

# Colidindo buracos negros

VÍTOR CARDOSO E CARLOS HERDEIRO

**BURACOS NEGROS SÃO OBJECTOS ASTROFÍSICOS EXTREMAMENTE FASCINANTES. UM DOS EVENTOS MAIS ESPECTACULARES E VIOLENTOS DO COSMOS É A COLISÃO DE DOIS BURACOS NEGROS. APÓS DÉCADAS DE TENTATIVAS, OS FÍSICOS CONSEGUIRAM FINALMENTE PROGRESSOS IMPORTANTES EM RELATIVIDADE NUMÉRICA, QUE JÁ PERMITEM COMEÇAR A ENTENDER ESTES EVENTOS.**

## ONDAS GRAVITACIONAIS: JANELAS SOBRE O UNIVERSO

Se por artes de magia, o Sol desaparecer num certo instante, o movimento da Terra será afectado imediatamente, de acordo com a teoria da gravitação Newtoniana. No entanto, esta resposta é inaceitável; significa que a teoria da gravitação Newtoniana tem uma propagação instantânea, violando assim, os princípios de causalidade da relatividade restrita,

nomeadamente o de que nenhum sinal se pode propagar com uma velocidade superior à da luz no vazio.

O problema foi resolvido com o advento da teoria da gravitação relativista de Albert Einstein, denominada “Relatividade Geral”. Esta teoria descreve o campo gravítico de um corpo através de deformações do espaço e do tempo. Assim, podemos imaginar o espaço na ausência de fontes gravíticas como um lençol esticado na horizontal, enquanto que, na presença dessas fontes – uma estrela, por exemplo –, o espaço “afunda” como se colocássemos sobre o lençol uma bola pesada (ver Fig. 1). Einstein compreendeu que, nesta descrição, o desaparecimento do Sol seria “anunciado” a todo o cosmos sob a forma de uma variação ondulatória da geometria do espaço-tempo. Isto é, ao retirarmos a bola do lençol, ondas “sísmicas” circulares propagam-se sobre ele, com epicentro no local de onde a bola desapareceu e com uma certa velocidade. No caso do espaço-tempo, essa velocidade é exactamente igual à da luz e as ondas chamam-se “ondas gravitacionais”.

Em 1918, após alguns avanços e recuos, Einstein compreendeu em que condições um sistema emite ondas gravitacionais. A emissão acontecerá sempre que uma propriedade denominada momento quadrupolar do sistema variar no tempo. Na prática, quase todo o tipo de aceleração gera ondas gravitacionais. Um exemplo simples é um sistema binário – por exemplo, uma estrela e um planeta orbitando em torno do centro de massa. Mas enquanto que a emissão do sistema Sol-Terra é extremamente ténue e inobservável, a emissão por um sistema binário de estrelas de neutrões pode produzir efeitos importantes. Em particular, a emissão destas ondas faz o sistema perder energia, o que provoca uma pequena variação no movimento de cada estrela: ao longo do tempo, estas aproximam-se mutuamente, diminuindo o período orbital, numa espiral que acaba quando as duas estrelas colidem. Este efeito foi detectado graças à descoberta, em 1974, por Russell Hulse e Joseph Taylor, de um sistema

A emissão por um sistema binário de buracos negros, especialmente na fase final em que estes estão próximos e coalescem, deverá ser um dos fenómenos mais espectaculares na natureza, no que toca à emissão de ondas gravitacionais.

As ondas gravitacionais interagem muito fracamente com a matéria, e é por essa razão que são tão importantes: ao contrário da luz – que é absorvida, espalhada e reflectida por poeira cósmica (por exemplo) –, as ondas gravitacionais transportam informação pura sobre como e onde nasceram. Deste modo, a observação de ondas gravitacionais abre uma janela completamente nova no universo, permitindo perceber objectos muito densos e massivos como buracos negros e estrelas de neutrões – e talvez o próprio início do universo.

