

## Mergulhando em um buraco negro de Kerr Ator: Matheus

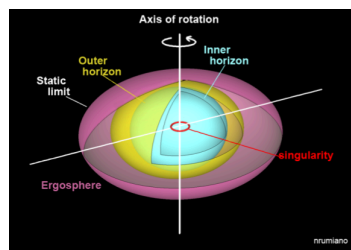
Resumo: Um buraco negro de Kerr é um dos quatro tipos de buracos negros que podem existir na teoria da relatividade geral. Em poucas palavras um buraco negro de Kerr nada mais é que um buraco negro com rotação (momento angular).

Além do buraco negro de Kerr, existem outros três tipos de buracos negros:

- Buraco negro de Schwarzschild, que seria um buraco negro estático.
  - Buraco negro de Reissner-Nordström, que possui carga elétrica e carece de momento angular.
  - Buraco negro de Kerr-Newman, que possui carga elétrica e momento angular.
- Os dois últimos tipos de buraco negro são teoricamente impossíveis de se formarem naturalmente. Já os buracos negros de Kerr são os mais abundantemente no universo, pois quando uma estrela massiva entra em colapso gravitacional, o seu momento angular é conservado, dando origem a um buraco negro rotativo.

Nesse artigo focarei especificamente nesse tipo de buraco negro e em como a sua rotação afeta a sua singularidade e deforma o espaço-tempo, tornando teoricamente possível coisas como usinas de buracos negros, viagens interestelares mais rápidas e até mesmo o uso de buracos negros como máquinas do tempo.

Um buraco negro em rotação pode ser dividido em: Ergosfera, horizonte de eventos externo, horizonte de eventos interno e a singularidade em formato de anel.



### Ergosfera

A ergosfera pode ser descrita como uma zona onde a rotação do buraco negro (ou de qualquer outro corpo que seja denso ao ponto de deformar o espaço-tempo) deforma e arrasta o próprio espaço-tempo ao seu redor, fazendo com que ele rotacione junto com o buraco negro. Devido à isso, a ergosfera também pode ser considerada como o limite estático, e qualquer coisa que ultrapasse esse limite é arrastado e forçado a rotacionar junto com o buraco negro em velocidades próximas à da luz. Esse fenômeno recebe o nome de "efeito Lense-Thirring", também conhecido como "arrasto de quadro", pois os quadros de referência não são estacionários em relação ao resto do universo. Entretanto, ainda é possível escapar da ergosfera. Tendo isso em mente, se um corpo em movimento entrar na ergosfera, ele pode se aproveitar da rotação para aumentar a própria energia cinética e

assim sair da ergosfera com uma velocidade absurdamente alta. Em outras palavras, se uma nave entrar na ergosfera, essa nave vai ser acelerada e ganhar energia suficiente para fugir da ergosfera, ganhando muita energia cinética no processo. Porém essa energia não é ilimitada, pois o buraco negro estaria sacrificando seu momento angular durante esse processo. Com o tempo, o buraco negro perderia todo o seu momento angular (rotação) e se transformaria em um buraco negro estático. Dessa forma, é possível extrair energia de um buraco negro até que o mesmo perca toda a sua energia. Essa ideia foi proposta pelo matemático Roger Penrose em 1969, e recebeu o nome de processo Penrose. Em 2020, Penrose foi laureado com o prêmio Nobel de física "pela descoberta de que a formação de buracos negros é uma previsão robusta da teoria geral da relatividade".

Devido ao efeito Lense-Thirring, buracos negros em rotação talvez possam ser considerados como verdadeiras máquinas do tempo naturais. Isso é algo extremamente complexo de se explicar sem o uso de termos mais técnicos, então cabe a mim resumir isso de uma forma rasa mas que todos entendam. Como dito antes, a ergosfera é uma zona onde o espaço-tempo rotaciona ao redor do buraco negro, logo o próprio tempo estaria rotacionando nessa região. Caso alguém queira saber como isso funciona detalhadamente, irei deixar um trecho da Wikipedia que resume bem esse fenômeno.

