

O papel de Cecilia Payne na determinação da composição estelar

The Role of Cecilia Payne in the stellar composition

Patrese Coelho Vieira^{*1}, Neusa Teresinha Massoni², Alan Alves-Brito³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Caxias do Sul, RS, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Física, Porto Alegre, RS, Brasil.

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Astronomia, Porto Alegre, RS, Brasil.

Recebido em 23 de janeiro de 2021. Revisado em 20 de abril de 2021. Aceito em 21 de abril de 2021.

O presente trabalho apresenta um relato histórico sobre a astrofísica britânico-estadunidense Cecilia Payne (1900–1979), cuja trajetória pessoal esteve envolta em dificuldades enfrentadas enquanto mulher na busca por reconhecimento e ascensão acadêmica. Exibe, também, sua importância fundamental na determinação da abundância relativa dos elementos químicos nas estrelas durante sua pesquisa de doutorado, na década de 1920. Para tal, tomamos por base tanto publicações da época, realizadas pela própria cientista e também por seus pares, quanto fontes posteriores que tratam de sua história de vida e carreira profissional. Entendemos que a tese de doutorado de Payne representa um marco na Astrofísica, por apontar a alta concentração de hidrogênio e hélio na composição das atmosferas estelares em relação aos demais elementos analisados, achado que contrariava a concepção vigente, na qual elementos metálicos, como o ferro, teriam maior preponderância. Mesmo diante de tal feito, atualmente visto como pioneiro, Cecilia Payne permaneceu subvalorizada profissionalmente por ser mulher. **Palavras-chave:** Cecilia Payne, Mulheres na Ciência, História da Ciência, Astrofísica.

The present work presents a historical account of British-American astrophysicist Cecilia Payne (1900–1979), whose personal trajectory was involved in difficulties faced as a woman in the search for recognition and academic ascension. It also exhibits her fundamental importance in the determination of the relative abundance of the chemical elements in the stars during her doctoral research in the 1920s. For that, we took as a basis publications of the time, made by the scientist herself and also by her peers, as well as later sources that deal with her life history and professional career. We understand that Payne's doctoral thesis represents a milestone in Astrophysics, as it points to the high concentration of hydrogen and helium in the composition of the stellar atmospheres in relation to the other elements analyzed, a finding that contradicted the then current conception, in which metallic elements, such as iron, would have greater preponderance. Even in the face of this feat, currently seen as a pioneer, Cecilia Payne remained professionally undervalued for being a woman.

Keywords: Cecilia Payne, Women in Science, History of Science, Astrophysics.

1. Cecilia Payne e sua Trajetória Educacional

Nascida em 1900, na pequena cidade de Wendover, Inglaterra, Cecilia Helena Payne cresceu em uma época e em um lugar no qual o acesso das mulheres à escolarização e à construção de uma carreira profissional sofria diversas restrições, fator que se entrelaça com sua trajetória ao tornar-se uma cientista pioneira na Astrofísica [1]. Suas primeiras décadas de vida ocorreram paralelamente ao período hoje conhecido como “primeira onda feminista”, entre o século XIX e o começo do século XX, marcado pela reivindicação de direitos básicos pelas mulheres, brancas e de classe média, como a equiparação da jornada de trabalho e da remuneração em relação aos homens e o direito ao voto [2, 3].

Payne passou a infância junto de seu irmão e sua irmã, ambos mais novos, em uma família de relativa estabilidade econômica, que após o falecimento do pai, quando a menina tinha somente quatro anos de idade, passou a ser chefiada pela mãe, imigrante da Prússia. Sua curiosidade por Astronomia surgiu ainda pequena, quando aos cinco anos presenciou a ocorrência de um meteoro sobre uma floresta, evento que sua mãe a explicou [4]. A partir de então, começou a identificar algumas formações e constelações no céu noturno. Foi nesse período também, que começou a se perguntar sobre a diferença de tratamentos sociais dados aos meninos e às meninas. Não entendia, por exemplo, por que seu irmão mais novo podia sair para cavalgar com seu padrinho e ela, não [1, 5].

Desde criança, Payne tinha vontade de se tornar uma cientista, mas isso não a impediu de desenvolver interesses bastante diversos, passando por Linguagens, História e Música, os quais eram atendidos pela coleção de livros

* Endereço de correspondência: patrese.vieira@caxias.ifrs.edu.br

acumulada por seus familiares ao longo de gerações. Sua vida escolar teve início em uma instituição local para meninas, onde permaneceu por seis anos, período em que adquiriu habilidades em diferentes idiomas e também, em Matemática, além de técnicas de observação e memorização.

A mudança de sua família para Londres, quando tinha doze anos, foi motivada pela necessidade de seu irmão mais novo obter uma melhor preparação para dar continuidade aos estudos. Em concomitância, Payne começou a frequentar uma escola católica, também exclusivamente feminina, que no primeiro ano não oferecia aulas de ciências em seu currículo, por entender que existiam conflitos com a doutrina religiosa. Quando estava no segundo ano na escola, a menina passou a ter aulas com a professora de ciências Dorothy Dalglish que, rapidamente, tornou-se uma referência para ela. Dalglish lecionava Química e Botânica, essa última que se converteu em uma das grandes paixões de Payne. A mesma professora lhe presenteou com livros sobre Física e Astronomia ao perceber seu interesse pela ciência.

O envolvimento direto da Inglaterra na Primeira Guerra Mundial trouxe conflitos na vida da então adolescente, incluindo a participação de um tio materno na linha de frente do exército alemão, no lado oposto aos britânicos, fazendo com que, desde então, a garota passasse a se identificar como pacifista. O prosseguimento e avanço de sua vida escolar também foi dificultado, pelo fato da professora Dalglish adoecer e precisar parar de dar aulas definitivamente, não havendo outra profissional que pudesse substituí-la de imediato.

Aos 16 anos, Payne já havia cursado todas as disciplinas sobre ciências que a escola poderia oferecer, voltando sua atenção ao aprendizado de idiomas clássicos e, em maior ênfase, de alemão e Matemática, que ela entendia terem maior importância para seguir uma carreira científica. Nessa mesma instituição, a adolescente teve uma relação conturbada com sua professora de Matemática, a qual lhe teria dito que ela jamais seria uma estudiosa, causando-lhe um bloqueio de aprendizagem na disciplina. Devido ao episódio, a escola a convidou a retirar-se, afirmando que não poderia fazer mais nada por ela, não sem antes ouvir da diretora que estaria “prostituindo seus dons” [1] ao querer se tornar uma cientista.

Apesar do transtorno, a transferência para uma nova escola mostrou-se benéfica, pois lá Payne encontrou um ambiente totalmente diferente, no qual era encorajada a estudar ciências, tendo acesso a mais livros e a laboratórios. Nessa instituição, havia aulas de Física e noções de Astronomia com a professora Ivy Pendlebury, que lhe proporcionou um novo mundo. Com essa oportunidade, a jovem conseguiu por meio de um exame, em 1919, uma bolsa para estudar Ciências Naturais no Newnham College, instituição da Universidade de Cambridge, dedicada ao ensino somente de mulheres.

