Nucleossíntese dos elementos e astrofísica nuclear

VALDIR GUIMARÃES E MAHIR S. HUSSEIN

INTRODUÇÃO

"Nós somos feitos de poeira estelar." Essa foi uma frase dita por Carl Segan alguns anos atrás em um dos episódios da série *Cosmos*. O que essa frase quer dizer é que, com exceção de alguns poucos elementos leves como hidrogênio, hélio e lítio, praticamente todos os elementos presentes atualmente na Terra se originaram nas estrelas. A matéria no universo de hoje, em termos de abundância relativa, é 73% de hidrogênio, 25% de hélio, 1% de oxigênio, e todos os outros elementos juntos correspondem a apenas 1%. Por outro lado, no corpo humano há 61% de oxigênio, 23% de carbono, 10% de hidrogênio, 2,5% de nitrogênio, 1,4% de cálcio, 1,1% de fósforo, e o restante, 0,9%, corresponde a outros elementos inclusive o ouro (que não vem do dentista) numa proporção de 0,000001%. Assim, com exceção do hidrogênio (que se formou poucos minutos após o big-bang), o ser humano é de fato feito de poeira estelar.

VALDIR GUIMARÃES e **MAHIR S. HUSSEIN** são professores do Instituto de Física da USP.

A formação dos elementos leves no universo primordial e dos elementos mais pesados no meio intergalático e nas estrelas ocorreu através de reações nucleares. Podemos dizer que são as reações nucleares as responsáveis pela produção de energia e síntese dos elementos nos vários entes astrofísicos. Assim sendo, as reações nucleares têm um papel determinante na existência e evolução dos entes astrofísicos, do pacato Sol às espetaculares explosões de supernovas. O estudo das reações nucleares envol-

vidas nos processos astrofísicos faz parte do que chamamos astrofísica nuclear e o processo de formação dos elementos é chamado de nucleossíntese. A astrofísica nuclear é então a ciência que lida com o estudo das reações nucleares que geram a nucleossíntese dos elementos tanto no universo primordial como no meio estelar. É, portanto, a astrofísica nuclear a responsável por tentar trazer respostas às questões mais básicas e importantes de nossa própria existência e de nosso futuro: como se deu a origem dos elementos que fez a vida na Terra possível? Como é gerada a energia do Sol? Como o Sol, o sistema solar, as estrelas e nossa galáxia se formaram e como eles evoluem? Qual é a densidade de matéria no universo? O universo vai um dia colapsar ou continuará a se expandir para sempre?

É claro que para responder a todas essas questões sobre a origem e formação dos elementos e das estrelas é necessário um esforço teórico para construir modelos de como se deu a origem do universo e o surgimento dos primeiros elementos e como ocorre o processo de evolução das estrelas. Para criar modelos que sejam capazes de prever as observações dos eventos estelares é preciso uma grande quantidade de informações experimentais que servirão de parâmetros e testes para esses modelos. Muitas das informações e dados experimentais necessários para entendermos as questões ainda em aberto na astrofísica e dos dados usados como parâmetros para os modelos de evolução das estrelas e do próprio universo provêm de medidas realizadas em laboratórios de física nuclear. Ainda não dispomos de todos os dados experimentais de que precisamos e a maioria das informações necessárias para esses modelos é baseada em extrapolações ou modelos teóricos sem uma firme base experimental. Dados e medidas precisas de processos nucleares são também ingredientes importantes para interpretarmos e decifrarmos corretamente as observações dos eventos estelares feitas por observatórios terrestres como os grandes telescópios Keck e ESO (European Southern Observatory) ou ainda pelos observatórios espaciais como o Hubble Space Telescope e o Chandra X-Ray Observatory. E ainda temos que interpretar corretamente as observações feitas pelos detectores subterrâneos de partículas cósmicas como o Sudbury Neutrino Observatory e o Super-Kamiokande.

É claro que, apesar de todo o esforço em termos de observação espacial e terrestre dos eventos estelares, das realizações dos experimentos em laboratórios, e da elaboração das teorias e modelos, ainda existem muitas questões intrigantes em aberto, dando margem a muita investigação e estudo para o futuro. Além disso, apesar de vários dos processos que ocorrem nas estrelas já serem conhecidos, muitos dos fenômenos que podem ser previstos a partir dos modelos existentes sobre a evolução das estrelas e nucleossíntese estão em conflito com as observações astronômicas. De certa forma, esses conflitos não são surpresas, afinal muitos dos parâmetros utilizados para prever e explicar esses fenômenos ainda são incertos ou mesmo desconhecidos. Novos equipamentos estão sendo construídos e desenvolvidos e medidas novas e mais precisas estão sendo realizadas, que permitirão que esses modelos se tornem mais elaborados e que os aspectos da física nuclear dos fenômenos de evolução estelar e formação dos elementos fiquem em uma base mais segura.

Nosso entendimento do que ocorre nas estrelas e do que ocorreu no universo primordial tem aumentado bastante nos últimos 75 anos. Está bem claro agora que a energia do Sol deve vir de reações nucleares. Nenhum outro processo, químico ou gravitacional, poderia produzir a luminosidade que observamos do Sol nos seus 4,6 bilhões de anos de existência. Uma das evidências mais diretas de que ocorrem reações nucleares nas estrelas é a observação do elemento tecnécio (Z= 43) no espectro atômico de estrelas distantes. Esse elemento não existe na Terra. Todos os isótopos desse elemento têm uma vida média menor que 4,5 milhões de anos, ou seja, não há mais nenhum traço desse elemento na Terra (a Terra tem bem mais que alguns mi-

lhões de anos e todos os átomos de tecnécio devem ter desaparecido). A observação desse elemento nas estrelas indica que ele deve estar sendo formado continuamente através de reações nucleares ao longo dos bilhões de anos de existência do universo.

