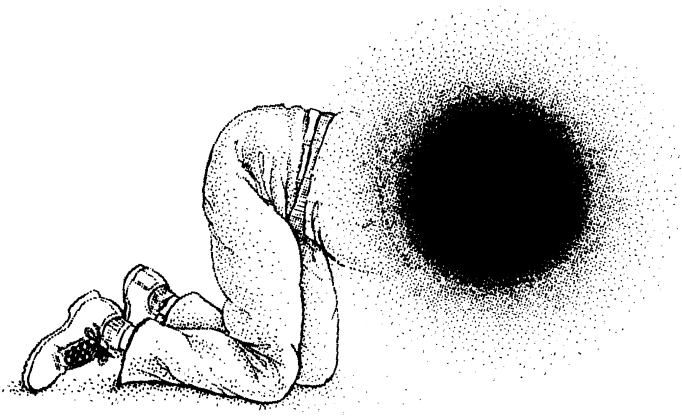


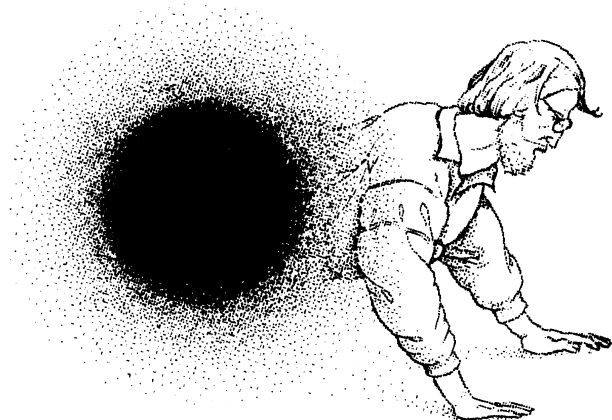
“Wormholes”: Túneis no Espaço-Tempo

Francisco Lobo *
Paulo Crawford *



Existem soluções das equações de Einstein que descrevem túneis ou wormholes transitáveis no espaço-tempo. Poder-se-á utilizar uma geometria destas para efectuar viagens interestelares rápidas? Esta questão tem sido avançada nos últimos tempos. No entanto, a matéria que constitui um tal wormhole (transitável) tem densidade de energia negativa, o que viola algumas condições de energia fundamentais. Por isso, ela se designa por matéria exótica. Apesar desta e doutras dificuldades, não existe uma prova irrefutável da inexistência de wormholes, pelo que nada nos impede de os considerar possíveis.

Mostramos aqui como construir wormholes transitáveis e analisamos as condições necessárias para uma viagem confortável de seres humanos através deles. Trata-se do desenvolvimento da ideia de Carl Sagan no seu livro *Contacto*, que deu origem ao filme com o mesmo nome.



Introdução

É frequente os escritores de ficção científica considerarem buracos negros para viagens interestelares rápidas. Imaginam viajantes intrépidos lançando-se num buraco negro e encontrando-se subitamente numa região distante do universo. Para ilustrar tais buracos recorre-se normalmente a soluções esfericamente simétricas das equações de Einstein, por serem as mais fáceis de tratar. No entanto, podem levantar-se objecções muito sérias às viagens interestelares através de buracos negros esfericamente simétricos.

Em primeiro lugar, no caso mais simples, conhecido por buraco negro de Schwarzschild, as forças de maré na vizinhança do buraco podem produzir acelerações tão grandes que esmagariam qualquer viajante, comprimindo-o transversalmente e esticando-o na direcção longitudinal. Em segundo lugar, a fronteira do buraco, conhecida por horizonte de acontecimentos, pode ser considerada uma “membrana” com um só sentido, através da qual os objectos entram mas não podem sair. Logo, uma viagem nos dois sentidos é estritamente proibida a não ser que o buraco negro tenha carga eléctrica, sendo então a sua geometria dada pela solução de Reissner-Nordstrom, e o objecto de saída seja um buraco branco. Os buracos brancos possuem anti-horizontes, que são superfícies instáveis face a pequenas perturbações e das quais só podem emergir objectos ou luz mas nada pode entrar. Como resultado dessa instabilidade, o anti-horizonte pode converter-se em horizonte, num intervalo de tempo extremamente pequeno. Esta conversão, que ocorre pouco depois da criação do anti-horizonte, impede na prática uma travessia nos dois sentidos.

