

ALFREDO PEREIRA JÚNIOR

TEMPO E IRREVERSIBILIDADE:
UMA CRÍTICA DA TRADIÇÃO BOLTZMANNIANA

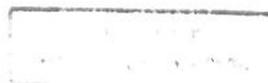
Tese de Doutorado, apresentada ao
Departamento de Filosofia, do
Instituto de Filosofia e Ciências
Humanas, da Universidade Estadual
de Campinas, sob a Orientação do
Prof. Dr. MICHAEL WRIGLEY.†

Michael Wrigley

Este exemplar corresponde à
redação final da dissertação
ou tese defendida e aprovada
pela Comissão Julgadora em

21/09/94

CAMPINAS
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
1994



A meu pai, Alfredo Pereira,
com quem aprendi sobre a
força da vontade, que se
revelou essencial na reali-
zação desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

- . Professor Steven R. D. French, pela ampla orientação recebida, durante o curso de Doutorado, e pela atenção dispendida mesmo após seu afastamento da UNICAMP;
- . Dr. Osvaldo Pessoa Júnior, pelos comentários críticos e sugestões, e, especialmente, pelo decisivo apoio à elaboração do Capítulo 4;
- . Professores Michel O. Ghins e Roberto de A. Martins, pela participação no Exame de Qualificação (julho de 1988), pelas críticas e sugestões apresentadas na ocasião (ao professor Ghins, também agradeço a leitura e comentários à primeira versão dos capítulos 1, 2 e 3);
- . Professores Elias H. Alves e Michael Wrigley, por assumirem sucessivamente minha orientação, junto ao Departamento de Filosofia, após a saída do Professor French;
- . Dra. Katya M. Aurani, pelos comentários importantes para o fechamento da tese;
- . Professor Celson Pereira, pela ajuda didática para o entendimento do "Teorema-H", no texto de Boltzmann;

- . Àqueles que discutiram comigo aspectos da tese, dentre os quais os Professores Silvio Chibeni, Newton Bernardes, Michel Debrun e Maria Therezinha Tornero;
- . Colegas e Professores do curso de Doutorado em Filosofia da UNICAMP;
- . Colegas e funcionários do Departamento de Educação da UNESP/Botucatu, especialmente os funcionários que digitaram as diversas versões do texto: Hulda Pulquéria, Tânia Espernega e Sergio Vicentini;
- . Ao CNPQ, por Bolsa de Doutorado (1987), e à CAPES, por Auxílio-Deslocamento (1989 a 1993).

ÍNDICE

INTRODUÇÃO.....	1
CAP. I - A ESTRUTURA DO TEMPO E OS PROCESSOS FÍSICOS	
1. O Tempo e os Processos Temporais.....	11
2. Modelos do Tempo e dos Processos Temporais.....	16
3. Concepção "Biológica" da Ordem Temporal 'A Priori'.....	22
4. Ordem Temporal e Ordem dos Fenômenos Físicos em Kant.....	30
5. A Direção dos Processos Físicos Via Variação da Entropia: Reversibilidade e Irreversibilidade.....	36
6. Explicações Científicas da Irreversibilidade Macroscópica.....	46
7. A Afinidade entre Ordem Temporal e Ordem dos Processos Físicos.	50
CAP. II - A TRADIÇÃO BOLTZMANNIANA	
1. O Projeto de Explicação Mecânica Molecular da 2ª Lei da Termodinâmica.....	58
2. O "Teorema-H".....	63
3. A Objeção de Loschmidt, e a Resposta de Boltzmann.....	70
4. A Abordagem Probabilística da 2ª Lei.....	73
5. A Simetria Temporal da Curva da Entropia Probabilística.....	77
6. A Objeção de Zermelo e a Réplica de Boltzmann.....	82

7. A Hipótese Cosmológica.....	86
8. O Problema da Direção do Tempo em Boltzmann.....	89
9. A Reformulação de Reinchenbach.....	94
10. A Reformulação de Grünbaum.....	112

CAP. III - CRÍTICA DA IRREVERSIBILIDADE PROBABILÍSTICA

1. Crítica de Popper ao Subjetivismo de Boltzmann.....	125
2. "Paradoxos" da Entropia Probabilística com Relação às Observações Humanas.....	131
2.1. O "Paradoxo" da Assimetria.....	131
2.2. O "Paradoxo" da Não-Recorrência.....	140
2.3. O "Paradoxo" do Macro-Estado Inicial.....	143
2.4. O "Paradoxo" da Rede de Mistura.....	148
3. O Problema da "Contra-Indução".....	151
4. Ordem Temporal e Probabilidades.....	163
5. A Heresia de Earman.....	174
6. Probabilidade, Incerteza e Irreversibilidade	180
7. Ilusão e Antropomorfismo.....	185
8. A Possibilidade de Explicações Alternativas à Tradição Boltzmanniana.....	189

CAP. IV - CRÍTICA DA IRREVERSIBILIDADE DETERMINISTA

1. Breve Revisão do "Teorema-H".....	200
--------------------------------------	-----

2. Condições para a Explicação da Irreversibilidade Estrita pelo "Teorema-H".....	212
3. O Debate Histórico Sobre o Princípio Extramecânico.....	227
3.1. As Suposições Feitas Pelos Pioneiros da Teoria Cinética...	227
3.2. O Debate na Revista Nature.....	230
3.3. A "Desordem Molecular" de Boltzmann.....	236
3.4. A Reformulação do "Teorema" pelos Ehrenfests, e o Princípio de "Caos Molecular".....	242
4. Interpretação Determinista do "Teorema-H".....	249
4.1. Alternativas de Interpretação do "Teorema".....	249
4.2. Possibilidade de Entendimento Determinista da Distribuição de Velocidades.....	254
4.3. Possibilidade de Entendimento Determinista das Suposições Extramecânicas.....	263
4.4. O Princípio das Sequências Apropriadas.....	271
CONCLUSÃO.....	282
BIBLIOGRAFIA.....	291

INTRODUÇÃO

A termodinâmica do Séc. XIX propiciou a constatação do fenômeno da irreversibilidade: em sistemas macroscópicos isolados a entropia nunca diminui, em quantidade suficiente para a realização de trabalho. Tornou-se assim patente a impossibilidade da realização de moto-contínuos, e o aumento da entropia foi associado a uma direção temporal dos processos físicos. Do estudo do fenômeno acima se derivou o problema da irreversibilidade, de se explicar a razão pela qual os processos físicos se comportam de tal maneira. A termodinâmica, enquanto teoria descritiva dos processos macroscópicos, não teria meios de oferecer tal explicação; isso só seria possível mediante a elucidação dos mecanismos microscópicos subjacentes.

Ludwig Boltzmann elaborou, em 1871/1872, uma teoria a respeito do processo de colisões entre as moléculas de um gás - o posteriormente intitulado "Teorema-H" - que se julgou constituir uma explicação mecanística do problema da irreversibilidade. Contudo, frente à dificuldade de justificação de suposições extramecânicas utilizadas na demonstração, e frente às objeções apresentadas por Loschmidt e Zermelo, ele veio a optar por uma explicação assumidamente

probabilística do aumento da entropia, entendido como evolução para (macro) estados mais prováveis. Em 1896, em suas influentes *Leituras Sobre a Teoria dos Gases*, ele reinterpretou o "Teorema-H" como sendo uma teoria probabilística, e realizou a hoje difundida associação da direção dos processos físicos, dada pelo sentido de evolução da entropia probabilística nos sistemas isolados de uma certa região do universo, com a direção do tempo nessa mesma região.

A solução final de Boltzmann para o problema da irreversibilidade, que possui caráter científico e filosófico, originou uma corrente de pensamento na filosofia da temporalidade (por esta expressão entendemos tanto a filosofia do próprio tempo, quanto a filosofia dos processos que ocorrem no tempo), que chamamos de "tradição boltzmanniana". Hans Reichenbach e Adolf Grünbaum foram os principais continuadores e aperfeiçoadores, dessa visão da irreversibilidade e do tempo, contribuindo para que se tornasse atualmente a mais aceita, entre filósofos da ciência e cientistas.

Comungamos com a "tradição boltzmanniana" de pressupostos semelhantes, na filosofia da temporalidade. Assim como foi explicitado por Grünbaum, acreditamos que o 'vir-a-ser' temporal ('temporal becoming') teria realidade puramente psicológica, o que não impediria a formulação de uma teoria da

temporalidade. Nessa teoria, o tempo possui uma "direção" (é "anisotrópico"), a qual está fortemente correlacionada com características dos processos naturais, supondo uma efetiva transformação dos seres no tempo, mas não implicando que as alterações sejam causadas pela mudança de localização temporal. Em um aprofundamento dessa abordagem filosófica, julgamos serem necessários critérios mais rigorosos, para a formulação de uma teoria substantiva da temporalidade. Primeiramente, que a irreversibilidade dos processos físicos seja estrita, isto é, que a diminuição da entropia (em quantidades utilizáveis, em sistemas quase-isolados) não seja algo meramente improvável, sob certas condições particulares, mas que exista uma condição universal, na natureza, que a torne impossível. Em segundo lugar, que a ordem temporal seja assimétrica, como a ordem dos números reais, na "reta real" utilizada para a representação do tempo na física.

A solução final de Boltzmann para o problema da irreversibilidade, por sua vez, possui dois pilares:

- a) a explicação probabilística da irreversibilidade macroscópica, julgada como sendo a única, ou a melhor explicação possível;

b) a concepção reducionista do tempo, segundo a qual sua "direção" seria derivada da direção da evolução da entropia probabilística em sistemas fechados, tendo como consequência a reversão do tempo, caso ocorra uma evolução para estados de menor entropia. Essa concepção não enseja, portanto, uma verdadeira assimetria do tempo.

O presente trabalho tem por objetivo realizar uma crítica filosófica da linha de pensamento adotada pela tradição boltzmanniana, sob dois aspectos. No aspecto destrutivo, tentamos mostrar que a concepção probabilística da evolução da entropia, adotada ou não juntamente com a concepção reducionista do tempo, além de não explicar o fenômeno da irreversibilidade, conduz a diversas consequências filosoficamente implausíveis. No aspecto construtivo, defendemos a viabilidade de uma explicação não probabilística da evolução da entropia, semelhante, em linhas gerais, à teoria de Boltzmann de 1872, reconstruída pelos Ehrenfests, em seu influente trabalho de 1912. Acreditamos que esse tipo de explicação poderia dar conta da concepção estrita da irreversibilidade, que seria a mais adequada, frente à relação de ordem assimétrica adotada para a coordenada temporal na física.

As tarefas a que nos propomos demandam um extenso esforço argumentativo, que passa pela revisão de teorias já bem conhecidas, e pela proposição de hipóteses interpretativas

originais; pela referência a episódios da história da ciência, e pela tentativa de sistematização de conceitos essenciais para a análise dos temas tratados. Esse esforço se distribui em quatro capítulos, de cujos conteúdos faremos um breve resumo.

Em nosso primeiro capítulo partimos de uma breve enumeração dos principais problemas da filosofia da temporalidade, e do recorte de nossa temática. Preocupamo-nos com a assimetria do tempo (em particular com a assimetria da coordenada temporal utilizada na física), e sua relação com a reversibilidade ou irreversibilidade dos processos físicos (i. e., de processos que ocorrem no tempo, e cuja descrição requer o uso da coordenada temporal). Adotamos uma concepção cognitivista da coordenada temporal, segundo a qual ela constitui um esquema "a priori", porém corrigível, utilizado por um agente cognitivo, para coordenar suas percepções e ações no ambiente em que vive. Paralelamente, adotamos uma concepção naturalista dos processos temporais, segundo a qual a existência ou não de irreversibilidade dos processos físicos é uma questão "a posteriori", a ser respondida de acordo com as teorias científicas, e as informações disponíveis perceptualmente. Identificamos, finalmente, a existência de uma necessidade, de caráter pragmático, de harmonia entre a ordem temporal "a priori" e a direção dos processos físicos determinada "a posteriori": ou são ambas simétricas, ou são

ambas não-simétricas (i.é., assimétricas ou anti-simétricas). Enquanto a tradição boltzmanniana tendeu a optar pela primeira alternativa (apesar de eventualmente aparentar uma adoção da segunda), nossas pressuposições filosóficas nos conduzem a buscar uma formulação e justificação mais consistentes da segunda alternativa

No segundo capítulo fazemos uma revisão de idéias da tradição boltzmanniana, em seus três autores mais eminentes. Na revisão das idéias do fundador consultamos largamente os estudos de Stephen Brush, cujo trabalho de tradutor e historiador da ciência da segunda metade do Sec. XIX não pode ser subestimado; os comentários de Martin Klein e outros, e dois trabalhos de Boltzmann, que julgamos serem os mais relevantes para nossa temática: **Estudos Adicionais Sobre o Equilíbrio Térmico das Moléculas de Gases (1872)** e **Leituras Sobre a Teoria dos Gases (1896)** (ambos em traduções feitas por Brush). Nossa revisão de Reichenbach se baseia em sua obra póstuma **A Direção do Tempo (1956)**, onde se encontram suas principais contribuições, em especial a hipótese dos "sistemas desmembrados" ("branch systems"), que torna mais clara a dependência da explicação probabilística da irreversibilidade macroscópica frente ao estado inicial dos sistemas considerados. Para expôr a contribuição de Grünbaum nos

valemos principalmente de seu portentoso *Problemas Filosóficos do Espaço e do Tempo* (1972), onde as concepções elaboradas pela tradição encontraram sua forma mais acabada, e, possivelmente, seus limites.

Em nosso terceiro capítulo compilamos, ampliamos, e eventualmente rebatemos, objeções filosóficas postas às teses principais da tradição, como a crítica de Popper ao suposto subjetivismo de Boltzmann; a falha no argumento de Boltzmann em favor da colossal improbabilidade da observação de uma diminuição da entropia; o raciocínio "contra-indutivo", que infere a existência de regiões do universo, de tamanho equivalente à região observável, nas quais a entropia nunca aumenta; a impropriedade semântica, já apontada por Zermelo e posteriormente reforçada por Carnap, de associação entre a entropia probabilística e uma ordem temporal estritamente assimétrica; proposições de Earman, de que a orientação temporal do espaço-tempo relativístico precederia à ordem temporal derivada da evolução da entropia probabilística, e que considerações a respeito de irreversibilidade e entropia seriam pouco relevantes para o problema de ordem temporal; implausibilidade de uma explicação da irreversibilidade pela incerteza, no caso de uma interpretação subjetiva das probabilidades, e outras. A eficácia que atribuímos a uma parte considerável dessas objeções, nos impele a estudar a

possibilidade de uma explicação não probabilística da evolução da entropia, aliada a uma concepção não reducionista do tempo.

No quarto capítulo, analisamos a possibilidade de uma explicação determinista da irreversibilidade estrita, a partir de uma análise do trabalho de Boltzmann de 1872. Reavaliando as conseqüências da objeção de Loschmidt, identificamos uma falha na explicação da irreversibilidade oferecida pelo "Teorema-H", e reinterpretemos seu conteúdo intuitivo, de modo a que ele possa constituir uma explicação determinista da irreversibilidade estrita. Uma reformulação não-probabilística do "Teorema" requeriria então uma justificativa puramente epistêmica do uso da função de distribuição probabilística, e, principalmente, uma reformulação das duas condições e do princípio extramecânico utilizados por Boltzmann. Nos propomos em seguida a delinear o tipo de princípio extramecânico que julgamos adequado para a explicação determinista da irreversibilidade estrita. Retomamos a abordagem feita pelos Ehrenfests em 1912, e a hipótese de "caos molecular", que nos remete à necessidade de especificação exata dos tipos de agrupamentos moleculares que produzem os tipos de colisões previstas no "Teorema-H". Consideramos, assim como propôs Thomas Kuhn, que tal hipótese teria um caráter factual, e poderia ser apoiada por fontes independentes de evidência, ao longo do desenvolvimento

da física. Contudo, ela deveria ainda ser ampliada, de modo a dar conta das chamadas "flutuações" microscópicas; sob este aspecto, a interação entre a dinâmica molecular e os observadores macroscópicos também deveria ser levada em conta. Propomos então que se formule um princípio menos restritivo, ao qual denominamos provisoriamente de "Princípio das Sequências Apropriadas".

Nosso trabalho sofre de inúmeras limitações, algumas das quais devem ser aqui registradas: a) não discutimos a 2a. Lei da Termodinâmica no interior da própria Termodinâmica (onde sua interpretação não é ponto pacífico); b) discutimos a irreversibilidade em um modelo teórico clássico, i.é., não nos utilizamos das teorias relativística e quântica; c) não utilizamos uma formalização da mecânica clássica, que pudesse tornar mais precisas certas afirmações, como a de sua incompletude frente ao problema de muitos corpos; d) não fizemos análise exaustiva dos trabalhos dos autores (Boltzmann, Reinchenbach, etc.), mas apenas das partes de suas obras consideradas mais relevantes para a temática; e) não analisamos trabalhos mais recentes, no contexto da própria mecânica clássica, que poderiam lançar nova luz sobre os problemas tratados (como os trabalhos de Prigogine, Hollinger e Zenzen, e os desenvolvimentos da teoria ergódica); f) não elaboramos hipóteses científicas novas, mas apenas discutimos noções filosóficas relacionadas com a interpretação de teorias já existentes.

Apesar de todas essas limitações, acreditamos poder oferecer uma alternativa filosófica de entendimento das relações entre irreversibilidade física e ordem temporal; mesmo que essa alternativa não tenha aqui encontrado sua melhor defesa, pensamos que ela deva ser levada em conta e, possivelmente, ser melhor desenvolvida, nas futuras discussões sobre o tema.

CAPÍTULO I

A ESTRUTURA DO TEMPO E OS PROCESSOS FÍSICOS

1 - O TEMPO E OS PROCESSOS TEMPORAIS

A temporalidade possui duas faces: de um lado, o próprio tempo, e de outro, aquilo que ocorre no tempo, ou seja, os processos temporais. Temos menor dificuldade em entender os últimos, pois eles nos fornecem um conteúdo perceptivo, podendo muitas vezes serem descritos por uma linguagem de primeira ordem. Quanto ao próprio tempo, em seu estudo sempre nos deparamos com a célebre dificuldade de definição linguística¹, e com sua ausência enquanto objeto de experiência. Essas dificuldades deram origem a (pelo menos) três diferentes concepções filosóficas do tempo²:

a) absolutista: o tempo é uma entidade objetivamente existente, e suas propriedades são independentes das propriedades dos

(1) Ver ST. AGOSTINHO, Confissões, Liv. X, Cap. XIV, e os comentários de LACEY, 1972, p.41-58, e LUCAS, 1973, p.335.

(2) Alguns dos grandes pensadores que elaboraram teorias sobre a temporalidade são: Platão, Aristóteles, Newton, Kant, Husserl, Russell, McTaggart, Bergson e Heidegger, além daqueles que aqui estudaremos (a "tradição boltzmanniana"). Algumas obras recentes, que oferecem uma visão histórica e/ou sistemática dos problemas da filosofia do tempo, são as de WHITROW, 1961, GRÜNBAUM, 1972, LACEY, 1972, LUCAS, 1973, KRÖES, 1985, VAN FRAASSEN, 1985 e HORWICH, 1987.

processos temporais (incluindo aqui os processos cognitivos); eventualmente, as propriedades do tempo podem influenciar as propriedades dos processos temporais;

b) **relacionalista**: as propriedades do tempo são as propriedades dos processos temporais (relacionalismo-reducionista) ou são construídas por um agente cognitivo, em função das propriedades dos processos temporais que experiencia (relacionalismo-subjetivista);

c) **cognitivista**: as propriedades do tempo são existentes 'a priori' em um agente cognitivo, enquanto elementos ordenadores que organizam suas representações do mundo em que atua.

Enquanto para os absolutistas as dificuldades inerentes ao estudo do tempo seriam compreensíveis frente a seu caráter transcendente, para os relacionalistas elas seriam superáveis através do estudo rigoroso dos processos temporais. Para os cognitivistas, também poderiam ser superadas, através da identificação dos elementos constitutivos dos sistemas cognitivos. Porém, os caminhos escolhidos pelos dois últimos grupos também apresentam obstáculos, como o da diversidade de processos temporais, por um lado, e de sistemas cognitivos (e suas respectivas constituições), por outro, frente a uma (suposta) unicidade do tempo.

A lógica moderna ofereceu instrumentos de expressão simbólica das propriedades estruturais do tempo, contornando, em parte, as antigas dificuldades apresentadas pela Filosofia do Tempo. Podemos representar com clareza e rigor as propriedades do tempo, como: unicidade ou pluralidade de tempos; universalidade ou não; linearidade ou ciclicidade da ordem temporal; simetria ou assimetria da mesma; finitude ou infinitude do tempo; limitação unilateral (se, caso seja infinito, possui um começo ou um término); densidade ou discretude; métrica. Podemos, como exercício formal, formular qualquer possível propriedade do tempo. O problema filosófico se desloca, então, para a justificação de uma das opções, em detrimento das demais.

Mesmo que não sejamos relacionistas, o problema acima referido nos conduz para o estudo dos processos temporais, pois é através deles que obtemos subsídios para justificar uma ou outra escolha de propriedades do tempo³. Mesmo os absolutistas necessitam se referir aos processos temporais, para neles encontrar formas de expressão do tempo absoluto. No estudo dos processos temporais, encontramos (pelo menos) cinco possíveis abordagens:

(3) Muitas vezes o estudo empírico dos processos temporais não é suficiente para a decisão a respeito da estrutura do tempo, devido ao conhecido problema da subdeterminação de proposições teóricas. Sobre o assunto, ver PEREIRA JR. e FRENCH, 1990_a, onde se encontra uma discussão das diversas posições filosóficas a respeito da subdeterminação das teorias científicas.

- a) **naturalista:** através da consideração de processos físicos, químicos e/ou biológicos;
- b) **antropológica:** estudo dos modos de representação e vivência do tempo em diversas culturas, através do método etnológico e/ou psicológico;
- c) **fenomenológica:** estudo das formas de consciência e vivência do tempo, através, basicamente, da introspecção;
- d) **transcendental:** estudo racional das condições de possibilidade da representação do tempo, através da chamada "dedução transcendental" de conceitos;
- e) **linguística:** estudo das flexões verbais, na linguagem ordinária ou na lógica temporal.

No presente trabalho nos limitaremos ao estudo do problema da ordem temporal, em especial o de sua simetria ou não simetria. Nesse estudo, adotaremos a posição **cognitivista** a respeito da natureza das propriedades do tempo, juntamente com uma abordagem **naturalista** para a consideração dos processos temporais.

A conjugação da posição **cognitivista** com a

abordagem naturalista necessita ser devidamente esclarecida, e sua fertilidade demonstrada. Segundo a posição cognitivista, a estrutura do tempo é dada 'a priori' para um agente cognitivo, que dela faz uso para representar os processos temporais com os quais se depara em sua experiência. Mesmo que o agente não possa apreender a estrutura 'a priori' do tempo como objeto de consciência, pode fazer inferências a seu respeito, com base no seu uso. A análise desse uso é uma pedra de toque para as abordagens fenomenológica e transcendental, mais comumente associadas com a concepção cognitivista⁴. Contudo, também encontramos nas ciências da natureza bons exemplos de representações de processos temporais, coordenados temporalmente segundo uma estrutura 'a priori'. Podemos então considerar as representações científicas da natureza como atividades de um agente inter-subjetivo (a "comunidade científica"), que se utiliza de esquemas 'a priori' para sua elaboração, dentre os quais um esquema temporal.

Além disso, também encontramos nas representações científicas dos processos temporais outras propriedades desses processos, que não as oriundas do próprio esquema temporal. Ou seja, além das determinações dos eventos no tempo, estes também são determinados quanto à massa, volume, temperatura, pressão, etc..

(4) Um belo exemplo da concepção cognitivista de tempo, desenvolvida através da abordagem fenomenológica, é o trabalho de Husserl sobre a percepção do tempo, que estudamos brevemente em PEREIRA JR., 1990.

Enquanto a determinação temporal é, para o cognitivista, 'a priori', essas outras determinações são, via de regra (excetuando de momento casos polêmicos, como o da relação causal), 'a posteriori'. Abre-se então, no contexto da abordagem naturalista, interessante questão para o cognitivista: investigar se, como e porque as determinações temporais 'a priori' estariam correlacionadas com determinações não-temporais 'a posteriori'⁵.

2 - MODELOS DO TEMPO E DOS PROCESSOS TEMPORAIS

Descreveremos as propriedades da estrutura 'a priori' do tempo, e da estrutura 'a posteriori' dos processos temporais, por meio de dois tipos de modelos simbólicos, independentes entre si.

O modelo simbólico típico do tempo contém basicamente um domínio I (conjunto dos instantes temporais) e uma relação AT (anterioridade temporal) como termos primitivos. Devemos reforçar que primitivamente AT ordena os instantes temporais, e não os eventos que ocorrem nos instantes (na aplicação desse modelo, por parte do agente cognitivo, os

(5) Na seção nº 3 deste capítulo apresentaremos nossa solução para esse problema, assim como, na seção nº 4, uma breve comparação com a solução de Kant.

eventos são locados nos instantes ou intervalos - isto é, conjuntos de instantes formando um contínuo - e, desse modo, passam a ser ordenados por AT). No nível do modelo do tempo (não preenchido por eventos), dizemos que AT estabelece uma ordem temporal pura, e que um contínuo de instantes constitui uma duração temporal pura.

Propriedades da ordem temporal pura são expressas no modelo acima como propriedades de AT. Utilizando as definições formais expostas por Suppes⁶, temos:

AT reflexiva em I $\leftrightarrow \forall x \{x \in I, (x \text{ AT } x)\}$

AT irreflexiva em I $\leftrightarrow \forall x \{x \in I, \neg(x \text{ AT } x)\}$

AT simétrica em I $\leftrightarrow \forall x \forall y \{x, y \in I, (x \text{ AT } y) \rightarrow (y \text{ AT } x)\}$

AT assimétrica em I $\leftrightarrow \forall x \forall y \{x, y \in I, (x \text{ AT } y) \rightarrow \neg(y \text{ AT } x)\}$

AT anti-simétrica em I $\leftrightarrow \forall x \forall y \{x, y \in I, (x \text{ AT } y) \wedge (y \text{ AT } x) \rightarrow x=y\}$

AT conexa em I $\leftrightarrow \forall x \forall y \{x, y \in I, x \neq y, (x \text{ AT } y) \vee (y \text{ AT } x)\}$

AT desconexa em I $\leftrightarrow \forall x \forall y \{x, y \in I, x \neq y, \neg [(x \text{ AT } y) \vee (y \text{ AT } x)]\}$

AT transitiva em I $\leftrightarrow \forall x \forall y \forall z \{x, y, z \in I, (x \text{ AT } y) \wedge (y \text{ AT } z) \rightarrow (x \text{ AT } z)\}$

AT intransitiva em I $\leftrightarrow \exists x \exists z \exists y \{x, y, z \in I, \neg [(x \text{ AT } y) \wedge (y \text{ AT } z) \rightarrow (x \text{ AT } z)]\}$

(6) SUPPES, 1960, p.69. Uma aplicação dessas definições, em um modelo do tempo também constituído por um conjunto de instantes, e uma relação binária "temporalmente anterior", foi feita por NEWTON-SMITH, 1981, p. 51-52, que, em seu apêndice (p. 243-245), dá uma explicação abrangente das propriedades das relações formais utilizadas na filosofia do tempo. Esse autor denomina as propriedades da ordem temporal de "topológicas", as distinguindo assim das propriedades da métrica temporal.

Na ciência física moderna, é utilizada uma variedade do modelo do tempo na qual os instantes são associados aos números reais, e a relação de anterioridade é associada à relação "menor que", que ordena esses números. Nesse modelo padrão, o tempo adquire a forma da "reta real", com propriedades de irreflexibilidade, assimetria, conectividade e transitividade. Em sua aplicação empírica ele é utilizado como "coordenada", isto é, como um sistema formal de referência, associado com a posição de um agente cognitivo (um "observador"), o que constitui requisito para a representação (algébrica ou gráfica) dos processos físicos.

Nosso modelo dos processos temporais se restringirá aos processos físicos. Existe grande diversidade de processos temporais, mas seu estudo está limitado a diferentes domínios empíricos. Uma das mais abrangentes abordagens é a oferecida pela Física moderna, na Mecânica Clássica (que se aplica aos corpos que se deslocam no espaço e no tempo, inclusive às partículas microscópicas) e na Termodinâmica (que se aplica às transformações macroscópicas expressas na forma de alterações de volume, pressão e/ou temperatura). Embora os resultados dessas duas disciplinas científicas tenham alcance limitado frente à Biologia, à Psicologia ou mesmo frente à

própria Física atual, acreditamos que forneçam material suficiente para uma análise não exaustiva de algumas propriedades dos processos temporais. Desse modo, tomaremos os processos físicos, descritos pela Mecânica Clássica e pela Termodinâmica (e pela filha bastarda dessas duas disciplinas, a Mecânica Estatística) como exemplos típicos dos processos temporais, não excluindo, como é evidente, a validade de outras abordagens desses processos.

Para representar os processos físicos introduziremos um tipo de modelo composto basicamente por um domínio E (conjunto de estados dos sistemas físicos⁷) e a relação de ordem DF (direcionalidade física). A direcionalidade física é uma relação de ordem transitiva e conexa, entre os estados de um mesmo sistema físico, sendo que tal ordem é estabelecida por fatores que ocorrem no tempo, mas não são determinados pela estrutura do tempo: leis físicas, entropia, expansão do universo, causalção (em interpretação não humeana), etc. A direcionalidade entre dois estados físicos e_1 e e_2 não deve, portanto, ser entendida como relação de anterioridade temporal; ou seja, " $e_1 DF e_2$ " significa " e_1 está

(7) podemos nos referir, ao invés de estados físicos, aos eventos físicos, entendendo por "evento físico" a ocorrência de um determinado estado em um sistema físico. Ver sobre o assunto VAN FRAASSEN, 1985, p. 33-34.

fisicamente direcionado para e_2 ", e, não, " e_1 é temporalmente anterior a e_2 ". Enquanto e_1 e e_2 forem coordenados por um agente cognoscente, que se utiliza de um esquema temporal, então a relação de anterioridade temporal poderá se sobrepor à DF. Porém, mesmo que não recoberta por AT, julgamos DF suficiente para estabelecer a ordem dos estados de um sistema físico⁸. Essa ordem pode ter as propriedades de reflexibilidade ou irreflexibilidade, simetria, assimetria ou anti-simetria, transitividade ou intransitividade, que são definidas da mesma maneira como fizemos para AT em I (só que, agora, para DF no domínio E).

DF pode ser estabelecida em função de uma conjunção de determinações não-temporais que afetam os sistemas físicos. Nesse caso, temos progressivamente:

- a) um estado de um sistema físico, afetado por diferentes determinações (por exemplo, de pressão, volume e temperatura);
- b) um processo físico, como sucessão de diferentes estados daquele sistema;
- c) a relação DF como ordenação da sucessão de estados;
- d) a projeção de DF em um domínio ordenado por AT, por parte de um agente cognitivo.

(8) assumimos de antemão a conectividade de DF apenas para um só sistema físico; julgamos que ela seria não-conexa, para grupos de sistemas com diferentes características.

A sucessão de estados de um sistema físico pode ser representada em um gráfico de N dimensões (o chamado "espaço de fase"), onde cada dimensão expressa uma das grandezas físicas do sistema. Um sistema físico, por sua vez, é aquele que mantém invariante certas características físicas distintivas (energia, limites espaciais, etc.) ao longo de suas mudanças de estado. A relação DF estabelece parcialmente uma topologia nesse espaço abstrato, a qual, segundo nossa pressuposição de independência conceitual, seria logicamente independente da topologia do esquema temporal através do qual um agente cognoscente coordena sua representação da sucessão de estados ordenados por DF.

Devemos ressaltar que nem AT, nem DF, nem a superposição de ambas, têm a conotação de "vir-a-ser" temporal ("temporal becoming"). O "vir-a-ser" temporal envolve a distinção entre passado, presente e futuro (a constituição das "séries A" de B. Russell e McTaggart), distinção essa que diz respeito ao fluxo dos estados de consciência de um sistema cognitivo, como o humano⁹. Julgamos AT como "regra" de ordenação temporal, que pode ser operada por um sistema cognitivo não-consciente, e que poderia estar incluída entre as funções mais elementares do sistema cognitivo humano (no qual o fluxo de

(9) para uma distinção entre sua "anisotropia do tempo" e o "vir-a-ser" temporal, ver GRUNBAUM, 1972, p. 209-210.

consciência estaria no nível superior).

O recobrimento de uma relação DF por uma relação AT, para um determinado observador, frente a um determinado conjunto de sistemas, estabelece uma ordem temporal entre os estados ou eventos físicos, que corresponde de modo bastante aproximado às "séries B" de B. Russell e MacTaggart. Enquanto, do ponto de vista fenomenológico, a percepção do vir-a-ser temporal é primária, e é a partir dela que o agente cognoscente pode construir a ordem temporal entre os eventos, do ponto de vista da estrutura funcional da mente humana, acreditamos que as "regras" geradoras das séries B estariam em um nível mais básico que o do fluxo da consciência, tornando possível a própria ordenação temporal dos conteúdos perceptivos. Portanto, julgamos que a realidade do tempo se localizaria no domínio das "séries B"¹⁰.

3) CONCEPÇÃO "BIOLÓGICA" DA ORDEM TEMPORAL 'A PRIORI'

Com a distinção dos dois tipos de modelos, feita acima, adotamos uma independência conceitual entre a estrutura

(10) Como não estamos adotando a abordagem fenomenológica, vamos nos abster de discutir aqui o argumento de McTaggart pela idealidade do tempo. Nossa concepção realista do tempo será apresentada na Conclusão desse trabalho.

do tempo e a estrutura dos processos físicos. As relações AT e DF são logicamente independentes, mas, mesmo assim, somos impelidos a acreditar que deva existir algum tipo de afinidade, ou mesmo algum tipo de isomorfismo, entre elas. Para elucidar as razões que motivam tal crença, precisamos examinar alguns aspectos da concepção cognitivista do tempo, por um lado, e da abordagem naturalista dos processos temporais, por outro, quando notaremos que a exigência de afinidade estaria fundada em um legítimo apelo de ordem pragmática.

Vamos inicialmente discutir, e reelaborar à nossa maneira, a concepção cognitivista do tempo, que tem sua origem na Crítica da Razão Pura. Chamamos nossa versão particular dessa concepção de "biológica", porque faz uso de categorias emprestadas de teorias biológicas; porém, usamos o termo entre aspas devido a que, como se sabe, os conceitos de tempo e de ordem temporal não são objetos de estudo das ciências biológicas. Em seguida compararemos nossa concepção com a original kantiana, mostrando os focos de divergência para com aquela, para, nas próximas seções, nos dedicarmos à discussão da abordagem naturalista dos processos temporais, e tirar algumas conclusões a respeito do nexa entre estrutura do tempo e estrutura dos processos físicos.

Os seres vivos dotados de um sistema nervoso coordenam sua apreensão dos fenômenos segundo uma ordem temporal, conferida por uma "regra" (no sentido computacional,

e não normativo, da palavra), inerente a tais sistemas. Essa regra está basicamente codificada em seu "programa" genético, existindo 'a priori' para cada ser vivo individual; isto é, a ação efetiva de cada ser individual, para que esteja dentro do padrão comportamental da espécie a que pertence, já pressupõe desde o início a aplicação dessa regra na coordenação de sua ação. Um ser individual não pode alterar tal regra, porque não pode alterar seu próprio "programa" genético (hoje sabemos que essa situação pode ser alterada pela tecnologia). Ao longo da história das espécies, os genótipos predominantes em determinadas populações podem vir a se alterar, através de mutações e/ou recombinações genéticas, vindo a ser afetados pelo mecanismo de seleção natural: aqueles genótipos que produzem indivíduos (fenótipos) inadaptados a seus ambientes não são perpetuados, pois esses indivíduos deixam menor número de descendentes.

Assim, ocorreria ao longo da escala de evolução das espécies uma "aprendizagem" indireta com o ambiente, onde as características de origem genética seriam selecionadas, de modo que apenas as que produzem seres adaptados aos seus respectivos ambientes seriam perpetuadas nos descendentes. Como a ordem temporal seria uma categoria cognitiva oriunda do "programa" genético dos indivíduos, então sua continuidade, ao longo do tempo, estaria também submetida à prova da adaptação. Mesmo excluindo a possibilidade de sua construção pelo próprio indivíduo (nesse aspecto a concepção cognitivista se distingue

da relacionalista-subjetivista), haveria uma regulação de suas propriedades por parte das propriedades dos ambientes em que seus possuidores atuam, ou seja, uma regulação das propriedades de AT pelas propriedades de DF. Conseqüentemente, uma afinidade entre, de um lado, o esquema de ordem temporal, de indivíduos cujo comportamento é controlado por um sistema nervoso, e, de outro, a direção dos processos físicos no ambiente em que atuam, poderia ser explicada de modo pragmático: qualquer inadequação entre ambos teria conduzido à inadaptação dos indivíduos, e ao previsível fracasso de suas estratégias de sobrevivência. Logo, é esperado que aquelas espécies que sobreviveram possuam esquemas temporais afinados com aquilo que ocorre em seus ambientes. Como nova consequência da visão acima, as propriedades de AT poderiam variar de espécie para espécie, ou entre as variedades de uma mesma espécie, e poderiam ser "corrigidas" ao longo da evolução, por meio da eliminação dos genótipos que gerassem indivíduos sem as propriedades que contribuem na produção de comportamentos adaptados.

Para uma aplicação da visão "biológica", esquematicamente apresentada acima, à Filosofia da Ciência, seriam necessários diversos refinamentos. Primeiramente, devemos levar em conta que do próprio ponto de vista biológico não está correta a identificação daquilo que é 'a priori' (no sentido de inato) com o "programa" genético. A partir do

genótipo ocorre, no desenvolvimento do indivíduo, o chamado processo epigenético, que virá a produzir o seu fenótipo (incluindo seu sistema nervoso). As regras inatas do sistema nervoso são produtos do processo epigenético, podendo não constituir mera "expressão" do "programa" genético¹¹.

Em segundo lugar, sabemos que o sistema cognitivo humano é muito mais suscetível de influência cultural que o das demais espécies, podendo-se questionar seriamente se no homem o esquema de ordem temporal efetivamente usado teria alguma base genética bem definida.

Em terceiro lugar, precisamos indagar se a história da cultura humana seguiria o mesmo mecanismo da história das espécies biológicas (e.g., com mutações e recombinações de unidades básicas, e com mecanismo de seleção que elimine os inadaptados ao ambiente natural).

Finalmente, devemos questionar se o uso de um certo esquema de ordem temporal (p. ex., a "reta real") como 'a priori', na atividade científica, teria alguma correlação com a suposta regra inerente ao sistema cognitivo dos indivíduos humanos que produzem o conhecimento científico.

(11) ver PEREIRA JR., 1991.

Apesar de não podermos dedicar a devida atenção às importantes questões expostas acima, estamos dispostos a sustentar que, mesmo após o necessário refinamento de visão "biológica" proposta, suas conseqüências de variabilidade e corrigibilidade dos esquemas 'a priori' devem ser mantidas. Na ciência física em particular, um determinado esquema de ordem temporal, incluindo especificações das propriedades de AT, seria utilizado de modo 'a priori' para a representação dos processos físicos, tendo sido escolhido entre outros esquemas igualmente possíveis, e podendo ser corrigido, no caso de seu uso conduzir a resultados insatisfatórios (ser difícil de ser usado, gerar ambigüidade ou contradição, ou não organizar adequadamente o "conteúdo" empírico). O uso da "reta real", como esquema de coordenação das representações físicas por parte do agente cognitivo humano, tem obtido aparente sucesso por centenas de anos; sua sobrevivência ao longo da história da ciência pode ser creditada à simplicidade, facilidade de uso, coerência interna e adequação aos processos estudados. Outros esquemas seriam igualmente possíveis, como o "tempo cíclico" de alguns povos indígenas, que condiz com o tipo de organização de suas experiências, e com os tipos de processos físicos com os quais convivem; é possível, inclusive, reconstruir a mecânica

clássica¹² tomando-se como coordenada um certo tipo de tempo cíclico¹³. Contudo, o sucesso da "reta real", como coordenada para as representações físicas, tornou desnecessário o uso de outros esquemas temporais. Como também não se demonstrou a necessidade de que fosse corrigida, produziu-se a ilusão de que ela constituiria condição 'sine qua non' para o conhecimento físico.

No nível de atividade científica, a corrigibilidade do esquema 'a priori' de ordem temporal se inclui no mecanismo mais geral de regulação, a longo prazo, das pressuposições adotadas em uma ciência, por parte das teorias e experimentos realizados com base nessas mesmas pressuposições¹⁴. Em oposição aos relacionistas¹⁵, não admitimos que uma ciência construa suas pressuposições de ordem temporal a

(12) NEWTON SMITH, 1978 demonstrou a possibilidade de uma reconstrução da mecânica clássica com um tempo não contínuo. A reconstrução para um tempo cíclico é mais simples, tomando-se como base o Teorema da Recorrência de Poincaré, que postula a recorrência dos estados de um sistema físico que obedeça exclusivamente às leis mecânicas. Bastaria então estabelecer uma correlação entre estrutura do tempo e as classes de estados recorrentes.

(13) para uma crítica da noção corrente de "tempo cíclico", e sua substituição pela noção mais rigorosa de "tempo fechado" ver NEWTON SMITH, 1981, p. 57.

(14) GLYMOUR, 1980, estudou exaustivamente o funcionamento desse mecanismo, no caso particular em que uma determinada hipótese é utilizada como premissa para seu próprio teste (estratégia de "bootstrapping").

(15) a concepção relacionalista-subjetivista também pode ser apresentada como sendo de caráter "biológico" (como foi feito por Boltzmann, que estudaremos em nosso capítulo seguinte), mas, nesse caso, dependeria de uma biologia lamarckista.

partir de seus resultados; por outro lado, admitimos que uma variedade de ordem temporal 'a priori' possa ser corrigida por outra variedade de ordem temporal 'a priori', desde que a segunda mostre maior valor pragmático que a primeira.

Enquanto coordenada utilizada para a representação científica dos fenômenos, acreditamos que o esquema temporal 'a priori' estaria no nível do entendimento. Seguindo nesta mesma linha, Van Fraassen concebeu o tempo utilizado na física como um "esquema conceitual" não necessário¹⁶; situado no nível do "espaço lógico" proposto por Wittgenstein, no seu *Tractatus*. Essa concepção nos assegura as condições adequadas para utilizar uma coordenada temporal, com propriedades equivalentes à "reta real", sem sofrermos dos problemas relativos à sua construção a partir das relações físicas, e sem postularmos de início a existência de entidade transcendente (tempo absoluto newtoniano). Newton-Smith, embora concordando com o caráter não necessário da estrutura do tempo¹⁷, ao identificar na proposta de Van Fraassen a possibilidade do tempo ser "dependente da mente" ("mind-dependent")¹⁸, propôs que o tempo seria um "construto teórico" ("theoretical framework"), a ser interpretado realisticamente, nos contextos

(16) VAN FRAASSEN, 1985, p. 95-107

(17) NEWTON-SMITH, 1980, p. 55

(18) NEWTON-SMITH, 1980, p. 218-221

em que não houver subdeterminação¹⁹. Concordamos com essa proposição de Newton-Smith, que evita o compromisso da adoção de um conceito wittgensteiniano, desvinculado do seu contexto filosófico original.

4) ORDEM TEMPORAL E ORDEM DOS FENÔMENOS FÍSICOS EM KANT.

Ao propor a concepção cognitivista do tempo, Kant se distanciou tanto das concepções absolutistas quanto das relacionalistas²⁰. Ao lado de sua teoria do tempo, ele apresentou uma teoria, menos famosa, sobre a ordem dos fenômenos físicos, a qual pressupõe a ordem temporal mas dela não se deriva²¹. De forma semelhante à nossa proposta, sua concepção também implicava na independência conceitual entre a estrutura do tempo e a estrutura dos processos físicos. Nossas divergências para com esta se situam em três pontos: o de que o

(19) NEWTON-SMITH, 1980, 239-242

(20) Citaremos a segunda edição da *Crítica da Razão Pura* (edição B), pela paginação original; quando fizermos transcrições, serão da tradução brasileira de V.Rohden e V.B.Moosburger (Kant 1983). As críticas de Kant ao absolutismo e ao relacionalismo se encontram nas páginas 56/57.

(21) vide pag. 233: "o tempo não pode ser percebido em si mesmo, nem em referência a ele se pode determinar, por assim dizer empiricamente no objeto, o que precede e o que sucede".

esquema temporal estaria no nível do entendimento; o da variabilidade e corrigibilidade do esquema de ordem temporal, e o do caráter pragmático da exigência de afinidade entre AT e DF. Ele concebia esses tópicos de forma diferente: o esquema temporal estaria apenas no nível da sensibilidade; seria universal e necessário, como tudo o que é 'a priori'; e a afinidade seria garantida pela coerência do sujeito transcendental.

Existem indicações na Estética Transcendental de que Kant concebia as propriedades da ordem temporal como equivalentes à da "reta real"²². Embora ele tenha aqui se proposto a expor o conceito do tempo, para ele esse conceito não seria "discursivo", posto que o tempo constituiria uma "forma pura de intuição sensível"²³. Contudo, conceber que a ordem temporal tenha propriedades equivalentes à "reta real", e também que esteja no nível da sensibilidade, conduz a pelo menos dois problemas: a) não experienciamos eventos instantâneos, mas apenas eventos que têm a duração de um certo intervalo de tempo; além disso, boa parte da física microscópica descreve processos que ocorrem em intervalos muito menores que o intervalo mínimo necessário para que uma percepção humana seja possível;

(22) pag. 47: o tempo "possui uma única dimensão: diversos tempos não são simultâneos, mas sucessivos"; pag. 50: "representamos a sucessão temporal por uma linha avançada ao infinito, na qual o múltiplo perfaz uma série de uma única dimensão".

(23) cf. pag. 47

b) as operações matemáticas usuais na Física se utilizam frequentemente do infinito temporal atual, enquanto o "infinito" da "experiência possível" kantiana é apenas o "ilimitado", relativo às operações do sujeito cognoscente²⁴. Segue-se que, para que não precisemos renunciar às propriedades da "reta real", e, mais importante, para que façamos justiça ao uso efetivo do tempo como coordenada na ciência, que o concebamos na filosofia da ciência como esquema conceitual ou teórico, ou, na terminologia kantiana, como uma forma do entendimento. Isso evidentemente não exclui que, em outras abordagens, se considere o tempo como uma forma da sensibilidade.

Para Kant, tudo o que é 'a priori' é universal e necessário; essa é uma das pedras basilares de seu sistema filosófico, já assentada logo na Introdução à Crítica da Razão Pura²⁵. Como o tempo é uma forma 'a priori', então se infere que suas propriedades (no nosso caso, o tipo de ordem temporal) também o seriam. Uma determinada ordem temporal 'a priori', como a da "reta real", não poderia então ser concebida como variando de um agente cognitivo para outro, ou como suscetível de correções e substituição. Porém, mesmo que levemos em conta apenas os agentes cognitivos da espécie humana, existem evidências inequívocas de variabilidade e alterabilidade

(24) cf. pag. 47-48, e também pag. 546-551.

(25) cf. pag. 3-4.

culturais dos esquemas temporais coordenadores da experiência, tanto em nível individual quanto em nível da "comunidade científica". Essas evidências afetam os dois sentidos em que podemos tomar a exigência de necessidade e universalidade: o sentido em que todo agente cognitivo humano teria que adotar tal ordem temporal para que pudesse exercer sua faculdade cognitiva, e o sentido em que a experiência possível humana seria coordenada por um único sistema de referência temporal. Para o primeiro caso, basta mostrar que podemos transpor nossos conhecimentos para um mundo com tempo cíclico, ou então que conhecimentos diferentes dos nossos podem ser coordenados por um tempo cíclico. No segundo caso, existem bem conhecidas dificuldades frente à Teoria da Relatividade²⁶.

No estudo dos Princípios Sintéticos 'a priori', mais precisamente nas Analogias da Experiência, encontramos uma teoria de Kant a respeito da ordem dos fenômenos físicos. A segunda analogia trata a sucessão temporal, a qual é regulada pela "lei da causalidade". Para Kant, os fenômenos se sucedem em uma relação assimétrica de causa e efeito, sendo que o critério para se determinar a direção da causalidade (qual fenômeno é a causa e qual é o efeito) não seria a própria ordem do tempo, mas o tipo de relação existente entre os

(26) ver discussão de argumento de Gödel contra o tempo universal, em Whitrow, 1961, p. 256-267.

fenômenos²⁷. Contudo, a assimetria não é estabelecida pelo conteúdo perceptivo, e sim por uma regra do entendimento: o Princípio da Razão Suficiente, que mostraria as causas como condições suficientes dos efeitos, mas não os efeitos como condições suficientes das causas²⁸. Observamos, portanto, que a teoria kantiana da ordem dos processos físicos não conduz a uma abordagem naturalista, em que DF se associasse à evolução de uma quantidade física; ela se opõe tanto ao empirismo cético de Hume, para quem a direção da causalidade se reduziria à direção do tempo²⁹, quanto ao relacionalismo de inspiração leibiniziana (de quem ele curiosamente retoma, de modo reinterpretado, o citado Princípio³⁰). Kant aqui assume uma posição de cunho

(27) sobre a assimetria na percepção e na apreensão dos fenômenos, ver p. 237 e p. 233-234; sobre a derivação da "sucessão subjetiva" a partir de "sucessão objetiva", ver p. 238.

(28) sobre a importância da regra que torna "necessária" a "ordem das percepções", ver p. 238-239; sobre o princípio, p. 246.

(29) como se sabe, Hume negou a existência de uma "conexão necessária" entre causas e efeitos, baseada em princípios metafísicos como o Princípio da Razão Suficiente, e defendeu que os únicos vínculos empíricos entre elas seriam sua "união constante" e a anterioridade temporal das causas frente aos efeitos, conforme HUME, 1973, p. 154-158 (correspondendo aos § 50 a 57). Para uma breve crítica dessa posição ver WHITROW, 1961, p. 271-272.

