

Astrofísica nuclear

Mahir Saleh Hussein

Introdução

Astrofísica nuclear é a ciência de interface entre astrofísica e física nuclear. É a ciência responsável por tentar trazer respostas a questões tais como: Como o Sol, o sistema solar, as estrelas, as galáxias se formaram e como eles evoluem? Como se deu a origem dos elementos que fez a vida na Terra possível? Ou ainda, o nosso universo um dia vai se colapsar ou continuará a se expandir para sempre? Respostas a essas questões podem ser obtidas do estudo de como os elementos foram e são formados no universo primordial e no meio estelar, que é exatamente o objeto de investigação da astrofísica nuclear. Em outras palavras, podemos dizer então que a astrofísica nuclear estuda a síntese dos elementos e sua relação com a evolução das estrelas e do universo. Os elementos leves foram formados no universo primordial e os mais pesados foram e ainda continuam sendo formados tanto no meio intergaláctico como nas estrelas. A formação e síntese dos elementos se dão através de reações nucleares. Podemos então dizer que são as reações nucleares as responsáveis pela produção de energia e síntese dos elementos nos vários entes astrofísicos. Sendo assim, são as reações nucleares que tem um papel determinante na existência e evolução dos entes astrofísicos, do pacato sol às espetaculares explosões de Novas e Supernovas. O estudo das reações nucleares envolvidas nos processos astrofísicos faz parte do que chamamos Astrofísica Nuclear e o processo de formação dos elementos é chamado de nucleossíntese.

Para responder as questões sobre a origem e formação dos elementos e das estrelas e como isso definiu a evolução do universo e como isso define a evolução de uma estrela, o que os cientistas fazem é construir modelos teóricos de como se deu a origem do universo e de como se formaram os primeiros elementos e de como ocorre o processo de evolução das estrelas. Esses modelos não são puramente teóricos e em geral envolvem uma grande quantidade de parâmetros que são obtidos de experiências realizadas em laboratórios de Física Nuclear. Por fim, esses modelos devem ainda ser corroborados com as observações dos eventos estelares. Existe enfim uma sinergia entre medidas precisas de processos nucleares realizados em laboratórios de física nuclear e 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. A cada dia novos equipamentos vêm sendo construídos e desenvolvidos e medidas novas e mais precisas estão sendo realizadas, permitindo com que os modelos de evolução estelar e formação dos elementos se tornem mais elaborados e que os aspectos da Física Nuclear desses fenômenos fiquem em uma base mais segura.

Devido ao fato de ser o Sol a estrela mais próxima da Terra e da qual depende a nossa própria existência, ele sempre foi objeto de especulação e curiosidade. Em 1930, Bethe e Von Weizsacker propuseram que a energia do Sol e o brilho das estrelas viriam da energia de reações nucleares, já que nenhum outro processo, químico ou gravitacional, poderia produzir a luminosidade que observamos do Sol nos seus 4.6 bilhões de anos de existência. Hoje sabemos que é a diferença de massa entre núcleos antes e depois de se fundirem que se transforma em energia. Energia essa que é dada pela famosa fórmula de Einstein ($E=mc^2$), onde m seria essa diferença de massa. Em 1957 Burbidge, Burbidge, Fowler e Hoyle, conhecido como grupo B2FH,

escreveram um famoso artigo descrevendo como deveria ser a produção da energia do Sol e como seria a nucleossíntese dos elementos no início de evolução de estrelas. Eles propuseram que essa conversão se daria em ciclos. Nesses ciclos, 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 daria em etapas formando ciclos e gerando energia. 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 devido ao fato da reação de fusão desses dois prótons para se transformar num núcleo de Deutério ocorre através da ação da força fraca, que transforma um dos prótons em nêutron, e de tunelamento quântico entre essas partículas. Por causa dessa reação levaria 10 bilhões de anos para que todo Hidrogênio no Sol se transforme eventualmente em Hélio. Como produto extra da reação de fusão de dois prótons em deutério, temos também a geração de outras partículas mais exóticas como pósitrons (elétrons com carga positiva) e neutrinos. Os neutrinos são partículas sem carga elétrica e muito rápidas, e exatamente por isso eles atravessam toda a extensão do Sol quase que sem nenhuma interação. Os neutrinos chegam a Terra como uma chuva dessas partículas. Assim, uma evidência importante que corroboraria o modelo padrão de geração de energia do Sol seria a observação desses neutrinos solares na Terra. Desde os anos 60, físicos procuram detectar estes neutrinos solares mas foi apenas na década de 90, graças a construção de gigantes detectores como o Super-Kamiokande, construído numa montanha no Japão, é que essas partículas puderam ser detectadas com sucesso. Atualmente há evidências suficientes para que possamos afirmar que o modelo proposto pelo grupo B2FH seja o cenário que ocorre em estrelas como o Sol.

