



Nebulosa do Caranguejo (esquerda) e pulsar Caranguejo (direita): uma sobreposição de imagens de raios X (azul) e radiação óptica (vermelho). (Créditos: ESO, NASA e ESA)

Estrelas de neutrões

Constança Providência e Lucília Brito

Centro de Física Computacional

Departamento de Física da Universidade de Coimbra

Neste número dedicado ao Ano Internacional da Astronomia, o artigo da secção Gazeta ao Laboratório fala-nos de estrelas de neutrões, uma das grandes experiências do maior e mais rico laboratório a que podemos aceder: o Universo.

UM POUCO DE HISTÓRIA

A primeira observação de uma estrela de neutrões em luz visível foi realizada em 1997. Mas porque é tão difícil a detecção de um destes astros na luz visível?

Em 1967, a estudante de doutoramento Jocelyn Bell e o seu orientador Anthony Hewish observaram a emissão de impulsos regulares de ondas de rádio vindas da nebulosa do Caranguejo. Era como se

existisse um farol naquela nebulosa dando 30 voltas por segundo. Esta radiação foi interpretada como sendo emitida por uma estrela de neutrões isolada e em rotação. Anthony Hewish recebeu o Prémio Nobel da Física por esta descoberta, mas Jocelyn Bell foi esquecida...

A nebulosa do Caranguejo é o remanescente de uma supernova, a SN 1054, registada como uma estrela visível à luz do dia, por astrónomos chineses e árabes em 1054. Fica à distância de cerca de 6 300 anos-luz da Terra.

MAS AFINAL O QUE É E DE QUE É FEITA UMA ESTRELA DE NEUTRÕES?

Pensa-se que uma estrela de neutrões tem uma massa semelhante à do Sol, ou um pouco maior, mas não é provável que possa ter uma massa superior a duas massas solares. Enquanto que o Sol é constituído essencialmente por protões e electrões e algum hélio e tem um raio de cerca de 700 000 km, o raio da estrela de neutrões é da ordem de 15 km! Muitas das estrelas de neutrões conhecidas são pulsares, estrelas de neutrões que rodam com um período de rotação muito regular, que pode variar entre 0,001 s e 2 s. Estas estrelas têm um campo

magnético muito forte à superfície, cerca de 10^9 a 10^{12} G, podendo mesmo ir até 10^{15} G no caso dos magnetares. A radiação que nos chega destas estrelas é emitida ao longo do seu eixo magnético, o qual não está alinhado com o eixo de rotação. Se os telescópios que usamos para observar o espaço forem orientados na direcção do eixo magnético da estrela, conseguiremos observar a radiação emitida pela estrela, caso contrário não. Conhecem-se actualmente 1800 pulsares.

A matéria estelar é electricamente neutra: a carga total das partículas de carga negativa terá de ser compensada por partículas com carga positiva. Os principais constituintes de uma estrela de neutrões são neutrões, prótons e electrões mas os investigadores pensam que no interior da estrela poderão existir partículas bem mais exóticas: muões, hiperões, condensados de kaões ou de piões, ou mesmo quarks desconfinados ...

COMO PODE TER UMA ESTRELA DE NEUTRÕES UM RAIÃO TÃO PEQUENO?

Vamos voltar à história: em 1911 Rutherford verificou experimentalmente que apesar de o átomo ter um raio de cerca de 0,1 nm a sua massa devia estar concentrada numa pequena região, o núcleo atómico, com raio de 5-10 fm, ou

seja, cerca de 0,0001 do raio do átomo. Esta descoberta foi a base experimental de diversos modelos atómicos, como o de Rutherford, o de Bohr, etc. Em 1931 Landau propôs a existência de estrelas que não passariam de um núcleo gigante com cerca de 10^{56} nucleões ligados pela força gravítica. Foi a primeira proposta de existência de estrelas muito densas. Uma colher de chá da matéria do núcleo atómico tem a massa de mil milhões de toneladas!

