



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS ANGICAL
LICENCIATURA EM FÍSICA

AURISLENE LOPES DA SILVA

BURACOS NEGROS: FORMAÇÃO E PRIMEIRA DESCRIÇÃO TEÓRICA

ANGICAL
2018

AURISLENE LOPES DA SILVA

BURACOS NEGROS: FORMAÇÃO E PRIMEIRA DESCRIÇÃO TEÓRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Angical como requisito para obtenção do grau de licenciado em Física.

Orientadora: Prof^a. Msc. Samara Clotildes Saraiva
Rodrigues

Coorientador: Prof. Msc. Rodrigo dos Santos Almeida

ANGICAL

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586 Silva, Aurislene Lopes da
b Buracos Negros : Formação e Primeira descrição teórica / Aurislene Lopes da Silva
- 2018.
55 p. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Angical, Licenciatura em Física, 2018.

Orientadora : Profa Ma. Samara Clotildes Saraiva Rodrigues.
Coorientador : Prof Me. Rodrigo dos Santos Almeida.

1. Estrelas escuras. 2. Buracos negros. 3. Velocidade de escape. I. Título.

CDD 530

AURISLENE LOPES DA SILVA

BURACOS NEGROS: FORMAÇÃO E PRIMEIRA DESCRIÇÃO TEÓRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí como requisito para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Aprovado em 03/04/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Msc. Samara Clotildes Saraiva Rodrigues (Orientadora)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

Prof. Msc. Rodrigo dos Santos Almeida (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

Prof^a. Esp. Maria Aparecida Alves de Carvalho (Examinadora)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

A todos que de alguma forma contribuíram
para realização deste trabalho, com gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora, professora Samara Rodrigues, e também ao meu coorientador, Rodrigo Almeida pela empatia, paciência e atenção prestadas.

Ao meu namorado, Joel Lucio, pelo apoio e companheirismo.

À minha mãe Maria da Cruz, por ter me ensinado a lutar sempre e nunca desistir.

Aos meus colegas de turma e também amigos, Andressa, Silvestre, Ana Flávia, John Lennon, Silas, Daniel Rosa, Guilherme e Marcio pelo auxílio e aos bons momentos vividos nestes quatro anos de graduação.

As minhas amigas, Luanny, Vivi e Thalita por sempre estarem comigo nos momentos bons e ruins.

Aos professores da graduação, por terem compartilhado seus conhecimentos.

Ao Programa Institucional de Bolsa de Iniciação a Docência (PIBID) por ter me proporcionado a enriquecedora experiência de participar do programa e de viver os melhores momentos de iniciação a prática docente.

“Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração”.

Nikola Tesla

RESUMO

Neste trabalho além de expormos a teoria de criação dos buracos negros é feita uma revisão bibliográfica sobre esses exuberantes objetos astronômicos, desde sua primeira descrição teórica proposta pelo astrônomo e físico inglês John Michell no ano de 1783, até a concepção mais atual desenvolvida pelo físico alemão Karl Schwarzschild no século XX com base na teoria da Relatividade Geral. O trabalho também tem como objetivos, o de resgatar conceitos mais acessíveis que possam ajudar no entendimento de buraco negro e de compreender o processo evolutivo que levou a concretização do conceito atual desses objetos, sendo as duas abordagens apresentadas de forma sucinta, onde uma é formulada pela física newtoniana através da noção de geometria e velocidade de escape e a outra sustentada pela solução obtida por Schwarzschild das equações de Einstein, conhecida como solução de Schwarzschild.

Palavras chaves: Estrelas escuras, buracos negros, velocidade de escape.

ABSTRACT

In this work besides exposing the theory of creation of the black holes a bibliographical revision on these exuberant astronomical objects is made, from its first theoretical description proposed by the English astronomer and physicist John Michell in the year of 1783, until the most current conception developed by the German physicist Karl Schwarzschild in the twentieth century based on the theory of General Relativity. The work also has as objectives, to rescue more accessible concepts that can help in the understanding of black hole and to understand the evolutionary process that led to the concretization of the current concept of these objects, the two approaches being succinctly presented, where one is formulated by Newtonian physics through the notion of geometry and escape velocity and the other supported by Schwarzschild's solution of the Einstein equations, known as the Schwarzschild solution.

Keywords: Dark Stars, black holes, escape velocity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Nebulosa de Órion	13
Figura 2 – Diagrama Hertzsprung-Russell	14
Figura 3 – Estrutura interna de uma estrela de nêutrons	21
Figura 4 – Último estágio evolutivo das estrelas	27
Figura 5 – Ciclo de vida de uma estrela semelhante ao sol	28
Figura 6 – Diagrama do artigo original de Michell de 1784	30
Figura 7 – Aproximação por retângulo da área sob a curva <i>BADR</i>	32
Figura 8 – Órbita parabólica tangente à superfície do Sol no ponto de retorno	34
Figura 9 – Aceleração da gravidade produzida por um objeto de massa M a uma distância r	39
Figura 10 – Disco de acreção em torno do buraco que se acredita existir no centro da galáxia NGC 4261	43
Figura 11 – Região na qual se encontra Cygnus x-1	44
Figura 12 – Aglomerado central de estrelas IRS 16, localizado na constelação de Sagitário	45
Figura 13 – imagem representativa de órbitas de estrelas em torno do buraco negro supermassivo dormiente localizado no centro da Via Láctea	46
Figura 14 - Distorção do espaço-tempo provocada pela presença de massa e energia	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da estrela quanto à luminosidade	16
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$M_{\odot}$ Massa do sol

$L_{\odot}$ Luminosidade do sol

$E_{\odot}$ Energia do sol

$V_{\oplus}$ Velocidade Tangencial

$R_{\odot}$ Raio do sol

LISTA DE SÍMBOLOS

K	Kelvin
H	Hidrogênio
CO	Monóxido de carbono
m^*	Magnitude aparente
M^*	Magnitude absoluta
$\odot$	Sol
$\propto$	Proporcional
m_p	Massa do próton
c	Velocidade da luz
∞	Infinito
$\gg$	Muito maior que
$\oplus$	Tangencial
$\approx$	Aproximadamente
M_*	Massa da estrela negra

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. ESTRELAS	13
2.1 COMO SE FORMAM AS ESTRELAS	13
2.2 ESTRELAS E O DIAGRAMA HR	14
2.3 MÓDULO DE DISTÂNCIA	16
2.4 O TAMANHO DAS ESTRELAS E SUA LUMINOSIDADE	16
2.5 ANÃS BRANCAS	18
2.6 ESTRELAS DE NEUTRÔNS	20
2.7 FONTE DE ENERGIA DAS ESTRELAS	21
2.8 TEMPO DE VIDA DAS ESTRELAS	23
2.9 ÚLTIMO ESTÁGIO EVOLUTIVO DAS ESTRELAS	25
3.0 BURACOS NEGROS	28
3.1 A PRIMEIRA DESCRIÇÃO TEÓRICA DE BURACOS NEGROS	28
3.1.1 Histórico	28
3.1.2 A estrela escura de John Michell	30
3.1.3 A massa de uma estrela escura	37
4. DESCRIÇÃO MODERNA DE BURACOS NEGROS	37
4.1 EVIDÊNCIAS DA EXISTÊNCIA DE BURACOS NEGROS	42
4.2 ORIGEM DOS BURACOS NEGOS PRIMORDIAIS	45
4.3 BURACOS NEGROS E ONDAS GRAVITACIONAIS	47
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS	50

1. INTRODUÇÃO

Após a estimativa de Roemer de que a luz se propagava em velocidade finita, John Michell, um professor de Cambridge, apresentou em 1783 uma carta intitulada “*On the means of Discovering The Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of Their Light*” (“Sobre os meios de descobrir a distância, magnitude e etc. das estrelas fixas, em consequência da diminuição da Velocidade da Luz”) publicada no volume de 1784 da *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* no qual alegava que uma estrela massiva e devidamente compacta, geraria um campo gravitacional tão intenso, que nem mesmo a luz poderia escapar, assim para um observador suficientemente afastado da estrela ela seria completamente escura (HAWKING, 1994), podendo ser somente percebida, devido seus efeitos gravitacionais sobre outros corpos.

Michell sugeriu haver um grande número de estrelas como essa e que embora não fosse possível enxerga-las, pelo fato de a luz emitida por elas não alcançar os olhos de um observador externo, poder-se-ia ainda assim sentir sua atração gravitacional. Os maiores corpos do Universo segundo Michell poderiam ser invisíveis por causa da sua velocidade de escape (MICHELL, 1784).

Hoje se sabe que de acordo com a teoria da Relatividade Geral, estrelas densas o suficiente não devem originar as estrelas escuras de Michell, mas sim buracos negros (CASTIÑEIRAS et al., 2006). A primeira solução das equações da teoria da relatividade geral foi obtida em 1916, pelo astrofísico alemão Karl Schwarzschild, enquanto servia ao exército alemão no front russo durante a primeira guerra mundial (MATSAS, 2004).

Passados 100 anos que o físico e astrônomo Karl Schwarzschild formulou sua solução para as complicadas equações de Einstein, foi anunciado pelas colaborações LIGO e VIRGO¹ com grande interesse através dos principais meios de comunicação, a primeira detecção direta de ondas gravitacionais, uma descoberta que além de ser uma evidência observacional da existência dos buracos negros foi

¹ LIGO - *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser), VIRGO – *A large interferometer designed to detect gravitational waves predicted by the general theory of relativity* (Grande interferômetro projetado para detectar ondas gravitacionais previstas pela teoria da relatividade geral).

considerada por muitos pesquisadores o embrião de uma nova era na observação astronômica (SAA, 2016).

Este estudo tem a finalidade de facilitar a compreensão das primeiras teorias sobre buracos negros e um pouco do contexto histórico que levou a descrição desses objetos como se conhece atualmente tentando resgatar conceitos mais simplificados que possam ajudar em seu entendimento.

2. ESTRELAS

2. 1 COMO SE FORMAM AS ESTRELAS

As estrelas são formadas dentro de nuvens de gás, poeira e outros elementos mais pesados (carbono, oxigênio, enxofre, cloro e ferro) (GEDOZ, 2016) como a nebulosa de Órion (Figura 1). Um núcleo denso em rotação com densidade relativamente alta (cerca de 100 partículas por cm^3), conhecidas como nebulosas estelares. Na fase inicial de uma nuvem colapsante com cerca de uma massa solar, assim como publicado por Richard B. Larson, no *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* em 1969, as temperaturas são da ordem de 10K. (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004). Nessas condições os gases tornam-se moleculares, isto é, seus átomos se agrupam para formarem moléculas, dentre as quais as mais comuns são H_2 e CO . As baixas temperaturas nesses aglomerados favorecem a concentração do gás a densidades mais elevadas (GEDOZ, 2016).

Figura 1 – Nebulosa de Órion.



Fonte: HAWKING, 2016, p.121.

Mendes (2009, p.15), descreve: “o hidrogênio nas nuvens gasosas tem características diferentes do hidrogênio presente na estrela. Pois a temperatura da ordem de milhões de Kelvin faz com que o comportamento da matéria seja diferente. Sendo este conhecido como estado de plasma”.

O início da formação de uma nova estrela é devido a uma perturbação da nuvem que pode ser causada por várias instabilidades dentre as quais se pode citar as explosões de supernovas, transição de fase, ondas de densidades dos braços espirais (GEDOZ, 2016). Quando uma grande quantidade de gás, geralmente hidrogênio e vestígios de elementos mais pesados começam a colapsar devido à atração gravitacional, forma-se uma estrela (HAWKING, 2016). À medida que a mistura se contrai, os átomos do gás começam a colidir com uma frequência cada vez maior e então o gás aquece; posteriormente este estará tão aquecido que os átomos de hidrogênio ao colidirem se fundirão formando gás hélio. O calor desprendido nessa reação cria uma pressão capaz de equilibrar a atração gravitacional pondo fim ao colapso (HAWKING, 2016). “O estado estável da estrutura estelar, também chamado de *estado estacionário*, é determinado pela condição de que a quantidade de energia liberada internamente contrabalance a energia liberada da superfície” (PRADO, 2006, p. 133).

