

A TERRA, O COSMOS E A ENTROPIA

ANTÓNIO HEITOR

Departamento de Física, Universidade de Évora, Largo dos Colegiais, 2 — 7000 Évora

A esmagadora maioria dos processos que ocorrem na Terra são irreversíveis. Neste artigo é evidenciado o papel da entropia como conceito chave para a compreensão da fenomenologia terrestre.

1. A Terra e o Cosmos — balanço de entropia

O nosso planeta não é um sistema isolado. Recebe a radiação electromagnética, oriunda maioritariamente do Sol, é bombardeado continuamente tanto por partículas elementares (radiação cósmica, neutrinos, etc.), como por meteoritos, e inclusivamente converte energia gravitacional dos sistemas Terra-Lua e Terra-Sol em energia mecânica dos fluidos planetários (marés), da qual uma pequena parte é transformada em calor.

No entanto, a quase totalidade das trocas de energia entre a Terra e o espaço exterior é feita sob a forma de radiação electromagnética. As variações de entropia envolvidas nos processos de troca de energia determinam precisamente a possibilidade e, consequentemente, o sentido de evolução destes processos (2.º Princípio da Termodinâmica). A equação de balanço para a entropia do planeta Terra estabelece:

Variação de entropia na Terra =

$$\left(\text{Produção de entropia na Terra} \right) - \left(\text{Fluxo total de entropia entre a Terra e o Cosmos} \right) \quad (1)$$

Designando por \dot{Q}_{Sol} a potência radiativa média recebida do Sol e \dot{Q}_{Terra} a potência radiativa média emitida pela Terra e, considerando, em primeira aproximação, a energia interna (U) da Terra constante, resulta:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \dot{Q}_{Sol} - \dot{Q}_{Terra} = 0 \quad (2)$$

À potência radiativa recebida do Sol está associado um fluxo de entropia \dot{Q}_{Sol}/T_{Sol} . De modo análogo,

o fluxo de entropia associado à potência radiativa emitida pela Terra é $\dot{Q}_{Terra}/T_{Terra}$. Usando a equação (2), podemos escrever:

$$\text{Fluxo total de entropia entre a Terra e o Cosmos} = \dot{Q} \left(\frac{1}{T_{Sol}} - \frac{1}{T_{Terra}} \right) < 0 \quad (3)$$

e concluir que, sendo $T_{Sol} \gg T_{Terra}$, a Terra emite muito mais entropia do que aquela que recebe.

O 3.º termo de (1) representa a taxa temporal de geração de entropia devida aos processos que ocorrem na Terra. A Termodinâmica dos processos irreversíveis fornece o valor deste termo [1-5]:

Produção de entropia na Terra por unidade de tempo =

$$= \int_{Terra} \left(-L_{22} \frac{\partial T}{\partial x^v} + L_{23} \frac{\partial P}{\partial x^v} - L_{24} \frac{\partial \mu}{\partial x^v} \right) dV \quad (4)$$

onde os coeficientes cinéticos L_{ij} são definidos por:

$$L_{22} = 2 \frac{\Delta x^v_{(T)} J_v^U}{T^2} ; L_{23} = \frac{\Delta x^v_{(P)} J_v^V}{T} \quad (5)$$

$$L_{24} = \frac{\Delta x^v_{(\mu)} J_v^M}{T}$$

sendo T a temperatura absoluta, P a pressão, μ o potencial químico, e Δx^v os parâmetros característicos da distribuição espacial destas grandezas. J_v^U , J_v^V , J_v^M são respectivamente os fluxos de energia interna, volume ($-\vec{v}$) e de massa na direcção v .

2. A necessidade da ocorrência de «fenómenos» na Terra

A taxa temporal de produção de entropia no planeta Terra resulta, deste modo, do acoplamento entre o gradiente da temperatura e o fluxo de energia interna (equivalente a *Fluxo de volume + fluxo de entropia (calor) + fluxo de massa*), do acoplamento entre os fluxos de volume (*velocidade*) e os gradientes de pressão, e do acoplamento dos fluxos de massa com os gradientes do potencial químico. Como os fluxos espontâneos das variáveis extensivas têm, na maioria dos casos, sentido oposto ao dos gradientes das variáveis intensivas (*note-se também que μ pode ser positivo ou negativo*), o 3.º termo de (1) é *francamente positivo*, pese embora alguma contribuição negativa dada por $L_{24} \frac{\partial \mu}{\partial x^v}$ respeitante, nomeadamente, às reacções associadas à *fotossíntese*. *Resulta deste facto uma contínua produção de entropia na Terra e, não fora a contribuição negativa do 2.º termo de (1), a entropia do nosso planeta aumentaria incessantemente.*