Em 1932 James Chadwick identificou o neutrão: uma partícula sem carga eléctrica e com massa semelhante à do próton. Por esta descoberta Chadwick ganhou o Prémio Nobel da Física em 1935. A primeira proposta de existência de estrelas de neutrões foi feita pelos astrónomos Walter Baade e Fritz Zwicky em 1933. Segundo eles, as estrelas de neutrões seriam o resultado de uma supernova e teriam um raio de cerca de 10 km! Como observar um objecto tão pequeno num universo tão extenso? Por muitos anos estes astros foram considerados meros objectos teóricos, cuja detecção seria pouco provável ou mesmo impossível... Só voltaram a ser alvo de atenções após a descoberta de Jocelyn Bell!

O raio e a massa de uma estrela de neutrões

Através de alguns cálculos simples é possível fazer uma previsão do tamanho e da massa de uma estrela de neutrões. A fórmula semi-empírica da massa de von Weizsäcker parametriza a energia de ligação dos núcleos em função do seu número de massa A e o seu número atómico Z . A massa de um núcleo com A nucleões e Z prótons é dada pela expressão

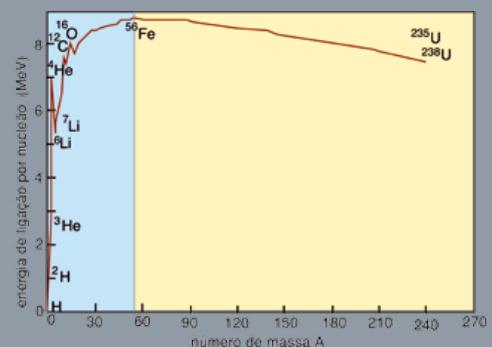
$$M(Z,A) c^2 = Z m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2 - B(Z,A)$$

onde $B(Z,A)$ é a energia de ligação, parametrizada por

$$B(Z,A) = a_{vol} A - a_{sup} A^{2/3} - a_{Coul} Z^2 / A^{1/3} - a_{sim} (Z - N)^2 / A \pm a_p A^{-1/2}$$

sendo a_{vol} , a_{sup} , a_{Coul} , a_{sim} e a_p parâmetros ajustados de modo a reproduzirem a massa dos núcleos estáveis. O primeiro termo desta expressão indica que a energia de ligação é proporcional ao número de nucleões; é o termo de volume já que o raio de um núcleo é proporcional à raiz cúbica do seu número de massa, $R=r_0 A^{1/3}$. Os três termos seguintes corrigem a contribuição de volume tendo em conta que (i) os nucleões à superfície do núcleo não estão tão ligados por não estarem rodeados de vizinhos por todos os lados (segundo termo) ; (ii) os prótons sentem a

força repulsiva de Coulomb (terceiro termo); (iii) a força nuclear é simétrica na carga e uma assimetria no número de prótons e de neutrões, não favorece a ligação (quarto termo). Finalmente, a última parcela reflecte o efeito de emparelhamento: os nucleões são partículas quânticas que estão mais ligadas se estiverem emparelhadas. O sinal mais (menos) corresponde a núcleos par-par (ímpar-ímpar); para núcleos com A ímpar, $a_p=0$.



Energia de ligação por nucleão em função do número de massa. O máximo ocorre para o ferro-56. Só as reacções de fusão dos elementos na zona a azul podem libertar energia.

A energia de um sistema ligado é uma quantidade negativa, simétrica da energia de ligação, $E(Z,A)=-B(Z,A)$. Se considerarmos um núcleo formado apenas de neutrões ($Z=0$), a energia por nucleão deste sistema reduz-se a

$$E(Z=0, A)/A = -a_{\text{vol}} + a_{\text{sup}} A^{-1/3} + a_{\text{sim}} \mp a_p A^{-3/2}$$

