

DE ONDE VEM OS ELEMENTOS QUÍMICOS

WHERE THE CHEMICAL ELEMENTS COME FROM

Toni Cordeiro de Almeida¹, Gabriel Pereira Silva², Marcel Oliveira de Melo³, Raquel Silva Freitas⁴,
Irandery Fernandes de Fernandes⁵

Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Física. E-mail: 1tonialmeida10@hotmail.com, 2biel.silva2802@gmail.com, 3marceldemelo.fis@gmail.com, 4raquel.uefs7@gmail.com, 5iffernandes@uefs.br

Ao longo de toda a sua história, a humanidade se deparou com diversas perguntas de cunho filosófico sobre sua origem. "De onde viemos?", "Para onde vamos?", "Do que somos feitos?"... todas estas perguntas são até hoje um mistério para nós. Porém, para pelo menos uma destas conseguimos encontrar uma resposta razoavelmente satisfatória. Sabemos que nós, e toda a matéria presente no Universo, somos constituídos de átomos que por sua vez são constituídos de outras partículas que são também constituídas de partículas ainda mais fundamentais. Porém, uma pergunta que surge quase que como consequência da anterior é: de onde vem os átomos dos quais somos constituídos? Este trabalho apresenta uma breve resposta a esta última questão, descrevendo de forma simples a origem dos elementos químicos presentes no Universo.

Palavras-Chave: estrelas, nucleossíntese, átomos, supernova

Throughout its history, humanity has been faced with many philosophical questions about its origin. "Where do we come from?", "Where are we going?", "What are we made of?" all these questions are a mystery to us to this day. However, for at least one of these we have managed to find a reasonably satisfactory answer. We know that we, and all matter in the universe, are made up of atoms, which in turn are made up of other particles that are also made up of even more fundamental particles. However, a question that arises almost as a consequence of the previous one is: where do the atoms we are made of come from? This paper presents a brief answer to this last question, describing in a simple way the origin of the chemical elements present in the universe.

Key-Words: stars, nucleosynthesis, atoms, supernova

INTRODUÇÃO

Em algum momento da sua vida, você provavelmente se deparou com a seguinte frase: "Somos todos poeira de estrelas", talvez não se lembre do nome de quem a proferiu pela primeira vez, mas certamente deve achar a frase romântica. Nos elevamos ao nível de sermos constituídos daquilo que um dia fez parte de uma das milhares de estrelas que estão espalhadas pelo céu noturno nos traz uma sensação de sermos especiais, não somos só mais um grãozinho de areia no universo.

Talvez, ao se deitar na grama numa noite escura repleta de estrelas iluminando o céu, você tenha parado e refletido sobre esta frase de uma forma romântica, instigante, talvez com um sorriso no rosto de poder admirar a imensidão do universo e saber que faz parte dele. O que talvez nunca tenha parado para pensar é que esta frase carrega o poder de uma afirmação que é maior do que o próprio sentimento romântico que ela propaga. Essa frase carrega a afirmação de que um dia todos nós fizemos parte de uma estrela que brilhou no céu e que deu a sua vida para que fossem formados os elementos químicos que hoje constituem o nosso organismo. O ferro que corre em nossas veias neste exato momento só foi possível de ser criado nos momentos finais da vida de uma estrela, já o zinco utilizado no metabolismo de suas proteínas foi gerado após a explosão, conhecida como supernova, dessa mesma estrela. Portanto, quando estiver admirando a beleza do céu noturno pare e pense a cerca disso, reflita sobre a importância que essa frase tem. Mas, não se iluda, nós não somos cada um uma estrela diferente, viemos todos de uma mesma estrela que um dia enriqueceu o meio

interestelar na região que um dia viria a ser o Sistema Solar. Talvez essa estrela também tenha sido poeira de outra estrela, mas provavelmente não passamos de duas gerações estelares.

Depois dessa breve introdução, talvez você tenha se lembrado do icônico nome do autor dessa poderosa frase, mas caso contrário não se preocupe o seu nome é Carl Sagan (Sagan, 2006). Ele foi um cientista estadunidense que dedicou parte de sua carreira à divulgação científica, se tornou bastante famoso pelos seus livros de divulgação científica e pela série de televisão intitulada *Cosmos: Uma Viagem pessoal*. Caso ainda não tenha assistido *Cosmos*, é extremamente recomendável que o faça, é uma obra prima da divulgação científica, ao terminar a leitura deste texto se aventure na maravilhosa jornada ao conhecimento que a série nos proporciona.

