistemas que permitiu, por exemplo, desenvolver a ideia de que a completa irregularidade do movimento molecular levaria à completa regularidade do comportamento macroscópico devido às leis da probabilidade. Clausius também fez parte dessa discussão e chegou a usar métodos estatísticos rudimentares sobre o movimento molecular. Uma de suas intenções foi utilizar a teoria atômica para justificar por que a entropia sempre aumenta.

3.2 As articulações do conceito durante a primeira fase do trabalho de Boltzmann

Boltzmann foi substancialmente influenciado por Clausius e estava convencido de que o seu conhecimento em matemática poderia ser útil para prover uma contribuição significativa à

⁴ Em alemão, ao invés de “Lei”, usa-se o termo “*Hauptsatz*”, que significa literalmente “proposição principal”.

física pela construção de uma relação mais próxima entre teoria atômica e a Termodinâmica. Isso se tornou sua ambição vital ao ponto de ter dito no seu segundo artigo, de 1866, que o propósito era o de “oferecer uma prova puramente analítica, completamente geral, da segunda lei da termodinâmica” (BOLTZMANN, 1866). Destaque-se que a compreensão que Boltzmann tinha a esse tempo sobre átomos e moléculas era de que eles seriam pontos materiais, círculos e esferas.

Ao tempo de Boltzmann, muitos físicos sob influência da filosofia positivista, pensavam que toda problematização ou hipóteses apoiadas em algo além das aparências soaria como “metafísica” ou não “científica”. Por isso, a Termodinâmica, que emergiu em meados do século XIX, parecia oferecer uma oportunidade para reconstruir a ciência com base na observação direta e refutar a ciência mecanicista de Newton e a hipótese atomística de Dalton, subordinando-as a si (BLACKMORE, 1995, p. 10).

Pouco tempo depois, Maxwell incorporou à teoria cinética os desenvolvimentos da teoria das probabilidades daquele tempo. Ele aplicou a lei dos erros normais ao problema das velocidades moleculares, considerando que as componentes do vetor velocidade de uma molécula eram independentes entre si (MAXWELL, 1860). Alguns anos depois, ele relacionou o número de colisões moleculares ao número de moléculas e à magnitude das componentes do vetor velocidade associada a cada uma delas (MAXWELL, 1867). Nesse intervalo, Boltzmann conseguiu calcular o calor específico dos sólidos usando como base a teoria cinética dos gases (BOLTZMANN, 1866), evidenciando a robustez da teoria nascente, que transcendia o estado de agregação gasoso. Mais importante é reconhecer que a descrição maxwelliana do comportamento dos gases, fundamentada na suposição de aleatoriedade (ou caos) molecular, foi crucial para Boltzmann conduzir sua dedução da evolução temporal das funções de distribuição de velocidade, que resultaria no trabalho de 1872. Daí se estabeleceu uma relação intrínseca entre os conceitos de “aleatoriedade” e de “irreversibilidade”.

Todavia, os resultados da 2ª Lei da Termodinâmica, ainda eram motivo de desconfiança para Maxwell. Tanto foi que, em correspondência com P. G. Tait – outro pioneiro da Termodinâmica –, propôs um experimento mental em que um determinado ser poderia, através de uma classificação criteriosa de velocidades, violar a 2ª Lei da Termodinâmica (MAXWELL, 1871). Como consequência, a 2ª Lei foi descrita como sendo apenas uma certeza estatística. No decorrer da discussão com Tait, Maxwell assumiu a mistura de diferentes moléculas como o processo irreversível fundamental. Isto seria importante mais tarde, quando Boltzmann viesse a empreender suas investigações sobre entropia e desordem. A essa altura, Boltzmann já estava como professor em Graz.

Curiosamente, nos trabalhos de Maxwell publicados entre os anos 1868 e 1875, a noção de aleatoriedade era acompanhada por uma ambiguidade ou contradição. Por vezes, a aleatoriedade era tratada apenas como fruto da ignorância sobre a precisão dos dados, o que acaba levando à necessidade de métodos estatísticos. Nesse sentido, a natureza não seria intrinsecamente aleatória. No entanto, outras vezes ele se referia ao movimento molecular individual como sendo estocástico⁵, de forma que a aleatoriedade faria parte da natureza do movimento molecular.⁶

Outro elemento importante desse desenvolvimento é o conhecimento tardio de Boltzmann em relação aos trabalhos de Maxwell sobre a teoria dos gases. A partir deles, publicou um trabalho importante em 1868, seu quinto artigo, em que passou a lidar com funções de distribuição ao invés de se lidar com um conjunto completo de propriedades moleculares (BOLTZMANN, 1868). A maioria das ideias dos trabalhos futuros de Boltzmann derivaram daquele autor. Isso lhe deu mais liberdade para desenvolver sua teoria em termos de conjuntos de configurações (*ensembles*), estados de equilíbrio e condições médias. (BLACKMORE, 1995, p. 12).

Clausius, em 1871, publicou um artigo com equações idênticas às do artigo de Boltzmann de 1866. Isso fez com que o jovem professor de Graz respondesse a Clausius indicando a primazia dos seus resultados. A discussão em torno desses dois trabalhos assemelhados envolveu as considerações feitas acerca das forças que atuavam sobre as moléculas. Para Boltzmann, a natureza das forças era irrelevante. Porém, como fruto dessa discussão, nasceu a noção de espaço de fases como sendo o espaço definido pelo conjunto completo de coordenadas de velocidades e posições ocupáveis por todas as moléculas. A partir desse conceito, o valor médio de qualquer função seria calculado como a soma dos valores da função de interesse em cada elemento do espaço de fases multiplicado pelo curtíssimo intervalo de tempo que o sistema provavelmente ocuparia naquela região. Com isso, o cálculo de propriedades incorporou com mais intensidade a noção de distribuição de probabilidades no cálculo de propriedades físicas. Por essa técnica, ele foi capaz de derivar uma expressão complexa para a entropia que rendeu uma equação simples para a entropia de

⁵ Em um fenômeno estocástico, a evolução do sistema é indeterminada. Mesmo que se conheça a condição inicial, o processo pode evoluir em diferentes direções. Mais detalhes na Seção 4.3 (cf. nota 9).

⁶ Provavelmente, aqui estão algumas raízes da abertura a uma nova forma de se considerar a realidade concreta que desembocaram nas discussões desenvolvidas mais tarde no âmbito da mecânica quântica, em que se distingue um princípio da indeterminação de um princípio de incerteza. Pelo primeiro, a natureza seria ontologicamente indeterminada. Pelo segundo, o caráter probabilístico das descrições da mecânica quântica manifesta nossa carência de informações completas e incapacidade determiná-las completamente.

um gás monoatômico e também para o calor específico de um sólido, que ele já havia derivado anteriormente.

Nesse contexto científico oportuno, Boltzmann deu o próximo passo de sua empreitada ao demonstrar, sob uma perspectiva teórica, que um gás real se dirige a um estado de equilíbrio. Isso resultou em um segundo trabalho de destaque, o vigésimo segundo da sua produção, em que se descreveram os processos de transporte em gases, resultando na Equação de Boltzmann e na demonstração do Teorema-*H* que abriu as portas para a discussão sobre a irreversibilidade dos processos moleculares (BOLTZMANN, 1872). Por meio desse teorema, conclui-se que os estados fora do equilíbrio térmico são tão improváveis – não impossíveis – que as flutuações do sistema se dirigem naturalmente à condição de equilíbrio. A importância dos resultados apresentados nesse artigo envolvem a superação de uma aparente contradição existente entre a reversibilidade tradicional dos movimentos puramente mecânicos e o crescimento irreversível da entropia.

Para muitos experimentalistas da época, foi precisamente essa contradição que parecia provar que a termodinâmica, essencialmente empírica e sem pressupostos, era mais razoável e que a mecânica newtoniana tinha aplicação limitada. Segundo a perspectiva deles, ambas não poderiam ser verdadeiras, de modo que muitos físicos estavam certos de que as duas leis da Termodinâmica, excetuando a especulação atomística, eram parte do progresso conceitual.

A partir daí Boltzmann se tornou um dos maiores atores na grande discussão científico-filosófica do seu tempo: sua obra articulou a consagrada fundamentação da natureza sobre uma visão mecanicista, com uma visão não ortodoxa ao seu tempo sobre a constituição atomística, incluindo nesta articulação as perspectivas abertas pela recém instaurada Termodinâmica, frente a outras perspectivas de seu tempo, como o energetismo (DAHMEN, 2006). A respeito disso, vale à pena revisitar a tese de doutorado do Prof. Augusto Videira (1992).

3.3 Comentários gerais sobre a perspectiva científica de Boltzmann

Blackmore destaca que Boltzmann alimentou três crenças durante seu trabalho científico e filosófico: primeiramente, que o ser humano havia dominado as leis da natureza, no sentido de ter a consciência de que as leis seriam abstrações que não exigem a ocorrência de nada na realidade; em segundo lugar, que era necessário muito cuidado ao se aceitar significados artificiais ou artificialidades sem conexão com o mundo concreto; e, por fim, que não haveria necessidade de se aceitar o que os filósofos chamavam de universais, no sentido

de que a realidade só apresenta particulares o que, de certa forma, seria típico da postura antimetafísica do seu tempo (BLACKMORE, 1995, p. 6-7). Curiosamente, apesar dessas três crenças, ao longo de sua vida a distinção entre as moléculas e os modelos moleculares se tornaram apenas uma questão de linguagem. Cercigiani (1998, p. 170) o qualifica como um filósofo da natureza realista – do que se depreende das três crenças –, mas não ingênuo.

Complementarmente, Pereira Jr (1997) identifica na obra de Boltzmann uma conjugação de duas tendências: uma racionalista e outra empirista. Pela tendência racionalista, o modelo mecânico se mantinha como fundamento para o conhecimento da natureza. Nos termos do próprio Boltzmann, em uma aula inaugural proferida em 1902 ao reassumir a sua antiga cátedra em Viena trinta anos após o artigo de 1872: “a mecânica é o fundamento sobre o qual está erguido todo o edifício da física teórica, a raiz de onde provêm todos os outros ramos dessa ciência” (BOLTZMANN, 1902). Por esse viés, os esquemas dedutivos formariam a base do método científico, visando construir uma representação mecânica do mundo a partir da teoria. Frente a essa tendência, o próprio Boltzmann valorizava a perspectiva empirista, que deveria confrontar os resultados teóricos com a experiência, visando corrigir e modificar a representação mecânica do mundo. Segundo suas próprias palavras: “nunca vá excessivamente além da experiência, e introduza apenas abstrações que logo possam ser testadas pela experiência” (BOLTZMANN, 1899). Isso evidencia que para Boltzmann, apesar de toda a elegância e formalismo dos métodos matemáticos da física teórica, seria preciso que os modelos científicos fossem avaliados em função de sua eficácia prático-experimental. Esse critério de julgamento, adotado como parte do seu método de trabalho, potencializou a relevância dos seus resultados quanto à descrição teórica do comportamento da natureza. Sobre isso, Pereira Jr atesta:

A combinação de elementos metodológicos aparentemente opostos entre si deu origem, em Boltzmann, a um estilo peculiar de trabalho científico. Apenas levando-se em conta sua postura epistemológica, na qual uma tendência à formação de uma “imagem da natureza” estável era contrabalançada pela vontade de obter resultados experimentalmente úteis, poderemos compreender a forma como se deu a evolução de seu trabalho científico, diante do problema da explicação da irreversibilidade expressa pela Segunda Lei da Termodinâmica. (Pereira Jr, 1997, p. 41).

4 A FÍSICA DA IRREVERSIBILIDADE BOLTZMANN

Com o intuito de recuperar a física de Boltzmann acerca da noção de irreversibilidade, foi necessário revisitar, de forma sintética, alguns conceitos importantes para compreender o que está em jogo no tratamento do assunto pelo físico austríaco. Um guia importante para essa finalidade foi o trabalho de Bricmont (1995), cujo objetivo foi “clarificar muitas confusões na literatura popular referentes ao caos, determinismo, a seta do tempo, entropia e o papel das probabilidades em física”. Nesse trabalho, evitou-se o apelo a abordagens puramente matemáticas de forma que um público alvo não especialista em física e matemática, mas interessado em filosofia da natureza, consiga compreendê-lo. No entanto, cabe registrar que é desejável o conhecimento de noções básicas acerca de funções e vetores, típicos de aulas de Física e Matemática no Ensino Médio.

