

ESCOLA DE TALENTOS - TURMA GATOS INSTÁVEIS
INSTITUTO PRINCIPIA

**Da Evolução Estelar à Relatividade: a formação e a descrição dos buracos
negros**

AUTORES: EDUARDO HENRIQUE FABIANE
RAFAEL ARAÚJO DE OLIVEIRA
ORIENTADOR: ANDRÉ GUSTAVO SCAGLIUSI LANDULFO

São Paulo - SP
Julho, 2026

AGRADECIMENTOS

Eduardo

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar e me dar forças ao longo de toda esta caminhada.

À minha família, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim durante toda esta jornada.

Aos professores Ricardo Matheus, Leonardo de Lima e André Paschoal, que conduziram as aulas ao longo do projeto, sempre dispostos a enriquecer nosso conhecimento e a nos guiar da melhor forma possível.

Ao Marcelo Guzzo, que sempre procurou fazer o possível para que nossa trajetória na Escola de Talentos fosse leve e para que pudéssemos estudar aquilo que gostamos.

Em especial, ao meu orientador, André Landulfo, que ao longo deste período se dispôs a ajudar a mim e ao Rafael neste trabalho de conclusão de curso, sempre nos ensinando de maneira calma, clara e atenciosa às nossas dúvidas e preocupações.

À Mariana, por toda a atenção e cuidado durante nossos encontros, levantando de madrugada pra deixar eu olhar pelo telescópio.

Ao Wellington, por toda a ajuda e dedicação para que tudo ocorresse da melhor forma.

Ao Instituto Principia, que, por meio da Escola de Talentos, tornou possível a realização deste projeto, o qual foi e será um aprendizado enriquecedor para muitos alunos.

Rafael

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar e me dar forças ao longo de toda esta caminhada.

À minha família, pelo apoio constante e por me incentivarem a seguir em frente em cada etapa desta jornada.

Aos professores Ricardo Matheus, Leonardo de Lima e André Paschoal, que conduziram as aulas ao longo do projeto, sempre dispostos a enriquecer nosso conhecimento e a nos guiar da melhor forma possível.

Ao Marcelo Guzzo, que sempre procurou fazer o possível para que nossa trajetória na Escola de Talentos fosse leve e para que pudéssemos estudar aquilo que gostamos.

Em especial, ao meu orientador, André Landulfo, que ao longo deste período se dispôs a ajudar a mim e ao Eduardo neste trabalho de conclusão de curso, sempre nos ensinando de maneira calma, clara e atenciosa às nossas dúvidas e preocupações.

Ao Wellington, por toda a ajuda e dedicação para que tudo ocorresse da melhor forma.

Ao Instituto Principia, que, por meio da Escola de Talentos, tornou possível a realização deste projeto, o qual foi e será um aprendizado enriquecedor para muitos alunos.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem sobre a evolução das estrelas e os fenômenos físicos associados aos buracos negros, articulando a descrição astrofísica com o tratamento relativístico do espaço-tempo. Inicialmente, é discutido o ciclo de vida estelar de forma conceitual, desde a formação das estrelas a partir de nuvens moleculares, passando pela sequência principal, a fase de estabilidade em que ocorre a fusão do hidrogênio, até seus estágios finais. Demonstra-se que a massa é o fator determinante do destino de cada estrela, que pode terminar como anã branca, estrela de nêutrons ou buraco negro. Em seguida, o trabalho aborda os fundamentos da teoria da relatividade, desde a relatividade especial e o espaço-tempo de Minkowski até a relatividade geral e as equações de Einstein, apresentando as soluções de Schwarzschild e de Kerr. A partir dessas formulações, analisam-se as propriedades dos buracos negros, incluindo o horizonte de eventos, o raio de Schwarzschild e, no caso dos buracos negros rotacionais, a ergosfera. Por fim, discute-se a radiação Hawking, fenômeno que conecta a relatividade geral, a mecânica quântica e a termodinâmica. Conclui-se que o estudo da evolução estelar e da relatividade, de forma integrada, permite compreender tanto a origem quanto a natureza física dos buracos negros.

Palavras-chave: Evolução estelar. Buracos negros. Relatividade geral. Radiação Hawking. Métrica de Schwarzschild.

ABSTRACT

\This study presents an approach to stellar evolution and the physical phenomena associated with black holes, connecting the astrophysical description with the relativistic treatment of spacetime. Initially, the stellar life cycle is discussed conceptually, from the formation of stars from molecular clouds, through the main sequence, the stable phase in which hydrogen fusion occurs, to their final stages. It is shown that mass is the determining factor in the fate of each star, which may end as a white dwarf, a neutron star, or a black hole. Next, the study addresses the foundations of the theory of relativity, from special relativity and Minkowski spacetime to general relativity and Einstein's equations, presenting the Schwarzschild and Kerr solutions. Based on these formulations, the properties of black holes are analyzed, including the event horizon, the Schwarzschild radius, and, in the case of rotating black holes, the ergosphere. Finally, Hawking radiation is discussed as a phenomenon that connects general relativity, quantum mechanics, and thermodynamics. It is concluded that the integrated study of stellar evolution and relativity makes it possible to understand both the origin and the physical nature of black holes.

Keywords: stellar evolution; black holes; general relativity; Hawking radiation; Schwarzschild metric.

SUMÁRIO

Introdução	7
1 Formação Estelar	9
2 Formação e Fases Pré-Sequência Principal	11
2.1 Protoestrelas.....	11
2.2 Estrelas Jovens (T-Tauri).....	12
2.3 Anãs Marrons	14
3 Sequência Principal.....	15
3.1 O Início da Fusão	15
3.2 Massa e Tempo de Vida	16
4 O Fim da Vida das Estrelas.....	17
4.1 Saída da Sequência Principal.....	17
4.2 Gigante Vermelha e Anã Branca	17
4.3 Explosão de Supernova.....	20
4.4 Estrelas de Nêutrons	22
5 Buracos Negros.....	25
5.1 Formação de Buracos Negros	25
5.2 Horizonte de Eventos.....	25
5.3 A Radiação Hawking.....	25
6 Relatividade Especial e seus Fundamentos.....	27
6.1 Limitações da Mecânica Clássica	27
6.2 Postulados da Relatividade Especial	28
6.3 Dilatação Temporal, Contração Espacial e o Fator de Lorentz.....	28
6.4 Transformações de Lorentz	29
7 Espaço-Tempo de Minkowski.....	31
7.1 Eventos e Representação Espaço-Temporal	31
7.2 Diagramas de Espaço-Tempo	31

7.3 O Intervalo Invariante Espaço-Temporal e a Métrica.....	32
7.4 Cones de Luz e Causalidade.....	33
8 Espaço-Tempo de Rindler e Princípio de Equivalência.....	34
8.1 Espaço-Tempo de Rindler	34
8.2 Princípio da Equivalência.....	34
8.3 As Equações de Einstein	35
9 A Energia, a Quadrivelocidade e o Quadrimomento de uma Partícula	36
9.1 A Solução de Schwarzschild.....	36
9.2 Diagrama de Espaço-Tempo de Schwarzschild e os Cones de Luz	37
10 Métrica de Kerr.....	40
11 Propriedades Gerais dos Buracos Negros	42
11.1 Horizonte de Eventos.....	42
11.2 Singularidade Gravitacional Real.....	42
11.3 Buracos Negros “Não Possuem Cabelo”	42
11.4 Frame Dragging.....	42
11.5 Lei das Áreas	43
REFERÊNCIAS.....	47

Introdução

O estudo das estrelas permite compreender não apenas como esses corpos surgem e se transformam, mas também como dão origem a alguns dos objetos mais extremos do universo. Ao longo de sua existência, uma estrela percorre um ciclo de vida que se inicia na formação a partir de nuvens de gás, passa pela sequência principal — a longa fase de estabilidade em que ela funde hidrogênio — e culmina em seus estágios finais, cujo destino depende diretamente de sua massa: anãs brancas, estrelas de nêutrons ou buracos negros.

Entre esses destinos, os buracos negros se destacam como os mais extremos: regiões do espaço-tempo cuja gravidade é tão intensa que nem mesmo a luz consegue escapar. Compreendê-los plenamente, no entanto, exige ir além da descrição astrofísica de sua formação e recorrer a um novo arcabouço teórico. A partir da visão clássica newtoniana é possível descrever diversos fenômenos físicos observados no cotidiano, especialmente aqueles associados a baixas velocidades e campos gravitacionais pouco intensos. Entretanto, ao analisar fenômenos que ocorrem em regimes de velocidades muito elevadas, próximas à velocidade da luz, ou em regiões onde os efeitos gravitacionais tornam-se significativos, as previsões fornecidas pelo modelo clássico deixam de apresentar resultados compatíveis com observações experimentais.

Nesse contexto surge a teoria da relatividade, inicialmente desenvolvida por Albert Einstein, a qual introduz uma nova interpretação para os conceitos de espaço e tempo. Nessa nova perspectiva, o espaço-tempo deixa de ser apenas o palco onde os fenômenos físicos ocorrem e passa a desempenhar um papel ativo na dinâmica, respondendo à presença da matéria por meio de sua curvatura. A partir dessa formulação, diversas descrições geométricas do espaço-tempo foram propostas, incluindo modelos planos, como o espaço-tempo de Minkowski, referenciais acelerados descritos pelas coordenadas de Rindler e modelos gravitacionais mais gerais, como aqueles desenvolvidos por Einstein, Schwarzschild e Kerr.