De qualquer forma, estudar astrofísica nuclear é entender como a formação dos elementos ocorre nos diversos entes astrofísicos e como essa formação define a evolução desses entes. Sabemos, por exemplo, que os elementos leves como o Hidrogênio, Hélio e Lítio se formaram alguns minutos depois do Big-bang (nucleossíntese primordial). Já os elementos um pouco mais pesados (até o Ferro) são sintetizados nas estrelas. Para síntese de elementos mais pesados que o ferro é preciso que ocorram processos explosivos e mais sofisticados que envolvam mais energia tais como explosões de Novas e Supernovas.

Big-Bang e a origem dos primeiros elementos

Nós acreditamos que nosso universo tenha sido formado a 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 estado que ainda não é totalmente conhecido, um plasma de quarks e gluons. Após mais alguns minutos essa sopa quente de quarks e gluons se condensou numa sopa mais espessa e menos quente de partículas mais conhecidas 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 a era da Física Nuclear. Uma vez que o universo primordial tenha formado os prótons e nêutrons e começou a se esfriar um

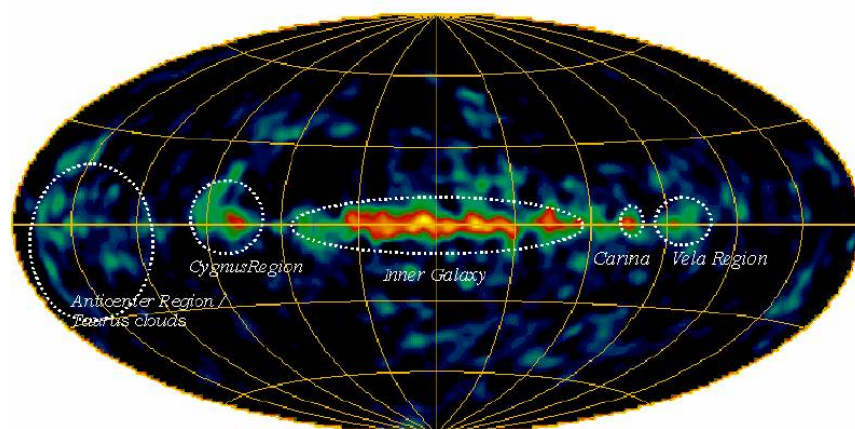
pouco mais, elementos leves como Deutério, Hélio e Lítio se formaram a partir de reações nucleares de fusão e captura de prótons e nêutrons. A síntese desses elementos leves é uma das chaves para se entender o universo primordial. As relíquias desse universo primordial podem ser encontradas ainda hoje no nosso universo e podem ser uma pista interessante para sabermos exatamente o que ocorreu naquela época. É como se esses elementos fossem fósseis desse universo primordial e a abundância desses elementos pode ser considerada como uma pista sobre as condições desse universo primordial.