"Dentro da ergosfera não existe o repouso. É impossível que um corpo não se mova, pois o próprio espaço gira em torno da singularidade, pelo que a matéria que se encontra nessa região girará junto a ela. Para o observador externo à ergosfera, o corpo viajará a sua velocidade própria somada à da rotação do espaço. Este fato segundo a teoria da relatividade implica curiosas consequências. A observação de um corpo que viajara suficientemente rápido sobre a ergosfera poderia dar uma velocidade relativa com respeito a nós superior inclusive à velocidade da luz  $c$ . Nesse caso, tal objeto simplesmente desapareceria de nossa vista. Chegaria a seu destino antes de que houvesse, o que em termos físicos significa que haveria viajado ao passado. Por essa surpreendente ideia as ergosferas se concebem, pelos físicos teóricos, como verdadeiras máquinas do tempo naturais. Máquinas onde, em qualquer caso, não se pode viajar mais além do momento em que se formou o buraco negro em questão."

Esse assunto é mais complexo do que aparenta. Para entender completamente esse método de viagem no tempo, seria necessário um estudo mais aprofundado em relatividade geral, métrica de Kerr, curva fechada de tipo tempo, métrica de Gödel e outras coisas que eu ainda não sou capaz de entender completamente. Caso tenham interesse nisso, eu posso criar outro artigo focando apenas em viagem no tempo.

### Horizonte de eventos interno e externo

Também conhecido como ponto de não-retorno, o horizonte de eventos é o que separa o universo do interior de um buraco negro. Qualquer coisa que cruze essa fronteira não poderá mais escapar do buraco negro, nem mesmo a luz. Não se sabe ao certo o que acontece quando um corpo atravessa o horizonte de eventos, pois, devido ao fato da luz ou qualquer outra radiação eletromagnética não conseguir sair dele e chegar aos nossos olhos, é impossível que possamos ver o que ocorre dentro de um buraco negro. Do nosso ponto de vista, qualquer coisa que entra dentro de um buraco negro deixa de existir. A única certeza que temos é a existência de uma singularidade em seu interior, fora isso, tudo que

temos são especulações baseadas em resoluções das equações da relatividade geral. Uma dessas resoluções é a métrica de Kerr, cujo objetivo é descrever o espaço-tempo ao redor de um corpo massivo em rotação. Com base nessas equações chegou-se à conclusão de que um buraco negro rotativo possui dois horizontes de eventos: Horizonte externo e horizonte interno, também nomeado como horizonte de Cauchy.

**Horizonte externo:** Trata-se do horizonte de eventos que qualquer buraco negro possui. Como dito anteriormente, nada pode escapar dessa região, pois a gravidade torna-se tão grande ao ponto da velocidade de escape (velocidade necessária para escapar de um campo gravitacional) em sua superfície ser maior que a velocidade da luz, e de acordo com Einstein, nada pode ir mais rápido que a luz.

Vamos fazer um experimento mental. Imaginem que existam dois astronautas próximos a um buraco negro giratório e supermassivo com  $10^5$  massas solares. Iremos ignorar a presença de um disco de acreção e da ergosfera ao redor do buraco negro. Um dos astronautas está distante o suficiente para não sofrer o efeito da atração gravitacional do buraco negro, enquanto o outro está se aproximando do horizonte de eventos. Na perspectiva do astronauta que está próximo do horizonte de eventos, o tempo iria começar a desacelerar. Quanto mais ele se aproxima, mais devagar o tempo passa. Caso ele olhe para trás, seria possível ver toda a informação (luz) que caiu dentro do buraco negro. Ele poderia observar todo o início e evolução do universo, toda matéria que atravessou o horizonte de eventos e também poderia ver a si mesmo no passado. O astronauta continuaria preso nesse processo de desaceleração temporal até ser finalmente engolido pelo buraco negro. O astronauta que está em uma distância segura apenas veria o seu amigo se aproximando lentamente do horizonte de eventos, até ficar completamente parado e então desaparecer. Essa desaceleração do tempo é chamada de dilatação temporal, e ocorre pois qualquer corpo com massa é capaz de deformar o espaço-tempo ao seu redor. Essa deformação é a própria gravidade. Quanto maior a massa do corpo, maior vai ser a gravidade e o efeito de dilatação temporal. Portanto, é correto afirmar que se pegarmos dois relógios e levarmos um deles para Jupiter, para depois trazê-lo de volta à terra, esse relógio estaria atrasado em relação ao relógio que ficou na terra, pois a gravidade em Jupiter é maior, logo o tempo passaria mais devagar em relação à terra. Isso é um exemplo simples de como a dilatação do tempo funciona.

