

geral, já tinham lido isso mesmo em qualquer revista.

Uma solução de emergência é a de dar aos rapazes as caixas de material Phywe para efectuarem experiências, do que resulta o estrago e a quebra das peças e a permanente desarrumação de tudo. Os interesses são muito diferentes, as idades também e, embora algum pequeno proveito se possa acidentalmente tirar, não é possível atender a todos e ser-lhes útil. Os próprios rapazes, por não terem faltas naquelas actividades, nunca aparecem tantos quantos os poucos que se inscreveram no clube e, às vezes, nem um só aparece.

8. O balanço geral de quantas considerações fizemos a respeito da evolução do ensino liceal da Física nestes últimos

seis anos não é agradável principalmente se nos recordarmos que esse intervalo de tempo se integra numa época em que todo o mundo se agita na efectivação de reformas, e não já na elaboração dos seus projectos. O que de novo se fez entre nós (cursos de actualização e reapetrechamento de material) é apenas um progresso virtual como um verniz que se dá num móvel carunchoso e o embeleza, porque tudo é montado sobre um ensino obsoleto, com programas antiquíssimos, sobre compêndios que não satisfazem, sobre um corpo doente preparado à pressa, que não tem tempo para aprender a lidar com a ferramenta laboratorial nem sossego para meditar sobre a responsabilidade que lhe cabe no futuro dos 127 000 estudantes que estavam matriculados no ensino liceal no ano escolar findo.

## Estruturas de Atmosferas Planetárias: A Atmosfera Terrestre

por ALFREDO S. MENDES

(Do Serviço Meteorológico Nacional e do Instituto Geofísico da Universidade de Lisboa)

1. Alguns dos planetas possuem uma camada gasosa exterior designada atmosfera (do grego *atmos*+*sphaire*), que constitui uma cobertura cuja estrutura geral depende da composição, temperatura, campos gravítico e magnético, propriedades dos constituintes do espaço interplanetário envolvente, etc.

A atmosfera terrestre é uma região complexa de interacção entre a superfície do globo e o espaço interplanetário, ligada à terra por atracção gravítica, constituída por camadas de composição química, densidade, temperatura, pressão e extensão diferentes. No entanto, a grande complexidade dos fenómenos atmosféricos e a grande dificuldade dos estudos teóricos e

experimentais sobre o comportamento dos constituintes do ar, têm conduzido à construção de modelos mais representativos para a atmosfera inferior do que para a superior. Os constituintes do ar satisfazem a equação de estado  $p = \rho RT/m$  de um gás ideal, para os valores da pressão na atmosfera e encontram-se em equilíbrio hidrostático quase perfeito, de modo que a diminuição do gradiente da pressão em altitude é contrabalançado pela acção das forças da gravidade, isto é,  $\partial p / \partial z = -\rho g$ .

Na baixa atmosfera os processos energéticos que mantêm os fenómenos físicos são do tipo termomecânico, enquanto que na média e alta atmosfera dominam os do tipo termoquímico e termoeléctrico. Gra-

dualmente, a alta atmosfera, tornando-se cada vez menos densa, passa a ser constituída por partículas que quase não colidem. Entra-se, assim, numa região muito pouco densa, que faz a transição para o espaço exterior — exosfera. Nesta região os processos energéticos são fortemente condicionados à acção do campo geomagnético sobre as partículas carregadas de origem terrestre, solar ou cósmica.

O recurso à observação física e química directa, em toda a atmosfera, pela utilização de instrumentos transportados através dela em balões, foguetões e satélites, permitiram melhorar apreciavelmente o seu conhecimento, a tal ponto que, hoje, se admite a atmosfera terrestre estendendo-se até milhares de quilómetros, enquanto que há 30 anos, se admitia que aquela distância, não deveria exceder uns 200 km.

A atmosfera terrestre é um meio físico sujeito a processos de poluição de vária ordem, do exterior pelas partículas cósmicas, solares, etc., da superfície da terra, principalmente como consequência do desenvolvimento industrial, do aumento do parque automóvel e das experiências atómicas, e no próprio meio, pelo desenvolvimento da aviação e dos programas espaciais com foguetões e satélites, que lançam na atmosfera superior gases diversos (vapor de água, anidrido carbónico, óxido de carbono, hidrogénio e compostos metálicos) em quantidades apreciáveis, que podem atingir valores da ordem de dezenas de toneladas.

A atmosfera terrestre constitui barreira à penetração de radiações extra-terrestres, nocivas à vida, e regula a distribuição dos climas sobre o globo terrestre.

2. A diferenciação das várias regiões da atmosfera assenta no seu estado físico e químico definido pela distribuição vertical do comportamento dos seus constituintes e da temperatura do ar, como se indica na figura 1.

Quanto à *variação da composição química*, a atmosfera é dividida em duas regiões fundamentais, a *homosfera* (0 a 100 km), onde o ar tem composição relativa

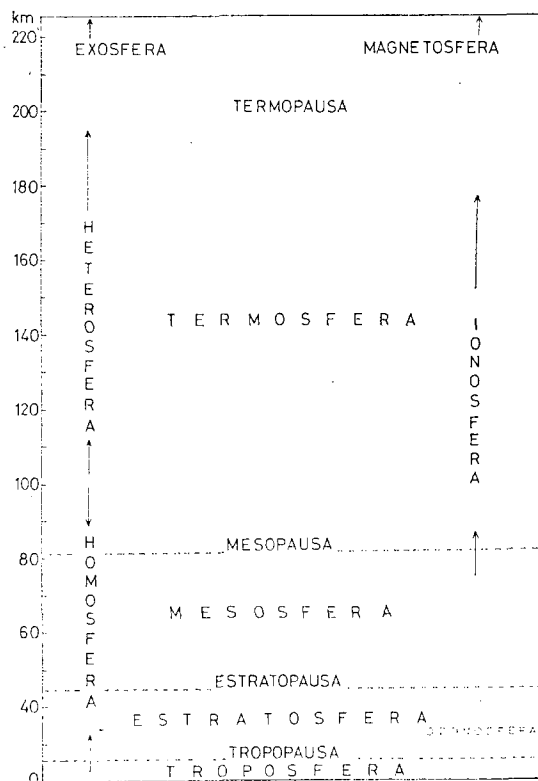


Fig. 1 — Nomenclatura da atmosfera segundo Chapman, Goody, Nicolet e a UGGI (1960).

constante no que se refere aos constituintes principais (azoto e oxigénio moleculares e argon) e a *heterosfera* (de 100 km até um nível variável com a temperatura ambiente). Entre a homosfera e a heterosfera existe uma região de transição, designada *homopausa*.

