

ESCOLA POLITÉCNICA DE SAÚDE JOAQUIM VENÂNCIO
FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ
LABORATÓRIO DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL EM TÉCNICAS LABORATORIAIS EM
SAÚDE

Rayane Vitória da Silva Vinhaes

UMA BREVE NARRATIVA DO CONHECIMENTO SOBRE A EXTRAORDINÁRIA
ENERGIA DAS ESTRELAS.

Rio de Janeiro

2016

Rayane Vitória da Silva Vinhaes

UMA BREVE NARRATIVA DO CONHECIMENTO SOBRE A EXTRAORDINÁRIA
ENERGIA DAS ESTRELAS.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio
como requisito parcial para aprovação no curso
técnico de nível médio em saúde com habilitação em
Análises Clínicas.

Orientador (a): Tânia Camel.

Rio de Janeiro

2016

Rayane Vitória da Silva Vinhaes

UMA BREVE NARRATIVA DO CONHECIMENTO SOBRE A EXTRAORDINÁRIA
ENERGIA DAS ESTRELAS.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio
como requisito parcial para aprovação no curso
técnico de nível médio em saúde com habilitação em
Análises Clínicas.

Aprovado em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

(Doutora Tânia de Oliveira Camel - Fiocruz)

(Doutor Sergio Ricardo de Oliveira - Fiocruz)

(Doutora Virgínia de Lourdes Mendes Finete - Fiocruz)

*Dedico este trabalho as minhas
amadas Esmeria Pereira (avó) e
Janete Pereira (mãe);*

AGRADECIMENTOS

Confesso que há muito que agradecer. Primeiramente, agradeço este Deus tão zeloso que vem cuidando de mim há muito tempo, desde que ainda estava no ventre de minha mãe. Se não fosse por um milagre deste Deus, não viria a este mundo: uma rubéola que atingiu a minha mãe logo nos primeiros meses de gravidez, contagiou o líquido amniótico no qual me encontrava. Não havia mais saída. O aborto foi a sugestão que os médicos da época forneceram a minha mãe. A continuação da gravidez era uma incógnita. Havia apenas uma certeza: Se prosseguisse com a gravidez, eu poderia nascer surda, muda, sem cérebro... O vírus da rubéola me deformaria. Entretanto, minha doce avó, Esmeria Pereira apoiou a minha mãe durante todo o processo, aconselhando a filha, Janete Pereira, a não desistir da gravidez. E ela não desistiu. A decisão final foi prosseguir com a gravidez. Contando-me esta história, a minha avó sempre relata uma de suas falas neste momento tão difícil entre optar ou não optar pelo aborto: “Janete, não importa o jeito como ela vier a este mundo. Eu cuidarei deste bebê do modo que Deus me enviar. Eu cuidarei da minha neta”. No IFF (Instituto Fernandes Figueira) minha mãe passou todo o período de gestação, acompanhando o desenvolvimento da gravidez, fazendo diversos exames. Ao final de tudo, contrariando a lógica da medicina, nasci perfeita. Obrigado, meu Deus. Agradeço também as minhas amadas Esmeria Pereira da Silva e Janete Pereira da Silva, pois são um exemplo de garra, força e enorme resiliência. Mãe, avó: Amo vocês! Obrigado por tudo! Quero agradecer também o carinho, amor e paciência de todo o corpo docente de professores da EPSJV-FIOCRUZ, que são muito especiais para mim, e foram importantes em toda a minha trajetória do ensino médio. Obrigado, queridos professores! Vocês são incríveis! Especialmente, gostaria de agradecer os ensinamentos, dedicação e trabalho da minha querida professora de química e orientadora Tânia Camel. Gostaria de mencionar também todo o corpo da EPSJV-FIOCRUZ, desde as moças que deixam o banheiro da escola limpo, até os diretores. Todos, em integração, fazem desta escola um lugar incrível. Por fim, gostaria de agradecer aos meus parceiros de turma, família análises 2012, com os quais convivi durante quatro anos e com os quais vivenciei muitos momentos importantes da minha vida.

“Há um tempo certo para cada coisa; há um tempo certo para cada propósito debaixo do céu.”

Eclesiastes 3:1

RESUMO

Esse trabalho apresenta uma narrativa histórica da construção dos conhecimentos a respeito da seguinte questão: “Qual a fonte de energia das estrelas?”. Sabe-se que as bases teóricas, em qualquer área da ciência, são formadas não por respostas, mas sim por perguntas e questionamentos, que culminam em tais respostas. Este trabalho descreve de forma abreviada alguns questionamentos desenvolvidos no percorrer dos séculos até, especificamente, o século passado sobre a fonte de energia das estrelas. Estes questionamentos foram fundamentais para o estabelecimento teórico do que se conhece a respeito da energia que move as estrelas e para construir um campo novo de conhecimentos que é a astrofísica. Neste percurso, em prol do nascimento de ideias que satisfizessem o questionamento sobre a energia estelar, veremos o diálogo e a união entre diferentes formas do saber. Química, Óptica, Matemática, Física, entre outros, tiveram seus conhecimentos reunidos na busca de uma resposta. Mais especificamente, a espectroscopia, a fotografia e a radioatividade foram três campos decisivos. O trabalho descreve as ideias iniciais sobre a fonte de energia das estrelas e os seus desdobramentos, além de descrever também a articulação da espectroscopia e da radioatividade e as suas relações com a formulação da teoria que se mostrou suficiente à explicação da energia das estrelas. Cumpre observar, que um ramo científico não é suficiente a si mesmo, nem à produção de seus conhecimentos e que a ciência é movida por questionamentos que constroem e desconstroem conhecimentos. Nesse sentido, o trabalho também contempla aspectos do conhecimento sobre a natureza da ciência.

Palavras Chave: energia, estrelas, fusão nuclear, reações termonucleares.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espectro solar obtido por Fraunhofer.....	19
Figura 2: Espectroscópio de Bunsen e Kirchhoff.....	21
Figura 3: Espectros: Contínuo, de emissão e de absorção, semelhantes aos obtidos por Kirchhoff.....	21
Figura 4: Corrente de reações Próton-Próton.....	45
Figura 5: Reação envolvendo carbono, nitrogênio e oxigênio como catalisadores.....	46
Figura 6: Esquematização do Ciclo do Carbono elucidado por Bethe.....	47
Figura 7: Exemplo do Be^9 sendo consumido na reação.....	47
Figura 8: A abundância dos elementos químicos no Sol e nas estrelas.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descoberta de elementos químicos por espectroscopia.....	25
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVO.....	15
1.2.1 Objetivo Geral.....	15
1.2.2 Objetivos Específicos.....	15
1.3 METODOLOGIA.....	15
2 ANTECEDENTES: A ESPECTROSCOPIA E A RADIOATIVIDADE	16
2.1 A ESPECTROSCOPIA.....	17
2.1.1 Os primórdios da espectroscopia.....	17
2.1.2 Joseph von Fraunhofer e as linhas escuras no espectro do Sol.....	19
2.1.3 Bunsen e Kirchhoff: as revelações do espectro.....	20
2.1.4 A descoberta do Hidrogênio e do Hélio no interior solar.....	24
2.1.5 Os demais elementos químicos descobertos.....	25
2.2 A RADIOATIVIDADE.....	26
2.2.1 A identificação dos raios X e seus desdobramentos.....	26
2.2.2 Marie Curie e a identificação da radioatividade.....	28
2.2.3 Ernest Rutherford: o átomo e a fissão nuclear.....	32
3 A ENERGIA QUE MOVE AS ESTRELAS	36
3.1 PENSAMENTOS INICIAIS.....	36
3.2 UMA SÍNTESE SOBRE O DEBATE DA IDADE DA TERRA E DO SOL.....	38
3.3 ARTHUR STANLEY EDDINGTON E A HIPÓTESE DO SUBATÔMICO.....	40
3.4 FRITZ HOUTERMANS E ROBERT ATKINSON COM A REAFIRMAÇÃO DO SUBATÔMICO.....	42
3.5 HANS BETHE E A FUSÃO NUCLEAR NO INTERIOR DAS ESTRELAS.....	44
4 CONCLUSÕES	50
5 REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Há ser que olhe para o céu a noite e, se deparando com pequenos pontinhos em sua grandeza luminosa, não admire tal beleza? Estrelas são astros impressionantes, que emanam de si extraordinária energia e luminosidade, cativando a atenção de quem as observam. Através dos olhares de encanto, no interior da mente de seus observadores, muitos pensamentos começam a surgir. Questionamentos e instigação começam a vir à tona, trazendo a curiosidade de conhecer o que existe por detrás destes pontinhos a cintilar no céu. Neste exato ponto, os observadores não podem mais resistir à pergunta: Afinal, o que são estrelas?

Para início de conversa, em linhas gerais, podemos dizer que estrela é um astro que possui forma praticamente esférica, sendo constituída por elementos químicos variados, com predominância de hidrogênio e hélio, submetidos a condições de altíssimas temperaturas. Em seu interior ocorrem as reações termonucleares, que produzem uma grande quantidade de energia, e são como "fôlego de vida" de uma estrela (FARIA, 2007). Este fenômeno pode ser descrito como a transmutação de elementos, onde ocorre a fusão nuclear de hidrogênio em hélio e, posteriormente, em elementos mais pesados (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). O "fôlego de vida" estelar depende das reações termonucleares que, além de acarretarem a produção de uma gama de elementos químicos, também liberam energia geradora de uma força de pressão que se equilibra com a força da gravidade. É nesta batalha constante entre "comprimir" (gravidade) e "expandir" (pressão) que este astro consegue manter-se brilhando. As estrelas, assim como nascem e vivem, também morrem. Toda a sua trajetória de vida e até a sua forma de morte estão relacionadas com a massa total do material de que a mesma é feita (MORAIS, 2009).

É importante relatar que o foco do trabalho desenvolvido, contudo, não é contemplar os conhecimentos do tempo presente. O passado que construiu os saberes sobre a energia que move as estrelas será o tema desenvolvido. Afinal, todo o conhecimento sobre as estrelas que está estabelecido atualmente foi fruto de muitos séculos de questionamentos, pesquisas, tentativas, dúvidas e erros. É claro que acertos também. Enfim, fato é que há muito tempo o homem contempla o céu noturno com espanto e desafio, instigado a desvendar os mistérios destes pontinhos luminosos: "Há algo por trás deste cintilar tão intenso e duradouro". Qual é a origem deste brilhar? O que acontece no interior das estrelas? Qual a sua extraordinária fonte de energia?

Viajando no tempo, há a identificação de três campos do conhecimento na história que contribuíram para a construção do conhecimento sobre a energia estelar: A espectroscopia, a radioatividade, e a fotografia. Com raízes em tempos bem remotos, a espectroscopia teve o seu início a partir das experiências de Newton, entre os anos de 1665-66, das quais desde então veio revelando importantes propriedades da luz, dos átomos e também dos astros. A espectroscopia foi uma técnica desenvolvida que permitiu ao homem não só conhecer o seu planeta Terra como também conhecer e chegar ao interior do Sol. A partir de sua luz irradiada, decomposição e análise dessa luz, foram apresentadas à humanidade as propriedades e composição do Sol. Não apenas isto, mas com a espectroscopia, o mundo científico deparou-se com o nascimento de uma nova ciência: A astrofísica, oriunda da astronomia, estuda o desenvolvimento dos corpos celestes e sua composição química. Disciplina científica que teve data de nascimento em meados do século XIX como fruto da reunião de conhecimentos das áreas da química e da óptica. (LOPES, 2007; HISTORY, 2010).

A radioatividade abriu novos caminhos para a descoberta da energia que move as estrelas, e teve um início posterior à espectroscopia. O físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen em 1895 conseguiu realizar a descoberta dos raios X, um fenômeno que despertou interesse mundial. E através desta descoberta, houve uma explosão de pesquisas sobre o assunto. Diversos cientistas procuraram desvendar as propriedades dos raios X e também tentar descobrir novas radiações misteriosas. Foi em meio a toda esta efervescência de pesquisas, que a radioatividade revelou-se ao mundo – como um desdobramento de pesquisas sobre os raios X. O casal Pierre e Marie Curie foram os responsáveis por tal descoberta, que inovou o mundo científico, e abalou alguns de seus alicerces. Através da descoberta da radioatividade, concepções já consolidadas foram derrubadas; novas ideias foram nascendo e inovando o conhecimento: a forma como se concebia o átomo na época foi modificada, e uma nova concepção atômica começou a surgir. Não só a ideia de átomo fora modificada, mas também as hipóteses que se tinha sobre a energia das estrelas também: Um novo caminho para explicar essa energia surgiu.

Uma vez conhecidos os fenômenos radioativos da fissão e da fusão nuclear, a fusão revelou-se capaz de explicar a fonte de energia das estrelas, sendo descoberta como a responsável por manter as estrelas brilhando. O astrofísico Arthur Stanley Eddington foi um dos pioneiros a mencionar o termo “sub-atômico” e relacioná-lo às estrelas. Contudo, foi Hans Bethe o

personagem que completou a história, apresentando ao mundo científico com detalhes as reações de fusão que aconteciam no interior das estrelas.

A fotografia foi uma técnica que teve o seu início anterior à radioatividade, na França, em plena década de 1820, e que tornou possível preservar as imagens obtidas dos espectros das estrelas. É importante justificar que há o reconhecimento da importância da fotografia na história da energia que move as estrelas. Entretanto, este assunto não será desenvolvido em razão dos critérios adotados na construção desta monografia. A fotografia está relacionada ao campo do registro, da conservação e da documentação de imagens; enquanto a importância da espectroscopia e da radioatividade reside no fato de serem dois campos do conhecimento que forneceram bases teóricas para a fundamentação do que compreendemos atualmente sobre a energia que move as estrelas. Através do desenvolvimento dos conhecimentos nas áreas da espectroscopia e da radioatividade, os conhecimentos sobre a energia que move as estrelas foram construídos. Portanto, estes dois últimos campos citados serão desenvolvidos e classificados como os antecedentes que auxiliaram a firmar as bases do que se conhece sobre a energia das estrelas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Desde o primeiro contato que tive com a disciplina de química, senti-me cativada pela mesma. Átomos, ligações químicas e tabela periódica sempre foram minhas paixões; mas também é um fascínio sem par quando me deparo com um céu à noite estrelado. Quando tive a oportunidade de saber que as estrelas eram grandes reatores, que fundiam e criavam novos elementos, não pude resistir à tentação. Além de uma estrela ser encantadora, ainda conseguiria me motivar através de sua extraordinária energia e relação com os elementos químicos? A partir desta questão fiquei cada vez mais curiosa e desejando conhecer mais, podendo então escolher o meu tema de monografia.

