

Energia no Universo (*)

JOSIP KLECZEK

Astronomical Institute of the Academy of Sciences, Prag, Czechoslovakia

O Universo é constituído por *partículas elementares* (protões, electrões e neutrões) e por *fotões*. Do ponto de vista energético podemos portanto considerar dois componentes distintos do Universo: um *Universo de partículas* constituído por partículas elementares e um *Universo fotónico*. Para sermos precisos, devemos mencionar também os neutrinos e as ondas de gravitação, mas os seus fluxos e conteúdos energéticos não são ainda conhecidos.

1 Energia do Universo de partículas (i.e. Universo de matéria)

Toda a partícula elementar ou sistema de partículas elementares (desde os núcleos atómicos às super-galáxicas) têm uma energia intrínseca associada. A energia total de uma partícula (ou sistema de partículas) depende da sua massa em repouso m (que é uma propriedade fundamental da partícula) e também da velocidade v com que a partícula se desloca em relação ao meio exterior. Correspondentemente, a partícula tem uma *energia de repouso* ($m c^2$) e uma *energia cinética* ($1/2 m v^2$). A energia total é portanto

$$E = m c^2 + 1/2 m v^2 \quad (1)$$

Este resultado é verdadeiro para a maioria das partículas que observamos no Universo, porque elas se deslocam com velocidades muito menores que a velocidade da luz.

Há contudo uma pequena fracção das partículas do Universo que se movem com velocidades elevadíssimas, isto é, com velocidades próximas da velocidade da luz c . Evidentemente, um protão ou qualquer outra partícula *material* ou sistema de partículas nunca pode atingir a velocidade da luz e por isso — segundo as ideias ideias da Mecânica Clássica — uma

partícula material nunca pode ter uma energia comparável com a sua energia de repouso. Mas as medidas efectuadas sobre os raios cósmicos mostram que há protões com energias milhões ou mesmo biliões de vezes superiores. Tais partículas designam-se *relativistas*; movem-se com uma velocidade próxima da velocidade da luz, a sua energia cinética é comparável à sua energia de repouso ou mesmo superior, e neste caso a Teoria da Relatividade conduz a uma nova expressão para a energia total da partícula:

$$E = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (2)$$

Para velocidades v muito inferiores à velocidade da luz ($v/c \ll 1$) esta expressão reduz-se à expressão clássica da energia total da partícula, dada pela expressão (1).

As partículas relativistas (partículas elementares ou núcleos atómicos) no espaço inter-galáctico, inter-estelar ou interplanetário designam-se por *raios cósmicos*. Pequenos feixes de partículas relativistas são também produzidos pelos físicos das Altas Energias, utilizando aceleradores de partículas de grande dimensão.

1.1. Energia de repouso ($m c^2$)

Trata-se de uma propriedade fundamental de qualquer partícula material ou sistema de partículas elementares. Corresponde a uma energia elevadíssima, porque c^2 é uma grandeza com um valor muito elevado, i.e. $9 \times 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ou $9 \times 10^{20} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$. Um corpo com uma massa de 1 kg tem uma energia em repouso

(*) Trabalho apresentado na Escola de Verão da União Astronómica Internacional para Jovens Astrónomos, Espinho, Setembro 1986; tradução de J. Bessa Sousa.

de $1 \text{ kg} \times 9 \times 10^{16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ou $9 \times 10^6 \text{ J}$. Esta energia corresponde a $2,5 \times 10^{10} \text{ khw}$. Quem, no nosso planeta, poderia pagar o preço da energia contida num quilograma de qualquer substância (matéria), seja 1 kg de carvão, petróleo, urânio ou água? Mesmo uma pequena porção de matéria — i.e. um agregado de partículas elementares (protões, electrões e neutrões) — representa um gigantesco reservatório de energia.

É por isso natural fazer a seguinte pergunta: como extrair energia da matéria?

O assunto deste artigo é justamente identificar e caracterizar as forças que fazem com que a matéria do Universo possa libertar energia para o exterior. Trata-se de um problema muito geral que procuraremos descrever e sintetizar no âmbito do presente artigo.

Nós, habitantes do terceiro planeta do sistema solar, somos apenas uma parte ínfima do Universo e apenas um elo extremamente ténue na sua evolução. Por isso não podemos ultrapassar as leis do Universo, mas tão só actuar no estrito contexto dos limites fixados por essas leis.