Uma outra solução das equações de Einstein, sem simetria esférica mas com simetria em torno de um eixo, é a solução de Kerr, que descreve buracos negros em rotação. Esta geometria possui no seu interior túneis que ligam regiões assintoticamente planas do espaço-tempo. Se aceitarmos a formação dos túneis de Kerr, estes não existiriam por muito tempo devido à presença de horizontes de Cauchy: superfícies nulas (*i.e.*, luminosas) para além das quais se quebra a previsibilidade. Estes horizontes de Cauchy também são instáveis relativamente a pequenas perturbações. Um pacote de ondas luminosas incidente sofreria um *blue-shift*, com um aumento exponencial da energia ao aproximar-se do horizonte de Cauchy, dando origem a campos gravitacionais intensos que fechariam os túneis, convertendo-os possivelmente em singularidades físicas. Logo, o interior de um buraco negro de Kerr não deve possuir túneis a ligar regiões diferentes do espaço-tempo, mas singularidades que também esmagariam qualquer viajante.

Se fosse possível a formação e a estabilização dos túneis de Kerr, estes possuiriam singularidades em forma de anel. Se a física fosse puramente clássica e o buraco negro suficientemente grande e com rotação elevada, um viajante facilmente atravessaria a singularidade. No entanto, a teoria quântica de campos prevê que as singularidades quebram o estado de vácuo (quântico), irradiando um fluxo intenso de partículas de altas energias que certamente mataria qualquer viajante.

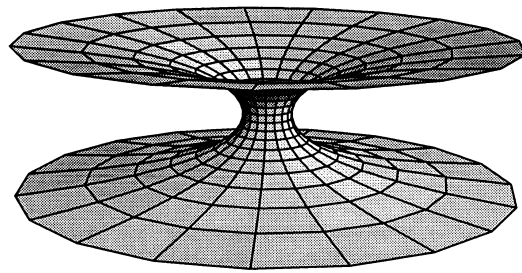


Fig. 1 Diagrama de um wormhole que liga dois universos diferentes.

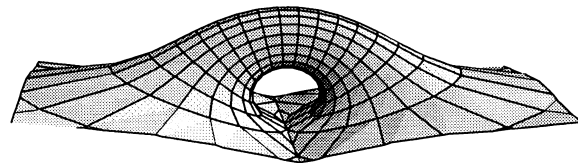


Fig. 2 Diagrama de um wormhole que liga duas regiões distintas de um espaço-tempo.

Os *wormholes* (tradução à letra: buracos de verme) oferecem um mecanismo para viagens interestelares rápidas. A Fig. 1 apresenta um diagrama de um *wormhole* que liga dois universos diferentes; a Fig. 2 apresenta duas regiões distantes do mesmo universo. Ambos os *wormholes* são descritos pela mesma solução das equações de Einstein, a solução de Schwarzschild, diferindo apenas nas suas topologias. Saliente-se que estas equações não impõem restrições à topologia das soluções.

Mas também existe uma série de objecções às viagens interestelares utilizando os *wormholes* de Schwarzschild. As forças de maré de origem gravitacional na garganta destes *wormholes* têm a mesma ordem de grandeza que as do horizonte do buraco negro de Schwarzschild.

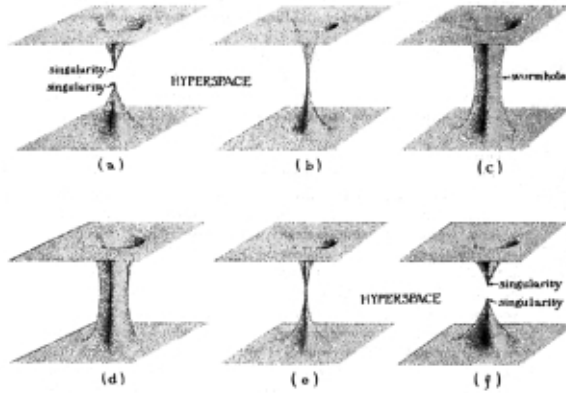


Fig. 3. Processo de expansão e contracção de um wormhole de Schwarzschild.

Um *wormhole* de Schwarzschild é dinâmico. Expande-se a partir de uma circunferência nula (dois universos desligados) até um valor máximo na garganta, e depois contrai-se para um valor nulo (Fig. 3). Este processo de expansão e contracção é tão rápido que é impossível efectuar uma viagem sem se ser esmagado pela contracção. Tal como o buraco branco, o *wormhole* de Schwarzschild possui um anti-horizonte e é altamente instável relativamente a pequenas perturbações.