É de suma importância ressaltar a amplitude e relevância do assunto abordado neste projeto. Uma estrela não é um ser vivo, mas sim uma maquinaria eficiente que nos permite obter as peças fundamentais constituintes de um. O que seria da matéria sem os átomos? E o que seria dos átomos sem a transmutação elementar? Pois bem; a diversidade estelar deve ser explorada e conhecida.

“Peço-vos que olhem em ambas as direções. Pois a via para o conhecimento das estrelas passa pelo átomo; e conhecimentos importantes acerca do átomo têm sido atingidos através das estrelas” (EDDINGTON, 1928 apud BAKER, 2011).

O homem em seu ingênuo fascínio de contemplar o céu estrelado à noite jamais imaginou que através deste ato, inocente e questionador, poderia um dia chegar tão perto de descobrir a origem de tudo. Nós, seres humanos, animais, plantas, rochas, enfim, planeta Terra como um todo, temos uma relação estritamente intrínseca com os cintilantes pontinhos noturnos. Quem diria que ao olhar para uma estrela poderíamos ver o nosso reflexo? Hidrogênio, Carbono, Oxigênio, Cálcio, Ferro, entre outros elementos que constituem um ser animado ou inanimado, sendo abundantemente formados no interior destes corpos estelares. Quem diria que ao olhar para uma estrela poderíamos ver o passado? Através da determinação da idade de algumas estrelas, podemos até descobrir quantos bilhões ou trilhões de anos o nosso universo tem e construir teorias coerentes que podem indicar a origem de tudo.

E por que não pensar que com os estudos das estrelas podemos aprender a construir uma forma de energia limpa e ilimitada? Um problema que preocupa muito a humanidade atualmente

é a produção de energia. Os meios mais utilizados para obtenção de energia prejudicam muito o nosso planeta Terra. Precisamos descobrir outra forma de obter energia suficiente para suprir toda a humanidade, sem desestabilizar tanto o planeta. Futuramente, quem sabe, com o avanço da tecnologia e o aprimoramento do conhecimento, o ser humano consiga alcançar o inatingível no momento - A dominação da energia estelar aqui na Terra, com a fusão termonuclear sendo a grande solução para o problema energético.

Estrelas são astros importantes e por isso devem ser conhecidos. Digo não apenas por pessoas que optam pelo desafio de sondá-las; mas sim, me refiro ao ato de despertar o interesse em indivíduos. Então, a produção de um trabalho a respeito da energia estelar que possua uma linguagem de fácil entendimento e que seja acessível aos alunos do ensino médio é importante; até porque a radioatividade é um conteúdo que faz parte da grade curricular do ensino médio – e a energia estelar é produzida através da fusão nuclear, um fenômeno radioativo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Apresentar a historicidade do conhecimento sobre as estrelas, no que diz respeito a sua energia, bem como, demonstrar a interação entre diferentes campos da ciência e sua relação na construção de novos conhecimentos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os conhecimentos que deram suporte teórico à explicação da fonte de energia que move as estrelas.
- Descrever o desenvolvimento de teorias sobre a causa e natureza de sua energia.

1.3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do trabalho foi realizada uma abrangente revisão bibliográfica de artigos, livros, revistas científicas, e entre outros, recorrendo sempre que possível à fontes primárias.

2 ANTECEDENTES: A ESPECTROSCOPIA E A RADIOATIVIDADE

A espectroscopia e a radioatividade foram aqui reunidas em um único corpo, em prol do desenvolvimento da seguinte questão: De onde surgiu a ideia de uma fonte de energia que alimenta as estrelas? É uma explicação que envolve os tempos remotos de Newton, até o século presente. A espectroscopia foi, literalmente, a luz encontrada para o conhecimento e exploração do interior do Sol e outras estrelas. Com sua energia irradiada em forma de luz, foi possível, a partir da espectroscopia, revelar a humanidade muitos segredos sobre o Sol.

O ser humano conseguiu adentrar no íntimo do astro através de sua luz, que chegava a Terra como um código ou enigma secreto que, pouco a pouco, foi se conhecendo o modo de leitura e interpretação. Neste percurso, nasceu a astrofísica, anteriormente citada. E eis alguns resultados da espectroscopia: Hidrogênio e Hélio (sendo este último encontrado primeiramente no espectro do Sol e 27 anos depois na Terra) são os principais constituintes das estrelas! Nesta parte relacionamos a radioatividade.

Como falar de “FUSÃO” sem as palavras, hidrogênio, hélio e Sol? Sim, o Sol, pois como qualquer estrela é o único local onde a junção de núcleos é algo “natural”. Isto o define como estrela: A produção de sua própria energia! E que energia! A radioatividade foi o campo científico que tornou possível o conhecimento desta forma tão peculiar de energia que move as estrelas, que não ocorre aqui na Terra, e que até hoje o ser humano não encontrou meios para reproduzir, tamanha a sua complexidade na prática. Tudo começou com a quebra de núcleos, o que já foi uma surpresa para a ciência, pois não se conhecia o quão mutável e inconstante um elemento químico poderia ser, revolucionando a ideia de átomo e, sobretudo o conceito de elemento químico. Isto surpreendeu o mundo científico. A fusão veio posteriormente, como uma possível resposta à fonte de energia das estrelas.

Reunindo então a espectroscopia, que nos permitiu entrar no interior do Sol, e a radioatividade, que trouxe a ideia do que acontecia dentro deste, temos um caminho que ajuda a encerrar a questão trazida na introdução do trabalho: “O que há por trás deste cintilar?”; “Qual a energia que move as estrelas?”.

Por fim, relatada a importância destes dois conhecimentos distintos, iniciemos a narrativa dos fatos que alicerçaram a resposta ao questionamento da energia estelar.

2.1 A ESPECTROSCOPIA

E como discorrer sobre a energia e composição das estrelas sem mencionar a espectroscopia? Por definição, a espectroscopia é o estudo da luz através de suas cores componentes, que aparecem quando a luz passa através de um prisma ou de uma rede de difração (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). O sequenciamento de cores formadas após esta passagem é denominada de espectro, que varia do vermelho, numa extremidade, ao violeta, na outra (FILGUEIRAS, 1996). Conhecimentos sobre a composição química das estrelas foram formados a partir do desenvolvimento deste campo científico. Sendo fundamental salientar também que a astrofísica, ramo da astronomia que estuda a natureza e evolução das estrelas e corpos celestes, foi uma disciplina com data de nascimento em meados do século XIX, a partir de descobertas na área da espectroscopia óptica (RODRIGUES, 2014).

2.1.1 Os primórdios da espectroscopia

Desde a antiguidade, o fenômeno do espectro da luz fora observado com curiosidade. Há relatos de que um homem chamado Aristófanes, no ano 423 a.C, foi uma das primeiras pessoas a fazer tal observação, enquanto trabalhava na tentativa de construir lentes (BERGAMINI, 1971 apud LOPES, 2007). No decorrer da história, diversos cientistas realizaram experimentos para a compreensão da luz visível e a interpretação de seu espectro (LOPES, 2007). Contudo, foi no século XVII, entre os anos de 1665-66, que se conheceu uma importante propriedade da luz para a espectroscopia: Isaac Newton (1642-1727) demonstrou que a luz branca, como a luz proveniente do sol, se decompõe em luz de cores diferentes ao passar por um prisma, formando um espectro como o arco-íris (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). Com seus artigos publicados sobre este fato em 1672, houve uma melhor compreensão da decomposição da luz visível, gerando uma nova era na Óptica; Isaac Newton afirmou que a luz branca, assim como a luz do sol, era uma luz policromática. De acordo com Lopes (2007), as experiências de Newton marcaram o início da espectroscopia.

Como citado anteriormente, o espectro é a decomposição da luz branca em suas diversas cores componentes, semelhante às cores do arco-íris. Contudo, além das cores visíveis, o espectro

apresenta radiações invisíveis ao olho humano: a ultravioleta e a infravermelha. Há muitos séculos atrás já se tinha o conhecimento de que os sais de prata, como por exemplo, o cloreto e o brometo de prata, são substâncias que escurecem ao serem atingidos pela luz. Especificamente, a razão do escurecimento se deve a redução dos íons de prata, originando o metal finamente dividido, que é preto. No ano de 1777, o químico sueco Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) experimentou colocar amostras de cloreto de prata em cada uma das regiões coloridas do espectro solar obtido com um prisma. Logo após, pode verificar que a substância se escurecia mais intensamente quanto mais próxima da extremidade violeta. O fato indicava que a luz violeta era a mais energética do espectro, pois era o escurecimento da prata ocorria mais rapidamente (FILGUEIRAS, 1996).

Foi no ano de 1801, entretanto, que se descobriu o invisível: O alemão Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) resolveu colocar uma amostra de sal de prata na região escura além do violeta. Aconteceu que a reação de redução da prata se verificava com maior facilidade ainda, o que Johann Ritter já desconfiava, concluindo então que existe no espectro solar uma radiação de energia ainda mais alta que a luz violeta¹. Esta radiação, invisível aos nossos olhos, ficou conhecida como ultravioleta (FILGUEIRAS, 1996).

A descoberta da radiação infravermelha aconteceu em 1800, pelo astrônomo inglês William Herschel (1738-1822): Ao realizar uma experiência na qual colocou o bulbo de um termômetro em cada uma das extremidades coloridas do espectro solar, verificou que a temperatura do mercúrio aumentava pela incidência da luz². Todavia, este aumento era mais rápido quanto mais próximo à extremidade vermelha do espectro. Colocando o bulbo do termômetro na região não iluminada depois do vermelho, Herschel observou que a temperatura subia ainda mais rapidamente, demonstrando então que existia uma radiação invisível aos nossos olhos. Esta radiação foi denominada de infravermelha (FILGUEIRAS, 1996).

Em 1802, William Hyde Wollaston (1766-1828) notou algumas linhas escuras no espectro da luz solar que passava por uma fenda, e depois por um prisma, interpretando as linhas observadas como sendo o limite das cores (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014).

¹ O químico inglês William Hyde Wollaston (1766-1828) fez nesta época, independentemente, a mesma descoberta.

² O aumento da temperatura relatado se deve à agitação térmica provocada pela luz.

2.1.2 Joseph von Fraunhofer e as linhas escuras no espectro do Sol

No ano de 1814, o fabricante alemão de instrumentos de vidro, Joseph von Fraunhofer (1787-1826), repetiu o experimento de decomposição da luz branca realizado por Newton, entretanto, permitindo maior incidência de luz solar à formação do espectro e submetendo-o a uma grande ampliação, observando assim o espectro com maiores detalhes. Com isto, Fraunhofer notou que o espectro solar não era contínuo, mas apresentava diversas linhas escuras. Observando a luz refratada pelo prisma com um telescópio, Fraunhofer conseguiu identificar 574 riscas escuras no espectro da luz do sol até o ano de 1820, confirmando o fenômeno anteriormente observado por Wollaston (FRIANÇA et.al, 2003 apud LOPES, 2007).

Para oito riscas fortes, Fraunhofer nomeou-as utilizando as letras de A a G, no sentido vermelho-violeta; enquanto que para outras duas linhas, bem mais fortes, denominou de “linhas D” (LOPES, 2007). Todo este conjunto de linhas escuras ficou conhecido como as linhas de Fraunhofer, e seus estudos se estenderam ao espectro da luz de vários corpos celestes como a Lua, Vênus, Marte e as estrelas (CAMEL, 2004). É importante relatar, contudo, que Fraunhofer utilizava as linhas do espectro solar para calibrar seus instrumentos (vidros e prismas) e para determinar as propriedades do vidro, já que mínimas variações na quantidade e na mistura de componentes que constituem o vidro fazem com que os prismas fabricados desloquem o comprimento de onda em diferentes ângulos (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). Na figura 1 observa-se o espectro da luz solar obtido por Fraunhofer.

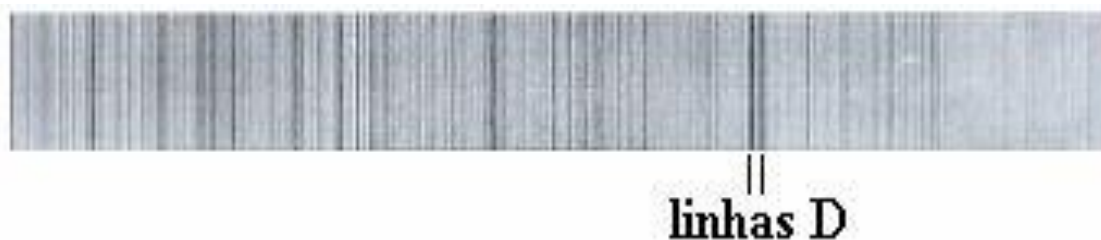


Figura 1: Espectro solar obtido por Fraunhofer.
Fonte: LOPES, 2007.

Todavia, cabe aqui ressaltar que Fraunhofer não conseguiu compreender a origem destas riscas escuras no espectro solar. Chegou até a observar, com auxílio de telescópios, linhas nos espectros das estrelas Sírus, Castor, Pollux, Capella, Betelgeuse e Procion. Entretanto, mal sabia

ele, estava diante de uma espécie de enigma a ser decifrado somente na década de 1860, e que dizia respeito a informações sobre a composição química do Sol.

2.1.3 Bunsen e Kirchhoff: as revelações do espectro.

Em 1856, o químico alemão Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) desenvolveu o bico de gás (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014), denominado bico de Bunsen, criado para identificação de metais e seus sais. (NUNES, 2005 apud LOPES, 2007). Com este novo aparato desenvolvido, Bunsen obtia uma chama incolor de alto poder de aquecimento e de intensidade regulável, adequada para observar chamas de coloração característica (CAMEL, 2004). Quando um elemento químico era colocado sobre a chama, as cores emitidas eram das substâncias e não da chama (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). Anteriormente, enquanto ministrava aulas de química na Universidade de Breslau, Bunsen conheceu o físico Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), de quem se tornou amigo e com quem desenvolveu grande parceria posteriormente, em Heidelberg (FIGUEIRAS, 1996 apud LOPES, 2007).