Quanto à *distribuição vertical da temperatura*, a atmosfera é dividida em cinco regiões fundamentais e quatro regiões de transição. As quatro primeiras regiões fundamentais são a *troposfera* (0 a 11 km), a *estratosfera* (11 a 50 km), a *mesosfera* (50 a 85 km) e a *termosfera* (acima de 85 km) onde a temperatura decresce e cresce com

a altitude de camada para camada; as quatro regiões de transição, são a primeira (*tropopausa*) e a terceira (*mesopausa*) onde a temperatura passa pelos valores mínimos, a segunda (*estratoausa*) onde atinge um máximo, e a quarta (*termopausa*) isotérmica, à altitude entre 200 e 500 km, conforme a actividade solar, e, a quinta região fundamental é a *exosfera*, região exterior onde se observa fuga das partículas para o espaço.

Atendendo, ainda, à *actividade química dos constituintes do ar* desenvolvida entre as altitudes de 20 a 100 km, principalmente

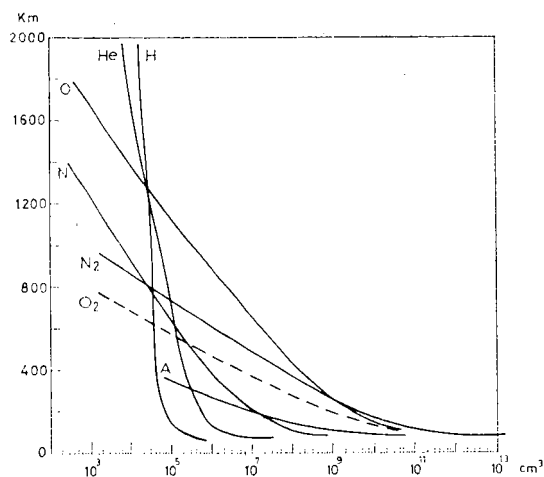


Fig. 2 — Distribuição vertical dos constituintes do ar (Champion, 1965).

pela fotodissociação provocada por radiação solar com comprimentos de onda superiores a 2000 Å, aproximadamente, esta região é por vezes designada *químiosfera*; e, à forte *ionização do meio*, podemos considerar duas camadas na atmosfera, a *ionosfera*, que se estende da mesosfera até ao limite superior da atmosfera e a *magnetosfera*, que se estende pelo espaço interplanetário até cerca de 40 raios terrestres.

3. *A homosfera* (0 a 100 km) é a região inferior da atmosfera. Na homosfera, os constituintes principais do ar (oxigénio e

azoto moleculares) encontram-se perfeitamente misturados e distribuídos com idêntico decréscimo das suas concentrações relativas, mantendo-se a composição do ar, expressa na sua massa molecular,

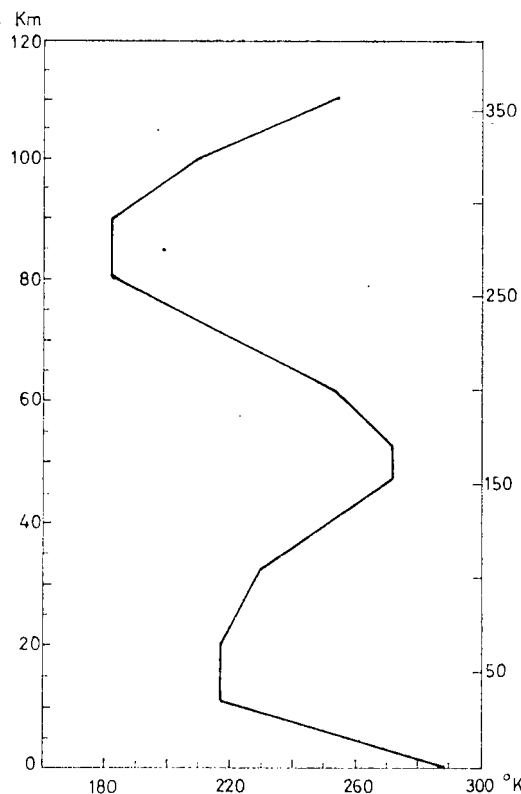


Fig. 3 — Distribuição vertical da temperatura para a atmosfera padrão (E. U. 1962).

aproximadamente constante (28,9). A homosfera inclui a troposfera, a estratosfera e a mesosfera, que, por isso, têm composição química análoga.

4. *A heterosfera*, é a região imediatamente acima da homosfera até um nível variável com a temperatura. A heterosfera tem composição variável, visto que o oxigénio molecular é fortemente dissociado, aparecendo assim o oxigénio atómico como elemento importante da composição do ar nesta região. Por outro lado, observa-se ainda, aumento relativo dos

elementos leves (hidrogénio e hélio) em relação aos elementos pesados (oxigénio e azoto) devido à difusão no campo da gravidade. A concentração de cada um dos constituintes decresce praticamente, segundo uma lei exponencial conforme a sua massa molecular, e, assim, a massa molecular média do ar diminui até cerca de 16 a 500 km exactamente, onde o oxigénio atómico é o componente fundamental. Entre a homosfera e a heterosfera, existe uma região de transição onde se dá a passagem do estado de mistura dos constituintes ao estado de difusão, e que se designa *homopausa*.

5. *A troposfera*, assim designada pelo meteorologista inglês Sir Napier Shaw, por causa do seu estado de movimento turbulento quase permanente, é a região da atmosfera que se estende até à altitude média de 11 km (*tropopausa*). A altitude média da tropopausa varia com a região do globo e as condições atmosféricas, podendo atingir 17 km nas regiões equatoriais, 8 km nas regiões polares e 13 ou 17 km, nas regiões tropicais conforme a situação meteorológica é de altas (anticiclone) ou baixas (depressão) pressões, respectivamente.

A temperatura do ar na troposfera diminui, em geral continuamente, até ao valor médio  $-56^{\circ}\text{C}$  ( $217^{\circ}\text{K}$ ) no topo, com o gradiente de cerca de  $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$  e frequentes inversões.

Na troposfera onde o ar está em constante turbulência e mistura ocorrem os fenómenos meteorológicos formando-se os anticiclones, os ciclones, os hidrometeoros (núvens e precipitação), etc. A troposfera está em equilíbrio convectivo com a superfície do globo terrestre aquecida pela radiação solar.