Este trabalho tem como objetivo, em um primeiro momento, apresentar o ciclo de vida estelar de forma conceitual, evidenciando como os processos de evolução das estrelas conduzem à formação dos diferentes objetos compactos — em especial os

buracos negros. Em seguida, apresenta a evolução do conceito de espaço-tempo, desde a relatividade especial até a relatividade geral, introduzindo os principais fundamentos físicos e matemáticos necessários para a compreensão desses modelos, incluindo uma análise conceitual dos buracos negros. Articula-se, assim, a descrição astrofísica das estrelas com o tratamento relativístico do espaço-tempo.

1 Formação Estelar

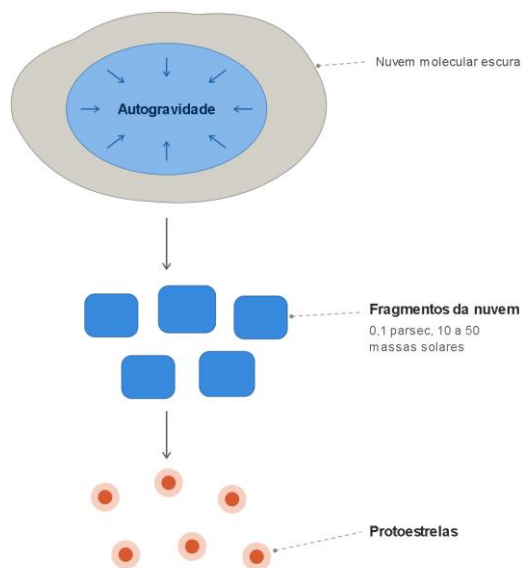
Estrelas são criadas a partir de grandes nuvens de gás e poeira chamadas nuvens moleculares (Maia Gil; Silva Pinho; Fernandes de Fernandes, 2023). Nuvens moleculares possuem massa que pode variar entre mil e dez milhões de vezes a do Sol, com a sua extensão podendo abranger de dezenas até centenas de anos-luz (NASA, 2026). Sua constituição é formada principalmente pelos gases moleculares H_2O , CH_4 , NH_3 e H_2 (Antunes Rosa *et al.*, 2025).

Nuvens moleculares são frias, fazendo com que o gás se aglomere em bolsas de alta densidade (NASA, 2026). Esses locais, por conta de sua alta densidade, impedem a passagem de luz visível, sendo chamadas nebulosas escuras. Para estudar essas regiões, é necessário a utilização do infravermelho ou o domínio de rádio (UFRGS, [s.d.]).

A formação estelar propriamente dita começa quando regiões mais densas das nuvens moleculares colapsam sob a ação de sua própria gravidade. Tais regiões têm as suas massas em torno de 10^4 massas solares. Essas regiões, que geralmente são centralizadas nas nuvens moleculares, têm densidade maior do que em partes mais externas, fazendo com que colapsem primeiro.

Enquanto colapsam, as regiões centrais se fragmentam em pedaços, com cerca de 0,1 parsec de extensão (aproximadamente 0,33 anos-luz) e com massas variando entre 10 e 50 vezes a massa solar. Esses fragmentos dão origem às protoestrelas (o tempo envolvido entre o colapso das regiões centrais e a formação das estrelas é da ordem dos milhões de anos).

Figura 1 – Esquema do colapso de uma nuvem molecular: a autogravidade fragmenta a nuvem, originando as protoestrelas.



Fonte: elaborada pelo autor (2026).

Grande parte das regiões onde estrelas são formadas são fontes infravermelho, indicando a presença de gás em contração e aquecimento, decorrente da conversão de energia potencial gravitacional em energia interna, associada ao movimento e a agitação das partículas que compõem um corpo (UFRGS, [s.d.]).

Lotes de estrelas que se formaram recentemente a partir de nuvens moleculares, são chamados de aglomerados estelares e nuvens moleculares cheias de aglomerados estelares são chamados de viveiros estelares (NASA, 2026).

2 Formação e Fases Pré-Sequência Principal

2.1 Protoestrelas

A protoestrela surge quando um fragmento se destaca das outras partes da região de formação estelar, tornando-se um objeto bem definido, seu campo gravitacional se destaca do restante da nuvem. Como dito anteriormente, durante a formação da protoestrela, gás cai em direção ao seu centro se contraindo e convertendo energia cinética em energia interna. Esse processo leva ao aquecimento e ao aumento da pressão do corpo, que ao atingir alguns milhares de graus, a protoestrela se torna uma fonte de infravermelho.

Figura 2 – A protoestrela L1527, envolta na nuvem de material que alimenta seu crescimento, observada no infravermelho pelo Telescópio Espacial James Webb.



Fonte: NASA, ESA, CSA e STScI (2022).

Ainda durante o colapso inicial, ele é rápido e o fragmento permite a passagem de radiação de forma fácil. À medida que a densidade aumenta, o fragmento se torna opaco, retendo radiação e consequentemente calor e o aumento da pressão no centro.

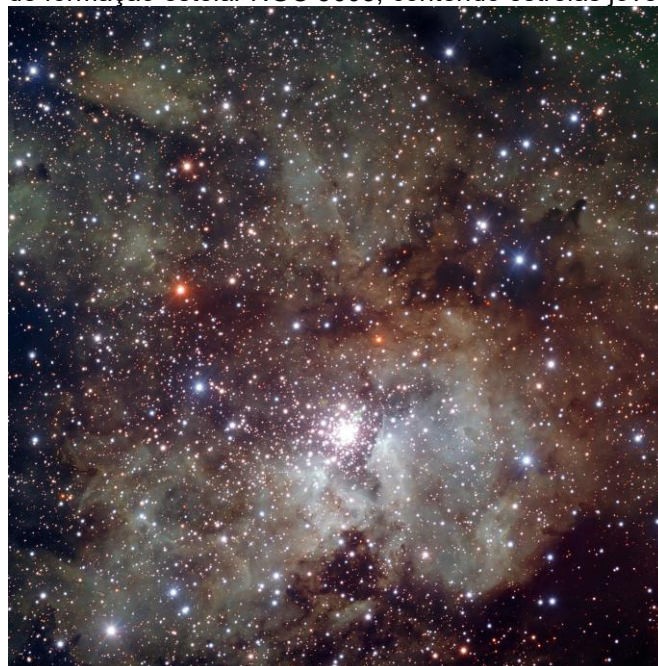
Em algum momento, a pressão se torna grande ao ponto de conter o colapso do objeto, que se torna uma protoestrela estável.

No começo, as protoestrelas têm apenas 1% de sua massa final. O material ainda cai em direção ao centro da protoestrela, acumulando-se em suas regiões mais externas (UFRGS, [s.d.]). Quando ela atinge uma temperatura de oito milhões de kelvin (UFRGS, [s.d.]) após alguns milhões de anos, as reações termonucleares iniciam-se em seu centro. Um forte vento estelar (radiação e partículas) é produzido, finalmente encerrando a queda de gás em direção ao centro. A partir daí a protoestrela se torna uma estrela jovem, pois sua massa não se altera mais, e a sua futura evolução está definida.

2.2 Estrelas Jovens (T-Tauri)

Estrelas quando estão nessa fase inicial, são chamadas de T-Tauri, e elas sempre são encontradas no interior de nuvens de gás das quais nascem (UFRGS, [s.d.]; Gregorio-Hetem *et al.*, 1992). Um exemplo notável é a NGC 3603 (ver Figura 3), uma região de formação estelar localizada a vinte e dois mil anos-luz de distância da terra, considerada uma das mais compactas e luminosas estrelas jovens de grande massa de toda a Via Láctea (ESO, 2010)

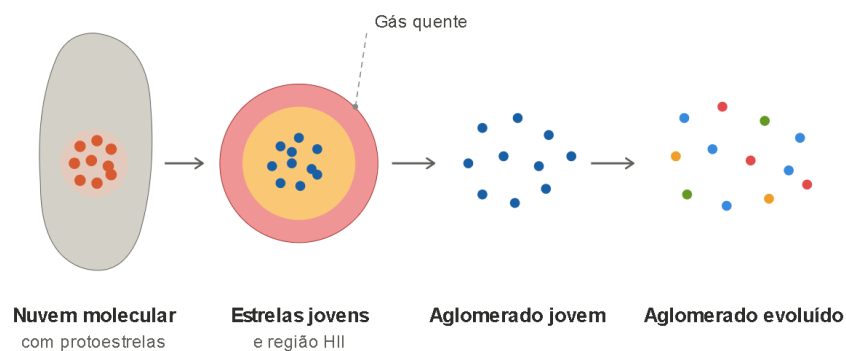
Figura 3 – A região de formação estelar NGC 3603, contendo estrelas jovens de grande massa.



Fonte: ESO, 2010.

As estrelas jovens evoluem a partir de um aglomerado de protoestrelas localizadas em regiões centrais das nuvens moleculares. Elas evoluem juntas, pois a nuvem se fragmenta em vários pedaços simultaneamente. Essas protoestrelas se tornam um aglomerado de estrelas T-Tauri, cuja superfície quente e ventos estelares aquecem o gás à sua volta e formam uma região denominada HII — processo decorrente da ionização do hidrogênio ao redor, por conta da abundância de radiação ultravioleta que as estrelas jovens emitem. Posteriormente, esses aglomerados se quebram e o gás é expelido, o que marca a evolução para as estrelas. Essa expulsão de gás é decorrente da imensa força dos ventos estelares. O esquema abaixo ilustra a evolução.