No ano de 1859, Kirchhoff sugeriu analisar os espectros emitidos pelos sais e metais submetidos ao bico de Bunsen e, conseqüentemente, espectros de raios solares obstruídos por vapores metálicos³. Para tal façanha, em 1860, Bunsen e Kirchhoff construíram juntos um aparato denominado espectroscópio, constituído por um prisma como elemento dispersor (CAMEL, 2004). Neste aparato desenvolvido, não havia um elemento que pudesse detectar a intensidade da radiação, por isso as observações eram feitas a “olho nu” e anotadas conforme as suas colorações e intensidades (LOPES, 2007). Na figura 2, observa-se o espectroscópio de Bunsen e Kirchhoff:

³ Dedicando-se também, a partir deste mesmo ano, a estudar óptica e as raias nas linhas de Fraunhofer (PIROLO, 2010).

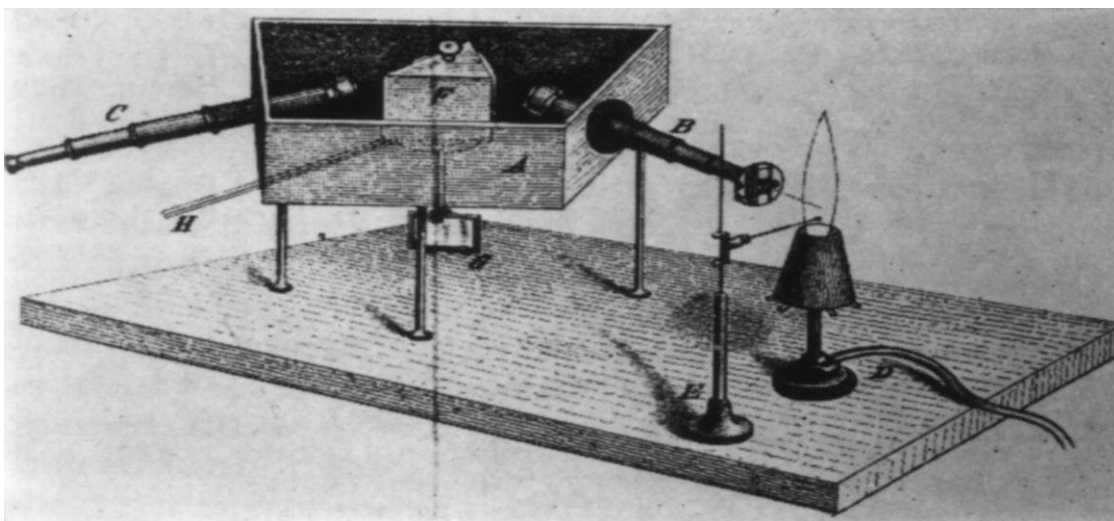


Figura 2: Espectroscópio de Bunsen e Kirchhoff

Fonte: BUNSEN E KIRCHHOFF, 1860

Bunsen e Kirchhoff analisaram que os gases quentes observados não emitiam um espectro contínuo. Eles descobriram que cada elemento gerava uma série de linhas diferentes: enquanto “o neônio tinha linhas no vermelho (por isso, o cartaz de neon é vermelho), o sódio tinha linhas no amarelo, e o mercúrio tinha linhas no amarelo e no verde” (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). Em suas experiências, Kirchhoff notou que os espectros de absorção produzidos coincidiam sempre com os espectros de emissão de cada elementos. Com efeito, Kirchhoff pôde concluir que cada elemento absorve precisamente a mesma luz que emite (FARIA, 1987 apud LOPES, 2007). Na figura 3, observa-se a exemplificação de espectros obtidos por Kirchhoff:

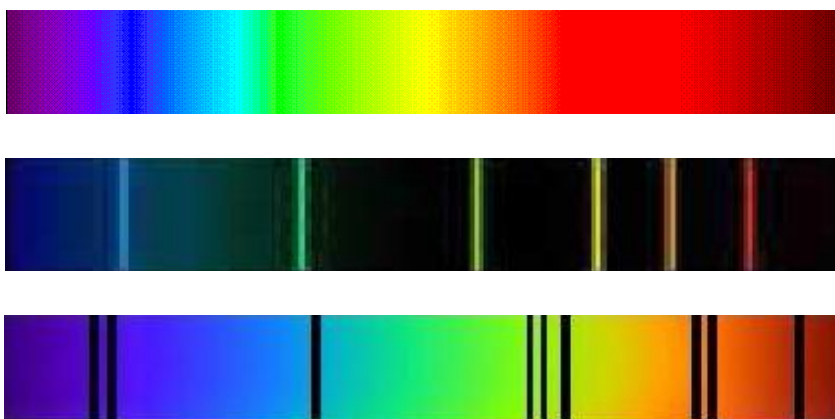


Figura 3: Espectros: Contínuo, de emissão e de absorção, semelhantes aos obtidos por Kirchhoff.
Fonte: LOPES, 2007.

Todas as linhas dos espectros de elementos observados por Bunsen e Kirchhoff eram brilhantes (espectro de emissão), enquanto que as linhas do espectro solar obtido por Fraunhofer eram escuras (espectro de absorção). Em algumas de suas experiências com o espectroscópio, Kirchhoff utilizava amostras contendo sódio e pode notar que duas linhas escuras no espectro solar (as linhas D de Fraunhofer) coincidiam com as linhas amarelas observadas com chamas de amostras contendo sódio (CAMEL, 2004).

Kirchhoff, então, quis comprovar que as linhas escuras D descobertas por Fraunhofer eram linhas de sódio. A fim de tentar confirmar tal suspeita, Kirchhoff deixou que a luz do Sol passasse através de uma chama de sódio, esperando que as linhas de sódio preenchessem as linhas escuras do sol. Contrariando as expectativas, as linhas D se apresentaram mais fortes, ou seja, mais escuras. Insatisfeito, Kirchhoff substituiu a luz do sol por um sólido quente. O mesmo resultado: A luz do solido que passava pela chama apresentava as mesmas linhas escuras do Sol, na posição das linhas do sódio. Ao final da análise, Kirchhoff concluiu que “o Sol era um gás ou sólido quente, envolto por um gás mais frio. Essas camadas mais frias produziam as linhas escuras do Sol. Comparando o espectro, descobriu linhas de Mg, Ca, Cr, Co, Zr, Ba, e Ni no Sol” (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). Em outras palavras, as linhas escuras observadas no espectro do Sol eram causadas pela absorção de comprimentos de onda característicos quando a luz atravessa os gases na atmosfera do Sol (FARIA, 1987).

No ano de 1860, Kirchhoff e Bunsen publicaram o artigo “*Chemical Analysis by Observation of Spectra*”, admitindo que:

A espectroscopia é um método simples, capaz de descobrir os menores vestígios de determinados elementos em substâncias terrestres, mas que também amplia as pesquisas químicas à uma região completamente fechada que vai muito além dos limites da Terra e até mesmo do sistema solar. Uma vez que este método analítico é suficientemente capaz de analisar um gás incandescente, esta técnica pode ser facilmente aplicada à atmosfera do Sol e das estrelas brilhantes. No entanto, há uma modificação necessária aqui por causa da luz emitida por estas estrelas [...] como descrito por Kirchhoff, teoricamente, o espectro de um gás incandescente é invertido, ou seja, as linhas brilhantes são convertidas em linhas escuras. Nesse caso, tem atrás de si uma fonte de luz de intensidade e envio de um espectro contínuo suficiente. Pode-se concluir que o espectro do Sol com suas linhas escuras é simplesmente o reverso do espectro que a atmosfera do Sol mostraria. Portanto, a análise química da atmosfera do Sol exige apenas a busca daquelas substâncias que produzem as linhas brilhantes, que coincidem com as linhas escuras da energia solar (BUNSEN E KIRCHHOFF, 1860 p. 4).

Podemos observar através de todas estas considerações de Bunsen e Kirchhoff que o estudo dos espectros ultrapassa os limites de nosso sistema solar, alcançando até as estrelas mais distantes através dos vestígios de sua luz. É através da análise dos espectros do Sol, e de qualquer estrela, que seja possível a identificação da luz irradiada, que conhecemos sua composição química e propriedades. As considerações descritas neste artigo de Bunsen e Kirchhoff comprovam que a espectroscopia é um instrumento importante, que nos permite a construção de tal conhecimento sobre o Sol e demais estrelas.

De acordo com seu artigo “*On the relationship between emission and absorption of bodies for heat and light*” Kirchhoff conseguiu interpretar a possibilidade de diferentes tipos de espectro, o que foi fundamental para o estabelecimento do método espectroscópico. Sendo importante salientar que neste trabalho Kirchhoff não descreve nomeadamente leis da espectroscopia como conhecidas atualmente. Estas leis na verdade surgiram a partir de certa análise e interpretação de seus resultados a respeito dos espectros, e são conhecidas atualmente como:

1. Espectro contínuo: um corpo opaco quente, sólido, líquido ou gasoso, emite um espectro contínuo. Por exemplo, o filamento de uma lâmpada incandescente (sólido), a lava de um vulcão (líquido), uma estrela (gás denso). **2. Espectro de emissão:** um gás transparente (isto é, pouco denso), produz um espectro de linhas brilhantes (de emissão). O número e a cor (posição) dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás. Por exemplo, uma lâmpada fluorescente. **3. Espectro de absorção:** se um espectro contínuo passar por um gás a temperatura mais baixa, o gás frio causa a presença de linhas escuras (absorção). O número e a posição dessas linhas dependem dos elementos químicos presentes no gás. Por exemplo, o Sol e sua atmosfera (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014. p. 213).

Os trabalhos de Kirchhoff e Bunsen direcionaram uma nova era na astronomia, pois a partir de então foi possível determinar a constituição do Sol e dos demais astros. Este leque de descobertas na área da espectroscopia marcou o surgimento da astrofísica, que começou a se desenvolver juntamente e em constante diálogo com os novos conhecimentos de outras ciências básicas, como a Física, a Matemática e a Química (FARIA, 1987).

2.1.4 A descoberta do Hidrogênio e do Hélio no interior solar

É importante relatar que a espectroscopia foi – e continua sendo – importantíssima para o conhecimento de composições químicas. Entretanto, a espectroscopia não se limitou aos

elementos químicos já identificados, como também revelou elementos químicos jamais antes conhecidos. No que diz respeito ao ramo da astrofísica, a observação e análise dos espectros estelares tomou impulso a partir de 1860. Foi no ano de 1862, contudo, que o astrônomo sueco Anders Jonas Ångström (1814-1874), desenvolvendo maior precisão na medida do comprimento de onda, identificou as linhas de hidrogênio no Sol. Sendo a presença deste mesmo elemento hidrogênio identificada aqui na Terra anteriormente, em 1766, pelo físico e químico inglês Henri Cavendish (1731-1810) (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014).

Outra identificação importante de um elemento químico fora feita alguns anos depois: Para o dia 18 de agosto de 1868 estava previsto um eclipse solar, onde diversos cientistas e astrônomos, com seus telescópios e espectroscópios, se deslocaram para a Índia (local onde aconteceria o eclipse total) a fim de obter melhores espectros⁴. Analisando os espectros obtidos, inicialmente constataram a existência de uma linha, que foi confundida com a linha D do sódio. Posteriormente, averiguaram que se tratava de uma nova linha, denominada de D3. Pensou-se que esta fosse correspondente a uma nova substância presente apenas no Sol, já que tal linha não coincidia com nenhuma nos espectros de elementos até então conhecidos na Terra (LOPES, 2007). Por esta razão, o novo elemento ficou conhecido como hélio, do grego *helios*, Sol. Entretanto, 27 anos depois, o elemento hélio foi descoberto na Terra pelo químico inglês *Sir* William Ramsay (1852-1916) (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). Segundo Filgueiras (1996), o hélio representou “a descoberta mais retumbante propiciada pela espectroscopia”. Sabe-se atualmente que o hélio é o segundo elemento mais abundante do Universo, sendo o hidrogênio o primeiro (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014).

No ano de 1835, Auguste Comte (1798-1857) afirmou que a humanidade nunca seria capaz de estudar, por método nenhum, a composição química das estrelas ou a sua estrutura mineralógica, considerando que o conhecimento “positivo” das estrelas está limitado aos seus fenômenos geométricos e mecânicos (MAAR, 2011). Contudo, nas explosões de novas descobertas e identificações de elementos químicos, que extrapolaram os limites do planeta Terra e invadiram as estrelas, pressupostos como o de Comte perderam seu significado. Segundo Lopes 2007:

Assim, a análise espectral obtida mostrava o que muitos consideravam impossível, derrubando teorias como a do filósofo francês Auguste Comte (1798-1857),

⁴ O estudo do espectro solar ficava facilitado durante os eclipses, quando se podia observar apenas a borda do disco solar, sem os problemas normais de ofuscamento.

criador da filosofia positivista (que baseia todo o conhecimento na observação dos fatos, rejeitando especulações que não sejam comprovadas pelos sentidos). Alguns anos antes, Comte afirmara que nunca seria possível estudar a composição química dos corpos celestes. A Astrofísica não só o desmentiu como demonstrou que estabelecer limites para o conhecimento é uma posição insustentável (LOPES, 2007. p. 18).

2.1.5 Os demais elementos químicos descobertos

A espectroscopia transformou-se em um poderoso método de análise que levou a descoberta de muitos elementos químicos. A tabela 1 ilustra alguns elementos descobertos pelo método espectroscópico, além da maioria dos elementos terras raras e do hélio (no Sol).

Elemento químico descoberto	Ano	Quem descobriu
<i>Césio</i>	<i>1860</i>	<i>Robert Bunsen e Gustav Kirchhoff</i>
<i>Rubídio</i>	<i>1860</i>	<i>Robert Bunsen e Gustav Kirchhoff</i>
<i>Tálio</i>	<i>1861</i>	<i>Sir William Crookes</i>
<i>Índio</i>	<i>1863</i>	<i>Ferdinand Reich e Theodor Richter</i>

Tabela 1: Descoberta de elementos químicos por espectroscopia.

Fonte: MAAR, 2011.

2.2 A RADIOATIVIDADE

O século XX pode ser considerado uma era revolucionária no que diz respeito aos conhecimentos estabelecidos. As observações de novos fenômenos provocaram o surgimento de novas áreas de pesquisa, hipóteses e formas inusitadas de criticar o que já estava estabelecido até então, transformando o mundo da física e da química, criando novos contornos e identidades para os mesmos. No que diz respeito à estrutura e natureza da matéria, a descoberta do fenômeno da radioatividade e os seus desdobramentos, culminaram na reformulação do conceito de elemento químico e da concepção de átomo como sinônimo de imutável, estável e indestrutível. Esses fatos

abriram caminhos para retomada de uma ideia até então banida da química: a transmutação elementar.