Como parte do currículo básico do curso de Ciências Naturais, Payne precisou escolher três áreas principais

de estudos, optando pela Botânica, Química e Física, sendo necessário insistir para ter acesso à última, pois, usualmente, Botânica seria combinada com Zoologia. Dessa forma, pôde contemplar seus interesses, uma vez que, inicialmente, não tinha certeza em qual dessas áreas gostaria de especializar-se.

O ambiente em Cambridge era vanguardista no que se referia à ciência de ponta, uma vez que abrigava nomes importantes, como J. J. Thomson (1856–1940) e Ernest Rutherford (1871–1937), e contava com visitas e palestras de pesquisadores renomados, como Niels Bohr (1885–1962) e Irving Langmuir (1881–1957). No final de 1919, uma dessas palestras assumiu importância crucial na vida de Payne.

Arthur Eddington (1882–1944), também professor na Universidade de Cambridge, fez uma apresentação a respeito da Teoria da Relatividade, inicialmente mostrando conceitos centrais e suas consequências físicas para, então, introduzir alguns resultados experimentais, que foram obtidos a partir de observações de um eclipse solar tomadas na Ilha de Príncipe, na costa oeste africana¹, constatando que os desvios das posições esperadas de determinadas estrelas relativas à posição do Sol estariam de acordo com predições de tal teoria.

Apreciar tais resultados foi o fator decisivo para que a jovem enveredasse definitivamente para os estudos de Física e Astronomia. Payne concluiu a primeira parte do curso em dois anos, sendo três o período normalmente previsto. Infelizmente, ela não pôde acessar as aulas de Astronomia que desejava, pois o currículo acadêmico colocava tal área como um ramo da Matemática, curso no qual não estava matriculada. Assim, começou a ter aulas de Física Avançada, ministradas por Rutherford, não mais em classe somente feminina, ao contrário, passou a ser a única mulher da sala, período no qual teve de lidar com piadas e desconfianças, tanto de seus colegas quanto do próprio professor.

Ao participar de noites de observações astronômicas promovidas pelo Observatório de Cambridge, Payne passou a ter contato mais frequentemente com Eddington, que lhe recomendou diversas leituras, muitas das quais ela já havia lido. Posteriormente, Eddington tornou-se seu professor em algumas disciplinas. Nesse período, ela também reativou um observatório que estava parado no Newnham College, contudo, mesmo diante de seus esforços pessoais, ela ouviu do diretor do Observatório que jamais seria uma astrônoma, que não passaria de uma amadora [1].

Por ser mulher, ela eventualmente poderia acessar algum curso de doutorado em Cambridge, porém não receberia o título, somente a formação, mesmo caso de sua graduação [5]. Essa não seria uma preocupação para a jovem, pois seu objetivo era ter a oportunidade de seguir uma carreira como pesquisadora, independentemente de

¹ Payne, em sua descrição da referida palestra [1], não fez alusão quanto ao uso dos dados obtidos no Brasil a partir da observação do mesmo eclipse solar na cidade de Sobral, no Ceará.

titulação ou posição acadêmica. No entanto, seu futuro, caso permanecesse na Inglaterra ao término da segunda parte de sua graduação, provavelmente seria tornar-se professora em uma escola para meninas, o que não a agradava.

Payne viu uma oportunidade surgir quando um de seus professores, Leslie Comrie (1893–1950), a apresentou a Harlow Shapley (1885–1972), astrofísico que havia se tornado, recentemente, diretor do Observatório da Universidade de Harvard, nos Estados Unidos, e estava em visita à Universidade de Cambridge. Shapley era conhecido por realizar pesquisas com estrelas binárias eclipsantes e por sua medida do tamanho da Via Láctea [5]. Ela se ofereceu para trabalhar com Shapley e, posteriormente, obteve uma bolsa de pesquisa ofertada exclusivamente para mulheres. Em uma carta de recomendação, estaria escrito que, recebida a oportunidade, ela devotaria sua vida para a Astronomia e não fugiria para um casamento após alguns anos [6, 7].

Payne partiu para os EUA no fim de 1923, após concluir os estudos em Cambridge. Em Harvard, trabalhou ao lado de outras cientistas mulheres, como Annie Jump Cannon (1863–1941) e Antonia Maury (1866–1952), que em conjunto com outras pesquisadoras desempenharam papel fundamental na análise, realização de medidas e classificação de placas espectrográficas² e criação da classe espectral de Harvard, as quais inicialmente não tinham seu potencial completamente explorado. Apesar da complexidade de tal trabalho, o mesmo era entendido, naquela época, como de menor dificuldade e, consequentemente, de remuneração inferior, sendo atribuído como de “caráter feminino”. Os cientistas homens ocupavam-se, majoritariamente, do desenvolvimento de teorias, cálculos e publicações, uma vez que a escolha das funções cabia a eles [8].

Embora o objetivo de Cecilia Payne (Figura 1) ao se mudar para os Estados Unidos fosse o de continuar atuando como pesquisadora em Astronomia, foi posteriormente convencida por Shapley de que poderia transformar seu trabalho em uma tese, objetivando o título de doutora no Radcliffe College, instituição irmã de Harvard. Desse modo, começava a tomar forma aquela que já foi chamada de “*a tese mais brilhante já escrita na Astronomia*” [7].

2. Aportes sobre a Composição das Estrelas

Enquanto era estudante na Inglaterra, Payne conheceu no Observatório de Cambridge o astrofísico Edward Milne (1896–1950) que, em conjunto com o físico teórico



Figura 1: Cecilia Payne em fotografia provavelmente registrada na década de 1920. Autoria desconhecida. Disponível em: <https://hea-www.harvard.edu/~fine/Observatory/thumbs/YoungPayneHat.png>.

Ralph Fowler (1889–1944), havia formulado um estudo [9] sobre medidas de temperatura e pressão nas atmosferas estelares por meio de uma adaptação da teoria da ionização térmica³, publicada em 1920 pelo astrofísico Meghnad Saha (1893–1956), professor na Universidade de Calcutá [10, 11].

Por possuírem cunho quantitativo, os trabalhos de Saha e de Fowler e Milne estariam inseridos em uma mudança de tradição, no que se refere à investigação na Astrofísica [12], na qual abordagens desse tipo adquiriram grande relevância à medida que avanços da Física, na época, permitiam o aprofundamento de tal

² Resumidamente, as placas espectrográficas são registros do espectro da radiação emitida pelas estrelas, à época sobretudo na faixa da luz visível, impressos em materiais fotossensíveis. Tais placas possibilitavam, através do traçado de linhas verticais deixado por essa luz, estudar diferentes características físicas da estrela em questão.

³ Em linhas gerais, a teoria da ionização térmica relaciona o grau de ionização da matéria com a temperatura estelar, processo que exerce influência direta na formação e no aspecto dos espectros estelares. São os espectros que permitem a análise de diferentes propriedades das estrelas, como a própria temperatura, pressão, densidade e composição, o que exemplifica a importância de conhecer profundamente as etapas de sua formação para extrair adequadamente esses dados.

enfoque. Até então, a captação de espectros teriam auxiliado no estudo da composição estelar sobretudo por correlações de natureza qualitativa, que haviam sido frutíferas, por exemplo, na criação das classes espectrais, na identificação dos elementos químicos nas estrelas e em estabelecer uma proporção direta entre intensidade das linhas e abundância relativa dos elementos, esta última posteriormente percebida como equivocada, conforme se discutirá adiante.