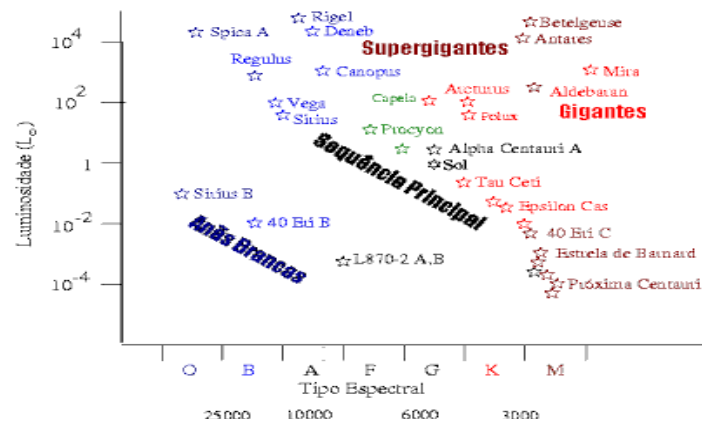
No centro da protoestrela², o núcleo continua a acumular matéria das camadas mais superficiais, tornando se cada vez mais denso e quente, com densidade aproximada de $10^{-10} g\ cm^{-3}$ e temperatura da ordem de 170 K (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004). “Nessa fase ela passa por variações de temperatura, massa e diâmetro” (PICAZZIO et al., 2011, p. 191). Quando a temperatura no interior da estrela atingir 8 milhões de Kelvin, as reações termonucleares se iniciam e a protoestrela torna-se uma estrela, começando sua vida na sequência principal (MORAIS, 2013).

2.2 ESTRELAS E O DIAGRAMA HR

O diagrama HR, Diagrama de Hertzsprung e Russel, foi descoberto de forma independente pelo dinamarquês Ejnar Hertzsprung em 1911, e pelo americano Henry Norris Russel, em 1913. O diagrama relaciona a luminosidade estelar com sua temperatura superficial conforme mostra Figura 2 (PRADO, 2006).

² Fragmento bem definido que se destaca das outras partes da região de formação estelar, com identidade e campo gravitacional próprio.

Figura 2 - Diagrama Hertzsprung-Russell.



Fonte: (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004, p.187).

Hertzsprung descobriu que estrelas da mesma cor podiam ser divididas entre luminosas e estrelas de baixa luminosidade. As estrelas luminosas ele chamou de gigantes e as pouco luminosas as titulóu de anãs. Assim, o sol e a estrela capela possuem a mesma classe espectral, ou seja, a mesma cor, porém capela é uma gigante cerca de 100 vezes mais luminosa que o Sol. Russel estendeu o estudo de Hertzsprung para as estrelas mais quentes catalogando as 300 estrelas para as quais havia sido medida a paralaxe naquela época (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

Segundo Mourão (1995), o importante a se notar em um diagrama HR é que as estrelas não estão bem distribuídas nele, e sim concentradas em algumas regiões distintas. Sendo que em sua maioria encontra-se dentro da sequência principal, que é uma estreita faixa diagonal que parte do extremo superior esquerdo ao extremo inferior direito. As estrelas situadas ao longo desta faixa diagonal são conhecidas como “estrelas da sequência principal”, o sol é um exemplo desse tipo de estrela.

As estrelas dentro da sequência principal são as anãs, aquelas localizadas acima da sequência principal na região superior direita são as gigantes, as situadas no topo do diagrama são as mais luminosas e são conhecidas como supergigantes. Já as que se concentram no canto inferior esquerdo são estrelas quentes de baixa luminosidade chamadas de anãs brancas (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004). Segundo Costa (2014), estrelas gigantes são aquelas que já esgotaram o hidrogênio de sua região central através dos processos termonucleares, as supergigantes são as estrelas mais massivas, com massa entre 8 e 12 $M_{\odot}$, raio que vai de 30 a 1000

raios solares e brilho entre 30.000 até centenas de milhares de vezes a luminosidade do sol. Já as anãs são as menores estrelas, tendo como característica principal a produção de energia pelo processo de fusão de prótons em uma reação conhecida como próton-próton.

2.3 MÓDULO DE DISTÂNCIA

Quando se conhece a magnitude aparente de uma estrela e sua temperatura então partindo do diagrama HR, é possível determinar sua luminosidade. Da mesma forma, quando é conhecido o seu brilho, sua distância pode ser encontrada utilizando-se do seu módulo de distância (PICAZZIO et al., 2016). O módulo de distância pode ser definido de acordo com Oliveira (2016, p.16), “como a diferença entre a magnitude aparente e a magnitude absoluta, ou seja, $(m^* - M^*)$ ”. Podendo ser calculado de acordo com a relação de Picazzio et al. (2011):

$$m^* - M^* = (-2,5 \log L + 5 \log d) - (-2,5 \log L + 5 \log 10) \quad (1)$$

$$m^* - M^* = 5 \log d - 5 \log 10 \quad (2)$$

$$m^* - M^* = 5 \log \frac{d}{10} \quad (3)$$

Onde, d é a distância em parsecs³.

O método acima, conhecido como método das paralaxes espectroscópicas é uma maneira de se obter as distâncias das estrelas, a partir do seu espectro e luminosidade (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

2.4 O TAMANHO DAS ESTRELAS E SUA LUMINOSIDADE

De acordo com Mendes (2009), as estrelas são classificadas quanto ao seu tamanho e coloração. Já a classificação quanto à luminosidade é dada como representado na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da estrela quanto à luminosidade

Classe	Tipo de estrela
I	Supergigantes
II	Gigantes brilhantes

³ Distância à qual um objeto celeste está da Terra, tendo um ângulo de paralaxe de um segundo de arco (ou 1").

III	Gigantes
IV	Subgigantes
V	Anãs.

Fonte: (OLIVEIRA FILHO, 2004).

O Sol é classificado como uma anã, ou seja, uma estrela de classe V (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

A categoria mais comum de estrelas são as estrelas frias de baixa luminosidade, conhecidas como anãs vermelhas e anãs marrons (MÜHLBEIER, 2009). Anãs marrons são na verdade protoestrelas de massa menor que 0,08 massas solar, com uma temperatura central que nunca atinge um valor suficientemente alto para desencadear a fusão nuclear, resultando na formação de uma “estrela mal sucedida” (MOURÃO, 1995). As anãs marrons têm massa aproximada entre 13 e 80 massas de júpiter e existem mais de 20 conhecidas (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004). As estrelas massivas são mais luminosas (BALBINOT, 2008) da categoria das gigantes e supergigantes, chegam a ser até dez vezes maiores que o sol e possuem magnitude em torno de -5 a -8, podendo em alguns alcançar magnitude $-10(10^{+6}L_{\odot})$. Essas estrelas apesar de possuir luminosidades e tamanhos extremamente grandes, possuem densidade muito pequena da ordem de 1 milionésimo de grama por cm^3 (KIPPENHAHN, 1981).

Segundo Oliveira Filho e Saraiva (2004) se é conhecida a temperatura e o tamanho de uma estrela, é possível calcular a luminosidade da estrela utilizando a lei de Stefan Boltzmann, na qual a luminosidade de uma estrela é diretamente proporcional a sua área e a quarta potência de sua temperatura:

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

Onde, σ é a constante de Boltzsmann, e equivale $\sigma = 5,67051 \times 10^{-5} \text{ ergs/cm}^2 \text{ K}^4 \text{ s}$.

Assim, fica evidenciado por meio da relação acima que tanto o raio quanto a temperatura de uma estrela influencia na sua luminosidade. “Uma estrela fria deve emitir muito menos que uma muito mais quente, a menos que o fator R^2 consiga “compensar” isto, de tal forma que as mais frias tenham sempre raios maiores” (HORVATH, 2013, p. 7).

Usando as massas e luminosidades das estrelas da sequência principal, pode-se obter uma relação massa – luminosidade empírica de acordo com a relação de Oliveira Filho e Saraiva (2004) da forma:

$$\text{Para, } M \geq 3 M_{\odot}, L \propto M^3 \quad (5)$$

$$\text{Para, } 3 M_{\odot} \geq M \geq 0,5 M_{\odot}, L \propto M^4 \quad (6)$$

$$\text{Para } M \leq 0,5 M_{\odot}, L \propto M^{2,5} \quad (7)$$

Ou seja, para massas superiores a três massas solares, a luminosidade é proporcional ao cubo da massa, já para massas inferiores a 0,5 massa solar a luminosidade é equivalente a 2,5 potência de massa. Como mostra a relação de Maciel (1999):

$$L \propto M^n \quad (8)$$

$$\text{Com } n \approx 3 - 4$$

Essa é uma relação muito importante para a determinação de massas estelares para estrelas isoladas quando conhecida sua magnitude e distância (MACIEL, 1999). Para estrelas pertencentes a sistemas binários, em que uma órbita em torno da outra é possível calcular a massa aplicando a terceira lei de Kepler (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

2.5 ANÃS BRANCAS

As anãs brancas são objetos celestes de enormes densidades, com massa de até $1,44 M_{\odot}$ concentrada em um raio equivalente ao do planeta terra. Elas são formadas quando uma estrela com até 8 massas solares começam a exaurir seu hidrogênio, e o núcleo torna-se composto principalmente de hélio (COSTA, 2014).

Quando todo o hélio no núcleo destas estrelas for convertido em carbono e parte em oxigênio a pressão não consegue mais conter a força gravitacional e a estrela começa a colapsar, até que em densidades bem elevadas, a matéria se degenera (SILK, 1988), assim as camadas mais externas da estrela são expelidas para o espaço em uma nebulosa planetária (MÜHLBEIER, 2009). Portanto, sendo formada pelo núcleo remanescente da estrela original.

A primeira anã branca descoberta foi à companheira de Sirius, descoberta em 1862 por Clarck Jr. As estrelas estão interligadas por meio de uma atração gravitacional mútua, sendo a estrela principal Sirius A com massa de $2,3M_{\odot}$, e sua companheira fraca Sirius B, cerca de 10000 vezes menos luminosa que Sirius A e massa equivalente à massa do sol. Em virtude do pequeno diâmetro dessas estrelas e sua alta temperatura superficial, que faz com que a luz emitida por elas seja branca, essas estrelas passaram a ser chamadas de anãs brancas (KIPPENHAHN, 1981).

O americano Walter Sydney Adans, estudando o espectro de Sírius B, descobriu em 1914 que sua baixa luminosidade e alta temperatura indicavam um raio de 18 000 km, o equivalente a somente 2,5 vezes o raio da terra, com massa equivalente a $0,98M_{\odot}$. Até 1917 apenas três estrelas com estas características eram conhecidas: Sírius B, 40 Eridani B, e Van Maanen 2 (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

Aproximadamente 10% das estrelas pertencentes à Via Láctea são estrelas anãs brancas, e 98% de todas as estrelas que já saíram da sequência principal são anãs brancas (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2014 apud COSTA, 2014, p. 42).

“Medindo a idade das anãs brancas mais antigas de uma galáxia, chega-se a uma estimativa da idade da própria galáxia. Mas, por serem pouco luminosas, só enxergamos as anãs brancas da nossa própria galáxia” (DAMINELI E STEINER, 2010, p. 40).

O limite de Chandrasekhar estabelece uma massa limite de $1,5M_{\odot}$ para uma anã branca. Se a estrela anã branca ultrapassar este limite, a pressão de degenerescência dos elétrons não é mais capaz de suportar o puxão gravitacional, a estrela começa o colapso, iniciando a fusão do carbono e oxigênio em metais mais pesados, que acaba por liberar uma quantidade enorme de energia resultando numa explosão termonuclear (MÜHLBEIER, 2009).

Uma anã branca por ser originalmente o núcleo de uma estrela é de início um objeto com temperatura bastante elevada, o que a mantém irradiando luz pela conversão de sua energia interna em radiação. Porém uma anã branca pode ser resfriada também pela emissão de neutrinos. Essas partículas por não possuírem

massa interagem fracamente com a matéria e escapam livremente da estrela levando consigo energia. Apesar do vagaroso processo de resfriamento, a anã branca acaba irradiando toda sua energia, tornando-se um objeto cada vez menos luminoso, sólido, cristalino e frio, uma anã negra. (COSTA, 2014).

2. 6 ESTRELAS DE NEUTRÔNS

Estrelas muito massivas se defrontam com um destino catastrófico no final da sua vida (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004). Semelhante a uma anã branca, uma estrela de nêutrons é formada a partir do núcleo da estrela em colapso.

A massa inicial da estrela original era suficientemente elevada para contrabalancear as fortes forças gravitacionais e as elevadas temperaturas no centro da estrela que resultam na formação de um núcleo de ferro de massa ligeiramente superior a $1,5M_{\odot}$. Com o fim do combustível nuclear, a gravidade se torna muito alta para ser mantida pela pressão dos elétrons degenerados (SILK, 1988). A estrela colapsa violentamente até que em densidades bem elevadas, os elétrons e os prótons se combinam para formar nêutrons, tornando a parte central da estrela um imenso núcleo atômico (SAGAN, 1985).

