

# A origem dos elementos da Tabela Periódica

Jorge E. Horvath

Universidade de São Paulo

---

## Resumo

Apresentamos neste artigo um panorama da nucleossíntese cosmológica, estelar e catastrófica que leva a povoar a Tabela Periódica do elementos criada por D. Mendeleev há mais de um século.

## Abstract

We present in this article a broad overview of nucleosynthesis of cosmological, stellar and catastrophic origin, which lead to populate the Periodic Table of elements created by D. Mendeleev more than a century ago.

---

**Palavras-chave:** origem dos elementos, astrofísica, cosmologia.

**Keywords:** origin of the elements, astrophysics, cosmology.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38513](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38513)

## 1 Introdução

A extraordinária síntese e classificação atingida por Dmitri Mendeleev no final do século 19 é apresentada e discutida em todos os colégios do mundo. Mendeleev conseguiu um ordenamento dos elementos químicos, posteriormente justificado por Pauling e outros com a aplicação da mecânica quântica que continua vigente e imprescindível. Com o tempo, novos elementos sintetizados em laboratório, algumas vezes com vidas médias minúsculas, foram adicionados a Tabela Periódica que contém nada menos que todos elementos químicos do universo.

O que não é tão discutido (de fato, nem é mencionado na maior parte das vezes) é a questão crucial da origem destes elementos [1]. Com efeito, desde que estão presentes na Natureza, devem haver processos naturais que os produzam, e sua abundância relativa no Cosmos, no Sistema Solar e na crosta terrestre onde vivemos deve ser também explicada de forma abrangente. Esta última afirmação não é nada óbvia. Por exemplo, o berílio no Sistema Solar é ordens de grandeza mais abundante que no Cosmos como um todo, o silício na crosta da Terra é muito comum, mas não é este o caso no meio interestelar. Há inúmeros problemas e detalhes a serem explicados até atingirmos uma compreensão completa da Tabela Periódica e da origem dos seus elementos.

Neste sentido, as fontes dos elementos quími-

cos de origem astrofísica e cosmológica estão hoje melhor estudadas e caracterizadas, já que uma parte importante desta tarefa é a de separar e avaliar cada processo e quantificar sua contribuição. Houve avanços significativos nas últimas décadas que permitiram, se não explicar ainda detalhadamente cada processo e seu desfecho quantitativo, pelo menos oferecer uma descrição tentativa e caminhos para aprofundar o conhecimento de cada um deles.

Desde uma perspectiva cósmica precisamos distinguir os processos que produziram elementos na evolução cosmológica (nucleossíntese primordial) daqueles que produzem núcleos a partir de condições mais locais (nucleossíntese estelar). O último grupo, por sua vez, compreende uma nucleossíntese própria da evolução das estrelas, mas também processos explosivos no fim da evolução estelar, e além dela, que somente agora começam a ser confirmados e revelados. A composição destes vários processos deve explicar as abundâncias observadas, como afirmamos anteriormente.

## 2 Nucleossíntese do Big Bang

Há um século atrás, os pioneiros da ideia da cosmologia moderna começaram a se preocupar pela origem dos elementos tal como hoje a entendemos. Uma das primeiras ideias foi a do “ovo cósmico” ou “átomo primordial” de Lemaître

tre, em 1931. Lemaître raciocinou que o Universo inteiro estava inicialmente num estado ultracompacto [2], e que os elementos mais leves que conhecemos se formaram pelos decaimentos radioativos desse “átomo primordial”. Além do “ovo” ser de um dos mitos cosmogônicos mais comuns, a proposta de Lemaître foi talvez a primeira tentativa racionalista moderna de responder a questão da origem dos elementos.

A retomada da questão teve um protagonista fundamental, o físico ucraniano George Gamow. Num trabalho célebre [3] no qual Hans Bethe foi incluído para que as iniciais sejam  $\alpha\beta\gamma$ , Alpher, Gamow e Bethe propõem que os núcleos primordiais foram montados “de baixo para cima”, pela adição sucessiva de nêutrons. Veremos agora como é que a expansão do Universo entra de forma crucial e até onde podem aparecer núcleos pesados.

Segundo as ideias e evidências modernas do Big Bang como contexto cosmológico, a nucleossíntese primordial pode ter produzido a maior parte dos elementos mais leves, mas não contribuiu para criar núcleos com número de massa  $A > 8$ . Vejamos agora o porquê desta afirmação.

Muito cedo na história do Universo a matéria não comportava núcleo algum. De fato, nem mesmo os chamados hádrons ordinários (prótons e nêutrons) existiam. Uma “sopa” indiferenciada de partículas elementares colidia incessantemente, com destaque para os “tijolos” elementares dos prótons e nêutrons, denominados quarks e glúons, até que a temperatura do ambiente baixou para uns 170 MeV ( $\sim 1,7 \times 10^{12}$  K). De acordo com os cálculos teóricos e as observações da física das colisões de íons pesados, existe uma transição de fase na qual os quarks e glúons formam as “bolhas” que chamamos de prótons e nêutrons para não mais aparecer como estados livres para temperaturas menores que a temperatura da transição de fase. Com efeito, três quarks formam um próton ou nêutron, e todas as outras partículas que participam das interações fortes e formam os núcleos são combinações de quarks. Esta transição de fase leva o nome de *confinamento*.