Sendo o Sol a estrela mais próxima da Terra e da qual depende a nossa própria existência, ele sempre foi objeto de especulação e curiosidade. A energia do nosso Sol vem da conversão de átomos de hidrogênio em hélio. Foi em 1930 que Bethe e Von Weizsacker propuseram qual deveria ser o cenário dessa conversão nos primeiros estágios da evolução de uma estrela. Eles propuseram que essa conversão se daria em ciclos chamados ciclo pp e ciclo CNO. No ciclo pp, quatro núcleos de hidrogênio (prótons) se convertem em um núcleo de hélio (núcleo com dois prótons e dois nêutrons, também conhecido como partícula alfa). Essa conversão se dá em etapas formando um ciclo. Na primeira etapa dois prótons se fundem formando um núcleo de deutério liberando uma quantidade enorme de energia na forma de fótons, além de pósitrons e neutrinos. A seguir dois núcleos de deutério se fundem formando o núcleo de hélio. De fato a evolução natural de estrelas como o Sol é, em seu estágio inicial, transformar núcleos de hidrogênio (prótons) em hélio. Esse processo é bastante lento, principalmente pelo fato de que a reação de fusão desses dois prótons para se transformar num núcleo de deutério ocorre através da ação da força fraca e de tunelamento quântico entre essas partículas. Nesse processo a interação fraca é a responsável por converter um dos prótons em um nêutron liberando um pósitron e um neutrino. A probabilidade de essa conversão ocorrer é muito pequena fazendo com que o processo como um todo seja bastante lento. Levaria 10 bilhões de anos para que todo o hidrogênio no Sol se transformasse eventualmente em hélio. Como produto dessa reação de fusão de dois prótons temos também os pósitrons e neutrinos. Sendo os neutrinos partículas com carga neutra e muito rápidos eles atravessam toda a extensão do Sol quase sem nenhuma interação, chegando até a Terra como uma chuva dessas partículas. Então, uma evidência importante de que seria esse o mecanismo envolvido na produção de energia do Sol seria a observação desses neutrinos solares na Terra. Desde os anos 60 físicos procuram detectar esses neutrinos solares. Foi apenas na década de 90, graças à construção de gigantescos detetores, como o Super-Kamiokande, construído numa montanha no Japão, que essas partículas puderam ser detectadas com sucesso. Atualmente há evidências suficientes de que seja esse o cenário que ocorre em estrelas como o Sol, representando uma prova importante a favor do Modelo Solar Padrão. Em 1957 Burbidge, Burbidge, Fowler e Hoyle, conhecido como grupo B2FH, escreveram um famoso artigo descrevendo como deveria ser a produção dos elementos, ou seja, a nucleossíntese dos elementos nas estrelas, mas foi somente nos anos 70 que a idéia de como se deu a nucleossíntese primordial, após o big-bang, dos elementos mais leves foi elaborada. Já para produzir elementos mais pesados é preciso que ocorram processos mais sofisticados e que envolvam mais energia. Em outras palavras, para sintetizarmos elementos mais pesados como carbono, nitrogênio e oxigênio, essenciais à vida, é preciso que ocorram fenômenos explosivos tais como explosão de novas e supernovas.

NUCLEOSSÍNTESE

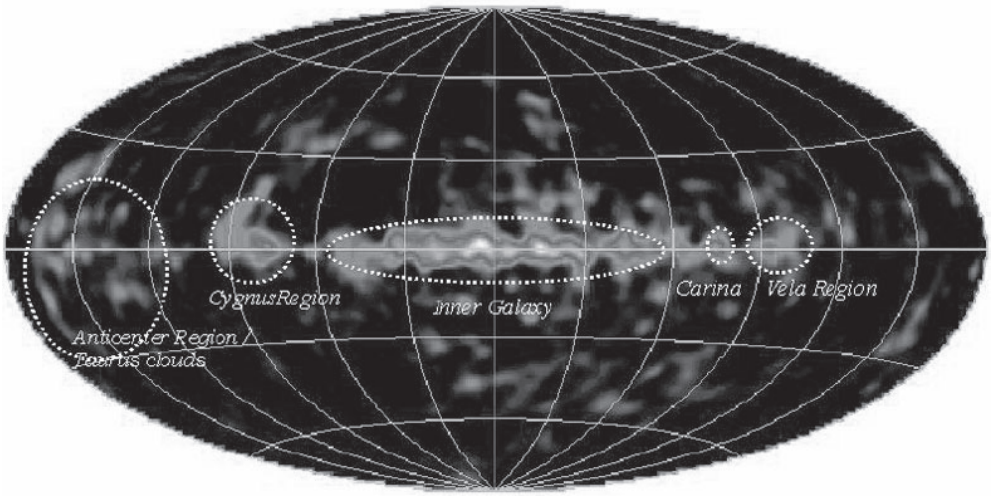
Vamos agora dar um passeio pelas idéias de como os elementos se formaram no universo desde seu início com o big-bang até sua participação na evolução das estrelas. Com isso, poderemos ter uma idéia de como e quando a física nuclear acaba tendo um papel determinante no entendimento do nosso universo. Comecemos pelos núcleos mais leves, os núcleos de hidrogênio (^{1}H), deutério (^{2}H), hélio (^{3}He e ^{4}He), e ainda o lítio (^{7}Li). Esses núcleos foram forjados basicamente na era pré-galática da nucleossíntese, ou seja, após os primeiros minutos