Esse experimento mental é apenas umas das evidências que as leis da física se comportam de maneira "estranha" quando tentamos aplicá-las em buracos negros. Talvez isso seja um sinal que as nossas teorias estão incompletas e precisamos revê-las, ou pode ser que nossas teorias estejam completamente corretas, porém é necessário uma nova teoria que seja capaz de descrever buracos negros sem ter absurdos matemáticos como resultado. Talvez nenhuma das hipóteses anteriores estejam corretas, e os absurdos matemáticos realmente descrevem bem o que acontece após um corpo se aproximar do horizonte de eventos. De qualquer forma, isso é algo que apenas o tempo pode responder.

**Horizonte de Cauchy:** Esse horizonte está presente apenas em buracos negros giratórios ou eletricamente carregados. Para facilitar o entendimento, iremos retornar à analogia do astronauta.

Após atravessar o primeiro horizonte de eventos, o espaço iria trocar de lugar com o tempo, e o astronauta estaria de frente para o horizonte de Cauchy. Em termos técnicos "Um

horizonte de Cauchy é uma condição tal como a luz (espaço de Minkowski) do domínio de validade de uma problema de Cauchy (uma condição de fronteira particular da teoria das equações diferenciais parciais). Um lado do horizonte contém geodésica espacial fechada e o outro contém geodésica temporal fechada."

Ao atravessar esse horizonte, o tempo e espaço trocariam de lugar novamente, e o astronauta estaria observando a singularidade anelar, que por sua vez é temporal, portanto pode ser facilmente evitada, pois dentro do horizonte de Cauchy o espaço e tempo assumem os seus papéis normais. Caso o astronauta olhe para o eixo polar da singularidade anelar, ele estaria recebendo a luz que vem do nosso universo, a luz da própria singularidade e a luz de um "universo negativo", coisa que eu ainda irei abordar nesse artigo.

Dentro do horizonte de Cauchy, o astronauta iria ter o seu passado completamente "apagado". Em poucas palavras, o determinismo(ideia de que o passado dita o futuro, se você tem todas as informações sobre um objeto e a força que age nele você consegue prever o que acontecerá com esse objeto) pararia de funcionar. O passado deixaria de ter efeito sobre o futuro, permitindo que o astronauta tivesse um número infinito de futuros possíveis. Além disso, o astronauta iria entrar em contato com toda a energia que o buraco negro absorveu ao longo da vida do universo. Isso é mais uma consequência bizarra de quando aplicamos matemática em buracos negros.

Quanto mais rápido o buraco negro rotaciona, mais próximos estão os dois horizontes. Quando os dois horizontes se colapsam, ambos se anulam, deixando a singularidade "nua". Em outras palavras, seria possível enxegar a singularidade. Entretanto, isso viola a hipótese da censura cósmica, proposta por Roger Penrose em 1969.

A hipótese da censura cósmica conjectura que singularidades nuas não podem existir. A singularidade está isolada de nosso universo. Se estiver nua, essa área, que quebra as regras físicas usuais, está livre para interagir com todo o universo, permitindo que curvas fechadas tipo tempo existam fora do horizonte de eventos. Caso isso ocorra, um observador orbitando uma singularidade poderia viajar no tempo.

Após passar por tudo isso, o astronauta finalmente chega no núcleo do buraco negro: a singularidade toroidal.

### Singularidade anelar

A singularidade é o "coração" de todo buraco negro. Quando o hidrogênio de uma estrela massiva acaba, ela perde o seu combustível e não consegue mais gerar energia pela fusão nuclear do hidrogênio. Essa energia era o que mantinha a estrela funcionando, além de gerar a força necessária para evitar que a gravidade esmagasse a estrela. Sem essa energia, a gravidade faz com que a estrela entre em colapso com seu próprio núcleo, juntando toda a massa da estrela em um volume infinitamente pequeno, dando origem a um corpo com densidade infinita: uma singularidade. Sendo assim, um buraco negro nada mais é que um "fantasma" de uma estrela que perdeu a luta contra a gravidade. Entretanto, qualquer objeto com massa pode se tornar um buraco negro, basta reduzir o seu volume até a densidade do corpo se tornar infinita e a velocidade de escape em sua superfície ser maior do que a velocidade da luz. Caso queira calcular o quanto um corpo precisa diminuir de tamanho para se tornar uma singularidade, basta aplicar o raio de Schwarzschild, que é dado por:  $r = 2Gm/c^2$

Onde " $r$ " representa o raio que o objeto deve ocupar, " $G$ " representa a constante gravitacional universal, " $m$ " representa a massa do corpo e " $c^2$ " é a velocidade da luz ao quadrado.

