



JOCELYN BELL BURNELL E A DESCOBERTA DOS PULSARES: REVISANDO PESQUISAS DO ENSINO DE FÍSICA E DE ASTRONOMIA EM UMA PERSPECTIVA HISTÓRICA

Jocelyn Bell Burnell and The Discovery of Pulsars: reviewing researches of Physics and Astronomy Teaching in a Historical Perspective

Larissa do Nascimento Pires [larissa.n.pires@hotmail.com]
*Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário Trindade, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil*

Luiz O. Q. Peduzzi [luizpeduzzi@gmail.com]
*Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário Trindade, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil*

Resumo

A detecção das estrelas de nêutrons consiste em um dos eventos científicos mais singulares para o campo da Astronomia. Esta descoberta, protagonizada pela astrônoma Jocelyn Bell Burnell, possibilitou a identificação dos primeiros sinais que viriam posteriormente a serem reconhecidos como pulsares, o que permitiu uma melhor compreensão sobre o processo de evolução das estrelas. No ensino de Física e de Astronomia, no entanto, existe um desconhecimento das/os docentes e discentes sobre o processo de evolução estelar. Neste artigo, desenvolvemos uma pesquisa bibliográfica de maneira a investigar como a história da descoberta dos pulsares e a atuação de Jocelyn Bell Burnell neste episódio se manifesta em trabalhos publicados nas últimas décadas no campo do ensino de Física e de Astronomia, bem como em pesquisas acadêmicas destas áreas. Para o estudo, selecionamos 35 trabalhos, dentre artigos publicados em periódicos e eventos, além de dissertações e teses. O desenvolvimento da análise se baseou em fontes primárias e secundárias que versam sobre elementos históricos relativos à descoberta dos pulsares. Concluímos que pontuais trabalhos realizam uma discussão histórica sobre estes objetos celestes, principalmente produções acadêmicas no campo da Física e da Astronomia, enquanto pesquisas no campo do ensino concentram discussões em um âmbito mais conceitual. Indicamos que este episódio apresenta potencialidades para estudos sobre natureza da ciência e sobre a visibilidade das mulheres na ciência.

Palavras-Chave: Pulsares; Estrelas de Nêutrons; Jocelyn Bell Burnell; História da Física e da Astronomia.

Abstract

The detection of neutron stars is one of the most unique scientific events in the field of Astronomy. This discovery, led by astronomer Jocelyn Bell Burnell, enabled the identification of the first signs that would later be recognized as pulsars, which allows a better understanding of the process of evolution of the stars. However, there is a lack of knowledge by teachers and students about the process of stellar evolution. In this article, we developed a bibliographic research in order to investigate how the history of discovery of pulsars and the performance of Jocelyn Bell Burnell in this episode is manifested in research published in the last decades in the field of Physics and Astronomy Teaching, as well as academic research in these areas. It was selected 35 researches, among papers published in journals and events, in addition to dissertations and theses. The development of the analysis was based on primary and secondary sources that deal with historical elements about the discovery of pulsars. It was observed that specific works carry out a historical discussion about these celestial objects, mainly academic productions in the field of Physics and Astronomy, while research in the field of teaching concentrates discussions in a conceptual scope. Also, this episode presents potential for studies about the nature of science and about the visibility of women in science.

Keywords: Pulsars; Neutron Stars; Jocelyn Bell Burnell; History of Physics and Astronomy.

INTRODUÇÃO

“Scientists should never claim that something is absolutely true. You should never claim perfect, or total, or 100% because you never ever get there”.

Jocelyn Bell Burnell (2010)¹

Embora o fascínio em relação às estrelas remonte aos primórdios da humanidade, constituindo *“tanto um refúgio quanto uma referência para os seres humanos”* (Stasinska, 2010, p. 674), a compreensão desses objetos começou a se delinear com o desenvolvimento da Astronomia e da Astrofísica. De fato, as maiores contribuições deste campo do conhecimento *“não são as aplicações tecnológicas, ou os seus [...] avanços científicos, mas a oportunidade de alargarmos os nossos limitados horizontes, a fim de descobriremos a beleza e a grandeza do universo, bem como o nosso lugar nesse contexto”* (Darroz, Rosa, Rosa, & Pérez, 2014, p. 119).

Um dos esforços científicos desenvolvidos por astrofísicas/os consiste na compreensão das características e do comportamento das estrelas. A consolidação do Diagrama de Hertzsprung-Russell possibilitou compreendermos que a depender de determinadas características como sua massa e sua temperatura, as estrelas estão destinadas a serem anãs brancas, estrelas de nêutrons ou até buracos negros ao final de sua evolução estelar. Sobre isso, o historiador da ciência Steven Dick (2013, p. 337), aponta que *“[...] uma vez aceito o conceito de evolução estelar, o problema era determinar quais estrelas estavam em quais estágios e como a física funcionava em condições variadas, entre os maiores quebra-cabeças da história da ciência”*.

Neste âmbito, a detecção das estrelas de nêutrons consistiu em um dos eventos científicos mais singulares para o campo da Astronomia (McNamara, 2008), possibilitando-nos uma melhor compreensão acerca da evolução estelar. Este achado se demonstrou mediante as pesquisas desenvolvidas, durante a década de 1960, por radioastrônomos da Universidade de Cambridge. Neste contexto, a astrônoma britânica Jocelyn Bell Burnell, em meio a sua pesquisa de doutorado, protagonizou a detecção dos primeiros sinais astronômicos que viriam posteriormente a ser reconhecidos como pulsares (McGrayne, 1998). Estes objetos, além de possibilitarem o desenvolvimento de estudos sobre uma diferenciada categoria de corpos estelares, foram responsáveis pela corroboração de predições teóricas relativas às estrelas de nêutrons. Assim, McNamara (2008, p. 1), em seu livro *Clocks In The Sky: The Story of Pulsars*, evidencia algumas características destes objetos:

“Os pulsares, ao que parece, têm o potencial de revelar aspectos muito diversos do universo, como a natureza do espaço-tempo e as propriedades fundamentais da matéria. [...] E, ao girarem, emitem raios de radiação - luz, rádio e raios-X - que fluem para o espaço. Se um dos raios cruza a Terra, o pulsar parece piscar como um sinal de alerta que marca o local de um cataclismo estelar. Essa gama de características únicas torna os pulsares como laboratórios para testar fenômenos com significado não apenas astronômico, mas cosmológico. A incrível precisão dos pulsares permite que os astrônomos estudem uma das previsões mais importantes da relatividade geral, as ondas gravitacionais. As taxas de rotação dos pulsares são tão precisas que são consideradas uma das fontes de tempo mais exatas”.

Em relação à discussão deste conceito no contexto de ensino de Física e de Astronomia, pesquisadoras/es relatam a relativa escassez na abordagem didática acerca de conhecimentos de Astrofísica (Henrique, Andrade, & L'Astorina, 2010; Darroz *et al.*, 2014). Algumas pesquisas evidenciam, especificamente, que aspectos relativos ao comportamento e evolução das estrelas não são compreendidos em sua totalidade pelas/os docentes atuantes na educação básica (Leite & Hosoume, 2007; Sanzovo & Laburú, 2013). Esta situação, predominantemente, é decorrente de um contexto educacional que envolve a ausência de discussões destas temáticas na formação docente inicial e continuada, o que gera insegurança das/dos professoras/es na abordagem dos temas (Peixoto & Ramos, 2011), além da existência de equívocos conceituais, inclusive sobre as estrelas, presentes nas principais fontes de consulta das/os docentes, como os livros didáticos (Langhi & Nardi, 2007).

Em relação às alunas e aos alunos, a pesquisa de Iachel (2011, p. 21), por exemplo, descreve que, ao analisar as concepções prévias de centenas de discentes do ensino médio sobre as estrelas, *“poucos*

¹ Tradução: “Os cientistas nunca devem alegar que algo é absolutamente verdadeiro. Você nunca deve reivindicar perfeição, ou totalidade, ou 100%, porque você nunca chegará lá”.

alunos apresentaram ideias de que as estrelas possuem um tempo determinado de ciclo evolutivo, podendo terminar seus processos como uma nebulosa, ou um buraco negro". Deste modo, constatações como esta nos permitem conjecturar quanto ao desconhecimento sobre discussões conceituais, mas também históricas, sobre as etapas da evolução estelar.

Para contribuir com este contexto, entendemos que a abordagem de Astronomia e de Astrofísica *"não cabe como um mero acréscimo de conteúdos a serem tratados em aula, mas [...] pode promover ricos debates sobre a história e a filosofia das ciências"* (Gama & Henrique, 2010, p. 13). Assim, é consensual em pesquisas no âmbito da educação científica que por meio da utilização didática da História e Filosofia da Ciência (HFC) é possível não somente demonstrar os resultados científicos, mas também identificar o contexto de construção destes conhecimentos. No contexto do presente trabalho, o estudo do episódio histórico de descoberta dos pulsares proporciona evidenciar, por exemplo, como cientistas puderam contribuir para o entendimento deste objeto celeste. Por certo, *"estudar a História e Filosofia da Ciência é compreender as origens das ideias científicas e as diversas influências sofridas e exercidas por ela"* (Moura, 2014, p. 41).

Além disso, estudar a história dos pulsares permite igualmente problematizar um recorrente debate no campo da educação científica: a discussão histórica sobre a presença de mulheres nas ciências. Justificamos a necessidade destas abordagens pelo fato de que *"a promoção da igualdade de gênero nas ciências viabilizará a participação ampla das mulheres, que poderão melhor contribuir para a ciência e tecnologia e serem reconhecidas por suas contribuições"* (Lima, 2013, p. 889). O campo da Astronomia, em especial, apresenta contribuições de diversas mulheres, como Hipátia de Alexandria (350/370-415), Henrietta Swan Leavitt (1868-1921), Cecília Payne-Gaposchkin (1900-1979), Katherine Johnson (1918-2020), Margaret Burbidge (1919-2020), Vera Rubin (1928-2016), bem como Jocelyn Bell Burnell. Desta forma, o desenvolvimento de pesquisas que apresentem o trabalho de mulheres cientistas pode ensejar a apresentação de exemplos de pesquisadoras no contexto educacional, pois a recorrente ausência desta temática em sala de aula acaba por perpetuar uma visão da ciência pouco inclusiva e pouco diversa por parte das/os discentes e das/os docentes. Em outras palavras, pesquisas *"[...] que analisam a presença histórica e os obstáculos enfrentados por essas cientistas [...] permitem que o Ensino de Ciências ultrapasse visões equivocadas de quem faz Ciência, [e que] apesar das dificuldades as mulheres estão produzindo conhecimento"* (Heerdt et al., 2018, p. 235).

Percebendo a relevância da discussão desta temática em diferentes perspectivas, objetivamos investigar como a história da descoberta dos pulsares e a atuação de Jocelyn Bell Burnell neste episódio se manifesta em trabalhos do campo do ensino de Física e de Astronomia, bem como em pesquisas acadêmicas destas áreas, com publicação nas últimas décadas. Assim, nesta pesquisa, visamos responder a seguinte pergunta de pesquisa: *"Como os trabalhos do campo de ensino de Ciências e trabalhos acadêmicos de Física e de Astronomia abordam o episódio histórico de descoberta dos pulsares e a contribuição da astrônoma Jocelyn Bell Burnell?"*. Para tanto, desenvolvemos uma revisão bibliográfica em periódicos e em eventos de ensino de Física e de Astronomia, em dissertações e em teses do campo da Física e da Astronomia e das suas respectivas áreas de ensino.

A fundamentação teórica para a análise dos conteúdos históricos presentes nos trabalhos coletados envolveu fontes primárias², como artigos redigidos pela própria astrônoma (Bell Burnell, 1977, 1983, 2004) e artigos científicos publicados por outros cientistas envolvidos no processo de entendimento dos pulsares (Chadwick, 1932; Baade & Zwicky, 1934; Oppenheimer & Volkoff, 1939; Tolman, 1939; Schmidt, 1963; Landau, 1965; Pacini, 1967; Gold, 1968; Hewish, Bell, Pilkington, Scott, & Collins, 1968; Large, Vaughan, & Mills, 1968; Staelin & Reifenstein, 1968; Hulse & Taylor, 1975; Chandrasekhar, 1994); e fontes secundárias, como obras e artigos que dissertam sobre a história dos pulsares (McGrayne, 1998; Longair, 2006; Kidger, 2007; McNamara, 2008; Dick, 2013; Yakovlev, Haensel, Baym, & Pethick, 2013; Graham-Smith, 2014).