do big-bang. Com a síntese desses núcleos leves, algumas reações nucleares puderam acontecer no meio gasoso interestelar, e alguns outros elementos em concentrações muito pequenas puderam ser formados antes mesmo da formação das galáxias. No entanto, a grande parte dos elementos mais pesados presentes nos dias de hoje aqui na Terra e em algumas outras estrelas mais novas foi formada em processos estelares de explosões de nova e supernova depois que as galáxias já haviam sido formadas. Inicialmente as estrelas são formadas basicamente de hidrogênio. Depois que as estrelas queimam o hidrogênio acabam se tornando estrelas bastante ricas em hélio. As estrelas que conseguem atingir a fase de queima de hélio e que tenham $M_{Sol} < M < 8 \times M_{Sol}$ acabam se tornando as principais fontes de carbono, nitrogênio e oxigênio e alguns elementos um pouco mais pesados. Estrelas mais massivas ($M > 8 \times M_{Sol}$) produzem então os núcleos desde oxigênio até zinco, e algumas delas chegam a produzir uma certa fração de elementos mais pesados que o ferro, como ouro, plutônio, urânio etc. Estrelas na fase de pré-supernova também produzem elementos pesados, assim como estrelas que entram na fase de queima explosiva do silício. O que queremos dizer é que existem vários processos dentro de uma estrela responsáveis pela formação de elementos pesados, no entanto, é através de uma explosão de nova e supernova que podemos formar elementos mais pesados que o ferro.

A FÍSICA NUCLEAR DO BIG-BANG E A ORIGEM DOS ELEMENTOS

Nós acreditamos que nosso universo tenha sido formado há 15 bilhões de anos por uma explosão de uma densa bola de fogo. Denominamos esse fenômeno de big-bang. Nos primeiros instantes após essa explosão, quando a temperatura ainda era muito alta, tínhamos uma matéria num es-

Figura 1



Mapa do universo do ponto de vista dos raios gama do núcleo 26-Alumínio. Devido ao fato de a meia-vida desse núcleo ser de alguns milhões de anos e de as galáxias serem transparentes aos raios gama podemos ver exatamente onde esse núcleo está sendo sintetizado nas galáxias.

tado que ainda não é totalmente conhecido, um plasma de quarks e glúons. Após mais alguns segundos de existência o universo começou a se esfriar um pouco mais e a matéria tomou uma forma um pouco mais conhecida para nós, prótons, nêutrons e outras partículas. A sopa quente de quarks e glúons se condensou numa sopa mais espessa e menos quente de partículas como prótons e nêutrons e algumas outras partículas pesadas, que, juntas, correspondem ao que chamamos de matéria hadrônica. Com o esfriamento gradual dessa sopa, os prótons e nêutrons começaram a se combinar formando elementos leves e, assim, dando início à era da física nuclear. É bem possível que a transição dessa sopa de quarks para sopa de matéria hadrônica não tenha sido tão calma e é possível que pudéssemos ter, naquele momento, uma certa não-homogeneidade entre o número de prótons e de nêutrons, ou ainda ter havido uma condensação de partículas estranhas formadas por um aglomerado muito grande de quarks. Essas relíquias desse universo primordial podem ser encontradas ainda hoje no nosso universo e podem ser uma pista interessante para sabermos exatamente o que ocorreu naquela época. Experimentos realizados recentemente no RHIC (Relativistic Heavy Ions Collider), um laboratório gigantesco nos Estados Unidos, tentam simular o que ocorreu nesse big-bang. A primeira experiência com esse gigantesco acelerador foi realizada em 2002, e a análise dos dados dos experimentos que foram e podem ser realizados nesse laboratório poderá elucidar o que pode ter acontecido durante essa fase de transição da sopa de quarks para a sopa de matéria hadrônica.

Uma vez que o universo conseguiu formar bastantes prótons e nêutrons e começou e se esfriar um pouco mais, elementos mais leves começaram a se formar, elementos como o deutério (núcleo com um próton e um nêutron) e o hélio (núcleo com dois prótons e um ou dois nêutrons). A partir desses elementos mais leves novas reações nucleares de fusão e captura começaram a ocorrer formando outros elementos, como lítio e berílio. Apenas bem mais tarde é que esses elementos começaram a se juntar devido à força gravitacional formando pequenos aglomerados que foram as sementes das primeiras estrelas e galáxias. Elementos mais pesados como boro, carbono e oxigênio são sintetizados nas estrelas. Para sintetizar elementos bem mais pesados que esses precisamos de um caldeirão ou um forno bem mais poderoso. Esses caldeirões ou fornos corresponderiam às violentas explosões estelares conhecidas como nova e supernova. Falaremos dessas explosões mais adiante.

A síntese de elementos leves como deutério e lítio é uma das chaves para se entender o universo primordial. É como se esses elementos fossem fósseis desse universo primordial, e a abundância deles pode ser considerada como pistas sobre as condições desse universo primordial. Hidrogênio e hélio são os elementos mais abundantes no universo. Apesar de alguns núcleos de hélio terem sido também produzidos em estrelas mais antigas, a maior parte observada nos dias de hoje foi produzida antes da formação das estrelas. O estudo da abundância desses elementos pode nos dar dicas sobre a densidade de matéria do universo. Nós entramos numa época em que as medidas astronômicas e astrofísicas estão cada vez mais precisas. Assim, chegamos a um ponto em que podemos também elaborar modelos que possam prever mais precisamente o que aconteceu nos primórdios do universo.

A nucleossíntese no big-bang envolve uma seqüência de reações nucleares com os núcleos leves. Precisamos ter informações acuradas sobre as probabilidades e taxas em que essas reações ocorreram para que possamos ter parâmetros precisos para nossos modelos de formação dos elementos. Por exemplo, se queremos conhecer a síntese do deutério (d) precisamos ter uma boa idéia de como o deutério é formado a partir da fusão de um próton (p) e um nêutron (n), p+n produzindo d+γ (raios gama), e de como o deutério é queimado, d+d produzindo n+^{3}He, ou ainda d+p$\rightarrow\gamma$+^{3}He ou d+d$\rightarrow$p+^{3}H. Em outras palavras, para sabermos a abundância de um determinado elemento precisamos conhecer o balanço