sendo as contribuições principais a primeira parcela, o termo de volume que é negativo, e o termo de simetria, terceira parcela. Como $a_{\text{vol}} \approx 16$ MeV é menor que $a_{\text{sim}} \approx 30$ MeV, esta quantidade é sempre positiva e um núcleo de neutrões não é estável. E se entrarmos em conta com a força gravítica, uma força atractiva, poderemos ter um núcleo formado apenas por neutrões, para o qual a energia seja negativa? Qual será o tamanho desse “objecto”? Teremos, então, de incluir a contribuição resultante da força gravítica na expressão da energia do sistema de nucleões. A energia gravítica de uma esfera de massa $M=Am_n$ é dada por

$$E_{\text{grav}} = -\frac{3GM^2}{5R} = -\frac{3G(Am_n)^2}{5R}$$

em analogia com a energia eléctrica de uma esfera de carga $Q = Ze$

$$E_{\text{Coul}} = \frac{3(Ze)^2}{54\pi\epsilon_0 R}$$

Incluindo a contribuição da energia gravítica e desprezando o termo de superfície e o de emparelhamento, que são muito pequenos para valores de A grandes, obtemos para a energia por partícula

$$E(A, Z=0)/A = -a_{\text{vol}} - \frac{3Gm_n^2}{5r_0} A^{2/3} + a_{\text{sim}}$$

Se A for suficientemente grande, a segunda parcela do segundo membro é dominante,

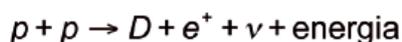
$$\frac{3Gm_n^2}{5r_0} A^{2/3} > a_{\text{sim}} - a_{\text{vol}}$$

e, portanto, a energia por partícula é negativa. Para valores de $A \sim 10^{56} - 10^{57}$, obtém-se um “núcleo” ligado com um raio $R \sim 10$ km e uma massa $M \sim 1 M_{\text{Sol}}$. Apesar de ser um cálculo muito simplificado, permite-nos obter a ordem de grandeza correcta do tamanho da estrela!

A FORMAÇÃO DE UMA ESTRELA DE NEUTRÕES

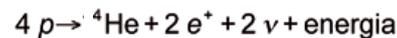
Pode parecer estranho mas uma estrela de neutrões nasce precisamente quando uma estrela normal com uma massa suficientemente grande morre! Nebulosas – como a nebulosa de Orion – são berços de estrelas, regiões no Universo com massas gasosas imensas contendo hidrogénio, um pouco de hélio, e restos de outras estrelas. Estas nuvens de gás interestelar consistem num gás não uniforme com uma temperatura de 10 a 2000 K, uma massa de 10 a $10^7 M_{\text{Sol}}$ e um raio de 1 a 100 anos-luz.

Será necessária uma grande compressão para se iniciarem reacções nucleares e libertação de energia. O pó protege o interior da nuvem da radiação de outras estrelas e o centro da massa gasosa arrefece o que dá origem a uma redução da pressão e o colapso gravitacional torna-se inevitável. A pressão gravitacional comprime o gás e a agitação térmica do gás equilibra a força gravitacional. A densidade e a temperatura no núcleo da estrela aumentam e quando a temperatura atingir 2000 K inicia-se a dissociação da molécula de hidrogénio em dois átomos de hidrogénio. A temperatura terá de atingir 10^7 K (cerca de 10^7 °C) para a fusão nuclear se tornar possível e a reacção de fusão de dois prótons num deuterão começar a ocorrer,

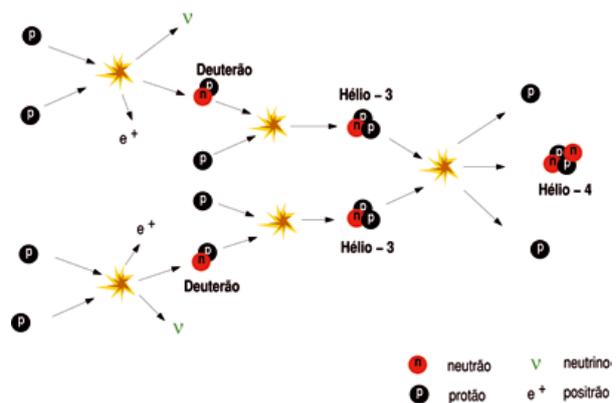


As partículas formadas, o deuterão (D), o positrão (e^+) e o neutrino (ν), têm, no seu conjunto, uma massa inferior à massa inicial dos dois prótons. A diferença de massa, $\Delta M = 0,41$ MeV/ c^2 , é libertada

