

ENTROPIA:

Algumas pistas para a sua interpretação.

Vasco M. Almiro Simões

Termodinâmica Generalizada, F.C.L. 1990

SUMÁRIO

	Pag.
I	Introdução
II	Objectividade e subjectividade
III	Entropia Termodinâmica e Entropia Estatística
IV	Entropia e probabilidade
V	Entropia, Evolução e Metafísica
VI	Entropia, ordem ou desordem ?
VII	Entropia e Informação
VIII	Entropia, Irreversibilidade e Bifurcações
	1 - Os três domínios da termodinâmica
	2 - A termodinâmica linear
	3 - A termodinâmica não linear
	4 - Que subjectividade ?
IX	Uma reflexão final
	1 - A teoria física
	2 - De volta à Entropia
APÊNDICE I	
	A formula de Boltzman
APÊNDICE II	
	O teorema de Prigogine
APÊNDICE III	

Indício experimental de um começo quente

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

83

I INTRODUÇÃO

Este trabalho, que inicialmente deveria ter por título "**A subjectividade do conceito de Entropia**" e que acabou por ser alterado para "**Entropia: Pistas para a sua interpretação.**", tinha por objectivo inicial fazer uma ilustração geral das interpretações mais ou menos subjectivas do conceito introduzido por Clausius. No entanto, apesar de manter sempre em mente esse objectivo, por vezes os assuntos abordados divergiram um pouco.

Os temas abordados foram surgindo à medida que o texto ia sendo elaborado e não obedecem a um plano preestabelecido pelo que, por vezes, conceitos e ideias sugeridas em certa altura são posteriormente abandonadas devido a uma reflexão mais madura ou mais geral. É o que se passa com a identificação entre Entropia e Desordem que é substituída pela identificação entre Entropia e Desinformação, e mesmo esta última analogia é posteriormente posta de lado.

Durante a fase de investigação, deparámo-nos com o domínio não linear da termodinâmica, a auto organização e as estruturas dissipativas. Este campo, de que não tínhamos informação até aqui, pareceu-nos fascinante de forma que não resistimos à tentação de lhe dedicar talvez uma atenção demasiada, pelo que pedimos desde já desculpas.

No final encontram-se alguns apêndices com desenvolvimentos mais detalhados sobre certos aspectos e algumas demonstrações de resultados referidos no texto que tentámos que ficasse o mais aligeirado possível no que respeita às demonstrações matemáticas.

II Objectividade e Subjectividade

Chamou-se Subjectividade, ou factor subjectivo da consciência, aos aspectos voluntário e sentimental dos estados de consciência, em oposição aos aspectos representativo e intelectual, que constituem a face objectiva da consciência. Designou-se por "doutrina da subjectividade", aquela que faz do sujeito o fundamento principal, ou mesmo único, do saber e da acção. Poderia designar-se "teoria céptica da subjectividade" aquela que considera a subjectividade como único valor possível, sendo ela o critério único do verdadeiro e do falso, do bom e do mau, do justo e do injusto. A subjectividade passa assim a ser um método de pesquisa e nunca uma posição definitiva que anula a cognoscibilidade de realidades independentes da consciência do sujeito.

Por vezes usa-se o termo "Subjectivo" para designar o que é próprio do sujeito individual, o que é contingente e arbitrário, por oposição ao que é comum a todos os homens, ou seres racionais, outras vezes, para denotar o que é uma propriedade do pensamento em geral, por oposição ao que não é mental, ao mundo físico, à natureza empírica dos objectos a que o pensamento se aplica. É neste último sentido que as chamadas "qualidades segundas" são por vezes classificadas de subjectivas, não porque possam diferir consoante os indivíduos mas porque não podem entrar na construção de um sistema de representações lógico e explicativo.

O sentido actual da palavra "subjectivo" só apareceu depois da revolução cartesiana que levou a considerar o "Eu" como único sujeito cuja realidade era impossível de por em duvida, por oposição a tudo quanto só conhecemos primitivamente como objectos para a nossa consciência.

Segundo a amplitude que se dê ao conceito de sujeito do conhecimento, pode admitir-se um subjectivismo individual ou solipsístico, e um subjectivismo impessoal ou colectivo.

Alguns estendem o conceito de subjectivismo a todos os sistemas filosóficos que subordinam a realidade ao pensamento, por considerarem que, em última análise, todo o conhecimento é relativo ao sujeito que conhece. Opõem este conceito ao objectivismo, termo que neste caso significaria toda a

orientação filosófica que atribua uma realidade extramental às ideias, quer por serem estas inatas, quer por serem fruto de uma intuição directa do Absoluto.

Parece fundamental, para abordar uma discussão sobre a interpretação do conceito de Entropia, esclarecer o significado em que se utilizam os termos "objectivo" e "subjectivo", uma vez que a utilização comum destes termos varia com grande facilidade, e é frequente depararmo-nos com afirmações da Subjectividade do conceito de Entropia. Assim, no que se segue, adoptarei o conceito de subjectivo e objectivo que passarei a precisar:

Objectivo refere-se a afirmações acerca de objectos que podemos afirmar sem ambiguidade que existem, ou acontecimentos que podemos afirmar sem ambiguidade que ocorrem, isto independentemente do pensamento ou percepções humanas, ou mesmo da presença humana no mundo.

Esta definição pode ainda trazer alguns problemas, e poder-se-ia objectar que sem a presença do homem no mundo não seria possível afirmar o que quer que fosse. No entanto, parece ser uma posição razoável a de admitir uma realidade exterior ao sujeito que conhece, sem o que deixaria de ser necessária a discussão dos conceitos em causa passando a existir apenas subjectividade, com a agravante séria de ser necessário explicar porque motivo haveria concordância de posições entre várias entidades conhecedoras. Assim, parece aceitável, pelo menos por agora, deixar a definição num plano mais elementar.

Quanto ao Subjectivo, refere-se por oposição ao Objectivo, a afirmações acerca do que é contingente e arbitrário, as paixões, aquilo que é parcial e próprio do sujeito individual.

Munidos com estas definições, talvez simplistas, tentaremos primeiro esclarecer o conceito de Entropia e se possível encontrar o local próprio para colocar tal conceito.

III Entropia Termodinâmica e Entropia Estatística

A palavra **Entropia** foi introduzida por Clausius, derivada da palavra grega que significava Transformação, e era encarada como a medida da "potência de transformação" ou "capacidade de transformação" de um corpo.

Na perspectiva clássica de Clausius, da termodinâmica das máquinas térmicas, a Entropia era definida da seguinte forma:

$$dS = \left(\frac{dq}{T} \right)_{rev} \quad (1)$$

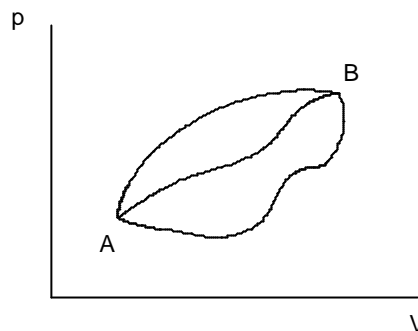
Para assentar ideias é necessário explicar sumariamente o significado desta expressão.

Considerem-se dois estados de equilíbrio A e B de um sistema físico Σ ¹, e a transformação reversível que leve o sistema Σ do estado A ao estado B. Se os estados do sistema podem ser representados por pontos num diagrama (p,V), e como em geral são possíveis muitas transformações reversíveis entre A e B, essas transformações serão representadas por diversos caminhos, em geral diferentes, entre os pontos A e B, como se mostra na figura seguinte.

¹ Por exemplo, uma mesma quantidade de um gás a diferentes volumes e pressões. Temos o mesmo sistema físico em dois estados, caracterizados por valores diferentes da pressão p e temperatura T, sendo ambos estados de equilíbrio.

Considere-se agora o integral seguinte:

$$\int_A^B \frac{dq}{T} = \int_z \frac{dq}{T} \quad (2)$$



estendido a um caminho de A a B a que chamaremos ζ . Pode mostrar-se que o integral (2) é independente de ζ , dependendo apenas dos pontos de partida e de chegada A e B. Então, se forem ζ_1 e ζ_2 dois caminhos de A a B tem-se:

$$\int_{\zeta_1} \frac{dq}{T} = \int_{\zeta_2} \frac{dq}{T} \quad (3)$$

A propriedade definida pela relação (3) permite definir uma função de estado do sistema a que chamamos Entropia, do seguinte modo:

Escolha-se um estado de equilíbrio padrão O ². Se for A um outro estado de equilíbrio qualquer teremos:

$$\int_O^A \frac{dq}{T} = S(A) \quad (4)$$

onde o integral se toma ao longo de um caminho reversível qualquer que una O a A. A função $S(A)$ chama-se Entropia do sistema no estado A, e como este integral depende apenas e só dos pontos O e A podemos dizer que (4) é apenas função do ponto A uma vez que o ponto O é fixo.

De (4) segue-se imediatamente (1).

Considere-se agora a função de estado

² Este estado padrão é completamente arbitrário nesta altura.

$$U = U(S, V, n_i) \quad (5)$$

isto é, uma função real da entropia S , do volume do sistema V , e do número de partículas n_i ³. Segue-se que:

$$dU = T dS - p dV + \sum_i \mu_i dn_i \quad (6)$$

Retomando o objectivo inicial, podemos já tecer algumas considerações sobre este conceito de Entropia. Com efeito, baseados na expressão (6), K. Denbigh e J.S.Denbigh [1] argumentam:

Aqui, as variáveis que determinam a variação de entropia dS são U , V , e os n_i , cujos diferenciais são as variações de energia interna, volume e número de moles respectivamente. Poder-se-á por em dúvida que elas sejam perfeitamente objectivas ?

Seguidamente continuam com a afirmação que parece um pouco apressada, ou pelo menos discutível:

Senão, segue-se que nas condições descritas pela equação de Gibbs, a variação de entropia dS é também perfeitamente objectiva. Não pode haver diferença na objectividade das várias variáveis intervenientes na equação.

Não se pretende por em dúvida a objectividade das variáveis U , V , n_i , mas parece pelo menos perigoso concluir sobre o carácter objectivo ou subjectivo de uma grandeza por um meio semelhante ao de uma "análise dimensional". Com efeito, se bem que a soma de duas áreas seja uma área, ou de

³ n_i é a abreviatura de n_1, \dots, n_n que representam os números de partículas presentes no sistema das espécies 1, ..., n.

duas energias seja uma energia, isto não permite estender este tipo de análise a conceitos puramente filosóficos como os de objectividade ou subjectividade. Assim, apesar de não ser de rejeitar este tipo de argumentação de forma definitiva, deve pelo menos por agora por certas reservas à sua aceitação sem uma reflexão mais profunda.

Esta Entropia Termodinâmica parece não conduzir longe quanto à sua natureza, até porque o edifício da termodinâmica clássica foi construído a partir de bases quase exclusivamente empíricas que, só por si, não nos pode conduzir ao fulcro da questão pois esgota-se no segundo princípio.

Antes de passarmos a uma revisão do conceito estatístico de Entropia, é importante referir no entanto que argumentos como o de Grad [2] que observa que uma variação na entropia estimada pode ocorrer **"quando alguma faceta relevante do problema em mãos é alterada, mesmo que apenas na mente do observador"**, não resistem ao contra argumento de Denbigh [3] de que este não pode ser um critério de subjectividade pois que **"afinal, não consideramos a idade de uma rocha como sendo subjectiva apenas porque a estimativa dessa idade esteja sujeita a revisão !"**, mas também este contra argumento em nada reforça a sua objectividade mantendo-nos precisamente ao nível do ponto de partida.

Os fundadores da Mecânica Estatística criam que a termodinâmica se devia basear numa teoria mais fundamental, crença essa perfeitamente legítima senão mesmo desejável.

Em Mecânica estatística é usual começar por afirmar que sistemas macroscópicos contendo digamos 10^{+23} partículas, não podem ser, no seu estado mecânico, conhecidos por nós.

Aqui é necessário esclarecer alguns pontos relativos à discussão encetada no Capítulo II, pois que me parece falaciosa a análise feita por Denbigh [4] acerca da natureza objectiva da afirmação anterior.

