



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM FÍSICA
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA

Antonio Edenilton Leite da Silva

Sobre a natureza e detecção de fontes de rádios provenientes de pulsares

Campina Grande, Paraíba, Brasil

2023

Antonio Edenilton Leite da Silva

Sobre a natureza e detecção de fontes de rádios provenientes de pulsares

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Dr. Francisco de Assis de Brito, apresentada à Unidade Acadêmica de Física em complementação aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Professor Dr. Francisco de Assis de Brito

Campina Grande, Paraíba, Brasil

2023

S586s

Silva, Antonio Edenilton Leite da.

Sobre a natureza e detecção de fontes de rádios provenientes de pulsares / Antonio Edenilton Leite da Silva. – Campina Grande, 2023.
43 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Brito".

Referências.

1. Ondas de Rádios Provenientes dos Pulsares. 2. Estrelas de Nêutrons. 3. Radiotelescópio. 4. Pulsares. 5. Radiofísica. 6. Ondas Eletromagnéticas. I. Brito, Francisco de Assis de. II. Título.

CDU 537.86(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM FISICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP
58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

ANTÔNIO EDENILTON LEITE DA SILVA

Sobre a natureza e detecção de fontes de rádios provenientes de pulsares

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada em: 06/04/2022

Francisco de Assis de Brito
Presidente da Comissão e
Orientador

João Rafael L. dos Santos
Examinador Interno

Morgana Lígia de F. Freire
Examinador Externo



Documento assinado eletronicamente por **Morgana Ligia de Farias Freire, Usuário Externo**, em 06/04/2022, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de](#)

[outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOAO RAFAEL LUCIO DOS SANTOS, PROFESSOR(A) DOMAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2023, às 09:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FRANCISCO DE ASSIS DE BRITO, COORDENADOR(A)**, em 08/05/2023, às 08:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2225920** e o código CRC **762BB2FC**.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM FISICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM FÍSICA, REALIZADA EM 06 DE ABRIL DE 2022

Aos seis dias do mês de abril do ano de dois mil e vinte e dois, reuniram-se em caráter de solenidade pública, os membros da comissão designada para avaliar **ANTÔNIO EDENILTON LEITE DA SILVA** ao grau de Mestre em Física, área de concentração Física. Foram componentes da Banca Examinadora os especialistas: o professor **Francisco de Assis de Brito** (Orientador) – Doutor em Física, o professor **João Rafael Lúcio dos Santos** – Doutor em Física, a professora **Morgana Lígia de Farias Freire** – Doutora em Física, sendo o primeiro, integrante do corpo docente da Universidade Federal de Campina Grande, o segundo, integrante do corpo docente da Universidade Federal de Campina Grande, e a terceira, integrante do corpo docente da Universidade Estadual da Paraíba. HORA DE INÍCIO: **14h00min** – LOCAL: **Sala Virtual, em virtude da suspensão de atividades na UFCG decorrente do corona vírus**. Dando início aos trabalhos, o Presidente da Banca, professor **Francisco de Assis de Brito**, após declarar os objetivos da reunião, apresentou o(a) candidato(a) **ANTÔNIO EDENILTON LEITE DA SILVA**, a quem concedeu a palavra para que dissertasse oral e sucintamente sobre o tema apresentado, intitulado **“Sobre a natureza e detecção de fontes de rádios provenientes de pulsares”**. Após discorrer o referido tema, o(a) candidato(a) foi arguido(a) pelos examinadores na forma regimental. Ato contínuo, passou a Comissão, em caráter secreto, a proceder a avaliação e julgamento do trabalho, concluindo por atribuir-lhe o conceito Aprovado. Face à aprovação, declarou o Presidente estar o(a) avaliado(a), legalmente habilitado(a) a receber o Grau de Mestre em Física, cabendo à Universidade Federal de Campina Grande, providências para a expedição do Diploma a que o(a) mesmo(a) faz jus. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a ata, que será submetida à aprovação da Comissão Examinadora. Campina Grande, 06 de abril de 2022.

Thaís Fernanda Clemente de Sousa Nascimento
Secretária

Francisco de Assis de Brito
Presidente da Comissão e Orientador

João Rafael Lúcio dos Santos
Examinador Interno

Morgana Lígia de Farias Freire
Examinadora Externa

Antônio Edenilton Leite da Silva
Candidato(a)

João Rafael Lúcio dos Santos
Coordenador do Programa

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese de Mestrado do(a) candidato(a) **ANTÔNIO EDENILTON LEITE DA SILVA**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários certificam que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **Morgana Ligia de Farias Freire, Usuário Externo**, em 06/04/2022, às 17:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio EdeniltonLeite da Silva, Usuário Externo**, em 06/04/2022, às 18:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOAO RAFAEL LUCIO DOS SANTOS, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2023, às 09:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FRANCISCO DE ASSIS DE BRITO, COORDENADOR(A)**, em 08/05/2023, às 08:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2225891** e o código CRC **02CD595A**.

Com muito orgulho e agradecimento, dedico aos meus pais, que são a base da minha vida.

Agradecimentos

- Ao Prof. Dr. Francisco de Assis Brito, pela orientação, sugestão, estímulo e competência com que conduziu este trabalho.
- Aos membros da banca examinadora pelos ensinamentos e colaborações.
- A todos os professores desta Unidade Acadêmica que contribuíram com a minha formação.
- Aos meus familiares pelo apoio, confiança e incentivo.
- Aos colegas de toda caminhada acadêmica e da vida.
- A todos que direta ou indiretamente possibilitaram a conclusão deste trabalho.
- Antônio Marcelo, Heleonardo Dantas, Marcos Antônio e todas as pessoas que estiveram comigo durante essa caminhada.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da
mente, a fim de distinguir qual é a
vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

Resumo

Conhecer e decifrar a origem e o futuro do universo é um desafio constante que tem levado pesquisadores a desenvolverem diversas técnicas a fim de analisá-lo e compreendê-lo cada vez mais. A radioastronomia, por exemplo, tem se dedicado a realizar investigações sobre o universo a partir de estrelas de nêutrons, na forma de pulsares. Os pulsares são estrelas de nêutrons que contêm massas entre 8 e 25 vezes a massa do sol e possuem características peculiares, como alta densidade e elevado campo gravitacional. Tendo em vista que os pulsares representam um dos estágios finais de uma estrela, carregando informações importantes sobre seu passado, este trabalho se propôs a realizar uma investigação teórica em relação a sua natureza e detecção de ondas de rádio provenientes destas estrelas de nêutrons. Para melhor compreensão a respeito do tema, traz-se inicialmente uma breve revisão sobre alguns conceitos de Óptica Física, seguida de um breve histórico acerca dos pulsares, sua formação e propagação, classificação e principais aplicações. Finalmente, é apresentada a estrutura de um radiotelescópio, instrumento utilizado para detecção do sinal de rádio gerado por estes pulsares, bem como o processo envolvido para esta detecção.

Palavras-chave: Pulsares. Estrelas de nêutrons. Radiotelescópio.

Abstract

Knowing and deciphering the origin and future of the universe is a constant challenge that has led researchers to develop several techniques in order to analyze and understand it more and more. Radio astronomy, for example, has been dedicated to carrying out investigations of the universe from neutron stars, in the form of pulsars. Pulsars are neutron stars that contain a mass between 8 and 25 times the mass of the sun and have peculiar characteristics, such as high density and high gravitational field. Considering that pulsars represent one of the final stages of a star, carrying important information about its past, this work aimed to carry out a theoretical investigation regarding its nature and detection of radio waves from these neutron stars. For a better understanding of the subject, a brief review of some concepts of Optical Physics is initially presented, followed by a brief history of pulsars, their formation and propagation, classification and main applications. Finally, the structure of a radio telescope, an instrument used to detect the radio signal generated by these pulsars, is presented, as well as the process involved for this detection.

Keywords: Pulsars. Neutron Stars. Radio Telescope.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Espectro eletromagnético da luz.....	8
Figura 2 - Comportamento ondulatório da luz proposto por Huygens	9
Figura 3 - Formação de padrões de interferência no experimento de Young	10
Figura 4 - Representação esquemática da difração em uma fenda	11
Figura 5- Feixe de luz difratado.....	12
Figura 6- Difração formando máximos e mínimos de uma abertura circular	13
Figura 7- Representação de dois focos de luz muito próximo em três níveis diferentes.....	14
Figura 8- Representação gráfica dos focos de luz	15
Figura 9– Equilíbrio entre pressão e gravidade em uma estrela	17
Figura 10- Processo de formação de anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros	19
Figura 11- Representação do modelo de ‘farol’ de um pulsar.....	20
Figura 12- Diagrama do período de spin de um pulsar em função de sua derivada	24
Figura 13- Relação entre pulsares de milissegundo e binários	27
Figura 14 -Representação de raios de luz refletidos na antena de um radiotelescópio	29
Figura 15- Representação esquemática de um refletor do tipo Cassegrain	30
Figura 16- Deslocamento do ângulo dos feixes de luz.....	31
Figura 17- Representação gráfica típica da sensibilidade de um telescópio.....	32
Figura 18- Representação esquemática dos componentes de um receptor em um telescópio	33
Figura 19– Representação esquemática de um filtro passa-baixa.....	34
Figura 20– Representação esquemática de um filtro passa-alta.....	34
Figura 21 - Ilustração ideal do processo de mixer do tipo switch, com as três faixas de frequência utilizadas	36

Lista de abreviaturas e siglas

Kyr	Mil anos
Gyr	Bilhão de anos
SN	Supernova
BN	Buraco Negro
AB	Anã branca

Lista de símbolos

λ	comprimento de onda	RC	resistor e capacitor
a	abertura da fenda	X_c	reatância capacitiva
θ	ângulo	R	resistência
I	intensidade	V	tensão elétrica
E	campo elétrico	F_c	frequência de corte
E_θ	campo elétrico em função do ângulo teta	ω	frequência angular
Φ	diferença de fase	α	constante de proporcionalidade
R	raio		
E_m	campo máximo		
Cos	cosseno		
Sen	seno		
I_θ	Intensidade em função de teta		
I_m	intensidade máxima		
d	distância		
J ₁	função de Bessel		
dF	infinitesimal da força gravitacional		
G	constante gravitacional universal de Newton		
V	volume		
ρ	rô		
dm	infinitesimal de massa		
dV	infinitesimal de volume		
r	raio		
P	pressão		
Ω	velocidade angular		
π	pi		
μ	índice de refração		
ν	frequência		
ν_p	frequência do plasma		
e	carga do elétron		
n_e	densidade de elétrons		
m_e	massa do elétron		
c	velocidade da luz		
d	distância		
t	tempo		
DM	densidade de elétrons contida na área disposta entre o pulsar e o observado		
%	porcentagem		
P	potência		
F_ν	densidade de fluxo		
A_{ef}	área efetiva		
D_ν	Largura e banda		
Δs	deslocamento do raio		
$\Delta\phi$	diferença de fase		

Sumário

1	Introdução	6
2	Uma introdução sobre óptica física	8
2.1	A luz como onda.....	8
2.1.1	Interferência	8
2.1.2	O experimento de Young.....	9
2.2	Difração	10
2.2.1	Difração em uma fenda.....	11
2.2.2	Abertura circular	13
3	Sobre pulsares: uma introdução.....	16
3.1.	Histórico.....	16
3.2	Formação de um pulsar.....	16
3.3	Propagação dos pulsos.....	21
3.4	Modelos de pulsares.....	23
3.4.1	Magnetares	25
3.4.2	Pulsares de Milissegundo e Binários	25
3.5	Aplicações de pulsares	27
4	Radiotelescópio e detecção do sinal	29
4.1	Estrutura de um radiotelescópio.....	29
4.1.1	Refletores.....	29
4.1.2	Receptores	32
4.1.2.1	Front-end	35
4.1.2.2	Back-end.....	36
5	Conclusões	38
	REFERÊNCIAS.....	41

1 Introdução

A astronomia é uma das ciências mais antigas, e desde o início qualquer observação que fosse realizada dispunha apenas dos olhos. Hoje a astronomia tem se difundido em todo o mundo. Estudiosos buscam através de estrelas, galáxias, nebulosas e demais astros, entender o universo, para isso, retêm de um vasto aparato de equipamentos, como satélites, câmeras, telescópios e demais tecnologias usadas para monitorar e descobrir corpos celestes.

Uma ferramenta fundamental no estudo da astronomia é o telescópio, trata-se de um aparelho com a capacidade de proporcionar a observação de objetos distantes com grandes resoluções, além de captar radiações eletromagnéticas e separá-las dentro do seu espectro, extraindo informações que permitem conhecer sua história, composição e futuro das suas fontes emissoras.

