

Entre placas de vidro e financiamento filantrópico: gênero, materialidade e construção coletiva do Diagrama Hertzsprung-Russell – contribuições de *The Glass Universe* para o ensino de Física

Between glass plates and philanthropic funding: gender, materiality, and the collective construction of the Hertzsprung-Russell Diagram – contributions of *The Glass Universe* to physics education

Caren Rejane de Freitas Fontella^{*1}, Alan Alves-Brito²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 91791-508, Porto Alegre, RS, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

Recebido em 04 de abril de 2026. Revisado em 16 de julho de 2026. Aceito em 02 de agosto de 2026.

A História Cultural da Ciência entrecruza-se com distintos marcadores sociais e políticos para interpretar as trajetórias de cientistas e questões materiais e simbólicas basilares das ciências. No entanto, sua incorporação no ensino, na educação e na divulgação das ciências físicas ainda se apresenta como um desafio. O nosso objetivo é, por meio de diálogos com a obra *The Glass Universe*, de Dava Sobel, apresentar e problematizar questões de gênero, materialidade e financiamento filantrópico na história da astrofísica dos séculos XIX e XX, levando em conta o papel do financiamento filantrópico e o trabalho das Mulheres Computadoras do Observatório de Harvard para a materialização do Diagrama Hertzsprung-Russell, um dos resultados mais marcantes da astrofísica estelar de todos os tempos. As histórias analisadas são interpretadas a partir da concepção da História Cultural, em diálogo com contribuições da literatura. Os resultados ampliam os horizontes acadêmicos, didático-pedagógicos e culturais de distintos profissionais do ensino, da educação e da divulgação da física e da astronomia, no entendimento de que as ciências (físicas) são construções humanas, localizadas no espaço e no tempo.

Palavras-chave: Mulheres na Ciência, História da Ciência, Diagrama Hertzsprung-Russell, Educação em Astronomia, Ensino de Física.

The Cultural History of Science intertwines with diverse social and political markers in order to interpret scientists' trajectories and the fundamental material and symbolic dimensions of science. However, its incorporation into physics teaching, education and science communication remains a challenge. This study aims, through a dialogue with Dava Sobel's *The Glass Universe*, to present and critically examine issues of gender, materiality, and philanthropic funding in the history of astrophysics in the nineteenth and twentieth centuries, with particular attention to the role of philanthropic funding and the work of the Women Computers at the Harvard Observatory in the development of the Hertzsprung-Russell Diagram, one of the most significant achievements in stellar astrophysics. The analyzed narratives are interpreted from a Cultural History perspective, in dialogue with contributions from the literature. The results contribute to the development of more critical and contextualized approaches to the teaching, education and science communication of physics and astronomy, emphasizing that the physical sciences are human constructions situated in space and time.

Keywords: Women in Science, History of Science, Hertzsprung-Russell Diagram, Astronomy Education, Physics Teaching.

1. Introdução

A área de educação em ciências e, particularmente, a de ensino de física, tem avançado de maneira consistente, nas últimas décadas, na incorporação de abordagens que compreendem a ciência como prática social, histórica e culturalmente situada, com destaque para as contribuições da História Cultural da Ciência. Nesse contexto, reconhece-se que a incorporação dessas perspectivas nos

currículos da Educação Básica e do Ensino Superior e nas práticas pedagógico-culturais em museus, planetários e centros de ciências, contribui para a compreensão do conhecimento científico em suas dimensões sociais e históricas [1–3].

Entretanto, embora esse reconhecimento esteja relativamente consolidado, há, por um lado, desafios basilares de sua incorporação na formação inicial e continuada de docentes e divulgadores(as) de ciências, principalmente no caso das ciências físicas, e, por outro, carência significativa de materiais didáticos e propostas pedagógicas que possibilitem aos/às profissionais trabalhar

*Endereço de correspondência: caren.fontella@gmail.com

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

tais episódios com autonomia, profundidade e intencionalidade formativa [3, 4]. Essas lacunas se tornam ainda mais evidentes quando se considera, primeiro, a necessidade de incorporar, de maneira sistemática, as histórias de mulheres cientistas e de outros grupos historicamente marginalizados, e, segundo, as histórias por trás das construções de imagens e/ou diagramas relevantes para a ciência. De maneira geral, os livros didáticos de ciências sumarizam, sem explicações ou contextualizações históricas, os resultados científicos, destacando teorias, observações e experimentos e, quando muito, a data de nascimento e morte dos(as) cientistas em destaque. Preza-se, nesses materiais, por uma visão predominantemente internalista da ciência, na qual outras dimensões do fazer científico são pouco exploradas ou mesmo ignoradas [2].

Nesse contexto, incorporar a trajetória de mulheres cientistas e os processos envolvidos na construção de imagens, instrumentos e diagramas relevantes para a ciência não constitui apenas um gesto de justiça historiográfica, mas também uma estratégia pedagógica capaz de promover identificação, pertencimento e uma compreensão mais ampla dos valores materiais, sociais e simbólicos que atravessam a produção do conhecimento científico [2, 5, 6]. Ao entrar em contato com essas narrativas, estudantes passam a dispor de um repertório mais amplo de referências, o que contribui para a compreensão da atividade científica como um espaço historicamente construído e socialmente situado.

Além disso, trabalhar essas histórias no âmbito da História Cultural, o qual se constitui como um proeminente campo de investigação [2, 7–10], permite problematizar as próprias estruturas de poder que historicamente moldaram a ciência. Além disso, ao evidenciar as condições sociais de exclusão, as divisões de trabalho marcadas por gênero e os mecanismos de invisibilização presentes na produção do conhecimento científico, a sala de aula, bem como outros ambientes de fomento à cultura científica, tornam-se espaços de reflexão crítica sobre a ciência promovendo, assim, não apenas a aprendizagem de conceitos científicos, mas também a formação de sujeitos capazes de compreender a ciência como prática humana, atravessada por disputas, negociações e relações de poder.

Neste trabalho, a principal pergunta que nos orienta é: *como a obra The Glass Universe* [11, sem tradução ainda para a língua portuguesa] *pode ser mobilizada, à luz da História Cultural da Ciência, para reconstruir a dimensão coletiva, material e generificada da construção do Diagrama HR e produzir implicações para o ensino de Física e Astronomia?*

E, nesse sentido, o nosso principal objetivo neste trabalho é, por meio da obra *The Glass Universe*, de Dava Sobel, jornalista científica, escritora e divulgadora de ciências dos Estados Unidos, apresentar e problematizar questões de gênero, materialidade e financiamento filantrópico na história da astrofísica do século XX.

Em diálogo com resultados da literatura, nos interessa discutir o potencial narrativo e pedagógico da trajetória de cinco pesquisadoras marcantes para a história da astrofísica, conhecidas historicamente como as *Mulheres Computadoras* do Observatório de Harvard [12] e, também nesse processo, problematizar a construção do Diagrama Hertzsprung-Russell (Diagrama HR), um dos mais importantes resultados imagéticos da história da astrofísica, que são introduzidos na obra de Sobel.

Especificamente, nos propomos a, primeiro, reconstruir historiograficamente a trajetória das Mulheres Computadoras do Observatório de Harvard, evidenciando sua centralidade na consolidação da astrofísica moderna e problematizando os processos de invisibilização que marcaram a narrativa tradicional da história da ciência. Buscamos demonstrar que o trabalho de classificação, medição e organização de dados realizado por essas mulheres não se constituiu como mera atividade auxiliar, mas como elemento estruturante da produção de conhecimentos astronômicos no final do século XIX e início do século XX. E, segundo, analisamos o papel do financiamento filantrópico, com especial atenção à atuação de uma filantropa científica, Anna Palmer Draper (1839–1914), como fator decisivo na definição das agendas científicas e na institucionalização da pesquisa espectroscópica no Observatório de Harvard.

Do ponto de vista teórico-metodológico, este trabalho desenvolve uma análise histórico-interpretativa da obra *The Glass Universe* [11], orientada pelos referenciais da História Cultural da Ciência [2, 7–10]. A leitura integral da obra constituiu o ponto de partida da investigação, permitindo identificar e selecionar episódios, personagens e processos históricos particularmente relevantes para os objetivos deste estudo, especialmente aqueles relacionados às trajetórias das Mulheres Computadoras do Observatório de Harvard, à materialidade das placas fotográficas, ao financiamento filantrópico da pesquisa astronômica e à construção do Diagrama HR. Esses elementos foram analisados em diálogo com literatura historiográfica e especializada em história da ciência, astronomia e astrofísica, buscando confrontar, aprofundar e contextualizar criticamente as narrativas apresentadas por Dava Sobel, que foram também construídas a partir de trabalho rigoroso de investigação, fundamentado em ampla pesquisa historiográfica e documental.

A análise foi organizada a partir de quatro eixos interpretativos que estruturam a discussão desenvolvida ao longo do artigo: (i) as relações de gênero e a divisão do trabalho científico; (ii) a materialidade das práticas observacionais e das placas fotográficas como infraestrutura da produção do conhecimento; (iii) o financiamento filantrópico e as condições materiais que possibilitaram a consolidação da pesquisa astrofísica; e (iv) a construção coletiva do conhecimento científico, tomando como estudo de caso a gênese histórica do Diagrama HR. A partir desses eixos, discutimos as potencialidades da obra para subsidiar a elaboração

de materiais didáticos complementares e abordagens voltadas ao ensino de física e astronomia, articulando história da ciência, natureza da ciência e conteúdos de astrofísica.

Publicado em 2016, o livro *The Glass Universe* [11] constitui uma fonte narrativa particularmente fértil para explorar dimensões históricas, sociais e pedagógicas da física e da astronomia no âmbito da História Cultural. Sua escolha como objeto central deste estudo decorre não apenas da riqueza de sua narrativa, mas também de sua capacidade de reunir, em um mesmo enredo, aspectos frequentemente tratados de forma dissociada na historiografia, como os principais elementos científico-culturais que nos interessam discutir no presente artigo. Dava Sobel, autora da obra, foi nomeada, em 2022, membro da *American Physical Society*, por conta das excepcionais contribuições que tem feito ao desvelar, em processos investigativos, aspectos fundamentais da História da Física e da Astronomia, trazendo humanos e não humanos para o centro do debate. Ao analisarmos as contribuições historiográficas e pedagógicas do livro para o ensino de física e astronomia, deslocamos o foco da análise de trajetórias individuais para as condições materiais e coletivas de produção do conhecimento, propondo uma leitura da astrofísica moderna que privilegia a articulação entre práticas observacionais, organização de dados e processos de interpretação, evidenciando que a constituição de objetos científicos, como o Diagrama HR, está diretamente vinculada a essas dinâmicas. A investigação não se limita à recuperação historiográfica de contribuições femininas, mas busca sobretudo a compreensão de como a própria estrutura do conhecimento astronômico foi configurada a partir dessas práticas.

Embora a literatura em ensino de física e educação em ciências tenha produzido avanços importantes na incorporação de abordagens históricas, culturais e sociais da ciência, persistem desafios para sua efetiva mobilização no contexto educacional, especialmente no que se refere às vivências, experiências e contribuições científicas das mulheres do Observatório de Harvard. E, ainda que existam materiais didáticos e propostas pedagógicas que incorporem episódios históricos ao ensino de física, observa-se que parcela significativa dessas abordagens ainda apresenta tais episódios de forma predominantemente ilustrativa ou descontextualizada, explorando de maneira limitada as dimensões sociais, institucionais e políticas que atravessam a produção do conhecimento científico [13, 14]. Em contraposição, a narrativa reconstruída em *The Glass Universe* [11] evidencia a ciência como prática histórica e socialmente situada, dependente de financiamento privado, de estruturas administrativas, de divisão sexual do trabalho e de redes internacionais de circulação de saberes, oferecendo elementos para abordagens pedagógicas que ultrapassem perspectivas celebratórias da história da ciência.