Quais dos processos libertadores de energia no Universo é que usamos? Qual a eficiência dos processos utilizados? Como poderemos aprender, do Universo, a extrair energia da matéria com mais eficiência? Tentaremos responder a estas questões num segundo artigo desta série ⁽¹⁾.

Interacção entre partículas

Nenhuma partícula do Universo está completamente isolada, porque ela faz parte, de facto, de algum sistema físico (núcleo atómico, átomo, molécula, cristal, meteorito, satélite, planeta, cometa, estrela, agregados de estrelas, galáxias, enxames de galáxias, supergaláxias). Uma grandeza característica ΔE expressa, em cada situação particular, em que grau está a partícula ligada ao seu sistema; esta grandeza designa-se por *energia de ligação*. Para «entrar» num sistema a partícula deve libertar, necessariamente, esta energia de ligação; tem de «pagar» a sua associação ao sistema. A partícula «paga» a energia de ligação («jóia» de

entrada) a partir da sua energia de repouso $m c^2$. Ela «paga» através do decréscimo da sua massa de repouso, de uma quantidade

$$\Delta m = \Delta E/c^2 \quad (3)$$

que se designa por *perda de massa* (no processo de ligação).

A libertação (isto é emissão, expelir para o exterior) de energia de um sistema é pois acompanhada de um decréscimo da sua massa em repouso.

No Universo, a energia de repouso é libertada da matéria pela acção de quatro interacções (i.e. forças) entre as partículas elementares: *nuclear, electromagnética, fraca e gravítica*. O processo mais eficaz de expelir (libertar) energia da matéria é, contudo, através da sua *aniquilação* com a anti-matéria.

Analisemos então como actuam, em que actuam e qual o grau de eficácia de cada processo para promover a libertação de energia da matéria.

(i) *Forças Nucleares*

As forças nucleares, também designadas por *interacções fortes*, promovem a ligação entre protões e neutrões criando um sistema chamado núcleo atómico. Estas forças são muito eficazes na libertação da energia de repouso das partículas constituintes do núcleo. Por exemplo, na transformação de cerca de 52 protões num núcleo de ferro, quase 1 % da energia de repouso dos protões é libertada para o exterior. Uma tal síntese do ferro a partir do hidrogénio decorre efectivamente no interior profundo de estrelas com massas quatro ou mais vezes superiores à massa do nosso Sol.

No interior de muitas estrelas o hidrogénio é sintetizado pelas forças nucleares em hélio e elementos mais pesados. Este processo designa-se por *nucleosíntese* e a energia de ligação libertada é emitida pelas estrelas sob várias formas de radiação.

No nosso Sol, por exemplo, meio bilião de toneladas de hidrogénio são transformadas em hélio em cada segundo! A perda de massa total

⁽¹⁾ *Energia ao serviço da Humanidade*; a publicar num próximo número da Gazeta de Física.

é de cerca de 4 milhões de toneladas por segundo e a energia libertada, $3,8 \times 10^{26}$ W, é emitida pelo Sol essencialmente sob a forma de luz visível e de radiação infra-vermelha. Esta importante grandeza — i.e. a energia emitida pelo Sol em cada segundo — tem um nome próprio, a chamada *luminosidade solar*.

O principal e mais importante período da vida das estrelas é caracterizado pela acção das forças nucleares que transformam o hidrogénio em hélio. O hidrogénio é de longe o elemento mais abundante nas estrelas e no Universo em geral (a nossa Terra perdeu o seu hidrogénio na fase inicial da sua evolução). Um protão, ao entrar na constituição de um núcleo de hélio liberta cerca de 7 MeV que representa 0,7 % da sua energia em repouso. Um valor tão elevado da energia de ligação dos protões nas partículas alfa (α , i.e. núcleos de He) explica a elevada estabilidade das partículas α com respeito às perturbações externas, e também a elevada eficácia das forças nucleares para libertarem energia da matéria. Este facto e, também, a elevada abundância de hidrogénio no Sol e nas estrelas em geral, explicam por que razão a combustão termo-nuclear do hidrogénio em hélio alimenta a luminosidade estelar por períodos extremamente longos: no caso das estrelas semelhantes ao Sol a combustão do hidrogénio dura cerca de 15 biliões de anos.

(ii) *Forças electromagnéticas*

As forças electromagnéticas actuam entre partículas electricamente *carregadas*; atraem electrões aos núcleos atómicas, ligam átomos a átomos nas moléculas, moléculas a cristais, a poeiras, meteoritos, e outros corpos cósmicos de pequenas dimensões (até cerca de 500 km).