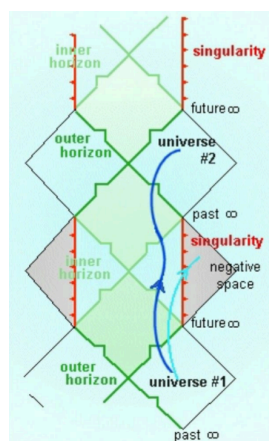
Não se sabe ao certo como são os átomos de uma singularidade, até porque não temos nem certeza se singularidades possuem átomos, então tudo que nos resta é especular. Se uma singularidade possui matéria ou alguma composição química, ela seria diferente de tudo que já vimos, pois a pressão seria mais forte o suficiente para romper a barreira eletromagnética que impede os átomos de se encostarem. Isso iria quebrar todos os átomos e transformar a singularidade em uma sopa de partículas comprimidas tentando se afastar uma das outras, portanto a singularidade seria formada apenas por quarks e elétrons. Ou talvez a singularidade seja feita inteiramente de matéria estranha (um tipo de matéria hipotética composta inteiramente por quarks). Quem sabe a pressão seja grande ao ponto de destruir até os quarks e formar algo composto por outros tipos de partículas mais fundamentais, ou então algo composto inteiramente de energia. Entretanto, isso é puramente teórico. Não encontrei nenhuma hipótese que descrevesse a matéria de uma singularidade, então formulei a minha própria hipótese.

Em buracos negros estacionários, a singularidade é um ponto no espaço-tempo onde toda a matéria do buraco negro está concentrada. Porém, o cenário é diferente quando aplicamos rotação à esse buraco negro, pois ela faz com que a singularidade assuma um formato de anel ou, em outras palavras, um toroide. Além disso, de acordo com as equações de Kerr, a singularidade é temporal e pode ser evitada.

Retornando à analogia do astronauta. Depois ele cruzar o horizonte de Cauchy, o espaço e o tempo voltariam aos seus devidos lugares. Como a singularidade é temporal, ela seria repulsiva para o astronauta, que estaria em um plano espacial. Portanto, exceto se ele se aproximar equador da singularidade, é possível ignorar completamente a singularidade.

Ao se aproximar do centro do buraco negro, o astronauta iria se deparar com curvas fechadas tipo tempo (retornando ao próprio passado) ao redor da singularidade. Em poucas palavras, caso ele contorne a singularidade, o astronauta entraria em um "caminho" no espaço-tempo que se conecta com si mesmo. Uma consequência disso pode ser a viagem temporal para o passado.

Caso ele deseje observar através singularidade, o astronauta poderia vislumbrar o nosso próprio universo, um "universo negativo" e a própria singularidade. Não existe um significado para o que é um "universo negativo", ou "espaço negativo". A única coisa que sabemos é, caso o astronauta cruze a singularidade, ele poderia chegar nesse "espaço negativo" ou em outra região do nosso próprio universo. Isso ocorre porque, teoricamente, singularidades temporais estão diretamente conectadas. Essa passagem pela singularidade é muito bem representada no diagrama de Penrose, que descreve o interior de um buraco negro de Kerr.



Após cruzar a singularidade, a jornada do astronauta chega ao fim, assim como este artigo.