4.1 Espaço de Fases

O conceito de espaço de fases constitui uma das mais importantes noções da ciência moderna e foi especialmente útil para o desenvolvimento da Mecânica Estatística por Boltzmann. Tal conceito é fruto de um conjunto entrelaçado – mas com alguns pontos cegos – de trabalhos e reflexões de natureza matemática e física desenvolvidos por J. Liouville, W. R. Hamilton, C. G. J. Jacobi, A. Cayley, H. Grassmann, B. Riemann, L. Boltzmann, J. C. Maxwell, J. W. Gibbs, H. Poincaré, P. Ehrenfest, A. Rosenthal, M. Plancherel, P. S. Epstein que se estendem desde 1838 a 1918 até se tornar de amplo uso (NOLTE, 2010).

A noção de espaço de fases é bastante útil para a análise de sistemas dinâmicos, ou seja, dos sistemas cuja evolução se desenvolve no tempo. O estado (ou configuração) de um sistema dinâmico pode ser representado por um conjunto de parâmetros quantitativos que constituem seus graus de liberdade. No contexto da mecânica clássica, por exemplo, um sistema constituído por uma única partícula, cujo desenvolvimento se dá apenas ao longo de uma direção no espaço, pode ter seu estado descrito por dois parâmetros que informam sua localização no espaço unidimensional e sua condição de movimento em um determinado instante. Dessa maneira, o estado desse sistema pode ser indicado por uma estrutura do tipo

$$e = (r, p)$$

em que r é a posição no espaço unidimensional e p é o seu momento linear (\equiv massa \times velocidade) que descreve sua condição de movimento. Para o caso de um sistema constituído

por N partículas pontuais, o estado é determinado pelo conjunto de posições e momentos lineares associados a cada uma delas. No espaço tridimensional, cada estado do sistema será representado por $3N$ informações de posição e $3N$ informações de momento linear, ou seja,

$$e = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N)$$

ou

$$e = (\{\mathbf{r}_i\}, \{\mathbf{p}_i\})$$

em que $\mathbf{r}_i = (r_{ix}, r_{iy}, r_{iz})$ é o vetor posição da partícula $i = 1, \dots, N$ no espaço tridimensional cartesiano, $\mathbf{p}_i = (p_{ix}, p_{iy}, p_{iz})$ é o vetor momento linear da partícula i e $\{\mathbf{r}_i\}$ e $\{\mathbf{p}_i\}$ são, respectivamente, os conjuntos dos vetores posição e momento linear das N partículas constituintes do sistema. Tanto para o caso de uma partícula, como para o caso de N partículas, a estrutura e acessível ao sistema é chamada de um *ponto do espaço de fases*, que indica uma forma com que o sistema pode se realizar no tempo.

A partir dessa forma de se descrever um sistema dinâmico, seu *espaço de fases* é constituído pelo conjunto de todos os estados (ou configurações) possíveis de serem realizados. Aqui, o espaço de fases será representado por $\Gamma = \{e\}$. Em linguagem filosófica, o espaço de fases é o conjunto de todas as configurações *potenciais* do sistema⁷.

A partir de uma configuração inicial e_0 , o sistema evolui no tempo e estabelece uma trajetória no espaço de fases, ou seja, uma sequência de pontos compatível com a condição inicial especificada, o que é representável por $e = f(e_0, t)$. Isso significa que a cada configuração inicial está associada uma trajetória⁸. Nesse mesmo contexto, pode-se também definir uma região do espaço de fases a partir de faixas de valores para cada uma das variáveis dinâmicas que o constitui e, em consequência, quantificar o volume de tal região no espaço de fases.

Em função das características internas do sistema, das condições que se impõem sobre ele e considerando toda a evolução realizável (trajetória completa) do sistema no espaço de

⁷ Evidentemente, ao se descrever o estado do sistema a partir da posição e do movimento de suas partículas, os efeitos de indeterminação quântica são desprezados e diz-se que as partículas são partículas clássicas. Boltzmann, em seu tratamento da irreversibilidade, considera a realidade concreta como constituída por partículas clássicas, uma vez que à época do seu artigo de 1872 ainda não havia ocorrido o irrompimento da Mecânica Quântica. Além disso, é importante destacar, no entanto, que a aplicação da noção de espaços de fases não se restringe a sistemas constituídos por partículas pontuais, mas a qualquer sistema dinâmico e quaisquer parâmetros a que estão relacionados seus graus de liberdade, abrangendo também uma descrição quântica da realidade.

⁸ Embora Boltzmann nunca tenha usado o termo “espaço de fases” explicitamente, nos seus trabalhos de 1871 (BOLTZMANN, 1871a, 1871b) já havia menção clara à ideia de uma “trajetória do sistema”, fazendo referência à descrição abstrata de movimento com muitas variáveis.

fases, a cada ponto do espaço de fases se associa uma probabilidade de ocorrência. Se os parâmetros do sistema forem variáveis contínuas, como são a velocidade e o momento linear para os sistemas clássicos, torna-se melhor dizer que há uma distribuição (ou densidade) de probabilidades para o espaço de fases ρ_{Γ} . Quanto a isso, é importante destacar que Boltzmann era um “finitista”, pois considerava o espaço de fases discreto, fruto da sua visão atomista. A ideia de contínuo, tão essencial ao cálculo infinitesimal, que também servia de base à sua teoria, só era compreendida como um limite (DUGAS, 1959, p. 25-29).

Sendo o sistema dinâmico caracterizado por essa abordagem, podem ser definidas propriedades “globais” para o sistema como funções do seu espaço de fases na forma $\Phi(\Gamma)$, de forma que muitos pontos do espaço de fases são associados a um valor de Φ . Por exemplo, se Φ representa um valor de energia especificado para o sistema, há um conjunto de estados que resultam no mesmo valor de Φ . Adicionalmente, dada uma configuração inicial do sistema e_0 , que dá origem a uma trajetória $e(e_0, t)$, qualquer função Φ definida sobre o espaço de fases gera uma evolução induzida da propriedade Φ , $\Phi_0 \rightarrow \Phi_t$, sendo $\Phi_0 = \Phi(e_0)$ e $\Phi_t = \Phi(e(e_0, t))$.

4.2 Ergodicidade

Uma vez estabelecida a noção de espaço de fases, é possível conceituar um tipo de sistema dinâmico que foi fundamental para a construção da teoria de Boltzmann: o sistema ergódico. Um sistema dinâmico é *ergódico* se o tempo médio de uma trajetória numa região do espaço de fases é proporcional ao volume dessa região. Ao se dizer tempo “médio”, o sentido considera o limite de tempo infinito, $t \rightarrow \infty$. Além disso, tal propriedade deve valer para todas as trajetórias, exceto aquelas de volume nulo no espaço de fases.

Uma consequência da ergodicidade é que, o comportamento médio do sistema dinâmico pode ser deduzido a partir da trajetória de uma condição inicial e_0 que seja representativa para o sistema. Outra consequência é que, para uma propriedade definida sobre o espaço de fases, a média da propriedade para todas as trajetórias viáveis é igual à média sobre todo o espaço de fases.

Aqui a noção de ergodicidade é especialmente importante para descrever aquilo que Boltzmann tratará como sistemas em equilíbrio (invariantes no tempo quanto às suas propriedades globais). Se o sistema dinâmico é ergódico, a média temporal de uma propriedade calculada ao longo de sua trajetória no espaço de fases é igual à média de tal propriedade sobre todo o espaço de fases. Se aos pontos do espaço de fases for associada a

ideia de localização no espaço de fases, que é uma noção geométrica, nos sistemas ergódicos há uma equivalência das abordagens temporal e geométrica para o cálculo de propriedades.

Há dois problemas relacionados à noção de ergodicidade. O primeiro, e menor, é se é possível provar que um sistema dinâmico concreto é ergódico. O segundo, e mais grave, é se é possível observar ou medir qualquer fenômeno de não-equilíbrio.

Boltzmann assume, por hipótese, como base da sua teoria mecânico-estatística, que os gases constituídos por átomos (ou moléculas) eram ergódicos, embora a associação formal de sua teoria à ergodicidade só tenha sido estabelecida em um trabalho 12 anos posterior ao trabalho de 1872 (BOLTZMANN, 1884, 1885). Isso gerou uma forte reação negativa em seu tempo. Contudo, com base nessa proposta audaciosa foi possível calcular pela primeira vez a relação entre grandezas macroscópicas dos gases – as equações de estado – e também de líquidos e sólidos. Apesar de este ter sido um ponto de partida importante, mais tarde Boltzmann percebeu que ele era desnecessário para explicar como os sistemas alcançavam o equilíbrio (GALLAVOTTI, 1995).

4.3 Mecanicismo

A filosofia do mecanicismo serviu de fundamento para a construção da teoria de Boltzmann sobre o comportamento da matéria sob uma perspectiva microscópica. David Bohm apresenta uma importante síntese sobre essa abordagem (BOHM, 2015), de modo que aqui são apresentados alguns de seus elementos essenciais. De acordo com o mecanicismo, o comportamento e os fenômenos do Universo podem ser ajustados a esquemas teóricos gerais semelhantes às leis de Newton do movimento baseado em relações muito claras de causas e efeitos e que tornam possíveis previsões quantitativas precisas sobre eles. Essencialmente, o mecanicismo liga-se a uma simplificação da experiência que, por hipótese, assume que sua descrição pode ser estabelecida de modo completo e perfeito pela operação de um conjunto completo e perfeito de leis puramente quantitativas que determinam o comportamento de uns poucos tipos de entidades básicas (BOHM, 2015, p. 107-108).

No caso de Boltzmann, sua forma de lidar com o mecanicismo produziu resultados importantes. Uma delas é a de que a regularidade das leis macroscópicas não demanda o conhecimento completo e absolutamente preciso da dinâmica microscópica (atômico-molecular) do sistema descrita pelas leis da mecânica newtoniana. O passo inicial para se chegar a essa conclusão envolve a percepção de que a ordem de grandeza da quantidade de moléculas envolvidas nos fenômenos macroscópicos é 10^{23} . Por exemplo, 3 mL

de água contêm aproximadamente 10^{23} moléculas de H_2O . Em função disso, seria impraticável determinar com absoluta precisão as posições e momentos lineares iniciais de cada uma delas de forma a especificar o estado inicial do sistema e_0 , bem como descrever quantitativamente o movimento de cada uma das moléculas e as interações – colisões ou processos de atração-repulsão – que se estabeleceriam entre todas elas. Contudo, uma análise quantitativa que tomasse por base um comportamento médio desse sistema de partículas poderia levar a leis macroscópicas. Por isso, pode-se dizer que as quantidades médias macroscópicas são muito insensíveis ao movimento e localização precisos de cada átomo e/ou molécula do sistema. Em outras palavras, ao se considerar a matéria como um sistema dinâmico de partículas microscópicas clássicas – que é o que Boltzmann faz –, a pretensão ontológica mecanicista de descrição completa e perfeita da realidade concreta sofre um revés pela necessidade de introdução da estatística e das probabilidades.

No contexto do mecanicismo de Boltzmann, sua estrutura de pensamento está bastante associada a relações causais do tipo muitos-para-um (BOHM, 2015, p. 79), em que múltiplos tipos de causas podem produzir essencialmente o mesmo efeito. Contudo, em Boltzmann, acompanhando essas relações do tipo muitos para um, é necessário que se distingam as escalas nestas relações causais: o “muitos” se refere ao nível microscópico e o “um” se refere ao nível macroscópico. Em outras palavras, isso significa que as múltiplas possibilidades de movimento de cada uma das partículas e até mesmo de configurações iniciais do sistema, leva, na prática, aos mesmos comportamentos macroscópicos do sistema.

Essa abordagem de Boltzmann que o leva à sua mecânica estatística – não se pode abandonar a palavra “mecânica” – não lida com acasos (lit: sem causa) do nível microscópico. O que a física de Boltzmann efetivamente propõe é que as propriedades e fenômenos macroscópicos dos sistemas têm suas causas nas propriedades e comportamentos do mundo microscópico constituído de átomos e moléculas, o que confronta a hipótese de continuidade da matéria sustentada por seu contemporâneo Ernst Mach. Além disso, é prudente esclarecer que a abordagem de Boltzmann não considera, em princípio, que a matéria, em nível molecular, se comporta como um sistema estocástico, nem como um sistema caótico ⁹.