Neste artigo, descrevemos uma breve retrospectiva histórica sobre as/os cientistas envolvidas/os no episódio de detecção dos pulsares, evidenciando o protagonismo de Jocelyn Bell Burnell. Em seguida, discutimos os resultados que evidenciam como aspectos históricos sobre a descoberta dos pulsares são explorados nos trabalhos publicados nos últimos anos, intencionando estabelecer um panorama quanto à abordagem deste conceito. A partir disso, objetivamos também evidenciar as possíveis contribuições do trabalho para futuras pesquisas que possam auxiliar professoras e professores a discutirem este episódio em sala de aula.

² No contexto desta pesquisa, compartilhamos da definição de fontes primárias e secundárias exposta por Martins (2005, p. 310). Segundo a autora, no âmbito das pesquisas em História da Ciência, fonte primária consiste em um "material da época estudada escrito pelos pesquisadores estudados" e fonte secundária diz respeito a "estudos historiográficos e obras de apoio a respeito do período e dos autores investigados".

UM BREVE RESGATE HISTÓRICO SOBRE OS PULSARES

Os primeiros estudos do que viria a ser conhecido como estrela de nêutrons têm início na década de 1930. Considerando o átomo como constituído por prótons e elétrons, no artigo *On The Theory of Stars*, publicado em 1932, Lev Landau (1908-1968) estabelece a possível existência de estrelas extremamente densas, denominando-as de *nucleus stars* (Landau, 1965). Embora não seja esta a concepção moderna sobre as estrelas de nêutrons, Landau é considerado o primeiro cientista a conjecturar a existência dessas estrelas. Segundo Yakovlev *et al.* (2013, p. 292), “o entendimento de Landau de que prótons e elétrons constituem núcleos atômicos [...] fornece uma prova adicional de que o artigo foi concebido antes da descoberta do nêutron [...] [e] a antecipação de Landau de estrelas densas (de nêutrons) que se parecem com núcleos atômicos gigantes foi presciente”. Além disso, o cientista apresentou contribuições sobre a massa máxima de anãs brancas, aspecto corroborado pelos cálculos posteriores elaborados por outros cientistas (McNamara, 2008).

Em fevereiro de 1932, imediatamente depois de Landau publicar suas considerações, James Chadwick (1891-1974) identifica o nêutron e publica o artigo *Possible Existence of a Neutron* na revista *Nature*. A partir da pesquisa de Chadwick (1932), a previsão inicial de Landau foi explorada pelos astrônomos Fritz Zwicky (1898-1974) e Walter Baade (1893-1960), no ano de 1934. Estes sugeriram a existência das estrelas de nêutrons, além de sugerir que estas se originavam a partir das explosões de supernovas (Baade & Zwicky, 1934). Segundo estes autores, “com todas as reservas, avançamos a ideia de que uma supernova representa a transição de uma estrela comum para uma estrela de nêutrons, consistindo principalmente de nêutrons. Essa estrela pode ter um raio muito pequeno e uma densidade extremamente alta” (Baade & Zwicky, 1934, p. 263).

Em 1939, Robert Oppenheimer (1904-1967) e George Volkoff (1914-2000), em conjunto com o trabalho de Richard Tolman (1881-1948), sugeriram matematicamente que a massa máxima destas estrelas poderia ser de aproximadamente 0,7MSol (Oppenheimer & Volkoff, 1939; Tolman, 1939), embora valores atuais coloquem este limite na ordem de 3 MSol. (Longair, 2006). No início da década de 1930, o físico Subrahmanyam Chandrasekhar (1910-1995) já havia calculado um limite análogo para as chamadas anãs brancas (Chandrasekhar, 1994), embora esta pesquisa não tenha recebido, na época, a aceitação de certos cientistas, como Arthur Eddington (1882-1944). O Limite de Chandrasekhar descreve que a massa máxima de uma anã branca é de aproximadamente 1,4 MSol (Dick, 2013).

Em meio a este cenário, o campo da Radioastronomia estava começando a se desenvolver. As contribuições na identificação das primeiras fontes de radio estelar por Karl Jansky (1905-1950) e Grote Weber (1911-2002), no início da década de 1930, desencadearam o desenvolvimento dos chamados radiotelescópios, capazes de identificar fontes estelares que emitissem radiação além da faixa da luz visível. Por meio da utilização dos radiotelescópios, os astrônomos puderam identificar os quasares, que se tornaram prioridade nos estudos desses cientistas: nesse contexto, destaca-se o achado de Maarten Schmidt (1929-), que em 1963 identificou o primeiro quasar denominado 3C273 (Schmidt, 1963). Com o objetivo de desenvolver mais pesquisas sobre fontes de rádio celestes, o astrônomo Antony Hewish (1924-2021) submeteu um projeto na Universidade de Cambridge para que o grupo de radioastrônomos pudesse construir um radiotelescópio, intitulado *Interplanetary Scintillation Array*, cuja finalidade seria catalogar fontes de rádio, como quasares, a partir do fenômeno chamado de cintilação interplanetária:

“Essas flutuações na intensidade das fontes de rádio ocorriam à medida que as ondas de rádio passavam por nosso Sistema Solar. O espaço interplanetário não está totalmente vazio, mas contém gás ionizado fluindo do sol. Irregularidades neste plasma afetam as ondas de rádio por refração e difração; o efeito é conhecido como cintilação interplanetária” (Graham-Smith, 2014, p. 108).

Uma das integrantes do grupo de radioastrônomos de Cambridge era a estudante de pós-graduação Susan Jocelyn Bell (1943-), que nasceu na cidade de Belfast, Irlanda do Norte. Após se formar com honras em Física pela Universidade de Glasgow (McGrayne, 1998), Bell ingressou em seu doutorado em Cambridge, no ano de 1965, sob a orientação de Hewish. Sua tarefa consistia em construir e operar o radiotelescópio, além de analisar os sinais registrados em longos gráficos na procura de quasares:

“Quando o telescópio começou a funcionar em julho de 1967, Burnell mudou do trabalho muscular para o cérebro. Aos 24 anos, ela era responsável por operar o telescópio e analisar seus dados [...] O telescópio varria o céu inteiro a cada quatro dias e expelia dados com quatro canetas [...] que cobriam quase 30 metros de papel gráfico diariamente. Burnell analisou os dados manualmente. O

telescópio era novo e ninguém estava familiarizado com seu comportamento; então a análise não foi computadorizada” (McGrayne, 1998, p. 365).

Após poucos meses do telescópio entrar em operação, Bell Burnell identificou, de maneira inesperada, “[...] um pequeno ruído incomum [...] [que] reaparecia nos 30 metros de gráfico de papel que o radiotelescópio que ela [a cientista] controlava produzia todos os dias” (Kidger, 2007, p. 30): estes sinais não puderam ser considerados como quasares e nem como interferências de outros radiotelescópios. Em um primeiro momento, considerou-se que os sinais poderiam ser resultado de interferência humana ou de problemas técnicos com o radiotelescópio (Bell Burnell, 2004). Com base em outras observações e o auxílio de outros astrônomos, a cientista e os demais membros do grupo identificaram, no mês de novembro de 1967, que este sinal regular apresentava o período de 1,3 segundos (Bell Burnell, 1977), estando situado na constelação de Vulpecula (Bell Burnell, 2004).

O grupo de pesquisa de Hewish começou a conjecturar, também, quanto à possibilidade desse sinal consistir na tentativa de uma comunicação extraterrestre – denominando o registro inesperado *Little Green Men*. Neste contexto, Hewish iniciou a procura de um possível Efeito Doppler emitido pela fonte incomum:

“Se os sinais se originassem de um pequeno planeta girando em torno de um sol distante no espaço, os sinais mostrariam evidências de uma mudança Doppler [...] quando um planeta orbitando ao redor de seu sol vem em direção à Terra, suas ondas de rádio são comprimidas. Conforme um planeta se afasta da Terra, as ondas se espalham novamente. No entanto, a equipe de Hewish não encontrou nenhuma evidência de uma mudança Doppler, descartando a possibilidade” (McGrayne, 1998, p. 367-368).

Entretanto, Bell encontrou outro sinal periódico em outra posição celeste no final de dezembro de 1967, com um período ainda menor que o primeiro, com 1,2 segundos (Bell Burnell, 2004). Esse achado, nas palavras da astrônoma, veio a derrubar a hipótese de comunicação extraterrestre, pelo fato de que “era altamente improvável que dois grupos de *Little Green Men* pudessem escolher a mesma frequência incomum e técnica improvável para sinalizar para o mesmo discreto planeta Terra!” (Bell Burnell, 1983, p. 168). Em meados de janeiro de 1968, a cientista detectou o terceiro e o quarto sinais com diferentes períodos, ainda menores. A partir desses resultados, o grupo de pesquisa decidiu divulgar os achados por meio da submissão do artigo *Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source*, com Hewish e Bell como os primeiros autores, na Revista *Nature*, em fevereiro de 1968. Até o momento da publicação, não havia consenso sobre a natureza desses sinais. No artigo, o próprio grupo de pesquisa sugeriu que tais achados poderiam ser a manifestação de anãs brancas ou estrelas de nêutrons (Hewish *et al.*, 1968). Outros cientistas, como Fred Hoyle (1915-2001), conjecturaram que estes pulsos poderiam ser oriundos de uma remanescente de supernova (McNamara, 2008).

A partir desse contexto de detecção deste novo objeto, as contribuições teóricas protagonizadas anteriormente foram retomadas. De fato, a identificação dos primeiros pulsares corroborou “a ideia de Baade e Zwicky de que uma estrela de nêutrons poderia ser o remanescente deixado para trás após a explosão de uma supernova” (Longair, 2006, p. 67). Cabe destacar que, antes da detecção realizada por Bell Burnell e colaboradores, os cientistas apresentavam um interesse teórico no estudo destas estrelas; no entanto, esforços destinados para seu estudo observacional eram reduzidos, pois por “serem estrelas muito compactas, com raios de apenas 10 até 20 km, acreditava-se que a única chance de observá-las seria como emissores de raios-X fracos” (Longair, 2006, p. 192). Segundo Graham-Smith (2014, p. 108), ainda, “é justo dizer que a maioria dos primeiros radioastrônomos começaram com uma formação em engenharia de comunicação em vez de física nuclear, e a ideia de uma estrela de nêutrons não estava em suas mentes quando o primeiro pulsar foi descoberto”.

Em 1967, alguns meses antes das primeiras detecções realizadas por Bell, Franco Pacini (1939-2012) indicou que a origem da fonte de energia detectada na Nebulosa do Caranguejo, considerada uma remanescente de supernova, poderia ser de estrelas de nêutrons em rotação, como sugerido trinta anos antes; além de supor a existência de campos magnéticos no interior dessas estrelas (Pacini, 1967). Entretanto, foram as contribuições de Thomas Gold (1920-2004) que se tornaram mais conhecidas: em seu artigo *Rotating Neutron Stars as the Origin of the Pulsating Radio Sources*, publicado imediatamente em seguida ao trabalho protagonizado por Bell Burnell. Este astrônomo indicou a possível relação entre as estrelas de nêutrons e os pulsares (McNamara, 2008), além de indicar que a radiação emitida pelo pulsar se originava a partir da sua energia rotacional (Gold, 1968).

“A imagem favorita para a natureza do fenômeno do pulsar foi descrita por Thomas Gold (1920-2004) em 1968, semelhante em muitos aspectos à proposta de Pacini de 1967, e consistia em uma estrela de nêutrons magnetizada, rotativa e isolada na qual o eixo magnético da estrela e seu eixo de rotação estão desalinhados [...] Os pulsos de rádio foram assumidos como originados de feixes de emissão de rádio emitidos ao longo do eixo magnético” (Longair, 2006, p. 193).

Na mesma época, corroborando a previsão feita por estes cientistas e por Baade e Zwicky, dois grupos de pesquisadores identificaram a presença de pulsares em diferentes remanescentes de supernova: em outubro de 1968, Michael Large e Alan Vaughan, da Universidade de Sydney, publicam o achado de um pulsar na Constelação de Vela no artigo *A Pulsar Supernova Association?*, mencionando a possibilidade real de que os pulsares são estrelas de nêutrons em rotação formadas na explosão de supernovas (Large, Vaughan, & Mills, 1968). Em seguida, em dezembro de 1968, David Staelin (1938-2011) e Edward Reifeinstein publicam o artigo *Pulsating Radio Sources Near the Crab Nebula* na revista *Science*, legitimando Large, Vaughan e Mills, demonstrando a existência de um pulsar na Nebulosa do Caranguejo, com emissão na faixa das ondas de rádio, com período de 33 milissegundos (Staelin & Reifeinstein, 1968). Este último consiste na *“supernova que explodiu em 1054 e que foi extensivamente estudada pelos astrônomos chineses da época”* (Longair, 2006, p. 193).