Nós entramos numa época em que as medidas astronômicas e astrofísicas são altamente precisas. Com isso estamos num estágio em que é possível elaborar modelos que possam prever mais precisamente o que pode ter acontecido nos primórdios do universo. Por outro lado, experimentos realizados no RHIC (Relativistic Heavy Ions Collider), um laboratório gigantesco nos Estados Unidos, e mais recentemente no LHC (Large Hadron Collider) em Genebra, tentam simular o que ocorreu nesse Big-Bang. A idéia dos experimentos nesses laboratórios é simular o início do universo primordial na tentativa de elucidar o que teria acontecido durante a fase de transição da sopa de quarks para a sopa de matéria hadrônica. Hoje em dia sabemos que o Hidrogênio e o Hélio são os elementos mais abundantes no universo. Em termos de abundância relativa o universo é formado por 75% de Hidrogênio, 24% de Hélio e o restante 1% corresponde a abundância relativa de todos os outros elementos juntos. Várias das reações envolvidas na formação desses elementos leves são conhecidas e já foram medidas em laboratórios. Portanto, temos 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, não está claro se a transição de fase entre quark/gluon para hádrons gerou uma densidade uniforme de matéria (iguais números de prótons e de nêutrons) ou se houve picos de densidades gerando uma não-homogeneidade do universo material. Essa não-homogeneidade poderia criar regiões de concentração de núcleos ricos em prótons ou ricos em nêutrons, que são núcleos com vida-média curta que poderiam 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 tem massa maior do que 5 e 8, respectivamente, não poderiam ter sido formados num universo homogêneo. Por outro lado, num universo não-homogêneo esses elementos, e a partir desses elementos mais pesados, poderiam ser formados. Nesse cenário, várias reações envolvendo núcleos radioativos de vida média curta, tais como lítio-8 e boro-8 (isótopos de massa 8 do lítio e boro) seriam importantes. Ter informações experimentais sobre a probabilidade com que reações envolvendo esses núcleos ocorrem nas energias em que elas teriam ocorrido no universo primordial é de fundamental importância para que possamos formular teorias mais precisas de como se deu a fase de transição do universo primordial. Essas reações só podem ser experimentalmente investigadas em laboratórios que possam produzir feixes com esses elementos radioativos.

Algum bom tempo depois do Big-bang esses elementos leves começaram a se juntar devido a força gravitacional formando pequenos aglomerados. Esses aglomerados podem ser considerados as sementes das primeiras estrelas e mais tarde das primeiras galáxias. Com a formação das estrelas, elementos mais pesados como Boro, Carbono e Oxigênio foram sintetizados. Já para sintetizar elementos bem mais pesados que esses precisamos de um caldeirão ou um forno bem mais poderoso. Esses caldeirões ou fornos correspondem às violentas explosões estelares conhecidas como Nova e Supernova. Falaremos dessas explosões mais adiante.

Astrofísica estelar

Os elementos mais pesados que o hidrogênio, hélio e lítio, que foram formados no universo primordial, são “cozidos” dentro de um caldeirão conhecido como “estrelas”. A prova de que esses elementos estão sendo sintetizados nesses caldeirões é a contínua produção de raios-gamas observada nas estrelas. Podemos então dizer que praticamente todos os elementos presentes na Terra foram formados nas estrelas e com isso podemos dizer também que somos feitos de poeira estelar. Na figura-1 podemos ver um mapa da produção de um raio-gama em particular proveniente do decaimento do núcleo ^{26}Al . Esse núcleo tem uma meia vida relativamente curta e, portanto, um claro sinal de esse núcleo é continuamente produzido. E se está sendo observado é porque ele está sendo produzido mesmo nos dias de hoje. 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 calma separados por períodos de grande agitação. A fase de calma é quando a estrela permanece queimando em seu interior um determinado elemento gerando energia nuclear que compensaria a força de contração gravitacional. O tempo em que a estrela demora nessa fase depende de qual elemento ela está queimando e qual a quantidade de energia da reação nuclear que ela está liberando. Aqui, quando dizemos *queimando* queremos dizer que as estrelas estão sintetizando elementos mais pesados, já que a queima corresponde a reações de fusão e/ou captura. Como já dito anteriormente é diferença de massa entre os núcleos antes e depois da fusão e /ou captura que é transformada em energia. Quando um dado elemento é praticamente todo consumido no interior da estrela, a energia liberada não é mais suficiente para segurar a contração gravitacional gerada pela formação do elemento mais pesado. 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 mais pesados (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.



Mapa do universo do ponto de vista dos raios gama do núcleo ^{26}Al . Devido ao fato da meia vida desse núcleo ser de alguns milhões de anos e de que das

galáxias são transparentes aos raios gama podemos ver exatamente onde esse núcleo está sendo sintetizado.

