



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ
CAMPUS POETA TORQUATO NETO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE FÍSICA

Francisco Yago Monteiro Silva

Termodinâmica de Buracos Negros

A R T I G O

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Licenciatura em Física
da Universidade Estadual do Piauí Campus Po-
eta Torquato Neto como parte dos requisitos obri-
gatórios para a obtenção do título de Licenciando
em Física.

Orientador: Prof. Dr. Felipe França Faria

Teresina(PI), 13 de janeiro de 2025

Termodinâmica de Buracos Negros

Black Holes Thermodynamics

Francisco Yago Monteiro Silva[†]

Orientador: Prof. Dr. Felipe França Faria[‡]

[†]franciscoysilva@aluno.uespi.br, [‡]felipecfranca@ccn.uespi.br

TCC - Licenciatura em Física - CCN - UESPI | Teresina(PI), 13 de janeiro de 2025

Resumo

Ao longo do presente artigo, serão mostradas questões fundamentais sobre a natureza da gravidade e os extremos da matéria. Neste estudo, exploraremos a complexidade da termodinâmica de buracos negros e sua importância na física teórica e na nossa visão da natureza do universo.

Abstract

Throughout this article, fundamental questions about the nature of gravity and the extremes of matter will be discussed. In this study, we explore the complexity of black hole thermodynamics and its importance in theoretical physics and our view of the nature of the universe.

Palavras-chave: Gravidade, Termodinâmica, Buracos Negros.

Keywords: Gravity, Thermodynamics, Black Holes.

Sumário

1	Introdução	2
2	Termodinâmica	2
2.1	Zerésima Lei da Termodinâmica	2
2.2	Primeira Lei da Termodinâmica	3
2.3	Segunda Lei da Termodinâmica	4
2.4	Potencial Químico e a Primeira Lei da Termodinâmica	5
2.5	Terceira Lei da Termodinâmica	5
3	Buracos Negros	5
3.1	Como São Formados Buracos Negros	6
3.2	Versão Newtoniana de um Buraco Negro	6
3.3	Raio de Schwarzschild na Versão Newtoniana	7
3.4	Versão Relativística dos Buracos Negros	7
3.5	Métrica de Schwarzschild	8
4	Termodinâmica de Buracos Negros	8
4.1	Primeira Lei da Termodinâmica de Buracos Negros	8
4.2	Segunda Lei da Termodinâmica de Buracos Negros	9
4.3	Terceira Lei da Termodinâmica de Buracos Negros	10
5	CONCLUSÃO	10
	Referências	11

1 Introdução

A termodinâmica dos buracos negros é um dos enigmas mais intrigantes da física teórica atual. A relação entre buracos negros e conceitos clássicos da termodinâmica, como temperatura, entropia e energia, desafia a compreensão existente da física e da gravidade. Desde a formulação da primeira lei da termodinâmica até a teoria da relatividade geral de Einstein, os buracos negros têm sido um terreno fértil para explorar os limites da nossa compreensão da natureza.

A descoberta de que os buracos negros têm temperatura e entropia levanta questões profundas sobre a natureza do espaço e do tempo. O objetivo deste estudo é investigar a termodinâmica dos buracos negros e explorar como os conceitos termodinâmicos podem ser estendidos e aplicados a esses objetos espaciais extremos. Primeiro, veremos as leis da termodinâmica num contexto geral e como elas têm sido usadas para explicar as propriedades dos buracos negros. Também veremos desenvolvimentos teóricos importantes, como a radiação Hawking, que revelou uma profunda ligação entre buracos negros e a termodinâmica. Esses avanços teóricos também têm implicações importantes para a compreensão da informação quântica e para a resolução de paradoxos associados à física dos buracos negros. Finalmente, discutiremos as implicações mais amplas da termodinâmica dos buracos negros para a cosmologia e a nossa compreensão do universo como um todo.

2 Termodinâmica

A termodinâmica é a área da física que estuda as relações entre calor, trabalho e energia em sistemas físicos. Ela é fundamental para entender processos naturais, máquinas térmicas, sistemas químicos, entre outros.