Ao longo deste texto será discutido em detalhes a frase de Sagan e porque ela é tão poderosa e instigante. Talvez não tenha percebido ainda, mas ela nos fornece a resposta para duas perguntas que estiveram presentes em toda a história da humanidade: do que nós somos feitos e o que gera o brilho das estrelas? Estas são duas questões importantíssimas e que serão respondidas ao longo do texto. Dando um pouco de spoiler do que será apresentado a seguir, nós somos formados por átomos e muitos destes só podem ser criados dentro do que chamamos de núcleo de uma estrela. No processo em que a estrela produz estes átomos ela também produz a luz que embeleza as nossas noites, mas não devemos nos esquecer do nosso amado Sol que também produz átomos no processo em que gera a luz tão essencial para as nossas vidas.

Adiantando as discussões que seguem nos próximos capítulos, as estrelas produzem energia através de fusões nucleares em um processo chamado nucleossíntese estelar, que também é o responsável pela síntese de parte dos elementos químicos existentes (MADEJSKY, 2014). As primeiras etapas deste processo ocorre quando o núcleo da estrela atinge temperaturas que estejam na faixa de $1.4 \cdot 10^6^\circ\text{C}$ a $3 \cdot 10^8^\circ\text{C}$, a termos de comparação, estas são cerca de mil a cem mil vezes a temperatura superficial do Sol, que é de aproximadamente 5507°C (MADEJSKY, 2014). Existem três processos termodinâmicos que podem ocorrer nessas condições de temperatura: próton-próton, ciclo CNO e o triplo-alfa, estes são processos que liberam quantidades absurdamente altas de energia, a exemplo do próton-próton que tem um saldo final de energia de 26.72 MeV (MADEJSKY, 2014). Apesar de não estarmos acostumados com a unidade de elétron-volt, 26.72 MeV é uma quantidade de energia absurdamente alta, para que um ciclo da cadeia próton-próton ocorra precisamos de quatro átomos de hidrogênio iniciais que produzem um núcleo de hélio, utilizando desse ciclo, precisaríamos de aproximadamente $6.6710 \cdot 10^{-3}$ gramas de hidrogênio para alimentar o consumo de energia, por um ano, de uma casa que consome 100 kW/h de energia por mês. Os detalhes de como ocorre a nucleossíntese estelar, bem como os seus processos decorrentes, serão explicados em mais detalhes na seção III deste trabalho.¹

DO QUE SOMOS CONSTITUÍDOS

¹ eV é uma unidade de medida de energia, chamada de elétron-volt, que equivale a quantidade de energia que uma partícula com uma carga igual a uma carga elementar possui ao ser submetida a um potencial elétrico de um volt. $1\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$, ou um milhão de elétrons-volt, onde 1 eV equivale a aproximadamente 1.06×10^{-19} joules.

Durante muito tempo a humanidade se perguntou de onde vem as coisas e do que a matéria é constituída. Economizando aqui uma discussão de séculos, toda a matéria conhecida no Universo é composta em sua essência por átomos (Maciel, 2004; Campos, 2020). Quando o nome átomo foi proposto, ele seria um ente indivisível, o composto mais fundamental da matéria, porém nós sabemos que não é isso que de fato ocorre.

Os átomos são constituídos de outras partículas ainda mais fundamentais, os nêutrons, os prótons e os elétrons. Os nêutrons e prótons ficam aglutinados no que chamamos de núcleo de um átomo, eles estão fortemente ligados no núcleo por um tipo de força que chamamos de força nuclear forte, esta dentro dos limites do núcleo consegue superar a poderosa força de repulsão que tenta a todo momento separar os prótons dos nêutrons (Campos, 2020; Souza and Dantas, 2010).

Os elétrons por sua vez "orbitam" o núcleo atômico, porém não devemos imaginar o átomo como análogo ao Sistema Solar (Souza and Dantas, 2010). Imaginar o núcleo como sendo o Sol e os elétrons como sendo os planetas está completamente errado, esta é uma analogia que não se deve ser feita. Entender como funciona a interação entre elétron e núcleo não é trivial e exige conhecimentos avançados de física que fogem do escopo deste trabalho, por hora não se apegue a esta discussão (Souza and Dantas, 2010).

