

O PEQUENO LIVRO DOS
**BURACOS
NEGROS**

**STEVEN GUBSER E
FRANS PRETORIUS**

O QUE SÃO, POR QUE EXISTEM E SUA
IMPORTÂNCIA PARA O FUTURO DO UNIVERSO

CRÍTICA

O PEQUENO LIVRO DOS
**BURACOS
NEGROS**

**STEVEN GUBSER E
FRANS PRETORIUS**

O QUE SÃO, POR QUE EXISTEM E SUA
IMPORTÂNCIA PARA O FUTURO DO UNIVERSO

Tradução

Rosaura Maria Cirne Lima Eichenberg

CRÍTICA

TRECHO ANTECIPADO PARA DIVULGAÇÃO. VENDA PROIBIDA

Copyright © Steven Gubser, 2017
Copyright © Frans Pretorius, 2017
Copyright © Editora Planeta do Brasil, 2022
Copyright da tradução © Rosaura Maria Cirne Lima Eichenberg
Todos os direitos reservados.
Título original: *The Little Book of Black Hole*

PREPARAÇÃO: Fernanda Guerriero Antunes
REVISÃO: Karina Barbosa Santos e Carla Sacrato
DIAGRAMAÇÃO: Nine Editorial
CAPA: Luciana Facchini

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO
ANGÉLICA ILACQUA CRB-8/7057

Gubser, Steven

O pequeno livro dos buracos negros / Steven Gubser, Frans Pretorius; tradução de Rosaura Maria Cirne Lima Eichenberg. – São Paulo : Planeta, 2021.
256 p.

ISBN 978-65-5535-580-2

Título original: *The Little Book of Black Hole*

I. Buracos negros (Astronomia) - Literatura infantojuvenil I. Título II. Pretorius, Frans III. Eichenberg, Rosaura Maria Cirne Lima

21-5224

CDD 028.5

Índice para catálogo sistemático:

I. Buracos negros (Astronomia) - Literatura infantojuvenil



Ao escolher este livro, você está apoiando o manejo responsável das florestas do mundo

2022

Todos os direitos desta edição reservados à
Editora Planeta do Brasil Ltda.
Rua Bela Cintra, 986, 4º andar – Consolação
São Paulo – SP – 01415-002
www.planetadelivros.com.br
faleconosco@editoraplaneta.com.br

TRECHO ANTECIPADO PARA DIVULGAÇÃO. VENDA PROIBIDA

SUMÁRIO

PREFÁCIO 7

1 A relatividade especial 19

2 A relatividade geral 45

3 O buraco negro de Schwarzschild 77

4 Os buracos negros com rotação 117

5 Buracos negros no universo 149

6 Colisões de buracos negros 173

7 A termodinâmica dos buracos negros 211

EPÍLOGO 241

CAPÍTULO 1

A relatividade especial

Para compreender os buracos negros, temos de aprender um pouco de relatividade. A teoria da relatividade é dividida em duas partes: a especial e a geral. Albert Einstein propôs a teoria da relatividade especial em 1905, que trata de objetos movendo-se uns em relação aos outros, e da maneira pela qual a experiência de espaço e tempo de um observador depende de como ele está se movendo. As ideias centrais da relatividade especial podem ser formuladas em termos geométricos usando um belo conceito chamado espaço-tempo de Minkowski.

A relatividade geral abrange a relatividade especial e também inclui a gravidade. A relatividade geral é a teoria de que precisamos para realmente compreender os buracos negros. Einstein desenvolveu a relatividade geral ao longo de um período de anos, culminando num estudo publicado no final de 1915 em que ele apresentou as chamadas equações de campo de Einstein. Essas equações descrevem como a gravidade distorce o espaço-tempo de Minkowski numa geometria curva de espaço-tempo – por exemplo, a geometria do buraco negro de Schwarzschild, a qual vamos descrever no capítulo 3. A relatividade espe-

cial é mais simples e mais fácil que a relatividade geral porque a gravidade é negligenciada – isto é, a gravidade é ignorada, ou presume-se que seja um efeito demasiado fraco para ser significativo.

A relatividade especial inclui a fórmula $E = mc^2$, que relaciona a energia E , a massa m e a velocidade da luz c . Essa é uma das equações mais famosas de toda a física, possivelmente de todo o conhecimento humano. $E = mc^2$ tornou possível prever a força assombrosa das armas nucleares, e está no cerne de nossas esperanças, ainda não realizadas, de uma fonte limpa de energia a partir da fusão nuclear. $E = mc^2$ é também muito relevante para a física do buraco negro. Por exemplo, a energia correspondente a 3 massas solares ejetada da primeira colisão de buracos negros observada é uma ilustração excelente da equivalência de massa e energia. Para se ter uma ideia de como essa colisão foi cataclísmica, considere-se que a massa convertida em energia na explosão de uma arma nuclear (pressupondo-se um rendimento de 400 quilotons) não passa de meros 19 gramas.