O reconhecimento da comunidade científica quanto à relevância da detecção dos pulsares ocorreu no ano de 1974, quando Antony Hewish, com seu colega de grupo Martin Ryle (1918-1984), recebeu o Prêmio Nobel de Física, pelo *“seu papel decisivo na descoberta dos pulsares”* (Nobel Prize, 2021a). Na época, a omissão de Jocelyn Bell Burnell se tornou um fato polêmico na história da premiação, havendo reações negativas à escolha do Comitê do Nobel por muitos cientistas, como Fred Hoyle (1915-2001) e Thomas Gold (1920-2004) (McGrayne, 1998; McNamara, 2008). Todavia, embora inicialmente a cientista tenha considerado sua omissão na láurea uma decisão justa, décadas depois, especialmente ao adentrar em discussões de gênero na ciência, em especial na Astronomia, ela passou a considerar que sua ausência da premiação pode ter sido influenciada por questões de gênero (McNamara, 2008).

No mesmo ano, Russell Hulse (1950-) e Joseph Taylor (1941-) detectaram pela primeira vez um sistema de pulsares binários (Hulse & Taylor, 1975), que lhes possibilitou investigar indiretamente a existência de ondas gravitacionais, previstas por Albert Einstein (1879-1955). Ambos foram reconhecidos no Prêmio Nobel de Física de 1993, pela *“descoberta de um novo tipo de pulsar, uma descoberta que abriu novas possibilidades para o estudo da gravitação”* (Nobel Prize, 2021b).

CAMINHO METODOLÓGICO

Um dos motivos que despertam o interesse no desenvolvimento de revisões bibliográficas consiste no fato de que, nestas pesquisas, *“os resultados de muitos trabalhos são agrupados para oferecer uma visão geral do estado corrente do desenvolvimento de um assunto, em um dado tempo”* (Figueredo, 1990, p. 132). Observamos que artigos publicados recentemente em periódicos de ensino de Física e de Astronomia apresentam esforços de revisões bibliográficas baseadas no levantamento de trabalhos publicados em periódicos e em eventos, além de teses e dissertações, como por exemplo: física quântica (Silva & Almeida, 2011), interdisciplinaridade no ensino de ciências (Mozena & Ostermann, 2014), física e literatura (Lima & Ricardo, 2015), efeito fotoelétrico (Silva & Errobidart, 2015), reflexão da luz (Ribeiro & Carneiro, 2016), história e filosofia da ciência (Damasio & Peduzzi, 2017), ensino de astronomia nos anos iniciais (Pacheco & Zanella, 2019), nanociência e nanotecnologia (Tonet & Leonel, 2019), entre outros.

Na presente revisão bibliográfica, visamos estabelecer um panorama sobre como a história da descoberta dos pulsares e a atuação de Jocelyn Bell Burnell neste episódio tem sido descrita em pesquisas em ensino de ciências, publicadas até o primeiro trimestre de 2020, em periódicos e em eventos da área, além de dissertações de mestrado e teses de doutorado em ensino de Física e de Astronomia. As palavras-chave utilizadas para a busca dos trabalhos foram as seguintes: “Jocelyn Bell Burnell”, “Estrela de Nêutrons”, “Pulsar” e “Radioastronomia”. A partir destes termos, procuramos pesquisas para investigar os seguintes indicadores, construídas *a priori*, com base na fundamentação teórica apresentada na seção anterior: (a) contexto da detecção dos primeiros pulsares por Jocelyn Bell Burnell; (b) contexto de pré-deteção dos primeiros pulsares, relacionado à predição destas estrelas; e (c) contexto pós-deteção dos pulsares, relacionado ao processo de compreensão conceitual destas estrelas pela comunidade científica.

Primeiramente, iniciamos a busca em periódicos sobre ensino de ciências, de Física e de Astronomia, que foram selecionados com base em seu reconhecimento na avaliação Qualis Periódicos na

área de Ensino (Quadriênio 2013-2016), realizada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). As quinze revistas consultadas possuem Qualis A1, A2, B1 ou B2. O Quadro 1 apresenta os periódicos acessados e suas respectivas classificações:

Quadro 1 – Periódicos.

Nome do Periódico	Qualis em Ensino
A Física na Escola	B2
Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia	A2
Caderno Brasileiro de Ensino de Física	A2
Ciência & Educação	A1
Contexto & Educação	A2
Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências	A1
Enseñanza de las Ciencias	A1
Experiências em Ensino de Ciências	B1
História, Ciências, Saúde - Manguinhos	A2
Investigações em Ensino de Ciências	A2
Revista Brasileira de Ensino de Física	A1
Revista Brasileira de História da Ciência	B1
Revista Brasileira de Pesquisa em Ensino de Ciências	A2
Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias	A1
Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia	B2

Nestes periódicos, desenvolvemos a coleta de trabalhos por meio da leitura dos números das revistas publicados nos últimos vinte anos. Com a reduzida quantidade de trabalhos encontrados, ampliamos a procura, com a consulta de artigos que apresentassem conceitos correlacionados com as palavras-chave selecionadas, como “Buraco Negro”, “Evolução Estelar”, “Onda Gravitacional”, além de trabalhos mais amplos relacionados à Educação em Astronomia. Em tal busca, encontramos artigos nos quais às menções aos pulsares e/ou a Jocelyn Bell Burnell eram encontradas no corpo do texto, embora não aparecessem nos títulos e/ou resumos.

Para a coleta dos trabalhos nas atas de eventos, desenvolvemos uma estratégia semelhante, mediante a leitura dos títulos e resumos dos trabalhos apresentados em comunicações orais e em comunicações em painéis. Os eventos que foram escolhidos, a partir de sua relevância para as áreas do ensino da Física e da Astronomia, estão expostos no Quadro 2:

Quadro 2 – Eventos.

Eventos	Sigla
Encontro de Pesquisa em Ensino de Física	EPEF
Encontro Nacional de Astronomia	ENAST
Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências	ENPEC
Simpósio Nacional de Ensino de Astronomia	SNEA
Simpósio Nacional de Ensino de Física	SNEF

Além dos periódicos e dos eventos de ensino de ciências, procedemos à procura de dissertações de mestrado e teses de doutorado, publicadas/os nos últimos vinte anos, nas seguintes bases de dados bibliográficos: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD) e Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES. Desenvolvemos estas coletas mediante o sistema de busca do repositório. Nestas consultas, recorreremos a diferentes combinações dos termos “Jocelyn Bell Burnell”, “Radioastronomia”, “Estrela de Nêutrons”, “Pulsar”, “Evolução Estelar” e “Astrofísica Estelar”. Para tanto, objetivando restringir a quantidade de trabalhos coletados de maneira que possuíssem relações diretas com o objeto de pesquisa, realizamos consultas com a utilização de operadores de truncagem e de proximidade, além dos operadores booleanos. Devido à restrita quantidade de dissertações e teses em ensino encontradas nestas bases de dados, optamos também por uma sondagem de pesquisas acadêmicas, não relacionadas ao ensino, do campo da Física e da Astronomia.

CARACTERIZAÇÃO GERAL DAS PESQUISAS

Periódicos

Das quinze revistas acessadas, em três encontramos trabalhos sobre a temática: Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF), Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) e Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA). Nestas revistas, em específico, realizamos a busca em todos os volumes, extrapolando, portanto, o período dos últimos vinte anos inicialmente considerado, o que resultou na seleção de 19 artigos. Após a leitura inicial do conteúdo destes trabalhos, observamos que sete dos artigos apenas mencionavam as palavras-chave de maneira pontual, sem discorrer detalhes históricos ou mesmo conceituais; e que outros dois dissertavam acerca de aspectos sobre radioastronomia sem vínculos com os pulsares. Considerando estes critérios de exclusão, restaram 10 artigos para a análise. Avaliando o escopo dessas revistas, percebemos que as discussões se restringem em periódicos com enfoque específico ao ensino de Física e Astronomia. Ainda assim, destacamos que embora a RELEA possua um enfoque às pesquisas sobre ensino de Astronomia, ela apresenta somente um artigo relacionado com a temática. O Quadro 3 apresenta os títulos destes artigos e o periódico em que foram publicados:

Quadro 3 – Artigos Coletados nos Periódicos.

Autoria	Artigo	Periódico
Livi (1987)	Um visitante inesperado: a supernova 1987A	CBEF
Lattari e Trevisan (2001)	Radioastronomia: noções iniciais para o Ensino Médio e Fundamental como ilustração de aula	CBEF
Bianchi (2004)	Radioastronomía: Una mirada más amplia	RELEA
Steiner (2010)	Buracos Negros: Sementes ou Cemitérios de Galáxias?	CBEF
Horvath (2013)	Uma proposta para o ensino da astronomia e astrofísica estelares no Ensino Médio	RBEF
Fróes (2014)	Astronomia, astrofísica e cosmologia para o Ensino Médio	RBEF
Bassalo e Cattani (2016)	Detecção de ondas gravitacionais	CBEF
Cordeiro (2017)	Mulheres na Física: um pouco de história	CBEF
Bassalo e Cattani (2018)	O Prêmio Nobel de Física de 2017 e as Instituições Brasileiras de Pesquisas Físicas	CBEF
Rodriguez (2018)	Polarización de la luz: conceptos básicos y aplicaciones en astrofísica	RBEF

Alguns autores (Steiner, 2010; Bassalo & Cattani, 2016; 2018) apresentam, respectivamente, um aspecto mais informativo sobre elementos históricos relativos aos conceitos de buracos negros e de ondas gravitacionais, que estão relacionados indiretamente com o conceito de pulsares. Outras/os autoras/es (Lattari & Trevisan, 2001; Bianchi, 2004), por sua vez, expõem materiais de consulta para que as/os docentes possam inserir discussões relativas à radioastronomia nas aulas de ciências, mencionando os

pulsares como um dos objetos que foram passíveis de observação mediante o desenvolvimento da radioastronomia.

O editorial de Cordeiro (2017), por sua vez, aponta uma denúncia quanto ao fato de mulheres que desenvolveram relevantes contribuições para a ciência não serem reconhecidas historicamente, como o caso de Jocelyn Bell Burnell. A autora sugere a inclusão destas cientistas no contexto de ensino de Física: “Mesmo quem busca tratar a Física pela atualidade dos tópicos de ponta, como da colisão das estrelas de nêutrons ocorrida no mês de outubro deste ano [...], tem espaço para falar da contribuição de Burnell” (p. 671).

A pesquisa de Rodríguez (2018), por exemplo, discorre sobre elementos conceituais sobre os pulsares para a compreensão do fenômeno de polarização de ondas eletromagnéticas, pelo fato dos pulsos emitidos por esses objetos serem polarizados. As pesquisas de Livi (1987), Horvath (2013) e Fróes (2014) consistem em artigos de orientação quanto a possíveis temáticas específicas sobre Astrofísica Estelar a serem abordadas no âmbito do ensino de Física e possuem em comum o fato de mencionarem as estrelas de nêutrons na discussão do episódio histórico sobre a explosão estelar ocorrida na Nebulosa de Caranguejo.

Eventos

No que diz respeito aos eventos³, dos cinco acessados, dois apresentaram trabalhos sobre as temáticas abordadas: o Simpósio Nacional de Ensino de Astronomia (SNEA⁴) e o Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF). Neste último evento, buscamos por trabalhos nas atas dos últimos vinte anos, cujos resumos e trabalhos completos estavam disponíveis na íntegra. Nessa primeira coleta, identificamos 12 como de potencial interesse; posteriormente, com a leitura destes trabalhos, observamos que sete deles apenas indicavam aspectos gerais sobre os descritores analisados, principalmente relacionados com a radioastronomia e a importância dos radiotelescópios. Dessa forma, para a análise, selecionamos cinco trabalhos. Os títulos e autoras/es, bem como o evento em que foram apresentados estão expostos no Quadro 4:

Quadro 4 – Artigos Coletados em Eventos.