Ao partir para os EUA, Payne teria como objetivo de pesquisa testar as teorias de Saha e de Fowler e Milne tendo como base o extenso acervo de placas fotográficas de espectros do Observatório de Harvard. Essa não era a ideia inicial de Shapley, que lhe havia sugerido o estudo de estrelas variáveis, com o qual ela inicialmente teria concordado, no entanto logo demonstrou seu verdadeiro interesse na interpretação física dos espectros [6].

A motivação de Payne em relação à análise física dos espectros teria surgido pouco antes de deixar a Inglaterra, por meio de um concurso anual que em 1923 premiaria o melhor ensaio sobre o tema “o estado físico da matéria a altas temperaturas” [1, 6], o qual orientava a utilização de dados físicos conhecidos e sua relação com espectros estelares. Ela não pôde participar da disputa, pois era restrita a pessoas que haviam logrado algum grau pela Universidade de Cambridge, no caso, apenas homens, uma vez que mulheres só passaram a receber títulos da respectiva universidade a partir de 1948.

A escrita de uma tese seria sua maior produção intelectual enquanto pesquisadora-bolsista, feito posteriormente adequado para uma tese de doutorado por sugestão de Shapley, que tornara-se seu orientador, em um passo para fortalecer o Departamento de Astronomia. Do ponto de vista institucional, tal modificação não foi simples, pois não existia o grau de PhD em Astrofísica no Radcliffe College naquele tempo. Inicialmente, houve uma tentativa de inscrevê-la no Departamento de Física, porém, a mesma não foi aceita pelo então responsável, Theodore Lyman, unicamente pelo fato de se tratar de uma mulher [1]. Com a negativa, Shapley agiu para que Payne pudesse se tornar PhD em Astronomia, o que ocorreu em 1925, sendo a primeira pessoa em toda Universidade de Harvard a obter tal titulação.

Sua tese de doutorado [13], *Stellar Atmospheres – A Contribution to the Observational Study of High Temperatures in the Reversing Layers of Stars* (Atmosferas Estelares – Uma contribuição ao Estudo Observacional de Altas Temperaturas em Camadas mais Internas da Atmosfera das Estrelas; livremente traduzido pelos autores), foi escolhida como a edição número um de uma série de monografias do Observatório de Harvard publicadas com intuito comercial. Sua relevância residiria em aplicar um método quantitativo, proveniente da teoria da ionização térmica, para estabelecer uma escala de temperatura para a atmosfera estelar, posteriormente empregada na medida da abundância relativa dos elementos químicos nas estrelas. Tais resultados apontariam a possibilidade de que estes corpos celestes

seriam compostos majoritariamente pelos dois elementos mais simples da tabela periódica, o hidrogênio e o hélio [12, 14].

A hipótese de Payne foi inicialmente recebida com reservas, pois confrontava diretamente a conjectura amplamente aceita [15], na qual as estrelas seriam formadas majoritariamente por elementos químicos mais complexos. Nesse sentido, uma das principais influências viria de Henry Norris Russell (1877–1957), prestigiado astrofísico e coautor do importante diagrama HR [16], que atuou como consultor externo na orientação da tese de doutorado de Payne. Russell [17] entendia que as estrelas teriam composição muito semelhante à crosta da Terra, assim, seus principais constituintes seriam sobretudo metais, como o ferro, percebidos a partir da presença de linhas fortes desses materiais nos espectros estelares, correlação de cunho qualitativo. Além disso, as amostras conhecidas de materiais que viriam de fora da Terra, como os meteoritos, possuiriam composição semelhante a do nosso planeta, o que serviria como evidência para essa concepção.

A tabela da Figura 2, compilada por Russell em 1914 [17], apresenta os elementos organizados por ordem de intensidade das linhas dos espectros solares e, portanto, de abundância, conforme entendido à altura, de acordo com medidas tomadas por meio de espectros de absorção do Sol e espectros de emissão da cromosfera solar, comparadas com a composição da crosta terrestre e de meteoritos rochosos. Russell [17] coloca que “*ao comparar as listas de Rowland [coluna 1 da tabela da Fig. 2] e Clarke [coluna 3], deparamos imediatamente com o fato – um dos lugares-comuns da Astrofísica – de que os elementos não metálicos, com exceção do carbono e do silício, quase não estão representados no espectro solar. O único cujas linhas aparecem é o oxigênio – que é de 20 a 100 vezes mais abundante em materiais acessíveis do que todos os outros juntos (exceto C e Si, como acima). Se simplesmente aceitarmos esse fato (que ainda está sem explicação adequada), e excluirmos os elementos não metálicos da comparação, a semelhança entre a ordem dos elementos restantes nas duas listas é notável*” (p. 792, livremente traduzido pelos autores). Apesar do hidrogênio aparecer em terceiro lugar nas colunas de Rowland e Mitchell, sua presença não foi comentada na referida publicação.

Em 1921, já ciente da teoria da ionização de Saha, Russell [18] explica que estrelas de coloração branca⁴, que seriam aquelas mais quentes, apresentam linhas mais fortes de gases como o hélio, pois sua elevada temperatura teria ionizado completamente os vapores metálicos, não sendo mais possível visualizar suas linhas em um espectro, motivo pelo qual estrelas amareladas, como o Sol, mais frias em comparação com as brancas, apresentariam linhas metálicas fortes, pois a energia

⁴ Na época, as estrelas brancas seriam aquelas com temperatura superior a das estrelas amarelas e vermelhas, respectivamente [18]. Corresponderiam às classes espectrais B, A e F [13].

Solar Spectrum, Dark Lines (Howland)		Chromosphere, Bright Lines (Mitchell)	Earth's Crust, Outer 10 Miles (Clarke)		Stony Meteorites (Merrill)	
1	Ca	Fe	O	49.85%	O	35.75%
2	Fe	Ti	Si	26.03	Fe	24.52
3	H	H	Al	7.28	Si	18.20
4	Na	Cr	Fe	4.12	Mg	13.80
5	Ni	Ca	Ca	3.18	S	1.85
6	Mg	V	Na	2.33	Al	1.45
7	Co	Sc	K	2.33	Ca	1.25
8	Si	Zr	Mg	2.11	Ni+Co	1.32
9	Al	C	H	0.97	Na	0.70
10	Ti	Mn	Ti	0.41	Cr	0.34
11	Cr	Mg	Cl	0.20	K	0.27
12	Sr	Ni	C	0.19	P	0.11
13	Mn	Ce	P	0.10		
14	V	Nd	S	0.10		
15	Ba	He	F	0.10		
16	C	Co	Ba	0.09		
17	Sc	Y	Mn	0.08		
18	Y	Sr	Sr	0.03		
19	Zr	Ba	Cr	0.025		
20	Mo	La	Ni+Co	0.018		
21	La	Sa	V	0.015		
22	Nb	Al	Zr	0.013		
23	Pd	Er	Cu	0.010		
24	Nd	Gd	Zn	0.004		
25	Cu	Na	Li	0.004		
26	Zn	Si	Pb	0.002		
27	Cd	Eu	Br	0.0006		
28	Ce	Zn	As	0.0004		
29	Gf	Dy	Cd	0.00002		
30	Ge	Cu				
31	Rh	Pr	Allowance for all other elements			
32	Ag	Nh	0.38			
33	Sn					
34	Pb					
35	Er					
36	K					

Figura 2: Tabela comparativa de Russell [17], que compila resultados de diferentes pesquisadores para a presença dos elementos químicos em diferentes meios, em ordem de abundância. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/pdf/1638885.pdf>.

presente seria suficiente para ionizar átomos desse tipo, de modo a produzirem espectros com linhas na faixa do visível. No entanto, permanecia com a defesa de que os vapores metálicos compunham a parte principal da massa das estrelas como um todo.