Figura 4 – Evolução de um aglomerado estelar, da nuvem molecular ao aglomerado evoluído.



Fonte: adaptada de UFRGS ([s.d.]).

É comum achar aglomerados de estrelas jovens próximas a outras estrelas jovens. Isso ocorre decorrente da formação estelar induzida por supernovas. Estrelas muito massivas são as primeiras a se formar no interior de uma nuvem e terminam a sua vida como supernovas. A explosão da supernova no interior da nuvem gera ondas de choque, que comprimem o gás próximo e levando-o a formar estrelas novas. Esse fenômeno leva a uma formação coerente de estrelas (estrelas jovens encontradas próximas a outras estrelas jovens), isso é o motivo do padrão de distribuição coerente de estrelas, visto em várias galáxias. A figura abaixo demonstra esse processo, onde (a), (b) e (c) são processos sucessivos da formação estelar induzida (UFRGS, [s.d.]).

2.3 Anãs Marrons

Em casos em que uma protoestrela se forma com 8% ou menos da massa solar, sua temperatura central nunca atinge a temperatura dos oito milhões de kelvin, e a fusão nuclear não é iniciada. Esta estrela "mal-sucedida" é chamada de anã marrom. Ela é um objeto intermediário entre uma estrela e um planeta como Júpiter (Rebolo; Zapatero Osorio; Martín, 1995).

Mesmo que não ocorra reações de fusão nuclear em seus interiores, anãs marrons emitem luz, principalmente no infravermelho, devido a energia que se acumula durante o colapso do gás em sua formação. Ela tem energia para brilhar por cerca de 15 milhões de anos. A importância das anãs marrons na astronomia está na sua abundância, por ser o tipo mais comum de estrelas, constituindo grande parte da matéria da nossa e das outras galáxias. Decorrido os 15 milhões de anos, elas esfriam, se tornam invisíveis e são chamadas de anãs pretas (UFRGS, [s.d.]).

3 Sequência Principal

Como visto anteriormente, ao final da fase proto estelar o núcleo se encontra cada vez mais denso e quente, porém, esse aquecimento não decorre de reações nucleares, mas sim da contração gravitacional. Também foi visto que essa fonte de energia é passageira, durando cerca de 15 milhões de anos, para sobreviver por bilhões de anos, como o Sol, a estrela precisa repor sua energia de outra forma. A mudança ocorre quando o seu núcleo atinge a temperatura de 8 milhões de kelvin. A partir daí se iniciam as reações termonucleares de fusão do hidrogênio, com a protoestrela se tornando uma estrela. A energia que a fusão nuclear fornece, substitui a contração gravitacional como forma de sustentação, e é aí que a forma mais longa da vida estelar começa: **a sequência principal**.

A sequência principal, nada mais é do que a fase “madura” da estrela. Nessa fase, não há mais mudanças de temperatura, massa e diâmetro, se tornando constantes. Quando a estrela chega nessa etapa, a queima de hidrogênio no seu interior é recente. Por exemplo, o Sol passará cerca de 11 bilhões de anos queimando hidrogênio tranquilamente (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010).

3.1 O Início da Fusão

A fusão nuclear começa após a estrela atingir os já citados 8 milhões de kelvin, e ela funciona da seguinte maneira: 4 núcleos de hidrogênio se fundem para formar 1 núcleo de hélio. O hidrogênio tem apenas 1 próton em seu núcleo, diferente do hélio que possui 2 prótons e 2 nêutrons, e a massa do núcleo formado é um pouco menor que a soma das massas dos 4 núcleos utilizados. Essa diferença de massa (0,007 da massa inicial) é o que será convertida em energia no interior da estrela (vale notar que, dos 4 prótons iniciais, 2 se convertem em nêutrons ao longo do processo, o que justifica a composição final do hélio. Essa conversão ocorre por meio de um decaimento nuclear que libera outras partículas, mas o detalhamento desse mecanismo foge ao escopo deste trabalho). A estrela tem grande quantidade de combustível a ser queimado, pois 90% de sua constituição são átomos de hidrogênio (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010).

3.2 Massa e Tempo de Vida

Para o início da fusão nuclear, os núcleos devem estar extremamente próximos uns dos outros, no entanto por conta de todos terem carga positiva, a repulsão elétrica entre eles impede a aproximação necessária e a fusão não ocorre. Porém no interior de uma protoestrela sofrendo a contração gravitacional, a temperatura aumenta à medida que o objeto colapsa, fazendo com que as partículas atinjam altas velocidades. Dessa maneira, alguns núcleos terão energia necessária para superar a repulsão elétrica, permitindo a interação entre eles.

Quando esses processos termonucleares se estabelecem, eles se autocontrolam. Dessa forma, quando a produção de energia nuclear aumenta, um excesso de pressão é gerado, provocando na estrela uma tendência de se expandir. Com o aumento do tamanho, o gás no interior da estrela tende a se resfriar, fazendo com que a estrela ache temperatura e tamanho ideais para o equilíbrio (o que caracteriza essa fase)(Bandecchi; Bretones; Horvath, 2019).

A massa da estrela e a temperatura em seu interior estão correlacionadas, de forma que uma massa maior resulta em uma temperatura maior. Estrelas mais quentes e mais massivas têm luminosidade superficial alta e consomem o seu combustível de forma muito mais acelerada que estrelas menos massivas, portanto o seu tempo de vida é menor. Como será visto adiante, é também a massa que determinará o destino final da estrela (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010).

4 O Fim da Vida das Estrelas

4.1 Saída da Sequência Principal

Como visto anteriormente, a massa da estrela é o fator crucial que determina como será o fim de sua vida (Maia Gil; Silva Pinho; Fernandes de Fernandes, 2023) . A massa está também relacionada à energia que ela tem armazenada, e a taxa que ela gasta essa energia é a sua luminosidade. Há uma relação matemática que prova que massa e luminosidade estão ligadas ao tempo que a estrela permanece na sequência principal (Bandecchi; Bretones; Horvath, 2019); como o foco do trabalho não está na matemática, mas sim na evolução estelar, a relação não será abordada aqui.

Dessa forma, quanto maior a massa, menor o tempo na fase de estabilidade. Há alguns principais exemplos de casos extremos, que são estrelas do tipo O ou B (que são as que possuem a maior massa de todas, podendo atingir respectivamente: 60 e 18 massas solares.), que permanecem na sequência principal por apenas algumas dezenas de milhões de anos, enquanto as do tipo anãs vermelhas (0,3 massas solares) podem ficar por até trilhões de anos queimando hidrogênio.

A massa também determina a fase pós sequência principal da vida de cada estrela, a saída dessa fase apresenta diferentes possibilidades, que levarão a estrela até a sua morte, os estágios finais de evolução. Quando o hidrogênio do núcleo finalmente é fundido em hélio, o longo equilíbrio que a estrela teve se rompe, bem como sua aparência e pressão interna se modificam (Maia Gil; Silva Pinho; Fernandes de Fernandes, 2023; Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010).

4.2 Gigante Vermelha e Anã Branca

No processo de fusão nuclear, a composição da estrela muda gradualmente, com a transformação do hidrogênio em hélio. No centro da estrela, a temperatura é mais elevada e a quantidade de hélio aumenta mais rapidamente que em outras áreas. À medida que o tempo passa, o núcleo começa a ter cada vez menos quantidade de hidrogênio, até ser nula, com um núcleo composto só de hélio. O processo de produção de energia nuclear termina e a fusão se inicia nas camadas mais acima. Desse modo, o núcleo mais interno de He puro, se torna cada vez maior. Como nesse

caso, o hélio não é fundido, não há produção de radiação e a pressão do gás diminui no núcleo mais interno, porém a gravidade não diminui, fazendo com que haja mudanças na estrutura da estrela, inevitavelmente. Cerca de 10 bilhões de anos após a chegada na sequência principal, no caso de uma estrela como o Sol, o núcleo de hélio começa a sua contração.

Em casos em que ocorre a fusão do hélio em elementos mais pesados, uma nova situação de equilíbrio pode surgir. Há mais energia sendo gerada com a queima do He e a pressão da radiação é suficiente para contrabalancear a contração gravitacional. Como já visto anteriormente, para que ocorra a fusão, são necessárias altas temperaturas, para que seja fornecida bastante energia cinética, suficiente para superar a força de repulsão eletromagnética entre partículas de mesma carga, no caso dos núcleos atômicos, positiva. Como no He há dois prótons no núcleo, a repulsão é maior ainda do que no hidrogênio, fazendo com que temperaturas da ordem dos 10^8 K sejam necessárias (para fundir o núcleo de hidrogênio é necessário pelo menos 10^7 K).

Com o fim da fusão nuclear no interior da estrela, a pressão diminui na região mais interna, causando um aumento na temperatura. Isso faz com que a queima de hidrogênio seja mais intensa, gerando energia de forma mais rápida do que era na sequência principal. Mesmo que a queima tenha cessado no interior da estrela, agora ela brilha mais.