Sobel [11] demonstra que noções fundamentais da astrofísica moderna, tais como classificação espectral, estrutura estelar e composição química das estrelas,

emergem de trajetórias humanas concretas, permeadas por controvérsias, resistências institucionais e avanços instrumentais. Explorar essas histórias em sala de aula permite aproximar os estudantes de conceitos complexos por meio de sua gênese histórica, tornando-os mais significativos e inteligíveis. Apesar da consolidação do ensino de astronomia como importante campo de investigação na educação em ciências, é particularmente pequena a presença de propostas pedagógicas que articulem conteúdos astronômicos às suas dimensões históricas, culturais e sociais [12–17], mesmo que a astronomia se constitua em uma das áreas mais mobilizadoras do imaginário científico de crianças, jovens e adultos. Essa ausência de contextualização histórica mais aprofundada se torna ainda mais significativa quando consideramos que o Diagrama HR é resultado historicamente dependente das redes de trabalho feminino descritas em *The Glass Universe* [11]. As classificações espectrais sistematizadas por Annie Jump Cannon (1863–1941), os refinamentos introduzidos por Antonia Maury (1866–1952) e o vasto conjunto de dados organizados pelas *computadoras humanas* de Harvard constituíram a base empírica que permitiu a Ejnar Hertzsprung¹ (1873–1967) e Henry Norris Russell² (1877–1957) estabelecerem as correlações entre parâmetros astrofísicos e estelares fundamentais. Desvincular o diagrama dessas trajetórias não apenas empobrece sua compreensão histórica, mas também reforça uma narrativa que privilegia nomes isolados, obscurecendo o conjunto de práticas e relações que tornaram possível a construção dessa síntese gráfica. Podemos ver que essas definições típicas e descontextualizadas, se repetem em várias referências, a exemplo:

“O Diagrama de Hertzsprung Russell, conhecido como diagrama HR, foi descoberto independentemente pelo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873–1967), em 1911, e pelo americano Henry Norris Russell (1877–1957), em 1913, como uma relação existente entre a luminosidade de uma estrela e sua temperatura superficial. Hertzsprung descobriu que estrelas da mesma cor podiam ser divididas entre luminosas, que ele chamou de gigantes, e estrelas de baixa luminosidade, que ele chamou de anãs.” [18, p. 241].

Nessa perspectiva, entendemos que o Diagrama HR é uma ferramenta imprescindível para a compreensão de processos de evolução estelar. No entanto, como exemplificado acima, a maioria das fontes, principalmente as que

¹ Formou-se como engenheiro químico em Copenhagem e St. Petersburgo e estudou eletroquímica em Leipzig. Voltou à Dinamarca em 1901 e, como amador, começou a focar seus estudos na Astronomia.

² Nascido nos Estados Unidos, Russell cresceu em uma família cujos pais foram acadêmicos da área de Matemática. Sua educação inicial foi feita em casa, na baía de Oyster, Nova Iorque, mas aos 12, começou os seus estudos na educação formal, tornando-se um dos mais respeitados astrofísicos do século XX.

possuímos em português, resume-se a contar uma história pouco clara sobre um diagrama *supostamente* desenvolvido independentemente e paralelamente por dois astrônomos. A curta descrição que estamos acostumados a ler nos livros e *sites* é pouco explicativa e convincente, corroborando com a ideia linear e a-histórica da ciência, que precisa ser problematizada.

2. As Mulheres Computadoras do Observatório do *Harvard College*

No final do século XIX, a astronomia passava por um processo de transformação marcada pela incorporação de novas técnicas observacionais, especialmente a espectroscopia e a fotografia³ astronômica, que marcaram o surgimento da astrofísica e ampliaram as possibilidades de registro e análise do céu [18, 19]. As placas de vidro permitiam fixar a luz das estrelas em suportes duráveis, preservando informações observacionais que podiam ser examinadas repetidamente ao longo do tempo. Esses registros tornaram-se artefatos epistêmicos centrais da prática astronômica e possibilitaram análises retrospectivas. A investigação astronômica passou, assim, a depender da constituição de arquivos sistemáticos de imagens do céu e da análise de grandes conjuntos de dados, alterando completamente os processos investigativos no campo e ampliando a própria ideia de Cosmologia ao longo dos séculos XX e XXI [18, 19]. Entre os protagonistas iniciais desse processo podemos destacar o médico e astrônomo amador norte-americano Henry Draper (1837–1882), cujos experimentos foram decisivos para demonstrar o potencial da fotografia como instrumento de investigação astronômica, conforme detalhadamente descrito em Sobel [11]. Bem sucedido profissionalmente e apaixonado pela astronomia, Henry Draper realizou, em um observatório instalado em sua residência, algumas das primeiras experiências bem-sucedidas de fotografia celeste, produzindo imagens da Lua, do Sol e, posteriormente, de espectros estelares. Henry Draper havia defendido, em 1857, uma tese amplamente ilustrada com daguerreótipos⁴, produzidos com o auxílio de um microscópio, evidenciando seu interesse precoce pelas possibilidades da fotografia como instrumento científico. Após concluir seus estudos, aos vinte anos de idade, Draper realizou uma viagem pela Europa durante a qual visitou o telescópio Leviatã de Parsonstown⁵. Esse contato com grandes instrumentos

astronômicos contribuiu para consolidar seu interesse pela aplicação de técnicas fotográficas à observação do céu.

Em 1872, Henry Draper fotografou o primeiro espectro estelar que mostrava linhas em absorção⁶ e, em 1880, foi o primeiro a fotografar a Nebulosa de Órion (Figura 1). Formado em medicina e de família abastada, Henry Draper casou-se com uma *socialite* rica, de nome Anna Mary Palmer (1839–1914) que, como veremos, teve papel crucial nas etapas que seguiram o fortalecimento do programa observacional do Observatório de Harvard.

A morte prematura de Henry Draper, aos 45 anos, levou Anna Draper a criar o Fundo Henry Draper (do inglês, *Henry Draper Fund*) do Observatório do *Harvard College*, que foi usado para criar o Catálogo



Figura 1: Primeira fotografia de uma nebulosa (M 42)⁷ obtida por Henry Draper em 30 de setembro de 1880. Fonte: Harvard College Observatory Plate Collection.

³ O francês Joseph Nicéphore Niépce (1765–1833) realizou, em 1826, o primeiro registro fotográfico da história, enquanto o inglês Henri Fox Talbot (1800–1877) desenvolveu, em 1841, a técnica de cópias de registros fotográficos por intermédio de um negativo.

⁴ Usando placas de cobre prateadas, trata-se do primeiro registro fotográfico comercializado, em que imagens de alta qualidade foram produzidas.

⁵ Com um espelho de 72 polegadas (1 polegada igual a 2,54 centímetros), foi considerado, por cerca de 72 anos, como o maior telescópio refletor do mundo, ajudando a desvelar no século XX a estrutura física de nebulosas. Os telescópios refratores utilizam lentes, enquanto os refletores utilizam espelhos.

⁶ O desenvolvimento da espectroscopia, nas primeiras décadas do século XIX, é fundamental para o surgimento da Astrofísica. Os estudos das linhas de absorção no Sol, por exemplo, é crucial para desafiar as ideias positivistas de Auguste Comte (1798–1857) em 1837, que afirmou que jamais conseguiríamos desvendar a composição de uma estrela, já que não poderíamos analisar, em laboratório na Terra, um pedaço das estrelas.

⁷ Denominação do objeto 42, Nebulosa de Órion, do Catálogo Messier. Trata-se de um dos mais importantes e usados catálogos em Astronomia, que lista objetos como nebulosas, galáxias e aglomerados, todos eles compilados, no século XVIII, pelo astrônomo francês Charles Messier.



Figura 2: Pickering e as Mulheres Computadoras (esquerda) em frente ao prédio do *Harvard College Observatory*, em 13 de maio de 1913. Classificando o espectro de estrelas (direita): Terceira da esquerda, sentada e com lente ampliadora: Antonia Maury; de pé, no centro, Williamina Fleming. Fonte: American Institute of Physics.

Henry Draper⁸ de espectros estelares, sob a supervisão de Edward Charles Pickering (1846–1919), um físico dinâmico, que iria contratar dezenas de mulheres para trabalhar em sua equipe, conhecidas como as Mulheres Computadoras do Observatório do *Harvard College* (Figura 2; ver também [12]).

Entre essas mulheres, estavam as lendárias Williamina Fleming (1857–1911; [20]), Antonia Maury⁹ [20], Annie Cannon [21], Henrietta Leavitt¹⁰ (1868–1921; [22]) e Cecilia Payne¹¹ (1900–1970; [23]). O principal objetivo do mapeamento era a determinação do brilho aparente de centenas de milhares de estrelas usando resolução de qualidade para a época. Queriam entender a estrutura e a natureza dos objetos estelares.

Por trás desse empreendimento científico, encontrava-se uma extensa rede de trabalho frequentemente pouco reconhecida nas narrativas tradicionais da História da Ciência, o das Mulheres Computadoras do Observatório de Harvard. A presença delas no observatório esteve diretamente associada às políticas institucionais conduzidas por Edward Charles Pickering, então diretor do observatório. Diante da crescente quantidade de dados produzidos pelos programas de observação, Pickering passou a contratar mulheres para realizar o trabalho de análise das placas de vidro e de organização dos

registros observacionais e, embora essa decisão tenha ampliado significativamente a participação feminina em atividades científicas, ela também esteve vinculada a fatores econômicos e sociais, uma vez que as mulheres eram frequentemente contratadas com salários inferiores aos de seus colegas homens e inseridas em posições hierarquicamente subordinadas dentro da estrutura institucional do observatório. Vale lembrar que o período de duração do projeto, do final do século XIX até a década dos anos 1950, corresponde sobremaneira à Primeira Onda Feminista [24, 25], em que as mulheres brancas exigiam o direito ao voto e à igualdade jurídica entre mulheres e homens, a despeito de todos os atravessamentos históricos experimentados pelas mulheres negras muito antes [24, 25].

Publicado em 1890, o catálogo Draper continha mais de 10 mil espectros estelares e é considerado o mais completo catálogo do século XIX, em que as Mulheres Computadoras classificaram, visualmente, ao longo dos anos, mais de 400 mil espectros, estabelecendo os tipos espectrais das estrelas. Esses sistemas seriam reinterpretados fisicamente, de forma decisiva, por Cecilia Payne em 1925, com base na teoria de ionização de Saha [26], permitindo relacionar tipos espectrais, temperatura e abundâncias químicas nas atmosferas estelares. Na época, a ideia bastante defendida, inclusive por Henry Russell, era de que o Sol possuía uma composição química similar à da Terra, mas a conclusão de Cecilia Payne mostrava que o Sol seria composto primariamente por hidrogênio e hélio [12], os elementos mais leves da tabela periódica.

A questão central que orientava essas investigações dizia respeito ao fato de que as estrelas, quando observadas, apresentavam colorações distintas, o que, naquele momento, mobilizava um intenso debate acerca da possibilidade de que tais diferenças estivessem associadas a estágios de evolução estelar. Nesse contexto, o estabelecimento do Catálogo Estelar do Observatório do *Harvard College* não se limitava a uma tarefa de

⁸ O Catálogo Henry Draper (HD) foi construído entre os anos 1918 e 1924, classificando mais de 225 mil estrelas. Em Astronomia, o catálogo HD é um dos mais utilizados até os nossos dias.

⁹ Sobrinha de Henry Draper e com formação em Física e Astronomia.

¹⁰ Subestimada, ela estudou estrelas variáveis (cujo brilho varia muito em questão de dias) e ficou famosa pela construção da relação período-luminosidade das Cefeidas, fundamental para o cálculo de distâncias galácticas que, sem elas, seria difícil chegarmos à Lei de Hubble.

¹¹ Escreveu a mais importante Tese de doutorado da Astrofísica (1925) de todos os tempos. Contemporânea de Henry Russell, revela, em sua autobiografia (Payne, 1984), comportamentos considerados pouco éticos por Henry Russell, um dos mais proeminentes astrofísicos à época (ver, também, [12]).

organização descritiva, mas implicava enfrentar um problema de natureza física mais ampla, que consistia em compreender de que maneira os diferentes espectros poderiam ser agrupados segundo características que fossem interpretáveis à luz das propriedades físicas das estrelas. Segundo a astrofísica contemporânea, a cor relaciona-se primariamente à temperatura efetiva, e sua conexão com a idade depende de massa, composição química e estágio evolutivo. Entretanto, naquele contexto histórico, alguns modelos interpretavam diferenças de cor como possíveis indícios de estágios evolutivos. Tal hipótese sustentava a ideia de que estrelas inicialmente mais quentes e brancas, ao longo do tempo, sofreriam processos de resfriamento que as conduziriam a tonalidades mais avermelhadas, estabelecendo, assim, uma possível sequência evolutiva. Ao mesmo tempo, a classificação estelar não se restringia a uma preocupação descritiva, mas articulava-se a interesses cosmológicos mais amplos, uma vez que se acreditava que o estudo detalhado das estrelas poderia fornecer elementos fundamentais para a compreensão da estrutura e da evolução do Universo. Vale salientar que as discussões em curso, no final do século XIX e início do século XX acerca da natureza da composição química das estrelas, também se dão em um cenário de construção e desenvolvimento da física atômica e molecular, bem como da mecânica quântica [12, 15, 27].

