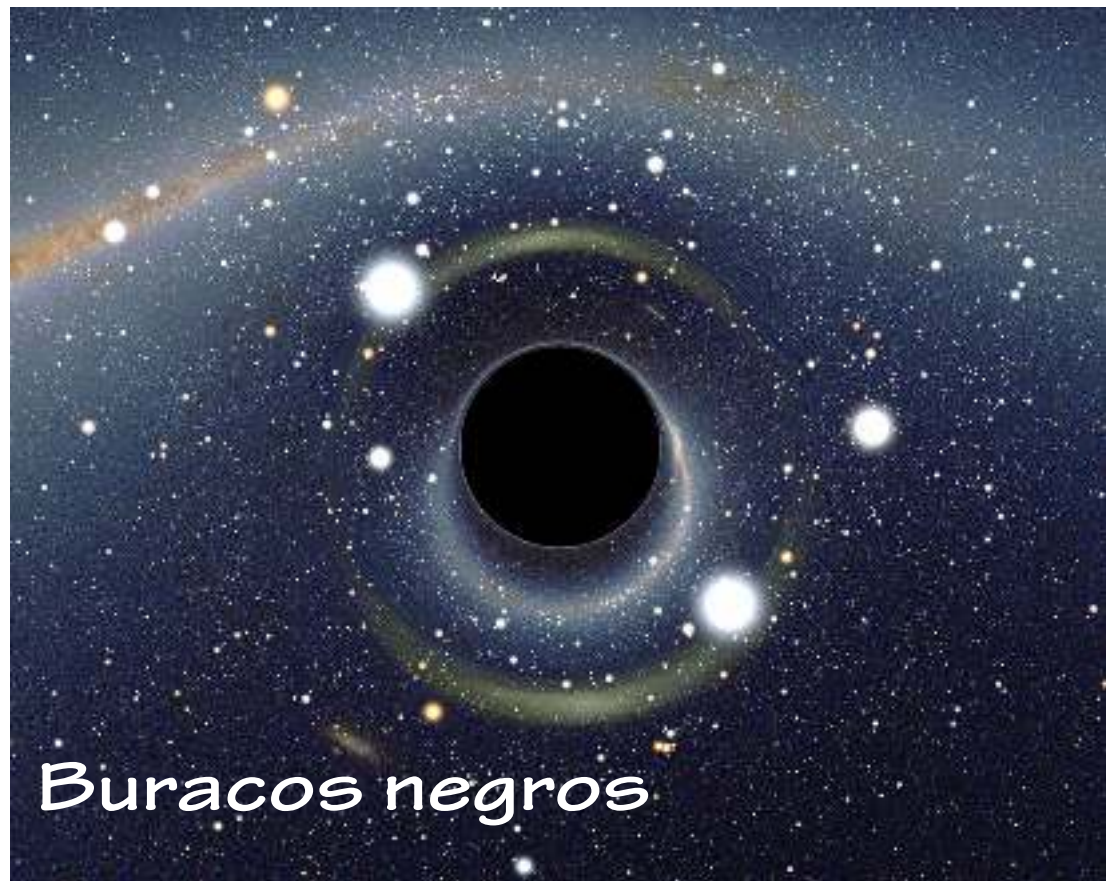


# O Universo no meu bolso



Buracos negros



Frédéric Vincent  
Observatório de Paris



A **tremenda pressão** no centro de uma estrela exerce uma força para fora **como o vapor em uma panela de água fervendo**.

## O equilíbrio de uma estrela

Uma estrela se equilibra entre duas tendências opostas.

As **reações nucleares** no centro da estrela (fusão de hidrogênio em hélio, fusão de hélio em carbono, etc. ver TUIMP 14) aquecem a matéria e, portanto, lhe dão uma pressão muito alta, que tende a expandir a estrela (como o vapor de água sob a tampa de uma panela aquecida).

**A gravidade** faz com que as partes externas da estrela sejam puxadas em direção ao seu centro, o que tende a contrair a estrela.

Estas duas tendências se equilibram perfeitamente durante a maior parte da vida da estrela. Mas o que acontece quando o combustível interno da estrela se esgota?

