

# Sobre buracos negros

Felipe Tovar Falciano

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

---

## Resumo

Buracos negros são objetos astrofísicos com propriedades muito particulares e fascinante. A partir de hipóteses genéricas, como a validade da teoria da relatividade geral, é possível provar teoremas que garantem a existência e propriedades desses objetos. Porém, apenas a observação e os experimentos são capazes de testar e verificar afirmações sobre fenômenos naturais. Seguindo este raciocínio, iremos desenvolver os conceitos básicos do que é um buraco negro, explicitar algumas de suas propriedades peculiares e por fim pontuar as observações que comprovaram a existência desses objetos compactos.

## Abstract

Black holes are astrophysical objects with very particular and fascinating properties. Starting from generic hypotheses, such as the validity of the theory of general relativity, it is possible to prove theorems that guarantee the existence and properties of these objects. However, only observation and experiments are capable of testing and verifying statements about natural phenomena. Following this reasoning, we will develop the basic concepts of what a black hole is, explain some of its peculiar properties, and finally punctuate the observations that prove the existence of these compact objects.

---

**Palavras-chave:** Buracos Negros, Relatividade Geral, Astrofísica.

**Keywords:** Black Holes, General Relativity, Astrophysics.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v4n1.39981](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v4n1.39981)

## 1 O que são buracos negros

Como é esperado de toda teoria científica, a Relatividade Geral trouxe com seu desenvolvimento uma nova visão e a identificação de novos fenômenos naturais. Um exemplo característico de inovação conceitual oriunda da Relatividade Geral são as soluções de buraco negro. O nome buraco negro advém da existência de uma região compacta a partir da qual nem mesmo a luz consegue escapar. No cenário das teorias relativísticas, as trajetórias de partículas sem massa (geodésicas nulas), como é o caso dos fótons, formam um envelope que delimita a região onde pode haver trajetórias de partículas massivas (geodésicas do tipo temporal). Assim, a impossibilidade de escape da luz significa na realidade o aprisionamento de qualquer ente físico.

Contudo, é bem verdade que a noção de um objeto astrofísico com massa suficientemente grande, para que a velocidade de escape de sua superfície fosse maior do que a velocidade da luz, já havia sido aventada ainda no final do século XVIII, independentemente por John Michell [1] e

por Pierre-Simon Laplace [2].

Imagine por exemplo que você esteja na superfície da Terra e atire um objeto para o alto na direção vertical ao solo. O objeto irá subir até uma certa altura e depois descer. Se lançarmos com uma velocidade inicial maior, o objeto irá atingir uma altura mais alta e retornará. Existe uma velocidade inicial a partir da qual o objeto consegue vencer o campo gravitacional da Terra e escapar para o infinito (regiões arbitrariamente longínquas). Essa velocidade se chama velocidade de escape e depende da massa do planeta.

Não é difícil imaginar um objeto astrofísico com massa grande o suficiente para que a velocidade de escape seja maior que a velocidade da luz. Neste caso, a luz conseguiria atingir uma altura máxima mas necessariamente retornaria à superfície do astro. Assim, observadores distantes não conseguiriam detectar estes objetos astrofísicos.

Note porém que a velocidade de escape depende da posição do lançamento, quanto mais afastado da superfície do Planeta, ou da Estrela, mais fácil torna-se o escape (menor velocidade de escape). Um sinal físico lançado da superfície do

astro atinge uma certa altura. Se colocarmos um repetidor podemos retransmitir o sinal a uma altura ainda maior, e sucessivamente até a distância que quisermos. Dito de outra forma, não há uma região de aprisionamento da qual não podemos extrair informação.

Esta concepção difere substancialmente do conceito moderno de buraco negro. Na Relatividade Geral, os buracos negros são definidos especificamente pela presença de horizontes, os quais impossibilitam a conexão causal de dentro para fora da região delimitada por esta superfície. O horizonte é um conceito matemático que pretende formalizar a ideia de aprisionamento e está intimamente ligado à própria definição de buraco negro.

Porém, vale lembrar que a propagação de qualquer sinal físico é sempre finita - um dos resultados basilares da relatividade. Logo, o fato de em um certo instante uma dada informação não estar acessível para uma outra região espacial não implica que haja uma região de aprisionamento. Pode ser o caso apenas uma questão de tempo necessário para que o sinal viaje até a região de interesse. De forma contrária, se houver uma configuração física que faça com que uma região compacta não possa emitir sinais independente do quanto se espere, então surge o conceito de aprisionamento.

De um ponto de vista astrofísico, os buracos negros são nada mais que objetos compactos oriundos do colapso de uma estrela. A natureza do remanescente (objeto resultante do colapso) depende do quão massivo era a estrela original. Ao longo da vida, a estrela realiza reações nucleares em seu interior, produzindo forte emissão de radiação, o que durante bilhões de anos, possibilita manter um certo equilíbrio e contrabalanceando o colapso gravitacional. As reações nucleares alteram a constituição da estrela e faz com que o sistema evolua para novas reações nucleares. O ponto importante aqui é que as cadeias de reações nucleares acessíveis dependem da massa total da estrela.

Toda estrela começa com a queima do hidrogênio, mas apenas as estrelas muito massivas são capazes de certas reações nucleares no estágio avançado da evolução estelar. O estágio final produz uma explosão denominada supernova, a qual ejeta parte da matéria para o espaço sideral, enquanto permanece no local o remanescente da

estrela em forma de um objeto compacto muito denso.