Agora bem, os prótons e nêutrons cósmicos recém formados não podem construir núcleos de imediato. Nesse momento da história do Universo, alguns  $\approx$  microssegundos depois do que conhecemos como “singularidade inicial”, ou seja

um momento extremo da nossa descrição do Universo, a temperatura do ambiente  $T_U$  ( $U$  para designar Universo) era gigantesca, o que impedia a síntese dos núcleos. Se formado, um núcleo leve era imediatamente quebrado pela radiação (fótons) também presentes no ambiente. Porém, a fração de prótons e nêutrons naquele momento pode ser calculada pela existência de equilíbrio químico garantido pelas interações fracas,

$$n \rightleftharpoons p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (1)$$

$$p \rightleftharpoons n + e^+ + \nu_e, \quad (2)$$

que resultou numa fração de nêutrons por prótons de

$$\frac{n}{p} = \exp\left(-\frac{\Delta mc^2}{k_B T_U}\right), \quad (3)$$

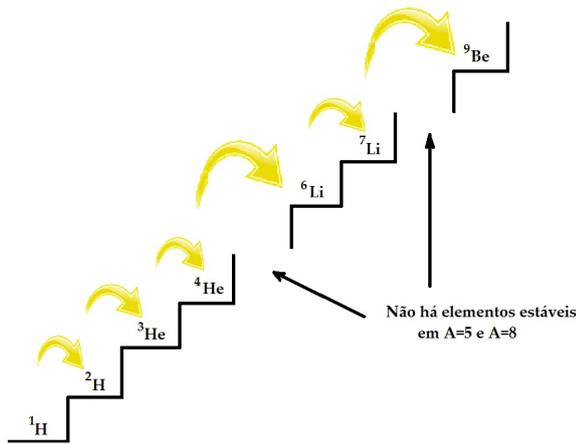
onde  $k_B$  é a constante de Planck e  $\Delta mc^2 = 1,3$  MeV é a diferença de massas do próton e o nêutron medida no laboratório. Isto não é outra coisa que a lei de ação de massas da química, aplicada à reação nuclear.

Agora bem, para manter o equilíbrio nas reações fracas (1), estas devem ser mais rápidas que a expansão do Universo. Quando esta condição não é mais satisfeita, a razão (3) “congela” e não muda mais enquanto a expansão do Universo continua. Esta temperatura de congelamento resulta ser  $T_U = T_F \sim 10^{10}$  K. Usando a equação (3) com  $\Delta mc^2$  como dado obtemos de imediato

$$n/p \cong 0,17. \quad (4)$$

Pouco depois do congelamento (ou *freezeout* em inglês), a temperatura  $T_U$  baixou o suficiente para que a nucleossíntese comece, por volta de  $10^9$  K. A fração  $n/p$  mudou pouco até esse momento, pelo decaimento de alguns nêutrons, e ficou em  $\sim 1/7$  quando isto aconteceu [4].

Deste quadro decorre o resultado central da nucleossíntese primordial: se havia 7 prótons por cada nêutron, e como dois prótons não podem fundir (não existe um estado ligado de dois prótons, o “dipróton” é instável), vemos que 3/4 do total de prótons ficaram sem fundir, livres. O próton que “sobrou” formou primeiro um núcleo de deutério com um nêutron, e posteriormente  $He^3$  e  $He^4$ , e outros núcleos um pouco mais pesados. Assim, em torno de 25% teria ficado na forma de hélio. Frações muito menores de *Li* foram formadas. Ou seja, podemos dizer com



**Figura 1:** O caminho da nucleossíntese primordial, com os gargalos em  $A = 5$  e  $A = 8$  que explicam por quê a nucleossíntese se deteve e não avançou para produzir elementos de grande  $A$ .

muita generalidade que 75% dos núcleos primordiais são hidrogênio, algo em torno de 25% hélio, e frações muito menores de deutério e de lítio (e talvez algo de berílio). A produção de elementos mais pesados não ocorre, pois a própria expansão do Universo acabou por inviabilizar a formação de elementos mais pesados.

Esta última afirmação diz que a nucleossíntese não conseguiu avançar e produzir carbono ou elementos mais pesados pela simples razão que a expansão de Hubble dificultou o “encontro” dos núcleons e os núcleos leves que permitiriam continuar a fusão. Isto é um fator que se soma a outra dificuldade que é produto de uma característica bem conhecida dos núcleos leves: não existem isótopos estáveis em  $A = 5$  e  $A = 8$ . Assim, para continuar seu caminho até números de massa maiores, a fusão precisaria “pular” esses gargalos apesar da diluição da densidade do ambiente provocada pela expansão do Universo. Este “pulo” implicaria duas fusões sucessivas, com uma única fusão um núcleo em  $A = 5$  ou  $A = 8$  decaí e a nucleossíntese não consegue avançar (Figura 1).