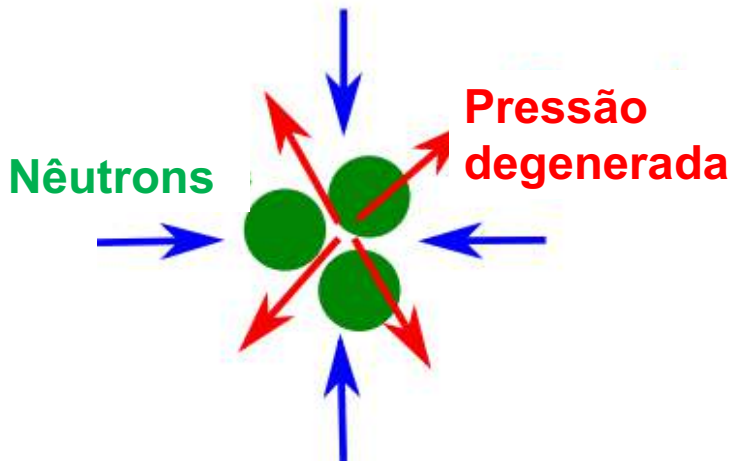
A gravidade tende a fazer com que as partes externas da estrela caiam em direção ao seu centro, assim como uma maçã cai de uma árvore devido à atração da Terra.



2

3

## Gravitação



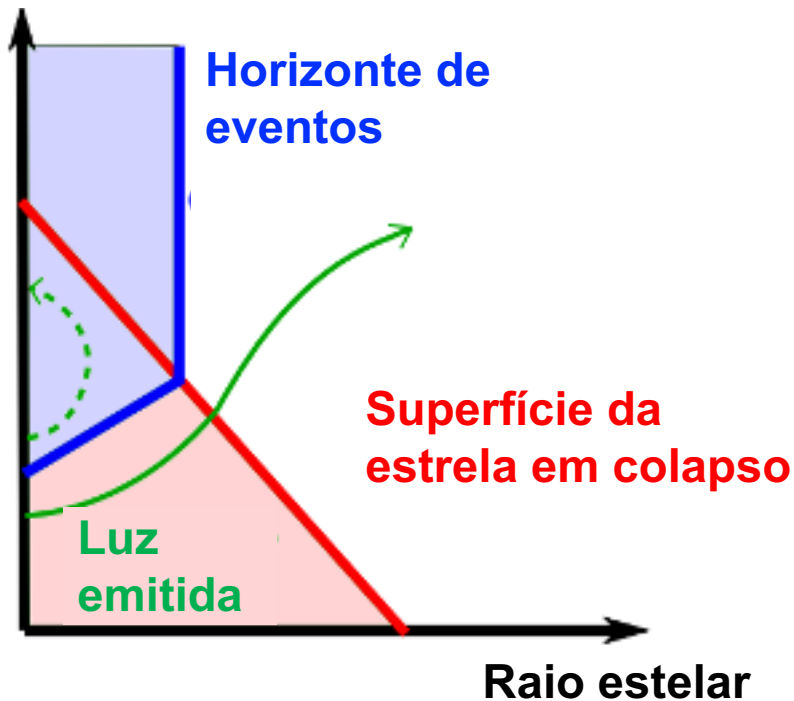
Na ausência de combustível nuclear, a gravidade causa o colapso da estrela, o que leva a uma compressão muito forte da matéria da estrela. A mecânica quântica revela então **uma nova forma de pressão, conhecida como degenerescência**, que aumenta à medida que a compressão aumenta. Aparece assim um novo adversário para enfrentar a gravidade, depois que a pressão térmica não é mais suficiente para suportar a estrela. Entretanto, se a estrela for suficientemente maciça, a gravidade por fim vence, e o colapso continua até que um buraco negro seja formado.

## Fim da vida de uma estrela maciça

Quando todo o combustível for consumido no núcleo da estrela, acaba o equilíbrio pressão-gravidade. A gravidade vence quando a pressão térmica não suporta o peso da estrela. A estrela colapsa sobre si mesma.

Se a estrela tiver mais de cerca de 10 massas solares, ela colapsa até que uma forma exótica de pressão chamada “degeneração de nêutrons” apareça e lute contra o colapso. Por fim, a estrela explode como uma supernova, mandando para longe suas camadas externas. Se o núcleo estelar restante tiver cerca de duas massas solares, o núcleo continuará como uma estrela de nêutrons. Mas, se o núcleo tiver uma massa maior, nem mesmo a degeneração de nêutrons terá pressão suficiente para contrabalançar a gravidade, e a estrela entrará em colapso em um buraco negro.