na forma de energia e corresponde a $0,41 \times 1,602 \times 10^{-13}$ J. A fusão nuclear do hidrogénio para formar hélio correspondente à reacção



e é o processo mais importante no início da vida das estrelas. As estrelas irão passar a maior parte da sua vida nesta fase. Por cada quatro prótons, forma-se um núcleo de hélio e liberta-se 26,7 MeV de energia.



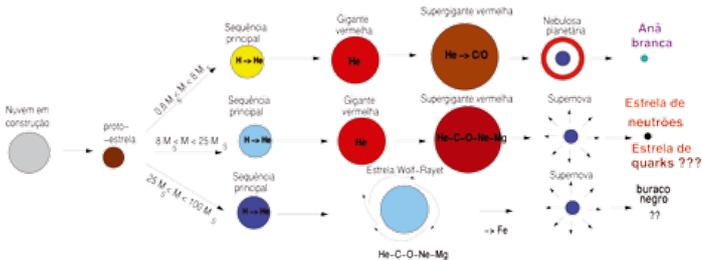
Produção de hélio numa reacção de fusão de prótons.

E quando se acaba o hidrogénio no centro das estrelas? Não se produz mais energia, a agitação térmica das partículas diminui e a força gravítica vence. A estrela contrai-se contribuindo para aumentar a temperatura no seu núcleo essencialmente formado por hélio rodeado por uma camada de hidrogénio que continua em “combustão”; as camadas mais externas da estrela expandem-se, e arrefecem deslocando-se o pico da radiação emitida para a zona do vermelho: a estrela evoluiu para uma gigante vermelha. Se houver massa suficiente, a pressão gravitacional sobre

o “núcleo” da estrela e o aumento da temperatura criarão condições à fusão de núcleos mais pesados. Quando a temperatura atingir 10^8 K inicia-se a combustão de três núcleos de hélio para formar carbono e posteriormente a combustão sucessiva dos núcleos mais pesados, carbono, oxigénio, néon, magnésio, silício até que o núcleo da estrelas é apenas formado por ferro, o elemento com maior energia de ligação. A partir deste momento não será possível libertar mais energia por fusão de dois núcleos e a produção de energia que sustém o colapso gravitacional termina.

Combustível	Produtos	Temperatura (K)	Densidade (g/cm ³)	Duração (anos)
Hidrogénio	He	7×10^7	10	10^7
Hélio (3-alfa)	C, O	2×10^8	2000	10^6
Carbono	Ne, Na, Mg, Al	8×10^8	10^6	10^3
Néon	O, Mg	$1,6 \times 10^9$	10^7	3
Oxigénio	Si, S, Ar, Ca	$1,8 \times 10^9$	10^7	0,3
Magnésio	Ni (decai em Fe)	$2,5 \times 10^9$	10^8	5 dias

