

O Horizonte de Eventos

David Hilditch¹

¹ CENTRA, Departamento de Física, Instituto Superior Técnico – IST, Universidade de Lisboa – UL, Avenida Rovisco Pais 1, 1049 Lisboa

1 - Introdução

Em contraste com muitos dos termos formais usados na física, o “*horizonte de eventos*” é abençoado com um nome que dá um sentido útil ao seu significado na linguagem comum (isto, é não-científica). Alguns dicionários *online*, por exemplo, oferecem as definições:

- Evento; algo que acontece. [Merriam-Webster] [1].
- Horizonte; o limite ou alcance da percepção ou conhecimento (ou noções semelhantes) [Dictionary.com] [2].

A partir destes conceitos familiares, e aplicando apenas um toque de raciocínio motivado, podemos sugerir um esboço de definição para o horizonte de eventos do seguinte tipo:

- Horizonte de eventos; a fronteira daquilo que é sempre perceptível.

Como veremos, esta definição é na verdade uma boa primeira tentativa. Contudo, precisamos de entender este conceito num sentido específico (não espiritual!). O primeiro objetivo deste breve texto é desvendar estas ideias.

Nos últimos anos, tem havido muito entusiasmo em torno dos resultados do “*Telescópio Horizonte de Eventos*” [3]. Esta colaboração científica produziu imagens surpreendentes da região próxima do centro de duas galáxias, sendo uma a nossa própria Via Láctea. O segundo objetivo deste texto é explicar as ideias (muito) básicas desta conquista.

Para manter estes objetivos um desafio para mim e, espero, agradável para si, leitor, tentarei gerir estes dois objetivos sem usar nenhuma equação.

2 - Estrutura Causal na Relatividade Restrita

Mantendo o nosso esboço de definição em mente (dada em cima), começaremos por conceber noções idealizadas de simultaneidade e percepção.

Começemos por imaginar uma arena, chamada espaço-tempo, que consiste no espaço e no tempo unidos de alguma forma. De acordo com a de-

finição da linguagem comum acima, os pontos nesta arena representam coisas que acontecem. Eles são chamados de “eventos”. Na nossa vida cotidiana, atribuímos nomes aos eventos. Por exemplo, podemos marcar um encontro com amigos num restaurante às 20:00. Os físicos chamam a estes nomes de “coordenadas”. Mas os nomes que escolhemos para dar a eventos específicos não são importantes. O que importa são as possíveis relações que existem entre eles. Estas relações permitem-nos imaginar o espaço-tempo não apenas como uma confusão aleatória de pontos, mas ocorrendo com uma estrutura que podemos tentar entender. Então, quais são as regras físicas desta estrutura do espaço-tempo que nos permitem entender os seus mistérios?

Imaginamos a seguir que alguém existe no espaço-tempo. Este alguém é altamente idealizado, existindo apenas como uma abstração chamada, no jargão da física, de “observador”. No nosso pequeno modelo, os observadores e os seus poderes de comunicação são necessários para satisfazer uma série de regras invioláveis, que por sua vez determinam a estrutura do espaço-tempo mencionada acima. Apresentaremos essas regras à medida que forem necessárias. A primeira regra é que os observadores devem se mover exclusivamente para o futuro e, em cada instante temporal (ou seja, em cada ponto no tempo), eles habitam um único ponto no espaço. Assim, um observador é uma coleção de eventos no espaço-tempo que podem ser encadeados ao longo de uma curva, chamada de “linha de mundo do observador”.

A relatividade restrita de Einstein (de 1905) consiste em duas ideias centrais. Ele diz que, além da escolha sem importância de unidades, dois observadores que se movem um em relação ao outro, medem, ainda assim, o mesmo valor para a velocidade da luz, e que este valor serve como um limite de velocidade universal para todos os observadores (e de facto para todos os sinais). Podemos distinguir entre um observador genérico e um observador “inercial”. Os observadores inerciais são apenas observadores em queda livre, o que significa que nenhuma força actua sobre eles. Em relatividade restrita, os observadores inerciais são especiais porque existe um procedimento que pode ser usado para desenhar coordenadas nas quais a velocidade da luz, o limite de velo-

cidade universal, assume o mesmo valor constante em todos os eventos. Essas coordenadas especiais são chamadas de “coordenadas inerciais globais”.

Acrescentar estas regras simples ao nosso modelo mental tem consequências profundas na estrutura do espaço-tempo.