O conceito de objectividade colectiva que foi adoptado até aqui, coincide perfeitamente com o definido por Denbigh, no entanto mantenho que, apesar de ser um conceito independente da presença do homem no mundo, ele evidentemente deve estar relacionado com a existência de algo que conhece, uma consciência, pois caso contrário não só o universo seria completamente desconhecido, mas nem sequer se poderia falar de "afirmação" pois que nenhum ser a poderia emitir. Há pois a necessidade de admitir a existência de algo consciente, que possa ao mesmo tempo observar e afirmar, algo que seria uma espécie de "olho" do universo que lhe permita observar-se a si próprio.

Posto isto passemos à exposição de Denbigh:

Quanto ao que diz respeito à afirmação "não podem ser conhecidos por nós", isto é evidentemente inteiramente verdadeiro - e no entanto a introdução do "nós" é perfeitamente desnecessária.

O que se põe seriamente em causa é que seja legítimo afirmar:

"não podem ser conhecidos por quem quer que seja."

que era o que se obtinha retirando o "nós".

De facto, não podemos sem ambiguidade ou polémica afirmar tal coisa pois trata-se de uma generalização das nossas limitações a entidades conhecidas perfeitamente desconhecidas, e que segundo a nossa definição leva imediatamente à subjectividade. Uma análise como a citada parece intensamente antropomórfica senão mesmo egocentrista. Voltaremos a esta questão mais adiante, numa altura em que faremos divergir um pouco a discussão para campos mais perigosos.

Voltemos então às questões técnicas. Considere-se a fórmula de Boltzman

$$S = K \cdot \ln W \quad (7)$$

Esta equação indica-nos que a Entropia de um sistema é monótona com o número de compleições do sistema W , isto é, o número de microestados possíveis compatíveis com o macroestado actual, ou seja, o macroestado em que o sistema se encontra de facto.

Esta expressão foi uma das grandes responsáveis pelo despoletar da discussão em que nos envolvemos, pois que é sem dúvida verdade que não conhecemos o microestado particular em que se encontra o sistema em determinado instante, mas apenas o número W de todos os possíveis microestados que podem ocorrer nesse instante. Com efeito, a conexão entre a Mecânica Estatística e a Teoria da Informação sugere que a Entropia de um sistema seja interpretada como a medida da ignorância do nosso conhecimento acerca desse sistema.

Parece agora que somos empurrados no sentido que conduz à subjectividade do conceito de Entropia, uma vez que nos é impossível provar que a nossa ignorância é a ignorância de qualquer consciência conhecedora.

Para fugir a este problema Tolman engendrou uma argumentação deveras engenhosa. Afirmar ele que [5]:

Dum ponto de vista preciso, parece esclarecedor sublinhar que a Entropia pode ser vista como uma quantidade que a Termodinâmica define ... e é interpretada estatisticamente ...

assim, Tolman deixa a resolução do problema ao nível da Termodinâmica o que, como já foi dito, não parece conclusivo, remetendo a interpretação estatística para um plano de mera possibilidade de interpretação, talvez até falsa ou pelo menos falível.

Obtivemos assim uma visão um pouco mais esclarecedora do problema interpretativo da Entropia, e de algumas posições possíveis a esse respeito. Nos próximos capítulos passaremos a uma discussão de alguns aspectos mais pormenorizados da questão.

IV Entropia e Probabilidade

Este tema é aqui introduzido, não para resolver o problema central que nos propusemos abordar, mas para tentar esclarecer de uma maneira intuitiva o carácter estatístico do conceito de Entropia. Por vezes, este recurso à estatística é tomado como bom indicador de subjectividade pois que a estatística aparece por vezes como o tratamento possível de situações em que se revela a incapacidade de lidarmos com todos os factores relevantes de um certo problema.

Para lá de outros pormenores técnicos, pode-se dizer que a Entropia é uma medida quantitativa da desorganização de um sistema físico. O conceito de Entropia é de uma generalidade impressionante. Para ter uma noção dessa generalidade remete-se o leitor para a obra "ENTROPIA uma nova visão do mundo" de J. Rifkin, onde o conceito é utilizado para análises que vão desde a Física, passando pela Economia, até à Metafísica. O conceito de Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica são das conquistas mais espectaculares da ciência actual. Mas em que consiste a Segunda Lei ?

A Segunda Lei da Termodinâmica, que se resume na seguinte expressão:

$$\Delta S \geq 0 \quad (8)$$

onde a igualdade vale para processos reversíveis. Em linguagem comum, traduz-se a expressão anterior dizendo que em sistemas físicos fechados, a Entropia S não diminui, isto é, a variação de Entropia é sempre positiva, ou quando muito nula no caso de processos reversíveis.

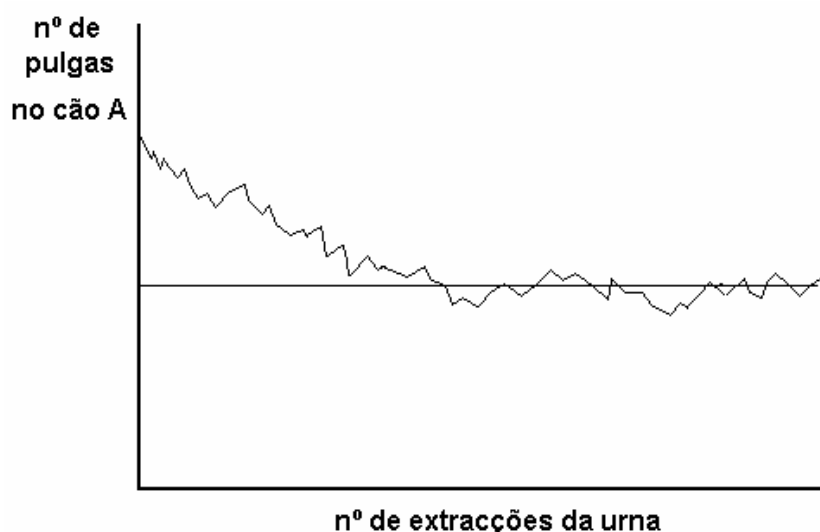
De facto, repare-se como é difícil manter as coisas limpas e arrumadas. Esta dificuldade não é accidental mas sim consequência desta lei fundamental da Termodinâmica.

A lei do aumento de Entropia manifesta-se em tudo aquilo que se passa em torno de nós, e ao medir o grau de desorganização de um sistema faz-nos sentir também a irreversibilidade da "seta do tempo".

Para deixar claro este conceito de irreversibilidade da seta do tempo torna-se conveniente deixar bem claro que também esta Segunda Lei é estatística e não absolutamente determinista. Os matemáticos Paul e Tatiana Ehrenfest elaboraram um modelo matemático simples que simula a

Mecânica Estatística do fluxo de um gás de um recipiente A para outro recipiente B [6]. Imaginem-se dois cães, o cão A e o cão B, que representam os dois recipientes: o cão A tem pulgas, num total de N , enquanto o cão B não tem nenhuma pulga. Cada pulga é amestrada e reconhece quando a chamam pelo seu número. Neste modelo as pulgas representam as partículas do gás. Perto dos dois cães encontra-se uma urna contendo N bolas numeradas de 1 a N . Retira-se então uma bola ao acaso da urna, digamos a bola nº i , e grita-se: "Pulga nº i salte!", e nessa altura, a pulga com esse número salta se um cão para o outro. A bola é repostada de novo na urna e misturada com todas as outras e nova bola é então retirada, repetindo-se o processo quantas vezes se quiser. Cada pulga tem assim igual probabilidade de ficar no cão em que se encontra ou de saltar para o outro.

A princípio todas as pulgas estão no cão A, e é certo que a primeira pulga saltará de A para B. Já não é no entanto certo que a segunda pulga salte de A para B, mas, a probabilidade de que a segunda pulga salte de B para A é de $1/N$, portanto uma pequena probabilidade comparada com a probabilidade $1-1/N$ de que o salto seja de A para B. Assim, a princípio haverá um fluxo positivo de pulgas de A para B, mas quando o número de pulgas em A e B for sensivelmente igual, a probabilidade de uma pulga ser chamada a saltar de A para B será sensivelmente igual à probabilidade do salto se dar de B para A, e rondará o valor de $1/2$, sendo o número de pulgas em cada cão de cerca de $N/2$ com pequenas flutuações. Claro está que não há nenhuma razão para que, a certa altura, se verifique um grande fluxo de pulgas para um dos lados, no entanto esse fenómeno será altamente improvável se o número N de pulgas for grande. Pelo contrário, se o número de pulgas for pequeno é já bastante provável que, de tempos a tempos todas as pulgas se concentrem num dos cães.



O gráfico acima que parece dispensar explicações, mostra claramente a tendência do número de pulgas em cada cão para o valor médio $N/2$ se bem que hajam flutuações em torno dessa média.

Com este modelo, assimilando cada pulga a uma molécula de um gás, estas, tal como as pulgas, vão realizar a distribuição mais provável e repartir-se uniformemente por todo o volume disponível nos dois recipientes. A situação inicial, com todas as pulgas no mesmo cão, era uma situação de reduzida Entropia, havia uma certa organização na posição das pulgas no sentido em que, sabíamos com certeza onde as poderíamos encontrar uma certa pulga, enquanto que na situação de equilíbrio final temos uma Entropia muito maior pois qualquer pulga tem à priori, igual probabilidade de se encontrar em qualquer cão.

Para reduzir a Entropia do sistema temos agora duas hipóteses: ou esperamos pelo acaso milagroso que levaria todas as pulgas a concentrarem-se sobre um só cão, acaso esse com probabilidade de ocorrência quase nula, ou então temos de intervir de alguma forma sobre o sistema por forma a "espantar" todas as pulgas de um dos cães o que se conseguiria, por exemplo, aplicando-lhe uma coleira insecticida potente.

Esta tendência dos sistemas fechados para realizarem a distribuição de máxima probabilidade, corresponde na Mecânica Estatística à segunda Lei da Termodinâmica, que obriga a entropia a aumentar, ou, quando muito, a manter-se constante.

Voltemos agora à "seta do tempo".

Considere-se que um observador é informado da situação inicial da experiência dos cães, sendo-lhe dito que, por exemplo, o infeliz do cão A era inicialmente portador de 1000 pulgas. Este observador é o feliz proprietário de uma Máquina do Tempo, capaz de o levar a qualquer instante no passado ou no futuro, mas, infelizmente, o dispositivo de controle do aparelho encontra-se avariado por forma que ele não sabe se se está a adiantar ou a atrasar no tempo. Posta a máquina em funcionamento, o observador começa a anotar o número de pulgas do cão A, obtendo os seguintes resultados:

1ª medição	983 pulgas
2ª medição	624 pulgas
3ª medição	419 pulgas
4ª medição	502 pulgas

5ª medição	500 pulgas
6ª medição	503 pulgas
7ª medição	489 pulgas

Pergunta-se agora se o observador na tal máquina do tempo descontrolada é capaz de organizar cronologicamente estas medições. A resposta é afirmativa. Com efeito, observando-se o gráfico anterior poder-se-á dizer que há grande probabilidade de que a 1ª observação seja anterior à segunda, e que esta seja anterior à terceira, mas, para as observações posteriores já não seria seguro apostar. O mais provável é que a ordem porque foram feitas as observações fosse a seguinte:

$$1^a \rightarrow 2^a \rightarrow 3^a \rightarrow \text{as outras}$$

quanto às 4ª, 5ª, 6ª e 7ª não há qualquer indicação sobre a sua ordem cronológica pois flutuam pouco em torno do valor médio de 500 pulgas e só poderemos afirmar que, provavelmente, foi já atingido o equilíbrio.

Assim o observador pode estabelecer o sentido de uma seta imaginária, a seta do tempo, representada no diagrama acima pelo símbolo \rightarrow , que aponta do passado para o futuro, sentido esse que, para um número N grande de pulgas terá probabilidade quase igual a 1 (quase certeza) de ser a correcta uma vez que é a seta que aponta no sentido da Entropia crescente.

Uma característica extremamente importante da Segunda Lei é que ela, aparentemente contrariando o próprio objectivo da Mecânica Estatística, não pode ser deduzida apenas a partir das leis da mecânica clássica uma vez que a irreversibilidade é um conceito perfeitamente alheio à mecânica clássica; as leis clássicas são incapazes de distinguir passado de futuro e do ponto de vista microscópico o tempo pode ter qualquer sentido.