Um ramo da astronomia que tem tido grande desenvolvimento é a radioastronomia, que tem foco principal em buscar informações do universo através de frequências de rádio. Essa área tem colaborado com a descoberta de novos corpos celestes. É o caso das estrelas de nêutrons, que tiveram seus primeiros registros em 1934, tais estrelas têm características peculiares, já que surgem a partir do ciclo de vida de uma estrela que veio a explodir em uma supernova.

Nessa perspectiva, com o auxílio dos radiotelescópios e o conhecimento das estrelas de nêutrons, em 1967, Jocelyn Bell, sob supervisão de seu tutor Anthony Hewish, na Universidade de Cambridge, percebeu sinais estranhos dentro de seus dados observacionais e após algumas especulações, concluíram que se tratava de uma estrela de nêutron pulsante, que foi denominada pulsar, conforme indicam Hewish, Bell e Pilkington (1968) [1]. Essa nova categoria de estrelas emite grandes quantidades de energia e pode ser detectada por radiotelescópios que operam na faixa de rádio.

Com isso, esse trabalho tem o objetivo de estudar os conhecimentos sobre os pulsares, realizando uma investigação desde a sua fonte emissora, o pulsar, até sua detecção e processamento em um radiotelescópio. Para melhor abordagem do tema, inicialmente, no Capítulo 2 são feitas considerações acerca dos conteúdos de Óptica Física envolvidos tanto no fenômeno de emissão e propagação do sinal pela fonte astronômica, quanto pela recepção e análise do sinal pelo equipamento utilizado.

No capítulo 3 é feita uma revisão acerca dos pulsares, abordando seu histórico, tratando da sua descoberta, da sua formação, da emissão e propagação do sinal. Alguns tipos e suas características e brevemente sobre as aplicações possíveis utilizando as características extremas fornecidas por esse astro, como a detecção de ondas gravitacionais em pulsares de milissegundo.

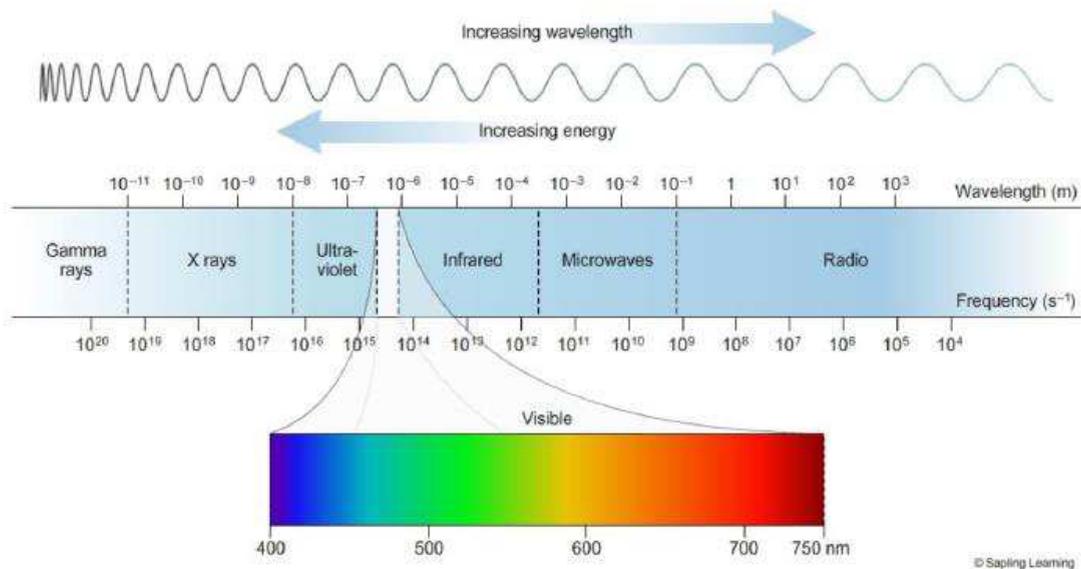
Uma etapa muito importante na astronomia é a coleta e processamento de dados, realizada por telescópios e radiotelescópios, assim, no capítulo 4 é feita uma descrição do funcionamento desse aparelho, descrevendo algumas estruturas fundamentais e o processo de captação e tratamento do sinal.

2 Uma introdução sobre óptica física

2.1 A luz como onda

O espectro eletromagnético comporta 7 tipos de ondas dentro de frequências que para a esquerda são cada vez menores tendendo aos raios gama a partir de um comprimento de 10^{-11}m e para a direita representando frequências de rádio a partir de 10^{-1}m , dentro desse intervalo é encontrado as frequências de raio-X, ultravioleta, luz visível, infravermelho e micro-ondas [2], como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Espectro eletromagnético da luz



Chaisson e McMillan (2014) [2]

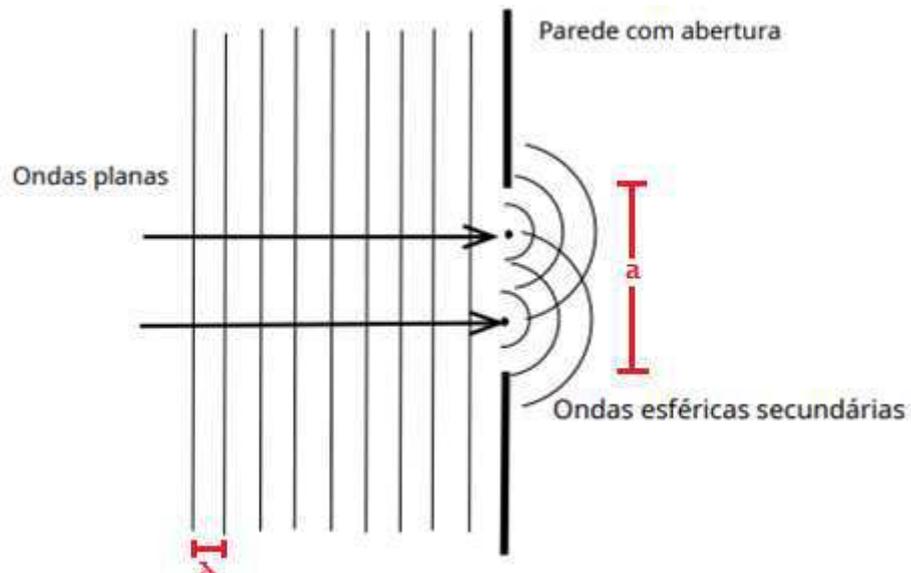
O espectro eletromagnético não tem limites bem definidos nas extremidades. Entre as faixas tem-se uma maior aproximação do comprimento de onda de cada uma. E de acordo com seu comprimento de onda pode-se encontrar uma determinação específica, como as faixas de rádio usadas nos meios de comunicação, canais de TV, rádio AM e FM, as faixas de infravermelho e raio-X utilizadas em tecnologias na atualidade [3].

2.1.1 interferência

O comportamento ondulatório da luz foi inicialmente postulado em 1678 pelo físico holandês Christian Huygens. A teoria de Huygens enfatiza a possibilidade de

prever a localidade de uma frente de onda a partir de sua posição inicial conhecida, processo conhecido como o princípio de Huygens. Este princípio expressa que toda frente de onda é composta por pontos que se comportam como novas frentes de ondas secundárias, logo, sua nova posição é dada pela tangente dessas novas frentes de ondas [4], [5]. A Figura 2 ilustra o fenômeno.

Figura 2 - Comportamento ondulatório da luz proposto por Huygens



Fonte: Adaptado de Marr, Snell e Kurtz (2015) [5].

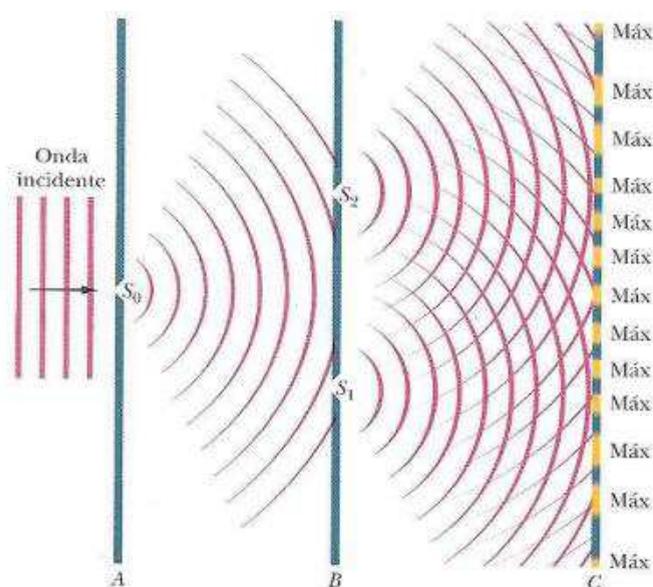
2.1.2 O experimento de Young

Segundo Nussenzveig (2014) [6], a interferência é um efeito ondulatório devido à superposição das ondas e Thomas Young, foi o primeiro a perceber esse fenômeno e a exemplificá-lo. Um experimento fundamental para demonstrar a natureza ondulatória da luz foi realizado por Young em 1801. Primeiramente, para entender o conceito geral, imagine que dois conjuntos de ondas na água cheguem juntos a um canal estreito. Se, ao passarem pelo canal, as elevações de um conjunto coincidirem com as elevações do outro conjunto, estas formarão uma onda com elevação maior. No caso em que as elevações de um e as depressões do outro forem simultâneos, soma que as elevações preencherão as depressões e a superfície da água continuará em repouso.

Tendo isso em vista, Young afirmou que o mesmo ocorreria para dois feixes de luz, e chamou de lei geral de interferência da luz. O experimento realizado por Young para demonstrar o efeito de interferência da luz (Figura 3), consiste em projetar uma

fonte puntiforme de luz sobre um anteparo opaco com dois orifícios pequenos e muito próximos entre si. Em um segundo anteparo opaco, notou-se que em cada ponto específico é atingido por dois caminhos distintos da luz, em vez de o resultado ser a soma do brilho luminoso que ultrapassou os dois orifícios, observou-se que apareciam franjas brilhantes e escuras, chamadas de franjas de interferência.

Figura 3 - Formação de padrões de interferência no experimento de Young



Fonte: Walker, Halliday e Resnick (2009) [4].

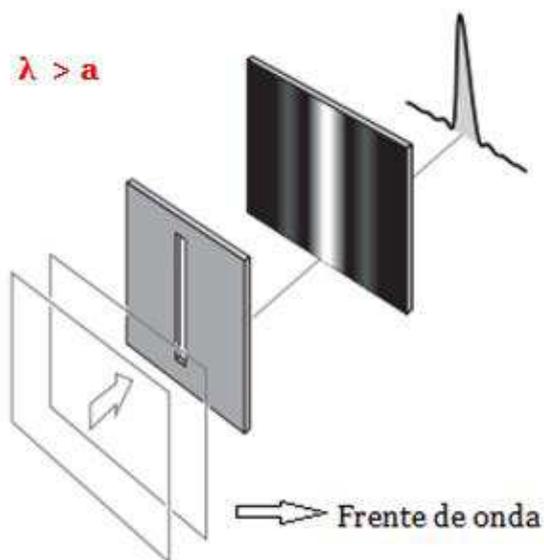
2.2 Difração

O efeito de difração pode ser descrito sob uma observação da sombra de um objeto opaco projetada em um anteparo e composta por tons claros e escuros em seu entorno, esse efeito caracteriza os fenômenos que ocorrem com ondas de qualquer natureza, basta uma frente dessa onda ser obstruída e uma região será alterada em termos de amplitude ou fase, logo, os demais seguimentos da onda se estenderão para além do obstáculo, interferindo e causando uma mudança na distribuição da densidade de energia em questão, formando assim os padrões de difração [3].

2.2.1 Difração em uma fenda

A difração em uma fenda ocorre de maneira simples, como pode ser observado na Figura 4, onde um feixe de luz incide sobre um anteparo que dispõe de uma fresta com formato retangular. Sobre um olhar da ótica geométrica, espera-se que na tela de observação os raios de luz refratados formem uma imagem com formato igual ao da fenda. No entanto, isso não é o observado, já que ao invés de uma única imagem de mesmo formato, ver-se várias franjas claras e escuras com intensidades e formatos diferentes, sendo a franja brilhante central mais larga que a fenda, tendo em vista que a mesma varia com o seu inverso, e em ambos os lados da franja central há franjas claras e escuras. Assim, a onda sofrerá um maior efeito de difração quando o seu comprimento de onda λ for efetivamente maior do que a abertura a da fenda.