⁹ Sistemas estocásticos são aqueles em que, a partir de um estado inicial e_0 , é possível determinar apenas uma distribuição de probabilidade para o seu estado em um instante futuro t . Isso significa que há múltiplas possibilidades para a condição futura, partindo-se da mesma condição inicial. Um sistema como esse não é determinístico, mas obedece a determinadas leis de natureza probabilística. Por outro lado, sistemas caóticos são aqueles em que, para uma condição inicial especificada e_0 , há outra arbitrariamente próxima a ela e_0' de modo que, após um intervalo de tempo suficiente, leva o sistema para um estado futuro marcadamente distinto daquele alcançado pela primeira condição inicial. Nesse caso, o sistema é muito sensível às condições iniciais, de forma que pequenos desvios na condição inicial conduzem a evoluções marcadamente distintas ao longo do tempo. Em consequência, sistemas dinâmicos caóticos são imprevisíveis na prática, pelo menos para tempos longos, já que sempre há um erro relacionado à determinação experimental das condições iniciais. Mas é

4.4 Reversibilidade e Irreversibilidade

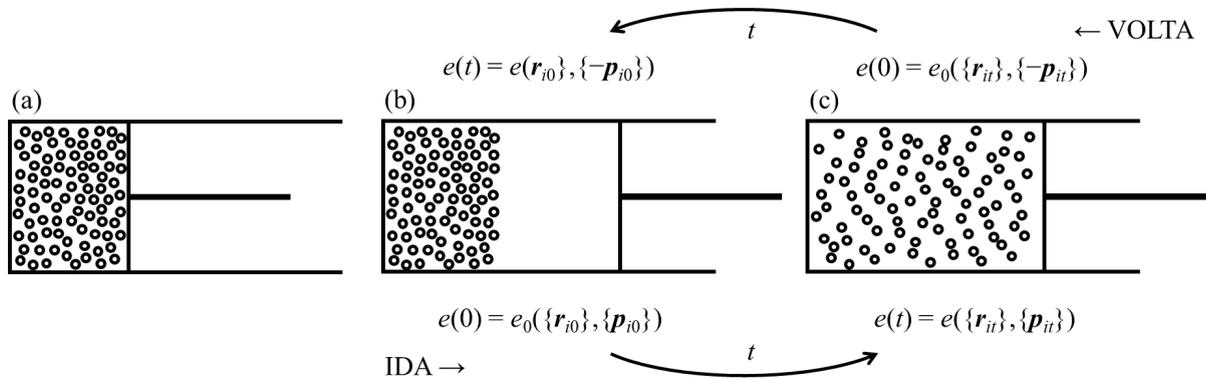
“Reversibilidade” e “irreversibilidade” também são termos essenciais para a compreensão da física boltzmanniana. Afinal, os resultados dos seus trabalhos impõem uma questão grave sobre a reversibilidade constitutiva das leis básicas da física mecanicista. A noção de reversibilidade pode ser facilmente compreendida a partir de um exemplo mental simples: ao se deixar um *sistema isolado* de corpos pontuais evoluir a partir de uma condição inicial e_0 , durante um período de tempo t , de acordo com leis físicas reversíveis e fosse possível inverter subitamente o sentido das velocidades de cada um dos corpos, deixando o sistema evoluir pelo mesmo período, ele chegaria a uma configuração equivalente à e_0 , a menos de as velocidades estarem no sentido oposto ao original.

Na percepção cotidiana da natureza, porém, testemunhamos a evolução de muitos sistemas cujas evoluções reversas nunca ocorrem. Por exemplo, vai-se da vida para a morte mas não o contrário, o leite derramado não retorna à xícara, misturas de líquidos não se des-misturam. Tais eventos sugeririam, em princípio, que a irreversibilidade seria a negação da reversibilidade. Além disso, esta por sua vez seria um tipo de processo idealizado e limitante que nunca ocorreria na prática. O que é crucial, entretanto, é destacar que, tanto a reversibilidade, quanto a sua negação, não são características nem das coisas nem das teorias, mas dos *processos* que podem ocorrer com os entes da realidade concreta (DENBIGH, 1989).

Embora os exemplos mencionados não tratem de sistemas isolados, é possível pensar a irreversibilidade a partir de um caso mais simples. Seja, por exemplo, uma determinada quantidade de gás confinado na metade esquerda de um recipiente com um pistão. Ao se liberar o pistão, o gás se expande e ocupa todo o recipiente (Figura 4.1). Qualquer pessoa com a menor experiência a respeito de gases jamais esperaria que as partículas retornassem à metade esquerda do recipiente e ali se detivessem, embora tal retorno seja absolutamente compatível com as leis da física mecanicista. Diante disso, a pergunta sobre a natureza da irreversibilidade poderia se resumir ao seguinte questionamento: se as leis da física são reversíveis, como testemunhamos o desenvolvimento de determinados fenômenos mas nunca o desenvolvimento no sentido reverso?

importante deixar claro que isso nada tem a ver com determinismo. Inclusive, o comportamento caótico é plenamente compatível com uma mecânica determinista.

Figura 4.1 Esquemática de uma suposta evolução reversível na forma de expansão livre de um gás originalmente na configuração (a) em função do movimento de um pistão que leva à configuração (b). A experiência da realidade indica que o gás evolui naturalmente da configuração (b) para a configuração (c). Porém, na prática, o retorno de (c) para (b) não é esperado, apesar desta evolução estar de acordo com a mecânica newtoniana e ser possível no espaço de fases.



Fonte: O autor.

O ponto final da discussão sobre a irreversibilidade a partir de Boltzmann é que a irreversibilidade não estabelece nenhuma contradição com as leis reversíveis da física. Tanto na ida quanto na volta as leis da física são obedecidas e, em cada caso, as trajetórias do sistema dependem da condição inicial. E, sendo as leis da física determinísticas, as considerações acerca das condições iniciais podem ser, no limite, considerações acerca do estado inicial do Universo. O primeiro tratamento dessa questão se deve a Boltzmann. Porém, apesar das incompreensões e objeções, a explicação do físico austríaco ainda se mantém válida. A explicação padrão para isso envolve considerar as condições iniciais e que o sistema de interesse possui muitos graus de liberdade.

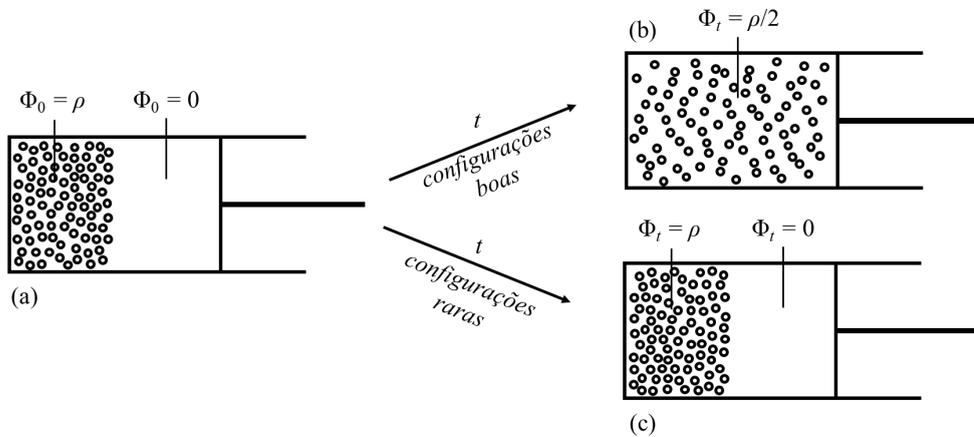
Muitos fenômenos que ocorrem na natureza e que são descritos por equações macroscópicas lidam com funções Φ do espaço de fases (propriedades físicas), cuja evolução induzida é realmente (aproximadamente) *autônoma*, ou seja, pode-se determinar Φ_t a partir de Φ_0 , ignorando o conhecimento das configurações microscópicas. É o que ocorre, por exemplo, na descrição da conservação do momento linear relativo ao escoamento de um fluido, na descrição da concentração de uma substância nos fenômenos de difusão e na distribuição de temperatura em fenômenos de propagação de calor. Isso significa que as diferentes configurações microscópicas que implicam Φ_0 , levam à mesma evolução a Φ_t .

Contudo, não é necessário que *todas* as configurações microscópicas que implicam Φ_0 levam à mesma evolução a Φ_t . De fato, uma vasta maioria de configurações produz esse efeito. Ou seja, as leis usadas na prática são aproximações às leis reais satisfeitas por Φ_t 's correspondentes. Dessa forma, uma lei macroscópica pode ser formalmente definida a partir

da noção de espaço de fases como: dados Φ_0 e um intervalo de tempo t não muito grande, existe um grande subconjunto do conjunto de e_0 que implica Φ_0 tal que a evolução induzida Φ_t é aproximadamente descrita pelas equações macroscópicas relevantes até o tempo t . Tal afirmação não é simples de ser provada porque demanda a lidar com sistemas dinâmicos com um número muito grande de graus de liberdade e a identificação dos limites de validade de cada um deles. Sob essa perspectiva, seria difícil sustentar que as leis macroscópicas são reversíveis. Além disso, não fica evidente nenhum motivo lógico para supor sua reversibilidade. Na verdade, elas podem ser reversíveis ou não. O que ficou evidente foi a importância da condição inicial.

Bricmont (1995) sugere um experimento mental baseado nas ideias de Boltzmann para evidenciar que a reversibilidade implica um paradoxo e aprofundar a compreensão sobre o que está em jogo na discussão sobre a reversibilidade e irreversibilidade. Trata-se de um sistema constituído por um gás em um recipiente cuja condição inicial foi estabelecida com o gás confinado por um pistão na metade esquerda. Se a propriedade de interesse Φ é a massa específica, no início ela é homogênea e assume o valor arbitrário $\Phi_0 = \rho$ para a primeira metade do recipiente e $\Phi_0 = 0$ para a outra metade. Após o tempo t em que ocorre a expansão, $\Phi_t = \rho/2$ aproximadamente em todo o recipiente. A evolução irreversível de Φ , condizente com o comportamento macroscópico esperado, pode ser explicada pelo fato de a maioria esmagadora das configurações correspondentes ao gás no lado esquerdo do recipiente evoluir deterministicamente de modo a induzir a evolução de Φ_0 a Φ_t . Tais configurações serão, por simplificação, chamadas de “boas”. Por outro lado, poderia haver, sem restrições, configurações em que o átomo do gás permaneceriam no lado esquerdo do recipiente. Porém, tais configurações são extraordinariamente raras, de forma que, na prática, talvez nenhuma delas ocorra de fato, mesmo para tempos muito longos. A Figura 4.2 ilustra essa evolução.

Figura 4.2 Esquemática da evolução irreversível de um processo de expansão livre de um gás originalmente ocupando metade de um reservatório (a) em que se distingue o destino de configurações iniciais “boas” (b) do destino de configurações iniciais raras (c).

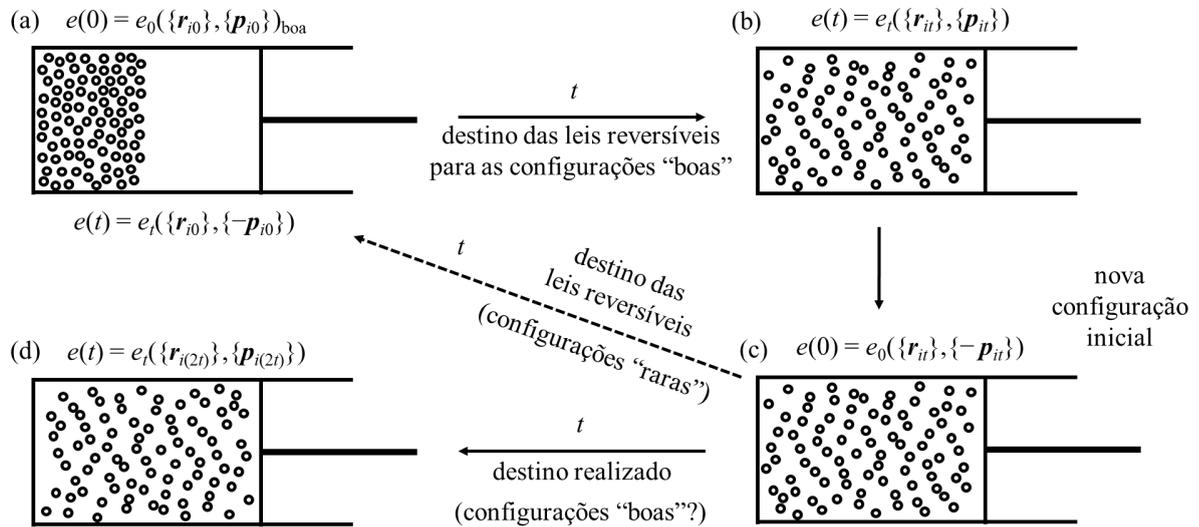


Fonte: O autor.

