Viagens no Tempo

Paulo Crawford e Francisco Lobo

Departamento de Física e Centro de Astronomia e Astrofísica da

Universidade de Lisboa (CAAUL)

Campo Grande, Ed. C8, Lisboa

Pouco depois de assumirem corajosamente a responsabilidade pelo renascimento da física dos *wormholes* [1], Morris e Thorne aperceberam-se que podiam utilizá-los como máquinas do tempo [2]. A aparente facilidade teórica com que se transforma um *wormhole* numa máquina do tempo é verdadeiramente assombrosa. Porém, esta transformação parece violar a causalidade pois vem acompanhada de paradoxos como é, por exemplo, o paradoxo do avô, em que um viajante regressa ao passado e assassina o seu avô, impedindo o nascimento do seu pai. Mas se o viajante existe pode perguntar-se: quem o procriou? Alguém que nunca chegou a existir? As viagens ao passado ou mesmo a mera possibilidade de enviar sinais para trás no tempo, abrem uma verdadeira boceta de Pandora [3] de quebra cabeças e paradoxos.

Como as noções da causalidade são fundamentais na construção das teorias físicas e na visão que os físicos têm da natureza, as viagens no tempo e seus paradoxos têm que ser tratados com muita cautela. Em geral, invocam-se as consequências estranhas dos paradoxos para negar a possibilidade de viajar no tempo, tal como outrora os paradoxos de Zenão foram utilizados para provar a impossibilidade do movimento.

Note-se que são as viagens ao passado que suscitam as maiores dificuldades, porque são estas que aparentemente violariam a causalidade. Viajar para a frente no tempo é conceptualmente fácil e não exige uma nova física. Na física newtoniana, com o seu tempo absoluto, todos nós viajamos para o futuro a uma taxa constante, igual para todos os observadores. **Com a relatividade restrita abre-se a possiblidade de alguns observadores viajarem mais depressa no tempo do que outros.** Por exemplo, no célebre paradoxo dos gémeos [4] um deles fica em casa, num referencial inercial, e o outro afasta-se a grande velocidade até uma galáxia distante e depois regressa a casa à mesma velocidade. Ao reencontrar-se com o gémeo que permaneceu em casa, o viajante descobre que experimentou um intervalo de tempo muito menor do que o do seu irmão. O regresso a casa é uma verdadeira "viagem ao futuro" do primeiro gémeo e de todos os habitantes da Terra. Em cada um dos percursos de ida e volta, o viajante observa o tempo dilatado por um factor de $1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$, onde v é a velocidade do viajante em relação à Terra e c é a velocidade da luz.

Quando nos referimos a um paradoxo podemos estar a invocar duas definições diferentes que, embora concisas e sucintas, têm significados diametralmente opostos: a primeira é a de uma inconsistência lógica num argumento aparentemente plausível;

a segunda definição é a de uma inconsistência aparente num argumento perfeitamente correcto. Note-se que o paradoxo dos gémeos da Relatividade Restrita reduz-se ao segundo tipo.

Os paradoxos podem ser classificados em duas categorias, nomeadamente os paradoxos de consistência e os de *loops* causais. O paradoxo do avô engloba-se no primeiro tipo. Um exemplo de um paradoxo de *loops* causais é o de um viajante que é lançado para o futuro. Este regressa com um manual que contém os planos de construção de uma máquina avançada. A máquina existe no futuro porque foi construida pelo viajante no passado. A sua construção foi possível no passado porque o viajante regressou com o manual do futuro. Ambas as partes consideradas em si mesmas são consistentes e o paradoxo só surge quando analisado como um todo. Perguntar-se-ia qual é a origem da máquina, pois aparentemente surge do nada.

Ainda o mais estranho é que ao perturbar um paradoxo de *loops* causais originamos um paradoxo de consistência. Por exemplo, suponhamos que o viajante, por livre-arbítrio recusa-se a viajar ao futuro, impedindo assim a recepção do manual que já tinha recebido de si mesmo no passado. Temos de novo um paradoxo de consistência.

Dada a dificuldade do tema e o enorme número de referências existentes na literatura, organizámos este trabalho em duas partes. Na primeira, começamos por analisar as viagens no tempo na Relatividade Restrita, descritas por taquiões: partículas hipotéticas que viajam mais rápido do que a luz, e depois, as viagens previstas no contexto dos *wormholes* transitáveis, já no âmbito da Relatividade Geral. O paradoxo dos gémeos foi já discutido em [4] com algum pormenor**.** Na segunda parte, analisamos algumas geometrias clássicas Lorentzianas, que são soluções das equações de Einstein, e que geram máquinas do tempo [5]. A Relatividade Geral está contaminada por geometrias não-triviais que admitem **curvas temporais fechadas**. Estas estranhas trajectórias descrevem caminhos no espaço-tempo que correspondem a um movimento para a frente no tempo local mas que terminam onde e quando começaram. Uma curva temporal fechada é, neste sentido, uma **máquina do tempo**, pois um viajante que percorre uma trajectória no espaço-tempo ao longo dessa curva, depara-se consigo próprio a iniciar a viagem quando regressa ao acontecimento da partida. Mais geralmente, diz-se que um espaço-tempo que contem curvas temporais fechadas, localizadas num região, tem uma máquina do tempo.