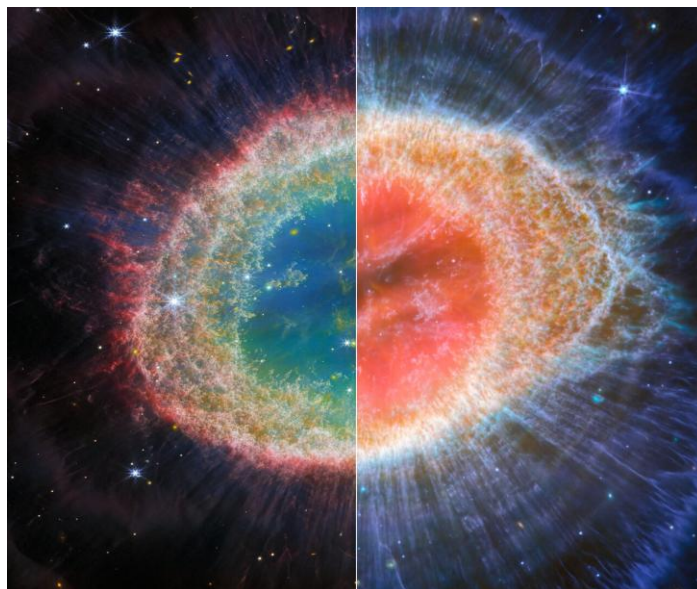
A rápida queima de H causa uma pressão de radiação que impele as camadas mais externas a aumentarem o seu raio. Com a expansão, a temperatura superficial da estrela diminui, e ela começa a se transformar em uma gigante vermelha, processo que dura 100 milhões de anos. Porém, a expansão da gigante vermelha não continua indefinidamente, chega um momento em que o núcleo atinge a pressão e temperatura necessária para a fusão do He. Quando isso ocorre, três núcleos de He se fundem para formar um núcleo de carbono (esse processo recebe o nome de triplo-alfa) (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010). Essa ignição acontece de forma abrupta, num evento que é conhecido como flash de hélio, restabelecendo a pressão térmica no núcleo. A partir daí a estrela se equilibra com duas fontes de energia: o hélio se fundindo no núcleo, e o hidrogênio na camada ao seu redor.

Algumas dezenas de milhões de anos depois do flash de He, um novo núcleo estelar foi formado, composto agora, principalmente de carbono. O interior estelar está dividido agora em: núcleo interno de C; camada de He queimando; camada de H queimando; camada de H, onde não há queima. A partir daí a estrela se expande ainda mais, aumentando ainda mais sua luminosidade, sendo nomeada supergigante vermelha.

O núcleo da supergigante vermelha não é quente o suficiente para continuar o processo de fusão e transformar o carbono em elementos mais pesados. Desta forma o núcleo continua a diminuir de tamanho, por conta da força gravitacional. A contração ocorre até que os elétrons fiquem tão próximos de si, que o gás não pode mais ser comprimido - fenômeno chamado degenerescência da matéria (Horvath, 2022). A temperatura, por conta disso, se estabiliza e a energia é produzida apenas nas camadas mais externas, onde a queima de H e He ainda é presente. Com o aumento da radiação vinda dessas camadas, o envoltório da estrela (suas camadas mais externas, de gás que não participa da fusão) se torna instável e acaba sendo ejetado. A estrela agora é dividida em duas componentes: um núcleo central muito pequeno, quente e de alta densidade, com apenas algumas camadas externas onde ocorre a queima de He; o material ejetado, que é frio e difuso, distante do núcleo central, denominado de nebulosa planetária.

Com o passar do tempo, a nebulosa planetária continua o seu processo de expansão, cada vez mais fria e difusa. A remanescente estelar no centro é composta principalmente de carbono, e por conta da sua alta temperatura, continua visível, mas com pouco brilho por ser pequena. Essa estrela restante é muito quente e densa, com o tamanho próximo ao da Terra, e metade da massa do Sol, recebendo o nome de anã branca (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010).

Figura 5 – A Nebulosa do Anel (M57), uma nebulosa planetária formada por uma estrela que expeliu suas camadas externas, observada em duas faixas do infravermelho pelo Telescópio Espacial James Webb; no centro, a anã branca remanescente.



Fonte: ESA/Webb, NASA e CSA (2023).

4.3 Explosão de Supernova

Todas as estrelas, após terem o hidrogênio em seu núcleo esgotado, deixam a sequência principal e começam a se expandir. Porém, estrelas com diferentes massas têm caminhos diferentes. Quanto maior a massa menor será a sua densidade interna quando a temperatura de queima de He for atingida, então a pressão gerada pela proximidade dos elétrons será menor também, fazendo com que o núcleo estelar seja mais estável durante a produção de C. Nessa fase, não há eventos explosivos como o flash do He, e não há mudanças repentinas.

Em estrelas com massas acima de oito massas solares, a temperatura interna atinge o necessário para fundir carbono em elementos mais pesados. Nesses casos, o núcleo estelar se desenvolve tão rapidamente, que a queima de He chega antes da estrela se tornar uma gigante vermelha. Ela passa por várias etapas de fusão nuclear, sem sofrer drásticas alterações. Quanto mais se aprofunda nas camadas internas de uma estrela massiva, maiores temperaturas são atingidas e diferentes processos de fusão nuclear acontecem - essa separação por camadas, frequentemente é comparada a uma cebola. Essas diversas camadas, processam cada vez elementos mais pesados, como: oxigênio, neônio, magnésio, silício e ferro, o qual compõe a parte

mais interna do núcleo, sendo o limite de fusão, também (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010).

Cada período entre o equilíbrio (período em que há fusão no núcleo) e instabilidade (o combustível daquela etapa acaba), a temperatura central aumenta e as reações nucleares aceleram, e a energia gerada sustenta a estrela contra o colapso gravitacional. Cada vez esse processo se torna mais rápido. Em estrela com vinte massas solares, o silício (um dos últimos elementos a se fundir) queima por apenas uma semana, e o núcleo estelar formado de ferro se desenvolve em menos de um dia.

O átomo de ferro é muito compacto e estável, e a sua fusão para gerar elementos mais pesados não gera energia. Com o fim da geração de energia, não há mais como conter o colapso gravitacional causando uma implosão estelar. A temperatura aumenta para 10^9 K, suficiente para gerar fótons energéticos (raios gama), capazes de quebrar o ferro em elementos mais leves, dividindo-os até restar apenas prótons e nêutrons - esse processo é chamado de fotodesintegração. Para que ocorra a fotodesintegração, é necessário altas energias, e conforme a energia é absorvida, o núcleo estelar se resfria, diminuindo mais ainda a pressão e acarretando num colapso gravitacional acelerado (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010).

Com o aumento da densidade, a pressão torna-se tão intensa que os elétrons são forçados a se fundir com os prótons: cada par elétron-próton dá origem a um nêutron e um neutrino. Dessa forma, as partículas eletricamente carregadas vão desaparecendo, e a matéria transforma-se progressivamente em um gás de nêutrons. Esses nêutrons, por sua vez, comprimem-se entre si até atingirem a degenerescência de nêutrons, processo análogo ao que ocorre com os elétrons na anã branca. A pressão gerada pelos nêutrons, é capaz de reduzir o colapso gravitacional. No entanto, a densidade atinge níveis tão extremos que o equilíbrio não é alcançado (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010; Horvath, 2022).

Em seguida, o núcleo estelar, agora composto de nêutrons, resiste à compressão e interrompe o colapso. As camadas externas que ainda despencavam se chocam contra esse núcleo rígido e são arremessadas de volta por uma enorme onda de choque, sendo ejetadas explosivamente para o espaço — levando consigo até mesmo o ferro do núcleo interno. Esse evento, altamente energético, é conhecido

como explosão de supernova. Existem dois tipos principais: o tipo II, descrito acima, resulta do colapso do núcleo de uma estrela massiva, restando dele um núcleo de nêutrons; já o tipo I decorre de uma anã branca. Como visto anteriormente, uma anã branca é normalmente sustentada pela pressão de degenerescência dos elétrons. Porém, quando ela faz parte de um sistema binário, pode receber matéria de sua estrela companheira; se sua massa ultrapassar 1,4 massas solares, a pressão de degenerescência deixa de ser suficiente, a fusão do carbono se inicia de forma descontrolada e a estrela explode por inteiro — um evento semelhante ao das estrelas massivas, mas por um motivo diferente (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010; Bandecchi; Horvath; Bretones, 2019; Thorne, 1994).

4.4 Estrelas de Nêutrons

Na supernova do tipo I, não sobra nada da estrela original depois da explosão. Porém, nas de tipo II, resta um pequeno “caroço” muito denso, proveniente da estrela original. Como já visto anteriormente, antes da explosão de supernova acontecer, elétrons e prótons se fundem de forma a produzir nêutrons e neutrinos. Os neutrinos, por sua vez, conseguem escapar e aceleram a propagação da onda de choque, que detonou o processo explosivo. Essa onda não se inicia exatamente no centro da estrela, deixando a parte mais interna do núcleo estelar intacta. O núcleo é formado basicamente de nêutrons, e, portanto, esse remanescente é chamado de **Estrela de Nêutrons**. Seu tamanho é muito pequeno, cerca de 10 a 20 km de raio, e sua densidade é extrema - da ordem de $10^{17} \text{ kg.m}^{-3}$ - bilhões de vezes mais denso que uma anã branca. Uma característica marcante das estrelas de nêutrons é sua velocidade de rotação extrema, com períodos medidos em frações de segundos - essa velocidade é resultante da conservação de momento angular. Outra característica importante é o forte campo magnético, criado pela compressão das linhas de campo, durante o processo de contração. É por meio dessas duas propriedades que a detecção e o estudo desses objetos são possíveis (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010; Oliveira Filho; Saraiva, [s.d.]).