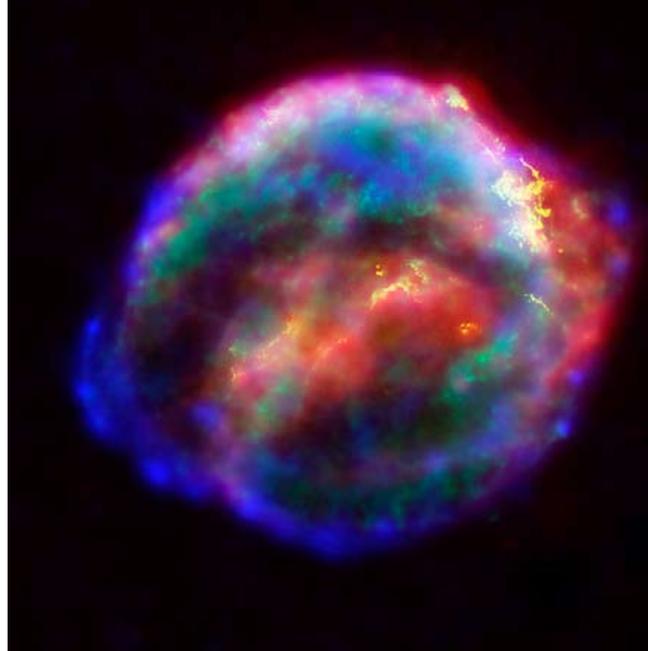
Estágios de uma estrela com $25 M_{\text{Sol}}$. A maior parte da vida da estrela é passada a converter hidrogénio em hélio.



Evolução estelar de acordo com a massa inicial da estrela. Para se formar uma estrela de neutrões a sua massa inicial deverá estar entre $8 M_{\text{Sol}}$ e $25 M_{\text{Sol}}$.

Uma estrela morre quando deixa de realizar a fusão nuclear e o seu caroço colapsa sob a acção da força gravítica. Durante o colapso, prótons e electrões no núcleo da estrela combinam-se para formar neutrões, daí o nome estrela de neutrões. O colapso terminará quando a pressão dos neutrões for suficientemente grande para equilibrar a pressão gravitacional. Entretanto, as camadas exteriores da estrela caem sobre o seu caroço e são reexpelidas numa onda de choque que é reavivada pela interacção dos neutrinos com a matéria nuclear. No centro da supernova resta uma estrela de neutrões com uma massa que não ultrapassa as duas massas solares. Poderá formar-se um buraco negro se o caroço da estrela tiver uma massa demasiado grande e a pressão dos neutrões não conseguir equilibrar a pressão gravitacional.

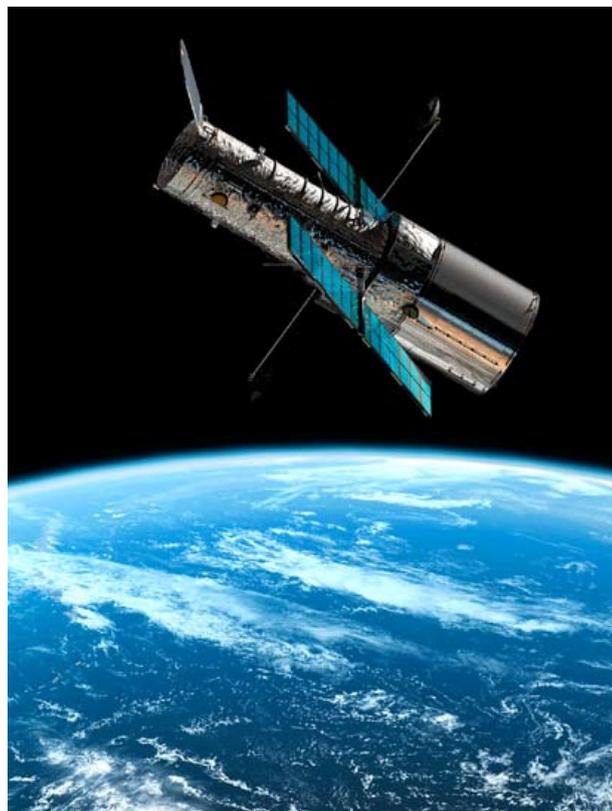
Na figura vemos a imagem duma supernova, captada pelo observatório Chandra, de radiação de raios X, óptica e infravermelho da SN 1604, supernova observada por Kepler em 1604.



Supernova SN1604 (Chandra X-ray Observatory compilação de radiação: raios X, óptica e infravermelho) (NASA).

Como podemos observar estas estrelas e conhecer as suas características?