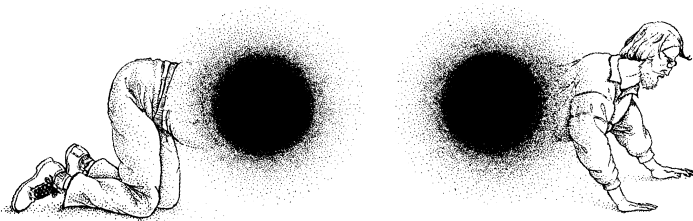


Fig. 4. Kip Thorne atravessa um wormhole.

Em 1986 Kip Thorne e Michael Morris descobriram [1] uma solução das equações de Einstein que descreve um *wormhole* transitável (Fig. 4). É uma solução relativamente simples, inspirada em parte por um desafio de Carl Sagan sobre a possibilidade real de viagens interestelares rápidas, ideia que é utilizada no seu livro *Contacto*, que deu origem ao filme com o mesmo nome (Fig. 5).

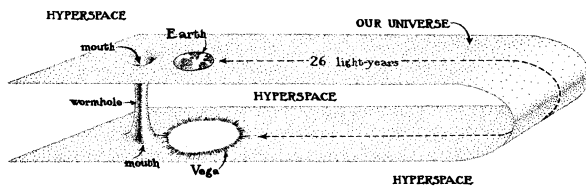


Fig. 5. O diagrama de imersão do wormhole transitável utilizado em *Contacto* em que uma personagem viaja da Terra a Vega.

Propriedades do Wormhole Transitável

Como vimos, existem várias objecções à possibilidade de se realizarem viagens interestelares através de buracos negros ou de *wormholes* de Schwarzschild. Para se tornar transitável um *wormhole* deverá possuir as seguintes propriedades:

1. Geometria esfericamente simétrica e estática. É uma condição imposta para simplificar os cálculos.
2. Ser solução das equações de Einstein.
3. Conter uma garganta (um fragmento estreito do espaço-tempo, extremamente curvo) ligando duas regiões assintoticamente planas do espaço-tempo.
4. Ausência de horizontes para permitir a viagem nos dois sentidos.
5. Forças de maré pequenas, para não destruir possíveis viajantes.
6. Permitir que um viajante possa atravessar o *wormhole* num tempo próprio e num tempo coordenado razoáveis. Este último é medido por um observador muito afastado das fontes do campo gravítico.
7. A matéria e os campos que geram a curvatura do espaço-tempo são descritas por um tensor de energia-momento com significado físico.
8. A solução deve ser estável para pequenas perturbações durante a passagem do viajante.
9. Finalmente, o *wormhole* deve ser construído com uma quantidade de matéria finita, certamente inferior ao conteúdo material do universo, e num intervalo de tempo finito, claramente inferior à idade do universo.

1. A métrica

Na ausência de campo gravítico, a geometria do espaço-tempo é plana, *i.e.*, se dois acontecimentos A e B são infinitesimalmente próximos então existe um conjunto infinito de sistemas de coordenadas tais que as diferenças das coordenadas temporal e espaciais, dt , dx , dy , e dz medidas num dado sistema de coordenadas, estão relacionadas pela expressão invariante conhecida por métrica do espaço-tempo [2]

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (1)$$

Os campos gravíticos deformam o espaço-tempo de tal modo que a Eq. (1) deixa de ser válida. Para o caso de um wormhole, vamos considerar um espaço-tempo estático e esfericamente simétrico dado pela métrica

$$ds^2 = -e^{2\Phi} c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{(1-b/r)} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (2)$$

onde $\Phi = \Phi(r)$ e $b = b(r)$ são funções arbitrárias da coordenada radial; $b(r)$ determina a forma do *wormhole* (por isso se designa *função de forma*); $\Phi(r)$ determina o *redshift* de origem gravitacional (e é designada *função de*

redshift). A coordenada radial r tem um significado geométrico específico, em que $2\pi r$ é a circunferência de um círculo centrado na garganta do *wormhole*. Portanto, r é não-monótona uma vez que diminui de $+\infty$ até um valor mínimo, b_0 , na garganta, aumentando novamente para $+\infty$.