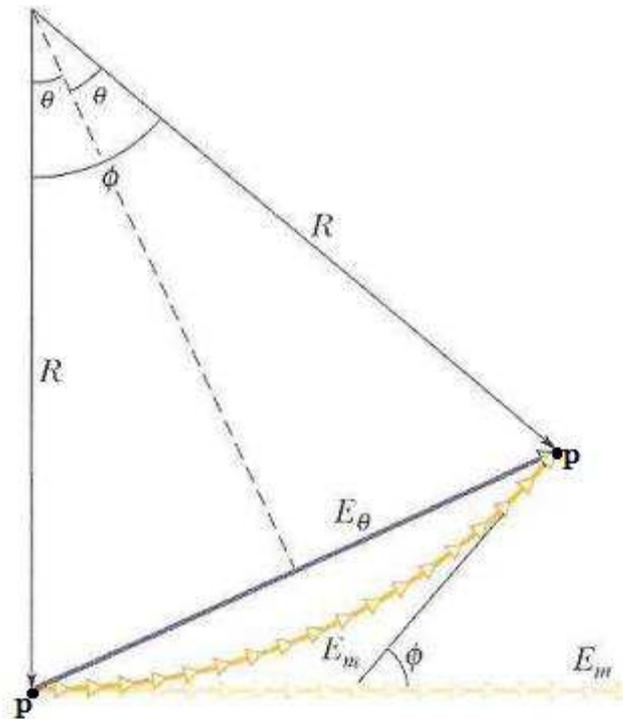
Figura 4 - Representação esquemática da difração em uma fenda



Fonte: Hecht (2017) [3].

A intensidade da luz que difrata pode ser calculada em função de θ , que é o ângulo formado pelo feixe de luz difratado e um ponto qualquer na tela de observação, como mostra a Figura 5. Sabendo que a amplitude é a soma vetorial dos fasores do campo elétrico E em cada ponto p , a intensidade I no ponto p é proporcional ao quadrado do campo elétrico. Assim, a amplitude no centro da figura de difração pode ser representada pelo campo E_θ . Já o ϕ representa a diferença de fase entre os vetores.

Figura 5- Feixe de luz difratado



Fonte: Walker, Halliday e Resnick (2009) [4].

E como pode ser visto, a figura forma dois triângulos iguais, logo, podemos descrevê-los da seguinte forma:

$$\left(\frac{E_{\theta}}{2}\right)^2 + \left(R \cos \frac{1}{2} \phi\right)^2 = R^2 \quad (2.1)$$

Logo,

$$E_{\theta} = 2R \sin \frac{1}{2} \phi \quad (2.2)$$

podendo ϕ ser expresso em radianos, é dado por,

$$\phi = \frac{E_m}{R} \quad (2.3)$$

tomando o valor de R e substituindo em (2.2), tem-se que,

$$E_{\theta} = \frac{E_m}{\frac{1}{2}\phi} \sin \frac{1}{2} \phi \quad (2.4)$$

tomando a relação de proporcionalidade existente entre a intensidade e a amplitude do campo elétrico,

$$\frac{I_{\theta}}{I_m} = \frac{E_{\theta}^2}{E_m^2} \quad (2.5)$$

Substituindo o valor de E_{θ} ,

$$\frac{I_{\theta}}{I_m} = \frac{\left(\frac{E_m}{\frac{1}{2}\phi} \sin \frac{1}{2}\phi\right)^2}{E_m^2} \quad (2.6)$$

e, portanto,

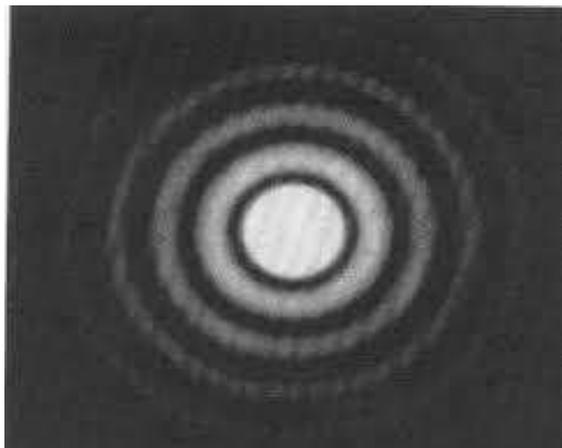
$$I_{\theta} = I_m \left(\frac{\sin \frac{1}{2}\phi}{\frac{1}{2}\phi}\right)^2 \quad (2.7)$$

Assim, a intensidade total no centro do padrão de difração é dada por I_m , enquanto a intensidade em seu entorno variando pelo ângulo θ é dada por I_{θ} .

2.2.2 Abertura circular

A difração produzida em uma abertura circular está caracterizada na figura 5, a mesma trata-se de anéis luminosos com um disco mais brilhante no centro, formada pela interferência em filmes finos. Na Figura 6, pode-se observar a formação de discos claros e escuros, caracterizando os máximos e os mínimos, semelhante ao que foi visto no fenômeno de difração em uma fenda.

Figura 6- Difração formando máximos e mínimos de uma abertura circular



Fonte: Walker, Halliday e Resnick (2009) [4].

Nesse tipo de difração, a posição do primeiro mínimo é dada pela seguinte equação,

$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (2.8)$$

onde θ é o ângulo formado entre o eixo central e a reta que liga o centro do anel à

posição do mínimo. Pode-se perceber que o fator 1,22 é o que difere da difração em uma fenda.

Na seção anterior, foi realizado a determinação da intensidade para o padrão de difração em uma fenda simples, pelo método de fasores. Agora vamos calcular a intensidade para um padrão de abertura circular, utilizando a integração de ondas harmônicas contínuas.

É possível demonstrar a seguinte relação para a intensidade:

$$I_{\theta} = I_m \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]^2, \quad (2.9)$$

onde J_1 é uma função de Bessel.

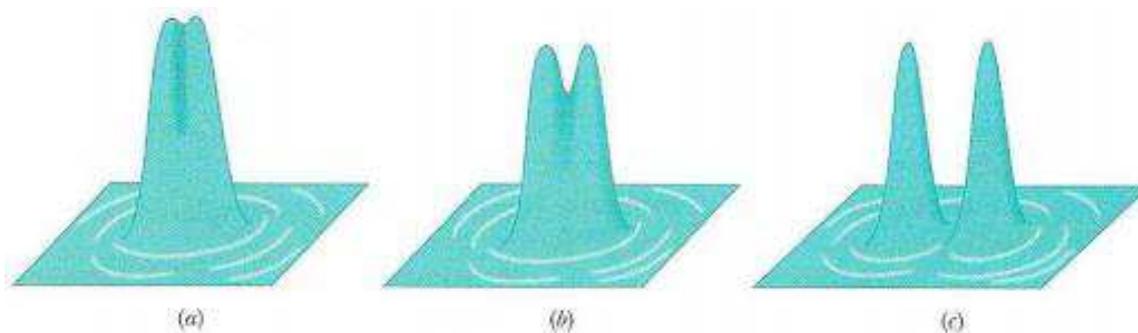
A qualidade das imagens captadas por um aparelho depende diretamente da resolução e, também, de como é tratada a distinção de mais de um foco de luz, como estrelas que estão muito próximas fazendo com que o ângulo θ de separação entre elas para o observador seja muito pequeno, como pode ser visto na Figura 7. Assim, o fenômeno de difração é fundamental para distinguir tais objetos, tendo em vista que a formação das imagens reproduz um padrão de difração.

Figura 7- Representação de dois focos de luz muito próximo em três níveis diferentes



Fonte: Adaptado de Walker, Halliday e Resnick (2009) [4].

Uma representação gráfica da detecção de focos de luz em diferentes proximidades é ilustrada na Figura 8, onde cada pico representa um máximo de intensidade de cada foco de luz. No gráfico *a* não pode ser distinguido os focos de luz, e tudo é visto como em um único foco. Na representação *b* os focos quase não podem ser reconhecidos, pois o máximo central de um deles está coincidindo com o primeiro mínimo do outro, assim, o observável está representado em *b* da figura 7, com aparência sucinta que se trata de dois objetos. Por fim, temos a última representação em *c*, onde claramente ver-se dois picos, caracterizando um ângulo θ suficientemente grande para distinguir as duas fontes.

Figura 8- Representação gráfica dos focos de luz

Fonte: Adaptado de Walker, Halliday e Resnick (2009) [4].

Considerando em particular a representação *b*, em que os focos mal podem ser distinguidos, recaímos em um princípio conhecido como critério de Rayleigh, onde a separação angular θ pode ser expressa em radianos, logo que os ângulos de separação são tão pequenos que a equação 2.8 pode expressar o limite de resolução para um ângulo θ :

$$\theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (2.10)$$

3 Sobre pulsares: uma introdução

3.1. Histórico

Em 1967, através do radiotelescópio projetado por Anthony Hewish no observatório da Universidade de Cambridge, Jocelyn Bell observou específicos sinais de micro-ondas emitidos de uma região do espaço, que em pouco tempo foram mapeados e explorados por Hewish (1968), catalogando sinais com um período de aproximadamente 1,34 segundos e uma duração de apenas 1/20 segundos [1].

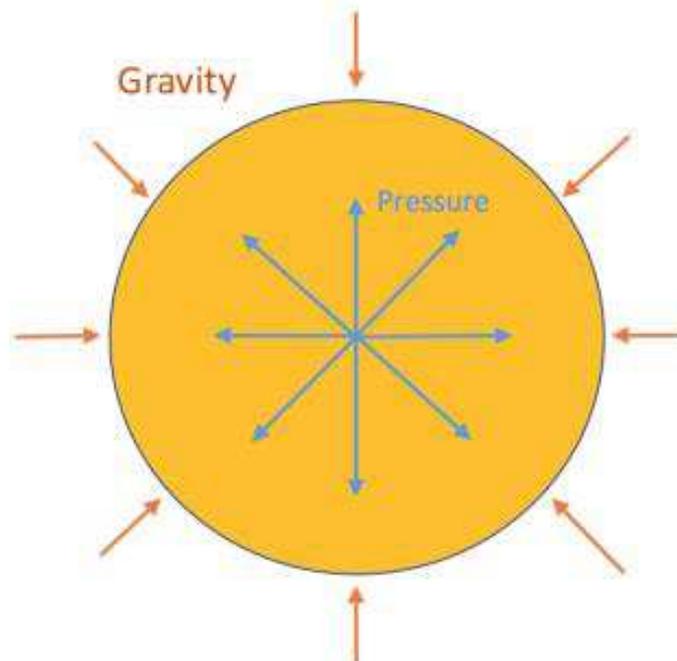
As micro-ondas eram facilmente captadas pelo radiotelescópio, pois detinham grandes quantidades de energia, e foi exatamente isso que levou os astrônomos a fazerem diversas especulações, até mesmo as mais otimistas, de que esses sinais seriam emitidos por outras civilizações extraterrestres, porém, essa hipótese foi logo descartada. Assim, para explicar tamanhas energias, precisava-se de uma poderosa fonte com um imenso campo magnético, que depois de outras especulações, resultou na confirmação que esta fonte seria uma estrela de nêutrons [1].

3.2 Formação de um pulsar

A formação de uma Estrela de Nêutrons (EN) é derivada do ciclo de vida de uma estrela “comum”, ou seja, surgem a partir da concentração de poeiras galácticas como nuvens de hidrogênio submetidas a uma auto gravitação, elevando temperatura e pressão do sistema, dando origem as protoestrelas, onde aquelas que tiverem energia suficiente para queimar seu hidrogênio se tornará de fato uma estrela, logo, seu destino será determinado pelo seu tamanho, cada estrela terá um percurso de vida a seguir com um diferente destino [7].

Para que a estrela possa continuar a existir, é necessário que haja um equilíbrio entre a força gravitacional imposta pelo sistema à estrela e sua força de fusão gerada pela queima de gases no seu interior, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9– Equilíbrio entre pressão e gravidade em uma estrela



Fonte: Autoria própria (2022).

Desta forma, pode-se abordar uma descrição gravitacional deste equilíbrio segundo uma teoria newtoniana, Dexheimer (2006) [8],

$$dF = -\frac{Gm(r) dm}{r^2}, \quad (3.1)$$

Considerando uma estrela perfeitamente esférica temos que $m(r)$ se trata da massa interna dessa estrela em função de um raio r e com um elemento infinitesimal de massa dm , e G é a constante gravitacional universal de newton. Pode-se tomar uma descrição relativa da massa total da estrela através de uma relação de volume (V) e densidade ρ ,

$$dm = \rho dV = \rho r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi, \quad (3.2)$$

Logo, o infinitesimal de massa passa a representar a massa total da estrela de forma pontual,

$$m(r) = \int_0^r \rho dV = \int_0^r \rho 4\pi r^2 dr, \quad (3.3)$$

Em contrapartida, tem-se uma força realizada pelos gases no interior da estrela para fora, que pode ser representada pela forma diferencial da pressão em um dado ponto,

$$dP = \frac{dF_P}{dA} \implies dF_P = dPr^2 \sin \theta d\theta d\phi, \quad (3.4)$$

Sendo P a pressão resultante no interior da estrela, dF_P o infinitesimal da força realizada pelas partículas e dA a parte infinitesimal de cada ponto das camadas da estrela.