2.2.1 A identificação dos raios X e seus desdobramentos

Localizemos o início de tal século, ano de 1901, no qual o físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) fora contemplado com o prêmio Nobel por razão de sua descoberta dos raios X em 1895, na cidade de Wuerzburg. Enquanto trabalhava com um tubo de raios catódicos, Röntgen observou que um écran um pouco distante ficava fluorescente: este fato ocorria devido ao choque do feixe de elétrons com as paredes do tubo, o que originava uma radiação invisível tornada visível no écran (FIOLHAIS, 2000). Em princípio de janeiro de 1896, data de publicação do seu primeiro artigo sobre o assunto, Röntgen já conseguira identificar muitas propriedades físicas dos raios X. Todavia, mesmo com diversas hipóteses aventadas sobre, durante anos, a natureza deste fenômeno permaneceu desconhecida. Além de, também, não se saber o porquê de descargas elétricas nos tubos de Crookes produzirem os misteriosos raios X (MARTINS, 2004).

O trabalho sobre a descoberta dos raios X foi bem recebido pela comunidade científica. Uma prova disto é que, em algumas semanas após a publicação, o artigo de Röntgen alcançou grande repercussão; e durante todo o ano de 1896, constata-se que mais de mil artigos sobre os raios X foram publicados (JAUNCEY, 1945; GLASSER, 1933 apud MARTINS, 2004).

A observação dos raios X provocou diversos questionamentos e discussões: “Outros tipos de materiais podem emitir os raios X?”; “Existem ainda radiações que, assim como os raios X, passaram despercebidas e ainda não foram conhecidas ?” – essas e outras questões mobilizaram os cientistas da época.

No mesmo ano da publicação de Röntgen, um reconhecido físico e matemático chamado Henri Poincaré (1854-1912), em 20 de janeiro de 1896, conjectura se haveria algum tipo de relação entre os raios X de Röntgen e o fenômeno da fluorescência:

É, portanto, o vidro que emite os raios Roentgen, e ele nos emite tornando-se fluorescente. Podemos nos perguntar se todos os corpos cuja fluorescência seja suficientemente intensa não emitiriam, além dos raios luminosos, os raios X de Roentgen, qualquer que seja a causa de sua fluorescência.” (POINCARÉ, 1896 apud MARTINS, 1990, p. 3).

Assim como diversos pesquisadores, o físico francês, Antonie Henri Becquerel (1852-1908), muito instigado pelo assunto, tomou para si a pesquisa sobre esta possível relação entre os raios X e a fluorescência. Becquerel realizou diversos testes com diferentes substâncias luminescentes. Chegou a descrever inclusive que determinada substância fosforescente (sulfato duplo de uranila e potássio) produzia radiações penetrantes semelhantes aos raios X, o que parecia comprovar a hipótese de Poincaré.

Durante a investigação da relação entre os raios X e a fluorescência, os compostos de urânio foram substâncias bastante utilizadas por Becquerel. Tanto ele quanto um físico inglês da mesma época chamado Silvanus Thompson, acreditavam que estes compostos de urânio emitiam algo semelhante à radiação ultravioleta⁵, porém com maior poder de penetração, o que seria uma contradição aos fenômenos luminescentes comuns, pois violava a lei de Stokes⁶. Becquerel chegou a formular uma hipótese teórica de que apenas os compostos de urânio emitiriam tal radiação. Ele considerava que esta radiação emitida pelo urânio, com maior poder de penetração, era uma propriedade específica do mesmo. (MARTINS, 2013).

É de suma importância relatar que existem certas divergências nesta história que está sendo apresentada. Alguns autores relatam que foi através desta série de investigações sobre a relação entre fluorescência e raios X que Henri Becquerel descobriu o fenômeno da radioatividade quando, em um dia, ao acaso, guardou sal de urânio juntamente com uma chapa fotográfica em uma gaveta. E neste ato, contudo, algo inusitado aconteceu: a amostra de urânio deixada nesta gaveta, sem exposição alguma aos raios solares⁷, impressionou a chapa fotográfica. Por fim, diante desse fato, Becquerel conseguira deduzir que havia um novo tipo de radiação, oriunda do urânio, ainda mais misteriosa que os raios X (FIOLHAIS, 2000).

Esta versão é muito divulgada, todavia, segundo Martins 1990:

Os trabalhos de Becquerel não estabeleceram nem a natureza das radiações emitidas pelo urânio nem a natureza sub-atômica do processo. Seu trabalho, originado [...] pela hipótese de Poincaré, era apenas um dos muitos, da época, que apresentavam resultados de difícil interpretação. Visto no contexto da época,

⁵ Ondas eletromagnéticas com pequeno comprimento de onda.

⁶ Segundo a lei de Stokes, a radiação emitida tem um comprimento de onda maior do que o da radiação absorvida. Portanto, os raios luminosos não deveriam emitir radiação ultravioleta.

⁷ Na época, já se tinha o conhecimento de que um sal de urânio exposto à luz solar tornava-se fluorescente.

eram pesquisas que não tiveram o impacto nem a fecundidade da descoberta dos raios X (MARTINS, 1990. p. 38).

Analisando com mais cuidado, um dos principais motivos de Becquerel ter interpretado seus resultados como interpretou foi ter se deixado influenciar pela hipótese de Poincaré e considerar que os tão misteriosos raios observados tinham relação com a fluorescência. Além do que, é importante citar que Becquerel pertencia a uma família de cientistas que há quatro gerações realizavam pesquisas no âmbito da luminescência. É muito provável que Becquerel buscava nos seus experimentos comprovar a hipótese de Poincaré. Podemos observar então o quão difícil é selecionar a teoria correta para explicar o que foi observado em um experimento e que pressupostos conduzem os pensamentos na interpretação de fenômenos.

2.2.2 Marie Curie e a identificação da radioatividade

Atualmente, sabe-se que a radioatividade “é um fenômeno no qual certos tipos de núcleos atômicos se desintegram espontaneamente, emitindo radiações penetrantes (alfa, beta e gama), de alta energia, e se transformando em núcleos diferentes” (MARTINS, 2013). A construção de tal conhecimento foi possível através das pesquisas da física Marie Sklodowska Curie (1867-1934), auxiliada por seu marido, o também físico Pierre Curie (1859-1906). É importante mencionar que Marie Curie foi a primeira mulher laureada com prêmios Nobel na física e na química.

Proveniente da Polônia, Marie foi uma jovem de origem simples que cursou física na universidade de Sorbonne, em Paris, onde seu interesse pelos raios urânicos de Becquerel foi despertado (FIOLHAIS, 2000). Ela foi a responsável por identificar e explicar o fenômeno da radioatividade, cunhando tal nome ao mesmo, e por identificar dois novos elementos químicos, ambos radioativos, os quais nomeou de polônio e rádio. De acordo com Fiolhais (2000), esses episódios que envolvem Marie Curie fazem parte da pré-história da física nuclear, cuja história propriamente dita se dá a partir das pesquisas de Rutherford (FIOLHAIS, 2000).

Descrevendo de forma sucinta a contribuição de Marie Curie para o conhecimento sobre a radioatividade, podemos pontuar o final do ano de 1897, época do nascimento de sua primogênita (Irène). Marie Curie escolheu um curioso tema para sua tese de doutorado: O estudo das radiações do urânio, através do método elétrico. Na época, Marie Curie não fazia parte de

nenhuma instituição científica. Seu marido lecionava em uma escola de engenharia, a *École Municipale de Physique et de Chimie Industrielles*, de Paris, cujo o diretor autorizou Marie a utilizar parte de uma sala para seus estudos. A sala era úmida e fria, mas Marie não possuía outras opções (MARTINS, 2013).⁸

Iniciada as suas pesquisas em dezembro de 1897, após alguns meses, Marie começou a busca de materias que emitissem radiações semelhantes a do Urânio. No seu caderno de anotações, Marie Curie descreve suas experiências com diferentes substâncias, comparando-as com o Urânio. Examinou uma extensa quantidade de metais, não encontrando nada de semelhante às radiações do urânio. (MARTINS, 2013).

Contudo, a certa altura de suas experiências, Marie examinou um mineral de urânio (pechblenda ou uraninita) e percebeu um fato estranho: a radiação da uraninita se mostrava mais intensa do que a radiação do urânio metálico. Todavia, Becquerel havia observado que a radiação do urânio “puro”, o urânio metálico, era mais intensa que a de qualquer um de seus compostos. O que Marie percebeu contradizia os fatos observados anteriormente por Becquerel. Diversas vezes ela repetiu os testes, refazendo as medidas, mas o resultado se mantinha: a pechblenda, muitas vezes testada, teimava em se mostrar ainda mais ativa do que o urânio metálico. Marie Curie chegou a publicar tal “anomalia”:

Todos os minerais que se mostraram ativos contêm os elementos ativos. Dois minerais de urânio – a pechblenda (óxido de urânio) e a calcolita (fosfato de cobre e uranila) são muito mais ativos do que o próprio urânio. Esse fato é muito notável e leva a crer que esses minerais podem conter um elemento muito mais ativo do que o próprio urânio. Reproduzi a calcolita pelo processo de Debray com produtos puros; essa calcolita artificial não é mais ativa do que outros sais de urânio. (CURIE, 1898, p. 1102 apud MARTINS, 1990).

Entre os meses de fevereiro e março de 1898, Marie examinou muitas substâncias diferentes, não encontrando nelas radiação ionizante. Talvez, a partir deste instante, Marie tenha se convencido de que se existisse algum outro elemento, que emitisse radiação como as do urânio, deveria ser um elemento raro (MARTINS, 2013).

⁸ Naquela época, o título era obtido pela defesa direta de tese, já que não existiam cursos de pós-graduação (MARTINS, 2013).

A pechblenda além de ser constituída pelo óxido de urânio é também formada por várias outras substâncias em pequena quantidade – incluindo tório. Talvez este tenha sido um dos motivos para que Marie logo após a observação de diversas substâncias, tenha se dedicado a analisar um mineral de tório e nióbio, que não continha o urânio. Através desta análise, Marie logo notou que este mineral emitia radiação ionizante. Testando separadamente os elementos que integravam este mineral, observou que apenas o tório emitia radiações. Analisando em seguida diversos minerais de urânio e de tório, notou que todos eles emitiam radiação ionizante, e testando várias outras substâncias, não encontrou nenhuma outra ativa. Não houve mais sombra de dúvidas. Com todas essas novas informações adquiridas, no mês de abril, Marie publicou as considerações que obtivera: a descoberta do tório como elemento químico que emitia radiações ionizantes, assim como o urânio. Todavia, é importante relatar que Marie Curie não foi a única a chegar a estas considerações. Ambos, Gerhard Carl Nathaniel Schmidt (1865-1949) e Marie Curie no mês de abril de 1898, publicaram a descoberta de que o elemento tório também emitia radiações, assim como o urânio (MARTINS, 2013).

Com a descoberta do tório como emissor de radiação, percebia-se que esta não era uma característica exclusiva dos “raios de Becquerel”. Tratava-se de um fenômeno que não se restringia apenas ao urânio. Marie Curie foi a personagem que cunhou a este fenômeno o nome “radioatividade”:

Os raios urânicos foram freqüentemente chamados raios de Becquerel. Pode-se generalizar esse nome, aplicando-o não apenas aos raios urânicos, mas também aos raios tóricos e a todas as radiações semelhantes. Chamarei de radioativas as substâncias que emitem raios de Becquerel. O nome de hiperfosforescência, que foi proposto para o fenômeno, parece-me dar uma falsa ideia de sua natureza. (CURIE, 1899, p. 42 apud MARTINS, 1990).

Neste texto, podemos observar que Marie Curie já não observa mais o fenômeno com restrições. Pelo contrário, Marie consegue visualizar a amplitude do fenômeno, agora denominado de radioatividade, que anteriormente estava restrito apenas ao elemento urânio por Becquerel. Com esta consideração, Marie parece abrir um novo rumo de pesquisas, criando ainda mais perguntas e questionamentos ao mundo científico.

Como se não bastasse, alguns meses após a descoberta do tório, Marie e Pierre Curie apresentam ainda outra novidade à comunidade científica: Na pechblenda continha urânio e uma

pequena quantidade de tório, mas também ainda havia outro elemento radioativo desconhecido. Marie havia descrito em seu trabalho anterior que a pechblenda talvez contivesse um outro material radioativo, desconhecido. Ela dedicou-se à tarefa de tentar isolar essa substância desconhecida, separando os componentes da pechblenda em frações radioativa e não radioativa. Ao final, através do processo de destilação fracionada, obteve uma substância praticamente inseparável do bismuto (a qual os processos usuais de separação não conseguiram obter êxito), que era 400 vezes mais ativo que o urânio puro. Segundo o casal Curie:

Creemos portanto que a substância que retiramos da pechblenda contém um metal ainda não identificado, vizinho ao bismuto por suas propriedades analíticas. Se a existência desse novo metal for confirmada, propomos dar-lhe o nome de polônio, nome do país de origem de um de nós. (CURIE & CURIE, 1898 apud MARTINS 1990).

A história parece se repetir na última reunião de 1898 da Academia de ciências, na qual novamente os Curie, agora acompanhados pelo químico Gustave Bémont (1857-1937), apresentam a descoberta de outro elemento radioativo, quimicamente semelhante ao Bário, extraído também da pechblenda que, assim como o polônio, não pode ser isolado. Entretanto, obteve-se um material 900 vezes mais radioativo que o urânio. Uma diferença, contudo, entre o polônio e este novo elemento radioativo foi que através da análise espectroscópica do polônio não houve qualquer identificação de raia espectral desconhecida (o que confirmaria a presença de um elemento desconhecido). Porém, no caso do segundo elemento descoberto, a análise espectroscópica permitiu notar uma raia espectral desconhecida. O casal Curie e Bémont deram a este novo elemento o nome de “radio”, pois parecia mais radioativo do que qualquer outro elemento (CURIE, CURIE & BÉMONT, 1898 apud MARTINS, 2013).

Entretanto, a história não termina por aqui. Este é o marco do início da radioatividade, que possui ainda uma longa história a ser contada. As descobertas de elementos que emitiam radiação ionizante, além do urânio, causaram uma revolução. Tamanha revolução, que gerou ainda mais perguntas e questionamentos. Segundo MARTINS (1990, p.41):

Faltava muita coisa, ainda, a ser compreendida. O que eram as radiações emitidas: iguais aos raios X, ou não? Até essa época, parecia que sim. De onde saía a energia desprendida desses materiais? Por que alguns elementos são radioativos e outros não? Nada disso havia sido esclarecido. Não havia, também, suspeita de que a radioatividade acarretava transformações de um elemento químico em outro.