Enquanto que do ponto de vista de um átomo não há envelhecimento, um amontoado de átomos, organizados de certa forma tal como o que sucede no corpo de um animal ou mesmo de uma bactéria, têm uma idade. A irreversibilidade, bem como os cabelos brancos ou o enrugar da pele são algo de inconcebíveis para um átomo, e em geral é algo de inconcebível para toda a microfísica. Uma

ilustração deste facto é magistralmente exposta por R. Pagels [7] com o episódio do fumo do cachimbo de Neils Bohr.

Retomando a nossa questão fundamental, podemos perguntar pois, que tem tudo isto que ver com a questão da subjectividade ?

Parece significativo que a questão da Entropia se ponha quando damos o salto qualitativo do microcosmos para o macrocosmos. Todos parecem concordar com o sentido que se deve atribuir à seta do tempo; antes de tomar o comboio para um qualquer destino são instantes indubitavelmente "anteriores" àqueles que se vivem quando nos encontramos já nesse destino. Toda a vida comum parece conhecer intuitivamente o sentido do tempo e isto talvez porque a evolução biológica levou a que os aparelhos sensoriais ignorassem simplesmente os fenómenos próprios do microcosmos para se aperceberem apenas das propriedades globais das distribuições, isto é, os aparelhos sensoriais operam em termos de valores médios e estão portanto particularmente orientados para a sobrevivência no macrocosmos que é precisamente o reino da irreversibilidade e da Entropia. Em particular, o suporte nervoso e fundamentalmente o cérebro, profundamente dirigido para a interpretação do macrocosmos, poderia ser um dado a considerar no sentido da subjectividade da interpretação do macrocosmos em geral, e da entropia em particular, ficando o objectivismo limitado às manipulações racionais dos conceitos tal como são apresentados pela física do microcosmos. No entanto, se continuarmos a adoptar uma definição de objectividade colectiva, este discurso aponta para o objectivismo da interpretação do macrocosmos uma vez que parece não haver grande discordância por exemplo sobre a questão do fluir do tempo, se não considerarmos alguns grupos minoritários de desequilibrados mentais.

V Entropia Evolução e Metafísica

Neste capítulo pretende-se esclarecer algumas implicações da Segunda Lei num campo considerado do domínio do Subjectivo por muitos que continuam a querer, teimosamente, relacionar o problema da evolução e das origens com questões teológicas.

Neste assunto em particular, a Segunda Lei torna-se incómoda quando tentamos reflectir sobre o sentido a dar à presença no mundo de qualquer consciência, pois como consequência da sua aplicação, este capítulo poderia chamar-se:

"Como a Entropia mata a esperança"

como parecerá claro quando se mostrar a inevitabilidade da morte térmica.

Paul Davies [8] na sua obra "Deus e a nova Física", no início do capítulo "Génese" dedicado à discussão da Criação, faz duas citações que, pela sua pertinência e pelo humor que consegue introduzir pela combinação das duas, passo a reproduzir:

"No princípio Deus criou o céu e a Terra."

Génesis I:I

"Mas não estava lá ninguém para ver."

Steven Weinberg in

Os primeiros três minutos.

De facto o contraste de mentalidades que ressalta quando se justapõem estas duas afirmações é marcante de uma certa forma de estar no mundo. Apesar de um certo retorno ao misticismo, as conquistas do homem fizeram de certa maneira perder o sentimento de dependência para adquirirmos

um sentimento de força. Em entrevista concedida à revista "Playboy" [9] o teólogo americano Hamilton conta um episódio significativo:

Uma noite encontrava-me no jardim com um dos meus filhos, que devia identificar determinadas constelações para um trabalho de ciências. Quando era jovem e me encontrava assim sob o céu estrelado, lembro-me que ficava possuído por tudo aquilo que se esperava de mim: o temor, o sentimento de pequenez, a dependência. Mas o meu filho, cidadão todo inteiro, disse-me depois de ter localizado as constelações de que precisava: "Quais são as que colocámos lá em cima papá?". Estava interessado no que poderia fazer lá em cima, e nada interessado no que podia sentir cá em baixo. Tornara-se um homem tecnológico e isto significa alguma coisa, teologicamente falando.

É este desprendimento de facto das coisas de Deus, e este orgulho de ser homem que determinou as reflexões durante largos anos, e ainda as domina. Quer queiramos quer não, a reflexão científica invadiu os assuntos que tradicionalmente eram da competência de Deus.

Tal como Paul Davies diz, e muito correctamente, seja qual for o sistema de pensamento com pretensões a fornecer um sistema de compreensão do mundo físico terá de tomar uma posição sobre a sua origem, e no fundo a escolha realiza-se entre um número reduzido de hipóteses: ou o Universo sempre existiu, ou então teve um começo mais ou menos abrupto em determinado momento do passado.

Ambas as alternativas têm sido fonte de grande perplexidade para teólogos, filósofos e cientistas, e ambas arrastam dificuldades óbvias para o leigo na matéria.

As questões fundamentais são as seguintes - se o Universo não teve origem no tempo, isto é, se sempre existiu, então terá uma idade infinita, e este conceito deixará muita gente na dúvida. Se já aconteceram um número infinito de acontecimentos, porque motivo vivemos agora ? Porque motivo não vivemos já em algum momento do passado ? E mesmo pondo de parte esta questão, a Segunda Lei

implica que, depois de um tempo infinito o Universo deveria estar num estado de equilíbrio térmico, de máxima Entropia, e nesse caso certamente não poderíamos estar aqui a discutir este problema. Por outro lado, se o Universo começou, então temos de aceitar que surgiu repentinamente do nada, o que implica a existência de um acontecimento primordial, e sendo assim, qual a sua causa ? Ou será que esta questão nem sequer tem sentido ?

Se o Universo tem uma reserva limitada de ordem, então está a mudar-se irreversivelmente para a desordem e a morte térmica é inevitável dissolvendo-se o Universo na Entropia que ele próprio criou. Neste caso torna-se imperioso que o Universo não tenha existido desde sempre pois que por certo já teria morrido também há um tempo infinito. Conclui-se pois que, aceitando por "boa" a Segunda Lei, o Universo nem sempre existiu.

Esta simples conclusão, baseada na Segunda Lei, tem implicações profundíssimas na teologia, metafísica e religião ocidentais. O Deus criador, que trouxe à existência o Universo, ideia firmemente enraizada na cultura Judaico-Cristã passa a arrastar consigo mais problemas que aqueles que pretende resolver.

A discussão seguinte nada tem que ver com a Entropia, mas é ela, e a Segunda Lei que afinal a despoletam, e a dificuldade prende-se com a natureza do tempo. Uma discussão detalhada deste assunto é-nos apresentada por Paul Davies [10] e aqui apenas apresentarei a pequena dificuldade que, qualquer que seja a resposta que lhe queiramos dar, faz ruir o conceito do Deus criador, quer ele seja temporal ou intemporal.

Se o tempo pertence ao Universo físico (como é aceite desde o aparecimento dos trabalhos de Einstein), e está sujeito às leis da Física, tem necessariamente de ser incluído no Universo supostamente criado por Deus. Deve então dizer-se que Deus criou o tempo, ou seja, Ele foi a sua causa. Mas então, Ele, como causa, deve preceder o efeito o que se torna absurdo uma vez que "não há" o antes do efeito. A "causação" é uma actividade intrinsecamente temporal, portanto é condição necessária que exista tempo antes de algo ser criado, e assim, a imagem ingénua de Deus "a existir" antes do Universo é claramente absurda uma vez que não podia existir o "antes".

* * *

Outro problema sobre a evolução é o seguinte:

Segundo a nossa melhor compreensão do Universo primordial, parece que ele começou no mais simples estado de todos - o equilíbrio termodinâmico - e que as estruturas complexas actualmente observadas só subsequentemente apareceram. Pode pois argumentar-se que o Universo inicial é, na realidade, a "coisa" mais simples que se pode imaginar. Além disso, se a predição de uma singularidade inicial se aceitar como autêntica, o Universo começou num estado de temperatura, densidade e energia infinitas. Não será isto pelo menos tão plausível e transcendente como a ideia de um Deus ?

æ primeira vista, a pretensão de que a complexidade do Universo surgiu do simples estado inicial parece estar em flagrante contradição com a Segunda Lei que exige precisamente o oposto - Que a ordem ceda lugar à desordem por forma que as estruturas complexas tendam para a decadência até ao ponto final estacionário de simplicidade completamente caótica. Esta aparente contradição levou a que se emitisse a opinião de que no começo deveria ter existido a organização máxima da energia, um tempo em que Deus deu corda ao relógio, e um dia virá em que o relógio parará se Ele não voltar a intervir.

Sabe-se hoje que esta ideia não está de todo correcta⁴, e o estado inicial deve, de facto, ser visto como o estado de máxima simplicidade e equilíbrio, e o aparente conflito com a Segunda Lei só recentemente foi resolvido.

A solução assenta na constatação de que a Segunda Lei só se aplica a sistemas isolados, e é fisicamente impossível isolar seja que sistema for da Gravidade, e mesmo que houvesse um "escudo" contra a gravidade, o sistema não poderia escapar à acção da sua própria gravidade.. Vejamos como isto é possível.

Sabemos que, dispondo de uma fonte exterior de energia a ordem pode ser criada num sistema à custa do aumento da desordem global do Universo. É o que se passa com a Terra, cuja complexidade é gerada à custa do banho de radiação solar. Mas isto só é possível à custa da degradação irreversível da própria fonte de energia. Vejamos como do mesmo modo e espontaneamente um Universo em expansão pode gerar ordem.

⁴ Para uma demonstração simples desta afirmação remetemos o leitor para o APÊNDICE III, "Indício experimental de um começo quente".

Consideremos um exemplo simples que mostra como a própria expansão se substitui a Deus no acto de dar corda ao relógio.

A partir do instante inicial, a substância cósmica arrefece, e teremos uma certa temperatura em cada fase da expansão. No entanto a temperatura dependerá também, até certo ponto, da natureza dessa substância. Para a energia electromagnética, a temperatura decresce de forma inversamente proporcional ao volume ocupado, isto é, duplicando o volume a temperatura cairá para a metade. Por outro lado, a matéria, como por exemplo o Hidrogénio, arrefece de forma inversamente proporcional ao quadrado do volume, portanto muito mais rapidamente. Isto traduz-se escrevendo:

$$\begin{aligned} T_{V_2}^r - T_{V_1}^r &\propto \frac{1}{V_2 - V_1} \\ T_{V_2}^m - T_{V_1}^m &\propto \frac{1}{(V_2 - V_1)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

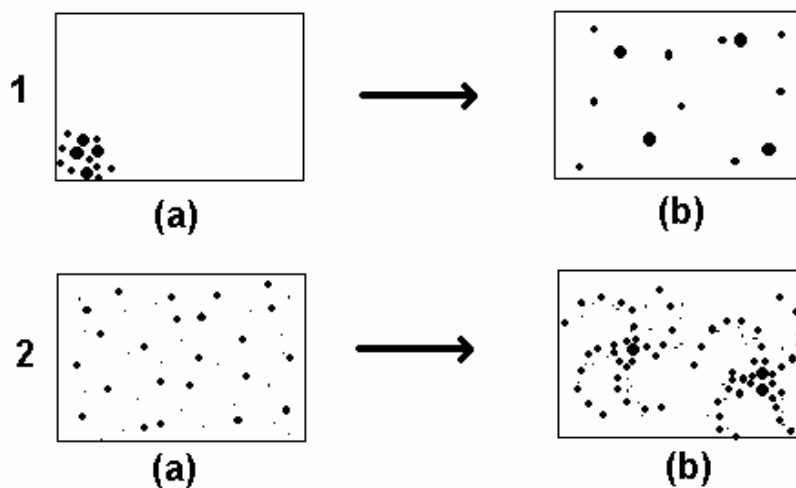
onde $T_{V_i}^r$ e $T_{V_i}^m$ são respectivamente as temperaturas do campo de radiação no volume V_i , e a temperatura da matéria no volume V_i . Isto vai implicar que enquanto o Hidrogénio se liberta do "calor radiante", o Universo em expansão faz surgir um gradiente de temperatura entre esses dois componentes da substância inicial, matéria e radiação, e tal gradiente é uma fonte ideal de energia útil. Assim, pelo menos em princípio, a expansão torna-se capaz de criar ordem onde anteriormente reinava a desordem.