Partindo agora, de uma configuração final originada de uma configuração inicial boa, ou seja, $e_t = e(e_{0,\text{boa}}, t)$, e revertendo o sentido de suas velocidades, essa nova configuração inicial deixa de ser boa¹⁰. Afinal, de acordo com as leis reversíveis, o sistema deveria retornar à condição em que os átomos do gás estão confinados na metade esquerda do recipiente. Mas o que ocorre é que o sistema permanece com massa específica homogênea e igual a $\rho/2$. Segundo o mecanismo reversível, a nova configuração inicial passou a fazer parte do limitadíssimo subconjunto de estados iniciais que produz, no início, massa específica uniforme $\rho/2$ em todo o recipiente e, ao evoluir, confina-o na metade esquerda. Ou seja, nunca se deveria esperar, na prática, obter tal configuração “rara” segundo o mecanismo reversível. Eis o paradoxo: jamais deveríamos esperar o novo estado inicial, que foi o ponto final da primeira evolução, por que nunca esperaríamos que o sistema evoluísse para uma condição em que o gás ficasse confinado na metade esquerda do recipiente. Em consequência, o ponto de partida real se tornou improvável e todo o processo se deu segundo uma mecânica microscópica reversível. A Figura 4.3 ilustra o raciocínio aqui descrito.

¹⁰ Para o caso de um sistema constituído por N partículas não interagentes e considerando que a velocidade de cada uma delas pode ser revertida com probabilidade $1/2$, a probabilidade de que o sistema esteja numa configuração em que as partículas ocupem as mesmas posições originais, mas com a velocidade revertida é de $(1/2)^N$. Esse resultado indica que para o caso em que N é grande, típico dos sistemas macroscópicos, essa probabilidade é muito pequena.

Figura 4.3 Esquemática da expansão livre de um gás em duas etapas. Na primeira, são obedecidas leis reversíveis a partir de uma boa configuração inicial (a) chegando-se em (b). Na segunda etapa, em que a configuração (b) tem as velocidades revertidas (c) as leis reversíveis conduzem a (a) que se torna, na prática, um estado improvável, estabelecendo um paradoxo, já que era, originalmente, uma configuração boa. O que se percebe, de fato, é a tendência natural de evolução do estado (c) é alcançar uma configuração comparável a (d).



Fonte: O autor.

A consequência paradoxal que esse experimento mental impõe é que as mudanças macroscópicas na natureza são, via de regra, irreversíveis e se devem à ocorrência de estados improváveis segundo as leis reversíveis. Se tais estados improváveis não ocorressem de fato, o universo estaria em equilíbrio. E, mais do que isso, considerando as leis da física como são formuladas até hoje, o mundo teria começado em equilíbrio. Em suma, o problema real trazido pela irreversibilidade é o de que não se trata de explicar o comportamento irreversível no futuro, mas o de delinear as condições iniciais excepcionais de toda a realidade concreta.

Nesse sentido, a explicação da irreversibilidade dos sistemas reais é simples e sutil já que se fundamenta numa abordagem probabilística, algo que não era o padrão no tratamento mecanicista da Física. O problema identificado foi o de que embora não haja irreversibilidade nas leis fundamentais da Física, o estado inicial do sistema de interesse pode ser muito improvável. Ou seja, seu volume relativo no espaço de fases é muito pequeno e sua evolução temporal leva, então, a uma região de volume relativamente grande, que corresponde a um estado muito provável do sistema. De fato, depois de um tempo muito longo, o sistema até poderia retornar a seu estado inicial improvável. Porém a espera para isso é impraticável. E, dessa maneira, no limite, ocorre, portanto, uma evolução temporal realmente irreversível (RUELLE, 1993).

Neste ponto cabe destacar que a aparente distinção entre propriedades microscópicas e propriedades macroscópicas não é necessária. O problema da irreversibilidade (ou da insuficiência da reversibilidade) se torna evidente quando há um número muito grande de graus de liberdade envolvidos. Naturalmente, no caso da análise de um sistemas de partículas, esse número de graus de liberdade está diretamente relacionado ao número de partículas. Quando o número de graus de liberdade é pequeno, a distinção “micro/macro” perde o sentido, pelo menos no âmbito de uma abordagem clássica.

Complementarmente, Debingh (1989) agrava a questão considerando que um processo é reversível se, e somente se, o sistema que sofre esse processo, juntamente com todas as partes de seu ambiente que são afetadas, puder ser restaurado de forma reprodutível a seus estados originais. Aqui a noção de reprodutibilidade é necessária, uma vez que uma restauração momentânea de um estado original pode ocorrer, em princípio, por flutuação espontânea. Por exemplo, ao se deixar o sistema ir de um estado inicial e_0 , passando pelos estados e_1, e_2, \dots , até um estado final e_{final} , os estados simultâneos correspondentes do ambiente afetado são a_0, a_1, a_2, \dots , até um estado final a_{final} . Há reversibilidade se for possível não apenas que o sistema seja restaurado de e_{final} para e_0 , mas que essa reversão seja acompanhada por uma reversão simultânea das partes afetadas do ambiente de a_{final} para a_0 . Em suma, todas as partes relevantes do universo devem ser capazes de voltar a ser como eram. O agravamento da questão por essa perspectiva se dá pela incorporação dos graus de liberdade do ambiente na consideração de todo o processo.

Como um passo inicial fundante, o que a teoria de Boltzmann sugere é que a reversibilidade não é alcançada no mundo real das coisas concretas, mesmo que essencialmente a natureza se desenvolva a partir de leis reversíveis. A irreversibilidade é uma consequência natural na realidade concreta, embora o conceito de reversibilidade continue sendo uma idealização útil para fins teóricos, em especial, na lide com sistemas macroscópicos.

Poder-se-ia alegar que a irreversibilidade nada mais seria do que o resultado das aproximações impostas na modelagem do sistema de interesse, o que acabaria sendo uma consequência da ignorância humana (PRIGOGINE, 2002). Afinal, conforme a construção aqui apresentada, as variáveis microscópicas se comportam reversivelmente e o problema da irreversibilidade surgiu apenas quando *optou-se* por dar foco às variáveis macroscópicas, como consequentes de um comportamento médio das partículas – algo que acaba por colapsar informações detalhadas do sistema. Nessa postura já haveria uma parcela de subjetivismo. Contudo, a evolução das variáveis macroscópicas é objetivamente determinada pelas variáveis

microscópicas e tal evolução ocorre independentemente do sujeito que lida com o sistema. Entretanto, se olharmos uma única molécula ou um conjunto delas representadas por um ponto no espaço de fases, não há sentido em dizer que ela/ele evolui irreversivelmente (BRICMONT, 1995, p. 143). De fato, a irreversibilidade é fruto da liberdade de movimento e configuracional de um sistema formado por muitos elementos. Destaque-se que em princípio, a física Newtoniana pode resolver o problema da expansão livre com exatidão, pois ele é determinístico. A dificuldade com a questão da irreversibilidade é que ela é uma característica emergente, ou seja, se manifesta apenas quando o sistema possui larga escala.

4.5 O artigo de 1872

O trabalho de 1872 de Boltzmann tornou-se uma pedra angular na história da Física pelo fato de nele ser demonstrado pela primeira vez como a irreversibilidade emerge de processos reversíveis. O artigo é bastante extenso em comparação com outros trabalhos da Física, explora o tema por um viés eminentemente matemático e se estrutura em seis seções, em que a primeira é a mais importante para a nossa discussão.

Nesse trabalho ele concebeu o que ocorreria em um gás, constituído por partículas pontuais, que ao longo de suas trajetórias, sofriam choques elásticos¹¹, obedecendo às leis reversíveis. As hipóteses adicionais adotadas em sua construção teórica foram bastante razoáveis. Tais hipóteses foram estabelecidas em torno da noção de não correlação entre duas moléculas antes da colisão e deveriam valer para qualquer evento de colisão no gás: 1) as duas partículas que participam da colisão têm energias cinéticas independentes e aleatórias; 2) as direções das velocidades das partículas são independentes; 3) os pontos de partida das partículas eram independentes; e 4) colisões repetidas não estão correlacionadas. Tais hipóteses levavam à vantagem matemática de considerar a probabilidade referente a um evento envolvendo duas moléculas como o produto de probabilidades associadas a cada molécula individualmente. Do ponto de vista físico, tais hipóteses representavam a ideia de caos molecular (HOLLINGER & ZENZEN, 1985, p. 12; PESSOA JR, 2024).

Sob essas suposições, e dada a mecânica da transferência de energia, Boltzmann construiu sua equação cinética que descreve a distribuição de energia cinética no sistema. Para essa equação cinética, a condição de equilíbrio do sistema foi descrita considerando que a taxa de colisão é a mesma em qualquer posição no sistema de partículas. Além disso, no equilíbrio, a distribuição de energia de cada molécula participante de uma colisão varia em

¹¹ Choques em que a energia cinética e o momento linear total ($\sum m_i v_i$) do sistema se conservam.

função da distribuição de energia das outras moléculas que participariam da colisão e da distribuição de energia de ambas após a colisão.

A partir dessa equação cinética, o processo dedutivo indicou que o processo contínuo de colisão de moléculas que partiram de uma condição inicial qualquer promove a redução contínua e irreversível de uma grandeza representada por E ao longo do tempo até atingir um mínimo, que é obtido quando as moléculas obedecem a uma distribuição de energia igual à distribuição de Maxwell-Boltzmann. Essa grandeza E tem associação direta ao negativo da entropia (HUANG, 1987, p. 79).

Tal resultado ficou conhecido como Teorema- H de Boltzmann¹² e serviu de base para Boltzmann fazer a conexão da sua teoria com o conceito termodinâmico de entropia e estabelecer, pouco tempo depois, a sua consagrada fórmula para o cálculo da entropia, $S = k \ln \Omega$ ¹³ (BOLTZMANN, 1877). Nos termos do próprio Boltzmann:

Foi assim provado rigorosamente que, qualquer que seja a distribuição inicial da energia cinética, no decurso de um tempo muito longo ela deve sempre aproximar-se necessariamente daquela encontrada por Maxwell. O procedimento utilizado até agora nada mais é do que um artifício matemático empregado para fornecer uma prova rigorosa de um teorema cuja prova exata não foi encontrada anteriormente. Ganha significado por sua aplicabilidade à teoria das moléculas de gases poliatômicos. Aí pode-se provar novamente que uma certa quantidade E só pode diminuir como consequência do movimento molecular ou, num caso limite, pode permanecer constante. Pode-se também provar que para o movimento atômico de um sistema de muitos pontos materiais arbitrariamente existe sempre uma certa quantidade que, em consequência de qualquer movimento atômico, não pode aumentar, e esta quantidade concorda até um fator constante com o valor encontrado para a integral bem conhecida $\int dQ/T$ em meu artigo sobre a “Prova analítica da 2ª lei, etc.” Preparamos, portanto, o caminho para uma prova analítica da segunda lei de uma forma completamente diferente daquelas investigadas anteriormente. Até agora o objetivo foi mostrar que $\int dQ/T = 0$ para processos cíclicos reversíveis, mas não foi provado analiticamente que esta quantidade é sempre negativa para processos irreversíveis, que são os únicos que ocorrem na natureza. O processo cíclico reversível é apenas um ideal, do qual se pode aproximar-se mais ou menos de perto, mas nunca atingir completamente. Aqui, no entanto, conseguimos mostrar que $\int dQ/T$ é em geral negativo, e é igual a zero apenas para o caso limite, que é, obviamente, o processo cíclico reversível (já que se alguém puder passar pelo processo em qualquer direção, $\int dQ/T$ não pode ser negativo). (BOLTZMANN, 1877)

Até antes desse trabalho, a 2ª Lei da Termodinâmica portava uma noção empírica de irreversibilidade ou de degradação dos sistemas, ora sendo assumida como uma lei, ora como um princípio. Boltzmann deu um passo fundamental para subordinar a 2ª Lei à estrutura do mecanicismo e para suspender a suposta dicotomia que haveria entre reversibilidade e irreversibilidade na constituição da natureza. A partir dos seus resultados, a irreversibilidade

¹² O símbolo H passou a ser usado a partir de 1890 em um artigo crítico de S. H. Burbury (1890), sendo essa notação adotada pelo próprio Boltzmann a partir de 1896.