(30) para WHITROW, 1961, p. 273, Kant teria assumido, como Leibniz, uma "teoria causal do tempo", segundo a qual "descobrimos a ordem temporal pelo exame da ordem causal, enquanto distinta da ordem perceptual". Discordamos dessa interpretação, pois julgamos que Kant apenas derivou a ordem da "sucessão subjetiva" (apreensão dos fenômenos) de ordem da "sucessão objetiva" (ordem de percepção), sendo que em nenhum dos casos se tratava da ordem do tempo. Além disso, nos casos de sucessões de fenômenos (ordem no tempo), tal ordem é determinada por um princípio sintético 'a priori', aplicável mesmo quando os efeitos são temporalmente simultâneos com as causas (conforme o famoso exemplo da bola de chumbo no travesseiro, na p. 248). Aqui, falha o critério empírico para a determinação da causa, mas, mesmo assim, o princípio não deixa de se aplicar. Nesse tipo de exemplo, a ordem causal não estabelece uma ordem no ou do tempo.

cognitivista, equivalente à sua posição na Filosofia do Tempo; isto é, para ele também a direção dos processos físicos é determinada por uma regra 'a priori' inerente aos sistemas cognitivos (no caso, do tipo humano). Nós, por outro lado, ao adotarmos a abordagem naturalista dos processos temporais, admitimos, diferentemente, a possibilidade de uma teoria de cunho relacionalista da direção dos processos físicos, na qual DF seria dada pela evolução de uma quantidade física conhecida 'a posteriori'.

Vejamos ainda como Kant coloca o problema da afinidade entre a ordem do tempo e a ordem dos fenômenos físicos, cada qual estabelecida independentemente da outra: "os fenômenos têm que determinar uns aos outros suas posições no tempo e torná-las necessárias na ordem temporal, isto é, o que sucede ou acontece tem que seguir segundo uma regra universal ao que estava contido no estado precedente. Disso resulta uma série de fenômenos que, mediante o entendimento, produz e torna necessária, na série das percepções possíveis, precisamente a mesma ordenação e interconexão contínua encontrada a priori na forma de intuição interna (o tempo)"³¹. Qual seria o fundamento da necessidade de afinidade entre a ordem do tempo e a ordem dos fenômenos? Como para Kant ambas são determinadas por regras 'a priori', julgamos que a garantia "de afinidade" estaria fundada

(31) p. 245

na coerência do sujeito transcendental. O problema da afinidade emerge ao considerarmos - diferentemente de Kant - a direção dos processos físicos como questão a ser determinada 'a posteriori'.

Na ausência daquela garantia, a obtenção da afinidade se desloca para o campo de interação entre o agente e os processos físicos no ambiente onde ele se situa; ela deixa de ser algo necessário de modo absoluto, e adquire a forma de um imperativo pragmático, relativo à eficácia da estratégia adaptativa do agente.

5. A DIREÇÃO DOS PROCESSOS FÍSICOS VIA VARIAÇÃO DA ENTROPIA: REVERSIBILIDADE E IRREVERSIBILIDADE

Agentes cognitivos do tipo humano utilizam uma certa ordem temporal 'a priori' para construir seu conhecimento físico, mas, após atingirem patamares superiores desse conhecimento, podem "jogar fora a escada" por alguns momentos, e tomar como objeto de conhecimento a relação DF, independentemente da relação de ordem temporal³². Constitui traço marcante da "tradição boltzmanniana", e grande

(32) matematicamente falando, isso significa que DF pode ser expressa por equações em que o tempo não figura explicitamente.

contribuição para a filosofia de temporalidade, o estudo da relação DF em função da variação da entropia em sistemas isolados. Boltzmann e seus seguidores adotaram uma concepção relacionalista do tempo, e também se preocuparam em estender suas conclusões sobre as propriedades de DF para AT. Embora discordando da inferência das propriedades de AT a partir de DF, consideramos plenamente válida a concepção relacionalista da direção dos processos físicos, no contexto de uma abordagem naturalista dos processos temporais. Desse modo, nossa visão adota, com restrições, uma das principais contribuições oferecidas por essa tradição.

Reichenbach formulou de modo claro e preciso a base para o entendimento de DF em função da entropia: "A existência de uma direção para os processos físicos é então formulada por meio de uma função de estado S, a entropia, a qual tem um determinado valor numérico para todo estado obtido, e ordena os estados físicos com números crescentes"³³. Sem dúvida alguém poderá argumentar em favor da consideração de outros fatores para o estabelecimento da simetria ou não-simetria de DF, além (ou ao invés) da entropia, como o fez, por exemplo, Popper³⁴. Contudo, para uma ordenação exequível e abrangente

(33) REINCHENBACH, 1956, p. 50

(34) ver POPPER, 1956 a, 1965, 1974.

(aplicável a todo sistema macroscópico isolado, ou a ciclos de transformações nos quais se considera a totalidade dos sistemas interagentes como um sistema isolado), podemos argumentar que Reichenbach teria optado por um critério altamente satisfatório.

Ao estabelecer as propriedades de DF, em função da evolução da entropia, precisamos optar entre uma relação de ordem simétrica ou não simétrica (assimétrica ou anti-simétrica). Esse dilema tem sido bastante discutido por físicos e filósofos, se utilizando de uma outra terminologia: a da reversibilidade ou irreversibilidade dos processos físicos. Enquanto a reversibilidade dos processos físicos seria assimilável à simetria de DF, existem dificuldades semânticas com a noção de irreversibilidade, que em algumas de suas conotações também se aproximaria da simetria de DF, diferindo de reversibilidade apenas em certas condições impostas à reversão dos processos.

Existem dois tipos de concepções da reversibilidade³⁵, que dão origem a diferentes concepções da irreversibilidade. O primeiro tipo, que chamaremos de

(35) formulações do conceito de reversibilidade podem ser encontradas em REICHENBACH, 1956, p. 51; LANDSBERG, 1972, p. 84-89 e Apêndices A e B); SKLAR, 1974, p. 365-368, e 400-410; DAVIES, 1974, p. 31-34; HORWICH, 1987, p. 51-54; KRÖES, 1985, p.120-124; e HOLLINGER e ZENZEN, 1982, p. 311-336, e 1986, p. 60-64.

idealizado, provém de um exame exclusivo das equações de movimento, vindo a caracterizar a reversibilidade a partir de uma propriedade dessas equações, a saber, a não-invariância sob reversão temporal. O segundo tipo, que chamaremos de empírico, decorre de um exame do comportamento dos sistemas empíricos, submetidos não só a tais equações de movimento, como também a outras condições factuais, que co-determinam seu comportamento efetivo.

Uma crítica ao primeiro tipo de concepções foi realizado por Hollinger e Zenzen (citados em nossa nota acima). Essa crítica abrangeu dois aspectos: a ambigüidade da expressão "reversão temporal", que pode significar apenas a inversão do sentido da coordenada temporal, ou também a inversão do sinal dos valores de velocidade, produzindo diferentes resultados; e a trivialidade dessa concepção de reversibilidade, desde que todas as leis da física conhecidas são invariantes sob reversão temporal. Propomos o acréscimo de uma terceira crítica: não devemos analisar os processos físicos por intermédio das leis físicas exclusivamente, pois temos razões para crer que essas leis não descrevem completamente os processos empiricamente dados. Desse modo, as concepções de reversibilidade (e irreversibilidade), às quais atribuímos relevância, são as do tipo empírico, que levam em conta as condições factuais que co-determinam os processos físicos.

As concepções do tipo empírico, por sua vez, se dividem em duas: a) aquela proposta por Hollinger e Zenzen, segundo a qual "reversibilidade" significa que os processos em ambos os sentidos temporais, permitidos pelas leis físicas, efetivamente ocorrem, no mundo empírico, enquanto "irreversibilidade" significa que, devido a razões a serem elucidadas, os processos em um determinado sentido temporal são excluídos (o que eles chamam de "irreversibilidade por exclusão"), e ocorrem apenas aqueles processos no sentido temporal oposto; b) aquela que defendemos adiante, segundo a qual "reversibilidade" se identifica com a simetria da relação de ordem DF, e "irreversibilidade" se identifica com a anti-simetria de DF. Acreditamos que essa última seja compatível com a de Hollinger e Zenzen, com a vantagem de oferecer maior facilidade de comparação com a estrutura do tempo

Consideramos um processo, em um sistema macroscópico isolado, como sendo reversível, se puder atingir, por mais de uma vez, estados de mesmo valor de entropia, passando por estados de valor diferente³⁶. Para que isso ocorra, é preciso que a entropia diminua, em quantidade

(36) estamos supondo, assim como fez Reinchenbach, que seja possível associar, a cada macro-estado de um sistema isolado, um determinado valor de entropia, mesmo que em determinadas situações empíricas não saibamos como determinar tal valor.

utilizável³⁷. Essa definição pode ser estendida para os casos dos ciclos fechados de transformações, abrangendo sistemas não-isolados; o ciclo seria reversível no caso do balanço de variação de entropia poder ser de valor negativo ou nulo. Tais casos se reduzem à definição acima, ao considerarmos o conjunto de sistemas abertos participantes do ciclo como constituindo um megassistema isolado. Associando univocamente macro-estados de um sistema isolado a valores de entropia³⁸, tomando por C o conjunto de estados possíveis do sistema, e por X e Y dois estados quaisquer não sucessivos³⁹, então, em um processo reversível, $\forall x \forall y (x, y \in C, (x \text{ DF } y) \rightarrow (y \text{ DF } x))$. Como X e Y são estados quaisquer do sistema, DF pode se aplicar potencialmente a quaisquer duplas de estados, o que nos leva a propor a equivalência do conceito de reversibilidade com a simetria de DF⁴⁰.

Devemos aqui fazer uma anotação a respeito da relação entre a definição "macroscópica" de reversibilidade acima, e a reversibilidade em nível microscópico, na mecânica

-
- (37) a permanência de um dado sistema, em um determinado estado, com um mesmo valor da entropia, não é suficiente para se caracterizar um processo como reversível. Esse segmento de trajetória pode fazer parte tanto de um processo reversível quanto de um processo irreversível (ver nossa concepção de irreversibilidade adiante).
- (38) essa associação não pode ser feita em nível microscópico, porque cada macro-estado corresponde a mais de um micro-estado. Mesmo do ponto de vista macroscópico, restrições extras podem ser necessárias, como a especificação do tipo de transformação que ocorre no sistema.
- (39) a ressalva da não-sucessividade visa evitar que se considere a ocorrência de macro-estados entropicamente estacionários (repetição de um macro-estado no tempo, ou rodízio de macro-estados de mesmo valor de entropia) como suficiente para se caracterizar um processo como reversível.
- (40) para intervalos finitos de observação, a universalidade da propriedade de simetria de DF só é caracterizada parcialmente. Contudo, do ponto de vista da totalidade dos estados em que o sistema pode se situar, a existência da simetria pode ser bem determinada.

clássica. Cada estado microscópico é ali caracterizado, em determinado instante, pela posição e momento de suas partículas, sendo que o momento, não ocorrendo variação de massa, depende apenas da velocidade. Dado um certo estado macroscópico K , produzido por um estado microscópico k , e dado o micro-estado k' , no qual as partículas ocupam as mesmas posições que em k , porém com as direções de velocidade invertidas, deveríamos considerar, frente à definição de processo reversível, o macro-estado produzido por k' como sendo, para os nossos propósitos, equivalente ao macro-estado K ? Como estamos interessados em uma concepção entrópica da reversibilidade, e dado que a entropia é definida com relação aos macro-estados, então julgamos que a resposta deva ser afirmativa, pois, caso contrário, apenas sistemas de comportamento microscópico periódico poderiam ser considerados como sendo reversíveis.

Ao analisar os processos entropicamente irreversíveis, em sistemas isolados, observamos primeiramente que não podem ser associados à assimetria de DF, pela razão que ao atingir o estado de equilíbrio, com entropia máxima (ou em suas proximidades), o sistema percorre uma série de macro-estados muito próximos, quanto ao valor da entropia. De um ponto de vista empírico, nada nos impede de supor que, em determinadas circunstâncias, um sistema no equilíbrio permaneça em um mesmo macro-estado ao longo do tempo. Desse modo,

se mantivermos nossa associação unívoca entre macro-estados e esses valores, o estado estacionário estará "fisicamente direcionado para si mesmo", ou seja, DF será reflexiva para ele. Restam-nos então duas alternativas para expressar a irreversibilidade através de propriedades de DF: por sua anti-simetria, ou por sua simetria com restrições.

A anti-simetria de DF expressa uma concepção que intitulamos de irreversibilidade estrita, e que é formulada da seguinte maneira: em um sistema isolado, a entropia nunca diminui em quantidade utilizável para a realização do trabalho. Assim, para um sistema isolado, com C estados possíveis, se $\forall x \forall y (x, y \in C, x \neq y, (x \text{ DF } y) \rightarrow \neg(y \text{ DF } x))$, então os processos que nele ocorrem são estritamente irreversíveis.

A segunda concepção de irreversibilidade é a propugnada pela tradição boltzmaniana, à qual chamaremos de irreversibilidade estatística. Para entender seu significado e motivação, precisamos nos reportar aos trabalhos de Reichenbach e Grünbaum, onde, devido à sua orientação relacionalista-reducionista, o problema da ordem dos processos físicos se confundiu com o da ordem temporal. Reichenbach dividiu o problema do estabelecimento da ordem temporal em duas partes: a

determinação de uma "ordem linear" adirecional⁴¹, e a determinação da "direção do tempo". Inicialmente ele lançou mão de um critério empírico de identificação da causalidade, o "método da marca"⁴², que fundamentaria uma teoria causal do tempo⁴³. Em sua obra póstuma, *The Direction of Time*, veio a optar pela construção de uma ordem linear simétrica, a partir das leis mecânicas, que são invariantes sob reversão temporal. Essa ordem é estabelecida pela relação "entre" ("between"), que é basicamente a mesma utilizada posteriormente por Grünbaum ⁴⁴. À ordem temporal simétrica eles propuseram acrescentar, através de consideração do comportamento da entropia nos sistemas isolados de uma determinada região espacial, uma "direção" ou "anisotropia" dos processos físicos (para eles, também do tempo). A restrição da "direção" ou "anisotropia" do tempo a uma região espacial deriva não só da simetria da ordem temporal anteriormente estabelecida, através da invariância temporal das

(41) lembremos aqui que, devido à sua concepção relacionalista do tempo, eles não interpretam a assimetria da ordem numérica da "reta real" como sendo uma assimetria do tempo; pelo contrário, Grünbaum a considera algo "extrínseco" ao tempo. Ver nossa discussão do assunto no capítulo 3.

(42) ver referências sobre esses trabalhos em REINCHENBACH, 1956, p. 25. O trabalho mais difundido é a *Filosofia do Espaço e do Tempo*, de 1928 (ver p. 135-138).

(43) essa abordagem de Reinchenbach foi decisivamente criticada em GRÜNBAUM, 1972, p. 180-187.

(44) ver REICHENBACH, 1956, p. 32-42, e GRÜNBAUM, 1972, p. 193-197. Uma diferença entre ambas as abordagens é que Grünbaum define sua relação de "o-betweenness" a partir da noção de "genidentidade", enquanto Reinchenbach se referiu à discussão sobre a causalidade "aberta", que sucedeu a seu estudo da relação "between".

equações mecânicas, como também - e principalmente - de sua concepção probabilística da evolução da entropia. Segundo essa concepção - que criticaremos ao longo de nosso trabalho - a probabilidade teórica⁴⁵ de diminuição de entropia, de um sistema isolado qualquer, é igual à probabilidade de seu aumento. Uma alta improbabilidade de ocorrência de diminuição da entropia só ocorrerá em regiões espaciais nas quais os (macro) estados iniciais dos sistemas isolados ali presentes forem de baixa entropia.

A dificuldade que se apresenta, na visão acima, é que tal "direção" ou "anisotropia" não se identifica com uma assimetria ou anti-simetria de DF (nem de AT), porque só tem valor regional e, além disso, em sua hipotética totalidade DF (ou AT) seria(m) simétrica(s). Para ilustrar o que entendem pelos conceitos de "direção" e "anisotropia", tanto Reichenbach quanto Grünbaum⁴⁶ falam de uma "diferença estrutural" entre o sentido de "antes" e o de "depois"; contudo, não podemos concordar em chamar de "estrutural" a uma diferença que só tem valor regional, e, além disso, está baseada apenas em razões estatísticas. Devido a esses dois aspectos, uma relação DF, derivada das leis mecânicas e da concepção probabilística de

(45) conforme a "Curva de Entropia" (vide nosso cap. 2), que descreve o comportamento dessa quantidade em um sistema isolado em tempo infinito, ou, em uma outra interpretação, descreve o comportamento médio da entropia para um número infinito de sistemas isolados.

(46) ver REINCHENBACH, 1956, p. 26, e GRÜNBAUM, 1972, p. 209-210

evolução da entropia, não pode ser considerada como assimétrica ou anti-simétrica, pois não podemos usar o quantificador universal na sua definição. Em realidade, essa relação DF é estruturalmente simétrica, ao que se acrescentam restrições informais - correspondendo a diferentes regiões - que limitam a atualização da potencialidade de ocorrência de tal simetria. Consequentemente, se tivermos uma determinada região em estado global de baixa entropia, para dois estados a e b de um sistema isolado, pertencente a essa região, se $S_a > S_b$, então $\text{PROB} (b \text{ DF } a) \gg \text{PROB} (a \text{ DF } b)$; já em uma região em estado global de alta entropia, $\text{PROB} (b \text{ DF } a) \ll (a \text{ DF } b)$. A "anisotropia" consiste então em uma relação de ordem simétrica afetada regionalmente por tais diferenças de probabilidades.

6 - EXPLICAÇÕES CIENTÍFICAS DA IRREVERSIBILIDADE MACROSCÓPICA

As diferentes concepções da irreversibilidade estão ligadas a diferentes explicações científicas, que dão suporte às propostas propriedades de DF. A concepção estatística da irreversibilidade foi certamente inspirada pela explicação probabilística⁴⁷ da evolução da entropia, antecipada por Boltzmann desde 1877. Do mesmo modo a concepção estrita se

(47) estamos supondo que realmente existam explicações probabilísticas, como foi defendido por SALMON, 1984.

associa às primeiras formulações da 2ª. lei da Termodinâmica, de Clausius e Thomson, onde a ocorrência de diminuição da entropia, macroscopicamente significativa, era julgada impossível.

Julgamos que a importante distinção usada por Grünbaum, entre irreversibilidade nomológica e irreversibilidade "de fato"⁴⁸, diga respeito aos tipos de explicação científica do fenômeno de irreversibilidade macroscópica, e não propriamente aos tipos de irreversibilidade. Para ele, a irreversibilidade nomológica seria conferida aos processos físicos por uma lei científica (de caráter universal) que fosse temporalmente não-invariante, como a 2ª. Lei da Termodinâmica aparentou ser; e a irreversibilidade "de fato" seria conferida por aspectos factuais de determinada região do universo, como no caso típico das condições iniciais de baixa entropia, no caso da explicação probabilística de evolução de entropia. Em ambos os casos ele se refere ao tipo de explicação que dá apoio a uma determinada concepção da irreversibilidade, e não às concepções em si mesmas (o que demandaria uma consideração de suas propriedades, como fizemos anteriormente).

Na classificação dos tipos de explicação da irreversibilidade acima referida, usualmente não se levam em

(48) a distinção foi feita originalmente por H.Mehlberg, em trabalho citado e ampliado por Grünbaum, 1972, p. 210-211.

conta duas outras concepções da irreversibilidade 'de fato', que historicamente desempenharam papel central nas discussões sobre o tema. Trata-se dos dois tipos de explicações que classificamos como funcionais: a explicação funcional-determinista e a explicação funcional-estocástica. Em ambos os casos, a explicação é feita através de leis físicas (temporalmente invariantes) mais um princípio extra. Da conjunção entre as leis e o princípio se define uma função de variáveis microscópicas, que tem como imagem a descrição do comportamento macroscopicamente irreversível. O princípio extra pode ter carácter universal ou local⁴⁹; e a função pode ser determinista ou estocástica, o que distingue entre os dois tipos de explicações funcionais.

A tentativa de formulação de uma função, que desse conta da irreversibilidade termodinâmica, foi celebrizada no famoso "Teorema-H" de Boltzmann de 1872, que discutiremos em capítulo posterior (cap. 4). Além dessa tentativa, devemos lembrar que existem outras abordagens de carácter funcional da irreversibilidade, que precisam ser reconhecidas como tais: as de Popper, Penrose e Percival, Kác, Prigogine, Horwich e

(49) a conjugação do factual com o universal é bem reconhecida na física atual, nas chamadas "constantes universais", das quais a mais notória é a velocidade máxima de deslocamento no espaço, que seria a da luz. Desse modo, a ciência da natureza teria fugido do veredito de Kant, de que o carácter de universalidade apenas poderia ser conferido por aquilo que é 'a priori'.

outros⁵⁰.

Conforme o tipo de princípio extra adotado, a explicação funcional pode se adequar tanto à concepção estrita de irreversibilidade (como foi o caso da versão original do "Teorema-H") quanto à concepção estatística (como foi o caso da reformulação deste "Teorema", por Boltzmann em 1896, quando atribuiu valor meramente probabilístico ao princípio extra). Para se explicar a irreversibilidade estrita, pensamos ser mais adequada uma função determinista, baseada em um princípio de caráter universal⁵¹. Com uma função estocástica certamente só daremos conta da irreversibilidade em sua concepção estatística; porém, não podemos descartar gratuitamente a possibilidade de uma explicação funcional estocástica da irreversibilidade estrita.

Para uma visão esquemática das diferentes concepções da irreversibilidade, e respectivas explicações aptas a satisfazê-las, observemos o seguinte quadro:

TIPO DE DF	TIPO DE IRREVERSIBILIDADE	TIPO DE EXPLICAÇÃO
simétrica com restrições	estatística	probabilística
anti-simétrica	estrita	funç. estocástica
		funç. determinista
		nomológica

(50) ver no Cap.3 e Bibliografia, referências dos trabalhos desses autores.
 (51) ver nossa discussão no Cap.4.

A explicação nomológica seria apta a dar conta da irreversibilidade estrita, mas tal opção não se concretizou devido à ausência de leis da natureza não-invariantes temporalmente, capazes de desempenhar o papel. Desse modo, a esperança em se conseguir essa explicação repousa principalmente nas teorias funcionais deterministas.

7- A AFINIDADE ENTRE A ORDEM TEMPORAL E A ORDEM DOS PROCESSOS FÍSICOS

Nossa suposição de independência conceitual entre estrutura do tempo e estrutura dos processos físicos, que rejeita as visões tradicionais sobre a relação entre tempo e processos temporais, nos levou a colocar um problema novo, o da aparente afinidade entre ambos, e a apresentar uma alternativa pragmática de sua solução.

As visões tradicionais se resumem em duas: aquela para a qual a estrutura do tempo determina a estrutura dos processos físicos (sem ser determinada por ela), e aquela para a qual a estrutura dos processos físicos determina a estrutura do tempo (sem ser determinada por ela). Entre os defensores da primeira se enquadram não só os absolutistas, como também os

adeptos da concepção humeana da causalidade; e entre os defensores da segunda estão todos os que adotam posições relacionistas de diversos matizes, na filosofia do tempo. Como existiria, em ambos os casos, dependência de uma estrutura frente à outra, então não haveria o problema de afinidade que nos colocamos.

Nossa suposição de independência conceitual permite, em vantagem, evitar dois falsos problemas da filosofia da temporalidade: a) a inversão da ordem do tempo implicaria na inversão dos processos físicos?; b) a inversão da ordem dos processos físicos implicaria na inversão do tempo? Nos dois casos a resposta seria, no plano conceitual, obviamente negativa.

Nas ações de um agente cognitivo, que coordena suas representações dos processos temporais, utilizando-se de um determinado esquema do tempo, e que necessita que esse último seja adequado frente à estrutura dos processos no mundo onde age, se coloca uma exigência pragmática, de afinidade entre a relação AT que ele adota, e a relação DF do mundo onde atua (tal como ele o representa, em suas propriedades não-temporais).

Devemos portanto começar por indagar sobre o significado da afinidade entre as relações AT e DF. A relação

AT é única, para cada agente cognitivo (ou, pelo menos, para o que costumamos entender por um agente cognitivo "normal", dentro do padrão humano). Já a relação DF é relativa ao tipo de sistema, ao tipo de processo, e ao modo de sua representação pelo agente cognitivo. Em princípio, não é impossível que um agente cognitivo construa uma única topologia das propriedades não temporais de todos os processos com os quais se depara regularmente em seu ambiente, e estude as propriedades da relação DF desse conjunto. Nossa abordagem optou por uma alternativa bem mais limitada, na qual o agente cognitivo se identificaria com parte da comunidade de cientistas da natureza; os sistemas em questão seriam os sistemas macroscópicos quase-isolados⁵²; os tipos de processos seriam aqueles empiricamente estudados pela Termodinâmica; e a (única) propriedade não-temporal representada pelo agente cognitivo seria a entropia. Nessa alternativa simplificada, o problema da afinidade se colocaria como o da semelhança, ou até de isomorfismo, entre n-uplas do domínio I, ordenadas por certa relação AT, e n-uplas do domínio E, ordenadas por uma certa relação DF, que seguiria a evolução da entropia.

Dado que em um determinado instante temporal, e

(52) a partir desse momento, nos referiremos aos sistemas quase-isolados, ao invés dos isolados, pois, caso contrário o processo de sua observação não seria possível. Contudo, supomos metodologicamente, que a observação não interfira na evolução desses sistemas

para um mesmo observador, podem ocorrer diversos estados, em sistemas físicos diferentes, uma formulação mais precisa da afinidade se referiria à semelhança, ou isomorfismo, entre n -uplas de I e grupos de n -uplas de E (para cada n -upla de I haveria um grupo de n -uplas de E)⁵³.

Existem aspectos, contudo, em que a afinidade entre AT e DF não seria tão estreita, a ponto de constituir um isomorfismo. Por exemplo, se adotarmos a assimetria de AT e a anti-simetria de DF, não haveria isomorfismo entre ambas. Que tipo de similaridade, então, seria de se esperar? Usualmente os estados físicos são considerados como instantâneos, ou seja, ao se representar a evolução de um sistema físico, cada instante temporal é associado com um único estado desse sistema (também podemos associar um mesmo instante a estados de sistemas diferentes, expressando a simultaneidade desses estados). A função um instante-um estado deixaria de existir no caso de AT não-simétrica e DF simétrica (um instante seria associado a mais de um estado do mesmo sistema), e se degeneraria no caso de AT simétrica e DF não-simétrica (um certo estado seria associado a

(53) da síntese entre os dois domínios, que só ocorre no nível pragmático, emergem importantes categorias da filosofia da temporalidade: a da ordem temporal de eventos ou estados (isto é, a localização desses eventos ou estados no esquema temporal do agente cognitivo), e a de duração temporal de eventos ou estados (isto é, o intervalo de tempo ocupado por um evento ou um estado - que se repete por um contínuo de instantes, no esquema temporal). Da segunda categoria se deriva o problema da métrica temporal, o qual, enquanto problema de ordem pragmática, é relativo ao tipo de observador considerado.

mais de um instante, sem que isso implicasse em uma permanência no tempo do referido estado). Tais combinações são logicamente possíveis, embora conduzam, no nível pragmático, a uma complicação no universo representacional do agente cognitivo, e conseqüente perda de eficiência em sua ação.

Na metodologia científica, o imperativo pragmático de eficiência se traduz em princípios metodológicos, como os de simplicidade, economia de meios, coerência e adequabilidade empírica⁵⁴. No que tange à afinidade entre AT e DF, esses princípios nos impelem a uma disjunção exclusiva: ou AT e DF são ambas simétricas, ou são ambas não-simétricas. Na história da filosofia do tempo, podemos notar que tal imperativo é quase sempre seguido, mesmo que não explicitado⁵⁵.

A disjunção apresentada acima nos conduz à escolha de um ou outro par de relações: ou o par AT e DF simétricas, ou o par AT e DF não-simétricas⁵⁶. A opção entre a simetria e a assimetria de AT é empiricamente subdeterminada, no sentido em que a totalidade da experiência de um agente cognitivo qualquer (incluindo a comunidade científica) não é

(54) por "adequabilidade empírica" entendemos não só a "adequação empírica" ressaltada por Van Fraassen, 1980, p. 12-13, como também a capacidade de se obter tal adequação da forma mais eficiente.

(55) uma exceção é HORWICH, 1987, que sustentou a existência de assimetrias no tempo (p.72-74), e a simetria do próprio tempo (p.54 ss.).

(56) pela não-simetria de AT entendemos principalmente sua assimetria, visto que a anti-simetria ensejaria uma concepção do tempo bastante incomum.

suficiente para se provar a adequação de uma dessas propriedades, em detrimento da outra. Formulando de modo mais preciso, tanto o modelo em que AT é simétrica, quanto aquele em que é assimétrica, poderiam igualmente satisfazer ao conjunto de proposições que descrevem todos os fatos de sua experiência possível.

A hipótese da subdeterminação das propriedades do tempo frente à experiência possível, em cujo favor já foram levantados bons argumentos⁵⁷, seria, de nosso ponto de vista, uma consequência natural da adoção da suposição de independência conceitual entre estrutura do tempo e estrutura dos processos físicos. Contudo, uma importante ressalva deve ser feita: tal subdeterminação não significa que a escolha por uma ou outra propriedade de AT seja indiferente, quanto às suas consequências cognitivas e comportamentais do agente cognitivo. Usando uma noção proposta por Van Fraassen⁵⁸, podemos escolher entre teorias subdeterminadas com base nas virtudes pragmáticas que uma delas possa possuir, em detrimento das demais. Parece-nos que a assimetria de AT possui uma virtude pragmática incontestável, que a torna preferível: ela evita os problemas de "inversão"

(57) para uma discussão extensa do tema, ver NEWTON-SMITH, 1978, 1980.

(58) VAN FRAASSEN, 1980, p. 87-95. Não pretendemos aqui adotar a visão de Van Fraassen de que a escolha entre teorias subdeterminadas seria exclusivamente em função de seus valores pragmáticos; nossa posição sobre o assunto está desenvolvida em PEREIRA JR. e FRENCH, 1990.

e do "retorno" do tempo, que, no caso contrário (simetria de AT), seriam possíveis a qualquer momento, e teriam que ser indicados e previstos. Julgamos que a consagração secular do esquema da "reta real", como coordenada para a representação científica dos processos físicos, seria sinal do valor pragmático da assimetria de AT.

A maior virtude pragmática da assimetria de AT decorre do fato de que apenas nos deparamos, em nossa experiência, com processos fisicamente irreversíveis. Mas, pode-se argumentar, se as propriedades estruturais de DF também forem empiricamente subdeterminadas, então a totalidade dos fenômenos que experienciamos poderia ser acomodada tanto em uma DF anti-simétrica quanto em uma DF simétrica. Com efeito, a atração filosófica da tradição boltzmanniana teria sido a da acomodação, da experiência da irreversibilidade, em uma visão de mundo onde ainda prosperava na base a concepção de simetria temporal dos processos físicos, oriunda da física clássica. A hipótese de subdeterminação das propriedades de DF contaria então em favor da concepção por ela proposta, na qual uma simetria estrutural do tempo e dos processos físicos convive com uma "direção" ou "anisotropia" regional, que supostamente daria conta do fenômeno da irreversibilidade que experienciamos.

Nossa crítica da tradição boltzmanniana supõe que

as propriedades de DF não devam ser consideradas como subdeterminadas frente ao domínio da experiência possível. Posto que consideramos a questão da direção dos processos físicos como sendo 'a posteriori', julgamos que o domínio da experiência possível deva constituir autoridade suficiente para uma decisão sobre as propriedades de DF.

Com base na experiência humana passada e atual, não hesitaríamos em defender que a decisão deva ser pela anti-simetria de DF, ou seja, nos parece estar acima de qualquer dúvida que vivemos em um mundo de processos estritamente irreversíveis. Mais que isso, nenhuma evidência aponta no sentido de que, na vastidão do universo ainda não observada, ou não observável, as coisas se passem de modo diferente. Supomos, por conseguinte, que todo o universo é caracterizado pela irreversibilidade estrita, ao contrário de tradição boltzmanniana, para a qual apenas as raríssimas regiões em estado inicial de baixa entropia teriam tal característica.

Para argumentar em favor da adoção da não-simetria de AT e DF, iremos passar por exame crítico os principais trabalhos da tradição boltzmanniana, onde a concepção de irreversibilidade estrita foi brevemente colocada, no "Teorema-H" de 1872, logo vindo a ser substituída pela concepção estatística.

CAPÍTULO II

A TRADIÇÃO BOLTZMANNIANA

1. O PROJETO DE EXPLICAÇÃO MECÂNICA MOLECULAR DA 2ª. LEI DA TERMODINÂMICA

O estudo dos fenômenos térmicos, que conduziu à formulação das teorias termodinâmicas, se desenvolveu inicialmente, nos trabalhos de pesquisadores como Fourier e Carnot, de uma forma empírica, relacionada com a observação da transmissão de calor, e com os problemas relativos à obtenção de maior rendimento das máquinas térmicas. Até Thomson e Clausius, a Teoria do Calor constituía uma área de estudos separada de Mecânica, que tinha seus princípios e leis próprios. Por volta da metade do Século XIX, com a aceitação do Princípio de Conservação da Energia, houve um movimento no sentido do abandono da teoria do calor-substância (o "calórico"), e a adoção da idéia de que o calor de um corpo seria uma função do movimento de suas partículas. A Teoria Cinética da Matéria surgiu como um modelo científico que se propunha a explicar os fenômenos macroscópicos com base na mecânica do movimento das partículas, conduzindo a uma unificação da Teoria do Calor e Mecânica.

Clausius foi um dos pioneiros na aproximação entre a Teoria do Calor e a Teoria Cinética, fundando a nova área de estudos, intitulada "Termodinâmica", ao solucionar o problema teórico da compatibilidade entre o Princípio de Conservação de Energia e o então chamado "Princípio de Carnot", relativo à perda de rendimento das máquinas térmicas¹. Seguindo uma linha de pesquisa pouco reconhecida, de Herapath e Waterson, Clausius desenvolveu em 1857 a Teoria Cinética dos Gases, criando um modelo para os movimentos das partículas microscópicas que produzem o calor (movimentos rotacional e de translação, alterados pelas colisões entre as moléculas).

Como resultado das colisões entre suas partículas, o sistema atinge o estado de equilíbrio, no qual uma certa proporção da energia total estaria distribuída em cada tipo de movimento. A temperatura do sistema seria relacionada à energia translacional, e seria independente do calor específico, que foi associado com os outros tipos de movimentos microscópicos². O principal trabalho de Clausius, acabado em 1865, foi a formulação termodinâmica do Princípio de Carnot, que viria a ser conhecida como a Segunda Lei de Termodinâmica: "O calor mostra uma tendência à equalização de temperaturas, e conseqüentemente só passa dos corpos mais

(1) BRUSH, 1976a, p.557-558.

(2) BRUSH, 1976a, p. 172-173.

quentes para os corpos mais frios"³, ou, na formulação de Thomson: "é impossível para uma máquina isolada, sem a intervenção de agentes externos, transferir calor de um corpo com menor temperatura para outro com maior temperatura"⁴.

Clausius distinguiu ainda os processos reversíveis dos irreversíveis, através da noção de "valor de equivalência" de uma transformação. Considerando a passagem do calor de uma fonte de maior temperatura para uma fonte de menor temperatura como tendo valor positivo, ele interpretou o princípio de Carnot como a proibição das transformações com valor negativo, exceto as compensadas por outras, de valor positivo igual ou maior. Para os processos reversíveis, o valor de equivalência total seria então igual a zero. Sendo T_x uma função de temperatura na fonte x , e N o valor de equivalência de um ciclo de transformações, temos:

$$N = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \dots = \sum_x \frac{Q_x}{T_x}$$

onde Q_x = quantidade de calor.

(3) BRUSH, 1976a, p. 570.

(4) BRUSH, 1976a, p. 571.

A Segunda Lei se expressaria assim:

$$\int \frac{dQ}{T} \gg 0,$$

onde o primeiro termo foi chamado de "entropia"⁵

Faltou a Clausius fazer a conexão entre a 2a. Lei e a mecânica dos movimentos moleculares, expressa no modelo que propôs anteriormente. A associação entre as quantidades macroscópicas, utilizadas em sua formulação da 2a. Lei, e as funções moleculares, já estava indicada, mas sua expressão em nível matemático demandaria novos esforços, que só se concretizaram no trabalho de Boltzmann.

O principal problema posto por Boltzmann, em seu trabalho científico, foi explicar a irreversibilidade expressa pela 2a. Lei (o aumento e estabilização, no valor máximo, da entropia) através do modelo mecânico molecular, proposto pela Teoria Cinética. A adoção deste programa revela uma orientação reducionista, para a qual as leis da Termodinâmica, enquanto leis fenomenológicas, deveriam ser explicadas pelas leis da Mecânica, julgada como a teoria

(5) BRUSH, 1976a, p. 575-576.

física mais básica.

Contudo, em Boltzmann, uma tendência racionalista, que levava à postulação do modelo mecânico como fundamento para o conhecimento da natureza, era contrabalançada pela tendência empirista, a mesma que presidiu o surgimento da Termodinâmica. Desde o início de seus trabalhos, Boltzmann considerava a Mecânica como "a fundação sobre a qual todo o edifício de física teórica é construído"⁶, e o objetivo último da ciência como sendo a construção de uma "visão-de-mundo mecânica", cada vez mais abrangente e precisa. Para ele, o trabalho científico devia adotar uma metodologia "dedutiva", partindo da teoria, uma representação mecânica do mundo, que seria confrontada com a experiência, para ser corrigida e modificada. Esta autoridade 'a posteriori' da experiência, não reconhecida plenamente por filósofos racionalistas como Kant e Hegel - este último, duramente criticado por Boltzmann - é uma razão pela qual os empiristas lógicos do nosso século foram buscar em Boltzmann um dos precursores de sua concepção da ciência. Sua tendência empirista pode ser avaliada através da conhecida recomendação: "nunca vá excessivamente além da experiência, e introduza apenas abstrações que logo possam ser testadas pela experiência"⁷. Embora não induzidos da experiência, os modelos

(6) BOLTZMANN, 'apud' MILLER, 1981, p.231.

(7) BOLTZMANN, 'apud' MILLER, 1981, p. 234-237.

científicos deveriam ser avaliados em função de sua eficácia prático-experimental.

A combinação de elementos metodológicos aparentemente opostos entre si deu origem, em Boltzmann, a um estilo peculiar de trabalho científico, que tanto o fazia adotar - muitas vezes sem a necessária explicitação - as suposições que o permitissem atingir os resultados teóricos almejados, quanto o impelia a sucessivas modificações em suas hipóteses - para que se mostrassem empiricamente adequadas - nem sempre acompanhadas das devidas justificações. Tendo trabalhado em uma área bastante complexa, na qual se cruzam diversos problemas físicos, e em época rica em debates, era de se esperar que por vezes tivesse que mudar de suposições ou de hipóteses. Contudo, 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, frente ao problema da explicação da irreversibilidade expressa pela 2ª. Lei da Termodinâmica.

2. O "TEOREMA - H"

No seu trabalho de 1866, O Significado da 2ª.

Lei da Termodinâmica, Boltzmann estabeleceu o objetivo de expressar a entropia de um sistema termodinâmico em função do modelo mecânico molecular. O primeiro passo foi dar uma caracterização mecânica para o estado de equilíbrio termodinâmico, o que só foi então obtido para os sistemas estritamente periódicos⁸. Mas os sistemas físicos empíricos, em sua maioria, não são estritamente periódicos, o que restringia o alcance da teoria. A tomada de conhecimento do trabalho de Maxwell, na Teoria Cinética, levou Boltzmann a adotar elementos estatísticos, como forma de obter resultados mais abrangentes. Ao invés de partir de um conjunto completo de variáveis moleculares, como se faz em uma abordagem mecânica - mas que se torna praticamente impossível de se tratar em um sistema de muitas partículas - passou a utilizar a função de distribuição de Maxwell, para descrever as mudanças de estado.

Os precursores da Teoria Cinética faziam suposições de que as moléculas de um gás se movem com uma mesma velocidade, que estão dispostas em um arranjo espacial regular, e que se movem apenas nas direções paralelas às paredes do recipiente. Maxwell chamou a atenção para os desvios em relação ao comportamento médio das moléculas,

(8) Ver DAUB, 1956, p. 322-324

propondo que as colisões entre elas, ao invés de homogenizar todas as velocidades, produzem uma distribuição em classes de velocidades diferentes. A cada velocidade poder-se-ia atribuir uma certa probabilidade, dada por uma função, a função de distribuição⁹. Em 1860, Maxwell propusera como um resultado geral que, após uma série de colisões, a energia cinética das partículas tende a se equalizar¹⁰. Em 1866, ele deu um novo e importante passo, definindo a distribuição de equilíbrio: como resultado de colisões, as velocidades a e b , de duas moléculas que colidem, é mudada, para a' e b' ; quando o número de pares de moléculas que troca de velocidade a e b por a' e b' é igual ao número de pares que muda de a' e b' para a e b , então "a distribuição de velocidade final é obtida, a qual não mais será alterada por trocas subsequentes"¹¹. Justifica-se então porque esta distribuição, além de ser a "final", também seria a única verdadeiramente estável¹².

Como se sabe, existem dois tipos de processos irreversíveis¹³. No primeiro, um fluxo contínuo de massa, momento ou energia atinge o sistema, sendo imposto do exterior. Os trabalhos de Clausius e Maxwell se direcionaram no sentido da explicação desse tipo de processo. No segundo,

(9) BRUSH, 1976a, p. 182-186, e 342-346

(10) BRUSH, 1976a, p. 344-345.

(11) MAXWELL, 1860, 'apud' BRUSH (1976a), p. 346.

(12) Cf. BRUSH, 1976, p. 346-347.

(13) Cf. BRUSH, 1976, p. 422-423.

um sistema isolado (e.g., um gás), inicialmente em não-equilíbrio, espontaneamente evolui em direção ao equilíbrio. Maxwell deu uma importante contribuição para a abordagem deste tipo de processo, ao descrever o estado de equilíbrio termodinâmico. Mas os resultados mais interessantes, para a explicação da 2ª. Lei, foram os alcançados por Boltzmann.

De 1868 a 1871, Boltzmann aplicou a função de distribuição ao estudo de evolução, para o equilíbrio, de sistemas compostos de muitas partículas. Através da função de distribuição, ele estabeleceu que a variação da quantidade de calor seria igual à variação da energia média, menos o trabalho realizado pelo sistema. Dividindo-se ambos os lados da equação por T (função de temperatura), se obtém uma expressão para $\Delta Q/T$ em função da temperatura, da energia cinética média e da energia total do sistema¹⁴. Para uma redução da Segunda Lei, restava mostrar o modo como a distribuição de velocidades muda, devido às colisões entre as moléculas, conduzindo ao estado de equilíbrio.

Usando a linha de raciocínio empregada por Clausius e Maxwell, Boltzmann propôs em 1872 que "como

(14) sobre o trabalho de Boltzmann de 1871, ver KLEIN, 1973, p. 62-65 e DAUB, 1969, p. 325-326

resultado das colisões, muitas moléculas adquirirão maiores velocidades, e outras obterão menores velocidades, até que finalmente é estabelecida uma distribuição de velocidade entre as moléculas, tal que não seja alterada por novas colisões"¹⁵. A lacuna apresentada pelo trabalho de Maxwell, que ele se propunha a preencher, era a de provar que "qualquer que seja o estado inicial do gás, ele sempre atingirá o limite encontrado por Maxwell"¹⁶. Para resolver este problema, Boltzmann adotou duas condições. A primeira, que, como "após um tempo muito longo cada direção de velocidade de uma molécula é igualmente provável... então podemos assumir que já no início cada direção de velocidade é igualmente provável"¹⁷. A segunda, que "a distribuição de velocidade já deve ser inicialmente uniforme"¹⁸. Logo a seguir, após repetir as duas condições assumidas, Boltzmann afirmou que "estas duas condições vão ser claramente satisfeitas para todo o tempo seguinte"¹⁹. Estas duas condições foram apresentadas como se fossem meras simplificações facilitadoras do cálculo.

O passo mais importante, para o cálculo da mudança de valores da função de distribuição, se refere ao

(15) BOLTZMANN, 1872, p. 91

(16) BOLTZMANN, 1872, p. 92

(17) BOLTZMANN, 1872, p. 93

(18) BOLTZMANN, 1872, p. 93. Ver nossa discussão no Cap. 4.

(19) BOLTZMANN, 1872, p. 94

número de colisões que ocorrem, em um intervalo de tempo, em uma unidade de volume, entre moléculas com velocidade entre determinados limites, tal que a soma da energia cinética das moléculas permaneça constante. Ele estabeleceu que esse número é proporcional a t e às quantidades $f(x,t) dx$ e $f(x', t)dx$: quanto maior o intervalo de tempo, ou quanto maior o número de moléculas na unidade de volume, cuja energia cinética está entre x e $x + dx$, ou entre x' e $x' + dx'$, maior será o número de colisões entre tais moléculas ²⁰. Portanto, o número de colisões entre moléculas com velocidade entre tais limites não dependeria de considerações precisas a respeito de posições e direções de velocidade das moléculas na unidade de volume, mas apenas da quantidade de moléculas (com essas velocidades) ali presentes, e do intervalo temporal considerado. A consequência disso, para o cálculo do número de colisões, consiste em que os componentes de velocidade das moléculas que colidem entre si seriam considerados como independentes, o que constitui a suposição conhecida como *Stosszahlansatz* (Princípio Sobre o Número de Colisões). Boltzmann então inferiu que "por intermédio de cada uma destas colisões, uma molécula altera sua energia cinética, de tal modo que uma colisão diminui o número de moléculas cuja energia cinética está entre x e $x+dx$ em uma unidade"²¹.

(20) BOLTZMANN, 1872, p. 95-97

(21) BOLTZMANN, 1872, p. 98

Com base nesse raciocínio, ele construiu uma equação que descreve a variação da distribuição de velocidades ao longo do tempo, posteriormente conhecida como a "Equação de Boltzmann"²², que tem valor zero quando a distribuição possui a forma maxwelliana. Prosseguindo em sua explicação da 2ª. Lei da Termodinâmica, Boltzmann definiu uma quantidade abstrata, E (mais tarde chamada de H), a qual, substituída na equação dF/dt (onde F = função de distribuição), apenas decresce monotonamente, ou se mantém no valor mínimo²³. Essa prova se tornou conhecida pelo nome de "Teorema-H" (ao qual nos referimos sempre com aspas, visto não ser realmente um teorema da mecânica, por conter suposições extramecânicas).

Como a quantidade E seria proporcional ao negativo da entropia termodinâmica, então o crescimento monotônico da entropia poderia ser explicado em termos moleculares. O "Teorema-H" oferece uma explicação, para os processos irreversíveis, que abrange o domínio da 2ª. Lei da Termodinâmica, em sua formulação original, dando conta da irreversibilidade estrita dos processos físicos macroscópicos.

 (22) ver BOLTZMANN, 1872, p. 99ss, e comentários em BRUSH, 1976a, p. 599-600, KLEIN, 1973, p.66, KUHN, 1978, p. 41-42.

(23) ver BOLTZMANN, 1872, p. 106ss. comentários em BRUSH, 1976a, p. 600-602, KLEIN, 1973, p. 67-69, KUHN, 1978, p. 41-42 e principalmente, TOLMAN, 1938, p. 134-179.

A principal característica do "Teorema-H" é que nele a variação da função de distribuição seria (para um observador onisciente) determinista, baseada na mecânica das colisões. Por outro lado, a mecânica das colisões seria baseada nas leis mecânicas mais algum fator adicional, adotado por Boltzmann, de forma pouco explícita, em 1872. Esse fator adicional estaria relacionado com as duas suposições citadas, e com a forma de cálculo do número de colisões, o que discutiremos em nosso Capítulo 4.

3. A OBJEÇÃO DE LOSCHMIDT, E A RESPOSTA DE BOLTZMANN

A proposta de uma explicação "mecânica" da 2ª Lei foi alvo de objeção por parte de Loschmidt, que apareceu no contexto de uma discussão sobre a suposta "morte térmica" do universo. O chamado "Paradoxo da Reversibilidade", levantado por Loschmidt, consiste em que o "Teorema - H", (supostamente) baseado exclusivamente no modelo mecânico molecular, não poderia dar conta da irreversibilidade termodinâmica, porque as leis da mecânica são invariantes sob reversão temporal. Argumentou Loschmidt que, se invertermos a velocidade de todas as partículas, de um sistema em evolução

para o equilíbrio, ou já no estado de equilíbrio, o sistema percorrerá uma sucessão inversa de estados, e, conseqüentemente, sua entropia diminuirá²⁴.

A objeção de Loschmidt faz referência a um evento cuja possibilidade não conflita com as leis da mecânica, a saber, a reversão das velocidades. Mas, embora a invariância temporal das leis da mecânica seja uma condição necessária para a ocorrência do evento, não chega, visivelmente, a ser uma condição suficiente para tal. Mantida a condição de isolamento do sistema, e suposta a validade do "Teorema-H", não podemos conceber como poderia ocorrer espontaneamente (isto é, sem acréscimo de entropia negativa externa) tal inversão. Desse modo, a primeira reação de Boltzmann teria sido, como levanta Brush, citando uma fonte informal, a de desafiar Loschmidt a produzir tal reversão²⁵. Porém, na sua resposta escrita a Loschmidt, surpreendentemente Boltzmann recuou, passando a admitir a possibilidade de diminuição da entropia.

Uma antecipação da objeção de Loschmidt, e da hipótese do caráter estatístico da evolução para o equilíbrio,

(24) Cf. LOSCHMIDT, 1876, 'apud' BRUSH, 1976a, p. 605.

(25) BRUSH, 1976a, p. 605.

havia ocorrido na discussão entre Maxwell, Thomson e Tait. Comentando a conhecida hipótese do "Demônio de Maxwell", que levantava a possibilidade de violação da 2ª. Lei, através da atividade microscópica de um ser que conhecesse as posições e velocidades de cada partícula, eles aventaram uma possibilidade de violação da 2ª. Lei, que seria a reversão de movimento das partículas²⁶. Thomson tratou com detalhe dessa hipótese em um artigo de 1874, concluindo que o processo de aproximação ao equilíbrio seria estatístico, e que a diminuição de entropia seria possível, embora extremamente improvável; a mesma concepção da irreversibilidade que Boltzmann passou a adotar, a partir de sua resposta a Loschmidt.