A relatividade especial é intimamente relacionada à teoria do eletromagnetismo de James Clerk Maxwell. Na realidade, uma primeira pista da visão relativística do espaço e tempo surgiu no final dos anos 1800 sob a forma das chamadas transformações de Lorentz, que explicam como as percepções de fenômenos eletromagnéticos por observadores dependem de como os observadores estão se movendo. O fenômeno eletromagnético mais familiar é a

luz, que é uma onda em movimento de campos elétricos e magnéticos. Uma consequência da teoria de Maxwell é que a luz tem uma velocidade definida. A relatividade é construída em torno da ideia de que essa velocidade é realmente uma constante, independentemente do movimento do observador.

O movimento dos observadores é descrito na relatividade especial em termos de sistemas de referência. Para ter uma ideia do que é um sistema de referência, vamos pensar num trem em alta velocidade. Se todos os passageiros estão sentados e toda a bagagem está acondicionada, então tudo no trem está realmente estacionário com respeito ao próprio trem. No entanto, o trem está se movendo rapidamente em relação à Terra. Vamos supor que ele esteja se movendo numa linha reta em velocidade constante. Para dar uma descrição plenamente precisa de sistemas de referência, devemos estipular a ausência de qualquer campo gravitacional significativo. Por exemplo, em vez de um trem avançando em velocidade constante ao longo da superfície da Terra, precisaríamos considerar uma nave espacial planando em velocidade constante num espaço do contrário vazio. O campo gravitacional de nosso planeta é fraco o suficiente a fim de que possamos ignorar, para os presentes fins, seus efeitos sobre o trem e trabalhar apenas com a teoria da relatividade especial, e não com a teoria geral.

Sem olhar para fora das janelas, é difícil dizer com que velocidade o trem está se movendo. Numa situação em que ele tenha uma suspensão fantástica, os trilhos sejam muito

nivelados, e as persianas de todas as janelas estejam abaixadas, seria impossível saber que está realmente se movimentando. O trem fornece um sistema de referência – aquele que seus passageiros naturalmente usam para julgar se algo dentro dele está se movendo. Eles não conseguem dizer (na situação ideal recém-descrita) se todo o trem está se movendo, mas decerto sabem quando alguém se aproxima pelo corredor, porque essa pessoa está se movendo em relação ao sistema de referência deles. Além disso, todos os fenômenos físicos, como bolas caindo ou piões girando, se comportariam da mesma maneira, quando observados por um observador no trem, quer este estivesse realmente se movendo, quer não. Em suma, portanto, um sistema de referência é um modo de olhar para o espaço e tempo que está associado a um observador, ou a um grupo de observadores, num estado de movimento uniforme. O movimento uniforme significa que o trem não está aumentando, nem diminuindo a velocidade, nem fazendo uma curva. Se executa uma dessas ações, os passageiros vão perceber; por exemplo, uma aceleração rápida os empurra para trás em seus assentos, enquanto uma desaceleração rápida os lança para a frente.

Vamos imaginar o nosso trem passando por uma estação sem parar nem diminuir a velocidade. Os passageiros que nele estão viajando – vamos chamá-los de Alice, Allan e Avery – são observadores num sistema de referência em movimento, a que daremos o nome de sistema-A. Enquanto isso, seus amigos Bob, Betsy e Bill estão de pé sobre a plataforma, num sistema de referência estacionário,

a que daremos o nome de sistema-B. Para desenhar esses sistemas de referência, colocamos a posição do sistema-B no eixo horizontal e o tempo do sistema-B no eixo vertical, e traçamos as trajetórias de nossos vários observadores através do espaço e tempo, de modo que ao longo do tempo os observadores do sistema-B sempre ficam nas mesmas posições do sistema-B, enquanto os observadores do sistema-A se movem para a frente. O diagrama resultante é na realidade o espaço-tempo de Minkowski! A palavra espaço-tempo se refere ao fato de que estamos mostrando espaço e tempo no mesmo diagrama. É possível adotar uma perspectiva diferente do espaço-tempo de Minkowski, como aquela em que os observadores do sistema-A são mostrados como estacionários, enquanto os observadores do sistema-B se movem para trás. Falaremos sobre essa perspectiva mais tarde.