Num espaço-tempo estático e assintoticamente plano, as superfícies não-singulares onde $g_{00} = -e^{2\Phi} \rightarrow 0$ identificam os horizontes. Por exemplo, o *wormhole* de Schwarzschild possui um horizonte precisamente na garganta, $r=2GM/c^2$. Logo, a condição do *wormhole* não possuir qualquer horizonte corresponde ao facto de $\Phi(r)$ ser finita em qualquer ponto do espaço-tempo.

Os cálculos subsequentes e a respectiva interpretação física serão simplificados utilizando uma base de vectores ortonormados, associados ao referencial próprio de um conjunto de observadores em repouso no sistema de coordenadas com (r, θ, ϕ) constante,

$$\begin{cases} \vec{e}_t = e^{-\Phi} \vec{e}_t \\ \vec{e}_r = (1 - b/r)^{1/2} \vec{e}_r \\ \vec{e}_\theta = r^{-1} \vec{e}_\theta \\ \vec{e}_\phi = (r \sin \theta)^{-1} \vec{e}_\phi \end{cases}$$

Nessa base a métrica toma localmente a forma dada pela Eq. (1) e as equações de Einstein, $G_{\hat{\alpha}\hat{\beta}} = 8\pi Gc^{-4} T_{\hat{\alpha}\hat{\beta}}$, que relacionam a curvatura do espaço-tempo com as distribuições de massa-energia representadas pelo tensor energia-momento, $T_{\hat{\mu}\hat{\nu}}$, ficam aqui reduzidas as três equações, como veremos adiante.

2. O tensor energia-momento

Sabe-se que a única solução de vácuo ($T_{\hat{\mu}\hat{\nu}} = 0$) e esfericamente simétrica das equações de Einstein é a solução de Schwarzschild. Mas, como o *wormhole* de Schwarzschild não é transitável, somos obrigados a exigir um tensor energia-momento não nulo para construir um *wormhole* transitável.

Na base ortonormada o tensor de Einstein, $G_{\hat{\mu}\hat{\nu}}$, tem a mesma estrutura algébrica do tensor energia-momento, $T_{\hat{\mu}\hat{\nu}}$, portanto, este tensor só tem três componentes não-nulas que são, $T_{\hat{t}\hat{t}}, T_{\hat{r}\hat{r}}, T_{\hat{\theta}\hat{\theta}} = T_{\hat{\phi}\hat{\phi}}$. Como os observadores estáticos utilizam os vectores de base ortonormados, cada uma das componentes do tensor de energia-momento tem uma interpretação física simples:

$$\begin{cases} T_{\hat{t}\hat{t}} = \rho(r)c^2 \\ T_{\hat{r}\hat{r}} = -\tau(r) \\ T_{\hat{\theta}\hat{\theta}} = T_{\hat{\phi}\hat{\phi}} = p(r) \end{cases} \quad (3)$$

em que $\rho(r)$ é a densidade de massa-energia total; $\tau(r)$ é a tensão por unidade de área medida na direcção radial

(i.e., a pressão radial a menos de um sinal negativo); e $p(r)$ é a pressão medida nas direcções angulares (direcções ortogonais à direcção radial).

3. As equações de Einstein

As equações de Einstein para a métrica dada pela Eq. (2), depois de referidas a uma base ortonormada, ficam:

$$\rho = \frac{b'c^2}{8\pi Gr^2} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{[b/r - 2(r-b)\Phi]c^4}{8\pi Gr^2} \quad (5)$$

$$p = \frac{r}{2} [\rho c^2 - \tau] \Phi' - \tau \quad (6)$$

A nossa escolha de $b(r)$ fornecerá $\rho(r)$ através da Eq. (4); $\Phi(r)$ e $b(r)$ forneceram $\tau(r)$, e, portanto, $p(r)$.

A matemática da imersão

Utilizam-se diagramas de imersão para demonstrar que a métrica (2) descreve um *wormhole*. A geometria do espaço tridimensional com a coordenada temporal fixa tem um interesse particular. Como esta geometria é esfericamente simétrica, podemos confinar a análise a um plano equatorial ($\theta=\pi/2$), sem perda de generalidade. O elemento de linha, com $t=const.$ e $\theta=\pi/2$, vem agora

$$ds^2 = \left(1 - \frac{b}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\phi^2 \quad (7)$$

O objectivo da imersão é construir uma superfície (bidimensional) do espaço euclidiano tridimensional, com a mesma geometria do plano equatorial descrito acima, i.e., queremos visualizar a camada equatorial removida do espaço-tempo e imersa no espaço euclidiano.