O nome “radioatividade” existia; mas não se conhecia ainda o complexo fenômeno ao qual damos hoje esse nome.

2.2.3 Ernest Rutherford: o átomo e a fissão nuclear

Ora, alguns anos após o conhecimento da radioatividade e a identificação de diversos elementos radioativos, as novidades no mundo da física e da química continuaram a aparecer. Ernest Rutherford (1871-1937), considerado um dos maiores físicos experimentais, foi o responsável por trazer à luz do conhecimento dois novos tipos de radiação, que denominou de alfa e beta (OLIVEIRA, 2012). Trabalho que resultou em um modelo nuclear para o átomo, em 1911, e no posterior rompimento do núcleo deste átomo em 1914.

Oriundo da zona rural de Spring Grove, Nova Zelândia, Ernest Rutherford nasceu no dia 30 de agosto de 1871. Desde sua mocidade, sentia grande interesse pela disciplina de física. Demonstrando sempre ser um aluno aplicado, com bons desempenhos, foi contemplado diversas vezes com bolsas de estudos durante sua trajetória acadêmica. No ano de 1894, Rutherford, com grau de mestre em física matemática e em ciência física, conquistou uma bolsa de estudos oferecida pela Exposição de Londres de 1851. Escolhendo o laboratório Cavendish, na Universidade de Cambridge, Inglaterra, iniciou os seus estudos em 1895. Logo após, em reconhecimento ao seu trabalho, foi convidado pelo físico responsável pelo laboratório Cavendish, J.J Thomson, para participar de investigações sobre efeitos causados pelos raios X ao atravessarem gases. Após esta primeira parceria com J.J Thomson, Ernest Rutherford começou a dedicar-se ao âmbito da radioatividade, e não parou, prosseguindo nesta área de pesquisa por seus próximos 40 anos. (BADASH, 2007 apud OLIVEIRA, 2012).

Ainda na Universidade de Cambridge, Rutherford, em um ensaio no ano de 1898, empenhou-se em verificar o grau de penetração de radiações emitidas pelos compostos de urânio em materiais. Rutherford desconfiava da existência de diferentes radiações e, para tornar verdadeiro tal pensamento, realizou sucessivos testes⁹. Para isto, preparou um aparato experimental, possuindo em seu interior uma fonte radioativa, contendo uma placa metálica conectada a um eletrômetro.

⁹ Percebe-se aqui como os pressupostos podem orientar uma pesquisa científica

Inserindo folhas de alumínio entre a fonte radioativa e a placa metálica, Rutherford pôde observar alterações no que diz respeito à intensidade das radiações emitidas. Notou-se que quanto maior a quantidade de folhas de alumínio inseridas, a intensidade das radiações decrescia. Mais especificamente, após a colocação da terceira folha de alumínio, a misteriosa radiação emitida pelo urânio comportava-se como menos intensa e mais penetrante. Mediante estes resultados, Ernest Rutherford discorreu em seu artigo *Uranium Radiation and the Electrical Conduction Produced by It* (1898, p. 175) que:

Estas experiências mostram que a radiação de urânio é complexa, e que estão presentes pelo menos dois tipos distintos de radiação— uma que é muito facilmente absorvida, que será denominada, por conveniência, radiação alfa, e a outra de um caráter mais penetrante, que será denominada radiação beta (RUTHERFORD, 1898, p. 175 apud OLIVEIRA, 2012).

Com o aprofundamento das investigações e experimentos sobre estas duas novas radiações, Rutherford posteriormente determinou a natureza da radiação alfa como sendo núcleos de átomos de hélio e Becquerel determinou a natureza da radiação beta como sendo elétrons (MARQUES, 2006 apud OLIVEIRA, 2012).

Conhecidas as radiações alfa e beta, posteriormente, um físico francês, Paul Villard (1860-1934), pôde observar, com experimentos de deflexão em um campo magnético, que existia um feixe de raios ainda desconhecido, que não desviava a sua trajetória retilínea, possuindo um elevado poder de penetração, superior ao dos raios alfa e beta. À vista disto, Villard averiguou que este tipo de radiação “se tratava de ondas eletromagnéticas de alta frequência e, por conseguinte, de curto comprimento de onda”. Esta nova radiação desvendada é o terceiro tipo de radiação que compõe as emissões radioativas, que foi nomeada posteriormente como raios gama por Rutherford. (SEGRÈ, 1857 apud OLIVEIRA, 2012).

As informações sobre a estrutura da matéria não pararam nas descobertas das radiações. Em 1911, a comunidade científica viu-se diante de um modelo nuclear para o átomo; um átomo inusitado, constituído por uma densa região central. O mesmo Ernest Rutherford, envolvido no conhecimento de radiações, desvendou o núcleo atômico com experimentos baseados nas grandes deflexões sofridas por partículas alfa (núcleos de hélio) e beta (elétrons) ao colidir com átomos de uma fina folha de ouro, na universidade de Manchester. Rutherford

apresentou um modelo para o átomo com configuração semelhante a um pequeno ‘sistema planetário’¹⁰, semelhante ao modelo atômico do físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950), apresentado em 1904, e que não obtivera qualquer reconhecimento.

No artigo de 1919, Rutherford relata que ao repetir a experiência substituindo os átomos-alvo de ouro por nitrogênio observou ‘um efeito anômalo’*: existiam entre as partículas alfa defletidas, também partículas de outro tipo, que foram identificadas como prótons (núcleos de hidrogênio). Segundo PIZA (2005, p.68):

Essa foi, na realidade, a primeira evidência de uma autêntica transmutação de elementos em laboratório: um dos prótons do núcleo de hélio se transferiria para um núcleo de nitrogênio transformando-o em um núcleo de oxigênio, ao mesmo tempo em que o núcleo de hélio se transformava em um núcleo de hidrogênio.

Posteriormente, este ‘efeito anômalo’ e processos semelhantes foram, e são até hoje, denominados de reações nucleares. A partir deste instante, podemos aqui destacar as primeiras reações nucleares que aconteceram em laboratório, após as experiências de Rutherford: No ano de 1932, na universidade de Cambridge, John Cockroft (1897-1967) e Ernest Walton (1903-1995) desenvolveram o primeiro acelerador de partículas carregadas através de projéteis artificialmente acelerados. Com um feixe de prótons em alta velocidade incidindo em alvos de alguns elementos químicos, observou-se a presença de partículas carregadas - Elas emergiam da colisão entre os prótons e os alvos, sendo identificadas como partículas alfa. Estas reações realizadas por Cockroft e Walton foram um indício da ocorrência de reações inversas às observadas por Rutherford (PIZA, 2005).

Além das reações nucleares em laboratório, seis anos após a descoberta do nêutron, em 1938, Otto Hahn (1879-1968) e Fritz Strassmann (1902-1980) presenciaram a realização da primeira fissão nuclear: Uma amostra de urânio foi exposta à irradiação por nêutrons, e logo após esta exposição realizou-se uma análise química da amostra, em busca de novos elementos químicos produzidos através de mecanismos nucleares de transmutação. Nesta análise química foram encontrados sinais de bário (que possui 56 prótons), que possui carga bem próxima à metade da carga elétrica original do urânio (que possui 92 prótons). Este resultado era totalmente

¹⁰ O modelo de Rutherford é utilizado até os dias atuais em textos para o ensino fundamental (PIZA, 2005)

inesperado, pois até então, em experiências reproduzidas com prótons, os resultados se limitavam à identificação de partículas nucleares. Otto e Fritz procuravam encontrar elementos que surgissem do urânio original pela carga elétrica de um ou dois prótons. Os resultados obtidos foram interpretados no início de 1939 por dois outros físicos, Otto Frisch (1904-1979) e Lise Meitner (1878-1968), como sendo um processo de ruptura do núcleo de urânio em dois fragmentos de tamanhos semelhantes ou comparáveis. Foram Frisch e Meitner que denominaram este processo de fissão nuclear (PIZA, 2005).

No mesmo ano de 1938, ano em que ocorrera a primeira fissão nuclear por irradiação de nêutrons, nos EUA foi proposto uma explicação para os mecanismos envolvidos na produção de energia em estrelas abundantes em hidrogênio, como o Sol, o que será apresentado no capítulo seguinte. Contudo, agora nos é apresentado uma forma “reversa” de fissão nuclear. As estrelas se mantêm brilhando não através do rompimento de núcleos pesados, mas sim de algo ainda mais surpreendente: As estrelas são astros formadores de elementos, que fusionam núcleos de hidrogênio em hélio e posteriormente o hélio em elementos mais pesados. Cabe informar que seria muito fácil relatar a história da maneira como ela se encontra e considerar o assunto encerrado. Entretanto, é válido perguntar: Como Hans Bethe chegou a tamanha conclusão? Foi ele o único a pensar neste tipo de energia? Quais os caminhos percorridos para se chegar a fusão no interior das estrelas?

3. A ENERGIA QUE MOVE AS ESTRELAS

As estrelas são objetos que sempre foram alvo de admiração e curiosidade por parte de nós, seres humanos; afinal de contas, quem não ficaria instigado em saber o porquê de elas estarem ali todas as noites brilhando para nós, iluminando um céu mergulhado na escuridão noturna? Desde muitos séculos atrás, os seres humanos se questionam a respeito da origem, causa e o porquê deste astro cintilar de tal forma. Portanto, qual é a energia que move as estrelas? As estrelas atravessam os séculos, e o tempo necessário para se findar gerações e gerações humanas. Todavia, as estrelas persistem através do tempo, em seu brilhar noturno encantador.

Será que não tem fim o seu cintilar? Talvez esta fosse uma das perguntas que incomodavam o intelecto humano. Agora, não mais. Fato é que hoje podemos contemplar o céu de forma mais tranquila. As estrelas atualmente não são um total mistério. Com o decorrer do tempo, o homem foi aprimorando a sua forma de pensar e de olhar as estrelas. Justamente, veremos um pouco deste aprimoramento ao percorrer a história: Afinal, como o homem foi desenvolvendo formas e teorias para compreender a tão misteriosa energia estelar?

3.1 PENSAMENTOS INICIAIS

As respostas plausíveis ao questionamento da fonte de energia estelar só pôde começar a ser fundamentada no século XIX, através do desenvolvimento da termodinâmica – estudo do calor e energia. Acredita-se que o médico alemão Robert Julius Von Mayer (1814-1878) foi o pioneiro a firmar bases à termodinâmica, o estudo da energia e do calor, através de observações feitas em uma viagem que fez para as Índias Orientais holandesas. Nesta viagem, ele embarcou como cirurgião em 1840, ano em que completou o seu curso de medicina. Durante esta viagem, Mayer percebeu que o sangue dos marinheiros recém-chegados da Europa era mais vermelho – portanto tinha mais oxigênio – do que o daqueles que estavam há muito tempo nos trópicos. A partir destas observações, Mayer conseguiu interpretar que uma menor quantidade de oxigênio no sangue era preciso para sustentar a temperatura do corpo em climas mais quentes. Além desta última conclusão, Mayer também enunciou a transformação da energia química contida na comida em calor e pôde então através destas considerações fundamentar a ideia de que todas as formas de energia eram mutáveis entre si (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014). Cumpre observar que

esta ideia já fora antecipada por Michael Faraday (1791-1867) nas primeiras décadas do século XIX, através do pressuposto de convertibilidade das forças.

Percebe-se observar que a ideia conclusiva de Robert Julius Von Mayer é o alicerce da primeira lei da termodinâmica. A primeira lei estabelece “que a energia, incluindo calor, nunca é criada ou destruída, simplesmente é transformada de uma forma em outra”. A palavra energia vem do grego *energeia* e pode ser basicamente definida como a capacidade de um sistema realizar trabalho. Ao fim da década de 1840, a conservação de energia já tinha sido claramente formulada pelo médico Mayer e alguns físicos, como o inglês James Prescott Joule (1818-1889) e o físico alemão Hermann Ludwig Ferdinand Von Helmholtz (1821-1894) (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014).

A partir dos fatos anteriores, é válido ponderar: Se a energia nunca é criada ou destruída e sim transformada em suas diversas formas, qual a forma de energia estaria sendo transformado no interior do Sol?

No fim do século XIX, os astrônomos começaram estabelecer respostas para o questionamento sobre que forma de energia estava sendo transformada em calor no Sol. Em 1898, o diretor do observatório de Cambridge *Sir Robert Stawell Ball* (1840-1913), pôde observar que fósseis de peixe tinham os olhos bem desenvolvidos e concluir então que isto era sinal de que o sol já existia e brilhava bem antes da humanidade. Sendo assim, que tipo de energia poderia ser transformada no interior do Sol a ponto de conferir-lhe tamanho tempo de existência? Mesmo se pudéssemos imaginar um sol constituído do melhor combustível conhecido naquela época como carvão mineral ou petróleo, segundo cálculos, o tempo de existência de nosso sol formado por estes combustíveis resultaria em torno de 6.000 a 10.000 anos (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014).

Bem antes da observação de *Sir Robert Stawell Ball*, a combustão química fora uma forma de energia claramente rejeitada. As evidências de debates que aconteciam no mundo científico justificam tal rejeição: “Afinal, qual a idade do planeta Terra e da nossa estrela, o Sol ?”