Para haver um equilíbrio, é necessário que a força gravitacional e a pressão gerada pelos gases sejam iguais, assim, foi substituído 3.2 em 3.1. igualando a eq. 3.4.

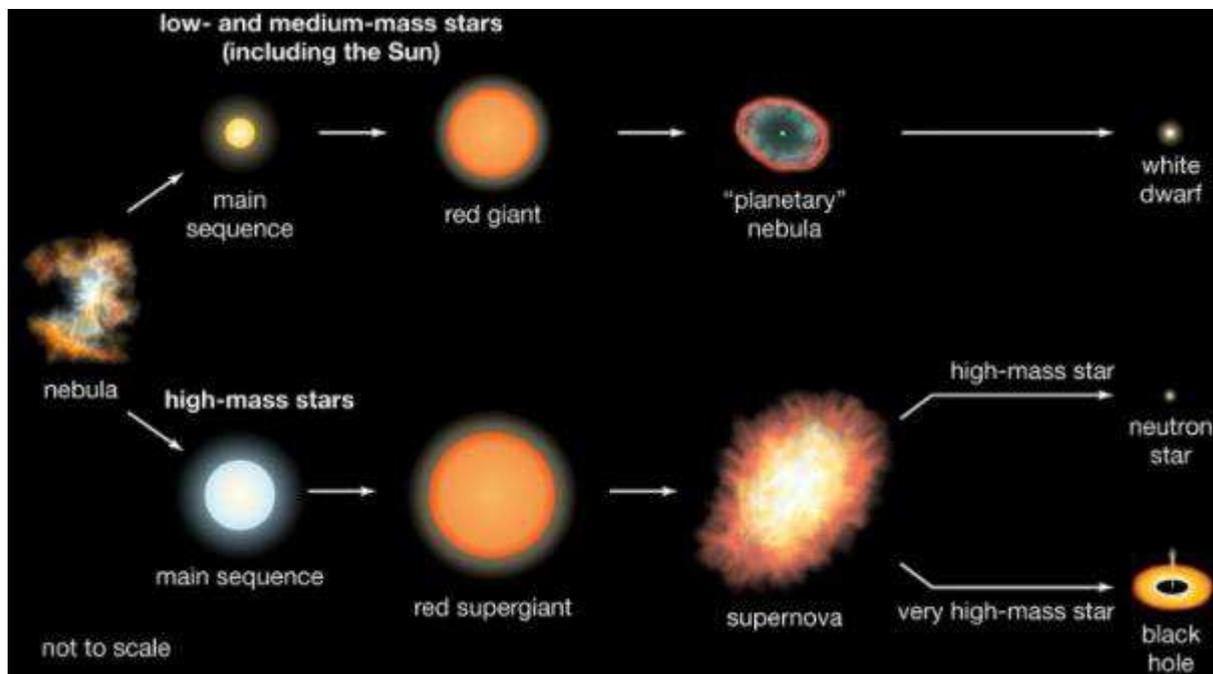
$$dF = dF_P \implies -\frac{Gm(r)\rho r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi}{r^2} = dPr^2 \sin \theta d\theta d\phi, \quad (3.5)$$

Onde logo pode-se definir a uma equação específica para a força de equilíbrio de uma estrela, como sendo,

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm(r)\rho}{r^2}. \quad (3.6)$$

Desta forma, quanto menor o raio da estrela menor será a pressão aferida a ela, que toma um valor negativo devido a força de gravidade impulsionar para o centro. No momento em que essa igualdade não é mais respeitada, ocorre um desequilíbrio na estabilidade das forças, e a estrela colapsa, seu destino agora é traçado de acordo com a massividade de cada estrela. Para estrelas menos massivas abaixo de (8 M), seu estágio final será uma Anã Branca (AB). Já estrelas mais massivas resultam em uma Supernova (SN) que pode recair em duas situações, dependendo da massa antes contida na estrela de origem, em estrelas supermassivas com massa acima de (25 M) o colapso gera Buracos Negros (BN), enquanto as intermediárias com massa entre (8 e 25 M) resultam nas Estrelas de Nêutron [9]. A Figura 10 ilustra o processo de formação dos três astros.

Figura 10- Processo de formação de anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros



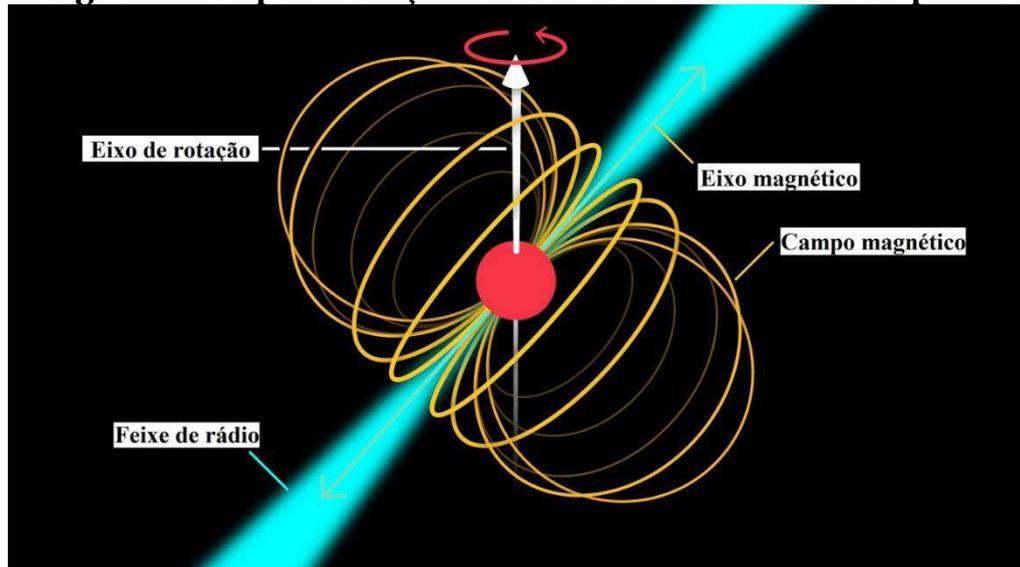
Fonte: Brittanica.com (2022) [10].

Desta forma, as estrelas de neutron surgem a partir de uma supernova. Esse processo ocorre devido ao intenso campo gravitacional criado pela própria estrela estar em constante reação com a força gerada pela irradiação da fusão de seus elementos químicos em outros elementos cada vez mais pesados. Logo, tais elementos pesados não conseguem mais decair e a pressão gravitacional é tão intensa que o núcleo da estrela se contrai ao ponto de colapsar novamente, agora com um poder energético imensamente grande, condesando ainda mais seu nucleo, tornam-doa menor, mais densa e conservando grande parte de sua energia [11], [12].

Com isso, NG (2014) [13], aponta que os pulsares são estrelas de nêutrons magnetizadas que devido a sua drastica compactação têm grande parte do seu momento angular conservado, o que eleva o seu movimento de rotação chegando a centenas de vezes por segundo. Logo, o campo magnético induz um imenso campo elétrico na sua superfície que ao girar rapidamente desloca elétrons que emitem radiação síncrotron em um feixe estreito. Como pode ser observada na Figura 11, a radiação eletromagnética é emitida das regiões próximas aos polos magnéticos da estrela. Assim, quando os mesmos não estiverem alinhados com o eixo de rotação da

estrela, a radiação eletromagnética será emitida em alternadas direções do espaço, e quando alinhado com o observador será vista rapidamente como um pulso [14]. A combinação dessa emissão de feixes de energia com sua grande rotação introduz o conceito do modelo de farol dos pulsares.

Figura 11- Representação do modelo de ‘farol’ de um pulsar



Fonte: V-Kosmose (2021) [15].

Os pulsares estabelecem uma precisão da ordem de 10^{-16} , o que os torna relógios significativamente precisos, isso devido a sua alta rotação gerada pela drástica compactação e conservação do momento linear [16], logo, quanto menor o período de rotação de uma estrela maior será sua velocidade angular, no entanto, existe um limite para essa velocidade angular Ω dada por,

$$\Omega^2 R = \frac{GM}{R^2} \implies \frac{4\pi^2 R}{P^2} = \frac{GM}{R^2} , \quad (3.7)$$

Tendo M como a massa da estrela e R o seu raio. Pode tornar a igualdade em função do período P chegando a,

$$P^2 = \left(\frac{4\pi R^3}{3} \right) \frac{3\pi}{GM} , \quad (3.8)$$

Logo, sabendo que a densidade é dada pela razão da massa pelo volume, pode-se reescrever a equação da seguinte forma,

$$\rho = \frac{3\pi}{GP^2} .$$

(3.9)

Com isso, podemos ver que o período de uma estrela está claramente ligada a sua densidade, o que cria uma relação de proporção com a velocidade angular. Ainda, podemos definir um raio R máximo para conter tal densidade [16]. Tomando a Equação 3.11, pode-se ver que,

$$R = \left(\frac{GMP^2}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} . \quad (3.10)$$

3.3 Propagação dos pulsos

Para Cameron (2014) [11], os pulsares exalam pulsos individuais que se distribuem dentro do espectro eletromagnético sob várias faixas de frequências. Os elétrons que são deslocados não podem escapar do intenso campo gravitacional, logo, descrevem uma trajetória curva, perdendo energia, no entanto, a energia perdida toma forma de micro-ondas que serão detectadas pelos aparelhos aptos. A maior parte de energia é emitida em frequência de rádio e a outra parte é produzida em ondas do espectro do raio-x e luz visível. É o caso do primeiro e único pulsar óptico descoberto na nebulosa do caranguejo em 1969.

Os fótons liberados viajam pelo meio intergaláctico composto por um plasma frio e ionizado, logo, pelo caminho há dispersões, já que o meio ao qual eles estão imersos oferece diversas resistências com diferentes índices de refração que distorcem o sinal, levando-os por diferentes caminhos e chegando ao observador em tempos diferentes, ocasionando um efeito adverso entre o verdadeiro perfil do pulso [13].

Essas resistências podem ser amenizadas ou intensificadas de acordo com os níveis energéticos desse foton, logo, ftons mais energéticos tendem a sofrer menos alteração na sua trajetória e velocidade, enquanto os menos energéticos, por deterem de uma frequência de propagação menor, são mais afetados pela colisões com o plasma [17]. Desta forma, pode-se determinar uma a velocidade de propagação V_g da seguinte forma,

$$\mu = \left[1 - \left(\frac{v_p}{v} \right)^2 \right]^{1/2} . \quad (3.11)$$

Sendo μ o índice de refração do meio, ν é a frequência da onda eletromagnética e ν_p a frequência do plasma. Pode-se determinar a frequência do plasma relacionando a carga e a densidade do elétron, e e n_e , respectivamente, pela sua massa m_e ,

$$\nu_p = \left(\frac{e^2 n_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} , \quad (3.12)$$

Logo, analisando a equação 3.11, nota-se que para uma frequência do plasma maior que a frequência da onda, resulta em um μ menor que zero, imaginário, assim, a onda não pode se propagar pelo meio [16]. Assim,

$$v_g = \mu c , \quad (3.13)$$

Enfim, pode-se considerar na maioria dos casos de observação de frequências de rádio que a frequência do plasma é muito menor que a frequência das ondas, logo,

$$v_g \approx c \left(1 - \frac{\nu_p^2}{2\nu^2} \right) , \quad (3.14)$$

Desta forma, pode-se ver que a velocidade das ondas é maior quando são emitidas em uma frequência maior. Diante disso, ainda podemos determinar uma relação para o tempo t de atraso da frequência ν se deslocando em uma distância d , como sendo,

$$t = \int_0^d \frac{dl}{v_g} - \frac{d}{c} , \quad (3.15)$$

Agora tomando o valor de v_g e substituindo em 3.16,

$$t = \frac{1}{c} \int_0^d \left(1 + \frac{\nu_p^2}{2\nu^2} \right) dl - \frac{d}{c} = \left(\frac{e^2}{2\pi m_e c} \right) \frac{1}{\nu^2} \int_0^d n_e dl , \quad (3.16)$$

$$t = \left(\frac{e^2}{2\pi m_e c} \right) \frac{1}{\nu^2} DM , \quad (3.17)$$

A expressão DM representa a densidade de elétrons contida na área disposta entre o pulsar e o observado, na astrofísica é chamada de medida de dispersão [16],

[17], conforme exibido a seguir.