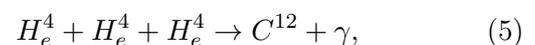
Desta forma concluímos que todos os núcleos com  $A > 8$  devem ser produto de fusões e outros processos não cosmológicos. A nucleossíntese do Big Bang produziu somente elementos leves (aquém do berílio que trancou a fusão posterior), e o hidrogênio e hélio são mais de 99% da massa visível do Universo e a matéria fundamental para formar as estrelas onde núcleos mais pesados serão construídos.

### 3 Nucleossíntese estelar

A formação das estrelas é um segundo estágio do Universo onde a nucleossíntese continua. De fato, as estrelas são frequentemente descritas como enormes reatores nucleares onde a fusão de núcleos leves em outros mais pesados serve para manter a estrutura e impedir o colapso estelar.

A reação fundamental é a da conversão de hidrogênio em hélio, a qual é normalmente descrita de forma muito simplificada, o qual esconde sua natureza complexa e sutil [5]. Basicamente, sabemos que acontecem várias coisas bem diferentes de colocar “4 prótons” juntos e obter hélio (como sugerido em quase todos os textos introdutórios com um desenho bem simples). De fato, já vimos que o dipróton não existe, e assim, uma reação de dois corpos de fusão bem sucedida resulta necessariamente de um decaimento fraco de um próton em nêutron, e no tempo em que está na região do poço de potencial atrativo do outro próton. É bastante claro que isto é um evento raríssimo, e provoca que a produção de energia aconteça com a taxa ditada pelas reações fracas, fazendo com que as estrelas durem da ordem de bilhões de anos. Em suma, quase nenhuma colisão próxima de dois prótons acaba em fusão, somente uma fração muito pequena que corresponde àquelas onde o decaimento espontâneo acontece no tempo certo. Uma exposição mais completa pode ser encontrada na Ref. [5].

Quando não há condições de continuar fusinando hidrogênio em hélio, a estrela sofre transformações estruturais que terminam no adensamento da região central e a ignição do chamado *ciclo triplo- $\alpha$* , que utiliza o hélio como combustível e produz carbono



que é, na verdade, uma espécie de taquigrafia para algo muito mais complicado [5–7]: se calculada a probabilidade de três hélios se encontrarem simultaneamente na região do poço atrativo, esta seria essencialmente zero. O triplo- $\alpha$  procede primeiro pela fusão de dois hélios dando origem a um estado de instável, mas de longa vida. Uma fração pequena destes consegue encontrar um terceiro hélio e formar carbono, que também não é aquele que conhecemos, mas um estado excitado que decai finalmente em  $C^{12}$ . Este caminho dista muito de um desenho onde os 3 hélios estão no mesmo ponto e o carbono emerge, daí que afirma-



**Figura 2:** Uma das inúmeras nebulosas planetárias (Nebulosa da Borboleta) produzidas pelos pulsos térmicos das estrelas do tipo solar. Imagem do Hubble Space Telescope. O caroço remanescente (composto de  $C - O$ ) deve se converter em uma anã branca com o tempo. Para estrelas mais massivas na Sequência Principal, as anãs brancas resultantes são mais progressivamente compostas de elementos mais pesados ( $O, Mg, \dots$ ) e têm massas maiores. O recorde atual é de  $1,37M_{\odot}$ .

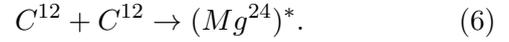
mos que pode-se interpretar a equação (5) como uma taquigrafia simbólica.

Quando feito adequadamente, a energia liberada pelo processo triplo- $\alpha$ , escrita segundo uma expressão paramétrica do tipo  $\epsilon(\rho, T) = cte\rho^{\alpha}T^{\beta}$ , tem  $\alpha = 2$  e  $\beta = 41$  (!!!). A dependência com a temperatura do ciclo triplo- $\alpha$  é assim extrema, de tal forma que a exaustão do hélio existente acontece muito mais rapidamente que no caso do hidrogênio do ciclo próton-próton anterior. Um caroço inerte rico em carbono cresce com o tempo, e como consequência das mudanças internas a posição da estrela no diagrama  $HR$  muda rapidamente. Existe para a maior parte das estrelas um estágio final de pulsação térmica que expulsa o envelope e resulta nessas imagens belíssimas que vemos nas nebulosas planetárias (por exemplo, na Fig. 2), e deixando para trás o caroço enriquecido em carbono e também algo de oxigênio (a captura  $\alpha$  pelo carbono é inevitável, e será tão mais importante quanto maior for a massa do caroço da estrela).