Tendo esgotado a produção de energia por reações nucleares, o mecanismo de sustentação dos remanescentes advém de um efeito quântico devido ao princípio de exclusão de Pauli. As Anãs Brancas são sustentadas pela repulsão quântica entre elétrons, enquanto as estrelas de nêutrons, como o próprio nome sugere, são sustentadas pela repulsão entre nêutrons. Porém, há um limite para a efetividade deste mecanismo de sustentação. Há situações em que nem mesmo os efeitos quânticos de repulsão são capazes de evitar o colapso gravitacional e assim forma-se um buraco negro.

Os buracos negros são objetos compactos remanescentes da evolução estelar cujo colapso gravitacional é intenso o suficiente para que toda a matéria concentre-se em uma região tão pequena a ponto de formar um horizonte ao seu redor. O que acontece dentro do horizonte não é conhecido e depende substancialmente da descrição da teoria que utilizamos. De fato não temos dados observacionais sobre o que acontece dentro de um buraco negro. Se aplicarmos a teoria da relatividade geral até às últimas consequências, concluímos que o colapso gravitacional que produz os buracos negros condensa toda a matéria do remanescente em um único ponto produzindo uma singularidade no espaço-tempo.

Na seção seguinte, iremos oferecer uma definição formal de buracos negros o que irá exigir um formalismo matemático adequado. Caso não seja do interesse, o leitor pode pular esta seção sem perda de compreensão para o restante do texto.

## 2 Definição de buracos negros

Para definirmos formalmente o que é um buraco negro, primeiramente, precisamos introduzir alguns conceitos matemáticos relacionados à estrutura causal do espaço-tempo. Em um espaço-tempo genérico, podem existir três tipos de curvas, a saber, as curvas do tipo espacial, do tipo nula, e as curvas do tipo temporal. As curvas do tipo nula e temporal podem ser direcionadas para o futuro, quando seus vetores tangentes apontam na direção crescente do tempo, ou para o passado no caso oposto.

Defini-se o futuro causal de um dado ponto  $x_o$ , e designa-se por  $\mathcal{C}^+(x_o)$ , o conjunto de pon-

tos do espaço-tempo que são conectados a  $x_o$  por uma curva dirigida para o futuro que seja do tipo nula ou temporal. Assim, um ponto  $p$  pertence a  $\mathcal{C}^+(x_o)$  se existe uma curva direcionada para o futuro do tipo temporal ou do tipo nula que inicia-se em  $x_o$  e termina em  $p$ . Pode-se, sempre, definir o futuro causal de um sub-espaço  $\mathcal{S}$  como a união do futuro causal de todos os seus pontos, i.e.  $p \in \mathcal{C}^+(\mathcal{S})$  se  $p \in \mathcal{C}^+(y)$  para  $y \in \mathcal{S}$ . O futuro causal de  $x_o$  consiste em todos os pontos do espaço-tempo que podem ser influenciados causalmente por  $x_o$ .

De maneira similar, pode-se definir o passado causal de  $x_o$ , e designá-lo por  $\mathcal{C}^-(x_o)$ , o conjunto de pontos conectados a  $x_o$  por uma curva direcionada para o passado que seja do tipo nula ou temporal. O passado causal é basicamente o mesmo conceito que o futuro causal, mas usando curvas direcionadas para o passado. É fácil notar que, ao invés de usar curvas saindo de  $x_o$  para o passado, é equivalente usar curvas para o futuro mas chegando em  $x_o$ . Um ponto  $p \in \mathcal{C}^-(x_o)$  se existe uma curva direcionada para o futuro do tipo nula ou temporal que origina-se em  $p$  e termina em  $x_o$ . O passado causal de  $x_o$  consiste de todos os pontos do espaço-tempo que podem influenciar causalmente  $x_o$ .

No espaço-tempo plano de Minkowski,<sup>1</sup> o futuro causal e o passado causal de qualquer ponto possuem a conhecida estrutura de cones de luz. Ademais, não há regiões espaciais que sejam inacessíveis no sentido de não ser possível contato causal com outras regiões espaciais distantes. É apenas uma questão de tempo para permitir a necessária propagação dos sinais físicos.

As regiões assintóticas de um espaço-tempo diferem quanto aos tipos de curvas que conseguem atingi-las. O infinito espacial, designado por  $i^o$ , é definido como a região assintótica espacial, ou seja, ele caracteriza tomar o limite assintótico das coordenadas espaciais mantendo o tempo finito. De maneira similar, o infinito futuro, designado por  $i^+$ , é definido como a região assintótica com as coordenadas espaciais finitas mas fazendo o tempo tender a infinito. O infinito passado, desig-

nado por  $i^-$ , tem a mesma definição mas fazendo o tempo tender a menos infinito.

Finalmente, há ainda duas regiões assintóticas distintas que são caracterizadas por fazer tanto o tempo quanto as coordenadas espaciais tenderem a infinito. O infinito nulo futuro, designado por  $\mathcal{J}^+$ , é definido por ambas coordenadas tenderem simultaneamente a infinito de forma que  $ct + r \rightarrow \infty$  mas  $ct - r = \text{finito}$  ( $c$  é a velocidade da luz no vácuo), e o infinito nulo passado, designado por  $\mathcal{J}^-$ , segue a mesma definição, *mutatis mutandis*.

$$\mathcal{J}^+ : \text{ infinito nulo futuro } \left\{ \begin{array}{l} ct + r \rightarrow \infty \\ \text{com} \\ ct - r = \text{finito} \end{array} \right\}$$

$$\mathcal{J}^- : \text{ infinito nulo passado } \left\{ \begin{array}{l} ct - r \rightarrow \infty \\ \text{com} \\ ct + r = \text{finito} \end{array} \right\}$$

Usando essas definições assintóticas podemos rephrasing a estrutura causal do espaço-tempo de Minkowski.