A história da termodinâmica está profundamente ligada à necessidade de entender o calor, o trabalho e a energia, tanto na ciência quanto em aplicações tecnológicas. As primeiras ideias sobre calor surgiram com os filósofos gregos. Heráclito, por exemplo, acreditava que o fogo era a essência da transformação. Durante a Idade Média, havia pouco progresso significativo, pois o calor era tratado de forma qualitativa. Com o desenvolvimento da mecânica clássica por Galileu Galilei e Newton, as ciências físicas começaram a progredir.

No século XVIII, cientistas como Lavoisier acreditavam que o calor era um fluido invisível chamado calórico, que fluía de corpos quentes para frios. Apesar de estar incorreta, essa teoria ajudou a explicar processos térmicos até sua refutação. A base teórica da termodinâmica foi estabelecida durante o século XIX, com contribuições fundamentais de vários cientistas. A termodinâmica nasceu da necessidade prática de melhorar máquinas térmicas durante a Revolução Industrial, mas logo se tornou uma teoria científica fundamental. Sua evolução uniu experimentos, observações e teorias matemáticas, tornando-se essencial em áreas modernas como física, química, cosmologia e engenharia (SILVA; ERROBIDART, 2019).

2.1 Zeroésima Lei da Termodinâmica

Quando dois sistemas estão em equilíbrio térmico com um terceiro sistema, eles estão em equilíbrio térmico entre si. Isso permite definir a temperatura como uma grandeza fundamental. Segundo essa lei, se um corpo A está em equilíbrio térmico em contato com um corpo B e se esse corpo A está em equilíbrio térmico em contato com um corpo C, logo B está em equilíbrio térmico em contato com C, como representado na Figura 1 abaixo. Quando dois corpos com temperaturas diferentes são colocados em contato, aquele que

estiver mais quente irá transferir calor para aquele que estiver mais frio. Isso faz com que as temperaturas se igualem chegando ao equilíbrio térmico.

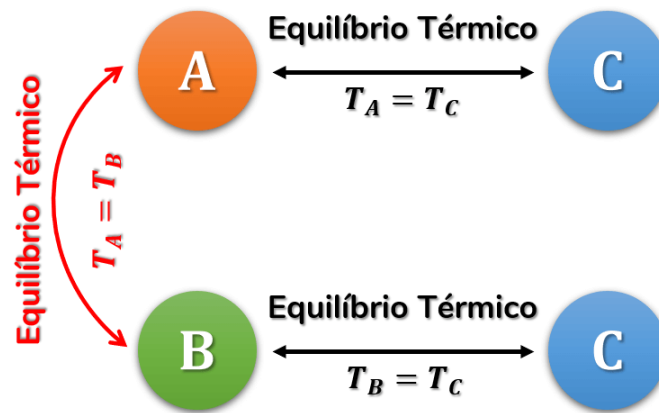


Figura 1: Representação da zeroésima lei da termodinâmica (FIN, 2020).

É chamada de lei zero porque o seu entendimento mostrou-se necessário para as primeiras duas leis que já existiam, a primeira e a segunda leis da termodinâmica (MACIEL; MARLON, 2022).

2.2 Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica é uma das bases fundamentais da física e é essencial para entender o comportamento de sistemas termodinâmicos. Ela estabelece o princípio de conservação de energia em processos térmicos, relacionando calor, trabalho e a variação da energia interna de um sistema.

Para sistemas isolados, a energia interna é constante. Já para sistemas não isolados, a variação da energia interna (ΔU) é igual ao calor (Q) trocado com o ambiente menos o trabalho (W) realizado pelo sistema, como representado na Figura 2 abaixo.