Desde a década de 1960, altura em que se desenrolaram as experiências pioneiras de Joseph Weber, a observação directa de ondas gravitacionais tem sido um dos grandes

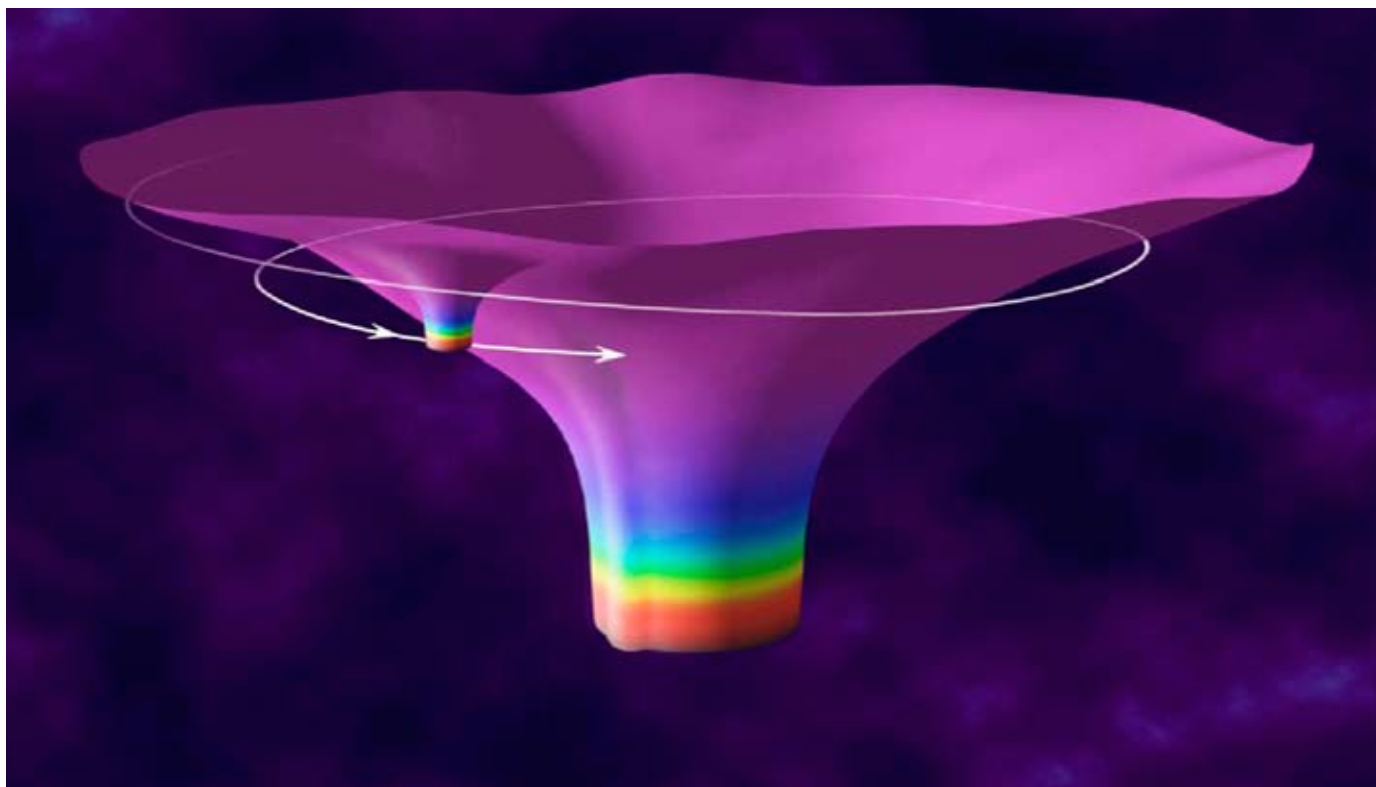


Figura 1 - Em Relatividade Geral, a gravitação é curvatura. Um corpo a orbitar em torno de outro, como a Terra em torno do Sol, é descrito em termos de curvatura da “geometria”. As ondas gravitacionais são pequenas oscilações que se propagam nesta geometria.