$$DM = \int_0^d n_e dl = \langle n_e \rangle d, \quad (3.18)$$

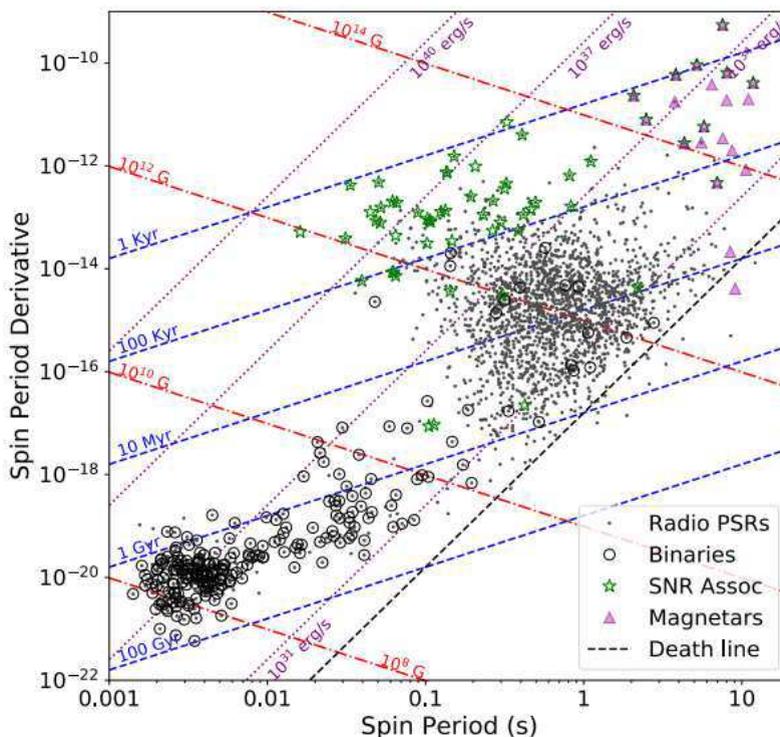
Com isso, o pulsar está constantemente liberando energia, logo, a sua velocidade de rotação está diminuindo. Isso significa que quanto mais rápido for o período do pulsar, mais jovem este será. Ainda foi detectado que os pulsares podem aumentar o seu período repentinamente e depois voltarem a decair. Esse fenômeno foi denominado pelos astrônomos de *glitch*, que significa “escorregão”, pode ser ocasionado por uma mudança na distribuição de massa dentro da estrela, ou resultado de choques entre meteoros com grandes diâmetros e a estrela de nêutron, ocasionando o aumento no momento angular da estrela devido sua conservação. A causa certa desse fenômeno ainda não está bem definida. Há outros modelos que buscam explicar esse fato, como por exemplo o proposto por Baym, Pethick, e Pines (1969), que apontam como causa do fenômenos terremotos na crosta da estrela [18], ou o modelo mais aceitável atualmente descrito por Ruderman, Zhu e Chen [19], que descreve esse mecanismo físico como resultado da interação de regiões fixas de vorticidade localizada na superfície da estrela que devido sua movimentação e estagnação, parte do momento angular pode ser acrescentado ao momento de rotação da estrela, produzindo um *spin-up*.

3.4 Modelos de pulsares

A amplitude que essa nova categoria de objetos celestes do nosso espaço galáctico alcançou, com mais de 3176 pulsares catalogados, onde 232 encontram-se em aglomerados globulares e desses, 31 estão localizados nas Nuvens de Magalhães [20] fez-se necessário classifica-los em diferentes categorias para que seja possível a construção de modelos capazes de explicar os diferentes grupos de pulsares em torno formação, de sua evolução, características e destino [11].

Os pulsares podem ser bem definidos pelo seu período de *spin*, tendo em vista a possibilidade de determinar sua idade característica e a magnitude do seu campo magnético, podendo ser traçado um diagrama do período de *spin-down* e da sua derivada, de acordo com a sua intensidade luminosa, que representa quantidade de energia e em função de sua temperatura [20], como apresentado na Figura 12, onde os pulsares com maior período tendem a ser mais lentos, enquanto os pulsares mais à esquerda tem um período de *spin* menor, são mais rápidos, chamados de pulsares de milissegundos.

Figura 12- Diagrama do período de *spin* de um pulsar em função de sua derivada



Fonte: Balakrishnan (2022) [20].

O fenômeno que faz o período de rotação de um pulsar aumentar com decorrer do tempo chamasse *spin-down*, e segundo Balakrishnan (2022) [20], é justificado pela perda de energia cinética rotacional, onde parte da energia é transformada em radiação do dipolo magnético e uma pequena fração convertida em frequências de rádio observável. No entanto, Graikou (2018) [21] afirma que apenas essa perda de energia rotacional para a radiação é insuficiente para explicar os índices de frenagem de um pulsar, seu *spin-down*, mas é uma boa aproximação.

Com isso, podemos resumir algumas classes de pulsares, como os pulsares jovens e os pulsares ‘comuns’. Analisando-se a Figura 12, nota-se que os pulsares jovens se encontram na parte superior a esquerda, com um período de rotação de 20 milissegundos, como o pulsar do caranguejo [22]. Esses pulsares apresentam períodos de vida mais curtos variando de 1 a 100 Kyr . Os pulsares comuns são de fato mais populosos, é a categoria que comporta a maioria dos pulsares, têm valor de *spin-down* próximo de 0,1s e período de vida entre 300 Kyr e 1 Gyr [20].

Outra classe dos pulsares é chamada de anulação, intermitentes e de mudança de modo. Essas denominações se dão pela característica temporal de oscilação comum entre os três, onde o pulso de luz que é a principal característica dos pulsares deixa de existir por alguns instantes ou até anos. O pulsar de anulação que apresenta momentos em que seu pulso não é observado, mas alguns minutos depois é retomando em seu período normal, enquanto que o pulsar intermitente a emissão do pulso pode sumir por horas ou até por anos e por fim o pulsar de mudança de modo, semelhante aos anteriores, apenas oscilar nas duas forma comentadas a sua emissão de pulso [23], [24].

3.4.1 Magnetares

Os magnetares formam expressivamente outro grupo de pulsares, tendo em vista o seu imenso campo gravitacional, característica que o destaca dos demais pulsares. Outro ponto específico dos magnetares é sua forma de emissão de energia, já que a maior parte de sua transmissão é feita em forma de raios-X, havendo também emissões na frequência de raios gama e mais recentemente foi registrado na faixa de rádio, como o magnetar AXP XTE J1810-197 [25]. Devido ao seu intenso campo magnético, os magnetares detêm um período de vida mais curto que os demais pulsares, resultando em uma rápida redução do seu período de rotação [11], [13].

3.4.2 Pulsares de Milissegundo e Binários

Os pulsares de milissegundos, caracterizados por seus períodos bem curtos e baixas taxas de *spin-down*, são bem estáveis e possuem forças de campo magnético mais baixas que seus semelhantes [13]. Esses pulsares de milissegundos são formados pela interação de um jovem pulsar de um sistema binário de estrelas [26]. Uma versão bem descrita da formação desses objetos é descrita em [9], na qual considera-se que uma das estrelas do sistema binário evolui até explodir em uma supernova formando uma estrela de nêutron, e nesse momento a energia liberada pela supernova desassocia o sistema formando um pulsar jovem simples. Por outro lado, pode ocorrer que o sistema não se desintegre totalmente, formando um pulsar de milissegundo binário.

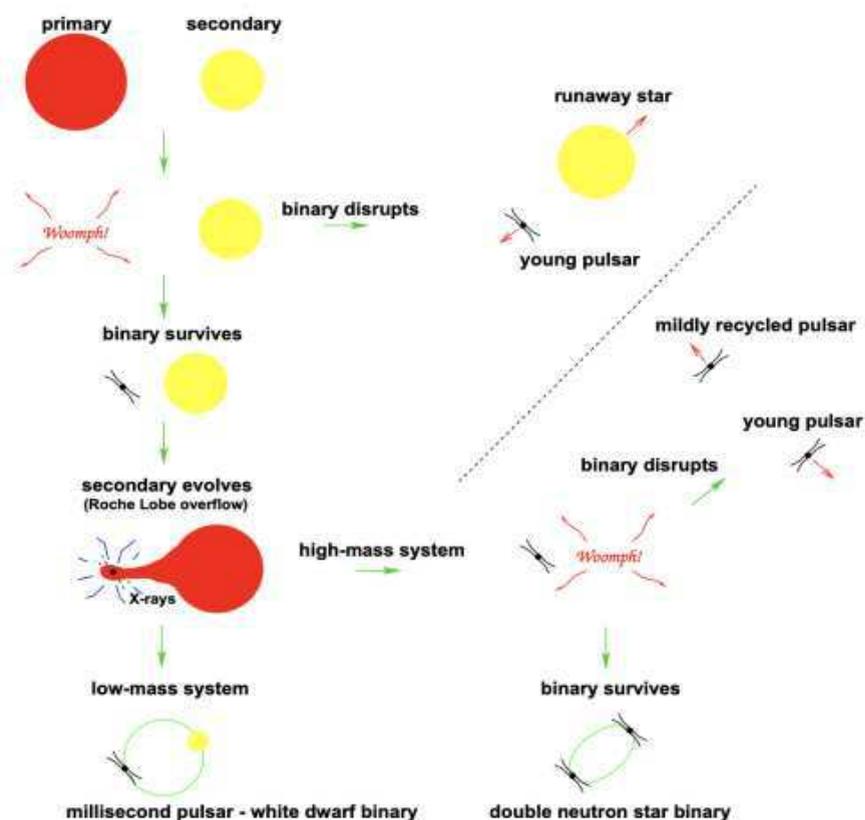
Os pulsares binários têm sua formação baseada na associatividade de duas estrelas, onde, inicialmente uma estrela evolui se comprimindo até sofrer uma explosão de supernova se tornando uma estrela de nêutrons, um pulsar, que irradiará energia

constantemente como um pulsar simples. Enquanto isso, a estrela companheira evolui para um estágio chamado gigante vermelha. Nessas condições, como aponta Ng (2014) [13], o campo gravitacional do pulsar poderá manter interação com a gigante vermelha, o qual irá atrair matéria e momento angular de sua parceira.

Os pulsares de milissegundo geralmente apresentam baixos campos magnético quando comparados a outras classe de pulsares, sendo uma média de 1089 G, onde 67% deles estão inseridos em um sistema binário, enquanto as outras classes somam apenas 2% [20], o que indica uma forte relação entre os pulsares de milissegundo e os de sistema binário.

Podemos observar essa relação dos pulsares de milissegundo e binários na Figura 13. Partindo de duas estrelas comuns orbitando entre si, uma evolui para um pulsar, a depender da magnitude da super nova que ocorreu, o sistema binário pode deixar de existir e permanecer um pulsar jovens ou continuar existindo junto a órbita do pulsar e mais tarde também evoluirá, chegando ao estágio de uma gigante vermelha, a qual transmitirá energia e matéria para seu parceiro, prolongando assim a sua vida. A depender da massa dessa gigante vermelha, considerando-a baixa, por um fenômeno chamado de transferência de massa, essa estrela agora se tornara uma anã branca, mantendo a órbita binária. No entanto, se a massa da estrela companheira do pulsar também explodir em uma supernova podemos ter um sistema binário de pulsares, caso a órbita seja interrompida com a explosão, pode formar um pulsar jovens e uma estrela de nêutrons ou dois pulsares jovens [20].

Figura 13- Relação entre pulsares de milissegundo e binários



Fonte: Balakrishnan (2022) [20].

3.5 Aplicações de pulsares

Um estudo muito importante realizado através dos pulsares diz respeito à sondagem da matéria das estrelas de nêutron, já que se trata de densidades ultra altas e pode ser usado na determinação de sua equação de estado. A equação de estado de um pulsar contribui na detecção de novos pulsares identificando raios, períodos, rotações, onde cada descoberta possibilita ainda mais o aperfeiçoamento da equação de estado [11].

Os testes realizados para tentar validar a teoria da relatividade geral em alguns experimentos são efetuados sob campo fraco de gravidade, onde seu espaço tempo se aproxima da métrica de Minkowski, com uma curvatura leve e uma velocidade muito menor que a velocidade da luz, como os três testes proposto por Einstein, a confirmação da precessão do periélio das orbitas planetárias, a deflexão da luz no espaço-tempo quando submetida a uma fonte gravitacional massiva e o *redshift* gravitacional que sofre desvio para o vermelho [27].