Nesse contexto, os estudos desenvolvidos pelo irlandês William Henry Stanley Monck (1839–1915) e o alemão Jacobus Cornelius Kapteyn (1851–1922), dois astrônomos da época, assumiram papel fundamental, na medida em que, a partir dos dados produzidos no Observatório de Harvard, eles articularam informações relativas ao *movimento próprio*¹² das estrelas com suas características espectrais, evidenciando, já em 1892, uma correlação entre essas dimensões. De modo geral, esses dois astrônomos observaram que os movimentos próprios tendiam a aumentar ao longo da sequência espectral das estrelas mais azuis em direção às mais vermelhas, ainda que as estrelas mais vermelhas não se comportassem de maneira homogênea enquanto classe. A partir dessas análises, Monck indicou que as estrelas amarelas se encontrariam, em média, mais próximas do Sol, ao passo que as estrelas vermelhas seriam, simultaneamente, mais brilhantes e de maiores dimensões, o que implicava uma reconfiguração importante das interpretações então vigentes sobre a evolução estelar, ao sugerir que estrelas gigantes dos tipos K e M poderiam preceder, em termos evolutivos, estrelas como o Sol, de tipo G.

É precisamente no interior desse conjunto de problemas que se insere o trabalho desenvolvido pelas

Mulheres Computadoras do Observatório de Harvard, cuja atuação foi decisiva, tanto para a consolidação dos sistemas de classificação espectral, quanto para a identificação de padrões na distribuição das estrelas. Elas contribuíram de maneira fundamental para a organização e sistematização dos dados espectrais, permitindo que essas informações fossem analisadas de forma comparativa e interpretadas em termos físicos. Conforme observa Dava Sobel no prefácio de *The Glass Universe* [11], essas mulheres se destacavam por suas habilidades matemáticas, por sua dedicação à observação e análise dos dados astronômicos, ou pela articulação entre essas competências, sendo que parte delas era oriunda de faculdades femininas recentemente fundadas, enquanto outras apenas possuíam formação escolar básica, aliada a um notável talento para o trabalho científico. Mesmo inseridas em um contexto histórico anterior à conquista de direitos civis fundamentais, como o voto feminino, diversas dessas pesquisadoras produziram contribuições de tanta relevância que seus nomes passaram a ocupar posições de destaque na História da Astronomia, ainda que, em muitos casos, esse reconhecimento tenha se dado de forma tardia ou parcial. Esse dado revela que, do ponto de vista histórico, as questões de gênero, nas relações interseccionais com outros marcadores sociais da diferença (raça, classe, localização geográfica, entre outros), precisam ser levadas em consideração. A subrepresentação das mulheres na física e na astronomia segue sendo uma realidade, que não pode ser tratada como um dado natural, mas parte dos processos sociais, culturais e políticos [24, 28–30].

Apesar da relevância de suas contribuições, a trajetória das pesquisadoras do Observatório de Harvard foi atravessada por limitações estruturais impostas às mulheres no campo científico do período, de modo que, mesmo diante de elevada competência técnica e intelectual, muitas permaneceram restritas a posições institucionais subordinadas, com salários inferiores e com possibilidades de progressão profissional significativamente limitadas. Cecilia Payne, por exemplo, cuja tese está entre as mais importantes no campo da astronomia, de todos os tempos, foi reconhecida tardiamente. Tal dinâmica pode ser compreendida à luz do que a literatura sociológica posteriormente conceituaria como *teto de vidro*, expressão associada aos estudos organizacionais e difundida por Marilyn Loden [31] para designar barreiras invisíveis que restringem a ascensão profissional de mulheres, mesmo na ausência de impedimentos formais explícitos, bem como em diálogo com análises historiográficas como as de Margaret W. Rossiter [32], que evidenciam os mecanismos pelos quais a produção científica feminina foi sistematicamente deslocada para posições marginais nas narrativas da ciência. Nesse contexto, o trabalho das chamadas computadoras do Observatório do *Harvard College* ultrapassa a dimensão descritiva ou organizacional, na medida em que participa diretamente da constituição das regularidades empíricas

¹² No movimento de uma estrela em relação à linha de visada de um observador(a) localizado(a) na Terra, o movimento próprio corresponde à variação angular aparente da posição da estrela ao longo do tempo, geralmente expressa em segundos de arco por ano. Sem a compreensão do movimento próprio fica difícil revelar as posições aparentes das estrelas. A junção das informações cinemáticas e espectroscópicas nos ajuda a revelar dimensões mais profundas da estrutura galáctica.

a partir das quais os problemas astronômicos passam a ser formulados.

É justamente nesse ponto, à luz dos estudos da História Cultural [2, 7, 10], que se desloca o eixo interpretativo deste trabalho, no qual mais do que recuperar trajetórias individuais ou denunciar processos de invisibilização já amplamente reconhecidos pela literatura, tratamos de compreender como a produção do conhecimento astronômico moderno esteve intrinsecamente vinculada a uma infraestrutura de práticas, técnicas e saberes historicamente situados, cuja materialidade e cuja divisão social do trabalho foram decisivas para a constituição de objetos científicos. É também nesse contexto que o Diagrama HR passa a ser compreendido como resultado de um processo de produção de dados sustentado por um amplo conjunto de contribuições, entre as quais se destaca o trabalho das Mulheres Computadoras.

As trajetórias de Williamina Fleming, Antonia Maury, Annie Jump Cannon, Henrietta Leavitt e Cecilia Payne-Gaposchkin devem, portanto, ser compreendidas no interior dessas dinâmicas, não como percursos individuais isolados, mas como expressões de um mesmo processo de produção do conhecimento (a ciência como uma produção coletiva), no qual a análise minuciosa das placas de vidro (Figura 3) e a construção de sistemas classificatórios desempenharam papel central.

Ao invés de constituírem etapas secundárias ou meramente preparatórias, essas práticas participaram diretamente da formulação dos problemas científicos que orientariam a astrofísica nascente, redefinindo as relações entre observação, classificação e interpretação teórica e, portanto, legando para a ciência uma outra compreensão do que ela é, e de como os seus métodos e procedimentos se organizam. O trabalho observacional, classificatório, computacional e interpretativo desenvolvido pelas Mulheres Computadoras revela, acima de tudo, um potencial criativo excepcional, levando em conta o próprio contexto da ciência em desenvolvimento. Sem a infraestrutura observacional e classificatória construída

pelas Mulheres Computadoras, bem como as condições materiais que possibilitaram sua consolidação, importantes desenvolvimentos da Astrofísica do século XX, tais como, a descoberta da Lei de Hubble-Lemaître [18] e dos artigos clássicos voltados para a discussão da nucleossíntese (gênese dos elementos químicos da tabela periódica) primordial e estelar [26, 33], provavelmente teriam seguido percursos distintos. Esses resultados foram cruciais para nos ajudar a ampliar os horizontes científicos acerca do Universo e sobre a compreensão do que é Cosmologia, nas suas interrelações teórico-observacionais com a física e a astronomia.

Em outras palavras, argumentamos que é impossível pensar, na contemporaneidade, sobre os desenvolvimentos em cosmologia física, sem as bases observacionais mobilizadas pelo trabalho das Mulheres Computadoras no final do século XIX. Suas contribuições permitiram não apenas organizar as estrelas, uma a uma, visualmente, criando e consolidando a sequência espectral (OBAFGKM) em uma lógica quantitativa das estrelas a partir de observáveis astrofísicos. Na virada do século XIX para o século XX, o pensamento corrente era de que as distintas classes espectrais expressavam composições químicas variadas. O trabalho de tese de Cecilia Payne [34] foi, nesse sentido, basilar, pois ela usou a classificação espectral das Mulheres Computadoras para não apenas demonstrar a homogeneidade química, mas também para desbancar as ideias correntes que sustentavam que os elementos químicos mais pesados seriam os mais predominantes nas estrelas. O trabalho de Cecilia Payne, somando-se aos primeiros estudos em física atômica e molecular, foi crítico para ampliar os estudos de espectros estelares em astrofísica a partir da determinação de temperaturas, as quais também são fundamentais para as medidas precisas de abundâncias químicas em estrelas. Do ponto de vista dos estudos de estrutura estelar, vale lembrar que uma estrela não pode ser estudada em detalhes sem a medida, por exemplo, de parâmetros astrofísicos fundamentais como a massa, o raio, a densidade (massa/volume) e a luminosidade.

Conforme será discutido mais adiante nesse texto, o Diagramas HR representa, também, um laboratório astrofísico fascinante para estudar a evolução estelar, ou seja, para investigar em detalhes como grandezas importantes como luminosidade, temperatura e raio variam ao longo da vida de uma estrela. Por outro lado, sem as classificações espectrais e as medidas de temperatura e luminosidade estelares, o Diagrama HR não poderia ser proposto. Nos anos seguintes aos desdobramentos da classificação espectral do Observatório de Harvard, da tese de Cecilia Payne, dos desdobramentos dos estudos voltados ao Diagrama HR, e, em paralelo, como consequência dos avanços em física atômica, molecular e nuclear, surgem as primeiras descrições (modelos), baseadas em física e astrofísica sólidas, para explicar como as estrelas evoluem e, daí, compreender como a produção dos distintos elementos químicos se dá no Universo.

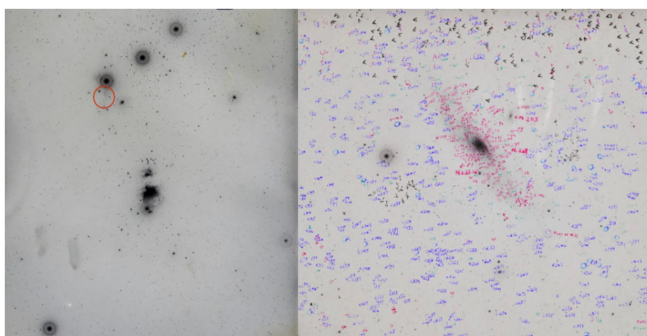


Figura 3: Imagem em placa de vidro do Cinturão de Órion (esquerda): a nebulosa Cabeça de Cavalo, descoberta por Williamina Fleming nesta placa, está destacada em círculo. Imagem da placa de Vidro (Glass Plate MC27415) (direita): Galáxia de Andrômeda. Fonte: The Harvard Plate Stacks – StarGlass.

2.1. Williamina Fleming

Williamina Paton Fleming foi uma mulher brilhante, obstinada e corajosa, que dedicou boa parte de sua vida ao Observatório do *Harvard College* [35]. Sua trajetória insere-se de maneira particularmente expressiva no processo de reorganização do trabalho científico que marcou o desenvolvimento da astronomia no final do século XIX, evidenciando como a consolidação de novas práticas observacionais esteve diretamente associada à constituição de formas específicas de divisão do trabalho no interior das instituições científicas. Nascida em Dundee, na Escócia, e posteriormente emigrada para os Estados Unidos, teve sua inserção inicial no mercado de trabalho marcada por vulnerabilidade social, tendo que atuar como empregada doméstica na residência de Edward Charles Pickering após ter sido abandonada pelo marido durante a gravidez [11].

Foi assim que se deu sua incorporação ao Observatório do *Harvard College*, em um movimento que ilustra não apenas trajetórias individuais de mobilidade social, mas também a própria reconfiguração das atividades científicas naquele período, na medida em que a crescente produção de registros fotográficos do céu exigia a formação de um corpo de trabalhadores dedicado à análise sistemática desses materiais. Pickering, ao reconhecer suas habilidades analíticas, lhe ofereceu uma posição na instituição, onde Williamina Fleming passou progressivamente a assumir funções centrais na organização do trabalho de classificação espectral, desempenhando também atribuições administrativas e de coordenação das atividades desenvolvidas pelas demais computadoradoras [11, 18, 36, 37].

No plano do trabalho científico em específico, sua contribuição esteve diretamente relacionada à elaboração de um dos primeiros sistemas de classificação espectral utilizados em Harvard, estruturado a partir da intensidade das linhas de hidrogênio observadas nos espectros estelares. A partir da análise das placas fotográficas de vidro, Williamina Fleming identificou a necessidade de distinguir um número muito maior de variações espectrais do que aquelas inicialmente consideradas, desenvolvendo um sistema composto por vinte e duas classes e aplicando-o à classificação de mais de dez mil estrelas no Catálogo Draper [11, 18, 36]. Esse esforço não apenas ampliou o repertório de dados disponíveis, mas também estabeleceu uma base sistemática a partir da qual classificações posteriores poderiam ser refinadas, especialmente nos trabalhos desenvolvidos por Antonia Maury e Annie Jump Cannon.