3.2 UMA SÍNTESE SOBRE O DEBATE DA IDADE DA TERRA E DO SOL

Este debate pode ter como referência o ano de 1840, no qual o médico Mayer (o mesmo que contribuiu para o desenvolvimento da termodinâmica) e o físico J.J. Waterson (1811-1883) sugeriram que a energia do Sol era o resultado da conversão da energia gravitacional em calor. Posteriormente, em 1854, o físico Hermann von Helmholtz realizou cálculos baseados na hipótese da contração gravitacional. No ano de 1859, Charles Darwin publica o seu livro “*On the Origin of the Species by Natural Selection*”, no qual fez uma estimativa da idade da Terra. Ele estimou a idade da Terra de 300 milhões de anos. Em 1862, um declarado opositor às ideias de Darwin, entrou neste debate: William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907), fez uma estimativa da idade da Terra, apoiando-se na ideia de que a energia solar resultava de impactos frequentes de meteoros na superfície do Sol. Por falta de evidências astronômicas, esta ideia foi abandonada. Todavia, Lord Kelvin não desistiu. Ele sugeriu que a energia solar provinha em sua grande maioria pela energia gravitacional de meteoros primordiais dos quais o Sol se originou. A partir desta hipótese, Kelvin calculou que a idade do Sol e também do planeta Terra estavam em torno de 30 milhões de anos. Esta idade era dez vezes menor que a idade encontrada por Darwin, em sua teoria da evolução das espécies. Caso Kelvin estivesse certo, toda a teoria desenvolvida por Darwin seria refutada. (HUSSEIN; SALINAS, 2001)

A resposta ao questionamento sobre a idade da Terra logo apareceu. No ano de 1903, Pierre e Marie Curie descobriram que o sal de rádio sempre gera calor. (HUSSEIN; SALINAS, 2001). Em 1905, Albert Einstein deduz uma relação (será explicada posteriormente), que torna possível a conversão de uma pequena quantidade de massa em uma enorme quantidade de energia. Na universidade de McGill, em Montreal, Ernest Rutherford verificou que materiais radioativos podiam produzir volumes enormes de energia:

Um pedaço de rádio, comprovou ele, gera calor suficiente para derreter seu peso em gelo a cada hora, e pode continuar a gerá-lo por mil anos ou mais. Outros elementos radioativos duram ainda mais; alguns mantêm-se vivos, sem perder quase nenhum vigor, por bilhões de anos. Era essa, portanto, a resposta a Kelvin, e uma resposta que foi a libertação do falecido Charles Darwin: a Terra permanece quente porque é aquecida pelos elementos radioativos das pedras e do núcleo em fusão do globo [...] O material radioativo não só testemunhava a antiguidade da Terra, como também proporcionava uma maneira de medi-la.” (FERRIS, 1990. Traduzido por DUTRA, 1990. p.191)

Usando-se materiais radioativos como meio para se determinar a idade da Terra, chegou-se a um intervalo de bilhões de anos de tempo de existência para o nosso planeta.

Podemos visualizar a ideia de como um planeta poderia ser mais velho do que a sua estrela ou até mesmo mais velho que o próprio sistema do qual faz parte. De forma lógica, o sistema solar é constituído por um centro, ocupado por uma estrela (o Sol), que possui um determinado número de astros que se movimentam ao seu redor. Por conseguinte, podemos raciocinar que o Sol, como o centro, deveria ter maior tempo de existência, caso contrário, não haveria a formação do sistema configurado da forma como o conhecemos. A resposta para idade da Terra foi encontrada. Entretanto, no que diz respeito ao Sol, que tipo de energia seria capaz de conferir-lhe um tempo de existência tão grande?

Com a descoberta da radioatividade em 1896, caminhos foram abertos e uma nova possibilidade de energia para as estrelas surgiu. No ano de 1905, Albert Einstein (1879-1955) generaliza a lei da conservação da energia com sua famosa equação $E = mc^2$, onde E representa “energia”, m representa “massa” e a letra c representa a velocidade da luz no vácuo. Uma vez que a velocidade da luz é muito grande, a fórmula implica que uma pequena quantidade de massa é requerida para gerar enormes quantidades de energia. No ano de 1920, o químico inglês Francis William Aston (1877-1945) fez medições precisas de átomos diferentes utilizando a técnica da espectrometria de massa. Ele descobriu que quatro núcleos de hidrogênio individuais possuem maior massa do que um núcleo de hélio, que é constituído justamente por quatro núcleos de hidrogênio. Mediante os fatos, o astrofísico Arthur Stanley Eddington (1882-1944) argumentou que as medições de William Aston indicavam que através da conversão de átomos de hidrogênio em hélio havia a liberação de cerca de 0,7% da massa do hidrogênio como energia no processo, e que este tipo de processo, ao qual se referiu como “subatômico”, permitiria ao Sol brilhar por bilhões de anos (KGS, 2010).

Percebe-se que o astrofísico Eddington conseguiu reunir as descobertas de seu tempo aplicá-las a um tipo diferenciado de hipótese: A hipótese do subatômico. Além de ser uma hipótese nova, conferiu ao Sol uma idade em torno dos bilhões de anos, reafirmando a ideia defendida por geólogos e evolucionistas. Segundo KGS (2010), Eddington foi um dos pioneiros a sugerir que os processos no nível subatômico, envolvendo o hidrogênio e o hélio, poderiam explicar como as estrelas geram sua energia. Em seu livro *“The Internal Constitution of the*

Stars”, publicado no ano de 1926 pela universidade de Cambridge, Eddington desenvolve a sua ideia do “subatômico” e refuta a hipótese da Contração Gravitacional.

3.3 ARTHUR STANLEY EDDINGTON E A HIPÓTESE DO SUBATÔMICO

Em seu livro “*The Internal Constitution of The Stars*”, publicado em 1926, Arthur Stanley Eddington (1882-1944) relata a problemática da hipótese da contração gravitacional. Como mencionado anteriormente, esta hipótese defendia a ideia de que a energia de uma estrela é gerada através de sua gradual contração, o que converte a energia gravitacional em energia irradiada. Especificamente no capítulo onze de seu livro, Eddington inicia sua escrita por uma demonstração matemática apoiada na hipótese da contração gravitacional, a fim de determinar a idade do Sol. Segundo os cálculos demonstrados a partir desta hipótese, o Sol teria em torno de 20 milhões de anos de existência, e o seu tempo máximo de existência estaria em torno de 47 milhões de anos.

Contudo, Eddington argumentou que os campos da Biologia, Geologia, Física e Astronomia já apontavam que a idade do Sol determinada por esta hipótese era insuficiente. Eddington descreve que, utilizando-se amostras de sais minerais radioativos para análise da formação de rochas terrestres, concluiu-se que a idade da Terra estava em torno de 1300 milhões de anos; como o planeta Terra poderia ser mais velho que a sua estrela, o Sol? Obviamente, o Sol deveria ter maior tempo de existência. Portanto, mediante as evidências, Eddington relata o que se tornava cada vez mais claro: 20 milhões de anos para o Sol era uma idade errônea, o que tornava a hipótese da contração gravitacional insustentável.

Entretanto, se esta última hipótese era inaceitável, qual seria então a hipótese aceitável e ideal para a fonte de energia das estrelas?

“*No source of energy is of any avail unless liberates energy in the deep interior of the star*”. Esta fora uma das frases de Eddington em seu esforço para formular uma teoria sobre a energia que move as estrelas. Eddington desconfiava de que havia algo bem nas profundezas das estrelas que as mantinha brilhando, sugerindo através da frase anteriormente citada, que nenhuma energia externa seria capaz de sustentar as estrelas. Para Eddington, o calor que alimenta as estrelas provinha exclusivamente de seu próprio interior, e não de fontes externas, como a matéria meteórica, como Lord Kelvin e outros supunham.

Contudo, é de suma importância aqui esclarecer que abordar a energia estelar era uma questão ainda mais complexa e delicada naquela época. Por mais que Eddington chegasse à teoria correta, a mesma pareceria errônea. Discorrer sobre uma possível fusão nuclear, ou um processo semelhante, pareceria especulação, tendo em vista que naquela época o átomo se resumia a prótons e elétrons. Não se conheciam as propriedades de um átomo constituído por prótons, nêutrons e elétrons. Havia lacunas na própria estrutura atômica e, portanto, a verdadeira resposta à energia que move as estrelas parecia algo quase que inatingível¹¹.

Todavia, mesmo com estas limitações de sua época, Eddington fora o pioneiro a mencionar o termo “sub-atômico” relacionando-o a resolução do problema da energia que move as estrelas: *“It is now generally agreed that the main source of star’s energy is subatomic”*.

Além do termo “subatomic”, Eddington também fora o pioneiro a descrever que as estrelas poderiam estar constantemente convertendo massa em energia: *“Energy and mass are equivalent, and we know the masses of the stars”*. Embasado na equação de Albert Einstein (1879-1955) $E=mc^2$, Eddington discorreu que massa e energia são equivalentes, o que para ele podia ser o caminho para desvendar a energia das estrelas. Por que não pensar então que massa estaria constantemente sendo convertida em energia e, por assim dizer, sendo convertida em calor dentro das estrelas? Com esta hipótese da energia “subatômica”, onde o Sol estaria convertendo massa em energia, o tempo de existência do Sol poderia atingir em torno de 15 bilhões de anos.

Neste pensamento, Eddington discorria sobre duas possibilidades de processos subatômicos: “A quebra de elementos complexos em elementos simples; ou a construção de elementos complexos a partir de elementos simples (radioatividade); A aniquilação de prótons por elétrons.” (EDDINGTON, 1926).

Considerando que na primeira hipótese apresentada, Eddington já pensava na possibilidade de transformar o hidrogênio em hélio (EDDINGTON, 1926).

É de suma importância ressaltar que a equação de Albert Einstein sustentou o raciocínio de Eddington em sua defesa do “subatômico”. Fora no ano de 1905 que a teoria da relatividade especial de Einstein, trouxe à tona uma equação que mudou a forma de interpretar o mundo: $E=mc^2$. Uma fórmula aparentemente simples, mas que possui significado grandioso: A energia (E) e a massa (m) são equivalentes, e podem ser transformadas uma na outra. Observando a equação, a massa (m) está sendo multiplicada pela velocidade da luz c, obtendo-se a conversão de

¹¹ O nêutron só foi identificado em 1932.

massa em energia. Como já estabelecido por cálculos, a velocidade da luz mede 3×10^8 m/s, sendo assim, c^2 é igual à 9×10^{16} . Isto significa que uma minúscula quantidade de massa pode ser convertida em uma imensa quantidade de energia.

Falar sobre a energia subatômica foi desafio para Eddington. Se a própria estrutura do átomo estava incompleta, como estabelecer uma correta teoria sobre a energia que move as estrelas? O mundo científico ainda não tinha olhos para visualizar a partícula que faltava no átomo- o nêutron, embora já houvesse a suspeita de sua existência. O mundo científico ainda não tinha conhecimento do átomo como um todo e nem das suas complexas propriedades. Portanto, a hipótese do “subatômico” de Eddington não obteve sucesso perante a comunidade científica da época.

3.4 FRITZ HOUTERMANS E ROBERT ATKINSON COM A REAFIRMAÇÃO DO SUBATÔMICO

As evidências, contudo, começaram a mudar pouco tempo depois. Em 1929, três anos após a publicação de Eddington, os físicos Fritz Houtermans (1903-1966) e Robert Atkinson (1898-1982) publicaram suas ideias sobre a fusão estelar. Nesta época, com a análise dos espectros, já se tinha o conhecimento de que o Sol era constituído principalmente de hidrogênio e parcialmente de hélio, o que parecia natural presumir que a energia gerada pelo Sol era resultado de reações nucleares em que o hidrogênio se fundia em hélio. Por mais que ninguém tivesse observado a fusão na Terra, segundo a equação de Einstein, sabia-se que este processo liberava enormes quantidades de energia. Segundo a equação, em teoria, “1 kg de hidrogênio poderia ser fundido em exatamente 0,993Kg de hélio e gerar $6,3 \times 10^{14}$ joules de energia, o que é igual à energia gerada pela queima de 100 mil toneladas de carvão.” (SINGH, 2006. Traduzido por CALIFE, 2006).

Todavia, como fazer com que dois prótons cheguem tão perto a ponto de haver uma fusão se, segundo a já consolidada Barreira de Coulomb, partículas de mesma carga repelem-se mutuamente? Em seu trabalho publicado em 1929, Fritz Houtermans demonstrou através de cálculos que se dois prótons pudessem se aproximar a uma distância crítica de um trilionésimo de um milímetro (10^{-15}), então haveria uma força de atração (conhecida como força nuclear forte)

que superaria a Barreira de Coulomb e uniria os núcleos firmemente (SINGH, 2006. Traduzido por CALIFE, 2006).

Aplicando o conhecimento às estrelas, Houtermans tinha a convicção de que no interior do Sol existiam condições de temperatura e pressão suficientes para forçar a aproximação dos núcleos de hidrogênio até a distância crítica de 10^{-15} metros, o que resultaria na fusão nuclear, liberando energia necessária para manter a temperatura e estimular mais fusão. Houtermans e Atkinson estavam convencidos de que com todos estes progressos, solucionaria a questão da energia das estrelas (SINGH, 2006. Traduzido por CALIFE, 2006).

Para dissabores, contudo, o que Houtermans havia desenvolvido era apenas uma teoria parcial da fusão estelar. O que tornava incompleta a sua teoria era que “mesmo que o Sol pudesse fundir dois núcleos de hidrogênio num núcleo de hélio, seria um isótopo muito leve e instável de hélio- o hélio estável precisa que mais dois nêutrons sejam acrescentados ao núcleo.” (SINGH, 2006. Traduzido por CALIFE, 2006).

Vale destacar, portanto, que uma contribuição fundamental para a descoberta da energia que move as estrelas foi a identificação do nêutron em 1932, por James Chadwick (1891-1974). A partir deste instante o átomo pôde ser contemplado em sua totalidade. E, como a resolução da energia das estrelas estava totalmente relacionada às partículas atômicas, o nêutron foi um divisor de águas, preenchendo o quebra cabeça tanto do próprio átomo quanto do caminho para o subatômico no interior das estrelas, eliminando as lacunas existentes.

Assim que o nêutron foi isolado em 1932, Houtermans poderia acrescentar os detalhes que faltavam a sua teoria. Entretanto, não conseguiu concluir seu trabalho por interferências políticas:

“Ele tinha sido membro do Partido Comunista e temia tornar-se uma vítima da perseguição nazista. Em 1933, fugiu da Alemanha para a Grã Bretanha, onde não gostou nem da comida nem da cultura [...]. No final de 1934, ele foi para a União Soviética [...]. O trabalho de Houtermans progrediu bem no Instituto Físico-Técnico Ucrainiano até Stálin iniciar um expurgo da comunidade científica. Tendo fugido dos nazistas, Houtermans estava agora sob absurda suspeita de ser um espião nazista. Ele foi preso pela NKVD, a política secreta soviética, em 1937 [...]. Houtermans foi interrogado durante mais de 11 dias, sem descanso, e durante esse tempo foi privado do sono e obrigado a ficar de pé. O pacto nazi-soviético levou à sua libertação em 1940, mas ele foi preso imediatamente pela Gestapo e interrogado de novo.” (SINGH, 2006. Traduzido por CALIFE, 2006)

Com Houtermans impedido de progredir com seu trabalho, outros físicos lançaram mão de suas ideias sobre a fusão estelar e calcularam, com detalhes, o processo que estava acontecendo no Sol. Contudo, o físico que mais contribuiu para completar a pesquisa de Houtermans foi Hans Bethe (1906-2005) (SINGH, 2006. Traduzido por CALIFE, 2006).