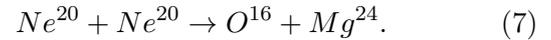
É esse caroço, inicialmente muito quente, que esfriará ao longo de vários *Giga* anos para se tornar finalmente uma anã branca.

Por outro lado, as estrelas de alta massa (aquelas que superam as  $8M_{\odot}$ ), têm condições mais extremas no centro, e atingem o valor da ignição do carbono em  $T \sim 8 \times 10^8$  K para continuar sua evolução. As temperaturas são tão elevadas que a emissão de *neutrinos* pelo caroço, partículas

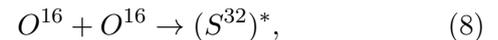
que escoam a energia muito eficientemente mas que não aparecem nas estrelas de massas menores, é agora fundamental para regular a evolução no sentido de se tornar o principal mecanismo de resfriamento. Se a massa for de cerca de  $10M_{\odot}$ , o carbono funde segundo



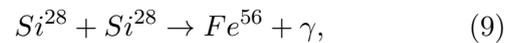
onde o magnésio em estado excitado  $(Mg^{24})^*$  decai por muitos canais diferentes, que somados resultam em uma taxa de reações  $\propto T^{29}$ . Por causa desta dependência extrema, o ciclo de fusão do carbono dura substancialmente *menos* que o triplo- $\alpha$  anterior. Esgotada a fusão do carbono, segue uma geração de energia que não é exatamente uma fusão, mas um rearranjo de “cacos” que é denominado *fotodesintegração do Ne*, onde os núcleos do neônio são quebrados por fótons segundo  $Ne^{20} + \gamma \rightleftharpoons C^{16} + \alpha$  e as partículas  $\alpha$  capturadas logo em reações do tipo  $Ne^{20} + \alpha \rightarrow Mg^{24} + \gamma$ . Entre o estado inicial e final, escreve-se de forma efetiva



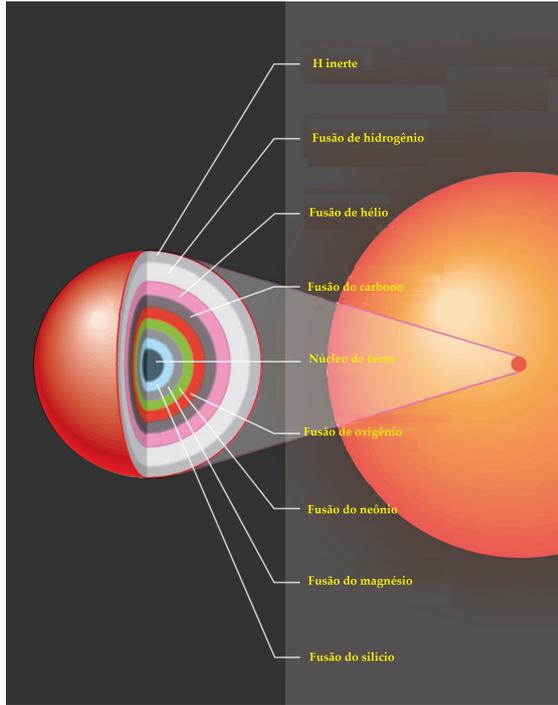
lembrando que não se trata realmente da fusão de dois neônios (daí as aspas), mas de fragmentos que compõem algo como um neônio “quebrado”. Ainda para  $T \sim 2 \times 10^9$ , o oxigênio pode fundir, com uma reação inicial



onde também o núcleo de fósforo excitado  $(S^{32})^*$  decai logo segundo uma grande quantidade de estados finais, cuja taxa de reações integrada é  $\propto T^{35}$ . E finalmente, a fusão do oxigênio é seguida por outra reação de fotodesintegração do  $Si^{28}$  escrita como



onde os  $Si^{28}$  são também um conjunto de fragmentos ou “cacos” com esse número de massa, não um verdadeiro núcleo de silício. Da mesma forma escrevemos que o representa, na verdade, uma série de elementos desse número de massa, que quando produzidos capturam e decaem em partículas rapidamente para formar uma distribuição que se conhece como elementos do “*pico do ferro*”. O que acontece depois no estágio de colapso e explosão é complicado, mas o que aqui importa é que os elementos produzidos em cada



**Figura 3:** Estrutura de cebola de uma estrela de grande massa. As reações de cada ciclo nuclear continuam nas camadas concêntricas até que o ciclo do silício gera o chamado caroço de ferro, o qual não tem como manter a estrutura assim que chega a seu limite de instabilidade em tempos da ordem de  $\sim 1$  semana (Tabela 1).

ciclo que estão nas camadas sucessivas do envelope (a chamada *estrutura de cebola*, Fig. 3) serão ejetados ao meio interestelar com a explosão da estrela.