Além da organização e classificação dos espectros, Williamina Fleming realizou diversas identificações de objetos celestes, incluindo estrelas variáveis, novas e nebulosas registradas nas placas analisadas no observatório, entre as quais se destaca a identificação da Nebulosa Cabeça de Cavalo, posteriormente reconhecida como uma das estruturas mais emblemáticas associadas a regiões de formação estelar. Essas contribuições

evidenciam que a análise das placas fotográficas de vidro implicava um processo ativo de investigação, no qual a observação sistemática e a comparação entre registros permitiam a identificação de fenômenos ainda não descritos.

Sua atuação no observatório também assumiu uma dimensão organizacional relevante, na medida em que passou a supervisionar o trabalho das demais *computadoras*, desempenhando um papel de liderança técnica que, embora não formalizado institucionalmente, foi fundamental para a consolidação das rotinas de análise e classificação adotadas em *Harvard* [11]. Tal posição evidencia que, mesmo em um contexto marcado por hierarquias de gênero, determinadas pesquisadoras conseguiram ocupar espaços de centralidade na produção do conhecimento, ainda que sem o correspondente reconhecimento institucional pleno.

Nesse sentido, o trabalho de Williamina Fleming pode ser compreendido como um momento inaugural na constituição de uma infraestrutura de produção de dados espectrais, na qual a análise sistemática das placas fotográficas de vidro e a organização de classificações consistentes permitiram transformar observações dispersas em um conjunto estruturado de informações. Essa transformação foi decisiva para a emergência de regularidades empíricas que, posteriormente, possibilitariam a formulação de interpretações mais abrangentes no campo da astrofísica, evidenciando que a produção do conhecimento científico não se organiza apenas em torno de formulações teóricas, mas depende de maneira fundamental das práticas materiais que tornam tais formulações possíveis.

A experiência de Williamina Fleming na astrofísica nos leva ainda a refletir, na atualidade, sobre como as intersecções de classe, gênero e raça são aspectos relevantes para o estudo da História Cultural da Ciência. A maternidade na ciência segue sendo um tema quente de debate [38]. Além disso, por questões históricas, sabemos que grande parte das empregadas domésticas no Brasil são mulheres negras, as quais, paradoxalmente, são subrepresentadas na física [29, 30]. A contribuição das mulheres negras empregadas domésticas e babás, bem como de técnicas de laboratórios/observatórios, é ainda pouco estudada na História da Ciência.

2.2. Antonia Caetana de Paiva Pereira Maury

No contexto das pesquisas financiadas pelo *Henry Draper Memorial*¹³, Edward Pickering encarregou Antonia Caetana de Paiva Pereira Maury da condução de um grande projeto de investigação espectroscópica, cuja iniciativa buscava aprofundar e refinar os sistemas de classificação estelar em desenvolvimento no Observatório [36].

¹³ O Henry Draper Memorial foi um programa de pesquisa financiado por Anna Palmer Draper no Harvard College Observatory, criado após a morte de Henry Draper, com o objetivo de dar continuidade aos estudos espectroscópicos iniciados por ele.

Miss Antonia Maury nasceu em Cold Spring, no estado de Nova York, em uma família diretamente vinculada à prática científica, sendo sobrinha de Henry Draper e de Anna Palmer Draper. Esse contexto familiar lhe proporcionou contato precoce com a astronomia e com as práticas observacionais associadas à espectroscopia e, diferentemente de parte de suas colegas no observatório, recebeu formação acadêmica formal, graduando-se no *Vassar College*.

Inserida em um ambiente no qual a produção de grandes catálogos dependia da análise sistemática de placas de vidro, Antonia Maury conduziu investigações voltadas ao refinamento dos sistemas de classificação espectral. Para isso, trabalhou com espectros obtidos por meio de técnicas que permitiam registrar, em uma única imagem, centenas de estrelas, o que ampliava significativamente o volume de dados disponíveis e exigia novos critérios de organização e interpretação [11].

A partir da análise dos espectros de estrelas brilhantes do Hemisfério Norte, Antonia Maury elaborou uma proposta classificatória que se distinguiu de maneira significativa dos modelos anteriores, especialmente daquele desenvolvido sob a coordenação de Williamina Fleming, ao introduzir critérios relacionados à forma, à largura e à nitidez das linhas espectrais, buscando uma organização capaz de discriminar propriedades físicas subjacentes às atmosferas estelares [11]. Essa preocupação com a estrutura fina dos espectros aproximava sua proposta de uma leitura mais interpretativa dos dados, em contraste com abordagens voltadas predominantemente à padronização e à rapidez classificatória.

Essa abordagem resultou na elaboração de um sistema classificatório mais complexo e detalhado, cuja sofisticação analítica permitia distinguir variações espectrais que não eram capturadas pelos modelos anteriores, ainda que sua aplicação em larga escala se mostrasse mais difícil, entrando em tensão com as prioridades institucionais do observatório, que estavam orientadas à produção extensiva de catálogos estelares a partir de grandes conjuntos de dados [11]. Esse descompasso evidencia não apenas uma divergência metodológica, mas diferentes concepções acerca da própria finalidade da classificação espectral, ora entendida como instrumento de ordenação empírica, ora como meio de acesso às propriedades físicas das estrelas.

As consequências dessa tensão foram significativas para sua trajetória, uma vez que seu trabalho acabou sendo publicado separadamente, em vez de plenamente incorporado ao sistema adotado no *Henry Draper Catalogue* [39], contribuindo para a circulação restrita de sua proposta no interior do observatório [36]. Sua correspondência com Pickering revela uma clara consciência do caráter autoral de sua investigação, ao reivindicar reconhecimento pelas dimensões teóricas de seu trabalho, e, ainda assim, seu estudo tornou-se, em 1897, o primeiro volume dos *Harvard Annals* a apresentar o nome de uma mulher na página de título [36].

Do ponto de vista historiográfico, a relevância do trabalho de Antonia Maury torna-se ainda mais evidente quando se considera sua influência sobre investigações posteriores, especialmente aquelas conduzidas por Ejnar Hertzsprung, que se apoiou nas distinções estabelecidas por Antonia Maury para identificar diferenças entre estrelas de mesma classe espectral, possibilitando a distinção entre estrelas gigantes e anãs [36]. Nesse sentido, o nível de detalhamento introduzido por sua classificação não apenas ampliou a capacidade descritiva dos espectros, mas participou diretamente da constituição das condições de possibilidade para a identificação de padrões físicos que seriam posteriormente formalizados no Diagrama HR, evidenciando o caráter estruturante de sua contribuição para a astrofísica estelar.

2.3. Annie Jump Cannon

A trajetória de Annie Jump Cannon representa um momento de estabilização e difusão dos sistemas de classificação espectral desenvolvidos no Observatório do *Harvard College*, no qual a organização dos dados observacionais atinge um grau de sistematicidade que permite sua ampla adoção pela comunidade astronômica. Nascida em Dover, no estado de Delaware, Annie Cannon cresceu em um ambiente familiar que valorizava a educação, tendo seu interesse pela astronomia sido incentivado desde a infância, especialmente por sua mãe, que lhe ensinou a reconhecer constelações no céu noturno [36]. Sua formação no *Wellesley College* lhe proporcionou acesso a uma educação científica formal, incluindo o contato com técnicas de observação e instrumentos astronômicos [11].

Sua incorporação ao Observatório, em 1896, ocorreu no contexto da ampliação das atividades de análise das placas de vidro, passando a integrar o grupo responsável pela organização sistemática dos espectros estelares [11]. A partir das classificações previamente desenvolvidas por Williamina Fleming e refinadas por Antonia Maury, Annie Cannon reorganizou as categorias em uma sequência espectral simples e funcional, posteriormente consolidada como uma sequência fortemente correlacionada à temperatura superficial das estrelas, a sequência espectral O, B, A, F, G, K e M [18, 36], em ordem decrescente de temperatura.

A força de seu sistema residia na capacidade de articular coerência física e padronização classificatória em larga escala, tornando comparáveis conjuntos extensos de dados e permitindo que regularidades espectrais fossem reconhecidas de maneira consistente pela comunidade astronômica [36]. Ao estabelecer uma sequência simples, estável e amplamente aplicável, Annie Cannon não apenas reorganizou classificações anteriores, mas instituiu um padrão de referência que possibilitou a circulação, a comparação e a cumulatividade dos dados produzidos em diferentes contextos observacionais. Nesse sentido, seu trabalho não apenas ampliou o alcance das classificações espectrais, mas redefiniu as condições sob

as quais essas classificações poderiam operar como base para investigações astrofísicas posteriores.

Sua habilidade na identificação de padrões espectrais é destacada por Sobel [11], que aponta sua capacidade de classificar dezenas de estrelas por minuto a partir da análise das placas fotográficas, resultado de uma familiaridade extremamente refinada com os espectros estelares.

No plano institucional, Annie Cannon alcançou reconhecimento significativo, tornando-se membro de diversas sociedades científicas, incluindo a *American Philosophical Society*, a *International Astronomical Union* e a *American Astronomical Society*, além de membro honorária da *Royal Astronomical Society* [36]. Em 1925, tornou-se a primeira mulher a receber o título honorário de Doutora em Ciências pela Universidade de Oxford, e, apenas em 1938, Harvard lhe concedeu uma nomeação institucional formal como astrônoma William Cranch Bond [36].

No contexto mais amplo do desenvolvimento da astrofísica, seu trabalho impactou profundamente a forma como os astrônomos passaram a compreender as estrelas, pois ao organizar a diversidade espectral em uma sequência coerente e estruturada, sua classificação forneceu a base classificatória a partir da qual se tornaram possíveis comparações sistemáticas entre estrelas de diferentes regiões do céu, permitindo que padrões globais de distribuição e evolução estelar fossem progressivamente identificados.

2.4. Henrietta Swan Leavitt

O trabalho de Henrietta Swan Leavitt assume uma posição singular no Observatório do *Harvard College*, ao evidenciar como a identificação de regularidades empíricas, a partir da comparação reiterada de registros fotográficos, podia conduzir à formulação de relações fundamentais para a compreensão da estrutura do universo. Inserida no contexto das investigações conduzidas no âmbito do *Henry Draper Memorial*, Henrietta Leavitt dedicou-se ao estudo de estrelas variáveis, particularmente aquelas registradas nas placas fotográficas de vidro das Nuvens de Magalhães¹⁴, cuja relativa uniformidade de distância permitia estabelecer comparações mais controladas entre diferentes objetos estelares [11, 36]. Seu trabalho consistia na análise minuciosa de séries de placas obtidas em momentos distintos, por meio das quais identificava variações de brilho e determinava com precisão os períodos dessas oscilações, em um processo que exigia não apenas rigor metodológico, mas também a capacidade de reconhecer padrões sutis em conjuntos extensos de dados observacionais. Foi a partir desse procedimento, ancorado na repetição sistemática e na comparação visual entre registros fotográficos, que Henrietta Leavitt identificou uma relação consistente

entre o período de variação e a luminosidade intrínseca das estrelas do tipo cefeida, observando que estrelas com períodos mais longos apresentavam maior luminosidade real.

A formulação dessa relação, posteriormente conhecida como relação período-luminosidade, representou um deslocamento significativo no interior da prática astronômica, ao permitir que propriedades observacionais fossem utilizadas como indicadores confiáveis de grandezas físicas não diretamente acessíveis, como a distância. Ao estabelecer uma correspondência sistemática entre o período de variação e a luminosidade intrínseca das estrelas do tipo cefeida, Henrietta Leavitt tornou possível a determinação indireta de distâncias estelares e, posteriormente, extragalácticas [40]. Com isso, a astronomia deixou de operar predominantemente no plano descritivo para passar a dispor de instrumentos que permitissem quantificar a estrutura do universo, estabelecendo as bases empíricas para a construção da escala de distâncias cósmicas.

Nesse sentido, sua contribuição ultrapassa o âmbito de uma descoberta isolada, inserindo-se em um processo mais amplo de transformação das práticas observacionais em instrumentos de inferência física, no qual a análise sistemática de dados passa a desempenhar papel central na produção de conhecimento astronômico. A utilização posterior dessa relação por diferentes astrônomos, em investigações voltadas à determinação de distâncias galácticas e extragalácticas, evidencia que o resultado obtido por Henrietta Leavitt não apenas ampliou o repertório técnico da astronomia, mas redefiniu as condições de possibilidade para a investigação da estrutura em larga escala do universo, deslocando a astronomia de um campo centrado na descrição de objetos individuais para uma ciência capaz de analisar a organização espacial do cosmos.