Será necessário detectar a radiação electromagnética que emitem em todos os comprimentos de onda. Embora a atmosfera terrestre funcione como um filtro opaco a grande parte dos comprimentos de onda, a luz visível e as ondas de rádio conseguem atravessá-la e podem ser observadas à superfície do nosso planeta com a ajuda de telescópios ópticos e radiotelescópios. O Very Large Telescope (VLT) do Observatório Europeu do Sul (ESO) é o maior conjunto de telescópios ópticos do mundo, construído no deserto de Atacama, no norte do Chile. O maior radiotelescópio está instalado em Arecibo em Porto Rico e tem um diâmetro de 200 m.



O telescópio espacial Hubble (ESA).



O Very Large Telescope (VLT), no deserto de Atacama, no norte do Chile (ESO).

A radiação electromagnética emitida pelos diferentes astros poderá também ser observada através de telescópios espaciais, com a vantagem de não ser distorcida ou absorvida pela atmosfera terrestre. Um exemplo é o telescópio espacial Hubble, da NASA e ESA, posto a orbitar em torno da Terra em 1990. Detecta luz visível e demora 97 minutos a dar uma volta à Terra. Outros exemplos são: Chandra, o observatório de raios X da NASA, lançado para o espaço em 23 de Julho de 1999 e projectado para observar raios X; ou Fermi, o telescópio de raios gama projectado para detectar a radiação mais energética do universo.

Espera-se também conseguir detectar as ondas gravitacionais emitidas por estes astros quando são perturbados: durante um estrelamoto ou acreção de massa de uma estrela vizinha ou quando ocorrem transições de fase no seu interior. Neste caso, em vez do espectro electromagnético observa-se a deformação do espaço-tempo causada por um objecto com massa. VIRGO, um interferómetro laser de Michelson com dois grandes braços ortogonais, de aproximadamente 3 km cada um, instalado em Cascina, Itália, ou LIGO (Estados Unidos), GEO 600 (Alemanha) e TAMA (Japão) são detectores de ondas gravitacionais a funcionar presentemente, mas já estão programados detectores mais potentes como o LISA, uma colaboração entre a ESA e a NASA.

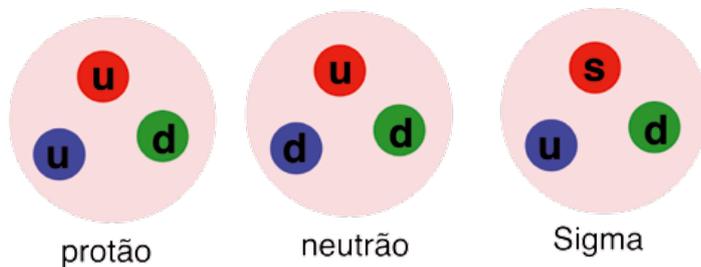
NEM SÓ DE NEUTRÕES SE FAZ UMA ESTRELAS DE NEUTRÕES

Mas afinal uma estrela de neutrões é apenas constituída por neutrões? Na verdade a constituição da estrela de neutrões vai depender da densidade hadrónica no seu interior e varia da superfície até ao centro. Através da força fraca um protão captura um electrão, transformando-se num neutrão e emitindo um neutrino:



Numa estrela de neutrões estabelece-se um equi-

líbrio químico entre os diversos tipos de partículas, o qual define, para cada densidade hadrónica, a fracção existente de neutrões, protões, electrões ou outras partículas, como os hiperões.



Constituição de um protão, um neutrão e um Sigma (Σ^0) ao nível de quarks *up* (u), *down* (d) e *estranho* (s).