Já os pulsares, são ótimos laboratórios para testes de gravidade por exemplo, já que oferecem condições extrema de campo gravitacional, temperaturas e pressão. No

caso da relatividade geral, pode-se realizar testes com regime forte de campo, o qual favorece uma curvatura significativa no espaço tempo com seus campos auto gravitantes [20]. Uma aplicação realizada com sucesso foi a mensuração de alguns parâmetros de um sistema binário de pulsares [28], o PSR B1913+6, com órbita de 7,75 horas e excentricidade de 0,62, onde sua taxa de avanço do periastro foi mensurada em $\dot{\omega} = 4.22(4)\text{yr}^{-1}$, valor significativamente maior que a previsão da relatividade geral de Einstein para a precessão de mercúrio [27].

Os pulsares podem ter aplicações para além dos testes de gravidade, como a mensuração do decaimento do período orbital de um pulsar binário, que de uma forma indireta fornece meios para buscar por ondas gravitacionais [20]. Nesse âmbito, é possível ir além, os pulsares são capazes de fornecer condições específicas para detectar ondas gravitacionais, é o caso do uso de pulsares de milissegundo para detecção de ondas gravitacionais, indicado por Jenet *et al.* (2005) [29], que é utilizando uma matriz de temporização para o reconhecimento de ondas gravitacionais numa faixa de nano-Hz. Para isso, é necessário observando uma grande quantidade de pulsares de milissegundos que contenham uma grande precisão em seu tempo de rotação, deve-se procurar por assinatura do ruído, que estão relacionadas com a produção de ondas gravitacionais devido a colisão de dois buracos negros [29].

Os efeitos de propagação dos pulsares têm grandes contribuições para o meio intergaláctico, já que pode ser mensurada a dispersão do pulsar, em alguns casos o tempo de propagação e as cintilações. Notar mudanças nos resultados desses fenômenos pode caracterizar mudanças no meio em que os mesmos se propagam, logo, possibilita um mapeamento da distribuição de elétrons no meio intergaláctico [30].

4 Radiotelescópio e detecção do sinal

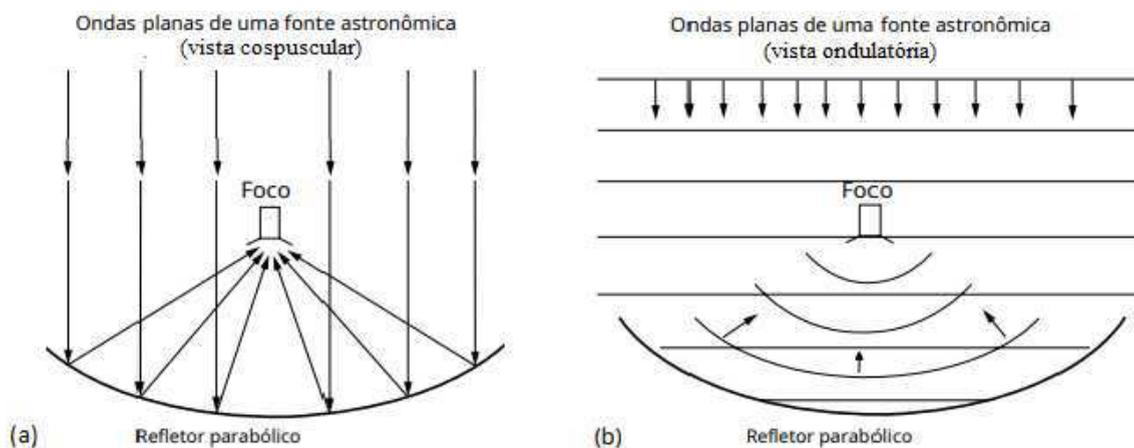
4.1 Estrutura de um radiotelescópio

Um telescópio é o principal objeto utilizado para detecção e observação de objetos celestes. Suas características básicas consistem de um refletor, alimentação, sua linha de transmissão e um receptor, onde sua forma e atuação podem variar de acordo com a necessidade, sendo controlado por um computador que dita seus movimentos e comporta as informações coletadas.

4.1.1 Refletores

Os refletores ou antenas de um radiotelescópio são responsáveis pela coleta do sinal. Com uma sutil diferença entre os dois, tem-se que o refletor concentra a radiação e a antena acopla as ondas eletromagnéticas para linha de transmissão, direcionando-as para o receptor. No entanto a antena pode operar de forma independente, enquanto o refletor necessita de uma antena para acoplar as ondas em uma linha de transmissão. Como pode ser visto na Figura 14, a geometria parabólica desse dispositivo permite a convergência de todas as ondas que chegam a ele em um único ponto, tendo em vista a distância astronômica em que se encontra a fonte emissora do sinal. Pode-se considerar que as ondas chegam ao refletor ou antena de forma paralela (14-a) ou plana (14-b), podendo assim abordar a natureza ondulatória ou corpuscular do sinal.

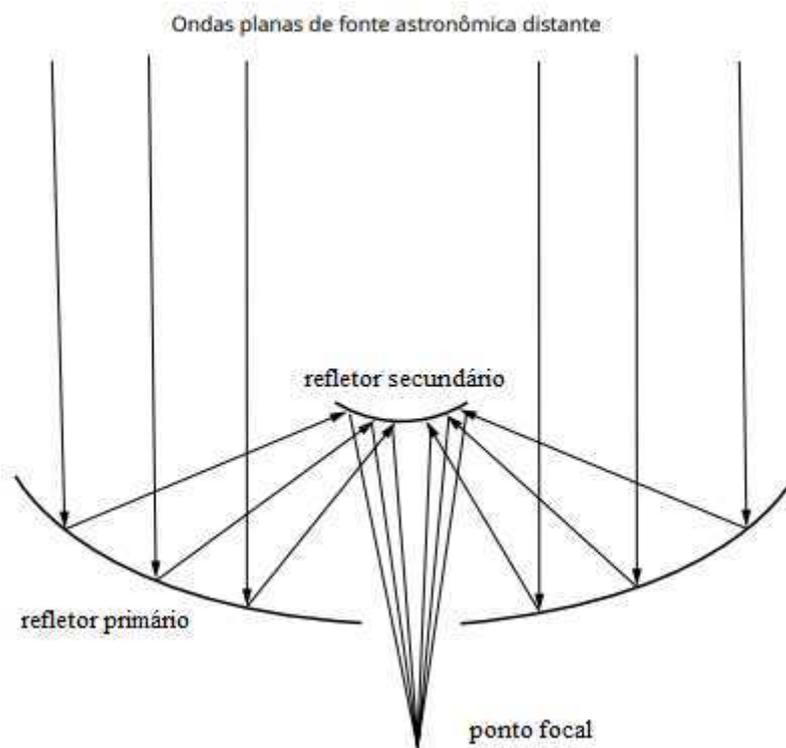
Figura 14 -Representação de raios de luz refletidos na antena de um radiotelescópio



Fonte: Adaptado de Marr, Snell e Kurtz (2015) [5].

A representação acima trata-se de um telescópio de foco principal, caracterizado pela posição do receptor que são posicionados atrás do ponto focal do refletor, o que pode dificultar seu acesso. Assim, torna-se mais conveniente o uso de telescópios do tipo *Cassegrain*, que se caracterizam pela existência de um segundo refletor posicionado no ponto focal do refletor, redirecionando o sinal para outro ponto focal localizado atrás do refletor primário, logo, faz-se necessário uma abertura para que as ondas cheguem aos receptores, como pode ser visto na Figura 15. Note que o primeiro refletor tem um formato parabólico, enquanto segundo é hiperbólico.

Figura 15- Representação esquemática de um refletor do tipo Cassegrain



Fonte: Marr, Snell e Kurtz (2015) [5].

Desta forma, nos telescópios *Cassegrain*, o refletor primário tem duas importantes funções, que são coletar e concentrar a radiação que o chega, ampliando as fontes mais fracas tornando-as mais detectáveis, logo, a quantidade de radiação coletada está diretamente ligada à área efetiva do telescópio. Assim, pela equação (4.1), a potência P com que o refletor capta radiação é dada pelo produto de sua densidade de fluxo F_ν e a área efetiva do telescópio A_{ef} e pela largura da banda D_ν , que se trata da frequência detectada. A sua outra função se trata da capacidade do telescópio diferenciar as emissões de diferentes objetos em diferentes ângulos no céu [5].

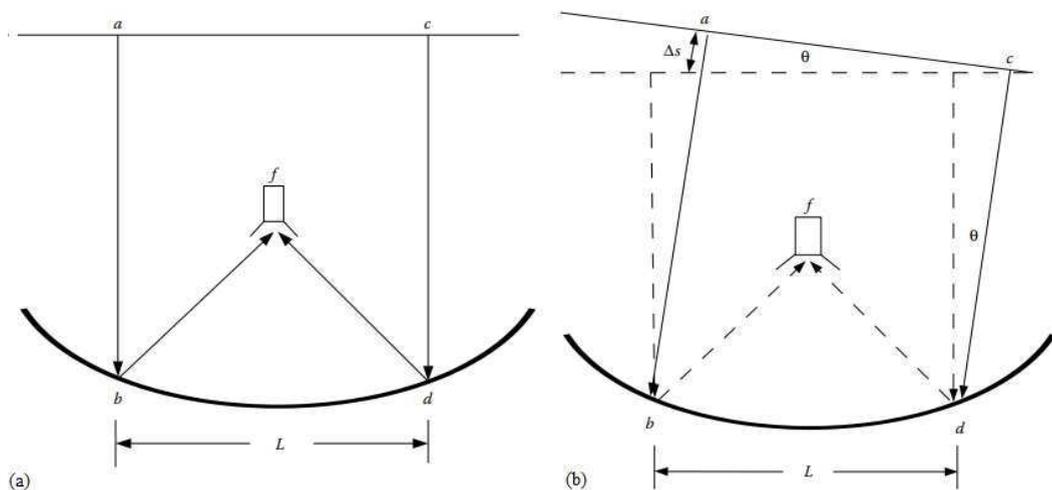
$$P = F_v \cdot A_{ef} \cdot D_v \cdot \quad (4.1)$$

No que se trata da diferenciação entre sinais de fontes astronômicas, fala-se do padrão do feixe emitido, que é identificado pela sensibilidade do telescópio em separar tais informações. Esperava-se que ao direcionar o telescópio para o céu fosse possível receber informações exclusivamente daquela direção específica, porém, isso não acontece devido ao fenômeno de difração das ondas, ocasionado pela interação das ondas com o meio em que se propagam desde sua fonte emissora até o telescópio [5].

Considerando apenas dois raios localizados paralelamente ao eixo óptico do telescópio, eles se refletem e percorrem distâncias iguais até o foco (Figura 16-a), logo, suas fases são iguais e suas ondas se somam, ocorrendo uma interferência construtiva no foco. No entanto, existem raios que não se encontram totalmente paralelos ao eixo central (Figura 16-b) logo, percorrem distâncias diferentes entre si, cuja diferença é dada aproximadamente pela expressão,

$$\Delta s = L\theta \quad (4.2)$$

Figura 16- Deslocamento do ângulo dos feixes de luz



Fonte: Adaptado de Marr, Snell e Kurtz (2015) [5].

Havendo essa diferença no caminho ocorre uma diferença de fase entre os raios ao chegarem ao foco, assim, a diferença de fase é dada por,

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot \frac{\Delta s}{\lambda} = 2\pi \cdot \frac{L\theta}{\lambda} \cdot \quad (4.3)$$

Note que sendo os caminhos diferentes, pode-se ter uma diferença de fase de $\lambda/2$, nesse caso uma diferença total de fase, igual a π , acarretando o cancelamento das

ondas ao chegarem ao foco, ou seja, uma interferência totalmente destrutiva, e nesse caso, a inclinação θ entre o raio e o eixo central fica dada por,

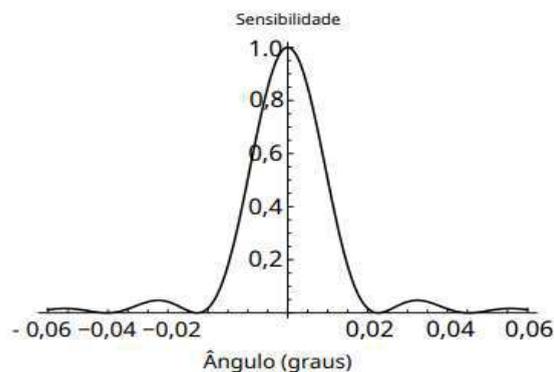
$$\theta = \frac{\lambda}{2L} . \quad (4.4)$$

Vale ressaltar que no caso real em que existem vários raios refletidos não ocorre um cancelamento completo, ainda que haja uma intensa redução na sua intensidade. Como visto em difrações, para uma abertura circular [5], vemos que a expressão acima ganha a seguinte forma, :

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D} . \quad (4.5)$$

A diferença que existe entre as duas fases construtivas ou destrutivas incompletas, significa que há uma variação no foco do telescópio, logo, quer dizer que ele pode identificar uma fonte de energia fora do seu eixo focal, porém, ocorre com uma sensibilidade menor. Como pode ser observado no gráfico da Figura 17, o pico de sensibilidade significa o alinhamento total com o eixo do telescópio, enquanto a variação em suas proximidades significa a diferença de fase devido as diferentes distâncias percorridas pelos raios devido ao não alinhamento central.