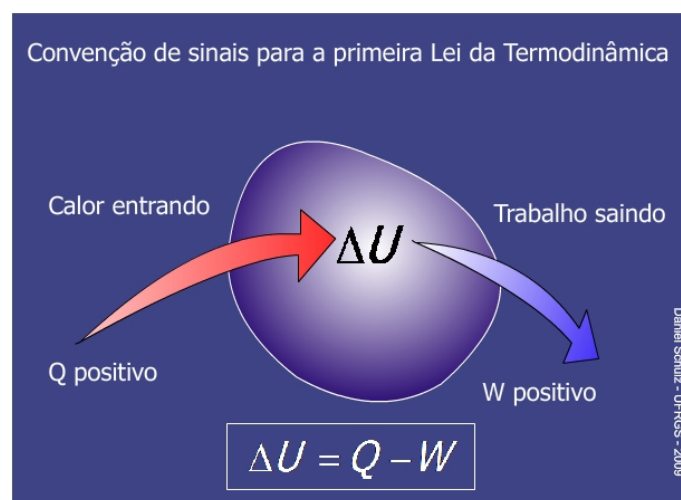


Figura 2: Representação da primeira lei da termodinâmica (SCHULZ,).

Para uma variação infinitesimal da energia interna, a primeira lei da termodinâmica é dada por

$$dU = dQ - dW. \quad (1)$$

Essa equação descreve como a energia é distribuída entre o calor, o trabalho e a variação da energia interna, oferecendo uma visão completa da transformação energética em sistemas termodinâmicos.

Quando a primeira lei é aplicada a um sistema hidrostático, o trabalho está associado à expansão ou compressão do sistema através da relação

$$W = \int P dV, \quad (2)$$

onde P é a pressão do sistema e dV é uma variação infinitesimal do volume do sistema. Neste caso, podemos escrever a primeira lei da termodinâmica (1) na forma

$$dU = dQ - PdV. \quad (3)$$

2.3 Segunda Lei da Termodinâmica

A segunda lei da termodinâmica introduz o conceito de entropia (S), que mede o grau de desordem do sistema. Segundo ela, a entropia total de um sistema isolado nunca diminui, o que pode ser expresso matematicamente como

$$dS \geq 0. \quad (4)$$

Em termos simples: em processos irreversíveis, a entropia aumenta ($dS > 0$) e em processos reversíveis, a entropia permanece constante ($dS = 0$). Essa tendência de aumento de entropia explica por que os sistemas evoluem naturalmente para estados de maior desordem e menor energia útil.

A relação entre entropia e desordem é uma analogia que ajuda a compreender o conceito de entropia em termos intuitivos. Entropia é uma grandeza termodinâmica que mede o grau de dispersão ou desorganização da energia em um sistema. Embora o termo "desordem" não capture todo o significado físico e matemático de entropia, ele é frequentemente usado para introduzir a ideia (OLIVEIRA, 2005), como representado na Figura 3 abaixo.

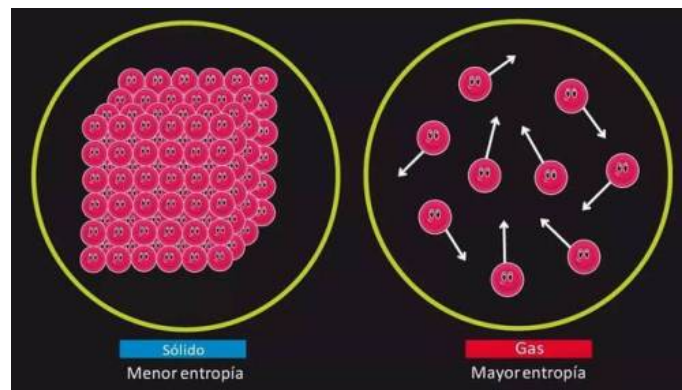


Figura 3: Relação entre a entropia e a desordem de um sistema termodinâmico (COSMOTEO, 2020).

A equação diferencial

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (5)$$

é uma expressão fundamental da termodinâmica e relaciona diretamente a entropia (S) com o calor (Q) transferido para ou do sistema, e a temperatura (T) à qual essa transferência ocorre. Essa relação revela o papel da entropia como uma medida da dispersão da energia térmica no sistema.

Isolando dQ em (5) e substituindo em (3), obtemos

$$dU = TdS - PdV, \quad (6)$$

que é a forma padrão da primeira lei da termodinâmica para um sistema hidrostático.