entre a taxa de sua produção e a taxa de seu consumo. Informações sobre essas reações são obtidas através de medidas em laboratórios incidindo um feixe de uma dessas partículas em alvos feitos da outra partícula. Modernos equipamentos permitem que possamos simular essas reações em laboratórios e obter as probabilidades e taxas em que elas ocorrem. No entanto, para se usar as informações obtidas de uma dada reação nuclear que tenha sido investigada num laboratório no cálculo da nucleossíntese primordial ou estelar é importante lembrar que os dois ambientes não são exatamente os mesmos. Enquanto os elementos encontrados no universo ou no centro da estrela são apenas núcleos (átomos ionizados), os alvos desses mesmos elementos usados no laboratório são átomos com um núcleo e todos os elétrons ainda presentes. Portanto, a medida da taxa de reação no laboratório deve ser corrigida pelo efeito dos elétrons que agem como blindagem eletrônica. O que normalmente é feito é calcular com a melhor precisão possível uma correção na interação elétrica devido a essa blindagem usando os conhecimentos que temos de física atômica. Até agora ainda não foi possível atingir a precisão de que necessitamos, e o problema continua atraindo a atenção de físicos nucleares e atômicos.

Várias das reações envolvidas nas estrelas já foram medidas em diversos laboratórios espalhados pelo mundo, dando uma boa indicação de como ocorrem esses processos iniciais de formação dos elementos. No entanto, ainda existem várias questões fundamentais ainda em aberto. Por exemplo, é ainda uma questão em aberto se a transição de fase entre quark/glúon para hádrons gerou uma densidade uniforme de matéria (iguais números de prótons e de nêutrons e de densidade) ou se houve picos de densidades gerando uma não-homogeneidade do universo material. Essa não-homogeneidade poderia criar regiões de concentrações de núcleos ricos em prótons ou ricos em nêutrons, que são núcleos com vida média curta mas que podem participar da formação de elementos estáveis. Como não existem elementos estáveis na natureza com massa A= 5 e A= 8, núcleos como berílio e boro, que têm massa maior do que 5 e 8, respectivamente, não poderiam ter sido formados num universo homogêneo. Apenas num universo não-homogêneo poderíamos formar os elementos e, a partir desses, elementos mais pesados. Nesse cenário, a reação mais importante para saltar dos elementos leves para os elementos mais pesados seria a reação $^{8}Li(\alpha,n)^{11}B$. Ou seja, núcleos de ^{8}Li, que são núcleos instáveis e vivem apenas alguns milissegundos, se fundindo com ^{4}He dando ^{11}B (11-boro) mais um nêutron. Portanto, ter informações experimentais sobre a probabilidade com que essa reação ocorre nas energias em que elas teriam ocorrido no universo primordial é de fundamental importância para termos uma idéia se o universo era ou não homogêneo. Essa reação só pôde ser experimentalmente investigada em laboratórios com o advento dos feixes de núcleos radioativos de vidas médias curtas (feixes com núcleos que duram menos que milésimos de segundos). Essa reação foi recentemente investigada, mas uma experiência mais precisa é ainda necessária. Várias outras reações que têm a participação de núcleos exóticos ocorrem no universo primordial ou em estrelas supermassivas (estrelas de população III com zero metalicidade). Essas reações estão sendo recentemente investigadas e várias ainda não foram e precisam ser medidas. Medidas das taxas dessas reações são importantes para que possamos formular teorias mais precisas sobre como se deu a fase de transição do universo primordial.

A NUCLEOSSÍNTESE NO MEIO INTERGALÁTICO

Existe, em nosso universo, uma população de enigmáticos elétrons, neutrinos e outras partículas que viajam em velocidades altíssimas (relativísticas) no meio intergalático. Essas partículas são conhecidas como GCR (Galactic Cosmic Rays), ou seja,

raios cósmicos galáticos. A própria origem dessas partículas ainda é obscura apesar de décadas de pesquisas. O que sabemos desses raios cósmicos, através de medidas obtidas com as espaçonaves Ulysses e Mir, é que eles não vieram de supernovas ou de fontes estelares do tipo do Sol. Novos equipamentos das estações espaciais, tais como Access (Advanced Cosmic-ray Composition Experiment for Space Station) e Ecco (Extremely Heavy Cosmic-ray Composition Observer), poderão nos dar mais informações a respeito dessas enigmáticas partículas e suas reações exóticas.

Esses raios cósmicos também contribuem para a formação de elementos, mas de uma forma diferente. Eles acabam sendo responsáveis por reações de quebra ao invés de reações de captura ou fusão de dois núcleos. Podemos tomar por base novamente o núcleo ^{11}B. Dissemos anteriormente que ele só poderia ser formado fora das estrelas se o universo fosse não-homogêneo e houvesse a presença de núcleos radioativos (exóticos) como o ^{8}Li. No entanto, os neutrinos cósmicos podem se chocar com os núcleos de carbono que ficam na crosta de uma estrela massiva quebrando o núcleo de ^{12}C em $^{11}B+p$. Essas reações de quebra ou de espalação provocadas pelos neutrinos e elétrons relativísticos do meio interestelar com os núcleos da crosta de estrelas acabam formando alguns elementos como berílio e boro que acabam sendo ejetados também para o meio interestelar.

Sabemos muito pouco sobre essas reações e, do ponto de vista de laboratório, ainda precisamos obter informações de como se dão essas reações de espalação utilizando feixes de neutrinos e elétrons.