Esses nêutrons por sua vez continuam por se degenerar. “Se a pressão proporcionada pelos nêutrons degenerados for suficiente para paralisar o colapso, dá-se então a formação de uma estrela de nêutrons” (SILK, 1988, p. 261). A implosão violenta do centro repercute no exterior uma explosão de supernova. Esta pode ser mais brilhante do que a radiação combinada de uma galáxia inteira (SAGAN, 1985).

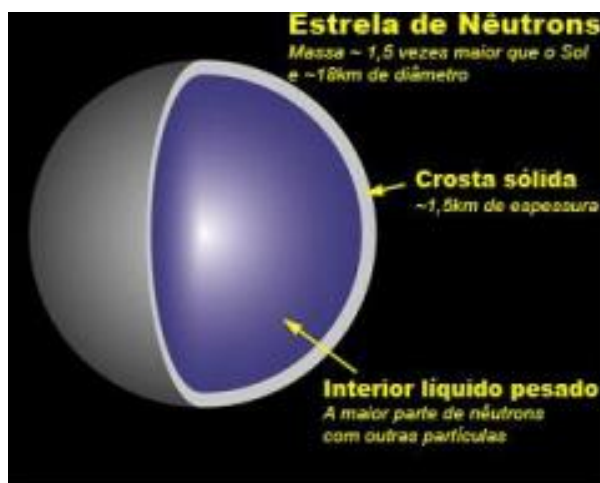
Estrelas de nêutrons possuem atmosfera bem espessa, com uma crosta de 1,5 km de espessura logo abaixo. O núcleo é constituído principalmente de nêutrons densamente agrupados e outra parte constituída de prótons e elétrons em mesmas quantidades em estado líquido conhecido como neutronium (Figura 3) (TORRES et al., 2010 apud COSTA, 2014, p. 51).

Os pulsares são estrelas de nêutrons em alta rotação formadas durante uma explosão de supernova que emitem um feixe de radiação próxima a sua trajetória, sobretudo nas faixas de raios-x e de rádio (MARRANGHELLO, 2014). A hipótese é que apenas estrelas tão compactas como as estrelas de nêutrons poderiam girar

com altas velocidades, o que acaba provocando a emissão ondas de rádio durante cada período de rotação (KIPPENHAHN, 1981).

Uma estrela de massa suficiente para formar uma estrela de nêutrons ao colapsar mantém seu momento angular, se tais estrelas possuírem tamanho reduzido sua velocidade de rotação aumenta rapidamente girando várias vezes em um intervalo de um segundo. Esse núcleo condensado emite uma poderosa radiação em torno das linhas de seu campo magnético, e recebe o nome de pulsar (MARRANGHELLO, 2014).

Figura 3 – Estrutura interna de uma estrela de nêutrons.



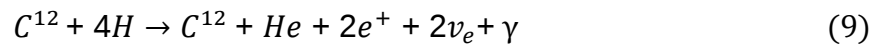
Fonte: (COSTA, 2014, p.51)

2. 7 FONTE DE ENERGIA DAS ESTRELAS

O processo de fusão que gera a energia subatômica das estrelas é similar à explosão de uma bomba de hidrogênio, só que no sentido inverso, nesse caso ao invés de se obter energia pela desintegração de um núcleo mais pesado em outros mais leves, a energia é obtida através da fusão de núcleos mais leves em elementos mais pesados (GLEISER, 2006). Os processos de fusão inicial envolvem a conversão de quatro núcleos de hidrogênio, elemento químico mais simples com apenas um próton no núcleo, em um núcleo de hélio que dispõe de dois prótons e dois nêutrons (PICAZZIO et al., 2011).

De acordo com Oliveira Filho e Saraiva (2004), depois da descoberta do nêutron em 1932, pelo Físico James Chadwick, o alemão Hans Bethe reuniu os

melhores dados das reações nucleares existentes até então e mostrou detalhadamente como ocorria a conversão de quatro prótons em um núcleo de hélio. Como naquela época a temperatura estimada para o sol pelos astrônomos era de cerca de 19 milhões de graus Kelvin, Bethe demonstrou que àquela temperatura, o ciclo do carbono seria o modo predominante de produção de energia.



Para que ocorra a fusão nuclear é necessário que os núcleos atômicos estejam devidamente próximos uns dos outros. Um processo nada fácil devido à carga positiva que os núcleos possuem que acaba gerando uma repulsão eletrostática entre eles impedindo a aproximação indispensável para que a fusão ocorra (PRADO, 2006).

No centro de uma estrela em contração, a temperatura aumenta sucessivamente, até que em altas velocidades os núcleos atômicos adquirem energia suficiente para vencer a repulsão elétrica, permitindo que a fusão nuclear se inicie. O processo de fusão nuclear libera a energia necessária para conter o puxão gravitacional (PICAZZIO et al., 2011).

Com uma temperatura central aceita atualmente de 8 milhões de Kelvin, o ciclo próton - próton é o modo predominante de produção de energia no sol, assim como explicado por Bethe no seu artigo.



“Tem-se então que, o ciclo predominante realizado no sol é o ciclo próton-próton, isto ocorre, devido à temperatura no interior do sol ser influenciado por sua massa” (MENDES, 2009, p. 32). A fusão no interior do sol é tamanha que a cada segundo 400 milhões de toneladas de hidrogênio são convertidos em hélio (SAGAN, 1985).

Enquanto, a energia liberada pelo ciclo do carbono é proporcional à 20ª potência da temperatura,

$$\epsilon_{CNO} \rightarrow \alpha T^{20}, \quad (11)$$

Segundo Maciel (1999), para o ciclo próton-próton, a energia liberada tem uma dependência bem menor, proporcional à quarta potência da temperatura,

$$\epsilon_p - p \propto T^4 \quad (12)$$

Após as descobertas de Bethe, o cálculo de evolução estelar se tornou um campo bem desenvolvido, levando os astrônomos atuais calcular o tempo de vida restante de uma estrela como o sol, para daqui a 6,5 bilhões de anos, quando se transformará em anã branca pela queima de hélio em carbono, pela reação triplo α de acordo com a relação de Oliveira Filho e Saraiva (2004):



O sol como qualquer outra estrela é uma grande “usina” termonuclear que transforma hidrogênio em hélio, somente ele constitui 99% de toda a energia do sistema solar. Com idade estimada de 4,5 bilhões de anos, o sol não teria sido originado do material primordial de 500000 anos provenientes do Big Bang, e sim de material reciclado (COSTA, 2014), provavelmente de uma estrela que se tornou uma supergigante e explodiu em uma supernova, ejetando seu material no espaço constituído por hidrogênio, hélio e cerca de 3% de materiais mais densos, como carbono, oxigênio, enxofre, cloro e ferro (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

2.8 TEMPO DE VIDA DAS ESTRELAS

O tempo de vida de uma estrela é definido como a razão entre a energia que ela tem armazenada e a taxa com a qual a mesma gasta essa energia, ou seja, sua luminosidade (MENDES, 2009). Como a luminosidade de uma estrela é proporcional a sua massa, então, seu tempo de permanência na sequência principal será controlado por sua massa (MOURÃO, 1995).

Estrelas massivas queimarão hidrogênio muito mais depressa, durando menos tempo (HAWKING, 2016). A parte mais longa da vida de uma estrela é quando ela se encontra na sequência principal, quando gera energia através de fusões termonucleares convertendo hidrogênio em hélio (PRADO, 2006).

De acordo com a equação de Einstein, massa é transformada em energia da seguinte forma $E = mc^2$ (GLEISER, 2006), assim nas reações estelares em que ocorre a transformação de quatro prótons, ou seja, quatro núcleos de hidrogênio em um núcleo de hélio (partícula α) resultam numa conversão de massa em energia (MENDES, 2009), pois assim como descrito por Oliveira Filho (2004), existe uma diferença entre a massa inicial e a massa final que é ligeiramente menor.

$$4m_p(4,0324u) \rightarrow 1 m_\alpha(4,0039), \quad (14)$$

Onde u = unidade de massa atômica e equivale a $1,66 \times 10^{-27}$ kg.

A diferença de massa é:

$$\Delta m = (4,0324 - 4,0039) u = 0,0285u \quad (15)$$

$$\frac{0,0285u}{4,0324u} = 0,007 = 0,7\% \quad (16)$$

Assim sendo, 0,7% da massa inicial da reação é convertida em energia (MENDES, 2009). De toda a massa da estrela apenas aquela contida no seu núcleo é transformada em energia, pois somente no núcleo a estrela atinge altas temperaturas necessárias para que ocorra fusão termonuclear (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004). O que quer dizer que apenas 10% de sua massa contribui no processo de produção de energia durante a maior parte de sua vida, quando a estrela se encontra na sequência principal (MENDES, 2009). A energia disponível nessa etapa é conforme a relação de Oliveira Filho e Saraiva (2004):

$$E_{SP} = 0,007 \times 0,1 \times M \times c^2 \quad (17)$$

Onde E_{SP} significa energia na sequência principal.

No sol, “em seu período de fusão do núcleo de hidrogênio em hélio” (MENDES, 2009, p. 35), essa energia equivale:

$$E_{\odot SP} = 0,007 \times 0,1 \times M_{\odot} \times c^2 \quad (18)$$

$$= 0,007 \times 0,1 \times 1,99 \times 10^{30} \text{kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \quad (19)$$

$$= 1,26 \times 10^{44} \text{ J}, \quad (20)$$

Onde $E_{\odot SP}$ = energia do sol na sequência principal e $M_{\odot}$ = massa do sol.

Assim é possível calcular o tempo de vida do sol na sequência principal segundo a relação de Oliveira Filho e Saraiva (2004), pela razão entre a energia nuclear disponível e sua luminosidade:

$$t_{\odot SP} = \frac{1,26 \times 10^{44} \text{ J}}{3,9 \times 10^{26} \text{ J/s}} = 3,29 \times 10^{17} \text{ s} = 10^{10} \text{ anos} \quad (21)$$

Pode-se calcular o tempo de vida de qualquer estrela nessa etapa em termos do tempo de vida do sol, quando ele também se encontra na mesma fase pela relação de Oliveira Filho e Saraiva (2004):

$$t_{SP} = \frac{E/E_{\odot}^{SP}}{L/L_{\odot}} \times 10^{10} \text{anos.} \quad (22)$$

2.9 ÚLTIMO ESTÁGIO EVOLUTIVO DAS ESTRELAS

O destino final das estrelas depois de ter esgotado toda sua reserva de combustível, depende de dois fatores: de sua massa inicial e o outro é se a estrela é simples ou faz parte de um sistema binário ou múltiplo. Se a estrela é binária sua evolução final dependerá tanto da sua massa quanto da distância que se encontra de sua companheira vizinha. Caso a estrela não faça parte de um sistema binário ou múltiplo seu último estágio evolutivo tem dependência apenas da massa com a qual a estrela iniciou sua vida (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

“A massa da estrela tem papel fundamental sobre os processos nucleares que ocorrem em seu interior [...]. A massa também define se a estrela irá terminar sua evolução como uma anã branca, uma estrela de nêutrons ou um buraco negro”. (BALBINOT, 2008, p.12). Se a estrela possui massa inferior a $0,08 M_{\odot}$, ela se tornará uma anã marrom. Se sua massa for entre $0,08 M_{\odot}$ e $0,045 M_{\odot}$ sua evolução final resultará numa anã branca com núcleo de hélio (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004). Se a massa inicial da estrela for equivalente a $0,8$ a $10 M_{\odot}$, depois de ter consumido todo o hidrogênio no centro as reações nucleares passam a acontecer em uma camada mais externa cerca de 2000 km de espessura que atinge temperaturas e densidades suficientes para que estas ocorram (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004). Durante essa fase nenhuma produção de energia é gerada no núcleo, que acaba por diminuir de tamanho rapidamente, com o encolhimento do núcleo, todo o gás presente na estrela aumenta lentamente sua temperatura, as camadas externas acabam por se expandir na tentativa de se ajustarem a esse aumento de luminosidade (MENDES, 2009), a estrela torna-se então uma gigante vermelha transformando hélio em carbono no seu centro.

Quando todo o hélio do núcleo da estrela é transformado em carbono e uma parte em oxigênio, a estrela deixa de ser uma gigante vermelha e transforma-se em uma supergigante lançando as camadas superficiais no espaço em uma nebulosa

planetária (PRADO, 2006). O que resta da estrela, após essa fase, dá-se o nome de anã branca, um objeto que já esgotou seu combustível nuclear e que, portanto não possui uma fonte de energia que a torne brilhante por muito tempo (COSTA, 2014).

Estrelas mais massivas esgotarão mais rapidamente seu combustível nuclear, isso porque quanto mais massa tiver, maior calor necessitará para equilibrar a atração gravitacional (HAWKING, 2016). Desta forma uma estrela de $8M_{\odot}$ massas solares durará mais tempo na sequência principal que uma estrela de $20M_{\odot}$ (PRADO, 2006).