Mas evidentemente o problema não fica por aqui. Deslocando a responsabilidade da ordem para a gravidade pergunta-se de seguida de onde vem ou como é que a ordem surgiu no campo gravitacional ? E estas questões "de onde ?" e "como ?" quando cessarão ?

O problema talvez tivesse uma pista de resolução se fosse possível medir a Entropia da Gravidade, mas infelizmente esta possibilidade encontra-se ainda em aberto.

Entretanto, a título de ilustração, repare-se no seguinte: em sistemas onde a acção da gravidade é muito pequena, como no caso de um gás num balão, os estados ordenados, de baixa Entropia, são extremamente improváveis. Por contraste, um sistema completamente desordenado sujeito à acção dominante dum campo gravítico é muito menos provável que um sistema organizado.

Repare-se na figura seguinte onde \rightarrow é a seta do tempo, e onde se representam os dois casos: o primeiro é um contentor de gás, e o segundo poderá por exemplo ser um sistema estelar.



Considerando que o estado de Entropia máxima é o mais provável, no caso do gás (1), o estado desorganizado (b) é o de entropia máxima, mas no caso das estrelas (2), o estado de entropia máxima é o mais organizado (b), isto respeitando o que foi dito anteriormente sobre a relação entre a entropia e o sentido da seta do tempo. A questão que fica é a seguinte: não contraria isto a Segunda Lei ? Poder-se-ia pensar que, ao aceitarmos a relação entre Entropia e Organização, no caso das estrelas, a seta do tempo deveria apontar no sentido oposto para que a Segunda Lei não fosse violada.

Eis aqui um caso em que não seria seguro apostar sobre qualquer das hipóteses.

VI Entropia, Ordem ou Desordem ?

A questão abordada no final do capítulo anterior merece alguma reflexão. Com efeito surgem situações similares de aparecimento de "ordem" noutros domínios, havendo alguns casos em que se torna obscura a relação exposta atrás entre Entropia e Desordem. Há pois que rever os conceitos que temos vindo a utilizar de Ordem e Desordem.

Além da situação criada pela presença do campo gravítico, há ainda o da cristalização espontânea de uma substância super arrefecida. Se este processo se dá adiabaticamente, a Entropia do sistema aumente, mas, na linha do conceito de ordem que temos vindo a utilizar (que ainda não foi definido rigorosamente), não se pode afirmar que a rede cristalina seja mais desordenada que o fluido inicial.

O problema está pois em clarificar o que se entende por Ordem ou Desordem.

Salta à vista que aquilo a que nos temos vindo a referir como sendo "ordem" é um conceito configuracional, isto é, um conceito quase geométrico, intimamente ligado à capacidade de um observador distinguir uma estrutura no sistema. Diz-se que há desordem quando a percepção humana não distingue mais que uma mancha uniforme e é incapaz de isolar nela partes definidas, e diz-se que há ordem se o sistema tem uma configuração, uma estrutura, mais ou menos complexa, na qual se podem claramente isolar certos domínios particulares. No entanto será isto assim ?

Ordem ou desordem não são propriedades das "coisas" em si mesmas, podendo apenas ser definidas em estreita relação com a consciência que as observa. Assim, Ordem e Desordem são conceitos puramente subjectivos, mesmo aparentes, fruto de uma história humana cuja tradição é a de moldar formas e organizar espaços, fruto de uma obsessão pela utilidade e pelo poder de controle sobre o meio ambiente e a natureza.

Alguns autores tiveram consciência deste facto ao observarem, por exemplo, quando um gás se expande a partir de uma parte do recipiente para vir a ocupar todo o volume disponível, este fenómeno

pode ser encarado de duas maneiras antagónicas: como aumento de Desordem pelo facto das partículas se tornarem mais dispersas e portanto ser muito mais difícil localizar uma partícula determinada, mas também, e precisamente ao contrário, como aumento de Ordem pois que o sistema se torna mais uniforme, passando de uma situação inicial assimétrica para uma situação final em que se encontra uniformemente distribuído.

Estes dois pontos de vista apresentam a diferença essencial de encararmos a ordem numa perspectiva microscópica de localização de uma partícula determinada ou na perspectiva macroscópica de valores médios. Com efeito, No estado inicial é mais fácil determinar as posições das partículas uma vez que elas estão confinadas a um volume menor (perspectiva microscópica), mas, ao contrário, o sistema perde homogeneidade de densidade (perspectiva macroscópica) por exemplo.

Destes exemplos ressalta que a Entropia não pode ser entendida da maneira intuitiva que temos vindo a sugerir sem que se defina perfeitamente o conceito de Ordem, e por oposição, o seu antónimo Desordem, e caso isto não seja possível, será necessário abandonar a relação Entropia-Desordem.

A tarefa de definir Objectivamente o conceito de Ordem não parece exequível, e portanto vamos abandonar desde já a relação anterior, tentando encontrar alguma alternativa viável.

Entretanto, parece útil que se esclareça o sentido em que continuaremos a utilizar a palavra Ordem. Mesmo sem uma definição objectiva de Ordem,, é possível continuar a usar o conceito no nosso discurso sem que se estabeleça grande confusão se conseguirmos traduzir de alguma forma a ideia subjacente.

No que se segue continuaremos a encarar a Ordem na perspectiva quase geométrica, relacionada com o reconhecimento por parte do observador de um certo padrão quer espacial, quer de comportamento dinâmico, o que não obriga a grande esforço de adaptação a um conceito completamente novo e intricado.

A vantagem de deixarmos o conceito neste plano é o de ele ser bastante intuitivo. Ao observarmos um carreiro de formigas reconhecemos nele certa Ordem. Algumas formigas "vão" enquanto outras "vêm", seguindo uma trajectória mais ou menos sinuosa mas bem definida. Trata-se de uma situação completamente diferente da que observaríamos se todas as formigas corressem a diferentes velocidades em todas as direcções, sem eira nem beira, chocando aleatoriamente umas com as outras. A esta segunda situação chamamos normalmente Desordem.

Outro problema que se põe ao tentarmos manter a célebre relação Entropia-Desordem é o da aditividade da Entropia.

Sabe-se que se temos um sistema A constituído por dois subsistemas A_1 e A_2 , se forem S_1 e S_2 as entropias associadas a cada um dos subsistemas, a entropia S do sistema $A = A_1 \cup A_2$ será $S = S_1 + S_2$.

$$A = A_1 \cup A_2 \Rightarrow S = S_1 + S_2 \quad (10)$$

Parece à primeira vista que, juntar Desordem com Desordem resultará certamente em ainda mais Desordem, mas, atentando melhor na questão será de facto isto assim ?

Pelo menos um contra argumento pode ser aqui apresentado, é o caso dos estereogramas de pontos aleatórios. Este exemplo parece mostrar que o caos pode relacionar-se com ainda mais caos de uma forma ordenada.

A ideia deste estereograma é utilizar conjuntos completamente aleatórios de pontos e com eles obter duas imagens. Deve salientar-se que cada imagem é de facto aleatória e, se bem que por vezes o fenómeno que vou descrever não se dê, outras vezes ele é espectacular.

Ambas as imagens são pois aleatórias, mas um observador humano, devido à arquitectura dos seus órgãos sensoriais, ao sobrepor as duas imagens no seu campo visual distingue um padrão bem definido, e o que se vê é uma imagem tridimensional⁵.

⁵ A figura abaixo é reprodução de "A Nova Aliança", I.Prigogine, I.Stengers; Ciência Aberta 1986.

O cérebro é sensível á correlação de funções aleatórias !

Aqui, adoptando a nossa definição intuitiva de ordem temos um caso em que a ordem surge de uma sobreposição de dois padrões aleatórios. É claro que isto só por si não põe em causa a aditividade da Entropia, uma vez que sobre as duas figuras há a intervenção de uma entidade exterior, o observador, e portanto não estamos perante um sistema isolado, mas é de salientar esta capacidade que o cérebro exhibe de retirar ordem do meio da desordem. Trata-se de uma obsessão cerebral ordenar o que se lhe apresenta desordenado. Não sabemos como o cérebro executa essa correlação, e os termos "soma" ou "união" dos dois conjuntos aleatórios podem não ser correctos, trata-se de um problema de neurofisiologia que parece não estar ainda resolvido.

Além disto parece interessante salientar que, apesar de por vezes ser difícil observar o padrão tridimensional quando se tenta a experiência pela primeira vez, depois deste primeiro esforço é quase

imediatamente o reconhecimento mesmo se o tentarmos algumas semanas depois, isto é, o cérebro humano consegue de alguma forma memorizar a correlação de milhares de bits de informação aleatória.

* * *

Pode agora perguntar-se o porquê de toda esta exposição. Parece que, como conclusão, o que se retira de toda esta discussão é o facto de se ter de abandonar, a não ser em casos simples, a relação Entropia-Desordem, substituindo-a a nível intuitivo por uma nova relação do tipo Entropia-Desinformação. Esta nova relação é sugerida ao nível da Teoria da Informação, e pelo que foi já dito, é algo de totalmente diferente da relação proposta anteriormente. De facto, o conceito de Informação, ao contrário do de Desordem, é um conceito perfeitamente definido e quantificável, e se bem que por vezes sejamos tentados a confundirlos é no momento da sua identificação que é introduzida claramente a carga de subjectividade que gera tanta controvérsia. É sobre este assunto que versará o capítulo seguinte.

VII Entropia e Informação

Já referimos no Capítulo III a formula de Boltzman que relaciona a Entropia de um sistema com o número de microestados acessíveis a esse sistema. Como o Logaritmo é uma função crescente com o seu argumento, a Entropia é pois uma função monótona com o número de microestados acessíveis.

Suponhamos então um sistema qualquer, cujo número de microestados possíveis é W , e que estamos interessados em estudar uma certa propriedade P do sistema cujo valor representaremos por X . Se sabemos que os valores possíveis para X são X_1, X_2, \dots, X_n , e que W_1 microestados conduzem ao valor X_1 dessa propriedade, W_2 microestados conduzem ao valor X_2 , ... , W_n microestados conduzem ao valor X_n , então, a probabilidade de se obter o valor X_i ($i=1,2,\dots,n$) ao fazer uma medição da propriedade P , será:

$$P_i = P(x = x_i) = \frac{W_i}{W} \quad (11)$$

e para $X = X_j$ teremos:

$$P_j = P(X = X_j) = \frac{W_j}{W} \quad (12)$$

Os W_i são os pesos estatísticos referentes a cada macroestado e, dividindo (11) e (12) verifica-se facilmente que as probabilidades vêm proporcionais aos respectivos pesos estatísticos:

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{W_i}{W_j} \quad (13)$$

Repare-se que os pesos estatísticos são essencialmente degenerescências, e como tal, aceitamos para cada macroestado o princípio de equipartição de probabilidades, dizendo que, nestas condições não há microestados privilegiados, sendo todos eles (os acessíveis para esse macroestado) igualmente prováveis. São estas simples considerações que constituem a base da Mecânica Estatística. Vejamos agora como surge o problema da analogia entre estes conceitos e os introduzidos por Shanon quando fundou a Teoria da Informação.

Para Shanon, o conteúdo informativo de uma mensagem pode ser quantificado como sendo a variação da falta de informação, a que chamou incerteza, entre a situação inicial, antes de ser recebida a mensagem, e a situação final, após ser recebida a mensagem. Posto isto podemos estabelecer uma relação de conservação entre incerteza e informação [11], dizendo que a soma destas duas grandezas é constante e igual à informação máxima, o que se traduz pela relação

$$H + I = C^* = H_{\max} = I_{\max} \quad (14)$$

onde H corresponde à incerteza, I à informação, e H_{\max} e I_{\max} às situações de ignorância total e de conhecimento total.

A incerteza H é uma função da degenerescência W, como parece ser claro, pois que se a degenerescência é 1, estamos em presença de uma certeza, e a incerteza vai aumentando à medida que aumenta a degenerescência. Temos pois que:

$$H \equiv H (W) \quad (15)$$

sendo H função monótona com o argumento W.

Tendo em conta as relações (11) e (12) conclui-se que, para $W = W_i$ se tem que $W_i = 1/P_i$ e portanto:

$$H \equiv H \left(\frac{1}{P_i} \right) \quad (16)$$

Posto isto, e por uma discussão análoga á que permite estabelecer a fórmula de Boltzman [11], baseada na aditividade da informação⁶, obtém-se para a incerteza uma expressão formalmente idêntica à da Entropia:

$$H (W_i) = K \log (W_i) \quad (17)$$

o que se pode reescrever em termos de probabilidades:

$$H (P_i) = K \log (\frac{1}{P_i}) \quad (18)$$

Parece ser nesta altura que se começam a delinear as dificuldades quanto à interpretação desta expressão.