A NUCLEOSSÍNTESE DOS ELEMENTOS NAS ESTRELAS

Para entendermos como os elementos são cozidos dentro do caldeirão estelar precisamos entender algumas fases da evolução de uma estrela. A evolução de uma estrela é caracterizada por fases bem determinadas. São períodos de calmaria separados por períodos de grande agitação. A fase de calmaria é quando a estrela permanece queimando em seu interior um certo núcleo gerando energia que compensa a força de contração gravitacional. O tempo que ela leva nessa fase depende de qual elemento ela está queimando e qual a quantidade de energia que ela está liberando. Aqui, quando dizemos queimando, significa que as estrelas estão sintetizando elementos mais pesados, já que a queima corresponde a reações de fusão e captura. Quando um dado elemento é praticamente todo queimado no interior da estrela a energia liberada não é mais capaz de segurar a contração gravitacional. Essa força gravitacional é gerada pelos elementos mais pesados que foram formados. A estrela então se contrai até que o calor liberado nessa contração gravitacional e a densidade alcançada sejam suficientes para desencadear a nova fase de queima dos elementos, que são as cinzas da fase anterior. O interessante é que muitas vezes as estrelas ficam queimando diferentes elementos em regiões de diferentes densidades na forma de camadas como se fossem cascas de cebola. Camadas mais densas de elementos mais pesados ficam no interior e, conforme vamos para as camadas mais externas, temos a queima de elementos mais leves.

Esses processos, apesar de não explosivos, podem ser bastante complexos. Atualmente temos uma boa compreensão de como eles se dão e já existem vários programas de computadores que simulam essas reações e podem prever a evolução de uma estrela a partir de alguns parâmetros iniciais. Esses códigos computacionais calculam a queima e síntese dos elementos baseados em cadeias de reações que ocorrem dentro das estrelas. É preciso, portanto, que forneçamos os parâmetros correspondentes às taxas de reações envolvidas e abundância inicial dos elementos. Além disso, algumas dessas reações envolvem núcleos em estados excitados de energia (estados ressonantes) que podem favorecer uma determinada reação de captura ou

fusão. Essas taxas de reações e informações sobre os estados excitados do núcleos (ressonâncias), ou seja, de sua estrutura, são obtidas de medidas realizadas em laboratórios de física nuclear. Obviamente ainda não temos informações de todas as reações envolvidas e nem da estrutura de todos os núcleos envolvidos nos processos de síntese dos elementos. Nesse caso, recorremos a modelos teóricos ou extrapolações de dados para energias de interesse. A conseqüência disso é que ainda não somos capazes de prever com detalhes vários dos processos estelares, nem a abundância

Figura 2

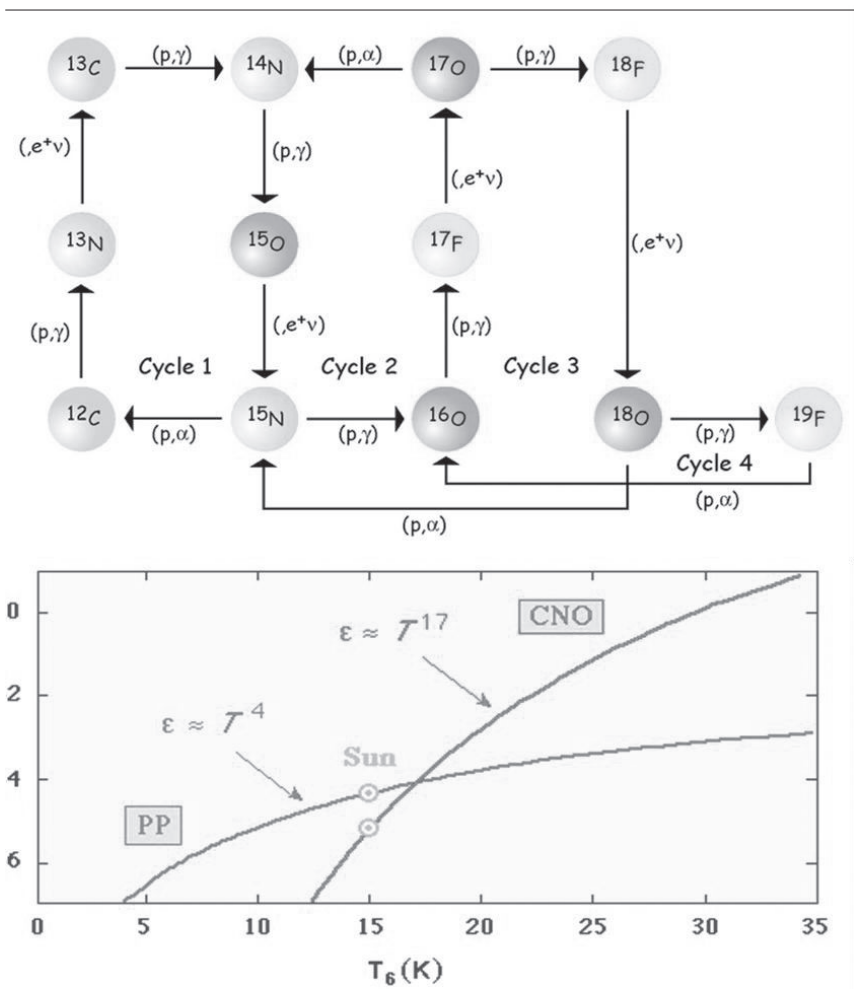


Figura indicando as reações envolvidas no ciclo CNO e, embaixo, um gráfico indicando a competição entre os ciclos pp e CNO em função da temperatura. A temperatura T_6 corresponde a milhões (10^6) de graus Kelvin. As setas indicam a direção em que as reações ocorrem. Na figura (p,γ) corresponde à reação de captura de prótons, ($e^+\nu$) corresponde ao decaimento beta e (p,α) corresponde à captura de um próton com a liberação de uma partícula alfa (núcleo de hélio). A temperatura do Sol é da ordem de 15 milhões de graus Kelvin e ambos os ciclos estão atuando na geração de energia.