Estrelas com massa entre 10 e $25M_{\odot}$, após ter consumido toda a reserva de energia nuclear a gravidade assume, a parte central da estrela começa a se resfriar e se contrair cada vez mais. As camadas distantes do núcleo expandem-se de tal forma que não é possível diferenciar a passagem da fase de gigante em supergigante, assim a estrela continua a queimar hélio em carbono, carbono em oxigênio, oxigênio em neônio, neônio em magnésio, magnésio em silício, até chegar ao núcleo de ferro, que por ser o elemento pesado mais estável, não é possível extrair energia através dos processos de fusão nuclear (MOURÃO, 1995). Os efeitos gravitacionais tendem a empurrar as camadas mais externas da estrela cada vez mais para o centro, o colapso é tão rápido e violento que as camadas externas são lançadas no espaço em um jato brilhante de luz conhecido como explosão de supernova (MÜHLBEIER, 2009).

“Muitas estrelas experimentaram mortes violentas em explosões de supernova, durante os primeiros anos de nossa galáxia, mas uma supernova é atualmente um acontecimento raro na Via Láctea (SILK, 1988, p. 222).”

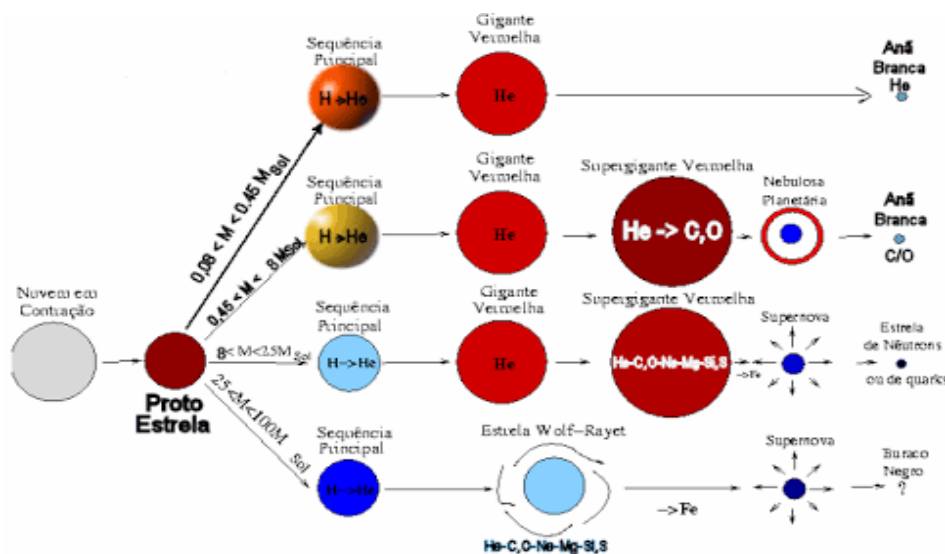
Em novembro de 1572, Tycho Brahe observou uma “nova estrela”, como eram conhecidas as supernovas na época, remanescente observada hoje em raios-x. Mais tarde em 1604, Kepler fez observações de uma supernova que permaneceu visível durante um ano inteiro, e assim como a supernova de Cassiopéia A, observada entre 1650 e 1680 ainda hoje é medida em raios-x (MÜHLBEIER, 2009). Essas foram às últimas supernovas observadas na Via Láctea e ficaram batizadas com os nomes dos astrônomos que as observaram em primeiro lugar, Tycho Brahe e Johannes Kepler (SILK, 1988).

É possível obter uma melhor ideia da taxa de explosões de supernovas observando outras galáxias, já que uma supernova é caracterizada por uma

explosão de brilho muito intenso (MÜHLBEIER, 2009). Dentro de algumas semanas o seu brilho pode intensificar-se em 1 bilhão de vezes a partir de seu estado original. Costa (2014, p.39), descreve “Ao atingir a luminosidade máxima $10^9 L_{\odot}$, a supernova poderá ofuscar o brilho de toda a galáxia na qual ela se encontra”. Uma explosão de supernova causa um efeito similar ao surgimento de uma nova estrela, antes do seu lento desaparecimento ao longo de várias semanas ou meses.

Se a estrela iniciar sua vida com massa entre 25 e $100 M_{\odot}$, após a explosão de supernova, o que resta é um buraco negro conforme Figura 4, com massa aproximada de $6 M_{\odot}$ e raio de horizonte, ou raio de Schwarzschild menor que 20 km . Este raio pode ser definido como a distância ao buraco negro do qual a luz não pode escapar (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

Figura 4 - Último estágio evolutivo das estrelas.

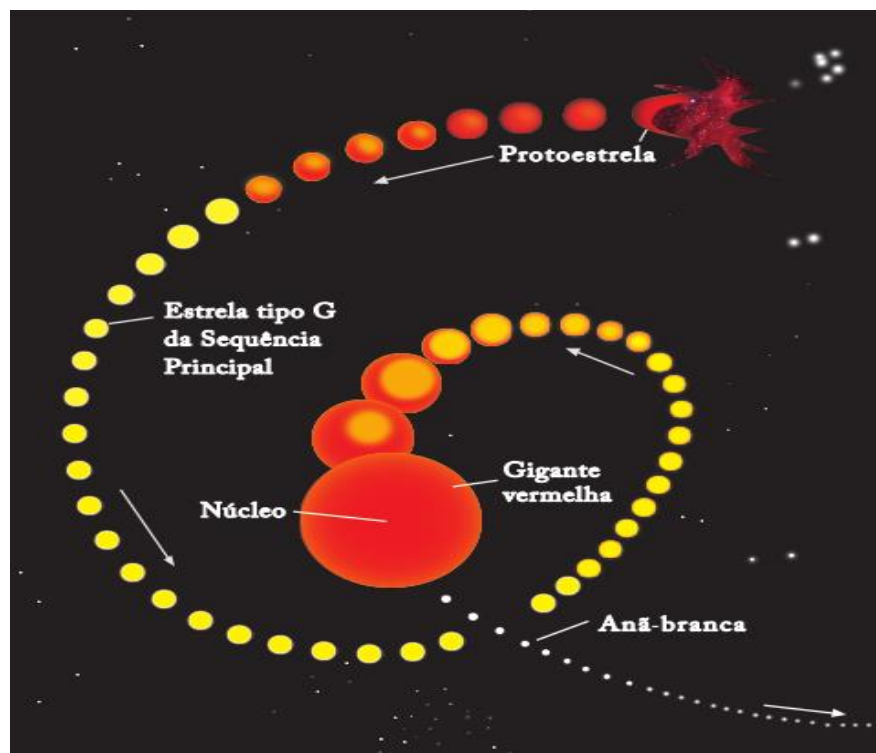


Fonte: (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004, p.187)

Por conversão 5% de sua massa total em hélio durante os primeiros 5 bilhões de anos de sua vida (GLEISER, 2006), o tempo de vida restante do sol na sequência principal está estimada em torno de 5 bilhões de anos, quando alcançará a fase de gigante vermelha (Figura 5). A radiação solar abordando a Terra nesta fase será de tamanha intensidade que a temperatura superficial no planeta atingirá 700°C (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004). Os oceanos ferverão e a atmosfera irá evaporar, pois a esta temperatura o grau de agitação dos átomos e moléculas será tão elevado que estes escaparão para fora da terra (SAGAN, 1985).

A temperatura central do astro chegará aos 100 milhões de Kelvins, a reação triplo α se iniciará transformando três núcleos de hélio em carbono no centro e hidrogênio em hélio em uma camada mais externa (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004). “Em seus estertores da morte, o Sol pulsará lentamente, expandindo e contraindo uma vez a cada alguns milênios, eventualmente expelindo sua atmosfera no espaço em um ou mais invólucros concêntricos de gás” (SAGAN, 1985, p. 232).

Figura 5 – Ciclo de vida de uma estrela semelhante ao sol.



Fonte: Picazzio et al. (2011).

3. BURACOS NEGROS

3.1 A PRIMEIRA DESCRIÇÃO TEÓRICA DE BURACOS NEGROS

3.1.1 Histórico

A mais primitiva tentativa de explicar a queda dos corpos materiais em direção ao solo ao que tudo indica, parece ter sido do filósofo grego Aristóteles (MATSAS e VANZELLA, 2008). Segundo Aristóteles, as substâncias seriam formadas por quatro elementos básicos: terra, água, fogo e ar. Sendo os corpos materiais compostos, sobretudo de terra e dos demais elementos em menores

proporções. Além disso, o filósofo acreditava que quanto mais denso fosse o objeto, maior seria sua velocidade de queda (LOCQUENEUX, 1989).

Em 1590, o astrônomo, físico e matemático italiano, Galileu Galilei discorda da ideia aristotélica de que os corpos mais pesados caem mais rapidamente em relação aos corpos mais leves publicando o resultado de suas observações em sua obra *De motu* (MATSAS e VANZELLA, 2008). Contudo, foi o físico inglês Sir Isaac Newton inspirado nas leis de Kepler que formulou a primeira Teoria Universal da Gravitação (NOGUEIRA e CANALLE, 2009).

Com a primeira teoria da gravitação formulada, os cientistas dos séculos XVIII e XIX começaram a utilizá-la para estudo dos fenômenos em que havia influência da gravidade (MATSAS e VANZELLA, 2008). Quando uma partícula, como uma bala de canhão é jogada para cima, ela volta ao solo depois de alcançar certa altura devido à gravidade (HAWKING, 2016). No entanto, o astrônomo e físico inglês John Michell, apresentou o seguinte argumento: “Se a velocidade de subida inicial for maior do que certo valor crítico [...] a gravidade nunca será forte o bastante para deter a partícula, que ficará livre” (HAWKING, 2016, p. 118). Essa velocidade a qual Michell se refere é chamada de velocidade de escape e pode ser facilmente calculada pela gravitação de Newton (MATSAS e VANZELLA, 2008).

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (23)$$

Tal velocidade é de cerca de $12 \times 10^3 \text{ m/s}$ para terra e $618 \times 10^3 \text{ m/s}$ para o sol, velocidades muito elevadas em comparação a velocidade de balas de canhão, no entanto, pequenas em comparação a velocidade da luz que é de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, por isso a luz pode escapar facilmente desses astros (HAWKING, 2016). Contudo o astrônomo inglês John Michell sugeriu, em 1783 perante uma carta de nome “*On the means of Discovering The Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of Their Light*” apresentada a Royal Society de Londres por Henry Cavendish, existir estrelas da qual a luz não pode escapar devido forte atração gravitacional gerada por elas, tornando-se invisíveis para o observador (MONTGOMERY et al., 2009). Essas estrelas intituladas por Michell de estrelas escuras é o que conhecemos atualmente como buracos negros (HAWKING, 2016).

velocidade de escape no problema do movimento inverso, ou seja, velocidade mínima necessária para que um corpo se livre da atração gravitacional de outro e chegue ao infinito com velocidade nula. (HALLIDAY e RESNICK, 2009).

De acordo com o trabalho original de Michell (1784), a velocidade do corpo em queda em direção à esfera central C pode ser demonstrada pela proposição 39 do Principia de Newton, que afirma que o quadrado da velocidade do corpo em d é igual ao dobro da área do retângulo rdC .

Isso pode ser comprovado fazendo a área do retângulo $rdC = A \times h$, onde A é a área da base do retângulo e h sua altura. Pela definição de derivada total segue que:

$$dr(t) = \frac{dr}{dt} dt, \text{ logo } dr = v dt \quad (24)$$

Assim:

$$rdC = a(r) \times dr \quad (25)$$

$$rdC = a(r) \times v dt \quad (26)$$

$$rdC = v dv \quad (27)$$

Fazendo a integral $rdC = \int v dv$, e sabendo que $BAdr$ representa a quadratura de rdC , segue que:

$$v^2 = 2 \times rdC = 2 \times BAdr \quad (28)$$

A área do retângulo rdC também é igual a:

$$rdC = \frac{GM}{r^2} \times r = \frac{GM}{r} \quad (29)$$

Onde, $\frac{GM}{r^2}$, é a aceleração gravitacional e r é a altura do quadrado rdC .