binário de estrelas de neutrões em que foi possível medir, ao longo de quase duas décadas, a variação do período orbital do sistema, verificando-se que estava em perfeito acordo com a previsão da Relatividade Geral para o sistema em questão. Esta descoberta valeu-lhes o Nobel da Física de 1993, por ter permitido a detecção indirecta de ondas gravitacionais.

desafios tecnológicos inspirados pela ciência fundamental (o facto destas ondas interagirem muito fracamente é um senão quando as queremos “ver” num detector). Existe actualmente um comité internacional (GWIC, *Gravitational Wave International Committee*) cujo papel é facilitar e promover a cooperação entre os vários detectores de ondas gravitacionais que estão a ser desenvolvidos e planeados (Advanced LIGO, Advanced VIRGO, GEO 600, TAMA/LCGT,

AIGO, LISA, etc). O investimento nestes detectores torna fundamental a existência de previsões teóricas das características dos sinais de ondas gravitacionais, especialmente para os acontecimentos que poderão fornecer sinais mais fortes, como a coalescência de dois buracos negros. Felizmente, progressos fantásticos na comunidade da relatividade numérica, iniciados por volta de 2005, estão a permitir obter essas previsões.

## RELATIVIDADE NUMÉRICA

Para se compreender o que acontece quando dois buracos negros coalescem é necessário resolver as equações de Einstein. Infelizmente, a complexidade das equações é tal que não se conhece nenhuma “lei de Kepler” em Relatividade Geral, isto é, uma solução que descreva dois corpos em movimento orbital. Chama-se a isto o “problema dos dois corpos”.

Este impasse resolve-se com força bruta: escrevem-se as equações de Einstein numa forma que um computador consiga entender e espera-se até que este faça o seu trabalho. As primeiras tentativas de reescrever as equações de Einstein para um computador datam dos anos 70, com os esforços pioneiros de Hahn, Lindquist, Smarr, Eppley, etc. Foi nesta altura que, pela primeira vez, se “colidiram” buracos negros num supercomputador, partindo do repouso a uma certa distância e chocando frontalmente. Simulações numéricas que durassem muito tempo, como por exemplo num binário de buracos negros espiralando até à coalescência, eram impossíveis de fazer. A razão era prática, uma vez que o poder computacional era limitado, mas também teórica, pois apareciam instabilidades numéricas. Nos anos 90, com supercomputadores poderosos, organizou-se uma tentativa ambiciosa de resolver o problema dos dois corpos, a que se chamou “Binary Black Hole Grand Challenge Alliance”. Esta aliança reunia vários peritos, muitos alunos e milhões de euros com o propósito único de simular nume-

ricamente dois buracos negros em órbita em torno um do outro. O desafio não foi ultrapassado na altura, e o investimento foi, sob algumas perspectivas, um fracasso. A razão era conhecida: ao fim de meio ciclo, o computador dava erro. Mais uma vez, apareciam instabilidades numéricas.

Em 2005, Frans Pretorius, um jovem físico do California Institute of Technology (agora em Princeton), conseguiu ultrapassar todas as dificuldades. Seguiu-se uma actividade frenética de todos os grupos com códigos “moribundos” com o objectivo de os reavivar, de acordo com as sugestões de Frans. Em pouco tempo, existia já uma mão cheia de grupos no mundo capazes de resolver numericamente o problema dos dois corpos em Relatividade Geral. Esta fase, que é conhecida como a fase áurea da Relatividade Numérica, continua até aos dias de hoje.