Primeiro note que a partir de qualquer ponto do espaço-tempo de Minkowski, as curvas nulas direcionadas para o futuro estendem-se até o infinito nulo futuro  $\mathcal{J}^+$ . De maneira complementar, a partir de qualquer ponto deste mesmo espaço-tempo, as curvas tipo temporal direcionadas para o futuro estendem-se até o infinito futuro  $i^+$ . Assim, o passado causal da região que denominamos infinito nulo futuro cobre todo o espaço-tempo, i.e.  $\mathcal{C}^-(\mathcal{J}^+) = \mathcal{M}$ , onde  $\mathcal{M}$  designa o espaço-tempo. Não há um ponto do espaço-tempo que não esteja no passado causal do infinito nulo futuro. Em Minkowski, temos também a propriedade complementar, ou seja  $\mathcal{C}^+(\mathcal{J}^-) = \mathcal{M}$ .

Caso houvesse uma região  $\mathcal{U}$  que não fizesse parte de  $\mathcal{C}^-(\mathcal{J}^+)$ , isso significaria que a região  $\mathcal{U}$  não consegue enviar sinais físicos para a região assintótica  $\mathcal{J}^+$ . A ideia de buracos negros é justamente haver uma região no espaço-tempo que não consegue se comunicar (mandar sinais) para regiões assintóticas. O espaço plano de Minkowski claramente não possui nenhum buraco negro.

Pode-se identificar que um espaço-tempo  $\mathcal{M}$  possuiu um buraco negro pela existência de uma região cujo futuro causal não se estende até o infinito nulo futuro  $\mathcal{J}^+$ . De maneira similar, pode-se definir o buraco negro como a região complementar do passado causal do  $\mathcal{J}^+$ , ou seja, o buraco negro é definido por  $\text{BN} = \mathcal{M} - \mathcal{C}^-(\mathcal{J}^+)$ .

<sup>1</sup>O espaço de Minkowski é um espaço-tempo plano, ou seja, sem curvatura e geralmente associado ao estado fundamental da teoria da relatividade geral no sentido de ser a solução sem curvatura. Este raciocínio é justificado também pelo espaço de Minkowski ser o espaço-tempo da relatividade restrita (cenário quando podemos ignorar efeitos gravitacionais).

O horizonte de eventos é a superfície que delimita o buraco negro, logo é composta por pontos na borda do passado causal do infinito nulo futuro, o qual denotamos por  $\dot{\mathcal{C}}^-(\mathcal{J}^+)$ . Desta maneira, definimos o horizonte de evento por  $h_e = \mathcal{M} \cap \dot{\mathcal{C}}^-(\mathcal{J}^+)$ . Pode-se mostrar que  $\mathcal{C}^-(\mathcal{J}^+)$  é um conjunto aberto (veja [3]), e assim sendo, o buraco negro é uma região fechada que contém o horizonte de eventos,  $h_e \subset \text{BN}$ .

### 3 Propriedades dos buracos negros

Os buracos negros são objetos astrofísicos estáveis com propriedades particulares. Até recentemente, tudo que conhecíamos sobre buracos negros era fruto de desenvolvimentos teóricos. A partir de hipóteses genéricas, como a validade da teoria da relatividade geral, os físicos e matemáticos provaram uma série de teoremas que especificam certas propriedades desses objetos, e talvez mais interessante ainda, garantem a manutenção de sua existência.

Por exemplo, há um teorema que assegura que, uma vez formado, um buraco negro não pode desaparecer nem bifurcar-se, ou seja, com o passar do tempo, ele não pode dividir-se em buracos negros menores.

Um outro exemplo muito interessante é que a área do horizonte de eventos nunca decresce com o tempo.<sup>2</sup> Isso significa que ao absorver um objeto genérico, o buraco negro sempre aumenta de “tamanho”, ou ainda, se dois buracos negros se chocarem formando um novo buraco negro, este teorema garante que a área do buraco negro resultante será maior ou igual a soma das áreas dos buracos negros que inicialmente se chocaram.

A solução mais simples de buraco negro é conhecida como solução de Schwarzschild. Karl Schwarzschild foi um físico e astrônomo alemão que encontrou em 1916 [4] uma solução exata das equações de Einstein. Seu intuito era descrever a solução exterior (região sem matéria) de uma estrela esféricamente simétrica, a qual deveria ser suavemente conectada com a solução no interior da estrela (região com matéria). Entretanto, esta mesma solução exterior descreve um buraco negro estático e esféricamente simétrico. Esta solução

<sup>2</sup>Esse resultado é válido para o regime clássico. Iremos mencionar a possibilidade de evaporação de buracos negros na seção 4

**Tabela 1:** Comparação entre o raio de Schwarzschild ( $r_s$ ) e o raio físico de alguns objetos astrofísicos típicos.

Objeto	raio $r_s$	raio físico
E. de Nêutrons	6 km	10 km
Anãs brancas	1,8 km	$10^4$ km
Sol	3 km	$7 \times 10^5$ km
Terra	$9 \times 10^{-6}$ km	$6 \times 10^3$ km

é caracterizada por apenas um parâmetro associado a massa total  $M$ . Podemos construir um raio característico pela combinação que denominamos raio de Schwarzschild

$$r_s \equiv \frac{2GM}{c^2} \quad (1)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz e  $G$  é a constante gravitacional de Newton. O horizonte de eventos do buraco negro de Schwarzschild localiza-se justamente no seu raio de Schwarzschild, i.e.  $r_h = r_s$ .