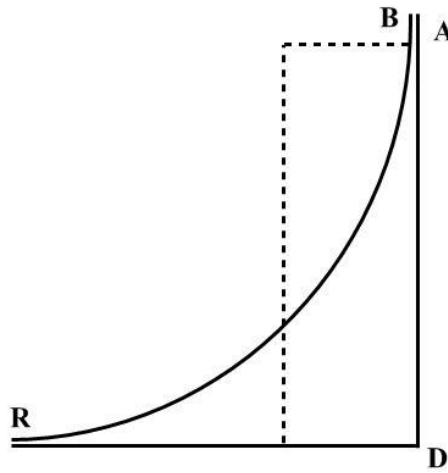
Assim em D , isto é, na superfície da estrela, em que, $r = R$, a área do retângulo CDR será:

$$CDR = \frac{GM}{R} \quad (30)$$

O retângulo CDR possui área igual à área abaixo da curva $BADR$, pois a definição de integral definida garante isso. De acordo com Stewart (2013), para calcular a área de uma região com lados curvos é possível aproximar a região por

retângulos e logo após fazer o número de retângulos se tornar grande. A área exata será o limite das somas das áreas destes retângulos. Desta forma pode-se fazer por aproximação a área sob a curva $BADR$ igual à área do retângulo de dimensões CDR , como representado na Figura 7. Assim a integral de uma função f definida em $R \leq x \leq D$ é $\int_R^D f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f(x_i) \Delta x$ (STEWART, 2013).

Figura 7 – Aproximação por retângulo da área sob a curva $BADR$.



Adaptada de MONTGOMERY et al. (2009).

Logo:

$$v^2 = 2 \times BADR = \frac{2GM}{R}, \quad (31)$$

Extraindo o radical, tem-se que a velocidade radial do corpo na superfície da estrela será:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (32)$$

A velocidade do corpo descendente de massa m também pode ser calculada de um ponto de vista mais moderno através do teorema do trabalho e energia cinética, dado de acordo com Halliday e Resnick (2009) como:

$$\Delta K = K - K_0 = W \quad (33)$$

Como $K = \frac{mv^2}{2}$, a equação 33, se torna:

$$\Delta K = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = W \quad (34)$$

Pela definição de trabalho é possível descrevê-lo segundo Machado e Tort (2016) pela relação:

$$w = - \int_{\infty}^r \frac{GMm}{r'^2} dr' \quad (35)$$

E como a velocidade inicial é nula para um r qualquer se tem:

$$v^2 = \frac{2GM}{r} \quad (36)$$

Voltando à abordagem inicial e supondo que a esfera central possua densidade uniforme $\rho = 4\pi M/3R^3$, a velocidade radial para um r arbitrário será de acordo com Machado e Tort (2016), igual:

$$v^2 = \gamma \rho \frac{R^3}{r}, \quad (37)$$

Onde

$$\gamma = \frac{8\pi}{3} G$$

Assim é possível escrever a velocidade radial terminal na superfície da estrela ($r = R$) como,

$$v^2 = \gamma \rho R^2 \quad (38)$$

Michell sabia que a velocidade radial terminal de um corpo em queda livre a uma altura infinita rumo à superfície do Sol seria igual à de um corpúsculo de massa m girando em uma órbita parabólica que roça a superfície do astro no ponto de retorno, mas com uma velocidade 20, 72 vezes maior que a da terra em sua órbita em torno do sol a uma distância de 214,64 vezes o raio solar (MICHELL, 1784).

Segundo os autores Machado e Tort (2016), a energia de um corpúsculo de massa m no problema de Kepler pode ser escrita pela relação:

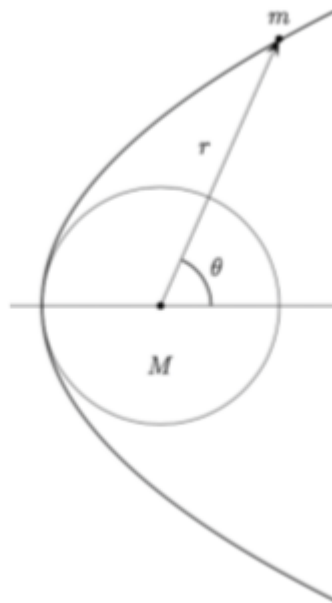
$$E = \frac{m \dot{r}^2}{2} + \frac{l^2}{2mr^2} - \frac{GMm}{r}, \quad (39)$$

Onde $l = mr^2\dot{\theta}$, é o momento angular em relação ao centro geométrico do sol e por suposição $M \gg m$. Halliday e Resnick (2009), afirma que ao fazer essa suposição o

centro de massa do sistema corpúsculo – Sol se concentrará aproximadamente no centro do sol.

Como mostra a figura ilustrativa abaixo (Figura 8), θ é ângulo entre o vetor posição do corpúsculo e tem origem no centro de força e no eixo de simetria elementar da órbita (MACHADO e TORT, 2016).

Figura 8 - Órbita parabólica tangente à superfície do Sol no ponto de retorno.



Fonte: (MACHADO e TORT, 2016, p. 3).

As órbitas do problema de Kepler podem assumir quatro configurações: órbita circular, elíptica, parabólica e hiperbólica (FARINA, 2006), sendo a órbita circular um caso particular da elipse (MACHADO e TORT, 2016). No caso da parabólica, o corpúsculo parte do repouso de uma distância inicial r muito maior do que o raio do Sol, assim na equação 39, o limite $r \rightarrow \infty$. Como na órbita parabólica, o momento angular l não pode ser zero, deve-se impor a condição $\dot{\theta} \rightarrow 0$ no limite $r \rightarrow \infty$ de modo a garantir que o produto $r^2 \dot{\theta}$ seja constante (MACHADO e TORT, 2016). Para órbita parabólica a energia mecânica inicial $E = 0$ (FARINA, 2006), e pelo fato da força gravitacional ser conservativa implica que a energia mecânica será nula durante toda a trajetória do corpúsculo em torno do sol. Além disso, no ponto de retorno a velocidade radial é nula (MACHADO e TORT, 2016). Desta forma, tem-se:

$$-GM + \frac{(R\dot{\theta})^2}{R} = 0 \quad (40)$$

Substituindo $(R\dot{\theta})^2$ pela velocidade tangencial no ponto de retorno V^2 , a equação se torna

$$-GM + \frac{V^2}{R} = 0 \quad (41)$$

Isolando V^2 obtém-se:

$$V^2 = \frac{2GM}{R} \quad (42)$$

Assim é possível concluir que a velocidade é igual aquela que o corpo teria em queda livre partindo do repouso ao atingir a superfície do sol, isto é, $V = v$.

A relação feita por Michell entre a velocidade radial terminal do corpo em queda livre com a velocidade tangencial da terra em sua órbita em torno do sol, pode ser feita considerando a órbita aproximadamente circular com D representando a distância da terra em volta do sol (MACHADO e TORT, 2016). O que não será um problema neste caso, já que a excentricidade da terra é de 0,0167. Portanto, bem próxima do zero, fator que determina uma órbita cíclica (ALMEIDA, 2013). Como é conhecido, todo objeto se movimentando em uma circunferência possui uma força resultante direcionada para o centro (força centrípeta), e como a força exercida sobre a terra é dada pela força de atração gravitacional (também dirigida para o centro), neste caso em especial a força gravitacional será a própria força centrípeta, logo:

$$\frac{GM}{D^2} = \frac{V_{\oplus}^2}{D} \quad (43)$$

Como $V_{\oplus}$ representa a velocidade tangencial da terra em volta do sol, então:

$$V_{\oplus}^2 = \frac{GM}{D} \quad (44)$$

Montgomery et al. (2009) estipula o raio da órbita da terra em torno do sol como sendo de 214,64 vezes o raio solar, assim é possível escrever como mostra a relação de Machado e Tort (2016), o raio da terra como um múltiplo do raio solar, isto é, $D = \lambda R$, assim segue que

$$V_{\oplus}^2 = \frac{GM}{\lambda R} = \frac{2 \times GM}{(2 \lambda) \times R} = \frac{v^2}{2 \lambda} \quad (45)$$

Então é admissível escrever a velocidade radial do corpo em queda (velocidade de escape) em função da velocidade tangencial da terra:

$$v^2 = 429,28 V_{\oplus}^2 \quad (46)$$

Extraindo o radical, tem-se:

$$v = 20,72 V_{\oplus} \quad (47)$$

De acordo com Michell (1784), a velocidade da luz é de 10310 vezes a velocidade orbital da Terra em volta do sol e que ao dividir c por v , o resultado daria aproximadamente 497, ou seja:

$$c = 10310 V_{\oplus} \quad (48)$$

e

$$\frac{c}{v} = \frac{10310 V_{\oplus}}{20,72 V_{\oplus}} \approx 497 \quad (49)$$

Fazendo a suposição de que c seja a velocidade terminal de uma partícula de luz que chega a superfície de uma estrela de raio R' de mesma densidade que o Sol. Pela equação $v^2 = \gamma \rho R^2$, fazendo as substituições necessárias, ou seja, v por c e R por R' pode-se escrever segundo Machado e Tort (2016):

$$c^2 = \gamma \rho R'^2 \quad (50)$$

Que resulta em:

$$\frac{c}{v} = \frac{R'}{R} = 497 \quad (51)$$

$$R' = 497 R \quad (52)$$

Assim para uma estrela de 497 vezes o raio do Sol e mesma densidade que ele, sua velocidade de escape será igual à velocidade da luz. Michell argumentou que qualquer estrela de mesma densidade do astro com raio superior a $497 R_{\odot}$ atrairá de volta toda luz que emite (SCHAFFER, 1979). Dessa forma uma estrela com raio que excede esse limite será completamente invisível (MONTGOMERY et al., 2009).

Como mencionado em seu trabalho: Se uma esfera de mesma densidade que o Sol excede o semi – diâmetro do astro na proporção de 500 para 1, um corpo que caísse na direção da esfera de uma altura infinita teria na sua superfície uma velocidade superior a velocidade da luz e supondo que a luz fosse atraída com força proporcional a sua massa como qualquer outro corpo, toda luz emitida pela esfera retornaria de volta pela sua própria gravidade (MICHELL, 1784). “A estrela negra de Michell é a versão newtoniana dos buracos negros previstos pela teoria relativística da gravitação de Einstein” (MACHADO e TORT, 2016, p. 4).

Michell observa que os corpos com essas características, permaneceriam para sempre invisíveis, contudo, a presença de outro astro em sua órbita poderia acusar a existência desses corpos centrais com algum grau de precisão, já que os efeitos gravitacionais sobre o astro em órbita não seriam facilmente explicável por qualquer outra hipótese (MICHELL, 1784).

3.1.3. A Massa de uma estrela negra

De acordo com a descrição feita por Michell, uma estrela com um raio aproximado de 500 vezes o raio do Sol e mesma densidade ($\rho = 1,41 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) como citado por Machado e Tort (2016), teria uma massa igual a:

$$M_* = (500)^3 M_{\odot} = 1.25 \times 10^8 M_{\odot} \quad (53)$$

Onde $M_{\odot} = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$ é a massa do Sol. A estrela negra de Michel possui uma massa da ordem de um buraco negro supermassivo como os supostamente existentes nos centros de galáxias ativas com massas entre 10^6 e 10^9 massas solares (MONTGOMERY et al., 2009).

O que revelam os cálculos pioneiros de Michell é que se uma estrela tem massa igual a do sol, mas raio 500 vezes maior, a velocidade de escape é a mesma que a velocidade da luz, logo, a luz é aprisionada pela estrela negra. Qualquer corpúsculo de luz emitido da superfície da estrela acabará por ser atraído de volta pela força de atração gravitacional retornando para onde emergiu. Dessa forma um observador distante não notaria a radiação de tal estrela que para ele seria negra (MACHADO e TORT, 2016).

4. DESCRIÇÃO MODERNA DE BURACOS NEGROS

No século XIX, encontra-se dentre os anunciadores da ideia de buraco negro Alexandre Humboldt que publica no terceiro volume de sua obra, Cosmos, na página

93 sobre a necessidade de estudar a existência de astros celestes cuja luz não nos atinge devido à intensa atração gravitacional gerada pelos mesmos, de tal modo que a luz é forçada a retornar ao corpo que a teria emitido. Humboldt teria concluído dizendo que estes astros obscuros eram um jogo de imaginação sustentado pela teoria da emissão da luz (MOURÃO, 1995).

É possível relacionar as estrelas escuras de Michell, os corpos obscuros de Humboldt as ideias desenvolvidas no século XX por Einstein e Schwarzschild que deram origem ao conceito atual de buraco negro (MOURÃO, 1995). Hoje se sabe que de acordo com a teoria da Relatividade Geral, estrelas densas o suficiente não devem originar as estrelas escuras de Michell, mas sim buracos negros (CASTIÑEIRAS et al., 2006). Através da publicação do seu famoso artigo onde propôs sua teoria da Relatividade Restrita em 1905, o jovem físico mostrou que espaço e tempo são relativos (STEINER, 2010).