A primeira detecção de uma estrela de nêutrons ocorreu em 1967, embora sua existência já tivesse sido prevista teoricamente na década de 1930, muito antes da confirmação observacional (Thorne, 1994). Esse objeto foi identificado por meio de emissões de rádio que chegavam em pulsos de frequência regular e invariável, o que

lhe rendeu o nome de pulsar. Trata-se de uma estrela de nêutrons cujo eixo magnético não coincide com o eixo de rotação: enquanto ela gira, os feixes de radiação emitidos por seus polos magnéticos varrem o espaço como o fecho de um farol. Cada vez que um desses feixes aponta em direção à Terra, registramos um pulso - daí a emissão periódica que caracteriza esses objetos (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010; Oliveira Filho; Saraiva, [s.d.]).

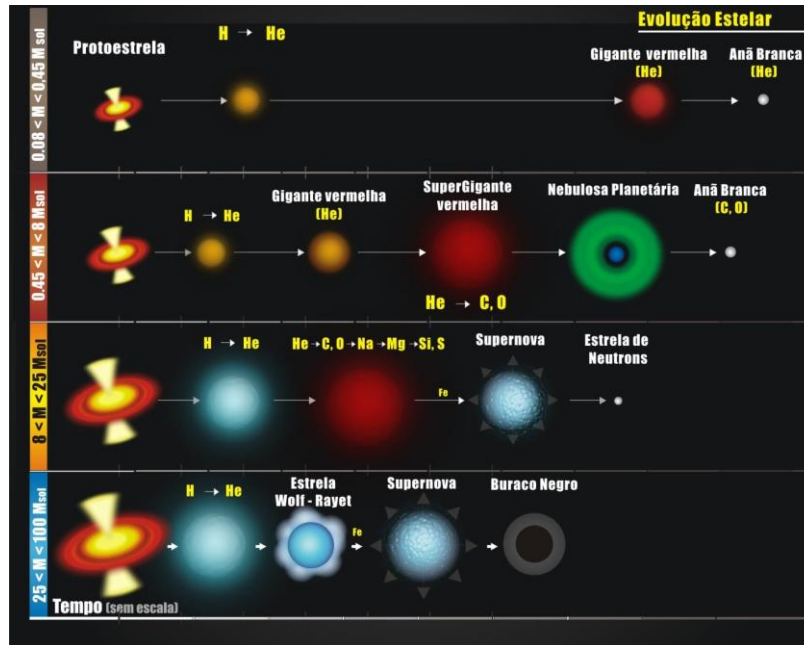
Figura 6 – A Nebulosa do Caranguejo (M1), remanescente da supernova observada no ano de 1054; o ponto brilhante em seu centro é um pulsar, a estrela de nêutrons que restou da explosão. Imagem do Telescópio Espacial James Webb.



Fonte: NASA, ESA, CSA e STScI (2023).

Assim como as anãs brancas têm um limite de 1,4 massas solares para não colapsar, estrelas de nêutrons também possuem um limite até que a pressão proveniente da degenerescência de nêutrons possa sustentá-la. Quando as estrelas de nêutrons têm massa acima de três massas solares, a pressão da degenerescência de nêutrons não é suficiente para contrabalancear o colapso. Com o colapso ocorrendo de forma contínua, surge o objeto mais extremo da física estelar: o **buraco negro**; sua gravidade é tão intensa que nem a luz consegue escapar (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010; Bandecchi; Horvath; Bretones, 2019; Thorne, 1994).

Figura 7 – Esquema da evolução estelar, sem escala, para diferentes faixas de massa: da protoestrela aos destinos finais (anã branca, estrela de nêutrons e buraco negro).



Fonte: Oliveira Filho e Saraiva ([s.d.]).

5 Buracos Negros

5.1 Formação de Buracos Negros

Como vimos anteriormente, após a explosão de supernova do tipo II sobra um pequeno corpo remanescente do núcleo da estrela. Se esse “caroço” restante tiver uma massa acima de três massas solares, nem a degenerescência de nêutrons segura o colapso gravitacional e ele ocorre de forma contínua e inevitável, nada o detém. A gravidade nesse momento é tão intensa, que a velocidade de escape necessária supera a da luz. Como nada viaja mais rápido que a luz, nem ela consegue escapar dessa região - e é isso que caracteriza um buraco negro (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010; Thorne, 1994).

5.2 Horizonte de Eventos

A região da qual nem a luz escapa tem um limite bem definido, e é chamado de horizonte de eventos. Não se trata de uma superfície física, mas um limite invisível no espaço. Até cruzar esse limite ainda é possível escapar do campo gravitacional do buraco negro, mas ao cruzá-lo não mais. O nome vem justamente daí: nenhum evento que aconteça além dessa fronteira pode ser visto ou comunicado ao resto do universo.

A distância entre o centro o buraco negro e o horizonte de eventos é chamado de raio de Schwarzschild, e está relacionado apenas a massa do objeto - quanto maior a massa, maior o horizonte. Um buraco negro com a massa do Sol, teria apenas 3km; um de três massas solares, aproximadamente 9km (Gregorio-Hetem; Jatenco-Pereira, 2010; Thorne, 1994).

5.3 A Radiação Hawking

Até aqui, vimos que nada é capaz de escapar de um buraco negro. Porém, isso só é verdade quando os efeitos da mecânica quântica são desconsiderados. Na década 1970, Stephen Hawking mostrou que ao considerar esses efeitos, os buracos negros passam a emitir partículas - uma emissão que ficou conhecida como radiação Hawking. Para compreender isso, é necessário saber que o vácuo, na física quântica, não é realmente vazio: nele surgem constantemente pares de partícula e antipartícula, que aparecem e se aniquilam em um intervalo de tempo extremamente curto.

O fenômeno ocorre quando um desses pares surge exatamente na borda do horizonte de eventos. Nesse caso, pode acontecer de uma das partículas cair para dentro do buraco negro enquanto a outra permanece do lado de fora. A partícula que escapou perde o seu par, e não é mais aniquilada, tornando-se uma partícula real e se propagando para longe. Para um observador externo, é como se o buraco negro estivesse emitindo partículas. Essa energia emitida, tem um custo: ela é retirada do próprio buraco negro, que perde massa lentamente. Ao longo de períodos extremamente longos, ele encolhe cada vez mais e pode, eventualmente, evaporar por completo (Santi; Santarelli, 2019; Neves, 2020).

6 Relatividade Especial e seus Fundamentos

A teoria da relatividade surge como uma formulação capaz de descrever fenômenos físicos não apenas em regimes de baixas velocidades, nos quais a mecânica clássica apresenta grande sucesso, mas também em situações envolvendo velocidades próximas à velocidade da luz. A partir dessa nova interpretação, grandezas anteriormente consideradas absolutas, como espaço e tempo, passam a depender do estado de movimento do observador. Entretanto, essa relatividade não ocorre de maneira arbitrária, uma vez que certas quantidades permanecem invariantes entre referenciais, destacando-se a velocidade da luz no vácuo, cuja constância foi motivada por resultados experimentais como os obtidos no experimento de Michelson–Morley.

6.1 Limitações da Mecânica Clássica

No estudo da mecânica newtoniana, o tempo é tratado como uma grandeza absoluta - descrição a qual assume que diferentes observadores inerciais compartilham uma mesma descrição temporal para eventos físicos. Nesse sentido, medidas de tempo independem do estado de movimento relativo entre observadores, permitindo a formulação das transformações galileanas clássicas de coordenada. Tal formalismo apresenta elevada precisão na descrição de fenômenos envolvendo velocidades pequenas em comparação à velocidade da luz.

Considere dois observadores inerciais, A e B, associados a referenciais distintos. O observador A descreve os eventos por meio das coordenadas (x, t) , enquanto o observador B, que se move com velocidade relativa constante v em relação a A, utiliza as coordenadas (x', t') . Na mecânica clássica, a mudança entre esses referenciais é realizada pelas transformações de Galileu, expressas por:

$$x' = x - vt \quad (1)$$

$$t' = t \quad (2)$$

em que v representa a velocidade relativa entre observadores. De maneira análoga, a composição clássica de velocidades derivada de (1) e (2) pode ser expressa por:

$$V_{Res} = V_{Rel} + V_1 \quad (3)$$

Em que V_{Rel} representa a velocidade de uma partícula “móvel” em relação ao referencial em movimento, V_1 corresponde a velocidade do referencial móvel em relação a um observador “fixo” e V_{Res} é a velocidade da partícula com relação a um referencial “fixo”.

Entretanto, embora esse modelo apresente resultados satisfatórios em diversas aplicações físicas, sua validade torna-se limitada ao considerar sistemas envolvendo velocidades próximas à velocidade da luz, situação na qual diversas previsões experimentais tornam-se incompatíveis com a formulação clássica. Tal incompatibilidade motivou o desenvolvimento da teoria da relatividade especial formulada por Albert Einstein em 1905, introduzindo uma nova interpretação para os conceitos de espaço e tempo.

6.2 Postulados da Relatividade Especial

- 1 - Princípio da Relatividade -

As leis físicas são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Não há observador privilegiado, ou absoluto nas descrições de eventos no espaço-tempo

- 2 - Princípio da constância da Velocidade da Luz C

A Luz possui uma velocidade constante no vácuo que independe do movimento do observador ou da fonte emissora.