Esta quantidade pode ser usada como uma estimativa grosseira da necessidade de considerarmos efeitos relativísticos para descrever o campo gravitacional de planetas e estrelas. Para isso, compara-se o raio físico do objeto com o seu raio de Schwarzschild. Incluir efeitos relativísticos torna-se imprescindível quando o raio de Schwarzschild for comparável ao raio físico do objeto astrofísico.

A tabela 1 mostra essa comparação para alguns objetos típicos. Note que nem mesmo em Anãs Brancas, com densidades da ordem de  $10^9 \text{ kg/m}^3$ , os efeitos relativísticos de gravitação são sub-dominantes o que é manifesto pela razão  $r_s/R \approx 2 \times 10^{-4}$ . No caso de Estrelas de Nêutrons temos  $r_s/R \approx 0,6$  e de fato estes objetos astrofísicos só são descritos de maneira adequada no contexto da relatividade geral.

As soluções convencionais de buracos negros podem ser descritas por apenas 3 parâmetros. O primeiro é justamente o raio de Schwarzschild associado a massa do buraco negro. Os outros dois são a carga total e o seu momento angular.<sup>3</sup> Buracos negros carregados são denominados de buracos negros de Reissner-Nordström [5, 6], enquanto que os com rotação (momento angular) são chamados de buracos negros de Kerr [7]. Logo

<sup>3</sup>Mais precisamente, o parâmetro que caracteriza a solução com rotação é o momento angular por unidade de massa

**Tabela 2:** Possíveis famílias de buracos negros de acordo com os valores dos parâmetros associados a carga  $Q$  e momento angular  $J$ .

	$J = 0$	$J \neq 0$
$Q = 0$	Schwarzschild	Kerr
$Q \neq 0$	Reissner-Nordström	Kerr-Newman

em seguida, Newman e colaboradores generalizaram esta solução incluindo carga ao buraco negro com rotação [8]. A solução mais geral de um buraco negro carregado e com rotação é chamada de buraco negro de Kerr-Newman. As possíveis famílias de buracos negros podem ser resumidas de acordo com a tabela 2.

Usando a massa do buraco negro e as constante da natureza  $G$  e  $c$ , podemos definir distâncias características associadas ao momento angular e carga de um buraco negro da mesma forma que definimos o raio de Schwarzschild. Assim os três parâmetros da família de buracos negros de Kerr-Newman podem ser escritos por

$$r_s \equiv \frac{2GM}{c^2}, \quad r_J \equiv \frac{2J}{Mc}, \quad r_Q \equiv \frac{2\sqrt{G}Q}{c^2}$$

Em termos destes raios característicos, o horizonte de eventos de Kerr-Newman localiza-se em

$$r_h = \frac{1}{2} \left( r_s + \sqrt{r_s^2 - (r_J^2 + r_Q^2)} \right).$$

No caso de um buraco negro de Schwarzschild ( $r_J = r_Q = 0$ ), o horizonte se reduz ao raio de Schwarzschild (1). É imediato notar que tanto o momento angular quanto a carga diminuem o tamanho do horizonte. Ademais, existe um limite máximo de valor da carga e do momento angular para a existência do horizonte, a saber  $r_s^2 \geq r_J^2 + r_Q^2$ . O caso limite onde os valores de  $J$  e  $Q$  produzem a igualdade na relação anterior é conhecido como buraco negro extremo. No caso de um buraco negro extremo de Kerr temos  $r_s = 2J/Mc$  enquanto se for um buraco negro extremo de Reissner-Nordström temos  $r_s = 2\sqrt{G}Q/c^2$ .

O único dos três parâmetros que não pode ser zero é a massa. O limite de tomar a massa tendendo a zero faz com que o sistema recaia no espaço plano (sem buraco negro). De maneira oposta, é muito difícil que um buraco negro astrofísico seja carregado. Não há cenários razoáveis em que um buraco negro apresente excesso de

carga suficiente para ser descrito por uma solução carregada. Isto decorre das interações eletromagnéticas atuarem para neutralizar a carga total dos corpos astrofísicos.

O Sol, por exemplo, é composto por partículas carregadas e possuiu fortes campos magnéticos. Contudo, a sua carga total, se não exatamente nula, é irrelevante se comparada com sua massa total. A natureza da interação gravitacional faz com que os efeitos das massas sempre se somem, ao contrário da interação eletromagnética que possuiu cargas positivas e negativas com a possibilidade de uma anular o efeito da outra.

Os buracos negros são entendidos como remanescentes dos estágios finais de estrelas muito massivas. A teoria de evolução estelar argumenta que as estrelas se formam por um processo de condensação de nuvens de gás interestelar. Em geral, esse processo de colapso produz estrelas com rotação (evidente pelas observações). Logo, é esperado que os buracos negros em geral também apresentem rotação.

A solução de Kerr descreve um buraco negro estacionário sem carga mas com momento angular. O fato de ser estacionário significa que a velocidade com que o buraco negro gira não varia no tempo. É uma configuração que não muda com o tempo. O exterior do buraco negro de Kerr é vácuo, ou seja, o buraco negro se apresenta isolado sem campo de matéria.