Nela era incorporado o dado experimental de que a velocidade da luz no vácuo tem sempre o mesmo valor, cerca de 300 mil km/s, medido por todos os observadores inerciais, independentemente do movimento da fonte emissora. Partindo dessa característica peculiar da luz e explorando suas consequências, Einstein mostrou que nossos velhos conceitos de espaço e tempo não eram absolutos, mas, sim, relativos ao observador. Embora os efeitos previstos pela relatividade restrita sejam, em geral, pequenos demais para se fazerem notar na vida cotidiana, eles devem ser considerados em alguns aparelhos modernos de tecnologia fina, como o sistema de posicionamento global, ou GPS (global positioning system), amplamente empregado em navegação (CASTIÑEIRAS et al., 2006, p. 34).

Segundo Fragata (2013), a teoria da Relatividade Restrita tem base nos seguintes postulados:

1. **Princípio da relatividade**, afirma que as leis básicas da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais em movimento relativo uniforme.
2. **Princípio da constância da velocidade da luz**, afirma que a velocidade da luz tem o mesmo valor c em todas as direções e em todos os referenciais inerciais.

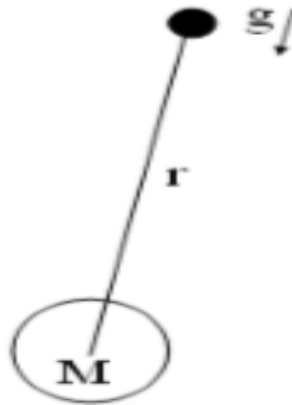
“Entenda que por luz, Einstein estava se referindo às ondas eletromagnéticas em geral” (PIRES, 2011, p. 304).

O primeiro postulado é uma reformulação do princípio da relatividade newtoniana para incluir todos os fenômenos de natureza física, não somente os fenômenos mecânicos (TIPLER et al., 2010). Como efeito deste postulado tem-se que o espaço não pode ser absoluto, visto que todos os referenciais inerciais são equivalentes, não existindo referencial privilegiado (RIFFEL, 2010).

“Essa teoria, no entanto, só vale para observadores em movimento retilíneo uniforme, sem aceleração. Isso quer dizer que só vale para referenciais inerciais” (STEINER, 2010, p. 724). Após a formulação da Relatividade Restrita, tornou-se evidente que as demais teorias precisavam se adaptar ao novo paradigma introduzido por ela, então Einstein começou a trabalhar para estender a teoria para referenciais não inerciais, ou seja, referenciais acelerados, chegando 10 anos depois a formulação da Teoria da Relatividade Geral publicada em seu artigo *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* de 1916 (CASTIÑEIRAS et al., 2006). Nesse artigo Einstein propôs as equações que ficaram conhecidas posteriormente como equações de campo de Einstein, equações essas que relacionam a geometria do espaço-tempo com a distribuição de matéria e energia contidas nele (CARLESSO, 2010). No entanto, o jovem físico não apresenta solução para tais equações.

O astrofísico alemão Karl Schwarzschild, foi o primeiro a obter meses depois a primeira solução das equações de Einstein enquanto servia ao exercito alemão na front russo durante a primeira guerra mundial (MATSAS, 2004). A solução de Schwarzschild fornece a aceleração da gravidade produzida por um objeto de massa M a uma distância r , assim como aquela dada pela lei de Newton, no entanto, a nova solução introduz um termo de correção sobre a fórmula newtoniana (ver Figura 9). Para pequenas distâncias de r o termo de correção se torna significativo, chegando a se anular caso toda a massa do corpo se concentre em um único ponto, ou seja, surge uma singularidade. Dada uma massa, isso ocorre a um raio chamado de Raio de Schwarzschild (STEINER, 2010). O Raio de Schwarzschild é o raio até o qual um corpo pode ser comprimido sem que a luz lhe escape (KIPPENHAHN, 1980). Já a singularidade pode ser definida como o ponto de densidade infinita onde se concentra toda a massa de um corpo, como por exemplo, uma estrela, após o colapso de sua matéria (DAMASIO e PACHECO, 2009). “Toda a energia dos buracos negros está condensada nas singularidades” (MATSAS, 2004, p. 91).

Figura 9 - Aceleração da gravidade produzida por um objeto de massa M a uma distância r



Adaptada de Steiner (2010, p. 726).

O raio de Schwarzschild pode ser calculado de acordo com Steiner (2010) pela relação 58. Utilizando-se da constante relativística e fazendo v igual à velocidade de escape é possível obter a solução de Schwarzschild, ou seja:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (54)$$

E como a velocidade de escape é dada por

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (55)$$

Substituindo se obtém

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}} \quad (56)$$

Se

$$\frac{2GM}{rc^2} = 1 \quad (57)$$

Logo,

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad (58)$$

Onde r_s é o raio de Schwarzschild.

Para r muito grande ($r \gg r_s$), a fórmula de Schwarzschild se aproxima da de Newton.

$$g(r) = \frac{GM}{r^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (59)$$

$$g(r) = \frac{GM}{r^2} \frac{1}{\sqrt{1}}, \quad (60)$$

Segue que

$$g(r) = \frac{GM}{r^2} \quad (61)$$

No entanto, quando $r \rightarrow r_s$ ocorre uma singularidade.

$$g(r) = \frac{GM}{r^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}} \quad (62)$$

Fazendo $r = r_s$

$$g(r) = \frac{GM}{r^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{\left(\frac{2GM}{c^2}\right)c^2}}} \quad (63)$$

$$g(r) = \frac{GM}{r^2} \frac{1}{\sqrt{1-1}} \quad (64)$$

$$g(r) \rightarrow \infty \quad (65)$$

Uma estrela que tivesse um raio menor do que esse valor seria indetectável para um observador externo, pois os raios de luz por ela emitidos seriam tragados de volta pela aceleração infinita. O objeto não pareceria uma estrela, mas um “buraco negro” no espaço (STEINER, 2010). O campo gravitacional da estrela seria demasiadamente forte a ponto de levar todo corpo que o adentrasse a ser fatalmente sugado cada vez mais para seu centro até ser destruído na singularidade (MATSAS, 2004). O raio de Shwarzschild de qualquer objeto é determinado pelo valor da sua massa. Esse raio é de cerca de 3 *km* para o Sol e um centímetro para a Terra. O que implica dizer que para o sol se tornar um buraco negro seria necessário que toda sua massa se concentrasse em uma esfera de 3 *km* de raio (TAVARES, 1999).

A solução de Schwarzschild descreve o que é conhecido atualmente como buraco negro, uma região do espaço-tempo contornada pelo chamado horizonte de eventos de onde é impossível emanar qualquer coisa, inclusive a luz. O horizonte de eventos separa as regiões do espaço-tempo de onde a luz pode e não pode escapar e é criado após a estrela atingir o raio crítico. Toda luz emitida pela estrela após passar pelo horizonte de eventos se encurvará de volta para dentro pela curvatura do espaço-tempo (HAWKING, 2016). A solução descrita acima descreve um buraco negro com simetria esférica, massa e supondo momento angular nulo (MOURÃO, 1995).

Essa região de não retorno dos raios de luz, conhecida como horizonte de eventos foi assim batizada pelo físico de origem austríaca, Wolfgang Rindler na década de 1950. Já a expressão buraco negro surgiu apenas em 1967 com o físico norte americano e mentor intelectual, John Wheeler (MATSAS e VANZELLA, 2008).

No entanto, apesar da solução de Schwarzschild demonstrar a existência dos buracos negros, por um longo período a maioria dos físicos, inclusive Einstein se mantivera céticos quanto à existência de tais objetos. A descoberta de Schwarzschild só teve sua importância reconhecida anos depois (HAWKING, 2016).

Segundo Steiner (2010), a descoberta das estrelas de nêutrons em 1939 pelos físicos J. R. Oppenheimer, G. M. Volkoff e R. C. Tolman, trouxe com ela a constatação de um limite superior de massa assim como acontece com as anãs brancas, em que o limite é de 1,4 vezes a massa do Sol, conhecido como limite de Chandrasekhar. O limite para estrelas de nêutrons seria por volta de 3 massas solares, chamado de limite de Volkoff-Oppenheimer. A existência do limite de Volkoff-Oppenheimer levou a um questionamento: O que aconteceria se uma estrela de nêutrons ultrapassasse esse limite? Sem dúvidas o colapso, no entanto, a estrela não poderia colapsar muito, pois logo alcançaria o raio de Schwarzschild. A única forma possível que uma estrela pode assumir após sua massa exceder o limite de Volkoff-Oppenheimer, é a de um buraco negro.

Como é possível detectar um objeto, tal como um buraco negro se nenhuma luz é emitida por ele? Segundo Hawking (2016), mesmo que não seja possível enxergá-lo, estes continuam a exercer a mesma força gravitacional nos objetos a sua volta que o corpo que o deu origem. Assim, por exemplo, se o sol se tornasse

um buraco negro sem perda de massa, os planetas continuariam o orbitando como atualmente. Portanto, uma das maneiras de procurar um buraco negro é buscar por matéria e astros orbitando algo invisível. Hoje se aceita buracos negros em sistemas como o centro das galáxias e os quasares (DAMASIO e PACHECO, 2009).

“Medidas feitas pelo satélite Uhuru na década de 70 mostraram alguns sistemas binários constituídos de estrelas gigantes (fáceis de observar) orbitando ao redor de companheiras invisíveis” (MATSAS, 2004, p. 92).

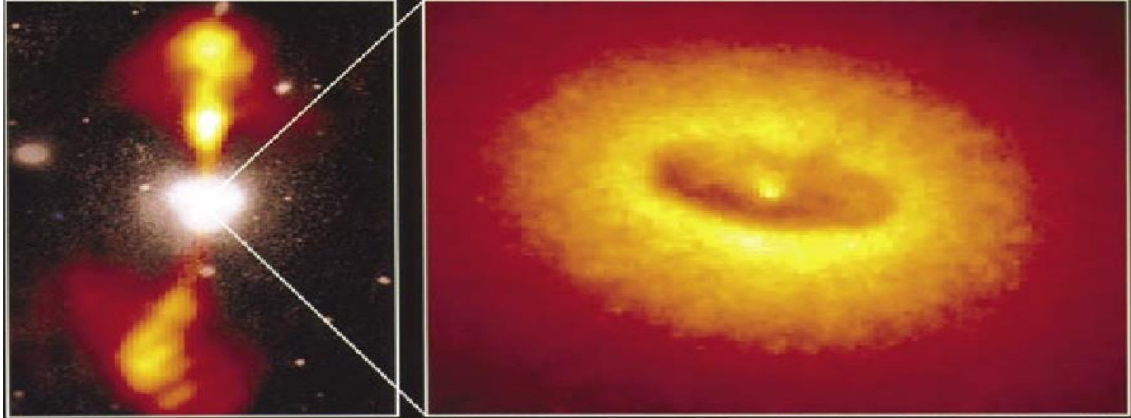
4.1 EVIDÊNCIAS DA EXISTÊNCIA DE BURACOS NEGROS

O surgimento dos quasares em 1963 gerou uma variedade de trabalhos teóricos sobre buracos negros na tentativa de observá-los diretamente (HAWKING, 2016). Quasares são objetos extremamente compactos e luminosos, capazes de emitir mais energia do que centenas de galáxias juntas, além de serem poderosas fontes emissoras de rádio variáveis com um aspecto apresentando linhas largas com o efeito Doppler indicando que os mesmos estão se afastando com velocidade de até alguns décimos da velocidade da luz (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

O estudo detalhado dessas fontes emissoras de rádio, principalmente nos anos iniciais da década de 1970, mostrou que grande parte dessas fontes estão associadas a estrelas de nêutrons em sistemas binários. Chegando a alguns casos exceder a massa permitida pelo limite de Volkoff-Oppenheimer. (STEINER, 2010). Edwin Ernest Salpeter e Yakov Borisovich Zel'dovich chegaram a propor que os quasares são provavelmente galáxias com buracos negros fortemente ativos no seu centro. Acredita-se que exista um buraco negro no interior de todas as galáxias ativas proporcionando as enormes quantidades de energia emitida por elas (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

Um único quasar pode ser até mil vezes mais brilhante do que uma galáxia inteira abrigando centenas de bilhões de estrelas, o que torna muito difícil o estudo das galáxias que hospedam esses objetos. Uma dessas galáxias em cujo centro se acredita existir um buraco negro supermaciço é a galáxia NGC 4261, representada na Figura 10, com um buraco negro de massa equivalente a meio bilhão de massas solares (DAMASIO e PACHECO, 2009).

Figura 10 - Disco de acreção em torno do buraco que se acredita existir no centro da galáxia NGC 4261.



Fonte: (CASTIÑEIRAS et al., 2006, p. 35).