2.4 Potencial Químico e a Primeira Lei da Termodinâmica

Para entender o papel do potencial químico na primeira lei da termodinâmica, considere um sistema termodinâmico hidrostático com mais de uma espécie de partículas (ou substâncias). A primeira lei da termodinâmica para tal sistema pode ser expressa de forma geral como

$$dU = TdS - PdV + \sum \mu_i dn_i, \quad (7)$$

onde μ_i é o potencial químico e n_i o número de mols da substância i . Aqui, o termo μdn representa o trabalho realizado pela variação do número de partículas no sistema, sendo análogo à contribuição de cada partícula para a variação da energia interna do sistema.

O potencial químico pode ser entendido como a variação da energia do sistema quando uma partícula é adicionada ou removida, enquanto as outras variáveis de estado (como temperatura, volume e pressão) permanecem constantes. É a energia “por partícula” do sistema e regula a transferência de partículas entre sistemas ou fases diferentes.

Em sistemas como buracos negros, o conceito de “potencial químico” é estendido para a troca de outras propriedades como massa, carga e momento angular, sendo análogos ao potencial químico de sistemas clássicos.

2.5 Terceira Lei da Termodinâmica

A terceira lei da termodinâmica afirma que é impossível atingir o zero absoluto ($T = 0$) em um número finito de etapas. A entropia de um sistema puro e cristalino se aproxima de zero quando a temperatura tende ao zero absoluto. A terceira lei implica também que nenhuma técnica física pode reduzir a temperatura de um sistema ao zero absoluto em um número finito de passos.

A Terceira Lei sugere que, no zero absoluto, a entropia de um sistema ideal seria nula porque, os átomos ou moléculas estão em seu estado fundamental de menor energia, não ocorrendo movimentos térmicos ou desordem associados ao calor, ocorrendo impossibilidade prática de atingir o zero absoluto. Embora seja possível resfriar sistemas até temperaturas extremamente baixas, a terceira lei implica que é impossível alcançar exatamente o zero absoluto. Isso ocorre porque, à medida que nos aproximamos dessa temperatura, é necessário gastar quantidades exponencialmente maiores de energia para continuar resfriando o sistema.

3 Buracos Negros

Os buracos negros são um dos fenômenos mais fascinantes e misteriosos do universo, representando regiões do espaço-tempo em que a gravidade é tão intensa que nada, nem mesmo a luz, pode escapar. Desde suas primeiras concepções teóricas até as modernas observações astronômicas, os buracos negros têm desafiado nosso entendimento da física e do cosmos.

O conceito de um corpo celestial com gravidade tão forte que nem a luz pode escapar remonta ao século XVIII. Em 1783, o cientista John Michell propôs a ideia de “estrelas escuras” com base na gravidade newtoniana. Independente disso, em 1796, o matemático Pierre-Simon Laplace sugeriu algo semelhante em seu livro “Exposition du Système du

Monde”. No entanto, esses conceitos foram amplamente ignorados até o início do século XX, quando Albert Einstein desenvolveu a Teoria da Relatividade Geral (1915). Em 1916, o físico alemão Karl Schwarzschild encontrou uma solução para as equações de Einstein que descrevia uma região de curvatura infinita do espaço-tempo, conhecida hoje como singularidade.

Por décadas, buracos negros eram vistos como meras curiosidades matemáticas, e sua existência real era amplamente questionada. Muitos cientistas acreditavam que a natureza teria mecanismos para evitar a formação dessas singularidades extremas. Nos anos 1960, cientistas como Roger Penrose, Stephen Hawking e John Wheeler refinaram os modelos matemáticos e provaram que os buracos negros eram uma consequência inevitável da relatividade geral. Wheeler também popularizou o termo “buraco negro” em 1967 (BERGLIAFFA, 2023).

3.1 Como São Formados Buracos Negros

Para entendermos melhor a formação dos buracos negros, temos que entender como é a vida e morte de uma estrela. Normalmente, estrelas se formam em locais no universo com uma grande quantidade de partículas, como nuvens moleculares. Estes locais são densos, e estas partículas vão formando objetos cada vez maiores devido a força gravitacional que vai atuando na região central dessa nuvem. Esta região tende a atrair cada vez mais partículas, fazendo com que a força gravitacional fique cada vez maior e, conseqüentemente, gere uma pressão cada vez mais forte. A pressão gerada começa a esquentar essa região até que, quando a temperatura atinge aproximadamente 8 milhões de Kelvin, os átomos começam a se chocar. Normalmente são átomos de hidrogênio que, ao se fundirem, formam átomos de hélio. O calor liberado emite luz, as reações nucleares fomentam a pressão, e a massa fomenta a gravidade. Neste momento, temos uma nova estrela.