Há na literatura soluções de buraco negro com rotação que não são vácuo no exterior. Existem campos que se estendem para fora do buraco negro como cabelos em uma cabeça. Contudo, estas soluções são particulares e não há prova de que possam realizar-se na natureza. A expectativa da comunidade científica é que toda solução fisicamente aceitável, ou seja, realizável na natureza, deva se comportar de forma a relaxar até decair na solução de Kerr. Mesmo que a condição inicial seja muito diferente de Kerr, a evolução faria com que o sistema tendesse ao buraco negro de Kerr e assim permanecesse. Esta ideia é conhecida como conjectura do não-cabelo.

Uma das característica marcantes dos buracos negros é a existência do horizonte de eventos. Este conceito implementa de maneira satisfatória a ideia de uma região da qual nenhuma informação pode ser extraída. Contudo, do modo com que é definido, a noção de horizonte de eventos requer o conhecimento de toda evolução do espaço-

tempo até o infinito futuro. Esta dificuldade operacional e técnica, incentivou a busca por definições locais de horizontes. Uma definição muito útil é a noção de horizonte aparente, a qual se baseia no conceito de região de aprisionamento.

A superfície de aprisionamento é uma superfície bidimensional compacta sobre a qual o fator de expansão, designado por  $\theta$ , das trajetórias nulas, e.g. fótons, é sempre negativo. O fator de expansão mede o quanto as trajetórias vizinhas se afastam ( $\theta > 0$ ) ou se aproximam ( $\theta < 0$ ). Assim, quaisquer duas trajetórias direcionadas para o futuro que iniciem na superfície de aprisionamento irão necessariamente se aproximar. O interior desta superfície é chamado de região de aprisionamento. De maneira semelhante ao horizonte de eventos, identificamos o horizonte aparente como a borda das regiões de aprisionamento.

O horizonte aparente possui propriedades interessantes. Assumindo a validade das equações de Einstein e certas condições de energia,<sup>4</sup> é possível mostrar que o horizonte aparente sempre localiza-se dentro do (ou coincide com o) horizonte de evento [3]. Além disso, o fator de expansão é uma quantidade que pode ser calculada a qualquer instante e ponto do espaço-tempo, não requerendo que toda a evolução seja resolvida de antemão. Por isso, é o horizonte aparente, e não o horizonte de eventos, que costuma ser utilizado nas simulações numéricas para definir a região do buraco negro.

A formação de uma superfície de aprisionamento está intimamente ligada com a formação de singularidades. É possível provar um teorema que mostra que dentro de todo horizonte aparente há uma singularidade. Em geral, as singularidades são catastróficas para a descrição física. Porém, no caso em questão, a singularidade está dentro do horizonte e sem contato causal com o exterior, ou seja, ela não pode influenciar o que acontece fora do buraco negro. Quando a singularidade não está velada por nenhum horizonte dizemos que a singularidade é nua, e temos uma situação sem controle preditivo.

Os teoremas que mencionamos mostram que no cenário da teoria da relatividade geral, com condições plausíveis para o campo de matéria, é inevitável a formação de singularidades, ou seja,

<sup>4</sup>As condições de energia são premissas sobre o comportamento dos campos de matéria que podem ser traduzidas em propriedades do tensor energia-momento associado a estes campos.

é algo que teremos que considerar. Porém, singularidades nuas fogem do controle descritivo. Esta situação levou a formulação do que é conhecido como a conjectura da censura cósmica que propõe que toda singularidade oriunda do colapso gravitacional deva sempre estar coberta (escondida) por um horizonte de modo que observadores externos não possam vê-la.

#### 4 Termodinâmica de buracos negros

O desenvolvimento das propriedades dos buracos negros mostram que as relações entre quantidades físicas associadas a mecânica dos buracos negros se assemelham muito as três leis da termodinâmica. As leis associadas aos buracos negros são resultados de teoremas para buracos negros estacionários. Em particular iremos considerar o caso de buracos negros de Kerr (com rotação).

Primeiramente, vamos introduzir uma quantidade definida sobre o horizonte de qualquer buraco negro estacionário denominada gravidade superficial e designada por  $\kappa$ . Na gravitação newtoniana, a gravidade superficial de um corpo astronômico é o valor da aceleração gravitacional no equador de sua superfície. No caso de buracos negros, a superfície é entendida como o horizonte de eventos, e neste caso a aceleração diverge a infinito.<sup>5</sup> Por isso, em buracos negros, a gravidade superficial é definida como o valor da aceleração própria local, ou seja, a aceleração necessária para impedir que o observador caia no buraco negro e que diverge no horizonte, renormalizada por um fator de dilatação temporal que tende a zero. Desta forma, a gravidade superficial assim renormalizada fornece um valor finito. Este fator de dilatação temporal faz com que reinterpretemos a gravidade superficial  $\kappa$  como sendo a aceleração para manter um objeto parado (sem cair no buraco negro), mas medida por um observador distante (na região assintótica longe do buraco negro).

O primeiro resultado da mecânica dos buracos negros é mostrar que  $\kappa$  é constante sobre o horizonte de eventos. Como veremos, esta quantidade aparece nas leis dos buracos negros da mesma forma que a temperatura aparece na termodinâmica. Em particular, a lei zero da termodinâmica

<sup>5</sup>Isto indica que seria necessária uma aceleração infinita para manter corpos massivos parados em cima do horizonte.

diz que a temperatura  $T$  é constante em corpos em equilíbrio térmico, da mesma forma que  $\kappa$  é constante no horizonte para buracos negros estacionários.