Em 1971 foi descoberta a primeira fonte emissora de raios-x na constelação do Cisne chamada de Cygnus x-1 (Figura 11). A poderosa fonte emissora de raios-x encontra-se no mesmo local de uma estrela supergigante azul e quente de $33 M_{\odot}$, que revela ter uma companheira próxima massiva, porém invisível que a puxa gravitacionalmente para sua órbita. Os cientistas presumiram por meio dos dados coletados que o objeto invisível cerca de dez vezes mais massivo que o sol colapsando em um volume do tamanho de um asteroide só pode ser um buraco negro (SAGAN, 1985). Devido à proximidade da estrela conhecida como *HDE 226868* ao buraco negro, o campo gravitacional deste acaba sugando parte da estrela e espirala em sua direção formando um disco relativamente fino que gira cada vez mais rápido à medida que se aproxima do centro do buraco negro (STEINER, 2010).

Figura 11 - Região na qual se encontra Cygnus x-1.



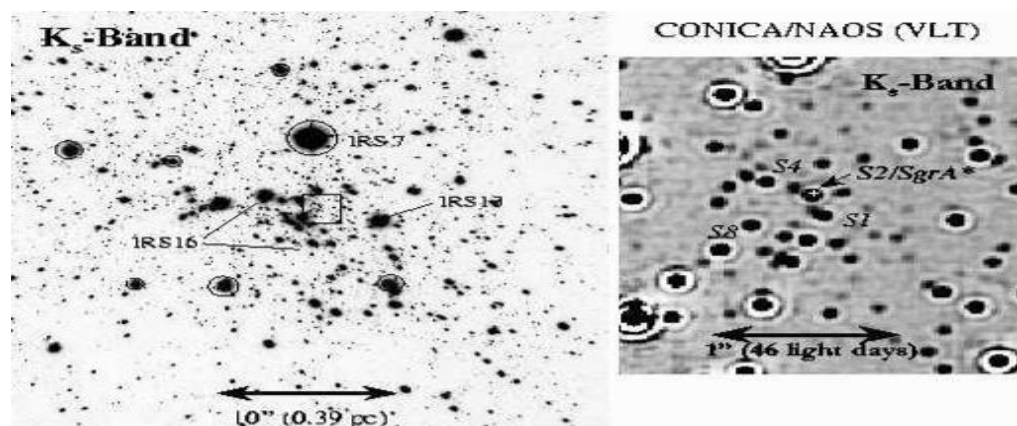
Fonte: (CASTIÑEIRAS et al., 2006, p. 34).

Os raios-x são possivelmente gerados por fricção no disco de gás e poeira em torno de Cygnus x-1 emanados da companheira supergigante (SAGAN, 1985). Com a proximidade ao centro onde se encontra o buraco negro a energia potencial gravitacional vai se transformando em energia cinética. As órbitas com velocidades desiguais (as mais internas girando mais rápido e as mais distantes mais devagar) gera atrito, o que acaba produzindo calor, aquecendo abundantemente o disco. Como o buraco negro é um abismo profundo e íngreme, o gás atinge temperaturas de 100 milhões a um bilhão de kelvin. O gás com essa temperatura é capaz de emitir raios-x que acabam escapando do disco antes de se aproximar do raio de Schwarzschild (STEINER, 2010).

Outras estrelas candidatas a buracos negros são as chamadas V861 Scorpii, GX339-4, SS443 e Circinus x-2. A remanescente de supernova Cassiopéia, cuja luz deve ter chegado a terra no século XVII, como proposto por Shklovskii talvez abrigue um buraco negro no local (SAGAN, 1985).

Segundo Matsas (2004), Os maiores buracos negros devem está situados no centro da maior parte das galáxias. O centro da Via Láctea onde gira em torno de 200 bilhões de estrelas, inclusive o sol, deve abrigar um buraco negro supermassivo (DAMINELI e STEINER, 2010). Medidas atuais coletadas a partir da monitoração da órbita de algumas estrelas na região de Sagittarius A* mostram que sua massa deve equivaler a mais de 3 milhões de massas solares. Foi descoberto que uma das estrelas mais próximas de Sagittarius A*, a estrela S2 tem um período de 15 anos e órbita elíptica (ver Figura 12) (STEINER, 2010).

Figura 12 - Aglomerado central de estrelas IRS 16, localizado na constelação de Sagitário.



Fonte: (STEINER, 2010, p. 738).

Verificou-se ainda que uma das estrelas passou a menos de 17 horas-luz do buraco negro. Caso teria se aproximado um pouco mais, seria possível verificar seu desaparecimento dentro do horizonte de eventos (MATSAS, 2004).

Existe um anseio entre os Físicos que observações astronômicas de alta precisão no futuro próximo apontem o desaparecimento de energia na região em torno dos buracos negros, pois assim seria possível deduzir que esses corpos invisíveis são os responsáveis por estar devorando toda essa energia faltante nas suas imediações. Evidências recentes indicam que algo do tipo aconteceu na galáxia RX J1242-11, onde uma estrela teria sido destroçada e posteriormente engolida por um buraco negro próximo a ela (MATSAS, 2004).

4.2 ORIGEM DOS BURACOS NEGROS PRIMORDIAIS

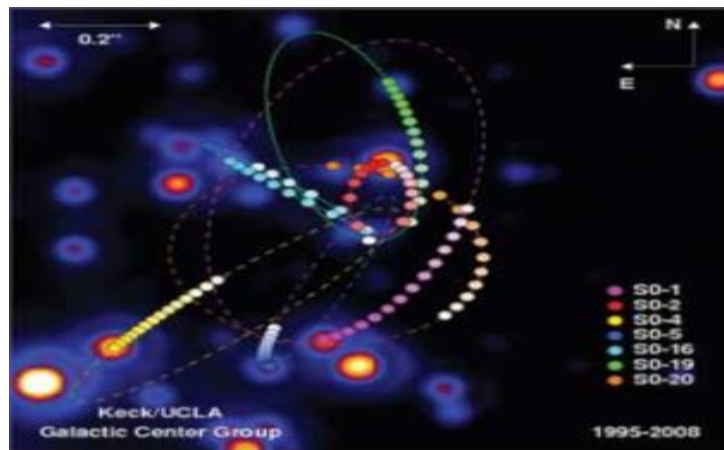
Com base em observações astronômicas pode-se dizer que é conhecido atualmente dois tipos de buracos negros: os buracos negros estelares, frutos da evolução das estrelas de grande massa, e os buracos negros supermassivos, residentes nos núcleos das galáxias. Dos 50 primeiros buracos negros supermassivos que tiveram suas massas medidas, o de menor valor foi de 1,7 milhões contra 3,9 bilhões de massas solares para o de maior valor (STEINER, 2010).

O que se acredita é que os primeiros buracos negros teriam se formado a partir do colapso de estrelas massivas (GUARIENTO, 2010). Esses feitos teriam aumentado sua massa por dois processos: fusão entre diferentes buracos negros e captura de gás da sua vizinhança. Enquanto o buraco negro permanece capturando gás, torna-se luminoso e é possível observá-lo a grandes distâncias. Quanto maior a quantidade de gás capturado pelo buraco negro maior sua luminosidade. De acordo com a luminosidade o buraco negro é classificado como um quasar, galáxia de Seyfert ou LINER. (STEINER, 2010).

Até recentemente acreditava-se que esses monstros cosmológicos gigantescos com até um bilhão de massa solar apenas poderiam ser encontrados no núcleo de algumas galáxias. No entanto, percebeu-se que existem buracos negros também no centro de galáxias tranquilas, cujos núcleos não emitem grandes quantidades de energia como a galáxia espiral NGC 6217 (DAMINELI e STEINER, 2010) e a própria Via Láctea (Figura 13). O que acontece é que quando um buraco

negro cessa sua captura de gás, ele não mais emite brilho e se tornam “quasares mortos”. Toda via um quasar deste tipo pode ressurgir na presença de uma fonte de gás como a explosão de uma estrela nos arredores de sua vizinhança (STEINER, 2010). “Em resumo, não existe diferença essencial entre galáxias ativas e não ativas apenas fases distintas no regime de acreção” (DAMINELI e STEINER, 2010, p. 69).

Figura 13 – imagem representativa de órbitas de estrelas em torno do buraco negro supermassivo dormente no centro da Via Láctea.



Fonte: (DAMINELI E STEINER, 2010, p. 68).

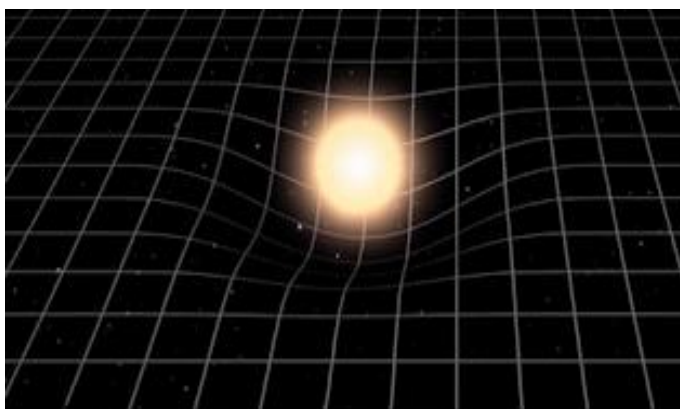
Existem muitos mecanismos formulados por hipóteses cosmológicas e novas teorias físicas sobre a formação dos primeiros buracos negros, no entanto sua existência ainda não foi observada. A detecção desses objetos tornariam suas propriedades uma excelente fonte de estudos para várias áreas da Física, como o colapso gravitacional, a Física de Altas Energias, Universo jovem e Gravitação Quântica (GUARIENTO, 2010).

4.3 BURACOS NEGROS E ONDAS GRAVITACIONAIS

Era esperado da Teoria Geral da relatividade prognósticos mais precisos que a teoria da gravitação de Newton, sobretudo na presença de campos gravitacionais intensos. No entanto, além do fato citado, ela revelou uma nova faceta do Universo, nunca revelada antes (CASTIÑEIRAS et al., 2006). De acordo com a Relatividade Geral, o espaço e o tempo deixam de ser estáticos e passam a interagir de modo dinâmico com os fenômenos físicos. A massa e a energia presente numa região distorce a estrutura do espaço-tempo, curvando-o (Figura 14), como por exemplo, a aparição de planetas, estrelas e galáxias em certa localidade (RAMOS e MALUF,

2017). “E essa curvatura, por sua vez, leva as trajetórias dos corpos, e mesmo dos raios de luz, a se desviarem da trajetória que teriam se o espaço-tempo fosse plano” (CASTIÑEIRAS et al., 2006, p. 34).

Figura 14 - Distorção do espaço-tempo provocada pela presença de massa e energia.



Fonte: <http://www.ciencianamedida.com.br>

O desvio nos raios de luz originados por estrelas pôde ser percebido por meio da observação do eclipse solar no arquipélago de São Tomé e Príncipe no hemisfério sul e na cidade de Sobral localizada no estado do Ceará durante a expedição liderada pelo astrônomo britânico Arthur Eddington em 29 de maio de 1919, quando foi verificado desvio na luz de estrelas distantes ao passarem próximas do sol, onde se obteve a primeira predição experimental da Relatividade Geral, conferindo fama mundial ao Físico Albert Einstein (SAA, 2016).

É importante ter em mente que não é possível explicar que a gravidade gerada pela massa do sol sozinha poderia desviar os raios de luz provenientes da estrela como no caso de interação gravitacional newtoniana entre dois corpos, visto que a luz não possui massa de repouso (SILVA OLIVEIRA, 2016).

Em circunstâncias normais esse desvio é quase insignificante nos arredores do sol, no entanto se fosse possível concentrar a massa do sol em um raio de pouco mais de 3 km, esse efeito de curvatura espaço-temporal na trajetória dos raios de luz seria catastrófico. Nessa situação se formaria uma região tamanha compacta que nenhuma luz conseguiria emanar da superfície solar, constituindo um buraco negro (CASTIÑEIRAS et al., 2006).

Um resultado bastante importante previsto pela Relatividade Geral foi à existência de ondas gravitacionais (SAA, 2016). Segundo Ramos e Maluf (2017), as ondas gravitacionais podem ser pensadas de modo grosseiro como as ondas

criadas ao se jogar uma pedra em um lago. Estas ondas podem ser definidas como perturbações no tecido do espaço – tempo movendo-se pelo universo com a velocidade da luz.

além disso, quando se trata de regiões com campos gravitacionais extremos (como a vizinhança de buracos negros) as ondas eletromagnéticas tendem a se obscurecer, enquanto a radiação gravitacional tende a ser emitida mais intensamente; ao contrário dos fótons, que interagem facilmente com a matéria, os grávitons (os quanta da radiação gravitacional) interagem muito fracamente e podem atravessar mesmo regiões tão densas quanto o núcleo de uma supernova ou o Universo primordial (SANTOS, 2006, p. 12)

A veracidade da existência dessas ondas permaneceu por muito tempo, restrita apenas as discussões teóricas. Na década de 1960 houve inúmeras tentativas pela comunidade científica de detectar tais oscilações gravitacionais, no entanto não obtiveram nenhum resultado confiável até fevereiro de 2016 (RAMOS E MALUF, 2017).

