

Ondas gravitacionais do universo primordial

António P. Morais

Departamento de Física, Escola de Ciências, Universidade do Minho
LIP Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas

amorais@fisica.uminho.pt

Quatro interações

Quando olhamos para o Universo atual e para as grandes estruturas que o constituem, como por exemplo planetas, estrelas, sistemas solares ou galáxias, é com naturalidade que aceitamos a existência de uma força que governa toda a sua dinâmica: a gravidade.

Desde tenra idade que nos habituamos a conviver com esta interação e a experienciar os seus efeitos, como a queda no recreio (e as marcas que nos vai deixando na pele, algumas para a vida), até ao lançamento de dardos num bar, numa noite animada entre amigos. Contudo, a gravidade não é a única força que tem impacto no nosso dia a dia. É difícil imaginar a viabilidade da civilização moderna sem a presença de eletricidade e magnetismo nas suas mais diversas utilidades. O simples ato de podermos observar o Universo, tanto a olho nu como com instrumentos óticos, e constatar a presença de corpos celestes, só é possível devido à existência da interação eletromagnética, que é, como sabemos, uma descrição unificada da eletricidade e do magnetismo. Isto deve-se não só à tecnologia aplicada em toda a instrumentação moderna para este efeito, mas, acima de tudo, devido à existência de uma partícula mensageira da força eletromagnética, o fóton, que, ao longo dos tempos, nos tem trazido informação sobre os pontos mais remotos do Universo.

Tanto a força gravítica como a força eletromagnética representam interações de longo alcance e, por isso, em escalas muito grandes, podendo ser descritas pelas leis da Física Clássica. Por outro lado, em escalas muito pequenas, ou seja, em regimes de *altas energias*, a interação eletromagnética obedece às leis da Mecânica Quântica. Contudo, o mesmo já não acontece com a gravidade, uma vez que, até hoje, não foi desenvolvida uma teoria quântica consensual que a descreva no contexto da física das altas energias.

Embora menos familiar para muitos de nós, mas não menos importante tanto do ponto de vista tecnológico como para a evolução do próprio Universo, encontram-se duas forças de carácter puramente quântico, que são as forças nuclear forte e nuclear fraca. Enquanto a primeira é responsável por fenómenos como a fissão nuclear, desempenhando um papel crucial na produção de energia em centrais nucleares, a segunda está na origem do decaimento radioativo e, em conjunto com

a força forte, é essencial para manter o sol a brilhar, condição indispensável para a existência de vida no nosso planeta.

Observando o Universo invisível: das partículas elementares às ondas gravitacionais primordiais

Como consequência da sua natureza quântica, as interações forte, fraca e eletromagnética explicam a existência de um conjunto de partículas elementares que compõem o que designamos por Modelo Padrão [1, 2] da física das altas energias. Deste conjunto, apenas algumas partículas persistem no Universo atual. Referimo-nos ao que denominamos por quarks de primeira geração — os constituintes fundamentais dos prótons e neutrões — bem como eletrões, neutrinos e fótons. Contudo, se recuarmos até ao Universo primordial, quando este tinha menos de um décimo de nanossegundo de existência após o Big-Bang, encontramos um ambiente extremamente quente e denso, preenchido por todas as partículas do Modelo Padrão. Nessa fase, as partículas moviam-se livremente e interagiam a velocidades relativistas. Embora o Universo visível mais antigo que conseguimos observar tenha cerca de 380 milhões de anos, é possível, através de experiências de colisão de partículas, recriar em laboratório as condições de épocas muito mais jovens. No entanto, a tecnologia atual ainda não nos permite ir muito além de um milésimo de nanossegundo após o Big-Bang — período que designamos por época eletrofraca — sendo fundamental para esse efeito o contributo de máquinas altamente sofisticadas como Grande Colisor de Hadrões, LHC [3], do CERN. Resta ainda um vasto intervalo temporal até à época em que se acredita que o Universo terá passado por um crescimento exponencial, conhecido como inflação cósmica, quando tinha aproximadamente dez elevado à potência de menos trinta e dois segundos de existência.

