



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Instituto de Física Armando Dias Tavares (IFADT)

Pedro Louzada Rocha

Buracos negros supermassivos: nascimento, vida e morte

Rio de Janeiro

2024

Pedro Louzada Rocha

Buracos negros supermassivos: Nascimento, vida e morte

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado, como requisito parcial para
obtenção do título de Graduado em
Bacharelado e Licenciatura em Física, ao
Instituto de Física Armando Dias Tavares, da
Universidade do Estado do Rio de Janeiro.



Orientador: Prof. Dr. Marcelo Chiapparini

Rio de Janeiro

2024

Ficha elaborada pelo autor através do
Sistema para Geração Automática de Ficha Catalográfica da Rede Sirius - UERJ

R672 Rocha, Pedro Louzada.
 Buracos negros supermassivos: : nascimento, vida
 e morte / Pedro Louzada Rocha. - 2024.
 53 f.

 Orientador: Marcelo Chiapparini.
 Monografia apresentada à Universidade do Estado do
Rio de Janeiro, Instituto de Física, para obtenção do
grau de bacharel em Física.

 1. Buraco Negros Supermassivo - Monografias. 2.
Evolução Estelar - Monografias. 3. AGN -
Monografias. I. Chiapparini, Marcelo. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto
de Física. III. Título.

CDU 53

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial deste trabalho de conclusão de curso, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Pedro Louzada Rocha

Buracos Negros Supermassivos: Nascimento, vida e morte

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado, como requisito parcial para obtenção do título de Graduado em Bacharelado e Licenciatura em Física, ao Instituto de Física Armando Dias Tavares, Física, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 19 de fevereiro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Chiapparini (Orientador)
Departamento de Física Teórica (DFT) - IFADT

Prof.^a Dr.^a Paula de Oliveira Ribeiro Alho
Departamento de Eletrônica Quântica (DEQ) - IFADT

Prof. Dr. Santiago Esteban Pérez Bergliaffa
Departamento de Física Teórica (DFT) - IFADT

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

Por meio dessa monografia gostaria de agradecer pessoas que foram essenciais para a minha formação. A minha mãe que sempre foi minha companheira e me apoia em tudo, ao meu pai que se tornou meu melhor amigo nesses últimos anos, a minha namorada, Thais Pinheiro, que me ajudou na revisão de texto dessa monografia e de tantos outros trabalhos e que tenho certeza que será uma grande historiadora.

Além deles, agradecer aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado comemorando todas as vitórias e apoiando em todas as derrotas. Aos meus amigos e colegas da UERJ, agradecer por todos momentos, perrengues e ajudas que dividimos, com ênfase na minha amiga desde o fundamental, Fernanda Araújo, que sem ela não teria chegado até aqui.

Gostaria de agradecer também a todos que acreditaram em mim nesse processo, como a prof^a. Dr^a. Paula de Oliveria Ribeiro Alho, que foi minha orientadora no nosso projeto por mais de dois anos e ao prof. Dr. Marcelo Chiapparini, que aceitou ser meu orientador nessa monografia mesmo eu tendo tido pouca experiência na área de pesquisa.

Por último gostaria de agradecer ao meu irmão, o principal responsável de eu ter escolhido a UERJ como faculdade e pessoa que serviu de inspiração para mim durante toda minha vida. Espero que esteja orgulhoso de onde quer que esteja.

RESUMO

ROCHA, Pedro Louzada. **Buracos negros supermassivos: nascimento, vida e morte**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Instituto de Física Armando Dias Tavares, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Inicialmente é apresentado uma linha do tempo de como se deu o conhecimento dos buracos negros. Em seguida é discutido como é o ciclo de vida de uma estrela massiva que eventualmente pode se tornar um buraco negro. Por fim é apresentado um possível ciclo de vida dos buracos negros supermassivos, passando desde a formação de um buraco negro estelar que cresce massa até atingir a dos gigantes encontrados nos centros das galáxias, chegando num possível fim que esse colosso do universo pode ter. Também serão descritos quais são os tipos de núcleos ativos no centro das galáxias, suas características e como podem influenciar na formação de estrelas da sua galáxia hospedeira.

Palavras-chave: evolução estelar; buracos negros supermassivos; AGN's.

ABSTRACT

ROCHA, Pedro Louzada. **Supermassive black hole: birth, life and death**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Instituto de Física Armando Dias Tavares, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

At first is presented a timeline of how the knowledge of Black Holes was given. Next, it's discussed how is the cycle of life of a massive star wich eventually can become a Black Hole. In the last chapter, it's presented a possible life cycle of Supermassive Black Holes, since the formation of a stelar Black hole, which is gaining mass until it reaches the same proportions of the giants found in the center of the galaxies, until a possible end of these colossus of the universe can have. The Active Galactic Nuclei (AGN) will also be described, going through their types and characteristics and how they can influence on the formation of new stars in their host galaxy.

Keywords: stellar evolution; supermassive black hole; AGN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Imagem obtida do disco de acreção do buraco negro supermassivo M87 pelo time do telescópio Event Horizon.....	17
Figura 2 -	Diagrama HR para estrelas próximas do Sol.....	19
Figura 3 -	Esquema de formação das protoestrelas.....	21
Figura 4 -	Esquema do ciclo próton-próton.....	23
Figura 5 -	Esquema do ciclo CNO. O Carbono-12 serve como catalisador de todo o processo e ao final é gerado um Hélio-4.....	24
Figura 6 -	Esquema das reações triplo-alfa, incluindo a possível reação de produção do Oxigênio.....	25
Figura 7 -	Esquema que demonstra a estrutura interna de uma estrela massiva no final de sua vida.....	26
Figura 8 -	Foto da nebulosa do caranguejo, remanescente de uma explosão de supernova.....	27
Figura 9 -	Representação artística uma anã-branca crescendo massa de um Gigante Vermelha companheira.....	28
Figura 10 -	Gráfico demonstrativo para comparação das curvas de luz dependendo de cada tipo de supernova.....	29
Figura 11 -	Estrutura de uma estrela de nêutrons que rotaciona em torno de seu eixo, configurando um pulsar.....	30
Figura 12 -	Foto obtida do disco de acreção de Sagittarius A, o buraco negro supermassivo presente no centro da Via-Láctea.....	31
Figura 13 -	Representação artística de Cygnus X-1.....	32
Figura 14 -	Imagem da Galáxia GN-z11 de massa de aproximadamente um bilhão de massas solares.....	37
Figura 15 -	Gráfico que demonstra as eras iniciais do universo, desde antes do primeiro segundo até o início da era da matéria, a qual nos encontramos hoje.....	39
Figura 16 -	A imagem apresenta espectros óticos de duas galáxias Seyfert...	42
Figura 17 -	A esquerda temos a galáxia do Compasso, uma Seyfert tipo II, enquanto a direita temos a galáxia NGC 5548, uma Seyfert tipo I.....	42
Figura 18 -	Imagem obtida pelo telescópio espacial Hubble da galáxia quasar 3C273.....	43
Figura 19 -	Galáxia 3C219 e seus jatos.....	44
Figura 20 -	Galáxia Sombrero (M104), exemplo de um LINER.....	44

Figura 21 -	Galáxia BL Lacertae H0323+02, um exemplo de Blazar.....	45
Figura 22 -	Estrutura de um AGN a partir do modelo unificado.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Ciclos e fusões presentes dentro das estrelas e a temperatura mínima necessária para que ocorram.....	22
Tabela 2	Tempos necessários diferentes com massas diferentes, mas mesmo tempo.....	36
Tabela 3	Tempos necessários diferentes com mesma massa, mas tempo τ diferentes.....	36
Tabela 4	Tipos de AGN e suas características principais.....	47

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
CAPÍTULO 1 - Uma Breve História dos Buracos Negros	13
1.1 Pré-Segunda Guerra Mundial	13
1.2 Pós Segunda Guerra.....	16
CAPÍTULO 2: A vida de uma estrela massiva	19
2.1 Diagrama Hertzsprung-Russell	19
2.2 Protoestrela massiva	20
2.3 Ciclos e reações nucleares: próton-próton, CNO, triplo- α , queima de Carbono e queima de Oxigênio.....	22
2.4 Início do fim da Estrela Massiva	25
2.5 Supernovas.....	27
2.6 Resultado de uma supernova: Estrela de nêutrons e Buracos Negros	29
CAPÍTULO 3: BURACOS NEGROS SUPERMASSIVOS, AGNS E MODELOS DE FORMAÇÃO	34
3.1 Modelos de formação dos buracos negros supermassivos	34
3.1.1 Acreção do buraco negro supermassivo.....	34
3.1.2 Modelo teórico do buraco negro semente	35
3.1.3 Modelo teórico dos buracos negros primordiais	38
3.2 Tipos de Buracos Negros Supermassivos	40
3.2.1 Galáxias Seyfert	41
3.2.2 Quasares e QSO's.....	42
3.2.3 Rádio Galáxias	43
3.2.4 LINERs.....	44
3.2.5 Blazares	45
3.2.6 Modelo Unificado de AGNs	45
3.2.7 AGNs: Fornalhas de estrelas.....	47
3.3 A morte de um buraco negro	48
CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS.....	52

INTRODUÇÃO

Buracos negros são alguns dos corpos celestes mais misteriosos e estudados de todo o universo. Massas colossais de quantidades diferentes de massas solares comprimidas em um único ponto, ocorrendo uma distorção do espaço-tempo de tamanha forma que nem mesmo a luz escapa, fazendo deles corpos completamente escuros.

Ao longo dos anos muitas teorias foram feitas sobre esses corpos, qual sua origem, sua influência ao redor, sua detecção, sua observação, e seu fim. Dessa forma, o seguinte trabalho tem como objetivo realizar um balanço acadêmico acerca dos buracos negros supermassivos presentes nos centros das galáxias, considerando suas características, como surgiram, os modelos teóricos sobre, dentre outros fatores. Tal escolha se deve ao fato de em 2015, no ano de conclusão do meu Ensino Médio, ter entrado em contato com notícias sobre a descoberta de ondas gravitacionais geradas a partir da união de dois buracos negros. Além disso, nesse mesmo ano, por já ter bastante afeição a Física, ganhei de presente o livro “Uma breve história do tempo” de Stephen Hawking, obra no qual foi de bastante importância para a escolha do meu curso de graduação.

Dito isso, em meu primeiro capítulo tracei uma linha do tempo de como se deu o desenvolvimento do que conhecemos como buraco negro, desde sua previsão até chegarmos à imagem gerada pela equipe do *Event Horizon*, em 2019, do Messier 87, um buraco negro supermassivo no centro de uma galáxia. Passando pelas soluções da relatividade geral de Einstein, a disputa do discípulo e do mentor, Chandrasekhar e Eddington e pela descoberta dos quasares, que foi essencial para a aceitação da existência de buracos negros.

No segundo capítulo, é passado todo o ciclo de vida de uma estrela, mais precisamente a de tipo massiva, que consiste em estrelas de massas maiores que 10 massas solares. Como se deu sua formação desde uma nuvem de gás, que gera inicialmente uma protoestrela até atingir temperatura interna o suficiente para gerar fusão nuclear, se tornando uma estrela.

Todos os ciclos de queima de átomos que ocorrem no núcleo da estrela serão apresentados, como ciclo p-p, ciclo CNO e outros, até atingir um núcleo de ferro altamente estável. Por não ocorrer mais fusão no seu núcleo, ocorre uma fotodesintegração que gera um efeito em cadeia, provocando uma explosão chamada supernova, cuja sua luminosidade ultrapassa a de todo o restante da galáxia. Veremos também o que temos de resultado dessa explosão, com mais foco ao buraco negro, objeto de estudo do trabalho.

No terceiro capítulo o foco passa a ser o buraco negro supermassivo e quais são os seus modelos de formação que melhor explicam a origem de corpos celestes de massas colossais como milhões e bilhões de massas solares. Assim como será discutido o papel dos AGN, Núcleos Ativos das Galáxias, que nada mais são que buracos negros supermassivos encontrados nos centros das galáxias que apresentam acreção de matéria. Todos seus tipos serão mostrados e caracterizados de acordo com os

fatores que os diferenciam. Por fim será mostrado um possível fim que esses corpos podem ter, devido a possível perda de massa que pode ocorrer a partir da radiação Hawking.

Ao final desse trabalho pretendo concluir qual o modelo que melhor explica a origem dos buracos negros supermassivos e qual fim o universo e esses corpos podem ter ao passar do tempo.

1. UMA BREVE HISTÓRIA DOS BURACOS NEGROS

1.1 Pré-Segunda Guerra Mundial

O primeiro indício do que hoje conhecemos como Buraco Negro foi introduzido inicialmente pelo filósofo naturalista John Mitchell (1724 - 1793), em 1783, ao utilizar o termo “estrelas escuras” em seus estudos da mecânica newtoniana, considerando que: “uma estrela com massa suficientemente compacta poderia ter um campo gravitacional tão forte que a luz não poderia escapar. Qualquer luz emitida pela superfície da estrela seria puxada de volta por uma atração gravitacional antes que conseguisse se afastar” (Franchi, 2013, p. 43).

Em 1799, Pierre Simon Laplace (1749 – 1827) publica uma demonstração matemática que uma estrela de diâmetro de 250 vezes o do Sol e com densidade igual a da Terra teria uma atração gravitacional tão forte que a luz não escaparia de sua própria superfície (Machado, 2016).

Esse conceito não foi explorado na época, sendo visto como algo impossível, pois ainda existiam debates sobre as propriedades da luz, se era partícula ou onda e se possuía velocidade infinita ou finita. Somente após mais de um século esse conceito voltou a ser discutido, após a publicação dos trabalhos de Albert Einstein (1879 – 1955), principalmente com o seu artigo publicado em 1915 referente a Teoria da Relatividade Geral, no qual demonstrou que a luz pode ser afetada pelo campo gravitacional de corpos celestes.

No ano seguinte, Karl Schwarzschild (1873 – 1916) resolveu as equações de Einstein para um campo gravitacional no vácuo, aplicada somente para a região externa do corpo, e encontrou que para casos em que o raio do corpo celeste for muito pequeno comparado a sua massa, um fator de correção deve ser considerado na equação da aceleração da gravidade desse corpo. Em casos do raio muito pequeno, pode existir um denominador nulo. Esse raio que causa isso foi denominado como Raio de Schwarzschild. Tanto a equação da aceleração ($g(r)$) usada por Schwarzschild quanto o raio (r_s) estão descritos abaixo, respectivamente:

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

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

onde $G = 6,6743 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$ é a constante da gravitação de Newton, $c = 3 \times 10^8 m/s$ corresponde a velocidade da luz e M a massa do Buraco Negro. Ao resolver essa equação para o caso do Sol (com $M = 1,98 \times 10^{30} kg$), encontramos que o raio de Schwarzschild é dado por:

$$r_s = 2,95 \text{ km}$$

Apesar das equações de Einstein e a solução de Schwarzschild indicarem a presença de corpos que sofreriam um colapso gravitacional, a sua existência foi inicialmente questionada. Um dos principais opositores foi Sir Arthur Stanley Eddington (1882 – 1944), um dos principais astrofísicos da época e um dos responsáveis pela expedição de 1919 que observou um eclipse solar em dois locais no hemisfério Sul, sendo um no arquipélago de São Tomé e Príncipe e outro em Sobral, cidade do interior do Ceará. Eddington foi o responsável pela comitiva da costa africana, enquanto dois colegas ingleses, Andrew Crommelin e Charles Davidson, vieram a Sobral observar o eclipse.

Assim como o próprio Schwarzschild não acreditava completamente na sua própria descoberta, Eddington se mostrou bastante contrário à ideia do colapso gravitacional e o raio de Schwarzschild, pois acreditava que as configurações necessárias para um corpo de grande massa se comprimir ao ponto de atingir o raio em questão seria impossível a partir do conhecimento que se tinha na época. Para resolver esse problema, seria necessário um estudo mais aprofundado sobre os detalhes internos e a formação dos corpos esféricos que originam os campos gravitacionais no qual o corpo colapsa e gera uma singularidade.

Eddington foi responsável por descrever modelos teóricos que explicam os processos que ocorrem dentro das estrelas e que são responsáveis por manter o equilíbrio, gerando energia e pressão que contrabalanceiam a ação da atração gravitacional da própria estrela. Além disso, desenvolveu um método para calcular o raio das estrelas e com ele conseguiu calcular o raio de Sirius B, companheira da estrela mais brilhante do nosso céu noturno. Como resultado obteve que a Sirius B tinha toda sua massa comprimida num volume próximo ao da Terra.