A mudança de posicionamento de Boltzmann foi aparentemente deflagrada pelo curto trecho do artigo de Loschmidt no qual ele menciona as conseqüências anti-termodinâmicas da hipotética reversão da velocidade das partículas. Uma premissa do "paradoxo" da reversibilidade de Loschmidt é que o "Teorema-H" seria puramente mecânico; porém, ninguém mais que Boltzmann deveria saber que sua hipótese continha uma suposição extra-mecânica, cujo papel só foi clarificado subseqüentemente.

(26) Segundo BRUSH, 1976a, p. 602, tal hipótese foi feita por Tait, mas, segundo KLEIN, 1973, p. 75, teria sido de Thomson.

Em sua resposta a Loschmidt de 1877, contudo, ele adotou o novo posicionamento, afirmando que o sinal da equação $\frac{dQ}{T}$ depende das condições iniciais do sistema, mais precisamente da direção de velocidade das partículas. Essas considerações - que desprezam as conclusões obtidas via "Teorema-H" - o conduziram à conclusão de que uma prova de que a entropia necessariamente aumenta, independentemente da distribuição inicial, não poderia ser obtida, pois uma diminuição de entropia, embora improvável, não seria impossível.

4. A ABORDAGEM PROBABILÍSTICA DA 2ª. LEI

Os fatos se passaram como se Boltzmann tivesse encontrado, na curtíssima objeção de Loschmidt, um pretexto para desenvolver a nova concepção de irreversibilidade, que, na verdade, já havia sido antecipada, em suas linhas gerais, por Maxwell, Tait e Thomson.

No trabalho de Boltzmann de 1872, não existiam indicações de que ele admitisse a possibilidade de diminuição da entropia, mas após a crítica de Loschmidt ele reavaliou que já estaria ali implícita uma visão probabilística do

crescimento da entropia²⁷. Podemos então procurar onde se manifestaria tal visão. Uma alternativa seria o caráter estatístico da função de distribuição, mas, se este caráter for concebido como devido apenas às limitações de nosso conhecimento, ele não poderia, em uma concepção objetiva da entropia, ter conseqüências sobre sua natureza. A outra alternativa seriam as suposições feitas na derivação do Teorema, que têm raízes na metodologia estatística utilizada pela teoria cinética, desde Clausius.

Em 1868, Boltzmann introduzira, marginalmente, um modelo alternativo, no qual a distribuição de velocidade das moléculas individuais era substituída pela distribuição das velocidades em células, no espaço de velocidade de três dimensões. Esse modelo, retomado após a discussão com Loschmidt, faz uso da análise combinatória, em detrimento das considerações sobre as colisões das moléculas. A probabilidade de uma distribuição é calculada independentemente da história do sistema, e dos mecanismos microscópicos que alteram a função de distribuição, fazendo-se o cálculo apenas sobre o número de maneiras distintas através das quais uma distribuição pode ser alcançada.²⁸

(27) cf. KLEIN, 1973, p. 73, 77 - 78.

(28) ver KLEIN, 1973, p. 80-81.

Consideremos uma coleção de N moléculas com energias individuais $0, e, 2e, \dots, pe$, e energia total E . w_k é o número de moléculas com a mesma energia ke . O conjunto de números w_0, w_1, \dots, w_p define um macro-estado do sistema, que pode ser produzido por diversos micro-estados; cada macro-estado, caracterizado por uma certa distribuição de velocidades, corresponde a um número P de micro-estados. P é a medida de permutabilidade da distribuição dada, e é calculado por :

$$P = \frac{N!}{(w_0!) (w_1!) \dots (w_p!)}$$

P é proporcional à probabilidade da distribuição dada em relação às distribuições possíveis, cada qual caracterizada por um diferente micro-estado. Fazendo-se apelo à hipótese ergódica, prova-se que todos os micro-estados têm uma mesma probabilidade²⁹. Conseqüentemente, a distribuição mais provável, de um sistema, seria aquela em que P tem um valor máximo.

(29) Ver EHRENFESTS, 1912, 9c, 10a, 11a/b. e KUHN, 1978, p. 54-57. Esta hipótese, formulada a partir do trabalho de Boltzmann, afirma que o ponto representativo do sistema no espaço de fase passa por todos pontos da hipersuperfície de energia. Tal formulação foi provada como matematicamente inconsistente, e subseqüentemente substituída pela hipótese quase-ergódica, que afirma que o ponto representativo passa arbitrariamente próximo de todos os pontos da hipersuperfície de energia.

Usando uma variante desse modelo para energia contínua, Boltzmann mostrou que a distribuição mais provável (P máximo), no espaço de velocidades, corresponde ao estado de equilíbrio. Impunha-se então uma interpretação de P como expressão da entropia, o que foi posteriormente sumariado na conhecida fórmula de Planck:

$$S = K \cdot \ln P$$

onde K = "constante de Boltzmann".

O estado de equilíbrio seria aquele que pode ser atingido por maior número de meios, ou seja, o estado mais provável; a evolução para o equilíbrio seria então uma evolução para estados sucessivamente mais prováveis, o que "explicaria" porque ela ocorre de maneira espontânea. A nova representação dos processos irreversíveis, assim obtida, além de se harmonizar com a hipótese levantada por Loschmidt, admitindo a possibilidade de diminuição da entropia, ao se reverterem as direções de velocidade, possuía também a vantagem de permitir a determinação do valor da entropia para estados de não-equilíbrio, onde não estava definida.

Contudo, frente ao programa de pesquisa

original de Boltzmann, seria ainda preciso explicar por que, em nível macroscópico, mesmo sendo possível a diminuição da entropia em sistemas isolados, não poderia ser observado um único caso deste tipo. Sem esta explicação adicional, a 2ª Lei da Termodinâmica não seria verdadeiramente explicada pela teoria probabilística, mas, ao invés de uma explicação, haveria uma substituição, na qual a teoria substituta não daria conta de todos os fenômenos explicados pela teoria substituída. Como a abordagem termodinâmica da entropia é plenamente adequada aos fenômenos, em nível macroscópico, a teoria nova, para mostrar sua superioridade em relação à antiga, e ter condições de obter aceitação, teria que dar conta do fato de que, em todos os fenômenos observados, ocorre apenas aumento ou estabilização da entropia. A teoria probabilística da entropia de Boltzmann encontraria dificuldades em fornecer tal explicação, que só poderiam ser superadas por meio de adoção de uma nova suposição.

5. A SIMETRIA TEMPORAL DA CURVA DA ENTROPIA PROBABILÍSTICA.

Em sua resposta a Loschmidt, Boltzmann já admitira a necessidade de se levar em conta aspectos do micro-estado inicial dos sistemas isolados (isto é, suas direções de

velocidade), mas ainda pensava ser possível justificar essa restrição em bases puramente probabilísticas. Apenas ao final de sua discussão com Zermelo, em 1896, ele percebeu a impossibilidade de uma explicação convincente, de caráter puramente probabilístico, da unanimidade fenomenológica do não-decrescimento da entropia, vindo então a adotar a nova suposição, extra-mecânica e factual, da baixa entropia dos macro-estados iniciais dos sistemas de nossa região do universo, em cujo apoio formulou a chamada "hipótese cosmológica".

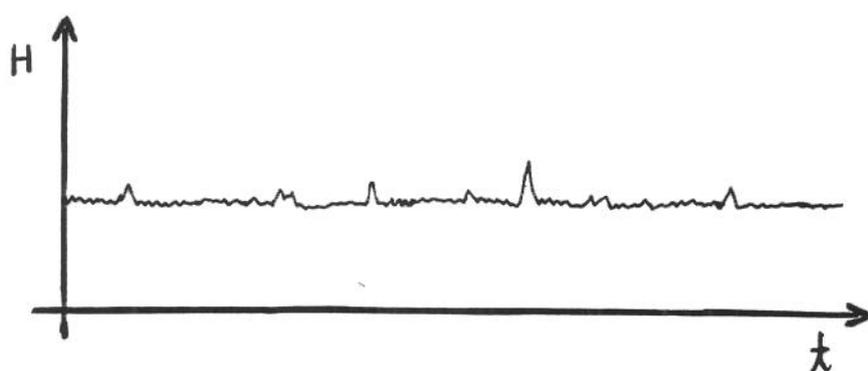
Analisaremos inicialmente a tentativa de Boltzmann (com uma pequena ajuda de Culverwell), de explicação puramente probabilística da irreversibilidade termodinâmica, que foi lançada em um artigo para a revista *Nature* em fevereiro de 1895. A motivação inicial do debate, iniciado por Culverwell³⁰, era o esclarecimento do significado do princípio extramecânico utilizado por Boltzmann no "Teorema-H", e, por extensão, o esclarecimento do significado do próprio "Teorema". Em seu artigo de fevereiro de 1895, Boltzmann se esquivou da discussão daquele princípio³¹, e colocou como

(30) vide BRUSH, 1976a, p. 616-625, sobre o debate na revista *Nature* a respeito do Teorema-H, e o nosso cap.4, para uma breve resenha da discussão sobre o princípio extramecânico.

(31) ele voltou a essa questão em uma carta à revista *Nature* de julho de 1895, afirmando que a condição extramecânica "é simplesmente isso: que as leis das probabilidades são aplicáveis para se encontrar o número de colisões" (BOLTZMANN, 1895, p.221).

ponto de partida a afirmação de que tanto o "Teorema" quanto a própria 2ª Lei da Termodinâmica seriam "apenas teoremas de probabilidade"³². Desse modo, ele deslocou o eixo da discussão que estava se travando nas páginas da revista, do problema do significado do princípio, para o problema da explicação da irreversibilidade pela teoria probabilística.

No artigo de fevereiro de 1895, Boltzmann defendeu a hipótese de que a prova, de que H (o negativo da entropia) sempre teria que diminuir, é "deduzida das leis das probabilidades", e que "se o estado inicial não for especialmente arranjado para um certo propósito, mas o acaso governar livremente, a probabilidade de que H decresça será sempre maior que a que H cresça"⁽³³⁾. Para ilustrar seu raciocínio, ele descreveu a chamada "Curva- H ":



(32) ver BOLTZMANN, 1895_a, p.414

(33) BOLTZMANN, 1895_a, p.414

A curva acima descreve o comportamento de H em um sistema perfeitamente isolado, com paredes perfeitamente elásticas, durante um tempo "indefinidamente longo". Na maior fração do tempo observa-se que H "estará muito próxima de seu valor mínimo", e, raramente, ocorrerão flutuações, nas quais o valor de H atingirá valores maiores. O argumento de Boltzmann foi que, se escolhermos arbitrariamente um valor qualquer de H , como estado inicial de um sistema isolado observável, haverá grande probabilidade de que escolhamos um estado de baixo valor, que seja seguido de outros estados de valor igualmente baixo; e haverá probabilidade consideravelmente menor de que escolhamos um macro-estado com valor de H diferente do patamar mínimo. Nesse último caso, existirão duas possibilidades: escolheremos um valor de H máximo, o qual será necessariamente seguido (ou precedido) por valores menores, o que está de acordo com nossas observações; ou então tomaremos um valor de H intermediário entre o mínimo e o máximo, o que enseja duas novas alternativas: um valor de H seguido (no tempo crescente) por um valor menor, que também está de acordo com nossas observações; ou seguido por outro maior, que seria o único tipo de caso que conflitaria com nossas observações — mas seria extremamente improvável. Ele então concluiu que, se escolhermos um valor de H diferente de seu valor mínimo, dado que as flutuações são muito raras e

breves, então será "muito provável" que o valor de H diminua em ambas as direções³⁴.

Essa última observação de Boltzmann inspirou Culverwell a formular uma imagem simplificada da Curva- H , na qual as flutuações frente ao valor mínimo são representadas como árvores invertidas, nas quais, partindo-se de um nódulo, sempre se seguiria em sentido decrescente do valor de H ³⁵. O problema, evidentemente, seria o de se justificar porque os estados iniciais dos sistemas observados estariam sempre situados nos nódulos. Boltzmann concordou com a imagem da árvore invertida, e acrescentou que, para sua aceitação, "a dificuldade consiste apenas em imaginar todos esses ramos como infinitamente curtos"³⁶. Contudo, tal malabarismo da imaginação se revelou ineficaz, pois a Curva- H é simétrica no tempo - como se pode facilmente notar em seu gráfico - e, conseqüentemente, o comprimento das seções em que H cresce é exatamente igual ao comprimento das seções em que H decresce. Com base exclusivamente nessa curva, a probabilidade de que H aumente é exatamente igual à que H diminua. As probabilidades

(34) BOLTZMANN, 1895a, p.415

(35) vide CULVERWELL, 1895, p. 581

(36) BOLTZMANN, 1895b, p.581

computadas por Boltzmann compreenderam também os casos em que H não varia, que são contados como se contribuíssem para que a probabilidade absoluta da diminuição de H fosse maior que a de seu aumento. Esse "truque" não surtiu efeito duradouro, pois, no ano seguinte, o próprio Boltzmann, frente às objeções de Zermelo, veio a adotar uma complementação de sua explicação.

6. A OBJEÇÃO DE ZERMELO E A RÉPLICA DE BOLTZMANN

Em 1896, E. Zermelo, assistente de M. Planck - que, nessa época, estava ocupado com a tentativa de basear a 2ª. Lei no Eletromagnetismo - apresentou uma objeção à hipótese de Boltzmann, tomando como base o conhecido Teorema da Recorrência, de Poincaré. Esse teorema afirma que, em um sistema mecânico isolado, no qual as forças dependam apenas da configuração espacial das partículas, toda configuração, especificada pelos valores das coordenadas e velocidades das partículas, irá recorrer, em um tempo suficientemente longo. O Teorema requer apenas que as coordenadas e as velocidades estejam dentro de certos limites, que são estabelecidos através do estado inicial e condições de contorno do sistema. Zermelo argumentou, com base nesse teorema, que não se poderia

falar em irreversibilidade para sistemas desse tipo, pois, devido à recorrência de estados, o valor da entropia do sistema sempre viria a retornar ao do estado inicial; conseqüentemente, a cada processo de aumento de entropia corresponderia um processo de sua diminuição. Logo, haveria incompatibilidade entre a visão de mundo da teoria cinética e a termodinâmica³⁷.

A primeira resposta de Boltzmann a Zermelo foi em defesa da explicação puramente probabilística da 2a.Lei. Dada a maior probabilidade dos estados de maior entropia, repetiu Boltzmann, se em um dado sistema o estado inicial for um estado menos provável, ele evoluirá com grande probabilidade para um estado mais provável, e aí permanecerá por longa fração de tempo; se for mais provável, evoluirá para outro estado mais provável. De acordo com o Teorema de Poincaré, haverá um retorno a estados improváveis, mas a fração de tempo para haver uma recorrência será muito grande em um sistema composto de muitas partículas. Logo, não haveria nenhuma contradição entre a teoria estatística microscópica de entropia e o fato de nunca observarmos uma diminuição em nível macroscópico, pois o tempo de observação humana é muito

(37) ZERMELO (1896a), em BRUSH, 1966, p. 208-217.

menor que o tempo necessário para a recorrência de estados³⁸.

Zermelo replicou a Boltzmann, apresentando fortes argumentos, não só quanto à impossibilidade de a teoria probabilística da entropia dar conta dos fenômenos observados (os quais são, segundo ele, adequadamente expressos na 2ª Lei), mas também quanto à legitimidade de tal empreendimento. Argumentando de um ponto de vista empirista, Zermelo disse preferir, no caso de um conflito entre as duas teorias da entropia, a termodinâmica e a estatística-mecânica, ficar com a primeira, que "sumariza fatos experimentais abundantes" enquanto a segunda seria um "teorema matemático" que, devido à sua própria natureza, não poderia ser "diretamente verificado"³⁹.

O principal objetivo de Zermelo, nesta réplica, era mostrar que as duas teorias são verdadeiramente conflitantes, contrariamente ao que defendera Boltzmann (isto é, que fossem empiricamente equivalentes, devido ao enorme tempo necessário à recorrência de estados). Zermelo admitiu que existem casos nos quais o tempo de recorrência seria o estimado por Boltzmann, mas argumentou não existirem razões para supor que todo sistema físico observável tivesse como

(38) BOLTZMANN, 1896b, p. 218-226 e TOLMAN, 1938, p.158. O intervalo de tempo "necessário" para uma separação apreciável na mistura de dois

gases seria de aproximadamente 10^{16} anos, e extrapolaria a própria existência do universo, cf. BOLTZMANN, 1986a, p.444.

(39) ZERMELO, 1986b, em BRUSH, 1966, p. 230.

estado inicial um estado com tempo de recorrência tão longo. Nada impediria que encontrássemos sistemas físicos cujo estado inicial tivesse um tempo de recorrência mais curto. Concluindo sua objeção, Zermelo questionou a possibilidade de explicação da 2ª. Lei pela teoria probabilística: "não seria suficiente mostrar que todas as perturbações finalmente relaxam em um estado de equilíbrio duradouro; seria preciso mostrar que as mudanças sempre ocorrem em um mesmo sentido"⁴⁰. Para que o argumento de Boltzmann fosse eficaz, seria necessário que os estados iniciais dos sistemas estudados sempre fossem estados de muito baixa entropia, mas, como o estado inicial de um sistema real poderia, em princípio, estar em qualquer ponto da curva da entropia, isto conduz a um "paradoxo", de que a curva da entropia seria absurdamente constituída apenas de pontos de mínimo. Restaria uma única alternativa para a defesa da teoria probabilística, que consistiria em adicionar-lhe uma nova suposição: que os estados iniciais dos sistemas físicos estariam sempre em uma região de baixa entropia da curva. Mas isto era, para Zermelo, cientificamente inadmissível, constituindo uma petição de princípio, pois a ciência física visaria justamente explicar o comportamento destes sistemas, para tal não podendo tomar como premissas asserções a respeito daquilo que deveria explicar⁴¹.

(40) ZERMELO, 1986b, em BRUSH, 1966, p. 231-233.

(41) ZERMELO, 1986b, em BRUSH, 1966, p. 234-235.

Novamente acatando as idéias de seus críticos, Boltzmann, em sua segunda réplica, ainda no ano de 1896, veio a adotar a idéia de se completar a explicação probabilística da entropia com uma suposição sobre a natureza do estado inicial dos sistemas físicos de "nossa região do universo".

7. A HIPÓTESE COSMOLÓGICA

Depois da aceitação da objeção de Loschmidt, e até sua primeira réplica a Zermelo, a explicação da irreversibilidade de Boltzmann tentava ser apenas probabilística, mas a discussão com Zermelo o levou a complementar essa explicação através da especificação do tipo de estado inicial que os sistemas físicos de nossa região do universo apresentam, ou seja, através das condições particulares a que os sistemas estudados experimentalmente na termodinâmica estão submetidos. Tais condições devem ser suficientemente abrangentes, para determinar toda a gama de fenômenos humanamente observáveis; porém, como são condições particulares, não podem se estender à totalidade espacial e temporal do universo, pois, neste caso, ocorreria o "paradoxo" apontado por Zermelo, de se ter um gráfico da entropia apenas com pontos de mínima. A hipótese apresentada por Boltzmann

apresentou, de acordo com tais diretrizes, um caráter regional, mas de amplo espectro, motivo pelo qual foi denominada hipótese cosmológica.

Na sua segunda resposta a Zermelo, em dezembro de 1896, Boltzmann lançou mão da hipótese de que "o universo, considerado como um sistema mecânico - ou ao menos uma grande parte dele, que nos rodeia - teve início em um estado bastante improvável, e está ainda em um estado improvável"⁴². Conseqüentemente, qualquer subsistema desta região, que vier a ser isolado, estará inicialmente em um estado improvável, e provavelmente evoluirá para estados mais prováveis. Fazendo-se referência a subsistemas deste tipo, que corresponderiam ao estado inicial dos sistemas empíricos que observamos, a probabilidade de ocorrência da diminuição da entropia, conforme a previsão da teoria probabilística, seria desprezível em termos práticos. Dessas premissas Boltzmann finalmente concluiu, em seu livro *Leituras sobre a Teoria dos Gases*, que "a unilateralidade deste processo [crescimento da entropia - APJ] é claramente não baseada nas equações de movimento das moléculas, pois estas não se alteram quando se inverte o sinal do tempo. Esta unilateralidade repousa única e exclusivamente nas condições iniciais"⁴³.

(42) BOLTZMANN, 1896b, em BRUSH, 1966, p. 238-239.

(43) BOLTZMANN, 1896c, p. 442.

Justificar essa "hipótese cosmológica", não é uma tarefa das mais fáceis, tendo em vista certas conseqüências, à primeira vista implausíveis, que são dela obtidas. Como se sabe, segundo a teoria probabilística da entropia, os estados de baixa entropia são improváveis; logo, a hipótese cosmológica implicaria que nossa região do universo - como um todo e em cada uma de suas partes - está em um estado improvável. Como dar conta desta conseqüência? Boltzmann, após lembrar a precariedade de toda imagem da natureza que extrapole os limites de experiência, propõe duas alternativas, das quais a segunda seria a menos indigesta⁴⁴.

A primeira seria que o universo inteiro estaria presentemente em um estado improvável, mas que a fração de tempo na qual ele permanece em tal estado seria pequena em relação à sua duração, o que impede um conflito entre tal hipótese e a Curva-H. A segunda seria que o universo como um todo estaria em estado de equilíbrio, mas existiriam pequenas flutuações em torno do equilíbrio, em algumas de suas regiões espaciais. Então, "se assumirmos que o universo é suficientemente grande, podemos fazer com que a probabilidade de que uma de suas partes relativamente pequena esteja em um estado (à distância do equilíbrio térmico) tão grande quanto desejarmos"⁴⁵.

(44) BOLTZMANN, 1896b, em BRUSH, 1966, p. 242-243.

(45) BOLTZMANN, 'apud' BRUSH, 1976a, p. 623.

Contra esta última alternativa - para ele a mais aceitável - Boltzmann chegou a perceber uma objeção que poderia ser feita: seria não-econômico e absurdo imaginar a maior parte do universo em estado de alta entropia, para explicar porque uma pequena parte está em estado de baixa entropia. Ele respondeu, com certa facilidade, que a objeção seria inválida, e para ilustrar o motivo, citou o exemplo de uma pessoa que se recusou a acreditar que o sol estivesse a 20 milhões de milhas da terra, porque seria inconcebível que existisse tanto espaço preenchido com éter, para tão pouco espaço com seres vivos⁴⁶.

8. O PROBLEMA DA DIREÇÃO DO TEMPO EM BOLTZMANN

Um outro problema, de maior complexidade filosófica, se apresentou, na discussão da hipótese cosmológica por Boltzmann. Introduzindo no domínio da ciência física tais considerações, era natural que Boltzmann sentisse a necessidade de confrontá-las com outros temas filosóficos correlatos, em especial com o da estrutura do tempo. Um dos significados propostos para a 2ª. Lei de Termodinâmica, era

(46) BOLTZMANN, 1896b, em BRUSH, 1966, p.242-243. Retornaremos a esse tema em nosso próximo capítulo.

que ela determinaria a direção temporal na qual ocorrem os processos físicos, o que poderia tradicionalmente ser interpretado de duas formas: de um ponto de vista absolutista, que haveria uma correspondência entre o sentido do tempo, determinado por propriedades a ele intrínsecas, e o sentido dos processos físicos, determinado pelo crescimento da entropia; de um ponto de vista relationalista, que o sentido do próprio tempo seria derivado do sentido de crescimento da entropia, nos processos físicos. Ao tentar relacionar a hipótese cosmológica com o problema da orientação temporal, Boltzmann veio a adotar o ponto de vista relationalista.

Além disso, na explicação probabilística, ainda não estava justificada a exclusão da possibilidade de que o macro-estado inicial do sistema, mesmo que fosse um estado de baixa entropia, estivesse em uma região de crescimento da Curva-H; tal exclusão exigiria uma referência aos micro-estados iniciais. Como então evitar que houvesse, por parte dos seres que habitam nessas regiões da curva, a observação de processos temporalmente reversos? Para evitar a possibilidade desse tipo de observação, Boltzmann propôs a idéia de que os seres vivos definem os estados do futuro como os estados mais prováveis, e os estados do passado como os estados menos prováveis. Logo não haveria um tempo universal, e cada região espacial do universo teria o tempo direcionado, por seus

habitantes, no sentido do crescimento da entropia⁴⁷. Em uma região de crescimento da entropia, a direção do tempo seria definida no sentido dos instantes correspondentes aos estados de menor entropia (estados mais improváveis) para os estados de maior entropia (estados mais prováveis); em uma região de decrescimento, a direção de tempo também seria definida no sentido dos instantes correspondentes aos estados de menor entropia para os estados de maior entropia⁴⁸. Conseqüentemente, os seres que vivem em uma região onde há decrescimento de entropia, estarão rodeados de processos físicos ocorrendo no sentido inverso ao que nós, humanos - que vivemos em uma região de crescimento de entropia - observamos, mas não terão sua direção do tempo invertida em relação à nossa.

Na verdade, Boltzmann está, aqui, adotando a concepção que chamamos de relacionalista-subjetivista. A direção do tempo seria construída pelos sistemas cognitivos dos seres vivos, tomando como argumento os estados dos sistemas físicos. Esta concepção vai além do relacionalismo-reducionista, pois admite que os seres vivos podem definir o sentido temporal de um processo de modo oposto ao que, do

(47) Ver discussão desse tópico em BRUSH, 1976a, p.635. Nossa exposição das idéias de Boltzmann sobre a definição de direção do tempo segue nossa própria interpretação do texto das Leituras

(48) Ver BOLTZMANN, 1896c, p. 447-448 e CURD, 1981, p.283.

ponto de vista relacionalista-reducionista, ele realmente ocorreria. Por exemplo: em uma região na qual ocorra diminuição da entropia, existirão processos como a separação espontânea da água e tinta, em um sistema isolado; porém, os seres vivos, nesta região, por terem seu ordenamento temporal definido de modo a considerar como anteriores os estados de menor probabilidade, e posteriores os estados de maior probabilidade, conceberão tal processo como sendo uma mistura espontânea de água e tinta. Portanto, uma consequência da hipótese de Boltzmann é que existem duas "direções do tempo", uma objetiva, dada pelo sentido do crescimento da entropia nos sistemas físicos isolados, e outra subjetiva, dada pela definição dos estados de menor entropia como os do passado, e dos de maior entropia como os do futuro. As duas direções se distinguem, e podem se opor, no caso de uma hipotética região do universo na qual ocorra diminuição de entropia em todos (ou na maior parte) os seus subsistemas. Nesse tipo de situação, haveria uma violação do imperativo pragmático de afinidade, por nós proposto (vide cap.1).

Na apresentação da hipótese cosmológica, e nas suas considerações sobre a direção do tempo, Boltzmann introduziu duas propriedades relativas à situação do observador - a de estar em uma região altamente improvável do universo, e a de definir a direção do tempo no sentido dos

estados menos prováveis para os mais prováveis - para resolver problemas da ciência física. Esse tipo de procedimento, que se tornou aceitável para muitos físicos contemporâneos, pode ser objeto de diversas interpretações. Uma, favorável a Boltzmann afirmando que nem todos, dentre os diversos mundos possíveis que são satisfeitos pelo modelo probabilístico, teriam um significado físico adequado à nossa experiência; neste caso, ele teria mostrado certas condições necessárias para que nossa experiência seja da forma que é. Uma segunda interpretação, desfavorável, identifica aqui a introdução de elementos subjetivos em uma teoria que se pretendia puramente objetiva, tendo como consequência a geração de uma tautologia⁴⁹.

As soluções finais apresentadas por Boltzmann, a hipótese cosmológica e a hipótese sobre a direção subjetiva do tempo, foram parcialmente conservadas e desenvolvidas por seus seguidores, cujas idéias principais estudaremos em seguida.

(49) Ver argumentos de Curd, contra as acusações popperianas de subjetivismo e tautologia em Boltzmann, em CURD, 1981, p. 289 e 291-293, e uma discussão em nosso próximo capítulo.

9. A REFORMULAÇÃO DE REICHENBACH

Os trabalhos filosóficos de Hans Reichenbach e Adolf Grünbaum, sobre irreversibilidade e tempo, consistiram em esforços de aperfeiçoamento da explicação probabilística da irreversibilidade, elaborada por Boltzmann, mostrando sua capacidade para estabelecer uma "direção" (Reichenbach) ou "anisotropia" (Grünbaum) do tempo.

No importante volume publicado postumamente, *The Direction of Time*, Reichenbach dedica um longo capítulo à "Direção do Tempo da Termodinâmica e Microestatística", onde faz uma reconstrução racional da abordagem probabilística de Boltzmann. Ele não considera o "princípio de crescimento da entropia" uma "lei estrita", mas uma "lei estatística"⁵⁰. Dois argumentos são levantados em favor dessa posição: por um lado, a física quântica teria mostrado que as leis fundamentais da natureza têm um caráter probabilístico⁵¹; por outro, Gibbs teria revelado a inconsistência da entropia "absoluta" termodinâmica, que deveria ser substituída pela entropia

(50) REICHENBACH, 1956, p. 54.

(51) REICHENBACH, 1956, p.56.

"relativa" estatística⁵². Estes dois argumentos aparentam evidenciar que a hipótese de Boltzmann teria sido confirmada pelos desenvolvimentos posteriores da física em nosso século.

Em sua reconstituição, Reichenbach dá especial atenção a duas suposições. Em primeiro lugar, a suposição de equiprobabilidade dos micro-estados, que é responsável pela definição de uma métrica probabilística, e que tem para ele uma "natureza empírica"⁵³. Certamente tal juízo sobre a suposição fundamental da Mecânica Estatística reflete duas orientações gerais da filosofia reichenbachiana, a recusa do "sintético a priori" e a interpretação frequentista das probabilidades⁵⁴. Em segundo, a suposição de determinismo, entendido como a univocidade da trajetória do sistema no espaço de fase, em obediência às leis da mecânica⁵⁵. Classicamente, a métrica probabilística pode ser baseada em uma suposição determinista: a trajetória do ponto

(52) REICHENBACH, 1956, p. 62-64. O "paradoxo de Gibbs" consiste em que, dado um sistema constituído por dois recipientes contíguos contendo um gás em iguais condições, e separados por uma divisória com uma portinhola, no momento da abertura desta, e sem qualquer alteração no estado do gás, o valor da entropia, calculado pela estatística de Maxwell - Boltzmann para um número absoluto de células acessíveis, seria maior que a soma das entropias do gás nos 2 recipientes. A solução do paradoxo foi considerar as probabilidades dos macro-estados relativas ao número de células disponíveis, o que conduz ao resultado esperado, isto é, a entropia do sistema inteiro como sendo a adição da entropia de suas partes.

(53) REICHENBACH, 1956, p. 56-57, 66 e 73.

(54) Cf. SALMON, 1977, p. 5-7, 14 ss.

(55) REICHENBACH, 1956, p. 74.

representativo do sistema no espaço de fase é determinada pelo hamiltoniano, e passa por todos os estados possíveis, consistentes com as condições iniciais e de contorno, com igual frequência⁵⁶. Para Reichenbach, contudo, a métrica probabilística é derivada da suposição de equiprobabilidade, que tem um caráter empírico, e não da suposição de determinismo. Seu argumento é o seguinte: se o "determinismo", no contexto da mecânica clássica, for entendido como a afirmação de que existe uma descrição precisa do sistema, do qual se prediz um estado com probabilidade igual à unidade, então o "indeterminismo" seria a negação da possibilidade de uma descrição última, ou a negação de que a seqüência de descrições mais e mais precisas convirja para um limite⁵⁷. A impossibilidade desta descrição (excluídos os casos de variação das condições de contorno) pode repousar no fato de que o número de parâmetros internos seria infinito, ou que as equações de movimento sejam apenas aproximadamente válidas⁵⁸. Uma evidência em favor do determinismo seria a convergência uniforme de valores nas seqüências de resultados, mas isto não

(56) REICHENBACH, 1956, p. 75, e 78-79. Em termos mais precisos, essa argumentação se baseia na Hipótese Ergódica e no Teorema de Liouville, mais uma suposição, implícita, de que a mecânica seria uma teoria completa para a descrição da evolução dos sistemas de muitos corpos. O efeito conjunto se assemelha ao "determinismo" referido por Reichenbach.

(57) REICHENBACH, 1956, p. 86-89

(58) REICHENBACH, 1956, p. 86-89.

é comprovado experimentalmente; observam-se, ao contrário, convergências não-uniformes, que impedem a estipulação da existência de uma descrição última da evolução do sistema⁵⁹. Conclui Reichenbach que "o determinismo é compatível logicamente com a física clássica, mas não é de forma nenhuma comprovado por ela, nem tornado provável por meio de evidência indutiva"⁶⁰.

A recusa do determinismo, por Reichenbach, não é acompanhada de uma tentativa de encontrar lugar para um princípio extramecânico, visto que ele sequer se refere ao "Teorema-H" original. O que ele pretende é evitar a inferência de propriedades dos processos físicos com base exclusivamente nas equações mecânicas. Sua ênfase está, desde o início, nas condições factuais que influenciam na evolução dos sistemas físicos, o que lhe permitirá desembaraçar-se das objeções de Loschmidt e Zermelo, com maior desenvoltura que Boltzmann, que só reconheceu tardiamente o papel das condições iniciais para a explicação da irreversibilidade, no contexto da abordagem probabilística.

Aceitando, da abordagem clássica, apenas a

(59) REICHENBACH, 1956, p. 90-94.

(60) REICHENBACH, 1956, p. 95.

suposição de equiprobabilidade, reinterpretada à sua maneira, Reichenbach vem então a adotar novas suposições, que desempenham importante papel, na derivação da direção dos processos físicos. Ele introduz o modelo das "redes de probabilidades", aplicando-o à mistura de dois gases, e, mais simplificada, à difusão de um único gás. Cada fileira horizontal expressa as posições e velocidades assumidas por uma molécula, em intervalos temporais discretos e pequenos, às quais estão associadas probabilidades horizontais, ou probabilidades de uma molécula se encontrar em certo estado⁶¹. Nas probabilidades horizontais, cada valor tem um "sobreefeito" sobre o seguinte; ou seja, a probabilidade de se obter um estado, dado que outro já foi obtido anteriormente, é diferente de sua probabilidade absoluta de obtenção. As probabilidades verticais refletem a probabilidade de uma molécula estar em um certo estado, relativamente à classe de atributos das colunas (isto é, o conjunto de estados das demais moléculas). As relações entre as probabilidades verticais e horizontais, que descrevem a evolução do sistema, são deriváveis das probabilidades horizontais, caso imponhamos duas condições: independência estatística das fileiras horizontais entre si (a ocorrência de um valor em uma fileira não altera o sobreefeito do antecessor sobre o sucessor em

(61) REICHENBACH, 1956, p. 98-99.

outra fileira), e invariância da rede ("toda probabilidade de fase contada horizontalmente é igual ao correspondente tipo de probabilidade de fase vertical")⁶².

O processo de mistura de dois gases é calculável por intermédio de uma rede na qual:

- a) existe sobreefeito horizontalmente;
- b) na primeira coluna ainda não há mistura e,
- c) são satisfeitas as condições de independência e invariância.

Uma rede deste tipo é por ele chamada "rede de mistura"⁶³. Reichenbach acredita que os sistemas termodinâmicos, para os quais foi definida originalmente a entropia, poderiam ter sua evolução descrita adequadamente por uma rede de mistura. Devido à condição de invariância, em uma rede de mistura podem-se fazer inferências da sucessão de estados de uma única molécula ao longo do tempo (ensemble temporal) para o conjunto de estados simultâneos de diversas moléculas (ensemble espacial)⁶⁴. A condição de invariância, introduzida analiticamente, não se aplicaria a todos os

(62) REICHENBACH, 1956, p. 100-102.

(63) REICHENBACH, 1956, p. 103.

(64) REICHENBACH, 1956, p. 103.

tipos de redes probabilísticas, e o julgamento sobre sua adequação aos processos estudados seria um problema empírico⁶⁵. Reichenbach, nesse ponto, se aproxima mais do método hipotético-dedutivo (no qual a adequação empírica das suposições é julgada 'a posteriori') que do indutivo, embora como bom empirista ainda considere a experiência decisiva em última instância.

Com base no modelo probabilístico proposto por Boltzmann, e descartando o modelo mecanista da teoria cinética, cujo lugar é ocupado pelo modelo da rede de mistura, Reichenbach propõe explicações adicionais, tanto da irreversibilidade da evolução dos sistemas físicos, quanto do tema correlato, também levantado por Boltzmann, da existência de uma "direção do tempo". Sua concepção da direção do tempo é relacionalista-reducionista, ou seja, ele define a direção do tempo com base na direção dos processos físicos, gerada pela variação da entropia. Em defesa desta concepção, ele começa por argumentar contra uma possível objeção⁶⁶. Como a concepção estatística da irreversibilidade admite que a entropia de uma minoria de sistemas possa diminuir, e como, para a concepção relacionalista-reducionista do tempo, a direção de tempo seguiria a direção dos processos físicos,

(65) REICHENBACH, 1956, p. 105.

(66) REICHENBACH, 1956, p. 107.

então poderiam ocorrer direções do tempo opostas em uma mesma região espacial: uma delas conforme à maioria dos sistemas, nos quais a entropia aumenta, e outra conforme à minoria, onde ela diminui. Mas Reichenbach não pretende abandonar nem a concepção estatística da irreversibilidade, nem a concepção relacionalista-reducionista do tempo. Para compatibilizá-las, argumenta que a direção do tempo deve ser definida apenas em relação à maioria dos processos termodinâmicos que ocorrem em certa região espacial⁶⁷. Esta solução, embora incorpore uma certa decisão subjetiva, de não levar em conta a direção da minoria dos processos na computação da direção global, não recai em certas dificuldades da posição boltzmaniana. Boltzmann defendia que os "seres vivos" definem a direção positiva do tempo segundo a direção de crescimento da entropia, permitindo, conseqüentemente, uma oposição entre tempo subjetivo e direção dos processos físicos, nas regiões em que a entropia diminui. Para Reichenbach, a direção do tempo estará sempre em consonância com a direção (da maioria) dos processos físicos. Sua alternativa permite a construção de uma coordenada temporal unidirecional, que abranja uma região espacial na qual

(67) "A direção do tempo é uma propriedade da cadeia causal como um todo, e é transferida da cadeia para os processos individuais. Nós definimos o tempo positivo como a direção na qual a maioria dos processos termodinâmicos ocorre", REICHENBACH, 1956, p.108

existam processos físicos ocorrendo em direções opostas quanto à entropia, e ainda os processos "adirecionais".

Feita a definição acima, Reichenbach passa a estudar o problema da irreversibilidade, que para ele se coloca nos seguintes termos: "a questão de se saber se é verdadeiro que as mudanças em direção de estados de maior entropia, ou de maior probabilidade, são mais prováveis que as mudanças na direção oposta"⁶⁸. Uma das mais sérias objeções ao princípio de que os sistemas físicos tendem na direção dos (macro) estados mais prováveis foi a objeção de reversibilidade dos micro-estados. Reinterpretando à sua maneira a objeção de reversibilidade, Reichenbach afirma que "a objeção se segue da natureza mesmo das probabilidades, e não se liga com a suposição de leis causais por trás da estatística molecular"⁶⁹.

Para refutar a objeção de reversibilidade, Reichenbach se refere à evolução de um sistema quase-isolado, formado por dois gases, indo de um micro-estado a, no qual os gases estão separados, para um estado b, em que se misturam.

(68) REICHENBACH, 1956, p.109.

(69) REICHENBACH, 1956, p. 112. Reichenbach lembra que, em sua versão original, a objeção se baseava no determinismo associado às leis da mecânica.

Uma reversão das velocidades das partículas em b gera b^* (estado reverso de b), conduzindo o sistema para a^* (estado reverso de a). Segundo Reichenbach, a e a^* possuem "ordem explícita", pois correspondem a um macroestado A , no qual os gases estão separados, e b^* possui "ordem implícita", pois conduz a a^* , que tem ordem explícita. A ordem explícita é para ele "estável", no sentido de que pequenas perturbações não alteram a sua evolução para o estado de equilíbrio, ao passo que a ordem implícita é "instável", no sentido de que uma pequena perturbação pode fazer com que sua evolução reconduza o sistema diretamente ao equilíbrio, sem antes passar pelo micro-estado a^* . A instabilidade de b^* torna o processo menos provável: as perturbações podem embaralhar as seqüências de estados, embora, atingindo o sistema de forma aleatória, não estejam direcionadas no sentido de impedir sistematicamente a obtenção de uma certa seqüência⁷⁰. Conseqüentemente, como já ocorrera em Boltzmann, a objeção de reversibilidade terminaria por favorecer a abordagem probabilística da entropia, que admite a possibilidade de reversão dos processos físicos, mas explica a não-ocorrência de reversões, devido a sua alta improbabilidade.

(70) REICHENBACH, 1956, p. 113. A idéia é de Thomson, que, em 1874, observou que "pequenos desvios, com relação à precisão absoluta" poderiam fazer com que o tempo gasto para a diminuição da entropia fosse abreviado, sendo inversamente proporcional ao número de moléculas do sistema. Voltaremos a essa idéia em nosso capítulo final.

Reichenbach aplicou suas concepções à evolução do universo, suposto como um sistema finito, do qual se poderiam caracterizar os estados, através de suas macroprobabilidades, e representar a evolução temporal, por intermédio da curva estatística isotrópica da entropia. Duas questões são colocadas: primeiramente, considerando-se um macroestado A de baixa entropia, será que um macroestado B temporalmente posterior a A terá entropia mais alta? A resposta é que, se o intervalo de tempo entre A e B for suficientemente grande (o "truque" está no tamanho do intervalo a ser considerado), é mais provável que a entropia de B seja maior que a de A. Porém, o mesmo ocorrerá se B for temporalmente anterior a A, o que revela que a curva isotrópica da entropia probabilística, para um único sistema, não é suficiente para estabelecer uma direção de tempo; ela apenas mostra que o sistema permanece a maior parte do tempo em estados de alta entropia⁷¹. Para se estabelecer a direção do tempo, são necessária outras suposições; trata-se da mesma dificuldade que Boltzmann fora obrigado a constatar.

A segunda questão diz respeito à possibilidade de se usar tal curva, reconhecida a sua simetria temporal, para definir uma direção de tempo relativa ao ensemble

(71) Ver REICHENBACH, 1956, p. 114-116.

espacial. Agora a análise não se refere ao universo em sua totalidade, mas a subsistemas, que mantêm certo tipo de interação com seus ambientes. Reichenbach adota a suposição de que a ocorrência de um estado de baixa entropia em um subsistema observado é consequência da interação desse sistema com o ambiente, e não de uma flutuação altamente improvável, em um sistema fechado que já tivesse estado anteriormente no equilíbrio. Ele introduz então a noção de sistemas desmembrados ("branch system"), para se referir aos sistemas que são separados de um sistema maior, permanecendo inicialmente em um estado de baixa entropia, e caminhando progressivamente para o equilíbrio⁷².

Um ensemble espacial, constituído por um conjunto de sistemas desmembrados similares, espacialmente distribuídos e temporalmente contemporâneos, é a unidade em relação à qual se poderá definir uma direção do tempo. Sua evolução é descrita por uma rede de probabilidades, na qual cada fileira caracteriza uma superfície de energia no espaço de fase, tendo um primeiro elemento em estado de baixa probabilidade, e os seguintes em estados de probabilidade progressivamente mais altas, o que satisfaz às condições de uma "rede de mistura". Conseqüentemente, pode-se calcular que a probabilidade "vertical" de um conjunto de estados de baixa

(72) REICHENBACH, 1956, p. 117-118.

entropia ser seguido por um conjunto de estados de entropia mais alta é muito mais alta que a probabilidade de serem precedidos por estados de entropia mais baixa⁷³. A conclusão acima aplicar-se-ia sempre que as seqüências de estados em questão não estiverem muito próximas do início das fileiras, e não se aplica a estados anteriores aos primeiros de cada fileira.

Obtém-se, através das medidas acima, um meio de estabelecer uma direção do tempo para um conjunto de sistemas que ocupam uma certa região espacial. Para tal, considera-se que a rede probabilística do coletivo espacial, por eles constituída, teria as características de um processo de mistura, mesmo que fisicamente estes sistemas não interajam reciprocamente. A responsabilidade pela atribuição das propriedades de uma rede de mistura ao coletivo espacial estaria para Reichenbach nas "leis do acaso governando séries independentes de eventos". Ele então conclui que "processos de mistura ... são os instrumentos que indicam uma direção de tempo. Eles o fazem porque traduzem a somatória das probabilidades horizontais em uma assimetria das probabilidades verticais"⁷⁴.

(73) REICHENBACH, 1956, p. 119-121.

(74) REICHENBACH, 1956, p. 122.

Embora esteja aqui claramente explicitado o papel da rede de mistura na obtenção de uma direção dos processos físicos (e, por extensão, do próprio tempo, do ponto de vista relacionalista-reducionista), não devemos deixar de notar o papel fundamental da condição inicial de baixa entropia dos sistemas desmembrados, que gera a assimetria própria às fileiras horizontais, a qual, através da suposição de rede de mistura, se torna uma assimetria da rede inteira.

Em seguida, Reichenbach relaciona as conclusões obtidas para o ensemble espacial, com a curva de entropia do universo. Um ensemble espacial no qual as fileiras começam com estados de baixa entropia, corresponde a uma pequena parte da curva de entropia do universo. Ao longo dessa curva, existem as regiões de alta entropia, onde os sistemas ramificados teriam comportamento diferente dos de nossa região do universo. Reichenbach argumenta que é possível definir direções do tempo relativas a seções da curva de entropia do universo, segundo o critério da "maioria". Em uma região de aumento da entropia, na maioria dos sistemas, a direção positiva do tempo seria a direção da evolução dessa maioria. O mesmo se aplica para as regiões em que a entropia diminui na maioria dos sistemas. Reichenbach descarta, assim como o fez Boltzmann, a possibilidade de uma direção do tempo universal, sustentando que "a alternância de direções de tempo não

envolveria nenhuma contradição, para as experiências a nós acessíveis⁷⁵, o que parcialmente se deve ao fato de que "não podemos adquirir conhecimento sobre um sistema que possua, no presente, uma direção do tempo oposta à nossa"⁷⁶.

A definição de uma direção do tempo teria como condição necessária a existência do observador ao longo de uma seção relativamente longa de crescimento ou decrescimento da entropia, e como condição suficiente que, nessa seção, ocorra um grande número de sistemas desmembrados com variação de entropia correspondente a tal parte da curva. A última condição se baseia em suposições que, para Reichenbach, têm caráter empírico. Ele se preocupou em revisar tais suposições, a maior parte delas já discutidas anteriormente, para verificar se não haveria circularidade em suas definições. As suposições são as seguintes⁷⁷:

1. O estado atual (de nossa região) do universo é de baixa entropia;

2. Existem muitos sistemas desmembrados;

(75) REICHENBACH, 1956, p. 128, 133ss.

(76) REICHENBACH, 1956, p. 139.

(77) REICHENBACH, 1956, p. 136.

3. A rede de probabilidades do conjunto de sistemas desmembrados de nossa região é uma rede de mistura;

4. Na grande maioria destes sistemas, ocorre uma variação da entropia (um de seus pontos terminais é um estado de baixa entropia e o outro de alta entropia), o que tem como consequência uma assimetria física na maioria das fileiras;

5. Na grande maioria dos sistemas desmembrados, as direções de crescimento da entropia são paralelas entre si, e também à direção do sistema maior do qual eles são separados.

A primeira destas suposições é claramente factual, e estabelece uma classe de estados iniciais disponível, para os sistemas cuja evolução conjunta constitui o fenômeno a ser explicado, isto é, a irreversibilidade termodinâmica. A segunda não parece ser objeto de maiores questionamentos. A última suposição não parece ser adequada a todos os fenômenos, pois, como lembra o próprio Reichenbach, para sistemas com pequeno número de componentes, os fenômenos de flutuação que ocorrem contrariam o paralelismo suposto. Mas ele acredita que ela possa ser derivada das suposições nºs. 3 e 4, oferecendo o seguinte argumento: "em uma rede de

mistura, as últimas colunas assumem distribuições que convergem para a distribuição existente nas fileiras"; portanto, se a probabilidade de ocorrer um estado de baixa entropia é pequeno nas fileiras, "apenas as colunas iniciais da rede podem ter um grande número de estados de baixa entropia". Como todo sistema desmembrado tem um estado terminal de baixa e um de alta entropia, "estes estados terminais têm que estar de um mesmo lado" na rede de mistura. Evidentemente, a prova da derivação acima requer a suposição adicional, que anteriormente mencionamos como um "truque", de se considerar as fileiras suficientemente longas. Reichenbach então reconhece que "a conclusão obtida não representa uma lei estrita para um conjunto de fatos individuais dados; ela está sujeita a possíveis exceções"⁷⁸, o que é atenuado pelo fato de que "hipóteses estatísticas não são revogadas devido a exceções individuais"⁷⁹. Além disso, como não existem evidências empíricas de exceções à suposição nº. 5, ela expressaria então uma certa uniformidade da natureza, uma "isotropia", e os sistemas ramificados definiriam uma direção de tempo única "porque o mundo é estatisticamente isotrópico"⁸⁰.

(78) REICHENBACH, 1956, p. 139.

(79) REICHENBACH, 1956, p. 140.

(80) REICHENBACH, 1956, p. 141.

Assim como na última versão da abordagem probabilística de Boltzmann, Reichenbach procurou explicar a irreversibilidade termodinâmica lançando mão de uma suposição sobre a baixa entropia do estado inicial dos sistemas por nós observáveis; mas essa suposição, embora necessária para conferir direcionalidade à curva isotrópica da entropia probabilística, não se mostrou suficiente para revelar a razão pela qual processos excepcionais de diminuição de entropia nunca foram experimentalmente detectados, em uma região caracterizada por tal tipo de estados iniciais.