Os protões e neutrões não são partículas elementares. São formados por quarks, os blocos elementares constituintes das partículas conhecidas por hadrões. Há seis tipos diferentes de quarks mas as partículas existentes numa estrela de neutrões são apenas formadas por combinações dos três quarks mais leves: o quark *up* (u), o quark *down* (d) e o quark *estranho* (s). Um neutrão é constituído por dois quarks *down* (d) e um quark *up* (u) enquanto um protão é formado por dois quarks *up* (u) e um quark *down* (d). Protões e neutrões são os bariões mais leves e, como são fermiões, cada estado quântico só pode ser ocupado por uma partícula. Num sistema em equilíbrio começam por preencher os estados de energia mais baixa. Como a fracção de neutrões é muito grande numa estrela de neutrões, a energia destas partículas no nível de energia mais alta é muito grande, podendo ser superior à massa de outras partículas semelhantes ao protão e ao neutrão mas com um ou mais quarks (s) em vez dos quarks (u) ou (d): são os hiperões. O Lambda (Λ), o Sigma (Σ) e a Cascata (Ξ) são exemplos de hiperões. Neste caso será mais favorável do ponto de vista energético o aparecimento destas partículas em vez de neutrões e ocorre, por exemplo, a reacção



Desde que se atinjam densidades suficientemente altas no interior de uma estrela é natural que existam hiperões. Matéria com hiperões é conhecida por matéria estranha por conter o quark *estranho* (s). Esta matéria é um dos possíveis constituintes exóticos de uma estrela de neutrões.

Podem também formar-se condensados de kaões ou de piões. Piões e kaões são hadrões formados por um quark e um anti-quark. São conhecidos por mesões e são bósons. Bósons são partículas quânticas, bem distintas dos fermiões, pois, ao contrário destes, podem ocupar todas o mesmo estado quântico. Quando muitas partículas estão no mesmo estado de energia dizemos que se formou um condensado. Os piões que poderão aparecer numa estrela de neutrões têm carga negativa e são formados por um quark (d) e um anti-quark (\bar{u}) enquanto que os kaões são formados por um quark (s) e um anti-quark (\bar{u}). Um condensado de

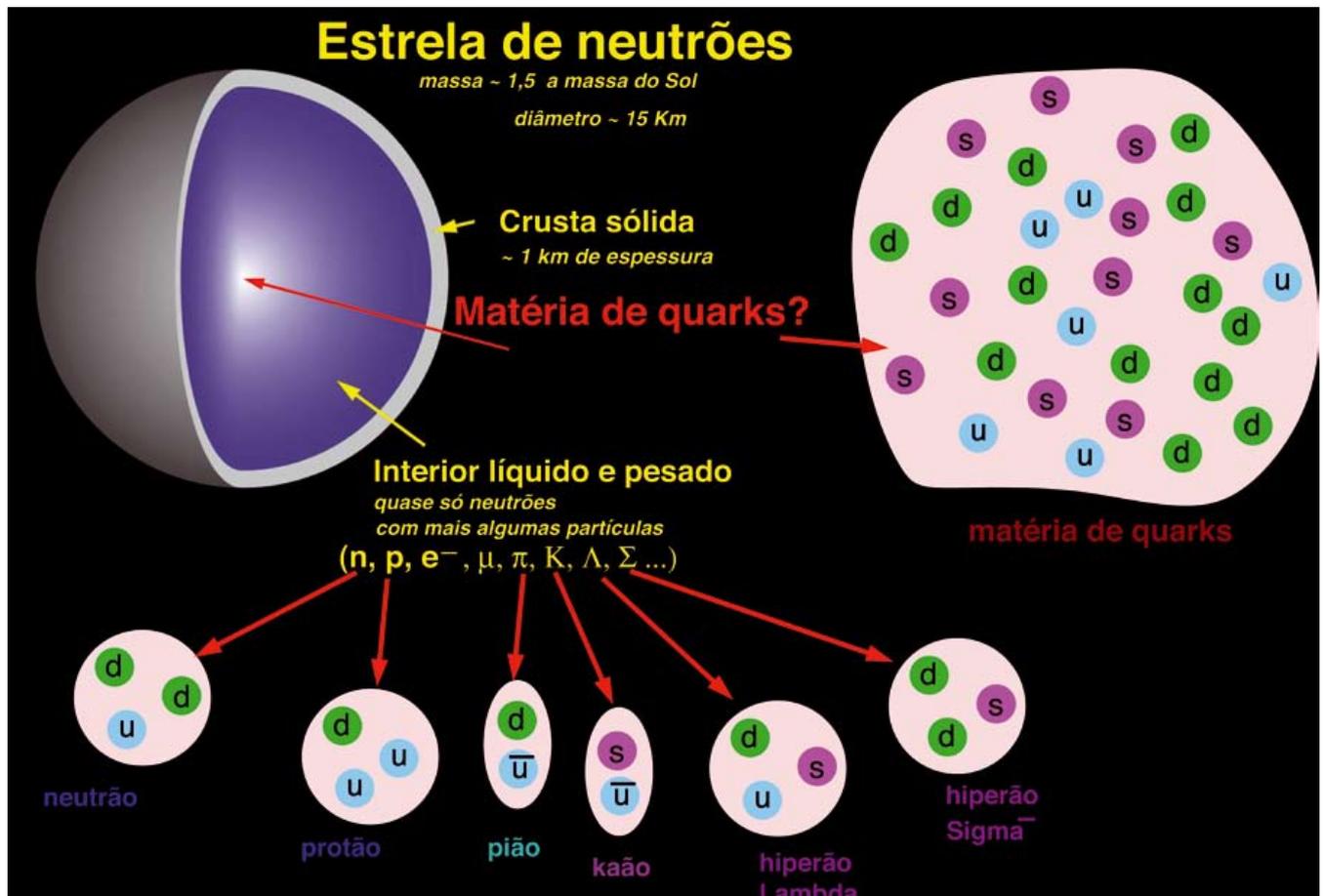
kaões contém quarks estranhos e por isso é outra forma de matéria estranha.