A troposfera, apesar da pequena espessura em relação à da atmosfera, contém cerca de 80% da sua massa, sendo 99% a proporção do azoto e do oxigénio

moleculares para a dos outros constituintes.

6. *A estratosfera*, (11 a 50 km), descoberta pelo meteorologista francês L. P. Teisserenc de Bort, recebeu esta designação por ter admitido, a partir de observações de temperatura do ar com termómetros instalados em balões, que se tratava de uma região estratificada muito estável, e, por isso, sem a turbulência observada na troposfera.

A temperatura do ar na estratosfera, mantém-se quase constante até aos 20 km, depois aumenta com a altitude até atingir  $0^{\circ}\text{C}$  na estratopausa, a princípio lentamente, e em seguida (30 km), mais rapidamente até ao limite superior. A temperatura do ar na estratosfera varia para cada latitude com a época do ano.

Anàlogamente à troposfera, a estratosfera tem, em geral, constituição uniforme e mistura de azoto e oxigénio, na mesma proporção. No entanto, às altitudes entre 25 e 30 km, a taxa do ozono na atmosfera é apreciavelmente maior (cerca de 250 vezes mais que na troposfera), devido à acção da radiação ultravioleta sobre o oxigénio molecular segundo as reacções  $\text{O}_2 + h\nu \rightarrow \text{O} + \text{O}$ ,  $\text{O}_2 + \text{O} + M \rightarrow \text{O}_3 + M$ , em que  $M$  representa uma terceira molécula que absorverá a energia química libertada sob a forma de energia cinética. Ainda que, nas condições normais de pressão e temperatura, à superfície do globo terrestre, aquela camada de ozono estratosférico (ozonosfera) não excedesse uma delgada camada de 0,3 cm de espessura, ela tem grande importância para a vida, como é sabido, pela absorção da radiação ultravioleta de comprimentos de onda compreendidos entre 2000 e 3000 Å. Esta absorção é responsável pelo aquecimento da estratosfera, mantendo o balanço térmico da atmosfera.

Além da camada de ozono referida acima, C. E. Junge, descobriu em 1961, a

altitude de 20 km, uma camada constituída por partículas de sulfato de amónio com dimensões muito pequenas (alguns microns). Este aerosol, pode ter origem na troposfera ou na própria estratosfera, pela oxidação do anidrido sulfuroso por oxigénio atómico.

A estratosfera é mais espessa nos pólos, e é, por vezes, quase inexistente no equador.

7. *A mesosfera*, constitui a última camada da homosfera, e por isso, tem a mesma constituição geral que a troposfera e a estratosfera, no que respeita aos constituintes azoto e oxigénio moleculares. A designação mesosfera, foi introduzida pelo geofísico inglês Sydney Chapman (1950).

Na mesosfera, a temperatura diminui rapidamente até ao mínimo da ordem dos  $-100^{\circ}\text{C}$ , na mesopausa, a cerca de 85 km de altitude. Análogamente à troposfera, a mesosfera está sujeita a grandes variações de temperatura com a época do ano, em todas as latitudes, em parte devido à diminuição do ozono em altitude, não havendo a compensação de calor resultante da decomposição daquele constituinte atmosférico pela radiação ultravioleta. A mesosfera é uma região fria em relação à estratosfera e à termosfera, que a limitam, e, nela desaparece a maioria dos meteoros.

Na mesosfera, embora com carácter secundário, começa a ionização do ar pela radiação solar, dando origem à camada *D* da ionosfera, acima de 65 km.

8. *A termosfera*, primeira camada da atmosfera superior, estende-se dos 85 km, até 350 km quando a actividade solar é mínima e até 700 km, quando é máxima. A temperatura na termosfera aumenta continuamente de  $-100^{\circ}\text{C}$  até  $500^{\circ}\text{C}$  ou de 1500 a  $2000^{\circ}\text{C}$  (conforme a actividade solar é mínima ou máxima) respectiva-

mente até à termopausa (250 a 400 km), região a partir da qual a temperatura se mantém constante com a altitude, como foi confirmado pelas observações feitas com os satélites. Esta região termina, onde a frequência dos choques dos constituintes do ar se torna pequena ou quase nula (nível crítico). Acima deste nível pode-se considerar que cada partícula se move segundo uma trajectória própria, ficando, assim, destruído o equilíbrio hidrostático dos gases ambientes.

Ao contrário da atmosfera inferior, onde os principais constituintes do ar são o azoto e o oxigénio moleculares, na termosfera, acima dos 100 km, a dissociação do oxigénio molecular pela acção da radiação solar de comprimento de onda superior a 2000 Å, seguindo a reacção indicada em (6) implica que o oxigénio atómico se torne o elemento importante da composição do ar, nesta região. Além do oxigénio atómico e molecular figuram ainda como constituintes importantes o azoto molecular, o hidrogénio atómico e o hélio sujeitos ao fenómeno da difusão, característico na alta atmosfera.

Nos períodos de maior actividade solar, aos efeitos caloríficos da radiação electromagnética de origem solar somam-se os da radiação corpuscular com a mesma origem, e assim, o considerável aumento de temperatura ocasionado, provoca expansão da atmosfera superior, de modo que as camadas mais densas podem atingir níveis mais altos, como foi confirmado com a alteração na marcha dos satélites quando atingem estas regiões. A termosfera, é a região de ocorrência de auroras.

9. *A exosfera*, é a região de transição da atmosfera para o espaço interplanetário acima da altitude média de 500 km, onde se observa fuga dos constituintes do ar.

Nas camadas inferiores da exosfera,

predomina o oxigénio atómico, enquanto que nas camadas superiores predomina o hélio e o hidrogénio (este principalmente na camada exterior) que podem encontrar-se no estado ionizado. O livre percurso médio das partículas, nesta região é da ordem dos 100 km, e, assim, os átomos atingem energia cinética que pode anular a acção do campo gravítico da terra e escapam-se. O mesmo já não acontece quando estão ionizados, por ficarem sujeitos ao campo geomagnético. Como a frequência de choque de partículas é muito pequena, devido à sua fraca concentração, a reacção química entre elas raramente ocorre.

A camada de hélio desta região foi confirmada pelas observações com os satélites Echo I (Nicolet, 1961) e Explorer VIII e XVII, tendo-se verificado que varia com a actividade solar, entre 500 e 1000 km, aproximadamente, devido à consequente expansão da atmosfera provocada pelo aumento da temperatura das partículas.