Um comentário deve ser feito a respeito da concepção reichenbachiana do processo de observação, visto que é em relação a ele que se define a classe de estados iniciais de baixa entropia que, por sua vez, desempenha papel crucial na abordagem probabilística. Salmon, em um estudo sobre a vida e obra de Reichenbach, lembra que o seu principal propósito, ao analisar o espaço e o tempo, era o de eliminar da ciência física as categorias subjetivas⁸¹. Assim, no Apêndice a *The Direction of Time* (que corresponderia ao último capítulo do livro, e não chegou a ser concluído), onde se trataria das relações entre a experiência subjetiva do tempo e a direção física objetiva, Reichenbach atribuiu um caráter

(81) Ver SALMON, 1977, p. 33.

naturalístico à noção de observação, envolvida na definição da direção do tempo: "O homem é uma parte da natureza, e sua memória é um instrumento de registro, sujeito às leis da teoria da informação. O crescimento da informação define a direção do tempo subjetiva"⁸². Portanto, com relação à classe de estados iniciais privilegiados, basta que ela ocorra em uma região do universo na qual existam sistemas registradores de informação, os quais, automaticamente, registrarão uma certa direção do tempo, de acordo com os processos externos, e não conforme um critério próprio ao sistema cognitivo, como em Boltzmann.

10. A REFORMULAÇÃO DE GRÜNBAUM

O trabalho de Grünbaum sobre o tempo e a irreversibilidade foi, em parte, responsável pela atenção dada à obra póstuma de Reichenbach. Embora retendo idéias centrais de seus antecessores, ele introduziu refinamentos conceituais na abordagem relacionalista do tempo, afastando-a ainda mais dos riscos de subjetivismo ou antropomorfismo, ao mesmo tempo em que terminou por reconhecer o papel de um novo princípio,

(82) REICHENBACH, 1956, p. 269.

adicional às probabilidades e às macro-condições iniciais , na explicação da irreversibilidade termodinâmica.

Em 1957, publicando com E. Hill uma nota em *Nature*, onde parcialmente aceitavam a concepção não-entrópica da irreversibilidade proposta por Popper (vide nosso Cap. 3), Grünbaum se referia à abordagem feita por Reichenbach da seguinte maneira: "Embora esse conceito [de entropia probabilística-APJ] seja pertinente para uma caracterização parcial das bases empíricas e psicológicas da seta do tempo em nosso ambiente físico, não tem relevância intrínseca, de nosso ponto de vista, para a irreversibilidade física como tal"⁸³. Uma década depois, em *Modern Science and Zeno's Paradoxes*, Grünbaum já tinha alterado seu julgamento sobre a relevância da abordagem probabilística da entropia, no estabelecimento de uma "anisotropia" do tempo.

O conceito de "anisotropia do tempo" não diria respeito nem à assimetria do tempo propriamente dita (a "seta" do tempo), nem ao vir-a-ser temporal ("temporal becoming"). Para Grünbaum, a anisotropia do tempo é algo objetivo, uma "diferença estrutural" entre os dois sentidos temporais do "antes" e do "depois"⁸⁴, e a base para o estabelecimento

(83) GRÜNBAUM e HILL, 1957, p. 1297.

(84) GRÜNBAUM, 1967, p. 13, e GRÜNBAUM, 1972, p. 209 ss.

desta diferença estaria na entropia probabilística, acrescida de uma suposição sobre a condição de baixa entropia dos macro-estados iniciais, e de um princípio de aleatoriedade relativo aos micro-estados iniciais. Estes três fatores produzem conjuntamente uma irreversibilidade de tipo "de fato" ou "nomologicamente contingente"⁸⁵. Dado que exista tal tipo de processo físico, então, infere ele, de modo relacionalista-reducionista, o tempo seria anisotrópico⁸⁶. Por outro lado, a anisotropia conferida ao tempo pelos processos irreversíveis, factuais ou contingentes, não implicaria nem em uma ordem assimétrica estrita, expressa pela imagem da "seta" do tempo⁸⁷, nem na existência de um vir-a-ser, caracterizado pela transição do presente, ao longo do passado para o futuro. Esse último seria um processo "dependente da mente" ("mind-dependent"), ou seja, um processo que só existe para seres conscientes, que têm um sentido do presente ou "agora" ("now"), e que não teria um significado físico objetivo⁸⁸.

A dificuldade com o conceito de "anisotropia do tempo" é que através dele Grünbaum pretende especificar de

(85) GRÜNBAUM, 1972, p. 210ss, o que corresponde à nossa concepção de irreversibilidade estatística. Grünbaum não levou em conta a possibilidade de uma irreversibilidade factual estrita.

(86) GRÜNBAUM, 1967, p. 12, e GRÜNBAUM, 1972, p. 211-212.

(87) GRÜNBAUM, 1967, p. 13, e GRÜNBAUM, 1972, p. 216-217.

(88) GRÜNBAUM, 1967, p. 14 ss.

modo "intrínseco"⁸⁹, uma propriedade do tempo, a partir de uma propriedade dos processos físicos: "existem certos tipos de seqüências de estados de sistemas, especificados na ordem das coordenadas temporais crescentes, tal que estes mesmos tipos de seqüências não ocorrem da mesma forma na ordem das coordenadas temporais decrescentes"⁹⁰. Mas a diferença, por ele encontrada, entre tais seqüências de estados, é apenas de natureza estatística, o que conduz à conclusão de que as diferenças entre os sentidos temporais também seriam de natureza estatística, uma idéia estranha que já tinha sido condenada por Zermelo, e posteriormente também por Carnap⁹¹. Cabe a Grünbaum o mérito de assumir claramente tal consequência da concepção estatística da irreversibilidade, associada à posição relacionalista-reducionista do tempo.

Grünbaum, enquanto defensor consciente da concepção estatística da irreversibilidade, não se contentou, como Reichenbach, com uma "maioria" de processos físicos, mas pretendeu explicar porque, apesar da reversibilidade permitida

(89) GRÜNBAUM, 1972, p. 214 ss. Para Grünbaum, uma relação de ordem é intrínseca quando "não requer referência a entidades externas ao domínio" (p. 215).

(90) GRÜNBAUM, 1967, p. 12. O mesmo raciocínio aparece em GRÜNBAUM, 1972, p. 212.

(91) Cf. ZERMELO, 1896, 'apud' BRUSH, 1976b, p. 235; ou CARNAP, citado pelo próprio Grünbaum, 1972, p. 279: "parece ser muito duvidosa a legitimidade de se tomar uma correlação estatística, por mais alta que seja, como a base para uma definição teórica".

pelas leis físicas, as seqüências inversas ou reversas dos processos observados "sempre (ou quase sempre) deixam de ocorrer"⁹², já que vivemos em um "mundo em não equilíbrio, ao qual a segunda lei da termodinâmica clássica, não-estatística, é efetivamente aplicável". Ele também discordou da primeira hipótese de Reichenbach, de que as relações causais possam ser utilizadas para se atribuir uma "ordem" ao tempo; para ele, a anisotropia temporal é mais primitiva que a relação causal, e é responsável pelo próprio ordenamento temporal de causalidade⁹³.

A questão colocada inicialmente por Grünbaum é a de se saber se - e como - a entropia confere anisotropia ao tempo, ordenando serialmente as seqüências de estados de sistemas isolados⁹⁴. Da termodinâmica clássica, segue-se a definição de Eddington, que "de dois estados do mundo, o posterior é aquele que corresponde à entropia mais alta, em qualquer sistema fechado e distante do equilíbrio, e o anterior é o que corresponde ao estado de menor entropia"⁹⁵. Dada a característica de irreversibilidade conferida pela entropia termodinâmica, tal definição denotaria a

(92) GRÜNBAUM, 1972, p.211.

(93) GRÜNBAUM, 1972, p. 218, e também sua crítica à teoria causal do tempo de Reichenbach, p. 179 ss.

(94) GRÜNBAUM, 1972, p. 219.

(95) GRÜNBAUM, 1972, p. 222-223.

unidirecionalidade do tempo, a qual, porém, não deveria ser associada ao fluxo unidirecional do tempo da consciência, como fez Bridgman⁹⁶. A definição de Eddington por sua vez falharia porque, do ponto de vista da mecânica estatística, a premissa de que "em um sistema permanentemente fechado, a entropia nunca diminui com o tempo" seria "insustentável"⁹⁷.

Grünbaum recapitulou os aspectos básicos da abordagem probabilística, oriunda da segunda parte da obra de Boltzmann, lembrando que a formulação estatística da segunda lei associa maior entropia com maior probabilidade dos macro-estados do sistema. Assim como Boltzmann e Reichenbach, ele constatou que a formulação probabilística, tomada isoladamente, é insuficiente para dar conta da irreversibilidade termodinâmica, mas, assim como eles - e citando os Ehrenfests - observou que, dado um ponto de baixa probabilidade (baixa entropia) na curva de evolução de um sistema isolado, é altamente provável que este seja seguido ou precedido de pontos de probabilidade mais alta (maior entropia)⁹⁸. O fato de tanto se poder inferir que um estado de maior entropia lhe é anterior, quanto que lhe é posterior,

(96) GRUNBAUM, 1972, p. 223 ss.

(97) GRUNBAUM, 1972, p. 236.

(98) GRUNBAUM, 1972, p. 242.

tornaria inválida a definição de Eddington⁹⁹. Ele começou a se distanciar de Reichenbach, recusando hipóteses a respeito da evolução do universo como um todo, e preferindo adotar a hipótese levantada por Von Weizsäcker, de que os estados iniciais de baixa entropia, encontrados em nossa região do universo, podem ser entendidos como constituindo uma flutuação, na curva probabilística da entropia, sem necessidade de elaborar suposições cosmológicas de maior amplitude para justificá-la¹⁰⁰.

Após discutir e rejeitar a tentativa de Born, de utilização da mecânica quântica para estabelecer uma irreversibilidade na evolução dos micro-estados, Grünbaum retomou criticamente a hipótese de Reichenbach, de explicação da irreversibilidade macroscópica através dos sistemas desmembrados. Assumiu então a existência de condições iniciais, e de contorno, características da "época corrente", caracterizada por esmagadora maioria de processos que ocorrem no sentido do aumento da entropia¹⁰¹. Ele concordou com Reichenbach que o estado inicial de baixa entropia desses sistemas se deve à sua interação com um sistema maior, em um

(99) GRUNBAUM, 1972, p. 244.

(100) GRUNBAUM, 1972, p. 243 ss.

(101) GRUNBAUM, 1972, p. 254.

intervalo de tempo curto¹⁰². Porém, ao invés de utilizar uma rede de mistura no ensemble espacial, para tornar as propriedades da evolução temporal dos sistemas desmembrados propriedades generalizadas em nossa região do universo, ele preferiu adotar uma suposição de aleatoriedade, na distribuição dos micro-estados dos estados iniciais dos sistemas desmembrados.

A suposição de aleatoriedade molecular é introduzida sem maiores justificações, que seriam desnecessárias apenas para os conhecedores do trabalho inicial de Boltzmann, e de sua discussão com os críticos ingleses, ou do trabalho dos Ehrenfests¹⁰³. Ela consiste em que "para cada classe de sistemas desmembrados equivalentes, possuindo o mesmo valor inicial da entropia S_1 , os micro-estados, constituindo os macro-estados iniciais idênticos, de entropia S_1 , são amostras aleatórias do conjunto de todos os micro-estados W_1 correspondentes ao macro-estado de entropia S_1 "¹⁰⁴.

(102) GRUNBAUM, 1972, p.255-356.

(103) GRUNBAUM, 1972, p. 256 : "Existe uma propriedade factual adicional dos sistemas desmembrados... essa propriedade consiste na seguinte aleatoriedade... na distribuição dos micro-estados pertencentes ao macro-estado inicial de um coletivo espacial de sistemas desmembrados".

(104) GRUNBAUM, 1972, p. 256.

Com base nas duas suposições, ele infere dois tipos de comportamento da entropia probabilística:

a) dado que o estado inicial dos sistemas desmembrados seja de baixa entropia, então eles se localizam na proximidade de um ponto de mínima, na curva da entropia de um sistema isolado; como esses sistemas não existiam anteriormente, não poderiam ter percorrido um estado de menor entropia, e, além disso, como as seções de grande queda da entropia, naquela curva, são muito mais raras que as pequenas flutuações, a grande maioria dos estados de baixa entropia destes sistemas se localiza no ponto de mínimo ou em suas proximidades; portanto, sua grande maioria irá, no sentido temporal crescente, evoluir para estados de maior entropia¹⁰⁵;

b) dada a distribuição aleatória dos micro-estados iniciais, a grande maioria dos sistemas desmembrados de um ensemble espacial que estão em estados de alta entropia não evoluirá para estados de menor entropia: "a já mencionada propriedade de aleatoriedade assegura que a ampla maioria dos sistemas desmembrados, cujos estados iniciais são de equilíbrio, possui valores máximos de entropia localizados bem no meio do plano da curva da entropia relativa a um único

(105) GRUNBAUM, 1972, p. 257-258.

sistema, ao invés da extremidade do plano, onde um decrescimento de entropia se inicia"¹⁰⁶. Ou seja, a escolha aleatória do macro-estado inicial garante que a maioria dos sistemas com macro-estado inicial de alta entropia não evoluirá para estados de menor entropia. Acrescentamos ainda que, com base no mesmo tipo de raciocínio, a suposição também garante que a ampla maioria dos sistemas com estado inicial de baixa entropia não evoluirá para estados de entropia ainda menor.

A posição de Grünbaum no debate o torna vulnerável às objeções de Mehlberg e Popper, por ele citadas, de que, de acordo com a concepção probabilística da entropia, acrescida das duas condições extras, seria possível que ocorressem fenômenos de sua diminuição, em alguns dos sistemas ramificados, que os tornaria contra-direcionados em relação à maioria dos sistemas componentes de um coletivo espacial¹⁰⁷. Sem oferecer, a estas objeções, uma resposta mais consistente que a suposição de aleatoriedade dos micro-estados iniciais, Grünbaum desviou o foco do debate para uma crítica a Reichenbach, como se as objeções daqueles autores só se aplicassem ao último. As divergências, frente a Reichenbach,

(106) GRÜNBAUM, 1972, p. 258.

(107) GRÜNBAUM, 1972, p. 260-261.

seriam que, primeiramente, como Grünbaum não vê sentido em se definir a entropia para o universo em sua totalidade, não compartilha também de suposição, daí derivada, de paralelismo entre a direção de crescimento da entropia do universo e a direção de cada sistema ramificado, em determinada época e em determinada região; em segundo lugar, não concorda com a regionalidade da anisotropia do tempo, e com a possível contra-direção de uma região com relação à outra¹⁰⁸. Para Grünbaum, a suposição de aleatoriedade se aplica a todo estado inicial, de toda região espacial ou temporal, produzindo uma anisotropia universal¹⁰⁹. Essa suposição parece ser incompatível com um universo espacialmente finito ou com número finito de partículas, mas Grünbaum preferiu deixar tal discussão aberta¹¹⁰.

De Boltzmann a Reichenbach, e deste a Grünbaum, notamos um esforço em três sentidos:

a) tratamento rigoroso das suposições necessárias para se explicar a irreversibilidade fenomenológica a partir do modelo probabilístico da entropia, reconhecido como sendo isoladamente insuficiente para dar

(108) GRUNBAUM, 1972, p. 261.

(109) GRUNBAUM, 1972, p. 263.

(110) GRUNBAUM, 1972, p. 262-263.

conta da tarefa;

b) eliminação do componente subjetivo (ou "biológico") da direção ou anisotropia do tempo;

c) refinamento conceitual da abordagem relacionalista do tempo.

O problema das suposições adicionais ao modelo probabilístico se afigura como o central, pois dele depende o sucesso de todo o empreendimento. Enquanto no "Teorema-H" original de Boltzmann, obtia-se irreversibilidade estrita às custas da introdução de modestas suposições extramecânicas, sua segunda abordagem necessitou de suposições sobre os macro-estados iniciais, que o remeteram a uma proto-cosmologia, cujos resultados foram criticados por seus próprios seguidores. Através da introdução das novas suposições, o uso de princípios extramecânicos não foi abandonado na abordagem probabilística. Em Reichenbach, o emaranhado de suposições atinge maior densidade, inclusive com tentativas de derivação de umas a partir de outras. A adoção do princípio de escolha aleatória do micro-estado inicial, de Grünbaum, implica por sua vez no abandono de uma concepção puramente mecânica, e na adoção de um componente aleatório, que não é implicado meramente por nosso desconhecimento dos valores exatos dos

micro-estados iniciais. Em ambos os casos adota-se um compromisso ontológico, seja em nível da própria natureza, seja em nível de nossa interação com ela. Visto que o preço a se pagar, pela explicação da irreversibilidade, não é maior, no "Teorema-H" original, que nos subprodutos da abordagem probabilística, devemos reavaliar se a eficácia da segunda compensaria a adoção do emaranhado de suposições, a que sua aceitação nos obriga.

CAPÍTULO III

CRÍTICA DA IRREVERSIBILIDADE PROBABILÍSTICA

1- CRÍTICA DE POPPER AO SUBJETIVISMO DE BOLTZMANN

A admissão da possibilidade de diminuição da entropia, em quantidades macroscopicamente significativas, em sistemas isolados, pela abordagem probabilística de Boltzmann, não encontrou muitos críticos ferrenhos. Durante uma centena de anos essa visão tem predominado, entre físicos e filósofos, como explicação da irreversibilidade fenomenológica. Alguns dos autores que se destacaram, em sua oposição à abordagem probabilística, foram Zermelo, Popper e Earman. Os três tiveram motivos extras para divergir da concepção boltzmanniana: Zermelo, por sua associação com Planck, defensor de uma teoria da irreversibilidade rival, baseada no Eletromagnetismo; Popper, por defender uma outra teoria, também rival; e Earman, por defender a primazia da orientabilidade temporal no espaço-tempo. Uma análise crítica das propostas de Boltzmann, Reichenbach e Grünbaum precisa reavaliar as objeções feitas por aqueles autores e outros, desdobrando e complementando, ou rebatendo-as, onde forem inconvenientes.

As críticas de Popper a Boltzmann, que aparecem de forma mais desenvolvida em sua *Autobiografia*¹, são motivadas pela posição originalmente defendida em um artigo de 1956, na revista *Nature*. Ele sustentava que os fenômenos irreversíveis que observamos se devem à ausência das classes de condições iniciais, ou de condições de contorno, que produziriam os processos reversos. Estas condições dependeriam de certas correlações causais que não ocorrem "espontaneamente" na natureza².

Três pontos, logicamente encadeados, ressaltam na argumentação crítica de Popper:

a) para Boltzmann, não existe uma (única) direção do tempo objetiva; pelo contrário, para ele a direção de tempo é definida de modo subjetivo (ou "biológico"): os animais "definem" a direção do tempo como a direção de aumento da entropia³;

(1) POPPER, K., 1972, São Paulo, Cultrix, p. 165-172.

(2) POPPER, K., 1956, p. 538. Uma discussão da concepção popperiana, assim como uma análise de seu debate com Grünbaum, encontra-se em GHINS, 1986.

(3) POPPER, K., 1972, p. 167: "Boltzmann abandonou sua teoria de uma direção temporal objetiva"; p. 168: "Suponhamos ... que a vida seja possível apenas nos lados de vales profundos da entropia ... subjetivamente, nós (e, conosco, os outros animais) percebemos a coordenada temporal como se ela tivesse um sentido - uma seta - apontando para locais em que a entropia aumenta".

- b) devido a tal tipo de definição da direção de tempo, a afirmação de que "a entropia aumenta na direção positiva do tempo" se torna tautológica⁴;
- c) devido ao caráter tautológico da definição acima, não se deve basear a direção do tempo na variação da entropia, mas sim em um outro critério, que vem a ser o do próprio Popper⁵.

A argumentação de Popper é construída de tal forma que, se falsearmos a primeira afirmação, relativa à subjetividade da direção do tempo em Boltzmann, todo o argumento é invalidado. Contudo, parece-nos que se Popper percebeu a fraqueza da proposta relacionalista de Boltzmann, o mesmo ocorreu também com os seguidores do segundo, que trataram de eliminar o elemento subjetivista da "definição" relacionalista da direção (ou anisotropia) do tempo. Portanto,

(4) POPPER, K., 1972, p. 167: "uma teoria subjetiva acerca da direção do tempo, teoria que dava caráter tautológico à lei do aumento da entropia ... a entropia sempre crescerá com o decorrer do tempo, ou seja, o tempo de nossa consciência. Segundo a hipótese biológica de que apenas no seio da experiência animal é que o tempo admite uma seta, e que a seta aponta só na direção do aumento da entropia, a lei do aumento da entropia torna-se uma lei necessária".

(5) POPPER, K., 1972, p. 170: "falha completamente a sua (de Boltzmann - APJ) ousada tentativa de deduzir a lei do aumento da entropia ($dS/dt > 0$) a partir de pressupostos mecânicos e estatísticos ... é uma definição ou uma ilusão que faz crescer a entropia, e não há (nem poderia ser exigida) uma prova cinética, dinâmica, estatística ou mecânica capaz de estabelecer tal fato".

se a argumentação popperiana se aplica a Boltzmann, não se aplica a Reichenbach e Grünbaum, e, conseqüentemente, a crítica não atinge toda a tradição boltzmanniana, mas apenas o fundador. Do ponto de vista relacionalista-reducionista de Reichenbach e Grünbaum, a direção ou anisotropia do tempo é objetiva, definida pela direção dos processos físicos em uma certa região e/ou época do universo. Pode-se acusar esta nova concepção, entre outras coisas, de tornar a direção do tempo redundante em relação à direção dos processos físicos, mas não de ser subjetiva. É interessante notar que um autor, que pretendeu defender Boltzmann contra Popper, o tenha feito da perspectiva de Reichenbach/Grünbaum, e não do próprio Boltzmann, que afirma claramente que o critério definitivo é "biológico"⁶.

Tanto o relacionalismo-subjetivista de Boltzmann, como o relacionalismo-reducionista de Reichenbach/Grünbaum, estão associados à concepção probabilística da irreversibilidade. Apesar de tal concepção da entropia admitir, em princípio, a diminuição de entropia em sistemas isolados individuais, as condições iniciais regionais a eles associados têm o papel de dar conta da unanimidade

(6) Ver CURD, M., 1983, p. 291: "A teoria de Boltzmann é 'subjetivista' mas não de modo fatal, pois ela deixa a salvo o estatuto objetivo da anisotropia temporal, definida em termos de aumento e diminuição da entropia".

fenomenológica da não-diminuição da entropia, ou seja, regionalmente é obtida coerência entre a maioria dos processos físicos observados e a relação temporal assimétrica da "reta real", utilizada para descrevê-los. Desse modo, as correções introduzidas por Reichenbach/Grünbaum evitam que a teoria de Boltzmann viole o imperativo pragmático de afinidade entre ordem do tempo e ordem dos processos físicos (vide cap.1, sobre tal imperativo).

A diferença entre ambas as concepções diz respeito a qual a direção a ser adotada nas regiões e/ou épocas de decrescimento majoritário da entropia; segundo a definição boltzmanniana, nestas situações os seres vivos continuarão definindo a direção minoritária de crescimento da entropia como a direção temporal-crescente, ao passo que, para Reichenbach/Grünbaum, a direção temporal crescente será a majoritária, de decrescimento da entropia. A grande fraqueza da concepção "biológica" de Boltzmann é que nas regiões de decrescimento majoritário de entropia os seres vivos ali porventura existentes coordenariam inadequadamente suas representações dos processos físicos; tal dissonância entre o "tempo interno" e o "tempo externo" contribuiria para sua inadaptação (e provável extinção). No critério de Reichenbach/Grünbaum, a direção dos processos temporais majoritários determina, por definição, qual será a direção do tempo. Embora

não concordemos com esta concepção reducionista, reconhecemos que ela satisfaz ao nosso imperativo pragmático de afinidade.

As partes b e c da argumentação de Popper ficam prejudicadas pela reformulação de Reichenbach/Grünbaum, o que mostra que sua crítica não atingiu aspectos cruciais daquela corrente interpretativa. Vejamos se os pontos b e c seriam eficazes contra os dois principais seguidores de Boltzmann. Se a definição da direção ou anisotropia do tempo é feita em termos da direção dos processos físicos, seria tautológica a afirmação de que, em nossa região de observação, a entropia cresce majoritariamente no sentido temporal crescente? Evidentemente que não, pois eles admitem que, em outras regiões, a entropia cresça (minoritariamente) no sentido temporal decrescente, dado que, nessas regiões, o sentido temporal crescente seria definido pela maioria de sistemas, nos quais a entropia decresce. Perde-se então uma razão para se evitar a teoria da irreversibilidade baseada na evolução da entropia, ainda mais se considerarmos que, no afã de excluir a abordagem de Boltzmann, Popper tivesse indiscriminadamente tentado excluir toda teoria entrópica da irreversibilidade, inclusive as não-probabilísticas.

2. "PARADOXOS" DA ENTROPIA PROBABILÍSTICA COM RELAÇÃO ÀS OBSERVAÇÕES HUMANA

Existem diversos "paradoxos", decorrentes da incompatibilidade "prima facie" entre as previsões feitas com base na curva da entropia probabilística, e os resultados das observações humanas, ordinárias e experimentais. Os defensores da tradição boltzmanniana tentaram, adotando suposições adicionais e levantando argumentos engenhosos, mostrar que os "paradoxos" seriam apenas aparentes, e não trariam ônus para a teoria. Nosso objetivo aqui será o de reconstruir tais "paradoxos", e as soluções para eles apresentadas, evidenciando que, mesmo que não constituam verdadeiros paradoxos lógicos, eles denunciam a inadequação entre a teoria probabilística da entropia e a interpretação racional dos fenômenos observados.

2.1- O "Paradoxo" da Assimetria

Se a curva da entropia probabilística é simétrica com respeito ao tempo, porque observamos grande número de processos de aumento de entropia (em sistemas quase-

isolados), e nunca observamos processos de diminuição de entropia?

A resposta tradicional a este paradoxo é que: a) os micro-estados são equiprováveis; b) os macro-estados de maior entropia são realizáveis por maior número de micro-estados; c) (como consequência de a e b) os macro-estados de maior entropia são mais prováveis; d) se um dado sistema estiver em um macro-estado de alta entropia, é mais provável permanecer neste, do que passar para um estado de menor entropia; e) se o macro-estado inicial for de baixa entropia, é muito improvável que o estado seguinte seja de entropia ainda menor.

A dificuldade para com esta resposta tradicional está em que, se por um lado ela é eficiente para demonstrar que a evolução para estados de maior entropia é mais provável que a evolução para estados de menor entropia, por outro lado ela não prova, de maneira alguma, por que nunca observamos alguns casos, ainda que raros, de diminuição de entropia. Esse é o espírito de objeções como aquelas feitas a Grünbaum por Mehlberg e Popper (ver nosso capítulo anterior).

Uma possível contra-objeção seria que a solução proposta é compatível com as flutuações microscópicas, que não

são mensuráveis nem utilizáveis para realização de trabalho. Porém, a curva de entropia probabilística contém segmentos de decrescimento de entropia de mesmo tamanho que seus segmentos de crescimento da entropia. Nas palavras de Hurley, "se existe uma trajetória conduzindo de macro-estados menos prováveis para macro-estados mais prováveis, existe uma trajetória conjugada, com todos os momentos revertidos, que segue o caminho inverso. Existe uma correspondência de um para um entre as trajetórias que obedecem a 2ª Lei e as trajetórias que não o fazem. Porque apenas observamos as trajetórias percorridas em direção dos estados mais prováveis?"⁷.

Como de uma teoria probabilística podemos prever também a ocorrência dos eventos que ela considera improváveis, desde que nossa amostra seja suficientemente grande; e, dado que em nosso problema a "amostra" (conjunto de observações humanas) aparentemente tem o tamanho suficiente para tal, como evitar a contradição entre as previsões da teoria e as nossas observações? Hurley levanta quatro alternativas⁸, das quais três se aplicam ao modelo probabilístico:

(7) HURLEY, 1986, p. 25.

(8) HURLEY, 1986, p. 26.

- a) como não existem sistemas perfeitamente isolados, são as perturbações externas que impedem a evolução para os estados menos prováveis;
- b) as condições iniciais conduzem o sistema preferencialmente para os estados mais prováveis;
- c) existem outros tipos de observações, além daquelas que conduzem para estados sucessivamente mais prováveis (correspondendo a segmentos de crescimento da curva da entropia) e as que conduzem para os estados sucessivamente menos prováveis (correspondendo a segmentos de decrescimento).

A alternativa "a" não é tão simples quanto possa parecer, e supõe uma certa teoria de colisões, que será discutida em nosso capítulo 4. A alternativa "b" foi a adotada por Boltzmann e Reichenbach, com respeito aos macro-estados iniciais, que seriam, supostamente, sempre de baixa entropia. Mas está sujeita a novas objeções: para excluir todos os possíveis casos de diminuição de entropia, todos os macro-estados iniciais teriam que ser pontos de mínima. Como de fato nos deparamos, em nossa experiência, com sistemas quase-isolados, cujos estados iniciais correspondem a todos os

valores possíveis da entropia - e não só ao valor mínimo - tal alternativa se revela como sendo injustificada. Foi neste ponto que Boltzmann se refugiou na hipótese "biológica" subjetivista, para dar conta da não observação de processos de diminuição de entropia, e Reichenbach terminou por admitir a ocorrência minoritária destes processos em um ensemble espacial, vindo a definir a direção do tempo com referência apenas à evolução da maioria dos sistemas recentemente isolados⁹. Grünbaum veio a enfrentar o problema adicionando uma nova suposição, sobre o micro-estado inicial, que precisaria ser ela mesma justificada. A combinação entre macro-estado inicial de baixa entropia, com micro-estado inicial aleatoriamente escolhido, corresponde a uma preparação do sistema, que não está de acordo com as condições iniciais espontaneamente obtidas em nossa região do universo.

A alternativa "c", adotada por Hurley, envolve uma nova suposição, nem sempre claramente explicitada, que é a da existência de um intervalo de observação significativo. Falar de "aumento" ou "diminuição" de uma quantidade supõe uma comparação entre dois estados, sendo que entre estes estados

(9) A cláusula - que passa quase despercebida - de que os sistemas isolados foram recentemente desmembrados de uma região de baixa entropia, é essencial para o argumento de Reichenbach. Contra ele, pode-se objetar que nossas observações abrangem uma infinidade de sistemas, que foram isolados há um tempo indefinido, e permanecem desde então nas proximidades do equilíbrio.

estados deve existir um intervalo temporal (Δt). Ao invés de comparar dois estados contíguos na curva da entropia probabilística, podemos comparar dois estados com Δt de afastamento temporal entre eles. Δt corresponde ao intervalo mínimo dispendido para uma única observação, capaz de basear um juízo simples, apenas de um dos tipos: ou aumento, ou diminuição, ou manutenção do valor da entropia. Δt pode ser de tamanho suficiente para conter pontos de máximo ou de mínimo; dessa forma, existiriam quatro tipos de observações com duração Δt , iniciando em estados de baixa entropia¹⁰:

1- cinéticas: começam com um estado cujo precedente era de menor entropia, progride através de estados de entropias sucessivamente maiores, e termina no estado de maior entropia de Δt , que por sua vez é seguido por um estado de entropia ainda maior;

2- anti-cinéticas: começam com um estado cujo precedente era de maior entropia, progride através de estados de entropia sucessivamente menores, e termina no estado de menor entropia de Δt , que, por sua vez, é seguido por um estado de entropia ainda menor;

3- cinético-reversas: começam com um estado cujo precedente era de maior entropia, progride através de estados de entropia sucessivamente menores, passa por um ponto de

(10) cf. HURLEY, 1986, P. 26

mínimo, progride através de estados de entropia sucessivamente maiores, e termina em um estado de entropia maior ou igual ao primeiro do intervalo, que é seguido por um estado de entropia ainda maior;

- 4- anticinético-reversas: começam por um estado cujo precedente era de menor entropia, progride através de estados de entropia sucessivamente maiores, passa por um ponto de máximo, progride através de estados de entropia sucessivamente menores, e termina em um estado de entropia menor ou igual ao primeiro do intervalo, que é seguido por um estado de entropia ainda menor.

Hurley construiu um modelo simples, no qual demonstrou, quantitativamente, que, para macro-estados iniciais de baixa entropia, "se o sistema não estiver próximo do estado de equilíbrio, a vasta maioria dos micro-estados são da classe cinético-reversa. Existem poucos estados cinéticos ou anti-cinéticos, e, ainda menor número de estados anticinético-reversos"¹¹.

Observamos que para que o argumento seja viável, as categorias de "cinético-reverso" e "anticinético-reverso", não devem se aplicar a estados (macroscópicos ou

(11) HURLEY, 1986, p. 27.

microscópicos) do sistema, pois, nesse caso, tais estados corresponderiam, respectivamente, a pontos de mínimo ou de máximo, consistindo grande coincidência o fato de todos os sistemas observados terem seus estados iniciais localizados exatamente nesses pontos. Ao definir as quatro categorias, o próprio Hurley não se refere a evoluções entre estados sucessivos, mas a trajetórias em um intervalo Δt ¹², o que, na verdade, só faz sentido com relação ao processo de observação humano. Se referindo ao intervalo mínimo de observação, seu argumento significa que, dado que os vales de decrescimento da entropia na curva probabilística muito raramente são profundos, então, se o sistema estiver, no início da observação, na proximidade de um ponto de mínimo, ao final da observação ele terá, com toda a certeza, uma entropia igual ou maior que em seu início. Portanto, essa solução requer que os estados iniciais dos sistemas observados estejam em pontos de mínimo ou em sua proximidade.

Sem dúvida a argumentação, na linha de Hurley, se aproxima de uma solução para o "paradoxo" da assimetria temporal dos fenômenos observados, frente à simetria de curva probabilística da entropia. Porém, devemos levar em conta que seus resultados só se aplicam para sistemas que possuam no

(12) HURLEY, 1986, p. 26

início da observação um estado de baixa entropia. Mas não poderíamos computar também as observações de sistemas quase isolados cujo estado inicial é de alta entropia? Já assinalamos anteriormente que a caracterização de Reichenbach dos sistemas desmembrados não abrange toda a gama de sistemas observados, pois freqüentemente entramos em contato perceptivo com sistemas que já se encontram no equilíbrio, ou em sua proximidade, por um tempo indefinido. Estimemos a freqüência do seguinte tipo de observação:

5- começa com um segmento inicial em máximos ou proximidade de máximos (sistema no equilíbrio ou em sua proximidade), seguido por um segmento de macroscopicamente significativa diminuição de entropia.

Ora, de acordo com a curva probabilística da entropia, estas observações teriam que ser tão freqüentes quanto as observações do tipo 1, cuja freqüência de ocorrência não é desprezível. Portanto, dado que o real universo de observação abrange sistemas cujos estados iniciais correspondem a quaisquer valores da entropia, a teoria probabilística nos leva à previsão da ocorrência de fenômenos de diminuição significativa de entropia. Como estes fenômenos nunca são observados, e na ausência de razões especiais para desconfiança frente à fidelidade de nossos sistemas perceptivos (ao menos frente a tal tipo de fenômenos) recai o ônus sobre a teoria que produz as previsões vazias.

2.2- "Paradoxo" da Não Recorrência

Porque não ocorrem nos sistemas observados recorrências de estados de baixa entropia, dado que na teoria probabilística não há nada que o impeça?

A resposta de Boltzmann, que convenceu a muitos leitores, foi resumidamente a de que, como o tempo de recorrência de Poincaré seria muito longo¹³, e, dada a condição factual de estarmos em uma região do universo de baixa entropia, muito raramente poderemos observar um destes processos. Curiosamente, parece que essa solução não teria convencido plenamente a Reichenbach e Grünbaum, posto que eles se dedicaram a emendá-la, não só através da noção de sistemas desmembrados, mas também por intermédio de suposições adicionais, como a de "rede de mistura" e de "aleatoriedade" dos micro-estados iniciais.

A insuficiência do argumento do tamanho do tempo de recorrência de Poincaré não foi devidamente elucidada pela tradição boltzmanniana. Vamos aqui levantar uma hipótese, que supomos ser plausível, a respeito da ineficiência desse

(13) Boltzmann, 1896a, p. 444, relata que estimou este tempo em $10^{10^{16}}$ anos.

argumento, tomado na sua forma primitiva. O cálculo feito por Boltzmann refere-se ao tempo para um sistema isolado retornar a um micro-estado anteriormente já percorrido. Ora, com base no mesmo modelo probabilístico, podemos afirmar que um sistema empírico, em situações de isolamento factíveis, poderia espontaneamente **diminuir sua entropia**, em um intervalo de tempo muito menor que o tempo de recorrência de Poincaré, sendo que o intervalo menor poderia ser compatível com o tempo da existência humana. Nós estamos interessados na recorrência de Poincaré porque ela implicaria na diminuição da entropia deste sistema; então, não seria necessário que um indivíduo ou grupo humano observasse **ambas** as ocorrências do estado recorrente, mas apenas que observasse uma destas ocorrências, a saber, aquela na qual a entropia diminui. Este raciocínio já reduz o tempo necessário à ocorrência de um fenômeno de diminuição de entropia a uma magnitude extremamente menor que a estimada por Boltzmann, e perfeitamente compatível com a experiência humana. O tempo necessário para a obtenção de um processo de diminuição de entropia em um sistema quase-isolado se torna extremamente menor, se levarmos em conta: a) o tempo que um sistema empírico já teria dispendido no equilíbrio, antes do início da observação; b) o fato decisivo de que a recorrência de um macro-estado de baixa entropia pode ser produzida pela obtenção de inúmeros micro-estados a ele correspondentes, **não**

implicando, dessa maneira, na recorrência de um mesmo micro-estado, ou seja, a recorrência de um micro-estado implica na diminuição da entropia, mas a conversa não é verdadeira.

Devemos ainda levar em conta outros dados decisivos: um indivíduo, ou grupo humano, não observa, durante sua existência, um único sistema físico em condições de quase-isolamento, mas um número muito grande de sistemas. A humanidade como um todo, observou e observa um número exponencialmente maior de sistemas. Nesse conjunto de sistemas, é admissível que, em diversos sistemas individuais, haja recorrência de estados em tempos muito menores que o de Poincaré. A probabilidade de que qualquer um destes sistemas diminua a sua entropia em quantidade significativa, seria incomparavelmente maior que a estimada por Boltzmann. Ele, na verdade, estimou apenas o tempo máximo para que um sistema, cuja passagem por um ponto de mínima coincida com o início de uma observação por um único agente cognitivo, retorne ao mesmo micro estado, sendo observado pelo mesmo agente. Tal situação é fictícia, e não adequada à situação efetiva, correspondente ao problema da entropia probabilística em relação ao conjunto das observações humanas. Aqui temos: a) muitos sistemas observados por muitos indivíduos; b) sistemas que já dispenderam muito tempo no equilíbrio, antes do início da observação; c) possibilidade de observação de inúmeros

processos de diminuição da entropia, sem a necessidade de recorrência de micro-estados.

2.3- O "Paradoxo" do Macro-Estado Inicial

Supondo-se que o universo em sua totalidade obedeça à distribuição expressa na curva probabilística da entropia, é altamente provável que uma região espaço-temporal, de tamanho equivalente ao mundo que observamos, esteja em estado de alta entropia. Entretanto, temos fortes evidências de que a região que habitamos está em estado de baixa entropia.

A concepção probabilística de evolução da entropia pressupõe a equiprobabilidade dos micro-estados, de modo que um ensemble temporal deverá obedecer à curva da entropia, cujas propriedades anteriormente analisamos. Infere-se, pela hipótese ergódica, que um ensemble espacial também apresentaria tais características. Supondo, como Boltzmann, que o universo em sua totalidade esteja no estado de equilíbrio, seria necessária uma flutuação de grande porte para que a região humanamente observável tivesse a maioria dos seus sistemas em patamares da curva da entropia correspondentes à evolução do não-equilíbrio para o

equilíbrio, ou do equilíbrio para o equilíbrio. Mas é preciso uma flutuação de porte ainda maior para excluir toda evolução do equilíbrio para o não-equilíbrio, i. é., para se garantir que a entropia nunca diminua, na região observada.

Uma das objeções de Zermelo a Boltzmann foi a de que seria preciso provar que nossa região do universo é uma região de baixa entropia¹⁴. Esta objeção pode ser interpretada como indicando que não se pode usar, ingenuamente, a premissa de que estamos em uma região de baixa entropia, antes de se julgar se ela tem consistência com a própria teoria probabilística da entropia. Com efeito, a premissa incorpora duas suposições:

- a) existe pelo menos uma região do universo, de tamanho comparável à região abrangida - no espaço e no tempo - pela experiência humana, na qual a grande maioria, ou a totalidade dos sistemas físicos, está em seções da curva da entropia que não conduzem à diminuição de seu valor, no interior da mesma região; ou seja, trata-se de uma região na qual não existem sistemas situados nas seções de diminuição de entropia;

(14) Para CURD, 1983, p. 290, esta objeção de Zermelo a Boltzmann não foi respondida.

b) nós estamos em uma região do universo que possui tal característica.

Se considerarmos o universo como suficientemente grande, podemos admitir que uma de suas partes satisfaça à suposição a acima. Porém, se levarmos em conta, conjuntamente, a suposição b - e é isso que Zermelo parecia ter em vista - surge uma limitação para tal raciocínio. A probabilidade de que ao menos uma região tenha tais características é bem maior que a probabilidade de que uma certa região, previamente dada, possua essas características (da mesma forma, a probabilidade de que alguém acerte a quina da Loto é bem maior que a probabilidade de que eu a acerte). Como podemos aumentar a probabilidade de que ao menos uma região do universo tenha as características acima? Bem, a única opção que temos é aumentando o suposto tamanho do universo. Então, existirá um número maior de regiões espaciais de mesmo tamanho que a região que observamos, um número que chamaremos de N . Supondo que exista probabilidade próxima de 1 que pelo menos uma região tenha a característica em questão, a probabilidade de que nossa região tenha a característica é de $\frac{1}{N}$ apenas. Agora, não poderemos aumentar este valor, pois, se aumentarmos ainda mais o tamanho do universo, de forma a aumentar o número de regiões que

tenham probabilidade próxima a 1 de possuir tais características, aumentaremos ao mesmo tempo o valor de N , que é o divisor na fração que determina a probabilidade de que a região que tem tal característica seja a nossa região.

O artifício do aumento do suposto tamanho do universo não seria, portanto, eficaz para compatibilizar as previsões feitas com base na teoria probabilística da entropia e a evidência empírica de que habitamos uma região de baixa entropia. O ônus deve recair sobre a teoria, pois ela não tem como explicar o fato de que habitamos uma região de baixa entropia, exceto se adotarmos uma teoria exótica da explicação científica, onde a probabilidade ínfima de ocorrência de um evento possa ser considerada como base de previsão para tal ocorrência.

Um argumento contrário, que pode ser levantado pelos defensores da tradição boltzmanniana, é que não devemos comparar questões teóricas com questões factuais. As equações físicas não fazem restrições quanto às condições iniciais (dentro do conjunto daquelas que as satisfazem). Mesmo que uma dada condição inicial seja improvável do ponto de vista da teoria, como tal teoria é probabilística, e posto que esta condição inicial não teria o tamanho de uma amostra relevante, então não haveria desconfirmação da teoria por ela. Uma

resposta a este argumento é a seguinte: se a teoria probabilística for verdadeira, ela corresponde a um estado de coisas¹⁵. Se, por outro lado, for verdadeiro que a região que observamos é de baixa entropia, trata-se de um novo estado de coisas. A incompatibilidade seria, portanto, entre dois estados de coisas. Como a solução de se aumentar o tamanho do universo falhou, persiste a incompatibilidade. Finalmente, se a totalidade de nossas observações não constituírem amostra relevante para confirmação ou desconfirmação de uma teoria, então estas noções metodológicas perdem todo o significado que possam ter.

Um novo argumento, que pode ser levantado em favor da teoria probabilística, seria o seguinte: só existirão observadores nas regiões do universo nas quais houver uma grande flutuação, relativamente ao suposto equilíbrio da totalidade do universo. Como na nossa região existem observadores, isso confirmaria o caráter probabilístico da teoria, que prevê a existência de flutuações. Uma resposta a este argumento pode ser a seguinte: nem sempre a existência de uma região de baixa entropia implicaria necessariamente na existência de observadores capazes de constatar a ocorrência

(15) Se interpretarmos as probabilidades na Mecânica Estatística como sendo puramente subjetivas, então incorreremos em outro tipo de dificuldade, de que tratamos em nosso item 4.6, neste capítulo.

dos sistemas em estados de baixa entropia; podem existir inúmeras regiões correspondentes a segmentos de baixa entropia da curva probabilística, sem que nessas regiões tenham surgido seres capazes de realizar observações sobre este fato. Ora, a probabilidade de que exista ao menos uma região do universo, de tamanho comparável à que habitamos, em estado de baixa entropia, e com trajetórias exclusivamente termodinâmicas, embora pequena, é muito maior que a probabilidade de que haja uma região com tais características, mais a presença de observadores. Esta última situação é extremamente improvável, do ponto de vista de teoria. Mas, concluímos, uma teoria probabilística só explica um fato se este for razoavelmente provável sob a perspectiva da teoria. Uma teoria que afirma que as mutações são raras, por exemplo, não explica a ocorrência de uma série de mutações simultâneas, em um determinado indivíduo. Para explicar tal fenômeno é preciso se referir a outras causas, alheias à teoria. E se, eventualmente, as mutações se tornarem frequentes nos seres vivos, a teoria de que são raras terá que ser corrigida ou abandonada.

2.4- O "Paradoxo" da Rede de Mistura

Ao elaborar sua proposta de construção de uma

direção do tempo baseada nos processos físicos, Reichenbach admitiu a possibilidade de que uma fração dos sistemas componentes de um ensemble espacial efetivamente diminuísse sua entropia, durante o tempo de observação. As conseqüências disso, no conjunto do ensemble, seriam eliminadas através das propriedades das redes de mistura, possibilitando a obtenção de uma ampla maioria de evoluções temporais de mesma direção, necessária para o estabelecimento da "direção do tempo".

Contudo, embora pretendesse que as redes de mistura tivessem valor empírico, ele as constituiu através de procedimentos analíticos, que predeterminam uma assimetria, na evolução temporal, de qualquer ensemble espacial que satisfaça às condições por ele estabelecidas. Esse tipo de abordagem não é sensível às peculiaridades factuais que podem influenciar na evolução dos sistemas componentes de um todo empiricamente dado. Isto pode ser notado através do "paradoxo" seguinte.

A assimetria "horizontal" de uma rede de mistura, decorrente de o estado inicial de cada sistema desmembrado componente ser de baixa entropia, se torna, devido às condições estabelecidas para tais redes, uma assimetria na evolução temporal do ensemble em sua totalidade. Ao se usar uma rede de mistura para a análise da evolução de um ensemble

cujos estados iniciais fossem de alta entropia, os estados finais predominantes seriam provavelmente de baixa entropia. Porém, segundo a teoria probabilística da entropia, a grande maioria dos estados finais dos sistemas componentes do ensemble, com estados iniciais de alta entropia, deveria ser também de alta entropia, o que contradiz a anunciada assimetria das redes de mistura.

Para determinar fisicamente os estados finais predominantes na evolução de uma rede de mistura com estados iniciais de alta entropia, precisaríamos saber o intervalo de tempo durante o qual estes sistemas já permaneceram no equilíbrio. Se se tratar de um equilíbrio recentemente atingido, haverá maior probabilidade de que os sistemas permaneçam em sua proximidade; se eles já estiverem nesta situação durante um intervalo suficientemente longo, então haverá maior probabilidade de que o estado final majoritário seja de baixa entropia.

Portanto, as redes de mistura de Reichenbach são cegas quanto à localização exata do estado inicial dos sistemas ramificados de um coletivo espacial ao longo da curva da entropia probabilística. Para efetuar tal localização não basta especificar o macro-estado inicial, através da especificação do valor da entropia; é preciso conhecer a

história precedente da região do universo em questão, ou então estipular com mais precisão, como fez Grünbaum, propriedades do micro-estado inicial, para que se possa prever o estado final majoritário do ensemble. Verificamos, conseqüentemente, que a proposta das redes de mistura pouco acrescenta para o projeto de uma explicação de irreversibilidade macroscópica. A maior contribuição de Reichenbach foi para a definição relacionalista da direção do tempo, com base na evolução da maioria dos sistemas de um dado coletivo, que veio a substituir com êxito, no contexto da tradição, a problemática definição subjetivista ou "biológica" de Boltzmann.

3- O Problema da "Contra-Indução"

Os problemas relativos à indução estão entre os mais discutidos na filosofia da ciência. Não iremos aqui fazer uso de uma interpretação particular da indução, mas apenas mostrar que o modo de pensar da tradição boltzmanniana conflita, em certo ponto, com a interpretação positiva do papel da indução na ciência.

A noção de "contra-indução" foi cunhada por

Feyerabend¹⁶, que lhe emprestou um papel construtivo na atividade científica, a saber, o de contrabalançar a tendência empirista, de se julgar as teorias exclusivamente com base em sua concordância ou discordância para com os fatos. Sua defesa da validade dos procedimentos contra-indutivos repousa na dependência das observações frente a pressupostos teóricos, e no papel construtivo que o conflito de teorias desempenha na história das ciências¹⁷.

Nossa avaliação da contra-indução difere parcialmente da de Feyerabend. Concordamos com ele em que o levantamento de hipóteses elaboradas contra-indutivamente tenha valor heurístico, enquanto propicia à investigação científica novas alternativas de interpretação dos fenômenos, de experimentação e de explicação dos resultados. Contudo, a continuidade da sustentação de uma hipótese contra-indutiva, mesmo após seu fracasso enquanto programa de pesquisa, nos afigura como postura dogmática, e irresponsável frente ao ideal científico de explicar satisfatoriamente os fenômenos, através das teorias.

A postura "contra-indutiva" deve ser claramente

(16) FEYERABEND, 1975, p. 29: o procedimento "contra-indutivo" consiste em "introduzir e elaborar hipóteses que são inconsistentes com teorias bem estabelecidas ou fatos bem estabelecidos".

(17) FEYERABEND, 1975, p. 31.

distinguida da postura "anti-indutiva" ou cética. Consideremos uma situação típica de indução, na qual temos conhecimento empírico a respeito de uma amostra A, respectiva a um conjunto de objetos C, semelhantes a A. O indutivista admite que podemos legitimamente inferir conclusões a respeito de C com base no conhecimento de A, atribuindo aos objetos não observados as características de A. Se os objetos de A têm uma certa propriedade, julga-se que os objetos restantes também as possuam, e, se os objetos de A possuem diferentes propriedades - inclusive, algumas delas sendo opostas entre si - os objetos restantes possuiriam a mesma distribuição de propriedades, i.é., estas propriedades estariam neles distribuídas com a mesma proporção que em A. A justificação desta inferência pode ser de carácter objetivo, supondo-se então que exista na natureza uma certa uniformidade de distribuição de propriedades (ou uma tendência em direcção à obtenção de certos tipos de estados), ou de carácter subjetivo, associada a uma determinada concepção psicológica. Para o "anti-indutivista", ou cético a respeito da indução, embora esta seja factualmente possível, lhe falta uma justificação satisfatória, o que impugna sua legitimidade enquanto procedimento para obtenção de novos conhecimentos empíricos.