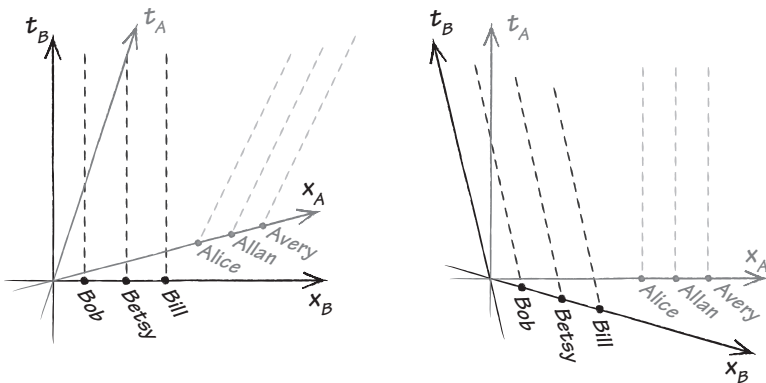


FIGURA 1.1. À esquerda: Espaço-tempo de Minkowski, mostrando três observadores no sistema-B como estacionários e três observadores no sistema-A como movendo-se para a frente. À direita: Uma perspectiva diferente no espaço-tempo de Minkowski, em que os observadores do sistema-B estão agora se movendo para trás e os observadores do sistema-A estão estacionários.

A relatividade especial depende da pressuposição de que a velocidade da luz é constante. Em outras palavras, supõe-se que a velocidade da luz seja a mesma, quando medida pelos observadores no trem e quando medida pelos observadores na plataforma. Se não fosse assim, pela medição da velocidade da luz, um observador poderia dizer em qual dos dois sistemas de referência se encontrava. No entanto, um princípio básico na teoria da relatividade é que a física deve ser a mesma em qualquer sistema de referência, de modo que *não podemos* realmente dizer em que sistema estamos por meio de qualquer medição física. Segundo esse princípio, não podemos escolher um sistema e afirmar: “Permanecer neste sistema é o que significa ficar estacionário. O movimento consiste em estar num sistema diferente”. Só podemos dizer: “Um sistema é tão bom quanto qualquer outro. A única ideia de movimento que podemos permitir é o movimento de um observador com respeito a outro”. Em outras palavras, os estados de movimento não são absolutos; eles são relativos. Assim, foi um erro referir-se ao sistema-A como em movimento e ao sistema-B como estacionário. Só podemos realmente dizer que eles estão se movendo um com respeito ao outro. (A ideia de o sistema-B ser estacionário parecia natural, entretanto, porque estávamos implicitamente pensando no movimento em relação à Terra.)

A intuição que explicamos sobre o movimento relativo parece senso comum, e devemos nos perguntar como será possível aproveitá-la nas questões relativas à natureza

profunda do espaço e tempo. O ingrediente-chave está na teoria do eletromagnetismo de Maxwell. O que essa teoria nos diz (entre outras coisas) é que, se Alice saca um ponteiro laser e envia um pulso luminoso em direção à frente do trem, e, se Bob faz o mesmo, então os dois pulsos luminosos avançam exatamente na mesma velocidade. Essa parece outra afirmação inócua, mas não é! Por exemplo, se arranjarmos para que o trem avance a 99% da velocidade da luz (é óbvio que não se trata de um trem americano), Bob não mediria que um pulso de laser disparado para a frente por Alice se move a quase o dobro da velocidade da luz? Afinal, ela está seguindo para a frente a 99% da velocidade da luz em relação a Bob, e seu pulso luminoso se move para a frente à velocidade da luz em relação a ela própria, por isso parece que Bob deveria medir que o pulso luminoso de Alice está avançando a 199% da velocidade da luz. Segundo o eletromagnetismo, porém, ele não obtém esse resultado! Ele mede que o pulso luminoso está se movendo à mesma velocidade da luz, em relação a ele, que Alice registraria se medisse esse movimento em relação a ela.

Como é possível? A resposta é que Alice e Bob medem a passagem do tempo de maneira diferente, e eles também medem o comprimento de maneira diferente. Os detalhes de como isso acontece estão codificados na transformação de Lorentz, que é uma expressão matemática que relaciona o tempo e o comprimento no sistema-A com o tempo e o comprimento no sistema-B. É fácil traçar uma

transformação de Lorentz por meio do espaço-tempo de Minkowski. Antes da transformação de Lorentz (o lado esquerdo da Figura 1.1), podemos pensar no sistema-B como estacionário e no sistema-A como movendo-se para a frente. Depois da transformação de Lorentz (o lado direito da Figura 1.1), o sistema-A está estacionário e o sistema-B está se movendo para trás! Uma transformação de Lorentz é apenas a mudança de perspectiva entre o relato que Bob daria baseando-se no entendimento de que seu sistema é estacionário, e o que Alice daria baseando-se no entendimento de que o sistema dela é estacionário.