Um outro resultado crucial para associar a mecânica de buracos negros com as leis da termodinâmica é o teorema que garante que a área de um buraco negro nunca decresce. Lembre-se que, na termodinâmica, a entropia de um sistema isolado nunca decresce. Esta comparação estimula a associarmos a entropia do buraco negro  $S_{BN}$  com a sua área. Para acertar as unidades devemos incluir alguns constantes fundamentais da natureza na forma

$$S_{BN} = \frac{k_B c^3}{4G\hbar} A$$

onde  $k_B$  e  $\hbar$  são respectivamente a constante de Boltzmann e a constante de Planck reduzida. A área do horizonte de eventos, naturalmente, depende dos parâmetros do buraco negro. No caso de um buraco negro de Kerr, se variarmos a sua massa  $M$  ou o seu momento angular  $J$ , a área do horizonte de eventos  $A$  muda de acordo. É possível mostrar que estas quantidades estão relacionadas pela equação

$$\delta M = \frac{\kappa}{8\pi G} \delta A + \frac{\Omega_h}{c} \delta J \quad (2)$$

onde  $\kappa$  é a gravidade superficial definida acima, e  $\Omega_h$  é a velocidade angular do horizonte de eventos. Em relatividade, massa é uma forma de energia,<sup>6</sup> de modo que (2) pode ser interpretada como uma equação de balanço de energia. A primeira lei da termodinâmica pode ser escrita como

$$\delta U = T\delta S - p\delta V, \quad (3)$$

onde  $\delta U$ ,  $\delta S$  e  $\delta V$  são respectivamente a variação da energia interna, da entropia, e do volume do sistema, enquanto que as quantidades intensivas são a temperatura  $T$  e a pressão  $p$ .

Note que o termo  $\Omega_h/c \delta J$  representa uma forma de trabalho no caso de variações no momento angular, da mesma maneira que o termo  $p\delta V$  funciona para variações do volume de um gás. Como  $\kappa$  faz o papel da temperatura e  $A$  o da entropia, temos uma identificação um-a-um entre as expressões (2) e (3).

<sup>6</sup>Essa é a essência da famosa fórmula de Einstein  $E = mc^2$  a qual possibilita, dentre outras coisas, calcular quanto de energia é liberada em reações nucleares quando um decaimento radioativo faz com que a massa resultante seja menor que a massa do átomo inicial.

Finalmente, a terceira lei da termodinâmica afirma ser impossível atingir o limite  $T \rightarrow 0$  por processos físicos. No caso de buracos negros extremos a gravidade superficial se anula, i.e.  $\kappa = 0$ . É possível mostrar que ao tentar levar um buraco negro não-extremo a se aproximar da condição de extremalidade, por aumento de carga ou de momento angular, quanto mais próximo da situação extrema mais difícil se torna alterar a condição do buraco negro. Desta forma, acredita-se não ser possível, por processos físicos, levar buracos negros a condição extremal que é justamente quando a gravidade superficial  $\kappa$  se anula. Chegamos assim as analogias da tabela 3.

Para identificarmos estas relações temos que a temperatura e a gravidade superficial devem se relacionar por

$$T = \frac{\hbar\kappa}{2\pi k_B c} \quad (4)$$

Duas ressalvas são necessárias. A primeira é que a terceira lei da termodinâmica tem uma formulação alternativa que afirma que a entropia tende a zero quando a temperatura tende a zero. Esta formulação não pode ser utilizada no caso de buracos negros, o que é evidente pois no caso extremo  $\kappa$  vai a zero mas a área do buraco negro permanece finita. A outra questão diz respeito a associação de uma temperatura ao buraco negro.

Classicamente, a temperatura termodinâmica dos buracos negros é zero pois esse objetos astrofísicos são absorvedores perfeitos que não emitem nada. Assim, a associação de  $\kappa$  como a temperatura do buraco negro não poderia ser de fato uma identificação mas apenas uma mera analogia. Contudo, em 1975 Hawking [9] mostrou que efeitos quânticos na presença de buracos negros podem criar partículas causando uma emissão efetiva pelo buraco negro com um espectro térmico com temperatura dada justamente pela relação (4). Ao emitir essa radiação Hawking, o buraco negro acaba por perder massa o que diminui a sua área. Este decréscimo de massa viola o teorema citado anteriormente em que a área de um buraco negro nunca decresce, o que mostra a limitação do teorema apenas para o regime puramente clássico. Note, no entanto, que a radiação Hawking fortalece as associações da tabela 3. A única ressalva é a necessidade de uma reformulação da segunda lei da termodinâmica para incluir tanto os campos de matéria quanto buracos negros. Com esta motivação, Bekenstein propôs [10, 11] a se-

**Tabela 3:** Analogia entre a mecânica de buracos negros e as leis da termodinâmica.

Lei	Buracos Negros	Termodinâmica
zero	$\kappa$ é constante sobre o horizonte de um BN estacionário	$T$ é constante em um corpo em equilíbrio térmico
1 <sup>a</sup>	$\delta M = \frac{\kappa}{8\pi G} \delta A + \frac{1}{c} \Omega_h \delta J$	$\delta U = T \delta S - p \delta V$
2 <sup>a</sup>	$\delta A \geq 0$	$\delta S \geq 0$
3 <sup>a</sup>	impossível atingir $\kappa = 0$ por processos físicos	impossível atingir $T = 0$ por processos físicos

gunda lei generalizada a qual afirma que a variação da entropia da matéria somada ao buraco negro não pode decrescer, i.e.  $\delta(S_{BN} + S_{mat}) \geq 0$ . Com esta modificação na lei da entropia, a termodinâmica dos buracos negros torna-se consistente.