¹³ Na equação de Boltzmann, k é uma constante chamada de constante de Boltzmann ($= 1,380649 \times 10^{-23}$ J/K) e Ω é o número de microestados correspondentes a um macroestado especificado do sistema.

foi compreendida como um resultado de natureza estatística e que acontece mesmo quando o sistema está submetido às leis mecânicas reversíveis no nível microscópico.

Embora toda a dedução tenha se baseado em condições bastante especiais – gases diluídos constituídos por elementos monoatômicos do tipo ponto material, ocorrência exclusiva de colisões binárias, forças externas foram excluídas e distribuição espacial uniforme – os resultados inicialmente se mostraram bastante gerais. Tanto que três anos depois, Boltzmann apresentou uma nova dedução do Teorema-*H* considerando a ação de forças externas (BOLTZMANN, 1875). Em tal trabalho ele concluiu que, mesmo nesse caso, as direções das velocidades moleculares eram igualmente prováveis e que a distribuição de velocidades em cada posição era igual ao caso sem a ação de forças externas.

5 IRREVERSIBILIDADE E CAUSAÇÃO: UMA APROXIMAÇÃO A ARISTÓTELES

Esta ciência, cuja construção parece ser a grande obra dos físicos do século XIX, como a construção da dinâmica foi a grande construção dos físicos do século XVIII, é verdadeiramente a *Física* na qual Aristóteles esboçou as grandes linhas.

(Pierre Duhem, em *L'Évolution des Théories Physiques*, 1896)

Na obra de Boltzmann, as menções à tradição filosófica são raras, sendo isso o reflexo do ambiente antimetafísico em que desenvolveu sua formação e atuação científica. Como já mencionado, as maiores aproximações de Boltzmann com a Filosofia se deram na fase da sua maturidade, após os quarenta anos (VIDEIRA, 1992, p. 2,4), dando maior enfoque aos métodos da ciência do que a questões ontológicas. No entanto, o trabalho de Wicken (1981) traz uma abordagem com viés ontológico relevante para a discussão aqui pretendida. O autor destaca que, embora haja dificuldades de se estabelecer relações causais necessárias no âmbito de uma teoria científica para explicar os fenômenos da natureza, o problema da irreversibilidade, no contexto da Termodinâmica, é sugestivo para a reflexão sobre o tema da causalidade. Daí, portanto, uma possibilidade de aproximação entre a Termodinâmica e a paradigmática metafísica de Aristóteles no debate da Filosofia da Natureza.

Martinás (1991) reforça essa relação interpretando a dinâmica da Física de Aristóteles como a dinâmica do movimento com atrito, o que sugere uma possibilidade real de diálogo desta com a Termodinâmica. Para ele, inclusive, alguns textos de Aristóteles apresentam uma espécie de Termodinâmica arcaica. Embora os livros clássicos sobre a história da Termodinâmica não apresentem menções a Aristóteles e, igualmente, livros clássicos sobre a física de Aristóteles e sobre Termodinâmica não abordem essa conexão, há uma influência significativa da física aristotélica no desenvolvimento da Termodinâmica, mesmo que, na prática, esquecida. Em seus termos:

Sustentamos que a interpretação mecânica amplamente aceita reflete apenas uma versão simplificada da filosofia natural aristotélica. O fator básico da 'física' aristotélica é o reconhecimento da contradição dos processos 'reversíveis' no céu e da 'irreversibilidade' do mundo sublunar, e por causa da irreversibilidade do movimento natural a única interpretação possível da física aristotélica pode ser encontrada na estrutura da termodinâmica irreversível moderna. Chamamos isso de termodinâmica aristotélica. Talvez para a física de Aristóteles esse nome não seja correto, pois o significado canônico da termodinâmica moderna está restrito à teoria mecânica do calor, a uma pequena parte da física estatística. (MARTINÁS, 1991, p. 286)

Por esse eixo interpretativo, o movimento natural – um processo onde o corpo tende a ocupar sua posição natural – seria um processo irreversível, de forma que a posição natural de um ente concordaria conceitualmente com o estado de equilíbrio termodinâmico. Isso significa que sem ações externas, esse processo não deveria se desenvolver do estado final ao estado inicial, tornando a lei do movimento natural correspondente à 2ª Lei da Termodinâmica. Em função disso, Aristóteles já teria de enfrentar o problema da “morte térmica” – o estado de equilíbrio cosmológico após um tempo infinito – em que no mundo sublunar fechado, tudo ocuparia a sua posição natural e nenhum movimento posterior seria possível. A solução aristotélica para esse problema é o “motor imóvel”, que perturba continuamente a posição natural por meio dos raios do Sol (MARTINÁS, 1991, p. 286). Cabe destacar que Pierre Duhem também explorou a ideia de lugar natural de forma a estabelecer uma relação entre a 2ª Lei da Termodinâmica e a Física Aristotélica (DUHEM, 1896; 1905a; 1905b; SOUZA FILHO, 2009).

Segundo a ontologia de Aristóteles, os processos que ocorrem na realidade concreta se dão por princípios causativos de duas categorias. A primeira delas constitui-se unicamente pelo princípio material – ou causa material –, que é o substrato em que as mudanças se desenvolvem. A segunda abrange o conjunto dos princípios formativos que orientam o desenvolvimento da mudança para além da matéria. Eles incluem a) a causa eficiente ou o conjunto de condições antecedentes responsáveis por iniciar o processo de mudança; b) a causa formal, ou a forma atualizada espaço-temporal do processo; e c) a causa final, ou o fim para o qual se destina o processo. Dentre esses, a causa formal não seria uma causa no sentido usual, mas os aspectos ordenados e regulares do processo ou do ente que fornecem uma identidade e demandam uma explicação (WICKEN, 1981, p. 66). Uma retomada da Figura 4.3 permite a associação das quatro causas ao processo de expansão livre do gás. A causa material é o próprio gás formado pelos átomos em contínuo movimento no volume em que está confinado. A causa formal envolve a estrutura intrínseca do fluido que o identifica como tal. A causa eficiente envolve, em princípio, as condições iniciais elencadas e as interações entre as partículas constituintes do gás resultantes da estrutura interna de cada uma delas. A questão sobre a causa final exige a discussão sobre se a partir da configuração (c), a configuração (a) pode ou não ser um destino esperado. Para as leis mecânicas reversíveis, a configuração (a) é um destino necessário do sistema e que se trata de um único ponto no espaço de fases. Por outro lado, a experiência cotidiana sugere, por uma percepção imediata, que a causa final se identifica com configurações semelhantes a (d) e abrange múltiplos

pontos no espaço de fases. Em função disso, a 2ª Lei da Termodinâmica poderia sugerir a existência de uma causa eficiente de outra natureza.

Superando as ontologias anteriores, Aristóteles identificou na causa final o elemento essencial para explicar a relação entre a causa eficiente e a forma com que o processo se desenvolve. O problema é que a causa final foi abandonada – ou mais claramente dizendo, “exorcizada” – pelo programa científico da ciência moderna. Um dos motivos para esse abandono é o fato de o mecanicismo propor o único esquema para a causa eficiente que aspira ser uma explicação geral e logicamente demonstrável, no sentido de estabelecer relações necessárias para os fenômenos. Tanto é que o mecanicismo se tornou um paradigma quase que irrevogável na epistemologia e, na prática, também na ontologia. No âmbito do mecanicismo, as explicações se dão de forma idealizada no espaço – incluindo o espaço de fases – e permitem o estabelecimento de trajetórias não ambíguas nesse espaço. Até para a visão de mundo fomentada pela Mecânica Quântica, o mecanicismo ainda se apresenta como uma perspectiva confrontadora.

A questão que se coloca, mesmo no contexto da Termodinâmica Clássica, é a de como entender a sucessão de estados $e_0 \rightarrow e_1 \rightarrow \dots \rightarrow e_i \rightarrow e_j \rightarrow \dots \rightarrow e_{eq}$ que ocorre em um sistema desde a sua condição inicial até a condição de equilíbrio incorporando a noção de irreversibilidade. Pela abordagem mecanicista, a partir de qualquer estado inicial e_0 , a sucessão de estados seria univocamente determinada até se alcançar o equilíbrio e também seria reversível. A irreversibilidade, que integra a perspectiva da Termodinâmica e que confronta o mecanicismo, apela para a noção de entropia para explicá-la. Em consequência, a 2ª Lei da Termodinâmica descreve a realidade por uma perspectiva distinta da visão mecanicista. Margenau diria “superior”, ao ponto de a chamar de uma “super-lei” (1950, p. 212), sugerindo, ao nosso ver, que ela estaria mais próxima de uma metafísica. Isso poderia ser considerado uma forma elegante de se descrever a ideia humeana de conjunção conjunta ou tratado como uma explicação teleológica no sentido de que a maximização de entropia é uma função que representa a causa final sem ela mesmo necessariamente o ser. O mais importante, no entanto, é que no escopo da estrutura formal da 2ª Lei na Termodinâmica Clássica, enquanto ciência macroscópica, há uma assimetria *a priori*: os processos são explicados com referência às suas consequências e não aos seus antecedentes. Embora o estado inicial possa ser a base para previsões determinísticas de um comportamento em conjunto com as suas leis, ele não permite, na prática, a dedução do estado final do sistema e nem explica as razões desse estado final.

Todavia é preciso estar atento a uma distinção crucial entre as explicações termodinâmicas e as explicações teleológicas aristotélicas. Para Aristóteles, se era necessário recorrer aos fins de um processo para explicar a sua ocorrência, era porque esses fins estavam eles próprios envolvidos na sua própria realização. Ou seja, pela perspectiva do estagirita, haveria um *isomorfismo* necessário entre uma explicação e o fenômeno. Para ele, o cosmos é organicamente integrado de forma que suas estruturas e processos ajustam-se perfeitamente às suas funções. E, nesse contexto, a alma racional era tida como um órgão cognitivo com a função de abstrair as formas substanciais da natureza de suas corporificações materiais, usando os sentidos, a intuição e a lógica, de forma que o que existe é coextensivo ao que se pode conhecer (WICKEN, 1981, p. 69).

A compreensão da ciência moderna contrasta fortemente com a perspectiva aristotélica, principalmente em função da separação radical entre o conhecedor e o conhecido, o que exige a intervenção constante do pensamento hipotético. Na prática científica contemporânea o modo teleológico de explicação não implica que os processos assim explicados sejam eles próprios teleológicos ou auto-realizáveis de alguma forma. Significa apenas que, dadas as circunstâncias, as explicações baseadas em fins ou consequências são os melhores tipos disponíveis. Os propósitos da natureza estão, na perspectiva da ciência moderna, para além do escopo da ciência.

A formulação estatístico-mecânica da Termodinâmica dá um passo adiante quanto à aproximação entre a ontologia e o racionalismo científico e também entre a conexão causal nos macroprocessos e uma teleologia explícita. A novidade que a formulação mecânico-estatístico inaugura é que, para um estado macroscópico de equilíbrio, há vários estados microscópicos igualmente prováveis por princípio, de forma que os processos possam ser descritos a partir de duas coordenadas mais gerais: o estado macroscópico do sistema e o número de alternativas microscópicas àquele estado. Os microestados referentes a um estado macroscópico são livremente acessíveis entre si e não há orientações internas para esse movimento, o que configura uma condição de aleatoriedade (ou estocasticidade). Essa aleatoriedade é fundamental para a Termodinâmica Estatística, já que, segundo essa abordagem teórica, eventos estocásticos levam necessariamente a uma expansão do número de microestados – algo que não faz sentido para o mecanicismo determinista. Dessa forma, a Termodinâmica Estatística não apela a condições iniciais e a leis que se desenvolvem a partir dessas condições iniciais, mas a uma outra lei em que estados macroscópicos com mais microestados são preferíveis.

Essa expansão do número de microestados tem forte similaridade com a causa final aristotélica no sentido de que ela explica o comportamento irreversível. Porém, ela não é a causa final aristotélica *stricto sensu* devido à sua falta de propósito ontológico. Não há na estrutura da Termodinâmica Estatística nada que descreva os sistemas macroscópicos como teleológicos por si próprios.