A partir deste momento alguns fatores, como sua massa e composição, definem de que tipo ela será. Quando em equilíbrio hidrostático, há uma queda de braço ocorrendo entre a pressão provocada pelas fusões nucleares no centro da estrela, empurrando tudo para o seu exterior, e a gravidade, empurrando tudo de volta para o centro, ocorrendo assim um colapso gravitacional. Quando uma estrela com massa inicial superior a 20-25 vezes a do Sol chega ao final de sua vida no núcleo da estrela, a fusão nuclear cria elementos cada vez mais pesados, até chegar ao ferro. O ferro não pode gerar energia por fusão, levando à perda de suporte térmico contra a gravidade fazendo com que o núcleo colapse sob sua própria gravidade, criando uma densidade e gravidade extremas. Assim, as camadas externas da estrela são ejetadas violentamente em uma explosão de super nova. Se o núcleo restante tiver massa suficiente (geralmente mais de 2-3 massas solares), ele colapsa em um buraco negro. Podemos ver todo esse ciclo de vida estelar na Figura 4 abaixo.

3.2 Versão Newtoniana de um Buraco Negro

A versão newtoniana de buracos negros é uma abordagem simplificada para entender os buracos negros usando os conceitos da gravitação clássica de Isaac Newton. Embora a relatividade geral seja a teoria correta para descrever buracos negros, a perspectiva newtoniana pode oferecer insights intuitivos sobre a natureza de objetos gravitacionalmente extremos.

Na gravitação newtoniana, podemos imaginar um objeto tão massivo e compacto que sua velocidade de escape ultrapassa a velocidade da luz. A velocidade de escape é dada pela fórmula

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}, \quad (8)$$

onde G é a constante gravitacional, M é a massa do objeto e R é o raio do objeto. Se $v_e > c$ (a velocidade da luz no vácuo), então nem mesmo a luz pode escapar da superfície do objeto, tornando-o invisível para observadores externos.



Figura 4: Ciclo de vida de uma estrela (GROSSMANN, 2012).

3.3 Raio de Schwarzschild na Versão Newtoniana

Com base na equação acima, podemos definir um limite para o raio do objeto, conhecido como o raio de Schwarzschild (embora originalmente derivado no contexto da relatividade geral). Em termos newtonianos, o raio crítico onde $v_e = c$ é dado por

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}. \quad (9)$$

Se um objeto estiver comprimido dentro deste raio, ele seria considerado um buraco negro na visão clássica. A abordagem newtoniana é útil como uma introdução pedagógica aos buracos negros, ajudando estudantes a compreender conceitos básicos como a relação entre massa, gravidade e a velocidade de escape. No entanto, ela é apenas um ponto de partida; a teoria completa e precisa requer a relatividade geral de Einstein.

3.4 Versão Relativística dos Buracos Negros

Antes da relatividade geral, a ideia de um objeto tão massivo que nem a luz poderia escapar já havia sido proposta por John Michell (1784) e Pierre-Simon Laplace (1796), usando conceitos da gravidade Newtoniana. Contudo, esses “buracos negros” clássicos eram descritos apenas como objetos de grande densidade.

A versão relativística dos buracos negros é baseada na teoria da relatividade geral de Einstein, que descreve a gravidade como a curvatura do espaço-tempo causada pela presença de massa e energia. Na relatividade geral, buracos negros são regiões do espaço-tempo onde a curvatura é tão extrema que nada, nem mesmo a luz, pode escapar.

O comportamento gravitacional de um buraco negro é descrito por métricas, que são soluções específicas das equações de campo de Einstein. Essas métricas descrevem a geometria do espaço-tempo ao redor do buraco negro, como representada de forma simplificada na Figura 5 abaixo.