Na conclusão apresentamos algumas das correntes de pensamento actuais e conjecturas que nos auxiliam a compreender melhor a verdadeira dimensão das viagens no tempo.

1 Taquiões

O taquião (que em Grego significa rápido) é uma partícula hipotética que viaja mais rapidamente do que a luz. Contrariamente ao que se afirma em muitos textos introdutórios de Relatividade Restrita, a sua existência não viola esta teoria, embora seja necessário modificar algumas das noções tradicionais de causalidade [6].
Na formulação da Relatividade Restrita a energia, E, e o momento linear, p, de uma partícula são dados por:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \qquad p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

em que m é a massa (própria) da partícula, c é a velocidade da luz e v é a velocidade da partícula no referencial do observador.

A dificuldade com os taquiões é a seguinte: de acordo com as equações acima descritas, ambas as quantidades, E e p, são imaginárias para $v > c$. Para terem existência física, E e p têm que ser reais. O problema aparentemente pode ser ultrapassado postulando que a massa dos taquiões é imaginária. Logo, se $m = i\mu$ (com $i = \sqrt{-1}$), a energia e o momento tomam as seguintes formas:

$$E = \frac{\mu\, c^2}{\sqrt{v^2/c^2 - 1}}, \qquad p = \frac{\mu\, v}{\sqrt{v^2/c^2 - 1}}$$

com $v > c$. E, portanto, a relação fundamental da dinâmica relativista toma a forma

$$E^2 = p^2c^2 - \mu^2c^4$$

Enquanto que para as partículas subluminais a energia e o momento linear são funções crescentes de v no domínio $0 < v < c$, para os taquiões são funções decrescentes em $c < v < \infty$.

As viagens no tempo são induzidas quando se considera o movimento relativo entre observadores que trocam taquiões. Por exemplo, consideremos dois observadores, ***A*** e ***B***, separados por uma distância x_0 no instante $t=0$, com ***B*** afastando-se de ***A*** com uma velocidade v ($v < c$) segundo o eixo dos xx. ***A*** emite um taquião com uma velocidade u ($u > c$) na direcção de ***B*** em $t=0$ (no seu referencial). Logo após a sua recepção, ***B*** emite um segundo taquião na direcção de ***A*** (com uma velocidade $-u$ no referencial de ***B***). A transformação de Lorentz das velocidades permite escrever que o segundo taquião será recebido por ***A*** num intervalo de tempo:

$$t_{rec} = \frac{x_0}{(u - v)^2}\left[u - v + u\left(1 - \frac{uv}{c^2}\right)\right]$$

Note que $t_{rec} = t_{ida} + t_{volta}$ e que na ida temos $x = x_0 + vt = ut$, pelo que $t_{ida} = x_0/(u - v)$. Para calcular o tempo de volta precisamos da velocidade do segundo taquião em relação a ***A***, ou seja, $(u - v)/(1 - uv/c^2)$, pelo que o tempo de volta se pode escrever:

$$t_{volta} = x(1 - uv/c^2)/(u - v) = x_0u(1 - uv/c^2)/(u - v)^2 .$$

Se $v=0$, temos $t_{rec} = 2x_0/v$ e não ocorre qualquer violação da causalidade, apesar de $u > c$. As anomalias causais ocorrem se $t_{rec} < 0$, i.e., se o observador ***A*** recebe o segundo taquião antes de enviar o primeiro. Para um dado valor de $u > c$, existe um valor crítico de v acima do qual há sempre anomalia causal. O valor de v a partir do qual se observam violações de causalidade é tanto mais baixo quanto maior for $u > c$. Se $v \to c$, $t_{rec} \to -x_0/c$, qualquer que seja o valor da velocidade taquiónica, pelo que é sempre possível encontrar uma anomalia causal para velocidades suficientemente altas entre os observadores. Por outro lado, como existe sempre um domínio em que $t_{rec} > 0$, nomeadamente para baixos valores de u, considerar velocidades mais rápidas do que a luz nem sempre é sinónimo de viagens no tempo.

2 De *Wormhole* a Máquina do Tempo

Uma das características mais fascinantes da física de *wormholes* transitáveis é a sua *aparente* facilidade em gerar máquinas do tempo. Para efectuar a análise matemática, é útil recorrer a uma experiência de pensamento (*gedanken)* que separa claramente os passos sucessivos na criação da máquina do tempo [5]. Os passos são os seguintes:

1. Adquirir e manter um *wormhole* transitável.
2. Induzir um desfasamento temporal entre as duas bocas.
3. Aproximar as duas bocas.

É apenas a indução do desfasamento temporal, no segundo passo, que vai depender intrinsicamente de efeitos relativistas. A criação *aparente* da máquina do tempo no terceiro passo pode efectuar-se de uma maneira adiabática e não-relativista.