A força nuclear forte é muito delicada, o que faz com que alguns átomos sejam muito instáveis, o que faz com que estes átomos emitam algumas partículas de forma espontânea, este processo pode transformar o átomo em outro completamente diferente desde que seguidas algumas regras para que o produto final do processo seja coerente (Souza and Dantas, 2010). Este é um processo chamado de decaimento radioativo, é assim que funcionam, por exemplo, usinas e bombas nucleares. Mas, não se engane, átomos muito estáveis também podem decair, porém o tempo necessário para que apenas um único átomo decaia por ser maior que a idade do próprio Universo (Souza and Dantas, 2010; Guimarães and Hussein, 2004).

Um átomo pode ser caracterizado pelo seu número de prótons, elétrons e nêutrons, já um elemento químico é um átomo com um número específico de prótons (Souza and Dantas, 2010). Ou seja, o que diferencia dois elementos químicos é a quantidade de prótons em seu núcleo. Exemplo: hidrogênio possui apenas um próton enquanto o lítio possui três prótons. Dois elementos com o mesmo número de prótons, porém diferente número de nêutrons são chamados de isótopos de um mesmo elemento químico (Souza and Dantas, 2010). Exemplo: um hidrogênio com apenas um próton e zero nêutrons é comumente chamado apenas de hidrogênio, quando ele possui em seu núcleo um próton e um nêutron ele é conhecido como deutério, porém podemos dizer que ambos são isótopos de hidrogênio. Alguns isótopos podem ser mais estáveis que outros assim como podem também ser mais ou menos raros de serem encontrados na natureza (Souza and Dantas, 2010).

Todos os elementos químicos que observamos no Universo com os mais poderosos telescópios também são encontrados na Terra (Campos, 2020; Guimarães and Hussein, 2004; Maciel, 2004). Note que estamos falando de elementos, alguns isótopos em específico podem não ser encontrados no nosso planeta. A abundância dos elementos no sistema solar é semelhante à encontrada em outras estrelas e galáxias (Maciel, 2004). Porém há alguns elementos que não são encontrados na natureza e que são somente produzidos em laboratório, estes costumam ser muito instáveis e decair muito rápido.

O corpo humano é composto por 61% de oxigênio, 23% de carbono, 10% de hidrogênio 2.5% de nitrogênio, 1.4% de cálcio, 1.1% de fósforo e o restante correspondente a outros elementos químicos, até mesmo o ouro faz parte da nossa composição, por tanto com exceção do hidrogênio, todos os outros elementos foram produzidos por uma estrela (Guimarães and Hussein, 2004), o que nos leva a constatação de sermos poeira estelar.

COMO SÃO PRODUZIDO OS ÁTOMOS

Provavelmente você já deve ter ouvido falar sobre o Big-Bang, a melhor teoria existente atualmente para explicar a formação do Universo e sua evolução ao estado atual. Se por Big-Bang costumamos imaginar uma grande explosão cósmica, então precisamos consertar um pouco este pensamento, pois uma explosão não é a melhor analogia para a teoria. Apesar do nome nos remeter a uma explosão, o Universo na verdade sofreu uma expansão acelerada que dura até os dias atuais.

Nos seus instantes iniciais, toda a matéria e energia do Universo estava contida em apenas um ponto infinitesimal que chamamos de singularidade (Guimarães and Hussein, 2004). O nome singularidade é muito propício pois ele nos remete a algo que é único, sem outros iguais. Em algum momento, por motivos que ainda nos são desconhecidos, essa singularidade começou a se expandir e de forma acelerada. Ser acelerada significa que quanto mais ela se expande, mais rápido ela continuará se expandindo, isso significa dizer que quanto mais longe dois objetos estão no Universo mais rápido eles se afastam por conta da expansão.

Uma boa analogia para imaginar a expansão do Universo é pensar em uma bexiga de ar, experimente fazer este experimento: pegue uma caneta e faça vários pontinhos em uma bexiga e comece a enchê-la, verá que a bexiga aumentará de tamanho conforme é soprada e os seus pontos vão aumentar a distância entre si mesmo não saindo do lugar.