Utilizam-se as coordenadas cilíndricas z, r e ϕ no espaço euclidiano de imersão (Figs. 1 e 2), cuja métrica tem a seguinte forma:

$$ds^2 = dz^2 + dr^2 + r^2 d\phi^2$$

A superfície de imersão apresenta uma simetria axial e pode ser descrita pela função $z(r)$. O elemento de linha é:

$$ds^2 = \left[1 + \left(\frac{dz}{dr}\right)^2\right] dr^2 + r^2 d\phi^2$$

que é o mesmo da Eq. (7) se identificarmos as coordenadas (r, ϕ) do espaço de imersão com as coordenadas (r, ϕ) do espaço-tempo do *wormhole*. Logo a função $z(r)$ satisfaz a relação

$$\frac{dz}{dr} = \pm \left[\frac{r}{b(r)} - 1\right]^{-1/2} \quad (8)$$

o que mostra o modo como $b(r)$ condiciona a forma do *wormhole*.

Forças de maré e tempo de travessia no wormhole

Imaginemos uma viagem através do *wormhole*, numa direcção radial, em que o viajante parte do repouso de uma estação espacial no universo inferior, em $l=-l_1$, e termina numa estação espacial no universo superior, em $l=+l_2$. Designemos por $v(r)$ a velocidade radial do viajante, medida por um observador estático em r e seja $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, com $\beta=v/c$. O valor de $v(r)$ é dado pela derivada da distância própria percorrida pelo viajante, dl , em ordem ao tempo próprio medido pelo observador estático, $d\tau_S=e^\Phi dt$. Temos então as equações:

$$v = \frac{dl}{e^\Phi dt} = \mp \frac{dr}{(1-b/r)^{1/2} e^\Phi dt}$$

$$v\gamma = \frac{v}{(1-\beta^2)^{1/2}} = \frac{dl}{d\tau} = \mp \frac{dr}{(1-b/r)^{1/2} d\tau}$$

em que $d\tau$ é o tempo próprio medido pelo viajante, que se relaciona com $d\tau_S$ por uma transformação de Lorentz $d\tau=d\tau_S/\gamma$. O sinal $-$ refere-se à primeira parte da viagem (no universo inferior); o sinal $+$ refere-se à segunda parte da viagem (no universo superior).

Para que seres humanos possam realizar comodamente uma viagem através de um *wormhole* impomos três condições:

(i) A viagem deve demorar pouco tempo, digamos menos de um ano, quer para o viajante quer para os observadores nas estações $-l_1$ e $+l_2$.

$$\Delta\tau = \int_{-l_1}^{+l_2} \frac{dl}{v\gamma} \leq 1 \text{ ano}$$

$$\Delta t = \int_{-l_1}^{+l_2} \frac{dl}{ve^\Phi} \leq 1 \text{ ano} \quad (9)$$

(ii) A aceleração sentida pelo viajante não deve exceder a aceleração gravítica terrestre g_\oplus . Localmente, podemos introduzir uma outra base ortonormada no referencial próprio do viajante, $(\vec{e}_0, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$, definida em função da base ortonormada dos observadores estáticos, $(\vec{e}_i, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\phi)$, pela transformação de Lorentz $\vec{e}_{\hat{\mu}} = \Lambda^{\hat{\mu}}_{\hat{\nu}} \vec{e}_{\hat{\nu}}$:

$$\begin{cases} \vec{e}_0 = \vec{U} = \gamma e_i \mp \gamma \beta \vec{e}_r \\ \vec{e}_1 = \mp \gamma \vec{e}_r + \gamma \beta \vec{e}_i \\ \vec{e}_2 = \vec{e}_\theta \\ \vec{e}_3 = \vec{e}_\phi \end{cases}$$

$\vec{U} = \vec{e}_0$ é o quadri-vector velocidade do viajante. O quadri-vector aceleração do viajante é $a_{\hat{\alpha}} = U_{\hat{\alpha};\hat{\beta}} U^{\hat{\beta}}$. Logo, os dois quadri-vectores são ortogonais entre si e, portanto, $\vec{a} \cdot \vec{U} = 0 = \vec{a} \cdot \vec{e}_0 = a_0 = -a^{\hat{0}} = 0$. Como o viajante se move radialmente, a sua aceleração tridimensional tem apenas a componente radial, *i.e.*, $a_2 = a_3 = 0$ e $\vec{a} = \vec{a} \vec{e}_1$, onde a é a intensidade da aceleração.