A Terra é, contudo, em primeira aproximação um sistema em equilíbrio termodinâmico (*com entropia constante*) com vizinhança. Tal facto pode ser inferido da observação de que as variáveis intensivas médias do nosso planeta $\langle P \rangle$, $\langle T \rangle$ e $\langle \mu \rangle$ não variam apreciavelmente no tempo (à escala climática $\sim 10^3$ anos). A essa escala, a entropia do nosso planeta mantém-se praticamente constante e, assim sendo, podemos considerar desprezível o primeiro termo de (1), pelo que o *fluxo de entropia entre a Terra e o exterior é, em média e à escala climática, integralmente balanceado pela produção de entropia devida à ocorrência de processos irreversíveis no planeta*. Por outro lado, podemos dizer que os *fenómenos que ocorrem na Terra são exactamente os necessários para que tal balanço se mantenha.*

3. A entropia relativa negativa, a circulação dos fluidos planetários e os processos vitais

A *necessidade* de fluxos de massa, de volume e de entropia (4) resulta, pois, do facto de estar associada à energia electromagnética recebida do Sol uma *entropia mais baixa* do que a que está associada à radiação electromagnética da Terra. Dito de outro modo, a energia electromagnética radiada pelo Sol possui uma *entropia relativa negativa* que constitui um *potencial entrópico* que é a «fonte» da fenomenologia terrestre.

Dada a forma quase esférica da Terra, a potência radiativa recebida do Sol por unidade de superfície terrestre decresce do equador para os pólos, originando heterogeneidades (gradientes) na distribuição espacial das variáveis P , T e μ . Os fluidos planetários respondem a esses gradientes com fluxos de massa, volume e entropia. A produção de entropia ocorre, conforme (4) e (5), pelo

acoplamento desses fluxos com os diversos gradientes presentes.

O nosso planeta actua como um *conversor de energia* ou um *produtor líquido de entropia* e esta necessidade imposta pelas leis da física traduz-se, precisamente, na imensa diversidade fenomenológica que ocorre no planeta e no mais espantoso de todos os fenómenos — *a vida*. A circulação dos fluidos planetários é, não só, uma gigantesca máquina de conversão de energia mas proporciona, também, a reunião de substâncias que possibilitam a ocorrência de uma multiplicidade de processos físico-químicos. Todos estes processos *devem*, de acordo com o 2.º *Princípio da Termodinâmica* aumentar a *entropia global*. Tal não significa que num subsistema particular do sistema global (Terra) *a entropia não possa diminuir enquanto no sistema global o balanço total é positivo*. Por exemplo, através da electrólise, o subsistema $H_2O + H_2O$ dá lugar a um subsistema de menor entropia constituído por $H_2 + H_2 + O_2$, sendo certo que a *diminuição de entropia neste subsistema é inferior ao aumento de entropia no dispositivo laboratorial no qual ocorre a electrólise*. Na Terra ocorrem fenómenos deste tipo de que são exemplo, entre outros, os fluxos (ascensionais) de massas de ar no mesmo sentido do potencial gravítico e as reacções associadas à fotossíntese. Fenómenos como estes são possíveis à custa de uma produção líquida de entropia no sistema global Terra. Os subsistemas onde tais processos ocorreram pelo facto de manterem relativamente à entropia média do sistema Terra uma entropia relativa negativa (potencial) estão na base da riquíssima diversidade dos fenómenos associados à vida. De facto, através das substâncias de origem vegetal (e animal) de que se alimentam, os animais incorporam nos seus organismos subsistemas de *entropia relativa negativa*, e através de uma cascata de conversões (reacções metabólicas) convertem a energia associada às ligações químicas no calor e no trabalho necessários à existência da vida.

Desta forma, a energia electromagnética radiada pelo Sol, ao encontrar o nosso planeta no seu trânsito, não é «consumida» nem «destruída» mas a *entropia* que lhe está associada aumenta apreciavelmente. Por a isso a Terra escapa à *monotonia* que se verifica no Universo próximo, isto é, a Terra é um lugar de *acontecimentos, de diversidade, de vida*.

4. «Morte térmica» — o fim da vida?

Poder-se-à perguntar como fizeram alguns físicos do séc. XIX: «*A contínua produção de entropia e a irreversibilidade que lhe está associada conduzirão, num horizonte mais ou menos longínquo, à impossibilidade de realização de trabalho e processos químicos, isto é, à "morte térmica" do Universo?*»

Hoje, podemos dar a esta pergunta uma resposta relativamente tranquilizadora. Efectivamente, os termos da eq. (4) *não são os únicos* que deverão ser considerados como fontes de entropia no sistema do Universo. Pode-se mostrar [5] que, num balanço global das fontes de entropia, existem termos que estão associados aos processos de criação/destruição de massa no Universo e termos que estão associados à expansão universal que contribuem negativamente para tal balanço. Sendo certo que não dispomos de meios para quantificar a totalidade dessas contribuições podemos concluir com uma mensagem menos apocalíptica: «*O desconhecimento da totalidade das contribuições dos processos que envolvem criação/ destruição de massa e volume não nos permite concluir, por enquanto, e provavelmente por muitos e bons anos, sobre um eventual aumento de entropia no sistema que é o Universo todo e, consequentemente sobre a inevitabilidade do desaparecimento da vida à escala universal.*»

