

Um rumor primordial

Lara Sousa

Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Centro de Astrofísica da Universidade do Porto

lara.sousa@astro.up.pt

Fomos desvendando a história do universo vendo-o. A luz dos corpos astronómicos – dos planetas, das estrelas, das galáxias, ... – demora algum tempo a chegar até nós porque se propaga com uma velocidade finita. Por isso, vemos estes corpos astronómicos não como são agora, mas como eram quando a luz foi emitida ou refletida. Vemos a lua de há 1,25 segundos e o sol de há 8 minutos. A Próxima Centauri, a estrela mais próxima a seguir ao Sol, parece-nos 4 anos mais nova e a imagem de Andrómeda, uma das galáxias mais próximas, já é de há mais de 2,5 milhões de anos. Quando olhamos para o céu, vemos então o passado do universo e vemo-lo tão mais novo quanto para mais longe apontarmos os nossos telescópios. Foi assim que fomos descobrindo como o universo era no passado e assim aprendemos quase tudo o que sabemos sobre como evoluiu. Mas o início do universo está fora do alcance dos nossos olhos e telescópios e, por isso, continuamos sem saber exatamente como tudo começou.

Aprendemos que o universo começou muito denso e quente, mas que tem expandido e arrefecido desde esse momento inicial [1]. Se viajarmos para o passado, à medida que a temperatura vai aumentando, primeiro os átomos ionizam-se, depois os núcleos dos átomos separam-se em prótons e neutrões e eventualmente estes também se desfazem nas partículas elementares que os constituem (os quarks) ... O universo seria então uma espécie de sopa de partículas elementares e, por isso, opaco à propagação da luz, já que os fótons não conseguiriam viajar grandes distâncias sem interagirem com as partículas carregadas deste plasma. Só quando o universo arrefeceu o suficiente para que os eletrões e prótons se pudessem combinar e formar átomos neutros de hidrogénio é que os fótons conseguiram desacoplar da matéria. Passaram então a poder viajar livremente pelo espaço e eventualmente chegar até nós. Foi nesta altura, 379 mil anos depois do início da vida do universo, que se gerou a primeira luz, a chamada radiação cósmica de fundo (Fig. 1). Detetámos, pela primeira vez, esta primeira luz em 1965 (mas tinha sido prevista vários anos antes) e, desde essa altura, temo-la estudado em detalhe com satélites mais e mais sensíveis. Foi com ela que aprendemos muito do que sabemos sobre o universo [2]. Mostrou-nos, por exemplo, que o universo é extremamente homogéneo e isotrópico e, por isso, é muito parecido em todo o lado e qualquer que seja a direção em que olhemos. Mas nunca vamos conseguir ver nada para além dela.

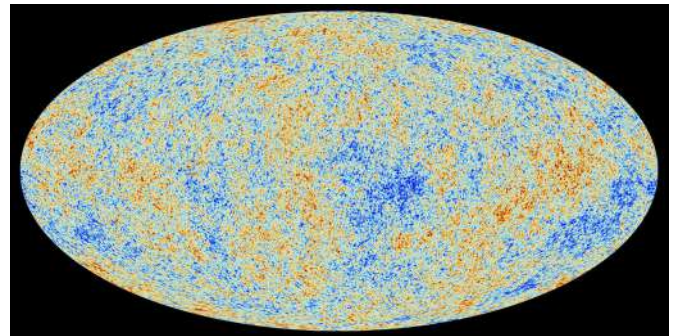


Figura 1: Imagem de céu completo da radiação cósmica de fundo captada pelo satélite Planck. Imagem: ESA/Planck Collaboration