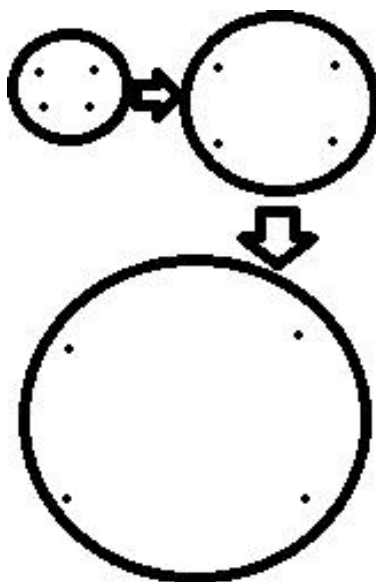


Figure 1: Ilustração da expansão do Universo.

Na Figura 1 temos uma ilustração de como funciona o experimento proposto acima. Note que quanto

maior a esfera, mais distante os pontos estão entre si, porém os pontos jamais saíram do lugar. Mas, este é um efeito a nível cosmológico, a nível de interações quotidianas a expansão não é capaz de nos afastar do chocolate na hora da sobremesa.

Nas primeiras frações de segundos após o Big-Bang, a matéria como conhecemos hoje ainda não existia, o universo era extremamente quente de modo que apenas as partículas mais fundamentais conseguiam existir (Campos, 2020). O nome fundamental é devido ao fato destas partículas serem as mais indivisíveis, ou seja, são o que há de mais fundamental no universo; toda a matéria que conhecemos é constituída dessas partículas (Campos, 2020). Estas partículas que conseguiam sobreviver a um estado tão extremo são os chamados quarks e glúons. Apenas alguns segundos depois o universo se resfriou, devido a expansão, a uma temperatura agradável o suficiente para que os quarks e glúons pudessem dar origem aos nêutrons, prótons e outras partículas que estamos mais acostumados (Guimarães and Hussein, 2004).

Basta sairmos da escala de alguns segundos para minutos após o Big-Bag para que a temperatura seja suficiente para que tenhamos a existência dos primeiros elementos químicos, o hidrogênio, o hélio, e mais alguns instantes depois graças a estes primeiros elementos é possível a formação de outros elementos como o berílio e o lítio (Guimarães and Hussein, 2004). Porém, ainda são necessários mais 200 milhões de anos desde o início do Big Bang para que as primeiras estrelas sejam formadas e seja possível a nucleossíntese estelar de elementos mais pesados (Carneiro, 2019).

NUCLEOSSÍNTESE ESTELAR

Com o surgimento das primeiras estrelas no Universo, é então possível a síntese de novos elementos químicos em um processo conhecido como núcleossíntese. A nucleossíntese se trata do processo de fusão nuclear onde elementos químicos são sintetizado dando origem a elementos mais pesados que os originais e liberando energia (MADEJSKY, 2014; Guimarães and Hussein, 2004; Carneiro, 2019; Campos, 2020). Este processo deve obedecer certas regras para que possa ocorrer.

Hoje sabemos que as as estrelas emitem energia e sintetizam elementos químicos no processo da nucleossíntese estelar, porém nem sempre tivemos essa percepção (MADEJSKY, 2014). Muitas foram as tentativas de explicar de onde vem a luz proveniente do Sol. A exemplo da proposta feita no século XVIII de que impacto de cometas seriam os responsáveis, se acreditava que, ao se colidirem com o Sol, eles transmitiriam energia cinética suficientemente grande para que, ao ser convertida em calor, explicasse toda a energia que o Sol emite, porém, o que não se sabia à época é que os cometas são constituídos de gelo e possuem um raio de alguns quilômetros, assim não sendo capazes de explicar o fenômeno, na verdade seriam capaz de fornecer a luminosidade da nossa estrela por apenas alguns segundos (MADEJSKY, 2014).

Foi somente em meados de 1920 que o astrônomo inglês Arthur Stanley Eddington, tendo conhecimento dos trabalhos de Gamow sobre tunelamento e outros trabalhos sobre física nuclear, propôs que a fonte de energia das estrelas seria devido a fusão nuclear em seu núcleo, o que chamamos de nucleossíntese estelar (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000).

Para entendermos melhor sobre a nucleossíntese estelar é necessário primeiro entender sobre como se

dá a formação e evolução de uma estrela uma vez que estes estão intimamente ligados. A vida de uma estrela é composta por períodos mais agitados e períodos mais calmos (Guimarães and Hussein, 2004).