Chegados a este ponto, impõe-se uma questão fundamental: *Como podemos estudar o Universo que existiu entre as eras eletrofraca e inflacionária?* É precisamente aqui que em 2015 a descoberta de ondas gravitacionais nos abriu uma nova janela de exploração, ampliando significativamente o leque de escalas de energia que podemos potencialmente investigar com dados observacionais, e com um alcance muito superior ao das experiências de colisão de partículas. Importa, no entanto, sublinhar que estas experiências não são substituíveis por experiências de ondas gravitacionais. Só através do ambiente controlado das colisões de partículas temos acesso direto a

nova física, podendo descobrir e medir muitas das suas propriedades. No caso das ondas gravitacionais, esse acesso a fenômenos ainda por desvendar é feito de forma indireta, uma vez que estamos a medir um efeito cosmológico resultante de setores ainda desconhecidos. Em teoria, estes setores podem manifestar-se sob a forma de uma vasta gama de partículas e interações, sem que seja possível, com ondas gravitacionais, determinar as propriedades exatas dessas partículas, como massa, carga ou modos de decaimento, entre outros.

Inflação cósmica: as mais antigas ondas gravitacionais

Quando no parágrafo anterior nos referimos a escalas de energia, estamos a falar de períodos da história do Universo que vão desde a época eletrofraca, caracterizada por uma escala de massa/energia das partículas da ordem de 100 gigaelétron-volts, até à época inflacionária, cuja escala energética atinge cerca de dez elevado a quinze gigaelétron-volt. Enquanto o LHC, no CERN, não ultrapassa a escala do teraeletrão-volt, que, neste contexto, corresponde essencialmente à escala eletrofraca, as diversas experiências de deteção de ondas gravitacionais, tanto as já em funcionamento como as planeadas, permitem-nos cobrir todo este espectro de energia. Mas, afinal, que física esperamos desvendar com estas experiências e que conclusões podemos retirar? Começando pela época inflacionária, esta correspondeu a um período de expansão extremamente rápido durante o qual a densidade de energia do Universo foi dominada pela energia do vácuo, cujo valor é extraordinariamente pequeno, sendo este um problema ainda por explicar. Mesmo neste estado de energia mínima, a mecânica quântica prevê a existência de flutuações na densidade de energia e na geometria do espaço-tempo, que são amplificadas para grandes escalas astrofísicas devido à expansão do Universo. São precisamente estas flutuações, geradas à microescala e ampliadas à macroescala, que atuam como fontes de ondas gravitacionais primordiais e que, desde essa época, se têm propagado livremente pelo Universo até poder chegar aos nossos detetores. Nos modelos inflacionários mais simples, a frequência dessas ondas gravitacionais do Universo primordial situa-se preferencialmente na região do herz, podendo constituir uma possível explicação para as recentes observações de NANOGrav [4, 5]. Embora estas observações ainda não cumpram os critérios estatísticos necessários para reivindicar uma descoberta, representam já uma evidência extraordinária para a existência de um fundo de ondas gravitacionais compatível com fontes de origem cosmológica.

Transições de fase: o Universo a borbulhar

Apesar de até hoje não termos descoberto novas partículas para além daquelas previstas pelo Modelo Padrão, sabemos que estas representam apenas cerca de 5 % do Universo. O restante está repartido entre matéria escura e energia escura, que correspondem a 27 % e 68 % do Universo, respetivamente. Para além disso, as massas extremamente leves dos neutrinos, inferiores a 0,1 eletrão-volt, também não encontram explicação no âmbito do Modelo Padrão. Estes dados observacionais sugerem fortemente a existência de novas partículas, que até hoje não foram descobertas em experiências de colisão, como o LHC ou os seus antecessores. Se considerarmos que estas partículas pertencem a um setor escuro, é natural que interajam muito fracamente com os 5 % de matéria visível,