Em suma, na Termodinâmica Estatística há a conciliação de um mecanicismo microscópico com uma indeterminabilidade essencial que requer a adoção de aproximações típicas dos processos estocásticos. Dessa maneira, a expansão do número de microestados é uma parcela do que está em jogo na explicação causal dos sistemas termodinâmicos e que pode ser associada à noção de causa final. Ressalte-se que essa abordagem não é possível na mecânica clássica de Newton e também na mecânica de Einstein. A outra parcela envolve a explicação mecanicista de como os microestados se conectam, o que pode ser associado à noção de causa eficiente. Mas, apesar dessas conexões mecanístico-microscópicas, a manifestação macroscópica dos sistemas nos processos irreversíveis promove a expansão do número de microestados. Em outras palavras, a expansão do número de microestados estabelece a sucessão macroscópica causal no conjunto das conexões mecanísticas disponíveis a um sistema termodinâmico. A sucessão dos estados microscópicos são a matéria prima para o “movimento” orientado no espaço do número de microestados. Em suma, a perspectiva teleológica da termodinâmica estatística e a perspectiva mecanicista das trajetórias no espaço de fases são idealizações complementares acerca dos processos que ocorrem na natureza. A primeira tem grande apelo epistemológico, em função das previsões macroscópicas acertadas. Já a última é justificada por fornecer um esquema geral de os processos macroscópicos ainda se manterem vinculados à perspectiva mecanicista (WICKEN, 1981, p. 75).

Como um comentário final, Wicken (1981, p. 75) ressalta a distinção da causa final aristotélica com a expansão do número de microestados, no sentido de que a primeira é produtora de forma¹⁴ e de unidade em sua operação, ao contrário do segundo que porta consigo a tendência de dissipação e de geração de multiplicidade. Nesse sentido, embora não haja uma compatibilidade total entre ambas, mas a expansão do número de microestados *serve* nas explicações da Termodinâmica Estatística como uma causa final, preenchendo o vazio explicativo entre causas eficientes estocásticas e suas consequências macroscópicas.

¹⁴ Bradie e Miller Jr (1984) esclarecem que a causa final aristotélica não se relaciona ao conceito de retrocausação (ou retrocausalidade), no qual um efeito precede sua causa no tempo e, portanto, um evento posterior afeta um anterior. A discussão de Schulman (2008) sobre o tema também é interessante.

6 OPOSIÇÕES À IRREVERSIBILIDADE DE BOLTZMANN

As refutações à perspectiva de Boltzmann sobre a irreversibilidade, que foi baseada na dinâmica mecanicista dos gases, foram levantadas desde a primeira hora, sendo um problema ainda aberto (DE VRUGT, 2021). Durante sua vida, Boltzmann respondeu a elas em discussões às vezes bastante acaloradas (DE GROOT, 1974, p. IX-X). Aqui apresentaremos as principais críticas que identificamos em nossa pesquisa quanto à proposta de Boltzmann sobre a irreversibilidade. Essa apresentação é estruturada em duas partes. A primeira delas abrange os intelectuais contemporâneos a Boltzmann e a segunda reúne as duas principais críticas inéditas desenvolvidas durante o século XX, a saber as críticas de Popper e Earman.

6.1 As críticas dos contemporâneos de Boltzmann

Lord Kelvin foi o primeiro a publicar uma objeção ao trabalho de Boltzmann de 1872, apresentando, dois anos depois, uma análise extensa e minuciosa das implicações de se reverter o movimento atômico (THOMPSON, 1874). Aparentemente, Boltzmann não valorizou essa crítica. Alguns anos mais tarde, concentrou-se em responder seu colega Loschmidt, que alegava ter encontrado uma contradição na derivação do Teorema- H desenvolvida por Boltzmann no segundo artigo em que apresentou o tema (BOLTZMANN, 1875). Tal contradição era de que a irreversibilidade predita se baseava na reversibilidade das colisões individuais (LOSCHMIDT, 1876; BOLTZMANN, 1877). Essa objeção, conhecida como Paradoxo de Loschmidt (BINDER, 2023), já havia sido debatida por Maxwell e Tait em 1867. Boltzmann prontamente percebeu a profundidade dessa crítica e sua estratégia para a resposta se baseou no fortalecimento do argumento de Loschmidt para apresentar uma resposta ainda mais robusta a fim de desencorajar críticas futuras que poderiam seguir na mesma linha.

Em sua resposta ao paradoxo de Loschmidt, Boltzmann sugeriu que a irreversibilidade dos processos no mundo real não era consequência das equações do movimento e da forma das forças intermoleculares, mas, consequência das condições iniciais. Para algumas condições iniciais não usuais o valor de E até poderia aumentar com o tempo¹⁵. Tais condições iniciais poderiam ser geradas pela reversão das velocidades de todas as moléculas em um estado de equilíbrio conhecido cuja evolução partiu de um estado de não equilíbrio.

¹⁵ Ver discussão da Seção 4.5, em especial a página 42 em que se comenta a definição de e e se discute a relação entre E , H e S .

Contudo, Boltzmann argumentou, que haveria infinitamente mais estados iniciais que evoluiriam com aumento de entropia, simplesmente porque haveria uma quantidade imensamente maior de estados possíveis que seriam estados de equilíbrio. Essa resposta foi explorada na Seção 4.4 desta monografia.

A explicação de Boltzmann não foi bem recebida na Alemanha, onde a Física experimental prevalecia e havia menor interesse em trabalhos teóricos como os de Maxwell e de Boltzmann. Além disso, aparentemente havia dificuldades de compreensão quanto aos trabalhos de Boltzmann devido a mudanças de perspectiva sem tornar isso explícito (KLEIN, 1973).

As respostas de Boltzmann ao paradoxo da recorrência parecem ter guiado seus próximos passos. No mesmo ano, 1877, Boltzmann estabeleceu a relação entre a entropia S – cujo conceito já estava estabelecido em termos macroscópicos desde Clausius (1865) – e a teoria de probabilidade, na forma de $S = k \ln \Omega$, considerando o número Ω de estados microscópicos possíveis correspondentes a um estado macroscópico do sistema¹⁶. A premissa dessa formulação foi a probabilidade igual *a priori* para todos os microestados do sistema.

Entre os pesquisadores ingleses, G. J. Stoney (1826-1911) investigando mais profundamente a condição de equilíbrio dos sistemas, chegou à conclusão de que a 2ª Lei da Termodinâmica não era uma lei dinâmica verdadeira e sugeriu, ainda, que o tempo não existe separado dos eventos (STONE, 1887). Pouco tempo depois, E. P. Culverwell (1855-1931) chegou à conclusão de que, a partir do princípio de reversibilidade, não seria possível provar de forma generalizada que uma coleção de partículas tenderia a obedecer uma distribuição de Boltzmann. Isso porque o movimento molecular seria, por natureza, irreversível, enquanto que a obediência às leis de Newton se realizava apenas coletivamente (CULVERWELL, 1890a, 1890b). Além dessas disputas acerca do tema, a questão continuava importante para a comunidade científica. Tanto que, na primeira metade dos anos 1890, a ênfase do debate se deu, de forma bem específica, em como a irreversibilidade é necessária para a prova do Teorema- H e também em torno das condições de validade da suposição de equilíbrio térmico e no uso da lei de distribuição de Maxwell-Boltzmann (HOLLINGER & ZEZEN, 1985).

No decorrer desse debate, Curverwell chegou a sugerir que as interações entre as moléculas e o éter seriam responsáveis por levar o sistema ao equilíbrio térmico. Nesse contexto, S. H. Burbury (1831-1911) propôs que a suposição crucial do Teorema- H é a independência estatística de duas moléculas em colisão, algo questionável no caso de colisões reversas. Para justificar essa suposição, Burbury postulou a existência de algum tipo de

¹⁶ Ver nota 13.

perturbação externa cujo efeito aleatório produziria a distribuição de coordenadas necessária para a diminuição de H (BURBURY, 1890). Em resposta, Boltzmann concordou que uma nova suposição, por ele nomeada de “desordem molecular”, era necessária para demonstrar que um sistema tende a evoluir irreversivelmente em direção ao equilíbrio térmico. Ainda que os movimentos fossem completamente aleatórios, haveria uma pequena probabilidade de que H pudesse eventualmente aumentar, tornando o Teorema- H estatisticamente verdadeiro. (BRUSH, 2006)

No entanto, a objeção mais notável à interpretação estatística de Boltzmann da 2ª Lei foi “a objeção do retorno” ou “a objeção da recorrência”. O filósofo Friedrich Nietzsche, nascido no mesmo ano que Boltzmann, trouxe à tona uma intuição a respeito da experiência da realidade, com finalidade eminentemente moral, e que se propagou para a compreensão da natureza como um todo: a ideia do eterno retorno (NIETZSCHE, 1882, 1883). Tal intuição foi formalizada em termos matemáticos pela primeira vez pelo matemático francês Henri Poincaré em 1890, quando provou que qualquer sistema dinâmico obrigado a se mover em um volume finito com energia total fixa deve eventualmente retornar a qualquer configuração inicial especificada (POINCARÉ, 1890). Seis anos depois, o filósofo e matemático alemão Ernst Zermelo também apresentou uma objeção ao trabalho de Boltzmann (ZERMELo, 1896). Diferentemente da perspectiva de Nietzsche, as objeções de Poincaré e Zermelo tinham por base o mecanicismo e a alegação de que, para espaço e energia finitos, haveria eventualmente uma recorrência exata do comportamento mecânico se a mecânica newtoniana era verdadeira, o que a tornaria incompatível com a 2ª Lei da Termodinâmica. Todavia, dado que o aumento da entropia foi repetidamente observado e era um fato empírico, então a incompatibilidade com a mecânica newtoniana sugeriria que esta última, assim como o mecanicismo, era falsa (BLACKMORE, 1995, p. 17; BRUSH, 2006).

A resposta de Boltzmann veio na forma de três artigos publicados entre 1896 e 1897, sendo dois dirigidos a Zermelo e um a Poincaré (BOLTZMANN, 1896a, 1896b, 1897). Em resumo, ele argumentou que não havia contradição entre o Teorema- H e o teorema da recorrência, pois o estado de equilíbrio macroscópico não é constituído por uma configuração única, mas por uma coleção da esmagadora maioria de configurações possíveis, caracterizada pela distribuição de Maxwell-Boltzmann. Estatisticamente, o retorno a algum estado inicial particular seria quase certo de ocorrer em função das flutuações do sistema microscópico para um tempo suficientemente longo. Na prática, porém, tal probabilidade de retorno seria tão pequena que seria necessário esperar um tempo imensamente longo antes de o sistema retornar ao estado inicial. Para Boltzmann, esses argumentos evidenciaram que a visão

mecanicista não levaria a qualquer consequência em desacordo com a experiência. Blackmore destaca o tom um tanto violento assumido por Boltzmann em um desses artigos:

Todos os paradoxos levantados contra a perspectiva mecanicista são, portanto, sem sentido e baseados em equívocos. Entretanto, se as dificuldades oferecidas não podem ser superadas pela clara compreensão dos teoremas da teoria dos gases, devemos, então, seguir a sugestão de Zermelo e decidir por desistir da teoria inteiramente. (BOLTZMANN, 1896, tradução nossa)

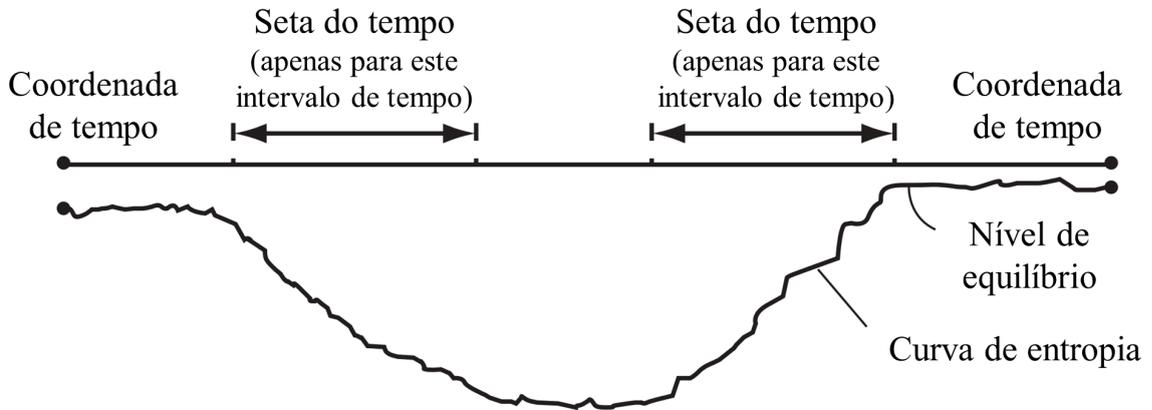
6.2 As críticas de Karl Popper e John Earman

Além das objeções contemporâneas a Boltzmann, encontramos oposições contundentes ao longo do século XX, principalmente advindas de Karl Popper e John Earman. As críticas de Popper são encontradas com mais clareza no seu artigo de 1956 e em sua autobiografia (POPPER, 1956; 1986). Para Popper, a “tragédia” de Boltzmann se manifestou na sua segunda réplica a Zermelo (BOLTZMANN, 1897) em que o físico seguiu a trilha do subjetivismo. As considerações de Popper podem ser organizados a partir de três enunciados logicamente encadeados que formam a base da crítica do epistemólogo inglês (POPPER, 1986, p. 167-169; PEREIRA JR., 1997):

1. Boltzmann teria abandonado uma direção temporal objetiva de forma que não existiria uma única direção do tempo objetiva; pelo contrário, para ele a direção de tempo é definida de modo subjetivo (ou “biológico”): os seres vivos “definem” a direção do tempo como a direção de aumento da entropia;
2. em função da teoria subjetiva acerca da direção do tempo, dizer que a “entropia aumenta na direção positiva do tempo” é uma tautologia; e
3. devido a essa tautologia, não se deve basear a direção do tempo na direção da entropia, mas sim em um outro critério: o de que é apenas no âmbito da experiência animal que o tempo admite uma seta, ou seja, o aumento da entropia é uma lei necessária, mas apenas subjetivamente operando na consciência humana em função do que assimila da sua realidade imediatamente, sem um critério absoluto de direção.