3.5 HANS BETHE E A FUSÃO NUCLEAR NO INTERIOR DAS ESTRELAS.

Foi em julho de 1906, em Estrasburgo (que hoje pertence à França, mas naquela época fazia parte da Alemanha), que Hans Albrecht Bethe nasceu. Durante algum tempo, Bethe estudou física em Frankfurt e fez o doutorado na Universidade de Munique, defendido em julho de 1928 e orientado por Arnold Sommerfeld (1868-1951)¹². Bethe realizou seu pós-doutorado em Cambridge e no laboratório de Enrico Fermi (1901-1954), em Roma. Até o ano de 1933, Bethe lecionou nas universidades de Frankfurt, Munique e Tübingen, perdendo o cargo de professor assistente nesta última universidade após a vitória do regime nazista na Alemanha e a ascensão ao poder de Adolf Hitler. Sendo importante mencionar que a mãe de Bethe era judia (LEITE; WAKI, 2015).

Em outubro de 1933, logo após perder seu cargo, Bethe fugiu da Alemanha e imigrou para a Inglaterra e entre os anos de 1933-1934, lecionou na universidade de Manchester. Logo no outono de 1934, ele foi para a universidade de Bristol. Com Sir Rudolf Ernst Peierls (1907-1995), ainda em 1934, desenvolveu uma teoria para o deutério. Em 1935 foi para os Estados Unidos da América, onde tornou-se professor assistente na Universidade de Cornell, e foi promovido dois anos depois como professor titular. Nesta Universidade de Cornell, Bethe ficou conhecido como um dos físicos teóricos líderes de sua geração onde, junto com outros colegas, colocou Cornell no mapa mundial da física. Durante a Segunda Guerra Mundial, Bethe trabalhou no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), e logo após este trabalho liderou a equipe de física teórica que trabalhava no Projeto Manhattan, para o desenvolvimento da bomba atômica. Bethe publicou diversos artigos sobre física nuclear, reunindo e aprimorando muito do que se conhecia na época,

¹² Físico alemão cujo modelo atômico permitiu a explicação do espectro de linhas finas. Introduziu a órbita elíptica e postulou os números quânticos azimutal e magnético. Orientou muitos físicos para a nova física teórica. Muitos dos seus orientandos receberam o prêmio Nobel.

um trabalho que ficou conhecido como “A bíblia de Bethe”. Nos anos e 1935 a 1938, Bethe estudou as reações nucleares e reações de seção eficaz (ciclo carbono-oxigênio-nitrogênio), desenvolvendo teorias que, ao final, levaram Bethe a descobrir as reações que fornecem a energia que move as estrelas (LEITE; WAKI, 2015).

O que Bethe fez foi teorizar com detalhes o processo de fusão nuclear que acontece no interior das estrelas, o qual libera energia suficiente para sustentar as estrelas durante bilhões de anos. Mais especificamente, Bethe apresentou duas possibilidades de processos distintos que ocorreriam no interior de uma estrela, e que apontavam para o mesmo resultado: A fusão de quatro núcleos de hidrogênio em um núcleo de hélio (NOBEL PRIZE, 2016).

O primeiro processo a ser relatado é conhecido atualmente como corrente de reações Próton-Próton. Neste processo, o hidrogênio (${}^1\text{H}_1$) reagiria com o deutério¹³ (${}^2\text{H}_1$). Esta reação resultaria em um isótopo leve do hélio, contendo dois prótons e um nêutron (${}^3\text{He}_2$). Logo em seguida, dois desses núcleos de hélio leve obtidos se fundiriam para formar um núcleo de hélio estável (${}^4\text{He}_2$), liberando dois núcleos de hidrogênio como subproduto. Podemos acompanhar todas as etapas deste processo através da figura 4 (FERRIS, 1990. Traduzido por DUTRA, 1990):

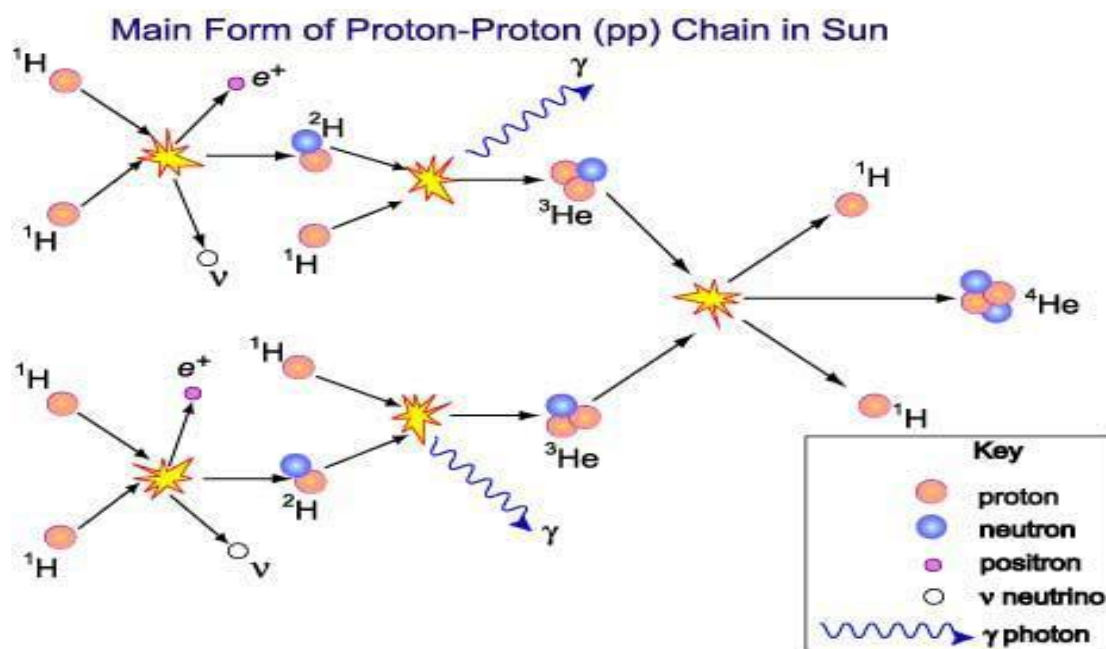


Figura 4 – Corrente de reações Próton-Próton.

Fonte: Austrália Telescope Facility Nacional apud PERCY, 2014.

¹³ Isótopo mais raro e pesado do hidrogênio.

Podemos perceber que, até esta altura, a corrente de reações Próton-Próton parece conseguir responder ao grande questionamento da energia que move as estrelas. Entretanto, segundo Ferris (1990), “A reação próton-próton era insuficientemente energética, porém, para explicar a luminosidade bem mais intensa das estrelas muito maiores do que o Sol [...]”. Portanto, se apenas o ciclo próton-próton não era suficiente para solucionar o “enigma” da energia que move as estrelas, quais seriam as outras reações a serem descobertas ?

Em seu breve artigo de uma página “*Energy Production In Stars*”, publicado no dia 15 de dezembro de 1938, pela Universidade de Cornell, Bethe explicou o ciclo envolvendo o carbono, nitrogênio e oxigênio como uma possibilidade de processo de produção de energia nas estrelas, descrevendo-a na figura 5:

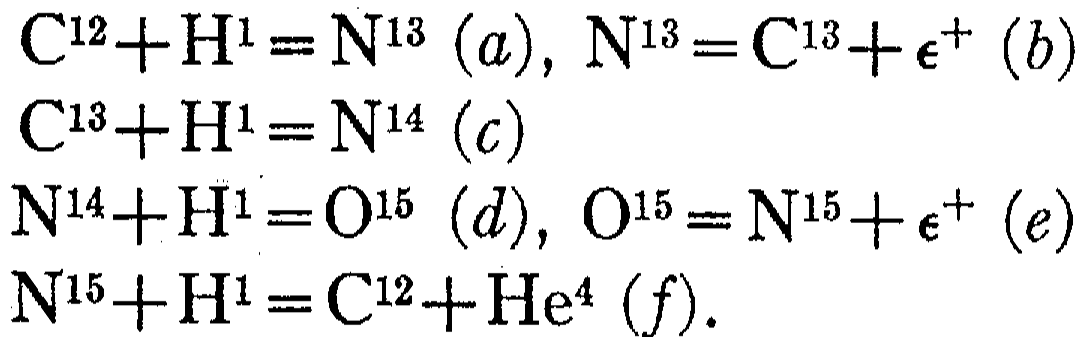


Figura 5 – Reação envolvendo carbono, nitrogênio e oxigênio como catalisadores.

Fonte: BETHE, 1938.

Este processo elaborado por Bethe, mais conhecido atualmente com Ciclo do Carbono, envolve uma complexa cadeia constituída de seis reações nucleares, nas quais isótopos de carbono e nitrogênio atuam como catalisadores para a fusão nuclear. Nesta época, os astrônomos calcularam que a temperatura no interior do Sol estava em torno de 19 milhões de graus Kelvin, e Bethe afirmou que, a esta temperatura, o ciclo do carbono seria o processo dominante de produção de energia (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2014; BETHE, 1938). De forma mais explícita, na figura 6 há uma esquematização de como o ciclo do carbono aconteceria no interior das estrelas:

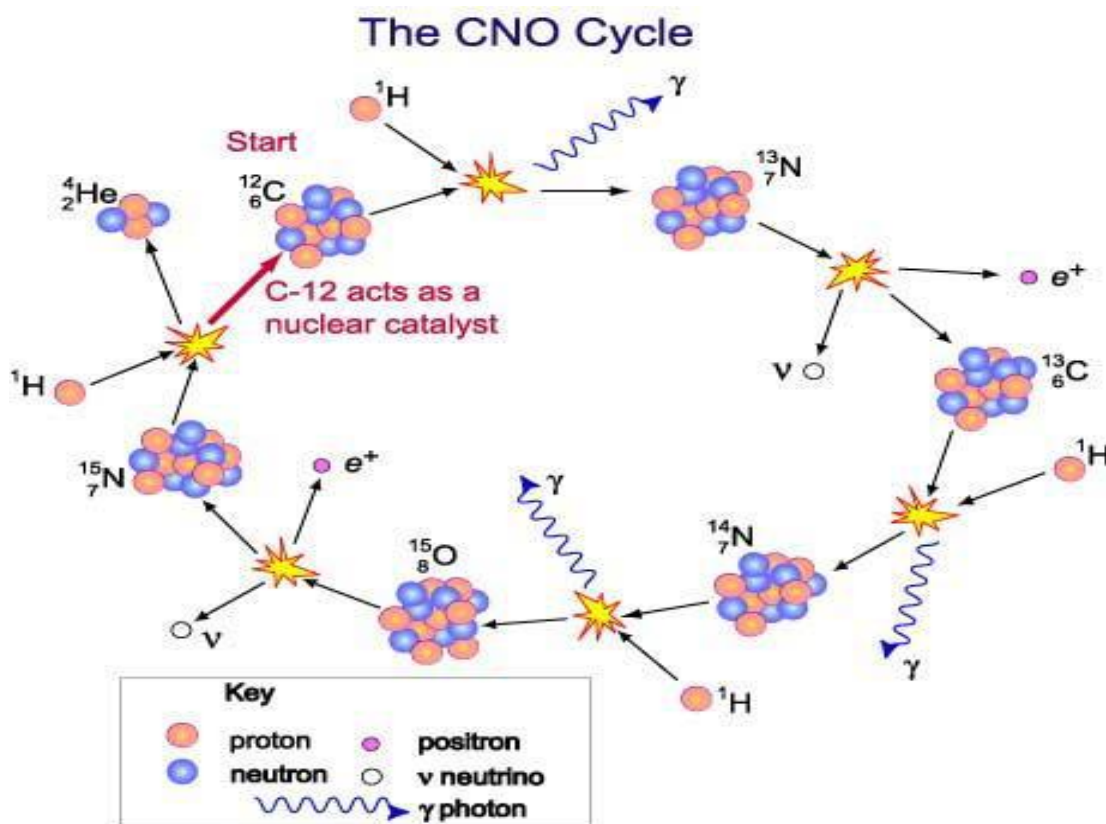


Figura 6 – Esquemática do Ciclo do Carbono proposto por Bethe.

Fonte: Austrália Telescope Facility Nacional apud PERCY, 2014.

É importante explicitar que Bethe ainda analisou a possibilidade de ocorrência das seis reações do processo e afirmou que não haveria a possibilidade deste mesmo processo ocorrer com elementos mais leves do que o carbono, pois qualquer elemento mais leve, ao reagir com os prótons, seria consumido nas reações de forma permanente (BETHE, 1938), conforme ele ilustrou com o exemplo do Be^9 no processo ilustrado na figura 7:

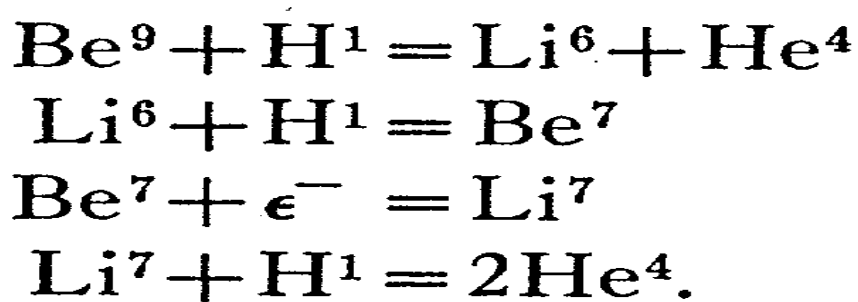


Figura 7 – Exemplo do Be^9 sendo consumido na reação.

Fonte: BETHE, 1938.