Embora Henrietta Leavitt não tenha acompanhado plenamente o impacto científico de sua descoberta, seu trabalho tornou-se rapidamente um dos grandes pilares da astronomia extragaláctica. A relação período-luminosidade seria utilizada posteriormente por diversos astrônomos para determinar distâncias de aglomerados estelares e galáxias próximas, desempenhando papel decisivo em pesquisas que ampliariam significativamente a compreensão da estrutura do cosmos. Entre os cientistas que empregaram esse método está Edwin Hubble (1889–1953), cuja identificação de estrelas cefeidas na galáxia de Andrômeda demonstrou que essa estrutura não pertencia à Via Láctea, mas constituía uma galáxia independente, resultado que ampliou de maneira decisiva a concepção científica sobre a verdadeira escala do universo.

Do ponto de vista historiográfico, o trabalho de Henrietta Leavitt permite compreender de maneira particularmente clara como a produção de conhecimento na astrofísica moderna esteve ancorada em práticas coletivas, materiais e reiterativas, nas quais a observação, o registro e a comparação sistemática de dados

¹⁴ Pequena Nuvem de Magalhães e Grande Nuvem de Magalhães, duas galáxias irregulares satélites da Via Láctea.

constituíram elementos estruturantes. A identificação da relação período-luminosidade não emerge, portanto, de um momento isolado de descoberta, mas de um processo contínuo de análise de placas fotográficas, evidenciando que a construção das bases empíricas da astronomia do século XX dependeu diretamente dessas formas de trabalho, frequentemente situadas em posições institucionais de menor visibilidade, mas centrais para a constituição do conhecimento científico.

2.5. Cecilia Payne-Gaposchkin

A trajetória de Cecilia Payne-Gaposchkin marca um ponto de inflexão na História da Astrofísica ao deslocar o eixo da investigação astronômica da organização empírica dos dados para sua interpretação física, transformando em problema teórico aquilo que, até então, se apresentava predominantemente como tarefa de classificação e ordenamento dos espectros estelares. A tese de Patrese Vieira apresenta, em detalhes, a vida e a obra de Cecilia Payne, em um trabalho seminal de História da Ciência no âmbito do ensino de física [12, 23]. A inserção de Cecilia Payne no Observatório do *Harvard College*, a partir de 1923, sob a direção de Harlow Shapley (1885–1972), ocorre em um momento em que já se encontrava consolidado um extenso corpo de dados espectrais produzido ao longo de décadas pelas chamadas computadoradoras, cuja organização havia sido progressivamente estruturada a partir das contribuições de Williamina Fleming, posteriormente refinada por Antonia Maury, sistematizada em larga escala por Annie Jump Cannon e expandida, no plano das regularidades empíricas, pelo trabalho de Henrietta Swan Leavitt [11].

É nesse cenário que a formação de Cecilia Payne e seu contato com os desenvolvimentos da física atômica e molecular assumem papel decisivo, sobretudo a partir da incorporação da Teoria de Ionização Térmica proposta por Meghnad Saha (1893–1956), que estabelecia uma relação quantitativa entre temperatura, pressão e o grau de ionização dos elementos químicos [26]. Ao mobilizar esse referencial teórico, em articulação com contribuições de Ralph Howard Fowler (1889–1944) e Edward Arthur Milne (1896–1950), Cecilia Payne passa a reinterpretar os espectros estelares não mais como simples critérios classificatórios, mas como expressões diretas das condições físicas presentes nas atmosferas das estrelas, deslocando o foco da identificação de padrões para a compreensão dos processos que os produzem [12].

Sua tese de doutorado, defendida em 1925 sob o título *Stellar Atmospheres: A Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars* [34, 41], constitui, nesse sentido, uma ruptura epistemológica ao demonstrar que a composição das estrelas é dominada por hidrogênio e hélio, resultado que contrariava frontalmente a concepção vigente, segundo a qual a constituição química dos astros deveria refletir proporções semelhantes às observadas na Terra. Um dos grandes defensores da ideia de que a constituição

química dos astros deveria refletir proporções semelhantes às observadas na Terra era, exatamente, um dos mais prestigiados e poderosos astrofísicos da época: Henry Norris Russell, um dos cientistas envolvidos na descoberta/proposição do Diagrama HR. Mais do que propor uma nova estimativa de abundâncias, Cecilia Payne estabeleceu uma relação consistente entre os tipos espectrais e a temperatura estelar, evidenciando que as diferenças observadas nos espectros decorrem fundamentalmente de condições físicas nas atmosferas estelares, e não de variações substanciais em sua composição química. Ela experimentou, ao longo de sua carreira, diversas tensões em torno das questões de gênero por ousar desafiar o pensamento hegemônico [12].

Nesse sentido, a reinterpretação de Cecilia Payne sobre a composição química estelar incide diretamente sobre o estatuto do Diagrama HR, que deixa de ser compreendido apenas como uma correlação empírica entre luminosidade e temperatura para assumir o papel de representação física das condições estruturais das estrelas. Ao fornecer a base teórica que permite compreender a sequência espectral em termos de temperatura e estado de ionização, Cecilia Payne transforma o diagrama em um instrumento interpretativo capaz de articular dados observacionais e processos físicos, consolidando-o como uma das principais ferramentas da astrofísica moderna. Nesse sentido, sua contribuição não apenas se apoia na infraestrutura de dados construída pelas gerações anteriores de pesquisadoras do observatório, mas a reorganiza conceitualmente, convertendo classificações e regularidades empíricas em evidências físicas sistematicamente interpretáveis [11].

A recepção inicial dos resultados de Cecilia Payne, contudo, foi marcada por cautela e resistência, levando-a a moderar, na versão final de sua tese, a interpretação de suas próprias conclusões sob influência de *autoridades científicas* da época, sobretudo Henry Norris Russell; anos mais tarde, investigações conduzidas pelo próprio cientista, no entanto, confirmariam essencialmente os mesmos resultados, evidenciando que os critérios de validação do conhecimento científico não operam de maneira neutra, mas estão atravessados por hierarquias institucionais e formas diferenciadas de autoridade no interior da comunidade científica [2, 3]. Esse episódio revela, de forma particularmente expressiva, como contribuições produzidas em posições periféricas de poder podem ser inicialmente relativizadas, vindo a adquirir legitimidade apenas quando reafirmadas por agentes situados em posições mais centrais.

Ao longo de sua trajetória em Harvard, Cecilia Payne permaneceu vinculada a atividades de pesquisa, ensino e orientação, ainda que, por décadas, sem reconhecimento institucional equivalente à relevância de sua produção científica, o que reforça a necessidade de compreender sua atuação não apenas como uma realização individual, mas como parte de um processo mais amplo de transformação das práticas científicas, no qual a articulação entre dados observacionais, sistemas classificatórios e modelos

teóricos redefiniu as bases da investigação astrofísica no século XX [11].

Compreender o encadeamento contínuo de práticas por meio do qual a astrofísica moderna se constitui implica considerar que a própria existência dessas práticas esteve diretamente vinculada a condições materiais específicas, sem as quais a produção sistemática de dados em larga escala não teria sido possível. A obtenção de placas fotográficas, a manutenção de equipamentos, a organização de arquivos extensos e a permanência de equipes dedicadas à análise contínua desses registros dependeram de formas de financiamento que, naquele contexto, não se encontravam plenamente institucionalizadas no âmbito estatal. Nesse processo, o próprio Diagrama HR se mostra como construção coletiva e dependente desses encadeamentos.

Nesse sentido, iniciativas de caráter filantrópico, especialmente aquelas associadas ao *Henry Draper Memorial*, não atuaram apenas como suporte externo à atividade científica, mas desempenharam papel ativo na definição de agendas de pesquisa, na organização do trabalho e na configuração das próprias condições que possibilitaram a emergência dos resultados discutidos ao longo desta seção. Ao incorporar essa dimensão, torna-se possível compreender que a produção do conhecimento astronômico moderno esteve indissociavelmente ligada às formas de financiamento que sustentaram sua materialidade.

3. O Financiamento Amador na Astronomia do Século XIX: O Caso do *Henry Draper Memorial*

No final do século XIX, a produção do conhecimento astronômico esteve diretamente vinculada a formas específicas de financiamento que, mais do que viabilizar a atividade científica, contribuíram para definir suas condições de possibilidade, suas escalas de operação e seus modos de organização. Antes da consolidação de sistemas amplos de financiamento estatal, observatórios e programas de investigação dependiam de uma articulação entre recursos institucionais limitados e iniciativas privadas de caráter filantrópico, cuja atuação incidia diretamente sobre a aquisição de instrumentos, a realização de observações sistemáticas e a manutenção de equipes dedicadas à análise de dados.

Entre essas iniciativas destacam-se as contribuições de duas mulheres cuja atuação teve impacto significativo no campo da astronomia: Anna Palmer Draper e Catherine Wolfe Bruce (1816–1900; [11]). Uma correspondência entre Edward Pickering e a Anna Palmer Draper deu início à intenção da Sra. Draper,

[...] o Sr. Clark informou-me que a senhora pretende dar continuidade ao trabalho no qual o Dr. Draper estava envolvido, e meu interesse pelo assunto oferece a desculpa perfeita para dirigir-lhe estas linhas. Não é



Figura 4: Anna Palmer Draper (sentada próxima ao centro) com as Mulheres Computadoras do Observatório do Harvard College. Imediatamente atrás da Sra. Draper está Antonia Maury; logo à direita está Williamina Fleming. Fonte: Harvard University Archives.

necessário que eu expresse a satisfação que sinto ao saber que a senhora tomou essa decisão, pois é evidente que não poderia haver monumento mais duradouro que a senhora pudesse erigir à memória de seu marido.” [11, p. 5, tradução livre¹⁵].

A atuação de Anna Palmer Draper (Figura 4) insere-se nesse contexto como um elemento decisivo na consolidação de um modelo de investigação baseado na produção sistemática de registros observacionais. Ao financiar o *Henry Draper Memorial*, sua iniciativa não apenas deu continuidade às pesquisas iniciadas por Henry Draper, mas instituiu as condições materiais que permitiram a expansão de programas de espectroscopia estelar em larga escala, viabilizando a produção contínua de placas fotográficas de vidro e a organização de equipes dedicadas à sua análise.

Após a morte de seu marido, o médico e astrônomo amador Henry Draper, em 1882, Draper decidiu financiar a continuidade das pesquisas que ele havia iniciado no campo da astrofotografia espectroscópica. No caso do Observatório de Harvard, o financiamento promovido por Anna Palmer Draper possibilitou a expansão das pesquisas em espectroscopia estelar e criou as condições institucionais para o desenvolvimento de extensos programas de catalogação e classificação de estrelas. Dessa forma, mais do que ampliar o volume de dados disponíveis, o financiamento promovido por Draper contribuiu para estabilizar um modo específico

¹⁵ “My dear Mrs. Draper,” Pickering wrote on January 13, 1883. “Mr. Clark [of Alvan Clark & Sons, the preeminent telescope makers] tells me that you are preparing to complete the work in which Dr. Draper was engaged, and my interest in this matter must be my excuse for addressing you regarding it. I need not state my satisfaction that you are taking this step, since it must be obvious that in no other way could you erect so lasting a monument to his memory.”

de produção do conhecimento astronômico, baseado na coleta sistemática de registros, na organização de arquivos extensos e na análise comparativa de observações ao longo do tempo. Esse deslocamento é fundamental, pois permite compreender que a própria forma assumida pela investigação astronômica, centrada na identificação de padrões em grandes conjuntos de dados, esteve diretamente vinculada às condições materiais que tornaram possível sua realização.

Como mencionado por Sobel [11] “O financiamento para estes projetos veio principalmente de duas herdeiras com grande interesse em astronomia, Anna Palmer Draper e Catherine Wolfe Bruce” (Prefácio, p. xi., *tradução livre*). Diferentemente do caso de Anna Palmer Draper, cujo financiamento esteve diretamente associado à continuidade de um programa específico de pesquisa, a atuação de Catherine Wolfe Bruce assumiu um caráter mais amplo, incidindo sobre a expansão da infraestrutura astronômica em escala internacional. Ao financiar a construção de telescópios e apoiar programas observacionais em diferentes instituições, Bruce contribuiu para ampliar significativamente a capacidade de produção de dados astronômicos, favorecendo a realização de levantamentos sistemáticos e a exploração de regiões do céu até então pouco investigadas.