A propósito dos trabalhos de Boltzman, P. Peixoto [13] escreve:

Finalmente a Entropia saiu de todos estes trabalhos como identificada com a probabilidade de um estado ou com a medida aferidora da desorganização e da "desordem" do edifício molecular que constituía o sistema num certo instante.

e continua com a seguinte afirmação:

A "desordem" surge porque não sabemos em que microestado se encontra o sistema. "Desordem" é então essencialmente o mesmo que ignorância.

Se bem que a ideia seja sugestiva, e adoptada por inúmeros autores, pelo menos com um sentido semelhante, parece essencial notar que a palavra Desordem se encontra entre aspas. De facto é

⁶ A demonstração deste resultado faz-se de forma análoga à apresentada no Apêndice I "Fórmula de Boltzman".

no momento em que introduzimos no nosso discurso, sem prévias cautelas, os conceitos de Ordem e Desordem que estamos a introduzir subjectividade. Parece perfeitamente concebível que, apesar de não dispormos de informação sobre um determinado sistema isso não signifique que o sistema esteja desordenado. Se pusermos de lado a referência a este conceito que como já vimos atrás é puramente subjectivo, a questão da subjectividade não se coloca uma vez que "falta de informação" é um conceito perfeitamente objectivo.

A relação Entropia-Incerteza é assim perfeitamente objectiva e reforçada pela Teoria da Informação.

Parece perfeitamente objectivo afirmar que "não disponho de suficiente informação para apostar sobre o resultado de um sorteio de Totoloto que se realizará no futuro", o que não significa que haja desorganização quando do processo de extracção das bolas numeradas.

Vejamos um outro exemplo sugestivo. Considere-se uma bola escondida numa de muitas gavetas de um contador. A propósito deste exemplo podemos dizer que [14]

A incerteza em sabermos qual a gaveta em que se encontra o objecto traduz, de facto, uma certa falta de informação. Mas, a incerteza, ou falta de informação, é tanto maior quanto maior for o número de gavetas (possibilidades) n .

Tudo isto parece claro, mas de facto, não se descortina qual a relação entre esta situação e a Desordem ou o Caos. Pergunta-se então: Será que o sistema Contador-Bola está desorganizado ? Parece difícil afirmar tal coisa, e até a pergunta parece falha de sentido. Nem mesmo poderemos dizer que as ideias do eventual detective que pretende encontrar a bola estejam desorganizadas, simplesmente não se dispõe de informação suficiente para apontar a gaveta certa.

Mas põe agora a questão de saber, se aceitarmos o exposto acima, se a medida dessa falta de informação é ou não subjectiva. Sobre este assunto parecem defensáveis duas posições: é perfeitamente objectiva a afirmação da ignorância do observador, e como tal, dizer que a Entropia Estatística é uma codificação numérica de um estado de conhecimento confere a essa Entropia um estatuto de Objectividade; por outro lado, pode argumentar-se que se essa medida depende do estado

de ignorância do observador, ela depende de facto da consciência de quem observa e será pois um conceito subjectivo.

A propósito deste assunto, Prigogine e Stengers [15] escrevem:

É possível situar o nosso duplo papel de actor e espectador num contexto que explicite a situação do conhecimento teórico, tal como a evolução da física nos permite hoje concebê-la.

.
. . . mostrar que, de ora em diante, os conceitos físicos contêm uma referência ao observador, não significa de forma alguma que esse deva ser caracterizado de um ponto de vista "biológico", "psicológico" ou "filosófico". A física limita-se a atribuir-lhe o tipo de propriedade que constitui a condição necessária a toda a relação experimental com a natureza, a distinção entre passado e futuro, mas a exigência de coerência leva a procurar se a física pode igualmente reencontrar esse tipo de propriedade no mundo macroscópico.

Assim, no fundo, retomamos o ponto de partida com a interrogação de se os conceitos físicos actuais, que implicam o papel do homem simultaneamente como actor e espectador, como parece ser o caso da Entropia⁷, se ajustam ou não à definição de objectividade dada no Capítulo II.

* * *

A propósito do problema da evolução para o caos, a título de curiosidade, transcreve-se aqui uma afirmação de René Thom, o pai da Teoria das Catástrofes [16]:

⁷ Uma discussão semelhante pode surgir no âmbito da Mecânica Quântica. Para uma discussão bastante aprofundada desta temática remete-se o leitor para Mário Bunge, "A Filosofia da Física"; Edições 70, Col. O Saber da Filosofia 1973.

. . . Na realidade, se se observa de perto a demonstração do Segundo Princípio da Termodinâmica, não existe absolutamente nada que permita afirmar que a variação da Entropia esteja necessariamente ligada a uma evolução em direcção a um estado caótico. A evolução em direcção a um estado mais estável de um sistema poderia, pelo contrário, estar relacionada com o aparecimento de uma ordem. Há aqui sem dúvida algo de novo que os investigadores nem sempre compreenderam plenamente.

De facto, é perfeitamente correcto observar que na Segunda Lei nada implica um aumento do caos com a Entropia. É a associação feita quer através da Mecânica Estatística, quer através da Teoria da Informação, que leva a essa ideia, que muitas vezes não é tomada com as devidas precauções, nomeadamente aquela de colocar entre aspas os termos Caos ou Desordem.

VIII Entropia Irreversibilidade e Bifurcações

VIII-1 Os três domínios da Termodinâmica

Do que foi exposto no Capítulo III vê-se que as variáveis termodinâmicas foram definidas para estados de equilíbrio, ou então, para estados infinitamente próximos de algum estado de equilíbrio, uma vez que os caminhos reversíveis são, no fundo, sucessões de pontos representativos de estados de equilíbrio. Este modelo de equilíbrio está bastante longe da realidade pois que a maioria dos sistemas e processos naturais estão respectivamente em estados de não equilíbrio, ou são processos irreversíveis.

Um dos grandes domínios da Termodinâmica é precisamente a Termodinâmica do Equilíbrio, sendo os outros dois domínios de não equilíbrio, distinguindo-se um do outro pelo facto de num deles os sistemas apesar de longe do equilíbrio tenderem para ele, e no outro não haver nenhum "atractor" que force o sistema a correr na direcção do equilíbrio.

Ao sairmos do domínio do equilíbrio, um problema imediato põe ao nível das variáveis físicas locais, ou intensivas. Com efeito, num sistema em equilíbrio termodinâmico, o valor das variáveis locais é igual por toda a extensão do sistema, mas o mesmo já não sucede fora do equilíbrio. Enquanto que no equilíbrio as variáveis locais podem ser tratadas independentemente da topologia, fora do equilíbrio a questão topológica torna-se fundamental.

Em "Termodinâmica dos Processos Irreversíveis" [17] pode ler-se:

Nada impede de falarmos da massa, da energia, do volume, da Entropia de um sistema num dado instante, mesmo que se encontre em evolução. Mas já é difícil falar da temperatura de uma barra de ferro em que uma extremidade está muito mais quente que a outra.

.

Podemos no entanto falar da temperatura num ponto, considerando um sistema infinitésimo que contem o ponto (bola), como uma operação limite que isole a vizinhança do ponto em que se aceita que a temperatura seja "a mesma por toda a parte".

Este conceito de variável local leva-nos ao conceito de campo e, por exemplo, no caso referido da barra de ferro com as extremidades a diferentes temperaturas, cujo domínio, ou sede de campo, é o espaço geométrico ocupado pela barra, dizemos que a temperatura T no instante t , no ponto (x, y, z) é:

$$T \equiv T(x, y, z, t) \quad (19)$$

Fora do equilíbrio há transporte de propriedades entre sistemas, ou entre subsistemas, transporte esse que se realiza sob influencia do gradiente existente de uma ou mais variáveis intensivas. Por exemplo, ainda no caso da barra de ferro, existe um gradiente de temperatura e portanto uma condução de calor dada pela lei de Fourier

$$J_Q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (20)$$

sendo J_Q o fluxo de calor por unidade de superfície, e a derivada parcial é a componente x do gradiente da temperatura⁸. A estes gradientes chamam-se Forças Termodinâmicas e são estas forças que "empurram" as propriedades (o calor neste caso) originando os fluxos. Estes fluxos são assim uma medida do afastamento do sistema em relação ao equilíbrio. Se for F_n a força responsável pelo fluxo J_n temos, se o afastamento do equilíbrio não for muito grande, que:

$$J_n = L F_n \quad (21)$$

⁸ Estamos a supor que a barra se dispõe longitudinalmente na direcção do eixo dos x e que cada secção recta da barra apresenta temperatura constante, daí não surgirem as componentes y e z do gradiente.

e há pois uma relação linear entre os fluxos e as forças. Se existirem várias forças actuando conjuntamente, a equação anterior é uma equação matricial:

$$[J] = [L] [F] \quad (22)$$

onde [J] e [L] são vectores coluna.

Esta relação linear entre fluxos e forças, válida para domínios não muito afastados do equilíbrio, é fundamental, facto pelo qual, perto do equilíbrio se diz que estamos em presença de uma Termodinâmica Linear. Para sistemas muito afastados do equilíbrio, a relação entre fluxos e forças já não é, em geral, linear, e diz-se que estamos no domínio da Termodinâmica não Linear.

VIII-2 A Termodinâmica Linear

No domínio da termodinâmica linear, como já dissemos atrás, é válida a relação linear seguinte:

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ J_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n \end{bmatrix} \quad (23)$$

Para este domínio, em 1931, Onsager obtêm a primeira relação geral da termodinâmica de não equilíbrio, o que lhe valeu o prémio Nobel em 1968. As relações de Onsager traduzem-se dizendo como Prigogine [18] que:

. . . quando um processo irreversível K é influenciado pela força termodinâmica F_h , ($L_{kh}>0$), o processo irreversível H é também

influenciado pela força F_k , ($L_{hk} > 0$). Além disso, os dois efeitos exprimem-se com a ajuda da mesma grandeza $L_{hk} = L_{kh}$.

ou seja, a matriz $[L_{ij}]$ chamada matriz das condutibilidades, é simétrica. As relações (23) dizem-se relações fenomenológicas, e aos coeficientes L_{ij} dizem-se coeficientes fenomenológicos.

Posto isto Prigogine continua [19]:

Assim, a existência de um gradiente térmico pode determinar um processo de difusão de matéria e o aparecimento de um gradiente de concentração numa mistura inicialmente homogénea; simetricamente, um gradiente de concentração produz, com o mesmo coeficiente de proporcionalidade, um fluxo de calor através do sistema.

Vejamos agora como tudo isto se relaciona com a produção de Entropia. Munidos destes conceitos de forças, fluxos e coeficientes fenomenológicos, pode mostrar-se que [20], em regime estacionário, a derivada total da Entropia em ordem ao tempo é um mínimo, ou seja, a taxa de produção de Entropia é mínima. Este resultado constitui o Teorema de Prigogine e a propósito dele o próprio Prigogine escreve [21]:

O teorema de produção mínima de Entropia deduz, com efeito, do Segundo Princípio que, no domínio onde são válidas as relações de Onsager, o domínio linear, o sistema evolui para um estado estacionário caracterizado pela produção de entropia mínima compatível com as coerções impostas ao sistema.

· · · · ·

O estado estacionário para o qual evolui então o sistema é caracterizado por velocidades não nulas dos processos dissipativos (isto é, irreversíveis), mas essas velocidades são ajustadas em função da força imposta, de tal modo que todas as grandezas que descrevem

globalmente o sistema são mantidas em valores independentes do tempo. Em particular, a Entropia do sistema é mantida constante, $dS = 0$, o que implica que $d_e S = - d_i S < 0$. O fluxo de calor ou de matéria vinda do meio determina uma variação de Entropia $d_e S$ negativa que compensa exactamente a variação $d_i S$ ligada aos processos irreversíveis.

($d_e S$ e $d_i S$ são respectivamente as variações de Entropia devidas a um fluxo de Entropia e à produção interna de Entropia).