Na formação inicial de uma estrela, uma nuvem de poeira e gás começa a girar ao redor de um centro enquanto acumula cada vez mais matéria, em um determinado momento quando possuir massa suficiente ela vai colapsar em seu núcleo formando uma protoestrela (MADEJSKY, 2014; Guimarães and Hussein, 2004). Quando realizamos experimentos em laboratório na Terra, devido às condições atmosféricas, a força gravitacional entre as moléculas de um gás é desprezível, de modo que o gás irá ocupar, devido à sua pressão interna, todo o volume que lhe for destinado (MADEJSKY, 2014). Porém, o mesmo não é válido quando falamos de uma nuvem de dimensão interestelar, neste caso a força gravitacional entre as moléculas de um gás pode ser grande o suficiente para causar uma pressão no gás maior que a pressão interna que o faz expandir, assim gerando um colapso gravitacional. (MADEJSKY, 2014).

Toda a vida da estrela vai girar em torno de uma guerra entre a gravidade e a pressão de fótons do gás que é formada. Enquanto a gravidade está a todo momento tentando atrair toda a matéria em um único ponto do espaço, a pressão interna de fótons tenta fazer com que a protoestrela se expanda aumentando o seu volume (MADEJSKY, 2014; Guimarães and Hussein, 2004). Em algum momento dessa guerra, ela consegue encontrar um equilíbrio onde a pressão interna é igual a pressão exercida pela gravidade, essa condição é conhecida como equilíbrio hidrostático (MADEJSKY, 2014). Nesse momento, ela consegue as condições de pressão e temperatura ideais em seu núcleo para que seja iniciada a fusão de hidrogênio em hélio. Para que uma estrela seja formada é preciso que nuvem de poeira e gás que a origina possua um limite inferior de massa de aproximadamente 0.7 massas solares para que seja realizada a fusão nuclear, abaixo desse valor a nuvem da origem a objetos de baixa massa como anãs marrons e planetas (MADEJSKY, 2014; Guimarães and Hussein, 2004; Maciel, 2004).

Os períodos agitados da estrela são justamente os de guerra entre as duas pressões, enquanto os calmos são os de equilíbrio. As primeiras estrelas do universo eram formadas basicamente por hidrogênio, uma vez que terminam a fusão do hidrogênio, passam a serem ricas em hélio, as com massa de até 8 massas solares conseguem sintetizar em seu núcleo elementos como carbono e oxigênio, enquanto as com massa acima de 8 massas solares conseguem produzir elementos ainda mais pesados, porém elementos mais pesados que o ferro, ou seja que possuam mais que 26 prótons, só podem ser gerados em um dos eventos mais catastróficos do Universo as explosões de novas e supernovas (Guimarães and Hussein, 2004).

Para as estrelas que possuem uma temperatura em seu núcleo da ordem de $1.4 \cdot 10^6$ a $3 \cdot 10^8$ °C, existem três processos de nucleossíntese que podem ocorrer: a cadeia próton-próton, o ciclo CNO e o processo de triplo-alpha (MADEJSKY, 2014). Todos estes são processos de fusão nuclear, onde que dois núcleos atômicos se colidem produzindo um novo núcleo atômico (MADEJSKY, 2014).

No caso da cadeia próton-próton, esta é predominante em estrelas de massa menor que 1.5 massas do Sol, na época da vida da estrela onde ela sintetiza núcleos de hélio em seu núcleo, para que este processo ocorra é necessário temperaturas no núcleo da estrela da ordem de 106.7 °C a 107.2 °C (MADEJSKY, 2014). Esta cadeia é subdividida em outras três: PP1, PP2 e PP3, onde PP1 é a mais provável de ocorrer, com 86% de probabilidade, as demais tem 14% e 0.02%, respectivamente (MADEJSKY, 2014). Estas probabilidades

tem dependência com as propriedades físicas da estrela, como temperatura, composição química e densidade, em temperatura próximas a $24 \cdot 10^6 \text{C}$ as cadeias PP2 e PP3 tem igual probabilidade de ocorrência (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000). Em todos os processos de próton-próton, temos como resultado final a transformação de núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio, no caso de PP1 é utilizado somente átomos de hidrogênio, enquanto PP2 e PP3 utilizam catalisadores como o berílio e o lítio, que apesar de serem utilizados durante o processo, são devolvidos ao fim do mesmo (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000). As energias liberadas nestes processos são de 26.2 MeV para PP1, 25.7 MeV para PP2 e 19.3 MeV para PP3 (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000). Estes processos também emitem partículas chamadas de neutrinos, que possuem energia média de 0.293 MeV para PP1, 0.86 MeV para PP2 e 7.2 MeV para PP3 (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000).