Popper inclusive ilustra a limitação do argumento de Boltzmann com um diagrama que reproduzimos a seguir:

Figura 6.1 Esquema apresentado por Karl Popper para argumentar em desfavor da anisotropia temporal boltzmanniana. Para Popper, a direção do tempo é apenas subjetiva em função de um contexto particular em que se experimenta um valor mais baixo de entropia sucedido por um mais alto.



Fonte: Adaptado de (POPPER, 1986).

Quanto a Earman, sua crítica em relação a irreversibilidade de Boltzmann, as propriedades do tempo se dão na estrutura espaço-tempo e não na ordem dos fenômenos. Nesse sentido, a noção de entropia baseada em probabilidades é irrelevante para determinar a ordem temporal e os fenômenos irreversíveis que não sejam consequências direta e exclusiva de leis físicas fundamentais. Suas considerações são expostas em um artigo em que ele reconhece que o problema da direção do tempo é aquele que causou mais controvérsia e mais emoção (EARMAN, 1974).

Esse artigo é estruturado em duas partes, em que na primeira ele esclarece o conceito de “direção de tempo”, que, segundo ele, teria sido objeto de uma discussão pouco produtiva e, na segunda, ele ataca o que foi tomado como dogma: a ideia de que irreversibilidade e entropia são cruciais para compreender o problema da direção do tempo. Nessa segunda parte, Earman dissocia a orientação temporal e processos macroscópicos irreversíveis, pois para ele, as leis e condições de contorno poderiam ser tais que as assimetrias temporais não existissem, e ainda assim faria sentido falar de uma direção do tempo. Para Pereira Jr (1997), apesar da rica análise conduzida por Earman, falta-lhe sustentação argumentativa para essa posição.

7 CONCLUSÃO

*Will some one say exactly what the H-theorem proves?*¹⁷
(E. P. Culverwell em *Nature*, v. 50, p. 617, 1894)

A pergunta em epígrafe sugere a existência de certa ansiedade acerca das consequências relativas ao Teorema-*H* de Boltzmann. De fato, como evidenciou-se aqui, a reflexão sobre a irreversibilidade confrontou o paradigma mecanicista dominante, exigindo esforços renovados para interpretar e compreender a estrutura da realidade sensível, desafiando físicos e filósofos desde meados do século XIX. Em função das limitações de extensão deste texto, pode-se dizer que este material tornou-se uma breve introdução ao tema, perpassando conceitos e encadeamentos históricos que o autor julgou fundamentais, que aparenta ser frutífero para ser continuado em estudos futuros, incluindo outros autores e outras abordagens sobre o tema. Revisitar a obra de Boltzmann para explorar a questão da irreversibilidade mostrou-se uma escolha acertada, porque esse físico-filósofo foi indubitavelmente um ponto de inflexão no desenvolvimento histórico do tema. Isso porque ele empreendeu esforços significativos para reconciliar a emergente termodinâmica com a estabelecida mecânica newtoniana, assim como para integrar o mundo macroscópico com o microscópico.

Nesse contexto, retomando-se os objetivos estabelecidos para o presente trabalho, chegou-se às seguintes conclusões fragmentárias:

- a) Primeiramente, destacou-se a centralidade do artigo de 1872 de Boltzmann na discussão sobre a irreversibilidade. Partindo da descrição do movimento molecular baseando-se em leis mecânicas reversíveis, Boltzmann desenvolveu uma concepção crucial da irreversibilidade, que pouco tempo depois seria associada ao aumento natural da entropia. Esse resultado fundamentaria, com base no mecanicismo, a existência de direções preferenciais para os processos que se desenvolvem no mundo concreto.
- b) Em segundo lugar, a compreensão do conceito de irreversibilidade de Boltzmann impeliu a uma apresentação mínima, que pode suprimir quase totalmente o formalismo matemático, dos conceitos de espaço de fases e de mecanicismo, que estavam integrados de forma significativa nas abordagens do físico.
- c) Em terceiro lugar, a obra de Boltzmann sobre a irreversibilidade produziu opositores desde cedo. Muitos deles sendo antigos colegas, como Loschmidt e Poincaré, e outros bem posteriores como Karl Popper e John Earman. À época de seus

¹⁷ Alguém vai dizer exatamente o que o Teorema-*H* prova?

contemporâneos a discussão abrangia principalmente a identificação de inconsistências e/ou paradoxos na teoria molecular que se estabelecia. Já os filósofos mais recentes, passaram a abordar a questão da irreversibilidade sob a perspectiva da subjetividade e também a possibilidade de desvincular a noção de irreversibilidade da noção de direção do tempo.

- d) Oportunizou-se também uma aproximação entre a obra de Boltzmann e a obra de Aristóteles. Em Aristóteles a noção de causa final pareceria estabelecer uma relação forte com a produção de entropia dos processos de interesse. Contudo tal relação não é plena, uma vez que a produção de entropia não é a *causa* pela qual um processo evolui, mas uma consequência do desenvolvimento do processo. Não se pode negar, no entanto, a similaridade entre a causa final e produção de entropia; e
- e) Quanto às contribuições da obra de Boltzmann para a Filosofia da Natureza, nossa investigação evidenciou maior destaque para a conciliação entre a 2ª Lei da Termodinâmica e o princípio da entropia máxima com o mecanicismo e o atomismo, de forma que foi justificada a experiência da irreversibilidade (ou uma direção temporal bem definida) para os processos que se realizam na realidade concreta. Além disso, sua abordagem estatística para fundamentar a validade lei da natureza macroscópica foi essencial estabelecer uma interpretação unificada da realidade abrangendo o mundo microscópico e o mundo macroscópico.

Espera-se que o presente trabalho possa ser continuado em outras pesquisas, uma vez que o manejo das referências utilizadas revelou a riqueza científico-filosófica do assunto. Em especial, o autor pretende incorporar a essa discussão a obra de Henri Bergson objetivando as possibilidades de contato entre o seu conceito de tempo e a noção de entropia, tão cara à Termodinâmica. Aparentemente essa interface ainda foi pouco explorada.

REFERÊNCIAS

BAILLY, J. S. **Lettres sur l'Origine des Sciences, et sur Celle des Peuples de l'Asie**. Paris: Chez M. Elmesly, 1777. Disponível em: https://archive.org/details/bub_gb_bWhjVxajXk0C

BALIAN, R. **From Microphysics to Macrophysics: Methods and Applications of Statistical Physics**, v. 1. Berlin: Springer, 1991. ISBN 978-354054694.

BINDER, P. M. The reversibility paradox: role of the velocity reversal step. **International Journal of Theoretical Physics**, v. 62, p. 200, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10773-023-05458-x>

BLACKMORE, J. (Ed.) **Ludwig Boltzmann: his later life and philosophy, 1900-1906: Book One: a documentary history**. Dordrecht: Springer Science + Business Media, 1995. ISBN 978-90-481-4492-1.

BOHM, D. **Causalidade e acaso na física moderna**. Tradução de Rodolfo Petrônio. Rio de Janeiro: Contraponto, 2015. ISBN 978-85-7866-112-0

BOLTZMANN, L. Über die Bewegung der Elektrizität in krummen Flächen. **Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften**. v. 52, p. 214–221, 1865. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139381420.002>

BOLTZMANN, L. Über die mechanische Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie. **Wiener Berichte**. v. 53, p. 195–220, 1866. In: HASENÖHRL, F. **Wissenschaftliche Abhandlungen**, v. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, p. 9–33. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139381420.003>

BOLTZMANN, L. Studien über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten. **Wiener Berichte**. v. 58, p. 517–560, 1868. In: HASENÖHRL, F. **Wissenschaftliche Abhandlungen**, v. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, p. 49–96. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139381420.006>

BOLTZMANN, L. Über das Wärmegleichgewicht zwischen mehratomigen Gasmolekülen. **Wiener Berichte**. v. 63, p. 397–418, 1871a. In: HASENÖHRL, F. **Wissenschaftliche Abhandlungen**, v. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, p. 237–258. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139381420.019>

BOLTZMANN, L. Einige allgemeine Sätze über Wärmegleichgewicht. **Wiener Berichte**. v. 63, p. 679–711, 1871b. In: HASENÖHRL, F. **Wissenschaftliche Abhandlungen**, v. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, p. 259–287. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139381420.020>

BOLTZMANN, L. Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gas-molekülen. **Wiener Berichte**, v. 66, p. 275–370, 1872. In: HASENÖHRL, F. **Wissenschaftliche Abhandlungen**, v. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, p. 259–287. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139381420.023> Tradução em: BRUSH, S. G. Further Studies on the Thermal Equilibrium of Gas Molecules. **The Kinetic Theory of Gases: An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary**. London: Imperial College Press, 2003. p. 262–349. DOI: https://doi.org/10.1142/9781848161337_0015

BOLTZMANN, L. Über das Wärmegleichgewicht von Gasen, auf welche äußere Kräfte wirken. **Wiener Berichte**, v. 72, p. 427–457, 1875. *In*: HASENÖHRL, F. **Wissenschaftliche Abhandlungen**, v. 2. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, p. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139381437.001>

BOLTZMANN, L. Über die Beziehung eines allgemeinen mechanischen Satzes zum zweiten Hauptsatze der Wärmetheorie. **Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften (II)**, v. 75, p. 67–73, 1877. *In*: BRUSH, S. G. **Kinetische Theorie**, v. 2. Berlin: Akademie-Verlag, 1970, p. 240–247. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-322-84986-1_5. Tradução em: BRUSH, S. G. On the Relation of a General Mechanical Theorem to the Second Law of thermodynamics. **The Kinetic Theory of Gases: An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary**. London: Imperial College Press, 2003. p. 362–367. DOI: https://doi.org/10.1142/9781848161337_0017

BOLTZMANN, L. Ueber die Eigenschaften monocyclischer und anderer damit verwandter Systeme. **Sitzungsberichte Akademie Wissenschaften in Wien, Mathematisch-Naturwissenschaftliche**, v. 90, p. 231–245, 1884.

BOLTZMANN, L. Ueber die Eigenschaften monocyclischer und anderer damit verwandter Systeme. **Journal für die reine und angewandte Mathematik**, v. 98, p. 68–94, 1885. DOI: <https://doi.org/10.1515/crll.1885.98.68>

BOLTZMANN, L. Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie, 1886. *In*: **Populäre Schriften**. Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1905. p. 25–50. Tradução em: BOLTZMANN, L. **Escritos Populares**. São Leopoldo: Unisinos, 2004. ISBN 85-7431-236-3.