Tanto o indutivismo, quanto o anti-indutivismo, são posições racionalmente defensáveis. O indutivista pode

argumentar, em favor de sua posição, que, embora ela não esteja plenamente justificada, enquanto forma de obtenção de conhecimento empírico novo, na ausência da possibilidade de observação dos casos novos, ou de dedução de suas características, a indução pode fornecer indicações que, embora falíveis, são pragmaticamente necessárias e, na maior parte das vezes, pragmaticamente bem sucedidas. O anti-indutivismo argumenta, contra isso, que o sucesso pragmático não é indicador seguro da correção da indução, sendo melhor a suspensão do juízo sobre os casos não observados (ou não-observáveis).

A posição "contra-indutiva" é um indutivismo às avessas, e, por isso, também se opõe ao ceticismo. Enquanto o cético prefere suspender o juízo sobre o inobservado ou inobservável, o contra-indutivista é aquele que prefere atribuir a estes casos propriedades opostas, ou estatisticamente divergentes às dos casos observados. Nas regiões desconhecidas, ocorreriam fenômenos radicalmente diferentes dos que ocorrem nas regiões observadas, ou então ocorreria distribuição de propriedades radicalmente diferente: o que aqui é minoritário lá se torna majoritário, e vice-versa.

O "contra-indutivismo" sistemático se a figura como uma posição racionalmente indefensável, pois toda característica a ser imputada ao desconhecido deriva daquilo que é conhecido. Não há razão para, ao se deixar de lado o ceticismo, apostar em definitivo que as propriedades dos objetos existentes nas regiões inobservadas ou inobserváveis sejam diferentes das propriedades dos objetos existentes na região observada, visto que as únicas razões que possuímos para atribuição de propriedades são derivadas do nosso conhecimento dos fenômenos que ocorrem no interior da região observada. Todo indício, que possa sugerir uma realidade relativamente diferente, fora dos limites da observação atual ou possível, é um fenômeno que ocorre no interior da região observada, de tal forma que as inferências a partir de indícios são indutivas ou abdutivas e não contra-indutivas. A contra-indução é, por definição, não fundada sobre fenômenos ocorrentes na região observada, e, por este motivo, só é racionalmente defensável enquanto procedimento heurístico. A contra-indução pode ter motivos, mas estes motivos não são razões. As religiões fazem uso da contra-indução, mas são doutrinas fundadas primordialmente na fé, e não na razão. Os produtos da contra-indução podem ser inseridos em uma sistematização racional, mas a contra-indução em si mesma envolve um ato de crença racionalmente incondicionada, movida por outros tipos de motivações.

Devemos também distinguir entre o procedimento contra-indutivo e o argumento contrafactual. Nos argumentos contrafactuais, supõe-se que algumas das características da região observada não ocorrem em uma outra região hipotética; porém, a "lógica global" da região hipotética é a mesma da região observada, pois, do contrário, as conclusões obtidas por meio da variação de características, fazendo uso da região hipotética, não se aplicariam à região observada. Ora, o objetivo dos argumentos contrafactuais sempre é o de inferir a respeito do comportamento de certas propriedades do mundo real, na ausência de outras propriedades, ou na presença de propriedades a ele estranhas. Portanto, neste tipo de argumento está sempre embutida uma cláusula "tudo o mais permanece igual", o que não ocorre com o procedimento contra-indutivo, que desrespeita a "lógica global" da região observada.

No caso da tradição boltzmanniana, a motivação é a defesa da entropia probabilística. Reichenbach foi um explícito defensor da indução, para a qual ofereceu uma justificação pragmática¹⁸. Isto não lhe impede de se utilizar da contra-indução, pois esta se localiza mais proximamente da indução que da anti-indução. Se alguém está disposto a pagar o

(18) Cf. SALMON, 1977, p. 22-26.

preço do salto indutivo, não lhe parecerá muito caro o adicional de um eventual salto contra-indutivo. E mesmo a contra-indução pode ter sucesso pragmático, se nossa concepção de "sucesso" incluir, como fator de relevo, a eventual aceitação da teoria que motiva a contra-indução. Por outro lado, se adotarmos, como Reichenbach, uma interpretação objetiva das probabilidades, emerge uma contradição entre indução e contra-indução, pois, como a primeira implicará em um postulado de uniformidade da natureza, a segunda implica no postulado de não-uniformidade. Neste caso, a adoção de um procedimento contra-indutivo por Reichenbach aparece como contraditório frente a suas conhecidas posições frequentistas. Não lhe restaria também espaço para defendê-la ao modo de Feyerabend, ou seja, a partir de uma postura anti-empirista.

Retornando à objeção formulada retoricamente por Boltzmann contra si mesmo, citada em nosso cap.1, podemos entendê-la como denunciadora de um procedimento contra-indutivo. Segundo a objeção, seria não só anti-econômico como também absurdo imaginar a maior parte do universo em estado de alta entropia, com o objetivo único de explicar o estado de baixa entropia da região por nós habitada. A carga lançada pela objeção pode ser interpretada de duas maneiras (não excludentes): que a hipótese da existência de regiões do universo com estado inicial de alta entropia seria 'ad hoc', e

que tal hipótese seria contra-indutiva. Parece que o caráter de 'ad hoc' não se aplicaria, pois existem pelo menos duas razões para se considerar o universo, em sua totalidade, no estado de equilíbrio: primeiro, porque seria um sistema isolado; segundo, porque provavelmente existe por um tempo muito longo ou infinito.

Forém, do equilíbrio global do universo, e das observações do aumento de entropia na região em que vivemos, se deduz da teoria probabilística que existiriam outras regiões, ou outras épocas cósmicas, em que a entropia maciçamente diminui. O caráter contra-indutivo dessa consequência se manifesta triplamente. Em primeiro lugar, trata-se de uma crença sem nenhum apoio, em quaisquer observações ou indícios efetivos. A resposta de Boltzmann, de que seria uma situação equivalente à quantidade de espaço preenchido com éter, frente ao espaço onde existe vida, apela para uma situação perfeitamente compreensível em termos indutivos: tal quantidade não é absurda simplesmente porque é corroborada por nossas observações. Podemos observar regiões do espaço nas quais não existe vida, mas não podemos observar um único caso de sistema isolado no qual a entropia diminua.

Poder-se-ia argumentar que a teoria probabilística da entropia encontra apoio indutivo na região

observada? Ora, a parte da teoria da qual se deduz a ocorrência de fenômenos de aumento ou estabilização da entropia (supondo-se que exista tal dedução) é diferente da parte estendida para o restante do universo. Frente à necessidade de uma confirmação seletiva das teorias científicas (visando evitar os conhecidos "paradoxos" da confirmação), só podemos considerar como tendo apoio indutivo a parte da teoria que participar essencialmente da dedução das conseqüências observáveis. No caso da teoria probabilística, seria a parte que não deduz a ocorrência de flutuações negativas de grande porte no valor da entropia. Não podemos, então, transferir o apoio para a parte da teoria que prevê a ocorrência destas flutuações. Se houvesse, na teoria probabilística, um mecanismo causal comum, gerando tanto as conseqüências observadas quanto as inobservadas, poderíamos transferir o apoio indutivo de uma parte para a outra; contudo, dada a própria natureza da teoria, sabemos que ela não contém este tipo de mecanismo.

Em segundo lugar, dada a suposição de equiprobabilidade dos micro-estados, e estabelecida uma "métrica probabilística" (para se usar a expressão de Reichenbach), a existência de uma flutuação de tamanha magnitude, coincidindo com a região de nossa observação, seria extremamente implausível, senão impossível, como percebeu

Landau¹⁹. Existe aqui contra-indução relativamente à métrica probabilística adotada²⁰: em um universo supostamente regido pelas leis estatísticas, no qual a equiprobabilidade dos micro-estados teria caráter "empírico", não haveria uma causa suficiente para produzir tamanha correlação. Em outras palavras, se estamos lidando com um modelo puramente probabilístico, no qual se supõe que as probabilidades refletem o modo de funcionamento do objeto, e não as expectativas de um observador com relação ao mesmo, então cada amostra relevante deve refletir ao menos aproximadamente a estrutura probabilística da totalidade. Para se explicar o fato de nossa região do universo, incluindo cada um de seus subsistemas, se encontrar em estado inicial de baixa entropia, seria necessário introduzir algum fator causal estranho ao modelo adotado.

Em terceiro lugar, Boltzmann pensou que, mesmo nas regiões de decrescimento da entropia, os seres vivos atribuiriam o sentido de crescimento do tempo ao sentido de crescimento da entropia. Conseqüentemente, estes seres passariam por experiências em nada parecidas com as que temos ordinariamente. Existe aqui contra-indução relativamente ao

(19) LANDAU, 'apud' CURD, 1983, p. 285.

(20) FEYERABEND, 1975, p. 29 ss., divide a contra-indução em dois tipos: teórica e factual. No presente caso, trata-se de contra-indução frente à teoria probabilística adotada.

que entendemos como sendo as propriedades dos seres vivos. Em Reichenbach, a dificuldade acima parecia ser sanada, mediante a definição da direção do tempo segundo a evolução da "maioria" dos sistemas ramificados. Os processos físicos, em regiões temporalmente contradirecionadas, seriam empiricamente equivalentes, para seres vivos semelhantes aos conhecidos, que as habitassem: "a alteração das direções de tempo não envolveriam nenhuma contradição nas experiências a nós acessíveis"²¹. Contudo, o próprio Boltzmann já sabia que, dado o que conhecemos de biologia (e que é relativo à região em que vivemos), a própria vida seria impossível em regiões de predomínio da alta entropia, o que implica que sequer haveria "experiência humana" nas regiões de decrescimento, exceto se, por contra-indução, postulássemos formas de vida bastante diferentes das conhecidas. Mesmo supondo uma forma de vida exótica, que conseguisse extrair alimento de um ambiente em estado de alta entropia, ou que sobrevivesse sem necessidades alimentares (dado que teria sua entropia espontaneamente diminuída), apenas a diferença de ambiente (em relação ao nosso) já lhe conferiria um tipo de experiência completamente diferente. A crença na possibilidade de tal tipo de experiência é um procedimento contra-indutivo.

(21) REICHENBACH, 1956, p. 128. Aqui, Reichenbach está se referindo a especulações de Boltzmann, mas a conclusão citada só tem pleno sentido no contexto da definição do próprio Reichenbach.

Grünbaum obteve maior eficácia na eliminação de procedimentos contra-indutivos, mas não os evitou totalmente. Sua recusa taxativa de uma hipótese cosmológica, e seu princípio de aleatoriedade inicial dos micro-estados, evitam a postulação de regiões espaciais ou temporais do universo nas quais ocorreriam fenômenos contra-indutivos. Porém, a aleatoriedade dos micro-estados significa que estes são escolhidos arbitrariamente, na curva da entropia probabilística de um sistema isolado. Ora, nestas curvas existem seções de diminuição da entropia, o que implica que, mesmo que raramente, eventualmente serão escolhidos micro-estados que conduzem à diminuição da entropia, seja no interior da própria região observável, seja em outras regiões não-observáveis do universo. A postulação de tais fenômenos, sem qualquer base indutiva nos fenômenos observados, é de caráter contra-indutivo.

Enquanto não se observar um único caso de diminuição de entropia em quantidade utilizável, em sistemas termodinâmicos quase isolados, a única inferência indutiva possível é a de que a entropia nunca diminui. Evidentemente tal inferência pode ser incorreta, mas a única forma racional de evitá-la seria o ceticismo, i. é., a suspensão do juízo sobre o assunto.

4 - ORDEM TEMPORAL E PROBABILIDADES

Desde que grande parte das equações utilizadas na ciência física faz uso de uma coordenada temporal, e que esta coordenada é uma série numérica dotada de uma relação de ordem, possuidora de certas propriedades, toda concepção relacionalista, que pretenda construir o tempo a partir dos processos físicos, necessitaria dar conta de tais propriedades. O uso de uma série numérica para representar o tempo remonta a Aristóteles²². Na definição do tempo dada pelo estagirita, ressalta também o tipo de ordem existente entre as unidades mínimas do tempo (os instantes): trata-se de uma ordem assimétrica, expressa nas relações de anterioridade e posterioridade. São relações primitivas da teoria do tempo, introduzidas em sua definição, e não derivadas de quaisquer processos físicos. Embora Aristóteles seja um relacionalista quanto à métrica do tempo, sua definição mostra que não o é quanto à ordem temporal, pois a relação de anterioridade e posterioridade seria intrínseca ao tempo.

A tradição boltzmanniana não colocou

(22) Sua concepção pode ser resumida na conhecida fórmula "O tempo é o número do movimento segundo o antes e o depois", 'apud' VAN FRAASSEN, 1985, p. 16.

explicitamente a questão do tipo de ordem adequada à coordenada temporal usada na física. O problema da ordem temporal, em Reichenbach e Grünbaum, foi dividido em duas partes: em primeiro lugar, estabelecendo uma ordem simétrica, através dos processos mecânicos reversíveis (ordem serial causal em Reichenbach, e relação de "o-betweenness" em Grünbaum²³), para, em segundo lugar, imprimir "unidirecionalidade" (Reichenbach), ou "anisotropia" (Grünbaum), à série já constituída, por meio da irreversibilidade gerada pela entropia probabilística, mais condições iniciais específicas. O resultado final, para que desse conta da constituição da coordenada temporal, é que a evolução probabilística dos sistemas físicos deveria ser capaz de fundar uma relação de ordem equipotente à relação de anterioridade e posterioridade, e isomorfa à relação de "maior que" e "menor que", as quais ordenam os números usados para representar os instantes temporais. Contudo, Grünbaum recusou a identificação de sua "anisotropia" do tempo com uma assimetria rigorosa, desistindo, ao mesmo tempo, de dar conta cabalmente da relação de ordem embutida na coordenada temporal. Grünbaum considerou, ao contrário, tal relação de ordem como sendo "extrínseca". Precisamos levar em conta que o

(23) GRÜNBAUM, 1972, p. 195. Tratamos desse tópico em nossos capítulos anteriores. Alguma repetição aqui se faz necessária, para a retomada crítica do tema.

significado que ele atribui a esse termo não corresponde ao usual (onde "extrínseco" se referiria às caracterizações de propriedades do tempo, com base em propriedades atemporais). Grünbaum usa o termo com significado diferente: para ele, ser "extrínseco" significa ser relativo a, ou necessitar se referir a, um observador externo, e à sua perspectiva particular, ao passo que uma caracterização "intrínseca" seria aquela que não necessitaria de "referência a entidades externas ao domínio" em questão²⁴. Porém, como bom relacionalista, para ele o domínio do tempo é o domínio dos fenômenos físicos, só vindo a ser uma caracterização "intrínseca" da estrutura do "tempo físico" aquela que se referir a processos físicos, e não aquela que se referir aos constituintes do próprio tempo (e. g., instantes)²⁵

A dificuldade dos relacionistas, frente à construção do espaço e do tempo, a partir da rede de relações estabelecidas pelos processos físicos, remonta a Leibniz, e à

(24) GRÜNBAUM, 1972, p. 214-215.

(25) A concepção da relação de anterioridade como termo primitivo da teoria do tempo pode parecer um compromisso para com a concepção absolutista das propriedades temporais. Porém, a alternativa de se pensar o tempo como um esquema conceitual corrigível (ver nosso primeiro capítulo) nos permite caracterizar a propriedade de assimetria como intrínseca, sem, ao mesmo tempo, incorrer em tal posição. Por outro lado, Earman e Sklar, que, no debate mais recente, criticaram a abordagem oferecida pela tradição boltzmanniana para a questão da ordem temporal, não se distinguiram claramente do absolutismo. Ver EARMAN, 1974, 1986b, e SKLAR, 1974, 1986.

sua omissão do vácuo, na teoria relacionalista do espaço. O vácuo seria o grande obstáculo à construção relacionalista de uma rede de relações espaciais com a uniformidade do espaço geométrico; analogamente, as seções de decrescimento, na curva de entropia probabilística, são obstáculos à teoria relacionalista do tempo. Como constituir uma relação de ordem temporal assimétrica, transitiva e conexa, como a ordem numérica representativa do tempo, em um mundo - o descrito pela entropia probabilística - na qual os processos físicos têm direções alternadas? Um arremedo de solução foi, como fizeram Boltzmann e Reichenbach, seccionar regiões do universo pelo critério espacial, ou de épocas temporais, no interior das quais houvesse unanimidade, ou, pelo menos, ampla maioria de processos físicos direcionados em um mesmo sentido. Uma objeção à aceitação de tal critério seria a seguinte: dado que a demarcação de tais regiões parece ser arbitrária, nada impede que consideremos um único sistema, de direção minoritária, como constituindo uma nova micro-região, na qual o tempo estaria direcionado contrariamente a seus arredores. Chegaríamos então à situação absurda de definir individualmente a direção positiva da coordenada temporal de um gráfico, de acordo com a direção do processo físico ali descrito. A concepção probabilística da entropia não só admite que um sistema passe através de um ponto de máximo ou de mínimo, mas também que regiões espaciais ou temporais

inteiras - de tamanho arbitrário - o façam. Ora, tais fenômenos corresponderiam à inversão da direção da coordenada temporal ao longo de um mesmo gráfico. Da mesma forma, um viajante espacial teria que enfrentar alterações na direção do tempo de mesma forma que nós enfrentamos as mudanças de fusos horários.

Ao invés de lastrear nossa objeção em futurísticas "experiências de pensamento", podemos formulá-la, mais taxativamente, como uma questão de princípio, ou como uma questão semântica. Foi esta a forma, sucinta, em que Zermelo a colocou: ordem temporal e probabilidades são duas coisas de naturezas diferentes; não se pode definir uma ordem temporal adequada sobre uma base probabilística²⁶. Está certo que, na objeção de Zermelo a Boltzmann, faltou mais argumentação: porque o conceito de probabilidade seria estranho ao conceito de tempo? Possivelmente porque - nós respondemos - eventos probabilísticos são eventos contingentes, ao passo que na definição de uma ordem temporal entra um elemento de necessidade: estabelecida a relação de anterioridade e posterioridade como primitiva, e dado o seu caráter assimétrico, é necessário que os pares de instantes "obedeçam" a esta relação, para que o uso da série numérica

(26) ZERMELO, 1896, em BRUSH, 1976b, p. 235. O mesmo argumento reaparece em POPPER, 1958 e POPPER, 1965. Ver também SKLAR, 1974, p. 406-407.

correspondente faça sentido. Não se trata aqui apenas da questão sobre a possibilidade de o tempo, sendo uma dimensão física, ser contingente, como a maioria dos fenômenos da natureza; mais importante que isso, a relação de ordem da coordenada temporal, como um esquema conceitual que usamos para descrever e calcular fenômenos físicos, precisa ser assimétrica, transitiva e conexa para que bem desempenhe a sua função.

Boltzmann e Reichenbach não se detiveram na questão da adequação conceitual entre tempo e probabilidades, cabendo a Grünbaum a defesa da tradição boltzmanniana, frente a três poderosos críticos: Carnap, Popper e Earman. Grünbaum começou por criticar falhas do próprio Reichenbach: o fracasso do "método da marca" para estabelecer uma ordem temporal baseada na relação causal²⁷; o caráter "extrínseco" da assimetria expressa na relação de ordem dos números reais utilizados para representar o tempo²⁸, e a impropriedade do uso da noção de "unidirecionalidade" para expressar o tipo de ordem temporal "intrínseca", estabelecida com base na entropia probabilística²⁹. Para ele, os processos reversíveis só permitem o estabelecimento de uma relação temporal

(27) GRÜNBAUM, 1972, p. 179-188.

(28) GRÜNBAUM, 1972, p. 215 e 218.

(29) GRÜNBAUM, 1972, p. 210 e 217.

"intrínseca" simétrica ("o-betweenness"), que é tornada "anisotrópica" (mas não rigorosamente assimétrica) pelos processos irreversíveis. Conseqüentemente, não existe, para Grünbaum, uma assimetria ou unidirecionalidade "intrínsecas" ao tempo; o que existe é, por um lado, a assimetria da relação de ordem dos reais (relação de "maior que"), que é "extrínseca", e, por outro lado, a "anisotropia" do tempo, que é "intrínseca" mas não é uma relação de assimetria, e sim uma mera "diferença estrutural" (sic) entre o "antes" e o "depois"³⁰.

Ao considerar a relação de ordem assimétrica, da série numérica representativa do tempo, como sendo de caráter "extrínseco", Grünbaum em certa medida muda as regras do jogo. O problema, (mal) colocado por Boltzmann e Reichenbach, era, no fundo, o de dar conta dessa relação de ordem assimétrica da coordenada temporal, com base na irreversibilidade gerada pela entropia probabilística mais condições iniciais. O que Grünbaum fez, foi substituir a assimetria pela "anisotropia" do tempo, enquanto descrição da estrutura interna do "tempo físico". As propriedades da série numérica não refletiriam as propriedades do tempo; sendo

(30) Usamos aqui os termos "intrínseca" e "extrínseca" no sentido de Grünbaum. Quanto à semântica da "diferença estrutural" entre o "antes" e o "depois", não foi fornecida por ele.

"extrínsecas", seriam propriedades atribuídas de fora do domínio, por parte do observador externo, em "sua perspectiva particular". A "reta real" para ele seria um esquema conceitual, sim, mas sem embasamento na realidade física, ou apenas parcialmente adequado, i. é., adequado naquelas regiões ou épocas em que a "anisotropia" "intrínseca" se apresenta de uma forma perfeitamente regular, sem ocorrência de fenômenos físicos contradirecionados. Ou seja, nas regiões ou épocas em que a "anisotropia" se comporta como uma assimetria.

Uma objeção à mudança das regras do jogo não poderia tardar a ocorrer. Ela veio da parte de Carnap, que, em *A Construção Lógica do Mundo*, tomara a relação assimétrica de anterioridade temporal como termo primitivo³¹. Em Carnap, tal opção tinha caráter convencional ou metodológico, estando desvinculada tanto do realismo absolutista quanto do apriorismo incorrigível kantiano. A ordem temporal deveria ser objeto de uma "definição teórica", não podendo se basear em uma "correlação estatística", "por mais forte que ela possa ser"³². A resposta de Grünbaum deixou muito a desejar. Parece que ele entendeu a objeção de Carnap como relativa à

(31) CARNAP, 1969, p.127-128,188-189. A relação R_s ("recollection of similarity") já faz recurso à assimetria entre vivência presente e vivência retida na memória. A relação R_{spo} ("Preliminary time order") é irreflexiva e transitiva, e, portanto, assimétrica.

(32) CARNAP, 'apud' Grünbaum, 1972, p. 279.

inexistência de conectividade temporal entre épocas cósmicas, ao que ele rebateu que "a atribuição das relações de anterioridade e posterioridade a estados pertencentes a épocas cósmicas entropicamente atípicas será ditada pelo fato de que as últimas épocas mantêm relações de intermediação ("betweenness") temporal com as épocas entrópicas típicas; ... sistemas desmembrados exibindo ... decrescimentos de entropia no tempo positivo, podem ser descritos como tais, desde que estes decrescimentos sejam temporalmente contra-direcionados com respeito ao crescimento da entropia na maioria dos sistemas desmembrados"³³. À crítica de Carnap, por ele mesmo citada, de que a ordem temporal não pode ser de natureza estatística ou factual, Grünbaum responde reafirmando que tal ordem efetivamente é desta natureza!

Já para Popper, a relação de anterioridade e posterioridade temporal, que tem maior peso que a mera "anisotropia", seria não só uma "noção teórica legítima", com também denotaria uma propriedade da "estrutura da realidade": "eu conjecturo que é parte da estrutura de nosso universo espaço-temporal que o tempo não apenas é anisotrópico, mas possui, aditivamente, uma direção; que existe não só a relação de inintermediação ("betweenness" - AF) em sua topologia, mas

(33) GRÜNBAUM, 1972, p. 280.

também a relação de antes e depois ... (que) é parte da estrutura da realidade"³⁴.

A discussão de Grünbaum com Earman sobre o tema foi mais acirrada, visto ser o segundo aparentemente proponente de uma visão pró-absolutista. Em um esboço de 1972, do que iria se tornar em 1974 um longo e influente artigo³⁵, Earman criticou a abordagem reichenbachiana da direção do tempo, através do seguinte argumento: dado que é possível definir uma "orientação temporal" no espaço-tempo relativístico, tal que esta possa ser estendida (por meio do transporte contínuo de vetores 'time-like') para diversas regiões (onde, segundo a teoria de Reichenbach, haveriam diferentes regimes da entropia), então "seria sempre fisicamente possível, e em alguns casos altamente provável", que ocorressem desacordos entre esta ordem temporal e a ordem temporal definida pelo critério reichenbachiano, do que se concluiria que ou não haveria sentido em se falar de direção do tempo, ou o método de Reichenbach nem sempre seria acertado³⁶.

(34) POPPER, 1974b, p. 1141

(35) trata-se de um "paper" citado por Grünbaum, 1972, p. 788, intitulado "Sense and Nonsense About Entropy and Time", que veio a se tornar "An Attempt to Add a Little Direction to 'The Problem of the Direction of Time'" (EARMAN, 1974).

(36) EARMAN, 'apud' Grünbaum, 1972, p. 790. A redação final, alterada, aparece em EARMAN, 1974, p. 22.

A resposta de Grünbaum foi que a especificação da orientação temporal no espaço-tempo seria "meramente uma condição necessária" para a unicidade e consistência global da definição dos dois sentidos do tempo opostos, mas não determinaria qual é o "futuro" e qual é o "passado", pois - e este é o ponto mais importante - fazer tal especificação em nível de propriedades do espaço-tempo seria fazê-lo "de dicto" ("in name only")³⁷.

Na versão definitiva do artigo, publicado em 1974, Earman dedicou uma seção especial para a crítica da noção de "anisotropia do tempo" de Grünbaum. Ele se baseia em uma distinção entre os sentidos "literal" e "metafórico" da noção de anisotropia³⁸. Esta distinção envolve os elementos de um modelo do espaço-tempo relativístico, uma variedade diferenciável, M , uma métrica lorentziana, g , e a conexão simétrica linear compatível com g ³⁹. Um espaço-tempo temporalmente orientável é considerado literalmente anisotrópico se em uma das suas direções não existe um difeomorfismo da variedade em si mesma que reverta a orientação temporal sem alterar a métrica e a conexão linear⁴⁰. Esta definição de anisotropia - que obviamente é

(37) GRÜNBAUM, 1972, p. 790, 799 - 800.

(38) EARMAN, 1974, p. 29 ss.

(39) EARMAN, 1974, p.16

(40) EARMAN, 1974, p.29.

diferente da de Grünbaum - a torna semelhante à noção de assimetria do tempo, uma vez que se interprete a orientação temporal em questão como uma relação de ordem verdadeiramente intrínseca (e não "intrínseca" no sentido de Grünbaum), i. é., como uma relação de ordem entre os instantes temporais, e não entre fenômenos que ocorrem no tempo. Para isso temos que considerar que a coordenada temporal do espaço-tempo relativístico seja o esquema conceitual por excelência representativo do tempo.

Concordamos com Earman que sua anisotropia "literal" está mais próxima da relação de ordem da coordenada temporal, que a anisotropia "metafórica" de Grünbaum; contudo, discordamos dele com relação à sua orientação filosófica absolutista, o que será discutido no próximo item.

5 - A HERESIA DE EARMAN

Para Earman, as propriedades do tempo estariam no nível da "arena" dentro da qual os fenômenos ocorrem - o espaço-tempo - e não no nível dos grupos de fenômenos. Com base nessa concepção, ele argumenta que a entropia probabilística seria irrelevante para determinar a ordem

temporal, assim como todo fenômeno irreversível, que não seja consequência direta e exclusiva de leis físicas fundamentais, também o seria⁴¹. Notamos, conseqüentemente, que em Earman a crítica à tradição boltzmanniana se radicalizou, a ponto de questionar a vinculação entre irreversibilidade termodinâmica e ordem temporal.

Seu influente artigo contém duas partes principais: uma, construtiva, na qual ele se propõe a clarificar o conceito de "direção de tempo", que teria sido objeto de uma controvérsia pouco produtiva; a outra, destrutiva, na qual ataca "aquilo que foi tomado como um dogma inquestionável: considerações sobre irreversibilidade e entropia são absolutamente cruciais para qualquer aspecto do problema" da direção do tempo⁴². A parte destrutiva recai principalmente sobre a tradição boltzmanniana; porém, o direcionamento por ele dado à argumentação conduz a uma oposição com todos os que julgam as considerações sobre a irreversibilidade como relevantes para a principal questão relativa à ordem temporal, a de sua assimetria.

Ambas as partes estão expressas na "Heresia da

(41) EARMAN, 1974, p.32 ss

(42) EARMAN, 1974, p. 15.

Direção do Tempo"⁴³: "Ela afirma primeiramente que uma orientação temporal, se existir, é uma propriedade intrínseca ao espaço-tempo, que não precisa nem deve ser reduzida a propriedades não-temporais; e, em segundo lugar, que a existência de uma orientação temporal não depende tão crucialmente da irreversibilidade, quanto os reducionistas gostariam que acreditássemos". Parece exagerado considerar a primeira parte desta posição algo de "herético": trata-se de novidade apenas frente à tradição majoritariamente relacionalista na filosofia do tempo. A segunda parte é realmente herética, pois aponta no sentido da dissociação entre orientação temporal e processos (macroscópicos) irreversíveis, uma posição que só aparece claramente em uma parte posterior do artigo (já que, inicialmente, a questão é colocada em relação àquilo que os "reducionistas" pensavam).

O que o próprio Earman pensa é que as assimetrias presentes nos processos físicos "não são cruciais para alguns dos aspectos do problema da direção do tempo; de meu ponto de vista, as leis e condições de contorno poderiam ser tais que essas assimetrias não existissem, e ainda assim faria sentido falar de uma direção para o tempo; ou, de outra maneira, as leis e condições de contorno poderiam ser tais que

(43) EARMAN, 1974, p. 20.

essas assimetrias fossem o reverso do que são agora, sem que necessariamente fosse o caso de a direção do tempo se tornar a reversa do que é atualmente"⁴⁴.

Ao recusar a estratégia reducionista, de se definir a "direção do tempo" com base na direção dos processos físicos, Earman terminou pendendo para o outro extremo, admitindo a total independência entre ambas, e a conseqüente possibilidade de violação do imperativo pragmático de afinidade. Embora tivesse começado seus argumentos mostrando a fraqueza da entropia probabilística para o estabelecimento de uma orientação temporal - com o que concordamos - Earman terminou por concluir que toda assimetria física, geradora de todo tipo de irreversibilidade nos processos físicos, seria irrelevante para a orientação temporal. Porém, apesar da riqueza da análise, e das críticas pertinentes, apresentadas ao longo do artigo, falta-lhe sustentação argumentativa para essa posição.

Julgamos que seria preciso que ele mostrasse que a irreversibilidade fenomenológica seria irrelevante para a orientação temporal não só no plano semântico (i.é., da definição da ordem temporal) mas também no plano pragmático

(44) EARMAN, 1972, p. 45.

(i.é., do uso da ordem temporal já definida, para a coordenação de fenômenos). Ora, em nível pragmático o sentido de crescimento da entropia é o melhor - senão o único - meio para se associar a ordem da coordenada temporal com a ordem dos processos físicos. Se fossemos seguir Earman, teríamos uma ordem temporal bem definida, mas nos faltaria um critério para seu uso empírico.

Earman supõe que o problema da "irreversibilidade macroscópica" teria, necessariamente, um caráter antropomórfico. Logo, a conciliação entre a reversibilidade microscópica e a irreversibilidade macroscópica lhe surge como um falso problema físico, cuja elucidação curiosamente se faria através de um caminho semelhante ao de Boltzmann (trocando-se apenas a noção de "regiões do universo" pela de "modelo"): "a reversibilidade não significa que em um dado modelo qualquer o processo reverso por ele permitido tenha que ocorrer. Vivemos em apenas um único modelo, e qualquer dado modelo pode ser tão radicalmente assimétrico com respeito ao passado e ao futuro quanto se queira, ao mesmo tempo em que todas as leis relevantes são invariantes à reversão temporal"⁴⁵. Previsivelmente, ele não considera a 2ª. Lei da Termodinâmica

(45) EARMAN, 1972, p. 37.

uma lei da natureza. A explicação das observações macroscópicas, nas quais não se apresentam processos significativos de diminuição de entropia, segue, ainda, a mesma rota de Boltzmann. Nossas observações "são finitas em dois sentidos importantes. Primeiro, são feitas em intervalos temporais finitos e não concernem ao longo prazo. Segundo, enquanto seres humanos, estamos restritos à observação de porções finitas do universo, e estas porções nunca estão completamente isoladas do resto do universo"⁴⁶. O segundo ponto diz respeito ao argumento, originário de Burbury (não citado por Earman, que se refere a autores mais recentes, Blatt, Lebowitz e Morrison) de que perturbações externas aos sistemas quase-isolados destroem correlações entre as partículas, impedindo a obtenção dos estados reversos.

As sugestões de Earman para o problema da irreversibilidade macroscópica, examinadas criticamente, se mostram distantes de uma solução adequada⁴⁷. Mesmo assim, ele se revela "cético" a respeito do valor da solução deste problema, e de seu valor frente à questão da direção do tempo⁴⁸. Entendemos tal ceticismo como uma deficiência, não negligenciável, de sua abordagem: a de não pretender, ou não

(46) EARMAN, 1972, p. 37-38.

(47) Vide nossas críticas anteriores ao próprio Boltzmann, e, para a hipótese de Burbury, vide o capítulo 4.

(48) EARMAN, 1972, p.39.

ser capaz, de dar conta do problema da explicação de irreversibilidade macroscópica. Além disso, a combinação das partes construtiva e destrutiva de sua "heresia" conduz à incorrigibilidade, com base na experiência, da orientação temporal porventura adotada, o que constitui característica do absolutismo, ou do convencionalismo. Nestas condições, não vemos dificuldade em endossar a resposta de Grünbaum, de que tal orientação temporal seria meramente 'de dicto', pois as propriedades que atribuímos ao espaço-tempo relativístico são, em boa parte, distantes de nossas possibilidades de experimentação. A própria forma como Earman introduz seu conceito de orientação temporal pouco difere da maneira de um convencionalista estabelecer suas definições. Por outro lado, mesmo que sua proposta possa servir como justificativa para o tipo de ordem temporal utilizada na física, ela em nada contribui para o problema da explicação da irreversibilidade macroscópica.

6 - PROBABILIDADE, INCERTEZA E IRREVERSIBILIDADE

Ao adotar a explicação probabilística da irreversibilidade, Boltzmann a nosso ver se baseou em um raciocínio falacioso, assim expresso em seu artigo de

fevereiro de 1895, na revista *Nature*: como "a Segunda Lei nunca poderá ser matematicamente provada por meio apenas das equações da mecânica", então "meu teorema mínimo (o "Teorema-H"-APJ), assim como a assim chamada Segunda Lei da Termodinâmica, são apenas teoremas de probabilidade"⁴⁹. Esse raciocínio revela três pressuposições de Boltzmann: de que a mecânica seria a teoria física fundamental; que "as probabilidades" teriam um caráter objetivo, ou seja, que existiriam "leis" probabilísticas objetivas, das quais o "Teorema-H" seria uma consequência; e que não existiria uma terceira alternativa, além da pura mecânica e das probabilidades, na explicação do fenômeno da irreversibilidade.

Parece-nos que não teria passado pela mente de Boltzmann que as probabilidades poderiam ser interpretadas como tendo um caráter subjetivo, relativo à incerteza dos agentes cognitivos, frente a determinados tipos de fenômenos. Dessa forma, ele não teve que se haver com uma nova falácia, que seria a seguinte:

Premissa 1 - A evolução para o equilíbrio é descrita através de um processo probabilístico.

(49) ver BOLTZMANN, 1985a, p. 414

Premissa 2 - As probabilidades são funções da incerteza do agente cognitivo.

Conclusão - A evolução para o equilíbrio é função da incerteza do agente cognitivo.

A associação entre incerteza e irreversibilidade parece ser absurda, pois a quantidade de informação disponível para o agente cognitivo não poderia causar a irreversibilidade do processo observado. Contudo, em alguns autores temos a impressão de que a adoção conjunta da teoria probabilística da entropia (premissa 1) e da interpretação subjetivista das probabilidades (premissa 2) conduziu, involuntária ou inconscientemente, para a indesejada conclusão. Como observam Hollinger e Zenzen, "provavelmente ninguém argumentaria seriamente que um método de descrição seria a causa de qualquer atributo da natureza, incluindo sua irreversibilidade; mas a literatura da Mecânica Estatística está cheia de afirmações que parecem se dirigir nessa direção"⁵⁰.

Ora, pode-se contra-objetar, tal falácia não traria nenhum ônus para a teoria probabilística de Boltzmann,

(50) HOLLINGER e ZENZEN, 1982, p. 340. Para ter Haar, 1955, por exemplo, o "aumento da falta de conhecimento corresponde a um aumento de entropia" (p.308).

porque este não interpretou subjetivamente as probabilidades (como sendo função da incerteza). Contudo, a crítica a ser feita a Boltzmann não seria a de ter cometido a segunda falácia, o que ele realmente não fez. A limitação de sua teoria estaria justamente em sua dependência frente a uma interpretação objetivista, e relativamente obscura, das probabilidades. Logo, no caso de desejarmos adotar uma visão mais sofisticada das probabilidades⁵¹, não poderemos, ao mesmo tempo, adotar sua explicação probabilística da irreversibilidade, sob pena de incorrer na segunda falácia.

Uma crítica mais séria da abordagem probabilística foi a de Hollinger e Zenzen⁵², que mostraram que na descrição probabilística de qualquer sistema - independentemente de sua constituição física - ocorre uma perda de informação, correspondente ao aumento da incerteza; e que a associação entre aumento de incerteza e irreversibilidade conduz ao que chamam de "irreversibilidade a priori", ou seja, à imagem de um comportamento irreversível do sistema, previamente determinada pelo método de descrição adotado. É claro que, se houverem paralelamente causas reais

(51) como a de JAYNES, 1957a, que afirma: "reconhecemos francamente que as probabilidades envolvidas na predição baseada em informação parcial apenas podem ter uma significação subjetiva" (p.626). Para uma visão das principais correntes interpretativas na Mecânica Estatística atual, ver o esclarecedor artigo de LAVIS (1977).

(52) ver HOLLINGER e ZENZEN, 1982 e 1986.

gerando um comportamento irreversível no sistema, tal descrição lhe parecerá adequada. Porém, devemos ter em conta que a referida descrição seria a mesma, ainda que o sistema apresentasse um comportamento reversível; ou seja, a metodologia probabilística de descrição conduziria, via teoria dos erros de medida, a uma diminuição progressiva da quantidade de informação transmitida do sistema para o observador. Essa "perda de informação" poderia se localizar no canal de transmissão da informação (canal com ruído), não podendo ser debitada exclusivamente às alterações ocorridas no sistema (aqui tomado como fonte de informação).

A passagem para macro-estados mais prováveis pode ser interpretada como perda de informação a respeito dos correspondentes micro-estados, dado que os macro-estados mais prováveis são realizáveis por maior número de micro-estados e, portanto, quando ocorre tal passagem, para um observador macroscópico aumenta a ambigüidade a respeito do micro-estado subjacente. Nesse caso, supondo-se a existência de um canal sem ruído e de um observador com capacidade compatível de computação, e com conhecimento completo a respeito das relações entre micro e macro-estados do sistema observado, então o aumento da incerteza a respeito do micro-estado subjacente, sendo dado o macro-estado, poderia ser associado com o aumento da entropia do sistema. Nesse tipo de

abordagem, o aumento da incerteza pode ser utilizado para medir o aumento da entropia, mas em nada nos esclarece a respeito dos mecanismos que sempre impedem a passagem para macro-estados menos prováveis e, portanto, não explica o fenômeno da irreversibilidade. Sob o ponto de vista do problema de formulação dessa explicação, somos levados a concordar com Hollinger e Zenzen, a respeito da ineficácia da associação entre irreversibilidade e incerteza.

7 - ILUSÃO E ANTROPOMORFISMO

Importantes críticas feitas à tradição boltzmanniana (mas não só a ela) apontam no sentido do caráter antropomórfico do conceito de entropia, e do caráter "ilusório" da direção temporal conferida pelo seu aumento⁵³. Faremos aqui uma breve apreciação dessas críticas, endossando-as em alguns de seus aspectos, e deixando outros de lado.

Existem muitos sentidos para a palavra

(53) um dos autores que mais criticou as diversas concepções, científicas e filosóficas, nas quais a irreversibilidade, e a direção do tempo a ela relacionada, são consideradas como tendo caráter ilusório, foi PRIGOGINE, 1981 (e PRIGOGINE e STENGERS, 1990). A crítica de antropomorfismo foi formulada, entre outros, por JAYNES, 1957 a e b.

"ilusão". Aquele que julgamos mais apropriado para a concepção da irreversibilidade propugnada pela tradição boltzmanniana consiste no seguinte: a curva da entropia probabilística (para um sistema isolada em tempo infinito, ou para um ensemble de sistemas), vista em sua totalidade, é perfeitamente simétrica; porém, vista de uma perspectiva bastante parcial (apenas um de seus segmentos, de curto tamanho), pode ser considerada como assimétrica. Se a perspectiva for ampliada, ver-se-ão outros segmentos, e a assimetria regional será absorvida na simetria global. Nessa situação, a visão de assimetria poderia ser considerada como ilusória, pois depende essencialmente de extrema limitação do conhecimento das propriedades gerais da curva. Nesse sentido - e apenas nele - concordaríamos com a visão ingênua de que a irreversibilidade seria um produto da ignorância: não se trataria de uma real assimetria dos processos físicos, mas apenas de uma visão parcial da simetria dos mesmos.

Como, para a tradição boltzmanniana, o fenômeno da irreversibilidade estrita não passaria de uma ilusão (no sentido da palavra acima especificado), então ela não se preocupou em explicar verdadeiramente porque a entropia nunca diminui, mas sim explicar porque nunca observamos esse tipo de fenômeno. As razões que apresentou, em breve revisão, foram: a) porque estamos em uma região do universo de baixa entropia;

b) porque todos os sistemas que observamos foram recentemente isolados; e c) porque não temos tempo de vida suficiente para acompanhar o tempo de recorrência. Conseqüentemente, a tradição se comprometeu com um certo tipo de antropomorfismo, segundo o qual os conceitos da ciência física (no caso, o de irreversibilidade) se referem ao domínio da interação entre o homem e a natureza (e não ao domínio dos seres e processos naturais em geral).

Grünbaum e os Denbighs⁵⁴ recusaram a pecha de antropomorfismo para a abordagem tradicional, em um outro sentido da palavra "antropomorfismo", a saber: se a (medida da) entropia é o logaritmo da probabilidade de macro-estados, e se a divisão entre micro e macro-estados depende da descrição "de grão-grosso", que só faz sentido em relação às capacidades perceptivas humanas, então a (medida da) entropia teria um caráter antropomórfico. Eles contra-argumentaram que, enquanto na descrição da evolução de sistemas individuais a alteração de valor de entropia pode ser influenciada por fatores antropomórficos, na descrição de um ensemble de sistemas, a evolução da grande maioria deles, no sentido do aumento (ou estabilização) do valor da entropia

(54) ver GRÜNBAUM, 1972, p. 646 ss; e DENBIGH e DENBIGH, 1985, p. 56 e 66, onde distinguem entre o "valor numérico" de entropia, que depende "do estado do conhecimento", e "as propriedades das substâncias", que devem ser consideradas como "objetivas".

poderia ser considerado um processo objetivo⁵⁵. Uma avaliação dessa resposta deve levar em conta que toda medida física se utiliza de unidades que são definidas no domínio do universo perceptual humano, mas que isso não implica que os resultados das medidas sejam antropomórficos. Por exemplo, a noção de "energia útil", na termodinâmica, se refere às possibilidades práticas de se transformar calor (ou outra forma de energia) em trabalho, e os meios contados para se realizar tal transformação não incluem os recursos sobre-humanos do "Demônio de Maxwell"⁵⁶.

Assim, não vemos porque a medida da entropia, como o logaritmo da probabilidade dos macro-estados, seria antropomórfica; consideramos, ao contrário, a definição do valor da entropia para estados de não-equilíbrio como constituindo a grande realização da abordagem probabilística de Boltzmann. Nossa crítica a essa abordagem se direciona para suas tentativas de explicação do fenômeno da irreversibilidade. Essa explicação não pode ser antropomórfica, mas os resultados apresentados com base na abordagem probabilística infelizmente o são, no sentido em que

(55) a idéia original é de GRÜNBAUM (1972), p. 656.

(56) os recursos sobre-humanos do "Demônio" incluem não só a onisciência, mas também a capacidade sobrenatural de agir com um consumo de energia menor ou igual à energia útil que ele recupera do sistema em que opera (de modo que o sistema maior, constituído pelo "Demônio" mais o sistema em que opera, constitua um Moto-Contínuo do Segundo Tipo).

tal teoria só se aplicaria no domínio da interação entre os sistemas físicos e o observador humano. Sua validade depende da situação particular a que o observador humano está submetido.

8 - A POSSIBILIDADE DE EXPLICAÇÕES ALTERNATIVAS À TRADIÇÃO BOLTZMANNIANA

Podemos encontrar correspondência empírica, para a ordem da coordenada temporal utilizada na física, em explicações da irreversibilidade macroscópica alternativas àquela que se tornou a majoritária no seio da tradição boltzmanniana. Popper, por exemplo, muito antes de Earman, já havia considerado a evolução da entropia probabilística inadequada para o estabelecimento da direção do tempo, devido à existência de flutuações⁵⁷. Alternativamente, ele procurou basear a direção do tempo em outra concepção da irreversibilidade macroscópica: que não observamos processos nos dois sentidos temporais devido à inexistência, na natureza, de coordenação espontânea entre numerosos fatores causais. Estes fatores seriam necessários para produzir os

(57) POPPER, 1958, p. 402 e POPPER, 1965, p. 233-234.

processos reversos, correspondentes às soluções de potencial avançado, permitidas pelas equações mecânicas (por exemplo, ondas em sentido concêntrico⁵⁸).

Grünbaum, que ocupa uma posição-limite na linha evolutiva da tradição boltzmanniana, também admitiu a existência de processos irreversíveis não entrópicos, embora divergindo de Popper quanto à necessidade do critério da "espontaneidade" da coordenação entre as causas, para sistemas abertos em um universo infinito⁵⁹. Segundo Grünbaum, a direção desses processos coincidiria com a dos entrópicos, ambas se integrando na assimetria cosmológica proposta por Gold⁶⁰. Sua forma de evitar as consequências da teoria probabilística, relativas à ocorrência de flutuação de grande porte, foi a adição da suposição de escolha aleatória dos micro-estados iniciais. Essa suposição tem função semelhante à suposição adotada por Boltzmann no "Teorema-H" (em uma de suas interpretações), pois ambas procuram minimizar a possibilidade de evolução no sentido da diminuição da entropia, no intervalo temporal subsequente. A suposição de Boltzmann era, contudo, mais eficaz que a de Grünbaum, pois sua ação (na interpretação de "caos molecular", dos

(58) POPPER, 1956a e 1956b.

(59) GRÜNBAUM e HILL, 1957, GRÜNBAUM, 1972, p. 264 ss e GRÜNBAUM, 1974, p. 777 ss.

(60) ver GRÜNBAUM, 1972, p. 278.

Ehreufests, que discutiremos no próximo capítulo), foi dirigida especificamente para a exclusão dos micro-estados que, segundo sua teoria, conduziriam à diminuição da entropia.

Outra contribuição importante - embora breve - de Grünbaum, foi o questionamento da distinção rígida entre leis da natureza e condições factuais, no contexto do problema da explicação da irreversibilidade macroscópica⁶¹. A irreversibilidade macroscópica, mesmo sendo um fenômeno de grande amplitude, não precisaria ser consequência exclusiva das leis físicas, mas poderia ser gerada por condições factuais. A tradição boltzmanniana centrou sua abordagem na especificação das condições iniciais, enquanto a recente "escola astrofísica", liderada por Gal-Or⁶², identificou sua origem nas condições de contorno vigentes em determinada região do universo. Além dessas duas vertentes, ainda resta outra possibilidade de explicação, através de condições factuais universais, que propiciem uma explicação funcional da irreversibilidade. Esta consiste na identificação de uma determinada característica, ou mecanismo, presente nos sistemas, ou processos físicos, e expressos através de um princípio adicional às leis físicas, de modo que, da conjunção entre essas leis e o princípio, se constitua uma função,

(61) GRUNBAUM, 1972, p. 273.

(62) Consultar GOLD, 1972, e GAL-OR, 1974a, 1975.

cuja imagem descreva processos macroscópicos irreversíveis. Nesta última categoria classificamos a proposta de Popper citada acima⁶³, o princípio da causa comum, gerador da "Fork Asymmetry" em Horwich⁶⁴, o "Princípio de Seleção" de Prigogine e George⁶⁵, e, em destaque, as condições estabelecidas por Boltzmann na derivação original do "Teorema-H".

No que tange à possibilidade de uma explicação da irreversibilidade macroscópica a partir de condições factuais, a crítica que se pode fazer à tradição boltzmanniana seria que ela identificou condições factuais com condições particulares de certas regiões espaço/temporais, deixando de procurar princípios factuais universais que dessem apoio a uma concepção estrita da irreversibilidade. Por outro lado, em um modelo probabilístico, como aquele em que trabalhou a tradição, a adição desse tipo de princípio conduz apenas a novas previsões probabilísticas, incapazes de dar conta cabalmente da irreversibilidade, em sua concepção estrita. Em Reichenbach, por exemplo, há uma proliferação de suposições, levando-o a tentar derivar umas das outras. Ele terminou por considerar como irredutíveis as de rede de mistura e de

(63) Consultar POPPER, 1956a e 1956b, e a primeira proposta de GRÜNBAUM e HILL, 1957.