No ano de 1924, quando Cecilia Payne dedicava-se ao seu doutorado, Russell e Karl Taylor Compton (1887–1954) relataram uma explicação para o que seria um problema do hidrogênio [19]. As linhas mais fortes se davam devido a um estado metaestável desse tipo de átomo, o que também poderia ocorrer com o hélio, favorecido pelas condições apresentadas pelas atmosferas estelares. Dessa maneira, suas abundâncias seriam menores do que os espectros poderiam suscitar.

3. Atmosferas Estelares

A tese de doutorado de Cecilia Payne [13] está dividida em três partes. A primeira traz uma revisão sobre

conceitos centrais da Física Quântica e da Astrofísica, essenciais para a compreensão de sua pesquisa. Na segunda parte, é introduzida a teoria da ionização térmica de Saha e são estabelecidas relações com conceitos amplamente empregados na Astrofísica Estelar, como temperatura, pressão e suas implicações nas características dos espectros luminosos. Por fim, na terceira são explicitadas etapas que conduzem ao conhecimento da abundância relativa dos elementos químicos em diferentes estrelas.

No período em que Payne mudou-se para os Estados Unidos, no início da década de 1920, o que hoje se denomina Física Moderna e Contemporânea era um ramo do conhecimento ainda recente, em plena ebulição de novos e transformadores conceitos, como o refinamento dos modelos de estrutura atômica e sua relação com a formação de espectros de radiação, por exemplo. Por esse motivo, ela preocupou-se em apresentar tais aspectos detalhadamente, uma vez que formariam os fundamentos das investigações a serem realizadas.

A base para a compreensão da origem dos espectros analisados por Cecilia Payne e as outras cientistas do Observatório de Harvard estava na teoria atômica de Bohr, que apresenta diferentes arranjos dos elétrons em órbitas ao redor do núcleo atômico. Um elétron na órbita mais próxima ao núcleo atômico estaria no chamado estado fundamental, estado de menor energia, enquanto outro em um estado normal estaria originalmente posicionado em uma das demais órbitas possíveis, com valores maiores de energia [13].

Um átomo em seu estado normal contaria com elétrons estáveis em suas órbitas. No entanto, existe a possibilidade de transição dos elétrons entre as diferentes órbitas, o que ocorre através da interação entre matéria e energia. Quando a luz visível ou outra forma de radiação é produzida no interior de uma estrela, é necessário que ela atravessasse uma série de camadas da estrutura estelar até que seja ejetada para o espaço. Tais radiações, eventualmente, podem ser interceptadas por um observatório terrestre, o qual registra um espectro, uma imagem do contínuo do feixe de energia inerente às radiações presentes que, na época, era gravado sobre placas fotográficas.

Linhas de absorção, faixas escurecidas ou desbotadas sobre o fundo contínuo do espectro (Figura 3), são produzidas se um elétron absorve energia da radiação e transita para uma órbita mais energética, portanto, mais afastada do núcleo, tornando o átomo excitado, ou se ocorre uma ionização, quando o elétron absorve energia suficiente para escapar da influência do núcleo atômico, uma vez que a parcela da radiação relativa à determinada frequência foi capturada pelo elétron. Ao fazer o movimento contrário, indo para uma órbita de energia mais baixa, o elétron emite a radiação com a frequência que havia absorvido anteriormente, produzindo, assim, uma linha de emissão, mais clara que o fundo contínuo.

Como o valor do nível energético de cada órbita é diferente para átomos de cada tipo de elemento químico, molécula ou suas versões ionizadas, os espectros

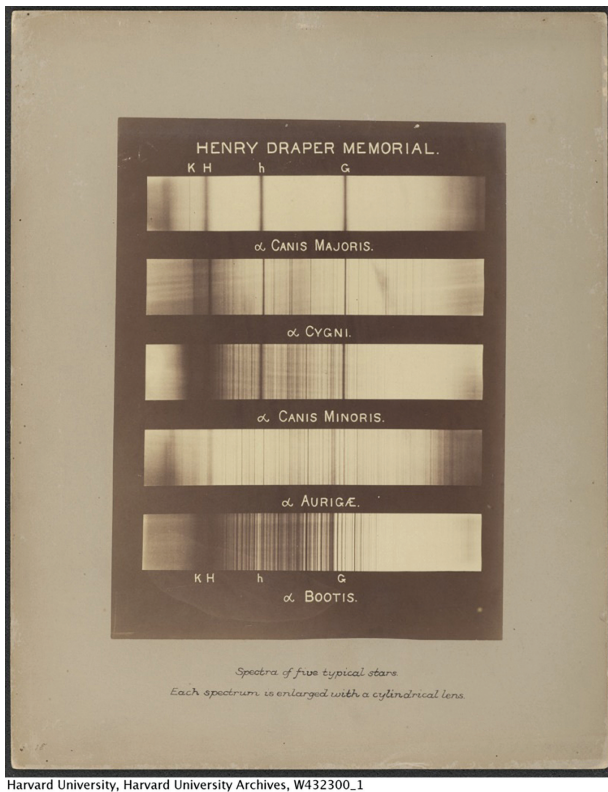


Figura 3: Exemplificação de espectros de absorção estelares produzidos entre final do Séc. XIX e início do Séc. XX pelo Harvard College Observatory. Disponível em: <http://id.lib.harvard.edu/via/olwwork432300/catalog>.

produzidos também são distintos entre si. A posição de cada linha registrada no contínuo do espectro indica o valor da energia correspondente à radiação que a produziu, podendo produzir séries principais, quando há uma transição envolvendo elétrons em seu estado normal, ou séries subordinadas, quando os elétrons estão excitados. Desse modo, a análise das placas espectrográficas permitiria verificar quais elementos estão presentes nas estrelas analisadas, pois cada tipo deixa um rastro único, de modo análogo a uma pessoa que pode ser identificada por uma impressão digital.

A intensidade das linhas de absorção no espectro seria um indicativo direto da quantidade dos elementos presentes na estrela, ou seja, quanto mais intensa for uma linha (mais escura, no caso de um espectro de absorção), maior seria a abundância desse elemento. Esse método serviu como base, por exemplo, na afirmação de que as estrelas teriam uma marcante presença de metais, como o cálcio, ferro e o titânio, em maior quantidade que o hidrogênio.