A Tabela 1 mostra para uma estrela de  $20M_{\odot}$  os tempos nos quais a estrela é sustentada por cada um dos ciclos. Estes ficam progressivamente mais curtos devido ao vigoroso dispêndio da energia. Para cada estágio de sobrevida da estrela que lança mão do reservatório que ainda possui, com vida cada vez mais curta, e que culmina com eventos de supernova.

Embora nos referimos habitualmente aos produtos principais (por exemplo, o “triplo- $\alpha$ ” produz carbono) existem em cada ciclo processos menos importantes que levam ao aparecimento de elementos importantes, até para a vida (por exemplo, o nitrogênio). Esta contagem está na Tabela 1 na coluna “produtos secundários”, os quais explicam basicamente as abundâncias para  $A < 56$  se somarmos as quantidades para cada massa estelar e levarmos em conta a função de massas (em inglês, *Initial Mass Function* ou *IMF*), além do fim das estrelas que ejeta os envelopes e permite que os elementos voltem ao

meio interestelar. Em resumo, a Evolução Estelar permite explicar os elementos mais leves que o “ferro”: eles são formados no interior estelar e expulsos quando as estrelas morrem, nas fases de chamadas de *Asymptotic Giant Branch*, ou *AGB* ou pelas explosões de supernovas tipo Ib, Ic e II. Não podemos perder de vista que as explosões termonucleares (supernovas Tipo Ia) produzem uma nucleossíntese explosiva de importância, por exemplo, a maior parte do ferro na galáxia se deve a estes eventos, bastante frequentes e posteriores à evolução estelar individual.

#### 4 Processos *s* e processos *r*

A partir desses elementos gerados pelos ciclos nucleares, o avanço para  $A > 56$  é possível pela captura de nêutrons livres no interior das estrelas. Se fosse pela fusão ordinária, não haveria como ir além deste número de massa, já que a energia de ligação aumenta com  $A$  a partir desse ponto. Porém, a “construção” de núcleos pesados pela captura de nêutrons é relativamente fácil porque os nêutrons não sentem a grande barreira Coulombiana devida à carga do “ferro”. Estas capturas de nêutrons podem ainda acontecer de duas formas diferentes: lentamente, com tempo de captura típico de  $\tau_n \approx 10^4$  anos correspondente às densidades baixas e temperaturas do interior estelar evoluído. A reação de captura de um nêutron pode ser escrita como



se o núcleo “filho”  $(Z, A+1)$  é instável, decairá antes de capturar um segundo próton, produzindo  $(Z + 1, A + 1)$ . E se resulta estável, servirá como base para capturar um outro nêutron, chegando a  $(Z, A + 2)$ . O mais importante é que o decaimento é muito mais rápido que o tempo entre as capturas  $\tau_n$  se a densidade for baixa. Os núcleos “filhos” vão ficando cada vez mais pesados, e pela lentidão este processo leva o nome de *s* (de *slow*, lento). Com o processo *s*, o caminho dos núcleos se detém nos pontos de camada fechada em nêutrons. O processo *s* opera por tempos muito longos nos interiores estelares, e um dos sítios onde é muito favorável processar núcleos desta forma é o envelope de estrelas no AGB, onde os chamados *flashes* (expansões súbitas) sucessivos da concha de hélio processam e reprocessam os núcleos, dando origem a uma distribuição de tem-

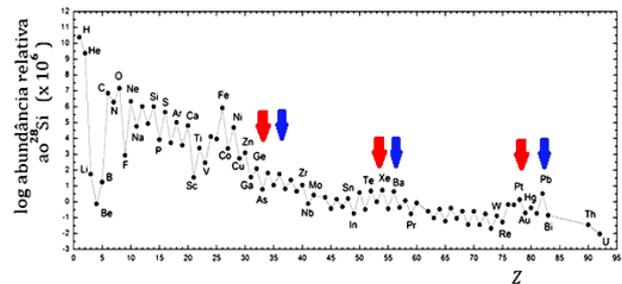
**Tabela 1:** Os diferentes ciclos de fusão termonuclear, junto com os principais produtos, temperaturas de ignição e tempos de vida para uma estrela de  $20M_{\odot}$ . Note-se a aceleração em cada estágio (última coluna).

Combustível	Produto principal	Produtos secundários	Temperatura ( $10^9$ K)	Duração do ciclo (anos)
<i>H</i>	<i>He</i>	$^{14}\text{N}$	0,02	$2 \times 10^7$
<i>He</i>	<i>C, O</i>	$^{18}\text{O}, ^{22}\text{Ne}$	0,2	$10^6$
<i>C</i>	<i>Ne, Mg</i>	<i>Na</i>	0,8	$10^3$
<i>Ne</i>	<i>O, Mg</i>	<i>Al, P</i>	1,5	3
<i>Si</i>	<i>F</i>	<i>Ti, V, Cr, Ni, Mn, Co</i>	3,5	< Semana