Hora



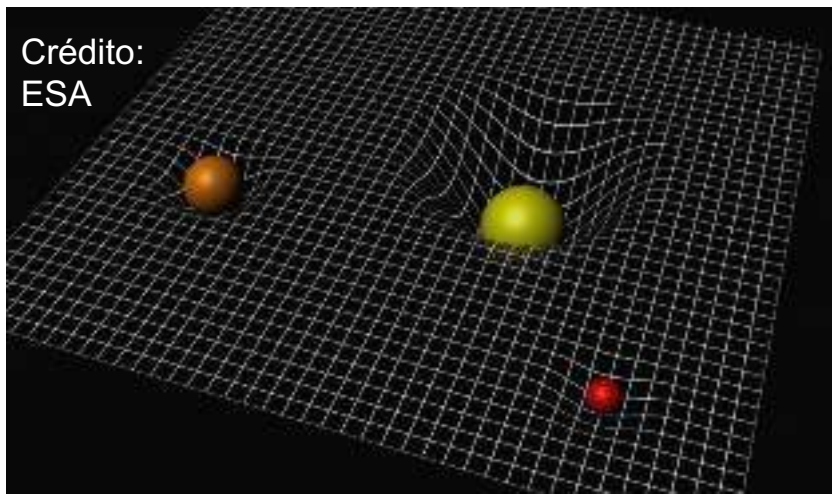
Raio estelar

## Formação de um buraco negro

Imagine um fóton (uma partícula de luz) emitido do centro da estrela em colapso. Inicialmente, este fóton pode escapar da estrela.

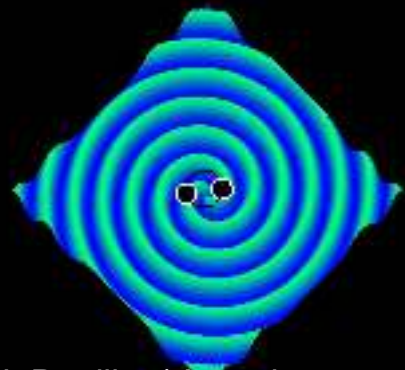
No entanto, em uma fase mais avançada do colapso da estrela, embora o fóton comece a se afastar, logo será forçado a voltar para o centro da estrela. Por quê? Porque nasce uma nova estrutura de espaço-tempo, chamada de horizonte de eventos. Isso sinaliza a criação do buraco negro. A luz emitida dentro do horizonte de eventos está sujeita a uma gravidade tão extrema que fica presa dentro do horizonte. Um buraco negro é “negro” no sentido de que a luz não pode escapar dele.

Crédito:  
ESA



A presença de objetos maciços distorce o espaço-tempo em suas proximidades. Se estes objetos ficarem estáticos, esta deformação não evoluirá.

Se esses objetos são buracos negros girando uns em torno dos outros, a deformação se propaga como ondulações na superfície de um lago no qual uma pedra foi jogada, mas viajando



N. Douillet / Artemis

à velocidade da luz: essas são as ondas gravitacionais. A figura acima mostra a emissão destas ondas por um par de buracos negros girando ao redor um do outro.

8

## Ondas gravitacionais

Podem existir pares de buracos negros: os dois membros do par então orbitarão um ao redor do outro e emitirão ondas gravitacionais.

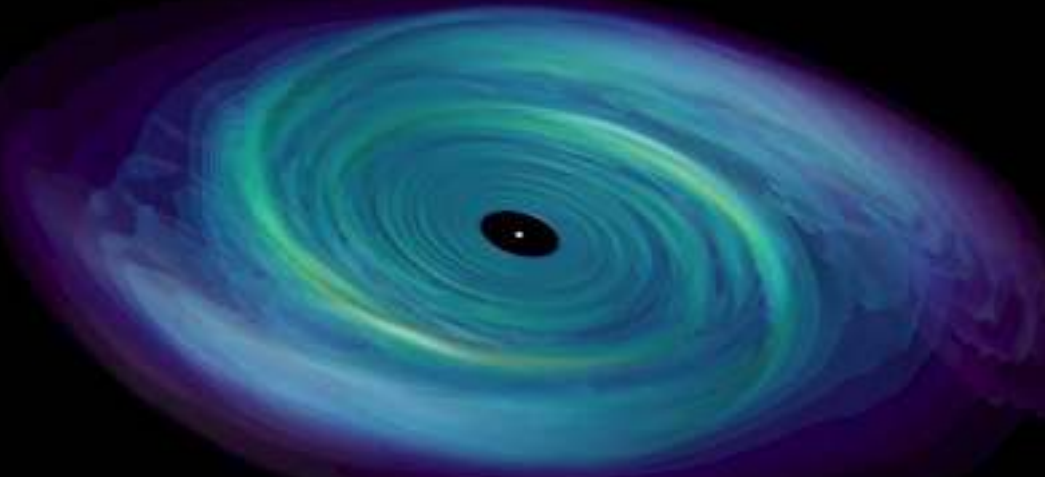
Imagine uma camada de geleia com uma uva no topo: a uva deformará levemente a superfície da geleia. Outra uva colocada ao lado adiciona sua própria deformação. Se você girar as uvas uma ao redor da outra, as linhas de deformação se espalharão através da geleia.

Da mesma forma, ondas gravitacionais são ondulações de deformação no espaço-tempo causadas pelo movimento de buracos negros.