Interessada em destinar sua riqueza a causas consideradas dignas, Bruce parecia nutrir também um interesse latente pela astronomia. O financiamento do telescópio fotográfico que levaria seu nome ilustra de maneira exemplar essa dinâmica, ao viabilizar a obtenção de registros observacionais em escalas inéditas e contribuir para a ampliação dos limites empíricos da astronomia observacional. A produção dessas imagens não apenas expandiu o volume de dados disponíveis, mas também redefiniu as possibilidades de investigação, ao permitir a identificação de novos objetos e padrões que não poderiam ser reconhecidos em observações pontuais.

Em 1927, o telescópio Bruce (Figura 5) foi transferido para Bloemfontein, na África do Sul, onde permaneceu

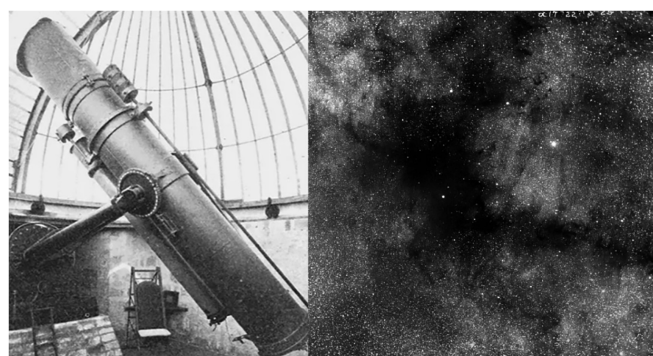


Figura 5: Telescópio Bruce – Arequipa, Peru (esquerda). Via Láctea na região de Ophiuchus. Telescópio Bruce, 4h 45min de exposição, 30 de junho de 1905 (direita). Fonte: Nasa Astrophysics Data System.

em operação até 1950. Em colaboração com Edward Pickering, Bruce instituiu um sistema de bolsas destinadas a astrônomos que apresentassem projetos promissores, ao mesmo tempo em que financiou empreendimentos de maior escala, como a transferência do Observatório Dudley para um novo local e a aquisição de instrumentos para outros centros de pesquisa, incluindo o Observatório Yerkes e o observatório de Heidelberg. Seu último gesto de generosidade, pouco antes de sua morte em 1900, foi a criação de um fundo destinado à concessão da Medalha Bruce pela *Astronomical Society of the Pacific*, prêmio que se tornaria uma das mais prestigiosas distinções da astronomia [11].

As contribuições de Anna Palmer Draper e Catherine Wolfe Bruce permitem aprofundar a compreensão de que a presença feminina na constituição da astrofísica não se restringiu às práticas de análise e classificação de dados, mas atravessou também as condições materiais e institucionais que sustentaram essas práticas. Se, como discutido anteriormente, o trabalho das computadoras foi central para a organização dos dados espectrais e para a identificação de regularidades empíricas, o financiamento promovido por essas mulheres incidiu diretamente sobre a viabilização e a continuidade desse mesmo processo, atuando na definição das escalas de produção, na ampliação das infraestruturas observacionais e na estabilização de programas de investigação de longa duração. Nesse sentido, suas ações não podem ser compreendidas apenas como suporte externo à atividade científica, mas como parte constitutiva das dinâmicas que configuraram o campo, evidenciando que a participação das mulheres na astronomia do período se deu de maneira articulada, tanto na produção e interpretação dos dados quanto na sustentação material que tornou tais processos possíveis, incluindo a consolidação de sistemas classificatórios e a emergência de representações como o Diagrama HR.

4. O Diagrama Hertzsprung-Russell

O Diagrama HR (Figura 6, versão contemporânea) estabelece uma relação sistemática entre luminosidade e temperatura estelar, tornando-se a ferramenta mais utilizada para compreender os processos de evolução estelar e outras relações básicas de astrofísica estelar.

Sua elaboração é frequentemente apresentada como resultado de descobertas realizadas independentemente por Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell no início do século XX [18, 42]. Mas é importante apontar que, uma vez analisado à luz das condições históricas de sua produção, o diagrama deixa de ser compreendido como uma descoberta isolada e passa a ser interpretado como a síntese gráfica de um processo coletivo de produção, organização e interpretação de dados, no qual o financiamento filantrópico, o trabalho feminino, a classificação espectral, a padronização das observações e a construção de grandes catálogos desempenharam papel estruturante.

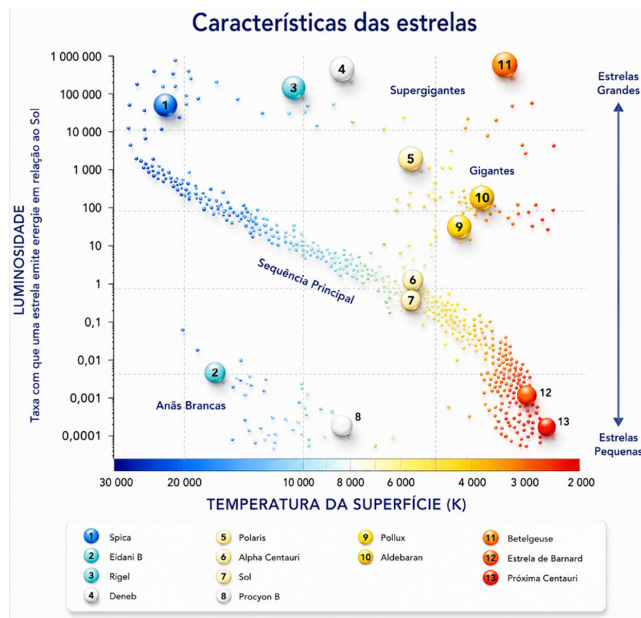


Figura 6: Diagrama HR mostrando Luminosidade (eixo das ordenadas: normalizadas à Luminosidade do Sol) versus Temperatura Superfície (eixo das abscissas: dadas em kelvin) para estrelas brilhantes próximas, destacando algumas delas na figura. Indica-se também em que sentido, no gráfico, o raio das estrelas aumenta/diminui. Fonte: Elaboração própria, adaptada de [18].

É nesse contexto que se inscrevem as investigações de Hertzsprung que, ao utilizar as distinções espectrais estabelecidas por Antonia Maury, identificou diferenças sistemáticas entre estrelas de mesma classe espectral, distinguindo, por exemplo, estrelas gigantes e anãs [11], mas ver também a carta de Hertzsprung a Pickering (22 de Julho de 1908), no *Harvard Archives, E.C. Pickering Collection* [43]. Esse resultado não emerge diretamente da observação, mas da possibilidade de comparar dados previamente classificados e organizados, evidenciando que o diagrama depende de uma infraestrutura de produção de dados que o antecede e o torna possível [44–47]. Posteriormente, Henry Norris Russell sistematizou essas relações em uma representação gráfica, consolidando o diagrama como uma ferramenta capaz de articular, em um mesmo plano, diferentes propriedades estelares [48, 49; Figura 7, esquerda]. Ao compararmos os primeiros diagramas construídos no início do século XX e aqueles produzidos contemporaneamente (Figura 7) podemos evidenciar que não apenas os dados, mas os próprios modos de interpretação do diagrama se transformaram ao longo do tempo [47; Missão Gaia].

Nos diagramas contemporâneos, como aqueles produzidos a partir dos dados da missão astrométrica Gaia da *European Space Agency* (Figura 7, direita), observamos não apenas um aumento significativo na densidade de pontos representados, mas também a emergência de estruturas mais refinadas, cuja interpretação depende de um arcabouço teórico consolidado e de

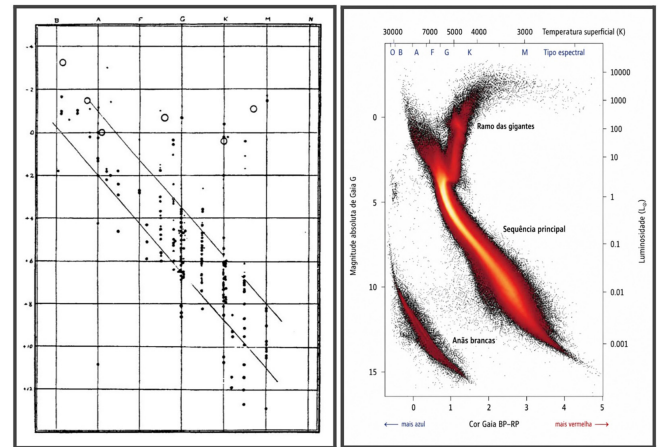


Figura 7: Esquerda: O primeiro diagrama proposto por Russell em 1913. Abscissa: tipo espectral, no sistema Annie Cannon. Ordenada: magnitude absoluta¹⁶ (de acordo com a definição moderna). Direita: Diagrama HR obtido com dados observacionais, em 2018, por meio da missão astrométrica Gaia da *European Space Agency* [50] com tradução própria. A figura sumariza dados coletados para mais de 4 milhões de estrelas num raio de 5 mil anos-luz¹⁷ do Sol. Fontes: Esquerda: [49]; Direita: *ESA Gaia Mission* [50].

técnicas avançadas de análise de dados. O Diagrama HR obtido por meio da missão astrométrica Gaia revela que, ao longo dos séculos, a ciência (e a astrofísica em particular) tem se desenvolvido a partir de uma relação complexa com os distintos países, por meio de investimentos públicos e privados, e também por intermédio da criação de redes e consórcios (inter)nacionais que acabam alterando as dinâmicas de produção da ciência. Desde o trabalho incansável e meticuloso das *Mulheres Computadoras* do Observatório de Harvard, é notório que a astrofísica (sua comunidade) tem procurado investir na obtenção de espectros estelares de alta resolução (e em distintas faixas do espectro eletromagnético) para determinar parâmetros básicos, incluindo a composição química das estrelas, em escala industrial, sobretudo no caso da obtenção de espectros de estrelas do tipo FGK. Além disso, das *computadoras humanas* aos algoritmos contemporâneos, é importante aqui destacar que as observações, o tratamento e a análise dos dados também têm sido automatizados por meio de máquinas e algoritmos cada vez mais sofisticados. No entanto, ainda que na contemporaneidade a automatização dos processos e a Inteligência Artificial estejam cada vez mais presentes, alterando sobremaneira as dinâmicas com as quais a pesquisa científica em astronomia (e não somente) são realizadas, a presença dos humanos, tal qual ocorreu no tempo histórico das *Mulheres Computadoras* de Harvard,

¹⁶ Medida do brilho de um certo objeto astrofísico medido como se o objeto estivesse a uma distância de 10 pc (parsec) do(a) observador(a) na Terra. Um parsec equivale a 3,26 anos-luz ou 30,9 trilhões de quilômetros.

¹⁷ 1 ano-luz equivale a cerca de 9,5 trilhões de km.

ainda é crucial para avaliar a acurácia e a precisão dos resultados obtidos de forma industrial.

Dessa forma, a compreensão do Diagrama HR pode ser aprofundada quando o consideramos como um dispositivo material que permite transformar fenômenos complexos em representações estáveis, transportáveis e comparáveis [2, 51], situadas no tempo e no espaço, atravessadas por marcadores sociais da diferença (gênero, raça, classe, entre outros). Ao condensar, em um único plano, informações provenientes de um grande número de estrelas, o diagrama não apenas representa dados, mas também reorganiza o próprio campo de investigação, tornando visíveis padrões que passam a orientar novas perguntas e interpretações, inspirando e fomentando a criatividade em outros campos de conhecimento, dentro ou fora da astronomia. Nesse processo, a visualização gráfica não se constitui como um elemento secundário, mas como parte integrante da produção do conhecimento, uma vez que é por meio dela que relações empíricas se tornam inteligíveis, evidenciando que tais representações não são neutras, mas participam ativamente da construção de significados no interior das práticas científicas [2, 3, 52].