Autoria	Artigo	Evento
Alves, Quintilio, Perez e Força (2007)	A evolução dos instrumentos de observação astronômica e o contexto histórico-científico	SNEF
Carvalho Neto, Stefani, Apolinário, Soares e Mendes (2017)	Trabalhando de forma prática o experimento de detecção de ondas gravitacionais do observatório LIGO	SNEF
Araújo, Guedes e Pereira (2019)	Da prática da radioastronomia amadora com o Radio Jove à criação de produtos educacionais para o ensino de física	SNEF
Costa, Polati e Allen (2018)	Uma proposta de discussão de controvérsias históricas e epistemológicas acerca da evolução estelar para o ensino médio	SNEA
Carvalho, Silva e Cabral (2019)	Contribuições femininas no desenvolvimento da física: uma pesquisa em periódicos da área de ensino	SNEF

Identificamos que estes trabalhos publicados em eventos trazem reflexões mais explícitas sobre a abordagem dos pulsares em propostas didáticas e suas implicações para o ensino; sendo exceção a pesquisa de Alves *et al.* (2007), a qual discute os equipamentos astronômicos e a relevância da radioastronomia na detecção dos pulsares. Podemos conjecturar o fato de que devido à temática ser recente, ainda não houve uma adesão teórica sobre o tema por parte do campo acadêmico em ensino de ciências – em nível de exemplo, no EPEF e no ENPEC não foram encontrados trabalhos. Diferentemente

³ Sobre as atas do EPEF e ENPEC, encontramos somente um trabalho em cada evento, com menções pontuais às palavras-chave. Quanto ao ENAST, as atas de algumas edições do evento não estavam disponíveis, o que impossibilitou sua inserção nos dados da coleta.

⁴ Alguns poucos trabalhos encontrados no SNEA não foram ser incluídos na coleta pelo fato de não poderem ser acessados na íntegra; constavam apenas seus resumos no site do evento.

do SNEF e do SNEA, eventos que abarcam relatos de experiências, já se apresentam pesquisas sobre intervenções didáticas que mencionam os pulsares em novas temáticas no ensino, como Evolução Estelar e Radioastronomia.

A pesquisa de Carvalho Neto *et al.* (2017), por exemplo, discorre sobre a possibilidade de articulação de conceitos sobre Relatividade no contexto de discussão sobre ondas gravitacionais, mencionando sua relevância para o estudo das estrelas de nêutrons. Por último, Costa *et al.* (2018) descrevem alguns aspectos de análise da implementação de uma sequência didática no ensino médio sobre evolução estelar, o qual fez menções aos pulsares e às contribuições de Jocelyn Bell Burnell.

Outro trabalho (Araújo *et al.*, 2019), resultado da dissertação de mestrado de Araújo (2017) – considerada no *corpus* de análise desta pesquisa – descreve as reflexões sobre a implementação de um produto educacional, cujo objetivo consistiu na abordagem de conceitos de radioastronomia e na exploração experimental dos radiotelescópios amadores. Destacamos que, ao mencionarem a pesquisa realizada por Bell Burnell na sequência didática, os autores indicam o desenvolvimento de um experimento o qual simula o comportamento de um pulsar. Outra pesquisa (Carvalho *et al.*, 2019), por sua vez, apresenta implicações mais acadêmicas, que dizem respeito à preocupação, também ilustrada por Cordeiro (2017), quanto às raras abordagens sobre exemplos de mulheres cientistas no contexto de educação em ciências: os resultados do trabalho indicaram a ausência de pesquisas que evidenciassem as contribuições da astrônoma Jocelyn Bell Burnell.

Dissertações e Teses

Em relação à busca de trabalhos de mestrado e de doutorado do campo do ensino de Física e de Astronomia na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações e no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, foram encontradas cinco dissertações de mestrado (Rodrigues, 2016; Araújo, 2017; Silva, 2017; Napoleão, 2018; Vieira, 2018) que evidenciaram a abordagem didática da temática dos pulsares para contextualização do campo da Radioastronomia e da Astrofísica Estelar.

Por conta desta reduzida quantidade, ampliamos a procura para dissertações e teses do campo da Física e da Astronomia. Nesta perspectiva, desconsiderando pesquisas que discorriam sobre o episódio de maneira superficial em introduções e/ou em preâmbulos de capítulos que objetivavam discutir estes conceitos, selecionamos 15 trabalhos. Em grande parte destes trabalhos (Jacobsen, 2007; Razeira, 2008; Pires, 2009; Gomes, 2011, 2016; Alloy, 2012; Casali, 2013; Oliveira, 2015; Marquez, 2018; Ladislau, 2019) constatamos uma característica em comum: destinavam seções das dissertações ou das teses para abordar especificamente aspectos históricos, o que pode evidenciar uma justa preocupação de físicas/os e astrônomas/os com o componente histórico deste conceito. No Quadro 5, demonstramos as informações relativas às pesquisas encontradas nestas bases de dados:

Quadro 5 – Dissertações e Teses Coletadas nas Bases de Dados.

Autoria	Trabalho
Cavagnoli (2005)	A importância dos mésons estranhos nas propriedades das estrelas de nêutrons
Dexheimer (2006)	Compressibilidade da Matéria Nuclear em Estrelas de Nêutrons
Jacobsen (2007)	Plasma de Quarks e Glúons no Interior de Estrelas de Nêutrons
Razeira (2008)	Naturalidade, Quebra de Simetria de Isospin e a Estrutura Interna das Estrelas de Nêutrons
Pires (2009)	Population Study of Radio-Quiet and Thermally Emitting Isolated Neutron Stars
Gomes (2011)	Transições de Fase Hádron-Quark em Estrelas de Nêutrons
Alloy (2012)	Pasta nuclear e a evolução de protoestrelas de nêutrons
Casali (2013)	Objetos estelares compactos sujeitos a campos magnéticos fortes
Oliveira (2015)	Modelo para o Índice de Frenagem de Pulsares
Alfradique (2016)	Modelos de Estrelas Relativísticas com Campo Magnético Dipolar
Gomes (2016)	Vínculos Magnéticos na Equação de Estado e na Estrutura de Estrelas de Nêutrons

Autoria	Trabalho
Lopes (2016)	Equações de Estado em Física de Hádrons
Rodrigues (2016)	Formação e evolução estelar como uma proposta de contextualização para o ensino de Termodinâmica no Ensino Médio
Araújo (2017)	Simuladores experimentais de radiotelescópios para o ensino de Astronomia no nível médio
Mendes (2017)	Evolução do Campo Magnético em Binárias Relativísticas
Silva (2017)	Evolução Estelar no Ensino de Ciências
Marquez (2018)	Conversão de fases em estrelas compactas
Napoleão (2018)	Astrofísica Estelar para o Ensino Médio: Uma abordagem empírica baseada na observação visual das estrelas variáveis
Vieira (2018)	Astrofísica Estelar para o Ensino Médio: análise de uma proposta
Ladislau (2019)	Análises dos mecanismos de perda de energia e os índices de freamento em pulsares

De fato, descrições históricas, embora com um teor cronológico, se apresentam nos trabalhos do campo da Física e da Astronomia. Nessas pesquisas, observamos a recorrente menção a nomes de cientistas cuja influência se percebe no contexto de construção do conceito de estrelas de nêutrons e dos pulsares. Neste sentido, além de Antony Hewish e Jocelyn Bell Burnell, também mencionam: Lev Landau, James Chadwick, Walter Baade, Fritz Zwicky, George Volkoff, Richard Tolman, Robert Oppenheimer, Thomas Gold, Franco Pacini, Russell Hulse e Joseph Taylor.

Por outro lado, nas dissertações que versam sobre ensino de Física e de Astronomia prevalecem discussões desta temática em um caráter conceitual. Vieira (2018), que desenvolveu uma sequência didática para discussão de aspectos sobre Astrofísica Estelar, menciona os pulsares na seção de resultados, elencando a curiosidade dos alunos em relação ao fenômeno de explosão de supernova. Silva (2017), por sua vez, objetivando embasar o desenvolvimento de um produto educacional no formato de um jogo sobre evolução estelar, evidenciou aspectos conceituais sobre os pulsares, sem indicar seus aspectos históricos. Rodrigues (2016) apresenta uma descrição conceitual semelhante, embora destaque pontualmente o contexto histórico da detecção da Nebulosa do Caranguejo.

As exceções a esta abordagem são as dissertações de Araújo (2017) e Napoleão (2018), que exploraram o conceito de pulsares, no contexto do ensino médio, respectivamente, em discussões sobre Radioastronomia e Astrofísica Estelar. Em termos históricos, Araújo (2017) desenvolve uma contextualização deste episódio, evidenciando determinados elementos do contexto da descoberta dos pulsares protagonizada por Bell Burnell; Napoleão (2018) menciona pontualmente a astrônoma e seu orientador como responsáveis pela detecção dos primeiros pulsares.

ANÁLISE DAS PESQUISAS

Contexto de Detecção dos Primeiros Pulsares

Considerando que parte do objetivo desta pesquisa bibliográfica é evidenciar como as contribuições de Jocelyn Bell Burnell na descoberta dos pulsares são destacadas nos trabalhos coletados, analisamos, primeiramente, como ocorrem essas menções à astrônoma nas pesquisas. Sua menção ocorre de maneiras ligeiramente diferentes, mas que não desconsideram o protagonismo da astrônoma neste episódio. Neste sentido, encontramos nove pesquisas (Bianchi, 2004; Jacobsen, 2007; Razeira, 2008; Gomes, 2011, 2016; Casali, 2013; Alfradique, 2016; Bassalo & Cattani, 2016, 2018) que colocam Bell Burnell como a responsável pela observação dos pulsos periódicos de ondas de rádio, que viriam mais tarde a serem compreendidos como pulsares, além de descreverem que a cientista era pertencente a um grupo de pesquisa em Cambridge, liderado por Antony Hewish. Como apontado por autoras/es que se debruçaram sobre os elementos históricos deste episódio (McGrayne, 1998; McNamara, 2008; Dick, 2013), Bell Burnell e Hewish eram integrantes de um grupo cujo objetivo de pesquisa consistia em investigar o comportamento de fontes celestes de ondas de rádio, como quasares. Outras nove publicações (Steiner, 2010; Alloy, 2012; Lopes, 2016; Araújo, 2017; Cordeiro, 2017; Mendes, 2017; Costa *et al.*, 2018; Marquez, 2018; Napoleão, 2018), por sua vez, apenas citam Bell Burnell e Hewish como os únicos envolvidos na detecção dos

pulsares, não se reportando ao grupo de pesquisa. Um destes exemplos está presente em uma das dissertações do campo de ensino de Física:

“As estrelas de nêutrons estão associadas ao fenômeno dos pulsares, descoberto na década de 1960 por Jocelyn Burnell e Anthony Hewish: pulsos regulares de radiação eletromagnética provenientes de certas regiões do céu, que posteriormente foram identificadas como locais em que haviam explodido supernovas há séculos ou milênios no passado. A rápida rotação da estrela e seu intenso campo magnético criam feixes de radiação eletromagnética, que se projetam da estrela ao longo do seu eixo magnético. Esses feixes giram com a estrela, mais ou menos como o feixe de luz de um farol. Se, por uma circunstância, a Terra estiver na linha do feixe, nós o veremos sob a forma de um pulso, a cada vez que a estrela gira” (Napoleão, 2018, p. 248).

Não obstante, localizamos algumas exceções a estas constatações: Oliveira (2015) apresenta apenas os nomes do grupo de pesquisa. Três publicações (Cavagnoli, 2005; Pires, 2009; Ladislau, 2019) mencionam somente a astrônoma, enquanto Dexheimer (2006) associa a detecção dos pulsares apenas ao orientador da cientista. Ademais, somente um trabalho apresenta os nomes de Bell Burnell e Hewish como importantes para o campo da Radioastronomia (Araújo *et al.*, 2019) e outra pesquisa (Carvalho *et al.*, 2019) menciona o nome de Bell Burnell como sendo uma protagonista no estudo das estrelas.

Naqueles trabalhos que aludem a estes cientistas, destacamos que quatro deles (Cordeiro, 2017; Mendes, 2017; Costa *et al.*, 2018; Marquez, 2018) mencionam a omissão de Jocelyn Bell Burnell à láurea no Prêmio Nobel de Física ocorrida no ano de 1974, recebida pelo seu orientador, Antony Hewish. Em nível de exemplo, há citações como: *“A exclusão de Jocelyn Bell se tornou uma das polêmicas ao redor do prêmio Nobel”* (Mendes, 2017, p. 23). Em outra pesquisa (Costa *et al.*, 2018), notamos que um dos seus resultados apresenta que as/os discentes que participaram da implementação da sequência didática desenvolvida pelos autores identificaram como uma problemática o fato de homens levarem predominantemente o crédito pelos trabalhos científicos. Por outro lado, outros trabalhos, mencionam a láurea ao orientador da pesquisadora, mas não estabelecem estas críticas (Jacobsen, 2007; Razeira, 2008; Alloy, 2012; Casali, 2013; Alfradique, 2016).