6.3 Dilatação Temporal, Contração Espacial e o Fator de Lorentz

No âmbito dos postulados da relatividade especial, a interpretação newtoniana de espaço e tempo absolutos mostra-se insustentável. A ausência de referenciais privilegiados, combinada à invariância da velocidade da luz no vácuo para qualquer observador inercial, impõe que medidas de intervalos espaciais e temporais associadas a um mesmo evento físico sejam, em geral, distintas entre referenciais em

movimento relativo. Para que a constância de 3×10^8 m/s seja mantida de forma consistente, as transformações entre referenciais devem necessariamente acoplar as coordenadas espaciais e temporais.

Desse acoplamento emerge o fator de Lorentz, grandeza adimensional que quantifica a magnitude dos efeitos relativísticos sobre as descrições espaço-temporais em função da velocidade relativa entre os referenciais inerciais.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

onde v denota a velocidade relativa entre os referenciais, c a velocidade da luz no vácuo e γ o fator de Lorentz. Essa formulação permite inferir dois fenômenos diretamente verificáveis: a contração do espaço e a dilatação do tempo expressas, respectivamente, por:

$$L = L_0 / \gamma \quad (5)$$

$$t = \gamma t_0 \quad (6)$$

6.4 Transformações de Lorentz

Diante da dependência entre as coordenadas espaciais e temporais introduzida pela relatividade especial, torna-se necessário reformular a maneira pela qual medidas realizadas em diferentes referenciais são relacionadas. Uma vez que observadores em movimento relativo atribuem valores distintos a intervalos espaciais e temporais para um mesmo fenômeno físico, as transformações clássicas deixam de fornecer descrições compatíveis com os postulados relativísticos.

Nesse contexto, introduzem-se as transformações de Lorentz, responsáveis por relacionar as coordenadas espaço-temporais entre referenciais inerciais distintos, preservando a forma das leis físicas e garantindo a constância da velocidade da luz no vácuo.

$$x' = \gamma(x - vt) \tag{7}$$

$$t' = \gamma(t - \frac{vx}{c^2}) \tag{8}$$

7 Espaço-Tempo de Minkowski

O espaço-tempo de Minkowski introduz-se com o intuito de fornecer uma formulação geométrica compatível com os resultados da relatividade especial. Nessa descrição, espaço e tempo deixam de ser tratados como grandezas independentes e passam a compor uma única estrutura quadridimensional, na qual os eventos físicos são representados por três coordenadas espaciais e uma coordenada temporal, que se combinam para preservar a estrutura geométrica do espaço-tempo e a forma das leis físicas em diferentes referenciais inerciais.

Uma vez que medidas de comprimento e intervalo temporal próprios dependem do estado de movimento relativo entre observadores, define-se uma grandeza invariante denominado intervalo espaço-temporal, preservada entre referenciais inerciais e utilizada como elemento geométrico fundamental na descrição relativística.

7.1 Eventos e Representação Espaço-Temporal

No contexto do espaço-tempo de Minkowski, um evento corresponde a uma ocorrência física associada a uma posição e um instante específicos, sendo representado por um conjunto de coordenadas da forma (t, x, y, z) . Tal representação permite descrever fenômenos físicos em uma estrutura quadridimensional unificada, na qual espaço e tempo passam a constituir componentes de uma mesma entidade geométrica.

A evolução temporal de um observador ou sistema físico nessa estrutura é representada por uma trajetória denominada linha de mundo, cuja forma depende do estado de movimento considerado. Dessa maneira, diagramas espaço-temporais constituem uma ferramenta geométrica para a análise das relações entre eventos observados em diferentes referenciais.

7.2 Diagramas de Espaço-Tempo

Diagramas espaço-temporais constituem representações gráficas utilizadas para descrever a posição e a evolução temporal de eventos em uma mesma estrutura geométrica. Nessa representação, convencionou-se dispor a coordenada temporal ao longo do eixo vertical e as coordenadas espaciais ao longo dos eixos horizontais,

permitindo a visualização simultânea das relações espaciais e temporais associadas a um evento.

7.3 O Intervalo Invariante Espaço-Temporal e a Métrica

O intervalo espaço-temporal entre dois eventos é definido por

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (9)$$

sendo ds^2 uma quantidade invariante sob transformações de Lorentz. Dessa forma, embora diferentes observadores possam medir valores distintos para intervalos espaciais e temporais, todos concordam quanto ao valor do intervalo associado a um mesmo par de eventos.

Tal propriedade está diretamente relacionada à invariância da velocidade da luz e constitui o elemento geométrico fundamental do espaço-tempo de Minkowski.

De forma equivalente, o intervalo pode ser representado por meio da métrica $g_{\mu\nu}$, definida pela matriz

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

permitindo escrever o intervalo na forma compacta

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (10)$$

onde dx^μ e dx^ν representam as componentes do deslocamento infinitesimal entre dois eventos no espaço-tempo. Nessa formulação, a métrica atua como o objeto matemático responsável por definir a medida geométrica entre eventos e recuperar o intervalo espaço-temporal anteriormente definido.

Utiliza-se ainda a convenção de soma de Einstein, segundo a qual índices repetidos indicam somatório automático sobre as componentes espaço-temporais, fornecendo uma representação compacta para operações geométricas no espaço-tempo.

7.4 Cones de Luz e Causalidade

A partir da definição do intervalo espaço-temporal, observa-se que quando

$$ds^2 = 0$$

A separação entre dois eventos é dita do tipo luz. Nesse caso, considerando uma dimensão espacial bidimensional, obtém-se

$$dx = cdt$$

indicando que a separação entre os eventos corresponde exatamente à trajetória que seria percorrida por um sinal luminoso.

Em diagramas espaço-temporais, com ct no eixo vertical e x no eixo horizontal, trajetórias são representadas por retas inclinadas a 45 graus, que delimitam uma região denominada cone de luz. Essa estrutura estabelece as relações de causalidade no espaço-tempo, separando eventos que podem ser fisicamente conectados, aqueles em que $ds^2 < 0$ - tipo Tempo - casualmente conectáveis, daqueles que exigiram velocidades superiores à da luz em que $ds^2 > 0$ - tipo Espaço - casualmente incontactáveis.

8 Espaço-Tempo de Rindler e Princípio de Equivalência

8.1 Espaço-Tempo de Rindler

Para a descrição de observadores com aceleração própria constante, no entanto, é necessária uma parametrização nova, já que, em Minkowski, as coordenadas estavam associadas a observadores inerciais, sem a presença de matéria- isto é, o espaço tempo era plano. Dessa maneira, surge a descrição espaço-temporal de Rindler. Nela, os referenciais possuem aceleração própria constante, e são, no diagrama, representados por hipérboles assintóticas aos cones de luz, dado que sua velocidade nunca pode ultrapassar a velocidade da luz.

Ao impor a aceleração como constante, obtém-se, a partir do elemento de linha a seguinte expressão para a hipérbole:

$$x^2 - c^2 t^2 = \frac{c^4}{a^2}$$

Define-se então, para simplificação das descrições, um parâmetro ξ o qual identifica cada uma das hipérboles tal que

$$\xi = \sqrt{x^2 - c^2 t^2}$$

Graficamente, esse parâmetro pode ser visualizado como a distância do vértice de cada uma das hipérboles até o centro de coordenadas, ao longo do eixo x.

Além disso, observa-se que $\xi = \frac{c^2}{a}$ logo, à medida que ξ aumenta, a aceleração diminui, representado uma hipérbole de curva menos acentuada, e aceleração menos intensa.

8.2 Princípio da Equivalência

A descrição de Rindler evidencia que observadores acelerados percebem o espaço tempo de maneira distinta daquela observada em referenciais inerciais. Em particular, observadores localizados em hipérboles diferentes, por possuírem acelerações próprias distintas, medem intervalos temporais diferentes, de modo que

relógios situados em posições distintas do referencial acelerado não permanecem sincronizados.

O comportamento dos corpos em queda e as diferenças no fluxo temporal observadas nesse contexto são análogos aos fenômenos verificados em campos gravitacionais. A partir dessa equivalência, Einstein postulou que era impossível distinguir os efeitos produzidos por um campo gravitacional daqueles promovidos pela aceleração própria. Tal postulado ficou conhecido como princípio da equivalência, e permite interpretar a gravidade não como uma força no sentido clássico, mas como uma geometria espaço-temporal.

8.3 As Equações de Einstein

Tal princípio conduz a uma reformulação da gravidade como uma manifestação da geometria espaço-temporal, estrutura curvada pela presença de energia. Nesse contexto, Einstein formulou as equações de campo da relatividade geral expressas por:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (11)$$

Em que $G_{\mu\nu}$ representa a geometria e a curvatura do espaço tempo, e $T_{\mu\nu}$ corresponde ao tensor energia momento, que descreve a distribuição de matéria e energia. Dessa forma, a dinâmica gravitacional passa a ser entendida como uma relação entre geometria e conteúdo material, na qual a presença de massa e energia determina a estrutura métrica do espaço-tempo e, conseqüentemente, o movimento das partículas livres e da radiação.