Até agora nunca foram detectados quarks isolados no laboratório. Talvez seja possível formar matéria de quarks desconfinados no grande colisionador LHC, no CERN. Mas no interior das estrelas de neutrões atingem-se pressões tão altas que possivelmente os neutrões e prótons começam a sobrepor-se, podendo ocorrer uma transição para uma fase sem prótons e neutrões mas sim com quarks isolados. Matéria de quarks desconfinados é outra possível fase exótica de uma estrela de neutrões.

E sobre as estrelas neutrões, o que falta descobrir? Mui-

crosta é outro domínio a desvendar: existirão estrelas-motos? Como arrefece a estrela? Que informações se recolherão a partir da detecção das ondas gravitacionais? É também necessário descobrir por que razão têm campos magnéticos tão fortes, observar e interpretar a evolução destes campos com o tempo. Há, pois, muitas questões em aberto e, como tal, muito trabalho a fazer numa área interdisciplinar que reúne físicos nucleares e de partículas, astrofísicos, físicos computacionais e cosmólogos.

A rede europeia CompStar (<http://www.compstar-eps.org/>), recentemente formada, tem justamente como objectivo principal reunir físicos europeus e



Possível constituição de uma estrela de neutrões. No seu interior poderão existir diferentes tipos de matéria exótica: desde hiperões, a condensados de kaões ou um caroço de quarks.

to! Precisamos de medir o raio e a massa de uma estrela de neutrões, pois, até agora apenas temos medições da razão massa/raio ou da massa, o que é pouco. Pretende-se descobrir que sinais indicam que a estrela é constituída por matéria exótica e, em particular, se é constituída por quarks desconfinados, possivelmente numa fase conhecida por supercondutora na cor. O estudo do comportamento da sua

do resto do mundo interessados no estudo destes objectos exóticos de modo a conjugarem as suas diversificadas experiências, contribuindo para formar uma nova geração de físicos nesta área interdisciplinar.

Referências

Norman K. Glendinning, Compact Stars, Springer Verlag, 2000.
J. M. Eisenberg e W. Greiner, Nuclear Models III, North Holland, 1976.
http://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_star