tornando a sua deteção experimental direta um enorme desafio, possivelmente fora do alcance da tecnologia atual. Por outro lado, a eventual existência destas mesmas partículas teria impacto no estado de energia mínima do Universo (o vácuo) e influenciaria a forma como este terá evoluído, em contraste com o que é previsto pelo Modelo Padrão. Ora, isto levanta a possibilidade da coexistência de múltiplos vácuos com energias diferentes, que podem evoluir ao longo do tempo, alterando os seus valores de energia. Ou seja, se imaginarmos que inicialmente existiam dois vácuos, A e B, com energias $E(A) < E(B)$, o Universo poderá ter evoluído para um estado em que $E(B) < E(A)$. Como a natureza nos demonstra repetidamente, tanto em sistemas clássicos como quânticos, o estado que minimiza a energia é sempre o vácuo preferencial. Por exemplo, se largarmos um berlinde numa calha parabólica, este irá sempre estabilizar no ponto mais baixo, e nunca fora dele. Isto significa que, inicialmente, o Universo poderia encontrar-se no estado A e ter experienciado uma transição de fase para o estado B a partir do momento em que $E(B) < E(A)$. Esta transição de A para B é acompanhada pela libertação de uma quantidade assinalável de energia, que conduz à formação de bolhas no Universo primordial, as quais se expandem e colidem. Esta expansão ocorre num meio denso que se comporta como um fluido, onde são geradas ondas sonoras que podem ser parcialmente ou totalmente convertidas em radiação gravitacional observável. Em situações extremas, quando as bolhas se expandem praticamente à velocidade da luz, a colisão entre as suas paredes pode dominar a produção de ondas gravitacionais.

Podemos estabelecer uma analogia entre este processo e o funcionamento de um fervedor de água. Inicialmente em repouso, ao aquecemos a água até 100 °C, ocorre a transição de fase do estado líquido (vácuo A) para o estado gasoso (vácuo B), durante a qual se formam bolhas de vapor que se expandem e colidem, gerando ondas mecânicas. Contudo, há uma diferença importante que devemos assinalar: no exemplo do fervedor, é necessário fornecer energia para produzir as ondas mecânicas, enquanto no Universo primordial este *borbulhar* ocorreu à medida que o Universo arrefecia.

As ondas gravitacionais primordiais resultantes de transições de fase [6] constituem um mensageiro extraordinário para determinar a escala de energia onde pode existir física para além do Modelo Padrão. A frequência destas ondas está relacionada com a escala de massa das hipotéticas novas partículas, pelo que uma eventual deteção poderá fornecer indicações valiosas sobre onde procurar essas partículas em futuras experiências de colisão. Por outro lado, a ausência de deteção permitirá impor restrições importantes às teorias atualmente desenvolvidas. Por exemplo, a experiência LISA [7], que deverá entrar em funcionamento na próxima década, será sensível a escalas de energia que vão desde o gigaelétron-volt até aproximadamente dez elevado a seis gigaelétron-volt, abrangendo, assim, a região que anteriormente designámos por eletrofraca. Os resultados obtidos por esta experiência poderão ser cruzados com futuras medições no LHC ou em aceleradores do futuro, como o FCC (*Future Circular Collider*) [8], permitindo a procura de nova física em diferentes e complementares frentes.

Experiências como LIGO [9], atualmente em funcionamento, ou o *Einstein Telescope* [10], que deverá iniciar a sua operação também durante a década de 2030, permitem aceder a escalas de massa superiores às que serão cobertas por LISA, possibilitando testar de forma indireta fenómenos físicos que estão fora do alcance das experiências de colisão.

Embora tenhamos centrado a nossa discussão em fenómenos que se manifestam à escala eletrofraca e a energias mais elevadas, é igualmente possível que existam setores escuros a escalas de energia inferiores. Nestes casos, também podem ocorrer transições de fase, mas que resultam em ondas gravitacionais com frequências mais baixas. Por exemplo, se a escala de energia for da ordem do megaeletrão-volt, podemos prever sinais com frequências acessíveis a experiências como NANOGrav.

Defeitos topológicos

Sempre que ocorrem transições de fase no Universo primordial, estas podem ser acompanhadas pela formação de defeitos topológicos, como cordas cósmicas [11] ou paredes de domínio [12]. As cordas cósmicas podem ser visualizadas como um análogo das fendas que se formam na água ao congelar. A interação entre cordas cósmicas pode dar origem a laços que ao vibrar perdem energia através da emissão de ondas gravitacionais. Por sua vez, as paredes de domínio surgem quando existem pelo menos dois vácuos, B e C, com energias equivalentes (ainda que não exatamente iguais), permitindo que diferentes regiões do Universo transitem do vácuo A para o vácuo B ou para o vácuo C com probabilidades semelhantes. No entanto, basta uma pequena diferença entre as energias $E(B)$ e $E(C)$ para destabilizar as paredes de domínio, levando ao seu colapso e consequente emissão de energia sob a forma de radiação gravitacional.