## NOVOS FENÓMENOS

As primeiras simulações numéricas mostraram algo surpreendente: quando os dois buracos negros coalescem, dão origem a um único buraco negro com uma grande velocidade de recuo; um fenómeno baptizado de *black hole kicks!* Isto apenas acontece se os dois buracos negros tiverem massa diferente; nesse caso a radiação gravitacional transporta momento linear, pelo que o buraco negro final tem necessariamente uma certa “velocidade de recuo”. O espantoso é que esta velocidade de recuo pode atingir 170 Km/s se os buracos negros não tiverem rotação (*spin*), e mais de 1000 Km/s se tiverem *spins* apropriados. Ora estas velocidades podem ser suficientes para cuspir o buraco negro final para fora da galáxia: dependendo da massa desta, a velocidade de escape é tipicamente inferior a 1000 Km/s. Assim, os *kicks* podem influenciar significativamente tanto a forma como as galáxias e os buracos negros crescem, como a relação entre a massa de uns e outros.

Contudo, o resultado mais aguardado era o sinal gravitacional emitido no processo. Este sinal é importantíssimo para as centenas de físicos que trabalham nos detectores de ondas gravitacionais, pois sem ele é quase impossível fazer uma detecção fiável. Se os dois buracos negros tiverem a mesma massa, a onda gravitacional tem a forma mostrada na Fig. 2. A fase inicial do processo é simples e corresponde a um grande afastamento entre os buracos negros. O sinal é quase sinusoidal, com frequência dupla da frequência orbital. Segue-se uma fase violenta, em que os buracos negros coalescem num único buraco negro final. Este nasce “deformado” e, tal como um sino, vibra até atingir o estado mais natural, que neste caso é um buraco negro em rotação. Estas vibrações sinusoidais amortecidas

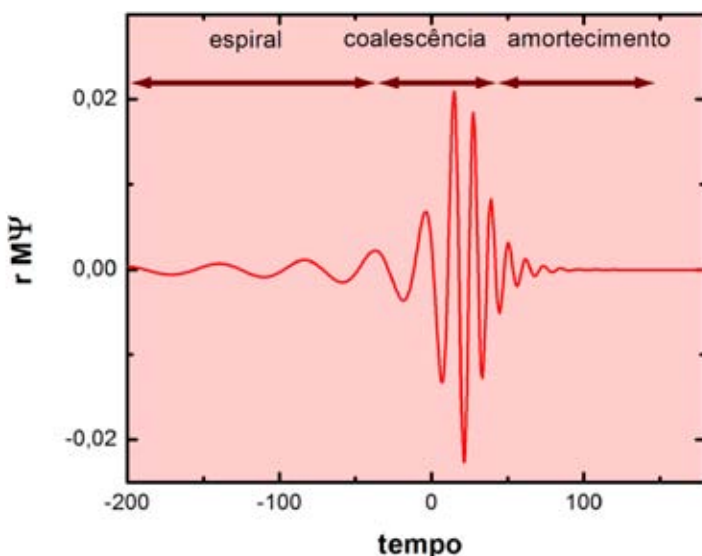


Figura 2 - Onda gravitacional gerada na fase final da vida de um sistema binário de buracos negros, cada um com  $10^5$  massas solares. Em  $t=0$  forma-se um horizonte de eventos comum, isto é, corresponde ao aparecimento do buraco negro final. A quantidade  $\Psi$  mede a curvatura (“escalar de Weyl”) do espaço-tempo, e é observada no plano orbital.

são conhecidas como oscilações quasi-normais dos buracos negros. O sinal da Fig. 2 está neste momento a ser procurado no meio dos dados que os detectores de ondas gravitacionais debitam.