REFERÊNCIAS

- [1] PRIGOGINE, I. — *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, 3rd ed., Interscience, N. Y. (1969).
- [2] KEISER, J. — *Statistical Thermodynamics of Non-Equilibrium Processes*, Springer (1987).
- [3] DE GROOT, S. R. — *Thermodynamics of Irreversible Processes*, North-Holland, Amsterdam (1966).
- [4] WOODS, L. C. — *The Thermodynamics of Fluid Systems*, Oxford Eng. Sc. Series 2 (1986).
- [5] HEITOR, A. — *Formalismo Termodinâmico com Base nos Parâmetros Críticos*, Tese de Doutoramento, Évora (1992).

BIBLIOGRAFIA ADICIONAL

- *Physics of Climate*, Peixoto, J. P. and Oort, E. H., American Institute of Physics, N. Y. (1992).
- *The Theory of Thermodynamics*, Waldram, J. R. Cambridge University Press, Cambridge (1985).
- *Nonequilibrium Thermodynamics and its Statistical Foundations*, Kreuzer, H. J., Oxford Science Publications, N. Y. (1981).

Prémio Rammal

Em memória do físico libanês R. Rammal (1951-91), a Sociedade Francesa de Física e a Fundação da École Normale Supérieure distinguirão anualmente, com a medalha e prémio Rammal, um físico eminente de um país mediterrânico (incluindo Portugal) que, pela sua vida e pelas suas actividades (*investigação fundamental ou aplicada, ensino*) tenha dado um contributo importante, na forma e modernidade, «aux courants d'échange scientifique dans cette région du monde». O termo *físico* é entendido em sentido lato, estendendo-se à química-física, biofísica, ciências do universo, e ciências físicas na engenharia.

O espírito subjacente a esta distinção pode sintetizar-se na seguinte transcrição: «R. Rammal fut un savant ouvert et généraux, attaché au principe de l'universalité des droits de l'homme. Le jury veillera à ce que la communauté des lauréats reflète assez fidèlement des situations et des talents autour de la Méditerranée.»

Candidaturas: a enviar para Société Française de Physique, 33 rue Croulebarbe, 75013 Paris, France, com as identificações *Presenteur: (nom et prénom, fonction(s), adresse), candidat: (nom et prénom, date de naissance, fonction(s), adresse)*, devendo juntar-se, se possível, um curriculum vitae do candidato, assim como uma lista das suas publicações ou uma selecção das publicações principais.

Prémio Amaldi

Criado pela Fundação E. Amaldi, Itália, com o patrocínio da EPS, este prémio distinguirá as 1.^{as} edições de livros de texto em Física para o ensino secundário (alunos entre os 14 e os 18 anos de idade), com reconhecido mérito. Serão, em particular, tomados em consideração pelo júri os seguintes elementos: inovação na metodologia de ensino (em relação com o nível dos alunos a que se dirige), o conteúdo do livro, estrutura e apresentação gráfica. O valor do prémio é de 20.000 ECU, sendo 16.000 ECU para o autor(es) e 4.000 ECU para o editor.

Candidaturas: Os autores e editores interessados (com o consentimento dos autores) deverão enviar 2 cópias do livro para: Amaldi's International Prize Secretariat, Via Mazzini 62 - 19100 Piacenza, Italy, até 30 de Setembro 1993, devendo a 1.^a impressão do livro em causa ter ocorrido no período 1 Janeiro 87 - 30 Setembro 93. O prémio será entregue em Piacenza, Itália, na Primavera de 1994.

Prémio de Tradução Científica e Técnica

No campo da terminologia científica, técnica, linguística, informática e domínios envolventes, em língua portuguesa, foi criado o Prémio União Latina - JNICT, no valor de 1 milhão de escudos. Poderão concorrer os tradutores cujos trabalhos tenham conteúdo para um enriquecimento da terminologia científica e técnica portuguesa. Para tal, deverão apresentar 3 exemplares do trabalho proposto, devidamente referenciado, e 3 curricula vitae, até ao dia 23 de Julho de 1993.

Informações mais detalhadas: Escritórios da União Latina, Telefones, (01) 3951234 / (01) 3966835.

Prémio Científico IBM

Para distinguir trabalhos de elevado mérito no campo da computação. O prémio é único e no montante de 3000 contos. Poderá concorrer qualquer cidadão português com menos de 36 anos em 31 de Outubro de 1993. Serão aceites trabalhos em língua portuguesa, originais ou publicados em data posterior a 1 de Outubro de 1992.

Candidaturas: Data limite para recepção dos trabalhos 1 de Outubro de 1993.

Informações: Companhia IBM Portuguesa, Prémio Científico, Departamento de Comunicações e Programas Externos, Praça de Alvalade, 7 — 1799 Lisboa Codex