Conclusão

Em suma, discutimos quatro tipos de fontes de ondas gravitacionais do Universo primordial: inflação, transições de fase, cordas cósmicas e paredes de domínio. Cada uma destas fontes apresenta características próprias, como a largura do espectro, a frequência (ou frequências) onde a densidade de energia da radiação gravitacional é máxima, a forma do espectro, entre outros detalhes mais subtis. Ao conhecermos estas propriedades, a deteção de um sinal poderá permitir discriminar quais as fontes que deram origem e que escalas de energia estão envolvidas. Embora tal não conduza à descoberta direta de novas partículas, possibilita identificar as classes de modelos de física das altas energias que podem explicar um fenómeno deste tipo. No cenário mais otimista, esta informação poderá ser de grande importância para orientar futuras buscas diretas em aceleradores de partículas, e, eventualmente, levar a descobertas. Afinal, quão valioso seria para as experiências de colisão dispor de uma indicação concreta sobre a escala de energia onde nova física se poderá manifestar? Por outro lado, a ausência de deteção deste fenómeno tornaria os setores escuros ainda mais escuros, impondo novas restrições a muitos dos modelos teóricos existentes na literatura científica.

Em jeito de conclusão, a força que nos fazia cair no recreio e

esfolar os joelhos quando éramos crianças é a mesma que, hoje, nos permite investigar onde se escondem as partículas ainda por descobrir e compreender de que forma o Universo evoluiu desde o final do período inflacionário até aos nossos dias.

Referências

- [1] <https://home.cern/science/physics/standard-model>
- [2] M. K. Gaillard, P. D. Grannis, F. J. Sciulli, The Standard model of particle physics, *Rev. Mod. Phys.* 71 (1999), S96-S111
- [3] <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>
- [4] G. Agazie et al. (NANOGrav), The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background, *Astrophys. J. Lett.* 951, L8 (2023), 2306.16213.
- [5] Y. Cai, Y.-T. Wang, and Y.-S. Piao, *JHEP* 03, 024.
- [6] D. J. Weir, Gravitational waves from a first order electroweak phase transition: a brief review, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A* 376 (2018), no. 2114 20170126, [1705.01783].
- [7] LISA Collaboration, P. Amaro-Seoane et al., *Laser Interferometer Space Antenna*, 1702.00786.
- [8] <https://home.cern/science/accelerators/future-circular-collider>
- [9] KAGRA, Virgo, LIGO Scientific Collaboration, R. Abbott et al., Upper limits on the isotropic gravitational-wave background from Advanced LIGO and Advanced Virgo's third observing run, *Phys. Rev. D* 104 (2021), no. 2 022004.
- [10] M. Punturo et al., The Einstein Telescope: A third-generation gravitational wave observatory, *Class. Quant. Grav.* 27 (2010) 194002.
- [11] A. Vilenkin, Gravitational radiation from cosmic strings, *Phys. Lett. B* 107 (1981) 47-50.
- [12] T. W. B. Kibble, Topology of Cosmic Domains and Strings, *J. Phys. A* 9 (1976) 1387-1398.



António Moraes é Professor Auxiliar no Departamento de Física da Escola de Ciências da Universidade do Minho e investigador integrado no grupo de fenomenologia do LIP (Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas). Desenvolve investigação em Física de Partículas e Cosmologia na sua vertente teórica, com ênfase recente no estudo de ondas gravitacionais do Universo primordial. Licenciou-se em Física em 2007 pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), onde também concluiu o Mestrado em Física Nuclear e de Partículas em 2009. Obteve o grau de Doutor em 2014 pela Universidade de Glasgow. Entre 2014 e 2019, realizou investigação pós-doutoral na Universidade de Aveiro e na Universidade de Lund, Suécia. De 2019 até final de 2024, foi investigador júnior no CIDMA (Centro de Investigação e Desenvolvimento em Matemática e Aplicações) da Universidade de Aveiro, integrando o grupo gr@v e coordenando a subárea de Física das Altas Energias. Entre outubro de 2023 e maio de 2024, exerceu funções como Scientific Associate no Departamento de Física Teórica do CERN. Desde então, permanece ligado à instituição na qualidade de Visitor Scientist.