A termodinâmica linear é pois uma descrição de processos irreversíveis previsíveis. Tanto neste domínio como no do equilíbrio o sistema "esquece-se" das suas condições iniciais pois quaisquer que estas sejam, por fim é atingido um estado determinado pelas condições limite, e além disso, uma alteração nessas condições limite produz uma reacção também previsível. Há pois um estado privilegiado, uma espécie de estado atractivo para o qual tende o sistema.

VIII-3 A Termodinâmica não linear

No domínio da Termodinâmica não linear, os fluxos já não dependem linearmente das forças termodinâmicas, e esta situação vem trazer problemas inteiramente novos, sendo o comportamento dos sistemas nesta situação fundamentalmente diferente dos comportamentos descritos anteriormente.

Neste domínio é impossível encontrar um método geral de definição de uma função potencial, da qual derivará a força, e a produção de Entropia já não permite encontrar um estado estacionário, atractivo, final e estável da evolução irreversível. A falta dum potencial termodinâmico arrasta atrás de si o problema da estabilidade dos estados para os quais o sistema pode tender.

Sem entrar em grande pormenor, tentaremos apresentar uma visão simples dos problemas que surgem neste domínio.

O facto de não ser possível, em geral, encontrar um estado atractor, impõe que a estabilidade de cada estado estacionário seja estudada em particular. Muito longe do equilíbrio pode acontecer

ainda que as flutuações que o princípio de ordem de Boltzman condena à extinção, pelo contrário, se avolumem e invadam todo o sistema.

Se é possível definir um potencial, a estabilidade dos regimes estacionários é garantida pois que, se bem que cada flutuação afaste o sistema do extremo desse potencial (extremo esse que corresponde ao mínimo de produção de Entropia), o sistema retoma ao estado atrator. Mas, se as forças termodinâmicas são suficientemente elevadas, pode atingir-se um limiar de estabilidade a partir do qual a estabilidade deixa de ser um atributo de um estado como tal, mas resulta de uma análise que tenha em linha de conta todas as flutuações possíveis.

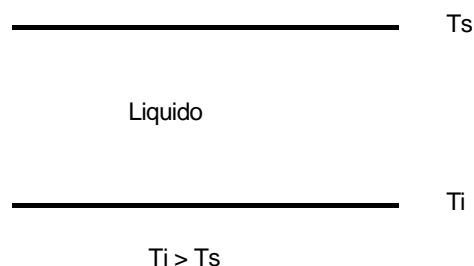
Assim, um sistema dir-se-á instável se se mostrar que algumas das flutuações, em vez de regredirem se amplificam invadindo e alterando todo o sistema, obrigando-o assim a evoluir para um novo estado estacionário ou mesmo, como diz Prigogine [22], "... fazendo-o evoluir para um novo regime de funcionamento qualitativamente diferente dos estados estacionários pelo mínimo de produção de Entropia."

A Termodinâmica pode pois precisar quais os sistemas que podem fugir ao tipo de ordem de Boltzman, que rege o equilíbrio, e a partir de que limiar isso acontece, isto é, a partir de que "distancia" do equilíbrio a pequena flutuação pode alterar totalmente o aspecto e o comportamento do sistema.

Um exemplo surpreendente de instabilidade deste tipo é a chamada instabilidade de Bénard. Esta instabilidade surge se impusermos a um liquido um gradiente de temperatura vertical por forma que uma lâmina liquida tenha, na sua superfície inferior uma temperatura superior àquela a que se encontra a superfície superior.

Enquanto a diferença de temperatura $T_i - T_s$ não atinge um certo "limiar de instabilidade", a condução de calor entre as superfícies inferior e superior é devida a fenómenos de difusão, semelhantes aos descritos pela lei de Fourier (20) da condução de calor, mas, a partir do limiar de instabilidade surgem fenómenos de convecção, e os movimentos de convecção constituem uma

organização espacial activa do sistema. Vários milhões de moléculas movem-se coerentemente, formando células hexagonais de convecção com um tamanho característico.



Prigogine diz a este respeito [23]:

O cálculo do número de compleições de Boltzman, que permite estimar a probabilidade de cada tipo de distribuição macroscópica da matéria pode ser aplicado a este caso.

.

O número de compleições que a partir daí se pode calcular, permite concluir pela probabilidade quase nula de um tal fenómeno de auto organização. Cada vez que novos tipos de comportamento aparecem, para além do limite de instabilidade, a aplicação do conceito de probabilidade, fundado no cálculo do número de compleições, torna-se desta forma impossível.

.

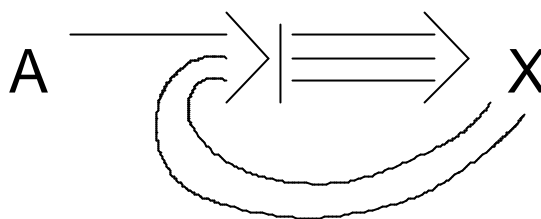
As células de Benard constituem um primeiro tipo de estrutura dissipativa, cujo nome traduz a associação entre a ideia de ordem (estrutura) e a de desperdício (dissipativa), tendo sido escolhido de propósito para exprimir o facto fundamentalmente novo: a dissipação de energia e matéria - geralmente associada às ideias de perda de rendimento e de evolução para a desordem - torna-se, longe do equilíbrio, fonte de ordem; a dissipação está na origem do que se pode muito bem chamar novos estados da matéria.

Um outro exemplo bem sugestivo destes fenómenos é o das "alças catalíticas". Trata-se de um processo químico muito importante nomeadamente em Biologia, e consiste no facto de em certas reacções químicas, a presença do produto ser fundamental para a sua própria síntese, ou seja, para produzir a molécula da espécie X, muitíssimas vezes é necessário partir de um sistema que já contenha X. O processo é o seguinte: Uma molécula da espécie X activa uma enzima e, fixada sobre a dita enzima, estabiliza-se na sua configuração reactiva. Um esquema de tal processo é o seguinte:



trata-se de uma auto catálise que Prigogine simboliza esquematicamente com uma imagem semelhante à da figura seguinte.

Em sistemas onde ocorrem estas alças reactivas, as equações cinéticas são fortemente não lineares; por exemplo, para o esquema (24) acima ter-se-á a equação cinética



$$r \frac{d X}{d t} = K A X^2 \quad (25)$$

São as propriedades singulares destas equações diferenciais não lineares que tem importância crucial na termodinâmica não linear.

Com efeito, pode imaginar-se que, num sistema químico, em certa altura, uma flutuação permite o aparecimento de uma molécula do tipo X, molécula essa que tem a propriedade de inibir alguma das reacções que se vinham a processar no sistema, trata-se portanto de uma anti-catálise, e além disso, a sua presença no sistema permite, por um fenómeno de auto-catálise, a síntese de novas moléculas da sua espécie. Neste caso haverá uma multiplicação "explosiva" da moléculas deste tipo X que invadirão todo o sistema, e travam alguma ou muitas das reacções que inicialmente se processavam pacatamente e sem interrupções.

VIII-4 Bifurcações

Um conceito fundamental no domínio não linear, isto é, para lá do limiar de instabilidade, é o de Bifurcação. Se um sistema é tornado instável, em algum momento produzir-se-á uma flutuação que se ampliará. Mas, em geral, não há apenas uma flutuação com possibilidade de se ampliar mas sim várias

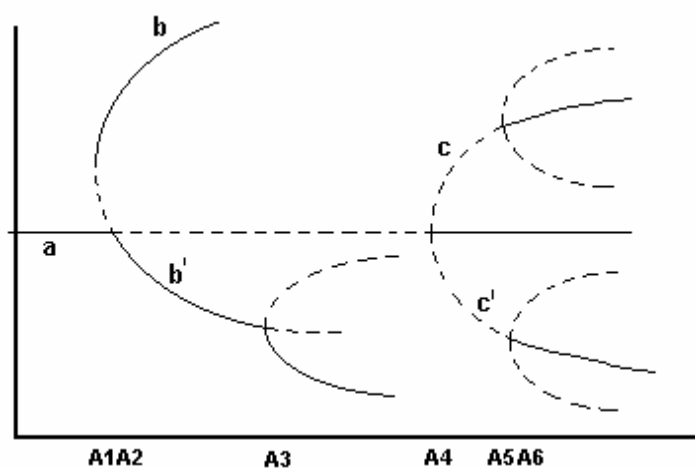
flutuações, o que abre várias hipóteses para a evolução do sistema. Neste caso a evolução do sistema dependerá da flutuação particular que de facto ocorrerá e se amplificará até realizar um dos possíveis estados macroscópicos. Prigogine afirma que "pode falar-se de uma "escolha" por parte do sistema, não por causa de uma liberdade "subjectiva" qualquer, mas porque a flutuação é precisamente o que, da actividade intrínseca do sistema, escapa irredutivelmente ao controlo pelas condições nos limites, o que traduz a diferença de escala entre o sistema como um todo, sobre o qual se pode agir e que se pode definir, e os processos elementares cuja multitude desordenada constitui a actividade desse todo".

A Bifurcação é precisamente o ponto crítico a partir do qual esta espécie de livre arbítrio do sistema se manifesta, e um novo estado se torna possível. São pontos de instabilidade em torno dos quais uma ou várias flutuações encontram terreno fértil para determinar um novo regime de funcionamento macroscópico.

Os pontos de Bifurcação de um sistema podem ser descritos por um Diagrama de Bifurcações de que se apresenta um exemplo abaixo, que é a representação gráfica que se desenvolve para valores crescentes de um determinado parâmetro, por exemplo, para valores crescentes de uma concentração de certa substância A. Estes diagramas são fenomenológicos e dependem do sistema particular em estudo.

Numa primeira bifurcação, deixa de estar assegurada a estabilidade do regime estacionário. Continuando o afastamento do equilíbrio, outras estruturas se tornam possíveis e, se o encontramos em certo ponto do diagrama, podemos reconstituir a sua história, ou no pior dos casos, as suas possíveis histórias.

Na figura ao lado representa-se um possível diagrama de bifurcações. O parâmetro de bifurcação é A. A tracejado estão representados estados instáveis e a cheio estados estáveis.



Assim, o sistema passa a ter em si a memória do seu passado, da sua história. Para determinar um estado já não basta dar a sua composição e as condições limite, é também necessário descrever a sua história, o número de bifurcações por onde passou, e quais as flutuações que decidiram a trajectória a tomar em cada bifurcação.

VIII-5 Que subjectividade ?

O surgimento de estruturas altamente ordenadas, no domínio não linear das estruturas dissipativas, por ser um problema inédito, traz novo desenvolvimento à questão filosófica.

A situação parece desconcertante. O princípio de ordem de Boltzman perde validade e as dificuldades de aplicação da Física Estatística tornam-se evidentes; assim perde também evidência a relação Entropia-Desinformação que era sobretudo baseada na analogia formal entre as equações de Boltzman e de Shanon.

Com esta perda de identificação, a Entropia parece ganhar uma nova carga de Objectividade pois ganha o estatuto de grandeza independente da informação. O que parece estranho é a simetria entre a Termodinâmica de Equilíbrio e linear e a Termodinâmica não linear. Este último domínio é ainda jovem e a investigação neste campo poderá num futuro mais ou menos próximo trazer novos desenvolvimentos que lancem luz sobre estas questões e eventualmente unifiquem os três campos.

IX Uma reflexão final

IX-1 A Teoria Física

Neste parágrafo vamos tentar uma abordagem a outro nível dos problemas já referidos. Trata-se de uma reflexão sumária sobre os princípios fundamentais, que parece ser fundamental e deve ser feita a par e passo com a investigação científica.

* * *

Uma Teoria Física não parece de forma alguma ser uma explicação, mas sim um sistema de proposições matemáticas, arduamente deduzidas de um número reduzido de postulados, que tem dois objectivos por finalidade: o de representar tão simplesmente, completamente e exactamente quanto possível um conjunto de comportamentos experimentais, e um segundo objectivo que é o de colocar nas mãos do investigador ou da humanidade em geral, os meios necessários para se poder operar sobre a natureza, e portanto reflecte em certa medida a aspiração humana de poder, por vezes até desmesurado nas suas consequências.

Se bem que o segundo objectivo possa ser posto em causa pelos puristas da ciência, parece que o primeiro dificilmente poderá ser discutível.