9 A Energia, a Quadrivelocidade e o Quadrimomento de uma Partícula

Conceitos físicos como velocidade e momento, a partir da análise relativística de manutenção do invariante espaço-temporal, assumem formas mais gerais, associadas à métrica. A quadrivelocidade representa a derivada com relação ao tempo próprio - isto é, o tempo medido no referencial da própria partícula - do quadrivetor X^μ (ct, x, y, z) de modo que $U^\mu = \frac{dX^\mu}{d\tau}$, em que τ é o tempo próprio, cujas componentes descrevem a evolução temporal e espacial da partícula no espaço-tempo. Multiplicando-se a quadrivelocidade pela massa invariante do corpo, obtém-se o quadrimomento,

$$P^\mu = U^\mu \cdot m = (\gamma mc, \gamma mv)$$

sendo U^μ o quadrivetor velocidade, tal que $U^\mu = \gamma(c, v)$ e P^μ o quadrimomento da partícula, tal que $P^\mu = \gamma m(c, v_x, v_y, v_z)$

Daí, deriva-se o fato de que, como $E = \gamma mc^2$, conclui-se que a componente temporal do quadrimomento corresponde à energia relativística da partícula dividida pela velocidade da luz, isto é

$$P^0 = \frac{E}{c}$$

9.1 A Solução de Schwarzschild

A obtenção de soluções particulares das equações de campo permite descrever diferentes configurações gravitacionais de interesse físico. Dentre elas, destaca-se a solução de Schwarzschild, correspondente ao caso de uma distribuição de massa esfericamente simétrica, estacionária e desprovida de rotação.

Essa solução fornece a descrição mais simples de um campo gravitacional relativístico e possibilita a análise de fenômenos como a dilatação temporal gravitacional, a curvatura das trajetórias geodésicas e a existência de horizontes de eventos, constituindo a base para o estudo dos buracos negros não rotacionais.

A geometria espaço temporal associada a essa formulação pode ser expressa matematicamente por:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \quad (12)$$

Em que representa a coordenada radial (ou raio areal), definida de modo que superfícies esféricas centradas na massa possuam área $4\pi r^2$, G a constante gravitacional e M o valor da massa.

À luz dessa formulação, e tomando o buraco negro como não racional, são observáveis a dilatação temporal e a contração espaço-temporal, haja vista que o intervalo invariante que descreve o raio real da estrela representado por

$$\int_{r_0}^{r_1} ds = \int_{r_0}^{r_1} \sqrt{\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1}} dr > r_1 - r_0$$

tomando $dt^2 = 0$ e $+r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 = 0$. Dessa maneira é nítido que a distância radial própria é superior à diferença entre as coordenadas radiais, evidenciando a curvatura do espaço nas proximidades da massa. Já para a dilatação temporal:

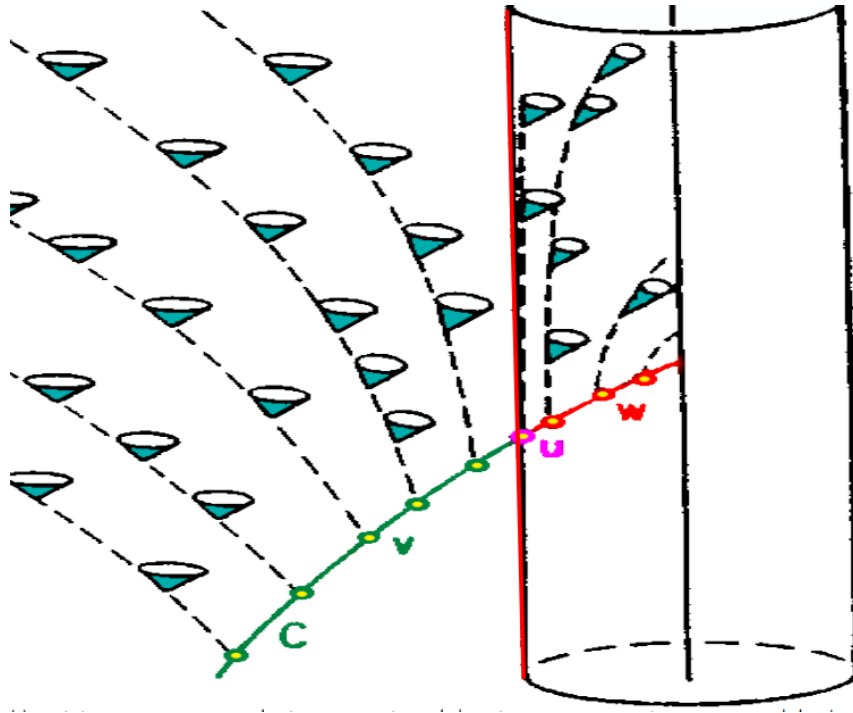
$$\int_{t_0}^{t_1} ds = \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)} c^2 dt^2 < t_1 - t_0$$

Tomando um observador estacionário. Isso evidencia que o fluxo temporal transcorre de maneira mais devagar nas proximidades do corpo.

Também é notório o raio limite $r_s = \frac{2GM}{c^2}$, em que a métrica apresenta singularidade aparente de coordenadas, valor denominado raio de Schwarzschild. Essa medida representa o valor crítico da coordenada radial que delimita o horizonte de eventos de um buraco negro não rotacional.

9.2 Diagrama de Espaço-Tempo de Schwarzschild e os Cones de Luz

Figura 8 – Nesse diagrama, a região delimitada pelo cilindro representa o interior do horizonte de eventos, cuja fronteira é indicada pela linha vermelha que passa pelo ponto U. Em regiões suficientemente distantes da massa, os cones de luz apresentam-se aproximadamente simétricos, refletindo a estrutura causal do espaço-tempo plano discutida anteriormente no contexto de Minkowski. À medida que se aproximam do objeto gravitacional, os cones inclinam-se progressivamente em direção à massa.



Fonte: adaptado de Orsi ([s.d.], p. 93).

No limite do raio de Schwarzschild, uma das geratrizes do cone de luz coincide com o horizonte de eventos. No interior dessa região, todas as trajetórias causais futuras apontam para a singularidade, que passa a constituir o destino causal inevitável de toda partícula ou radiação que ultrapasse o horizonte.

Considerando trajetórias luminosas radiais, tal comportamento pode ser obtido diretamente a partir da métrica de Schwarzschild. Impondo $ds^2 = d\theta = d\phi = 0$ obtém-se

$$\frac{dr}{dt} = \pm c \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)$$

logo, caso $r \gg r_s = \frac{2GM}{c^2}$ tem-se que

$$\frac{dr}{dt} \rightarrow \pm c$$

recuperando a trajetória de um raio no espaço tempo plano. No entanto, no limite $r \rightarrow r_s$ observa-se que

$$\frac{dr}{dt} \rightarrow 0$$

ou seja, nas coordenadas de Schwarzschild a velocidade radial da luz tende a 0, fato que pode ser observado geometricamente pela inclinação progressiva dos cones de luz em direção ao interior do buraco negro.

No interior do horizonte, $r < r_s$, o termométrico $\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)$ torna-se negativo, matematicamente, isso indica que a coordenada radial passa a desempenhar o papel de uma coordenada temporal, enquanto t torna-se espacial.

Embora a solução de Schwarzschild descreva adequadamente o campo gravitacional externo de corpos esféricos simétricos e não rotacionais, a maior parte dos objetos astrofísicos reais possui momento angular diferente de zero. Nessas condições, a rotação da massa modifica a estrutura do espaço-tempo circundante, tornando necessária uma solução mais geral das equações de Einstein.

10 Métrica de Kerr

Embora a solução de Schwarzschild constitua a descrição relativística mais simples de um campo gravitacional, ela apresenta limitações na representação de objetos astrofísicos reais, uma vez que se espera que buracos negros formados por processos naturais possuam momento angular diferente de zero em virtude da conservação do momento angular decorrente de sua formação.

Nesse contexto, a solução de Kerr surge como uma generalização da métrica de Schwarzschild para corpos em rotação, incorporando os efeitos do momento angular sobre a geometria espaço-temporal. Sua forma matemática pode ser expressa por:

$$ds^2 = -(\Delta/\rho^2)[dt - a \sin^2 \theta d\phi]^2 + (\sin^2 \theta/\rho^2)[(r^2 + a^2) d\phi - a dt]^2 + (\rho^2/\Delta) dr^2 + \rho^2 d\theta^2$$

Em que $d\phi$ representa a rotação, e a é o parâmetro de rotação $\frac{J}{Mc}$ sendo J seu momento angular e M sua massa. Nesse cenário, surge um outro valor, para além do raio de schwarzschild, de grande relevância, ele é dado por:

$$r = r_0(\theta) \equiv m + (m^2 - q^2 - a^2 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}}$$

Ele representa o chamado limite estático, e corresponde à superfície além da qual não há trajetórias fisicamente possíveis com $d\phi = 0$. A região determinada entre esse limite e o horizonte de eventos da massa é denominada ergosfera e compreende uma área em que, para partículas cujas trajetórias satisfaçam $ds^2 \leq 0$, $d\phi$ é necessariamente diferente de 0.

Tal fato ocorre pois o termo métrico torna-se negativo, ou seja $g_{tt} > 0$, implicando que mesmo para observadores com $dr = d\theta = d\phi = 0$, obtém-se $ds^2 > 0$, indicando que não existem trajetórias temporais correspondentes a partículas em repouso em relação a observadores localizados no infinito.

Desse modo, uma partícula nessa região é forçada a adquirir velocidade angular no mesmo sentido da rotação do buraco negro efeito conhecido como Frame dragging.