Portanto, a relação entre teoria, experimento e observação, expressa no Diagrama HR, não deve ser entendida como um simples procedimento de validação mútua entre modelos e dados, mas como resultado de um processo histórico no qual práticas de coleta, registro e análise de informações desempenharam papel fundamental na definição dos próprios objetos de investigação, feitos por pessoas. Ao considerar essa dimensão, o diagrama deixa de ser interpretado apenas como uma ferramenta representacional e passa a ser compreendido como parte de uma infraestrutura epistêmica mais ampla, na qual se articulam práticas observacionais, classificações sistemáticas e interpretações físicas. É esse aspecto que interessa à perspectiva da História Cultural [2, 7, 9, 10]. Um diagrama, ou uma imagem, com todos os seus significados materiais e simbólicos, bem como as nuances das pessoas que os constrói, tem muito a contribuir para a construção da ciência. Argumentamos que ao reinserir o Diagrama HR nesse conjunto de relações, torna-se possível compreender que sua importância não reside exclusivamente em sua forma gráfica ou em sua formulação original, mas também nas condições históricas que tornaram possível sua construção e nas práticas que continuam a redefinir seus significados no interior da ciência. Sob essa perspectiva, o diagrama deixa de ser apenas um conteúdo a ser ensinado e passa a constituir um exemplo privilegiado para a compreensão da ciência como prática histórica, coletiva e materialmente situada.

Sendo assim, quando considerado em sua totalidade, o Diagrama HR deve ser compreendido como a expressão condensada de um processo histórico no qual a produção, a organização e a interpretação de dados se articulam de maneira indissociável. Sua emergência está diretamente vinculada à existência de uma infraestrutura de práticas científicas que possibilitou a construção de conjuntos de

dados comparáveis, bem como à articulação entre diferentes formas de trabalho, agentes e condições materiais que sustentaram esse empreendimento.

5. Implicações para o Ensino de Física e Astronomia

Ao longo dos anos, temos trabalhado na perspectiva de que o ensino de física e astronomia devem fomentar outras formas de pensar o mundo e, a formação inicial e continuada de professores, no campo das ciências, precisam, de fato, dialogar cada vez mais com outros campos do conhecimento, como História, Natureza e Filosofia da Ciência, bem como refletir sobre questões históricas de desigualdades, de forma material e simbólica. Nesse aspecto, argumentamos que o estudo sobre como se deu o desenvolvimento das placas de vidro e do financiamento filantrópico no âmbito das trajetórias das *Mulheres Computadoras* do Observatório de Harvard, bem como a construção coletiva do Diagrama HR, nos permitem ampliar as possibilidades de ensino-aprendizagem no ensino de física e astronomia, seja na educação básica ou no ensino superior (Quadro 1).

Como se pode notar a partir do Quadro 1, as trajetórias formativas aventadas no presente artigo têm como foco principal a formação de estudantes e professores da educação básica, bem como estudantes e docentes de cursos de formação inicial e continuada em ciências (astronomia, física, química, matemática e ciência de dados), em diálogo com resultados cruciais de história, natureza e filosofia da ciência. As possibilidades formativas sistematizadas no quadro articulam conceitos científicos, contextos históricos e dimensões epistemológicas da ciência a objetivos voltados ao desenvolvimento da curiosidade científica, da observação sistemática, da interpretação e argumentação com base em evidências, da análise crítica de dados, da compreensão da ciência como um empreendimento histórico, coletivo e socialmente situado e da reflexão sobre as relações entre ciência, tecnologia e sociedade. Nessa perspectiva, busca-se favorecer a construção de uma compreensão mais ampla acerca da produção do conhecimento científico, estimulando o desenvolvimento do pensamento crítico, da tomada de decisões fundamentadas e do reconhecimento da participação de diferentes sujeitos, instituições e condições materiais na constituição da astrofísica moderna. Entre as concepções fundamentais mobilizadas ao longo do artigo destacam-se conceitos físicos como temperatura, luminosidade, magnitude, classificação espectral e Diagrama HR. No âmbito da natureza da ciência, evidenciam-se aspectos relacionados à autoria, às questões de gênero, aos instrumentos, aos dados, ao financiamento e à colaboração científica, compreendidos como elementos constitutivos da produção do conhecimento. O Quadro 1 sugere ainda que precisamos ampliar o diálogo entre áreas e estruturas de conhecimento para que, de fato, possamos promover o ensino de

Quadro 1: Possíveis trajetórias formativas de interesse pedagógico para a educação básica e o ensino superior a partir do presente estudo.

Percurso	Ideias Fundamentais	Desenvolvimentos	Objetivos Formativos
Educação básica			
Ensino fundamental	Propriedades das estrelas, classificação espectral	Observação do céu, magnitude, distância, cor, temperatura, luminosidade, espectros de estrelas	Desenvolver a curiosidade científica e a observação sistemática dos fenômenos celestes, reconhecendo que as estrelas apresentam diferentes características e que a ciência utiliza observações para construir explicações sobre a natureza. Interpretar fenômenos naturais e tecnológicos de forma crítica, formulando hipóteses e argumentações com base em evidências.
Ensino médio	Diagrama HR, evolução de estrelas, origem dos elementos químicos no Universo	Massa, raio, energia, luz, estágios evolutivos de estrelas, origem da matéria	Compreender o Diagrama HR como instrumento de interpretação científica, articulando propriedades físicas das estrelas, evolução estelar e produção histórica do conhecimento em astrofísica. Intervir de forma crítica no mundo que nos cerca.
Ensino superior			
Astronomia	Observação, produção e tratamento de dados, evolução estelar, modelos, placas fotográficas, catálogos astronômicos, relação período-luminosidade, escala de distâncias cósmicas, classificação espectral	Ciência de dados, astrofísica estelar, astronomia observacional, instrumentação, fotometria, espectroscopia, física atômica e molecular	Compreender como observações, registros, classificação e tratamento de dados participam da construção do conhecimento astronômico, reconhecendo o papel dos instrumentos e da colaboração científica. Desnaturalizar as relações céu-terra, posicionando-se de forma crítica perante as relações no Universo.
Física	Estrutura da matéria, radiação e interação luz-matéria	Termodinâmica, eletromagnetismo, física molecular, mecânica quântica, física de partículas	Relacionar conceitos físicos envolvidos na estrutura e evolução estelar, interpretando fenômenos luminosos, espectrais e energéticos por meio de modelos científicos. Desenvolver o pensamento crítico.
Matemática e ciência de dados	Gráficos, funções básicas, agrupamentos, análise de grandes bases de dados (levantamentos)	Estatística, computação	Desenvolver habilidades para interpretar, organizar e representar dados, reconhecendo a importância das ferramentas e ideias matemáticas e computacionais na investigação científica. Argumentar de forma crítica.
Química	Átomo, origem dos elementos químicos da tabela periódica	Física atômica e molecular, física nuclear, evolução química	Compreender a constituição da matéria e a origem dos elementos químicos no contexto da evolução estelar, articulando conhecimentos de física, química e astronomia. Desenvolver a capacidade de intervir de forma crítica no mundo, a partir da análise de dados e da investigação teórico-prática.
Educação básica e ensino superior			
História e filosofia da ciência	Natureza da ciência, epistemologias, metodologias e controvérsias científicas, mulheres na ciência, questões culturais na ciência, produção coletiva do conhecimento científico	História, filosofia, sociologia da ciência	Compreender a ciência como empreendimento histórico, coletivo e socialmente situado, reconhecendo a influência de contextos culturais, metodológicos e institucionais na produção do conhecimento científico. Perceber que a ciência é uma construção humana que varia no tempo e no espaço, não neutra, crucial para o fortalecimento da democracia.
Ciência e sociedade	Questões de gênero na ciência, diversidade, equidade, desigualdades sociais, filantropia, invisibilização das cientistas, divisão do trabalho científico	História, sociologia, filosofia, educação	Promover reflexões críticas sobre gênero, autoria, invisibilização, financiamento, divisão do trabalho científico e relações entre ciência, tecnologia e sociedade, reconhecendo a participação das mulheres na construção da astrofísica moderna. Permitir que estudantes e docentes compreendam como a ciência funciona e sejam capazes de tomar decisões éticas, justas e democráticas.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

astronomia para além de conteúdos e memorização de fórmulas e equações matemáticas ou de conceitos científicos desconectados da realidade. Isso nos compromete com uma sólida articulação entre currículo, formação inicial e continuada de professores e natureza da ciência para além das perspectivas hegemônicas de ciência. O currículo segue sendo um lugar tenso de disputa, que necessita não apenas apresentar as descobertas e formas de organização da ciência, mas situá-los do ponto de vista crítico para que estudantes e docentes possam, nos distintos níveis, tomar decisões que impactem positivamente na sociedade, comprometidos com a justiça social e a democracia. O nosso objetivo no presente artigo não é sugerir uma sequência didática ou um plano de aula como uma forma de bolo. Mais do que isso, provocamos as pessoas leitoras a construírem, a partir das inquietações e evidências que apresentamos nesse trabalho, caminhos, trajetórias e espaços de reflexão acerca das interações possíveis entre distintas áreas científicas e concepções de ciência e as suas formas de construir projetos inclusivos e libertários de sociedade, inerentes aos desafios sociais colocados para nós (escolas, instituições de ensino superior e sociedade) no presente século.

Tendo como referência as questões que foram tratadas no artigo, bem como estudos prévios realizados por nosso grupo [3, 12, 17, 23, 25, 33], sugerimos às pessoas leitoras uma proposta de sequência curta, composta pelas seguintes etapas: (i) leitura histórica; (ii) análise de espectros; (iii) construção de Diagrama HR simplificado; (iv) discussão sobre invisibilização e financiamento na ciência. Entre as formas de avaliação da proposta, sugerimos a realização de rodas de conversas em que as questões históricas envolvidas possam ser discutidas em coletivo. Além disso, recomendamos que seja feita a leitura e análise crítica de livros didáticos e/ou de divulgação científica, bem como a criação e interpretação de diagramas ou a elaboração coletiva de narrativas histórico-científicas. Discentes e docentes podem também buscar trechos de filmes e/ou documentários que trazem as narrativas histórico-científicas tratadas no presente artigo.

Positivamente, vale destacar que as questões abordadas no trabalho permitem que discentes e docentes na educação básica e/ou no ensino superior possam discutir e aprofundar problemas como a (i) a diferença entre brilho aparente, luminosidade e magnitude absoluta; (ii) a relação entre espectro, temperatura e composição química; (iii) o uso de diagramas como instrumentos de inferência; (iv) o papel de dados observacionais na modelagem física; (v) a diferença entre representação gráfica e realidade física; (vi) a natureza coletiva, material e social da astrofísica; (vii) o papel das mulheres para a construção coletiva da ciência.

Do ponto de vista didático-pedagógico, vale salientar que as imagens do Diagrama HR apresentados nas Figuras 6 e 7 precisam ser estudadas e debatidas em sala de aula com atenção para evitar concepções alternativas

associadas ao Diagrama HR, pois muitos estudantes tendem a interpretar o diagrama como uma *trajetória temporal única* pela qual todas as estrelas passam, ou como se este fosse um gráfico simples de *idade em relação à cor*. Há, nesse aspecto, riscos didáticos reais no ensino do Diagrama HR, especialmente no que concerne: (i) confundir cor com idade; (ii) interpretar o eixo de temperatura sem notar que ele usualmente decresce da esquerda para a direita, o que é pouco usual nos gráficos estudados ao longo das trajetórias estudantis; (iii) não notar que, em geral, o eixo vertical da luminosidade se apresenta em escala logarítmica; (iv) não distinguir luminosidade, brilho aparente e magnitude absoluta¹⁸; (v) tratar a sequência principal como uma trajetória evolutiva linear, como se as estrelas evoluíssem de cima para baixo ou de baixo para cima ao longo desta sequência; (vi) não compreender que diferentes regiões do Diagrama HR correspondem a massas, composições e estágios evolutivos distintos. Além disso, do ponto de vista da História da Ciência, salientamos que pode haver dificuldades de lidar com as dinâmicas dos contextos históricos envolvidos não apenas na construção do Diagrama HR em si, mas sobretudo na contextualização histórico-científica do papel das *Mulheres Computadoras* para a Astrofísica e para a ciência de forma geral.

E, por fim, chamamos a atenção das pessoas leitoras que, do ponto de vista histórico, a relação clássica existente entre luminosidade (L), raio (R) e temperatura superficial (T) de uma estrela, dada pela equação:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4, \quad (1)$$

em que σ corresponde à constante de Stefan-Boltzmann¹⁹ – relação esta que aparece nos mais variados livros de astrofísica em diferentes níveis –, *não* foi descoberta por Hertzsprung e Russell. Alternativamente, salientamos que enquanto as descobertas observacionais de Hertzsprung e Russell ocorrem de maneira independente entre 1911–1913, a dedução teórica dos matemáticos austríacos Josef Stefan (1835–1893) e seu aluno Ludwig Boltzmann (1844–1906) foi feita no final do século XIX. A relação apresentada na Equação (1) constitui-se, assim, como um dos mais importantes resultados para a astrofísica, pois permite investigar a evolução de uma estrela no Diagrama HR.