A partir disso, Eddington conseguiu mais uma comprovação da Teoria da Relatividade Geral, ao observar que a luz emitida por essa anã branca sofre um *redshift*¹, o que só ocorreria pela ação de um campo gravitacional de um corpo suficientemente denso como é a Sirius B. Devido à sua comprovação de uma das previsões de Einstein e sua participação na expedição para Sobral, Eddington tornou-se uma das maiores referências na área da Astrofísica, justificando toda a sua influência na história, tanto para o bem quanto para o mal.

Anos depois, alguns físicos se mostraram contrários a algumas das ideias de Eddington, principalmente o seu discípulo, Subrahmanyan Chandrasekhar (1910 – 1995), comumente chamado de Chandra, um dos primeiros a inicialmente propor a ocorrência de colapsos gravitacionais para dar origens a essas singularidades antes encontradas.

Em 1926, com o advento da Mecânica Quântica, o físico britânico Ralph H. Fowler (1889 – 1944) introduziu a ideia do princípio de exclusão de Pauli aos elétrons no interior das anãs brancas. Como consequência disso, acabou descobrindo a “matéria degenerada”, que nada mais é do que um gás de férmions de altíssimas densidades onde a interação das partículas é descrita pela impossibilidade

¹ *Redshift* é um fenômeno análogo ao do efeito Doppler relativístico e refere-se ao aumento do comprimento de onda e consequentemente diminuição da frequência e indica que o corpo que gera esse efeito está se distanciando de nós a uma determinada velocidade.

delas ocuparem o mesmo estado quântico. Essa pressão gerada pelo princípio de exclusão é contrária a atração gravitacional o que auxilia no equilíbrio de uma anã branca.

Um gás degenerado é relativístico quando a pressão gravitacional é muito grande, o que ocorre em corpos extremamente densos, que consequentemente faz com que os elétrons presentes possuam velocidades relativísticas, ou seja, próximas a velocidade da luz. Essa informação foi crucial para que Chandrasekhar demonstrasse uma massa limite de uma anã branca, já que a velocidade dos elétrons está diretamente proporcional ao campo gravitacional do corpo, e este está diretamente relacionado com a massa dele.

Dessa forma, para corpos suficientemente massivos, a velocidade dos elétrons poderia ultrapassar a velocidade da luz, o que é fisicamente impossível ao considerarmos a Teoria da Relatividade Restrita de Einstein. Tendo isso em mente, na descrição dos elétrons degenerados foi possível encontrar uma massa limite que uma anã branca pode ter para evitar que a velocidade dos elétrons ultrapasse a velocidade da luz. Assim, caso a massa ultrapasse este limite a anã branca entraria em colapso gravitacional. Esta massa máxima é chamada de Limite de Chandrasekhar e vale aproximadamente 1,4 massas solares, dependendo da composição da estrela.

Tais ideias postuladas por Chandrasekhar foram completamente desdenhadas por Eddington, por acreditar que a natureza jamais permitiria um colapso gravitacional. Mesmo não sabendo explicar como evitar o colapso gravitacional de estrelas suficientemente massivas, o astrofísico acreditava veementemente que a natureza sempre encontraria um jeito de evitar isso e só não tínhamos o conhecimento necessário para compreendê-la.

Eddington chegou ao ponto de se pronunciar publicamente numa reunião da *Royal Astronomical Society* em 1935:

Nesta reunião, primeiro Chandrasekhar falou sobre o seu cálculo do limite de massa e em seguida Eddington apresentou uma palestra sob o título “Degenerescência Relativista” (Thorne 1994, p. 156), na qual afirmou que a união que Chandrasekhar fizera entre a Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade Especial não fora lícita, em suas próprias palavras, “Eu não considero o filho de tal união como nascido de um casamento lícito”. E mais, “Eu me sinto tranquilo comigo mesmo de que se a união for feita corretamente, as correções relativistas são compensadas, de tal forma que nós preservaremos a fórmula ‘ordinária’ ”(Soares, 2019).

Como consequência, as ideias de Chandrasekhar foram consideradas incorretas pela comunidade científica da época decorrente da influência de Eddington. Como último recurso, Chandrasekhar recorreu a um dos pais da Mecânica Quântica, o físico Niels Bohr (1885 – 1962), pedindo sua opinião sobre o assunto, tendo como resposta a constatação de que Eddington estava sim errado e deveria dar continuidade ao seu trabalho.

Outros dois físicos importantes dessa época que valem ressaltar é o soviético Lev Landau (1908 – 1968) e o padre belga Georges Lemaître (1894 – 1966), onde o primeiro ao descobrir a densidade máxima que uma estrela de nêutrons pode ter, conseguiu consequentemente encontrar o valor da massa limite desses corpos. Já Lemaître observou que o universo estava em expansão em 1927, o que por

consequência o fez formular a Teoria do Big Bang, que inicialmente se chamava de *hipótese do átomo primordial*. A princípio essa teoria não foi bem recebida, já que o modelo de universo mais aceito no momento era o modelo estacionário, mas Einstein era um entusiasta de suas ideias e acreditava ser a mais bela e satisfatória das explicações sobre a origem do universo que já havia escutado. A partir disso, em 1933, Lemaître encontrou uma solução para as equações de campo de Einstein que derivaram na métrica Lemaître-Tolman, que considera um universo não-homogêneo, isotrópico e que se expande.

Entretanto, devido à pressão e a não aceitação de suas ideias, tanto Chandrasekhar quanto Landau preferiram se abster de forma que tanto eles como a comunidade científica só revisitariam essas ideias mais de duas décadas depois. Vale mencionar que o próprio Einstein era contrário as singularidades no espaço-tempo “pois uma singularidade traz tanta arbitrariedade a teoria que de fato a nulifica” (Einstein, 1935).

Enquanto Chandrasekhar preferiu se abster de comentar sobre os destinos das estrelas com massas maiores ao limite encontrado por ele, Landau postulou que as conhecidas leis da física não valeriam mais em tais casos, argumentando que estrelas não demonstravam essa “tendência ridícula” de se contraírem até um ponto (Almeida, 2021, p. 96)

Do outro lado do Atlântico, mais precisamente na Califórnia, nos Estados Unidos (EUA), um grupo de físicos se mostravam mais receptivos as ideias do colapso gravitacional e da Relatividade Geral, tendo como principais representantes os físicos Robert Oppenheimer (1904 – 1967) e Hartland Snyder (1913 – 1962). Oppenheimer e Snyder publicaram um artigo em setembro de 1939 intitulado *On Continued Gravitational Contraction* no qual consideraram a possibilidade de corpos auto gravitantes colapsarem devido ao seu próprio peso e que corpos com raios iguais ao seu raio de Schwarzschild teriam um *redshift* máximo, onde a onda de luz emitida pelo corpo sofre tamanho desvio que não consegue escapar (Oppenheimer, 1939). O que diferenciam dos demais é a utilização dos conceitos da Relatividade Geral, diferente do que já tinha sido feito por Chandrasekhar e Landau, que se utilizaram apenas da Relatividade Restrita. Esse artigo, por mais imperfeito que fosse, deveria ter instigado novamente as discussões, porém no mesmo dia de sua publicação o então líder da Alemanha Nazista, Adolf Hitler, atacou a Polônia, dando início a Segunda Guerra Mundial (1939-1945).

1.2 Pós Segunda Guerra

Durante o período da Segunda Guerra Mundial (1939-1945), houve uma mudança no foco dos estudos da comunidade científica do mundo inteiro, fazendo com que a pesquisa sobre o universo fosse deixada de lado, priorizando, em contrapartida, o desenvolvimento bélico a ser utilizado no conflito. Inclusive, o próprio Robert Oppenheimer foi o principal nome responsável pela criação da primeira bomba atômica. Devido a isso, somente na década de 1950 tivemos o retorno da discussão de tais conceitos astrofísicos.

Com o advento do conhecimento da física nuclear decorrente do investimento para a produção da bomba nuclear, foi possível entender melhor o que acontece no interior das estrelas, isto é, a fusão

nuclear gerando energia e elementos mais pesados e que os *“elementos mais leves, como o hidrogênio e o hélio, foram formados nos primórdios do universo, no que chamamos hoje de sopa primordial. Esse foi o ponto de partida da Teoria do Big Bang e do Modelo Padrão da Cosmologia”* (Almeida, 2021, p. 98).

Em 1958, David Finkelstein (1929 – 2016) foi o responsável por tornar o raio de Schwarzschild fisicamente viável de forma definitiva:

Seu trabalho possibilita a interpretação correta da esfera de raio $r = r_s$ como uma espécie de membrana unidirecional que só permitira o cruzamento de trajetórias físicas, incluindo as da luz, de fora para dentro. Quer dizer, a esfera de raio r_s funciona como uma espécie de fronteira entre duas regiões, sendo a região externa completamente desconectada do interior, sem qualquer possibilidade de comunicação de dentro para fora. Nascia assim o conceito de “horizonte de eventos”, que de fato é o que distingue e define um buraco negro (Saa, 2016).

Entretanto, o grande divisor de águas, responsável por fazer com que toda a comunidade de fato adotasse a ideia do buraco negro como algo de fato viável, foi a descoberta e o estudo dos mais novos objetos superdensos do universo, os quasares.

Batizados de faróis do Universo, pulsares são estrelas de nêutrons em rotação que emitem pulsos eletromagnéticos a um intervalo de tempo constante. Já os quasares são fontes extragalácticas de rádio quase-estelares, isto é, que se parecem com a de estrelas, mas que indicam uma densidade bem maior (Almeida, 2021, p. 99)

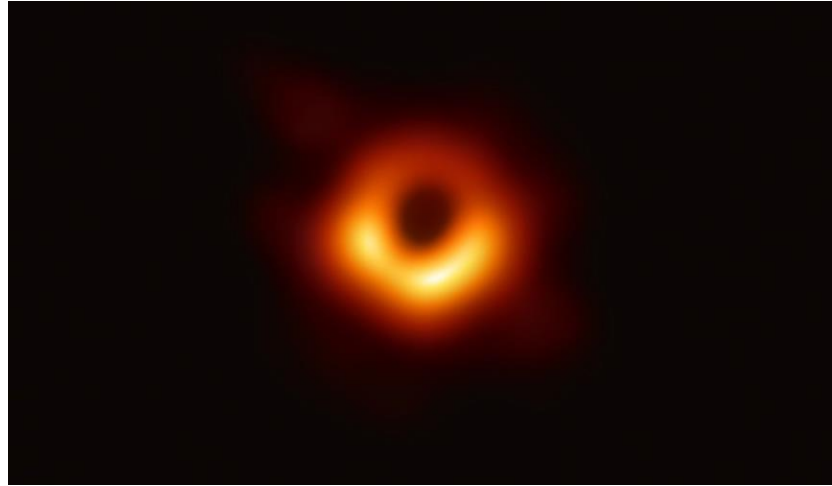
Além disso, dois físicos em 1969 comprovaram que singularidades tendem a ser o resultado quando um corpo de massa extremamente alta entra em colapso gravitacional, sendo eles Roger Penrose (1931 -) e Stephen Hawking (1942 - 2018).

Outro importante físico foi o neozelandês Roy Kerr (1934 -), que em 1963 encontrou a métrica de Kerr, que descreve a geometria do espaço-tempo para o caso de um corpo massivo em rotação. Um exemplo de corpo de tamanha massa seria o buraco negro, objeto de estudo desse trabalho.

A partir dessas descobertas, um físico que inicialmente se mostrou contrário à ideia de uma singularidade existir, mas que depois se tornou um dos maiores apoiadores e divulgadores, foi John Wheeler (1911 – 2008). Wheeler foi o responsável por popularizar o termo “Buraco Negro”, adotado a partir de uma recomendação de um dos presentes em uma de suas palestras.

Entretanto, para que tais debates teóricos tornassem-se comprovações efetivas da existência dos buracos negros, era necessário captar a ação gravitacional deles e observá-los, etapas essas que requisitaram anos de avanço tecnológico. Dessa forma, somente em 2015 foi detectado as ondas gravitacionais decorrentes da fusão de dois buracos negros que geraram um buraco negro maior e ondas gravitacionais que se deslocaram até nós. Já a observação, ocorreu apenas em 2019, com a imagem do disco de acreção do buraco negro supermassivo no centro da galáxia Messier 87 (M87), obtendo enfim um fator que auxilia ainda mais na comprovação da existência do buraco negro.

Figura 1 - Imagem obtida do disco de acreção do buraco negro supermassivo M87 pelo time do telescópio Event Horizon



Fonte: National Geographic Brasil.

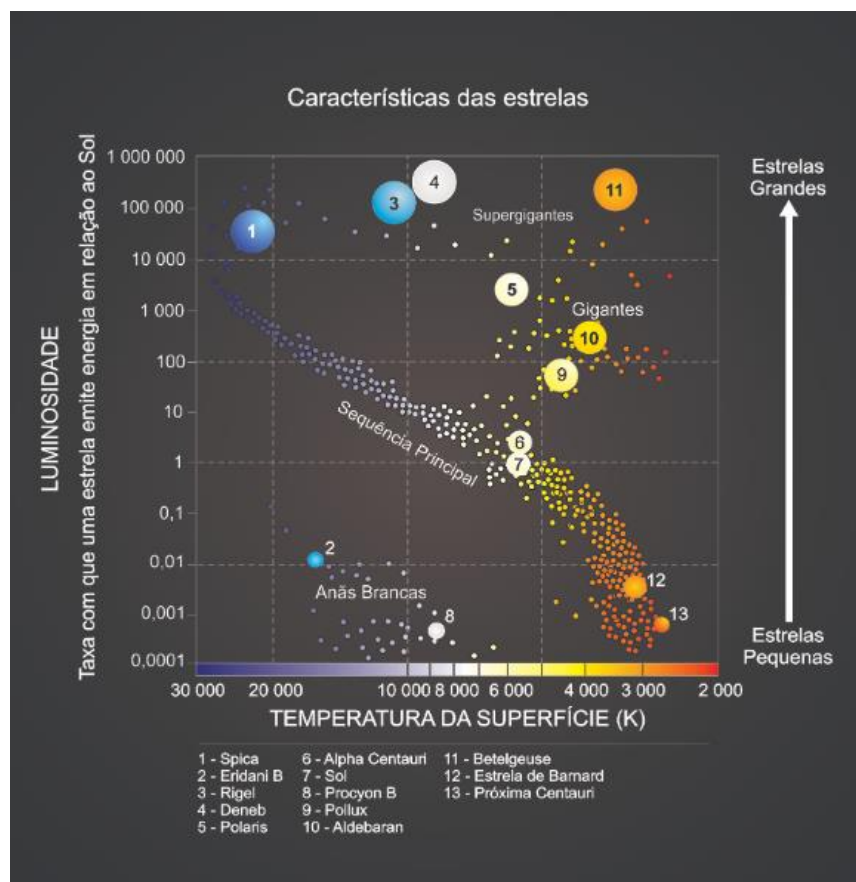
Diante disso, após entendermos como a ideia dos buracos negros surgiu e como a comunidade científica reagiu, é necessário compreender melhor como se geram os buracos negros estelares, presentes no final da vida de estrelas massivas, para assim sabermos como surgem os gigantes buracos negros supermassivos no centro das galáxias.

2. A VIDA DE UMA ESTRELA MASSIVA

2.1 Diagrama Hertzsprung-Russel

Antes de adentrarmos no ciclo de vida de uma estrela massiva, é importante discutirmos sobre o Diagrama Hertzsprung-Russel ou Diagrama H-R, apresentado pelo físico dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873 – 1967) e pelo estadunidense Henry Russel (1877 – 1957), em estudos independentes, respectivamente em 1911 e 1913.

Figura 2 - Diagrama HR para estrelas próximas do Sol



Fonte: Astro UFRGS.

O diagrama, apresentado na figura 2, demonstra a relação existente entre a luminosidade de uma estrela e sua temperatura efetiva ou superficial. Essas informações podem ser facilmente encontradas nas estrelas mais próximas, sendo a primeira a partir da magnitude aparente e a segunda de sua cor ou tipo espectral.

A partir do gráfico podemos observar que a temperatura aumenta da direita para a esquerda, e tanto o tamanho das estrelas quanto suas luminosidades aumentam de baixo para cima.

Tendo isso em mente, pode-se constatar que as estrelas não estão distribuídas uniformemente, havendo concentrações em determinadas partes do diagrama. A mais notória é onde se concentram a

maior parte das estrelas é a chamada de sequência principal, que vão dos dois extremos do diagrama, isto é, das estrelas mais massivas e quentes até as menos massivas e frias. A localização das estrelas dessa sequência é determinada pela sua massa, ou seja, quanto maior sua massa, mais quentes e luminosas elas serão.