Para que o viajante sinta uma aceleração menor ou igual à aceleração gravítica terrestre exige-se que

$$|a| = \left| e^{-\Phi} c^2 \frac{d(\gamma e^\Phi)}{dl} \right| \leq g_\oplus \Leftrightarrow \left| e^{-\Phi} c^2 \frac{d(\gamma e^\Phi)}{dt} \right| \leq g_\oplus \quad (10)$$

(iii) As acelerações de maré, $\Delta \vec{a}$, entre as várias partes do corpo do viajante também não deverão exceder a aceleração gravítica terrestre g_\oplus . Designemos por $\vec{\xi}$ a separação vectorial entre duas partes do corpo do viajante (por exemplo, a separação entre a cabeça e os pés). $\vec{\xi}$ é puramente espacial no referencial próprio do viajante, *i.e.*, $\vec{\xi} \cdot \vec{U} = 0 = -\xi^{\hat{0}}$.

A aceleração de maré entre duas partes do corpo do viajante é dada pela equação do desvio geodésico: $\Delta a^{\hat{\alpha}} = -c^2 R^{\hat{\alpha}}_{\hat{\beta}\hat{\gamma}\hat{\delta}} U^{\hat{\beta}} \xi^{\hat{\gamma}} U^{\hat{\delta}}$, onde $R^{\hat{\alpha}}_{\hat{\beta}\hat{\gamma}\hat{\delta}}$ são as componentes do tensor curvatura de Riemann. Com base nesta equação é ainda possível impôr condições na velocidade, v , do viajante ao atravessar o *wormhole* e na função de *redshift* Φ , mas evitámos apresentá-las aqui.

Restrições impostas à tensão e à densidade de energia na garganta do wormhole

As restrições impostas à função de forma, $b(r)$, do *wormhole* implicam que, através das equações de Einstein (4)-(6), surjam restrições na densidade de massa-energia, ρ , na tensão radial, τ , e na pressão lateral, p , que geram a curvatura do espaço-tempo. As restrições mais severas ocorrem na garganta do *wormhole*. A tensão radial na garganta é:

$$\tau_0 \equiv \frac{1}{8\pi G c^{-4} b_0^2} \approx 5 \times 10^{40} \frac{N}{m^2} \left(\frac{10m}{b_0} \right)^2$$

Para analisar as tensões na garganta e na sua vizinhança, definimos a seguinte função sem dimensões, utilizando as equações de campo (4) e (5) e substituindo as funções τ e ρ pelas funções b e Φ :

$$\zeta \equiv \frac{\tau - \rho c^2}{|\rho c^2|} = \frac{(b/r) - b' - 2(r-b)\Phi'}{|b|} \quad (11)$$

Na garganta ou nas suas vizinhanças: $\zeta > 0$.

A condição $\tau_0 > \rho_0 c^2$, estipulando uma tensão radial na garganta superior à densidade de massa-energia, introduz uma dificuldade na construção de um *wormhole*. Como a matéria usual não goza dessa propriedade, essa matéria designa-se por *matéria exótica*. A natureza exótica dessa matéria, está associada às medições efectuadas por observadores que se movam através da garganta com uma velocidade radial próxima da velocidade da luz, *i.e.*, $\gamma \gg 1$. Qualquer desses observadores medirá uma densidade de massa-energia negativa: $\rho c^2 < 0$, pois $\rho c^2 = \gamma^2 (\rho_0 c^2 - \tau_0) + \tau_0$.

Um *wormhole* é um atalho hipotético que liga duas regiões de um espaço-tempo. Contém duas entradas que designamos por *bocas*, ligadas por um túnel, cuja circunferência mínima chamamos a *garganta*. Pode-se visualizar um *wormhole* através de um diagrama de imersão, que idealiza um espaço-tempo com apenas duas dimensões espaciais. Neste diagrama, a garganta do *wormhole* é representada por uma circunferência, mas no espaço-tempo tetradimensional seria uma esfera.

Os *wormholes* foram descobertos matematicamente como soluções das equações de campo por Flamm em 1916, poucos meses depois de estas serem formuladas por Einstein. Em 1935, Einstein e Rosen, numa tentativa de construir um modelo geométrico de uma partícula elementar, encontraram soluções que representavam o espaço físico por dois planos idênticos, em que a partícula era representada por uma *ponte* que ligava os dois planos. Esta solução posteriormente ficou conhecida por “*ponte de Einstein-Rosen*”.