Payne entendia que um método puramente qualitativo não forneceria precisão suficiente para aferir os principais elementos presentes nas estrelas, uma vez que era sabido que fatores ambientais, como temperatura e pressão das diferentes camadas estelares, poderiam influenciar nas condições de registro dos espectros e modificar

características das linhas, como, por exemplo, deixá-las mais fortes ou fracas ou deslocá-las sobre o fundo contínuo do espectro. Dessa forma, uma linha de absorção mais intensa não necessariamente implicaria que o elemento que a criou seja mais abundante que outro responsável por uma linha mais fraca. Portanto, não informaria diretamente qual a abundância relativa desses elementos em sua composição, ou seja, qual fração da composição da estrela corresponderia a dado elemento ou composto químico.

A pressão, por exemplo, poderia deixar as linhas mais largas e desviá-las da posição esperada, o que se torna mais evidente quanto maior a sua quantidade em determinada camada da estrela. Já a temperatura modificaria a intensidade das linhas. Linhas relativas ao estado fundamental de um átomo são mais fortes quando a temperatura da estrela é mais baixa, enquanto as linhas provenientes de outras órbitas eletrônicas ficariam mais intensas à medida que a temperatura aumenta.

Como as características esperadas para as linhas de um espectro em condições controladas de temperatura e pressão eram previamente conhecidas por medidas anteriores, as diferenças encontradas em relação a esses parâmetros auxiliariam a determinar de qual camada da estrela a radiação responsável por sua formação emergiu.

A teoria da ionização térmica de Saha tem importância, pois relaciona a capacidade de ionização de uma amostra de matéria com sua temperatura. Tanto o potencial crítico de excitação (energia presente na transição de um elétron de uma órbita em seu estado normal para outra mais externa ou mais interna), quanto o potencial crítico de ionização (energia fornecida a um elétron para que ele seja removido ao infinito, ou seja, para que escape da influência do núcleo atômico), dependem da temperatura. A partir da estimativa da temperatura e da pressão para as camadas estelares, a teoria da ionização permitiria conhecer o número de átomos de cada tipo disponíveis para serem ionizados, ou seja, que são capazes de contribuir na formação de um espectro, principal recurso para desvendar suas abundâncias relativas na estrela.

Uma atenção especial recai sobre a *reversing layer*, uma fina camada estelar de transição entre a fotosfera, a região visível de uma estrela, mais densa e opaca em relação às camadas mais externas, e a cromosfera, região mais superficial e com densidade menor, geralmente não visível devido ao maior brilho da fotosfera. A *reversing layer* seria uma camada tão fina que sua opacidade seria desconsiderada. Atualmente, o termo se encontra em desuso, pois entende-se que a transição ocorre da fotosfera para a cromosfera, não havendo necessidade de uma camada extra. Na época [20], fotosfera, *reversing layer* e cromosfera, em conjunto com a coroa mais externamente, compunham a atmosfera estelar (Figura 4).

O caminho percorrido pela radiação através das camadas estelares (Figura 4) para a construção de um espectro estelar padrão era bem conhecido na época. No

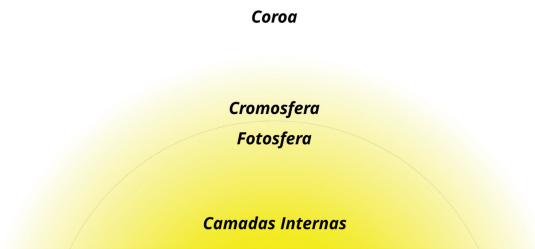


Figura 4: Representação simplificada e fora de escala de uma estrutura estelar. A “reversing layer”, camada atualmente em desuso, estaria localizada entre a fotosfera e a cromosfera, representada pela linha em cinza.

sentido do centro para fora da estrela, a radiação é emitida prioritariamente pela fotosfera e, então, emerge na *reversing layer* e na cromosfera, onde ocorre a absorção de determinadas frequências pelos diferentes tipos de átomos presentes, acarretando um espectro de absorção, caracterizado por linhas escuras em um fundo contínuo, esse último formado pela radiação remanescente da fotosfera que chegou à placa fotográfica onde o espectro foi registrado (Figura 3).

A *reversing layer* e a cromosfera seriam as principais responsáveis pelos fenômenos solares estudados através de espectros [13, 20]. Payne afirma, diante dessas colocações, que essas camadas representariam somente 10^{-11} da massa solar e 10^{-9} de seu volume, salientando que, por tal obstáculo, muitos aspectos da constituição estelar permaneceriam desconhecidos. Essa limitação tornava-se maior ao considerar que somente cerca de 25% dos espectros estelares catalogados em Harvard tinham suas linhas relacionadas a elementos e compostos químicos conhecidos ou suas formas ionizadas. Os demais eram formados, principalmente, por linhas muito finas e de baixa resolução, que dificultavam suas análises.

Outro conceito empregado na investigação da temperatura era o de temperatura efetiva, estimativa fictícia atribuída à estrela como um todo, que seria equivalente à temperatura de um corpo negro hipotético que emitiria a mesma quantidade total de radiação eletromagnética por unidade de área em dado intervalo de tempo. De modo geral, a temperatura efetiva representaria a temperatura da fotosfera, camada visível de uma estrela, imediatamente abaixo da *reversing layer*. À época, sabia-se que a temperatura de uma estrela decresceria de seu núcleo para fora até encontrar a fotosfera, portanto, a temperatura efetiva serviria como referencial para a estimativa de um gradiente de temperatura para a transição entre a fotosfera e a cromosfera.

Em uma região onde há baixa pressão e pequena concentração de matéria, como é o caso da *reversing layer* em comparação à fotosfera e outras camadas estelares mais internas, a ionização térmica seria a principal forma de ionização atômica em detrimento, por exemplo, das colisões, pois a energia captada pelos elétrons para que o átomo seja ionizado provém do próprio ambiente

ao redor, justificando a construção de uma escala de temperatura.

4. Abundância Relativa dos Elementos Químicos nas Estrelas

Saha [10, 11], em sua teoria da ionização térmica, apontou a relevância do processo na produção dos espectros estelares, através de uma abordagem que envolvia bases da Termodinâmica e da Mecânica Estatística. Tal aporte teria permitido calcular a fração de átomos ionizados em camadas da atmosfera estelar em função da temperatura e da pressão. Essa quantidade estaria relacionada com a espessura de uma linha de absorção, que depende, dentre outros fatores, da quantidade de átomos adequados a absorver radiação de determinada frequência por unidade de volume.

Ao analisar o comportamento de uma mesma linha de um elemento em espectros de estrelas de classes espectrais distintas, seria possível perceber o máximo de absorção. Com a identificação do máximo, a linha perderia força ao ser verificada nas classes espectrais vizinhas, reduzindo em espessura e nitidez, até chegar ao limite da visibilidade, dando origem a uma aparição marginal. Posteriormente, a linha desaparece por ausência de contraste com o fundo contínuo do espectro. Assumindo uma quantidade mínima de átomos necessária para criar a aparição marginal e o valor da pressão na atmosfera estelar, Saha organizou uma escala de temperatura estelar para as diferentes classes espectrais, fornecendo uma base empírica para a ideia, até então qualitativa, de que a temperatura seria o fator determinante em sua classificação.