### 5 Observação dos buracos negros

A teoria da relatividade geral foi formulada há pouco mais de 100 anos e, durante este centenário, seu formalismo foi desenvolvido junto com suas consequências. Porém, por mais bela ou matematicamente consistente que seja uma teoria, apenas a observação e os experimentos são capazes de verificar se ela de fato descreve de maneira satisfatória os fenômenos naturais. Um caso exemplar é justamente a existência de buracos negros.

Em 2020, o comitê da academia de ciências real da Suécia decidiu agraciar Roger Penrose, Reinhard Genzel e Andrea Ghez por suas contribuições no estudo e descoberta de Buracos Negros. Roger Penrose recebeu metade do prêmio “*pela descoberta que a formação de buracos negros é uma predição robusta da teoria de relatividade geral*” enquanto Reinhard Genzel e Andrea Ghez dividiram a outra metade do prêmio “*pela descoberta de um objeto compacto supermassivo no centro da nossa galáxia*”.<sup>7</sup>

O trabalho de Roger Penrose é citado como um método matemático engenhoso capaz de provar que buracos negros são uma consequência direta da teoria da relatividade geral. Note, porém, que isto não garante que buracos negros existam na natureza. Poderia ser o caso desta teoria ser

muito boa para descrever a gravitação mas no regime necessário para descrever a formação de buracos negros ela deixasse de ser válida. O próprio Einstein não acreditava que buracos negros realmente existiam. A bem da verdade, as provas matemáticas de Penrose foram desenvolvidas anos depois da morte de Einstein, durante a década de 1960. Não há como saber se o estudo de Penrose já seria suficiente para convencer a Einstein ou ele só se renderia a observação direta destes objetos super compactos.

No início da década de 1990, Reinhard Genzel e Andrea Ghez iniciaram os trabalhos que culminariam com a primeira evidência observacional robusta da existência de buracos negros. Cada um, liderando o seu grupo de astrônomos, decidiu focar seus esforços na observação de uma região no centro de nossa galáxia chamada de Sagitário A\*. Eles desenvolveram métodos para conseguir ver através de nuvens gigantes de gás interestelar e poeira, além de refinar técnicas para compensar as distorções causadas pela nossa atmosfera terrestre. O desafio foi remover os efeitos sofridos pela luz ao viajar do centro da galáxia até o telescópio na superfície da Terra para acompanhar a trajetória de estrelas. Essas trajetórias manifestam a curvatura local do espaço-tempo (de uma perspectiva newtoniana seria o equivalente ao campo gravitacional) e assim desvelaram a existência de um objeto extremamente massivo e invisível em uma região compacta pequena, da ordem do sistema solar. A única explicação cientificamente convincente para esta configuração é a presença de um buraco negro super-massivo.

Mais recentemente, tivemos mais dois tipos de observação que confirmam a existência de buracos negros: a detecção de ondas gravitacionais pela colaboração LIGO em 2015 e a foto de um buraco negro pelo Telescópio Horizonte de Eventos

<sup>7</sup>Tradução livre das citações na página oficial do prêmio Nobel justificando a premiação a estes três cientistas <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/press-release/>

(Event Horizon Telescope) em 2019.

A colaboração LIGO (acrônimo em inglês para observatório de ondas gravitacionais com interferômetro a laser) possuiu dois detectores gêmeos (mesma tecnologia e construção) localizados nos Estados Unidos. Em 14 de Setembro de 2015, ambos detectores registraram um sinal [12] que depois de uma análise exaustiva confirmou ser a primeira detecção de ondas gravitacionais (veja o v.2 n.2 dos Cadernos de Astronomia 2020). A reconstrução da possível origem do sinal indicou que a fonte possuiu uma distância luminosidade de  $410_{-180}^{+160}$  Mpc e originou-se a partir do choque de dois buracos negros com massas  $36_{-4}^{+5}$  e  $29_{-4}^{+4}$  massas solares produzindo um buraco negro final com massa  $62_{-4}^{+4}$  massas solares, ou seja, houve emissão de radiação por ondas gravitacionais equivalente a uma energia de  $3,0_{-5}^{+5} M_{\odot} c^2 \approx 1,78 \times 10^{47}$  Joules  $\approx 10^{57}$  GeV.<sup>8</sup>

O telescópio Horizonte de Eventos (EHT) é uma colaboração internacional com 8 telescópios de rádio na superfície da Terra que se compõem para formar um conjunto de detectores com escala planetária. A ideia é usar cada um dos 8 telescópios como se fosse parte de um único telescópio com dimensão da superfície da Terra. Esta colaboração conseguiu revelar a primeira evidência visual direta de um buraco negro super-massivo e de sua sombra [13]. O buraco negro registrado localiza-se no centro da gigante galáxia elíptica Messier 87 a qual faz parte da constelação Virgo - um aglomerado vizinho ao nosso. Este é um dos buracos negros mais massivos que conhecemos, sendo aproximadamente 1500 vezes mais massivo do que o localizado no centro de nossa galáxia, com  $6 \times 10^9$  massas solares.