Portanto, é importante observar que por mais que uma estrela, em suas etapas iniciais de formação, fosse constituída de uma apreciável quantidade dos elementos Li, Be ou B, os mesmos teriam sido consumidos logo no princípio da existência da estrela. Bethe ainda relata que este fato relaciona-se com o fato da baixíssima abundância destes elementos (se houver) nas estrelas (BETHE, 1938). Corroborando os argumentos de Bethe, a figura 8 explicita a abundancia dos elementos químicos no interior das estrelas:

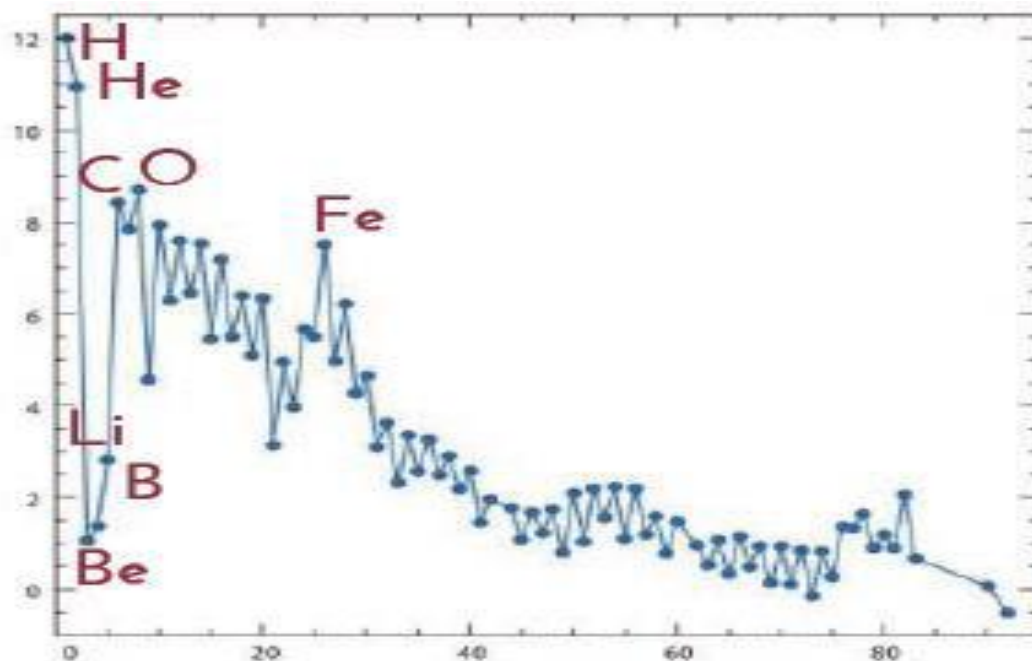


Figura 8 – A abundância dos elementos químicos no Sol e nas estrelas¹⁴.

Fonte: Nasa apud PERCY, 2014.

Segundo Ferris (1990):

Essas duas rotas nucleares eram, inicialmente, especulativas, mas outros físicos verificaram as equações e confirmaram que as reações eram viáveis. Ao mesmo tempo, os astrônomos ficaram mais certos de que o ambiente no interior do Sol era intenso o bastante para iniciar as reações nucleares. Na década de 1940 ficou claro que ambas as reações propostas por Bethe estavam acontecendo no Sol e

¹⁴ “O hidrogênio e o hélio são os mais abundantes. Há pouquíssimo lítio, berílio e boro e bastante carbono, nitrogênio e oxigênio. As abundâncias dos demais elementos diminuem consideravelmente ao aumentar o número atômico. O hidrogênio é 1012 vezes mais abundante que o urânio. Os elementos com número par de prótons possuem maior abundância que os elementos com os números ímpares de prótons. Os elementos mais leves que o ferro são produzidos pela fusão nuclear nas estrelas. Os elementos mais pesados que o ferro são produzidos por captura de nêutrons em explosões de supernova.” (NASA apud PERCY, 2014)

eram responsáveis por sua geração de energia. Os astrofísicos podiam visualizar exatamente como o Sol transformava 548 milhões de toneladas de hidrogênio em 580 milhões de toneladas de hélio, a cada segundo, transformando a massa perdida em massa luminosa. Apesar dessa taxa maciça de consumo, o Sol vai continuar a gerar energia por bilhões de anos, já que contém aproximadamente 2×10^{27} toneladas de hidrogênio (FERRIS, 1990. Traduzido por DUTRA, 1990. p. 287).¹⁵

¹⁵ Provavelmente ocorreu um erro de inversão com os números 548 e 580, uma vez que massa se converte em energia, a massa do produto deve ser menor que a do reagente, justificando a energia liberada.

4 CONCLUSÃO

O questionamento sobre o que faz as estrelas brilharem obteve seu êxito, a sua solução. Entretanto, é importante relatar que a historicidade do assunto nos permitiu explorar um pouco de como houve o progresso das ideias, das reuniões de diferentes campos do saber, e conhecer alguns dos debates no mundo científico. Os pressupostos e os contextos que cercavam o questionamento sobre a energia estelar não só influenciaram como definiram a construção da tão buscada resposta à questão: “Afinal, qual a energia das estrelas?”. Atualmente, sabemos que a energia das estrelas é originada a partir de constantes reações nucleares que transmutam elementos mais leves em elementos mais pesados. Contudo, o trabalho desenvolvido se propôs a construir uma narrativa sobre como este conhecimento surgiu e desenvolveu-se. De fato, o puro conhecimento sobre as estrelas é importante e fascinante. Entretanto, acompanhar o seu nascimento e progresso nos faz mergulhar na história e saber os porquês de tal conhecimento, explorando as suas transformações ao percorrer do tempo, identificando quais as dificuldades para a sua construção... Enfim, nós, tanto o sujeito ao punho quanto o sujeito leitor, posicionaram-se como telespectadores que viajaram no tempo através do desenvolver de conhecimentos. Foram-nos apresentados um pouco dos diálogos entre a física, a química, a astronomia, a óptica, a matemática, entre outros campos do saber, que integraram seus conhecimentos em prol da solução do questionamento: “Qual é a fonte de energia das estrelas?”.

Resumidamente, em todo o nosso percurso visualizamos as experiências de Newton em pleno século XVII, que desvendaram importantes propriedades sobre a luz e que marcaram o início da espectroscopia; visualizamos também como Bunsen e Kirchhoff conseguiram desvendar outras importantes propriedades da luz, ultrapassando os limites do planeta Terra e até mesmo de nosso sistema solar. Através da luz, de sua decomposição e exploração, observamos um pouco de como o ser humano desvendou o interior das estrelas, conhecendo a sua composição. Conhecemos também a história da identificação dos raios X em pleno final do século XIX, e como isto influenciou na descoberta da radiatividade, que transformou a concepção do que seria o átomo e o elemento. Vimos que massa a massa pode ser convertida em energia, comprovada na equação de Einstein e como isto contribuiu para a produção do conhecimento sobre as estrelas. Não podemos nos esquecer de que também houve diálogo com o conhecimento sobre o átomo na

narrativa, o modelo nuclear e a descoberta do nêutron, e como isto foi importante para a construção de uma resposta à energia das estrelas. Observamos, enfim, a reunião de conhecimentos da espectroscopia, da radioatividade, entre outros campos, que contribuíram em maior ou menor grau para a formulação de respostas sobre a energia que move as estrelas. Visualizamos também algumas das reações de fusão nuclear que ocorrem no interior das estrelas, que transformam constantemente a massa dos núcleos atômicos na energia que sustenta a estrela.

Podemos concluir que uma breve narrativa sobre as estrelas nos permitiu conhecer mundos, e atravessar séculos de construção de pensamentos e ideias sobre que tipo de energia é responsável pelo brilho das estrelas.

E por que não citar a importância de uma narrativa, que relata o passado, como uma possibilidade para a construção do presente e do futuro? Por que não pensar que a história da ciência pode ser um instrumento construtivo, que tem muito a ensinar não só sobre o passado, mas sobre os porquês do presente ser da forma como é? Por que não pensar que o histórico sobre a energia das estrelas ajudará a solucionar muitos questionamentos do tempo presente? Estas e outras perguntas pairam no pensamento, e servem de reflexão sobre a importância de explorar-se a historicidade do que conhecemos atualmente. Seja para aprimoramento dos saberes presentes, seja para desconstrução ou reformulação, seja para aprendermos a importância da conversação entre diversos campos do conhecimento, que resultam na produção da ciência, seja para nos apropriarmos da natureza da ciência.

A ciência é movida por questionamentos que geram, além da construção de conhecimentos, a desconstrução. Para se conhecer é preciso gerar ideias, mas também abandoná-las algumas vezes em busca de desenvolvimento. Afirmações que se mostraram inválidas e ideias que não tiveram reconhecimento em determinado período, se mostraram cruciais e importantíssimas no caminho da resposta ao questionamento estelar.

Podemos concluir, enfim, que mais do que as respostas que atendem a curiosidade humana, os questionamentos são a essência e a própria fundamentação de toda e qualquer ciência. Além de tudo, descobrimos que “um pequeno pontinho luminoso” aparentemente simples em nosso céu à noite tem muito a dizer; uma estrela esconde diversas verdades em meio aos encantos que atrai para si. Algumas dessas verdades já foram reveladas à humanidade, outras ainda não. Fato é que

o ser humano sempre terá o que dizer e descobrir sobre as estrelas, e também sobre sua energia. O universo das estrelas ainda não foi totalmente explorado e continuará sendo um grande desafio ao homem. O círculo vicioso de estudos e teorias nunca acabará.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAKER, Joanne. **50 Ideias de Física Que Precisa Mesmo de Saber**. Revisão de Jorge Silva. Portugal: Publicações Dom Quixote, 2011. p.140.

BETHE, H. A. **Energy Production in Stars**. New York: Cornell University, 1938. p. 1

CAMEL, Tânia. **Entre o Discreto e o Contínuo: Os Átomos de Éter**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. p. 105-114.

EDDINGTON, A. S. **The Internal Constitution of the Stars**. Cambridge: University of Cambridge, 1926. p. 289-297.

FARIA, Romildo Póvoa (Org.). As Estrelas. In: **Fundamentos de Astronomia**. Campinas, São Paulo: Papirus, 2007. p.115-137. Ed.9

FERRIS, Timothy. **O despertar na Via Láctea: uma história da astronomia**. Tradução de Waltensir Dutra. Rio de Janeiro: Campus, 1990. p.167-215.

FILGUEIRAS, Carlos Alberto Lombardi. **A Espectroscopia e a Química Da Descoberta de Novos Elementos Químicos ao Limiar da Teoria Quântica**. São Paulo: Química Nova na Escola, Universidade de São Paulo, 1996. N°3.

FIOLHAIS, Carlos. **Pré-história e história da física nuclear**. Departamento de Física da Universidade de Coimbra. Ano de publicação no site: 2000. Disponível em: < <http://nautilus.fis.uc.pt/personal/cfiolhais/extra/artigos/histfisnuclear.htm>> acesso em 20 ago. 2015.

HISTORY of astrophysics: part 1, A. The brussels journal: the voice of conservatism in Europe. Zürich, p.1-6, May. 2010. Disponível em: < <http://www.brusselsjournal.com/node/4424>> acesso em: 13 mar. 2015.

HUSSEIN, Mahir S. ; SALINAS, Silvio R. A. **100 anos da física quântica**. São Paulo: Livraria da Física, 2001. p. 138-139.

KGS. A History of astrophysics: part 2. Tundra Tabloids. [S.l], p.1-8, May. 2010. Disponível em: <<http://tundratabloids.com/2010/05/fjordman-report-history-of-astrophysics/>>. Acesso em: 13 mar. 2015.

KIRCHHOFF, Gustav; BUNSEN, Robert. **Chemical Analysis by Observation of Spectra**. Heidelberg: Annalen der Physik und der Chemie, 1860. Vol. 110. p. 161-189. Disponível em: <<http://www.chemteam.info/Chem-History/Kirchhoff-Bunsen-1860.HTML>>. Acesso em: 17 nov. 2015.

LEITE, Antônio Carlos; WAKI, Paulo Sizuo. **Hans Albrecht Bethe – fusão nuclear**. Disponível em: < <http://www.wilton.unifei.edu.br/Hans%20Bethe.pdf> > acesso em 15 set. 2015.

LOPES, David Elprin Cipio. **Espectroscopia óptica: histórico, conceitos físicos e aplicações**. 2007. Monografia do curso de licenciatura em física com ênfase em física ambiental. Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, 2007. p. 8-17.

OLIVEIRA, João Pedro Souza de. **OS PRIMÓRDIOS DA FISSÃO NUCLEAR: Rutherford e o conceito de transmutação**. Trabalho de conclusão do curso de vigilância em saúde. Rio de Janeiro: EPSJV-FIOCRUZ, 2012.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. O Sol- a nossa estrela; Estrelas. In: **Astronomia e Astrofísica**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014 (Departamento de Astronomia- Instituto de Física). p. 155-233; 244-250.

MAAR, Juergen Heinrich. **História da Química – Segunda Parte: De Lavoisier ao sistema periódico**. Florianópolis: Editora Para-Livro, 2011.

MARTINS, Roberto de Andrade. **As primeiras investigações de Marie Curie sobre elementos radioativos**. Campinas: Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência, 2013. [série 2].

MARTINS, Roberto de Andrade. **Como Becquerel não descobriu a radioatividade**. Florianópolis: Caderno Catarinense de Ensino de Física, 1990. v.7. p.27-45.

MARTINS, Roberto de Andrade. **Hipóteses e interpretação experimental: A conjectura de Poincaré e a descoberta da hiperfosforescência por Becquerel e Thompson**. Bauru: Revista Ciência & Educação (Unesp), 2004. V.10. N°3. P. 501-516.

MORAIS, Antônio Manuel Alves. Capítulos 3 e 4. In: **A Origem dos Elementos Químicos- Uma abordagem inicial**. São Paulo: Livraria da Física, 2009. Ed. 2.

PERCY, John. **Evolução das estrelas**. Conferência 1. Publicaciones de NASE. International Astronomical Union, Universidade de Toronto (Canadá). Disponível em: <<http://sac.csic.es/astrosecundaria/pt/cursos/formato/materiales/conferencias/ListaConferencias.php>> acesso em 06 set. 2014.

PIZA, A.F.R de Toledo. **Física Nuclear: conteúdo, contatos imediatos e aura**. São Paulo: Revista USP, julho/agosto 2005. n.66. p. 62-73.

RODRIGUES, Teresinha Alvarenga. O desenvolvimento da astrofísica no Brasil. In: MATSUURA, Oscar T. (Org.). **História da Astronomia no Brasil**. Recife: Companhia Editora de Pernambuco - Cepe, 2014. Vol. 1. p. 444-452.

SINGH, Simon. **Big Bang**. Tradução de Jorge Luiz Calife. Rio de Janeiro: Record, 2006. p.275-287.

THE NOBEL PRIZE. The Official Web Site of the Nobel Prize. **Hans Bethe – Facts**. Disponível em: < http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1967/bethe-facts.html> acesso em 12 jan. 2016.