(64) Consultar HORWICH, 1987, p. 72ss, e também REICHENBACH, 1956, p. 157ss, de onde a idéia se originou.

(65) Consultar PRIGOGINE e GEORGE, 1983, p. 4591, ou PRIGOGINE e STENGERS, 1984.

paralelismo da evolução dos sistemas ramificados. Contudo, todos esses artifícios não foram suficientes para excluir a possibilidade de significativa diminuição da entropia em alguns dos sistemas do ensemble espacial, o que o conduziu, finalmente, a apelar ao velho princípio de uniformidade da natureza⁶⁶. Ao fazê-lo, incorreu em circularidade da argumentação, pois a não observação de processos marginais de diminuição de entropia era justamente o que sua teoria deveria explicar.

Para se dar conta da irreversibilidade estrita, além das explicações funcionais poder-se-ia recorrer a uma explicação nomológica, onde se procuraria encontrar fundamento para a irreversibilidade em uma lei de natureza; ou a uma explicação cosmológica, onde se inclui a citada escola astrofísica, na qual se faria referência a condições factuais presentes em uma certa região espaço-temporal. Ambas as alternativas são defendidas por diversos autores, organizados em correntes interpretativas prolíficas, que não teremos condições de analisar nesse trabalho.

Na impossibilidade de discutir com profundidade as correntes nomológica e cosmológica, nos limitaremos a

(66) REICHENBACH, 1956, p. 141, onde afirma que "o mundo é estatisticamente isotrópico".

apontar algumas dificuldades que encontramos para sua aceitação, enquanto explicações da irreversibilidade estrita. A mais tradicional corrente proponente de uma explicação nomológica é o chamado "programa termodinâmico", que localiza o 'explicans' na própria 2ª Lei da Termodinâmica, que seria uma verdadeira lei científica, não tendo sido corrigida, ou transformada em mera aproximação probabilística, pela Mecânica Estatística moderna. Sua origem está em uma das conclusões de Zermelo, no debate com Boltzmann: devido ao fracasso na tentativa de redução da 2ª Lei à mecânica molecular, ao invés de se reformular a 2ª Lei, a mecânica é que deveria ser corrigida por ela, de modo a dar conta da irreversibilidade estrita⁶⁷. Contudo, as pretensões dessa corrente esbarram com as dificuldades de fundamentação da própria termodinâmica, que não foram totalmente dirimidas pelas tentativas de axiomatização⁶⁸. Como sustenta Wright, existem "conceitualmente distintos" tipos de termodinâmica, de modo que "várias questões só possam ser propriamente respondidas em um sistema particular, e não pela 'termodinâmica em geral'"⁶⁹. Uma das questões pendentes seria a respeito da possibilidade de uma termodinâmica não-mecânica (como proposta por Redlich e Giles) responder à objeção de

(67) Ver KRÖES, 1985, p. 160ss, sobre a situação atual deste programa.

(68) Como a de CARATHÉODORY, 1976.

(69) WRIGHT, 1980, p. 84.

recorrência de Zermelo. Wright argumenta que, nesse caso, tal teoria entraria automaticamente em conflito com a mecânica quântica, onde o Teorema de Poincaré se aplica.

Uma segunda alternativa para a explicação nomológica da irreversibilidade estrita seria sua associação com assimetrias quânticas⁷⁰. Esta corrente interpretativa enfrenta dificuldades sérias, pois, de um lado, a Equação de Schroedinger é, como as equações mecânicas, temporalmente invariante, e, por outro, o "colapso" da função de onda, que é irreversível, precisaria ser ele mesmo explicado, para que pudesse constar como 'explicans' de um outro 'explicandum'. Mesmo que se identifiquem certas assimetrias quânticas, como a violação da paridade CPT⁷¹, restaria ainda enfrentar objeções a esse tipo de abordagem, como a de Earman, de que a não-invariância nomológica, no nível microscópico, não seria suficiente para se explicar a irreversibilidade macroscópica⁷².

A dificuldade que encontramos, no programa da explicação cosmológica da irreversibilidade estrita, é de tipo semântico. Enquanto leis e princípios da natureza possuem um

(70) consultar a este respeito DAVIES, 1974, cap. 6, e HEALEY, 1981.

(71) Consultar DAVIES, 1974, p. 175 ss.

(72) EARMAN, 1974, p. 38.

caráter universal, as condições iniciais e de contorno são, por definição, variáveis de região a região, e só se aplicam a fenômenos localizados. Acatemos, hipoteticamente, que haja uma condição factual que confira uma propriedade espaço/temporalmente persistente a todos os processos físicos, em uma dada região do universo. Tal regularidade pode ser atribuída através fatores: a) uma lei da natureza; b) uma causa comum; c) uma coincidência. No caso a, recaímos em uma explicação nomológica da irreversibilidade. No caso b, se a causa comum der origem a um mecanismo que reproduza generalizadamente seus efeitos ao longo do tempo, este poderá ser expresso em um princípio da natureza, e recairemos em uma explicação funcional; se não der origem a um mecanismo persistente e de grande abrangência, seus efeitos se desvanecerão no espaço e no tempo, e não se poderá explicar a irreversibilidade estrita através da causa comum remota. Resta então a alternativa c, que não é racionalmente atraente. Portanto, as explicações nomológicas, se bem sucedidas, devem ser absorvidas pelas explicações funcionais.

As concepções não-entrópicas da irreversibilidade, apesar de não terem sido ainda submetidas conjuntamente a um tratamento sistemático exaustivo, aparentam ter, todas elas, familiaridade com a idéia, originalmente

popperiana, de exclusão da obtenção espontânea de certos estados correlacionais na natureza. Na hipótese de Horwich, só se admite a existência de um alto nível de correlação entre os fenômenos se estes possuírem uma causa comum, e constata-se que a forquilha causal do tipo causa comum seria mais freqüente que a forquilha do tipo efeito comum (i.é., eventos correlacionados, sem possuírem uma causa comum, produzindo efeito comum), o que imprimiria uma assimetria aos processos físicos⁷³. No trabalho de Prigogine e colaboradores, encontra-se um princípio, complementar à mecânica, e não quântico, que corresponderia à 2ª. Lei em nível microscópico: um princípio de seleção dos micro-estados iniciais, baseado na exclusão de correlações pré-colisionais abrangentes e persistentes⁷⁴. Uma linha de continuidade entre as propostas foi desenvolvida por Horwich, que relacionou, de modo um tanto sumário, a suposição de escolha aleatória dos micro-estados iniciais, de Grünbaum, com a hipótese cosmológica de um micro-caos inicial, com a hipótese do não-isolamento de sistemas físicos, e, finalmente, com sua própria hipótese de "fork asymmetry"⁷⁵. Este raciocínio o leva a concluir, entre outras coisas, que "a irreversibilidade termodinâmica pode ser vista como um caso especial da 'fork asymmetry' ... a não ocorrência de sistemas

(73) HORWICH, 1987, p. 72-73.

(74) PRIGOGINE e STENGERS, 1984, p. 284.

(75) HORWICH, 1987, p. 70-74.

desmembrados com entropia decrescente é devida à ausência de qualquer correlação entre as condições iniciais criadas (pela separação do sistema - APJ) e as forças externas a ele impostas"⁷⁶. Ou seja, segundo Horwich, a ação de forças externas a um sistema só garante que sua entropia não diminua se não houverem correlações prévias entre aquelas e suas forças internas, o que seria assegurado pela vigência da 'fork asymmetry'. Porém, a explicação eclética de Horwich é muito complicada, e ele não especificou, com a precisão mínima desejável, o tipo de modelo sobre o qual são impostas todas estas restrições. Se for um modelo puramente probabilístico, então, como já argumentamos, todas as restrições não serão suficientes para excluir definitivamente as previsões de processos observáveis de diminuição de entropia.

A tradição boltzmanniana alterou o 'explicandum' do problema da irreversibilidade macroscópica, vindo a dar conta da irreversibilidade em sua concepção meramente estatística, como foi evidenciado no conceito de "anisotropia", de Grünbaum. Para realizar essa tarefa, menos laboriosa que a de se explicar a irreversibilidade em sua concepção estrita, lançou mão de suposições e condições factuais, cujo débito ontológico é equivalente, e muitas vezes

(76) HORWICH, 1987, p. 74.

superior, ao das suposições originalmente adotadas por Boltzmann, na explicação de irreversibilidade estrita através do "Teorema H". As dificuldades enfrentadas pela tradição, e pelas explicações não-entrópicas da irreversibilidade (as quais, de qualquer forma, têm que dar conta do problema da não-diminuição da entropia), nos conduzem a um reexame da primeira abordagem de Boltzmann. Esse trabalho ilustra, de modo exemplar, a alternativa, que julgamos ser a mais condizente: a explicação de irreversibilidade macroscópica estrita, através de um princípio adicional às leis físicas, no contexto de um modelo determinístico da evolução da entropia.

CAPÍTULO IV

CRÍTICA DA IRREVERSIBILIDADE DETERMINISTA

1 - BREVE REVISÃO DO "TEOREMA-H"

Existem indicações, no trabalho de Boltzmann publicado em 1872, de que ele estaria elaborando uma explicação de irreversibilidade nos quadros do modelo determinista dos processos físicos, típico da física clássica¹, embora fizesse uso de uma função de distribuição probabilística². Frente às objeções de Loschmidt e Zermelo, e, certamente, expressando suas próprias simpatias para com o uso das probabilidades na física, ele veio, a partir de 1877, a reinterpretar o "Teorema" como tendo caráter probabilístico (ou estatístico³). A partir de

-
- (1) usamos a noção de "determinismo" no sentido laplaciano, onde se supõe que haja uma determinação exata do estado inicial, e que a trajetória do sistema seja regido por uma função no tempo que determine seus estados para todos (ou quase todos) instantes. Não entendemos que tal noção seja essencialmente epistemológica, relacionada à capacidade de previsão de um agente cognoscente; tal capacidade depende do seu sistema cognitivo, mas o caráter de determinístico ou não de um processo não deve depender do sistema cognitivo do observador. Uma discussão extensa sobre o significado do termo "determinismo", na atualidade, se encontra em EARMAN, 1986 a.
- (2) ver em BOLTZMANN, 1872, p. 89 ss, uma explicação de seu uso da função probabilística, e uma discussão em nosso item 5.6.1, adiante.
- (3) a distinção entre o "estatístico" e o "probabilístico", feita, por exemplo, pelos Ehrenfests (1912, Introdução), não é rigorosa, pois todo modelo estatístico faz uso das probabilidades. A distinção que julgamos adequada, seria entre os modelos determinísticos e os probabilísticos.

seu trabalho de 1877, a irreducibilidade da descrição probabilística dos processos irreversíveis, e o caráter probabilístico de suas suposições extramecânicas, foram por ele defendidas⁴. Portanto, embora ele tivesse, em uma fase de seu trabalho científico, contribuído para difundir - por exemplo, entre os cientistas ingleses - o projeto de uma explicação determinista da irreversibilidade termodinâmica, sua própria trajetória intelectual divergiu desse projeto.

Com a emergência da poderosa abordagem de Gibbs, a teoria das colisões moleculares cedeu lugar à teoria dos ensembles, ao passo que a explicação do fenômeno da irreversibilidade foi remetida à teoria probabilística de Boltzmann. Contudo, apesar da existência de tentativas, consideradas bem sucedidas, de formulação de teorias da irreversibilidade na abordagem de Gibbs⁵, e de outras reformulações, probabilísticas ou estatísticas⁶ - que não serão estudadas nesse trabalho - acreditamos que a discussão sobre o "Teorema-H" não atingiu a clareza e profundidade suficientes para ser considerada como exaurida, apresentando ainda hoje especial interesse, para aqueles que não se satisfizeram com a teoria probabilística da irreversibilidade.

(4) vide BOLTZMANN, 1986 a, p. 58 e 448-449.

(5) vide trabalho de ter HAAR, 1955, e MACKEY, 1989.

(6) vide JAYNES, 1957; KAC, 1973; LAYZER, 1975, e WU, 1969, onde encontramos uma resenha das principais abordagens.

Procederemos ao reexame crítico da linha de raciocínio proposta por Boltzmann em 1872, frente ao problema da irreversibilidade macroscópica, tentando detectar falhas que possam ter contribuído para inviabilizar historicamente a aceitação do projeto, assim como as diretrizes básicas remanescentes, que poderão permitir a elaboração de uma explicação determinista da irreversibilidade estrita.

Na construção do "Teorema-H", Boltzmann fez uso de um modelo bastante simplificado, de um gás perfeitamente isolado, inicialmente considerado como monoatômico, no qual ocorrem apenas colisões binárias entre suas moléculas, sem especificação da função da força, e tendo colisões perfeitamente elásticas com as paredes do recipiente⁷. A alteração das grandezas termodinâmicas foi representada como alteração na distribuição de velocidade das moléculas, através das colisões. A função de distribuição, como se sabe, não dá uma descrição "fina" do sistema, mas apenas especifica o número (provável) de moléculas em cada faixa de velocidade considerada. O estado de equilíbrio termodinâmico era identificado de duas maneiras, compatíveis entre si: como o estado no qual as colisões não mais alteram a distribuição de energias cinéticas (módulos de velocidade) das moléculas, e como aquele que obedece à

(7) vide BOLTZMANN, 1872, p. 91 ss.

distribuição de Maxwell (a qual tem a forma de uma curva gaussiana, ou seja, a função de probabilidade das velocidades tem a forma $F(|v|) = Av^2 - e^{-Bv^2}$, onde A e B são constantes).

Boltzmann também considerou o espaço total ocupado pelo gás como dividido em unidades de volume, contendo um certo número de moléculas, cada qual locada, a cada intervalo temporal considerado, em uma determinada faixa de velocidade. Ele dispensou a referência às posições e direções de velocidades das moléculas no interior das unidades de volume porque, devido às duas condições estipuladas⁸, as direções de velocidade se distribuiriam igualmente por todas as moléculas, e cada unidade de volume possuiria a mesma proporção de moléculas, por faixa de energia cinética, do volume total. O processo de aproximação ao equilíbrio foi considerado como alteração da distribuição das energias cinéticas nas unidades de volume (que é proporcional à sua alteração no volume total).

Para calcular os efeitos das colisões na alteração da distribuição de velocidades, ele levou em conta colisões binárias, nos quais a energia cinética de uma molécula estivesse, antes da colisão, em uma faixa X. Pelo princípio de conservação da energia, a soma das energias cinéticas pré-

(8) vide BOLTZMANN, 1872, p. 93, e a citação que fizemos em nosso Cap. 2.

colisionais seria igual à soma das pós-colisionais. Ele calculou o número de colisões em que uma das moléculas tem energia cinética pré-colisional na faixa X como sendo função: a) da quantidade de partículas na unidade de volume com energia cinética na faixa X; b) da quantidade de moléculas Z que se chocam com ela; c) do intervalo temporal considerado, e d) de um "fator de proporcionalidade", que depende da "natureza da colisão"⁹.

Em seguida Boltzmann integrou Z para todos os seus possíveis valores, obtendo o número de colisões (por unidade de volume, no intervalo temporal considerado) que diminuem a quantidade de moléculas com energia cinética na faixa X; subtraindo-se desse número o número de colisões que aumentam a quantidade de moléculas com energia cinética na faixa X (i.é., aquelas nas quais X é uma das faixas de energia cinética pós-colisional), ele obteve a famosa equação que descreve a variação da distribuição de velocidade, na faixa X (e que pode ser calculada para todas as faixas)¹⁰. Em um passo decisivo de seu trabalho, mostrou em seguida que a variação de tal função tem valor nulo para a distribuição de Maxwell¹¹. Após mostrar a

(9) vide Boltzmann, 1872, p. 96. Tais fatores dizem respeito aos ângulos entre as trajetórias pré-colisionais das moléculas e parâmetros de choque, e foram elucidados por Burbury no debate na revista Nature, e pelo próprio Boltzmann em 1896, como mostraremos adiante.

(10) BOLTZMANN, 1872, p. 96 a 105.

(11) BOLTZMANN, 1872, P. 106.

adequação de sua função para a descrição do estado de equilíbrio, ele sugeriu sua aplicação para a descrição da evolução do não-equilíbrio ao equilíbrio¹².

Forém, ao invés de demonstrar, como seria esperado, que a função obtida possuiria um comportamento assimétrico no tempo, ele adotou uma estratégia menos direta: definiu uma quantidade E ¹³ e demonstrou que, para os valores admitidos pela função em relação ao tempo, a quantidade E "nunca aumenta"¹⁴, o que a habilitaria a desempenhar o papel de inverso da entropia termodinâmica. O problema da estratégia adotada por Boltzmann é que ela não nos dá uma intuição clara do tipo de processo físico subjacente à diminuição de E , correspondendo à passagem do não-equilíbrio ao equilíbrio. Algumas indicações podem ser encontradas em uma instância ainda mais simplificada, também apresentada em 1872: o modelo cinético de energia discreta, no qual as energias cinéticas das moléculas são múltiplos inteiros positivos de uma unidade e . Ele denotou por N^{k1} o número médio de colisões por intervalo de tempo, em que mn as energias cinéticas das moléculas são ke e le antes das

(12) ele afirmou o seguinte: "Consideraremos agora o problema com maior generalidade (que Maxwell - APJ). Iremos assumir que a distribuição de energia cinética é inicialmente completamente arbitrária, e nos perguntaremos como ela muda no curso do tempo" (1872, p. 106).

(13) BOLTZMANN, 1872, p. 106.

(14) BOLTZMANN, 1872, p. 107-116.

das colisões, e n_e e n_e após as mesmas¹⁵. O valor de N^{kl} é
 mn
 dado pela quantidade de moléculas w_k e w_l com energias k_e e l_e
 na unidade de volume, pelo intervalo de tempo t e pelo "fator de
 proporcionalidade" B^{kl} ¹⁶:

$$N^{kl}_{mn} = t \frac{w_k \cdot w_l}{\sqrt{K \cdot l}} \cdot B^{kl}_{mn}$$

A variação da distribuição de energia cinética em
 uma unidade de volume é dada pelo somatório do número de
 colisões que aumentam a quantidade de moléculas em cada valor
 discreto de energia cinética (múltiplos inteiros de e),
 subtraído do somatório do número de colisões que diminuem a
 mesma quantidade. Tomemos o exemplo de 4 valores possíveis de
 energia cinética, $1e$, $2e$, $3e$ e $4e$. Para a classe de velocidades
 $2e$, por exemplo, a variação da energia cinética em um intervalo
 de tempo é dada por:

$$\frac{dF(2e)}{dt} = (N^{13}_{22} + N^{14}_{23} + N^{33}_{24}) - (N^{22}_{13} + N^{23}_{14} + N^{24}_{33})$$

Conhecendo-se a quantidade de moléculas em cada

(15) BOLTZMANN, 1872, p. 120.

(16) BOLTZMANN, 1872, p. 120.

classe x ($x = 1, 2, 3, 4$) de energia cinética, em determinado instante, mais os valores necessários para determinar o "fator de proporcionalidade" para cada tipo de colisão, pode-se então calcular a variação da distribuição para o intervalo seguinte. Nesse momento, Boltzmann reintroduziu a quantidade E ¹⁷:

$$E = \sum_x \sqrt{x} \cdot F(xe) \cdot \log F(xe)$$

e demonstrou¹⁸ que a variação de E no tempo, dada para o sistema acima ($x=4$) por:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dF(1e)}{dt} \cdot \log F(1e) + 2 \cdot \frac{dF(2e)}{dt} \cdot \log F(2e) +$$

$$3 \cdot \frac{dF(3e)}{dt} \cdot \log F(3e) + 4 \cdot \frac{dF(4e)}{dt} \cdot \log F(4e)$$

sempre seria "necessariamente negativa", exceto se a quantidade de colisões que retiram moléculas de cada valor de energia cinética for igual à quantidade de colisões que aí colocam moléculas (i.é., sistema em equilíbrio). Como a variação de E sempre é negativa, e de pequeno porte, Boltzmann concluiu que E

(17) BOLTZMANN, 1872, p. 121.

(18) BOLTZMANN, 1872, p. 127 ss.

"tem que, necessariamente, se aproximar de um valor mínimo"¹⁹.

A crítica feita a Boltzmann por Loschmidt, a partir de um argumento de Thomson²⁰, lançava mão de uma hipotética reversão das direções de velocidade das moléculas, em um sistema isolado em estado de equilíbrio, à qual deveria logicamente seguir (dados os supostos fundamentos puramente mecânicos do modelo de Boltzmann) um aumento de quantidade E do sistema. A consequência mais saliente dessa objeção foi que o chamado "Teorema-H" não poderia ser um verdadeiro teorema da teoria mecânica, porque, enquanto as leis mecânicas permitiriam o aumento de E (elas são invariantes sob reversão do tempo, ou das direções de velocidade) o suposto Teorema o proibia. Mas essa consequência da objeção de Loschmidt não é grave para um defensor do projeto de uma explicação funcional determinista da irreversibilidade, pois nada impugna 'a priori' a validade de uma teoria - como a de Boltzmann de 1872 de fato o era - onde as leis mecânicas estejam associadas a um princípio extramecânico, não contraditório com as mesmas, com vistas à explicação de um determinado fenômeno, para a qual tais leis sozinhas fossem insuficientes.

Há, contudo, uma segunda consequência da objeção

(19) BOLTZMANN, 1872, p. 128.

(20) ver nosso cap. 2.

de Loschmidt, que não foi devidamente realçada na literatura, e que seria efetivamente grave para o "Teorema-H", em sua formulação por Boltzmann em 1872. Para enunciar tal consequência, teremos que introduzir as noções de "colisão maxwelliana" e "colisão anti-maxwelliana". Considerando-se que o estado de equilíbrio corresponde a uma distribuição maxwelliana da energia cinética pelas faixas ou valores discretos de energia admitidos, e que toda distribuição de não-equilíbrio constitua um desvio frente à distribuição maxwelliana, então para um sistema em não-equilíbrio, toda colisão que o aproxime, minimamente que seja, da distribuição maxwelliana, constitui uma "colisão maxwelliana", e toda colisão que o afaste ainda mais, da distribuição maxwelliana, constitui uma "colisão anti-maxwelliana". Para um sistema em equilíbrio, consideramos que o número de colisões maxwellianas e anti-maxwellianas (definidas com relação ao não-equilíbrio) será igual, posto que o sistema está, e permanece, em uma distribuição maxwelliana.

Tomemos um caso particular de distribuição de não-equilíbrio, cuja forma é semelhante à do dorso de um camelo com duas corcovas (o que abreviaremos por "DCDC"). Nessa distribuição, predominam os valores de energia cinética mais altos e mais baixos; portanto, toda colisão na qual o produto das energias pré-colisionais for menor que o produto das

energias pós-colisionais é uma colisão maxwelliana, e toda colisão em que o produto das energias pós-colisionais for menor que o das pré-colisionais é anti-maxwelliana. Na passagem do não equilíbrio para o equilíbrio, o número de colisões maxwellianas tem que predominar sobre o número de colisões anti-maxwellianas, para que a distribuição progressivamente adquira a forma maxwelliana do equilíbrio. Correlatamente ao predomínio das colisões maxwellianas sobre as anti-maxwellianas, a quantidade E definida por Boltzmann progressivamente diminui, como foi por ele demonstrado; porém, na hipotética situação proposta por Loschmidt, na qual o sistema sai do equilíbrio e rumo para o não-equilíbrio, percorrendo em sentido inverso sua trajetória mecânica anterior, as colisões anti-maxwellianas predominam sobre as maxwellianas, e seria de se esperar que a quantidade E correspondentemente aumentasse. Mas a prova oferecida por Boltzmann, de que na aproximação ao equilíbrio E diminui, foi forte demais, e abrangeu também o processo inverso. Logo, o seu "Teorema-H" seria analítico, no sentido de que E sempre diminui, quer o sistema esteja se aproximando do equilíbrio ou dele se afastando, ou ainda cego, no sentido de que ele não distingue entre as colisões que aproximam o sistema do equilíbrio (maxwellianas) das que o afastam do equilíbrio (anti-maxwellianas). Compreende-se então que tal teoria não pudesse ser adotada enquanto explicação científica da irreversibilidade fenomenológica.

Detectada aquelas que julgamos serem as deficiências cruciais do "Teorema", podemos agora lançar uma interrogação sobre o trabalho de Boltzmann de 1872, diferente daquela lançada pelos críticos ingleses, sob a iniciativa de Culverwell. Da pergunta inicial a respeito do significado do "Teorema", a discussão na revista Nature, sob a influência de Burbury, veio a enfatizar a etapa da construção do "Teorema" na qual se teria introduzido o elemento responsável pela irreversibilidade. Ora, essa última questão, sobre o ponto em que a irreversibilidade foi introduzida, supõe que o "Teorema" efetivamente explicasse cabalmente o que constitui um processo mecânico molecular de aproximação irreversível ao equilíbrio. Mas é justamente aqui que ele contém uma falha, pois na função construída por Boltzmann $\frac{dE}{dt}$ apresenta os mesmos resultados (E

progressivamente diminui), tanto para a aproximação ao equilíbrio, quanto para o afastamento do equilíbrio. As perguntas básicas, com as quais devemos a ele nos dirigir, então seriam: em que consiste a aproximação ao equilíbrio? E: porque todo sistema isolado necessariamente progride para o equilíbrio? As respostas preliminares que possuímos, intuitivamente, são: a aproximação ao equilíbrio consiste em um predomínio (numérico) das colisões maxwellianas sobre as não-maxwellianas; e os sistemas isolados rumam para o equilíbrio devido a um princípio extramecânico, que faz com que as colisões maxwellianas sempre

predominem sobre as anti-maxwellianas (com admissão de pequenas flutuações, como discutiremos proximamente). Devemos, portanto, examinar em que medida essas respostas estão implícitas ou implicadas no trabalho de Boltzmann de 1872, vindo a apontar as possíveis insuficiências de seus resultados, relativamente à tarefa inacabada de se explicar a irreversibilidade termodinâmica.

2 - CONDIÇÕES PARA A EXPLICAÇÃO DA IRREVERSIBILIDADE ESTRITA PELO "TEOREMA-H"

Retomemos o exemplo loschmidtiano de reversão das direções de velocidade das moléculas de um sistema isolado, no equilíbrio recente. Se as trajetórias das moléculas seguirem estritamente as leis da mecânica, então o sistema evoluirá de um estado de equilíbrio para um estado de não-equilíbrio, o qual, para os fins de nossa análise, será considerado do tipo "DCDC". Tomemos o modelo de energia discreta, e um sistema com quatro valores w_x de energia (a saber, $x=1, 2, 3, 4$). Adotando um determinado número total de moléculas, e calculando separadamente o valor de E , pela definição dessa quantidade feita por Boltzmann, notamos que o valor de E no equilíbrio é menor que seu valor no não-equilíbrio; logo, se o sistema passar

do equilíbrio para o não-equilíbrio, o valor de E deve obviamente aumentar. Por conseguinte, sabemos que o problema com a variação de E não está na definição dessa quantidade, e sim na equação que dá sua variação no tempo, a qual é resultante da conjunção da definição de E com a função que dá a variação da função da distribuição no tempo, devida às colisões. Esta última função está montada sobre a idéia de que a variação do número w_k de moléculas para o valor k depende do número C^{kl} de mn colisões que retiram moléculas do valor k , e do número C^{mn} de $k1$ colisões, inversas das anteriores, que colocam moléculas em k ²¹. Ora, se uma dessas colisões for maxwelliana, e $k, l \neq m, n$, sua inversa será necessariamente anti-maxwelliana. Logo, colisões maxwellianas e anti-maxwellianas devem ocorrer em diferentes quantidades, para que o sistema rume para o equilíbrio ou dele se afaste (apenas no equilíbrio ocorrerão na mesma quantidade). Esse raciocínio nos leva a formular, em primeiro lugar, a seguinte questão: a equação de variação da distribuição (que doravante chamaremos de "Equação de Boltzmann"), formulada no contexto do modelo de energia discreta, mostra como, na aproximação ao equilíbrio, as colisões maxwellianas predominam

(21) uma exposição sobre o que constitui uma colisão inversa, assim como a definição de outros tipos de colisões, é encontrada em TOLMAN, 1938, p. 112-113.

quantitativamente sobre as anti-maxwellianas?

Uma resposta afirmativa à questão poderia se basear em duas alternativas: a) através do número de moléculas com energia pré-colisional favorável à produção de uma colisão maxwelliana, e desfavorável à produção de uma colisão anti-maxwelliana (p.ex., no modelo acima, muitas moléculas com $1e$ e $4e$, e poucas com $2e$ e $3e$); b) através de valores dos "fatores de proporcionalidade".

O modo como Boltzmann desenvolve seus exemplos, ilustrativos da aplicação do modelo de energia discreta, dificulta a seus leitores a percepção do papel da primeira alternativa no entendimento dos tipos de colisões que ocorrem na aproximação ao equilíbrio. Temos a falsa impressão de que, mesmo longe do equilíbrio, cada tipo de colisão direta ocorre em mesma quantidade que sua inversa, e, conseqüentemente, cada colisão maxwelliana ocorreria na mesma quantidade que sua inversa anti-maxwelliana. Foi certamente esse aspecto do trabalho de Boltzmann de 1872 que confundiu Culverwell em 1895, quando, após todo o debate por ele mesmo iniciado em 1894, novamente recorreu à revista *Nature*, publicando uma nova nota, na qual afirmava que "a expressão obtida no teorema de Boltzmann para o valor de $\frac{dH}{dt}$, depende da suposição de que a distribuição

existente seja, a cada instante, absolutamente idêntica com a distribuição mais provável"²², isto é, que o "Teorema-H" só se aplicaria a um sistema no equilíbrio, onde (em nossas palavras) o número de colisões maxwellianas seria igual ao de anti-maxwellianas. Ele desafiava Boltzmann e Burbury a responder a essa nova objeção. Apenas o primeiro tomou para si a tarefa, vindo, porém, a tratar de coisa bem diferente, a saber, da independência entre as velocidades pré-colisionais das moléculas (a chamada "Condição A" de Burbury, que estudaremos adiante). Nessa época, Boltzmann já assumira a hipótese de que o comportamento do gás descrito pelo "Teorema-H" não seria "absolutamente necessário", mas apenas o mais provável, e que a Condição A significaria apenas "que as leis das probabilidades são aplicáveis para se encontrar o número de colisões"²³.

Embora acreditemos que o "Teorema-H" efetivamente descreva a transição, do não-equilíbrio para o equilíbrio, julgamos que Culverwell farejou algo importante para se entender uma possível deficiência dessa teoria. De fato, ao substituímos o valor de E (chamado de "H", à época da discussão com os críticos ingleses) na Equação de Boltzmann, obtendo $\frac{dE}{dt}$, as

(22) CULVERWELL, 1985, p. 149. Nossa interpretação dessa afirmação, a seguir, não é a única possível; aparentemente Culverwell estaria influenciado pela metodologia da Mecânica Estatística, proposta nessa época por Gibbs.

(23) BOLTZMANN, 1895, p.221.

diferenças na distribuição existente, favorecendo um predomínio das colisões maxwellianas (ou das anti-maxwellianas, no exemplo de Loschmidt) deixa de ser relevante para a determinação do sentido de variação (i.é., do sinal) de E , pois, como já sabemos, E apenas diminuirá ou permanecerá constante. Examinemos a função $\frac{dE}{dt}$ para o exemplo de $x=1, 2, 3, 4$; Boltzmann mostrou

que $\frac{dE}{dt}$ seria calculada por²⁴:

$$\frac{dE}{dt} = \left\{ \begin{aligned} & \left[\begin{array}{c} B^{13} \\ 22 \end{array} (w_2 \cdot w_2 - w_1 \cdot w_3) \log \frac{(w_1 \cdot w_3)}{w_2 \cdot w_2} \right] + \\ & \left[\begin{array}{c} B^{24} \\ 33 \end{array} (w_3 \cdot w_3 - w_2 \cdot w_4) \log \frac{(w_2 \cdot w_4)}{w_3 \cdot w_3} \right] + \\ & \left[\begin{array}{cc} (B^{14} + B^{14}) & \\ 23 & 32 \end{array} \cdot (w_2 \cdot w_3 - w_1 \cdot w_4) \log \frac{(w_1 \cdot w_4)}{w_2 \cdot w_3} \right] \end{aligned} \right\}$$

O valor $\frac{dE}{dt}$ é, obviamente, dado pela soma das

três parcelas, mas, como todas têm a mesma forma, podemos analisar apenas o que ocorre no interior de uma delas. Na primeira parcela se faz referência às colisões do tipo C^{13} e C^{22}

C^{22} . Se o sistema estiver em não-equilíbrio do tipo "DCDC", C^{13} e C^{22}

então C^{13} é maxwelliana e C^{22} é anti-maxwelliana. O fator de C^{13} e C^{22}

(24) vide BOLTZMANN, 1872, p. 127.

proporcionalidade, para ambas, é B_{22}^{13} (que é igual a B_{13}^{22}). No

suposto estado atual de não-equilíbrio, $w_1 > w_2$, e $w_3 > w_2$. Logo, ocorrerão mais colisões do tipo C_{22}^{13} que do tipo C_{13}^{22} , e por causa

disso, o sistema se aproximará progressivamente do equilíbrio, onde o número de ambos os tipos de colisões se igualará. Contudo, na função calculada por Boltzmann, basta que $(w_2 \cdot w_2)$ seja diferente (maior ou menor) que $(w_1 \cdot w_3)$, para que E diminua. Ora, segundo nosso argumento, apenas no caso de $(w_1 \cdot w_3) > (w_2 \cdot w_2)$ o sistema estará evoluindo do não-equilíbrio citado para o equilíbrio, e, no caso contrário, estará se afastando ainda mais do equilíbrio, e sua entropia (inverso de E) estaria diminuindo, e não aumentando. Na função de Boltzmann, repetimos, em ambos os casos E diminui (correspondendo, em ambos, a um suposto aumento da entropia).

Na inferência de $\frac{dE}{dt}$, a partir de $\frac{dE}{dt}$ e da

definição de E , se revela portanto uma insuficiência de informação, a qual não permite a discriminação entre dois tipos relevantes de colisões, e a conseqüente impossibilidade de entendimento do predomínio numérico das maxwellianas sobre suas inversas. Como $\frac{dE}{dt}$ está definido no espaço de velocidades,

pode-se formular a hipótese de que tal função não conteria toda a informação necessária para a descrição completa de um sistema puramente mecânico. Porém, sabemos que o espaço de velocidades não só pode conter a informação da distribuição de velocidades pré-colisionais de todas as moléculas, como também seria um dos instrumentos de representação mais apropriado para expressá-la. Acreditamos que a razão da insuficiência então estaria no nível epistemológico: Boltzmann pretendeu elaborar uma teoria matematizada, aplicável a todos os sistemas isolados possíveis, e, nessa teoria, não poderia, sem os devidos cuidados conceituais, utilizar noções semelhantes às de "colisões maxwellianas" e "anti-maxwellianas", porque esses conceitos são relativos a classes particulares de distribuições pré-colisionais, e implicam, em última análise, em uma teoria geral sobre o não-equilíbrio, de que ainda hoje não dispomos. O que é uma colisão maxwelliana para um sistema cuja distribuição de velocidade é do tipo "DCDC", será não-maxwelliana para sistemas nos quais a grande maioria das moléculas estejam com energias cinéticas próximas da média (podemos imaginar tais distribuições como tendo forma semelhante à do "dorso do camelo de uma corcova"). A "informação perdida" na construção do "Teorema" seria então a da forma global da distribuição de energias cinéticas, anteriormente aos intervalos temporais nos quais ocorrem as colisões computadas. Boltzmann, ao calcular o número de colisões, computou isoladamente as quantidades de moléculas

em cada faixa (ou valor) de energia cinética; porém, a forma global de distribuição, em relação à qual podemos distinguir as colisões maxwellianas das anti-maxwellianas, e prever qual dos dois tipos ocorrerá em maior número, não entrou em sua computação como item informacional relevante.

Voltemos nossa atenção para a segunda alternativa. Analisaremos agora se, em um sistema em distribuição de não-equilíbrio do tipo "DCDC", poderíamos distinguir as colisões maxwellianas das anti-maxwellianas, por meio da conjunção entre a maior frequência de estados pré-colisionais favoráveis às colisões maxwellianas, e da diferença de fatores de proporcionalidade dentre as colisões. Nas Leituras compiladas por Boltzmann e publicadas em 1896, ele iniciou seu Capítulo I com um estudo das colisões, então consideradas como binárias, perfeitamente elásticas e tendo duração temporal infinitesimal²⁵. Fazendo uma análise geométrica das colisões - em boa parte já antecipada pelo trabalho de Burbury - ele distinguiu a linha dos centros de massa no instante da colisão, e a linha da velocidade relativa das duas moléculas, que seria a mesma antes e depois da colisão (devido à duração temporal considerada). Essas duas linhas formam entre si um ângulo agudo V , que possui especial

(25) BOLTZMANN, 1896a, p. 36ss.

importância, pois a natureza das colisões pode ser determinada, para moléculas esféricas de mesma massa e volume, apenas pelo ângulo ψ , pelas energias cinéticas das moléculas, e pelo ângulo E entre o plano onde se define ψ e um sistema de referência²⁶. Ao estudar isoladamente a natureza das colisões binárias, independentemente do que ocorre no restante do gás, podemos provisoriamente desprezar o ângulo E ²⁷. Resta-nos o ângulo ψ , como o determinante, juntamente com a soma das energias cinéticas iniciais, das energias cinéticas finais.

Os ângulos colisionais ψ , de uma colisão maxwelliana e de sua inversa anti-maxwelliana, são iguais; logo, com base exclusivamente neles, não podemos discriminar entre elas. Contudo, dados conjuntamente as energias cinéticas pré-colisionais e os ângulos colisionais, então podemos determinar qual colisão correspondente é maxwelliana e qual é anti-maxwelliana. Ex.: no modelo de energia discreta, com $x=5$, dadas as $EC_{pré}$ 2 e 4, as $EC_{pós}$ podem ser 1 e 5, 2 e 4 ou 3 e 3. Para as $EC_{pré}$ 2 e 4, os ângulos que geram os três resultados acima são diferentes; dado o ângulo, uma dessas três alternativas fica determinada. A anti-maxwelliana ψ ²⁴ tem o mesmo ângulo

15

(26) vide BOLTZMANN, 1986a, p. 43.

(27) de momento, o desprezo de E tem o único objetivo de facilitar nosso raciocínio, não significando ainda a adoção de uma suposição extramecânica.

colisional que a maxwelliana C_{15} ; porém, dado que as $EC_{pré}$ sejam

24

1 e 5, então a colisão especificada é a maxwelliana de C_{15} .

24

Resta-nos agora avaliar o papel dos "fatores de proporcionalidade" na explicação da evolução irreversível para o equilíbrio. Existem infinitos ângulos entre 0 e 90 graus, mas, no modelo de energia discreta, podemos classificar os ângulos em um número finito de tipos. Fixando um determinado número x de valores de energia discretos, notamos que para uma determinada distribuição de energias cinéticas D pode ocorrer um número N de colisões diferentes, relativamente às suas energias cinéticas iniciais e finais; podemos então identificar P tipos de ângulos colisionais. Além disso, supondo-se que em um intervalo temporal infinitesimal cada molécula colida apenas uma vez, e cada tipo diferente de colisão ocorra na mesma quantidade que as demais, podemos ainda identificar uma distribuição de ocorrências dos diferentes ângulos colisionais, que chamaremos de distribuição padrão (a qual equivale aproximadamente à noção de "distribuição mais provável", na linguagem probabilística). Para uma visualização das noções acima, elaboramos um exemplo com $x=5$. Tomando-se a distribuição D , em uma determinada unidade de volume: ($EC_{1e} = 10$ moléculas, $EC_{2e} = 12$ moléculas, $EC_{3e} = 14$ moléculas, $EC_{4e} = 12$ moléculas e $EC_{5e} = 10$ moléculas),

perfazendo um total de 58 moléculas (uma quantidade suficiente para os objetivos de nossa ilustração); considerando-se que em um intervalo infinitesimal cada molécula colida apenas uma vez, e que cada tipo diferente de colisão ocorra apenas uma vez, então teremos $N=29$ diferentes colisões por intervalo:

$c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{13}, c_{14}, c_{14}, c_{15}, c_{15}, c_{15}, c_{22}, c_{22}, c_{23}, c_{23},$
 11 12 13 22 14 23 15 33 24 22 13 23 14

$c_{24}, c_{24}, c_{24}, c_{25}, c_{25}, c_{33}, c_{33}, c_{33}, c_{34}, c_{34}, c_{35}, c_{35}, c_{44},$
 24 33 15 25 43 33 24 15 34 25 35 44 44

c_{44}, c_{45}, c_{55}
 35 45 55

Observe-se que, assim como Boltzmann, não distinguimos que valores de energia cinética pré ou pós-colisionais são de quais das duas moléculas que colidem; ou seja, consideramos as quatro notações c_{k1}, c_{k1}, c_{1k} e c_{1k} como

k1 1k k1 1k

referentes a colisões equivalentes: em todos os casos, trata-se do mesmo ângulo colisional ψ (tendo sua posição no espaço alterada), e das mesmas energias pré e pós-colisionais.

No conjunto de colisões acima, podemos distinguir P=3 tipos de ângulos colisionais V:

Tipo I : ângulos que não alteram as energias cinéticas do par de moléculas que colidem.

Exs.: Os ângulos que ocorrem em C¹¹, C¹², etc.

11 12

Tipo II: ângulos que alteram as energias cinéticas com saltos de uma faixa ou um valor por molécula. Exs.: os ângulos que ocorrem em C¹³, C⁴⁴, etc

22 35

Tipo III: ângulos que alteram as energias cinéticas com saltos de duas faixas ou dois valores por moléculas. Ex. o ângulo que ocorre em C³³

15

A distribuição padrão de ângulos colisionais V, relativa aos dados acima, seria:

Tipo I: ocorre na fração 15

29

Tipo II: ocorre na fração 12

29

Tipo III: ocorre na fração 2

29

Formularemos agora nossa Hipótese da Distribuição Padrão, a qual julgamos ser essencial para um entendimento intuitivo do "Teorema-H": ao longo da evolução de um sistema isolado de muitos corpos, do não-equilíbrio para o equilíbrio, a ocorrência de ângulos colisionais V , por intervalo temporal, sempre obedece à respectiva distribuição padrão. Essa hipótese, que está ligada às suposições extramecânicas adotadas por Boltzmann, teria as seguintes consequências:

- a. **Progressividade da evolução para o equilíbrio.** A existência de uma proporção fixa entre a ocorrência de ângulos colisionais que reproduzem as energias cinéticas já obtidas e ângulos que as alteram, faz com que as mudanças de distribuição não ocorram bruscamente, e também impede a estabilização do sistema longe do equilíbrio;
- b. **A distribuição de forma maxwelliana das energias cinéticas pré-colisionais é a distribuição do equilíbrio.** Parafraseando a prova já realizada por Maxwell e Boltzmann, podemos afirmar o seguinte: a hipótese de distribuição padrão dos ângulos colisionais implica que, dada uma distribuição maxwelliana das energias pré-colisionais, para cada ocorrência de um determinado ângulo $\angle V$ em uma colisão maxwelliana, existe exatamente o mesmo número de ocorrências desse mesmo ângulo em colisões anti-maxwellianas. Essa propriedade pode, por

indução matemática, ser provada para todas as distribuições de energia cinética pré-colisionais de forma maxwelliana, em sistemas com grande número de moléculas;

- c. A ocorrência da distribuição padrão, juntamente com a dada distribuição de energias cinéticas pré-colisionais, impõe restrições sobre a evolução dos sistemas isolados, que nos permitem explicar sua evolução irreversível para o equilíbrio.

Como a última consequência é aquela que estivemos procurando, lhe demandaremos especial atenção. O raciocínio básico é o seguinte: supondo-se uma distribuição de energias cinéticas pré-colisionais do tipo "DCDC", mais a ocorrência da distribuição padrão de ângulos colisionais V , então existirão necessariamente, no intervalo temporal seguinte, mais moléculas passando das faixas ou valores de energia cinética altas e baixas, para as médias. Devido às propriedades a e b acima, essa alteração da distribuição de energias cinéticas ocorrerá progressivamente, ao longo dos intervalos temporais seguintes, até que seja obtida uma distribuição maxwelliana, que será estável. Um exemplo poderá ilustrar o tipo de restrição a que nos referimos. Tomando $x=5$, e $D:(EC_{1e} = 30$ moléculas, $EC_{2e} = 25$ moléculas, $EC_{3e} = 20$ moléculas, $EC_{4e} = 25$

moléculas e $EC_{5e}=30$ moléculas), e passando por exame apenas as colisões dos tipos C_{15}^{33} e C_{33}^{15} , observamos que o ângulo colisional

V , de ambos os tipos de colisões, é igual; pela hipótese da distribuição padrão, sabemos que esse ângulo ocorrerá em determinada quantidade, e, como a distribuição pré-colisional não é maxwelliana, então, dentre as ocorrências desse ângulo, o número de colisões maxwellianas (no caso, C_{15}^{33}) será maior que

o de suas inversas anti-maxwellianas (C_{33}^{15}), porque na

distribuição pré-colisional dada existem mais moléculas com velocidades $1e$ ou $5e$, que com velocidade $3e$. Logo, como existirão mais colisões com tal ângulo, e $EC_{pré\ 1e\ e\ 5e}$, que colisões com o mesmo ângulo, e $EC_{pré\ 3e\ e\ 3e}$, então o número de moléculas que passarão de $1e$ e $5e$ para $3e$ será maior que o número de moléculas que passarão de $3e$ para $1e$ e $5e$.

Notamos então que, com os pequenos acréscimos que lhe fizemos, e no contexto de nossa particular interpretação, o "Teorema-H" de Boltzmann aparentemente tem condições de oferecer uma explicação intuitiva do processo de aproximação irreversível ao equilíbrio. Resta-nos examinar com maior rigor as suposições extramecânicas sobre as quais a explicação repousa, e, a partir daí, reavaliar se tal explicação ainda se revelaria contendo

elementos probabilísticos inelimináveis, ou se poderia ensejar uma verdadeira explicação determinista da irreversibilidade estrita.

3 - O DEBATE HISTÓRICO SOBRE O PRINCÍPIO EXTRAMECÂNICO

3.1. As Suposições Feitas Pelos Pioneiros da Teoria Cinética

Em 1858, Buys-Ballot argumentou contra Clausius²⁸ que, se as moléculas de um gás se movem a centenas de metros por segundo, a teoria cinética deveria prever que os gases se misturassem, ou se dispersassem, em velocidades superiores às observadas. Clausius respondeu que, nos gases reais, as moléculas não atravessam grandes distâncias em linha reta: há uma "esfera de ação" de uma molécula, na qual as forças de atração e repulsão são balanceadas. Fez então uma estimativa da distância, em relação à média, em que uma molécula pode se mover sem que o seu centro de gravidade atravessasse a esfera de ação de outra molécula. Para tal, introduziu uma suposição probabilística: dividiu o espaço ocupado pelo gás em camadas perpendiculares à direção de movimento de uma molécula, e

(28) vide BRUSH, 1976a, p. 178ss.

estimou a probabilidade de ela passar por uma camada de certa espessura, sem atravessar a esfera de ação de outra molécula. Encontrando uma expressão matemática para aquela probabilidade, deduziu a distância média atravessada por uma molécula, entre duas colisões²⁹. Segundo os Ehrenfests, Clausius baseou seus calculos em três suposições:

1. a distribuição espacial das moléculas é uniforme em todo o recipiente;
2. a distribuição de velocidade das moléculas é a mesma em todas as partes do recipiente;
3. em uma amostra suficientemente grande do volume, todas as direções de velocidade são encontradas com a mesma frequência³⁰.

A primeira prova da lei de distribuição das velocidades, apresentada por Maxwell em 1860, baseou-se na suposição de que os componentes de velocidade de uma molécula, em direções ortogonais, poderiam ser tratados como variáveis aleatórias. Conseqüentemente, as direções de movimento das moléculas seriam equiprováveis, e a distribuição de probabilidade, para cada componente de velocidade, seria

(29) ver BRUSH, 1976a, p. 179-180

(30) EHRENFESTS, 1959, p. 05.

independente dos valores dos demais componentes³¹. Porém, sofrendo a objeção da comunidade dos físicos, para a qual um determinismo de tipo laplaciano não permitia a aceitação de uma real aleatoriedade do movimento molecular, em 1866 Maxwell veio a alterar sua teoria. Ao invés de supor que os componentes de velocidade de uma molécula seriam estatisticamente independentes entre si, veio a supor apenas que as velocidades de duas moléculas que colidem sejam independentes³². No comentário de Brush, "Maxwell não explica porque tal suposição ... é mais aceitável que sua suposição prévia da independência dos diferentes componentes de velocidade de uma mesma molécula. Há uma importante diferença, que se torna clara apenas no trabalho posterior de Boltzmann: a segunda suposição de Maxwell torna possível a descrição de uma evolução temporal irreversível da função de distribuição de velocidade"³³. Existe ainda outra diferença, não notada por Brush: a nova suposição preserva o determinismo no nível das trajetórias individuais, relegando a independência estatística ao nível da interação entre as moléculas.

A partir de 1866 Maxwell passou a atribuir o uso de métodos probabilísticos na Teoria Cinética à ignorância dos

(31) BRUSH, 1976a, pags. 342 e 587.

(32) BRUSH, 1976, p. 345.

(33) BRUSH, 1976a, p. 588.

valores precisos das partículas, vindo então a formular sua famosa crítica à irreversibilidade estrita expressa pela 2ª Lei, através da hipótese da operação de um ser onisciente (o "Demônio de Maxwell", como Thomson o nomeou), que seria capaz de separar as moléculas de maior velocidade das de menor velocidade, causando uma diminuição de entropia. Conclui ele - antecipando a conclusão que Boltzmann iria divulgar alguns anos depois - que a 2ª Lei teria validade apenas em termos estatísticos³⁴. Em um sistema com pequeno número de moléculas (não se trata aqui evidentemente de um sistema termodinâmico) haveria uma probabilidade razoável de diminuição espontânea da entropia³⁵. A partir de 1873, como nota Brush³⁶, Maxwell retornou à sua posição inicial, atacando o determinismo de um ponto de vista pragmático, pois não conseguira eliminar toda suposição de aleatoriedade, em seu trabalho na Teoria Cinética.