Em relação a aspectos específicos sobre o contexto da descoberta dos pulsares, podemos perceber que parte considerável das pesquisas analisadas não discorre sobre o processo de desenvolvimento da pesquisa de Jocelyn Bell Burnell, o que implica em relatos históricos que tendem a enfatizar os resultados encontrados pelas/os cientistas, sem considerar os contextos que as/os levaram a desenvolver determinado conhecimento. Neste âmbito, observamos que a grande maioria dos trabalhos aponta que a cientista encontrou os pulsares ao estar estudando fontes celestes que emitiam ondas de rádio. Algumas exceções (Bianchi, 2004; Razeira, 2008; Pires, 2009; Oliveira, 2015), entretanto, adentram na discussão de que a cientista objetivava identificar outros objetos estelares, que se tratavam dos quasares, especificamente. Além disso, Casali (2013) e Ladislau (2019) mencionam o fenômeno de cintilação interplanetária, investigado pela astrônoma para estudo das fontes de rádio. Os trechos que apresentamos abaixo são alguns exemplos, que procuram aprofundar, em determinados aspectos, o trabalho protagonizado por Bell Burnell:

“Em 1967, enquanto usava um radiotelescópio construído para procurar variações rápidas na emissão de quasares na faixa do rádio, Jocelyn Bell encontrou uma série de sinais de rádio pulsantes extremamente precisos e rápidos” (Pires, 2009, p. 2).

“Em Julho de 1967, cientistas de um grupo de radioastronomia da Universidade de Cambridge detectaram sinais usando um radiotelescópio primitivo formado por um enorme conjunto de postes e cabos espalhados por 4,5 [sic] hectares de terra. O radiotelescópio foi desenvolvido por Antony Hewish, líder do grupo, e seus alunos, com objetivo de captar a cintilação das estrelas, particularmente de quasares” (Oliveira, 2015, p. 17).

“Em novembro de 1967, Jocelyn Bell, estudando a cintilação de ondas de rádio provenientes de fontes compactas no meio interestelar, observou pela primeira vez um sinal consistindo de uma série de pulsos que se repetiam a cada 1,337s localizado em ascensão reta e declinação fixas” (Ladislau, 2019, p. 6).

Além disso, podemos perceber que certos trabalhos elencam algumas das possíveis hipóteses levantadas por Bell Burnell e pelo grupo de pesquisa ao desenvolverem uma possível explicação para esses pulsos até então desconhecidos, como “*a reflexão de ondas de rádio na superfície da lua*” (Ladislau, 2019, p. 7), “*provenientes de alguma fonte artificial*” (Alloy, 2012, p. 31), “*pulsões radiais de estrelas anãs brancas*” (Mendes, 2017, p. 23). Entretanto, a hipótese que se mostrou mais predominante nos trabalhos coletados diz respeito à consideração de que os cientistas poderiam ter entrado em contato com civilizações extraterrestres (Cavagnoli, 2005; Bassalo & Cattani, 2016, 2018; Lopes, 2016; Costa *et al.*, 2018; Marquez, 2018; Ladislau, 2019), o que, de fato, é a hipótese que apresenta maiores discussões nos relatos históricos sobre este episódio.

Além destes, é imprescindível destacar que o trabalho que apresenta mais detalhes históricos sobre as hipóteses levantadas é a dissertação de Araújo (2017, p. 64–65), que menciona uma palestra dada pela pesquisadora na década de 1970, transcrita em Bell Burnell (1977). Nesta citação, o autor menciona várias hipóteses consideradas pelo grupo, como possibilidade de radiointerferência por outros radiotelescópios, possíveis problemas no próprio equipamento construído pelo grupo de pesquisa e a possibilidade dos sinais consistirem em uma tentativa de comunicação extraterrestre:

“Pulsares são corpos celestes cuja existência foi descoberta graças ao advento da Radioastronomia. As técnicas ainda eram relativamente incipientes, no ano de 1967, mas seus recursos permitiram à pesquisadora Jocelyn Bell Burnell (1943) detectar uma fonte de radiação eletromagnética, composta por pulsos de curta duração, extremamente regulares. Cerca de nove anos após a descoberta, Jocelyn Bell, em uma palestra no Eighth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics [...] explicou como a descoberta ocorreu, em meio à pesquisa que investigava a influência de partículas carregadas, como as do vento solar, que fazem as ondas de rádio cintilarem, ou parecerem flutuar em amplitude. Efeito semelhante à cintilação que a atmosfera terrestre provoca na luz das estrelas que vemos à noite. No relato, ela menciona seu trabalho de operar o funcionamento do radiotelescópio e analisar os dados, que eram impressos em papel e como, após analisar centenas de metros de folhas de gráfico, já estava familiarizada com as diversas emissões típicas e pôde diferenciar os ruídos de origem terrestre daqueles das emissões cósmicas. Assim, percebeu pulsos de curta duração, espaçados cerca de $1^{1/3}$ s, na ascensão reta 1919 (pulsar CP1919). Os sinais eram de regularidade espantosa e, em seu relato, quando Jocelyn Bell mostrou os gráficos ao seu orientador, Antony Hewish (1924), ele atribuiu sua origem à atividade humana. Ao examinar os sinais no observatório, no entanto, percebeu que seguiam o movimento sideral. Descartaram reflexão de radares na Lua, satélites em órbitas peculiares e até a influência de um grande edifício com cobertura de metal nas proximidades das antenas. As pulsações também foram captadas em outra antena, descartando problemas no equipamento. Houve então especulação de serem sinais de outra civilização, em função de serem pulsos tão regulares, que pareciam sinais artificialmente irradiados, mas os pesquisadores logo descartaram a hipótese quando outros três pulsares foram descobertos em outras regiões do céu, por Jocelyn Bell”.

Contexto de Pré-Detecção dos Pulsares

Além de analisarmos nas pesquisas coletadas o contexto de descoberta dos pulsares, é válido identificarmos alguns aspectos históricos anteriores a este episódio. Primeiramente, a análise dos trabalhos nos propiciou elencar uma divergência histórica na menção das contribuições do cientista Lev Landau. Certas pesquisas (Cavagnoli, 2005; Dexheimer, 2006; Jacobsen, 2007; Razeira, 2008; Ladislau, 2019) apresentam que Lev Landau desenvolveu as hipóteses iniciais sobre a existência das estrelas de nêutrons após a detecção do nêutron por James Chadwick. No entanto, no artigo *Lev Landau and the concept of neutron stars*, Yakovlev *et al.* (2013) discutem que o físico elaborou suas hipóteses iniciais considerando o átomo como constituído somente por prótons e elétrons.

Por outro lado, outras pesquisas (Gomes, 2011, 2016; Alloy, 2012; Lopes, 2016; Mendes, 2017; Marquez, 2018), apresentam referências a essa discussão. Por exemplo, respectivamente nas citações abaixo, Lopes (2016, p. 14) descreve que Landau elaborou suas ideias antes mesmo da identificação dos nêutrons, enquanto Mendes (2017, p. 21–22) evidencia datas de escrita e de publicação do artigo de Landau, o que esclarece que ele elaborou suas hipóteses anteriormente à publicação do trabalho de Chadwick:

“A primeira ideia a respeito das estrelas de nêutrons apareceu em 1931, um ano antes da descoberta do próprio nêutron. Um jovem [...] chamado Lev Landau, então com 23 anos, propôs que poderia existir um estado ainda mais denso e compacto que uma anã branca, cuja estabilidade provinha não da degenerescência dos elétrons, mas da própria estrutura da matéria nuclear. Como não se conhecia o nêutron naquela época, ele postulou que a densidade de tais estrelas seria tão grande que os seus constituintes se sobreporiam, transformando a matéria nuclear em um gigantesco núcleo”.

“A ideia das estrelas de nêutrons surgiu pela primeira vez em 1930 com a finalidade de resolver questões como os estágios finais da evolução estelar, a fonte de energia das supernovas e até mesmo especulando a respeito da fonte de energia de estrelas comuns. Os primeiros desenvolvimentos teóricos foram feitos pelo físico soviético Lev D. Landau (1908-1968). [...] O artigo em que Landau fala sobre as estrelas de nêutrons foi publicado em fevereiro de 1932, mas na última linha desse artigo está a data de fevereiro de 1931, indicando que ele teria escrito o artigo antes do nêutron ter sido descoberto”.

Em dezesseis pesquisas (Cavagnoli, 2005; Dexheimer, 2006; Jacobsen, 2007; Razeira, 2008; Steiner, 2010; Gomes, 2011, 2016; Alloy, 2012; Oliveira, 2015; Alfradique, 2016; Lopes, 2016; Mendes, 2017; Araújo, 2017; Marquez, 2018; Bassalo & Cattani, 2018; Ladislau, 2019), a menção histórica deste episódio também abarca discussões acerca da predição das estrelas de nêutrons por Fritz Zwicky e Walter Baade na década de 1930, os quais descreveram que o surgimento destes objetos resulta de explosões de supernovas. A citação de Gomes (2011, p. 113), por exemplo, ilustra este fato histórico:

“Dois anos após a descoberta do nêutron, em 1934, Walter Baade e Fritz Zwicky propõem que explosões de supernovas são a transição de uma estrela comum para um objeto extremamente compacto composto por nêutrons [...] Ainda em 1934, Baade e Zwicky publicaram mais hipóteses acerca dessas estrelas de nêutrons, apontando que estas deveriam ser objetos com densidades extremamente altas, podendo em alguns casos exceder a densidade da matéria nuclear e que seu raio deveria ser muito pequeno, sendo objetos de difícil detecção”.

Neste contexto, é interessante destacar que alguns trabalhos apontam a resistente aceitação da comunidade científica em relação à predição elaborada pelos astrofísicos, além da estagnação na continuidade das pesquisas em torno da temática naquela época. Por exemplo, Mendes (2017, p. 22) descreve que “[...] devido a pouca tecnologia existente na época e à impossibilidade de detectar esses objetos essas estrelas foram um pouco esquecidas pela comunidade astronômica”. As citações abaixo apresentam outras razões:

“Apesar do expressivo impacto do trabalho de W. Baade e F. Zwicky, a procura por estes objetos estelares não se deu de maneira imediata, pois não se sabia, à época, pelo que procurar: quais seriam as assinaturas destas estrelas, perguntavam-se então os cientistas?” (Razeira, 2008, p. 178).

“Também em 1939, o astrônomo Fritz Zwicky proclamava sua teoria de que existiam estrelas muito mais densas, as estrelas de nêutrons. Elas seriam responsáveis pelos fenômenos mais energéticos conhecidos, as explosões de supernovas, e pela existência de raios cósmicos – teoria elaborada com a colaboração de Walter Baade. Dado o fato de que ele tinha uma personalidade um tanto quanto inamistosa, ninguém o levou muito a sério até que, em 1968, foram descobertos os pulsares por Antony Hewish e Jocelyn Bell” (Steiner, 2010, p. 727).

“Houve um decréscimo na produção científica referente a estrelas de nêutrons nos anos que seguiram até a década de 60 devido à Segunda Guerra Mundial. A partir dessa época, surgiram diversos estudos teóricos que buscavam por uma equação de estado na matéria nuclear a altas densidades, ou seja, uma equação de estado para as estrelas de nêutrons” (Gomes, 2011, p. 109).

Não obstante, destacamos que uma pesquisa (Costa *et al.*, 2018) não descreve esta abordagem exposta nos demais trabalhos, evidenciando que a identificação das estrelas de nêutrons, por meio da pesquisa de Bell Burnell, ocorreu de maneira anterior à sua proposição. De fato, embora determinadas

características dos pulsares tenham se mostrado inéditas após sua detecção, como a periodicidade de seus pulsos, a descrição construída pelos autores não menciona as predições realizadas por Baade e Zwicky em 1934 e por Pacini no ano de 1967, as quais posteriormente foram relevantes para a compreensão destes novos objetos celestes.