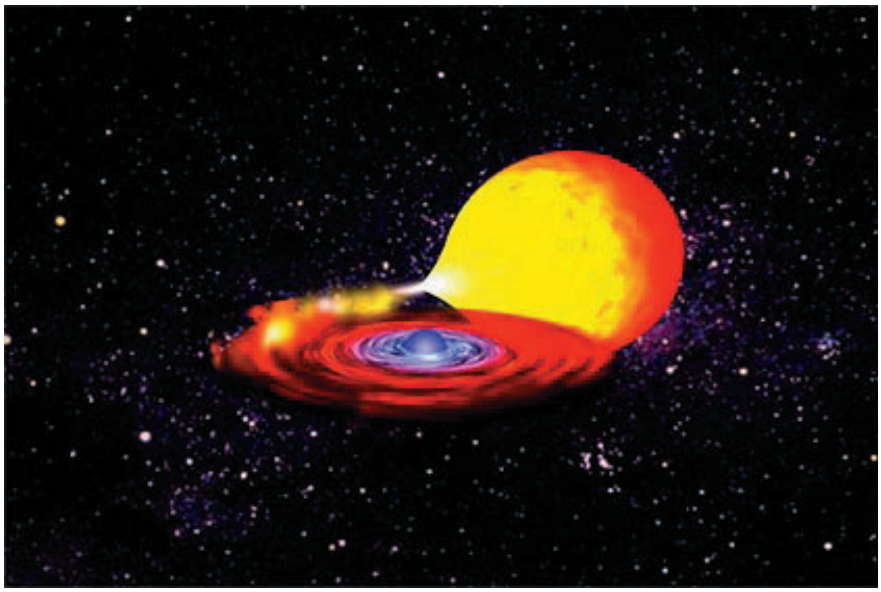
final dos elementos numa estrela. Por exemplo, ainda não é possível explicar as recentes observações das abundâncias de ^{7}Li, ^{23}Na e ^{27}Al na atmosfera de gigantes vermelhas, ou mesmo a abundância isotópica dos elementos encontrados em meteoritos. Não conseguimos também antecipar como se dá a formação dos elementos em nebulosas planetárias. Exatamente por esses motivos a astrofísica nuclear ainda é um campo bastante ativo da física nuclear e várias medidas e informações ainda devem e podem ser obtidas dos vários laboratórios e aceleradores de partículas espalhados pelo mundo.

Do ponto de vista de evolução de uma estrela, ela é formada inicialmente de núcleos de hidrogênio. Então, a primeira fase da evolução, a infância de uma estrela, é quando ela ainda está queimando o hidrogênio. Nosso Sol ainda está nessa fase e podemos dizer que ele ainda está em sua infância. A queima de quatro núcleos de hidrogênio para se formar um núcleo de hélio é dada por uma série de reações nucleares em ciclos, ciclos pp e ciclo CNO. Já citamos algumas das reações do ciclo pp. No ciclo CNO, carbono, nitrogênio e oxigênio, que podem estar presentes no interior de algumas estrelas, funcionam como catalisadores para a queima de hidrogênio. Na Figura 2 mostramos um desenho esquemático das reações envolvidas no ciclo CNO. Quando praticamente todo o hidrogênio é queimado, e isso pode demorar alguns bilhões de anos, a estrela se contrai, aumentando a densidade e a temperatura e dando ignição para a queima de hélio. A transformação de núcleos de hélio em carbono e oxigênio é dada em reações complexas chamadas captura tripla de alfas. Na etapa de queima dos núcleos de hélio a energia nuclear liberada é bem maior que na fase anterior da queima de hidrogênio. A estrela então se expande tornando-se uma gigante vermelha. As queimas subseqüentes do hélio para formar o carbono e o oxigênio fazem com que a estrela forme outras camadas. Algumas estrelas, como o nosso Sol, nessa fase, implodem no momento em que elementos mais pesados são sintetizados, tornando-se anãs brancas, muitas vezes praticamente inertes – esse seria a velhice e o destino final de nosso Sol. Outras estrelas mais pesadas que o Sol continuam o processo de síntese de elementos mais pesados por processos de captura de prótons (rp-process) e nêutrons (s-process) até a produção de núcleos de cálcio e ferro. Esses processos de captura são bastante complexos, os núcleos vão capturando prótons ou nêutrons e a um certo ponto acabam se tornando núcleos ricos em prótons ou em nêutrons e, portanto, instáveis por decaimento beta. Na nucleossíntese, esse ponto é chamado de ponto de gargalo, e é preciso que se espere um certo tempo para que o elemento instável decaia por beta para um núcleo estável para dar continuidade ao processo de capturas. Há ainda uma grande necessidade de informações sobre taxas de reações de captura de prótons, nêutrons ou até mesmo de captura de partículas alfa, medidas de massas dos vários isótopos envolvidos, informações sobre estrutura nuclear e formas de decaimento para que possamos descrevê-los corretamente. Saber modelar e prever com precisão esses processos é importante para que possamos descrever as fases seguintes de evolução estelar.

NUCLEOSSÍNTESE EXPLOSIVA

Durante o estágio final de evolução de uma estrela massiva (com massa bem maior que a do Sol), o interior dessa estrela é então formado basicamente de elementos com massa em torno do ferro (A= 56). Isso ocorre porque esses elementos são os mais ligados e compactos da tabela periódica. Exatamente por esse motivo os núcleos quase não interagem mais espontaneamente e a energia nuclear liberada é pequena. Assim sendo, novamente a força gravitacional ganha e o interior da estrela tem um colapso, uma contração. Quando então a estrela atinge uma densidade grande, devido a essa contração, ocorre uma explosão espetacular chamada de supernova.

Figura 3



Desenho ilustrativo da acreção da matéria de uma estrela de nêutrons de sua companheira menos evoluída num sistema binário, antes da explosão da supernova.

As supernovas são, sem dúvida, os objetos mais espetaculares e fascinantes no cosmos. O brilho gerado por sua explosão é tão grande que ultrapassa por ordens de magnitude o brilho do Sol. Algumas vezes essa explosão pode ser vista até mesmo a olho nu durante o dia, não fosse pelo fato de serem raras. Existem basicamente dois tipos de supernovas: supernovas que ocorrem devido à implosão de seu interior rico em ferro, conforme acabamos de descrever, que são as de tipo Ib, Ic e tipo II, e as famosas supernovas do tipo Ia, que se originam devido a uma troca de material entre duas estrelas (uma anã branca, estrela de nêutrons e uma estrela massiva) de um sistema binário.