Os *wormholes* foram alvo de estudo exaustivo na década de 50 pelo físico norte-americano John Wheeler e seus colaboradores. No entanto, nenhuma das soluções a que chegaram representa um *wormhole* transitável no espaço-tempo. As soluções encontradas eram as de um *wormhole* dinâmico, que, uma vez criado, se expandia até um valor máximo da garganta, contraindo-se novamente até a garganta desaparecer.

A expansão e a contração do *wormhole* é tão rápida que impede a travessia de qualquer viajante ou mesmo de um raio luminoso.

Os físicos têm sido bastante cépticos em relação aos *wormholes*. Em finais da década de 80 deu-se um renascimento, em parte devido a um desafio, lançado por Carl Sagan a Kip Thorne, sobre a possibilidade real de viagens interestelares rápidas, ideia utilizada no livro *Contacto* (saído na Gradiva). Foram encontradas soluções das equa-

ções de campo de Einstein que apresentavam algumas características peculiares [1].

Nomeadamente, a matéria que constitui o *wormhole* tem uma densidade de energia negativa, quando observada por um viajante que atravessa o *wormhole* a uma velocidade elevada. Diz-se, por vezes, que esta matéria é exótica, porque viola algumas condições de energia que são fundamentais para os teoremas clássicos sobre singularidades do espaço-tempo.

Aparentemente, as leis da física clássica proíbem as densidades de energia negativas, mas a teoria quântica de campo prevê a sua existência, violando por isso algumas destas condições de energia. Este assunto continua a ser alvo de intensa investigação. Espera-se que uma eventual teoria da gravitação quântica venha a resolver o problema.

Se é certo que os buracos negros parecem ser uma consequência inevitável da evolução estelar, já não se pode afirmar que exista um mecanismo natural para a criação de *wormholes*. Pergunta-se: será que uma civilização infinitamente avançada poderia construir um *wormhole* para realizar viagens interestelares? Será que as leis da física permitem a construção de *wormholes* e a mudança topológica associada? Atendendo às flutuações gravitacionais do vácuo, predomina uma espuma quântica com uma topologia multiplamente conexa à escala de Planck. Podemos imaginar uma civilização avançadíssima a extrair um *wormhole* da espuma quântica e a expandi-lo até dimensões clássicas. Thomas Roman oferece outra perspectiva interessante [5]. Considera a formação de um *wormhole* no *big-bang* através de uma flutuação quântica que se expandiu exponencialmente durante a inflação do universo, atingindo dimensões clássicas.



Mesmo os *wormhole* não-estáticos e sem simetria esférica são constituídos por matéria cuja densidade de energia é negativa para alguns observadores. Uma análise qualitativa é a seguinte: um feixe luminoso (formado por geodésicas nulas) que entra numa boca e emerge na outra tem uma secção eficaz que inicialmente diminui e depois de atravessar a garganta aumenta. A conversão do decréscimo para o acréscimo da secção recta eficaz apenas pode ser produzida pela repulsão gravitacional da matéria do *wormhole*, o que corresponde à existência de densidades de massa-energia (ou pressões) negativas.

Por outro lado, a restrição $\tau > \rho c^2$ viola algumas condições de energia, nomeadamente as condições de energia fraca,

forte e dominante que são fundamentais para demonstrar alguns dos teoremas sobre a existência de singularidades.

Construção e estabilidade de um *wormhole* transitável

Seria extremamente desconfortável para um viajante interagir com matéria sujeita a tensões da ordem de $\tau_e \approx 5 \times 10^{40} \text{ N/m}^2 (10 \text{ m}/b_0)^2$. Existem várias maneiras de proteger o viajante. Morris e Thorne sugerem que poderíamos colocar um tubo de vácuo através do *wormhole*, com um diâmetro muito menor do que o raio da garganta, e utilizar tensões nas paredes do tubo para evitar o acoplamento da matéria exótica com o viajante.

Essa possibilidade quebra a simetria esférica do *wormhole*, e obriga a obter soluções das equações de Einstein para um *wormhole* não-esférico. De facto, Matt Visser [3] aplicou o formalismo das condições de junção e descobriu soluções de *wormholes* cúbicos e poliédricos. Essas soluções têm a vantagem de um viajante não encontrar matéria exótica na travessia. Morris e Thorne ainda sugerem que a matéria exótica que constitui o *wormhole* (apesar das suas tensões e densidade de energia enormes) acopla muito fracamente com a matéria normal, tal como acontece com os neutrinos e as ondas gravitacionais.