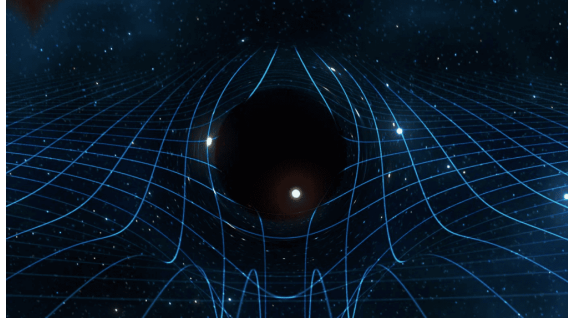


Figura 5: Geometria do espaço-tempo ao redor de um buraco negro (HOSTI, 2023).

3.5 Métrica de Schwarzschild

A métrica de Schwarzschild é a solução mais simples para as equações de Einstein e descreve um buraco negro esfericamente simétrico, sem rotação e sem carga elétrica. A métrica em coordenadas esféricas (t, r, θ, ϕ) é dada por

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2. \quad (10)$$

A singularidade se refere a uma região teórica no centro de um buraco negro onde as leis da física, como as conhecemos, deixam de funcionar, sendo um ponto no espaço-tempo onde a densidade da matéria e a curvatura do espaço-tempo se tornam infinitas. Isso significa que a gravidade é tão intensa que todas as partículas e informações colapsam em um único ponto de volume zero e densidade infinita (BERGLIAFFA, 2023).

Na métrica de Schwarzschild, a parte que multiplica dt^2 , ou seja, o fator temporal

$$1 - \frac{2GM}{c^2 r} \quad (11)$$

vai a infinito quando $r \rightarrow 0$. Esse comportamento sugere que a métrica “explode” em $r = 0$, indicando uma singularidade. Sendo essa uma singularidade física, pois corresponde ao centro do buraco negro, onde a densidade de massa e a curvatura do espaço-tempo tornam-se infinitas.

O horizonte de eventos de um buraco negro de Schwarzschild é formado por uma superfície esférica de raio $r = R_S = 2GM/c^2$ (o raio de Schwarzschild) ao redor da singularidade, como mostrado na Figura 6 abaixo. Nesse ponto, o fator espacial que multiplica dr^2 na métrica vai para infinito, o que parece ser uma singularidade, no entanto, essa não é uma singularidade física, mas sim uma singularidade de coordenadas, pois na singularidade física, valores como densidade ou curvatura do espaço-tempo tornam-se infinitos. Já a singularidade coordenada, surge de limitações no sistema de coordenadas escolhido e pode ser removida com transformações.

4 Termodinâmica de Buracos Negros

4.1 Primeira Lei da Termodinâmica de Buracos Negros

A primeira lei para buracos negros é análoga à primeira lei da termodinâmica para sistemas convencionais. Ela relaciona a variação da massa (energia) M , da área do horizonte A , do momento angular J e da carga elétrica Q do buraco negro. A expressão geral para

um buraco negro estacionário é

$$dM = \frac{k}{8\pi} dA + \Omega dJ + \Phi dQ, \quad (12)$$

onde k é a gravidade superficial, Ω é a velocidade angular e Φ é o potencial elétrico do buraco negro (FERNANDES, 2023).

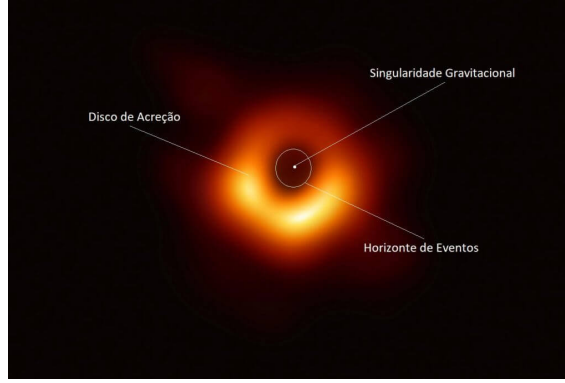


Figura 6: Singularidade e horizonte de eventos de um buraco negro (FIN, 2019).

A equação (12) descreve como a massa de um buraco negro muda com variações da área do seu horizonte de eventos, momento angular e carga, similar ao modo como a energia interna de um sistema termodinâmico comum muda com variações da entropia, volume e número de mols.