As estrelas na porção inferior centro-esquerda são chamadas de anãs brancas, que apesar de pequenas são quentes e pouco luminosas, e podem cobrir um intervalo muito extenso de cores e temperaturas, podendo fluir entre 200000 K até 3500 K, e entre cores quentes como azul e branco e frias como vermelha e amarelo. Já na região superior centro-direita é onde se encontram as estrelas gigantes, que apesar de não serem tão quentes, são consideravelmente luminosas. Acima delas, próximo ao topo do diagrama, estão as Supergigantes, onde se encontram as estrelas mais luminosas e que variam de temperatura por todos os dois extremos.

As posições das estrelas massivas no diagrama são referentes a sua idade, pois quanto mais jovens, menor é sua pressão térmica interna, já que inicialmente são queimadas moléculas de pouca complexidade. À medida que o tempo passa, a estrela massiva passa a queimar moléculas maiores, a pressão interna aumenta, conseqüentemente aumentando seu raio e diminuindo sua temperatura superficial, decorrente da relação inversamente proporcional do raio da estrela com sua temperatura aparente.

Para analisar o diagrama deve-se levar em consideração que as estrelas presentes são de uma amostragem próxima ao Sol, nisso se utilizarmos outros fatores de amostragem como luminosidade intrínseca ou uma distância preestabelecida do Sol, teremos um diagrama completamente diferente. De toda forma, o diagrama analisa muito bem estrelas pertencentes a um determinado aglomerado de estrelas, dependendo diretamente de sua idade, motivo pelo qual o diagrama H-R é uma importante ferramenta para o estudo da Evolução Estelar.

2.2 Protoestrela massiva

As estrelas não surgem do completo vazio, elas são geradas por nuvens de gás, formadas majoritariamente de moléculas de hidrogênio (H_2), aglutinadas pela força gravitacional do centro de regiões de maior densidade. O gás ao redor dessas regiões se condensa gerando fragmentos dessa nuvem. Após a ação da gravidade de cada um desses fragmentos, são formados filamentos de gás cada vez mais complexos em seus interiores, até que sejam formadas protoestrelas. Por conta da condensação de matéria decorrente da ação da gravidade, a pressão e temperatura interna aumentam gradativamente até que ocorra um equilíbrio hidrostático dentro delas.

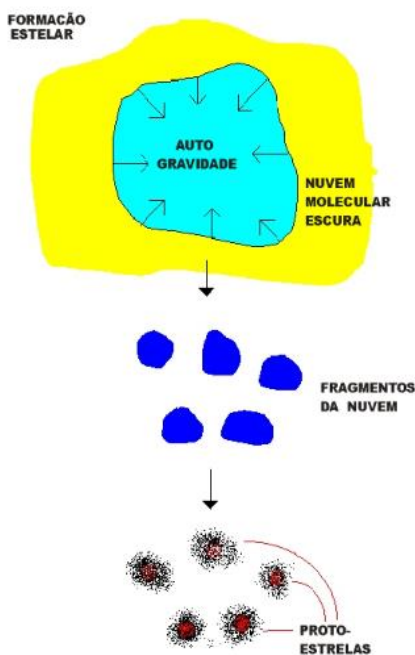
Vale ressaltar que não necessariamente toda a massa da nuvem de gás é assimilada pela protoestrela, conforme Ortiz aponta:

Parte dele permanecerá como matéria circunstellar sob a forma de um disco de gás e poeira em torno das estrelas menos massivas ou como um envoltório circunstellar de grandes dimensões, de formato aproximadamente esférico em torno das estrelas de maior massa. Portanto, a evolução da proto-estrela ocorre de maneira distinta, de acordo com a massa do objeto. (Ortiz, 2014)

Por decorrência de sua maior massa, as protoestrelas massivas têm diferenças significativas em relação as protoestrelas de menor massa. Apesar de inicialmente terem aproximadamente a mesma temperatura de condensação, as de maior massa possuem maior raio e maior luminosidade.

Quando o equilíbrio hidrostático é atingido e a temperatura do núcleo das estrelas atinge cerca de 10 milhões de Kelvin, ocorre a fusão nuclear de hidrogênio em hélio, também conhecido como ciclo p-p. Após a ocorrência de fusão no núcleo da protoestrela, enormes quantidades de energia são geradas, onde são expulsos fótons, fazendo com que a protoestrela gere luminescência própria, se transformando assim em uma estrela.

Figura 3 - Esquema de formação das protoestrelas



Fonte: UFRGS.

A figura 3 acima ilustra bem como ocorre a formação das protoestrelas. Inicialmente, regiões de maior densidade em nuvens de gases geram uma maior atração de matéria do seu entorno gerando fragmentos das nuvens que com o passar do tempo e da ação da sua atração gravitacional, passaram a se moldar em formato esférico, gerando assim a protoestrela.

Segundo Ortiz (2014), alguns modelos teóricos indicam que à medida que a protoestrela estiver

contraindo, ela se move horizontalmente da direita para a esquerda no diagrama H-R. Isso se deve, pois o raio da protoestrela é inversamente proporcional ao quadrado da temperatura, ou seja, à medida que a temperatura aumenta, o raio diminuirá ao quadrado desse aumento.

2.3 Ciclos e reações nucleares: próton-próton, CNO, triplo- α , queima de Carbono e queima de Oxigênio

Levando em consideração a sua massa, os tipos de queima presentes numa estrela podem ser divididos de acordo com o intervalo da massa dessas estrelas. Segundo Arany-Prado (2017) estrelas de massas de até 0,5 massa solar (M_{\odot}) só queimam hidrogênio. Massas entre 0,5 M_{\odot} e 10 M_{\odot} queimam até o hélio e acima de 10 M_{\odot} a estrela passa por todos os tipos de queima.

A tabela abaixo descreve os tipos de ciclos e reações que ocorrerão na estrela, os átomos reagentes e seus produtos e a temperatura necessária para que ocorra tais transformações.

Tabela 1 - Ciclos e fusões presentes dentro das estrelas e a temperatura mínima necessária para que ocorram

<i>Nome do ciclo ou reação nuclear</i>	<i>“reagentes” e “produtos”</i>	<i>Temperatura mínima requerida (K)</i>
<i>Ciclo p-p</i>	$4\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$	$1,0 \times 10^7$
<i>Ciclo CNO</i>	$4\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$	$1,5 \times 10^7$
<i>Triplo-α</i>	$3 {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$ ${}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{16}_8\text{O}$	$1,0 \times 10^8$
<i>Fusão do Carbono</i>	${}^{12}_6\text{C} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg}$ ${}^{12}_6\text{C} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + {}^4_2\text{He}$ ${}^{12}_6\text{C} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{16}_6\text{Ne} + 2 {}^4_2\text{He}$	$8,0 \times 10^8$
<i>Fusão do Oxigênio</i>	${}^{16}_8\text{O} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S}$ ${}^{16}_8\text{O} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{28}_{14}\text{Si} + {}^4_2\text{He}$ ${}^{16}_8\text{O} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Mg} + 2 {}^4_2\text{He}$	$2,0 \times 10^9$

Fonte: Ortiz (2014).

Como dito anteriormente, quando a temperatura de 10 milhões de Kelvin é atingida, inicia-se a fusão de hidrogênio em hélio, mas por se tratar de uma estrela massiva, o peso exercido pelas camadas superiores ao núcleo faz com que a pressão e temperatura aumentem consideravelmente. Quando a temperatura do núcleo atinge por volta de 15 milhões de Kelvin, um novo ciclo ocorre simultaneamente ao ciclo p-p, o ciclo CNO, onde prótons se fundem com núcleos de isótopos de carbono, nitrogênio e

oxigênio. Esse ciclo passa a ser a principal fonte de energia dessa estrela massiva.

O ciclo p-p consiste na fusão de dois núcleos de hidrogênio ou prótons que geram um deutério, um pósitron e um neutrino, como demonstrado na figura 4. O pósitron entra em contato com um elétron presente no meio, o que gera um fóton energizado, já o deutério se funde novamente com um outro próton, gerando um Hélio-3, que conseqüentemente se funde com outro Hélio-3 formando enfim um Hélio-4 e dois prótons, assim como fótons energizados. Abaixo temos a descrição do resultado total desse ciclo e um esquema descritivo do ciclo:

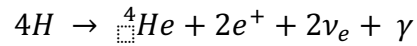
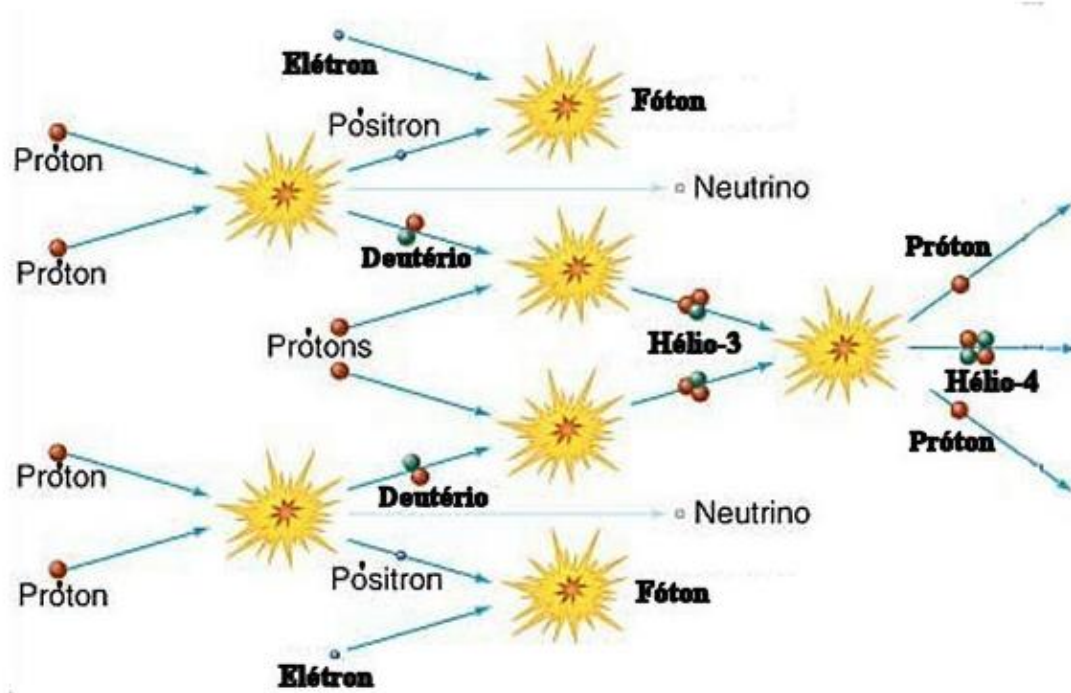
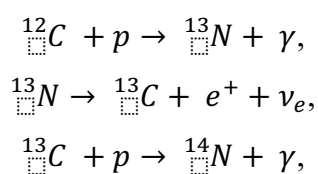


Figura 1 - Esquema do ciclo próton-próton



Fonte: Astro UFRGS.

Já o ciclo CNO é o predominante para o caso de estrelas massivas e tem esse nome pois são encontrados átomos de carbono, nitrogênio e oxigênio ao longo do processo. Este ciclo utiliza um carbono como catalisador, que ao longo do ciclo e com a adição de 4 núcleos de hidrogênio obtêm-se como resultado um Hélio-4 e o mesmo Carbono-12 utilizado no início do ciclo. Abaixo encontra-se cada uma das fusões presentes e um esquema do ciclo CNO, representado na figura 5.



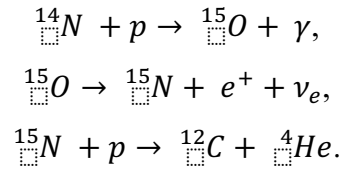
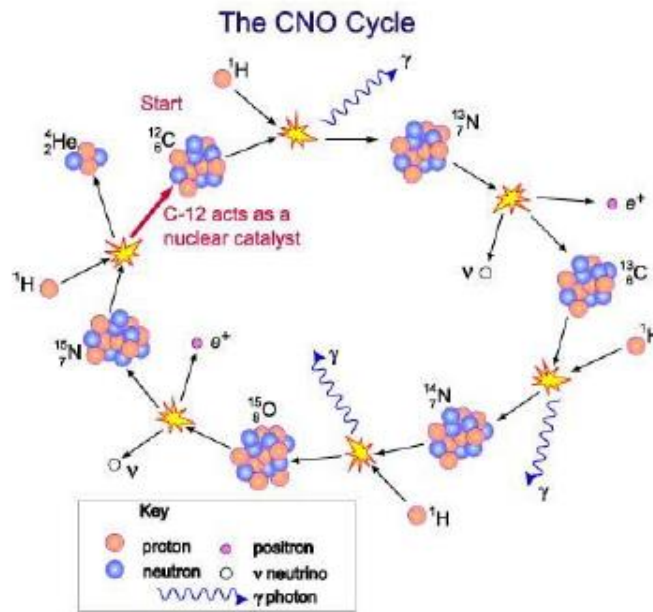


Figura 2 - Esquema do ciclo CNO. O Carbono-12 serve como catalisador de todo o processo e ao final é gerado um Hélio-4



Fonte: Australia Telescope Facility Nacional.

Por conta da maior massa, as estrelas massivas esgotam o hidrogênio de seu núcleo em poucos milhões de anos. Comparado as estrelas de menor massa, como o Sol, é um processo extremamente rápido, pois para o Sol fazer o mesmo processo são necessários bilhões de anos. Esse esgotamento faz com que a estrela tenha um núcleo cada vez mais denso, aumentando assim a pressão interna e gerando um aumento no tamanho da estrela, fazendo com que passe primeiramente a ser uma gigante, e caso tenha massa o suficiente, se torne uma supergigante.

Após o núcleo atingir aproximadamente 10^8K , inicia-se o ciclo triplo- α , que consiste na fusão de dois hélios num berílio (Be_8) que consequentemente se funde a um novo hélio, gerando assim um carbono (C_{12}) e energia em forma de fóton. Resumidamente 3 partículas alfa se fundem para formar um átomo de Carbono-12. Ademais, por conta do princípio de incerteza, que possibilita ressonâncias com energia levemente abaixo do limite, mais uma partícula alfa pode se fundir ao átomo de Carbono-12, gerando um átomo de Oxigênio-16. A fórmula química dessas reações e a figura 6 apresentando um diagrama esquemático deste ciclo se encontram abaixo:

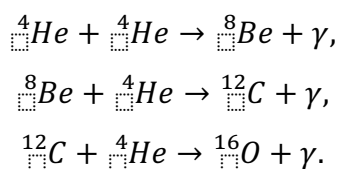
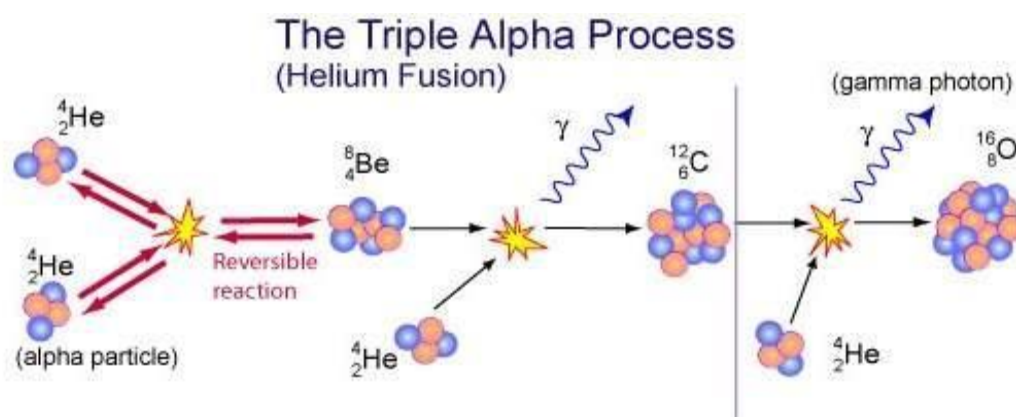


Figura 3 - Esquema das reações triplo-alfa, incluindo a possível reação de produção do Oxigênio



Fonte: Netnature (2013).

Estima-se que o tempo de queima desse ciclo é de apenas algumas centenas de anos, enquanto o ciclo de fusão para núcleos mais pesados está na casa de meses e dias. Logo, considerando os demais tempos necessários para fusão nuclear, pode-se aproximar o tempo de vida de uma estrela massiva ao tempo de queima do hidrogênio apenas.