A energia de ligação libertada pelas forças electromagnéticas é, contudo, uma fracção extremamente pequena da energia de repouso do sistema. Ilustremos esta afirmação com alguns exemplos.

Na recombinação de um electrão com um protão liberta-se uma energia de 13 eV, que é cerca da centésima milésima parte da sua energia de repouso.

A maioria dos fotões emitidos pelo Sol tem origem na recombinação de um electrão com um átomo neutro de hidrogénio, para formar um ião negativo de hidrogénio: $H + e^- \rightarrow H^- + \text{fotão}$. O fotão tem uma energia de alguns eV apenas, o que significa cerca de 1 bilionésimo da massa de repouso do átomo de hidrogénio mais o electrão capturado.

Mencionemos por último o exemplo mais drástico da combustão de produtos fósseis, por exemplo do carbono:



Neste processo, de 1 kg de matéria (0,3 kg de carbono e 0,7 kg de oxigénio) nós recebemos cerca de duas mil quilocalorias ($8,4 \times 10^6$ J) de calor. Lembremos que a combustão é uma reacção química, e como tal uma consequência das forças electromagnéticas que se manifestam entre átomos. A energia de repouso de 1 kg (de oxigénio e carbono) é 9×10^9 J, logo a eficácia da combustão do carvão e de outros combustíveis fósseis (petróleo, gás natural) é cerca de 1 bilionésimo ou ainda menos.

As forças nucleares, com uma «eficácia» de $10^{-3} - 10^{-2}$, são por isso muitos milhões de vezes mais eficientes na libertação da energia de repouso da matéria, que as forças electromagnéticas.

Neste contexto, o processo de queima de combustíveis fósseis pode comparar-se ao comportamento de um fumador que vai a um banco, levanta dez milhões de dólares, gasta alguns dólares na compra de fósforos e cigarros... e deita fora o resto do dinheiro!

No Universo, as forças electromagnéticas têm apenas uma importância diminuta nos processos de libertação de energia. É a forma mais ineficaz de libertar energia da matéria. Não é verdadeiramente surpreendente que para um ser inteligente — o homem da Terra, essa forma constitua ainda o processo mais importante de libertar energia da matéria?

(iii) *Interacções fracas*

As interacções fracas correspondem às forças que participam no decaimento radioactivo (decaimento β) dos núcleos atómicos. Elas par-

tipicam no processo da síntese nuclear nas estrelas e facilitam a libertação de energia pelas forças nucleares, ao sintetizarem núcleos mais pesados a partir de prótões. Neste processo de formação de núcleos mais pesados a partir dos prótões, pelo menos metade dos prótões são transformados em neutrões, justamente pela acção das forças das interacções fracas.

A própria energia geotérmica (libertada no interior da Terra) advém do decaimento β dos núcleos radioactivos presentes. Parte desse calor aparece nas nascentes de água quente e na lava que sai dos vulcões em actividade. Numa forma menos espectacular, a energia calorífica de origem geotérmica atravessa continuamente a crosta terrestre libertando-se para o espaço. O fluxo total de calor geotérmico através da superfície da Terra (32 TW; 1 TW corresponde a 1 bilião de kilowatts ou seja 10^{12} W) é cerca de quatro vezes superior ao consumo energético de toda a Humanidade, em cada segundo ($8 \text{ TW} = 8 \times 10^{12} \text{ W}$).

Nos primeiros tempos de formação da nossa Terra, a sua energia geotérmica era cerca de 15 vezes maior do que actualmente. Neste contexto é interessante assinalar que a idade dos núcleos radioactivos no interior da Terra é cerca de 7 biliões de anos. Eles formaram-se nas gigantescas explosões supernova, frequentes naqueles tempos — foi há 2,5 biliões de anos antes da Terra se ter condensado a partir da névem fotoplanetária. Os restos da supernova enriqueceram a matéria interestelar, da qual se formaram posteriormente o Sol e todos os planetas do sistema solar. O *calor geotérmico* é assim um resíduo ténue do calor imenso (correspondente a temperaturas de biliões de Kelvin) existente nas supernovas. Desde então o calor permaneceu «escondido» nos núcleos radioactivos.

(iv) *Forças gravíticas*

As forças gravíticas tornam-se particularmente importantes ao nível dos grandes corpos e sistemas. Assim, por exemplo, um planetoide com o tamanho de 500 km ou mais tem uma forma esférica devido à sua própria gravitação. Por outro lado, um planetoide com dezenas

de quilómetros pode apresentar formas muito irregulares: as forças electromagnéticas são mais importantes em face da sua massa, actuando apenas entre moléculas vizinhas, enquanto a tendência gravitacional para a esferecidade se torna desprezável.