pos de exposição que melhora o acordo com as observações. O processo *s* produz alguns núclídeos com exclusividade (por exemplo,  $\text{Sn}^{116}$ ) que se pensam ser somente produzidos pelo processo *s*. Muitos outros núclídeos podem ser produzidos tanto pelo processo *s* ou, como veremos a seguir, pelo processo *r*. Assim, as medidas de abundâncias estelares costumam focar uns e outros para separar a importância relativa de cada contribuição. Isto é particularmente verdadeiro nos “picos” de abundâncias de nêutrons observados em  $N = 50$ ,  $N = 82$  e  $N = 126$  da Fig. 4, este último chamado de “terceiro pico” e que apresenta dificuldades para sua geração e para explicar o urânio, e os transurânicos. Existe, porém, um modo rápido de captura, mas que só pode acontecer nas condições mais extremas. Quando a abundância de nêutrons é muito grande, uns  $n_n \approx 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ , tal como acontece durante as explosões de SN, a captura de nêutrons demora  $\sim 1$  ms, e um isótopo recém-formado ( $Z, A+1$ ) está em condições de capturar outro nêutron para chegar a ( $Z, A+2$ ) antes de conseguir decair. Podemos dizer que os núcleos se “engasgam” de nêutrons porque as capturas sucessivas são muito rápidas, daí o nome de processo *r* (rápido). Tanto o processo *s* quanto o processo *r* podem produzir núcleos muito pesados, mas não necessariamente os mesmos. Os máximos calculados para cada um dos processos, correspondentes às camadas fechadas mencionadas (análogas às camadas fechadas dos elétrons na química, mas referidas aos núcleons dentro dos núcleos) estão na Fig. 4.

Para esclarecer um pouco mais como acontecem o processo *s* e o processo *r*. Mostramos na Fig. 5 um detalhe dos caminhos na Tabela de isótopos para os dois casos, e os caminhos seguidos pelos processos nela.

Restam agora duas questões de importância: a primeira é onde existem as condições para for-

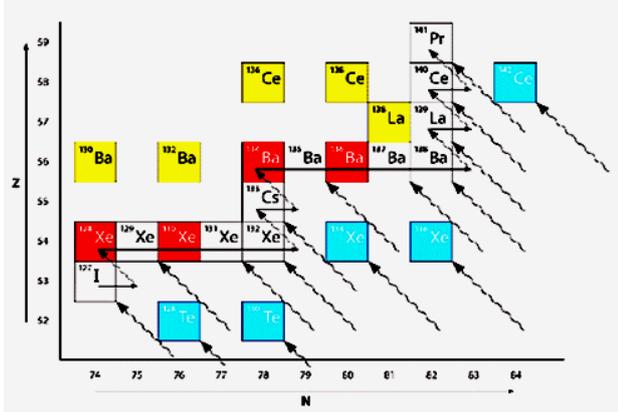
**Figura 4:** Máximos das abundâncias produzidas pelo processo *s* (vermelho) e *r* (azul). Como apontamos, estes máximos não coincidem. Elementos próximos devem sua existência a processos diferentes, que acontecem em locais diferentes. Por exemplo, o  $\text{Sn}_{50}^{116}$ , é de produção exclusiva do processo *s*, mas o irídio 77 têm isótopos somente produzidos pelo processo *r*. Outros elementos podem ser produzidos pelos dois processos.

mar núcleos pelo processo *s* e pelo processo *r*. A segunda é, até que ponto (se produzidos) esses núcleos voltam ao meio interestelar. O trabalho monumental que iniciou todas estas pesquisas é o de Burbidge e colaboradores [6], ainda muito atual e pioneiro em toda a nucleossíntese estelar.

## 5 Nucleossíntese explosiva/catastrófica

Finalmente, consideraremos a nucleossíntese na sua forma mais extrema e violenta, isto é, durante eventos explosivos/eruptivos ao final da evolução das estrelas, e até muito depois, como no caso da “ressurreição” da matéria de nêutrons que estava soterrada nas estrelas de nêutrons quando acontece uma fusão e matéria é ejetada em alta velocidade e forma núclídeos importantes (vide a seguir) .

O primeiro tipo de evento é encarnado pelas explosões de supernova, mais precisamente, pelos eventos denominados Tipo II, Tipo Ib e Tipo Ic. Apesar da denominação, todos eles são considerados eventos nos quais uma estrela de grande

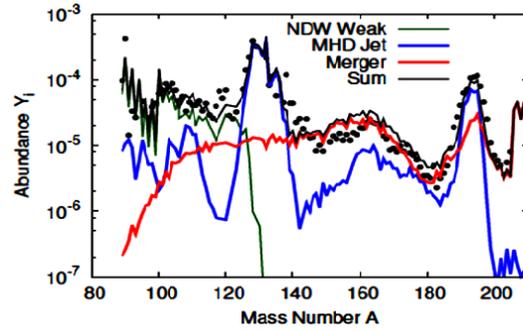


**Figura 5:** As capturas de nêutrons em ambientes de baixa densidade  $n_n$  (linhas horizontais cheias de esquerda a direita) são seguidas de decaimentos (linhas diagonais ascendentes) e fazem crescer o  $A$  em escalas de tempo muito longas (processo  $s$ , caminho tipo zig-zag). As capturas sucessivas sem decaimentos aumentam o  $N$  levando os núcleos bem para a direita no processo  $r$ , fora do vale de estabilidade até lugares como os indicados para os núcleos de  $Ce$ ,  $Xe$  e  $Te$  deste exemplo, enquanto alguns decaem depois (flechas ascendentes da direita para a esquerda).