3.2. O Debate na Revista Nature

Em 1890, E. Culverwell publicou um artigo sobre o trabalho de Boltzmann na Teoria Cinética, despertando o interesse dos membros da British Association for the Advancement

(34) Cf. BRUSH, 1976a, p. 589.

(35) KLEIN, 1973, p. 75-76.

(36) BRUSH, 1976, p. 591-592.

of Science. Ele apresentou uma nova objeção ao "Teorema-H", semelhante à de Loschmidt: dada a reversibilidade das equações mecânicas, para cada micro-estado que tende para a aproximação ao equilíbrio, existe um outro micro-estado que tende para o afastamento do equilíbrio; seria então impossível provar, em termos exclusivamente mecânicos, que $\frac{dH}{dt}$ seria negativa para

todas as configurações iniciais³⁷. Em 1894, Culverwell publicou um outro artigo, questionando como, e em que parte da prova do "Teorema-H", foi introduzida a irreversibilidade inexistente nas leis da mecânica, o que ocasionou uma série de debates com S. Burbury, H. Watson, G. Bryan, S. Larmor e o próprio Boltzmann³⁸.

Culverwell, em seu artigo de outubro de 1894, criticava a prova do "Teorema-H" oferecida por H. Watson, por pretender ser "puramente dinâmica", o que seria impossível, tomando-se por base a sua própria objeção³⁹. Estava lançado o desafio de se mostrar precisamente qual seria o elemento extra-mecânico responsável pela irreversibilidade no "Teorema-H". Em novembro do mesmo ano, Burbury argumentou que a prova do "Teorema-H" dependia do que chamou de **Condição A**, a saber que

(37) BRUSH, 1976a, p. 617.

(38) BRUSH, 1976a, p. 618.

(39) CULVERWELL, 1894, p. 617.

"se as coordenadas colisionais forem tomadas ao acaso, então... para qualquer dada direção de R [velocidade relativa das moléculas - APJ] antes de uma colisão, todas as direções após a colisão são igualmente prováveis"⁴⁰. Sua resposta a Culverwell foi então que a irreversibilidade seria consequência da aplicação da Condição A no movimento direto, e sua não aplicação ao movimento reverso.

Segundo Dias⁴¹ a Condição A tinha estreita familiaridade com a condição formulada por Maxwell em 1860, denominada Proposição II. Contudo, existe uma pequena diferença: enquanto Maxwell em 1860 propunha a aleatoriedade dos componentes de velocidade de uma mesma molécula, a Condição A de Burbury se refere apenas à aleatoriedade das coordenadas colisionais (ou seja, do ângulo V , em nossa notação anterior)⁴². Portanto, observamos que a Condição A de Burbury, assim como a condição reformulada de Maxwell de 1866, admitem que o estado pré-colisional das moléculas seja classicamente determinado, ou, nas palavras de Dias, a Condição A "não é incompatível com a

(40) BURBURY, 1894, p. 78. Ver também 1895, p. 320.

(41) DIAS, s/d, p. 4.

(42) embora Boltzmann fizesse uso, em 1872, do espaço de fase de uma molécula, não encontramos sentido na interpretação literal de que a aleatoriedade de distribuição dos ângulos colisionais implicaria na independência dos componentes de uma mesma molécula. Além do mais, em 1872 ele já admitia que as probabilidades se referissem tanto "aos vários estados que uma molécula terá durante um tempo muito longo" quanto aos vários estados que "moléculas diferentes possuirão ao mesmo tempo" (BOLTZMANN, 1872, p. 90).

mecânica das colisões, expressando possíveis simetrias, as quais têm a ver com independentes graus de liberdade"⁴³.

O "Stosszahlansatz" de Boltzmann, entendido como a proposição de independência estatística entre as direções de velocidade das moléculas que colidem, apresentaria uma pequena, porém importante, diferença conceitual, frente à "Condição A" de Burbury, (a qual veio a tomar o seu lugar, no contexto da discussão com os críticos ingleses). A diferença consiste em que o "Ansatz" foi entendido por Boltzmann como uma hipótese estatística, que veio a conduzir à abordagem probabilística; já a "Condição A" foi definida sob um pano de fundo mecanístico, onde o uso do termo "ao acaso" ("random") constitui apenas uma "façon de parler"⁴⁴. A tomada de coordenadas colisionais "ao acaso" produziria uma distribuição de ângulos colisionais equivalente à que chamamos anteriormente de "distribuição padrão", e a obtenção dessa distribuição seria consequência determinista de um estado de coisas anterior. Por outro lado, apesar da diferença acima apontada, ao longo da discussão na revista Nature Burbury teria eventualmente ampliado o significado de sua Condição A, a aproximando da formulação

(43) DIAS, s/d, p. 12

(44) a semântica da expressão "tomar ao acaso" se reporta às ações humanas, mas sabemos que para Burbury os estados pré-colisionais não são artificialmente preparados.

estatística do "Ansatz"⁴⁵.

Em 1894, Planck editou uma obra póstuma de Kirchhoff, na qual Boltzmann encontrou a suposição, que julgou injustificada e implausível, de que, na evolução para o equilíbrio, a probabilidade das colisões inversas (entre moléculas que já colidiram entre si) seria calculada da mesma maneira que a das colisões diretas (a saber, via produto das funções de distribuição das moléculas, o que supõe a independência estatística das direções de velocidade das mesmas)⁴⁶. Boltzmann entendeu que, embora fosse legítimo tomar como estatisticamente independentes as direções de moléculas que ainda não colidiram entre si, não se poderia fazer o mesmo para moléculas que recentemente colidiram⁴⁷.

A resposta de Planck a Boltzmann foi que, embora não se possa, em geral, considerar as velocidades das moléculas, nas colisões inversas, como independentes, na descrição de um sistema no equilíbrio - como era o caso estudado por Kirchhoff - poder-se-ia computar a probabilidade das colisões inversas da

(45) para uma análise minuciosa, ver DIAS, s/d, p. 9-14.

(46) KUHN, 1978, p. 62.

(47) as últimas teriam se tornado estatisticamente correlacionadas, isto é, a informação sobre o estado de uma poderia diminuir a incerteza sobre o estado de outra. Tal noção de "correlação" parece ser problemática, pois envolve a interação com um observador, mas seu uso se revela inevitável, em uma descrição puramente probabilística.

mesma forma que as diretas, porque ali as colisões não afetariam a distribuição de velocidades⁴⁸. Porém, na derivação do "Teorema-H", o próprio Boltzmann tinha usado o produto das funções de distribuição para calcular o número de colisões diretas e inversas. A crítica feita por Boltzmann contra Kirchhoff voltava-se contra si mesmo: a correlação produzida entre duas moléculas por uma colisão anterior impediria a aplicação do princípio às colisões seguintes⁴⁹.

Observações equivalentes foram feitas à mesma época, por Burbury e Bryan, em sua discussão crítica do "Teorema-H". Bryan argumentou que, no hipotético movimento reverso proposto por Loschmidt, "se fossemos reverter com exatidão o movimento, deveríamos ter uma situação na qual as probabilidades para duas moléculas antes de um encontro não seriam independentes... as probabilidades para duas moléculas não são independentes uma da outra após uma colisão entre elas"⁵⁰. Burbury também notou, em maio de 1895, que se, em um sistema real, as moléculas e as forças que atuam nelas têm uma dimensão finita, a satisfação da Condição A ao longo de toda a evolução temporal do sistema não poderia ser "tomada como um

(48) Cf. KUHN, 1978, p. 62.

(49) Cf. KUHN, 1978, p. 63.

(50) BRYAN, 1894, p. 176 e 1895, p. 29-30.

axioma⁵¹". Segundo T. Kuhn, foi a partir do enfrentamento deste problema que Boltzmann veio a elaborar o princípio de Desordem Molecular, como uma reformulação do "Stosszahlansatz".

4.3.3. A "Desordem Molecular" de Boltzmann

Nas *Leituras Sobre a Teoria dos Gases*, de 1896, encontramos um Boltzmann amadurecido pelos debates com críticos e comentadores, que já adotara a visão probabilística da irreversibilidade, mas ainda se preocupava com a elucidação de sua abordagem original. Empenhando-se no terreno conceitual, ele definiu ordem molar, ordem molecular, desordem molar e desordem molecular⁵². Se, em um gás, "as variáveis determinantes do movimento das moléculas" possuírem "diferentes valores médios" em diferentes regiões do recipiente (como, por exemplo, diferentes valores de densidade), então o gás seria molarmente ordenado. Se existirem regularidades no nível de grupos de duas ou mais moléculas, como "cada molécula se movendo em direção de sua vizinha mais próxima" ou "cada molécula, cuja velocidade

(51) BURBURY, 1895b, p. 104-105. Notamos aqui que, enquanto Bryan argumentou a partir da visão estatístico-probabilística de Boltzmann, Burbury, que se baseara em uma visão mecanicista ao formular sua Condição A, deveria ter reparado tal diferença, e, conseqüentemente, se esquivado da discussão a respeito da produção de "correlações" estatísticas, a menos que essas fossem definíveis no seu modelo geométrico-mecânico.

(52) Cf. BOLTZMANN, 1896a, p. 40ss.

está entre certos limites, possuindo dez moléculas mais lentas como suas vizinhas mais próximas", então o gás seria molecularmente ordenado. Quando existirem agrupamentos "especiais", como os acima, porém não limitados a determinadas regiões no recipiente, e "encontrados, na média, com igual frequência através de todo o recipiente", então o gás seria molarmente desordenado. Ele então definiu de forma pouco clara, a desordem molecular, através de três recursos. Primeiramente, ele opôs esse conceito aos de ordem molecular e desordem molar (e não apenas ao de ordem molecular, como seria de se esperar). Ele afirmou que, havendo desordem molar junto com a ordem molecular, a presença de uma molécula, na região onde irá colidir com uma segunda molécula, "não pode, portanto, ser considerada no cálculo de probabilidades como um evento independente" da presença da segunda molécula. Em segundo lugar, ele disse que o significado de uma distribuição molecularmente desordenada é definido "pela validade da equação" que dá o número de colisões por unidade de volume. Em seguida, ele acrescentou que, em um gás pouco denso, rapidamente "moléculas completamente diferentes... serão vizinhas próximas umas das outras", e, conseqüentemente, uma distribuição molecularmente ordenada e molarmente desordenada "será, com grande probabilidade, transformada em uma molecularmente desordenada em um curto tempo", pois "podemos considerar a ocorrência de uma nova molécula, no lugar onde ela colide pela

segunda vez, como sendo um evento completamente independente... do lugar de onde a primeira molécula veio (e, de modo similar, do estado de movimento da primeira molécula)"⁵³.

Para Boltzmann, a Desordem Molecular era simultaneamente factual e probabilística. Nas Leituras, ele afirmava que "o teorema... que estabelece que H decresce através de colisões, diz simplesmente que através das colisões a distribuição de velocidades das moléculas de gás se torna mais e mais próxima da mais provável, desde que o estado seja molecularmente desordenado, e então o cálculo de probabilidades seja introduzido"⁵⁴. O Princípio de Desordem Molecular era então responsabilizado por 2 coisas distintas: a) aproximação da distribuição mais provável; b) introdução do cálculo de probabilidades.

O papel atribuído à Desordem Molecular na aproximação ao equilíbrio foi largamente inspirado na Condição A de Burbury, e no papel que Burbury atribuiu a essa Condição. Na carta dirigida à revista *Nature*, publicada em julho de 1895, Boltzmann incorporava em sua maior parte a esclarecedora explicação oferecida por Burbury, discordando apenas de dois pontos: a não aplicação da condição aos intervalos temporais

(53) vide BOLTZMANN, 1896a, p. 41

(54) BOLTZMANN, 1896a, p. 58

subseqüentes ao estado inicial, e a sua dependência frente a perturbações externas. Relativamente a esses dois pontos, ele ofereceu um argumento de natureza factual, que nos permite afirmar que seu conceito de Desordem Molecular seria uma generalização da Condição A de Burbury. O argumento era que se "o caminho médio de uma molécula for bastante longo em comparação com a distância média de duas moléculas vizinhas, então... a distribuição de moléculas, ao redor do lugar do segundo impacto, será independente das condições na vizinhança do local onde o primeiro impacto ocorreu, e, portanto, independente do próprio movimento da molécula"⁵⁵. Desde que o sistema considerado seja "bastante grande", e que "o caminho médio seja maior, em comparação com a distância média entre duas moléculas vizinhas", então ocorreria a independência entre as velocidades pré-colisionais das moléculas, durante toda a evolução do sistema, e sem a necessidade de perturbações externas.

O significado da Desordem Molecular em Boltzmann é dúbio porque, ao mesmo tempo em que esse Princípio podia ser considerado como uma generalização da Condição A de Burbury, para Boltzmann ele também significava a introdução do cálculo de probabilidade na descrição (e explicação) da evolução para o

(55) BOLTZMANN, 1895, p. 221.

equilíbrio. Tratando especificamente do tema "Aplicação do Cálculo de Probabilidades na Física Molecular", ele observou, nas Leituras, que "a aplicação do cálculo de probabilidades ao movimento molecular em gases não pode, naturalmente, ser rigorosamente deduzido das equações diferenciais de movimento das moléculas. Ela se segue, antes, do grande número de moléculas do gás, e do comprimento de seus cursos, em virtude do qual as propriedades da posição no gás, onde uma molécula sofre uma colisão, são completamente independentes do lugar onde ela colidiu previamente"⁵⁶. Ora, então uma das razões para a adoção da Desordem Molecular seria exatamente a mesma da adoção do cálculo de probabilidades. Será que Boltzmann foi, neste ponto, vítima de uma confusão conceitual?

Parece-nos que não. Existe algo em comum entre a adoção da Desordem Molecular e a adoção da descrição probabilística - ambas violam os requerimentos de uma descrição estritamente causal dos movimentos moleculares. Ao supor que as velocidades pré-colisionais sejam sempre independentes entre si, há a exclusão da possibilidade de que o conjunto de ângulos colisionais, em um intervalo temporal dado, seja determinado pelo conjunto de ângulos colisionais do intervalo anterior, o que abre caminho para a suposição probabilística de que o conjunto de ângulos mais prováveis quase sempre ocorra.

(56) BOLTZMANN, 1986, p. 448.

Analisando a solução dada por Boltzmann para o uso da independência estatística nas Leituras, Kuhn entendeu que "duas moléculas, saindo de uma colisão, estão contidas nos elementos infinitesimais dw' e dw_i' do espaço de velocidade. Suas coordenadas estão então correlacionadas, mas as das outras moléculas na mesma célula não o estão necessariamente. Se, além disso, o número das outras moléculas é grande, o efeito da correlação, devida ao primeiro par, será desprezível"⁵⁷. Em sua interpretação, a Desordem Molecular não deveria ser entendida como um princípio de aleatoriedade, mas como um requerimento factual de que as conjunções entre ordem molecular e desordem molar, quando obtidas, fossem logo destruídas, dando lugar a agrupamentos molecularmente desordenados⁵⁸. Infelizmente ele não expôs idéias a respeito de como se daria a eliminação daqueles estados.

Portanto, a Desordem Molecular de Boltzmann pode ser interpretada de três maneiras diferentes:

- a) como um princípio forte de aleatoriedade, à maneira das suposições de Maxwell de 1860, o que entraria em choque com o modelo determinista clássico;

(57) KUHN, 1978, p. 63. Observamos que Kuhn usa acriticamente a noção de "correlação".

(58) vide KUHN, 1978, p. 67: "a desordem molecular é uma hipótese física a ser testada por meio de experimentos".

- b) como mera independência estatística entre as velocidades pré-colisionais das moléculas, justificada pelas características dos sistemas aos quais se aplicaria. Embora tal justificação seja de caráter factual, a idéia de independência estatística é essencialmente não-causal (o conjunto de ângulos colisionais em um intervalo de tempo não determina com exatidão o conjunto de ângulos do intervalo seguinte), e conduz à abordagem probabilística (como bem notou Boltzmann);
- c) como a ocorrência de certo tipo de arranjos de posição e direção de velocidades das moléculas, que produzem a distribuição de ângulos colisionais necessária para a validade do "Teorema-H". Essa concepção não conflita com o modelo mecânico, e permite o entendimento do "Teorema" como um teoria determinista. Embora se afine com a inspiração mecanicista de Burbury, só veio a ser formulada em 1912, pelos Ehrenfests, sob o nome de "Princípio do Caos Molecular", que deveria substituir a "Desordem Molecular" proposta por Boltzmann.

3.4. A Reformulação do "Teorema" pelos Ehrenfests e o Princípio de "Caos Molecular".

Na abordagem probabilística, Boltzmann utilizou

uma forma de descrição fina do sistema, o espaço- \mathcal{T} , de $2rN$ dimensões⁵⁹, no qual foram representados os micro-estados. Utilizando esse instrumento de representação, assim como outras contribuições de Boltzmann pós-1872, os Ehrenfests propuseram em 1912 uma reconstrução "mecânico-estatística" do "Teorema-H", na qual formularam o princípio de "caos molecular". Nessa versão, as probabilidades são consideradas como puramente epistêmicas, e os sistemas individuais como regidos pelo determinismo mecânico.

O espaço- \mathcal{M} , utilizado para representar a distribuição de velocidades, é dividido em células pequenas i , que contêm um número a_i de moléculas. Uma distribuição de estados Z é representada por um conjunto de números a_i , expressando a distribuição das moléculas nas células, em determinado momento⁶⁰. A cada distribuição Z corresponde um "continuum" de pontos no espaço- \mathcal{T} , chamado de "Z-estrela". O valor $H(Z) = -\sum a_i \log a_i$ foi então tomado como uma medida da distância da distribuição Z frente ao equilíbrio, no espaço- \mathcal{M} . A evolução de $H(Z)$ no tempo forma a curva- H , que corresponde a um feixe de curvas no espaço- \mathcal{T} . Os Ehrenfests então definiram a curva de concentração como a média das trajetórias que compõem o feixe de curvas acima, e identificaram o comportamento

(59) onde r =graus de liberdade das moléculas, e N =número de moléculas. Vide EHRENFESTS, 1912, p. 17ss.

(60) vide EHRENFESTS, 1959, p. 27.

dessa curva de concentração com o comportamento dos sistemas termodinâmicos segundo o "Teorema-H" de 1872: "a curva de concentração do feixe decresce monotonamente, do alto valor inicial $H(Z_a)$, converge para o mínimo H_0 , e nunca se afasta novamente deste"⁶¹.

Dada a simetria temporal das trajetórias que compõem a curva de concentração, qual a razão pela qual a curva como um todo teria um comportamento temporalmente assimétrico? Analisando as idéias de Boltzmann sobre o princípio extramecânico utilizado na derivação do "Teorema", os Ehrenfests encontraram as suposições (formuladas na linguagem probabilística) de que o "Stosszahlansatz" daria, para cada intervalo temporal, o número de colisões mais provável, e que o número real de colisões flutua em torno do valor mais provável⁶². Para substituir a linguagem probabilística, seria necessário recorrer a uma descrição mais fina que a dada pela função de distribuição: em suas palavras, "precisamos também conhecer quantos pares de moléculas estão prestes a realizar colisões dos vários tipos em um instante t_a ", ou seja, conhecer os "agrupamentos" das moléculas⁶³. A região do espaço de fase

(61) EHRENFESTS, 1912, p. 35.

(62) ver EHRENFESTS, 1912, p. 40.

(63) EHRENFESTS, 1912, p. 41. Essa noção de "agrupamentos" se assemelha à de "constelações moleculares", apresentada por Boltzmann nas Leituras (ver um estudo sobre as constelações moleculares em TOLMAN, 1938, p. 108-110). Os Ehrenfests a utilizam na acepção introduzida por J. Jeans.

de um sistema, correspondente à distribuição dada, a Z-estrela, contém subregiões correspondentes aos vários agrupamentos, sendo que eles chamaram aquela subregião de maior volume de "agrupamento de Jeans"⁶⁴.

Uma formulação do princípio extramecânico requerido pelo "Teorema-H" corresponderia às seguintes afirmações, que em seu conjunto constituem a "Hipótese do Caos Molecular":

- a) "quase todo o volume" da região do espaço de fase correspondente a uma dada distribuição (Z-estrela) "é ocupada pelo respectivo agrupamento de Jeans, e por agrupamentos muito próximos a ele"⁶⁵;
- b) "o agrupamento de Jeans fornece, para o intervalo temporal... subsequente, exatamente o sistema de números de colisões que satisfaz ao Stosszahlansatz"⁶⁶;
- c) em cada um dos subconjuntos da Z-estrela, os agrupamentos ocorrem com a mesma frequência relativa que na totalidade da Z-estrela⁶⁷

(64) EHRENFESTS, 1912, p. 41.

(65) EHRENFESTS, 1912, p. 41.

(66) EHRENFESTS, 1912, p. 41.

(67) EHRENFESTS, 1912, p. 42.

Como consequência da última afirmação, todas⁶⁸ as trajetórias possíveis do sistema no espaço- T , no tempo subsequente, conterão sistemas de colisões apropriados aos resultados descritos pelo "Teorema".

Os Ehrenfests lembram uma possível divergência da Hipótese de Caos Molecular com a posição de Burbury, para quem sua Condição A só teria validade no estado inicial. Mas, do modo como o "Caos Molecular" está definido, ele abrange toda a evolução do sistema. Como a preocupação de Burbury era com que as colisões ocorridas influenciassem causalmente as seguintes, anulando a suposta independência entre as velocidades pré-colisionais, devemos notar enfaticamente que, uma vez que a hipótese de Caos Molecular não se refere à independência de velocidades, nem implica em qualquer abandono da causalidade (pelo contrário, o agrupamento de Jeans predominante no microestado inicial determina as possíveis evoluções do sistema, em conformidade com o previsto pelo "Teorema"), então as objeções do tipo "impossibilidade de esquecer as correlações de velocidades" produzidas por colisões anteriores, não se aplicam

(68) os Ehrenfests se referem à "imensa maioria", mas não acreditamos que existam exceções, dado que o agrupamento de Jeans predomina em todas as fases da Z-estrela. O apelo à "imensa maioria" dos casos parece ser aqui uma herança da abordagem probabilística, assim como a expressão "quase todo o volume" (subl. APJ), da primeira afirmação acima. Para uma discussão técnica desse ponto, ver a nota dos Ehrenfests, em EHRENFESTS, 1912, p. 95-97, nota nº 173.

à hipótese de Caos Molecular dos Ehrenfests⁶⁹.

A questão, aqui pertinente, seria: porque os micro-estados iniciais são deste tipo? Tal questão nos remete a conjecturas sobre a micro-estrutura da matéria (em nível supra-quântico), ou seja, para conjecturas factuais, passíveis de teste por meio da experimentação científica (e/ou por simulações computacionais). Os Ehrenfests pensaram que tal tipo de teste seria impossível: "se essa afirmação (da mesma frequência relativa dos agrupamentos nos subconjuntos do agrupamento de Jeans-APJ) é ou não compatível com todas as afirmações anteriores só se pode apenas, aparentemente, decidir através do cálculo dos movimentos de todos os membros do conjunto... (o que é) algo praticamente impossível"⁷⁰. Contudo, desde que a condição factual seja definida de modo mais positivo que como mera condição de validade do "Teorema", torna-se possível planejar experimentos que a testem, ou então apoiá-la em outras teorias, que tenham fontes independentes de evidência.

(69) de resto, acreditamos que não se aplica a abordagens estritamente causais, porque entendemos que a noção de "correlação" seria de caráter informacional, e, em sua interpretação mais comum, seria relativa ao conhecimento do observador a respeito dos micro-estados (os estados de duas moléculas estão correlacionados se do conhecimento de um deles o observador puder obter informação sobre o da outra). Um conceito mais forte de correlação, ligado, por exemplo, à não-localidade, só é possível no contexto da teoria quântica.

(70) EHRENFESTS, 1912, p. 95, nota nº 166.

Como comentário final a nossa breve exposição da valiosa contribuição de 1912 dos Ehrenfests, sublinhamos que a hipótese de Caos Molecular efetivamente serve como base para uma explicação funcional determinista da irreversibilidade estrita, ou seja, sendo válida ela nos permite entender porque a entropia nunca diminui em quantidades utilizáveis. Decerto ela nos remete a uma tarefa ingrata, a da especificação de agrupamentos presentes nos micro-estados, o que aparenta ser inexequível na prática. Porém, ao mesmo tempo, ela aponta o caminho apropriado para a condução das investigações sobre a versão determinista do "Teorema", que podem nos conduzir a uma maneira exequível de definir os agrupamentos requeridos. Se esse caminho só recentemente foi retomado⁷¹, devemos debitá-lo à grande influência exercida pela corrente principal da tradição boltzmanianna, que privilegiou as abordagens probabilísticas e estocásticas.

A própria Tatiana Ehrenfest, em prefácio à tradução inglesa do trabalho de 1912, se referiu a "períodos de crescimento" da curva-H, onde o "Stosszahlansatz" não pode ser válido⁷², passando por cima de sua própria hipótese de caos

(71) a proposta mais clara neste sentido nos parece ser a de HOLLINGER e ZENZEN, 1983 e 1986. Trabalhos na teoria ergódica utilizam modelos de base determinista, porém não se propuseram a definir as condições factuais, em nível microscópico, responsáveis pela irreversibilidade. Resultados interessantes nesse sentido foram obtidos mais recentemente por MACKEY, 1991.

(72) em EHRENFESTS, 1912, p. x, xi.

molecular, a qual, sendo válida, implicaria na inexistência de tais "períodos de crescimento". Ora, se o princípio extramecânico adotado para a explicação da irreversibilidade restringe o universo das trajetórias mecanicamente possíveis, então seria perfeitamente compreensível que a reversibilidade de Loschmidt e a recorrência de Poincaré não viessem a ocorrer em sistemas submetidos ao princípio, e que, em correspondência, a entropia nunca diminuísse em quantidade utilizáveis.

Posto que uma explicação funcional determinista faça uso da mecânica, mais suposições factuais extramecânicas, o papel dessas suposições precisaria ser melhor desenvolvido, além do esforço dos Ehrenfests, para que se pudesse responder, adequadamente, a objeções como as de Loschmidt e Zermelo. Devemos, portanto, tentar delinear como seria uma formulação determinista do "Teorema-H", incluindo uma interpretação da função de distribuição, e das suposições extramecânicas.

4. INTERPRETAÇÃO DETERMINISTA DO "TEOREMA-H"

4.1. Alternativas de Interpretação do "Teorema"

Se o "Teorema-H" fosse uma teoria de mecânica, não poderia explicar a evolução temporal irreversível dos sistemas

termodinâmicos; ele pôde fazê-lo na medida em que operou uma restrição às trajetórias mecanicamente possíveis de um sistema isolado, as reduzindo às trajetórias compatíveis com a não diminuição da entropia em quantidades utilizáveis. A responsabilidade por tal restrição é das suposições extramecânicas que fazem parte do "Teorema": as duas condições estabelecidas explicitamente em 1872 (uniformidade da distribuição de velocidade, e equiprobabilidade das direções de velocidade) e o princípio formulado como "Condição A" por Burbury e "Desordem Molecular" por Boltzmann.

A interpretação usual da natureza dessas suposições, herdada do próprio Boltzmann, é que elas seriam essencialmente probabilísticas, podendo-se justificá-las, através de argumentos factuais, que se comprometem com uma concepção objetiva das probabilidades, ou informacionais, que, por sua vez, se comprometem com uma explicação da irreversibilidade pela ignorância; ou então considerá-las meras convenções, que nos permitem dar conta do fenômeno da irreversibilidade. Em qualquer caso, a interpretação probabilística se revela insuficiente para explicar a irreversibilidade em sua concepção estrita: se utilizarmos uma teoria com valores probabilísticos de base, não temos como impedir de modo definitivo que ela admita a ocorrência de eventos improváveis, que teriam como consequência a diminuição

de entropia em quantidades utilizáveis. Se considerarmos as suposições extramecânicas constituintes do "Teorema" como essencialmente probabilísticas, então aquele se torna - como bem o notou Boltzmann - um caminho para a abordagem probabilística, que só tem condições de explicar a irreversibilidade em sua concepção estatística.

A interpretação das suposições extramecânicas como suposições de aleatoriedade, por sua vez, implica na adoção de um modelo teórico mais abrangente que o da física clássica, no qual sejam incorporadas variáveis aleatórias. Nesse caso, um "Teorema-H" baseado na física clássica seria inconsistente, pois faria uso simultâneo do determinismo das trajetórias das moléculas, implicado pela forma das equações mecânicas, e de um elemento de aleatoriedade, que conflita com tal determinismo. O meio de se evitar a inconsistência seria a formulação do "Teorema" no bojo de uma teoria onde a aleatoriedade fosse intrínseca aos sistemas modelados, como se supõe ocorrer na Teoria Quântica. Tal reformulação constituiria uma explicação funcional estocástica da irreversibilidade, sobre a qual temos dúvidas de que seja suficiente para dar conta da irreversibilidade estrita. Embora julguemos que essa alternativa seja de grande relevância, uma análise do "Teorema-H" em nível

quântico⁷³ escapa ao escopo desse trabalho.

Para uma interpretação determinista do "Teorema", resta-nos a alternativa de reformulação das suposições extramecânicas de Boltzmann em uma linguagem não probabilística, entendendo-se, ao mesmo tempo, que o eventual uso da linguagem probabilística se deveria exclusivamente à ignorância dos arranjos microscópicos exatos, ou a uma limitada capacidade computacional. Desse modo seria possível elaborar uma explicação funcional determinista da irreversibilidade estrita, através de uma função gerada pela conjunção entre as leis mecânicas aplicadas aos movimentos das moléculas, e as suposições extramecânicas referentes aos tipos de arranjos moleculares factualmente dominantes. Os valores do domínio da função seriam seqüências de números reais⁷⁴, expressando as posições e

(73) o "Teorema-H" quântico é exposto didaticamente em trabalhos como o de TOLMAN (1938) e ter HAAR (1955).

(74) Acreditamos que, para que uma função seja considerada fisicamente determinista, não basta que seja uma função (relação unívoca), mas também é necessário que relacione estados físicos especificados com exatidão, com outros estados especificados da mesma forma. Funções que têm em seu domínio valores de probabilidade, ou valores gerados aleatoriamente, seriam, de acordo com nossa concepção, respectivamente funções probabilísticas e estocásticas. O grau de precisão com que especificamos os estados do sistema é limitado, ou "finito", como argumentam FRIGOGINE e STENGERS (1990, p. 118 ss), porém, diferentemente deles, julgamos que tal limitação se deve apenas às nossas limitações computacionais, ao passo que os estados físicos correspondem a números "infinitamente" exatos. Para uma crítica do suposto papel dos números irracionais na perda da previsibilidade em sistemas determinísticos "caóticos", ver WINNIE (1992).

velocidades das moléculas, e os valores do contra-domínio seriam seqüências de macro-estados.

Na formulação do princípio extramecânico em linguagem determinista, não se deve (nem se pode) assumir a tarefa (infindável) de enumeração exata dos agrupamentos moleculares de um determinado sistema, adequados aos resultados do "Teorema". O caminho para se especificar tais agrupamentos só pode ser através de propriedades que sejam comuns aos agrupamentos adequados, e não sejam possuídas pelos inadequados. A formulação dessas propriedades deve ser feita através de algoritmos, isentos de termos probabilísticos, que permitam uma partição exata do conjunto de agrupamentos de um dado sistema, entre o subconjunto dos adequados e o subconjunto dos inadequados. Veremos mais adiante que, além de ser necessário, para que se possa dar conta da existência das pequenas flutuações microscópicas (e.g., movimento browniano), também se torna muito mais simples especificar as seqüências de agrupamentos apropriadas ao "Teorema" (relativas aos intervalos mínimos necessários para a realização do ato de observação), do que especificar agrupamentos isoladamente.

4.2. Possibilidade de Entendimento Determinista da Distribuição de Velocidades

Entendida como sendo de natureza probabilística, a função de distribuição dos valores de posição e velocidade das moléculas nos dá a probabilidade das moléculas se encontrarem em certa faixa, ou em determinado valor discreto dessas grandezas. Entretanto, como estamos nos referindo a um domínio clássico, sabemos que, a cada instante, cada molécula, em princípio, possui posição e velocidade bem determinadas, e que um observador onisciente poderia conhecer tais valores com precisão. A única justificacão pertinente, em última análise, para o uso das probabilidades, parece ser a ignorância e a limitacão computacional, dos observadores humanos ou similares. Contudo, encontramos em Boltzmann outras justificativas para o uso da função probabilística, que não a ignorância e a limitacão computacional. Poderíamos deixar de lado tais idéias, em nossa reinterpretacão de seu "Teorema"?

Uma discussão das probabilidades em Boltzmann, implica em uma análise de seus diferentes usos dessa noção. Com base na análise feita por Klein⁷⁵, devemos distinguir três

(75) ver KLEIN, 1973, p. 83-88.

concepções: a) a estatística de uma molécula: "qual a probabilidade que uma molécula tenha tal e tal propriedades, com a resposta determinada pela função de distribuição molecular F "⁷⁶; b) a estatística do gás: "qual a probabilidade que o gás esteja em estado caracterizado por uma certa distribuição, (com a) resposta determinada pela medida de permutabilidade F "⁷⁷; c) a estatística do ensemble temporal: "a probabilidade de uma distribuição como sendo a fração de um intervalo temporal qualquer, suficientemente longo, durante a qual se espera encontrar o gás descrito por essa distribuição"⁷⁸.

Embora nossa crítica da explicação probabilística da irreversibilidade tenha se referido, no capítulo anterior, às concepções b e c acima, em nossa interpretação do "Teorema-H" estamos envolvidos apenas com a concepção a, pois as outras só se manifestaram de modo decisivo, no trabalho de Boltzmann, a partir de seu artigo de 1877. Uma discussão da primeira alternativa por si já se revela bastante complexa, pois existiriam ao menos 5 justificativas, não epistêmicas, do uso das probabilidades, aludidas implícita ou explicitamente por Boltzmann, relacionadas à sua interpretação do "Teorema-H":

(76) KLEIN, 1973, p. 83-84.

(77) KLEIN, 1973, p. 84.

(78) KLEIN, 1972, p.88

- a) o uso das probabilidades como meio de dar conta da alteração da função de força;
- b) o uso das probabilidades como condição necessária para se obter uma definição molecular genérica da entropia;
- c) aleatoriedade do movimento molecular individual, e obediência dos sistemas de muitos corpos às "leis probabilísticas";
- d) o uso das probabilidades como meio de permitir a medida de permutabilidade dos macro-estados;
- e) o uso das probabilidades como meio de escapar às conclusões anti-termodinâmicas de teoremas mecânicos, como o Teorema da Recorrência.

As duas primeiras justificativas foram feitas, de acordo com o estudo histórico realizado por Daub⁷⁹, por ocasião das primeiras tentativas de "redução" da 2ª Lei à mecânica molecular, por Boltzmann, em 1866 e 1871. Um dos problemas iniciais desse projeto, identificado em 1866 por Clausius, em comentário ao trabalho de Boltzmann, era que, nas palavras de Daub, "as adições de calor sempre envolvem mudanças de pressão e volume, ou seja, mudanças no tamanho e posição das forças

(79) DAUB, 1969.

externas"⁸⁰. Esse problema, que implicava em uma mudança "instantânea" na função de força, teria sido posteriormente resolvido por Boltzmann "em termos de variações nas probabilidades de posição das partículas"⁸¹. Contudo, ainda segundo Daub, embora a introdução das probabilidades tenha servido para resolver tal problema, a motivação de Boltzmann ao adotá-las teria sido a de "resolver um outro problema na redução mecânica - a severa restrição às trajetórias periódicas fechadas... Boltzmann percebeu que sempre poderiam existir casos especiais de posições iniciais e finais para as quais a entropia não poderia ser um perfeito diferencial (uma função de parâmetros gerais), e portanto optou, em 1871, por levar em conta a probabilidade das posições, ao invés de posições particulares"⁸².

Um juízo abalizado a respeito das duas fontes de problemas que, segundo Daub, conduziram Boltzmann à introdução das probabilidades no modelo mecânico molecular, nos exigiriam um estudo do seu trabalho anterior a 1872, que não temos condições de realizar nesse momento. Gostaríamos, entretanto, de anotar que, em ambos os casos, as probabilidades não constituíam a única forma possível de resolução daqueles

(80) DAUB, 1969, p. 322.

(81) DAUB, 1969, p. 323-324.

(82) DAUB, 1969, p. 324

problemas, e que sua adoção foi uma escolha de Boltzmann, que tornou possível seu trabalho subsequente, dentro das limitações teóricas e computacionais da prática científica da segunda metade do século XIX. Uma outra alternativa, para resolver o problema da alteração da função de força, seria, obviamente, descrever sua variação por meio de uma nova função, de caráter determinista. Quanto ao problema da generalidade do conceito de entropia, devemos lembrar que o significado da entropia termodinâmica depende essencialmente da referência a um nível descritivo "de grão grosso" (i.é., referência a "macro-estados"), e não propriamente de uma descrição de tipo probabilístico⁸³. O que observamos, historicamente, é que a teoria probabilística de Boltzmann conduziu à tentativa de revisão do conceito termodinâmico de entropia, e não propriamente à sua redução. A introdução das probabilidades não foi suficiente para eliminar os "casos especiais" a que se referiu Daub: para uma certa classe de estados iniciais, a entropia probabilística diminui, contrariando o significado original da 2ª Lei.

Na parte inicial do trabalho de Boltzmann publicado em 1872, encontramos uma intrigante justificativa do

(83) no capítulo anterior, já identificamos como falacioso o argumento de que as probabilidades seriam a única forma possível de ligação entre a dinâmica dos micro-estados e a (termo) dinâmica dos macro-estados.

uso da descrição probabilística. Ele começou por sugerir que o movimento individual das moléculas seria aleatório, e veio a sustentar que os sistemas com muitos componentes seriam regidos por "leis do cálculo de probabilidades"⁸⁴. Em seguida formulou um raciocínio que nos afigura como sendo enigmático: que, devido à existência de um comportamento global do sistema, consoante com as leis probabilísticas (i.é, com médias do comportamento do grande número de componentes - aquilo que atualmente chamamos de "lei dos grandes números"), então "não parece ser improvável que essas probabilidades possam ser obtidas das equações mecânicas sozinhas, sem que seja preciso integrá-las"⁸⁵. Esse trecho evidencia que as probabilidades tiveram para Boltzmann um papel heurístico crucial, na formulação do "Teorema-H"; porém, isso não constitui uma justificativa de seu uso, e de sua suposta familiaridade com as equações da mecânica. Se formos

(84) "moléculas individuais estão sempre alterando seu estado de movimento"; "o fato de que, contudo, observamos leis de comportamento completamente definidas nos corpos térmicos, se deve à circunstância de que os eventos mais aleatórios (sublinhado por APJ), quando ocorrem nas mesmas proporções, dão o mesmo valor médio", (Boltzmann, 1872, p. 89-90).

(85) BOLTZMANN, 1872, p. 90-91. Para uma melhor explicitação dessa idéia, ver BOLTZMANN, 1876a, p. 449. O exemplo da orquestra, aqui apresentado, é péssimo, pois os músicos não extraem aleatoriamente os sons de seus instrumentos, e, se o fizerem, dificilmente o conjunto soará harmoniosamente. Uma justificação mais razoável do método da Mecânica Estatística foi dado por TOLMAN (1938, p. 63-65). Tal método seria "realmente", ou "essencialmente" estatístico, e seus resultados verdadeiros "na média", para sistemas "de um ensemble apropriadamente escolhido". Nesse contexto (gibbsiano), as probabilidades são "consideradas subjetivas, e só se aplicam a ensembles, cujos componentes (sistemas individuais) seriam regidos exclusivamente pelas leis mecânicas". Sobre o aspecto "subjetivo" na abordagem de Gibbs, ver, p. ex. DENBIGH e DENBIGH, 1985, p. 53ss.

partir do pressuposto de que as trajetórias individuais não são deterministas, e que as regularidades só advêm das médias em sistemas de muitos componentes, então não estaremos usando um modelo realmente mecânico, e as equações mecânicas só dariam valores médios; nessa interpretação, seria legítimo considerar Boltzmann um precursor filosófico de certas interpretações da teoria quântica. Mas, antes de tirar qualquer conclusão desse tipo, precisamos comparar o que ele sugere, no início de seu trabalho, com o que ele realmente fez, na derivação e demonstração do "Teorema". Ora, ele só se afastou da linguagem e dos métodos clássicos da mecânica em dois momentos: na formulação das duas condições (uniformidade de distribuição e equiprobabilidade das direções de velocidade), e no uso da independência entre as velocidades no cálculo do número de colisões.

O fato de a função de distribuição utilizada ser uma função probabilística pouco influenciou a construção e demonstração do "Teorema", dado que as distribuições poderiam ser entendidas como conjuntos de frações - o que foi admitido por ele próprio⁸⁶ - com a realista condição de que as unidades de volume não fossem muito pequenas. Por outro lado, a adoção da descrição "de grão grosso" (em faixas de velocidade ou

(86) ver BOLTZMANN, 1896a, p. 61.

valores discretos), que é necessária para a conceituação da entropia termodinâmica, não implica, como já argumentamos anteriormente, em um uso essencial das probabilidades⁸⁷. Conseqüentemente, se as suposições extramecânicas necessárias ao "Teorema" puderem ser reformuladas de forma não probabilística, deixariam de existir razões para considerá-lo como sendo uma teoria probabilística.

A justificativa do uso da função de distribuição probabilística, como condição necessária para a medida da permutabilidade de macro-estados, era um tema considerado por Boltzmann, com justiça, como merecedor de "complicadas digressões e explicações"⁸⁸. Na verdade, se tratava de uma justificação circular do uso da função probabilística, que se baseava na suposta necessidade de oferecer uma explicação probabilística da evolução da entropia. No momento em que refletiu sobre a condição acima, Boltzmann estava tão imbuído da visão probabilística, que considerou o conceito de probabilidade como mais fundamental que o conceito aritmético de fração: para ele, falar do número de moléculas por unidade de volume (com uma

(87) a afirmação converso, de que o uso das probabilidades implica em uma descrição não-exata, é verdadeira, pois ao se definir o limite da frequência se faz referência a uma classe de eventos possíveis, não se determinando com exatidão qual evento ocorrerá em qual locação espaço-temporal.

(88) BOLTZMANN, 1896a, p. 61. As probabilidades não poderiam ser substituídas por frações porque "não se pode falar de um número de permutações de uma fração".

velocidade no interior de uma determinada faixa) como sendo uma fração, seria "simplesmente representar probabilidades"⁸⁹, ou seja, ele julgava que aquele número seria primitivamente uma probabilidade. Acreditamos, contrariamente, que as velocidades das moléculas não seriam probabilidades, e que o uso destas constitui, aqui, mero artifício representacional.

Finalmente o argumento, segundo o qual o uso da descrição probabilística seria necessário para acomodar as conseqüências anti-termodinâmicas de alguns teoremas mecânicos⁹⁰ é falacioso, pois existem outros meios de limitar o domínio de aplicação desses teoremas (como restrição às condições iniciais ou de contorno e/ou princípios extramecânicos formulados de modo não-probabilístico); além disso, tais conseqüências anti-termodinâmicas (como recorrência de estados, com correspondente diminuição da entropia em quantidade utilizável) não deveriam ser acomodadas, e sim evitadas, se se quisesse efetivamente oferecer uma explicação da 2ª Lei original.

(89) BOLTZMANN, 1896a, p. 61.

(90) ver Boltzmann, 1896a, p. 443, com respeito ao Teorema de Recorrência: "o fato de que um sistema fechado com um número finito de moléculas... após um tempo inconcebivelmente longo, finalmente tenha que novamente retornar ao estado ordenado, é portanto não uma refutação mas, ao contrário, uma expressiva confirmação de nossa teoria (probabilística-APJ)"

Como conclusão de nossas reflexões sobre o uso da função de distribuição probabilística por Boltzmann, em 1872, defendemos que tal uso não seria necessário, embora, do ponto de vista heurístico, a opção de Boltzmann se revelasse sobejamente justificada. Não faz sentido tentarmos provar a validade ou não de uma escolha metodológica, pois essa escolha depende, em última análise, da rede de pressuposições filosóficas do pesquisador (a qual, como sabemos, não é desconfirmada ou falseada pelos fatos científicos). Para nosso projeto de reinterpretação determinista do "Teorema-H", basta-nos argumentar que uma descrição não-probabilística da distribuição de velocidades, na construção desse "Teorema", seria possível em princípio. Examinamos portanto se as suposições extramecânicas formuladas por Boltzmann, caso sejam verdadeiramente condições necessárias e/ou suficientes para a validade do "Teorema-H", poderiam ser reformuladas em linguagem determinista.

4.3. Possibilidade de Entendimento Determinista das Suposições Extramecânicas

Inicialmente analisaremos o papel desempenhado pelas duas condições, de uniformidade de distribuição das velocidades, e de equiprobabilidade das direções de

velocidade⁹¹. Pela primeira, Boltzmann obviamente não entendia que as faixas de velocidade tivessem uma mesma quantidade de moléculas, mas que "moléculas com energias cinéticas diferentes estão misturadas uniformemente umas com as outras"⁹² nas unidades de volume. Isso significa que em cada unidade encontraremos todas as faixas de velocidade, representadas proporcionalmente a seus tamanhos no volume total. Conseqüentemente, essa suposição seria essencialmente uma suposição sobre o posicionamento das moléculas de diferentes velocidades, em relação ao volume total. Ela se revela como indispensável para que, em todas as unidades de volume - onde serão computadas as alterações da distribuição pela Equação de Boltzmann - as colisões maxwellianas predominem sobre as anti-maxwellianas. São duas as razões de sua necessidade: a) "no curso do tempo, moléculas com uma certa energia cinética...irão sair da unidade de volume; mas, como a distribuição de energia cinética é uniforme, na média uma mesma quantidade de moléculas entrará, vinda dos arredores"⁹³; b) moléculas de uma certa faixa de velocidade colidirão, em cada unidade de volume, com moléculas de todas as faixas de velocidade, na mesma proporção do tamanho dessas classes no volume total. Conseqüentemente, as faixas (ou valores discretos) de energia cinética mais populosas

(91) cf. BOLTZMANN, 1872, p. 94 e 120. As duas condições já foram citadas em nosso cap. 2.

(92) BOLTZMANN, 1872, p. 94.

(93) BOLTZMANN, 1872, p. 120.

nas unidades de volume, que mais participarão das colisões e mais terão suas energias cinéticas alteradas, serão as mais populosas no volume total, de modo que as ocorrências no interior de cada unidade de volume se somarão - e não se anularão - para gerar a variação total de E.

Com respeito à condição acima, verificamos que o seu papel é necessário para a validade do "Teorema", dado que dois dos fatores, que fazem com que as colisões maxwellianas predominem sobre as anti-maxwellianas, são: a) as faixas de energia cinética mais populosas são as que mais participam das colisões, e b) essas colisões se dão com moléculas de todas as outras faixas, na mesma proporção de suas populações totais. No caso de uma distribuição não uniforme das energias cinéticas por unidades de volume, os fatores acima não terão vigência, e o "Teorema" perderá sua eficácia. Como a condição de uniformidade não foi originalmente formulada em uma linguagem probabilística, seu único problema (frente ao projeto de reformulação determinista do "Teorema") seria que ela faz referência indireta às posições relativas das moléculas, e, portanto, não poderia ser representada no espaço de velocidades. Sua representação exata teria que se dar em uma descrição mais fina do sistema, em que se pudesse especificar tipos de arranjos espaciais das moléculas.

A segunda condição apresentada por Boltzmann faz explícita menção das probabilidades. No contexto de nossa interpretação do "Teorema-H", anteriormente apresentada, ela se relaciona com a hipótese de distribuição padrão: caso houvessem distribuições desiguais de direções de velocidade pelas moléculas, então as diferentes colisões possíveis não ocorreriam em igual quantidade, por intervalo temporal considerado, e, conseqüentemente, a distribuição padrão de ângulos colisionais não seria obtida; se essa distribuição não for obtida, nada garantirá que os produtos das colisões seriam os correspondentes às alterações da distribuição de energias cinéticas no sentido da distribuição de equilíbrio. Assim, a "equiprobabilidade" das direções de velocidade significaria que a distribuição de direções pelas moléculas se faz de tal forma que todas as direções possíveis computadas no modelo (i.é., um número finito de direções) tenham uma mesma quantidade de ocorrência por intervalo temporal considerado. Portanto, a condição afirma a equitatividade da distribuição das direções de velocidade pelas moléculas, nos intervalos temporais considerados (as diferentes direções estão distribuídas em quantidades iguais). Assim, o uso da noção de "equiprobabilidade" seria acidental, e poderia ser substituído, sem maiores prejuízos para seu papel no "Teorema".

Tal condição de equitatividade nos a figura como necessária, mas não suficiente, para a obtenção da distribuição

padrão de ângulos colisionais, requerida pelo "Teorema". O não-privilegiamento de certas direções de velocidade é necessário para que os diferentes tipos de colisões ocorram uma mesma quantidade de vezes por intervalo temporal considerado, mas ainda é preciso alguma outra premissa, para se obter a conclusão de que as colisões ocorram daquela forma. A premissa adicional diz respeito aos demais valores, além das direções de velocidade, que devem ser determinados, para que os agrupamentos moleculares sejam especificados com exatidão. Essa questão nos remete à relação, porventura existente, entre a segunda condição e o Princípio sobre o número de colisões. Em nossa visão, o significado funcional de Princípio (especialmente em sua versão final, como Caos Molecular) é o de garantir a obtenção da distribuição padrão de ângulos colisionais a cada intervalo temporal, através da designação dos agrupamentos apropriados. Desso modo, haveria uma superposição de papéis entre as duas condições de 1872 e o Princípio, onde as primeiras atuariam como condições necessárias, e o segundo como condição necessária e suficiente para a obtenção de distribuição padrão. Assim, a especificação dos agrupamentos (Hipótese de Caos Molecular) torna dispensável a formulação daquelas condições, pois na definição dos agrupamentos já seriam feitas as especificações de posição e direção de velocidade das moléculas, que as condições tinham a função de realizar.