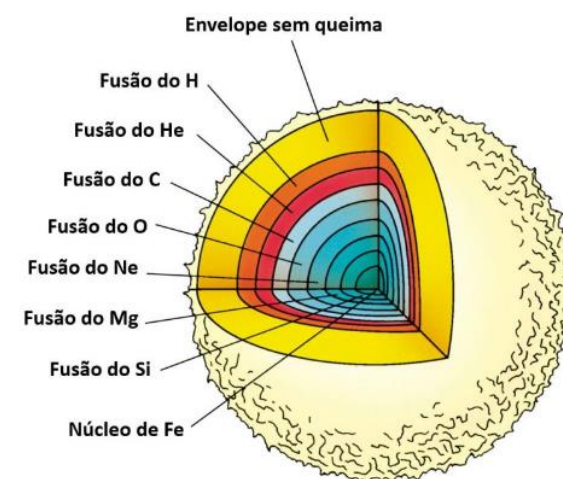
Por ocorrerem num espaço muito curto de tempo, as Queimas de Carbono e Oxigênio podem ocorrer de diversas formas possíveis, já que a mesma fusão de dois Carbono-12 pode gerar tanto um Neônio-20 e uma partícula alfa, quanto um Sódio-23 com um próton. O primeiro resultado possível se funde a partículas alfa, surgindo primeiro um átomo de Magnésio-24 e depois um átomo de Silício-28. Já para o segundo resultado o Sódio-23 se funde com um próton, gerando tanto um Neônio-20 com uma partícula alfa, quanto um Magnésio-24. Vale ressaltar que todas essas reações liberam fótons energizados.

Já para as fusões de Oxigênio pode resultar em Neônio-20, caso se funda com uma partícula alfa e, para fusões de dois oxigênios, pode-se ter como produto diversos átomos diferentes, tais como: Enxofre-32, Silício-28 com uma partícula alfa, Fósforo-31 com um próton ou um pósitron com neutrino e Silício-30 com dois prótons. Junto a isso, ocorrem fusões de átomos de Carbono-12 com Oxigênio-16, que podem ter como resultado Enxofre-28, Alumínio-27 com um próton, Magnésio-24 com uma partícula alfa ou Magnésio-27 com um nêutron. As fusões continuam ocorrendo entre os átomos gerados e os átomos catalisadores até atingirem o átomo de Ferro-56, um átomo altamente estável.

2.4 Início do fim da Estrela Massiva

É necessário enfatizar que apesar de no núcleo da estrela ocorrer fusão de elementos mais pesados, nas demais camadas ocorrem as outras fusões, gerando espécies de “camadas de uma cebola”. No centro realizam-se a fusão dos elementos mais pesados, como as que resultam em ferro e nas camadas seguintes as demais fusões, até chegar na parte mais externa, onde não há a fusão de hidrogênio em hélio. A imagem abaixo descreve como é o interior de uma estrela massiva nesse ponto:

Figura 4 - Esquema que demonstra a estrutura interna de uma estrela massiva no final de sua vida



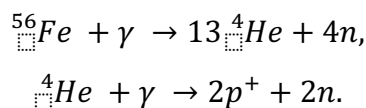
Fonte: Diana Andrade. Meteoríticas – Astronomia & Meteoritos (2020).

A partir da figura 7 vemos que no seu núcleo se encontra uma concentração de átomos de Ferro-56, e à medida que se passa uma camada cada vez mais externa, se encontra uma fusão de um átomo cada vez menos complexo, fazendo com que tenha essa aparência de camadas anteriormente mencionada.

Após análises, é detectado que à medida que um núcleo de maior massa é formado, menor é o tempo que leva para a queima dos materiais. Por exemplo, enquanto o hidrogênio demora milhões de anos para ser gasto, o do carbono demora por volta de 300 anos e o silício ocorre em apenas 2 dias. A conclusão que se chega é que quanto maior a massa de uma estrela, menor será seu tempo de vida, pois a força gravitacional gera pressão térmica contrária cada vez maior e mais rápida, atingindo temperaturas de fusão de elementos pesados mais rápido e consequentemente diminuindo o tempo de vida da estrela.

Ao final de toda a queima é gerado um núcleo de ferro, o elemento mais estável dos produzidos no núcleo estelar e cuja temperatura é na casa de unidades de bilhão de Kelvin. Devido a isso, os fótons altamente energizados entram em contato com o ferro fazendo com que se torne várias unidades de núcleos de hélio mais nêutrons. Após, o hélio gerado entrar em contato com outros fótons igualmente

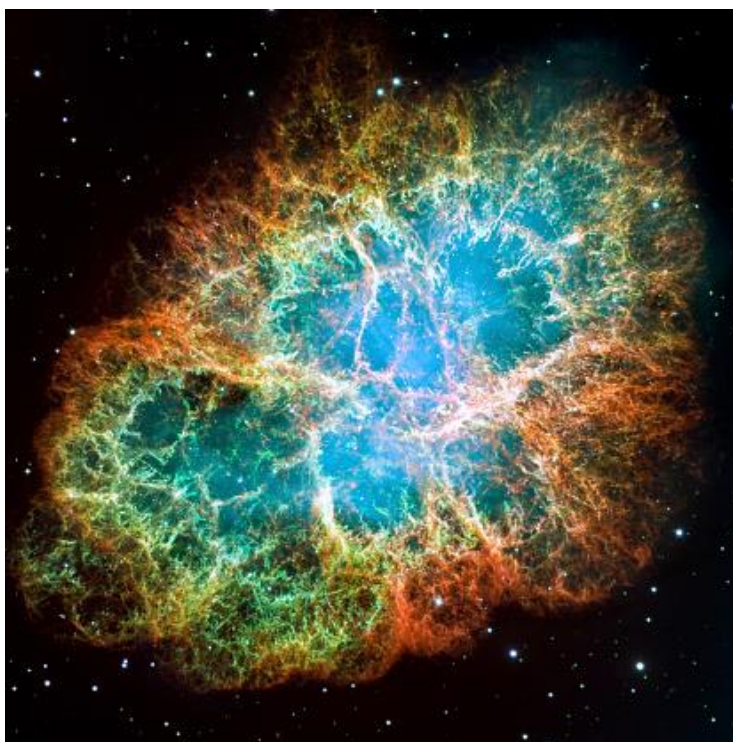
energizados, têm-se como resultado 2 prótons e 2 nêutrons. Abaixo encontram-se as reações descritas:



Essa reação é chamada de fotodesintegração e é considerada endotérmica, isto é, que absorve energia, pois faz o processo inverso das reações exotérmicas que estavam sendo feitas pelo núcleo. Por consequência disso, o equilíbrio hidrostático do núcleo é comprometido, fazendo com que as camadas superiores colapsem em cima do núcleo. Quando a temperatura do núcleo atinge 8 bilhões de Kelvin e a sua massa ultrapassa o limite de Chandrasekhar, da ordem de 1,38 massas solares, os prótons gerados na fotodesintegração se combinam com os elétrons livres, gerando nêutrons e neutrinos.

Esse colapso só é interrompido quando o núcleo atinge a densidade de aproximadamente $8 \times 10^{14} \text{ g. cm}^{-3}$. Nessa densidade os nêutrons não podem ficar mais próximos devido ao Princípio de Exclusão de Pauli, gerando uma onda de choque que se espalha para fora da estrela e leva consigo grande parte do seu volume e massa. O que resta é apenas um núcleo feito de nêutrons extremamente denso. Essa explosão gerada pela onda de choque é mais conhecida como supernova.

Figura 5 - Foto da nebulosa do caranguejo, remanescente de uma explosão de supernova



Fonte: Nasa ESA J. Hester (Universidade do Estado do Arizona).

Nota: Historiadores acreditam que a supernova foi documentada por astrônomos chineses e árabes em 1054. No seu centro encontra-se um Pulsar oriundo de sua estrela progenitora.

2.5 Supernovas

As supernovas são separadas em 2 tipos dependendo se são encontradas ou não linhas de absorção de hidrogênio no espectro de uma supernova. As de tipo I não contém linhas de absorção por

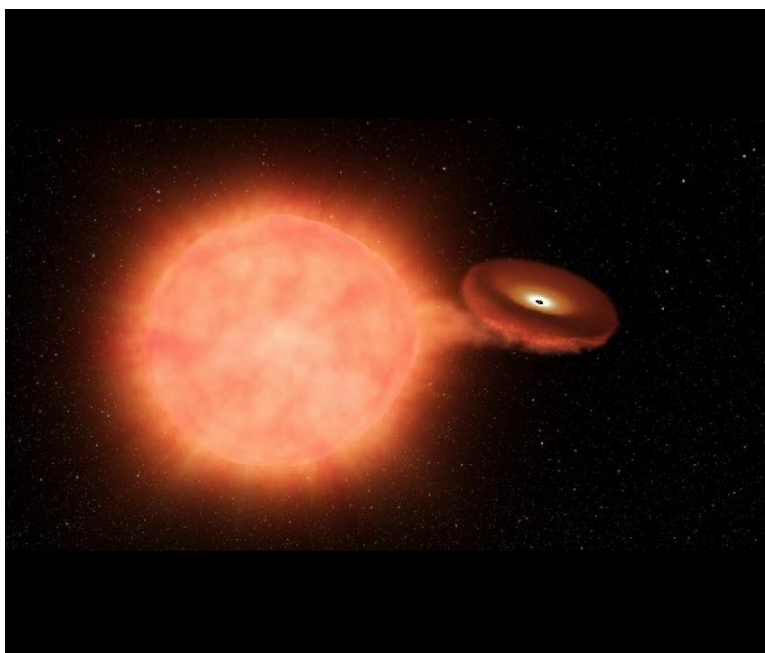
hidrogênio, enquanto as de tipo II possuem linhas de absorção de hidrogênio muito alargadas.

As de tipo I podem ser divididas em 3 classes, Ia, Ib e Ic, enquanto as de tipo II são divididas entre II-P, II-L e II-n. Somente as supernovas de tipo Ia decorrem da explosão de uma anã branca, enquanto as demais são decorrentes de uma estrela gigante supermassiva.

A supernova Ia é derivada de uma anã branca num sistema binário acompanhada de uma outra estrela gigante. Devido à alta densidade da anã branca, a atração gravitacional é tamanha que massa da estrela gigante companheira é assimilada pela anã branca. À medida que a estrela companheira da anã branca acrescentar massa nela, eventualmente a sua massa pode ultrapassar o limite de Chandrasekhar para anãs brancas, que é aproximadamente 1,4 massas solares. Ao ocorrer isso, a temperatura aumenta consideravelmente e pelo fato da anã branca não ter a mesma capacidade de uma estrela comum de expandir e se resfriar, ocorre uma reação em cadeia que gera uma explosão dessa anã branca em uma supernova. Existe também outra forma rara disso ocorrer, na qual duas anãs brancas se fundem, fazendo com que o corpo celeste resultante ultrapasse o limite de Chandrasekhar e ocorra o mesmo descrito anteriormente.

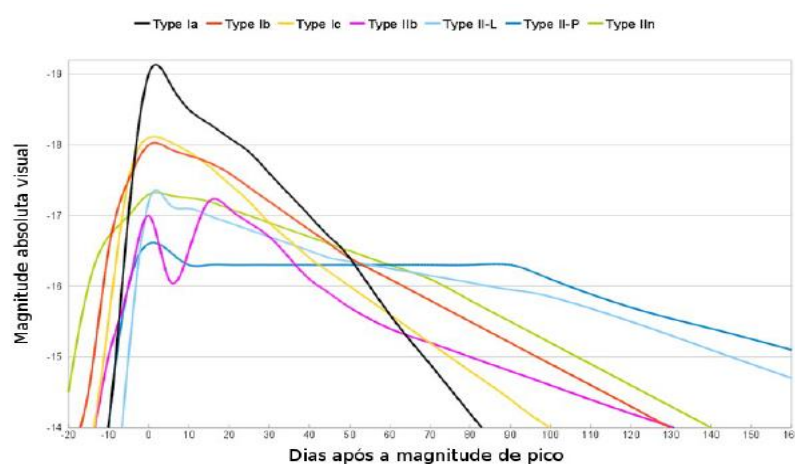
Já as demais Supernovas de tipo Ia, Ib e Ic são também oriundas de estrelas massivas que ejetaram a camada externa de hidrogênio, e são separadas de acordo com as faixas de absorção encontradas no espectro de onda da Supernova. A Ib e a Ic se diferenciam da Ia por conta da falta de uma faixa de absorção de Silício isoladamente ionizado, e por conterem faixas de elementos como oxigênio, cálcio e magnésio, enquanto as de Ia são predominantemente de ferro. Supernovas de tipo Ib se diferenciam das de Ic, pois a primeira possui faixas de hélio enquanto a segunda não possui.

Figura 6 - Representação artística uma anã-branca crescendo massa de um Gigante Vermelha companheira



Já as supernovas de tipo II podem ser divididas em 3/4 classes, separadas de acordo com o comportamento da curva de luz, que se trata de um gráfico de luminosidade em função do tempo, a figura 10 auxilia a ilustrar o comportamento da luminosidade dessas supernovas. As de tipo II-P ou II-platô, possuem uma queda de luminosidade bem lenta e gradativa, as de tipo II-L ou II-Linear tem uma diminuição da luminosidade de forma linear em função do tempo e as de tipo II-n ou II-Narrow possuem linhas espectrais de hidrogênio finas em contraste com as normais faixas espectrais do tipo II. Ademais, há uma quarta classe, a de tipo IIb, que consiste numa estrela massiva que possuía uma fina camada externa de hidrogênio e que inicialmente emitia finas faixas de absorção de hidrogênio, mas que com o passar do tempo atinge um segundo pico da curva de luz e passa a ter um comportamento semelhante a uma supernova de tipo Ib.

Figura 10 - Gráfico demonstrativo para comparação das curvas de luz dependendo de cada tipo de supernova



Fonte: Ortiz (2014).

2.6 Resultado de uma supernova: Estrela de nêutrons e Buracos Negros

Como resultado de uma supernova, o núcleo da estrela que passa pela explosão pode gerar dois tipos de corpos possíveis, as estrelas de nêutrons e os buracos negros. As estrelas de nêutrons são os núcleos remanescentes da estrela que gerou a supernova, onde, como o nome diz, são feitos dos nêutrons remanescentes da fotodesintegração. É necessário enfatizar que apesar da nomenclatura “estrela”, pelo fato de não ocorrer a fusão nuclear internamente, elas não podem ser consideradas como tal.

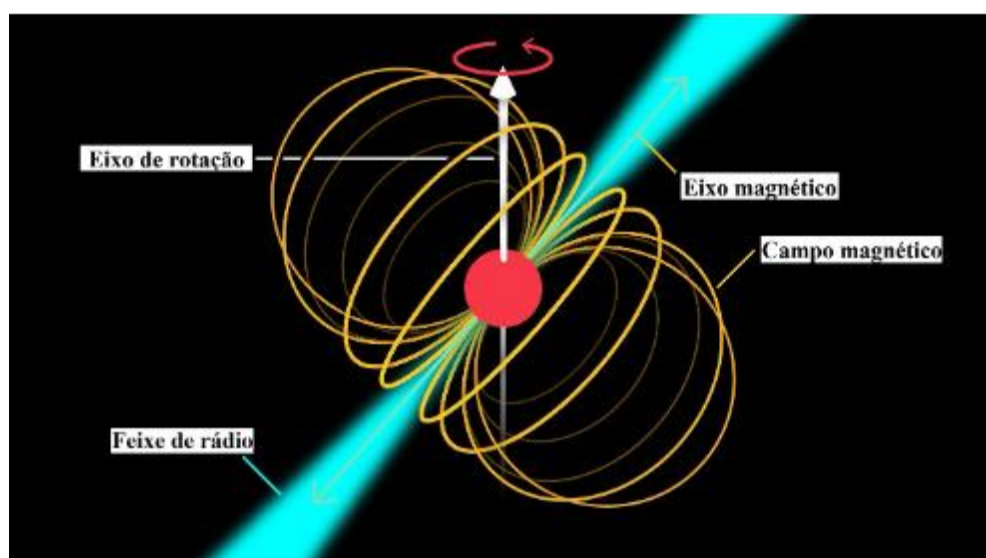
As estrelas de nêutrons se mantêm em equilíbrio hidrostático devido à pressão de degenerescência resultante do Princípio de Exclusão de Pauli. Essa pressão se equilibra com a ação da gravidade, evitando o seu colapso. Em relação ao tamanho que uma estrela de nêutrons normalmente tem, Ortiz (2014) aponta que *“comparando-se a massa e a gravidade do núcleo da estrela precursora com a densidade necessária para haja degenerescência neutrônica, pode-se estimar o tamanho de uma estrela de nêutrons, o qual resulta ser de 11 ~ 12 quilômetros de raio”*.