10. A *ionosfera*, é a região caracterizada por grande concentração electrónica (100 000 e/cm<sup>3</sup> a cerca de 100 km) relativamente à das outras regiões da atmosfera ainda que pequena comparada com a sua concentração em partículas neutras.

A ionosfera está compreendida entre 50 e 1000 km, aproximadamente.

Atribui-se a existência da *ionosfera* principalmente à acção da radiação ultravioleta, recebida do Sol, a qual penetrando na atmosfera terrestre provoca nos constituintes do ar maior ou menor ionização conforme o seu comprimento de onda. Em consequência a ionosfera apresenta constituição heterogénia, a qual se manifesta pela existência de camadas de densidade electrónica variável, a níveis diferentes, conforme se indica no quadro I. Deve, ainda, considerar-se a acção ionizante dos raios X e da radiação cósmica,

de origem extraterrestre na formação da ionosfera embora em menor quantidade do que a da radiação ultravioleta.

QUADRO I

Estrutura da ionosfera e processos da ionização

Camada	Nível de máxima densidade electrónica	Banda activa da radiação ultravioleta incidente	Gás absorvente	Processo de ionização
D	55 km	$\lambda=1012-910 \text{ \AA}$	O <sub>2</sub>	$O_2 + h\nu \rightarrow O_2^+ + e$ (N)
E <sub>1</sub>	90	744-661	O <sub>2</sub>	$O_2 + h\nu \rightarrow O_2^+ + e$ (E)
E <sub>2</sub>	130	795-755	N <sub>2</sub>	$N_2 + h\nu \rightarrow N_2^+ + e$ (N)
F <sub>1</sub>	170	661-585	N <sub>2</sub>	$N_2 + h\nu \rightarrow N_2^+ + e$ (E)
F <sub>2</sub>	250	910-795	O	$O + h\nu \rightarrow O^+ + e$

Os símbolos (N) e (E) indicam que a partícula se encontra no estado normal ou excitado.

Durante a noite, a camada D desaparece e as camadas F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub> coalescem formando a camada F. A camada E<sub>2</sub> forma-se eventualmente durante o dia. A densidade electrónica das camadas E e F<sub>2</sub> no equador é cerca de 2×10<sup>5</sup> e de 10<sup>6</sup> electrões por centímetro cúbico, respectivamente. A densidade e a altura das camadas da ionosfera apresentam variações diárias, mensais e anuais; e, efeitos de latitude e de longitude. A densidade das camadas E e F<sub>1</sub> apresenta o máximo cerca das 12 horas e o mínimo durante a noite; aumenta do inverno para o verão; e varia segundo o ciclo das manchas solares, aumentando quando a actividade solar também aumenta.

A densidade da camada F<sub>2</sub> apresenta no inverno, o máximo cerca das 12 horas, e no verão um máximo de manhã e outro à tarde, e o mínimo cerca das 12 horas. A variação diária na camada F é mais acentuada que nas camadas F<sub>1</sub> e E; e, a variação anual apresenta os máximos cerca dos equinócios.

A actividade solar influi também na densidade das outras camadas, como é óbvio. Sobrepostas às variações regulares da ionosfera registam-se outras irregulares relacionadas com as trovoadas, as tempestades magnéticas e as meteorites.

No estudo da propagação das ondas radioeléctricas na ionosfera consideram-se as camadas limitadas por superfícies planas e as suas densidades electrónicas aumentando progressivamente da base até ao máximo; e, desprezam-se as densidades iónicas por serem muito pequenas em relação àquelas.

Admitindo que a propagação se faz na ausência de campo geomagnético, recorrendo às leis de Ampere e de Maxwell que regulam a distribuição dos campos magnéticos e eléctricos, estabelece-se como condição para se dar reflexão de uma onda incidente (teoria iónica de Eccles-Larmor) que:

$$(1) \quad \sin^2 i = n^2 = 1 - \frac{4\pi N e^2}{m w^2}$$

na qual as letras têm significado conhecido. Se a incidência for normal ( $i=0$ ), a expressão (1) toma a forma:

$$(2) \quad \frac{4\pi N e^2}{m w^2} = 1.$$

A expressão (2) não interpreta completamente a propagação das ondas radioeléctricas porque observam-se (fig. 4) duas ondas reflectidas (fenómeno de refacção dupla) provocadas pelo campo geomagnético. Nestas condições estabelece-se que o índice de refacção das camadas ionosféricas depende das componentes transversal e longitudinal do campo geomagnético relativamente à direcção de propagação das ondas (teoria magnetoionica de Appleton-Hartree). A análise mais completa da propagação considera a colisão dos

electrões da inosfera, e portanto a absorção de energia das ondas radioeléctricas pelas camadas, a qual é proporcional à energia média de vibração dos electrões oscilantes e ao número de colisões por unidade de volume na unidade de tempo.

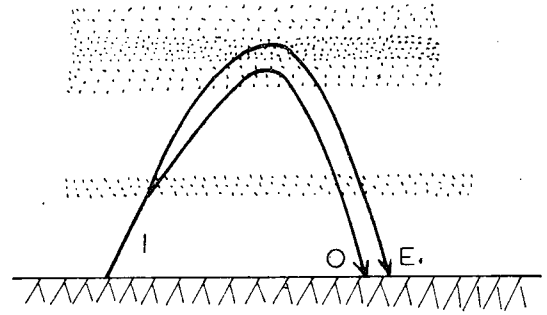


Fig. 4 — Fenómeno da dupla refração observado na propagação das ondas radioeléctricas.

II. A *magnetosfera*, é a região da atmosfera exterior, onde o movimento das partículas carregadas está sujeito à acção do campo geomagnético e estende-se pelo espaço até distâncias de cerca de 10 a 40 raios terrestres, na direcção do Sol ou oposta, respectivamente. Sob a pressão do vento solar, corrente de protões e electrões (com densidade de 1 a 10 partículas/cm<sup>3</sup> e velocidade média de 500 km/s) variável com a actividade do Sol, constituindo plasma solar, as linhas de força do campo geomagnético deformam-se e tomam a forma da figura 5.

No interior da magnetosfera existem duas grandes regiões de radiação, designadas camadas ou cinturas de Van Allen, constituídas por partículas (protões e electrões) principalmente de origem solar obrigadas a moverem-se segundo as linhas de força do campo geomagnético devido à sua grande energia cinética, 20 a 700 *meV* na camada interior e 1 *meV* na camada exterior.