Voltando ao nosso modelo, suponha que dois observadores estão a comunicar por meio da troca de mensagens que viajam com uma velocidade finita (que no máximo será dada pela velocidade da luz na relatividade restrita). Se tomarmos ‘receber uma mensagem’ como uma aproximação para o conceito de ‘percepção’, usado na nossa definição de linguagem comum acima, chegamos à ideia de cones nulos de um evento. Estes são conjuntos de eventos conectados ao primeiro por um caminho viajando a esta velocidade máxima. Para o futuro, um observador pode afetar qualquer evento que se encontre no, ou dentro, do seu cone nulo futuro. De forma análoga, os observadores no passado podem ser afetados por qualquer evento no, ou dentro, do seu cone nulo passado. Na Fig. 1, fiz um esboço destes conceitos.

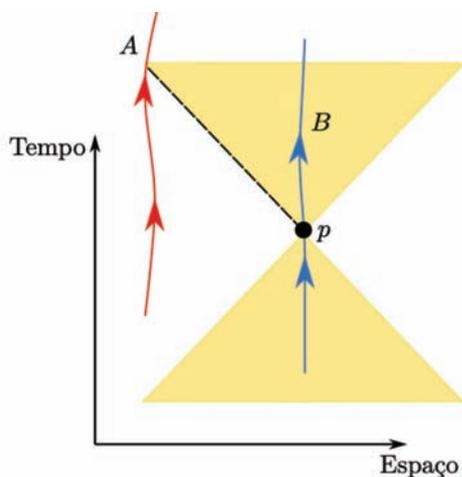


Figura 1 - Um esboço da estrutura do espaço-tempo na relatividade restrita. “Espaço” vai horizontalmente com o tempo aumentando verticalmente. A linha de mundo de dois observadores, A e B, é denotada. Os cones de luz futuro e passado do evento (ponto do espaço-tempo) p também são denotados. Em p, o observador B envia uma mensagem, denotada pela linha tracejada preta, ao observador A. Esta mensagem viaja à velocidade da luz; nenhuma mensagem poderia viajar mais rápido.

Recordo que o nosso esboço de definição do “horizonte de eventos” foi como sendo a fronteira daquilo que é sempre perceptível. Na explicação dada em cima, parece que uma mensagem de um observador acabará eventualmente por chegar sempre ao seu parceiro. Se fosse esse o caso, não importa a distância a que os nossos dois observadores estejam; eles podem comunicar um com o outro se forem suficientemente pacientes. Se isto estiver certo, então nada está fora do reino da percepção e, portanto, nenhum horizonte de eventos existe. Estará este raciocínio incorreto? De que estrutura adicional, se houver alguma, precisamos nas nossas noções de espaço-tempo?

3 - Curvatura do espaço-tempo

Na descrição acima, parti do pressuposto de que a velocidade máxima universal, vista por observadores inerciais, assumia o mesmo valor em qualquer lugar no espaço-tempo. Isso foi possível pelo uso de coordenadas muito especiais, as coordenadas inerciais globais. Mas acontece que tais

coordenadas só podem ser construídas se o espaço-tempo for, num sentido matemático específico, plano. Já que não quero ficar atolado em detalhes técnicos, direi apenas que a descoberta central da teoria da gravidade de Einstein, a teoria da relatividade geral de 1915, é que o espaço-tempo não é plano, mas sim curvo de uma maneira que pode ser descrita usando a geometria riemanniana conforme concebida na década de 1850. Na relatividade geral, a gravidade é a curvatura.

Voltando ao nosso modelo, queremos então relaxar a suposição de que observadores inerciais podem ser usados para construir coordenadas inerciais globais. Consequentemente, vamos imaginar que podemos desenhar coordenadas “inerciais locais” centradas na linha de mundo de um observador inercial pelo mesmo procedimento que usamos antes. Ao longo dessa linha do mundo, ainda é verdade que usando estas coordenadas para medir o limite de velocidade universal obteremos o valor que tínhamos antes. Mas, crucialmente, ao afastarmos-nos da linha do mundo do nosso observador, o valor medido do limite de velocidade pode mudar.

Como não havia nada de especial na linha do mundo que escolhemos, a mesma construção é possível para qualquer observador inercial. O que isso significa, portanto, é que o espaço-tempo localmente (muito perto de um observador) tem a mesma estrutura causal que vimos antes, com cones e assim por diante. Mas em grandes escalas, como o limite de velocidade universal pode mudar dependendo de para onde olhamos no espaço-tempo, surpresas podem acontecer!

4 - Buracos negros e o horizonte de eventos

Imagine-nos agora, dentro do nosso modelo mental de espaço curvo, como um observador e suponha que, à medida que nos afastamos da nossa linha de mundo, a velocidade que medimos para os sinais enviados na nossa direção diminui em magnitude. Obviamente, teríamos que esperar mais tempo do que no nosso modelo anterior para receber mensagens de um segundo observador. Na verdade, isso é exatamente o que a relatividade geral diz que deve acontecer para sinais que se propagam para fora de um campo gravitacional forte, conosco a desempenhar o papel de observadores à distância, e o segundo observador a desempenhar o papel de um observador dentro do campo gravitacional forte.