massa ( $M \geq 10M_\odot$ ) implode para depois explodir, deixando em geral uma estrela de nêutrons que sucede ao núcleo estelar colapsado. Mas a passagem de um choque (que energiza a explosão) desde as regiões mais internas, o qual carrega uma enorme densidade de nêutrons livres, cria condições para o já mencionado processo  $r$  (rápido). Em poucas palavras, as capturas sucessivas de nêutrons aumentam o número de massa  $A$  sem que estes núcleos-alvo consigam decair (eles “engasgam” de nêutrons, capturados a cada  $< 10^{-3}$  s). O caminho desta nucleossíntese é o mostrado na Fig. 5 com flechas horizontais longas da esquerda para a direita [7].

Há algumas décadas esperava-se que o processo  $r$  nas explosões de supernovas fosse o único responsável pela montagem de núcleos muito pesados a partir de outros mais leves e abundantes. Povoar o chamado “terceiro pico”, da Tabela Periódica (actinídeos), porém, mostrou-se bastante difícil quando o processo inteiro foi considerado em detalhe. Um dos cálculos recentes, que leva em conta as incertezas decorrentes das taxas de captura, massas nucleares e uma série de outras quantidades não muito bem conhecidas, é mostrado na Fig. 6.

Em suma, a explosão de uma supernova não só ejeta camadas inteiras de matéria já processada pela nucleossíntese que manteve a estrela em equilíbrio por muitos milhões de anos (incluída a



**Figura 6:** As contribuições relativas para os picos de abundâncias segundo Kajino et al. [8]. Note-se que estes autores obtêm que os jatos magneto-hidrodinâmicos (curva azul) de algumas supernovas são os dominantes no terceiro pico, mas que as fusões de estrelas de nêutrons dominam para  $A > 200$ .

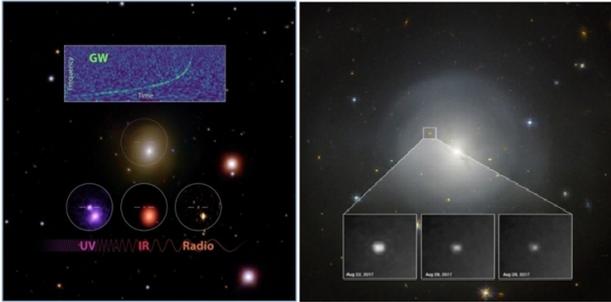
que sofreu processo  $s$ ), mas também produz de forma “instantânea” núcleos que também contribuem para as abundâncias no meio interestelar. Em alguns casos esta última é significativa, já que alguns núcleos somente são produzidos pelo processo  $r$ , mas as dificuldades para obter, por exemplo, as abundâncias observadas dos actinídeos (chumbo, ouro e platino entre outros) fez com que a comunidade ficasse testando outros sítios astrofísicos. Veremos a seguir a inesperada contribuição que foi confirmada na primeira detecção de uma fusão de duas estrelas de nêutrons “mortas”.

### 6 A fusão de duas estrelas de nêutrons e a Tabela Periódica

A sugestão de que haveria um caminho alternativo para produzir elementos pesados aparece pela primeira vez num trabalho de Eichler, Livio, Piran e Schramm em 1989 [9]. Estes autores observam que, se descomprimida a matéria de nêutrons, as “gotinhas” resultantes da fragmentação (núcleos) poderiam preencher a região de alto  $A$  da Tabela Periódica. O evento onde isto pode acontecer é na fusão de duas estrelas de nêutrons.

Quarenta anos depois deste trabalho, a disponibilidade de detectores de ondas gravitacionais (LIGO e Virgo) permitiu pela primeira vez observar um evento cosmológico, transmitir rapidamente uma localização aproximada e coletar assim umas 70 detecções de vários instrumentos, desde raios gama ao infravermelho (Fig. 7).