No início do ano de 2016, mais precisamente no dia 11 de Fevereiro, foram divulgadas duas importantes descobertas científicas previstas pela Teoria da Relatividade Geral. Uma delas foi à confirmação direta da existência de ondas gravitacionais e a primeira observação da colisão e fusão de um sistema binário de buracos negros (STURANI, 2016). O anúncio feito com grande empolgação pelas colaborações LIGO e Virgo através dos principais meios de comunicação além de ser uma evidência da existência desses monstros astronômicos foi considerada por muitos pesquisadores o embrião de uma nova era na observação astronômica (SAA, 2016).

O evento cataclísmico gerado pela fusão do par de buracos negros, conhecido como GW150914, teve sua origem em uma galáxia distante mais de um bilhão de anos-luz da Terra. Sendo observado em 14 de Setembro 2015 pelos dois detectores do Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferometria Laser, os instrumentos científicos, mais complexos e sensíveis já construídos até o momento (STURANI, 2016).

Pelas simulações estudadas acredita-se que essas minúsculas distorções no espaço-tempo tenham sido causada pela colisão de dois buracos negros com massas de 29 e 36 massas solares (SILVA OLIVEIRA, 2016) com uma incerteza em torno de 20% (STURANI, 2016) que teriam se fundido em um único e imenso buraco

negro há 1,4 bilhão de anos atrás (SAA, 2016). “A fusão de dois buracos negros formou um único buraco negro de massa correspondente a 62 vezes a do Sol” (STURANI, 2016, p. 1). “As três massas solares faltantes seriam convertidas, em fração de segundos, na energia que impulsionou as ondas gravitacionais” (SILVA OLIVEIRA, 2016, p. 157). Isto é esses objetos teriam transformado a massa desaparecida em energia e as emitido em forma de ondas gravitacionais.

Além destes progressos substanciais na observação indireta de buracos negros, a nossa compreensão teórica desses estranhos objetos foi drasticamente melhorada na última década por avanços notáveis na capacidade de simular em computador desde as várias órbitas muito próximas até a fusão de um sistema binário de buracos negros. Estes modelos permitiram a criação de ondas gravitacionais emitidas por buracos negros: o conhecimento de como essas evoluem à medida que os buracos negros ficam mais próximos até finalmente se fundirem em um único buraco negro mais massivo é necessário para maximizar as informações que podemos tirar da observação (STURANI, 2016, p. 1).

O artigo de nome “Sobre o campo gravitacional de uma massa puntual de acordo com a teoria de Einstein”, desenvolvido por Karl Schwarzschild 100 anos antes do anúncio da primeira detecção direta de ondas gravitacionais em fevereiro de 2016 levou não apenas à descoberta dos buracos negros, como também a boa parte da Física que hoje está sendo desvendada com as observações das ondas gravitacionais (SAA, 2016).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A primeira descrição teórica de buracos negros, feita pelo físico inglês John Michell retrata esses objetos de forma essencialmente geométrica e com base na gravitação newtoniana, portanto, de mais fácil compreensão que a descrição moderna fundamentada na Teoria Geral da Relatividade que se utiliza do cálculo tensorial, o que torna o estudo desses objetos para a maior parte das pessoas muito difícil. O importante de resgatar aspectos históricos referentes à primeira teoria do buraco negro vinculado a sua descrição mais atual é que se pode entender a evolução do conceito desse gigantesco abismo no espaço bastante discutido pela mídia atual e que desperta a curiosidade tanto de estudantes quanto de aficionados em geral.

Mesmo sendo um tema atual e de grande interesse por acadêmicos e sociedade, o entendimento físico de buraco negro é pouco compreensível pela maioria. Com tudo, a pesquisa considera a abordagem de Michell relevante já que a linguagem mais simplificada facilita o entendimento do assunto podendo até ser trabalhada quando cabível nos cursos de educação superior já que é uma descrição puramente newtoniana.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G. Um método simples e intuitivo para determinar a excentricidade da órbita da terra. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 30, n. 1: p. 165-176, abr. 2013. Disponível em: < 10.5007/2175-7941.2013v30n1p165>. Acesso em: 13 mar. 2018.
- ARANY-PRADO, L. I. **À luz das estrelas**. 1. ed. Rio de Janeiro: editora DP&A, 2006.
- BALBINOT, E. Análise de Diagramas Cor-Magnitude para aglomerados estelares do Grupo Local. 2008. 24f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciado em Física) - Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.
- CARLESSO, F. P. Introdução à teoria da relatividade geral. 2010. 40fl. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Física) – Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Naturais e Exatas Departamento de Física. Santa Maria, 2010.
- CASTIÑEIRAS, J.; CRISPINO, L. C. B.; MATSAS, G. E.; VANZELLA, D. A. T. (2006). O Retrato do Monstro. Scientific American Brasil – Especial Gênios da Ciência **Stephen Hawking**, p. 32-39.
- COSTA, M. S. F. Um estudo introdutório sobre as estrelas. 2014. 63f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciado em Física) – Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2014.
- DAMINELI, Augusto.; STEINER, João. **Fascínio do universo**. 1. ed. São Paulo: editora Odisseus, 2010.
- DELVAS FRÓES, André Luís. Astronomia, astrofísica e cosmologia para o Ensino Médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 3, p. 1-15, 2014. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v36n3/16.pdf> > Acesso em: 01 Nov. 2017.
- F. DAMASIO.; PACHECO S. M. V. Buracos nem tão negros assim. Revista Física na Escola, n. 1, v. 10, Ago. 2009. Disponível em: <www.sbfisica.org.br>. Acesso em: 04 Out. 2017.
- FARINA, C. O vetor de Laplace-Runge-Lenz no problema de Kepler. Caderno de Física da UEFS 05 (1-2) 115, 2006.
- FRAGATA, F. R. P. Tópicos da Teoria da Relatividade. 2013. 178 fl. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestre em Matemática) – Universidade dos Açores. Ponta Delgada, 2013.

FRÓES, D. L. A. Astronomia, astrofísica e cosmologia para o Ensino Médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, n. 3, v.36, Ago. 2014. Disponível em: <www.sbfisica.org.br>. Acesso em: 09 Nov. 2017.

GEDOZ, L. Estudo de Candidatos a Aglomerados Abertos e Remanescentes de Aglomerados Abertos de Estrelas na Galáxia. 2016. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Física: Astrofísica) – Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

GLEISER, Marcelo. **Poeira das estrelas**. Vol. 1. São Paulo – SP: editora Globo, 2006.

GUARINETO, C, D. Evolução de buracos negros primordiais no universo. 2010. 110 fl. Dissertação (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

HALLIDAY, D.; RESNICK.; WALKER, J. **Fundamentos de física volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HAWKING, S. **O universo numa casca de noz**. 1.ed. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2016.

HAWKING, S. **A Brief History of Time-- From the Big Bang to Black Holes**. 3. ed. Lisboa: Gradiva -- Publicações, L.da, 1994.

HORVATH, J. E. Uma proposta para o ensino da astronomia e astrofísica estelares no Ensino Médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 4, 4501, Out. 2013. Disponível em:<www.sbfisica.org.br>. Acesso em: 29 Set. 2017.

KIPPENHAHN, Rudolf. **100 bilhões de sóis: nascimento, vida e morte das estrelas**. São Paulo: editora Melhoramentos, 1981.

LOCQUENEUX, R. **História da Física**. Portugal: Europa América, 1989.

MACHADO, R. R.; TORT, A. C. Michell, Laplace e as estrelas negras: uma abordagem para professores do Ensino Médio. Revista Brasileira de Ensino de Física, n. 2, v.38, Fev. 2016. Disponível em: <www.scielo.b/rbep>. Acesso em: 29 Out. 2017.

MACIEL, J. W. **Introdução à Estrutura e Evolução Estelar**. 1.ed. São Paulo: EDUSP, 1999.

MALUF, V. R.; RAMOS, P. M. Sobre a teoria de Einstein para ondas gravitacionais e sua aplicação no estudo da radiação emitida por um pulsar binário. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 40, n. 2, ago. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2017-0177>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

MARRANGHELLO, F. G. **Estrelas de nêutrons**. 21.ed. Santa Catarina: Casa Aberta, 2014.

MATSAS, G.; VANZELLA, D. **Buracos negros: rompendo os limites da ficção**. Rio de Janeiro: Vieira & Lent, 2008.

MATSAS, A. E. G. Buracos negros no cosmos, Revista USP, n. 61, p. 88-93, junho/agosto 2004. Disponível em:<<http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13344/15162>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

MENDES, J. F. Simplesmente estrelas. 2009. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciado em Física) – Universidade Católica de Brasília. Brasília, 2009.

MICHELL, J. Philosophical Transactions of the Royal Society, 74, 35-57 (1784).

MONTGOMERY, C.; ORCHISTON, W.; WHITTINGHAM, I. Michell, Laplace and the origin of the black hole concept. Centre for Astronomy, Journal of Astronomical History and Heritage. 12 2 90 – 96 (2009).

MORAIS, S. T. Estudo do potencial do surgimento de vida na vizinhança solar em função do tempo. 2013. 27f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Biológicas) – Universidade de Taubaté. Taubaté - SP, 2013.

MOURÃO, F. R. R. **Nascimento, vida e morte das estrelas: a evolução estelar.** Petrópolis, RJ: Vozes, 1995.

MÜHLBEIER, T. Estudos das medidas de massas de neutrinos através de supernovas que formam buracos negros pelo método do tempo de vôo. Dissertação (Mestrado em Física) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

NOGUEIRA, S.; CANALLE, G. B. J. **Astronomia: ensino fundamental e médio.** Brasília: MEC, SEB; MCT ; AEB, 2009.

OLIVEIRA FILHO, Kepler Souza.; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. **Astronomia e Astrofísica.** 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.

OLIVEIRA, P. A. R. Estudo fotométrico de jovens aglomerados estelares. 2016. 37f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Física: Astrofísica) – Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

OLIVEIRA, S. J. A. Buracos negros, curvatura espaço-tempo e ondas gravitacionais. Revista eletrônica de jornalismo científico, jul. 2016. Disponível em:<<http://www.comciencia.br/comciencia/handler.php?section=8&edicao=125&id=1517>>. Acesso em: 18 fev. 2018.

P. A. TIPLER, R. A. LLEWELLYN. **Física Moderna.** 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

PICAZZIO, Enos. et al. **O Céu Que Nos Envolve: Introdução à astronomia para educadores e iniciantes.** 1. ed. São Paulo: Editora Odysseus, 2011.

PIRES, T. S. A. **Evolução das idéias da física.** 2. ed. São Paulo – SP: editora Livraria da Física, 2011.

RIFFEL, R. A. **Teoria da Relatividade Especial,** Universidade Federal de Santa Maria (2010).

SAA, A. Cem anos de buracos negros: o centenário da solução de Schwarzschild. Revista Brasileira de Ensino de Física, n. 4, v.38, Ago. 2016. Disponível em: <www.sbfisica.org.br>. Acesso em: 11 Nov. 2017.

SAGAN, Carl. **Cosmos**. Rio de Janeiro – RJ: editora Francisco Alves S.A. 1985.

SANTOS, S. M. Ondas Gravitacionais Primordiais. 2006. 90 fl. Dissertação (Mestrado em Ciências com habilitação em Astronomia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SCHAFFER, S. John Michell and black holes. Journal for the History of Astronomy, 10, 42-43 (1979).

SILK, J. **O Big Bang (A Origem do Universo)**. 2. ed. Brasília: UnB, 1988.

STEINER, J. E. Buracos negros: sementes ou cemitérios de galáxias?, Cad. Bras. Ens. Fís., v. 27, n. Especial: p. 723-742, nov. 2010. Disponível em: <[10.5007/2175-7941.2010v27nespp723](https://doi.org/10.5007/2175-7941.2010v27nespp723)>. Acesso em: 10 fev. 2018.

STEWART, J. **Cálculo**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

STURANI, R. Observação de ondas gravitacionais geradas pela fusão de um sistema binário de buracos negros. Instituto de Física Teórica – UNESP/ICTP-SAIFR. 17 fev. de 2016.

TAVARES, L. M. A. Concepção de um Manual Escolar destinado ao Ensino secundário "A Vida das Estrelas". 1999. 113 fl. Dissertação (Mestrado em Ensino de Astronomia) – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto, 1999.