Carl Störmer admitiu (1907) o aprisionamento de partículas electrizadas de

origem solar pelo campo geomagnético, ao pretender explicar a formação de auroras polares; e Chapman e Ferraro (1931), sugeriram a configuração assimétrica e alongada daquele campo. As medições feitas com os instrumentos instalados nos

satélites Pioneer, Vanguard e Explorer e nas sondas lunares, conduziram a partir de 1958, à descoberta das camadas de Van Allen e à configuração alongada do campo geomagnético (fig. 5), confirmando aquelas hipóteses.

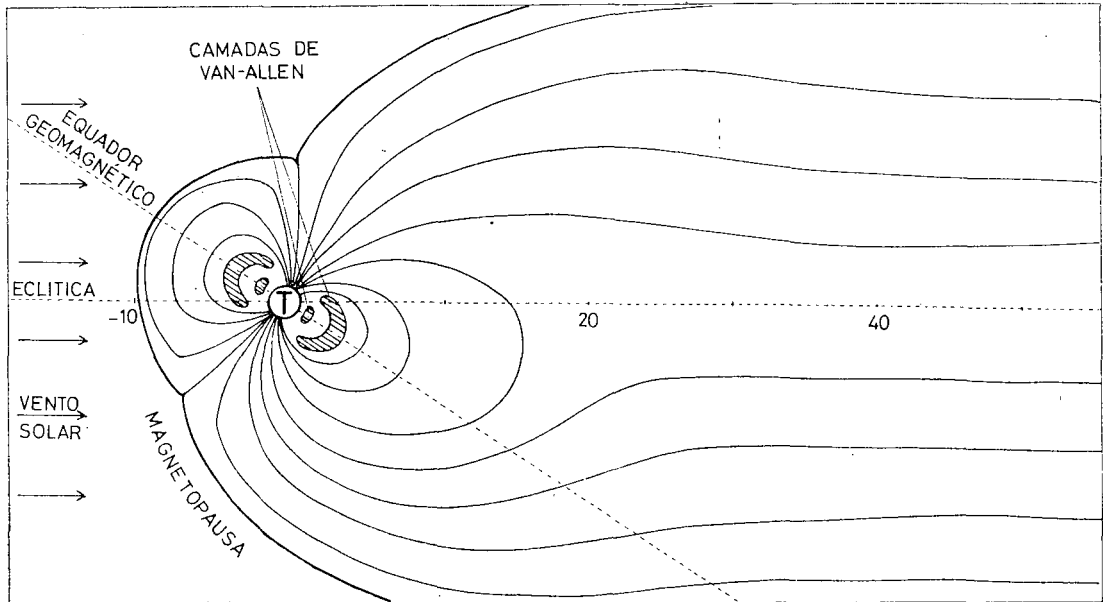


Fig. 5 — Modelo da Terra com a magnetosfera deformada sob a pressão do vento solar.

## A Conversão Directa de Energia Térmica em Eléctrica

por RUI NAMORADO ROSA

A conversão directa de energia térmica em eléctrica a partir das fontes caloríficas naturais tem vindo a ser objecto de estudo intensivo nos últimos anos. Dada a longa e elaborada tradição tecnológica em que o método indirecto convencional de conversão pelo turbo-alternador se baseia, é de esperar que o papel central que este hoje desempenha na vida industrial se prolongará por muitos mais anos ainda. Mas as superiores potencialidades em rendimento energético e densidade de potência que os métodos de

conversão directa apresentam virão um dia, sem dúvida, a dar preferência a estes.

De entre os métodos de conversão directa há dois — os conversores termoiónico e magnetohidrodinâmico — que têm vindo a beneficiar do recente progresso da ciência dos plasmas em que o seu funcionamento se baseia. É a estes dois métodos de evolução recente — o método termoiónico desde 1957 e o método magnetohidrodinâmico desde 1960 — que iremos dar agora a nossa atenção.

Antes de entrar no detalhe do funcio-



namento de tais conversores interessa, porém, chamar a atenção para a natureza física do plasma. O plasma é o estado físico típico da matéria a alta temperatura quando o seu grau de ionização se torna elevado. As suas propriedades físicas são predominantemente aquelas próprias de um meio constituído pela sobreposição de dois fluidos, um de carga eléctrica positiva e outro de carga negativa, de densidades semelhantes, de forma a assegurar a neutralidade média do meio. Tal estado físico encontra-se nas chamas de alta temperatura, em lâmpadas fluorescentes, etc., e é de facto o estado mais abundante no universo já que as próprias estrelas e muito do espaço interstelar são constituídos por plasmas.

O método termoiónico de conversão de energia fundamenta-se, em primeira análise, no efeito termoiónico descoberto por Edison em 1883. Quando uma superfície metálica é aquecida no vácuo a uma temperatura elevada pode observar-se uma vaporização de electrões na superfície incandescente de um modo vagamente análogo à produção de vapor na superfície de um líquido.

A primeira versão dum conversor termoiónico foi o díodo de vácuo. A sua constituição e funcionamento estão esquematizados na figura 1. Para melhor enten-

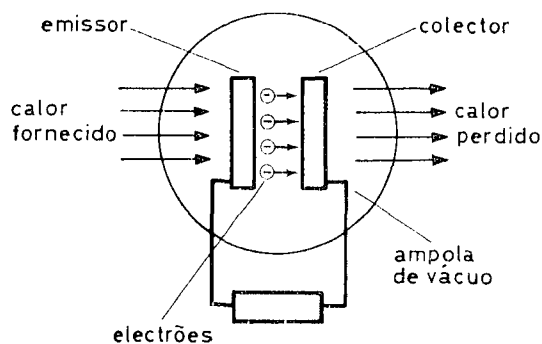


Fig. 1 — Esquema da versão mais simples do conversor termoiónico — o díodo de vácuo — com o circuito exterior de utilização.

der o seu funcionamento convém agora chamar a atenção para o perfil de potencial eléctrico que se estabelece através do díodo como vem exemplificado na figura 2. Como se sabe, os electrões mais enérgicos da banda de condução dum metal encontram-se na vizinhança do nível de Fermi. Entre este nível e o potencial no vácuo existe um intervalo que se chama