Inicialmente as estrelas são formadas basicamente de núcleos de Hidrogênio, ou seja, basicamente prótons. Esse Hidrogênio vai aos poucos sendo queimado produzindo o elemento Hélio. Já falamos desse processo lento de transformação de quatro prótons em um núcleo de hélio quando falamos do que ocorre no Sol. 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. No entanto, dependendo do tamanho da estrela ela pode evoluir de forma diferente e acabam sintetizando diferentes proporções de elementos. O estágio seguinte a queima de Hidrogênio é a de queima de Hélio, fase essa que se inicia apenas as estrelas vão ficando cada vez mais ricas em hélio. As estrelas que conseguem atingir a fase de queima de Hélio e que tenham $M_{\text{Sol}} < M < 8M_{\text{Sol}}$ acabam se tornando as principais fontes de Carbono, Nitrogênio, Oxigênio e alguns elementos um pouco mais pesados. Estrelas muito densas e com massa muito maiores que o Sol, conseguem entrar na fase de pre-Supernova e também produzem elementos pesados. Enfim, existem vários processos dentro de uma estrela responsáveis pela formação de elementos pesados. A queima de Hidrogênio pode demorar alguns bilhões de anos, durante essa fase a estrela se contrai, aumentando a densidade e temperatura até que se dê a ignição para a queima de Hélio. A transformação de núcleos de Hélio em Carbono é dada por uma reação complexa chamada captura tripla de alfas (alfas são núcleos de Hélio), onde três partículas alfas são fundidas de uma só vez. 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 subsequentes a do Hélio, queima do Carbono e Oxigênio, faz com que a estrela forme outras camadas. Algumas estrelas nessa fase, como o que poderá acontecer com o nosso Sol, implodem no momento em que elementos mais pesados são sintetizados se tornando anãs brancas, muitas vezes praticamente inertes. Esse estágio seria a velhice e o destino final de nosso Sol. Outras estrelas mais massivas 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. Num determinado ponto os núcleos formados são núcleos ricos em prótons ou em nêutrons e, portanto, instáveis por decaimento beta. 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 que o processo de síntese de elementos mais pesados por capturas de prótons e nêutrons tenha continuidade.

Esses processos apesar de não explosivos podem ser bastante complexos. Atualmente temos uma boa compreensão de como esses processos 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 massas, abundância inicial, estrutura e forma de decaimento dos núcleos envolvidos bem como as taxas de reações de captura envolvidas. Além disso, algumas dessas reações envolvem núcleos em estados excitados de energia (estados ressonantes) que podem favorecer uma determinada reação de captura ou fusão. Informações sobre esses diversos parâmetros necessários para os modelos de evolução estelar são obtidas de medidas realizadas em laboratórios de Física Nuclear. Obviamente ainda não temos informações de

todas as reações e nem sobre a estrutura de todos os núcleos envolvidos nos processos de síntese dos elementos. Nesse caso, recorremos a modelos teóricos ou a extrapolações de dados obtidos em energias mais altas para as energias de interesse. A consequência disso é que ainda não somos capazes de prever com detalhes vários dos processos estelares, não somos capazes ainda de prever com boa precisão a abundância final dos elementos numa estrela. 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 nos vários laboratórios e aceleradores de partículas espalhados pelo mundo.