Há trabalhos que apresentam as contribuições de Richard Tolman, George Volkoff e Robert Oppenheimer, que definiram cálculos, baseados na Relatividade Geral, acerca do limite de massa para uma estrela de nêutrons, objetivando embasar a proposta desenvolvida anos antes por Baade e Zwicky. A maioria das pesquisas insere as contribuições dos três cientistas na definição do limite da massa desta categoria de estrelas (Jacobsen, 2007; Razeira, 2008; Gomes, 2011, 2016; Alloy, 2012; Casali, 2013; Marquez, 2018), embora algumas pesquisas (Cavagnoli, 2005; Bassalo & Cattani, 2016; Lopes, 2016; Mendes, 2017; Ladislau, 2019) citem apenas Oppenheimer e Volkoff. A contribuição destes cientistas se demonstra pelo fato de que *“as estrelas de nêutrons são objetos estelares extremamente compactos e causam considerável deformação no espaço-tempo, de forma que os efeitos previstos pela relatividade geral não são desprezíveis”* (Alloy, 2012, p. 29).

Entretanto, uma discussão interessante e que corrobora os estudos elaborados sobre o episódio (McNamara, 2008; Dick, 2013) diz respeito à apresentada por poucas pesquisas (Gomes, 2011, 2016; Alloy, 2012; Lopes, 2016; Marquez, 2018) que evidenciam que, embora os cálculos desenvolvidos pelos cientistas tenham sido aceitos pela comunidade científica da época, o valor encontrado por estes cientistas não era considerado a estimativa correta, pois conflitava com o limite descrito por Chandrasekhar. Neste sentido, Marquez (2018, p. 18–19) é um dos autores que discutem esta questão com relativa profundidade:

“Um avanço significativo na compreensão deste tipo de objeto [estrelas de nêutrons] foi a obtenção da equação relativística para o equilíbrio hidrostático à partir das equações da relatividade geral de Einstein, resultado publicado simultaneamente por Tolman (1939) e Oppenheimer e Volkoff (1939). Já era patente à época que, ao contrário das anãs brancas, onde cabia o uso da gravitação newtoniana, nas estrelas de nêutrons seria necessário levar em conta os efeitos da gravitação relativística, que surgiriam devido às altíssimas densidades envolvidas nesse tipo de objeto. Enquanto Tolman (1939) dá uma abordagem mais formal, voltada à solução analítica das equações de Einstein, o trabalho de Oppenheimer e Volkoff (1939) se preocupa com a solução da equação relativística para o equilíbrio hidrostático, apresentando a abordagem ‘física’ ainda hoje usual para a solução desta, além de trazer a primeira aplicação deste método em estrelas de nêutrons. [...] Contudo, na aplicação em matéria estelar, os autores obtiveram como resultado uma massa máxima de 0.71 MSol. Mesmo que à época não houvesse quaisquer indícios observacionais de estrelas de nêutrons ou medições de suas massas, este valor conflitava com o limite de Chandrasekhar. Assim, dificultava-se a explicação quanto ao fenômeno que permitiria o surgimento destes objetos, uma vez que a pressão de degenerescência dos elétrons deveria ser superada nesse processo, algo que apenas ocorreria para massas maiores que 1.4 MSol. A origem desta inconsistência está na simplicidade da EoS [Equation of State] utilizada, que consistia na equação de estado para um gás de Fermi livre, em que os nêutrons não interagem entre si. Embora admitindo que a presença de uma interação repulsiva pudesse contribuir para a elevação dessa massa limite, os autores insistiram, incorretamente, que o resultado obtido por eles estava próximo do verdadeiro. Resultados posteriores estabeleceram que a massa máxima de um objeto para que o colapso gravitacional seja evitado pela pressão de degeneração dos nêutrons, o chamado de limite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV), está situada entre 1.5 e 3 MSol”.

Em relação às contribuições de Chandrasekhar, encontramos oito pesquisas (Dexheimer, 2006; Jacobsen, 2007; Steiner, 2010; Gomes, 2011, 2016; Bassalo & Cattani, 2016; Costa *et al.*, 2018; Marquez, 2018) que mencionam historicamente seu trabalho no contexto de compreensão das anãs brancas, esboçando o possível limite de massa desta categoria de estrelas. Em outras nove pesquisas analisadas (Cavagnoli, 2005; Razeira, 2008; Casali, 2013; Ladislau, 2019) esta descrição não é aprofundada, se restringindo apenas à existência deste limite e seu respectivo valor. Entretanto, evidenciamos que dois trabalhos (Dexheimer, 2006; Costa *et al.*, 2018), excepcionalmente, destacam que a possibilidade da existência de estrelas massivas, como as sugeridas por Chandrasekhar, não foram consideradas por muitos cientistas daquela época. Dexheimer (2006, p. 8), por exemplo, apresenta esta discussão:

“Quando em 1930 Subrahmanyan Chandrasekhar, muito jovem ainda, publicou seus estudos sobre os mecanismos de formação e evolução das estrelas anãs brancas, ele predisse que se a massa desses objetos estelares fosse maior do que 1.44 massas solares (limite de Chandrasekhar), a pressão de degenerescência dos elétrons contidos em seu interior seria insuficiente para impedir o seu colapso gravitacional. Suas predições, que consideravam a possibilidade da existência de objetos estelares super-densos, foram na época muito contestadas, levando Arthur Eddington, em particular, a afirmar que: ‘deve (ou deveria) haver uma lei na natureza que impeça uma estrela de se comportar de forma tão absurda...’”.

Contexto de Pós-Detecção dos Pulsares

Quanto à alusão a cientistas que contribuíram com o entendimento conceitual destes objetos celestes, sete pesquisas no âmbito da Física e da Astronomia (Jacobsen, 2007; Razeira, 2008; Pires, 2009; Gomes, 2011, 2016; Oliveira, 2015; Ladislau, 2019) mencionam as contribuições elaboradas por Franco Pacini em 1967 e por Thomas Gold em 1968, que puderam embasar a publicação dos sinais de rádio periódicos identificados pela astrônoma. De acordo com estes pontuais trabalhos, estes cientistas descreveram as características das estrelas de nêutrons em mais detalhes, ressaltando que tais objetos celestes consistiam em estrelas altamente magnetizadas, cujo período de rotação aumentava com o passar do tempo. Por exemplo, Pires (2009, p. 2) indica que a relação

“[...] entre essas fontes de rádio pulsantes, chamadas pulsares, e o giro rápido altamente magnetizado das estrelas de nêutrons foi estabelecido por Pacini e Gold, que eventualmente introduziram o conceito de ‘pulsar acionado por rotação’: se a estrela de nêutrons irradia a partir da energia rotacional disponível, o período observado deve ser prolongado gradualmente”.

Em determinados trabalhos (Jacobsen, 2007; Razeira, 2008; Alfradique, 2016; Bassalo & Cattani, 2016, 2018) percebemos a recorrência da menção destas estrelas no contexto de discussão sobre os pulsares binários, estabelecendo que o estudo destas, por Hulse e Taylor, possibilitou a identificação indireta das ondas gravitacionais previstas por Albert Einstein mediante a Teoria da Relatividade Geral, como exposta em uma das citações encontradas:

“Em dezembro de 1973, o astrofísico norte-americano Russell Alan Hulse [...] foi trabalhar no Arecibo Radio Telescope, em Porto Rico, operado pela Cornell University, na frequência de 430 MHz [...] Seu objetivo era o de preparar sua Tese de Doutorado sob a orientação do astrofísico norte-americano Joseph Hooton Taylor Junior [...] Entre dezembro de 1973 e janeiro de 1975, Hulse descobriu 40 novos pulsares. Contudo, um deles, observado no dia 02 de julho de 1974, na constelação de Águia, não se enquadrava na crença geral de que esses objetos celestes eram estrelas de nêutrons solitárias e girantes. Este pulsar, denominado de PSR 1913 + 16, onde PSR significa pulsar e o número é a sua posição no céu, apresentava um período de 0,05903 s. Contudo, no dia 25 de agosto de 1974, Hulse tentou obter um período mais acurado para esse pulsar. Depois de realizar um ajuste do efeito Doppler (1842)-Fizeau (1848) devido ao movimento da Terra, Hulse encontrou uma diferença de 27 μ s (1 μ s = 10⁻⁶ s) em suas medidas. Em princípio, pensou tratar-se de uma falha em seu programa de computador [...] Reescreveu-o e voltou a observar o PSR 1913 + 16, entre 01 e 02 de setembro de 1974. Novamente encontrou uma variação do período com o tempo, variação essa que permaneceu nas observações subsequentes. Então, no dia 18 de setembro de 1974, escreveu uma carta para Taylor, que se encontrava em Amherst, dizendo-lhe que o PSR 1913 + 16 era um pulsar-binário, com período de ~ 8 horas. Desse modo, Hulse e Taylor, em Arecibo, começaram a realizar uma análise desse objeto celeste usando as leis de Kepler [...] Hulse e Taylor afirmaram que esse objeto celeste poderia servir para testar as OG [Ondas Gravitacionais], pois qualquer sistema que radiasse esse tipo de onda perderia energia. Assim, em virtude dessa perda de energia, as estrelas do pulsar-binário se aproximariam uma da outra e, em consequência, haveria uma diferença em seu período orbital. [...] Esse resultado levou Taylor a fazer o seguinte comentário: Portanto, 66 anos depois de Einstein prever as ondas gravitacionais, um

experimento foi realizado e que apresenta clara evidência de sua existência” (Bassalo & Cattani, 2016, p. 884–885, grifo dos autores).

Observamos, também, que certas pesquisas apresentam divergências históricas relativas à descrição da detecção do pulsar localizado na Nebulosa do Caranguejo. Bassalo e Cattani (2016, 2018) colocam que o primeiro pulsar detectado pela astrônoma britânica estava localizado na Nebulosa do Caranguejo: mas, ainda que este seja um dos pulsares mais famosos, o pulsar de Caranguejo só foi identificado posteriormente à publicação dos achados de Jocelyn Bell Burnell, o que possibilitou corroborar os achados observacionais com os pressupostos teóricos elaborados sobre as estrelas de nêutrons. Nesse âmbito, encontramos pesquisas (Jacobsen, 2007; Gomes, 2011, 2016) de acordo com esta descrição. Outros trabalhos (Cavagnoli, 2005; Razeira, 2008; Pires, 2009; Oliveira, 2015; Alfradique, 2016), ainda, também mencionam a detecção do pulsar na Nebulosa de Vela. Estas pesquisas colocam que a detecção destes pulsares ajudou a corroborar a hipótese de que as estrelas de nêutrons se originam nas explosões de supernovas, além de demonstrar que estas estrelas consistem em estrelas de nêutrons em rotação:

“Após a descoberta do primeiro pulsar por J. B. Burnell e A. Hewish, dois outros pulsares foram identificados, o pulsar do Caranguejo descoberto por D. H. Staelin e E. C. Reifstein em 1968 e, no mesmo ano, o pulsar de Vela descoberto por M. I. Large, A. F. Vaughan e B. Y. Mills. Ambos foram identificados no interior de remanescentes de supernovas, respectivamente, a nebulosa do Caranguejo e a de Vela. Ambos tinham um período de rotação muito menor do que o primeiro pulsar observado. Os períodos correspondentes, de 33ms e 89ms, foram decisivos para identificar os pulsares como estrelas de nêutrons ao invés de anãs brancas” (Razeira, 2008, p. 183).

Sobre a Nebulosa de Caranguejo, especificamente, algumas pesquisas (Livi, 1987; Horvath, 2013; Fróes, 2014; Rodrigues, 2016) apresentam apenas que esta nebulosa é constituída por uma estrela de nêutrons muito energética, resultado de uma explosão que fora registrada no longínquo ano de 1054 pelos chineses. De fato, Livi (1987, p. 99) detalha esta discussão ao apontar que

“Antes de Tycho Brahe, os europeus desconheciam fenômenos desse tipo, apesar de possivelmente terem tido a oportunidade de vê-lo em julho de 1054. Nessa época os chineses registraram o surgimento de uma estrela, que eles denominaram “visitante”. Ela ficou tão brilhante que, durante três semanas, foi visível até de dia; depois diminuiu seu brilho devagar e sumiu da visão, mesmo na mais escura das noites, em abril de 1056. Usando pequenos telescópios ainda se pode ver no seu lugar a famosa nebulosa do Caranguejo, formada por filamentos gasosos que ainda hoje estão se expandindo. Tudo indica que, num evento espetacular, uma estrela muito fraca para ser visível explodiu, aumentando sua luminosidade pelo menos milhares de vezes e ejetando grande parte da matéria que a formava no espaço. O que sobrou do núcleo da estrela é um pulsar no centro da nebulosa, um objeto tão pequeno que rota trinta vezes por segundo, enviando um pulso cada vez que um de seus pólos fica apontado em nossa direção. Quase toda a massa da estrela original foi lançada no espaço, reciclando a matéria cósmica, agora enriquecida com elementos pesados que se formaram nas reações nucleares que ocorreram durante a vida da estrela”.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a reflexão elaborada por Jocelyn Bell Burnell em uma das suas citações apresentadas no início do artigo, a qual enfatiza que “cientistas nunca devem alegar que algo é absolutamente verdadeiro”, reconhecemos que a revisão bibliográfica desenvolvida pode ser incompleta em determinados aspectos, seja devido ao método de análise ou o recorte estabelecido nos trabalhos coletados. Apesar disso, acreditamos que os resultados indicam um panorama sobre como os pulsares estão sendo discutidos historicamente, em especial, no contexto de ensino de Física e de Astronomia, pelo fato das buscas serem realizadas em diferentes estilos de publicações acadêmicas: periódicos, eventos, dissertações e teses.