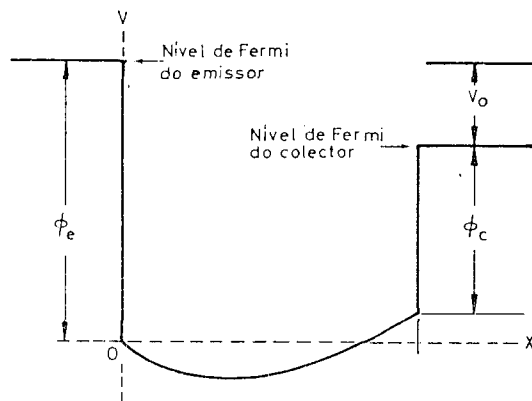


Fig. 2 — Perfil do potencial eléctrico através do díodo de vácuo.  $\phi_e$  — potencial de extracção do emissor;  $\phi_c$  — potencial de extracção do colector;  $V_0$  — tensão nos terminais do conversor.

potencial de extracção o qual representa a altura da barreira de potencial que um electrão deverá vencer para ser emitido da superfície. A diferença entre os potenciais de extracção de dois metais é o potencial de contacto o qual é a altura da barreira de potencial que um electrão encontra ao transitar de um metal para o outro. Como se depreende do diagrama, a tensão entre os dois eléctrodos do díodo de vácuo está próxima do seu potencial de contacto, sendo a diferença devida à variação de potencial produzida pela carga espacial no espaço entre os eléctrodos.

A densidade de corrente que a superfície metálica emite em saturação varia com o potencial de extracção e com a temperatura segundo a lei de Richardson:

$$j_s = A T \exp(-e \phi / k T)$$

onde  $A$  é uma constante e  $\varphi$  é o potencial de extracção. A escolha dos materiais para os eléctrodos deverá ser feita com vista aos máximos de tensão e de densidade de correntes possíveis. O colector deverá pois ter baixo potencial de extracção; quanto ao emissor há que fazer uma escolha de compromisso pois que a densidade de corrente decresce enquanto que a tensão cresce com o potencial de extracção.

A presença da carga espacial entre os eléctrodos produz uma barreira de potencial que é duplamente inconveniente: por um lado, a densidade de corrente é substancialmente reduzida abaixo do seu valor de saturação em virtude da reflexão de grande parte dos electrões nessa barreira e seu retorno ao emissor; por outro lado, a tensão do díodo é reduzida abaixo do potencial de contacto dos eléctrodos. Estes inconvenientes podem ser obviados pela redução substancial do espaçamento dos eléctrodos, mas esta solução é tecnicamente difícil e praticamente insuficiente.

Assim surgiu a ideia de introduzir no díodo um gás que, após ionização e produção de iões positivos, conduzisse à neutralização da carga espacial negativa do gás electrónico e permitisse então atingir densidades de corrente comparáveis à da corrente de saturação do emissor. Note-se ainda que, além desta vantagem, a presença do gás proporciona um potencial de contacto mais elevado. Este efeito é devido à adsorção de gás na superfície dos eléctrodos a qual produz um abaixamento do potencial de extracção. Como a adsorção se dá preferencialmente sobre o colector, por ser este o eléctrodo menos quente, ter-se-á, em condições favoráveis de materiais, gás e temperatura, um mais elevado potencial de contacto e portanto maior tensão do gerador. Uma vez que um mecanismo de ionização entre em operação, as cargas eléctricas distribuir-se-ão em camadas

fronteiras carregadas, na vizinhança imediata dos eléctrodos, e organizar-se-ão num plasma, meio eléctricamente neutro, que poderá estender-se sobre quase toda a extensão do espaço entre os eléctrodos. É o díodo de plasma.

A baixa pressão ou a baixa densidade de corrente a ionização é um fenómeno de superfície. Quando um átomo colide com uma superfície incandescente ele tem uma probabilidade apreciável de ser reemitido como um ião. Esta probabilidade é usualmente expressa como a razão entre o fluxo de iões provenientes da superfície incandescente e o fluxo total — átomos neutros e ionizados — sobre ela incidente:

$$B = \frac{1}{1 + 2 \exp[e(V - \varphi)/kT]}$$

onde  $V$  e  $\varphi$  são os potenciais de ionização e extracção respectivamente. Quanto mais o potencial de extracção exceder o potencial de ionização, maior será a eficiência do processo de ionização ( $B \approx 1$ ), mas não é de modo algum necessário que tal condição se verifique para que a ionização se processe. A pressão mais elevada a probabilidade de colisão ionizante entre o electrão e átomos neutros torna-se substancial no espaço inter-eléctrodos e então, se a densidade de corrente é também elevada, a ionização passa a ser um processo volúmico. Este regime, devido à alta taxa de ionização, permite mais completa neutralização de carga espacial e portanto mais elevada densidade de corrente no díodo. Por outro lado, porém, dado que a manutenção do processo de ionização volúmica requer um campo eléctrico que, como agente acelerante, contrabalance o efeito desacelerante das colisões ionizantes sobre a corrente electrónica, parte da tensão de contacto tem de ser absorvida no interior do próprio díodo e mais baixa é a tensão disponível nos terminais.

A baixa corrente, em regime de ionização superficial, o díodo de plasma for-

nece uma tensão da ordem do potencial de contacto dos eléctrodos; a baixa tensão, em regime de ionização volúmica, a corrente é da ordem da corrente electrónica de saturação do emissor. Para potência máxima o conversor deverá ser operado na vizinhança do ponto de transição de um regime para o outro.

A eficiência ou rendimento de conversão do díodo de plasma está limitada pelas perdas por radiação do emissor para o colector e deste para o exterior, por condução térmica através do próprio plasma e ainda por perdas de condução térmica e efeito de Joule nos próprios condutores. Os rendimentos obtidos até à data vão de 10 a 20%, apenas.

O conversor termoiónico, apesar do seu ainda baixo rendimento de conversão, apresenta um certo número de vantagens sobre o conversor convencional. Assim: (i) não possui partes móveis; (ii) requer um radiador de reduzidas dimensões pois que, posto que funciona a muito alta temperatura, a potência radiada por unidade de superfície é muito elevada; (iii) tem elevada densidade de potência, da ordem de 10 W/cm<sup>2</sup>. Estas características tornam-no aconselhável em certas condições particulares, como gerador em satélites e aeronaves, por exemplo. Têm sido operados com sistemas de aquecimento solar e com fontes de calor de radionuclídeos. Um domínio em que o conversor termoiónico apresenta possibilidades promissoras é como gerador associado a reactores nucleares. Neste caso, cada elemento de combustível de urânio está envolvido numa baíha que funciona, ao mesmo tempo, como o emissor dum díodo de plasma. A radiação  $\gamma$  presente actua como agente estimulante por via da emissão secundária de electrões que ela induz nos eléctrodos do díodo.