4.2 Segunda Lei da Termodinâmica de Buracos Negros

A segunda lei para buracos negros estabelece que a área total do horizonte de eventos de um buraco negro nunca diminui em processos físicos clássicos. Essa lei é análoga à segunda lei da termodinâmica convencional, que afirma que a entropia total de um sistema isolado nunca diminui (FERNANDES, 2023).

Como a massa de um buraco negro aumenta quando matéria cai dentro dele, podemos concluir que a área superficial do horizonte de eventos de um buraco negro, que é dada por

$$A = 4\pi R_S^2 = 16\pi \left(\frac{GM}{c^2} \right)^2, \quad (13)$$

nunca diminui com o tempo em qualquer processo físico clássico. Matematicamente, isso pode ser expresso como

$$dA \geq 0, \quad (14)$$

onde dA é uma variação infinitesimal da área do horizonte de eventos.

Para buracos negros, surge uma aparente violação da segunda lei da termodinâmica convencional quando consideramos cenários onde matéria altamente entropiada (com grande S) cai em um buraco negro. Quando o buraco negro “engole” essa matéria e parece não restar rastro da entropia associada à matéria, já que ela desaparece no horizonte, isso implicaria uma redução da entropia total do universo.

Para resolver esse paradoxo, Jacob Bekenstein propôs, nos anos 1970, que os buracos negros possuem uma entropia associada à sua área de horizonte de eventos. Essa ideia foi formalizada por Stephen Hawking, que demonstrou que buracos negros irradiam energia (a radiação Hawking) e têm temperatura finita, através da equação

$$S_B = \frac{k_b A}{4l_p^2}, \quad (15)$$

onde k_B é a constante de Boltzmann e $l_P^2 = \hbar G/c^3$ é a área de Planck. Essa equação estabelece uma correspondência entre a área do horizonte e a entropia, de modo que o aumento da área implica aumento de entropia. Assim como na termodinâmica convencional, onde a entropia mede o número de estados microscópicos disponíveis para um sistema, a área do horizonte de eventos parece conter informações sobre o conteúdo interno do buraco negro.

A segunda lei generalizada da termodinâmica afirma que a soma da entropia do buraco negro e da entropia do universo fora do buraco negro nunca diminui:

$$dS_{total} = dS_B + dS_{ext} \geq 0. \quad (16)$$

Portanto, mesmo que a matéria caia no buraco negro, a diminuição da entropia externa é compensada pelo aumento da entropia do buraco negro, garantindo a validade da segunda lei generalizada.

A radiação Hawking introduz um detalhe intrigante: buracos negros evaporam ao irradiar energia, o que reduz sua área e, conseqüentemente, sua entropia. Isso parece violar a segunda lei generalizada, mas a radiação Hawking gera entropia S_{ext} fora do buraco negro, o que mais do que compensa a redução de S_B . Assim, o balanço total da entropia ainda satisfaz $dS_{total} \geq 0$ (FERNANDES, 2023).

A radiação Hawking é térmica, sugerindo que a informação sobre a matéria que formou o buraco negro é perdida. Isso entra em conflito com a conservação da informação da mecânica quântica, gerando o famoso paradoxo da informação.

4.3 Terceira Lei da Termodinâmica de Buracos Negros

A terceira lei da termodinâmica dos buracos negros é uma extensão da terceira lei da termodinâmica convencional, que afirma que é impossível atingir o zero absoluto de temperatura $T = 0$ por meio de um número finito de processos físicos. Na teoria dos buracos negros, ela estabelece que a gravidade superficial k de um buraco negro não pode ser reduzida a zero por qualquer processo físico (FERNANDES, 2023).