¹⁸ Em astrofísica, o brilho aparente de um astro é definido a partir do fluxo emanado do corpo celeste que é medido na Terra, normalmente expresso em termos da magnitude aparente m . Por definição, $m = -2,5 \log(F)$, em que o fluxo (F) equivale à luminosidade (L) medida por unidade de área ($4\pi D^2$). Nesse sentido, $F = L/(4\pi D^2)$, em que D é a distância do astro à Terra. Enquanto a *magnitude aparente* materializa o brilho como o observamos na Terra, a *magnitude absoluta* representa o brilho real e intrínseco de um astro, determinado como se este estivesse a uma distância de 10pc de nós (Terra), conforme discutimos previamente. Uma *cor*, ou *índice de cor*, por sua vez, corresponde a uma expressão numérica obtida pela diferença de magnitude de um astro (geralmente uma estrela) através de diferentes filtros fotométricos, altamente relacionada à temperatura superficial do astro em questão.

¹⁹ σ equivale a $5,67 \times 10^{-5} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ s}^{-1}$.

6. Considerações Finais

Ao longo deste trabalho, buscamos analisar as contribuições historiográficas e pedagógicas da obra *The Glass Universe* para o ensino de física e astronomia, tomando como eixo articulador a construção histórica do Diagrama HR e o papel desempenhado pelas mulheres do Observatório de Harvard nesse processo. A análise permitiu evidenciar que a narrativa apresentada por Sobel não apenas amplia o repertório historiográfico disponível sobre a astrofísica moderna, mas também oferece elementos concretos para a elaboração de abordagens pedagógicas que integrem conteúdos científicos, história da ciência e questões de gênero de forma articulada.

A reconstrução das trajetórias das chamadas Mulheres Computadoras, entre elas Williamina Fleming, Antonia Maury, Annie Cannon, Henrietta Leavitt e Cecilia Payne, permitiu demonstrar que suas atividades não podem ser compreendidas como etapas auxiliares ou secundárias no desenvolvimento da astronomia, mas sim, como parte estruturante da própria produção do conhecimento e História da Astronomia. A classificação sistemática dos espectros, seu refinamento progressivo, a padronização em larga escala e a identificação de regularidades empíricas configuraram uma infraestrutura de dados sem a qual não seria possível a formulação de problemas astrofísicos mais amplos. Nesse sentido, o Diagrama de HR emerge, não como resultado de uma descoberta isolada, mas como a síntese gráfica de um processo coletivo e historicamente situado, no qual a divisão do trabalho científico desempenhou papel decisivo. Ao ser compreendido como a síntese gráfica de um processo coletivo e historicamente situado, o Diagrama HR revela também uma transformação em seu estatuto epistemológico. Mais do que organizar observações astronômicas, ele consolida-se como uma ferramenta central para a investigação da evolução estelar e passa a participar da formulação de novos problemas científicos e da organização das práticas de produção do conhecimento em astrofísica. Nessa perspectiva, o diagrama evidencia que classificações, instrumentos, práticas de observação e formas de organização do trabalho científico não apenas registram o conhecimento, mas participam ativamente de sua construção.

A análise do financiamento amador e filantrópico, com destaque para a atuação de Anna Palmer Draper e Catherine Wolfe Bruce, permitiu compreender que a consolidação da astrofísica observacional esteve diretamente vinculada a condições materiais específicas, que ultrapassavam os limites institucionais da academia. Mais do que viabilizar a produção científica, essas iniciativas contribuíram para definir suas escalas de operação, suas agendas de pesquisa e suas formas de organização, evidenciando que a produção do conhecimento científico se encontra intrinsecamente articulada a redes sociais, econômicas e institucionais muito mais amplas.

Do ponto de vista pedagógico, nossas análises indicam que a incorporação de narrativas como a apresentada

em *The Glass Universe* pode contribuir para superar abordagens descontextualizadas, e excessivamente formalizadas do ensino de física e astronomia. Ao evidenciar a ciência como uma prática histórica, coletiva e materialmente situada, tais narrativas possibilitam a construção de propostas didáticas que promovam não apenas a aprendizagem de conceitos, mas também a compreensão crítica das condições de produção do conhecimento científico. Além disso, ao tornar visíveis trajetórias femininas na construção da astrofísica, promovemos processos de identificação e pertencimento para futuras cientistas, ampliando suas possibilidades de reconhecimento como participantes legítimas da atividade científica e, ao analisar o Diagrama HR à luz da História Cultural da Ciência, contribuímos para deslocar sua compreensão de um conteúdo apresentado de forma isolada para um objeto privilegiado de análise das práticas, relações e condições que estruturam a ciência. Esses deslocamentos de gênero, materialidade e financiamento filantrópico na história da astrofísica, não apenas ampliam sua inteligibilidade no contexto educacional, mas também reforçam a importância de integrar dimensões históricas e sociais na formação científica, permitindo compreender a ciência em sua complexidade e em sua historicidade como parte da cultura, uma construção significativamente humana.

Em síntese, esperamos que o presente artigo contribua e inspire discentes e docentes para a criação de propostas didático-pedagógicas relevantes, atuais e adequadas para articular história da ciência, ensino de física, astronomia, astrofísica estelar, gênero, materialidade científica e produção coletiva do conhecimento. A ideia central articulada no artigo desloca a narrativa usual do Diagrama HR, frequentemente atribuída apenas a Hertzsprung e Russell, para uma compreensão histórica mais ampla, envolvendo o trabalho das *Mulheres Computadoras* do Observatório de Harvard, o financiamento filantrópico e a materialidade das placas fotográficas ao longo da História da Astronomia, cujo tema é altamente pertinente para a área de ensino de física e astronomia. A articulação entre história cultural da ciência, astrofísica estelar e gênero atende a demandas contemporâneas de formação científica mais crítica, menos internalista e menos centrada em narrativas heroicas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) no âmbito do Programa de Estágio de Pós-Doutorado.

Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que embasa os resultados deste estudo está publicado no artigo, com referências aos respectivos estudos.

Referências

- [1] L.O.Q. Peduzzi, em: *Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora*, editado por M. Pietrocola (Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001).
- [2] C.B. Moura e A. Guerra, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências* **16**, 725 (2016).
- [3] A. Alves-Brito e J.R. Macedo, *Revista Brasileira de História da Ciência* **15**, 400 (2022).
- [4] E.S. Silva, E.S. Teixeira e M.C.M. Penido, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **35**, 766 (2018).
- [5] S. González-Pérez, R. Mateos de Cabo e M. Sáinz, *Frontiers in Psychology* **11**, 2204 (2020).
- [6] M. Tal, R. Lavi, S. Reiss e Y.J. Dori, *Journal of Science Education and Technology* **33**, 699 (2024).
- [7] P. Burke, *O que é história cultural?* (Jorge Zahar, Rio de Janeiro, 2008).
- [8] M.R. Matthews, *Science teaching: the role of history and philosophy of science* (Routledge, New York, 1994).
- [9] M.R. Matthews, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **12**, 164 (1995).
- [10] J. Pimentel, *Arbor* **186**, 417 (2010).
- [11] D. Sobel, *The Glass Universe: How the Ladies of the Harvard Observatory Took the Measure of the Stars* (Viking, New York, 2016).
- [12] P.C. Vieira, N.T. Massoni e A. Alves-Brito, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210028 (2021).
- [13] T.F.C. Mello, R. Martins e M. Pietrocola, *Enseñanza de las Ciencias, Núm. Extra*, 3241 (2009).
- [14] D.J.S. Santos, T.C.M. Forato e J.A. Silva, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **38**, 1282 (2021).
- [15] I.L. Silva, *Brazilian Journal of Physics* **56**, 74 (2026).
- [16] L.N. Pires e L.O.Q. Peduzzi, *Investigações em Ensino de Ciências* **26**, 157 (2021).
- [17] L. Slovinski, A. Alves-Brito e N.T. Massoni, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210173 (2021).
- [18] K. Oliveira Filho e M.F. Saraiva, *Astronomia e Astrofísica* (Livraria da Física, São Paulo, 2017), 4 ed.
- [19] A. Alves-Brito e A. Cortesi, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20200418 (2021).
- [20] F.A.A. Conte, *Uma história da astronomia a partir dos desenvolvimentos tecnológicos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo (2021).
- [21] M.C.B. Marchi, *A contribuição de Annie Jump Cannon para a classificação espectral de Harvard*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo (2017).
- [22] B.A. Silvério, C.M. Sitko e S.F. Figueirôa, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **40**, 670 (2023).
- [23] P.C. Vieira, *Uma estrela eclipsada na ciência: um resgate histórico de Cecilia Payne e seu papel na determinação da composição estelar*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (2021).
- [24] L. Gonzalez, *Por um feminismo afro-latino-americano: ensaios, intervenções e diálogos* (Zahar, Rio de Janeiro, 2020).
- [25] A. Alves-Brito, *Cad. Astro.* **5**, 17 (2024).
- [26] M. Saha, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **40**, 472 (1920).
- [27] O. Freire Jr., O. Pessoa Jr. e J.L. Bromberg (orgs.), *Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais* (Editora da Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2011).
- [28] D.P. Menezes, C. Brito e C. Anteneodo, arXiv:1901.05536 (2019).
- [29] V. Morcelle, G. Freitas e Z.M.C. Ludwig, *QUARKS: Brazilian Electronic Journal of Physics, Chemistry and Materials Science* **1**, 40 (2019).
- [30] 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 (2020).
- [31] M. Loden, *Implementing Diversity: Best Practices for Making Diversity Work in Your Organization* (Irwin Professional Publishing, Chicago, 1996).
- [32] M.W. Rossiter, *Women Scientists in America: Struggles and Strategies to 1940* (Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1982).
- [33] A. Alves-Brito e L. Slovinski, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **47**, e20240313 (2025).
- [34] C. Payne-Gaposchkin, *Stellar Atmospheres: A Contribution to the Observational Study of High Temperature in the Reversing Layers of Stars*. Tese de Doutorado, Radcliffe College, Cambridge (1925).
- [35] A. Gordon, *Women's Studies Newsletter* **6**, 24 (1978).
- [36] G. Kass-Simon e P. Farnes (orgs.), *Women of Science: Righting the Record* (Indiana University Press, Bloomington, 1990).
- [37] L.S. Zrull, *Journal for the History of Astronomy* **52**, 115 (2021).
- [38] K. Powell, *Nature* **595**, 611 (2021).
- [39] E.C. Pickering, *Annals of Harvard College Observatory* (Harvard College Observatory, Cambridge, 1890), v. 27.
- [40] G. Johnson, *Miss Leavitt's Stars: The Untold Story of the Forgotten Woman Who Discovered How to Measure the Universe* (W.W. Norton & Company, New York, 2005).
- [41] C. Payne-Gaposchkin, *Cecilia Payne-Gaposchkin: An Autobiography and Other Recollections* (Cambridge University Press, Cambridge, 1984).
- [42] M.A. Hoskin (ed.), *The Cambridge Illustrated History of Astronomy* (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).
- [43] Harvard University Archives, *Edward Charles Pickering Papers, 1854-1926. Call number: UAV 630.14* (Harvard University, Cambridge, 2026).
- [44] A.V. Nielsen, *Centaurus* **9**, 219 (1963).
- [45] D.H. DeVorkin, em: *The HR Diagram: The 100th Anniversary of Henry Norris Russell*, *Proceedings of the IAU Symposium No. 80*, editado por A.G. Davis Philip e D.S. Hayes (D. Reidel, Dordrecht, 1978).
- [46] D.H. DeVorkin, em: *The General History of Astronomy*, editado por O. Gingerich (Cambridge University Press, Cambridge, 1984), v. 4, parte A.
- [47] B.W. Sitterly, *Vistas in Astronomy* **12**, 357 (1970).
- [48] H.N. Russell, *Popular Astronomy* **22**, 275 (1914).
- [49] D.H. DeVorkin, *Physics Today* **31**, 32 (1978).

- [50] C. Babusiaux, *Gaia's Hertzsprung-Russell diagram*, disponível em: <https://sci.esa.int/web/gaia/-/60198-gaia-hertzsprung-russell-diagram>, acessado em 26/03/2026.
- [51] B. Latour, *Pandora's Hope: Essays on the Reality of Science Studies* (Harvard University Press, Cambridge, 1999).
- [52] M. Lynch e S. Woolgar (orgs.), *Representation in Scientific Practice* (MIT Press, Cambridge, 1990).