Como se sabe, o método convencional de conversão da energia térmica em eléc-

trica utiliza um turbo-alternador. Segundo este método, o calor de uma fonte calorífica é transferido para um gás ou vapor a alta pressão, o qual é posto em movimento por expansão através duma turbina que assim entra em movimento e que, por sua vez, acciona o rotor dum alternador. O método da conversão magnetohidrodinâmica (MHD) fundamenta-se na ideia do emprego dum fluido condutor em movimento num campo magnético para a produção directa de forças electromotrices utilizáveis por meio de um sistema de eléctrodos.

O fluido condutor poderia ser um metal líquido mas a solução mais interessante é utilizar um gás parcialmente ionizado. Acontece que às temperaturas que se podem alcançar em fontes caloríficas intensas (1500 a 3000 °K) um gás apresenta já, e mesmo em equilíbrio termodinâmico, um pequeno grau de ionização. O grau de ionização é regido pela lei de Saha para o equilíbrio termodinâmico:

$$\frac{n_+ n_-}{n_0} \propto T^{3/2} \exp(-eV/kT)$$

onde  $n_+$ ,  $n_-$  e  $n_0$  são as densidades das partículas positivas, negativas e neutras, respectivamente, e  $V$  é o potencial de ionização do gás. A introdução de aditivos de baixo potencial de ionização (na prática têm-se utilizado vapor de césio e de outros metais alcalinos ou alcalino-terrosos) permite elevar substancialmente o grau de ionização.

É ainda possível manter um grau de ionização superior ao valor de equilíbrio termodinâmico através do aquecimento preferencial do gás electrónico e consequente aceleração dos processos de ionização. Este aquecimento preferencial tem sido conseguido por efeito de Joule no seio do próprio fluido condutor, pois que este efeito eleva a temperatura do gás electrónico, que é o agente condutor,

acima da temperatura do gás neutro, que não é directamente afectado pelo campo eléctrico. Processar-se-á então uma transferência de calor do gás electrónico para o gás neutro a uma taxa proporcional à elevação da temperatura. Esta taxa é, por outro lado, mais elevada nos gases poliatômicos do que nos gases monoatômicos porque as moléculas poliatômicas têm mais baixos níveis de excitação e apresentam, portanto, maiores secções eficazes de colisão inelástica ao electrão. Deste modo, um gás monoatômico é compatível com uma temperatura electrónica mais elevada sendo esta a razão pela qual os gases raros são frequentemente empregados em conversores *MHD*.

Uma vez produzido o fluido condutor a alta pressão este é posto em movimento por expansão através da conduta do conversor onde adquire a velocidade média  $\bar{u}$ . Na presença do campo magnético transversal  $\bar{B}$  as cargas positivas e negativas separam-se em sentidos opostos, segundo a normal à direcção de deslocamento do fluido e ao campo magnético, gerando-se assim um campo eléctrico transversal. Este campo eléctrico é naturalmente conhecido pelo nome de campo de Faraday,  $\bar{E}_F$ , e a corrente eléctrica a ele associado pelo nome de corrente de Faraday,  $\bar{j}_F$ . O esquema dum gerador *MHD* que utiliza este mecanismo físico está ilustrado na figura 3.

O movimento do fluido condutor no campo magnético vai originar, por outro lado, a separação entre cargas positivas e negativas segundo a direcção de escoamento do fluido porquanto os electrões tendem a ficar aprisionados no campo magnético enquanto que os iões, sob a acção de frequentes colisões com as partículas neutras, tendem a acompanhar o movimento do gás neutro. Resulta assim um campo eléctrico longitudinal que recebe o nome de campo de Hall,  $\bar{E}_H$ , o

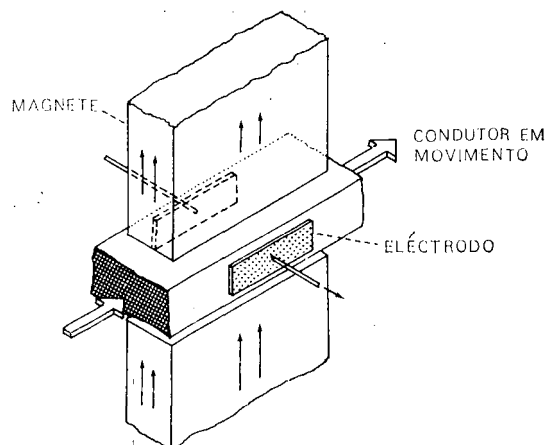
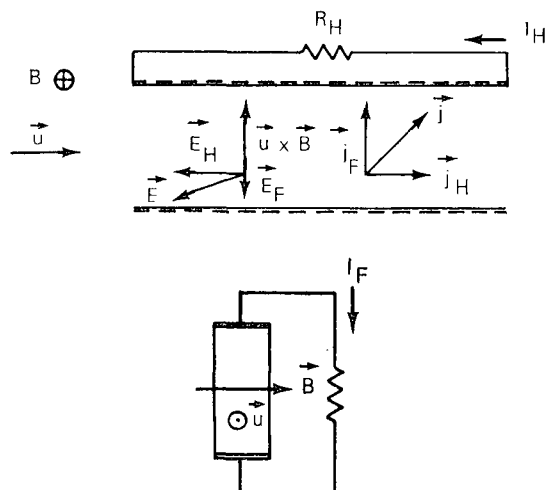


Fig. 3 — Esquema para ilustrar o funcionamento dum gerador *MHD*, neste caso, o gerador de Faraday.

qual está associado a uma corrente eléctrica longitudinal dita corrente de Hall,  $\bar{j}_H$ . Vejam-se as figuras 4 e 5.

Existindo eléctrodos de ligação e circuitos exteriores fechados, irão circular correntes sob a acção das forças electromotrizas do gerador. A força magnética  $\bar{j} \times \bar{B}$  que assim surge no seio do gerador é uma força que se opõe e trava o movimento do fluido de modo que é extraída



Figs. 4 e 5 — Os campos e as correntes no interior do gerador *MHD*. Note-se que os campos eléctricos têm o sentido oposto ao das correntes por se tratar de forças electromotrizas. (Fig. 4 — vista lateral; Fig. 5 — vista de topo).

energia cinética deste e, convertida em energia eléctrica para o exterior.