Passemos então ao exame da possibilidade de reformulação determinista do famoso Princípio, relativo ao cálculo do número de colisões que alteram a quantidade de moléculas, por faixas (ou valores discretos) de energia cinética, por unidade de volume, no intervalo temporal considerado. De nossa revisão histórica precedente concluímos que uma reformulação determinista de Princípio não deve se referir à independência das velocidades pré-colisionais das moléculas. Como bom mecanista, Burbury logo percebeu que sua Condição A não poderia ser aplicada após a ocorrência de colisões, no sistema estudado; mas a consequência lógica dessa limitação seria que a Condição A não poderia ser aplicada nunca, pois no estado inicial de qualquer sistema real as moléculas já teriam colidido inúmeras vezes, gerando relações causais que não poderiam ser negligenciadas. Para a preservação do determinismo, é preciso que o conjunto de ângulos colisionais obtidos, a qualquer momento de evolução de um sistema isolado, seja - do ponto de vista cinético - determinado pelo conjunto de ângulos obtido anteriormente. Logo, se a distribuição padrão for obtida sempre, isso terá que ser consequência dos agrupamentos moleculares anteriormente existentes, como foi proposto na hipótese de Caos Molecular, dos Ehrenfests. A existência desses agrupamentos previamente (e não de outros), seria uma questão factual, relativa à micro-estrutura da matéria, e o fato de tais agrupamentos gerarem, via colisões,

novos agrupamentos semelhantes, seria uma propriedade de invariância, através das colisões, dos mesmos.

Uma revisão da fórmula do cálculo do número de colisões, a partir da perspectiva adotada no parágrafo anterior, nos leva a afirmar que, em primeiro lugar, a forma aritmética multiplicativa (do número de moléculas em cada unidade de volume) não se deveria à suposta independência de velocidades, mas à obediência de um mero procedimento combinatorial, adequado ao tipo de agrupamento molecular subjacente: dado que os agrupamentos são tais que cada tipo de colisão ocorrerá um igual número de vezes por intervalo temporal considerado, então a computação das colisões segue uma fórmula combinatorial simples, na qual se leva em conta a quantidade de moléculas em cada faixa (ou valor discreto) de energia cinética, a distribuição padrão de ângulos colisionais, e o intervalo temporal, conduzindo aos mesmos resultados obtidos por Boltzmann. Em segundo lugar, os valores multiplicados não seriam probabilidades, mas quantidades de moléculas em determinada faixa (ou valor discreto) de energia cinética, por unidade de volume (que podem ser expressas em frações).

O próprio Caos Molecular especifica agrupamentos moleculares, em termos de conjuntos de posições e velocidades

relativas das moléculas, que determinam toda a trajetória do sistema isolado, no espaço Γ , de modo que os sistemas de colisões produzam, para todas as seqüências de intervalos temporais, na evolução do sistema, seqüências de macro-estados que satisfazem aos requisitos de irreversibilidade estrita. Podemos então afirmar que o "Caos Molecular" realiza a tarefa para a qual foi proposto. Porém, assim como o "Teorema-H" original, é forte demais, tornando-se difícil de ser cientificamente justificado e aceito. Notamos nele quatro problemas: a) impossibilidade prática de definição dos agrupamentos, do modo proposto pela hipótese; b) impossibilidade de dar conta da existência de "flutuações" do valor da entropia ("flutuações", bem entendido, de pequeno porte - e.g., movimento browniano - e incapazes de serem utilizadas para realização de trabalho); c) como os agrupamentos especificados determinam toda a evolução futura do sistema isolado, seria impossível explicar como o Princípio poderia não ser válido no equilíbrio, para que a reversão de velocidades de Loschmidt conduzisse à diminuição de entropia mecanicamente previsível, e d) aparente impossibilidade de teste experimental e/ou apoio em outras teorias físicas, que possuam fontes de evidência independentes. Para tentar resolver, em algum grau, alguns desses problemas, proporemos uma versão mais abrangente da Hipótese de Caos Molecular.

4.4. O Princípio das Sequências Apropriadas

Tendo estudado as principais linhas históricas do debate a respeito do "Teorema-H", e proposto algumas diretrizes para sua formulação verdadeiramente determinista, nos dispomos doravante a fazer sugestões para uma reformulação, mais abrangente, da Hipótese do Caos Molecular, eventualmente utilizando, como fonte de inspiração, desenvolvimentos mais recentes de teorias físicas.

A especificação exata dos agrupamentos moleculares presentes no estado inicial de um sistema de muitos corpos, que satisfaçam aos tipos de colisões requeridas pelo "Teorema", constitui tarefa infundável. Um novo aspecto de problema, aparentemente ainda mais complicado, seria o de se especificar seqüências temporais apropriadas de agrupamentos - dado que os processos irreversíveis dizem respeito a intervalos temporais, e não a instantes. Nos interessa saber quais seriam os agrupamentos, presentes em seqüências de micro-estados, que produzem os tipos de colisões responsáveis pelas seqüências de macro-estados que satisfazem à concepção estrita de irreversibilidade. Mas é possível que alguns agrupamentos, instantaneamente julgados como inapropriados, produzam no intervalo temporal correspondente a um ato de observação

(humano), uma seqüência de macro-estados com irreversibilidade estrita. Portanto, na evolução de um sistema isolado para o equilíbrio, ou em sua permanência neste, não seria necessário que a cada momento fossem obtidos agrupamentos que produzissem as colisões apropriadas ao "Teorema"; podemos admitir que ocorram agrupamentos instantaneamente inapropriados, desde que, ao longo de um intervalo temporal, correspondente ao mínimo requerido para a realização de uma observação, o balanço das transferências de moléculas, entre as faixas (ou valores discretos) de energia cinética se faça de acordo com o exigido pelo "Teorema". Esse fato seria essencial não só para se redefinir o princípio extramecânico requerido pelo "Teorema", como também para que este consiga dar conta da existência de pequenas flutuações (não utilizáveis para realização de trabalho, e, conseqüentemente, não mensuráveis) do valor da entropia.

Felizmente, a consideração das seqüências apropriadas de agrupamentos, ao invés dos agrupamentos isolados, nos permite uma reformulação, mais simples e flexível, do princípio de Caos Molecular dos Ehrenfests. Considerando-se o intervalo temporal mínimo necessário para a realização de uma observação humana, capaz de julgamento a respeito da evolução da entropia (aumento, diminuição ou não-alteração de valor), tomemos apenas a distribuição de velocidades nos pontos inicial

e final do intervalo. Realizando-se o produto das energias cinéticas de todas as moléculas presentes em uma unidade de volume, no instante inicial (P1), e também no instante final (P2), e comparando-se os dois resultados, podemos interpretá-los das seguintes maneiras⁹⁴:

- a) se o estado inicial corresponde a uma situação de não-equilíbrio do tipo "dorso do camelo de duas corcovas", então:
- a.1.) se $P1 \ll P2$, então a seqüência de agrupamentos subjacente é apropriada;
- a.2.) se $P1 \gg P2$, então a seqüência é inapropriada;
- b) se o estado inicial corresponde a uma situação de não-equilíbrio do tipo "dorso do camelo de uma corcova", então:
- b.1.) se $P1 \gg P2$, então a seqüência é apropriada;
- b.2.) se $P1 \ll P2$, então a seqüência é inapropriada;
- c) se o estado inicial corresponde a uma situação de equilíbrio, então:
- c.1.) se $P1 = P2$, então a seqüência é apropriada;
- c.2.) se $P1 \gg P2$, ou $P1 \ll P2$, então a seqüência é inapropriada.

(94) existem outras interpretações possíveis, mas não temos condições de dar um tratamento exaustivo ao problema, que demandaria uma teoria geral do não-equilíbrio.

Os critérios acima nos permitem distinguir as seqüências apropriadas das inapropriadas, sem nenhuma referência às probabilidades⁹⁵ (as operações são puramente aritméticas). Trata-se de uma distinção operacional entre as duas classes de seqüências, que se baseia nos resultados que elas produzem, e não nos respectivos valores de posição e direção de velocidade das moléculas constantes dos agrupamentos. Mesmo assim, é um critério rigoroso, que permite uma partição exata do "espaço de seqüências", entre as seqüências apropriadas e as inapropriadas.

Com base no critério acima, podemos considerar que a noção de "seqüência apropriada" possa ser definida em um modelo determinista dos processos físicos, e utilizá-la para uma reformulação do princípio extramecânico, que passaria a ser o seguinte: na evolução de um sistema isolado a partir do não equilíbrio, todas as seqüências de agrupamentos, contidas em intervalos temporais iguais ou maiores que o mínimo necessário para a realização de uma observação humana (capaz de juízo sobre a evolução da entropia), são seqüências apropriadas.

Ao princípio acima, de nível microscópico e caráter factual e universal, chamamos de Princípio das

(95) na prática, o cálculo pode ser probabilístico, devido (exclusivamente) à ignorância dos valores exatos de velocidade. Em modelos computacionais, pode-se fazer o cálculo com valores exatos.

Sequências Apropriadas (PSA). Sua principal vantagem sobre o Caos Molecular é permitir dar conta das chamadas "flutuações" microscópicas do valor de entropia, sem, contudo, admitir - como faz a abordagem probabilística - a possibilidade de diminuição de entropia em quantidade utilizável.

A noção de "flutuação" está comprometida com uma conotação probabilística (derivada da teoria dos erros, ou de uma aleatoriedade no movimento das partículas); porém, no contexto da mecânica estatística, deve se referir a fenômenos objetivos, ou seja, às pequenas variações do valor da entropia. Uma formulação rígida do princípio extramecânico requerido pelo "Teorema-H", como a hipótese de Caos Molecular, por sua vez implicaria que o sistema se aproximaria progressivamente do equilíbrio, e, ao atingí-lo, se manteria rigorosamente em uma mesma região do espaço de estados. Essa formulação, que dá a idéia de um "encolhimento" de extensão no espaço de estados, parece encontrar dificuldades de compatibilização com o Teorema de Liouville.

Já em nossa proposta de reformulação do Princípio, são admitidas pequenas diminuições do valor da entropia, no interior dos intervalos mínimos de observação, desde que sejam contrabalanceadas por processos compensatórios, no interior desses mesmos intervalos. Logo, o sistema poderá

percorrer quaisquer micro-estados mecanicamente possíveis, durante tal intervalo, o que significa que no equilíbrio ele não ficará limitado a uma dada região do espaço de fases. Isso, a nosso ver, dissolve a possível dificuldade que uma teoria estrita da irreversibilidade poderia enfrentar, frente às consequências do Teorema de Liouville.

Uma hipótese um pouco ousada, seria que o PSA estaria relacionado com a existência de um "atrator"⁹⁶, no espaço de posições e direções de velocidade, de um sistema de muitos corpos; ou seja, o princípio expressaria o fato de que nestes sistemas, devido às interações entre seus componentes, haveria um conjunto de posições e direções de velocidades privilegiado, espontaneamente obtido. Além disso, podemos ainda hipotetizar que esse "atrator" de posições e direções só ocorreria na região de não-equilíbrio, de modo que o PSA não tivesse validade para sistemas em estados de equilíbrio. Com base nessas duas hipóteses adicionais, conseguiríamos explicar duas coisas importantes: o papel das pequenas perturbações externas, inelimináveis em sistemas (quase) isolados reais, como sustentação do princípio extramecânico

(96) a noção de um conjunto de estados "atratores", em sistemas complexos (em especial, nos sistemas "caóticos", os "atratores estranhos") está largamente difundida em diversas áreas da física contemporânea, nos parecendo ser dispensável oferecer alguma referência bibliográfica. Uma razão geral pela qual existem atratores, seria, segundo PRIGOGINE e STENGERS (1990, p. 132-136), a existência de fenômenos de ressonância.

(hipótese de Burbury⁹⁷), e a possibilidade (teórica) da reversão de velocidades, proposta por Loschmidt, à qual se seguiria uma breve diminuição do valor da entropia.

Analisemos primeiramente o papel das pequenas perturbações externas. Não julgamos que a influência de perturbações externas em sistemas quase-isolados por si só explique a não-diminuição de entropia. Vejamos algumas dificuldades que esse tipo de explicação encontraria: a) por serem aleatórias, 'a priori' tais perturbações poderiam favorecer tanto as seqüências de micro-estados que produzem aumento de entropia quanto as que produzem sua diminuição; b) existem inúmeros casos em que perturbações externas, com aporte de energia, fazem com que sistemas fechados diminuam sua entropia; c) na Termodinâmica o isolamento dos sistemas é noção metodológica, que não deve ser tomada literalmente como verdadeira; porém, se as perturbações externas forem tomadas como essenciais para explicar a não-diminuição da entropia, então deduziríamos a afirmação contrafactual de que se houvesse um sistema perfeitamente isolado, nele a entropia

(97) "todo sistema material real recebe perturbações externas ao acaso, cujo efeito é o de produzir justamente aquela distribuição de coordenadas que é requerida para fazer H diminuir", cf. BURBURY, 1894, citado por BRUSH, 1976a, p. 621. Essa hipótese foi reforçada por diversos autores contemporâneos. MACKAY (1989) a defende com o valioso argumento de que seria a única maneira de compatibilização do princípio extramecânico com a mecânica.

necessariamente diminuiria em grandes quantidades. Essa conclusão nos parece ser contraditória com a 2ª Lei da Termodinâmica, mesmo em sua reformulação probabilística.

Devido às dificuldades acima, julgamos que a hipótese das pequenas perturbações externas, como justificativa do princípio extramecânico do "Teorema", se tomada sozinha seria inviável. Contudo, em conjunção com a hipótese de que os agrupamentos que satisfazem ao PSA constituem um "atrator", ela se torna altamente defensável, para explicar porque certas seqüências de micro-estados mecanicamente possíveis nunca seriam, de fato, obtidas. Um sistema de muitos corpos em interação possui grande sensibilidade às variações, por pequenas que sejam, das condições de contorno. Ora, se um sistema desse tipo, na região de não-equilíbrio, apresenta comportamento instável⁹⁸, possuindo ao mesmo tempo um atrator de posições e direções de velocidade, então qualquer desvio, mecanicamente determinado, frente a tal atrator, poderá imediatamente ser eliminado, pela ação causal de uma pequena perturbação externa, que reconduzirá o sistema para a região do atrator. Desse modo, as pequenas variações do valor de entropia, no interior dos intervalos mínimos de observação, nunca teriam tamanho crítico para poderem ser utilizadas na realização de trabalho.

(98) sobre o papel das micro-instabilidades para a irreversibilidade, ver p. ex. ERBER e SKLAR (1974).

Continuando nosso exercício teórico, examinemos a importância da hipótese de que o referido "atrator" não abrangesse as regiões correspondentes aos estados de equilíbrio. Primeiramente, por uma questão de coerência, não podemos supor que o mecanismo de "instabilidade mais perturbação externa mais conjunto de estados atratores" se instale no equilíbrio. Em segundo lugar, a não aplicação do PSA ao equilíbrio nos permite admitir que, se ocorresse a reversão de Loschmidt, haveria a diminuição da entropia. Porém, existem ótimos argumentos, levantados pelos autores mais insuspeitos (Thomson, Bryan, o próprio Boltzmann e, ainda Prigogine⁹⁹), de que a diminuição ocorreria em um intervalo temporal muito breve, logo dando lugar a nova progressão ao equilíbrio. A nossa explicação para isso seria que, logo que a diminuição de entropia atingisse patamar suficiente para ativar o mecanismo citado acima, o sistema retomaria o caminho em direção ao equilíbrio. Essa explicação condiz com as observações que fazemos, de que nenhum sistema no equilíbrio, por mais tempo que aí tenha permanecido, jamais se altera a ponto de podermos utilizar essa variação para

(99) "pequenos e finitos desvios da precisão absoluta na reversão... não eliminarão a resultante desseqüalização da distribuição da energia. Mas quanto maior o número de moléculas, mais curto será o tempo durante o qual a desseqüalização irá continuar" (THOMSON, 1874, p. 181-182); ou, de um ponto de vista implicitamente operacionalista, "praticamente seria impossível projetar as moléculas em seus movimentos reversos com precisão suficiente para capacitá-las a retrair seus passos por mais que poucas colisões" (BRYAN, 1894, p. 176); ou ainda, ver BOLTZMANN, 1896, p. 59-60, e PRIGOGINE e STENGERS, 1990, p. 139ss. Em alguns pontos, o argumento de Prigogine se assemelha ao de Bryan.

realizar trabalho.

Lembramos ainda que o Teorema da Recorrência não poderia ser usado como base para uma objeção à teoria da irreversibilidade que contenha princípios como o do Caos Molecular ou PSA, pois tais princípios extramecânicos restringem as trajetórias mecânicas possíveis, de um sistema isolado (onde a recorrência de micro-estados seria necessária), a um subconjunto, onde os micro-estados correspondentes a macro-estados de baixa entropia não recorrem no tempo.

Finalizando nossos comentários, lembramos o principal ponto da argumentação precedente: que o PSA constituiria condição suficiente para a explicação da irreversibilidade estrita através do "Teorema-H", substituindo com vantagem as diversas formulações de condições e princípios extramecânicos analisados. De uma perspectiva mais modesta, poderíamos nos furtar de hipóteses a ele adicionais, ou justificativas sobre "a causa da causa" da irreversibilidade. Entretanto, o progresso, no entendimento da irreversibilidade, sem dúvida demanda novos e mais aprofundados estudos, sobre o "Teorema-H", e a(s) suposição(ões) extramecânica(s) nele envolvida(s), que em muito se beneficiarão dos desenvolvimentos recentes da física, em especial das teorias de "sistemas

caóticos"¹⁰⁰. Acreditamos que o avanço da pesquisa confirmará a viabilidade da explicação da irreversibilidade macroscópica através de modelos deterministas, de modo semelhante ao aqui delineado¹⁰¹.

-
- (100) nos casos de "caos determinista", se considera esses sistemas como ontologicamente deterministas, e apenas epistemicamente "indeterministas" (i.é., imprevisíveis com exatidão). Sobre o assunto, ver HUNT (1987) e STONE (1989).
- (101) embora nossa proposta em alguns pontos se assemelhe à de Prigogine, em especial na busca de uma concepção mais forte da irreversibilidade, capaz de se harmonizar com a assimetria do tempo, existem divergências insuperáveis entre ambas, entre as quais destacamos duas: a) ele descarta a possibilidade de se trabalhar com modelos deterministas na explicação da irreversibilidade, considerando a descrição probabilística como sendo fundamental; b) a maior parte de seus argumentos filosóficos são de caráter operacionalista. Para uma apreciação filosófica inicial do trabalho de Prigogine e associados, ver KROES (1985), BATTERMAN (1991) e VERSTRAETEN (1991). Julgamos que uma avaliação filosófica mais abrangente e aprofundada, de seus trabalhos sobre a irreversibilidade e o tempo, ainda está por ser feita.

CONCLUSÃO: A REALIDADE DA TEMPORALIDADE

Através de uma crítica da tradição boltzmanniana, procuramos nesse trabalho encontrar fundamentação para nossa concepção filosófica da temporalidade, que se assenta em dois pilares: a) o tempo como um esquema conceitual, 'a priori' e corrigível, utilizado pelos agentes cognitivos para elaborar representações dos processos que ocorrem no mundo de sua experiência. Considerando-se a comunidade científica como um agente cognitivo, o esquema por ela utilizado é o da "reta real", que possui como característica distintiva a relação de ordem assimétrica entre os instantes temporais; b) a ocorrência de transformações estritamente irreversíveis na natureza, detectável através do aumento e estabilização da entropia termodinâmica em sistemas isolados (ou quase-isolados), e explicável por meio de uma teoria determinista ao estilo do "Teorema-H" de Boltzmann de 1872 (interpretado da forma como o fizemos).

A realidade da temporalidade se baseia na correspondência entre as propriedades daquele esquema conceitual, e as propriedades do mundo em que tal agente cognitivo vive. Tal correspondência se estabelece, portanto, no nível pragmático, o que só se torna possível a partir da

afinidade semântica, entre a estrutura do esquema conceitual do agente, e a estrutura dos processos que ocorrem em seu mundo da experiência.

Nessa concepção da temporalidade, a existência do tempo como um esquema conceitual não implica em uma posição filosófica idealista a seu respeito. Comparando a questão com a polêmica medieval sobre os universais, nossa posição é análoga àquela atribuída a Pedro Abelardo: julgamos que o tempo seria um esquema conceitual com base na realidade, ou com aplicação na realidade (trata-se, aqui, da "realidade externa" ao agente que possui o esquema). Afirmamos que o esquema conceitual possui base ou aplicação na realidade, porque sua propriedade de assimetria (que julgamos ser a mais peculiar) encontra pleno apoio na irreversibilidade estrita dos processos físicos. Desse modo, os agentes cognitivos que utilizam esse esquema, vivendo em um mundo onde os processos físicos se comportam de tal maneira, terão boas oportunidades de se adaptarem ao mesmo, pois o esquema que possuem é o mais eficaz para a representação daqueles processos, e para a coordenação de suas ações no seio daquele mundo¹. Julgamos que uma efetiva adaptação constitui condição de possibilidade de todos os fenômenos da

(1) Estamos supondo a possibilidade de uma teoria pragmática da correspondência entre estruturas 'a priori' e estruturas 'a posteriori', baseada na noção de adaptação. Deixamos para um trabalho futuro uma melhor formulação dessa concepção realista pragmática.

temporalidade, analisados nas abordagens antropológicas, fenomenológicas e linguísticas. A essa condição elementar se acrescentam, historicamente, outras determinações, sócio-culturais, que enriquecem a experiência da temporalidade.

As recentes observações, feitas por Prigogine e colaboradores, de fenômenos que ocorrem em sistemas abertos, na distância do equilíbrio termodinâmico, não só reforçam a idéia da existência de irreversibilidade estrita na natureza, como também ressaltam a ocorrência de transformações no sentido de estados de maior complexidade, ao longo dos processos físicos. O fato dessas transformações só ocorrerem em sistemas abertos, e longe do equilíbrio, confirma a hipótese de que a irreversibilidade termodinâmica seria estrita (isto é, que os sistemas isolados ou quase isolados sempre rumam para o equilíbrio e lá permanecem), e, por outro lado, traz um ônus para certas associações entre a 2ª Lei e o aumento de "desordem" (desordem molar, no sentido de Boltzmann), feitas no contexto da explicação probabilística.

Não acreditamos que haja real continuidade entre a abordagem do "Teorema-H" e a abordagem probabilística da entropia. Embora haja uma semelhança formal entre a definição

matemática da quantidade E (depois chamada de H), e a da entropia probabilística, ambas possuem significados essencialmente diferentes. Para o próprio Boltzmann, o "Teorema- H " foi reinterpretado como probabilístico, de modo que a distribuição de velocidades passou a ser entendida literalmente como uma coleção de probabilidades, as quais poderiam ser relacionadas com a medida da permutabilidade, de micro-estados por macro-estados, que constitui a base do cálculo da entropia probabilística. Entretanto, julgamos que essa semelhança é "forçada", e inapropriada, pelas razões seguintes.

A quantidade E , entendida como uma medida da distância ao equilíbrio, expressa propriedades de determinadas distribuições de velocidades, sendo que a propriedade mais relevante, diretamente vinculada com a entropia termodinâmica, é a capacidade de realização de trabalho. Além desse significado físico primário, os valores assumidos pela quantidade E também expressam uma disposição do sistema, a de se dirigir para o equilíbrio. Como analisamos em nosso capítulo 4, as alterações de quantidade E são produzidas por um mecanismo (gerado pelas leis mecânicas, mais um princípio extramecânico, mais as pequenas perturbações externas), que conduz inexoravelmente os sistemas quase-isolados para o equilíbrio, e

lá os mantém². A quantidade E expressa exatamente o estágio, desse processo, em que um determinado sistema se encontra.

A entropia probabilística, entendida da maneira clássica, como uma medida da probabilidade de um macro-estado, relativamente aos micro-estados com ele compatíveis, não possui um significado físico primário, nem necessariamente expressa propriedades do estado em que se encontra um dado sistema. Dizer que um dado sistema possui um determinado valor de entropia probabilística, significa afirmar que ele pode estar em um dentre numerosos micro-estados possíveis. Ora, nessa coleção de micro-estados possíveis, existem tanto os micro-estados direcionados para a aproximação ao equilíbrio, quanto os direcionados para o afastamento do equilíbrio. Como a entropia probabilística, diferentemente da quantidade E, não expressa um estágio no interior de um processo com direção definida, a rigor ela não nos permite nenhuma inferência, com base física, a respeito da evolução temporal da entropia. A idéia da evolução preferencial para macro-estados mais prováveis constitui uma

(2) O fato de a distribuição de equilíbrio possuir forma semelhante à da Teoria Estatística do Erros, poderia aqui ser interpretado como relacionado ao fato de os atos de medida, enquanto operações no universo físico, estarem sujeitos à 2ª Lei, implicando em perda de precisão. Essa idéia precisaria ser mais desenvolvida; seu valor estaria em mostrar que não existiria um componente estatístico na base da 2ª Lei. Em outras palavras, é o aumento da entropia, no megassistema observador-sistema observado, que causa a perda de precisão, e não a perda de precisão que causa o aumento da entropia

disposição psicológica, que transferimos para os sistemas físicos observados. Essa disposição psicológica é produzida pela crença de que os eventos mais prováveis certamente ocorrerão.

Mesmo que a entropia probabilística não seja antropomórfica ou subjetiva, no sentido contestado por Grünbaum e os Denbighs (vide nosso capítulo 3), o mesmo não se pode dizer da teoria da irreversibilidade que ela suporta. A suposta tendência de evolução, no sentido dos macro-estados mais prováveis, se baseia única e exclusivamente nas crenças do observador, uma vez que, apesar de todas as cláusulas firmadas por aqueles que a entendem como legítima (macro-estado inicial de baixa entropia, escolha aleatória do micro-estado inicial, etc...) a evolução para os macro-estados menos prováveis sempre seria possível, com base na referida teoria. Sabemos ainda que o observador humano possui tais crenças devido à sua posição especial no universo, como habitante de uma raríssima região de baixa entropia.

Se a teoria probabilística da entropia não constitui legítima explicação para o problema da irreversibilidade macroscópica, conforme argumentamos, como poderíamos entender o seu sucesso, em termos de aceitação pela comunidade científica? Nossa resposta é que, embora ela não

seja exatamente aquilo que aparenta, pode vir a desempenhar um papel igualmente importante. Como bem notaram Jaynes e o próprio Shannon, a entropia probabilística funciona como medida da incerteza a respeito dos micro-estados de um sistema macroscópico, a partir do conhecimento das propriedades de seus macro-estados. Seria interessante realizar estudos sociológicos a respeito do modo como cientistas usam a entropia probabilística boltzmanniana, investigando em particular se eles interpretam as probabilidades objetivamente, da mesma maneira que Boltzmann, ou se as interpretam subjetivamente, ao modo de Jaynes. Também seria importante avaliar se eles interpretam o aumento da incerteza como evidência inequívoca da ocorrência de processos irreversíveis³. Portanto, a semelhança entre a medida de informação de Shannon e a entropia probabilística boltzmanniana (na fórmula adotada por Planck) não seria meramente casual. A evolução da entropia, entendida meramente como passagem para macro-estados mais prováveis, reflete a evolução da informação disponível sobre os micro-estados do sistema. Como em muitos casos existe um real paralelismo entre aumento de entropia (termodinâmica) e aumento da incerteza, a identificação - consciente ou não - entre ambas, se revelou eficaz, em contextos tecnológicos.

(3) dada a diferença, no plano conceitual, entre a quantidade E , que expressaria a entropia termodinâmica, e a entropia probabilística, na sua interpretação particular como uma medida de incerteza sobre o micro-estado subjacente, é de se esperar que suas medidas não sejam sempre proporcionais.

Exceto nas interpretações contra-indutivas, não acreditamos que deva existir margem de dúvida, de que a irreversibilidade macroscópica se apresenta na forma estrita, isto é, que a entropia nunca diminui em quantidades utilizáveis, em sistemas isolados (ou quase-isolados). Como a existência desse fenômeno constitui a base de aplicação do esquema temporal assimétrico da "reta real", engendrando, para os agentes cognitivos, as condições elementares da temporalidade, se justifica, do ponto de vista filosófico, a avaliação crítica da "tradição boltzmanniana", aqui realizada, como meio de elaboração de uma teoria substantiva da irreversibilidade, que é parte central da teoria da temporalidade.

Usar teorias científicas na construção, ou justificação, de concepções filosóficas, pode parecer empreendimento excessivamente arriscado, para aqueles que julgam que a filosofia possuiria uma natureza radicalmente diferente da ciência. De nossa parte, acreditamos que o intercâmbio de idéias entre filosofia e ciência constitua uma das mais profícuas contribuições dessa controversa área do pensamento contemporâneo, intitulada "Filosofia da Ciência". É certo que a consonância com uma concepção filosófica não implica na validade empírica de uma teoria científica, assim como a consonância com uma teoria científica bem confirmada não implica na validade conceitual de uma concepção filosófica.

Contudo, a consonância entre uma concepção filosófica atraente e uma teoria científica plausível constitui uma maravilha do pensamento, que não pode deixar de atrair a atenção de todos aqueles que estão empenhados na "busca da verdade".

BIBLIOGRAFIA

- BATTERMAN, R.W. (1991) - "Randomness and Probability in Dynamical Theories: On the Proposals of the Prigogine School", em Philosophy of Science, nº 58, p. 241-263.
- BOLTZMANN, L. (1872) - "Further Studies in the Thermal Equilibrium of Gas Molecules", em BRUSH, S. (Ed.) - Kinetic Theory, V. 1, p. 88-175.
- BOLTZMANN, L. (1877) - "On the Relation of a General Mechanical Theorem to the Second Law of Thermodynamics", em BRUSH, S. (Ed.) - Kinetic Theory, V. 2, p. 188-193.
- BOLTZMANN, L. (1895a) - "On Certain Questions of the Theory of Gases", em Nature, nº 1.322, V. 51, p. 413-415.
- BOLTZMANN, L. (1895b) - (sem título), em Nature, nº 1.329, v. 51, p. 581.
- BOLTZMANN, L. (1895c) - "On the Minimum Theorem in the Theory of Gases", em Nature, nº 1.340, V. 52, p. 221.
- BOLTZMANN, L. (1896a) - Lectures on Gas Theory, Trad. S. Brush, Berkeley/Los Angeles, University of California Press, 1964.

- BOLTZMANN, L. (1896b) - "Reply to Zermelo's Remarks on the Theory of Heat", em BRUSH, S. (Ed.) - Kinetic Theory, V. 2, p. 218-228.
- BOLTZMANN, L. (1897) - "On Zermelo's Paper "On the Mechanical Explanation of Irreversible Processes", em BRUSH, S. (Ed.) - Kin Theor., V. 2, p. 238-245.
- BOLTZMANN, L. (1902) - "Model", em BOLTZMANN, L. - Theoretical Physics and Philosophical Problems, trad. P. Foulkes, Boston, D. Reidel, p. 213-222.
- BOLTZMANN, L. (1905) - "Populare Schriften", em BOLTZMANN, L. Theor Phys ..., p. 1-200.
- BRUSH, S. (Ed.) (1965) - Kinetic Theory, V. 1: The Nature of Gases and Heat, Trad. S. Brush, Oxford/London, Pergamon Press.
- BRUSH, S. (Ed.) (1966) - Kinetic Theory, V. 2: Irreversible Processes, Trad. S. Brush, Oxford/London, Pergamon Press.
- BRUSH, S. (1976a) - The Kind of Motion We Call Heat - A History of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century: Book 1: Physics and the Atomists; Book 2: Statistical Physics and Irreversible Processes, Amsterdam/New York, North-Holland.

- BRUSH, S. (1976b) - "Irreversibility and Indeterminism: Fourier to Heisemberg", em Journal of the History of Ideas, nº 37, p. 603-630.
- BRUSH, S. (1981) - "Changes in the Concept of Time During the Second Scientific Revolution", em SEXL e BLACKMORE (Eds.) - Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe, p. 305-328.
- BRYAN, G.H. (1894) - "The Kinetic Theory of Gases", em Nature, nº 1312, V. 51, p. 175-176.
- BRYAN, G.H. (1895) - "The Assumptions in Boltzmann's Minimum Theorem", em Nature, nº 1332, V. 52, p. 29-30.
- BUNGE, M. (1972) - "Time Asymmetry, Time Reversal and Irreversibility", em FRASER, HABER e MULLER (Eds.) - The Study of Time, p. 122-130.
- BURBURY, S.H. (1894) - "Boltzmann's Minimum Function", em Nature, nº 1308, V. 51, p. 78.
- BURBURY, S.H. (1895a) - "Boltzmann's Minimum Function", em Nature, nº 1318, V. 51, p. 320.
- BURBURY, S.H. (1895b) - "Boltzmann's Minimum Function", em Nature, nº 1335, V. 52, p. 104-105.

- CARATHÉODORY, C. (1976) - "Investigation into the Foundations of Thermodynamics", em KESTIN, J. (Ed.) - The Second Law of Thermodynamics, Stroudsburg, Dowden, Hutchinson and Ross, p. 257-290.
- CARNAP, R. (1969) - The Logical Structure of the World, Trad. Rolf George, Berkeley/Los Angeles, Univ. of California Press.
- CHRISTENSEN, F. (1987) - "Time's Error: Is Time's Asymmetry Extrinsic?", em Erkenntnis n^o 26, p. 231-248.
- CLAUSIUS, R. (1857) - "The Nature of the Motion We Call Heat", em BRUSH, S. - Kin Theor., V. 1, p. 111-134.
- CLAUSIUS, R. (1858) - "On the Mean Lengths of the Paths Described by Separate Molecules of Gaseous Bodies", em BRUSH, S. - Kin Theor., V. 1, p. 135-147.
- CLAUSIUS, R. (1870) - "On a Mechanical Theorem Applicable to Heat", em BRUSH, S. - Kin Theor., V. 1, p. 172-178.
- CULVERWELL, E.P. (1894) - "Dr. Watson's Proof of Boltzmann's Theorem on Permanence of Distributions", em Nature n^o 1304, V. 50, p. 617.

- CULVERWELL, E.P. (1895a) - "Boltzmann's Minimum Theorem", em Nature, nº 1315, V. 51, p. 246.
- CULVERWELL, E.P. (1895b) - "Professor Boltzmann's Letter on the Kinetic Theory of Gases", em Nature, nº 1329, V. 51, p. 581.
- CURD, M. (1981) - "Popper on Boltzmann's Theory of the Direction of Time", em SEXL e BLACKMORE (Eds.), Ludwig Boltzmann, p. 263-303.
- DAUB, E. (1969) - "Probability and Thermodynamics: the Reduction of the Second Law", em Isis nº 60, p. 318-330.
- DAVIES, P.C.W. (1974) - The Physics of Time Asymmetry, London, Surrey Univ. Press/Intertext.
- DENBIGH, K.G. (1972) - "In the Defense of the Direction of Time", em FRASER, HABER e MULLER (Eds.) - The Study of Time, p. 148-158.
- DENBIGH, K.G. (1989a) - "Note on Entropy, Disorder and Disorganization", em Brit. J. Phil. Sci., nº 40, p. 323-332.
- DENBIGH, K.G. (1989b) - "The Many Faces of Irreversibility", em Brit. J. Phil. Sci., nº 40, p. 501-518.

- DENBIGH, K.G. E DENBIGH, J.S. (1985). - Entropy in Relation to Incomplete Knowledge, Cambridge University Press.
- DIAS, P.M.C. (s/d) "'Will Some One Say Exactly What the H-Theorem Proves?' (Culverwell): A Study on Burbury's 'Condition A' and Maxwell's 'Proposition II'", Universidade Federal do Rio de Janeiro/CLE-UNICAMP. (texto xerografado)
- EARMAN, J. (1974) - "An Attempt to Add a Little Direction to the 'Problem of the Direction of Time'", em Philosophy of Science, nº 41, p. 15-47.
- EARMAN, J. (1986a) - A Primer on Determinism, Dordrecht/Boston, D. Reidel.
- EARMAN, J. (1986b) - "The Problem of Irreversibility", em FINE, A. e MACHAMER, P. (Eds.) - Philosophy of Science Association, 1986, V. 2, p. 226-233.
- EHRENFEST, P. e EHRENFEST, T. (1912) - The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics, Trad. Michael Moravcsik, Cornell Univ. Press, 1959.
- ERBER, T. , SKLAR, A. (1974) - "Macroscopic Irreversibility as a Manifestation of Micro-Instabilities", em GAL-OR, B. (Ed.) - Modern Developments in Thermodynamics, New/York/Jerusalem, John Wiley/Israel Univ. Press, p. 281-302.

- FEYERABEND, P. (1975) Against Method, Londres, Humanities Press.
- FONG, P. (1970) - "Second Thoughts on the Second Law of Thermodynamics: Its Past, Present and Future", em STUART, GAL-OR e BRAINARD (Eds.) - A Critical Review of Thermodynamics, Baltimore, Mono Books Corporation, p. 407-416.
- GAL-OR, B. (1970) - "On the Universal Foundations of Thermodynamics", em STUART, GAL-OR e BRAINARD, A Crit. Rev., p. 445-462.
- GAL-OR, B. (1974a) - "Statistical Mechanics, Fallacy and a New School of Thermodynamics", em GAL-OR, B. (Ed.) - Modern Developments, p. 352.
- GAL-OR, B. (1974b) - "On a Paradox-Free Definition of Time and Irreversibility", em GAL-OR, B. (Ed.) - Modern Developments, p. 429-434.
- GAL-OR, B. (1975) - "Philosophical Problems in Thermodynamics", em KUBÁT e ZEMAN (Eds.) - Entropy and Information, p. 211-231.
- GHINS, M. (1986) - "Popper on the Arrow of Time", em Manuscrito, nº 2, V. 9, p. 77-93.

- GLANSDORFF, P. (1987) - "Irreversibility in Macroscopic Physics", em Foundations of Physics, nº 7, V. 17, p. 653-666.
- GLYMOUR, C. (1980) - Theory and Evidence - Princeton, Princeton University Press.
- GOLD, T. (Ed.) (1967) - The Nature of Time, Ithaca and London, Cornell University Press.
- GRÜNBAUM, A. (1967) - Modern Science and Zeno's Paradoxes, Middletown/Connecticut, Wesleyan University Press.
- GRÜNBAUM, A. (1972) - Philosophical Problems of Space and Time, 2.ed. , D. Reidel.
- GRÜNBAUM, A. (1974) - "Popper's Views on the Arrow of Time", em SCHILPP, P.A. (Ed.) - The Philosophy of Karl Popper, p. 775-795.
- GUÉROULT, M. (1929) - La Philosophie Transcendantale de Salomon Maimon, Paris, Félix Alcan.
- ter HAAR, D. (1955) - "Foundations of Statistical Mechanics", em Rev. Mod. Physics, nº 27, p. 289-338.

- HABER, F., FRASER, T., Muller, G. (Eds.) 1972 - The Study of Time, Springer-Verlag.
- HARRISON, M.J. (1975)- "Entropy Concepts in Physics", em KUBÁT e ZEMAN, Entropy and Information ..., p. 41-59.
- HEALEY, R. (Ed.) (1981) - Reduction, Time and Reality, Cambridge, Cambridge University Press, 1981.
- HILL, E.L., GRUMBAUM, A. (1957) - "Irreversible Processes in Physical Theory", em Nature, nº 179, p. 1296-1297.
- HOLLINGER, H., ZENZEN, M. (1982) - "An Interpretation of Macroscopic Irreversibility Within the Newtonian Framework", em Philosophy of Science, nº 49, p. 309-354.
- HOLLINGER, H., ZENZEN, M. (1986) - The Nature of Irreversibility - A Study of Its Dynamics and Physical Origins, Dordrecht/Boston, D. Reidel.
- HORWICH, P. (1987) - Asymmetries in Time, Cambridge/London, MIT Press.
- HUME, D. (1973) - Investigação Sobre o Entendimento Humano, em Os Pensadores, São Paulo, Ed. Abril.

- HUNT, G. (1987) - "Determinism, Predictability and Chaos", em Analysis, nº 47, V. 3, p. 129-132.
- HURLEY, J. (1986) - "The Time-Asymmetry Paradox", em Am. Jnl. Phys. nº 54, p. 25-28.
- JAYNES, E.T. (1957) - "Information Theory and Statistical Mechanics", em Physical Review, V. 106, nº 4, p. 620-630, e V. 108, nº 2, p. 171-190.
- KÁČ, M. (1973) - "Some Probabilistic Aspects of the Boltzmann Equation", em COHEN, E, e THIRRING, P. (Eds.) - The Boltzmann Equation, Wien/ New York, Springer-Verlag. p. 379-400.
- KANT, E. (1978) - Crítica da Razão Pura. Trad. V. Rohden, em Os Pensadores, São Paulo, Ed. Abril.
- KLEIN, M. (1970) - "Maxwell, his Demon, and the Second Law of Thermodynamics", em American Scientist, V. 58, p. 84-97.
- KLEIN, M. (1973) - "The Development of Boltzmann's Statistical Ideas", em COHEN e THIRRING (Eds.) - The Boltzmann Equation, p. 53-105.
- KRÖES, P. (1985) - Time: Its Structure and Role in Physical Theories, Dordrecht/Boston, D. Reidel.

- KUBÁT, L., ZEMAN, J. (Eds.) (1975) - Entropy and Information in Science and Philosophy, Amsterdam/Oxford, Elsevier.
- KUHN, T. (1978) - Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, Oxford, Clarendon Press.
- LACEY, H. M. (1972) - A Linguagem do Espaço e do Tempo, São Paulo, Perspectiva.
- LANDSBERG, P. (1972) - "Time in Statistical Physics and Special Relativity", em HABER, FRASER E MÜLLER, The Study of Time, p. 59-109.
- LAUIS, D. (1977) - "The Role of Statistical Mechanics in Classical Physics", em Brit. Jnl. Phil. Science, nº 28, p. 255-279.
- LAYZER, D. (1975) - "The Arrow of Time", em Scientific American, nº 234, p. 56-69.
- LEBOWITZ, J., PENROSE, D. (1973) - "Modern Ergodic Theory", em Physics Today, Feb. 1973, p. 23-29.
- LUCAS, J. (1973) - A Treatise on Time and Space, London, Methuen and Co.

- MACKAY, M.C. (1989) - "The Dynamic Origin of Increasing Entropy", em Reviews of Modern Physics, V. 61, nº 4, p. 981-1015.
- MAXWELL, J. (1860) - "Illustrations of the Dynamical Theory of Gases", em BRUSH, S. (Ed.), Kin. Theor., V. 1, p. 148-171.
- MAXWELL, J. (1866) "On the Dynamical Theory of Gases", em BRUSH, S. (Ed.) - Kin. Theor., V. 2, p. 23-87.
- MCCALL, S. (1976) "Objective Time Flow", em Philosophy of Science, nº 43, p. 337-362.
- MELLOR, D. (1981) - Real Time, Cambridge, Cambridge University Press.
- MILLER, A. (1981) - "On the Origins, Methods and Legacy of Ludwig Boltzmann's Mechanics", em SEXL e BLACKMORE, Ludwig Boltzmann Gesamtausgabe, p. 305-328.
- NEWTON-SMITH, W. (1978) - "The Underdetermination of Theory by Data", Proceedings of the Aristotelian Society, Supplementary V. 52, p. 71-91.
- NEWTON-SMITH, W. (1980) - The Structure of Time, London/Boston, Routledge/Kegan Paul.

- NYHOF, J. (1988) - "Philosophical Objections to the Kinetic Theory", em Brit. Jnl. Phil. Science, nº 39, p. 81-109.
- ORBAN, J., BELLEMANS, A. (1967) - "Velocity Inversion and Irreversibility in a Dilute Gas of Hard Disks", em Physics Letters, V. 24A, nº 11, p. 620-621.
- PENROSE, O., LAWRENCE, A. (1974) - "The Direction of Time and the Microcanonical Ensemble", em GAL-OR (Ed.) - Modern Developments, op.cit., p.303-309.
- PEREIRA JR, A. (1989) - "A Percepção de Tempo em Husserl", Trans-Form-Ação, V. 13, p. 73-84.
- PEREIRA JR, A. (1990) - "Estatuto Biológico do Processamento de Informação Mental", Trans-Form-Ação, V. 14, p. 139-153.
- PEREIRA JR, A. e FRENCH, S. (1990) - "Metaphysics, Pragmatic Truth and the Undertermination of Theories", Dialogos 56, Ano XXV, p. 37-68.
- PLANCK, M. (1976) - "The Second Law of Thermodynamics", em KESTIN, J. (Ed.) - The Second Law of Thermodynamics, Stroudsburg, Dowden, Hutchinson and Ross, p. 257-290.

- POPPER, K. (1980) - A Lógica da Investigação Científica, em Os Pensadores, São Paulo, Ed. Abril, edição abreviada do original Logik der Forschung. (1934).
- POPPER, K. (1956a) - "The Arrow of Time", em Nature, V. 177, p. 538.
- POPPER, K. (1956b) - Resposta a R. Schlegel, em Nature, V. 178, p. 382.
- POPPER, K. (1957) - Resposta a A. Grünbaum e E.L.Hill, em Nature, V. 179, p. 1279.
- POPPER, K. (1968) - Resposta a R.C.L. Bosworth, em Nature, V. 181, p. 402-403.
- POPPER, K. (1965) - "Time's Arrow and Entropy", em Nature, V. 207, p. 233-234.
- POPPER, K. (1972) - Autobiografia Intelectual. São Paulo: Cultrix (do original Unended Quest, La Salle, Open Court Publ.).
- POPPER, K. (1974) - "Reply to my Critics: Grünbaum on Time and Entropy", em SCHILLPP, P.A. (Ed.) - The Philosophy of Karl Popper, p. 1140-1144.

- POUTHAS, J. e OMS, J. (1981) - "Ludwig Boltzmann and the Second Law of the Theory of Heat", Orsay, Institute de Physique Nucleaire, B.P. n^o 1. (texto xerografado)
- PRIGOGINE, I. (1967) - Thermodynamics of Irreversible Processes, New/York/London, Wiley-Interscience, 3^a Ed.
- PRIGOGINE, I. (1970) - "Dynamic Foundations of Thermodynamics and Statistical Mechanics", em STUART, GAL-OR e BRAINARD (Eds.) - A Critical Review of Thermodynamics, p. 1-18.
- PRIGOGINE, I. (1973) - "The Statistical Interpretation of Non-Equilibrium Entropy", em COHEN e THIRRING, The Boltzmann Equation, p. 401-450.
- PRIGOGINE, I. (1981) From Being to Becoming: Time and Complexity in Physical Sciences, San Francisco, Freeman e Co.
- PRIGOGINE, I. e COURBAGE, M. (1982) - "Intrinsic Randomness and Intrinsic Irreversibility in Classical Dynamic Systems", em Proc. Natl. Sci. USA, V. 80, p. 2412-2416.
- PRIGOGINE, I e GEORGE, C. (1983) - "The Second Law as a Selection Principle - The Theory of Dissipative Processes in Quantum Systems", em Proc. Natl. Sci. USA, V. 80, p. 4590-4594.

- PRIGOGINE, I e STENGERS, I (1990) - Entre o Tempo e a Eternidade, Lisboa, Gradiva.
- REDLICH, O. (1970) - "The Basis of Thermodynamics", em STUART, GAL-OR e BRAINARD (Eds.) - A Critical Review of Thermodynamics, p. 439-444.
- REICHENBACH, H. (1956) - The Direction of Time, Univ. of California Press.
- ROSENFELD, L. (1972) - "General Introduction to Irreversibility", em GARRIDO, L. - Irreversibility in the Many-Body Problem. New-York/London, Plenum Press.
- SALMON, W. (1977) - "The Philosophy of Hans Reichenbach", em Synthese, nº 34, p. 5-88.
- SALMON, W. (1984) Scientific Explanation and the Causal Structure of the World. Princeton Univ. Press.
- SCHILPP, P.A. (Ed.) (1974) - The Philosophy of Karl Popper, Open Court, Illinois.
- SKLAR, L. (1974) - Space, Time and Space-Time, Berkeley, Univ. of California.

- SKLAR, L. (1986) - "The Elusive Object of Desire: In Pursuit of the Kinetic Equations and the Second Law", em FINE, A e MACHAMER, P. (Eds.) - PSA 1986, V. 2, p. 209-225.
- STONE, M. (1989) - "Chaos, Prediction and Laplacean Determinism", em American Phil. Quart., V. 26, nº 2, p. 123-131.
- STUART, E., GAL-OR, G., BRAINARD, A. (Eds.) (1970) - A Critical Review of Thermodynamics, Baltimore, Mono Books Corp.
- SUPPES, P. (1960) - Axiomatic Set Theory, Stanford, Stanford University.
- THOMSON, W. (1874) - "The Kinetic Theory of the Dissipation of Energy", em BRUSH, S. (Ed.) - Kin Theor., V.2, p. 176-187.
- TOLMAN, R. (1938) - The Principles of Statistical Mechanics, Londres, Oxford University Press.
- VAN FRAASSEN, B. (1980) - The Scientific Image, Oxford, Clarendon Press.
- VAN FRAASSEN, B. (1985) - An Introduction to the Philosophy of Time and Space, New York, Columbia Univ. Press.

- VERSTRAETEN, G. (1991) - "Some Critical Remarks Concerning Prigogine's Conception of Temporal Irreversibility", em Philosophy of Science, V. 58, p. 639-654.
- WATSON, H.W. (1894) - "Boltzmann's Minimum Theorem", Nature, nº 1309, V. 51, p. 105.
- WEINGARD, R. (1977) - "Space-Time and the Direction of Time", em Noûs, nº 11, p. 119-132.
- WHITROW, G. (1961) - The Natural Philosophy of Time, New York, Harper.
- WINNIE, J.A. (1992) "Computable Chaos", em Philosophy of Science, nº 59, p. 263-295.
- WRIGHT, P.G. (1980) - "Conceptually Distinct Types of Thermodynamics", em Eur. J. Physics, n 1, p. 81-84.
- WU, T. (1969) - "On the Nature of Theories of Irreversible Processes", em International Jnl. of Theor. Physics, V. 2, nº 4, p. 325-343.
- YE'EMAN, Y. (1974) - "Time Reversal Asymmetry at the Fundamental Level, and its Reflection on the Problem of the Arrow of Time", em GAL-OR (Ed.) - Modern Developments, p. 91-94.

ZERMELO, E. (1896a) - "On a Theorem of Dynamics and the Mechanical Theory of Heat", em BRUSH, S. (Ed.) - Kin. Theor., V.2, p. 208-217.

ZERMELO, E. (1896b) - "On the Mechanical Explanation of Irreversible Processes", em BRUSH, S. (Ed.) - Kin. Theor., V.2, p. 229-237.