Isto não é mero sofisma como no paradoxo de Zenão, mas uma característica honesta do nosso modelo e, mais importante, uma previsão da relatividade geral que foi verificada experimentalmente na Terra já no início dos anos 1970, colocando relógios de alta precisão em voos longos e comparando, no final da viagem, os seus tempos com aqueles decorridos em relógios deixados em Terra.

Levando a ideia ao extremo, podemos conceber uma situação em que uma sequência de observa-

dores que se distanciam sucessivamente nos envia mensagens. Mensagens de observadores próximos chegam rapidamente, mas se a redução do limite de velocidade for grande o suficiente, estas mensagens enviadas para nós de dentro da região de campo forte nunca chegam! Curiosamente, não há necessidade de que essa desconexão ocorra em ambas as direções, e ainda podemos ser capazes de enviar mensagens ao nosso/a azarado/a amigo/a, estando ele/a incapaz de nos responder, não importa o quanto queira.

O conjunto de eventos do qual nenhum sinal pode emergir para nos alcançar, estando nós longe do campo forte, é chamado de região do buraco negro. Além do mais, agora vemos como realizar a nossa definição anterior de linguagem natural de horizonte de eventos no nosso modelo. O horizonte de eventos é simplesmente o limite da região do buraco negro e, na verdade, o limite daquilo que é sempre perceptível, pelo menos de fora. Isso é esboçado na Fig. 2. Nada de anormal precisa acontecer no próprio horizonte de eventos. Na verdade, um observador poderia navegar através dele do horizonte de eventos (de fora para dentro) sem ter ideia de que o tinha feito. Para dar uma descrição satisfatória da relatividade geral, é claro que precisaríamos de formalismo matemático, mas a definição central do horizonte de eventos é essencialmente conforme a discutida aqui, mesmo na teoria completa.

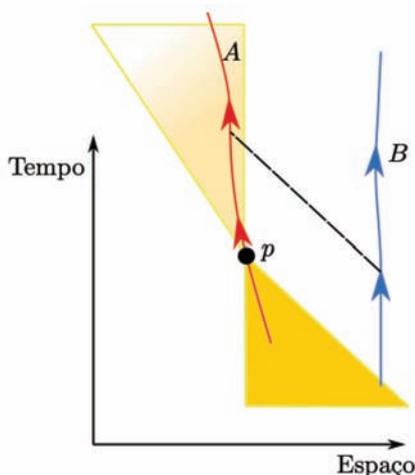


Figura 2 - Um esboço da estrutura do espaço-tempo num espaço-tempo de buraco negro. Como antes, vemos a linha de mundo de dois observadores, A e B, mas desta vez os cones de luz inclinam-se em direção a A, e a partir do evento p estão tão inclinados que A não pode mais responder à mensagem de B!

5 - Descrição matemática

É claro que a discussão acima, dada apenas em palavras, é necessariamente qualitativa. Para fornecer uma descrição quantitativa detalhada, é necessário um formalismo matemático pesado. Mas essa maquinaria está bem desenvolvida e tem sido usada para estabelecer fatos profundos sobre o desenvolvimento do horizonte de eventos. Por exemplo, foi estabelecido já na década de 1970, em trabalhos

famosos de Hawking [4,5], que se tomarmos dois cortes do horizonte de eventos em momentos diferentes, então a área do corte posterior deve ser maior ou igual à do corte anterior. Por outras palavras, na relatividade geral, os buracos negros só podem crescer! Apesar desse trabalho clássico, ainda há questões a serem respondidas - e pesquisas ativas estão em andamento. Na relatividade numérica, por exemplo (ver o artigo de Miguel Zilhão nesta edição para uma introdução) “localizadores de horizonte de eventos” são uma ferramenta importante [6,7], cuja tarefa é identificar a posição do horizonte de eventos dentro de espaços-tempos construídos computacionalmente. Uma vez tendo encontrado o horizonte de eventos este pode ser investigado, e até questões subtis, por exemplo relativas à sua suavidade, podem ser abordadas.

6 - Buracos negros na astrofísica

O objetivo fundamental da física é fornecer uma descrição precisa da realidade. Portanto, belas definições alucinantes como a do horizonte de eventos devem, no mínimo, ser compatíveis com as observações. Existem, de facto, inúmeras evidências independentes da existência de buracos negros, que agora são considerados um pilar da astrofísica.