A energia de ligação gravitacional de um corpo de grande dimensão (p. ex. uma estrela) é proporcional ao quadrado da sua massa e inversamente proporcional ao seu raio, ou seja, $-G M^2/R$, onde G é a constante universal da atracção gravítica ($G = 6,670 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$). Põe-se o sinal negativo nesta energia de ligação porque ela representa uma *perda* para a referida estrela, pois foi retirada da energia de repouso da estrela e radiada para o exterior.

As estrelas são condensadas, por auto-gravitação, a partir de gigantescas núvens de matéria interestelar arrefecida. Quando se inicia a contracção da névem, a sua dimensão R é de alguns meses-luz (isto é, $10^{15} - 10^{16} \text{ m}$). Uma névem tão grande (também chamada um glóbulo) tem uma energia de ligação desprezável, porque R está no denominador da expressão da energia de ligação atrás apresentada. Pela contracção o tamanho R diminui e a energia de ligação do sistema aumenta.

Que acontece à energia gravítica de ligação libertada? De acordo com um teorema da Física (virial theorem), metade dessa energia é convertida em energia cinética dos átomos individuais no interior da névem — o que significa que o material é aquecido — enquanto a outra metade da energia gravítica de ligação é irradiada para o espaço cósmico exterior. Uma estrela nesta fase de evolução (tamanho decrescente, energia de ligação a aumentar, temperatura no interior a crescer) toma o nome de *proto-estrela*.

Uma proto-estrela obtém toda a sua radiação (essencialmente radiação infravermelha) da sua energia de repouso $M c^2$, graças às forças de gravitação. Quando a temperatura atinge 7 milhões de Kelvin ou mais (na região central da proto-estrela), iniciam-se as reacções nucleares que convertem hidrogénio em hélio: as forças nucleares tomam o comando das ope-

rações para a subsequente libertação de energia de repouso. Termina então a contração da *proto-estrela* e a recém-nascida estrela inicia o período mais longo (termonuclear) da sua vida, no qual se dá a conversão do seu elemento mais abundante — hidrogénio — em hélio.

Após muitos milhões de anos — quando todo o hidrogénio na região central (com uma massa cerca de $M/8$) se converteu em hélio — a gravitação aparece de novo a dominar, contraindo a estrela e aquecendo subsequentemente a sua região central, muito rica em hélio (helium core). De novo as forças gravitacionais libertam energia da energia de repouso, suportando assim a luminosidade da estrela e o calor no seu interior. Quando se atinge a temperatura de 100.000.000 K, o hélio começa a ser convertido em carbono, depois em oxigénio, etc. Os períodos alternados de efeitos essencialmente nucleares e gravíticos terminam finalmente com uma drástica contração gravítica, que representa o colapso da estrela. O estado final da evolução estelar é então uma *anã branca*, uma *estrela de neutrões* ou um *buraco negro*, tudo dependendo da massa inicial da estrela.

Numa escala alargada, a gravitação pode provavelmente libertar até 60 % da massa de repouso de um sistema. Podemos deste modo explicar as fantásticas explosões de núcleos galácticos, radiogaláxias e galáxias infravermelhas — isto é, galáxias que irradiam substancialmente mais sob a forma de radiofrequências e radiação infravermelha do que em luz visível.

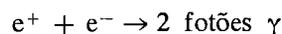
A gravitação desempenha um papel fundamental à escala do Universo: a expansão do Universo decresce a sua própria energia de ligação e por isso a própria velocidade da expansão é gradualmente reduzida. Tanto as observações ópticas como as observações das radiofrequências, feitas com os instrumentos mais avançados, indicam que a expansão deverá terminar passados cerca de 30 biliões de anos. Ocorrerá então o processo inverso — a contração do Universo — com uma duração de cerca de 40 biliões de anos e que conduzirá

a um imenso colapso gravitacional de todo o Universo. Devemos contudo realçar aqui que esta imagem da evolução do Universo permanece controversa, podendo as futuras observações levar à alteração destas ideias. É que tanto nos primeiros como nos últimos instantes do ciclo do nosso Universo (isto é, os chamados Big Bang e Big Collapse) a *aniquilação da matéria* pela antimatéria pode desempenhar um papel fundamental, como mecanismo eficaz de libertação de energia a partir da energia de repouso, numa escala verdadeiramente cósmica.