Dentre as estrelas de nêutrons, caso haja uma rotação em volta de seu eixo, ela passa a ser conhecida como pulsar, pois emite pulsos regulares de radiação em altas faixas espectrais. Foi descoberta ao acaso por Jocelyn Bell (1943-), em 1967, enquanto observava quasares com seu radiotelescópio e acabou notando uma fonte de pulsos regulares com mesmo período entre eles. Após um tempo observou outra fonte com comportamento idêntico em outra direção do céu, observações essas que culminaram na descoberta do Pulsar.

Devido a configuração única de seu campo magnético fruto de sua composição e sua alta rotação, produzem jatos de radiação de seus polos que varrem e percorrem distâncias astronômicas, como se fosse um farol. A radiação gerada pelo Pulsar é oriunda da radiação síncrotron emitida pelas partículas presas no campo magnético da estrela de nêutrons somada a radiação térmica resultante da colisão das partículas com a superfície da estrela. Por conta do forte campo magnético, a radiação é expelida somente pelos polos do pulsar. A figura 11 ilustra bem a estrutura de um pulsar.

Já o outro resultado de uma supernova e o foco de nosso trabalho, são os buracos negros. Caso a massa do núcleo da estrela massiva ultrapasse o limite de Volkoff-Oppenheimer de aproximadamente $3 M_{\odot}$, a maior massa que uma estrela de nêutrons pode ter, o núcleo colapsará em seu próprio peso, pois a ação da força da gravidade direcionada para o centro venceria a pressão de degenerescência do Princípio de Exclusão de Pauli. Como resultado, a gravidade do buraco negro gerado é tamanha que nem mesmo a luz consegue escapar dele, fazendo com que não haja emissão de radiação por parte do buraco negro, por isso o termo “negro”.

Figura 11 - Estrutura de uma estrela de nêutrons que rotaciona em torno de seu eixo, configurando um pulsar



Fonte: Scientific American (2015).

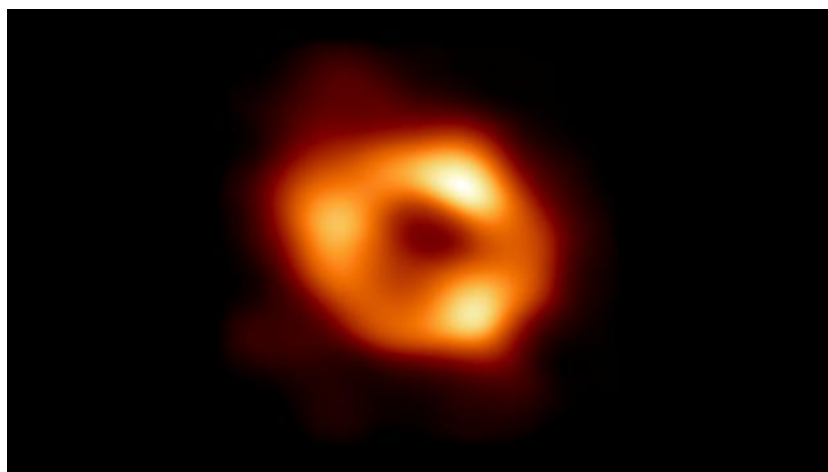
A distância do centro do buraco negro até onde a radiação gerada permanece confinada é chamada de horizonte de eventos, sabendo que o raio de Schwarzschild para o sol é igual a 2,95 km, utilizando-se da equação podemos calcular o raio do horizonte de eventos para buracos negros de outras massas. Substituindo na equação temos que:

$$R_{HE} = M 2,95 \frac{km}{M_{\odot}},$$

sendo M a massa do buraco negro dada em M_{\odot} . Com isso podemos estabelecer uma relação direta do raio do horizonte de eventos com a massa do buraco negro em questão. Quanto maior a massa do buraco negro, maior será seu horizonte de eventos.

Apesar de toda a teoria já prever a existência de buracos negros e todo o conhecimento sobre a evolução estelar considerar os buracos negros como um possível final da vida de uma estrela massiva, foi somente após a publicação em 2019 da foto do buraco negro supermassivo presente no centro da galáxia Messier 87 (M87) que tivemos comprovação visual de que buracos negros existem e que buracos negros gigantes são encontrados no centro das galáxias. Posteriormente, em 2022 foi publicada uma imagem do buraco negro supermassivo presente no centro de nossa galáxia, a Via-Láctea, chamado de Sagittarius A (figura 12).

Figura 7 - Foto obtida do disco de acreção de Sagittarius A, o buraco negro supermassivo presente no centro da Via-Láctea



Fonte: Colaboração Horizonte de Eventos EHT, ESO/M. Kornmesser.

Em relação a Sagittarius A, é possível calcular a sua massa, pois há uma estrela próxima que orbita o buraco negro e que possui um período de aproximadamente 15 anos terrestres. Como sua órbita é elíptica e o buraco encontra-se em um de seus focos, podemos encontrar sua massa a partir das leis de Kepler e do que conhecemos da gravitação Newtoniana, com isso, descobriu-se que a massa de Sagittarius A é de aproximadamente 4 milhões de massas solares.

Para estimar a massa de um buraco negro supermassivo em outra galáxia é utilizado o mesmo método, observando uma ou mais estrelas próximas a ele e como configura o seu movimento orbital. Por exemplo, o buraco negro supermassivo no centro da galáxia M87 anteriormente mencionado tem a massa estimada entre 3,5 e 6,5 bilhões de massas solares.

O primeiro buraco negro estelar a ser encontrado foi na década de 1970, quando observaram que existiam várias fontes de raios-X espalhados pelo universo. Ao analisarem melhor perceberam que a maioria dessas fontes se relacionam com estrelas de nêutrons em sistemas binários, entretanto a massa estimada da maior parte dessas estrelas ultrapassava o limite de Volkoff-Oppenheimer, portanto, teoricamente, se tratava de um buraco negro.

A primeira fonte minuciosamente analisada foi a Cygnus X-1, um sistema binário de estrelas onde temos uma estrela supergigante e outra não visível. Porém com o passar do tempo foi observado que o período desse sistema é de apenas 5/6 dias. A partir da conhecida terceira lei de Kepler, é possível calcular que a massa da estrela “invisível” é de 15 massas solares. Logo, uma estrela de tamanha massa não poderia ser captada a não ser se fosse um buraco negro.

A emissão de raio-X desse sistema provavelmente origina-se de um disco de acreção que gira em torno do buraco negro. Segundo esse modelo, a estrela supergigante perde massa, que é atraída para o buraco negro. No entanto, ao invés de cair diretamente, a matéria forma um disco de gás ionizado em órbita em torno do buraco negro. O movimento das cargas aceleradas na parte mais interna desse disco (prótons e elétrons do plasma) gera emissão de radiação em um amplo espectro de frequências (Ortiz, 2014).

Figura 13 - Representação artística de Cygnus X-1



Fonte: Blogspot Humberto Souza. Divulgação Científica (2012).

Nota: Mostra o buraco negro, seu disco de acreção e a estrela companheira que alimenta o buraco negro.

Com a observação dos buracos negros presentes no nosso universo, é possível observar que encontramos majoritariamente dois tipos. O primeiro é o já muito bem conhecido, o buraco negro estelar, produzido pela evolução das estrelas anteriormente descritas, cujas massas costumam variar de

unidades a poucas centenas de massas solares. Já o segundo tipo é o misterioso buraco negro supermassivo, que normalmente possui milhões ou bilhões de massas solares.

Entretanto, não se encontra facilmente buracos negros de massa intermediária, entre milhares e centenas de milhares de massas solares. Uma teoria que pode justificar a sua dificuldade é que eles são extremamente difíceis de serem captados. Buracos negros estelares são mais facilmente encontrados e analisados quando são acompanhados de outras estrelas, formando um sistema binário, pois tanto a luminosidade da estrela vizinha quanto a radiação gerada pela acreção tornam possível a detecção. Já em relação aos buracos negros supermassivos, caso seja um tipo de buraco negro conhecido como AGN ele possui um disco de acreção que, simultaneamente, aumenta sua massa e gera luminosidade, possibilitando sua observação.

Para o caso de buracos negros intermediários, sua massa não é alta o suficiente para estar no centro de uma galáxia. Por possuir uma massa bastante elevada quando comparada com a de um buraco negro estelar, possibilita imaginarmos que os corpos de sua vizinhança já foram acrescidos a sua composição, portanto, não possui matéria em torno que consegue gerar um novo disco de acreção e luminosidade para sua detecção.

Outra teoria é que caso a acreção de um buraco negro no centro de uma galáxia seja suficientemente rápida, então um buraco negro intermediário seria observado como um estado transitório até um buraco negro supermassivo, o que justificaria a dificuldade de sua observação.

Retomando os buracos negros supermassivos, muitos mistérios os cercam, afinal de contas, se buracos negros surgem de estrelas massivas que após finalizarem seu tempo de vida tem seu núcleo implodido gravitacionalmente, como um buraco negro de milhões ou bilhões de massas solares seria formado? Existem estrelas tão massivas que virariam esses gigantes negros? De que maneira esses gigantes influenciam na formação e composição das galáxias? E se teoricamente são o fim de tudo, pois sua atração gravitacional faz crescer cada vez mais massa, é correto dizer que são corpos eternos, ou seja, que permanecerão dessa forma até o fim do universo?

O próximo capítulo buscará responder a essas perguntas.

CAPÍTULO 3: Buracos negros supermassivos, AGNs e modelos de formação

3.1 Modelos de formação dos buracos negros supermassivos

3.1.1 Acreção do buraco negro supermassivo

Antes de apresentar os modelos teóricos de formação dos buracos negros supermassivos é necessário compreendermos como que se deve esse acréscimo de massa ao longo do tempo. Para isso, focaremos no modelo de acreção formulado por Hermann Bondi (1919 – 2005), em 1952. Um modelo mais simples, que não considera situações relativísticas e que consiste num gás contínuo que é acrescentado pelo buraco negro e é descrito pelas equações de um fluido perfeito, continuidade e fluxo de momento (Bondi, 1952).

Além disso, possui outros fatores considerados no modelo, sendo eles: a simetria esférica do gás; o fato de serem um regime estacionário; o gás estar em repouso a longas distâncias do buraco negro; a massa acrescentada consideravelmente inferior ao do buraco negro; e a única força presente é a gravitacional exercida pelo buraco negro. Dessa forma, apesar de não ser correspondente com a realidade, são feitas aproximações satisfatórias dos resultados encontrados.

A partir desse modelo serão encontradas equações que conseguem calcular a massa de um buraco negro crescendo ao longo do tempo, podendo assim explicar a possibilidade da existência de corpos de tamanha massa.

Segundo Madejsky (2018), nuvens de gás tomadas pela ação da gravidade do buraco negro colidem com outras nuvens, ocorrendo uma diminuição do momento angular de ambas, com isso, as órbitas desses gases em relação ao buraco negro se tornam cada vez mais circulares até gerar um disco de acreção. Outros objetos como estrelas próximas são assimiladas a partir de sua desconfiguração, devido à ação da força de maré presente caso o corpo celeste esteja a uma distância do buraco negro menor que o seu raio de Roche.

O raio ou limite de Roche foi proposto pelo físico e astrônomo francês Édouard Roche (1820 – 1883). Esse limite consiste na distância mínima que um objeto orbitando ou se aproximando de outro corpo com maior força gravitacional pode estar para não ocorrer uma desintegração da sua composição devido às forças de maré. Isso se deve, pois, a força gravitacional exercida pelo corpo principal é maior que a própria força gravitacional que mantêm a estrutura do corpo secundário. Roche então definiu matematicamente esse limite como sendo:

$$d_R = 2,45R_S \left(\frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3},$$

onde ρ_M é a densidade média do buraco negro, ρ_m a densidade do corpo secundário e r_S o raio de Schwarzschild.

Consequentemente, para o caso de um buraco negro que se alimenta na taxa máxima, a sua massa

é aumentada exponencialmente. Utilizando o modelo de acreção de Bondi, anteriormente mencionado, a equação que descreve a relação da massa de um buraco negro em relação à passagem de tempo é dada por:

$$M_{bn}(t) = M_0 e^{(t-t_i)/\tau}, \quad (1)$$

onde τ é dado por:

$$\tau = \frac{\sigma_T c}{4\pi G m_p},$$

sendo σ_T a seção de choque de Thomson, $m_p = 1,67 \times 10^{-27} kg$ a massa do próton, c a constante de velocidade da luz e G a constante gravitacional. Ao substituirmos valores, essa grandeza fica na ordem de dezenas a centenas de milhões de anos. Dessa forma, percebemos que o τ é diretamente proporcional ao tempo necessário para o buraco negro atingir determinada massa, já que quanto maior o τ , maior será o intervalo de tempo.

3.1.2 Modelo teórico do buraco negro semente

A teoria mais conservadora da origem de um buraco negro supermassivo defende que um buraco negro estelar como conhecemos é gerado no início do universo e cresceu em massa ao passar do tempo até chegar ao seu estado atual (Steiner, 2010). Sua acreção pode ter ocorrido tanto pela captura de gases de nuvens e estrelas de sua vizinhança, quanto pela assimilação de outros buracos negros menores. A partir desse modelo, as primeiras estrelas do universo teriam passado por todo o seu ciclo de vida, de maneira próxima ao que foi estudado no capítulo 2 deste trabalho, e ao fim de sua vida teriam gerado uma supernova resultando num buraco negro de origem estelar.

Com isso, considerando um buraco negro de massa próxima de 10 massas solares produzido nas primeiras centenas de milhões de anos e se alimentando a uma taxa alta de acreção, ele pode chegar a bilhões de massas solares em bilhões de anos.

Em seu trabalho, Inacio (2022) calculou a massa mínima necessária para que um buraco negro atingisse a massa de 3 bilhões de massas solares a partir de diferentes parâmetros pré-estabelecidos por ela. Para isso ela utilizou a equação para a idade do universo utilizando dois valores de *redshift* arbitrários encontrando assim um intervalo de tempo para que haja a formação desse buraco negro.

Partindo da mesma metodologia dela e considerando um buraco negro de massa inicial de 10 massas solares, um $\tau = 10^8$ anos e a massa final do buraco negro de 3 bilhões de massas solares, podemos encontrar o tempo necessário para que o buraco negro passe a ter essa massa acrescentada. Substituindo os valores para a equação (1).

$$M(t) = M_0 e^{(t-t_i)/\tau}$$

$$3 \times 10^9 = 10 e^{\Delta t / 10^8}$$

$$3 \times 10^8 = e^{\Delta t / 10^8}$$

$$\ln(3 \times 10^8) = \frac{\Delta t}{10^8}$$

$$\Delta t = 10^8 \cdot 19,52 \approx 2 \times 10^9 \text{ anos}$$

Nessa taxa de acreção um buraco negro de 10 massas solares passaria a ter 3 bilhões de massas solares em aproximadamente 2 bilhões de anos. Considerando taxas de acreção diferentes, com τ maiores e menores, temos situações diferentes. Abaixo encontram-se duas tabelas que mostram o tempo necessário para atingir 3 bilhões de massas solares, sendo a tabela 2 com massas iniciais diferentes e mesmo τ e a tabela 3 com τ diferentes e mesma massa inicial.

Tabela 2 - Tempos necessários diferentes com massas diferentes, mas mesmo tempo τ

Massa inicial (M_{\odot})	τ (anos)	Δt (anos)
10 M_{\odot}	10^8	2×10^9 anos
30 M_{\odot}	10^8	$1,84 \times 10^9$ anos
100 M_{\odot}	10^8	$1,72 \times 10^9$ anos
1000 M_{\odot}	10^8	$1,49 \times 10^9$ anos

Fonte: O autor (2024).

Tabela 3 - Tempos necessários diferentes com mesma massa, mas tempo τ diferentes

Massa inicial (M_{\odot})	τ (anos)	Δt (anos)
30 M_{\odot}	4×10^7	$7,37 \times 10^8$ anos
30 M_{\odot}	7×10^7	$1,29 \times 10^9$ anos
30 M_{\odot}	10^8	$1,84 \times 10^9$ anos
30 M_{\odot}	$1,5 \times 10^8$	$2,76 \times 10^9$ anos
30 M_{\odot}	2×10^8	$3,68 \times 10^9$ anos

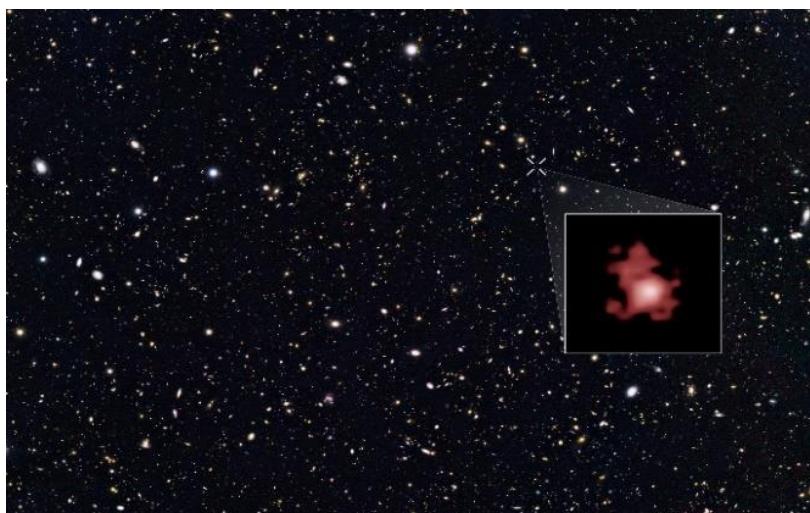
Fonte: O autor (2024).