Estrelas de tamanho não muito maior que o Sol evoluem para uma gigante vermelha e terminam sua vida de forma simples com a implosão da gigante vermelha para uma anã branca quase inerte. O resultado final de uma explosão de supernova, por outro lado, é a formação de uma estrela de nêutrons bastante densa ou de um buraco negro. A síntese de elementos mais pesados que o ferro só é possível nessas explosões de supernova e podemos dizer que todos os elementos mais pesados que o ferro foram cozidos nesses fornos intensos. É então a supernova que processa a alquimia de transformar o ferro em ouro. Um dos grandes esforços da astrofísica atual é exatamente tentar entender com boa precisão os processos que ocorrem durante as explosões de supernova.

Por incrível que possa parecer, mais da metade das estrelas observadas no céu são sistemas binários envolvendo duas estrelas de tamanhos diferentes. Quando uma das estrelas evolui primeiro, transformando-se numa anã branca ou numa estrela de nêutrons, sua força gravitacional começa a sugar matéria de sua companheira menos evoluída. O hidrogênio sugado pode então desencadear uma explosão que chamamos

de explosão de uma nova. É interessante notar que as explosões do tipo nova são bem mais freqüentes do que as supernovas. São observadas na Terra ou nas estações de observações espaciais em torno de 100 explosões de nova por ano, enquanto apenas algumas supernovas por década. Se a acreção da matéria por parte de uma das estrelas num sistema binário for lenta, isso pode gerar fenômenos tais como uma emissão enorme de raios-X. Se ainda esse sistema binário estiver girando, essa emissão de raio-X dará a impressão de que a estrela está pulsando. Chamamos a esse tipo de estrelas de pulsares. Se, no entanto, a acreção de matéria for muito rápida para a anã branca ou estrela de nêutrons, isso pode desencadear a explosão de supernova do tipo Ia. As explosões de supernova do tipo Ia são conhecidas, e já podemos determi-

Figura 4

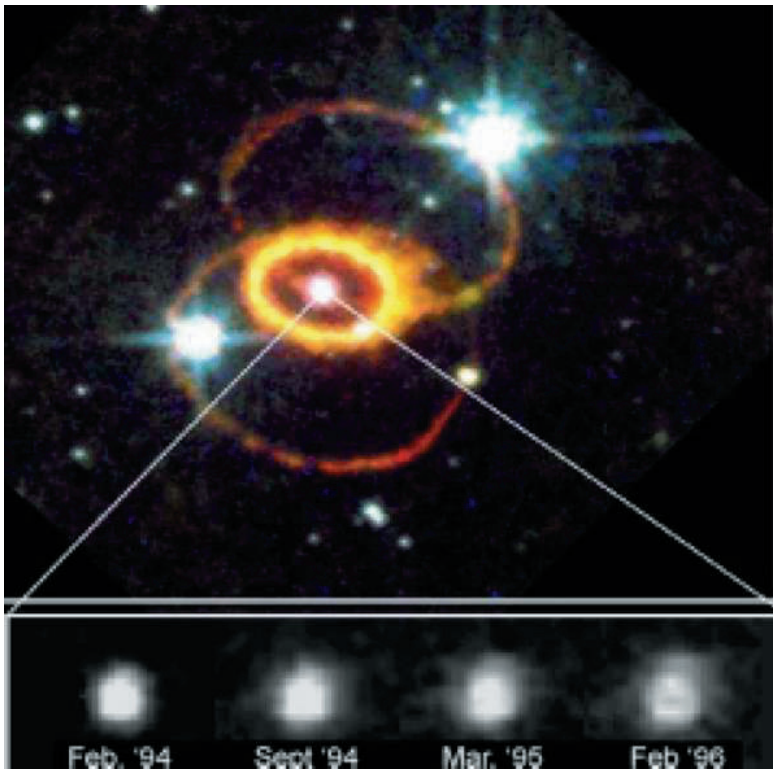


Imagem do telescópio Hubble da supernova 1987a. Essa supernova explodiu em 1987 e é a supernova mais próxima desde o lançamento do Hubble. A explosão dessa supernova lançou no meio intergalático uma quantidade enorme de neutrinos e partículas leves. A origem do anel em volta da supernova é ainda desconhecida.

nar exatamente sua luminosidade. Conhecendo essa luminosidade podemos usar a explosão da supernova do tipo Ia como velas-padrão de luminosidade para saber a distância entre as galáxias, ou mesmo para saber o quanto as galáxias se afastam umas das outras determinando assim a taxa de expansão do universo.

O desafio aqui, para a astrofísica, é entender os fenômenos envolvidos no colapso da supernova e como se dá a síntese dos elementos pesados nessa explosão. Esse colapso da supernova é um evento que gera uma quantidade extraordinária de energia gerando condições para os mais diversos mecanismos de reações nucleares e de síntese dos mais diversos elementos. A explosão espalha esses elementos no meio interestelar, onde eles podem ser incorporados ou gerar novos sistemas estelares com possibilidades de formar bases para novos sistemas solares eventualmente com presença de vida. Além disso, o que é deixado para trás, estrelas de nêutron ou buraco negro, contém elementos raros ou mesmo novas formas de matéria hadrônica. Assim sendo, a supernova é um grande laboratório para se investigar a nucleossíntese de elementos extremamente exóticos, estudar propriedades dos neutrinos e outras partículas geradas e estudar formas nucleares em ambientes de altíssima densidade e temperatura.