BOLTZMANN, L. Entgegnung auf die wärmetheoretischen Betrachtungen des Hrn. Ernst Zermelo. **Annalen der Physik**, v. 57, p. 773-784, 1896. *In*: BRUSH, S. G. Reply to Zermelo's Remarks on the Theory of Heat. **The Kinetic Theory of Gases: An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary**. London: Imperial College Press, 2003. p. 392–402. DOI: https://doi.org/10.1142/9781848161337_0021

BOLTZMANN, L. Zu Hrn. Zermelos Abhandlung 'Über die mechanische Erklärung irreversibler Vorgänge', **Annalen der Physik**, v. 60, p. 392-398, 1897a. *In*: BRUSH, S. G. On Zermelo's Paper 'On the Mechanical Explanation of Irreversible Processes'. **The Kinetic Theory of Gases: An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary**. London: Imperial College Press, 2003. p. 412–419. DOI: https://doi.org/10.1142/9781848161337_0023

BOLTZMANN, L. Über einen mechanischen Satz Poincaré's, **Wiener Berichte**, v. 106, p. 12-20, 1897b. *In*: HASENÖHRL, F. **Wissenschaftliche Abhandlungen**, v. 3. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, p. 587–595. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139381444.057>

BOLTZMANN, L. Über die Prinzipien der Mechanik, 1902. *In*: **Populäre Schriften**. Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1905. p. 308-337. Tradução em: BOLTZMANN, L. **Escritos Populares**. São Leopoldo: Unisinos, 2004. ISBN 85-7431-236-3.

BOLTZMANN, L. Ein Antrittsvortrag zur Naturphilosophie, 1903. *In: Populäre Schriften*. Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1905. p. 338–344. Tradução em: BOLTZMANN, L. *Escritos Populares*. São Leopoldo: Unisinos, 2004. ISBN 85-7431-236-3.

BOLTZMANN, L. **Theoretical Physics and Philosophical Problems**. Tradução: Paul Foulkes. Dordrecht: Reidel, 1974. ISBN 978-90-277-0250-0.

BOLTZMANN, L. **Escritos Populares**. Organização e Tradução: Antonio A. P. Videira. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2004. ISBN 978-85-7431-236-3.

BORNHEIM, G. A. **Os Filósofos Pré-Socráticos**. São Paulo: Cultrix, 2000.

BRADIE, M.; MILLER JR, F. D. Teleology and natural necessity in Aristotle. **History of Philosophy Quarterly**, v. 1, p. 133–146, 1984. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/27743674>

BRICMONT, J. Science of chaos or chaos in science? **Annals of the New York Academy of Sciences**. v. 775, n. 1, p. 131–175, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1996.tb23135.x>

BRUSH, S. G. Ludwig Boltzmann. *In: GILLISPIE, C. C. (ed.) Dictionary of Scientific Biography*, v. 1. Charles Scribner's Sons: New York, 1970. Tradução em português em: BENJAMIN, C. **Dicionário de Biografias Científicas**, v. 1, 2. ed. Contraponto: Rio de Janeiro, 2009.

BRUSH, S. G. Ludwig Boltzmann and the Foundations of Natural Science. *In: FASOL-BOLTZMANN, I. M.; FASOL, G. L. Ludwig Boltzmann (1844-1906): Zum hundertsten Todestag*. Wien: Springer, 2006. p. 65–80. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-211-47311-5_2

BURBURY, S. H. XXXV. On some problems in the kinetic theory of gases. **Philosophical Magazine - Series 5**, v. 30, p. 298–317, 1890. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786449008620029>

CERCIGNANI, C. **Ludwig Boltzmann: the man who trusted atoms**. Oxford: Oxford University Press, 1998. ISBN 978-0198501541.

CLAUSIUS, R. Ueber eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie. **Annalen der Physik und Chemie**, n. 12, p. 481–506, 1854. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.18541691202>

CLAUSIUS, R. XI. On the nature of the motion which we call heat. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 14, p. 108–127, 1857. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786445708642360>

CLAUSIUS, R. Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie. **Annalen der Physik und Chemie** v. 125, p. 353–400, 1865. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.18652010702>

CULVERWELL, E. P. Note on Boltzmann's kinetic theory of gases, and on Sir W. Thomson's address to Section A, British Association, 1884. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 30, p. 95–99, 1890a. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786449008619989>

CULVERWELL, E. P. Possibility of irreversible molecular motions. **Report of the British Association for the Advancement of Science**, v. 60, p. 744, 1890b. Disponível em: <https://www.biodiversitylibrary.org/item/93461>. Acesso em 22 jun. 2024.

DALTON, J. **A New System of Chemical Philosophy**. Part I. Manchester: S. Russel, 1808. Disponível em: <https://books.google.fr/books?id=7je4AAAAIAAJ>

DAHMEN, S. R. A obra de Boltzmann em Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 28, n. 3, p. 281–295, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172006000300005>

DE GROOT, S. R. Foreword. In: BOLTZMANN, L. **Theoretical Physics and Philosophical Problems**. Tradução: Paul Foulkes. Dordrecht: Reidel, 1974. ISBN 978-90-277-0250-0.

DENBIGH, K. G. The many faces of irreversibility. **The British Journal for Philosophy of Science**. v. 40, p. 501–518, 1989. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/687738>

DUGAS, R. **La Théorie Physique au Sens de Boltzmann et Ses Prolongements Modernes**. Neuchâtel: Le Griffon, 1959. Disponível em: <https://archive.org/details/TheoriePhysique>. Acesso em: 25 jul. 2023.

DUHEM, P. L'Évolution des Théories Physiques du XVII^e siècle jusqu'à nos jour. **Revue des Questions Scientifiques**, v. 20, p. 462–499, 1896. DOI: https://doi.org/10.1163/9789004246522_007

DUHEM, P. **L'Évolution de la Mécanique**. Paris: Librairie Scientifique A. Hermann, 1905a. Disponível em: <https://archive.org/details/lvolutiondelam00duheuft>

DUHEM, P. Physique de croyant. **Annales de philosophie chrétienne**. t. I, p. 44–67 e p. 133–159, 1905b. Disponível em: <https://books.openedition.org/enseditions/6925>

EARMAN, J. An Attempt to Add a Little Direction to “The Problem of the Direction of Time”. **Philosophy of Science**, v. 41, p. 15–47, 1974. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/187375>. Acesso em: 26 mai. 2024.

FERREIRA, J. Você conhece Henriette von Aigentler? **Acesse News**. Disponível em <https://www.acessenews.com.br/2024/05/01/voce-conhece-henriette-von-aigentler/>. Acesso em 01 mai. 2024.

GALLAVOTTI, G. Ergodicity, Ensembles, Irreversibility in Boltzmann and Beyond. **Journal of Statistical Physics**, v. 78, n. 5/6, p. 1571–1589, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02180143>

HAMILTON, W. R. XV. On a general method in dynamics; by which the study of the motions of all free systems of attracting or repelling points is reduced to the search and differentiation

of one central relation, or characteristic function. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. v. 124, p. 247–308, 1834. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1834.0017>

HAMILTON, W. R. VII. Second essay on a general method in dynamics. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. v. 125, p. 95–144, 1835. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1835.0009>

HOLLINGER, H. B.; ZENZEN, M. J. **The Nature of Irreversibility**. Dordrecht: D. Reidel, 1985. ISBN 978-94-010-8897-8.

HUANG, K. **Statistical Mechanics**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1987. ISBN: 0-471-81518-7

JACOBI, C. G. J. **Vorlesungen über Dynamik**. Berlin: Georg Reimer, 1866.

KLEIN, M. J. The Development of Boltzmann's Statistical Ideas. *In*: COHEN, E. G. D. (ed.) **The Boltzmann Equation: Theory and Applications**. Wien: Springer-Verlag, 1973. p. 53–106.

LOSCHMIDT, J. Über den Zustand des Warmgleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft. **Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu Wien**, v. 73, p. 128–142, 1876.

MARGENAU, H. **The Nature of Physical Reality**. New York: McGraw-Hill, 1950.

MARTINÁS, K. Aristotelian Thermodynamics. *In*: MARTINÁS, K.; ROPOLYI, L.; SZEGEDI, P. **Thermodynamics: history and philosophy: facts, trends, debates**. Singapura: World Scientific, 1991.

MAXWELL, J. C. V. Illustrations of the dynamical theory of gases. - Part I. On the motions and collisions of perfectly elastic spheres. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 19, p. 19–32, 1860. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786446008642818>

MAXWELL, J. C. On the Dynamical Theory of Gases. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 157, p. 49–88, 1867. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstl.1867.0004>

MAXWELL, J. C. **Theory of Heat**. Londres: Longman, Green, 1871.

McQUARRIE, D. A. **Statistical Mechanics**. New York: University Science Books, 2000. ISBN 978-1891389153.

NOLTE, D. D. The tangled tale of phase space. **Physics Today**. v. 63, n. 4., p. 33–38, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3397041>

PEREIRA JR., A. **Irreversibilidade física e ordem temporal na tradição boltzmanniana**. São Paulo: UNESP, 1997. ISBN 85-7139-163-7.

PESSOA JR, O. Mecânica estatística e irreversibilidade: Teorema-H. **Filosofia da Física Clássica**. São Paulo: USP, 2024. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8511507/mod_resource/content/2/FiFi-22-Cap24-Irreversibilidade-Teorema-H.pdf. Acesso em 03 ago. 2024.

POINCARÉ, H. Sur le problème des trois corps et les équations de dynamique. **Acta Mathematica**, v. 13, p. 1–270, 1890. *In*: BRUSH, S. G. On the Three-body Problem and the Equations of Dynamics. **The Kinetic Theory of Gases: An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary**. London: Imperial College Press, 2003. p. 368–376. DOI: https://doi.org/10.1142/9781848161337_0018

POPPER, K. **Autobiografia Intelectual**. São Paulo: Cultrix, 1986. ISBN 85-3160-434-6.

PRIGOGINE, I. **As Leis do Caos**. São Paulo: UNESP, 2002. ISBN 85-7139-416-4.

RUELLE, D. **Acaso e Caos**. 3. ed. São Paulo: UNESP, 2001. ISBN 978-8571390515.

SCHULMAN, L. S. Influence of the future. **Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 39, p. 819–829, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2008.02.004>

SKLAR, L. **Physics and Chance: philosophical issues in the foundations of Statistical Mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. ISBN 0-521-44055-6.

SOUZA FILHO, O. M. O programa metafísico de Pierre Duhem: Analogia entre a Termodinâmica Geral e a Física Aristotélica. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL PRINCÍPIA, 5, 2009, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: NEL/UFSC, 2009. p. 123-132.

STONE, G. J. Curious consequences of a well-known dynamical theory. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 23, p. 544–547, 1887. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786448708628050>

TE VRUGT, M. The five problems of irreversibility. **Studies in History and Philosophy of Science**. v. 87, p. 136–146, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2021.04.006>

THOMSON, W. On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy. **London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 4, p. 304–306, 1852. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786445208647126>

THOMSON, W. The Kinetic Theory of the Dissipation of Energy. **Proceedings of the Royal Society of Edinburgh**, v. 8, p. 325–334, 1874. *In*: BRUSH, S. G. **The Kinetic Theory of Gases: An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary**. London: Imperial College Press, 2003. p. 350–361. DOI: https://doi.org/10.1142/9781848161337_0016

VIDEIRA, A. A. P. **Atomisme épistémologique et pluralisme théorique dans la pensée de Boltzmann**. 1992. Tese (Doutorado em Epistemologia e História das Ciências) – Université Paris VII, Paris, 1992.

VIDEIRA, A. A. P. Apresentação aos escritos populares de Ludwig Boltzmann. *In*: BOLTZMANN, L. **Escritos Populares**. São Leopoldo: Unisinos, 2004. ISBN 85-7431-236-3.

WICKEN, J. S. Causal Explanations in Classical and Statistical Thermodynamics. **Philosophy of Science**, v. 48, p. 65–77, 1981. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/187068>

WILSON, A. D. Boltzmann's philosophical education and its bearing on his mature scientific epistemology. *In*: BATTIMELLI, G.; GARCIA, M.; KRESTEN, O. (org.) INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LUDWIG BOLTZMANN, 1989, Roma. **Proceedings** [...]. Viena: Verlag der Osterreichischen Akademie der Wissenschaften, 1993. p. 57–69. ISBN 978-3700119845.

ZERMELO, E. Über einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie. **Annalen der Physik**, v. 57, p. 485–494, 1896. Tradução em: BRUSH, S. G. On a Theorem of Dynamics and the Mechanical Theory of Heat. **The Kinetic Theory of Gases: An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary**. London: Imperial College Press, 2003. p. 382–391. DOI: https://doi.org/10.1142/9781848161337_0020