2.1 Um *wormhole* transitável

Suponhamos que uma civilização genericamente avançada adquiriu e continua a manter um *wormhole* transitável, tal como foi descrito em [7]. Recordemos que Mike Morris e Kip Thorne recorreram à possibilidade teórica, existente no contexto da física quântica, de a densidade de energia numa dada região do espaço-tempo poder ser negativa, para construirem matematicamente um *wormhole* transitável. Em [7] mostra-se que a relatividade geral prevê que o *wormhole* colapse em menos tempo que o necessário para a luz o atravessar se nao for preenchido por essa energia negativa. É a natureza repulsiva do campo gravitacional associado à energia negativa que suporta o *wormhole*, tornando-o transitável. Consideremos um *wormhole* transitável com um túnel extremamente curto imerso no espaço-tempo de Minkowski. Esta aproximação despreza as complicações relacionadas com a espessura da garganta, que vamos considerar nula.

O *wormhole* é agora modelado pelo espaço-tempo de Minkowski com duas linhas de universo temporais (as bocas do *wormhole*) identificadas. Por simplicidade podemos considerar que as bocas estão inicialmente em repouso relativo, e que ligam *tempos iguais* no referencial de repouso destas. Matematicamente isso significa que estamos a considerar o espaço-tempo (3+1)-dimensional de Minkowski com as duas linhas de universo identificadas:

$$l_1^{\mu}(\tau) = \bar{l}_0^{\mu} - \frac{1}{2} S^{\mu} + \tau U^{\mu}$$

$$l_2^{\mu}(\tau) = \bar{l}_0^{\mu} + \frac{1}{2} S^{\mu} + \tau U^{\mu}$$

onde U^{μ} é um 4-vector temporal arbitrário, S^{μ} é ortogonal a U^{μ}, logo é um 4-vector espacial,e l_0^{μ} é um 4-vector temporal constante completamente arbitrário. O centro de massa do par de bocas do *wormhole* tem a seguinte linha de universo: $\bar{l}^{\mu}(\tau) = \bar{l}_0^{\mu} + \tau U^{\mu}$.

O 4-vector S^{μ} descreve a separação das bocas do *wormhole*, sendo $S^{\mu}\ S_{\mu}=s^2>0$, o intervalo invariante que fornece a distância de um ponto na garganta do *wormhole* em relação a si mesmo, medida no espaço exterior.

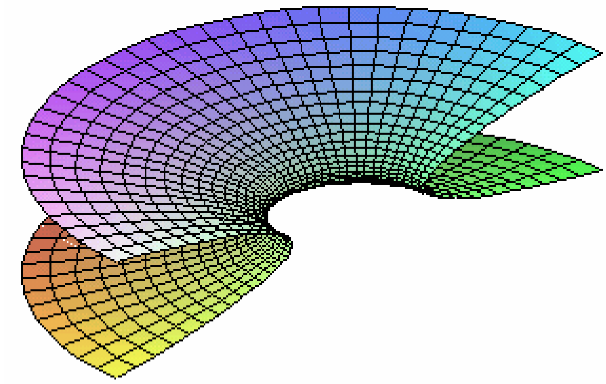

fig.1 Um *wormhole* transitável com um túnel extremamente curto imerso no espaço-tempo. Essa aproximação despreza as complicações relacionadas com a espessura da garganta, que podemos considerar nula.

É através do passo seguinte, o da indução de um desfasamento temporal, que com uma simples manipulação *aparentemente* se tranforma um *wormhole* numa máquina do tempo.

2-Como induzir um desfasamento temporal

O penúltimo passo na construção da máquina do tempo implica a indução de um desfasamento temporal entre as duas bocas do *wormhole* transitável. Por simplicidade consideremos o referencial de repouso das duas bocas. Sem perda de generalidade podemos considerar que $U^{\mu}=(1,0,0,0)$ e $S^{\mu}=s(0,0,0,1)$ respectivamente. Consideremos, por simplicidade, que $\bar{l}_0^{\ \mu}=(0,0,0,0)$. As linhas de universo tomam agora a seguinte forma:

$$l_1^{\ \mu}(\tau)=\left(\tau,0,0,-\frac{s}{2}\right),\quad l_2^{\ \mu}(\tau)=\left(\tau,0,0,\frac{s}{2}\right)$$

Alterando a notação $\tau \rightarrow t$, e efectuando uma translacção de $s/2$ ao longo do eixo do z, vem:

$$l_1^{\ \mu}(t)=(t,0,0,0)$$

$$l_2^{\ \mu}(t)=(t,0,0,s)$$

As duas linhas de universo são identificadas, devido ao comprimento extremamente pequeno do túnel:

$$(t,0,0,0)\equiv(t,0,0,s).$$

A indução de um desfasamento temporal entre as duas bocas implica um *wormhole* com a seguinte identificação:

$$(t,0,0,0)\equiv(t+T,0,0,l)$$

em que T é o desfasamento temporal e l é a distância entre as duas bocas.