No entanto, como discutido anteriormente, a energia medida por um observador localizado no infinito pode ser associada à componente temporal do quadrimomento da partícula. Nesse contexto, a presença do termo misto $d\phi dt$, responsável pelo arrastamento de referenciais, permite que, no interior da ergosfera, existam trajetórias para as quais essa energia assuma valores negativos.

Tal propriedade constitui o fundamento físico do processo de Penrose e dos mecanismos de extração de energia de buracos negros rotacionais.

11 Propriedades Gerais dos Buracos Negros

11.1 Horizonte de Eventos

O horizonte de eventos representa o limite em que os cones de luz possuem uma de suas geratrizes coincidentes com as fronteiras delimitadas pelo buraco negro, ele define a região causalmente desconectada do infinito. Após sua travessia, toda e qualquer trajetória temporal futura conduzirá à singularidade, que se torna o destino causal de qualquer partícula ou radiação que se encontre no interior dessa região. Sua distância corresponde, matematicamente, para um buraco negro de Schwarzschild, a:

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

11.2 Singularidade Gravitacional Real

Ela corresponde à região em que as quantidades geométricas associadas à curvatura espaço temporal divergem, isto é, na descrição de Schwarzschild, o ponto em que $r = 0$.

11.3 Buracos Negros “Não Possuem Cabelo”

Tal propriedade diz respeito à plena capacidade de descrição de um buraco negro por meio de apenas 3 grandezas macroscópicas: sua carga elétrica, massa e seu momento angular. Dessa maneira, propriedades mais específicas relacionadas à matéria que deu origem ao colapso gravitacional é inacessível a observadores externos.

11.4 Frame Dragging

Em buracos negros rotacionais, o momento angular da massa central induz uma conformação geométrica em que todo e qualquer observador próximo ao objeto passará a ser arrastado em seu sentido de rotação. Tal efeito denominado arrastamento de referenciais, ocorre na região delimitada entre o limite estático e o horizonte de eventos, conhecida pelo nome de ergosfera.

11.5 Lei das Áreas

Segundo o teorema das áreas proposto por Stephen Hawking, a área de um buraco negro nunca diminui em processos físicos clássicos tais como a absorção de matéria ou a fusão entre dois buracos negros. Dessa forma, tais processos sempre resultam em uma área final igual ou superior à área inicial.

12 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo apresentar o ciclo de vida das estrelas e os fundamentos físicos e matemáticos necessários para compreender a formação e as propriedades dos buracos negros, articulando a descrição astrofísica da evolução estelar com o tratamento relativístico do espaço-tempo. O percurso partiu da formação das estrelas em nuvens moleculares e chegou às soluções de Schwarzschild e de Kerr para a descrição desses objetos.

Pela via astrofísica, ficou claro que as estrelas nascem do colapso gravitacional de regiões densas dentro de nuvens moleculares. Nesse processo surgem as protoestrelas, que se contraem e esquentam até reunir as condições para iniciar a fusão nuclear; a partir daí a estrela entra na sequência principal, fase em que a contração gravitacional e a pressão gerada pelas reações termonucleares se equilibram.

A massa é o que decide o destino de cada estrela. As de menor massa costumam terminar como anãs brancas, depois de expelir as camadas externas e formar uma nebulosa planetária. Já as mais massivas fundem elementos cada vez mais pesados até formar um núcleo de ferro; como essa fusão não gera energia suficiente para sustentar a estrela, o núcleo colapsa e ocorre a explosão de supernova, que pode gerar uma estrela de nêutrons ou, quando a massa remanescente é grande o bastante, um buraco negro.

Descrever esses objetos exige ir além da mecânica clássica. A relatividade especial mostrou que medidas de espaço e tempo dependem do movimento do observador, ainda que certas grandezas, como o intervalo espaço-temporal e a velocidade da luz no vácuo, permaneçam invariantes. As transformações de Lorentz, o fator de Lorentz, a dilatação temporal e a contração espacial explicam como espaço e tempo passam a se relacionar quando as velocidades se aproximam da velocidade da luz.

O espaço-tempo de Minkowski deu a esses eventos uma estrutura geométrica quadridimensional e permitiu entender a causalidade através dos cones de luz. Já a análise do espaço-tempo de Rindler, com seus referenciais acelerados, levou ao entendimento do princípio da equivalência: os efeitos de uma aceleração podem,

localmente, ser indistinguíveis dos efeitos de um campo gravitacional. Esse princípio é a base da relatividade geral, em que a gravidade passa a ser entendida como curvatura do espaço-tempo causada pela presença de matéria e energia.

A solução de Schwarzschild descreve o campo gravitacional externo de um corpo esférico sem rotação, e foi a partir dela que se analisaram o raio de Schwarzschild, o horizonte de eventos, a dilatação temporal gravitacional e o comportamento dos cones de luz perto de um buraco negro. O horizonte de eventos é uma fronteira causal invisível, sem existência física própria: ultrapassá-lo significa que toda trajetória futura possível passa a levar ao interior do buraco negro, sem volta.

Essa solução, porém, não leva em consideração nem o momento angular nem a carga e, por isso, não é capaz de descrever a grande maioria dos buracos negros reais, dotados de tais propriedades. Daí a importância da solução de Kerr, que descreve buracos negros em rotação. Nela aparece a ergosfera, região em que o arrastamento de referenciais impede que uma partícula fique parada em relação a um observador distante; é essa possibilidade de trajetórias com energia negativa que sustenta o processo de Penrose, capaz de extrair energia de rotação do buraco negro.

Do ponto de vista das propriedades gerais, um buraco negro pode ser descrito apenas por três grandezas: massa, carga elétrica e momento angular. E, em processos físicos clássicos, a área do seu horizonte de eventos nunca diminui, como estabelece o teorema das áreas. Isso mostra que, apesar das condições extremas, os buracos negros têm uma estrutura física e geométrica bem definida.

A radiação Hawking, no entanto, revela que essa descrição clássica não é suficiente: ao considerar a mecânica quântica, os buracos negros passam a emitir partículas perto do horizonte de eventos, perdendo massa e energia aos poucos. Em prazos extremamente longos, esse processo pode reduzir e até evaporar completamente um buraco negro. Isso conecta a relatividade geral, a mecânica quântica e a termodinâmica: o estudo dos buracos negros toca em algumas das principais teorias da física moderna.

Compreender os buracos negros, portanto, passa tanto pelos processos astrofísicos que levam à sua formação quanto pela descrição relativística do espaço-tempo. A evolução estelar explica como esses objetos surgem do colapso de estrelas

massivas; as soluções de Schwarzschild e Kerr explicam suas propriedades e sua estrutura causal. Juntas, essas duas frentes mostram os buracos negros como um resultado possível da vida das estrelas e, ao mesmo tempo, como um dos objetos mais úteis para testar os limites da física atual.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES ROSA, C. et al. Miller e Urey no Universo: detecção de moléculas prebióticas em regiões de formação estelar. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 47, e20250125, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2025-0125>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- BANDECCHI, M.; BRETONES, P. S.; HORVATH, J. E. O equilíbrio e a estrutura estelar em uma abordagem simples: a Seqüência Principal. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, e20190031, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0031>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- FELIPE, B. S.; OLIVEIRA, J. Introdução aos buracos negros e sua termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, e20240010, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2024-0010>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- GREGORIO-HETEM, J.; JATENCO-PEREIRA, V. **Observatórios Virtuais — Fundamentos de Astronomia**. São Paulo: IAG/USP, 2010. Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/~jane/aga215/apostila/>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- GREGORIO-HETEM, J.; LEPINE, J. R. D.; QUAST, G. R.; TORRES, C. A. O.; DE LA REZA, R. A search for T Tauri stars based on the IRAS point source catalog. I. **The Astronomical Journal**, v. 103, n. 2, p. 549-563, 1992. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992AJ....103..549G/abstract>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- HORVATH, J. E. A degenerescência do gás de elétrons e sua importância em Astrofísica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, e20220002, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0002>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- MAIA GIL, S.; SILVA PINHO, J.; FERNANDES DE FERNANDES, I. Nascimento e morte de uma estrela em uma abordagem simples para o ensino médio: a evolução estelar. **Caderno de Física da UEFS**, v. 21, n. 1, p. 1401.1-18, 2023. Disponível em: <https://periodicos.uefs.br/index.php/cadfis/article/view/10410>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- NASA. **Stars**. Science.nasa.gov, [s.d.]. Disponível em: <https://science.nasa.gov/universe/stars/>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- NEVES, J. C. S. O buraco negro e sua sombra. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, e20200216, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2020-0216>. Acesso em: 11 jul. 2026.
- OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Star Formation**. Departamento de Astronomia, Instituto de Física, UFRGS. Porto Alegre, [s.d.]. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/oei/stars/formation/form_st.htm. Acesso em: 11 jul. 2026.
- ORSI, Jorge A. R. **Teoria da Formação de Galáxias**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s.d.]. Disponível em:

https://www.if.ufrj.br/~joras/disciplinas/16.1/tfg1/joras_tfg1.pdf. Acesso em: 11 jul. 2026.

REBOLO, R.; ZAPATERO OSORIO, M. R.; MARTÍN, E. L. Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster. **Nature**, v. 377, p. 129-131, 1995. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/377129a0>. Acesso em: 11 jul. 2026.

SARAIVA, M. F. O. **Etapas evolutivas das estrelas**. Departamento de Astronomia, Instituto de Física, UFRGS. Porto Alegre, [s.d.]. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~fatima/ead/estrelas.htm>. Acesso em: 11 jul. 2026.