As consequências-chave da transformação de Lorentz incluem a dilatação do tempo e a contração do comprimento. Vamos explicar primeiro a dilatação do tempo, porque é mais fácil de descrever. Suponhamos que, ao meio-dia de uma sexta-feira, você tome um trem em Princeton Junction. Para facilitar, vamos dizer que este tempo e lugar correspondem à origem do espaço Minkowski, onde se cruzam os eixos t e s . Ora, há trens rápidos e trens lentos passando por Princeton Junction; alguns vão para o norte em direção a Nova York, outros vão para o sul em direção à Filadélfia – e você pode decidir qual deseja tomar. O que você vai fazer é viajar no trem por exatamente uma hora pelo seu relógio, e depois desembarcar e marcar o ponto a que chegou. Obviamente, se pegar um trem rápido, você vai mais longe. No entanto, tenha cuidado com a suposição de que chegará exatamente duas vezes mais longe viajando num

trem que avança duas vezes mais rápido. O xis da questão é que você viaja por exatamente uma hora medida pelo seu próprio relógio. A velocidade de um trem é algo que observadores estacionários em relação ao chão mediriam, e seus relógios funcionam de um modo um pouquinho diferente do seu relógio, porque estão num sistema de referência diferente.

Então a que lugar você chega? De modo mais geral, se você e um grupo de amigos tomarem trens diferentes (todos partindo de Princeton Junction à mesma hora), a que ponto vão chegar? A resposta é que todos chegarão a algum ponto de uma hipérbole no espaço-tempo de Minkowski (ver Figura 1.2). Em outras palavras, a hipérbole é o conjunto de todas as possíveis localizações finais a que vocês podem chegar depois de precisamente uma hora de seu tempo de viagem. Uma localização final possível é a própria Princeton Junction, precisamente à 1 hora da tarde, tempo de Princeton Junction. O modo como você chega lá depois de uma hora é sendo tolo o suficiente para passar uma hora num trem que absolutamente não se move. Nessa situação, claro que será 1 hora da tarde, tempo de Princeton Junction, quando você “chegar”, porque seu sistema de referência é o mesmo da estação, de modo que seu relógio segue exatamente o tempo da estação. Se, em vez disso, você tomar um trem que realmente vai a algum lugar, o seu relógio andarà mais devagar que o tempo da estação, de modo que ao desembarcar depois de uma hora de tempo de viagem percebido,

pelo tempo da estação, será de fato mais tarde do que você acha que deveria ser. Esse efeito mais-tarde-do-que-você-acha, conhecido como dilatação do tempo, é captado no espaço-tempo de Minkowski pela maneira como a hipérbole se curva para cima na direção do tempo, à medida que você vai a localizações cada vez mais distantes de seu ponto de partida.¹ O espaço-tempo de Minkowski é às vezes chamado de geometria hiperbólica, em referência precisamente ao tipo de hipérbole que temos discutido.

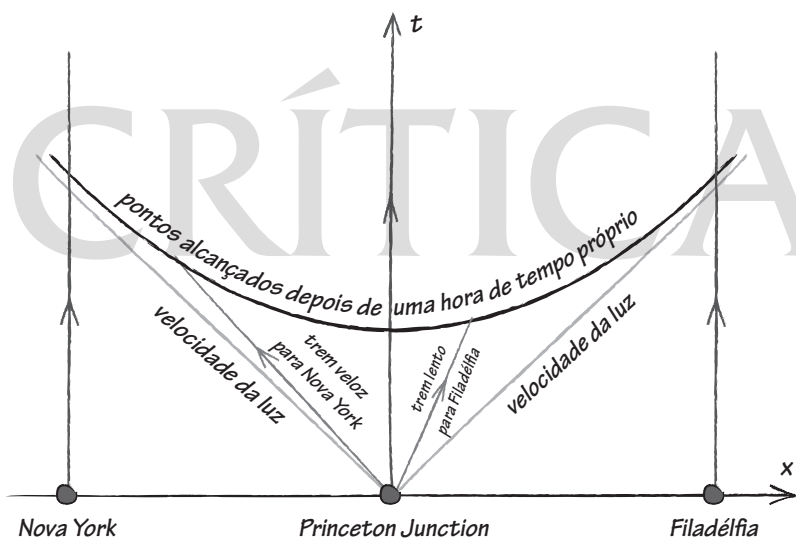


FIGURA 1.2. Trens a partir de Princeton Junction. A curva mostrando os pontos alcançados depois de uma hora de tempo próprio é uma hipérbole.

¹ O efeito mais-tarde-do-que-você-acha para uma viagem normal de trem de Princeton à cidade de Nova York importa em aproximadamente cem bilionésimos de segundo. Assim, a dilatação do tempo não vai fazer você chegar atrasado ao trabalho.