A gravidade superficial é uma medida do campo gravitacional no horizonte de eventos do buraco negro. É análoga à temperatura em sistemas termodinâmicos comuns. Em unidades naturais, a temperatura do buraco negro está relacionada a k por

$$T = \frac{k\hbar}{2\pi k_B}. \quad (17)$$

Podemos ver da relação (17) que quando $k = 0$ a temperatura também é zero, o que aconteceria num buraco negro de área zero no qual a massa (energia) é apenas a energia de rotação ou energia elétrica. Isso reforça que a entropia está relacionada à geometria do horizonte, não à gravidade de superfície. A impossibilidade de alcançar $k = 0$ garante que os buracos negros permanecem sistemas estáveis e consistentes do ponto de vista termodinâmico e gravitacional.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, exploramos as conexões e as distinções entre a termodinâmica convencional e a termodinâmica de buracos negros, destacando a relevância dos conceitos termodinâmicos na descrição de sistemas extremos. A termodinâmica clássica, que trata do comportamento de sistemas compostos por uma grande quantidade de partículas, está profundamente enraizada nas leis fundamentais da física, como as leis da conservação de energia e entropia. No entanto, a introdução dos buracos negros na física teórica levou

ao desenvolvimento de uma “termodinâmica de buracos negros”, onde conceitos como temperatura, entropia e energia se aplicam de maneira inédita, devido às características extremas do espaço-tempo e da gravidade.

A principal analogia entre essas duas áreas reside no comportamento da entropia e da temperatura, mas as diferenças são igualmente significativas. No caso de buracos negros, a entropia está relacionada à área do horizonte de eventos, e não ao volume do sistema, como é típico na termodinâmica clássica. Além disso, a temperatura dos buracos negros, dada pela fórmula de Hawking, não é uma temperatura convencional, mas sim uma temperatura associada à radiação que pode ser emitida pelo buraco negro, resultante de efeitos quânticos no limite do horizonte de eventos.

Ao comparar os dois campos, percebemos que a termodinâmica de buracos negros amplia os conceitos clássicos, integrando-os à relatividade geral e à mecânica quântica. Esse entrelaçamento sugere a possibilidade de uma descrição unificada das interações fundamentais da natureza. Contudo, ainda existem desafios e questões em aberto, especialmente no que se refere à reconciliação entre a termodinâmica e a mecânica quântica, área em que os buracos negros desempenham um papel central, especialmente em contextos como a informação e a entropia quântica.

Portanto, a termodinâmica de buracos negros não apenas amplia o entendimento da física em condições extremas, mas também oferece insights profundos sobre as leis fundamentais do universo, demonstrando a necessidade de novas abordagens e teorias para uma compreensão mais completa do cosmos.

Referências

- BERGLIAFFA, Santiago Esteban Perez. Introdução à física dos buracos negros. **Cadernos de Astronomia**, v. 4, n. 1, p. 49–66, 2023.
- COSMOTEO. **Termodinâmica: a entropia**. 2020. Disponível em: <https://horadebereal.com.br/2020/12/07/termodinamica-a-entropia/>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.
- FERNANDES, Tiago. A termodinâmica de buracos negros. **Cadernos de Astronomia**, v. 4, n. 1, p. 78–90, 2023.
- FIN, Denis. **Buracos negros: um guia completo para iniciantes**. 2019. Disponível em: <https://aprovatotal.com.br/buracos-negros/>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.
- FIN, Denis. **Leis da termodinâmica: conceitos e fórmulas**. 2020. Disponível em: <https://aprovatotal.com.br/leis-da-termodinamica/>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.
- GROSSMANN, Cesar. **Ciclo de vida de uma estrela**. 2012. Disponível em: <https://hypescience.com/ciclo-vida-estrela-ciclo-vida-estelar/>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.
- HOSTI, Brunno Pleffken. **O que é a Teoria da Relatividade Geral?** 2023. Disponível em: <https://www.espacotempo.com.br/o-que-e-a-teoria-da-relatividade-geral/>. Acesso em: 17 de dezembro de 2024.
- MACIEL, Eugênio Bastos; MARLON, Yanneson. **Termodinâmica:: fundamentos e aplicações**. [S.l.]: Editora Intersaberes, 2022.
- OLIVEIRA, Mário José de. **Termodinâmica**. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2005.

SCHULZ, Daniel. **Primeira lei da termodinâmica.**

SILVA, Geilson Rodrigues da; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães. Termodinâmica e revolução industrial: Uma abordagem por meio da história cultural da ciência. **História da Ciência e Ensino: construindo interfaces**, v. 19, p. 71–97, 2019.