(v) *Aniquilação da matéria*

A aniquilação da matéria é um processo bem conhecido para os físicos que estudam raios cósmicos ou que trabalham com aceleradores de partículas.

No interior profundo do Sol ocorrem mais de 10^{38} processos de aniquilação em cada segundo, nos quais positrões (e^+) libertados nas reacções termonucleares colidem com electrões (e^-) existentes no plasma circundante, transformando-se nesse processo toda a energia de repouso das partículas em fotões *gama*:



A energia de repouso do electrão é de 0,5 meV, e o mesmo acontece para o positrão; por isso cada um dos dois fotões γ possui uma energia de 0,5 meV.

De modo semelhante, um protão aniquila-se com um antiprotão, um neutrão com um antineutrão, etc. A eficiência deste processo é 100 %, porque toda a energia de repouso das partículas materiais se converte em energia da radiação γ .

Devido à ausência natural de antimatéria na nossa Terra, o processo de aniquilação de matéria não desempenha qualquer papel como fonte de energia no nosso planeta. Mas há modelos em cosmologia segundo os quais toda a energia cinética necessária para a expansão do Universo em larga escala e para outros movimentos como as rotações das galáxias, das estrelas, dos planetas, etc., é suposta provir da energia libertada nos instantes iniciais pela

aniquilação de matéria pela antimatéria. Se as duas formas chegam ao contacto, produz-se uma grande quantidade de radiação gama na região de contacto; essa radiação γ , por sua vez, afasta a antimatéria da matéria, acelerando-as, de modo que a aniquilação não pode ser completa; é o chamado efeito Leidenfrost. De acordo com esta hipótese, deveriam ainda existir grandes quantidades de antimatéria no Universo. Não é, contudo, fácil fazer a estimativa desta quantidade, porque um fóton emitido por uma estrela é o mesmo que o antifóton emitido por uma anti-estrela. Não podemos dizer se uma estrela que observamos é feita de matéria normal (Koinomatter) ou de antimatéria. Neste contexto, as observações de neutrinos seriam mais promissoras, uma vez que a combustão de anti-hidrogénio produz antineutrinos, enquanto a combustão de hidrogénio nas estrelas normais (como o nosso Sol) produz neutrinos. Contudo, os métodos de detecção de neutrinos e antineutrinos existentes não são ainda suficientemente sensíveis.

1.2. Energia Cinética

Todas as partículas do Universo e todos os sistemas de partículas estão intrinsecamente dotadas de movimentos relativos, e portanto de energia cinética.

Tudo se move no Universo: as partículas do plasma e dos sólidos, dos líquidos, dos gases, das núvens; os satélites movem-se em torno dos seus planetas, os planetas movem-se em torno das suas estrelas, as estrelas rodam em torno dos seus eixos e participam na rotação da Galáxia, as galáxias movem-se em torno do centro das suas supergaláxias.

Os corpos celestes e os seus sistemas herdaram a sua energia cinética do material progenitor. Todos os movimentos no sistema solar são uma herança visível dos movimentos de rotação e de turbulência da névula progenitora do Sol. É interessante mencionar aqui que a energia rotacional dessa névula inicial acabou por se dividir igualmente entre o Sol e o movimento translacional dos planetas (em conjunto, 2×10^{35} J).

O movimento de translação caótico dos átomos, iões e electrões na matéria representa também energia cinética—calor. A parte principal do Universo observado está no estado de *plasma* e contém uma grande quantidade de calor. Por exemplo, a energia cinética associada aos movimentos térmicos de todos os átomos, iões e electrões no nosso Sol é de 3×10^{41} J, enquanto a energia de translação do movimento do Sol (relativamente às estrelas vizinhas, isto é, 19 km.s^{-1} em relação à constelação de Hercules) é três ordens de grandeza mais pequena. A energia cinética dos átomos, iões, electrões livres, determina o tipo de *estado da matéria* para uma dada densidade de matéria; ela decide, em última instância, se o agregado de partículas é um sólido, um líquido, um gás, um plasma, um gás degenerado, um gás de neutrões ou um gás de hiperões.

A energia cinética pode ser transferida para a componente fotónica do Universo. Nas colisões de átomos, iões e moléculas entre si ou com electrões livres, parte da sua energia cinética é transformada em energia de excitação ou ionização e pode então ser irradiada sob a forma de fótons. Sempre que um electrão num plasma passa na vizinhança de um ião, a sua trajectória é deflectida e parte da sua energia cinética é emitida sob a forma de um fóton. Todo o plasma perde a sua energia desta forma; os fótons emitidos chamam-se fótons térmicos de «bremsstrahlung». Os electrões relativistas dos raios cósmicos circulam em torno das linhas de força dos campos magnéticos perdendo a sua energia sob a forma de radiação sincrotrónica. Há ainda outros modos de passagem da energia da componente material para a componente fotónica do Universo. A absorção de fótons pela matéria constitui o processo inverso, no qual a energia do fóton se converte em energia cinética das partículas, isto é, em calor.