A identificação do evento GW170817 como



**Figura 7:** Esquerda: o sinal detectado do evento GW170817 (acima) e a localização do mesmo em raios gama (centro), acompanhada de detecções em UV, infravermelho e rádio (abaixo) em mais de 60 instrumentos. Direita: imagens ópticas do Telescópio Espacial Hubble em 22, 26 e 28 de Agosto de 2017, mostrando o declínio da magnitude óptica do transitório associado ao evento.

duas estrelas de nêutrons que se fusionaram foi possível pela comparação da forma da onda gravitacional registrada com simulações de arquivo detalhadas. Embora não foi possível saber com certeza as massas individuais das estrelas que participaram, a soma das massas das duas foi bem determinada,  $M_1 + M_2 = 2.74 \pm_{0.01}^{0.04} M_\odot$ . É provável que tenha sido produto de duas massas idênticas, embora a faixa aceitável determinada admite assimetria:  $M_1 = [1.36M_\odot, 1.6M_\odot]$  e  $M_2 = [1.17M_\odot, 1.36M_\odot]$ . Utilizando uma combinação de dados observados e simulações numéricas, foi possível abordar a questão da contribuição deste tipo de eventos para a Tabela Periódica.

Um fato importante neste sentido foi a observação da existência de um brilho adicional depois de  $\sim$  dias do evento, denominado *kilonova* [10]. A kilonova é interpretada como o produto da presença de elementos de massa  $A \approx 140$  (lantanídeos) na matéria ejetada, que provocam a retenção da energia pela sua alta opacidade aos fótons. De fato, nos espectros do evento foram observadas linhas claramente associadas aos lantanídeos. Assim, direta e indiretamente (através da presença da kilonova), a fusão estelar mostra a produção de elementos do “segundo pico” da Tabela Periódica, desta vez pela descompressão da matéria de nêutrons superdensa ejetada e fragmentada, tal como sugerido por Schramm e colaboradores.

Por outro lado, a evolução temporal do brilho (chamada de *curva de luz* na astronomia) foi interpretada como decorrente da produção de actínídeos ( $A \sim 200$ ) que injetam depois energia pelos decaimentos radioativos. Esta energia não sai imediatamente da região precisamente pela

retenção dos lantanídeos também produzidos no evento.

É possível calcular quanta matéria, por exemplo, em chumbo, ouro, platino etc. foi formada pela fusão estelar para explicar a curva de luz. O resultado indica que é possível que unicamente estes eventos sejam o lugar do Universo onde os actínídeos mais importantes são produzidos. Esta é uma hipótese radical, mas não descabida, e está ancorada diretamente nas observações.

Os esforços teóricos, enquanto novos eventos são procurados, se dirigem a calcular o desfecho da matéria ejetada, sua fragmentação e reprocessamento para estabelecer a nucleossíntese final. Existem muitas perguntas pendentes, entre as quais se conta a importância relativa das fusões e nucleossíntese das supernovas Tipo II, Ib e Ic (Fig. 6). Mas hoje poderíamos dizer para o próprio Mendeleev que estamos a caminho de uma compreensão abrangente da Tabela que ele criou e que norteia os cientistas há mais de um século.

### Sobre o autor

Jorge Ernesto Horvath ([foton@iag.usp.br](mailto:foton@iag.usp.br)), Professor Titular no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Espaciais (IAG), da Universidade de São Paulo (USP), é Graduado em Física e Doutor em Ciências Exatas pela Universidad Nacional de La Plata (Argentina), e possui Livre Docência pela USP. Autor de pesquisas em Astrofísica Relativística, Altas Energias e Cosmologia, além de vários livros no Brasil e no exterior para os diferentes níveis de educação. Pesquisador Nível I do CNPq e visitante na University of Arizona (1998-1999). Fundador e Coeditor da Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA) desde 2003. Coordenou de 2011 até 2021 o Núcleo de Pesquisas em Astrobiologia da USP.

### Referências

- [1] K. Horvath, P. Bretones e J. Horvath, *Interdisciplinary study of the synthesis of the origin of the chemical elements and their role in the formation and structure of the Earth*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200160 (2020).

- [2] G. Lemaître, *The Primeval Atom: An Essay on Cosmogony* (Van Nostrand, Nova York, 1950).
- [3] R. A. Alpher, H. Bethe e G. Gamow, *The origin of chemical elements*, [Phys. Rev. \*\*73\*\*, 803 \(1948\)](#).
- [4] J. E. Horvath et al., *Cosmologia Física* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).
- [5] J. E. Horvath, *As estrelas na sala de aula* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2019).
- [6] E. M. Burbidge et al., *Synthesis of the elements in stars*, [Rev. Mod. Phys. \*\*29\*\*, 547 \(1957\)](#).
- [7] J. E. Horvath, *Fundamentos da Evolução Estelar, supernovas e objetos compactos* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011).
- [8] T. Kajino e G. J. Mathews, *Impact of new data for neutron-rich heavy nuclei on theoretical models for r-process nucleosynthesis*, [Reports on Progress in Physics \*\*80\*\*\(8\), 084901 \(2017\)](#).
- [9] D. Eichler et al., *Nucleosynthesis, neutrino bursts and  $\gamma$ -rays from coalescing neutron stars*, [Nature \*\*340\*\*\(6229\), 126 \(1989\)](#).
- [10] B. D. Metzger, *Kilonovae*, [Living Reviews in Relativity \*\*23\*\*\(1\), 1 \(2019\)](#).