Fowler e Milne [9], por sua vez, adaptaram a teoria da ionização térmica atribuindo maior importância ao máximo de intensidade das linhas de absorção, que possuiria identificação mais precisa que a aparição marginal, para também medir o número de átomos que contribuem na formação das linhas. Para estes pesquisadores, a aparição marginal dependeria diretamente da abundância relativa dos elementos químicos, pois uma linha fraca poderia ser produzida pela pouca quantidade do elemento, não necessariamente pela baixa ionização. Esse empecilho não era encontrado com o máximo, uma função do grau de ionização do elemento que depende da temperatura e da pressão, duas grandezas físicas que eles igualmente pretendiam mensurar.

Por meio dessa abordagem, Fowler e Milne [9] desenvolveram um método para medir a concentração máxima teórica relacionada ao máximo da intensidade da linha de absorção, o que auxiliou na determinação mais acurada da pressão e da escala de temperatura. Também apontaram possíveis desdobramentos da teoria da ionização térmica, pois acreditavam que “quando as bases da teoria forem estabelecidas, uma discussão das aparições marginais deve fornecer mais tarde informações importantes sobre a abundância relativa e o

número mínimo de átomos necessários para a aparição” (p. 404, livremente traduzido pelos autores) e que “investigadores que tiverem acesso a extensas coleções de espectros estelares serão capazes de fazer determinações mais exatas das posições dos máximos de absorção das linhas, cujas relações de série são conhecidas, do que nós fomos capazes de fazer” (p. 424, livremente traduzido pelos autores).

Payne tinha acesso a uma extensa coleção de placas espectrográficas no Observatório de Harvard [13], que serviu de base para seu teste da teoria da ionização térmica, utilizando tanto o conceito do máximo de absorção, empregado para a construção de uma escala de temperatura para a *reversing layer* nas diferentes classes espectrais, quanto o de aparição marginal das linhas espectrais, pois era de seu interesse determinar a abundância relativa dos elementos químicos na atmosfera estelar.

Dada a baixa temperatura em relação à fotosfera e às camadas mais altas da atmosfera estelar, os elementos químicos presentes na *reversing layer* tenderiam a estar em seu estado normal, não excitado, caso não se agrupem em moléculas, o que influencia na localização dos máximos e aparições marginais. Por conta disso, predominam os espectros com linhas de séries principais, caracterizadas por serem mais acentuadas. Estrelas mais frias têm séries principais mais proeminentes, formadas por linhas de Fe, Ti, Cr e Mn e séries subordinadas para Ca e Fe, todas para átomos neutros. À medida que se avança entre as classes espectrais em direção às estrelas mais quentes, tais linhas se tornam mais fracas. Nesse caso, linhas de átomos ionizados ficam mais fortes e aproximam-se de seu máximo, como ocorre com Mg⁺, C⁺ e Si⁺.

Cecilia Payne obteve novos dados, empregando dois grupos de espectros como base, para a análise da teoria da ionização. No primeiro grupo, a cientista usou linhas do espectro de Alfa do Cisne como parâmetro para a construção de uma escala de medidas de intensidade, apenas para estrelas consideradas quentes. No segundo, empregou o espectro solar com a mesma finalidade, para estrelas frias e algumas poucas estrelas quentes. Dessa maneira, construiu uma escala arbitrária de intensidade que ajudaria na identificação dos máximos de intensidade. Com o emprego da formulação de Fowler e Milne, que permite estimar a temperatura na qual dada linha atinge seu máximo, e admitindo um valor constante para a pressão parcial de elétrons, da ordem de 10^{-4} atmosferas, Payne pôde montar uma escala de temperatura para a *reversing layer* de acordo com as diferentes classes espectrais [13, 16].

Os espectros, que permitem conhecer características físicas das estrelas, também auxiliaram Payne a conjecturar que havia uma uniformidade na composição estelar. Uma evidência seria que muitas amostras de espectros seriam idênticas, no entanto, maior importância estaria no fato de que, mesmo aqueles espectros que

apresentavam diferenças entre si, poderiam ser agrupados em classes homogêneas ao longo de uma série contínua, demonstrando uma distribuição uniforme, semelhante ao que Annie Jump Cannon e outras astrônomas em Harvard haviam feito ao classificar as classes espectrais [8]. Além disso, a teoria da ionização térmica forneceria um aporte para explicar as diferenças que surgiriam entre uma classe e outra, devido às temperaturas e pressões distintas [13].

Com as temperaturas da *reversing layer* estimadas e a hipótese da uniformidade das composições, Payne passou a empregar tais conhecimentos para a determinação das abundâncias relativas dos elementos nas atmosferas estelares. Quando uma linha espectral é espessa, entende-se que a quantidade ionizável do elemento, em dada camada da atmosfera estelar, é relativamente alta, especificamente para aquele elemento que a constituiu. Por consequência, quando a linha começa a se tornar menos larga significa, que o número de átomos disponíveis para absorção teria diminuído. Para que uma mesma linha fosse capaz de manter sua espessura a radiação deveria vir de níveis cada vez mais profundos, uma vez que a temperatura se tornaria maior e por consequência elevaria o número de átomos ionizáveis por radiação térmica.

Assim, linhas largas poderiam emergir de diferentes profundidades da atmosfera estelar, chamadas de nível efetivo. À medida que a linha se torna mais fina, o nível efetivo se move em direção às camadas mais baixas da atmosfera da estrela. A redução da largura da linha espectral mostraria que sua parte central é formada em uma profundidade cada vez maior, uma vez que é a última a desaparecer. O afinamento da linha ocorre enquanto o nível efetivo desce, em um processo que pode intensificar até que ele atinja a fotosfera, ou seja, coincidindo com a *reversing layer*, formando uma aparição marginal. Isso significa que, na aparição marginal, todos os átomos do mesmo tipo acima da *reversing layer* estariam contribuindo para a formação daquela linha, o que justifica sua relevância na investigação da composição das atmosferas estelares como um todo.

A linha escura que representa o máximo de absorção não é formada por uma única linha, mas sim por uma linha larga central cercada por linhas mais finas nos extremos, chamadas asas. Quanto maior a distância entre as asas, significa que a radiação que formou tais linhas saiu de uma camada mais profunda. Se as asas estão menos espalhadas, que é o caso comum à maioria dos elementos, significa que a radiação veio de uma região mais alta da atmosfera estelar.

A aparição marginal forneceria a classe espectral na qual certa linha foi observada pela última vez, o que permitiria conhecer sua temperatura, através da escala feita por Payne. Na aparição marginal, a quantidade de átomos adequados à ionização corresponderia a apenas uma fração do total de átomos de um mesmo tipo

presentes na atmosfera estelar, quantidade chamada por Fowler e Milne de concentração fracional, que pode ser mensurada a partir do seu desenvolvimento da teoria da ionização térmica. Em outras palavras, o número de átomos que forma uma linha na aparição marginal é igual a concentração fracional [13, 21].