2. Energia do Universo fotónico

Há fótons em toda a parte do Universo, no vasto espaço entre as estrelas e entre as galáxias, e no interior das estrelas. As energias

dos fótons cobrem uma vastíssima gama de um diapasão, desde 10^{-11} eV a 10^{17} eV por fóton. A astronomia, até algumas décadas atrás, usava apenas uma oitava do diapasão (entenda-se luz), enquanto a astronomia da era dos voos espaciais usa a totalidade do diapasão, que atinge as 96 oitavas desde as ondas de rádio muito longas até aos fótons γ mais energéticos.

A energia total de todos os fótons existentes num cm^3 do espaço (a chamada densidade de energia da radiação), e a sua distribuição em função da energia (espectro), variam no tempo e no espaço. Dá-se na Tabela I a densidade de radiação em diferentes regiões.

TABELA I — Densidades da radiação em diferentes regiões do Universo de partículas.

Espaço inter-galáxico (predomínio de fótons 3 K)	0,4 eV. cm^{-3}
Espaço inter-estelar	1,1 eV. cm^{-3}
Vizinhança da Terra (face iluminada)	3×10^7 eV. cm^{-3}
Vizinhança do Sol	1 erg. cm^{-3} ⁽¹⁾
Região central do Sol	10^7 J. cm^{-3} ⁽¹⁾
Interior de uma estrela massiva (antes do seu colapso)	10^{11} MJ. cm^{-3}
Onda de choque numa supernova	10^{18} MJ. cm^{-3}

⁽¹⁾ 1 J = 10^7 erg, 1 erg = $6,25 \times 10^{11}$ eV.

Os fótons no espaço inter-galáxico são *fótons fósseis* porque eles sobreviveram desde os primeiros instantes da evolução do Universo (isto é, desde o Big Bang). É uma radiação isotrópica e o seu espectro corresponde no momento presente a uma temperatura de 3 K. A energia de cada fóton decresce à medida que o Universo se vai expandindo. No período de tempo de 10 biliões de anos, que é a idade do nosso Universo, os fótons γ acabarão lentamente por se degradar em ondas de rádio milimétricas e centimétricas. No interior da nossa Galáxia, próximo do plano da Galáxia, a radiação de origem estelar está sobreposta à radiação fóssil de fundo. A maior parte da energia consiste de fótons no infravermelho.

A radiação próxima da Terra e em todo o sistema planetário em geral, é sobretudo de origem solar apresentando o seu máximo na luz visível. No centro do sistema solar os fótons estão distribuídos de acordo com a lei de

Planck, uma vez que as regiões centrais das estrelas constituem a melhor aproximação de um *corpo negro* conhecida no Universo. O máximo da densidade de radiação correspondente à temperatura de 13 milhões de Kelvin ocorre para radiações com 2 \AA de comprimento de onda, e por isso os fótons na região central do Sol são fótons de raios X.

Nas regiões centrais das estrelas pesadas, no termo do seu estado termonuclear, e nas ondas de choque acompanhando o seu colapso, os fótons γ de elevadíssima energia existem em densidades extremamente elevadas. Tais fótons, com energias de muitos mega-electrões-volt, podem reverter energia de ligação aos nucleões

em núcleos atómicos e deste modo núcleos menos estáveis podem ser dissociados (foto-dissociação nuclear). Os nucleões libertados recuperaram assim a sua energia de repouso original, que possuíam no começo da evolução da estrela.

Os fótons transportam consigo energia e informação. O seu conteúdo de *informação* é a fonte mais importante do conhecimento que temos acerca do Universo. A *energia* trazida pelos fótons solares é a fonte de (quase) todos os movimentos do nosso planeta e também dos outros planetas que nos acompanham. Através das plantas verdes a energia solar entra em todos os organismos vivos da biosfera terrestre (foto-síntese). Esses fótons sempre foram e provavelmente continuarão a ser a base fundamental do desenvolvimento e do bem estar da sociedade humana. Estes tópicos serão objecto do nosso próximo artigo, sobre a Energia ao serviço da Humanidade.