Ao analisarmos as tabelas, podemos ver que a influência da massa inicial do buraco negro na escala de massas de buracos negros estelares não altera tanto o tempo necessário, quando comparado com τ diferentes. Apesar de encontrarmos valores diferentes, o tempo necessário ainda está dentro da idade do universo, portanto seria esse modelo suficiente para explicar todos os buracos negros supermassivos do universo?

Infelizmente o universo não é tão simples, pois são detectadas galáxias quasares que possuem *redshift* altíssimos, na ordem de $z > 7$, o que indica que pela lei de Hubble, essas galáxias estão extremamente longe da Terra, sendo de épocas do início do universo, mais precisamente na ordem de

centenas de milhões de anos de idade. Nessas galáxias são encontrados buracos negros supermassivos de massa na ordem de bilhões de massas solares. Sendo assim, como é possível existir buracos negros tão grandes sem haver tempo o suficiente para que eles acresçam matéria?

Figura 14 - Imagem da Galáxia GN-z11 de massa de aproximadamente um bilhão de massas solares



Fonte: NASA. Oesch; Brammer; Van Dokkum; Illingworth via Wikimedia Commons

Nota: Estima-se que a luz dessa galáxia que captamos é de quando tinha apenas 400 milhões anos, ou seja, nos primórdios do universo.

Uma teoria para responder essa questão é que nos primeiros anos do universo existiam estrelas extremamente massivas da ordem de centenas a milhares de massas solares, que após ocorrerem as suas supernovas, deixaram como resultado buracos negros estelares 10 a 100 vezes mais massivos que os conhecidos atualmente. Além disso, como no início do universo a massa ainda não havia dispersado tanto como é hoje, podemos considerar uma maior densidade de matéria em torno desses buracos negros, portanto as taxas de acreção desse período possivelmente eram muito maiores que as estipuladas em teorias como a anteriormente dita.

Considerando uma massa inicial maior devido as estrelas bem mais massivas que as vistas hoje e uma taxa de acreção que cresce massa mais rapidamente ao buraco negro, então não é impossível considerar essa possibilidade.

Outra teoria considera a presença de minihalos de gases de massas na ordem de centenas de milhares a milhões de massas solares. Neles podem ter surgido as primeiras estrelas e consequentemente, os buracos negros gerados nesses minihalos podem ter massas muito superiores as já conhecidas, possibilitando um crescimento rápido a ponto gerar um buraco negro supermassivo numa idade tão jovem do universo.

Segundo Madejsky (2018) esses minihalos de gases poderiam ter sido os berços das galáxias, pois a partir da teoria, os buracos negros formados nessa nuvem de gás estariam localizados no centro, de forma a gerar um grande buraco negro no núcleo desse minihalo que acresceria massa nele ao longo do tempo. Com o tempo esse minihalo se tornaria a nuvem de gás e estrelas que estão presas ao buraco

negro do centro da galáxia.

3.1.3 Modelo teórico dos buracos negros primordiais

Existe outra teoria bastante excêntrica, a da existência de buracos negros primordiais, criados pelo excesso de matéria nas primeiras frações de segundo após o Big Bang (Guariento, 2010). Essas regiões com excesso de matéria poderiam ter atração gravitacional maior que a expansão do universo naquele momento, gerando corpos com massas muito superiores aos buracos negros estelares, possibilitando um crescimento rápido o suficiente para resultar nos buracos negros supermassivos vistos atualmente.

Apesar de nunca ter sido comprovada, a teoria dos buracos negros primordiais tem consequências interessantes tanto para a sua confirmação quanto para sua negação. Caso existam tais objetos, suas propriedades os tornam fontes interessantes para diversas áreas da Física, como o colapso gravitacional, a física em altas energias, o Universo jovem e até mesma a Gravitação Quântica. Entretanto caso seja demonstrado como inviável, a sua não existência estipula limites das teorias cosmológicas (Guariento, 2010).

Segundo a teoria dos buracos negros primordiais, caso o raio de uma região com alta densidade ρ , formada por partículas de massa μ a uma temperatura T ultrapasse o comprimento de Jeans λ_J , a energia térmica e a expansão serão vencidas pela pressão gravitacional, gerando um colapso que resulta num buraco negro de diferentes massas possíveis.

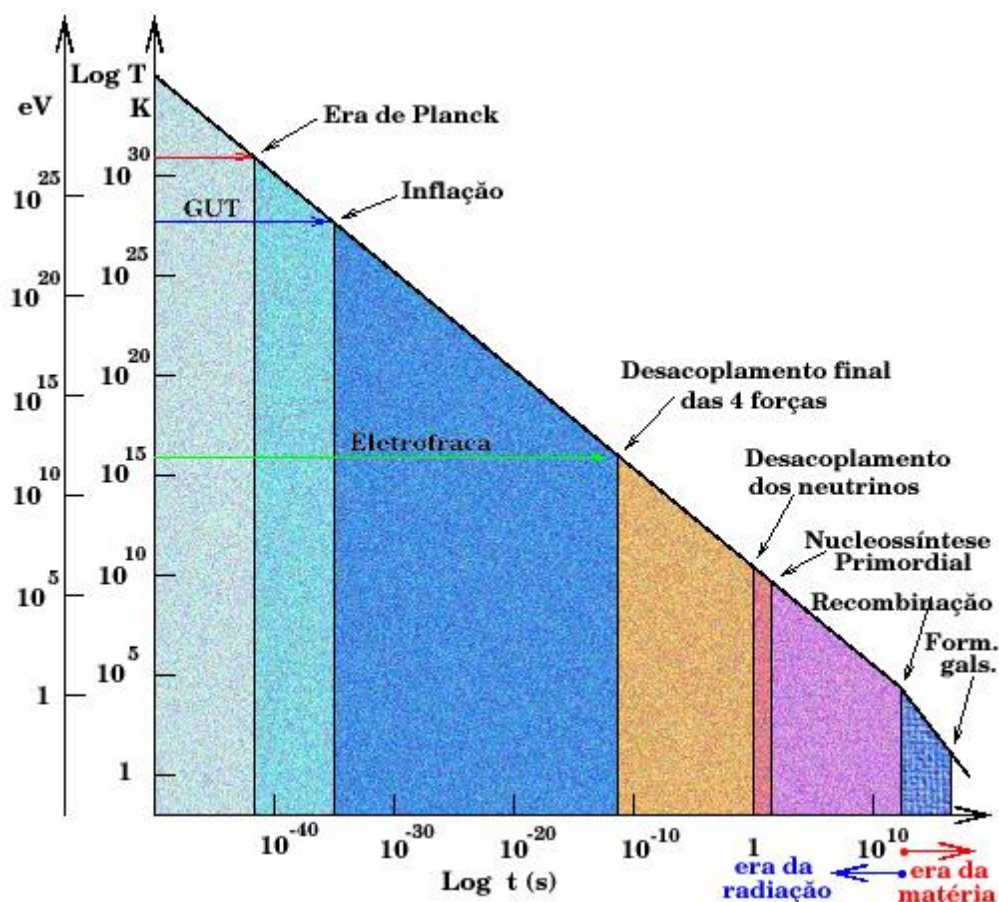
Formulado por James Jeans (1877 – 1946), o comprimento de Jeans é o raio crítico de uma região de gás molecular ou poeira do meio interestelar onde a pressão térmica que expande a nuvem é igualada a atração gravitacional da própria massa da nuvem, gerando assim um colapso gravitacional do corpo. A equação do Comprimento de Jeans é dada por:

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{15k_B T}{4\pi G \mu \rho}},$$

onde $k_B = 1,38 \times 10^{-23} J/K$ é a constante de Boltzmann e G é a constante gravitacional.

Apesar de aparentar ser improvável, os buracos negros primordiais podem ter existido caso respeitem os limites da causalidade, ou seja, um buraco negro primordial não pode se formar com uma massa maior que da ordem de massa contida no horizonte de partículas na época de sua formação.

Figura 15 - Gráfico que demonstra as eras iniciais do universo, desde antes do primeiro segundo até o início da era da matéria, a qual nos encontramos hoje



Fonte: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – USP.

Ao compararmos a massa contida num horizonte possível com a massa de um determinado buraco negro de mesmo raio, percebemos que as massas dos buracos negros, que são dadas em grama e que podem ser gerados dependem do tempo do universo e são dadas pela seguinte equação (Guariento, 2010):

$$m \approx t \approx 10^{15} g \left(\frac{t}{10^{-23} s} \right)$$

A partir dessa equação, a variação da massa dos buracos negros gerados nesses instantes, teoricamente, abrange de centenas de milésimos de gramas para casos na época de Planck até centenas de milhares de massas solares em momentos mais próximos do primeiro segundo do universo. Em casos extremos, até o final da era da radiação, pode atingir massas de 10^{17} massas solares, porém nunca foi visto um buraco negro com tamanha massa, tornando-o extremamente improvável.

Uma consequência interessante da existência dos buracos negros primordiais das mais diversas massas é que devido a evaporação Hawking, o buraco negro perde massa a partir da radiação e podem terminar em fortes explosões que deixam matéria desconhecida no universo. Como sabemos que a

radiação Hawking ocorre de forma lenta e é inversamente proporcional a massa do buraco negro, no caso de buracos negros primordiais de pequenas massas, a radiação Hawking pode ter gerado a destruição de diversos micro buracos negros nos primeiros instantes do universo (Onody, 2021). Com isso, alguns físicos acreditam que os remanescentes de buracos negros que passaram por todo o processo de perda da radiação Hawking podem ser candidatos para a matéria escura (Guariento, 2010). A teoria da radiação Hawking vai ser mais bem explicada na seção 3.3.

Apesar de bastante improvável, a teoria dos buracos negros primordiais, caso seja comprovada, pode explicar algumas das maiores dúvidas existentes sobre a origem do universo, matéria escura e tantas outras teorias. Além de ser mais uma possibilidade de explicação para os buracos negros supermassivos de idades baixas, como o anteriormente mencionado GN-z11 (figura 13).

3.2 Tipos de Buracos Negros Supermassivos

Buracos negros supermassivos só são encontrados nos centros das galáxias e seu horizonte de eventos pode ultrapassar bilhões de quilômetros de diâmetro. Em comparação, o raio de Schwarzschild ou o horizonte de eventos para buracos negros estelares são na ordem de dezenas ou centenas de quilômetros.

É importante salientar que as galáxias são classificadas com base na ação e tipo de buraco negro supermassivo presente no seu centro. Caso o seu núcleo não esteja crescendo matéria, essa galáxia é classificada como uma galáxia não ativa. Já para buracos negros supermassivos que crescem em massa são chamados de AGN (*Active Galactic Nuclei*) ou núcleos galácticos ativos.

Segundo Mo et al (2010), todos os AGNs possuem características em comum, como: uma região nuclear compacta muito brilhante; emissão de radiação não-termal; fortes linhas de emissão e variabilidade na emissão de contínuo; e/ou linhas em escala de tempo relativamente pequenas.

Nas regiões próximas do AGN são encontradas grandes concentrações de poeira e gases estelares. Esse material em torno do núcleo rotaciona de forma extremamente acelerada, gerando um disco de matéria que à medida que se aproxima do centro esquentando, por conta do atrito entre as partículas presentes, havendo assim emissão de raios X e raios gama. Isso ocorre devido a interação de elétrons com velocidades próximas a da luz que geram fótons com altas energias que são ejetadas perpendicularmente ao plano da galáxia. Por consequência, essas partículas são colimadas e aceleradas pelo campo magnético do buraco negro, gerando um jato relativístico de ondas de rádio por síncrotron.

Vale mencionar que ao observarmos AGNs podemos encontrar linhas de emissão de duas formas, sendo elas linhas permitidas e linhas proibidas. A primeira é produzida por transições normais de estados, onde um átomo passa de um estado mais excitado para um menos excitado, liberando um fóton. Já a segunda é gerada pelo mesmo processo, porém o estado excitado é chamado de metaestável. A diferença de um estado excitado normal para um metaestável é o tempo médio de vida de um átomo no estado em questão. Um estado normal tem um tempo na ordem de 10^{-8} s enquanto um estado

metaestável é da ordem de 1 s.

Como não são todas as galáxias que podemos detectar essas emissões de rádio, foi gerada uma classificação de AGNs, a partir das características em relação a sua luminosidade, angulação em relação a nós observadores, quantidade de ondas de rádio emitidas e a largura das linhas de emissão dos seus espectros.

No que se refere a emissão de rádio é dividido em *radio Loud* (RL) e *radio quiet* (RQ), sendo o primeiro para galáxias com altas emissões de rádio e o segundo para galáxias com baixas emissões de rádio.

Já em relação a largura das linhas de emissão, é separada de acordo com o tamanho da largura das linhas espectrais de emissão desses AGNs. Tendo essas duas divisões postas, as AGNs podem ser classificadas em: galáxias Seyfert, Quasares, Rádio galáxias, LINER's e Blazares.

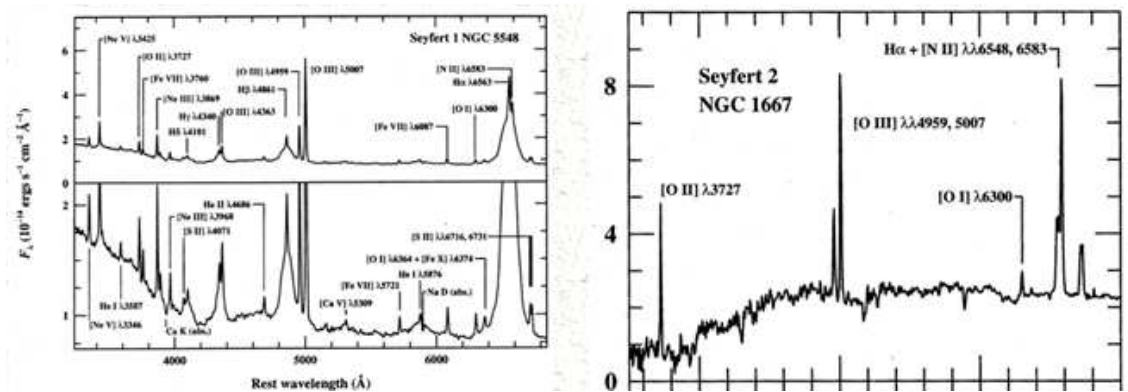
3.2.1 Galáxias Seyfert

As galáxias Seyfert são comumente encontradas na forma de espirais e possuem núcleos altamente luminosos, ao ponto de sua luminosidade ultrapassar todo o restante da galáxia, mas com variedade no seu brilho. Além disso, possui alta emissão não-térmica, baixa emissão na faixa do rádio e não apresenta jatos de emissão aparente. Tais galáxias são divididas em dois tipos, Seyfert tipo I e Seyfert tipo II.

As Seyfert I possuem linhas espectrais da emissão de átomos de hidrogênio e hélio bastante largas, enquanto a Seyfert II tem essas mesmas linhas bastante estreitas. Essa disparidade é devido ao ângulo que a galáxia está em relação ao observador. No caso da Seyfert II, ela está possivelmente mais “deitada” ou com nuvens de poeira na frente, nisso o bojo da galáxia fica na frente do AGN, fazendo com que sejam vistas linhas estreitas do espectro. Já as Seyfert I estão inclinadas ou de “face” completamente virada para nós, não existindo poeiras no bojo da galáxia atrapalhando as linhas espectrais de emissão, tornando-as mais largas. A imagem 17 demonstra bem a diferença de posição que as galáxias de tipo I e II estão em relação a nós.

A figura 16 ilustra bem a diferença do tamanho das linhas de emissão, sendo o espectro da esquerda o de tipo I, com bandas bem largas e o espectro a direita de tipo II, com bandas bastante estreitas.