Payne assumiu, para a concentração fracional, que a quantidade de átomos requeridos para que as linhas de aparição marginal se formassem fosse a mesma para qualquer tipo de átomo, assim estabelecendo uma mesma base comparativa. Dessa forma, supôs que a eficiência de absorção de cada átomo, individualmente, deveria ser a mesma, justificada a partir da igualdade de condições de pressão, que seria baixa na atmosfera estelar e implicaria na maior parte da ionização ocorrendo devido à ionização térmica e não à colisões entre os átomos, e da escala de temperatura considerada para a atmosfera estelar, cuja variação, em diferentes profundidades, não comprometeria a quantidade de energia necessária para a ocorrência da ionização. O tempo de recombinação de cada átomo, após ser ionizado, também seria da mesma ordem para todos os tipos.

Conseqüentemente, uma maior concentração fracional seria um indicativo de que a abundância desse elemento seria igualmente maior, uma vez que mais átomos estariam adequados à ionização dentro de uma mesma quantidade, em comparação com o mínimo necessário à formação da aparição marginal. Seria possível, a partir do recíproco da concentração fracional calculada por meio da formulação de Fowler e Milne [9], estabelecer uma abundância relativa do elemento em questão.

Na tabela da Figura 5, foi apresentado por Payne [13] o logaritmo da abundância relativa para 18 elementos distintos, sendo que a_r indica a abundância relativa. Por exemplo, para o hidrogênio, como $\log a_r = 11$, logo $a_r = 10^{11}$. A abundância relativa ganha significado, como seu nome sugere, ao ser comparada com a de outro elemento. Para o ferro, $a_r = 10^{4,8}$, dessa forma, o hidrogênio seria abundante $10^{11}/10^{4,8} = 10^{6,2}$ vezes mais que o ferro na atmosfera estelar, ou seja, existiria mais de um milhão e

TABLE XXVIII

Atomic Number	Atom	Log a_r	Atomic Number	Atom	Log a_r	Atomic Number	Atom	Log a_r
1	H	11	13	Al	5.0	23	V	3.0
2	He	8.3	14	Si	4.8	24	Cr	3.9
	He+	12		Si+	4.9	25	Mn	4.6
3	Li	0.0		Si+++	6.0	26	Fe	4.8
6	C+	4.5	19	K	3.5	30	Zn	4.2
11	Na	5.2	20	Ca	4.8	38	Sr	1.8
12	Mg	5.6		Ca+	5.0		Sr+	1.5
	Mg+	5.5	22	Ti	4.1	54	Ba+	1.1

Figura 5: Tabela de Payne [13] com o logaritmo da abundância relativa em estrelas de diferentes elementos químicos. Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1925PhDT.....1P/abstract>.

quinhentas mil vezes mais átomos de hidrogênio do que ferro.

5. Desdobramentos dos Resultados de Payne

Os resultados encontrados por Payne [13] apontavam similaridades entre a composição das atmosferas estelares e da crosta terrestre, que seriam constituídas, majoritariamente, por elementos mais leves, considerados aqueles com número atômico abaixo de trinta, conforme Russell teria apontado, anos antes, ao considerar uma análise qualitativa dos espectros [17].

Na tabela da Figura 6, a abundância estelar está representada em porcentagem relativa. Apenas dezesseis, dos dezoito elementos investigados, estão presentes na mesma, pois foram omitidos os resultados encontrados para hidrogênio e hélio. Payne [13] argumenta que “As discrepâncias excepcionais entre as abundâncias astrofísicas e terrestres são evidentes para hidrogênio e hélio. A enorme abundância derivada desses elementos na atmosfera estelar quase certamente não é real. Provavelmente, o resultado pode ser considerado, para o hidrogênio, como outro aspecto de seu comportamento anormal, já aludido; e o hélio, que tem algumas características do comportamento astrofísico em comum com o hidrogênio, possivelmente se desvia por razões semelhantes. As linhas de ambos os átomos parecem ser muito mais persistentes, em altas e baixas temperaturas, do que as de qualquer outro elemento” (p. 188–189, livremente traduzido pelos autores).

As altas abundâncias de hidrogênio e hélio foram inicialmente encaradas como uma discrepância, não como um achado. Buscaram-se razões para justificar

TABLE XXIX

Atomic Number	Atom	Stellar Abundance	Terrestrial Abundance		Abundance Stony Meteorites
			Crust	Whole Earth	
14	Si	5.7	16.2	9.58	11.2
11	Na	5.7	2.02	0.97	0.6
12	Mg	4.2	0.42	3.38	2.8
13	Al	3.6	4.95	2.66	1.1
6	C	3.6	0.21	....	....
20	Ca	2.9	1.50	1.08	0.56
26	Fe	2.5	1.48	46.37	5.92
30	Zn	0.57	0.0011	....	....
22	Ti	0.43	0.241	0.12	....
25	Mn	0.36	0.035	0.06	....
24	Cr	0.29	0.021	0.05	0.29
19	K	0.11	1.088	0.38	0.10
23	V	0.05	0.0133	....	....
38	Sr	0.002	0.0065	....	....
54	Ba	0.005	0.0098	....	....
3	Li	0.0000	0.0829	....	....

Figura 6: Tabela de Payne [13] que compara a abundância relativa de diferentes elementos químicos presentes em estrelas, na Terra e em meteoritos rochosos. Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1925PhDT.....1P/abstract>.

que eles não seriam os elementos químicos mais abundantes nas atmosferas estelares, ainda que resultados semelhantes para o hélio já houvessem sido obtidos por Harry Plaskett (1893–1980), também explicados por um comportamento anômalo do elemento [13].

A influência de Russell sobre Shapley [6, 12], o orientador de Payne, e seu prestígio no círculo astronômico teriam exercido peso na decisão da exclusão de hidrogênio e hélio da tabela comparativa de resultados (Figura 5), contudo, não da tese como um todo. Payne [13] publicou um trecho de uma correspondência pessoal recebida de Russell, no qual ele afirma acreditar que “*mais da metade de todas as linhas fortes e com asas de espectros do Sol são linhas do ferro*” (p. 188, livremente traduzido pelos autores), portanto, os valores encontrados deveriam ser entre 3 e 5 vezes maiores que os apresentados, o que o colocaria como o elemento mais abundante nas atmosferas estelares, tal qual ocorreria na Terra como um todo. Dessa maneira, o ferro assumiria a posição, nas palavras de Russell, na qual ele “*obviamente pertence*” (p. 188, livremente traduzido pelos autores).

De acordo com Russell e Compton [19], o átomo de hidrogênio apresentaria linhas mais fortes devido a um estado quântico metaestável, no qual seu elétron se encontraria estável, entretanto em um nível mais energético que o comum. Tal estado teria sua formação favorecida em regiões das estrelas com menor pressão, como as atmosferas estelares, e pelas eventuais colisões entre os átomos, o que seria mais frequente em estrelas do tipo anã, como o Sol, por terem densidade maior em relação às gigantes. O hélio seria outro elemento químico que poderia apresentar o mesmo comportamento.