O ciclo CNO ocorre em estrelas de massa da ordem de mais de 1.5 massas do SOL, com temperaturas típicas no núcleo de 107.2°C a 107.7°C , e liberando energia de 25 MeV (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000). Esse é um processo que utiliza núcleos de carbono, nitrogênio e oxigênio como catalisadores, eles servem para que o processo possa ocorrer e são devolvidos ao ser completado um ciclo (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000). Ao fim de ciclo CNO, o resultado é a transformação de quatro núcleos de hidrogênio em um núcleo de hélio (MADEJSKY, 2014). Durante o processo do ciclo, em algumas de suas etapas, ocorre um decaimento radioativo que libera uma partícula beta² (MADEJSKY, 2014).

O processo de triplo-alpha, proposto por Edwin Ernest Salpeter, se trata da transformação de núcleos de hélio em núcleos de outros elementos (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000). Nos processos anteriores, a estrela consegue transformar sintetizar núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio, como consequência, a quantidade de hidrogênio em seu núcleo diminui, fazendo com que a produção de energia também diminua (MADEJSKY, 2014). Como a quantidade de energia produzida diminui, a pressão interna também diminui, então a estrela sofre uma contração do seu núcleo, o que leva a um aumento da temperatura (MADEJSKY, 2014). Ao atingir uma temperatura maior que 108°C , a estrela consegue realizar o processo de triplo-alpha consumindo núcleos de hélio (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000). Alguns dos elementos que podem ser produzidos nesse processo são: oxigênio, neônio, magnésio, silício, enxofre e argônio (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000).

Para estrelas muito massivas, com massas acima de 8 massas do Sol, ao atingir temperaturas em seu núcleo da ordem de $5 \cdot 10^8 \text{C}$ a $10 \cdot 10^8 \text{C}$ é possível realizar outros processos nucleares, como a fusão do carbono em outros elementos químicos (MADEJSKY, 2014; OLIVEIRA FILHO and SARAIVA, 2000). Em temperaturas maiores que $6 \cdot 10^8 \text{C}$, é possível a colisão de dois núcleos de carbono, gerando elementos como o sódio e o neônio e liberando energia (MADEJSKY, 2014). Ao atingir temperaturas maiores que 109°C , é possível a fusão de dois núcleos de oxigênio, formando elementos como o enxofre, fósforo, silício e magnésio em processos que geram energia (MADEJSKY, 2014). Para temperaturas maiores que $4 \cdot 10^9 \text{C}$ é possível a

² Partícula beta se trata de elétrons ou pósitrons de alta energia que são emitidos por núcleos radioativos no processo chamado de decaimento beta (Souza and Dantas, 2010).

realização de outro processo, chamado processo-e, ou processo de equilíbrio (MADEJSKY, 2014). Nesse último processo, fótons altamente energéticos colidem com núcleos de elementos químicos, produzindo prótons, nêutrons e partículas α^3 que podem se fundir com outros núcleos atômicos, gerando assim novos elementos (MADEJSKY, 2014).

O grande problema que as estrelas não conseguem sintetizar elementos mais pesados que o ferro é que até este o processo de fusão nuclear gera energia para estrela, ou seja quanto mais elementos são sintetizados, mais energia é liberada mantendo o equilíbrio de pressão na estrela (MADEJSKY, 2014). A luz das estrelas que vemos a noite, bem como a luz do Sol que ilumina o dia, é proveniente desse processo. Porém, para os elementos com número atômico A^4 maior que 56 o processo ao invés de gerar energia, ele consome energia, ou seja, as estrelas precisam fornecer energia para que esse processo ocorra (MADEJSKY, 2014).

EXPLOSÃO EM SUPERNOVA

Este é um dos eventos mais energéticos que podem ocorrer no Universo, e ocorre quando uma estrela super massiva (com massa da ordem de 8 vezes a massa do Sol) chega ao fim de sua vida (Brandão, 2021). Neste ponto, a estrela inicia a "queima" de elementos pesados como o oxigênio, magnésio, neônio e silício, em um processo tão rápido que pode durar apenas alguns dias (Brandão, 2021). A estrela, então, consegue sintetizar ganhando energia, os elementos químicos até o ferro, a partir do próximo elemento a estrela começa a perder energia para que o processo de fusão nuclear ocorra (MADEJSKY, 2014). Então, ela entra no estágio final de sua vida, e colapsa em um evento explosivo, com energias tão altas que são capazes de sintetizar os elementos mais pesados encontrados na natureza (Souza and Dantas, 2010).