A Teoria Física não nos diz porque é que as coisas são como são, ou o que são, mas descreve apenas como elas são ou como elas se comportam. A propósito deste assunto a passagem seguinte de F. Jacob [24], apesar de relativa a outro campo da Ciência, parece elucidativa. Ao discutir o problema da sexualidade escreve:

De facto, a sexualidade não é uma condição necessária à vida. Existem numerosos organismos que não têm sexo e que, contudo, parecem bastante felizes. Reproduzem-se por cissiparidade ou gemulação. Neste caso é suficiente um só organismo para produzir dois

idênticos. Porque não sucede o mesmo connosco? Porque devem a maior parte dos animais e das plantas acasalar-se para chegarem ao mesmo resultado ? E porquê dois sexos e não três ? De facto nada nos impede de imaginar um mundo no qual a produção de um ser humano exija o concurso, não de dois, mas de três indivíduos diferentes. E quantas consequências resultariam da necessidade de tais famílias a três ! Quantos novos temas para os romancistas, variações para os psicólogos, complicações para os juristas ! as talvez isso fosse demasiado. Talvez não resistíssemos a tantas delícias e tormentos. Contentemo-nos pois com os nossos dois sexos.

As explicações finalistas, essas sim explicativas, usuais na antiguidade, foram após Galileu, definitivamente abandonadas e substituídas em favor das descrições.

Pierre Duhem [25] precisa este ponto de vista caracterizando "as quatro operações sucessivas pelas quais se forma a Teoria Física" como segue:

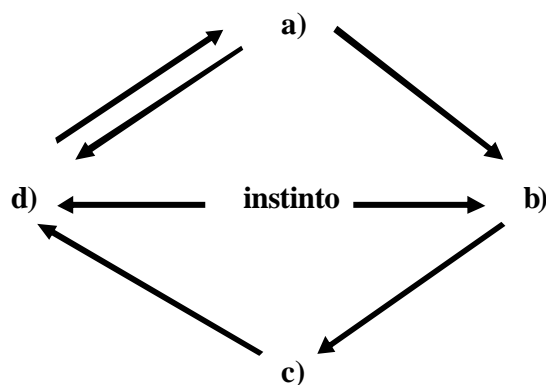
- a) Escolhe-se de entre as propriedades físicas a estudar as que consideramos simples e as derivadas, fazendo-lhes corresponder, por meio de medidas apropriadas, símbolos, números e grandezas. Trata-se pois da definição e medida das grandezas físicas.
- b) Ligam-se entre si as diversas grandezas obtidas em a) por meio de umas poucas proposições que servirão de princípios para posteriores deduções, isto é, criam-se hipóteses, hipóteses estas que são perfeitamente arbitrárias, pelo menos nesta altura, e a única objecção que contra elas se pode erguer é a da sua inconsistência mútua.
- c) Lança-se mão da análise matemática para combinar conjuntamente estes princípios sendo apenas necessário observar as exigências da lógica algébrica. As grandezas às quais se aplicam os cálculos não têm

pretensões a ser realidades físicas nem os princípios evocados garantem o enunciado de relações verdadeiras.

- d) De todo este processo podem deduzir-se uns quantos juízos sobre as propriedades dos corpos, os teoremas, e estes são comparados com a experiência que a teoria se propõe representar. Se há concordância, no grau de aproximação possível experimentalmente a teoria é dita "válida". Esta concordância é o único critério de validade.

Aparentemente o processo desenrola-se assim, se bem que, vistas de mais perto, algumas destas "operações" tornam-se obscuras.

Tal como Duhem o descreve, o ponto a) fica de facto mal esclarecido. Como escolher as propriedades físicas sem experimentar, ou, pelo menos, observar ? Além disso, os princípios de que se fala em b) não surgem como completamente arbitrários pois que se assim fosse o investigador corria o risco de passar toda a sua vida a propor princípios que seriam rejeitados quando da experimentação referida no ponto d). Não, os princípios são propostos de acordo com toda a vivência "física" do investigador, da sua cultura científica, e a mais das vezes ditados por uma espécie de "instinto" científico. Caso contrário, a investigação em Física seria um enorme sorteio de Lotaria. O esquema que se propõe, baseado nas quatro etapas de Duhem é apresentado na figura seguinte, e faz aparecer explicitamente, por meio de setas de duplo sentido a interligação dos pontos a) e d), completando assim um ciclo.



Assim, a teoria "verdadeira", não é a que dá, das aparências, uma explicação conforme com a realidade, mas uma representação satisfatória ao intelecto de um conjunto de dados experimentais. No fundo aproximamos a nossa posição da de Einstein quando escrevia [26]:

Os conceitos da física são criações do espírito humano e não, como possam parecer, unicamente determinados pelo mundo externo. No esforço por conhecer a realidade, a nossa posição lembra a de um homem que procura adivinhar o mecanismo de um relógio fechado. Esse homem vê o mostrador e os ponteiros em movimento, ouve o tiquetaque, mas não dispõe de meios que lhe permitam abrir a caixa. Se é um homem engenhoso pode representar a imagem de um mecanismo responsável por tudo o que observa, mas não poderá nunca ter a certeza de que o mecanismo que imagina seja o único capaz de explicar as suas observações. Não poderá nunca comparar a imagem que forma do mecanismo interno com a realidade desse mecanismo e nem sequer pode imaginar a possibilidade ou a significação de tal comparação. Mas o investigador crê certamente que, à medida que o seu conhecimento cresce, a sua representação da realidade se torna mais e mais simples e explicativa de domínios cada vez mais extensos. E pode ainda crer na existência de um limite ideal para o conhecimento que o espírito humano consegue atingir. Esse extremo ideal será a verdade objectiva.

Esta posição é sem duvida idealista e coloca toda a física, e mesmo todo o conhecimento, como reflexo de imaginação pura e engenho intelectual para imaginar mecanismos que reproduzam, nas suas consequências, o "movimento" da natureza, e toda a ciência é assim deslocada para o domínio do subjectivo.

Mas a ciência vai mais além, não se limita a tratar fenómenos que, sem ambiguidade, se pode afirmar que existem, e no dizer de Jacobs [27]:

. . . de qualquer modo, explicar o fenómeno é sempre considerá-lo o efeito visível de uma causa escondida, ligada ao conjunto de forças invisíveis que se julga regerem o mundo.

IX-2 De volta à Entropia

Abandonando agora o plano adoptado na secção anterior, retomemos o nível das definições do Capítulo II. Parece que, se deixarmos a discussão ficar por este nível a situação muda de figura.

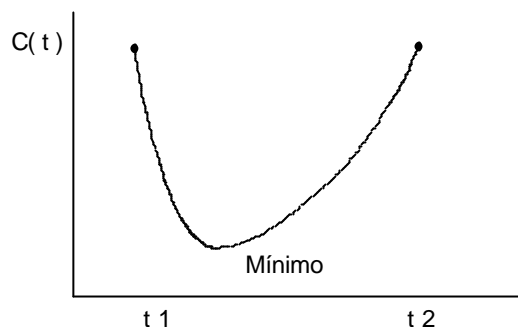
Debrucemo-nos sobre a alegada conexão entre a Termodinâmica e a Teoria da Informação. Apesar de, como já dissemos, esta relação parecer não trazer para o discurso da Termodinâmica, nomeadamente no caso bem conhecido do Demónio de Maxwell, qualquer elemento de subjectividade, o que é certo é que, apesar de estarmos em face de um discurso bem objectivo, o facto de associarmos a Entropia à "medida da ignorância" altere intimamente o carácter de "coisa real" da Entropia para a associar com algo de intimamente ligado às limitações humanas. Aqui, o que se põe em causa é, mais uma vez, que esta interpretação da Entropia possa ser feita sem prévios cuidados.

Considere-se a expansão irreversível de um gás que passa de um volume V_1 para um volume V_2 . Adoptando a interpretação da Entropia com base na Teoria da informação, dir-se-á que, durante o fenómeno há uma perda de informação que é monótona com o tempo de duração do mesmo. Mas, observemos mais de perto a expansão.

Inicialmente temos uma certa quantidade de gás num estado bem definido e conhecido, de equilíbrio, com volume V_1 , e no final, temos de novo um estado de equilíbrio bem definido e conhecido com volume V_2 . Entretanto, durante a expansão, ocorreram toda a espécie de processos imprevisíveis. A probabilidade de conhecimento do estado do gás durante o processo passa evidentemente por um mínimo, não se pode, vistas bem as coisas, dizer que a perda de informação é monótona com o tempo, ou então teremos de dissociar, como conceitos diferentes, informação e possibilidade de conhecimento ou de previsão. Surge assim a questão fundamental de toda a discussão, a saber, que o conceito de Informação foi transferido para o discurso da Termodinâmica sem uma reflexão prévia de qual poderá ser o seu significado neste campo, distinto daqueles a que foi inicialmente aplicado por Shanon.

Na figura ao lado $C(t)$ é o Conhecimento, em função do tempo. A curva passa por um mínimo mas volta a atingir um ponto de Conhecimento elevado.

Este gráfico é, evidentemente um gráfico de tendência e a forma da curva é desconhecida.



Parece agora necessário a formulação de certas regras de procedimento quando se importam termos para o discurso da Física. Com a definição rigorosa das "regras de conversão" para os termos utilizados é possível posteriormente a sua conversão em valores quantitativos de grandezas físicas.

Chamada a atenção para este aspecto da questão parece acertado dizer que, no contexto actual de utilização dos conceitos de Informação, que são importados de uma forma intuitiva para o discurso da Física, não é possível decidir da subjectividade ou não do conceito de Entropia senão na direcção apontada na secção VIII-1, e nesse caso não só a Entropia mas toda a Física seria uma imagem subjectiva do mundo.

Trata-se pois de uma discussão que só poderá ser concluída quando forem esclarecidos, objectivamente, nos diversos campos da ciência, os significados dos termos utilizados.

APÊNDICE I

A FÓRMULA DE BOLTZMAN

A fórmula de Boltzman pode ser estabelecida com base no princípio de Boltzman que afirma que a Entropia de um macroestado de um sistema é função exclusiva e universal da probabilidade termodinâmica, isto é:

$$S \equiv S (W) \quad (26)$$

Seja um sistema A composto de 2 subsistemas A_1 e A_2 . Se forem W_1 e W_2 as probabilidades termodinâmicas dos subsistemas, a probabilidade termodinâmica W de A será:

$$W = W_1 \cdot W_2 \quad (27)$$

pois que para cada um dos microestados de A_1 existem W_2 microestados de A_2 . Então, como a entropia S do sistema deve ser a soma das Entropias S_1 e S_2 dos subsistemas, tem-se que:

$$S = S_1 + S_2 = S (W_1) + S (W_2) \quad (28)$$

e, pelo princípio de Boltzman

$$S = S (W) = S (w_1 \cdot w_2) \quad (29)$$

portanto:

$$S(W_1 \cdot W_2) = S(W_1) + S(W_2) \quad (30)$$

Fazendo agora as derivadas parciais de $S(W)$ de primeira ordem obtém-se:

$$\frac{\partial S(W)}{\partial W_1} = \frac{\partial S(W)}{\partial W} \frac{\partial W}{\partial W_1} = \frac{\partial S(W)}{\partial W} W_2 \quad (31)$$

$$= \frac{\partial S(W_1)}{\partial W_1}$$

e de igual forma se obtém:

$$\frac{\partial S(W)}{\partial W_2} = \frac{\partial S(W_2)}{\partial W_2} \quad (32)$$

Pode agora escrever-se que:

$$\frac{\partial S(W)}{\partial W} = \frac{1}{W_2} \frac{\partial S(W_1)}{\partial W_1} = \frac{1}{W_1} \frac{\partial S(W_2)}{\partial W_2} \quad (33)$$

Multiplicando isto por $W_1 W_2$ vem:

$$W \frac{\partial S(W)}{\partial W} = W_1 \frac{\partial S(W_1)}{\partial W_1} = W_2 \frac{\partial S(W_2)}{\partial W_2} \quad (34)$$

e como só aparece uma única variável em cada membro, estes devem ser constantes, e temos três equações diferenciais do tipo:

$$W \frac{d S(W)}{d W} = C \quad (35)$$

que integradas conduzem a:

$$S(W) = C \log W + K \quad (36)$$

$$S(W_1) = C \log W_1 + K_1$$

$$S(W_2) = C \log W_2 + K_2$$

agora, como $S(W) = S(W_1) + S(W_2) = S(W_1 W_2)$ obtém-se:

$$\begin{aligned} S(W) &= C \log W_1 + C \log W_2 + C^t \\ &= C \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) + C^t \end{aligned} \quad (37)$$

com $C^t = K_1 + K_2$.