Um perfil moderado e cauteloso seria atributo de Russell quanto às suas orientações, como teria demonstrado em outras ocasiões [15], que foi mantido, em especial, no caso de Payne, por se tratar de achados que contrariavam as concepções então vigentes. Payne, por sua vez, sabia que tal decisão poderia influenciar em seu futuro profissional, tendo relatado em carta a Margaret Harwood, astrofísica e amiga pessoal, em relação a Russell que “*seu poder no mundo astronômico é outra questão, e temerei isso até o dia da minha morte, como o destino de alguém como eu poderia ser selado por ele com uma palavra*” (p. 141, livremente traduzido pelos autores).

Apesar dos receios, a tese de Payne foi particularmente bem aceita por seus pares, destacando seu grau de excelência [14, 22]. Havia recomendação de novas investigações, porém, sem se opor à alta abundância relativa de hidrogênio e hélio. A ideia perdurou e foi aprofundada nos anos seguintes [6], inclusive por Russell [23, 24] que, em artigo publicado sobre a composição solar, teria chegado, por diferente metodologia, à mesma conclusão. Décadas depois, o trabalho de Russell tornou-se referência na área, por muito tempo creditado como pioneiro ao reconhecer o hidrogênio como elemento preponderante [15]. Russell [23] citou a tese de doutorado

de Payne, inclusive a empregando como comparação para validação de seus achados, no entanto ele não se referiu aos motivos que a teriam levado a desconfiar de seus próprios resultados e afirmar que as abundâncias relativas medidas para hidrogênio e hélio provavelmente não seriam reais [6].

6. Considerações Finais

Após a publicação de sua tese, Cecilia Payne começou a trabalhar em Harvard, onde permaneceu por toda sua vida profissional. Seu cargo não possuía nome ou deveres bem definidos, cujas funções compreendiam desde lecionar e realizar pesquisas, até orientação de estudantes e edição de publicações, envolvendo assuntos que não necessariamente atendiam seus interesses particulares. Apesar da gama de afazeres, seu salário era baixíssimo; maior que o de suas outras colegas de observatório, porém menor que o de professores homens iniciantes [1].

Enquanto mulher, não era permitido a Payne assumir oficialmente o cargo de professora em Harvard, o que só ocorreu em 1956, após mais de trinta anos na instituição, tornando-se a primeira mulher a conseguir a posição em tal Universidade. Nesse tempo, a cientista casou-se com o também astrofísico Sergei Gaposchkin (passando a atender pelo sobrenome Payne-Gaposchkin) e tornou-se mãe de três filhos.

As publicações científicas de Cecilia Payne estenderam-se desde 1923 até 1979, ano em que faleceu. Ainda em vida, recebeu diferentes homenagens, incluindo o *Henry Norris Russell Prize* [25], principal premiação concedida pela *American Astronomical Society*, em 1976, tornando-se a primeira mulher a receber tal premiação, em meio a uma carreira marcada por importantes contribuições, mas, também, por menos reconhecimento e um avanço lento, que em nada remetem à sua competência.

Entende-se que a história de Cecilia Payne, seu importante legado científico e sua trajetória pessoal enquanto mulher e cientista, cujo brilho foi claramente eclipsado pelo padrão social e científico predominante à época, sucintamente apresentado neste trabalho, podem contribuir para a discussão em sala de aula na educação científica, incentivando abordagens didáticas relacionadas a temáticas presentes nos nossos dias, como as próprias questões de gênero na ciência [26], relações de poder e como a ciência é, de fato, uma construção humana colaborativa [27, 28], bem como servir de inspiração para que mais e mais meninas se interessem pela ciência, em especial, pela Física e Astrofísica.

Referências

- [1] C.H. Payne-Gaposchkin, *The Dyer's Hand (An Autobiography)* (privately printed, 1979).
- [2] A.S. Vieira, G.K. Souza e L.H. Buratto, em: *Seminário de Filosofia e Sociedade*, editado por A.S. Silva e J.L. Azeredo (UNESC, Criciúma, 2018).

- [3] B. Hooks, *Revista Brasileira de Ciência Política* **16**, 193 (2015).
- [4] D. Moore, *What Stars Are Made Of – The Life of Cecilia Payne-Gaposchkin* (Harvard University Press, Cambridge, 2020).
- [5] D. West, *The Astronomer Cecilia Payne-Gaposchkin – A Short Biography* (CreateSpace, Scotts Valley, 2015).
- [6] P.A. Kidwell, em: *Cecilia Payne-Gaposchkin: an Autobiography and Other Recollections*, editado por K. Haramundanis (Cambridge University Press, Cambridge, 1996), p. 11.
- [7] P.A. Wayman, *Astronomy & Geophysics* **43**, 1.27 (2002).
- [8] D. Sobel, *The Glass Universe: How the Ladies of the Harvard Observatory Took the Measure of the Stars* (Penguin Books, Londres, 2016).
- [9] R.H. Fowler e E.A. Milne, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **83**, 403 (1923).
- [10] M.N. Saha, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science Series 6* **40**, 472 (1920).
- [11] M.N. Saha, *Proceedings of the Royal Society of London* **99**, 135 (1921).
- [12] J.K. Hearnshaw, *The Analysis of Starlight: Two Centuries of Astronomical Spectroscopy* (Cambridge University Press, Cambridge, 2014).
- [13] C.H. Payne, *Stellar Atmospheres; a Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars*. Doctoral Thesis, Radcliffe College, Cambridge (1925).
- [14] O. Struve, *Astrophysical Journal* **64**, 204 (1926).
- [15] D.H. DeVorkin, *Journal of Astronomical History and Heritage* **13**, 139 (2010).
- [16] D.H. DeVorkin e R. Kenat, *Journal for the History of Astronomy* **14**, 102 (1983).
- [17] H.N. Russell, *Science* **39**, 791 (1914).
- [18] H.N. Russell, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **33**, 275 (1921).
- [19] H.N. Russell e K.T. Compton, *Nature* **114**, 86 (1924).
- [20] H.N. Russell e J.Q. Stewart, *Astrophysical Journal* **59**, 197 (1924).
- [21] C.H. Payne, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **11**, 192 (1925).
- [22] P.W. Merrill, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **38**, 14 (1926).
- [23] H.N. Russell, *Astrophysical Journal* **70**, 11 (1929).
- [24] D.H. DeVorkin e R. Kenat, *Journal for the History of Astronomy* **14**, 102 (1983).
- [25] C.H. Payne-Gaposchkin, *Astronomical Journal* **82**, 665 (1977).
- [26] C. Anteneodo, C. Brito, A. Alves-Brito, S.S. Alexandre, B.N. d'Avila e D.P. Menezes, *Physical Review Physics Education Research* **16**, 010136-1 (2020).
- [27] M.A. Moreira e N.T. Massoni. *Epistemologias do Século XX* (E.P.U., São Paulo, 2011).
- [28] L. Fleck. *Gênese e Desenvolvimento de um Fato Científico* (Fabrefactum, Belo Horizonte, 2010).