Mas, se o universo primordial é o reino das partículas, precisamos de física de partículas para percebê-lo. Espera-se que, no início da vida do universo, as quatro interações fundamentais – a gravidade, o eletromagnetismo, a força fraca (que rege as interações subatómicas) e a força forte (que confina os quarks em partículas e mantém os núcleos dos átomos ligados) – tenham estado unificadas e fossem descritas por uma única força. No entanto, à medida que expandiu e arrefeceu, o universo terá passado por várias transições de fase em que estas interações se terão separado progressivamente. Terá sido algo muito semelhante ao que acontece, por exemplo, com a água se a arrefecermos progressivamente a partir de temperaturas muito altas: passamos de vapor de água a água líquida e depois a gelo. A cada transição de fase as propriedades mudam. Se pensarmos, por exemplo, na solidificação da água, vemos que esta desenvolve uma estrutura cristalina: as moléculas de água passam a orientar-se ao longo de direções preferenciais. No seu estado líquido, a água é isotrópica, não tem direções preferidas e as propriedades não dependem da direção. Quer isto dizer que, se fizermos uma rotação num dado ponto em torno de qualquer eixo, as propriedades da água se mantêm inalteradas. Matematicamente dizemos que um sistema tem uma dada simetria se for invariante segundo um determinado grupo de transformações. Diz-se, por isso, que a água líquida tem simetria de rotação. Quando se forma o gelo nesta transição, a água deixa de ter esta simetria e passa para um estado menos simétrico. Houve, por isso, uma quebra de simetria. Nas transições de fase por que terá passado o universo primordial terá havido também quebras de simetria e, neste contexto, isto é particularmente importante: não foi só o estado da matéria contida no universo e as suas propriedades que se

alteraram a cada quebra de simetria, também as leis da física foram mudando subitamente.

A Emmy Noether [3] demonstrou, em 1918, que aquilo a que chamamos leis da física – as leis que nos dizem que determinadas quantidades são conservadas – resultam precisamente das simetrias (contínuas) do sistema físico. Por exemplo, a energia conserva-se se o sistema for invariante sob translações temporais e, por isso, as equações do movimento forem as mesmas em cada instante de tempo. O momento linear conserva-se se as equações do movimento forem as mesmas em todo o lado e o sistema tiver simetria de translação. Já o momento angular deve ser conservado se houver simetria de rotação. As leis da física resultam então da simetria do sistema e devem, por isso, alterar-se quando há uma quebra de simetria. Assim, à medida que o universo primordial foi passando por sucessivas transições de fase com quebra de simetria, as interações fundamentais, que no início da vida do universo seriam descritas por uma simetria comum, foram-se separando sucessivamente – primeiro a gravidade, depois a força forte e, mais recentemente, a força fraca – e parecem-nos agora a baixas temperaturas interações distintas, descritas por leis de conservação independentes.

Sabemos já como descrever o eletromagnetismo e a interação fraca de forma unificada. A teoria que descreve esta força eletrofraca foi proposta por S. Glashow, A. Salam e S. Weinberg na década de 60 e muitas das suas previsões foram verificadas experimentalmente em aceleradores de partículas vários anos depois. Há também várias propostas de Teorias da Grande Unificação, que tentam juntar a força forte à interação eletrofraca, mas ainda não nos foi possível testá-las experimentalmente: a transição de fase em que a força forte se terá separado deve já ter acontecido a temperaturas (ou escalas de energia) tão elevadas que estão fora do alcance dos nossos aceleradores das partículas. A transição de fase em que a gravidade se teria separado teria ocorrido a temperaturas ainda mais altas e, por isso, estaria ainda mais fora do nosso alcance. Mas no caso destas Teorias de Tudo, que tentam descrever de maneira unificada as quatro interações fundamentais e descrever assim toda a física, às limitações experimentais juntam-se ainda dificuldades teóricas e/ou concetuais: é preciso reconciliar a gravidade com a mecânica quântica e, até ao momento, ainda não foi possível desenvolver uma teoria que cumpra todos os requisitos. Há, por isso, inúmeras propostas e modelos para descrever o universo primordial e a física fundamental [4] e ainda não conseguimos testá-las devidamente de forma experimental. Apesar de esforços ao longo de décadas em várias frentes não temos, por isso, ainda uma teoria que explique tudo e continuamos sem saber como tudo começou.