O buraco negro absorve mas não emite luz, por isso, o mais perto que se consegue de uma foto destes objetos é registrar a sombra do buraco negro. Ao cair no buraco negro, a matéria que o circunda emite radiação a qual eventualmente consegue escapar e viajar até nossos detectores. Parte desta matéria segue trajetórias que cruzam o horizonte de eventos deixando uma área negra cercada por uma região luminosa. Esta região negra é chamada de sombra do buraco negro. Estima-se que o horizonte de eventos deste

buraco negro é 2.5 vezes menor do que a sombra que ele cria e tem um diâmetro de área superficial de pouco menos de 40 bilhões de km.

Os buracos negros super-massivos são relativamente pequenos se comparados com outros objetos astronômicos. Como o tamanho do buraco negro é proporcional a sua massa, os buracos negros super-massivos em galáxias vizinhas são os candidatos ideais para ser registrados. Em particular, a enorme massa do buraco negro na M87 e sua relativa proximidade foram decisivos para a sua escolha com primeiro alvo. Recentemente esta mesma colaboração conseguiu fotografar também o buraco negro Sagitário A\* no centro de nossa galáxia [14].

É muito estimulante notar que já passamos da fase de tentar provar a existência de buracos negros para usá-los como fenômenos naturais capazes de testar nossas teorias e hipóteses. Estas observações além de comprovar a existência desses objetos também são fundamentais para testar nossas teorias.

## 6 Considerações finais

Por fim, vale lembrar que há uma série de questões teóricas e outras observacionais relacionadas à física dos buracos negros. Estuda-se, por exemplo, se a taxa de formação desses objetos pode nos ensinar sobre a formação da estrutura em cosmologia. A produção de ondas gravitacionais na colisão de dois buracos negros, ou entre um buraco negro e uma estrela de nêutrons, é uma das áreas promissoras para o futuro próximo com possibilidades tanto de desenvolvimento astrofísico quanto em cosmologia. Ademais, devido a intensidade dos efeitos gravitacionais, os buracos negros servem de laboratório para avanços em estudos de gravitação quântica.

Contudo, apesar do enorme progresso em nosso entendimento da astrofísica desses objetos, ainda há perguntas não respondidas como, por exemplo, quais são os graus de liberdade associados a entropia do buraco negro ou o paradoxo da informação em buracos negros. Todos estes pontos, somados a riqueza e a situação extrema desses sistemas, fazem da física dos buracos negros uma das áreas mais belas e instigantes da física relativística.

<sup>8</sup>Os valores acima e abaixo de cada valor de massa indica a incerteza calculada, enquanto  $M_{\odot}$  e  $c$  são respectivamente a massa do Sol ( $1,988 \times 10^{30}$  kg) e a velocidade da luz no vácuo ( $2,99 \times 10^8$  m/s).

## Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer o apoio financeiro parcial do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq).

---

## Sobre o autor

Felipe T. Falciano ([ftovar@cbpf.br](mailto:ftovar@cbpf.br)) é Doutor em Física (2008) pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e Mestre em Filosofia (2017) pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Desde 2009 é pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, vinculado a coordenação COSMO e atuando nas áreas de cosmologia e gravitação.

## Referências

- [1] J. Michell, *On the means of discovering the distance, magnitude, & c. of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their light, in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be farther necessary for that purpose. by the rev. john michell, b. d. f. r. s. in a letter to henry cavendish, esq. f. r. s. and a. s.*, *Philosophical Transactions of the Royal Society* **74**, 35 (1784).
- [2] P.-S. Laplace, *Beweis des satzes, dass die anziehende kraft bey einem weltkörper so gross seyn könne, dass das licht davon nicht ausströmen kann.*, *Allgemeine Geographische Ephemeriden* **4**, 1 (1799). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1799A11GE...4...1L/abstract>, acesso em fev. 2023.
- [3] R. M. Wald, *General Relativity* (The University of Chicago Press, 1984).
- [4] K. Schwarzschild, *On the gravitational field of a mass point according to Einstein's theory*, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.)* **1916**, 189 (1916). [ArXiv: physics/9905030](https://arxiv.org/abs/physics/9905030).
- [5] H. Reissner, *Über die Eigengravitation des elektrischen Feldes nach der Einsteinschen Theorie*, *Annalen der Physik* **355**(9), 106 (1916).
- [6] G. Nordström, *On the Energy of the Gravitation field in Einstein's Theory*, *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings Series B Physical Sciences* **20**, 1238 (1918).
- [7] R. P. Kerr, *Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics*, *Phys. Rev. Lett.* **11**(5), 237 (1963).
- [8] E. T. Newman et al., *Metric of a Rotating, Charged Mass*, *Journal of Mathematical Physics* **6**(6), 918 (1965).
- [9] S. W. Hawking, *Particle Creation by Black Holes*, *Commun. Math. Phys.* **43**, 199 (1975), [Erratum: *Commun.Math.Phys.* **46**, 206 (1976)].
- [10] J. D. Bekenstein, *Black holes and the second law*, *Lett. Nuovo Cim.* **4**, 737 (1972).
- [11] J. D. Bekenstein, *Generalized second law of thermodynamics in black-hole physics*, *Phys. Rev. D* **9**(12), 3292 (1974).
- [12] B. P. Abbott et al. e LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016).
- [13] A. Kazunori et al. e The Event Horizon Telescope Collaboration, *First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole*, *The Astrophysical Journal Letters* **875**(1), L4 (2019).
- [14] A. Kazunori et al. e The Event Horizon Telescope Collaboration, *First Sagittarius A\* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way*, *The Astrophysical Journal Letters* **930**(2), L12 (2022).