Neste sentido, ressaltamos a importância de se explicar como os conceitos científicos, a exemplo dos pulsares, foram historicamente construídos, o que possibilita apontar algumas das figuras científicas relevantes neste processo. Este esforço, em específico, concede visibilidade a exemplos de cientistas que

não são mencionados no contexto do ensino de Física e de Astronomia. Neste âmbito, evidenciamos que, parte considerável dos trabalhos analisados assume que a descoberta dos pulsares consistiu em um achado desenvolvido com a contribuição de vários cientistas, não deixando de evidenciar o protagonismo da cientista Jocelyn Bell Burnell.

Apesar disso, não observamos nenhum trabalho no âmbito do ensino que possua o objetivo de discutir este episódio histórico com enfoque no protagonismo desta cientista. Esta constatação corrobora com o que Carvalho *et al.*, (2019) discutem em seu artigo, de que a “*divulgação de contribuições de mulheres para o desenvolvimento da física bem como a proposição/análise de sequências didáticas que as abordem não têm sido alvo primordial de pesquisadores da área*” (p. 5). Este argumento nos possibilita reconhecer que importantes contribuições de mulheres no desenvolvimento científico e tecnológico, como Jocelyn Bell Burnell, ainda não são devidamente exploradas. Cordeiro (2017) sugere que “*deveríamos nos indagar sobre os motivos dessa escassez ser normalizada na educação e na ciência e o que ela diz sobre nossas expectativas da ciência, da sociedade e das relações entre homens e mulheres*” (p. 671). Neste viés, destacamos não somente a importância do estudo das contribuições das mulheres cientistas, mas também a necessidade de nos aprofundarmos em aspectos da trajetória dessas mulheres, de maneira a observarmos as dificuldades estruturais presentes nas suas ascensões científicas.

Ainda em relação aos aspectos históricos, percebemos que as discussões sobre este episódio são exploradas pontualmente em artigos de periódicos e em trabalhos de eventos. Ademais, há pontuais pesquisas que exibem divergências em relação aos relatos históricos apresentados em fontes primárias e secundárias, como aquela observada em termos da história da detecção do pulsar na Nebulosa do Caranguejo. Além disso, dissertações no campo do ensino que apresentam discussões sobre os pulsares elaboram menções de maneira predominantemente conceitual. Neste contexto, consideramos importante destacar que embora exista um recente esforço para o desenvolvimento de pesquisas sobre Evolução Estelar e Radioastronomia, direcionadas ao ensino de Física e de Astronomia, o que proporciona a inserção de discussões sobre as estrelas de nêutrons e os pulsares, pouco se apresenta preocupações acerca da sua abordagem histórica no contexto educacional.

Embora algumas dissertações e teses do campo da Física e da Astronomia mostrem uma relativa preocupação com as discussões históricas envolvidas nestes conceitos, destinando capítulos de suas pesquisas para o desenvolvimento de contextualizações históricas, poucas delas apresentam discussões mais aprofundadas, demonstrando uma escrita histórica predominantemente cronológica. Estas evidências reforçam a relevância da necessidade do desenvolvimento de resgates históricos sobre essa temática, que abarquem não somente a pesquisa protagonizada por Jocelyn Bell Burnell, mas que também estabeleça uma discussão histórica sobre o contexto anterior e posterior ao episódio de identificação dos primeiros pulsares. Nesta perspectiva, é possível não se recair em narrativas históricas sobre a ciência que submetem descobertas como fruto de trabalho de cientistas isoladas/os em seus laboratórios; diferente disso, as narrativas históricas sobre descobertas devem enfatizar as cooperações, mas também as controvérsias, por exemplo.

No sentido de ensejar perspectivas futuras de estudo sobre esta temática, a análise das pesquisas do campo do ensino de Física e de Astronomia, em especial, possibilitou evidenciar a potencialidade dos pulsares como um fenômeno que articula diferentes campos da Física para seu entendimento conceitual, como Mecânica, Óptica, Relatividade, Física Nuclear e de Partículas. Em nível de exemplo, a citação de Napoleão (2018, p. 248) define estes objetos da seguinte maneira:

“Estrelas de nêutrons são objetos extremamente compactos, constituídos inteiramente pelos nêutrons que existiam no núcleo das estrelas originais. Todas elas possuem raio muito pequeno (cerca de 10 km, o tamanho de uma cidade) e densidades ainda maiores que as anãs brancas, da ordem de 10^{14} a 10^{15} g/cm³: uma pessoa que pesa 70 kg na Terra pesaria 14 bilhões de toneladas na superfície de uma estrela de nêutrons! Todas elas giram com uma rotação extremamente rápida, da ordem de frações de segundo – o que se explica pela maneira pela qual elas se formaram (o colapso quase instantâneo de um núcleo de cerca de 6.000 km de raio para apenas 10 km) e pelas leis da conservação do momento angular (as mesmas que garantem que uma patinadora no gelo possa girar a velocidades muito maiores quando cola os braços ao corpo)”.

Além disso, o estudo dos elementos históricos sobre os pulsares presentes nas pesquisas analisadas sugere a possibilidade de profícuas discussões de aspectos relativos à Natureza da Ciência, como indicados, por exemplo, no artigo de Peduzzi e Raicik (2020), podendo-se articular referenciais da

moderna filosofia da ciência. Com efeito, algumas pesquisas indicam que o achado dos pulsares protagonizado pela astrônoma ocorreu de maneira inesperada, o que possibilita discutir acerca da serendipidade na ciência; outros trabalhos, por sua vez, ensejam refletir sobre as complexas relações entre teoria-observação no contexto histórico de detecção dos pulsares, na qual podemos discutir, por exemplo, sobre as implicações da hipótese dos *Little Green Men*. Inclusive, alguns trabalhos também evidenciaram a possibilidade de discussões relativas aos fatores que geram a aceitação ou a rejeição de hipóteses científicas, como a dificuldade da aceitação de Arthur Eddington perante as propostas teóricas sobre as anãs brancas descritas por Subrahmanyan Chandrasekhar, além da aceitação da comunidade científica acerca dos cálculos relativos à massa das estrelas de nêutrons desenvolvidas por Richard Tolman, Robert Oppenheimer e George Volkoff, que conflitavam justamente com o que fora encontrado anos antes por Chandrasekhar.

Concluimos este artigo defendendo a riqueza das discussões presentes na história dos pulsares, devido, por exemplo, “[...] sua impressionante previsão a partir da mesma física que levou à ameaça de guerra nuclear, sua descoberta inesperada e as controvérsias que se seguiram” (McNamara, 2008, p. 1). Neste sentido, argumentamos quanto à necessidade de pesquisas e de esforços acadêmicos que possam dar mais visibilidade a discussão desta temática no contexto do ensino de Física e de Astronomia, de forma a se contribuir, também, com estudos, sob uma perspectiva histórica, acerca da origem e evolução das estrelas. Reiteramos que este episódio, ainda que seja relativamente recente no contexto da história da Astronomia, apresenta uma riqueza histórico-filosófica e conceitual muito relevante para o ensino *de e sobre* Ciência.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa e às/aos árbitras/os deste artigo pelas valiosas contribuições para o aperfeiçoamento do texto.

REFERÊNCIAS

- Alfradique, V. A. P. (2016). *Modelos de Estrelas Relativísticas com Campo Magnético Dipolar*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ. Recuperada de <https://app.uff.br/riuff/handle/1/3817>
- Alloy, M. D. (2012). *Pasta nuclear e a evolução de protoestrelas de nêutrons*. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Recuperada de <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/99287>
- Alves, V. C., Quintilio, M. S. V., Perez, E. P., & Força, A. C. (2007). A evolução dos instrumentos de observação astronômica e o contexto histórico-científico. In *Atas do XVII Simpósio Nacional de Ensino de Física*. São Luiz, MA. Recuperada de <https://sec.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvii/atas/resumos/T0642-2.pdf>
- Araújo, M. L. (2017). *Simuladores experimentais de radiotelescópios para o ensino de astronomia no nível médio*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ensino de Astronomia. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA. Recuperada de <http://tede2.uefs.br:8080/handle/tede/tede/644>
- Araújo, M. L., Guedes, G. P., & Pereira, M. G. (2019). Da prática da radioastronomia amadora com o Radio Jove à criação de produtos educacionais para o ensino de física. In *Atas do XXIII Simpósio Nacional de Ensino de Física*. Salvador, Bahia. Recuperada de <https://sec.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxiii/sys/resumos/T0780-1.pdf>
- Baade, W., & Zwicky, F. (1934). Cosmic Rays from Super-Novae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 20(5), 259–263. <https://doi.org/10.1073/pnas.20.5.259>
- Bassalo, J. M. F., & Cattani, M. (2016). Detecção de ondas gravitacionais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33(3), 879–895. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2016v33n3p879>

- Bassalo, J. M. F., & Cattani, M. (2018). O Prêmio Nobel de Física de 2017 e as Instituições Brasileiras de Pesquisas Físicas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 35(2), 440–460. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2018v35n2p440>
- Bell Burnell, J. (1977). Petit Four. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 302(1 Eighth Texas), 685–689. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1977.tb37085.x>
- Bell Burnell, J. (1983). The Discovery of Pulsars. In K. Kellermann, & B. Sheets (Orgs.). *Serendipitous Discoveries in Radio Astronomy* (pp. 160-170). Green Bank: National Radio Astronomy Observatory. <http://library.nrao.edu/public/collection/02000000000280.pdf>
- Bell Burnell, J. (2004). Pliers, pulsars and extreme physics. *Astronomy and Geophysics*, 45(1), 1.07-1.11. <https://doi.org/10.1046/j.1468-4004.2003.45107.x>
- Bell Burnell, J. (2010). Discovery of Pulsars (Temporada 1, Episódio 1). Beautiful Minds [Seriado de Televisão]. United Kingdom: BBC. <https://www.bbc.co.uk/programmes/b00ry9jq>
- Bianchi, V. (2004). Radioastronomia: Uma mirada más amplia. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, 1, 61–76. <https://doi.org/10.37156/RELEA/2004.01.061>
- Carvalho Neto, J. T., Stefani, J. L., Apolinário, F. R., Soares, A. A., & Mendes, L. (2017). Trabalhando de forma prática o experimento de detecção de ondas gravitacionais do observatório LIGO. In *Atas do XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física*. São Carlos, SP. Recuperada de <https://sec.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxii/sys/resumos/T0746-1.pdf>
- Carvalho, R. A., Silva, A. C., & Cabral, T. C. (2019). Contribuições femininas no desenvolvimento da física: uma pesquisa em periódicos da área de ensino. In *Atas do XXIII Simpósio Nacional de Ensino de Física*. Salvador, Bahia. Recuperada de <https://sec.sbfisica.org.br/eventos/snef/xxiii/sys/resumos/T0623-1.pdf>
- Casali, R. H. (2013). *Objetos estelares compactos sujeitos a campos magnéticos fortes*. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Recuperada de <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107262>
- Cavagnoli, R. (2005). *A importância dos mésons estranhos nas propriedades das estrelas de nêutrons*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Recuperada de <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/102475>
- Chadwick, J. (1932). Possible Existence of a Neutron. *Nature*, 129(3252), 312. <https://doi.org/10.1038/129312a0>
- Chandrasekhar, S. (1994). The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 15(2), 115–116. <https://doi.org/10.1007/BF03012171>
- Cordeiro, M. D. (2017). Mulheres na Física: um pouco de história. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 34(3), 669–672. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2017v34n3p669>
- Costa, B. L., Polati, F., & Allen, M. P. (2018). Uma proposta de discussão de controvérsias históricas e epistemológicas acerca da evolução estelar para o ensino médio. In *Atas do V Simpósio Nacional de Educação em Astronomia*. Londrina, PR. Recuperada de https://sab-astro.org.br/wp-content/uploads/2020/01/SNEA2018_TCP83.pdf
- Damasio, F., & Peduzzi, L. O. Q. (2017). História e filosofia da ciência na educação científica: para quê? *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, 19, 1–20. <http://doi.org/10.1590/1983-21172017190103>
- Darroz, L. M., Rosa, C. W., Rosa, A. B., & Pèrez, C. A. S. (2014). Evolução dos conceitos de astronomia no decorrer da educação básica. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, 17, 107–121. <https://doi.org/10.37156/RELEA/2014.17.107>
- Dexheimer, V. A. (2006). *Compressibilidade da Matéria Nuclear em Estrelas de Nêutrons*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Recuperada de <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/7454>