Figura 17- Representação gráfica típica da sensibilidade de um telescópio



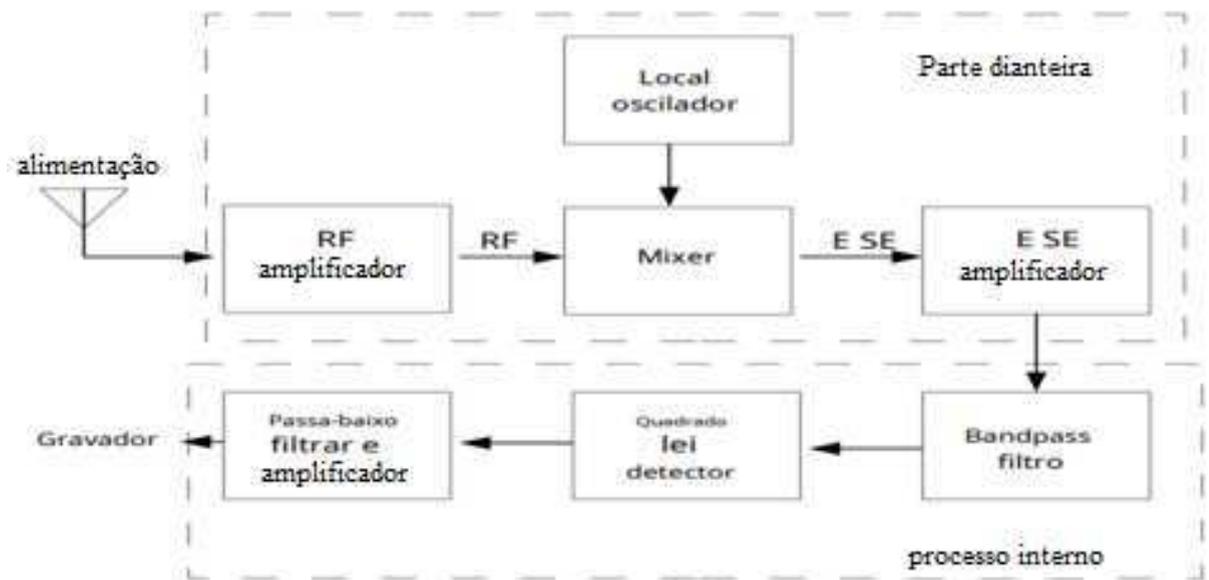
Fonte: Marr, Snell e Kurtz (2015) [5].

4.1.2 Receptores

As antenas alimentam os receptores que logo definem a faixa de frequência onde se encontra e será armazenada. Essa fase de processamento é definida por seus respectivos componentes, a parte dianteira do receptor, *front-end*, localizada próxima

do foco do telescópio e o processamento interno, *back-end*, que ocorre já fora do telescópio, como mostram Marr, Snell e Kurtz (2015) [5]. Na Figura 18 pode-se notar todo esse sistema de recepção do sinal que engloba vários componentes até a entrega da informação processada, que durante o processo de transmissão até o armazenamento podem afetar o perfil da radiação em questão com a geração de ruídos e interferências.

Figura 18- Representação esquemática dos componentes de um receptor em um telescópio



Fonte: Marr, Snell e Kurtz (2015) [5].

As linhas de transmissão podem ser de vários tipos, onde algumas características são comuns à sua maioria, o transporte de ondas eletromagnéticas. As duas formas de linhas de transmissão mais comuns são as guias de ondas e os cabos axiais, onde a escolha por essas formas ou por outras depende da situação, já que apresentam vantagens e desvantagens. É o caso da transmissão da radiação eletromagnética de um componente a outro, como da alimentação até os receptores e entre as partes do receptor [5].

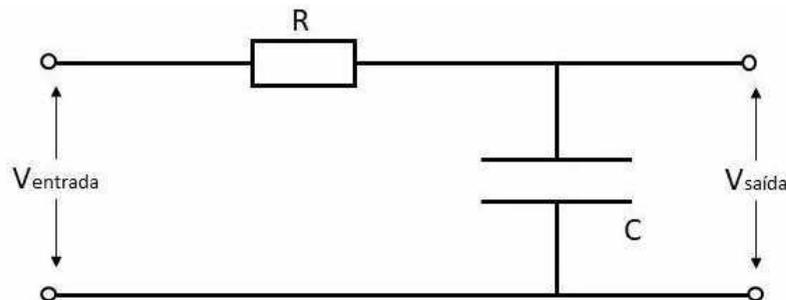
- Filtro passa-baixa e passa-alta:

O filtro passa-baixa e passa alta são meios de controlar a entrada e saída de uma frequência qualquer, isolando os sinais de baixa ou de alta frequência de acordo com o desejado. Isto é, tomando uma frequência específica desejada, um sinal de rádio frequência que passa pelo filtro passa-baixa encontrará uma resistência para as aquelas

acima do valor da frequência de corte, enquanto as frequências abaixo daquele limite desejado passaram livremente. No filtro passa-alta o processo é semelhante ao anterior, no entanto, a resistência atuará nas frequências que estiverem abaixo do valor de referência, enquanto as altas frequências passaram livremente.

No interior desses filtros pode-se encontrar um sistema composto por resistores e capacitores. O filtro passa-baixa (Figura 19) é composto por um circuito RC-série, tendo a tensão de saída indicada pelo capacitor. Para ondas de baixa frequência f , a reatância capacitiva X_c , descrita na equação 4.6, adota valores mais altos que o valor da resistência R , logo a tensão de saída se aproxima da tensão de entrada, já para as ondas de altas frequências, a reatância toma valores mais baixos que o valor da resistência, assim, a tensão de saída assume valores praticamente nulos.

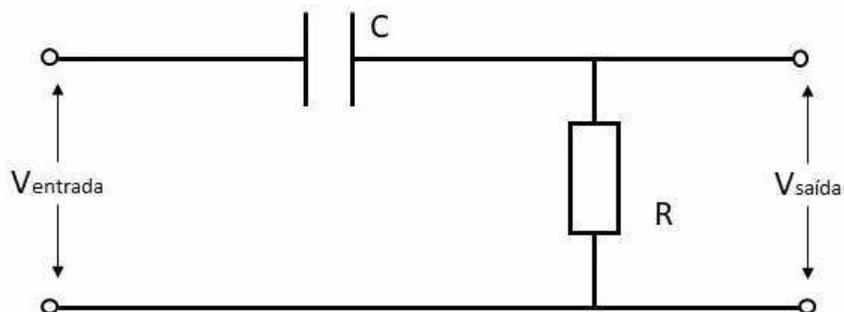
Figura 19– Representação esquemática de um filtro passa-baixa



Fonte: Autoria própria (2022).

Para filtros passa-alta (Figura 20), ainda temos um circuito do tipo RC-série, no entanto o resistor e capacitor estão posicionados em paralelo. Nesse, a frequência de corte determina a menor frequência permitida, logo, as que estão abaixo de f_c serão barradas, e as mais altas seguem livremente.

Figura 20– Representação esquemática de um filtro passa-alta



Fonte: Autoria própria (2022).

Uma corrente alternada ao passar por um capacitor sofrera uma resistência, a

mesma é denominada de reatância capacitiva, e se comporta inversamente proporcional a frequência da corrente [31], dada pela seguinte equação,

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad , \quad (4.6)$$

tomando a reatância igual a resistência, pode-se determinar a frequência de corte,

$$X_C = R \text{ ou } \frac{1}{2\pi f_c C} = R \rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad , \quad (4.7)$$

Considerando uma dada frequência em que a resistência capacitiva assume valores iguais ao dessa resistência, tem-se que as tensões no resistor e no capacitor serão iguais, e quando somadas vetorialmente encontram a tensão de entrada. Desta forma, tem-se que,

$$V_e = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \quad , \quad (4.8)$$

$$V_R = V_C = V_s \rightarrow V_e = \sqrt{V_s^2 + V_s^2} \quad , \quad (4.9)$$

$$V_e = \sqrt{2V_s^2} \quad , \quad (4.10)$$

$$V_e = V_s \sqrt{2} \text{ ou } V_s = \frac{V_e}{\sqrt{2}} \quad . \quad (4.11)$$

4.1.2.1 Front-end

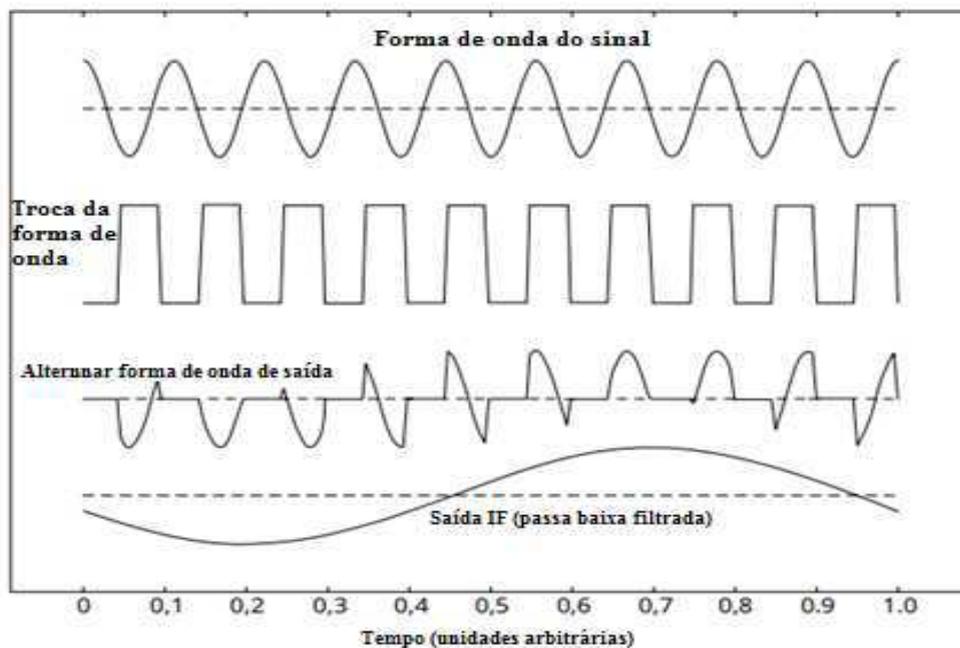
Em um telescópio, o *front-end* é onde o sinal captado começa a receber um tratamento para melhor ser analisado. Assim, a primeira modificação feita nas ondas recebidas é o aumento da amplitude. Essa ação ocasiona um aumento na potência e, note que, a potência está diretamente relacionada ao quadrado do campo elétrico, logo, o campo elétrico também é aumentado. Após sua amplificação é necessário realizar uma modificação na frequência do sinal recebido, convertendo-o geralmente para uma frequência mais baixa, pois trabalhar com frequências altas significa custos mais altos e a possibilidade de perdas de potência [5].

O processo de mudança de frequência ocorre já no receptor, onde o sinal de frequência de rádio é mixado com um sinal gerado por um oscilador local, resultando numa frequência intermediária, sendo esta, uma frequência mais baixa, de melhor

qualidade e que carrega as mesmas informações do sinal da frequência de rádio.

Na Figura 21 pode-se observar o processo de mudança de frequência separado por etapas. Na primeira demonstração, tem-se o sinal de frequência de rádio vindo de uma fonte astronômica e que entra no receptor já com sua amplitude aumentada. Na outra faixa, pode-se ver a atuação do oscilador local produzindo uma frequência própria. Posteriormente, há o processo de mixagem, fazendo com que ocorra um bloqueio com o aumento da frequência, selecionando sinais semelhantes. Finalmente na última ilustração, com o sinal já mixado, tem-se que o mesmo foi submetido a um sistema de filtragem, para que apenas sinais com uma frequência intermediária permaneçam.

Figura 21 - Ilustração ideal do processo de mixer do tipo switch, com as três faixas de frequência utilizadas



Fonte: Marr, Snell e Kurtz (2015) [5].

4.1.2.2 Back-end

O produto que deixa o *front-end* ainda é uma onda eletromagnética, modificada dentro de padrões desejados para uma melhor análise seguinte. Agora, a onda eletromagnética entra no *back-end*, ver Figura 13, e será mapeada, tendo como primeira necessidade a realização de uma nova filtragem, para definir exatamente a faixa de frequência de rádio a ser analisada. Nesse momento, todas as demais faixas serão barradas. Isso permitirá realizar a primeira análise, a quantidade de energia que

essa onda transporta.