A corrente fornecida pelo conversor *MHD* está condicionada pela lei de Ohm do circuito de carga e pela lei de Ohm generalizada que governa a condução no interior do próprio gerador. A lei de Ohm generalizada, relevante no caso dum gás parcialmente ionizado, é, em regime estacionário,

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) - \vec{j} \times \frac{\sigma \vec{B}}{en_-}$$

onde  $\sigma$  é a condutividade; o parâmetro  $\beta = \sigma B / en_-$  é conhecido com o nome de parâmetro de Hall. As segunda e terceira parcelas do segundo membro representam as forças magnéticas distintamente exercidas sobre as cargas positivas e negativas, respectivamente (note-se que o gás iónico se desloca com a velocidade média do fluido  $\vec{u}$  e que a corrente eléctrica  $\vec{j}$  é pura corrente de condução electrónica em virtude da maior mobilidade do electrão relativamente ao ião). A corrente fornecida pelo gerador *MHD* está também condicionada pela estrutura do sistema de eléctrodos de ligação, como se verá seguidamente.

Consideremos primeiro o caso do gerador dotado com dois únicos eléctrodos contínuos (gerador de Faraday); neste caso o campo de Hall fica em curto circuito,  $\vec{E}_H = 0$ , e facilmente se deduz:

$$j_F = \frac{\sigma}{1 + \beta^2} (E_F - uB)$$

$$j_H = -\beta j_F.$$

Sendo  $\beta \gg 1$  tem-se  $j_F \ll j_H$  o que revela baixo rendimento em vista da pequena fracção de corrente colectada (a corrente de Faraday) e da baixa condutividade equivalente  $[\sigma / (1 + \beta^2)]$ .

Consideremos agora o caso do gerador segmentado, isto é, dotado de elevado número de eléctrodos individuais, de modo que a corrente de Hall não possa circular,  $j_H = 0$ ; neste caso deduz-se:

$$j_F = \sigma(E_F - uB)$$

$$E_H = \beta(E_F - uB).$$

A condutividade equivalente é agora idêntica à condutividade real e toda a corrente é colectada.

Os conversores *MHD* têm sido operados em dois regimes diversos: ciclos aberto e fechado. Em ciclo aberto o fluido é lançado na atmosfera após atravessar o gerador. Este regime põe, é claro, problemas de poluição e de recuperação dos aditivos. Além disso, o fluido necessita de ser elevado a pressão superior à atmosférica, e como quanto mais elevada é a pressão, menor é o grau de ionização (tendo em atenção a lei de Saha), há dificuldade em atingir o grau de ionização desejado. Em ciclo fechado, após atravessar o gerador, o fluido é arrefecido (de modo a estabelecer a queda de pressão necessária), em seguida comprimido, aquecido e de novo lançado no gerador.

O conversor *MHD* está sujeito a perdas térmicas e eléctricas através dos eléctrodos assim como está também sujeito à influência de impurezas que tendem a reduzir a temperatura electrónica e portanto também o rendimento do conversor. Os rendimentos atingidos ou calculados até à data são da ordem de 40 a 55%. Encara-se como interessante o projecto de associar um turbo-alternador à saída dum gerador *MHD* de modo a aproveitar uma maior queda de temperatura do fluido motor e a elevar por conseguinte o rendimento global do sistema de conversão.

O conversor *MHD* revela-se atractivo: (i) pela eliminação de maquinismos com componentes móveis; (ii) pela possi-

bilidade de funcionar com um fluido motor a temperatura muito superior à temperatura do fluido num gerador convencional; (iii) pela elevada densidade de potência (a geração é devida ao desenvolvimento de forças volúmicas no seio do próprio fluido ao passo que na turbina as forças motoras são superficiais e desenvolvem-se na interface do fluido com o rotor); (iv) pelas reduzidas dimensões do radiador pois que funciona a mais alta

temperatura e a eficiência de arrefecimento por radiação é portanto muito superior. Considera-se o conversor *MHD* operando em ciclo fechado como tendo boas possibilidades para funcionar em associação com reactores nucleares dada a sua aptidão em aproveitar a elevada temperatura realizável em tais reactores assim como em aproveitar directamente a radiação  $\gamma$  como agente de ionização do fluido condutor.

## Neutrões e Matéria Condensada

por FREDERICO GAMA CARVALHO

Laboratório de Física e Engenharia Nucleares — Junta de Energia Nuclear — Sacavém

### 1. Introdução

Na última década, os neutrões chamados lentos — energia inferior a 1 eV (1), — adquiriram grande importância no estudo das ligações interatómicas dos corpos que constituem o nosso mundo físico, a ponto de serem considerados hoje em dia ferramenta das mais valiosas de que dispõe o investigador naquele domínio. Este facto deve-se naturalmente às propriedades do neutrão, que determinam a natureza específica da sua interacção com a matéria, mas deve-se também ao progresso tecnológico que levou à construção de fontes de neutrões adequadas à experimentação. Em particular os reactores nucleares permitem pôr à disposição do experimentador feixes de radiação suficientemente intensos para este tipo de aplicações.

(1) O electrão-volt, unidade correntemente usada na Física Atómica e na Física Nuclear, define-se como a variação de energia que experimenta um electrão ao deslocar-se entre dois pontos dum campo eléctrico entre os quais existe a diferença de potencial electrostático de 1 V (1 eV =  $1,502 \cdot 10^{-12}$  erg = 11605 °K. $k$ , em que  $k$  é a constante de Boltzmann).

Nos parágrafos seguintes, procuraremos apresentar ao leitor os aspectos essenciais da utilização dos neutrões lentos no estudo dos estados de agregação da matéria. Entende-se por tal, o estudo do arranjo ou disposição espacial dos átomos nos corpos físicos (1) (*estrutura estática* ou, simplesmente, *estrutura*) e o estudo da intensidade e natureza das ligações entre eles, bem como o estudo dos seus movimentos característicos (*estrutura dinâmica*, chamada *dinâmica das redes cristalinas*, na matéria cristalina).

Hoje em dia encontra-se com frequência a expressão *matéria condensada* nas publicações em que se tratam problemas do domínio que acabamos de definir. Por matéria condensada deve entender-se qualquer porção de matéria na qual existam forças de ligação, observáveis experimentalmente, entre as unidades físicas mais complexas, de características bem definidas, que nela se podem distinguir. Essas ligações determinam as propriedades macroscópicas da matéria, como a

(1) A designação corpo físico abrange aqui também as moléculas.