Finalmente, a Relatividade numérica permitiu estudar um dos exemplos mais excitantes de processos com buracos negros: a colisão ultra-relativista entre buracos negros. Este é um importante e antigo problema em Relatividade Geral. Sendo extremamente violento, não há ferramentas analíticas que consigam descrever o processo: é necessário resolvê-lo no computador. Pensava-se que, devido à violência do choque, poderia ser possível que o objecto final fosse uma singularidade nua no espaço-tempo, algo de estranho e indesejável. Os resultados numéricos mostram que não: a colisão de dois buracos negros a grande velocidade produz, no final, um novo buraco negro, e radia cerca de 14% da energia inicial do sistema sob a forma de ondas gravitacionais. Este é o processo mais eficiente que se conhece para “geração” de energia – 14% parece pouco, mas é uma quantidade enorme! Em comparação, numa reacção nuclear apenas algumas fracções de percentagem da massa em repouso são convertidas em energia. Uma animação deste processo pode ser vista na Ref. [5], onde é claro que o buraco negro final também está a vibrar.

## O FUTURO

Os resultados descritos atrás foram obtidos nos últimos dois anos, o que deixa antever o enorme potencial do campo. Há muito para fazer e aprender. Dada a complexidade, o problema só será resolvido através de colaborações internacionais. Físicos portugueses estão também empenhados em contribuir, existindo neste momento uma colaboração internacional que envolve um grupo do Instituto Superior Técnico e outro da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

A física de buracos negros tem assumido na última década um papel fulcral não só em Astrofísica mas também em física de altas energias e física fundamental. A única forma de entender estes objectos, especialmente na presença de uma forte dinâmica, é perscrutando as equações de Einstein com técnicas numéricas, à procura de novos fenómenos e efeitos. Podemos tentar antecipar as surpresas que iremos encontrar mas, como nos ensinou o mestre Arthur C. Clarke no prólogo do seu clássico “2001 Odisseia no Espaço”, a “realidade será sempre mais estranha do que a ficção.”

### Referências

[1] Frans Pretorius, “Binary black hole coalescence”, e-Print: arXiv:0710.1338 [gr-qc]  
[2] Ulrich Sperhake, Vitor Cardoso, Frans Pretorius, Emanuele Berti, Jose Gonzalez, “The high-energy collision of two black holes”, Phys. Rev. Lett. 101, 161101 (2008). e-Print: arXiv:0806.1738 [gr-qc]

[3] Jose Gonzalez, Mark Hannam, Ulrich Sperhake, Bernd Bruegmann, Sascha Husa, “Supermassive recoil velocities for binary black-hole mergers with antialigned spins”, Phys. Rev. Lett. 98, 231101 (2007). e-Print: gr-qc/0702052

[4] Davide Castelvecchi, “No naked black holes”, Science News, [http://www.sciencenews.org/view/generic/id/37200/title/No\\_naked\\_black\\_holes](http://www.sciencenews.org/view/generic/id/37200/title/No_naked_black_holes)  
[5] <http://gamow.ist.utl.pt/~vitor/highenergycollisions.html>



Carlos Herdeiro é investigador no Centro de Física da Universidade do Porto. Doutorou-se em 2001 na Universidade de Cambridge, Inglaterra, foi post-doc na Universidade de Stanford (EUA), e Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP). De 2003 a 2008 foi Prof. Auxiliar Convocado do Departamento de Física da FCUP. Desde 2007 é presidente da delegação norte da Sociedade Portuguesa de Física. Recebeu em 2005 um Prémio de Estímulo à Investigação da Fundação Calouste Gulbenkian pelo seu trabalho de ligação entre teoria de cordas e cosmologia. A sua pesquisa incide ainda sobre a física de buracos negros.

Vitor Cardoso é investigador no Instituto Superior Técnico (IST), onde trabalha no CENTRA, no Departamento de Física do IST, e Professor Adjunto na Universidade do Mississippi, onde está neste momento como cientista Fulbright e membro da colaboração científica do LIGO. Previamente, foi investigador de pós-doutoramento nas Universidades de Coimbra, Washington em St. Louis, e Mississippi. A sua pesquisa incide principalmente sobre fontes de ondas gravitacionais e a sua detecção, e também sobre efeitos gravitacionais em colisões relativistas.