Tais ondulações foram detectadas na Terra pela primeira vez em 2016. Elas são valiosas para determinar as propriedades dos buracos negros. O Prêmio Nobel de Física de 2017 foi concedido por esta detecção.

9

NASA (M. Owen, J. Blondin - resultado de simulação)



Disco de acreção: a matéria gira em torno de um buraco negro, que emite luz.

ESO / L. Calçada

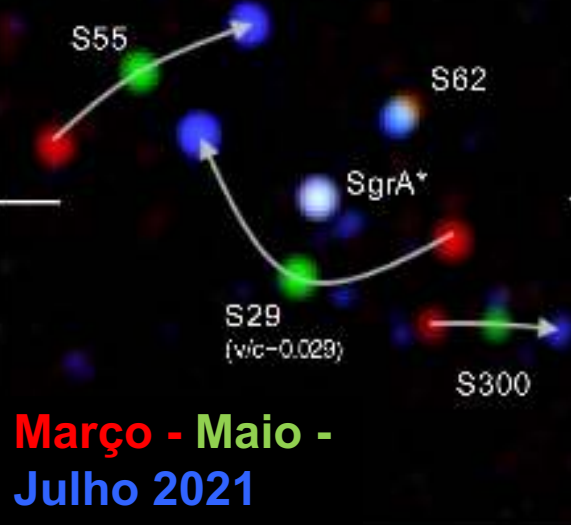


Uma visão artística da órbita de uma estrela em torno de um buraco negro. A mudança gradual da órbita é causada pela gravidade muito forte do buraco negro.

## Buracos negros e matéria circundante

Embora um buraco negro seja negro, o mesmo não pode ser dito em relação à matéria que o cerca. Um buraco negro não é um grande aspirador de pó cósmico: a matéria orbitará o buraco negro e criará um disco de acreção. Estes discos emitem uma imensa radiação em todos os comprimentos de onda, o que marca a presença do buraco negro. Além disso, estrelas podem orbitar um buraco negro, e suas trajetórias também mostrarão a presença do objeto compacto. Como as ondas gravitacionais, a luz emitida nas proximidades de um buraco negro e as órbitas das estrelas próximas também são ferramentas úteis para o estudo das propriedades do buraco negro.

Colaboração GRAVITY  
2021



Movimento de 4 estrelas nas proximidades do buraco negro supermassivo SgrA\* no centro da Via Láctea. O ponto branco central corresponde à radiação

do disco de acreção ao redor de SgrA\*.

Colaboração EHT  
2019



Imagem da área mais central do disco de acreção ao redor do buraco negro supermassivo no centro da galáxia M87.

## Buracos negros supermassivos

Além dos buracos negros criados pelo colapso de estrelas maciças, existem buracos negros “supermassivos” nos centros das galáxias.

O Prêmio Nobel 2020 foi concedido pelo estudo das órbitas das estrelas que ocupam a região mais central de nossa Via Láctea, revelando a existência de uma massa 4 milhões de vezes a massa do Sol, concentrada em uma região não maior do que nosso Sistema Solar. Outras observações da galáxia Messier 87 em 2019 forneceram a primeira imagem da vizinhança imediata de outro buraco negro supermassivo, trazendo um forte respaldo à existência desses objetos extremamente maciços.

# Desafio



Qual destas  
imagens é  
resultado de uma  
observação?



Resposta no verso

Simulação de um  
disco de acreção  
ao redor de um  
buraco negro (Owen  
& Blondin, 2005).

Simulação com a Via  
Láctea ao fundo e  
um buraco negro  
em primeiro plano  
(Riazuelo 2009).

Simulação de um  
disco de acreção  
ao redor de um  
buraco negro no  
centro da galáxia  
M87 (Vincent et al.  
2019).

Imagem observada  
do disco de acreção  
no centro da galáxia  
M87  
(Colaboração EHT 2019).

# Resposta

Simulação de um  
disco de acreção ao  
redor de um buraco  
de minhoca no  
centro da Via  
Láctea (Lamy et al.  
2018).



# O Universo no meu bolso Nº 17

Este livrinho foi escrito em 2021 por Frédéric Vincent do Observatório de Paris (França) e revisado por Eric Gourgoulhon, também do Observatório de Paris, e Stan Kurtz (UNAM, México).

Imagem da capa: simulação por Alain Riazuelo (Instituto de Astrofísica de Paris) com a Via Láctea no fundo e um buraco negro em primeiro plano.



Para saber mais sobre esta coleção e os tópicos apresentados neste livrinho, você pode visitar <http://www.tuimp.org>.

Tradução: Natalia Vale Asari  
TUIMP Creative Commons