Em (36) a constante K é zero se se convencionar Entropia nula para $W = 1$.

APÊNDICE II

O Teorema de Prigogine

Atendendo às relações fenomenológicas

$$J_i = \sum_j L_{ij} F_j \quad (38)$$

e sendo a taxa de produção de Entropia dada por:

$$\dot{S} = \sum_i J_i F_i \quad (39)$$

obtem-se, substituindo (38) em (39) que:

$$\dot{S} = \sum_i \sum_j L_{ij} F_j F_i = \sum_{ij} L_{ij} F_i F_j \quad (40)$$

como das relações de Onsager se tem que $L_{ij} = L_{ji}$, vem então que:

$$\dot{S} = \sum_i L_{ii} F_i^2 + 2 \sum_{i=j} L_{ij} F_i F_j \quad (41)$$

e derivando esta última relação em ordem a F_i vem:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{S}}{\partial F_i} &= 2 \sum_i L_{ii} F_i + 2 \sum_{j=i} L_{ij} F_j \\ &= 2 \sum_j L_{ij} F_j = 2 J_i \end{aligned} \quad (42)$$

como, no regime estacionário, se a força F_i é constante, o fluxo J_i é nulo pode escrever-se:

$$\left(\frac{\partial \dot{S}}{\partial F_i} \right)_{F_j} = 2 J_i = 0, \quad i = j \quad (43)$$

e portanto, num estado estacionário com $J_i = 0$ e F_i constante, a produção de Entropia atinge um extremo. Como em geral os elementos diagonais da matriz de condutibilidades são positivos:

$$\left(\frac{\partial^2 \dot{S}}{\partial F_i^2} \right)_{F_j} = 2 \sum_j L_{ii} > 0 \quad (44)$$

e esse extremo é um mínimo Q.E.D.

* * * *

É interessante referir porque motivo os coeficientes próprios são positivos, sem o que não seria possível escrever a expressão anterior. Para isso, consideremos o caso de dois fenómenos irreversíveis. Teremos

$$\begin{aligned} J_1 &= L_{11} F_1 + L_{12} F_2 \\ J_2 &= L_{21} F_1 + L_{22} F_2 \end{aligned} \quad (45)$$

Substituindo isto em (39) obtemos para a fonte de Entropia a forma quadrática

$$\dot{S} = L_{11} F_1^2 + (L_{12} + L_{21}) F_1 F_2 + L_{22} F_2^2 > 0 \quad (46)$$

e esta forma quadrática deve ser positiva para todos os valores das variáveis F_i , excepto apenas para $F_1 = F_2 = 0$, caso em que a produção de Entropia é nula. Esta condição implica as desigualdades clássicas seguintes

$$L_{11} > 0 \quad ; \quad L_{22} > 0 \quad (47)$$

$$(L_{12} + L_{21})^2 < 4 L_{11} L_{22}$$

e por consequência os coeficientes fenomenológicos próprios são positivos⁹.

APÊNDICE III

Indício experimental de um começo quente

Para fazer o estudo do problema cosmologico, I.D.Novikov [28] apresenta uma definição especial de Entropia. Após uma análise mais detalhada do papel fundamental da densidade de matéria e da curvatura do espaço-tempo no estudo dos primeiros momentos após a singularidade, Novikov define Entropia como segue:

É claro que, para se poder fazer uma ideia do que se passou nesta matéria, qual a sua composição resultante das muito rápidas reacções nucleares, não é suficiente conhecer apenas a densidade da matéria - temos também de especificar os valores da temperatura e de alguns outros parâmetros. No caso mais geral há vários destes parâmetros numéricos. De considerações físicas infere-se que, pelo menos dois valores adicionais devem ser especificados para além da densidade da matéria. (Estritamente falando, de facto são precisos mais de dois valores, mas aqui estamos interessados apenas nos dois mais importantes). O primeiro caracteriza, para falar com simplicidade, o conteúdo de calor da matéria. É a famosa Entropia, da qual os físicos tanto se orgulham. Neste caso a Entropia da matéria tem um significado bem claro. Quanto mais quente se encontra a matéria, mais quanta electromagnéticos se encontram presentes (e maior é a energia de cada

⁹ A este respeito, para uma abordagem mais detalhada, consultar as obras com referências [31], [32] e [33].

quantum). Em resultado, o número de fótons por partícula pesada (bárions), representa adequadamente o conteúdo de calor da matéria - a sua Entropia. O segundo número é a chamada carga leptónica.

.

Uma vez especificados, em certo momento fixo, ambos estes valores se mantêm quase constantes, e não variam no decurso da expansão do Universo.

O problema do estabelecimento das condições iniciais está pois em fazer uma escolha não contraditória dos dois parâmetros L e S, respectivamente número leptónico e Entropia.

A questão que se arrastou durante vários anos foi a de decidir sobre a escolha dos valores L e S, em particular, de escolher entre $S = 0$ ou $S \gg 1$, o que corresponde a escolher entre um início quente ou um início frio.

Actualmente, com a descoberta em 1965 da chamada Radiação Fóssil prevista para o caso de um início quente, esta hipótese impôs-se. Esta radiação fóssil seria uma consequência directa da muito elevada Entropia da matéria inicial, e seria uma espécie de resíduo da radiação electromagnética inicial que, devido à elevadíssima temperatura, seria muito abundante.

Com a expansão, a temperatura da matéria e da radiação cai, mas, de qualquer forma, alguma parte da energia electromagnética, caracterizada pela temperatura, deve atingir os observadores actuais.

O número de Fótons fósseis por cm^3 é

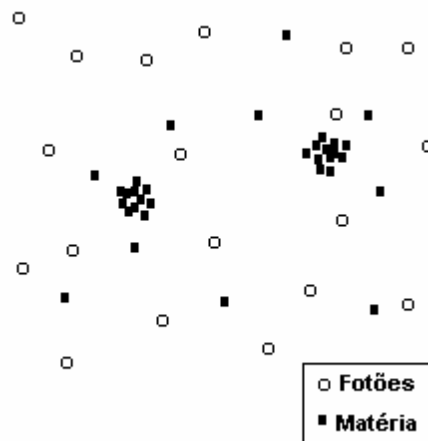
$$N \approx 500 \text{ fot cm}^{-3} \quad (48)$$

e como a densidade média da matéria é de cerca de 10^{-30} g cm^3 , com a definição dada acima de Entropia, pode estimar-se a entropia do Universo como sendo a razão entre o número de fótons e o número de partículas pesadas, obtendo-se assim

$$S = 10^9 \quad (49)$$

Num momento posterior da expansão, surge aquilo a que se chama "perturbação entrópica". Com efeito, a radiação fóssil é homogénea por todo o espaço, mas a matéria concentra-se aleatoriamente em certas regiões do espaço como mostra a figura seguinte.

Assim, a Entropia específica varia de ponto para ponto. Actualmente o problema põe-se em saber como esta perturbação evolui no tempo, sob o pano de fundo da expansão, problema que está ligado à determinação das condições iniciais, condições essas ainda desconhecidas.



Ainda Novikov, continua [29]:

O obstáculo principal que impede a solução do problema da formação das estruturas em grande escala no Universo é a nossa ignorância quanto às condições iniciais.

Aqui apenas parece possível uma forma para ultrapassarmos o mistério . . . o de experimentar diferentes suposições quanto aos parâmetros das perturbações iniciais, calcular os seus efeitos e comparar os resultados com a informação experimental.

* * * * *

A título de curiosidade vejamos como decresce a temperatura do Universo com o tempo. Para isso partimos da lei de Hubble que relaciona a velocidade v das galáxias com as distâncias a que elas se encontram R :

$$v = H \cdot R \quad (50)$$

onde H é a constante de Hubble. Agora, se a densidade da matéria for a densidade crítica ρ , ou seja, o valor da densidade a partir do qual o Universo após a expansão se torna a contrair, esta densidade crítica é fácil de calcular a partir da expressão da velocidade de escape de uma esfera:

$$v = \sqrt{\frac{2 G M}{R}} \quad (51)$$

sendo $M = \frac{4}{3} \rho R^3$. Então, tendo em conta (50)

$$H R = \sqrt{\frac{8}{3} G \rho R^2} \quad (52)$$

e portanto

$$\rho = \frac{3 H^2}{8 G} \quad (53)$$

Por outro lado, como o tempo passado desde o início é inversamente proporcional à constante de Hubble [30]:

$$t = \frac{1}{H} = \sqrt{\frac{3}{8 G \rho}} \quad (54)$$

Considere-se agora a radiação a uma temperatura elevadíssima, próximo da singularidade inicial. Seja Ξ_{res} a densidade de energia da radiação residual ou fóssil, então, da lei de Stefan-Boltzman tem-se:

$$\Xi_{\text{res}} = a T^4 \quad (55)$$

com $a = 7.6 \times 10^{-15} \text{ erg cm}^{-3} \text{ K}^{-4}$. Usando agora a formula de Einstein

$$E = m c^2 \quad (56)$$

vem

$$\Xi = \mathbf{r} c^2 \Rightarrow \mathbf{r} = \frac{\Xi}{c^2} \quad (57)$$

e pode então escrever-se

$$\mathbf{r} = \frac{a T^4}{c^2} \quad (58)$$

o que substituída em (54) conduz a:

$$t \approx \sqrt{\frac{3}{8 \mathbf{p} G a}} \frac{c}{T^2} \quad (59)$$

ou:

$$T = \sqrt{\sqrt{\frac{3}{8 \mathbf{p} G a}} \frac{c}{t}} \quad (60)$$

o que, substituindo as constantes dá:

$$T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{t_s}} \quad (61)$$

ou seja, por exemplo, ao fim do 1º segundo a temperatura seria

$$T = 10^{10} \text{ K}$$

e para tempos inferiores a temperatura seria ainda mais elevada.

REFERÊNCIAS

- [1] Denbigh, Kennet, "How Subjective is Entropy ?", Chemistry in Britain, 1981
- [2] Grad, "The many faces of Entropy", 1961
- [3] Denbigh, Kennet, op. cit.
- [4] idem
- [5] Tolman, The Principles of Statistical Mecanics, Oxford 1983
- [6] Pagels, H. R., O Código Cósmico, Ciência Aberta, 1982
- [7] idem
- [8] Davies, Paul, Deus e a nova Física, Edições 70, 1986
- [9] Playboy, Agosto 1966
- [10] Davies, Paul, op. cit.
- [11] Peixoto, José P., Ordem, Desordem, Entropia e Informação,(A)
- [12] idem
- [13] Peixoto, José P., Entropia e Informação, (B), Seminário da F.C.U.L.
- [14] Peixoto, José P., (A), op. cit.
- [15] Prigogine, Ilya & Stengers, Isabel, A Nova Aliança, Ciência Aberta 1986
- [16] Thom, René, Parábolas e Catástrofes, Biblioteca OPUS 1985
- [17] Peixoto, José P., "Termodinâmica dos processos Irreversíveis", (C), Folhas de divulgação, Lisboa 1986
- [18] Prigogine,Ilya & Stengers, Isabel, op. cit.
- [19] idem
- [20] Peixoto, José P., (C), op. cit.
- [21] Prigogine,Ilya & Stengers, Isabel, op. cit.
- [22] idem

- [23] idem
- [24] Jacob, Francois, O Jogo dos Possíveis, Ciência Aberta 1981
- [25] Duhem, Pierre, "La théorie physique" in De Montaigne a Louis de Broglie, Textes Philosophiques, Berlinn Paris 1965
- [26] Einstein, Albert & Infeld, Leopold, A evolução da Física, Livros do Brasil, Lisboa
- [27] Jacob, Francois, op. cit.
- [28] Novikov, I. D., Evolution of the Universe, Cambridge 1983
- [29] idem
- [30] idem
- [31] Glansdorf, P. & Prigogine, Ilya, Structure stabilité et fluctuations, Masson et Cie 1971
- [32] Nicolis & Prigogine, Ilya, Self-Organization in nonequilibrium systems, Wiley Interscience 1977
- [33] Groot, S. R., Non-Equilibrium Thermodynamics, North-Holland publishing company 1969