O dispositivo necessário para realizar tal medida chama-se detector de lei quadrada, que contém um diodo do tipo cristal ou semiconductor. Esse diodo produzirá uma corrente, que se comporta proporcionalmente ao quadrado do campo elétrico da onda que entra no *back-end*. A corrente gerada será submetida a uma resistência, que pela Lei de Ohm resulta numa tensão também proporcional a potência como pode ser visto nas equações seguintes [5],

$$V \propto E^2 \propto (E_0 \cos(\omega t))^2 \propto E_0^2 \cos^2(2\omega t). \quad (4.12)$$

Resultando em,

$$V \propto E_0^2 \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega t)]. \quad (4.13)$$

No momento em que o sinal passa pelo filtro, as componentes de altas frequências são removidas, mantendo apenas o índice de proporcionalidade com a energia e, por consequência, proporcional a sua potência. Logo, a tensão de saída é dada pela expressão [5]:

$$V = \alpha P. \quad (4.14)$$

5 Conclusões

A partir do desenvolvimento desse trabalho, foi possível compreender aspectos históricos dos pulsares, sua natureza, classificações e principais aplicações. Foi possível realizar uma análise à luz da literatura tanto da parte física que envolve a utilização de um radiotelescópio para detecção das ondas de rádio geradas pelos pulsares, quanto da parte de análise dos pulsos e tratamento do sinal, assim como também da exposição mais detalhada sobre os possíveis testes que os pulsares possibilitam. Logo, tendo em vista a importância do tema proposto, esse trabalho buscou abranger os conteúdos e procedimentos envolvidos no estudo dos pulsares.

Na radioastronomia é indispensável os conhecimentos acerca da óptica física, tendo em vista a necessidade de caracterizar os sinais obtidos das fontes astronômicas. Esses sinais são emitidos através de ondas eletromagnéticas que percorrem o meio intergaláctico e a nossa atmosfera até chegar aos radiotelescópios. Dentro do espectro eletromagnético encontramos a faixa de rádio, que é a principal frequência de onda emitida pelos pulsares, objeto de estudo desse trabalho. Logo, é notório que a óptica se torna uma ferramenta fundamental na análise das ondas eletromagnéticas, tendo em vista os fenômenos que as mesmas sofrem desde sua emissão até seu destino final onde é captada, assim como na montagem dos radiotelescópios para captação e a manipulação do sinal apanhado.

Os radiotelescópios apresentam uma infraestrutura que é descrita pela física óptica, considerando que sua funcionalidade baseia-se na captação de ondas eletromagnéticas através de refletores e antenas, encaminhando-as via linha de transmissão para os receptores, nesse momento, as ondas eletromagnéticas são ampliadas, filtradas e separadas em uma faixa de frequência desejada para que possa ser extraído o máximo de informações. Para tal objetivo, foi apresentada formas de manipulação de diversas variáveis como a potência de captação de radiação de um refletor, o processo de formação de padrões de interferências e difração para determinação do foco de uma fonte de energia, a determinação de sua frequência específica para análise, a intensidade de uma fonte luminosas. Essas são variáveis fundamentais com aplicações diretas em uma base de observação para que se possa ter informações sobre uma dada fonte de rádio.

Nesse sentido, foi apresentado os pulsares como objeto de estudo desse trabalho. Os pulsares são estrelas de nêutrons que resultaram de uma supernova de estrelas com massas entre 8 e 25 massas solares, e que devido sua drástica

compactação adquirem uma grande quantidade de energia rotacional em pequenos períodos. Esses são donos de grandes quantidades de energia que será liberadas em maior quantidade na frequência de rádio, e em menor quantidade em raios-X, raios gama, e com uma pequena fração em luz visível liberada pelos seus polos, que devido sua alta rotação aparenta pulsar, justificando sua principal característica.

Sobre os pulsares, buscou-se apresentar princípios de sua formação, como pode ser visto na seção 3, dando ênfase em algumas características em específico, como o força de equilíbrio de uma estrela descrita na equação 3.6, que relaciona a proporcionalidade da força com o tamanho do raio da estrela. Foi possível ainda demonstrar a relação entre a densidade de uma estrela e o seu período de rotação. Isso infere diretamente na velocidade angular da estrela, que quando mais densa mais rápida ela será, no entanto existe um limite para essa relação descrita na equação 3.10, que estabelece um raio máximo para conter essa relação, caso contrário a estrela se destruiria devido as altas rotações que poderia alcançar.

A propagação dos pulsos eletromagnéticos se torna uma das variáveis fundamentais a serem estudadas, já que são esses carregam todas as informações que são captados pelos radiotelescópios. Logo, achou-se por bem determinar algumas definições sobre esse fenômeno, como a relação entre a frequência das ondas e a frequência do plasma dada na equação 3.15, onde pode-se observar que quanto maior a frequência em que a onda for emitida maior será a sua velocidade de propagação. No entanto as ondas sofrem um atraso em seu tempo de chegada ao observador devido perturbação em sua trajetória, logo pode-se determinar uma relação para o tempo de atraso descrita na equação 3.18 que está em função de uma medida de dispersão dita na equação 3.19. Essa medida de dispersão representa a densidade de elétrons dispersos no meio.

Os pulsares ainda podem apresentar muitas variações entre si, o que torna essa classe de astros bem numerosa, chegando a mais de 3176 pulsares identificados, que podem ser classificados de acordo com características particulares, como citados no texto sobre algumas classes mais comuns, que são os magnetares, pulsares de milissegundos e binários. Todos eles apresentam período de *spin-down*, é salvo um fenômeno ainda não bem definido pela literatura, o chamado *glitches*, que provoca um aumento temporário na frequência de rotação dos pulsares. Esses astros são apresentados como uma ferramenta para testes de teorias como a relatividade geral sob campo forte, já que os mesmos detêm de um auto campo gravitacional, temperatura e pressão. Sendo uma das maiores contribuições a possibilidade de

detectar ondas gravitacionais, por meio do decaimento do período orbital de um pulsar binário.

Em fim, podemos afirmar que o propósito deste trabalho foi alcançado, tendo em vista o intuito de difundir os conhecimentos sobre esses corpos celestes levantando seus principais fundamentos e suas relevâncias para a radioastronomia. Ficando como uma perspectiva o aprofundamento de pesquisas nessa área, assim como a execução prática dos procedimentos que foram descritos nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] HEWISH, A., BELL, S., PILKINGTON, J. *et al.* Observação de uma fonte de rádio de pulsação rápida. *Nature* **217**, 709–713 (1968).
- [2] CHAISSON, E. MCMILLAN, S. **Astronomy Today**. 8 ed. Pearson Edition, San Francisco, 2014.
- [2] HECHT, E. **Optics**. 5. ed. Inglaterra: Pearson Education, 2017. 728 p. ISBN 978-1-292-09693-3
- [4] WALKER, J. HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos De Física: Óptica E Física Moderna**. 8. ed. [S. l.]: LTC, 2009. 444 p. v. 4. ISBN 978-8521616085
- [5] MARR, J. M.; SNELL, R. L.; KURTZ, S. E. *Fundamentals of Radio Astronomy: Observational Methods*. [S.l.]: CRC Press, 2015. v. 13.
- [6] NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: ótica, Relatividade, Física Quântica**. 2. ed. [S. l.]: Blucher, 2014. 359 p. v. 4. ISBN 978-8521208037.
- [7] GONÇALVES, V.P.; LAZZARI, L. S. Uma introdução às estrelas estranhas, *Rev. Bras. Ensino Física*. 42 (2020). <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2020-0032>.
- [8] DEXHEIMER, V. A. **Compressibilidade da Matéria Nuclear em Estrelas de Nêutrons**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- [9] HEGER, A., FRYER, C. L., WOOSLEY, S. E. *et al.* How Massive Single Stars End Their Life. *The Astrophysical Journal*, **591**, 288–300 (2003). <https://doi.org/10.1086/375341>
- [10] BRITANICA. **Star formation and evolution**. Disponível em: www.britannica.com/science/planetary-nebula-phase. Acesso em: 20 jan. 2022.
- [11] CAMERON, A. D. **Innovative Pulsar Searching Techniques or Fantastic Pulsars and How to Find Them**. Orientador: Kramer, Michael. 2018. Dissertation (Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)) - Mathematisch–Naturwissenschaftlichen Fakultät and Rheinische Friedrich–Wilhelms–Universität Bonn, Sydney, Australia, 2018.
- [12] ANTONIADIS, I. **Multi–wavelength studies of pulsars and their companions**. 2013. Dissertation (Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)) - RHEINISCHEN FRIEDRICH–WILHELMS–UNIVERSITÄT BONN, Alexandroupolis, Griechenland, 2013.
- [13] NG, C. W. Y. **Pulsar searching and timing with the Parkes telescope**. Orientador: Kramer, Michael. 2014. Dissertation (Erlangung des Doktorgrades (Dr.rer.nat.)) - Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Hong Kong, China, 2014.
- [14] LAZARUS, P. **Pulsar Discoveries and their Exploitation**. Orientador: Kramer, Michael. 2015. Dissertation (Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)) - Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät And Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Montreal, Canada, 2015.

- [15] V-KOSMOSE. Pulsares e estrelas de nêutrons. Disponível em: <https://v-kosmose.com/pulsaryi>. Acesso em: 21 jan. 2022.
- [16] CONDON, J. J.; RANSOM, S. M. Radioastronomia essencial. Princeton University Press, 2016.
- [17] GHOSH, P. Rotation and Accretion Powered Pulsars, WORLD SCIENTIFIC, 2007. <https://doi.org/10.1142/4806>.
- [18] BAYM, G., PETHICK, C., PINES, D. *et al.* Spin-Up in Neutron Stars : The Future of the Vela Pulsar. *Nature* **224**, 872–874 (1969). <https://doi.org/10.1038/224872a0>
- [19] RUDERMAN, M., ZHU, T., CHEN, K. Neutron Star Magnetic Field Evolution, Crust Movement, and Glitches. *The Astrophysical Journal*, **492**, 267–280 (1998). <https://doi.org/10.1086/305026>
- [20] BALAKRISHNAN, V. Novel Search Techniques to Detect Pulsar Black Hole Binaries in Radio Observations. 2022. 248 p. Dissertation - Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität, Bonn, 2022.
- [21] GRAIKOU, E. High Precision Timing. 2018. 160 p. Dissertation - Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität, Bonn, 2018.
- [22] STAELIN, D.H.; REIFENSTEIN, E.C. Pulsating Radio Sources near the Crab Nebula, *Science* (80-.). 162 (1968) 1481–1483. <https://doi.org/10.1126/science.162.3861.1481>.
- [23] PAK, K.S. , WILLIAM, L.; GROSSFIELD, J. Arnold, © 1970 Nature Publishing Group, *Nat. Publ. Gr.* 228 (1970) 726–734.
- [24] CAMILO, F. ; RANSOM, S.M.; CHATTERJEE, S.; JOHNSTON, S.; DEMOREST, P. PSR J1841-0500: A radio pulsar that mostly is not there, *Astrophys. J.* 746 (2012). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/746/1/63>.
- [25] CAMILO, F., RANSOM, S. , HALPERN, J. *et al.* Transient pulsed radio emission from a magnetar. *Nature* **442**, 892–895 (2006). <https://doi.org/10.1038/nature04986>.
- [26] ALPAR, M., CHENG, A., Ruderman, M. *et al.* A new class of radio pulsars. *Nature* **300**, 728–730 (1982). <https://doi.org/10.1038/300728a0>.
- [27] WEX, N. Testing relativistic gravity with radio pulsars. arXiv preprint arXiv:1402.5594, 2014.
- [28] TAYLOR, J.H. ; HULSE, R.A.; FOWLER, L.A.; GULLAHORN, G.E.; RANKIN, J.M. Further observations of the binary pulsar PSR 1913+16, *Astrophys. J.* 206 (1976) L53. <https://doi.org/10.1086/182131>.
- [29] JENET, F. A., HOBBS, G. B., LEE, K. J. *et al.* Detecting the Stochastic Gravitational Wave Background Using Pulsar Timing. *The Astrophysical Journal*, **625**, L123–L126 (2005). <https://doi.org/10.1086/431220>.

[30] MAITIA, V.; LESTRADE, J -F.; COGNARD, I. A. 3 Year Long Extreme Scattering Event in the Direction of the Millisecond Pulsar. *The Astrophysical Journal*, **582**, 972–977 (2003). <https://doi.org/10.1086/344816>.

[31] CAPUANO, F. G.; MARINO, M. A. M. ***Laboratório de Eletricidade e Eletrônica - Teoria e Prática***. - 23^a edição - São Paulo: Editora Érica, 2005.