Figura 16 - A imagem apresenta espectros óticos de duas galáxias Seyfert, sendo a da esquerda da galáxia Seyfert tipo I NGC 5548 e da direita a da galáxia Seyfert tipo 2 NGC 1667



Fonte: NASA/IPAC Extragalactic Database.

Nota: A imagem ilustra bem a diferença do tamanho das bandas de linhas de emissão entre os tipos I e II.

Figura 17 - A esquerda temos a galáxia do Compasso, uma Seyfert tipo II, enquanto a direita temos a galáxia NGC 5548, uma Seyfert tipo I



Fontes: ESA/Hubble e NASA autoria de David de Martin via Wikimedia Commons, à direita. NASA, autoria de Andrew Wilson *et al.* via Wikimedia Commons, à esquerda.

Nota: Pela imagem dessas galáxias podemos ver a influência que a angulação que a galáxia está em relação a nós e a presença de nuvens de poeira e gás podem ter em relação a classificação do tipo das galáxias em questão.

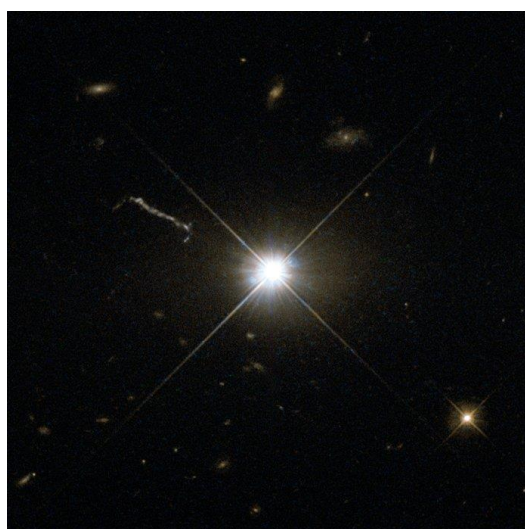
3.2.2 Quasares e QSO's

Por conta de sua altíssima luminosidade e por ser muito similar visualmente no óptico a uma estrela azulada, recebeu o nome de *Quasi-stellar* ou quase estelar, nomenclatura essa alterada para quasares. Seu brilho é tamanho que ofusca todo o restante de luminosidade da galáxia hospedeira, aumentando mais ainda a suspeita inicial de terem sido estrelas. Contudo, tal suspeita se mostra errônea ao vermos que suas linhas de absorção são muito fracas e a presença de um grande *redshift*, pois um corpo tão distante da Terra não poderia ter tamanho brilho sendo uma estrela. Além disso, também apresenta uma variabilidade de luminosidade não vista em estrelas.

Os quasares possuem uma alta emissão de raios X e são grandes fontes de raios, tendo um jato central de partículas relativísticas partindo do núcleo tão forte que somente este jato consegue ser captado por radiotelescópios.

Ademais, as galáxias quasares são compactas, possuem um espectro similar aos Seyfert, e o que difere os quasares dos QSO's (*Quasi-stellar object*) é que, segundo Mo *et al.* (2010), os quasares teriam grande emissão de rádio, sendo considerado um RL, enquanto os QSO teriam emissões muito mais baixas, sendo assim um RQ.

Figura 18 - Imagem obtida pelo telescópio espacial Hubble da galáxia quasar 3C273



Fonte: ESA/Hubble e NASA.

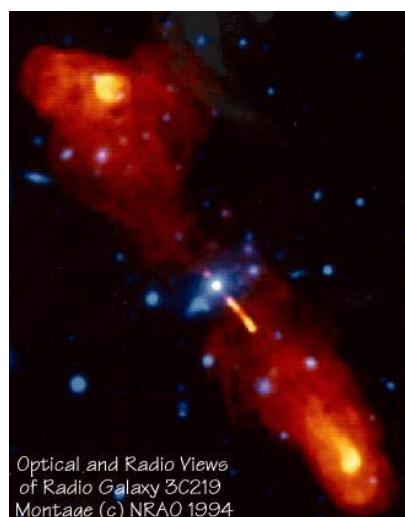
Nota: Uma galáxia gigante elíptica presente na constelação de Virgem.

3.2.3 Rádio Galáxias

As Rádio Galáxias são majoritariamente elípticas, com uma estrutura que possibilita emissão de rádio dos dois lados do núcleo, gerando dois jatos que formam 180° entre eles. Possui uma abundância de emissão em rádio, o que justifica seu nome, decorrente da radiação síncroton gerada nos seus jatos ou lóbulos anteriormente mencionados.

A distância que esses jatos podem tomar da galáxia podem chegar a valores muito maiores que seu próprio raio. A exemplo disso, a rádio galáxia 3C219 possui um diâmetro de aproximadamente 100 mil anos-luz e os jatos gerados alcançam um milhão de anos-luz. Além disso, são encontradas rádio galáxias de bandas largas e estreitas.

Figura 19 - Galáxia 3C219 e seus jatos



Fonte: Astro UFRGS via Guia Heu.

3.2.4 LINERs

LINER's ou *Low-Ionization Nuclear Emission-Line Region*, são galáxias com baixa luminosidade devido à pequena ação do seu núcleo, encontradas normalmente em formas espirais. São bastante comuns na nossa proximidade, uma em cada 3, numa distância de 40 Mpc. Apresentam também linhas espectrais de baixa ionização do tipo proibida razoavelmente intensas, porém estreitas. (Diniz, 2017).

As galáxias LINERs tem comportamentos bastante semelhantes as galáxias Seyfert, porém um estudo realizado por Kewley *et al.* (2006) mostrou que as LINERs são mais massivas que as Seyfert, possuem uma população estelar mais velha, tem menos poeira, menor concentração de corpos celestes, menor luminosidade e, como principal diferença, a taxa de acreção, tendo a LINER uma taxa menor que a galáxia Seyfert.

Figura 20 - Galáxia Sombrero (M104), exemplo de um LINER



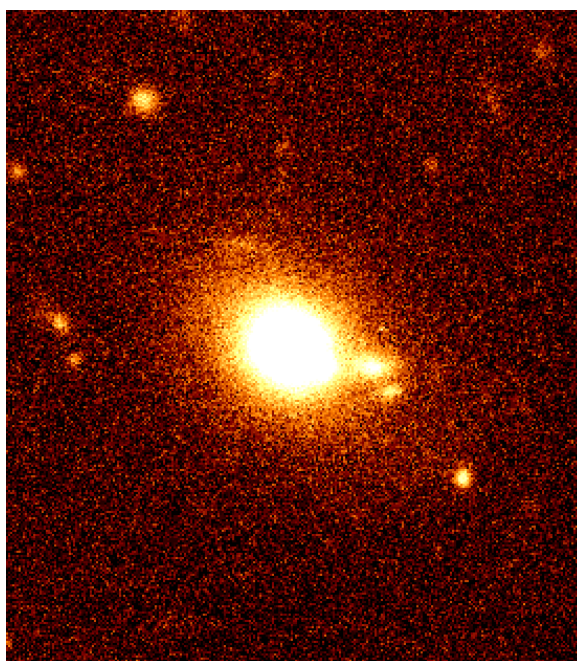
Fonte: NASA/ESA via Hubble.

3.2.5 Blazares

Os blazares possuem núcleos extremamente brilhantes e compactos, a ponto de sua luminosidade ofuscar o restante da galáxia hospedeira. São conhecidos como os AGNs mais brilhantes do universo, porém possuem luminosidade bastante polarizada quando comparada com outro AGN luminoso como o quasar, e possui um brilho altamente variável em curtos períodos.

Outra consequência de seu forte brilho é que as linhas de absorção e emissão são praticamente imperceptíveis (Guedes, 2022). Acredita-se que pela falta de observação de jatos visíveis, os Blazares são na verdade Rádio-galáxias quando olhadas diretamente para o jato emitido pelo AGN (Mo et al., 2010).

Figura 21 - Galáxia BL Larcetae H0323+02, um exemplo de Blazar

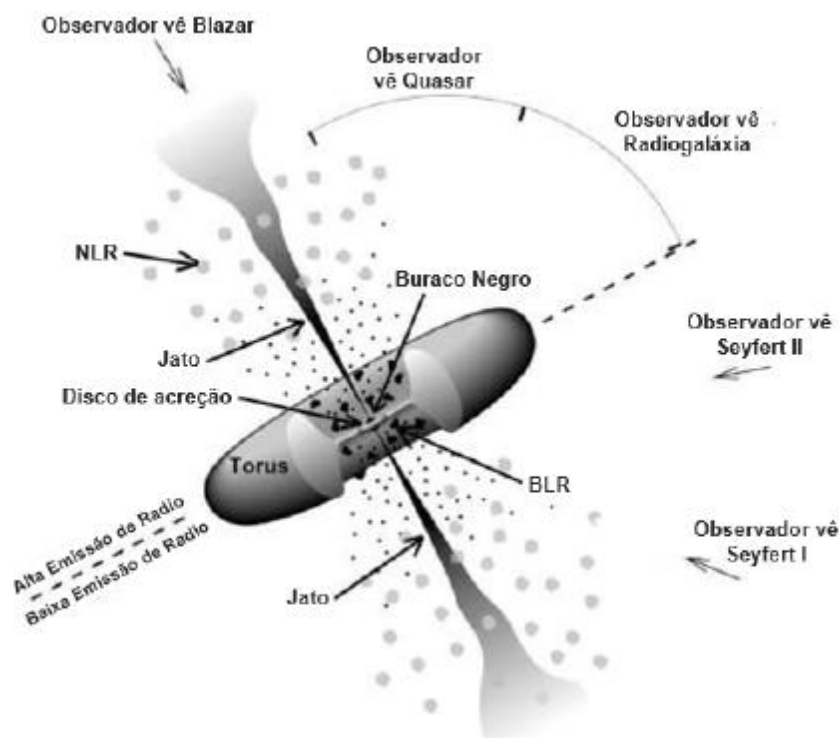


Fonte: Renato Falomo via Wikimedia Commons.

3.2.6 Modelo Unificado de AGNs

O modelo unificado de AGNs é uma teoria que acredita que todos os AGN previamente mencionados são na verdade o mesmo tipo de corpo, só que vistos sob uma perspectiva diferente (Antonucci, 1993). Por estarmos presos no nosso referencial, se pudéssemos observar uma galáxia Quasar vista da Terra em outro lugar, poderíamos ver a mesma galáxia só que sendo um Blazar. A figura 22 abaixo mostra como seria o AGN do modelo unificado.

Figura 22 - Estrutura de um AGN a partir do modelo unificado



Fonte: Guedes (2022).

Nota: A partir dessa imagem podemos ver qual ângulo de visão corresponde ao tipo de AGN, além de mostrar os diferentes componentes de um AGN.

Mesmo se tratando de um modelo unificado, ainda assim os AGNs são divididos em 2 tipos, sendo o primeiro o tipo I, com baixa emissão de Rádio e o segundo o tipo II, com altas emissões de rádio. Esse modelo nos permite explicar o porquê que dependendo do tipo de AGN tem-se mais ou menos emissão de raios X, ondas de rádio e raios gama.

A partir da estrutura do AGN unificado podemos ver que no centro de tudo está o buraco negro supermassivo e o disco de acreção em volta dele. Próximo ao núcleo se encontra nuvens de gás densas, quentes e com altas velocidades que emitem as linhas de emissão de banda larga, a chamada BLR (Região de Linhas Largas ou do inglês *Broad Line Region*). Após a BLR temos o Tórus, que nada mais é do que uma região de poeira que gira em torno do buraco negro, podendo se estender a grandes distâncias como centenas de parsecs.

Saindo perpendicularmente do buraco negro de alta emissão de rádio estão os jatos que quando apontados parcialmente para nós vemos galáxias Quasar e diretamente vemos galáxias Blazar. Em volta da região do jato mais próximo do núcleo temos a chamada NLR (Região de Linhas Estreitas ou do inglês *Narrow Line Region*), que se trata de região com um gás relativamente frio, escasso e com baixa velocidade.

Com todos os componentes do modelo unificado descritos, pode-se perceber que essa estrutura consegue explicar qual galáxia podemos ver dependendo da angulação que está em relação a nós e o tipo de AGN em questão, com alta ou baixa emissão de rádio.

Para o caso de um AGN de alta emissão de rádio, teremos Quasares quando olhamos quase

diretamente para o jato e Blazares quando olhamos perpendicularmente ao plano da galáxia, ou na mesma linha que o jato. Enquanto isso, se olhamos de forma inclinada para essa galáxia, encontramos uma Rádio-galáxia, Já para o caso de um AGN de baixa emissão de rádio teremos galáxias Seyfert de tipo I para pouca interferência de poeiras de gás e de tipo II para interferência significativas, o que explica a diferenças do tamanho das bandas das linhas de emissão.

Já para o caso das galáxias LINERs, acredito ter relação com a idade dessas galáxias, pois como são mais comumente detectadas em distâncias próximas de nós, as observamos numa idade avançada quando comparada com as demais galáxias. Portanto, bastante massa já pode ter sido acrescida pelo núcleo de forma que justifique sua fraca atividade e, conseqüentemente, sua baixa emissão de radiação.

Tendo isso em mente, a tabela abaixo descreve o tipo de galáxia correspondendo a quantidade de emissão de rádio e o tamanho das linhas de emissão permitidas ou proibidas.

Tabela 4 - Tipos de AGN e suas características principais

Emissão de Rádio	Propriedades das linhas de emissão		
	Linhas Estreitas	Linhas Largas	Não Usuais
Baixa emissão	Seyfert II	Seyfert I	LINER
Alta emissão	Rádio-galáxias	Quasar	Blazar

Fonte: O autor (2024). Adaptado de Guedes (2022).
Nota: O termo “não usuais” indica presença de linhas proibidas para o caso LINER e nenhuma presença de linha, para o caso do Blazar.

3.2.7 AGNs: Fornalhas de estrelas

Uma das maiores e mais pertinentes dúvidas geradas por esses colossos é qual o seu papel na evolução da vida estelar da galáxia. Serão os buracos negros supermassivos os responsáveis por aniquilar toda formação estelar de uma galáxia, adquirindo pouco a pouco toda a sua massa? Ou seriam eles os responsáveis por iniciar o desenvolvimento da galáxia, acrescentando massa em sua composição, formando assim novas estrelas?

Na realidade, é provável que não seja nem um, nem outro, e sim que ambos evoluíram simultaneamente. Pode-se chegar a essa conclusão, pois descobertas recentes observaram que a massa do buraco negro supermassivo corresponde a cerca de um milésimo da massa total da galáxia (Steiner, 2010). Como isso é observado em quase todos os casos, chega-se à conclusão de que a evolução de ambos está relacionada.

Como dito anteriormente, o buraco negro supermassivo no centro de uma galáxia tem massa equivalente e diretamente proporcional a massa total da galáxia, o que indica que ele tem ação direta na evolução da galáxia e nas estrelas presentes nela.

Caso a galáxia tenha um AGN em seu centro, o buraco negro supermassivo se alimenta a partir do seu disco de acreção e libera para o restante da galáxia radiação e matéria em jatos e ventos, saídos

da parte interna do disco e que emitem majoritariamente em ondas de rádio. Essa matéria ejetada provoca uma maior formação estelar na região circumnuclear, ou seja, próxima do AGN.

Segundo Hennig (2018), as taxas de *inflows* (massa direcionada para crescer o buraco negro) são muito maiores que o necessário para alimentar um AGN, sendo o suficiente para ser possível formação estelar na região próxima ao núcleo. Além disso, os processos de *feedback*, caracterizados pelos jatos e ventos anteriormente mencionados também tem um papel importante, pois as taxas de matéria carregadas em regiões de até 100 a 1000 parsecs são muito maiores que as taxas de acreção do AGN.

Isso indica que a ação do AGN de se alimentar de massa próxima gera um efeito de *feedback* que alimenta de matéria a região circumnuclear, fazendo desse local mais propício para a geração de novas estrelas. Apesar desses ventos gerados pelo AGN não possuírem muita massa, a energia cinética deles empurra as nuvens de gás no entorno do AGN para regiões onde podem ocorrer a síntese de novas estrelas.

3.3 A morte de um buraco negro

Essa seção terá foco em explicar o fim que os buracos negros supermassivos ou que os buracos negros como um todo podem ter. Ao pensarmos de forma intuitiva, como esse corpo possui tamanha massa que “puxa” matéria próxima de forma a crescer em massa, eventualmente toda a matéria será engolida por buracos negros próximos, de forma que ou teremos tudo engolido num único buraco negro hipermassivo com massa igual à do universo ou teremos diversos buracos negros espalhados pelo universo, já que o mesmo encontra-se em expansão.