- Dick, S. J. (2013). *Discovery and Classification in Astronomy: Controversy and Consensus*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Figueredo, N. (1990). Da importância dos artigos de revisão da literatura. *Revista Brasileira de Biblioteconomia e Documentação*, 23, 131–134. https://brapci.inf.br/repositorio/2011/09/pdf_6245ece57c_0018790.pdf
- Fróes, A. L. D. (2014). Astronomia, astrofísica e cosmologia para o ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36(3), 1–15. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000300016>
- Gama, L. D., & Henrique, A. B. (2010). Astronomia na sala de aula: por quê? *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, 10, 7–15. <https://doi.org/10.37156/RELEA/2010.09.007>
- Gold, T. (1968). Rotating Neutron Stars as the Origin of the Pulsating Radio Sources. *Nature*, 218(5143), 731–732. <https://doi.org/10.1038/218731a0>
- Gomes, R. O. (2011). *Transições de Fase Hádron-Quark em Estrelas de Nêutrons*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Recuperada de <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/55416>
- Gomes, R. O. (2016). *Vínculos Magnéticos na Equação de Estado e na Estrutura de Estrelas de Nêutrons*. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Recuperada de <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/150053>
- Graham-Smith, F. (2014). *Unseen Cosmos: The Universe in Radio*. Oxford: Oxford University Press.
- Henrique, A. B., Andrade, V. F. P., & L'Astorina, B. (2010). Discussões sobre a natureza da ciência em um curso sobre a história da astronomia. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, 10, 17–31. <https://doi.org/10.37156/RELEA/2010.09.017>
- Heerd, B., Santos, A. P. O., Bruel, A. C. B. O., Ferreira, F. M., Anjos, M. C., Swiech, M. J., & Banckes, T. (2018). Gênero no Ensino de Ciências Publicações em Periódicos no Brasil: o estado do conhecimento. *Revista Brasileira de Educação em Ciências e Educação Matemática*, 2(2), 217-241. <https://doi.org/10.33238/ReBECM.2018.v.2.n.2.20020>
- Hewish, A., Bell, S. J., Pilkington, J. D. H., Scott, P. F., & Collins, R. A. (1968). Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source. *Nature*, 217(5130), 709–713. <https://doi.org/10.1038/217709a0>
- Horvath, J. E. (2013). Uma proposta para o ensino da astronomia e astrofísica estelares no Ensino Médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35(4), 4501. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172013000400012>
- Hulse, R. A., & Taylor, J. H. (1975). Discovery of a pulsar in a binary system. *The Astrophysical Journal*, 195(9), L51-L53. <http://doi.org/10.1086/181708>
- Iachell, G. (2011). O conhecimento prévio de alunos do ensino médio sobre as estrelas. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, 12, 7–29. <https://doi.org/10.37156/RELEA/2011.12.007>
- Jacobsen, R. B. (2007). *Plasma de Quarks e Glúons no Interior de Estrelas de Nêutrons*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Recuperada de <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/15328>
- Kidger, M. (2007). *Cosmological Enigmas: Pulsars, Quasars, and Other Deep-Space Questions*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press.
- Ladislau, S. M. (2019). *Análises dos mecanismos de perda de energia e os índices de freamento em pulsares*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP. Recuperada de <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/02.14.19.01>
- Landau, L. (1965). On the Theory of Stars. In: *Collected Papers of Lev Davidovich Landau*. (60–62). London: Elsevier.

- Langhi, R., & Nardi, R. (2007). Ensino de Astronomia: Erros conceituais mais comuns presente em livros didáticos de ciência. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 24(1), 87–111. <https://doi.org/10.5007/%25x>
- Large, M. I., Vaughan, A. E., & Mills, B. Y. (1968). A Pulsar Supernova Association? *Nature*, 220(5165), 340–341. <https://doi.org/10.1038/220340a0>
- Lattari, C. J. B., & Trevisan, R. H. (2001). Radioastronomia: noções iniciais para o ensino médio e fundamental como ilustração de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 18(2), 229–239. <https://doi.org/10.5007/%25x>
- Leite, C., & Hosoume, Y. (2007). Os professores de ciências e suas formas de pensar a astronomia. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, 4, 47–68. <https://doi.org/10.37156/RELEA/2007.04.047>
- Lima, B. S. (2013). O labirinto de cristal: As trajetórias das cientistas na física. *Revista Estudos Feministas*, 21(3), 883–903. <https://doi.org/10.1590/S0104-026X2013000300007>
- Lima, L. G., & Ricardo, E. C. (2015). Física e Literatura: uma revisão bibliográfica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 32(3), 577–617. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2015v32n3p577>
- Livi, S. H. B. (1987). Um visitante inesperado: a supernova 1987 A. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 4(2), 98–103. <https://doi.org/10.5007/%25x>
- Longair, M. (2006). *The Cosmic Century: A History of Astrophysics and Cosmology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lopes, L. L. (2016). *Equações de Estado em Física de Hádrons*. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Recuperada de <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/175101>
- Marquez, K. D. (2018). *Conversão de fases em estrelas compactas*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Recuperada de <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/191052>
- Martins, L. A. C. P. (2005). História da Ciência: objetos, métodos e problemas. *Ciência & Educação (Bauru)*, 11(2), 305–317. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132005000200011>
- McGrayne, S. B. (1998). *Nobel Prize Women in Science: Their Lives, Struggles and Momentous Discoveries* (2nd. ed.). Washington: Joseph Henry Press.
- McNamara, G. (2008). *Clocks in the Sky: The Story of Pulsars*. New York: Praxis.
- Mendes, C. (2017). *Evolução do Campo Magnético em Binárias Relativísticas*. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Recuperada de <https://www.iag.usp.br/pos/astrofisica/portugues/dissertacoestestes/evolucao-do-campo-magnetico-em-binarias-relativisticas>
- Moura, B. A. (2014). O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência. *Revista Brasileira de História da Ciência*, 7(1), 32–46. https://www.sbh.org.br/arquivo/download?ID_ARQUIVO=1932
- Mozena, E. R., & Ostermann, F. (2014). Uma revisão bibliográfica sobre a interdisciplinaridade no ensino de Ciências da Natureza. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, 16(2), 185–206. <https://doi.org/10.1590/1983-21172014160210>
- Napoleão, T. A. J. (2018). *Astrofísica Estelar para o Ensino Médio: uma abordagem empírica baseada na observação visual das estrelas variáveis*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ensino de Astronomia, Universidade de São Paulo, SP. Recuperada de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14134/tde-11072018-075714/>
- Nobel Prize. (2021a). The Nobel Prize in Physics 1974. Retrieved from <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1974/summary>

- Nobel Prize. (2021b). The Nobel Prize in Physics 1993. Retrieved from <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/summary/>
- Oliveira, H. O. (2015). *Modelo para o Índice de Frenagem de Pulsares*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Física, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP. Recuperada de http://www.bd.bibl.ita.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3276
- Oppenheimer, J. R., & Volkoff, G. M. (1939). On Massive Neutron Cores. *Physical Review*, 55(4), 374–381. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.374>
- Pacheco, M. H., & Zanella, M. S. (2019). Panorama de pesquisas em ensino de Astronomia nos anos iniciais: um olhar para teses e dissertações. *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*, 28, 113–132. <https://doi.org/10.37156/RELEA/2019.28.113>
- Pacini, F. (1967). Energy Emission from a Neutron Star. *Nature*, 216(5115), 567–568. <https://doi.org/10.1038/216567a0>
- Peduzzi, L. O. Q., & Raicik, A. C. (2020). Sobre a natureza da ciência: asserções comentadas para uma articulação com a história da ciência. *Investigações em Ensino de Ciências*, 25(2), 19–55. <http://doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2020v25n2p19>
- Peixoto, D. E., & Ramos, E. M. F. (2011). Formação do professor de Física para o ensino de Astronomia: algumas possibilidades e reflexões. In *Atas do I Simpósio Nacional de Educação em Astronomia*. Rio de Janeiro, RJ. Recuperada de https://www.sab-astro.org.br/wp-content/uploads/2017/04/SNEA2011_TCP26.pdf
- Pires, A. M. (2009). *Population Study of Radio-Quiet and Thermally Emitting Isolated Neutron Stars*. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Filosofia, Universidade de São Paulo, SP. Recuperada de <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14131/tde-22072010-054601/pt-br.php>
- Razeira, M. (2008). *Naturalidade, Quebra de Simetria de Isospin e a Estrutura Interna das Estrelas de Nêutrons*. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Recuperado de <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/23231>
- Ribeiro, J. L. P., & Carneiro, M. H. S. (2016). A reflexão da luz nos periódicos de Ensino de Física: evidenciando tendências e carências de pesquisa a partir de uma revisão bibliográfica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33(2), 355–398. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2016v33n2p355>
- Rodrigues, R. S. R. (2016). *Formação e evolução estelar como uma proposta de contextualização para o ensino de Termodinâmica no Ensino Médio*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Recuperada de <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/174129>
- Rodríguez, J. M. (2018). Polarización de la luz: conceptos básicos y aplicaciones en astrofísica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 40(4), e4310. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0024>
- Sanzovo, D. T., & Laburú, C. E. (2013). Identificação de conceitos astronômicos em livros paradidáticos na formação de professores de Ciências. In *Atas do IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*. Águas de Lindóia, SP. Recuperada de http://abrapecnet.org.br/atas_enpec/ixenpec/atas/resumos/R0464-1.pdf
- Schmidt, M. (1963). 3C 273: A Star-Like Object with Large Red-Shift. *Nature*, 197(4872), 1040. <https://doi.org/10.1038/1971040a0>
- Silva, A. B. (2017). *Evolução Estelar no Ensino de Ciências*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ensino de Astronomia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA. Recuperada de <http://tede2.uefs.br:8080/handle/tede/653>
- Silva, A. C., & Almeida, M. J. P. M. (2011). Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 28(3), 624–652. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2011v28n3p624>

- Silva, R. S., & Errobidart, N. C. G. (2015). Sobre as pesquisas relacionadas ao ensino do efeito fotoelétrico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 32(3), 618–639. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2015v32n3p618>
- Staelin, D. H., & Reifenstein, E. C. (1968). Pulsating Radio Sources near the Crab Nebula. *Science*, 162(3861), 1481–1483. <http://doi.org/10.1126/science.162.3861.1481>
- Stasinska, G. (2010). Por que as estrelas são importantes para nós? *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27(4), 672–684. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2010v27nespp672>
- Steiner, J. E. (2010). Buracos Negros: sementes ou cemitérios de galáxias? *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27(4), 723–742. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2010v27nespp723>
- Tolman, R. C. (1939). Static solutions of Einstein's field equations for spheres of fluid. *Physical Review*, 55(4), 364–373. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.364>
- Tonet, M. D., & Leonel, A. A. (2019). Nanociência e Nanotecnologia: uma revisão bibliográfica acerca das contribuições e desafios para o ensino de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 36(2), 431–456. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2019v36n2p431>
- Vieira, M. B. F. (2018). *Astrofísica Estelar para o Ensino Médio: análise de uma proposta*. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciências, Universidade de São Paulo, SP. Recuperada de <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14135/tde-07072018-124501/pt-br.php>
- Yakovlev, D. G., Haensel, P., Baym, G., & Pethick, C. (2013). Lev Landau and the concept of neutron stars. *Physics-Uspekhi*, 56(3), 289–295. <http://doi.org/10.3367/UFNe.0183.201303f.0307>

Recebido em: 27.04.2021

Aceito em: 06.12.2021