O processo acima é conhecido como Supernova do tipo II, originada de um colapso de uma estrela super massiva no fim de sua vida (Brandão, 2021). Mas, há ainda outro tipo, as Supernovas de tipo Ia, esta que se forma em sistemas binários de estrelas de massas típicas entre 0.8 e 8 vezes a massa do Sol, onde a estrela mais massiva termina a sua vida como uma anã branca que, ao longo da vida da estrela menos massiva, captura a massa da sua companheira até o ponto em que o sistema se torna instável e colapsa na explosão de Supernova (Brandão, 2021).

Dois processos são muito importantes para que possamos explicar a síntese de elementos químicos mais pesados que o ferro: processo-s e o processo-r, ambos envolvem a fusão de um nêutron com um núcleo de elemento da família do ferro (MADEJSKY, 2014). O s do primeiro processo vem do termo slow, que do inglês significa lento, e ocorre em um ambiente de baixa temperatura e baixa densidade de nêutrons, ele permite a síntese de núcleos com número atômico A máximo de 210 (MADEJSKY, 2014). Já o r do processo-r vem do termo rapid, que do inglês significa rápido, ocorrendo em ambientes de alta densidade de nêutrons e temperaturas altas, sendo um processo importante em condições de alta temperatura e densidade, como ocorre na fase inicial de uma supernova (MADEJSKY, 2014).

³ Partícula alpha se trata de um núcleo de átomo de hélio de alta energia que é emitido por núcleos radioativos no processo chamado de decaimento alpha (Souza and Dantas, 2010).

⁴ O número atômico A de um átomo representa a soma da quantidade de prótons e nêutrons que ele possui em seu núcleo.

CONCLUSÃO

Neste artigo, apresentamos uma breve introdução ao fato de "sermos" poeira de estrelas e a origem dos elementos químicos constituintes da matéria presente no Universo. Foram apresentados os constituintes básicos da matéria a qual somos formados, que são os átomos, que por sua vez são constituídos de partículas ainda mais fundamentais. Átomos estes que, em sua maioria, são formados no núcleo de uma estrela ou em belíssimas explosões de supernovas no processo que gera a luz que vemos a noite e a que recebemos do Sol. Portanto, os elementos químicos constituintes da matéria que forma os nossos corpos um dia estiveram no núcleo de uma estrelas ou foram gerados numa explosão de supernova. O processo de sintetização dos elementos químicos no núcleo das estrelas é chamado de nucleossíntese e este libera energias tão altas que facilmente poderia alimentar o consumo de energia de uma casa por um ano. A nucleossíntese, por sua vez, é dividida em diversos processos, que geram diferentes elementos e quantidade de energia. Porém, os elementos mais pesados que o ferro só podem ser gerados em um dos eventos mais catastróficos e belos do Universo, as explosões de supernova. Esperamos que, ao final desta leitura, o leitor possa sentir um pouco do sentimento de admiração e esplendor que os autores sentem sobre o Universo.

REFERÊNCIAS

- K. A. Brandão. *Proposta de aprendizagem para o Ensino de Astronomia e Química utilizando o jogo como ferramenta didática*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2021.
- G. C. Campos. A nucleossíntese no universo primordial. 2020.
- B. P. Carneiro. A nucleossíntese estelar e o tunelamento quântico. *Anais Seminário de Iniciação Científica*, (22), 2019.
- Guimarães and M. S. Hussein. Nucleossíntese dos elementos e astrofísica nuclear. *Revista USP*, (62):74–87, 2004.
- W. J. Maciel. Formação dos elementos químicos. *Revista USP*, (62):66–73, 2004.
- K. R. MADEJSKY. Curso básico de astrofísica e cosmologia: 1-o sistema solar, as estrelas e a via láctea. *Feira de Santana:UEFS Editora*, 2014.
- K. d. S. OLIVEIRA FILHO and M. d. F. O. SARAIVA. Introdução à astronomia e à astrofísica., 2000.
- C. Sagan. *Cosmos*, volume 1. Edicions Universitat Barcelona, 2006.
- M. A. M. Souza and J. D. Dantas. Fenomenologia nuclear: uma proposta conceitual para o ensino médio. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27(1):136–158, 2010.