### Considerações finais

A maior parte das coisas ditas aqui são puramente teóricas. O buraco negro precisaria estar em um ambiente controlado e completamente isolado, pois a solução de Kerr é bastante instável e, assim como o horizonte de Cauchy, pode ser desestabilizada com a adição de matéria no buraco negro. Se quisermos uma teoria mais completa, seria necessário mensurar os efeitos quânticos que iriam ocorrer ao inserir matéria (ou até mesmo um observador) em um buraco negro rotativo, e pra isso precisaríamos de uma teoria que unificasse física quântica com relatividade (uma teoria da gravitação quântica). Até a própria singularidade é incerta, pois ela só ocorre devido à resultados matemáticos absurdos quando tentamos calcular objetos massivos comprimidos em um espaço que tende ao infinito. Como dito anteriormente, eu não encontrei nada que explicasse a composição química de uma singularidade, portanto tudo dito naquela parte do artigo foi mera suposição baseada em como a matéria se comporta em ambientes de extrema pressão.

Obviamente nenhum astronauta iria sobreviver a um mergulho em um buraco negro, mesmo se ele for rotativo e possuir uma singularidade temporal. E por último, viagens no tempo são bastante improváveis e violam princípios da causalidade. Entretanto, isso não quer dizer que tudo dito aqui não passa de suposições sem fundamentos.

Obs: Nenhum astronauta foi morto, ferido ou jogado em um buraco negro de kerr durante a produção desse artigo. Quaisquer acusações serão consideradas como atos de inverdades e estão sujeitas à processo jurídico.

### Nota do autor

"Esse artigo foi feito com o intuito de compartilhar os sentimentos que eu senti quando fui pesquisar sobre esse tema, além de explicar conceitos físicos de forma simplificada na medida do possível, até porque teve partes em que uma explicação simplificada ficaria extremamente rasa. Caso queiram, eu posso fazer um artigo dedicado apenas à viagens no tempo(que são mais possíveis do que você imagina) e outros assuntos que eu não consegui esclarecer completamente nesse artigo. Como o intuito é facilitar um tema difícil, resolvi tirar a parte matemática. Porém ela ainda pode ser encontrada facilmente nas fontes que eu vou deixar no final do artigo, para caso alguém se interesse pelo tema e comece a

pesquisar por conta própria. O tema é bem denso, então boa sorte pra quem for se aventurar no mundo da astrofísica. Eu aconselho que você comece pelos artigos da Wikipedia e siga as fontes deixadas nos mesmos.

fvck moderação  
My final message. Goodby"

#### Fontes

[http://nrumiano.free.fr/Estars/int\\_bh2.html#naked](http://nrumiano.free.fr/Estars/int_bh2.html#naked)

[https://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/Kerr\\_black\\_hole.html](https://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/Kerr_black_hole.html)

<https://www.forumnsanimes.com/t32649-buraco-negro-de-kerr>

[https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Buraco\\_negro](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Buraco_negro)

<https://phys.org/news/2019-01-rotating-black-holes-gentle-portals.html>

[https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Buraco\\_negro\\_em\\_rota%C3%A7%C3%A3o](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Buraco_negro_em_rota%C3%A7%C3%A3o)

<https://news.berkeley.edu/2018/02/20/some-black-holes-erase-your-past/>

[https://pt.m.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9trica\\_de\\_Kerr](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9trica_de_Kerr)

[https://pt.m.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9trica\\_de\\_Kerr](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9trica_de_Kerr)

[https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Hip%C3%B3tese\\_da\\_censura\\_c%C3%B3smica#:~:text=As%20hip%C3%B3teses%20da%20censura%20c%C3%B3smica%20conjectura%20que%20n%C3%A3o%20existem%20singularidades,por%20Roger%20Penrose%20em%201969.](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Hip%C3%B3tese_da_censura_c%C3%B3smica#:~:text=As%20hip%C3%B3teses%20da%20censura%20c%C3%B3smica%20conjectura%20que%20n%C3%A3o%20existem%20singularidades,por%20Roger%20Penrose%20em%201969.)

[https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Curva\\_fechada\\_de\\_tipo\\_tempo#:~:text=Em%20f%C3%ADsica%20matem%C3%A1tica%2C%20uma%20curva,ao%20seu%20ponto%20de%20partida.](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Curva_fechada_de_tipo_tempo#:~:text=Em%20f%C3%ADsica%20matem%C3%A1tica%2C%20uma%20curva,ao%20seu%20ponto%20de%20partida.)

[https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Singularidade\\_gravitacional](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Singularidade_gravitacional)

[https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Raio\\_de\\_Schwarzschild](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Raio_de_Schwarzschild)