Na ausência de uma compreensão mais completa da matéria exótica, é impossível estabelecer uma análise da estabilidade do *wormhole* face a pequenas ou grandes perturbações, tal como na travessia de uma nave espacial. Mas se o *wormhole* apresenta instabilidades naturais, uma civilização avançada poderia monitorizar a sua estrutura e aplicar forças de *feedback* de modo a estabilizá-lo (nova sugestão de Morris e Thorne).

A construção de um *wormhole* é muito problemática, pois implica mudanças da topologia do espaço-tempo (Fig. 6). Na relatividade geral as mudanças topológicas são provavelmente acompanhadas de singularidades do espaço-tempo, as quais só poderão ser compreendidas e talvez evitadas no quadro de uma teoria quântica da gravitação.

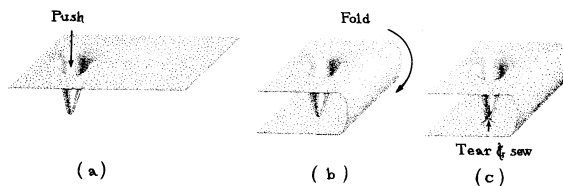


Fig. 6 A mudança da topologia do espaço-tempo na construção de um *wormhole*. (a) É criada uma deformação na curvatura do espaço-tempo. (b) Efectua-se uma dobra ligeira no hiperespaço. (c) O tecido do espaço-tempo é rompido na deformação e na dobra, e, em seguida, efectua-se uma colagem. O processo de rompimento produz uma singularidade, governada pelas leis da gravitação quântica.

Aliás, existem fortes indicações de que os efeitos da gravitação quântica predominam à escala de Planck, $l_p = (G\hbar/c^3)^{1/2} = 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$, produzindo uma *espuma* com uma estrutura multiplamente conexa do espaço-tempo. Poderíamos imaginar uma civilização avançadíssima a extrair um *wormhole* transitável dessa espuma quântica, expandindo-o até ele atingir dimensões macroscópicas.

Thomas Roman oferece uma perspectiva mais realista [5]. Suponhamos que um *wormhole* transitável se poderia formar no universo recém-nascido, através de uma flutuação

quântica. Será possível, num cenário inflacionário do universo, converter um *wormhole* quântico num *wormhole* com dimensões clássicas?

Qualquer esperança de construir um *wormhole* depende da futura descoberta de um campo exótico, ou seja, de um estado quântico cuja tensão exceda a densidade de energia à escala macroscópica. Mas mesmo que um tal campo exótico existisse, há outras dificuldades, nomeadamente: a mecânica quântica poderá proibir uma mudança topológica do espaço-tempo, ou os *wormholes* serem altamente instáveis, e a matéria exótica acoplar fortemente com a matéria normal, o que impediria a travessia.

Outra consideração assombrosa acerca dos *wormholes* é a sua possível utilização como máquinas do tempo, embora tal viole aparentemente a causalidade...

Em conclusão: apesar das dificuldades apresentadas, não existe uma prova irrefutável da inexistência de *wormholes* como soluções das equações de Einstein da gravitação. Portanto, não nos resta senão admitir *wormholes* transitáveis no espaço-tempo como uma possibilidade teórica e continuar a investigar a matéria exótica e todas as outras consequências incómodas associadas aos *wormholes*.

* Departamento de Física e Centro de Física Nuclear da Universidade de Lisboa

Av. Prof. Gama Pinto, 2 1699 Lisboa

crawford@cosmo.cii.fc.ul.pt

Referências:

- [1] Morris, M. S. e Thorne, K. S., "Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity", *American Journal of Physics* 56 (1988) 395-411.
- [2] Crawford, P. e Simões, A. I., "Tempo e Relatividade I e II", *Gazeta de Física*, Vol 9 (1986), 36-40 e 49-56.
- [3] Visser, M., "Lorentzian wormholes: From Einstein to Hawking", AIP Press, New York, 1995.
- [4] Thorne, K. S., "Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy", Papermac, New York, 1995.
- [5] Roman, T. A., "Inflating Lorentzian wormholes", *Physical Review D* 47 (1993), 1370-1379.

Créditos das Figuras:

Figs. 1 e 2: Ref. [1]. Figs. 3, 4, 5 e 6: Ref. [4].