Entretanto, uma teoria criada por Stephen Hawking (1942 – 2018) demonstrou que um buraco negro pode emitir partículas e perder massa ao passar do tempo. Essa teoria é chamada de radiação Hawking ou evaporação de Hawking e nela é proposto que apesar de teoricamente nenhuma partícula poder escapar do horizonte de eventos, efeitos quânticos que ocorrem nas proximidades do horizonte de eventos podem possibilitar a emissão de partículas. Desta forma, o buraco negro apresenta emitir radiação como se fosse um corpo negro de temperatura igual a (Santi, 2019):

$$T_H = \frac{k}{2\pi},$$

sendo k a gravidade superficial do buraco negro, que é definida como a força a ser exercida por um observador no infinito para que uma determinada partícula permaneça em repouso sob ação da gravidade na fronteira do horizonte de eventos. Para o caso de um buraco negro de Schwarzschild $k = \frac{1}{4m}$, logo (Lima, 2022):

$$T_H^s = \frac{1}{8\pi M},$$

A partir da temperatura acima e considerando a área do horizonte de eventos do buraco negro, podemos calcular, utilizando a lei de Stefan-Boltzmann, a taxa de perda de massa de um buraco negro decorrente da radiação Hawking

$$m(t) = \left[m_i^3 - \frac{1}{5120\pi} \frac{kg^3}{s} (t - t_i) \right]^{\frac{1}{3}},$$

onde considerando que ao final da evaporação a massa do buraco negro será igual a zero e a diferença entre os tempos $(t - t_i)$ é igual ao tempo de evaporação (t_{evap}) , então temos que

$$t_{evap} = 5120\pi \frac{s}{kg^3} m_i^3,$$

Podemos também calcular o inverso para o caso de um buraco negro primordial que somente sofre radiação Hawking e que estaria sendo completamente evaporado nesse exato instante. Partindo de uma massa arbitrária introduzida por Hawking com $m_{Haw} \sim 10^{15}g$. Desta forma a massa inicial de um buraco negro em termos dessa massa introduzido pode ser encontrada por:

$$t^*(m) \sim t_0 \left(\frac{m}{m_{Haw}} \right)^3,$$

Entretanto pode ocorrer de haver acreção de massa ao mesmo tempo que ocorre a evaporação Hawking, portanto haverá uma competição entre esses dois fenômenos, onde o que ganhar aumentará ou reduzirá a massa do buraco negro. Para o caso de assimilação apenas de radiação, Barrow *et al.* (1991) calcularam a massa de equilíbrio de um buraco negro quando acrescido de massa ao mesmo tempo que passa por evaporação. Essa massa foi apelidada de massa crítica e indica que quando um buraco negro estiver com massa acima da massa crítica predomina a acreção de massa e quando estiver abaixo o buraco negro perderá massa por evaporação.

Apesar de interessante, a evaporação Hawking se mostra bastante improvável quando olhamos hoje para os buracos negros do universo, pois como a radiação ocorre de maneira inversamente proporcional a massa do corpo, então à medida que o buraco negro tiver maior massa, menor será sua radiação emitida.

Em termos de comparação, se considerarmos um buraco negro da massa do Sol (o que não é viável, mas é um bom parâmetro), ele iria emitir tão pouca radiação que seria por muito vencida pela assimilação da radiação cósmica de fundo, fazendo com que esse buraco negro não perca massa. Como encontramos buracos negros de no mínimo 3 massas solares, é possível prever que os buracos negros conhecidos no universo não estão perdendo massa decorrente da evaporação Hawking.

CONCLUSÃO

Segundo Steiner (2010, p. 16) “buracos negros foram, ao longo do século XX, evoluindo desde especulações teóricas até a consolidação como objetos reais”. Como dito na introdução, buracos negros são um dos corpos celestes mais misteriosos do universo, cercado de perguntas e teorias.

Ao longo deste trabalho vimos toda a dificuldade de previsão, aceitação e observação que a ideia de um buraco negro teve ao longo da história. Passando desde a possibilidade de uma “estrela negra” e as soluções de Einstein e Schwarzschild, a disputa de Chandrasekhar e seu mentor Eddington pela aceitação dessa ideia, até chegar na descoberta dos quasares e a primeira foto de um buraco negro, o M87, fatos esses que consolidaram o buraco negro como uma realidade no universo.

Além disso, foi descrito como é o processo de vida de uma estrela massiva até chegarmos ao buraco negro e todas as etapas de sua vida. Desde uma protoestrela iniciando a fusão nuclear, passando por todos os ciclos de fusão que ocorrem no núcleo de uma estrela, até atingir um estágio de instabilidade tamanho que gera uma explosão cuja luminosidade ultrapassa a de toda uma galáxia. Tendo como resultado dois corpos possíveis dependendo da massa do núcleo remanescente da estrela, o primeiro uma estrela de nêutrons caso tenha massa inferior e um buraco negro, gerado a partir de um colapso gravitacional do núcleo.

Com o bom entendimento de como surge os buracos negros estelares, discutimos um possível ciclo de vida de um buraco negro supermassivo. Inicialmente falamos sobre as duas principais teorias que podem explicar o surgimento desses colossos presentes no centro das galáxias. A primeira é o surgimento a partir de um buraco negro estelar que acresceu massa ao longo do tempo até atingir massas colossais como as que vemos hoje, e a segunda explorou a possibilidade dos buracos negros primordiais, corpos que podem ter sido gerados nos primeiros instantes do universo, podendo ter as mais variadas massas, partindo desde centenas de milésimos de gramas até centenas de milhares de massas solares.

Foi discutido também o que são os AGNs, quais são seus tipos dependendo do nível de emissão de rádio que possui, luminosidade, larguras das bandas de linhas de emissão e como se posiciona em relação a nós observadores. E por fim mencionado uma possibilidade de final para os buracos negros a partir da Evaporação Hawking, que pode perder massa ao longo do tempo e eventualmente se tornar outra forma de matéria que não conhecemos.

Portanto, ao fim desse trabalho não consigo concluir, em relação aos modelos possíveis de formação dos AGNs e buracos negros supermassivos, qual teoria melhor explica o surgimento desses corpos. Para o caso dos AGNs de massas muito grandes no início do universo, ambas as teorias conseguem explicar, pois para a teoria do buraco negro semente, se considerado estrelas supermassivas, que por sua alta massa teriam ciclos de vida muito curtos, gerariam buracos negros inicialmente muito massivos e que conseguiriam crescer massa mais rapidamente a ponto de nesse instante do universo que vemos um AGN de grande massa. Enquanto a teoria do buraco negro primordial diz que nos primeiros instantes do universo poderia ter se gerado buracos negros a partir de pontos de grandes

densidades de partículas, que com o passar do tempo poderiam crescer a ponto de atingir a massa necessária.

Em relação a radiação Hawking, acredito que os buracos negros que conhecemos não estão perdendo massa ao longo do tempo pois sua evaporação seria extremamente insignificante quando comparada com sua taxa de acreção. Contudo, caso a teoria dos buracos negros primordiais seja considerado de fato viável e que nos primeiros instantes do universo existiram buracos negros de pequeníssimas massas, então a radiação Hawking pode ser viável para tais corpos e por consequência, acredito que possam ter evaporado a ponto de desestabilizar os buracos negros e gerar um remanescente que pode ser um candidato a matéria escura.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. R. A pré-história dos buracos negros. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 42, p. 1-6, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0197>. Acesso em: 19 set. 2022.
- ANTONUCCI, R. Unified Models for Active Galactix Nuclei and Quasars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, [s.l.], v. 31, p. 473-521, 1993. Disponível em: <https://adsabs.harvard.edu/full/1993ARA&A..31..473A>. Acesso em: 19 set. 2022.
- ARANY-PRADO, L. I. **À Luz das Estrelas: Ciência através da astronomia**. Rio de Janeiro: DP&A Editora: 2006. Disponível em: <https://ciencianautas.com/wp-content/uploads/2021/10/A-Luz-das-Estrelas.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.
- PETERSON, B. M. Seyfert Galaxies *In: An Introduction to Active Galactic Nuclei*, Cambridge University Press, 1997. Disponível em: https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Glossary/Essay_seyfert.html Acesso em: 19 set. 2022.
- BARROW, J. D; COPELAND, E. J.; LIDDLE, A. R. The Evolution of black holes in na expanding universe. **Monthly Notices of the Royal Astronomic Society**, vol. 253, 15 de dez. de 1991. Disponível em: <https://academic.oup.com/mnras/article/253/4/675/975202> Aceso em: 13 out. 2023.
- BERGMANN, Thaisa S. Buracos Negros Supermassivos: os monstros que se escondem no centro das galáxias. **Ciência e Cultura**, vol.61 no.4 p. 38-41, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v61n4/13.pdf> Acesso em: 19 set. 2022.
- BOHÓRQUEZ, William Eduardo C. **Influência da Formação Estelar versus Buracos Negros de Núcleos Ativos de Galáxia (AGN) na Evolução de Ventos Galácticos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Física, Departament de Física Matemática, São Paulo, 2018. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-10102018-160124/publico/SF_vs_AGN.pdf Acesso em: 19 set. 2022.
- BONDI, H. On Spherically Symmetrical Accretion. **Royal Astronomical Society**, vol. 112, nº2, 3 de out. de 1951. Disponível em: <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1952MNRAS.112..195B> Acesso em: 13 out. 2023.
- CHANDRASEKHAR, S. XLVIII: The density of white dwarf stars. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, series 7, vol. 11, 1931. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14786443109461710> Acesso em: 13 out. 2023.
- CHAVES, Alaor. Supernova a morte catastrófica de grandes estrelas. **UFMG: Observatório Astronômico Frei Rosário**, 02 de jun. de 2011. Disponível em: <http://xingu.fisica.ufmg.br:8087/oap/public/acervo/supernova/supernova.html> Acesso em: 12 out. 2023.
- Estrelas que brilham no tempo: Arthur Eddington. **Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço**, 15 de mai. de 2019. Disponível em: <https://divulgacao.iaastro.pt/pt/feature/estrelas-que-brilham-no-tempo-arthur-eddington/> Aceso em: 13 out. 2023.

FILHO, Kepler de Souza Oliveira; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. O Diagrama Cor-Magnitude - Hertzsprung-Russell. **Astronomia e Astrofísica: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS**, 25 de ago. de 2022. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node2.htm> Acesso em: 8 out. 2023.

FILHO, Kepler de Souza Oliveira; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. Limite de Roche. **Astronomia e Astrofísica: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS**, 25 de out. de 2023. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/fordif/node7.htm> Acesso em: 13 de out. de 2023.

_____, Kepler de Souza Oliveira. Novas, Supernovas e Hipernovas. **Astronomia e Astrofísica: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS**, 10 de jul. de 2020. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/evol/node51.htm> Acesso em: 13 out. 2023.

_____, Kepler de Souza Oliveira. Ciclo Próton-Próton. **Astronomia e Astrofísica: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS**, 3 de set. de 2014. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/evol/reacoes/reacoes.htm> Acesso em: 12 out. 2023.

Georges Lemaître, o padre do Big Bang que fez Einstein. **Instituto Humanitas Unisinos**, 21 de jul. de 2018. Disponível em: <https://www.ihu.unisinos.br/categorias/188-noticias-2018/581045-o-sacerdote-georges-lemaître-o-padre-do-big-bang-que-fez-einstein-mudar-de-ideia> Acesso em: 13 out. 2023.

GUARIENTO, Daniel Carrasco. **Evolução de Buracos Negros Primordiais no Universo**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Física, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-16092010-102755/publico/tese.pdf> Acesso em: 19 set. 2022.

HENNIG, Moiré G. **Formação estelar e emissão de poeira em núcleos ativos de galáxias**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física, Santa Maria (RS), 2018. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/16727/TES_PPGFISICA_2018_HENNIG_MOIRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y Acesso em: 19 set. 2022.

HORVATH, J.E. A massa máxima das estrelas de nêutrons: uma abordagem didática. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 42, jun. de 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/n4KctXzdg9Md6YXXB3nfwKv/?format=pdf> Acesso em: 13 out. 2023.

INACIO, Maria Eduarda da Silva. **Acreção de matéria e formação de buracos negros supermassivos**. Tese (Graduação em Física) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p.49, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/db512262-6f08-492d-94a7-ad85a4203065/content> Acesso em: 13 out. 2023.

JEANS, J. H. The Stability of a Spherical Nebula. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, vol. 199, 1 de jan. de 1902. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rsta.1902.0012> Acesso em: 13 out. 2023.

KERR, R. P. Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics. **Physical Review Letters**, 11, 237, 1 de set. de 1963. Disponível em: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.11.237> Acesso em: 13 out. 2023.

KEWLEY, L. J.; GROVES, B.; KAUFFMANN, G.; HECKMAN, T. The host galaxies and classification of active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 372, ed. 3, pp. 961-976, 26 maio de 2006. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0605681.pdf> Acesso

em: 20 out. 2023.

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**, vol. 38, nº 2, jun. de 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/sf3PwZCcX8Myn8WMjtLqSxC/?lang=pt#> Acesso em: 13 out. 2023.

MACIEL, W. J. (ed.). **Astronomia e Astrofísica**. 1. ed. São Paulo: IAG/USP, 1991. Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/~maciel/teaching/livros/livro1.pdf> Acesso em: 8 out. 2023.

MADEJSKY, Rainer Karl. Buracos negros supermassivos: I. Observações e modelos teóricos. **Caderno de física da UEFS** 16 (02): 2404.1-15, 2018. Disponível em: <http://dfisweb.uefs.br/caderno/vol16n2/s4-a4-Buracos-Negros-Supermassivos.pdf> Acesso em: 19 set. 2022.

MO, Houjun; BOSCH, Frank van den; WHITE, Simon. **Galaxy Formation and Evolution**. Cambridge University Press, jun. 2010. Disponível em: <https://people.astro.umass.edu/~hjmo/astro330/html/dir/reading.pdf> Acesso em: 13 out. 2023.

NEMMEN, Rodrigo S. **Acreção a Buracos Negros Supermassivos no Universo Presente**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/16325/000702092.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 19 set. 2022.

OLIVEIRA, AJ. A história do eclipse de Sobral (CE) que comprovou a Teoria da Relatividade. **Revista Galileu**, 25 de out. de 2018. Ciência. Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/10/historia-do-eclipse-de-sobral-ce-que-comprovou-teoria-da-relatividade.html> Acesso em: 10 out. 2023

OLIVEIRA, Bruno Dall'Agnol de. **O impacto da retro-alimentação de Buracos Negros Supermassivos nas suas galáxias hospedeiras**. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Departamento de Astronomia, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/212318/001114021.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 19 set. 2022.

OPPENHEIMER, J. R.; SNYDER, H. On Continued Gravitational Contraction. **Physical Review**, vol. 56, 10 de jul. de 1939. Disponível em: <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.56.455> Acesso em: 13 out. 2023.

ORTIZ, Roberto. Evolução Estelar – I. **Aperfeiçoamento em Astronomia para a docência**, p.1-19, jul./2014. Disponível em: http://each.uspnet.usp.br/ortiz/classes/Leitura_s21_Evolucao_Estelar1 Acesso em: 19 set. 2022.

_____, Roberto. Evolução Estelar – II. **Aperfeiçoamento em Astronomia para a docência**, p.1-17, jul./2014. Disponível em: <https://docplayer.com.br/41602489-Evolucao-estelar-ii-roberto-ortiz.html> Acesso em: 19 set. 2022.

SAA, Alberto. Cem anos de buracos negros: o centenário da solução de Schwarzschild. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 38, nº 4, e4201 (2016). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0191> Acesso em: 19 set. 2022.

SANTI, N. S. M. de; SANTARELLI, Raphael. Desvendando a radiação Hawking. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 41, nº3, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/CM5JzVF3Gtf5ztK3CB5vH4g/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 13

out. 2023.

SOARES, Domingos. Eddington versus Chandrasekhar acerca do destino estelar. **Universidade Federal de Minas Gerais**, - julho de 2019. Disponível em: <https://lilith.fisica.ufmg.br/~dsoares/eddingon/eddchan.htm> Acesso em: 13 de out. de 2023.

STEINER, João E. Buracos negros: sementes ou cemitérios de galáxias? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n. Especial - dezembro de 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2010v27nespp723> Acesso em: 19 set. 2022.

WALSH, Louise. Journeys of Discovery. **University of Cambridge**. Disponível em: <https://www.cam.ac.uk/stories/journeysofdiscovery-pulsars> Acesso em: 13 out. 2023.

WILSON, A. S. ; COLBERT, E. J. M. The Difference between Radio-loud and Radio-quiet Active Galaxies. **Astrophysical Journal**, v.438, p.1-27, 2 ago. de 1994. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9408005.pdf> Acesso em: 20 out. 2023.