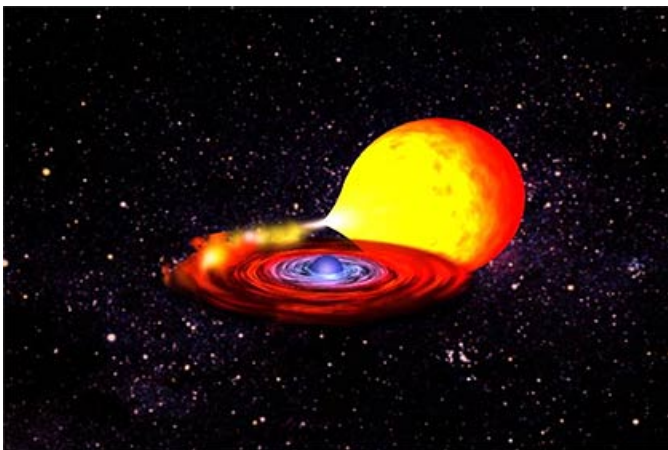
Nucleossíntese explosiva

No universo acontecem algumas explosões que geram eventos espetaculares. Esses processos explosivos são chamados de Novas e Supernovas, e ocorrem em estrelas com condições especiais. Estrelas de tamanho não muito maiores que o Sol evoluem para uma gigante vermelha mas terminam sua vida de forma simples com uma implosão da gigante vermelha para uma anã branca quase inerte. Por outro lado, o interior de uma estrela com massa bem maior que a do Sol, no seu estágio final de evolução, é formado basicamente de elementos com massa em torno do Ferro ($A=56$). Isso ocorre porque esses elementos são os elementos mais ligados e compactos da tabela periódica. Por esse motivo a geração de energia nuclear não é mais espontânea e a força gravitacional começa a dominar. Como a região central dessa estrela massiva é muito pesada, a estrela atinge uma densidade muito grande e a contração é então violenta. Com o aumento brusco da densidade devido a contração estelar, o interior da estrela gera energia suficiente para desencadear processos de fusão nuclear. Essa nova fase de geração de energia nuclear faz com que ocorra uma explosão espetacular chamada de 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. O resultado final de uma explosão de Supernova é a formação de uma estrela de nêutrons bastante densa ou de um buraco negro, dependendo do seu tamanho e densidades originais. A síntese de elementos mais pesados que o Ferro exigem tanta energia que só são possíveis nesses processos explosivos de uma Supernova. 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.

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, se transformando 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 o que chamamos de explosão de uma Nova. Seria como injetar gás numa fogueira. É interessante notar que as explosões do tipo Nova são bem mais frequentes do que as Supernovas. São observadas na Terra ou nas estações de observações espaciais em torno de 100 explosões de Nova por ano, enquanto que apenas algumas Supernovas são observadas 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 que a estrela está pulsando. Chamamos a esse tipo de estrelas de Pulsares. Se, no entanto, a acreação de matéria para a anã branca ou estrela de nêutrons for muito rápida, isso pode desencadear a explosão de Supernova do tipo Ia. As explosões de Supernova do tipo Ia são conhecidas e já podemos determinar exatamente sua luminosidade. Conhecendo essa luminosidade podemos usar a explosão da Supernova do tipo Ia como velas padrões de luminosidade para sabermos a distância entre as galáxias, ou mesmo para sabermos 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, contem elementos raros ou mesmo novas formas de matéria hadrônica. Assim sendo, Supernovas são um grande laboratório para investigarmos a nucleossíntese de elementos extremamente exóticos, para estudar propriedades dos neutrinos e outras partículas geradas e estudar formas nucleares em ambientes de altíssima densidade e temperatura.



Desenho ilustrativo da acreação da matéria de uma estrela de nêutrons de sua companheira menos evoluída de sistema binário, antes da explosão da Supernova.

Nucleossíntese no meio intergaláctico

Existem em nosso universo alguns elétrons, neutrinos e partículas leves que viajam pelo meio intergaláctico em velocidades altíssimas (relativísticas). Essas partículas são conhecidas como GCR (Galactic Cosmic Rays), ou seja, Raios Cósmicos Galácticos. Apesar de décadas de pesquisa, a origem dessas enigmáticas partículas ainda é obscura. O pouco que sabemos desses raios cósmicos, através de informações obtidas pelas espaçonaves Ulysses e Mir, é que eles não vieram de

Supernovas ou de fontes estelares do tipo do Sol. Equipamentos mais sofisticados instalados nas estações espaciais 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. Esses raios cósmicos, apesar de em pequena escala, também contribuem para a formação de elementos. No entanto, o processo é um pouco diferente. Eles formam novos elementos através de reações de quebra de núcleos. Essas reações de quebra ou de espalação, provocadas pelos neutrinos e/ou elétrons relativísticos do meio interestelar com os núcleos da crosta de estrelas, formam alguns elementos como Berílio e Boro que são ejetados também para o meio interestelar e contribuem para novas reações. 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.

Comentários finais

Neste documento procuramos abordar 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. 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.