A ASTROFÍSICA NUCLEAR NO BRASIL

A física nuclear é a ciência que estuda reações nucleares e estrutura dos núcleos. Essa ciência está bastante conectada à astrofísica. Para entendermos a geração de energia nas estrelas, nucleossíntese dos elementos, explosões estelares, estrelas de nêutrons, buracos negros, interações com neutrinos, precisamos exatamente de informações que podem ser obtidas da física nuclear. Essas informações podem ser divididas em três categorias básicas: medidas de grandezas fundamentais (massas, vidas médias e raios dos núcleos), propriedades dos estados excitados dos núcleos (estados isoméricos, ressonâncias, densidades de níveis, taxa de decaimento) e aspectos das reações nucleares (taxa de reações, mecanismo de reações, interferência entre os mecanismos). Cada uma dessas categorias de informações tem um impacto direto no entendimento dos processos astrofísicos.

Essas informações para núcleos estáveis já são bastante conhecidas e foram a base da física nuclear das últimas décadas. No entanto, muitas informações importantes dos núcleos ricos em nêutrons ou em prótons, que estão longe do vale de estabilidade na tabela de nuclídeos, ainda são desconhecidas. Esses núcleos radioativos são conhecidos como núcleos exóticos por terem excesso de nêutrons ou de prótons e ter formas exóticas de decaimento e arranjo dos núcleons que os compõem. Esses núcleos têm uma vida média curta e portanto não estão presentes na composição da Terra. Tanto fenômenos explosivos como a explosão de nova e supernova quanto o processo de evolução de estrelas supermassivas e no universo primordial (não-homogêneo) envolvem, inevitavelmente, esses núcleos radioativos. Explosões de supernova e o processo de evolução de estrelas supermassivas ocorrem num ambiente de alta densidade e alta temperatura. Assim, as sucessivas reações de nucleossíntese nesses eventos envolvem núcleos que estão longe da linha de estabilidade na tabela de nuclídeos. Esses núcleos radioativos acabam tendo uma influência grande e algumas vezes fundamental em muitos fenômenos estelares. É interessante notar que enquanto há algo em torno de 280 elementos estáveis na natureza (tabela periódica), devem existir mais de 3.000 núcleos radioativos (veja tabela de nuclídeos). Esses núcleos não são encontrados na Terra mas têm papel fundamental para que possamos entender como foram produzidos os 280 elementos estáveis e suas respectivas abundâncias. Informações sobre esses núcleos radioativos (núcleos exó-

ticos) acabam sendo particularmente importantes para que possamos melhorar nosso entendimento do que ocorre nos processos que determinam a forma de nosso universo. Foi apenas no final da década de 80 e início da década de 90 que esses núcleos exóticos começaram a ser investigados com mais afinco e detalhes. A razão é que, a partir dessas últimas décadas, foram construídos aceleradores e equipamentos que podiam fabricar feixes desses elementos radioativos. O impacto da idéia de se usar feixes de núcleos radioativos para se medir em laboratório as reações envolvendo esses núcleos que não estão presentes na Terra foi bem colocado por Willy Fowler em 1985:

"Nós estamos no meio de um daqueles excitantes e estimulantes períodos que ocorrem na ciência de tempos em tempos. Tem agora se tornado claro que é preciso dados experimentais sobre as propriedades e interação desses núcleos radioativos necessários para a astrofísica. Métodos para produção de feixes com esses núcleos radioativos em quantidades suficientes têm sido propostos e estão no estágio de se estimar custos e performance... Vamos em frente com isso!!".

O entusiasmo de Fowler não foi em vão. Da década de 90 para cá vários laboratórios começaram a produzir feixes com esses núcleos exóticos. Aqui no Brasil o grupo de pesquisadores do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, Alinka Lépine-Szily, Rubens Lichtenthaler e Valdir Guimarães, que já vinham trabalhando ativamente na área de núcleos exóticos, estimulados também pela possibilidade de se usar feixes radioativos de baixa energia no estudo de fenômenos astrofísicos, decidiram instalar o sistema Ribras (Radioactive Ion Beam in Brasil). Esse projeto, inicialmente coordenado pelo prof. Mahir S. Hussein, consiste de um duplo solenóide supercondutor, e tem como objetivo a produção e utilização de feixes radioativos de baixa energia para investigar a estrutura de núcleos exóticos e medir taxa de reações envolvendo esses núcleos. Esse sistema foi recentemente instalado no Laboratório Pelletron do Instituto de Física da USP e colocado em operação no início deste ano de 2004.

Neste artigo abordamos alguns fatos importantes dessa fascinante ciência que é a astrofísica nuclear, e discutimos um pouco os mecanismos a partir dos quais os elementos na tabela periódica são produzidos com as suas respectivas abundâncias. Também procuramos enfatizar o papel fundamental que os núcleos radioativos ricos em nêutrons ou prótons têm nesses mecanismos. É importante salientar que o campo da astrofísica nuclear envolve uma sinergia entre cosmologia, astrofísica pura, astronomia, física de partículas elementares, física nuclear, e física atômica raramente encontrada. Portanto, podemos ousar dizer que o campo da astrofísica nuclear tem um charme intelectual todo especial evidenciado ao englobar conhecimentos fundamentais de áreas tão variadas da física moderna. Para mais detalhes e informações mais técnicas sobre astrofísica nuclear e o futuro dessa área convidamos o leitor a ler alguns artigos de revisão mais específicos listados abaixo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADELBERGER, Eric G. et al. "Solar Fusion Cross-sections", in *Review of Modern Physics*. vol. 70, nº 4, October, 1998.

KAPPELER, F.; THIELEMANN, F. K.; WIESCHER, M. "Current Quest in Nucler Astrophysics and Experimental Approaches", in *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* vol. 48, 1998, pp. 175-251.

SMITH, Michael S. and REHM, K. Ernst. "Nuclear Astrophysics Measurements with Radioactive Beams", in *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* vol. 51, 2001, pp. 91-130.