Nos últimos anos, por exemplo, grandes avanços experimentais foram dados por:

- Detecção de ondas gravitacionais.
- Rastreamento do movimento das estrelas ao redor de Sagitário A*, o objeto supermassivo no centro da Via Láctea (amplamente considerado um buraco negro) - ver o artigo de P. Garcia e A. Amorim neste volume.
- O telescópio do horizonte de eventos - ver o artigo de P. Cunha neste volume.

O trabalho para a primeira e segunda evidência mencionadas foi premiada com os prémios Nobel de 2017 e 2020, respectivamente. Agora vou discutir brevemente apenas o último desses três, mas não resisto a mencionar que a deteção de ondas gravitacionais, pelos detectores LIGO / Virgo, finalmente tornou possível examinar experimentalmente [8] resultados aparentemente abstratos como o teorema da área de Hawking mencionado acima!

O telescópio do horizonte de eventos é operado por uma colaboração internacional de cientistas que coletam dados de vários observatórios de rádio distribuídos por todo o planeta. A combinação cuidadosa desses dados permite que a colaboração crie efetivamente um único detector virtual enorme. Esta estratégia é chamada de interferometria de linha de base muito longa. Consequentemente, a colaboração foi capaz de construir e apresentar, em 2019, a primeira imagem de observação direta de um buraco negro, nomeadamente o buraco negro supermassivo situado no centro da galáxia Messier 87. Adicionalmente, em março deste ano, a colaboração apresentou, a partir dos mesmos dados, uma análise mais detalhada que incorpora informações sobre a polarização da radiação. Dada a definição acima, claramente não é possível ‘tirar uma foto’ do horizonte de eventos em si. Em vez disso, o que estas agora famosas imagens realmente mostram é uma representação da luz emitida por gás perto do buraco negro. A colaboração realizou cálculos detalhados para construir uma imagem semelhante em

modelos teóricos, assumindo que a relatividade geral está correta, e descobriu que as observações são perfeitamente compatíveis com estas previsões. Uma introdução mais aprofundada ao trabalho do telescópio de horizonte de eventos, juntamente com uma reprodução das suas imagens espetaculares, pode ser encontrada neste número, no artigo de Pedro V.P. da Cunha.

7 - Resumo

Ao realizar um conjunto de experiências mentais, fomos capazes de arquitetar uma definição para o horizonte de eventos e um modelo no qual essa definição é realizada. Para o nosso pensamento foram cruciais as noções de estrutura causal local e global. Posteriormente, consideramos as evidências recentes de buracos negros na astrofísica.

O leitor interessado em ir mais longe descobrirá que há uma abundância de livros acessíveis sobre o assunto dos buracos negros, incluindo [9,10].

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. José Sande Lemos e ao Prof. Carlos Herdeiro pelo convite para escrever este artigo.

Agradeço ao Francisco Duque e ao Carlos Herdeiro pela sua ajuda na tradução do texto original, e ao Justin Feng por discussões interessantes. Este trabalho recebeu apoio da FCT (Portugal) IF Program IF/00577/201 and Project No. UIDB/00099/2020.



David Hilditch. Depois de completar o seu doutoramento na Universidade de Southampton no Reino Unido, David Hilditch passou alguns anos como investigador na Universidade de Jena Friedrich Schiller, na Alemanha. Depois, mudou-se para o Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, onde é agora Professor Assistente. Ele trabalha em relatividade matemática e numérica.

Referências

- [1] <https://www.merriam-webster.com/>
- [2] <https://www.dictionary.com/>
- [3] <https://eventhorizontelescope.org/>
- [4] *Gravitational Radiation from Colliding Black Holes*, S. Hawking, Phys. Rev. Lett., 26, 1344 (1971).
- [5] *Black holes in general relativity*, S. Hawking, Comm. Math. Phys., 25(2), 152-166 (1972).
- [6] *Event and Apparent Horizon Finders for 3 + 1 Numerical Relativity*, J. Thornburg, Living Rev. Relativ., 10, 3 (2007); <https://doi.org/10.12942/lrr-2007-3>.
- [7] *Horizon dynamics of distorted rotating black holes*, T. Chu, H. Pfeiffer, M. Cohen, Phys. Rev. D 83, 104018 (2011).
- [8] *Testing the black-hole area law with GW150914*, M. Isi, W. Farr, M. Giesler, M. Scheel, S. Teukolsky, Phys. Rev. Lett., 127, 011103 (2021).
- [9] *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, Kip S. Thorne, ISBN: 0-393-21276-3.
- [10] *Black Hole Survival Guide*, Janna Levin, ISBN-10: 052565822X.