Mas pode haver outra maneira. Quando há transições de fase com quebra de simetria podem gerar-se configurações estáveis dos campos que descrevem as interações a que chamamos defeitos topológicos. Neste contexto, as quebras de simetria acontecem quando, a uma dada temperatura crítica, estes campos se vêm “forçados” a relaxar para um dos estados de vácuo (os mínimos da sua energia potencial) porque isto se torna energeticamente mais favorável. Ora, muitas vezes há mais do que uma escolha: o potencial pode ter mais do

que um mínimo e, em geral, a priori nenhum deles é particularmente favorecido. Não é por isso de esperar que regiões muito distantes do universo “escolham” o mesmo vácuo. O universo contém aliás regiões causalmente desconexas, que estão tão distantes entre si que não podem sequer comunicar já que qualquer sinal, mesmo que viajasse à velocidade da luz, demoraria mais do que a vida do universo a percorrer a distância que as separa. Prevê-se por isso que diferentes regiões do universo escolham estados de vácuo diferentes. Nas fronteiras entre essas regiões, contudo, pode não ser possível aos campos relaxar para um dos mínimos já que têm de variar continuamente no espaço. Formam-se, então, nestas fronteiras os tais defeitos topológicos que são, pura e simplesmente, regiões em que os campos não estão num dos estados de vácuo e em que, por isso, há energia concentrada.

Estes defeitos podem formar-se em vários contextos. Por exemplo, vemo-los frequentemente em laboratório em sistemas de matéria condensada – em cristais líquidos, no grafeno, em ferromagnetes, entre outros – e até em bioquímica, quando as proteínas se “enovlam” para assumir a sua configuração funcional. Encontramos também muitas vezes algo parecido em casa, nos cubos de gelo que há no nosso congelador. Se fizermos gelo lentamente, descendo progressivamente a temperatura da água, há tempo suficiente para as moléculas de água adotarem uma estrutura cristalina perfeitinha. Isto faz com que o gelo fique límpido e transparente. Mas quando pomos uma cuvette com água à temperatura ambiente a temperaturas muito mais baixas no nosso congelador, esta começa a congelar rapidamente a partir dos bordos, onde a água arrefece mais depressa, em direção ao centro do cubo. A estrutura cristalina forma-se então subitamente a partir de vários pontos e, em pontos diferentes, as moléculas não se orientam necessariamente na mesma direção, o que pode levar a defeitos nesta estrutura que tornam o gelo turvo. Ora, se há defeitos em todo o lado, também se devem formar, por um processo semelhante, no universo primordial e foi Tom Kibble quem, em 1976, propôs pela primeira vez a existência destes defeitos cósmicos [5].

Os defeitos topológicos são em geral estáveis – isto é, são uma imperfeição na configuração dos campos que não se pode remover – e prevê-se, por isso, que em geral sobrevivam ao longo da vida do universo até aos dias de hoje. Podemos então tentar detetá-los e estudá-los agora para reconstituir a sequência de transições de fase que aconteceu num passado distante e começar assim a desvendar a física de como tudo começou. As quebras de simetria acontecem quando o estado de vácuo de uma teoria é menos simétrico do que o estado inicial ou, por outras palavras, quando uma transformação que deixaria a teoria invariante transforma um mínimo do potencial noutra mínimo distinto. Assim, quando os campos evoluem para um dos estados de vácuo a simetria é quebrada. Mas, nos defeitos topológicos, os campos não conseguem relaxar para um dos mínimos e, por isso, mantêm-se a simetria original no seu interior. São, por isso, como fósseis do universo primordial em que a simetria e a física persistem inalteradas.

As propriedades dos defeitos topológicos dependem do tipo

de simetria que foi quebrada. Quando se quebra uma simetria de reflexão, podem formar-se paredes de domínio, defeitos topológicos com duas dimensões que separam regiões do universo em que o valor do campo no vácuo é diferente. Se se quebrar uma simetria esférica, podem formar-se defeitos pontuais conhecido por monopólos. Podem também formar-se defeitos com uma dimensão, conhecidos por cordas cósmicas, sempre que houver uma quebra de simetria axial ou cilíndrica (isto é, quando o potencial é invariante segundo rotações em torno de um dado eixo). Estas cordas são configurações dos campos semelhantes a vórtices, parecidas com os redemoinhos que se formam no mar e nos rios quando correntes de água que se movem em direções distintas se encontram. Correspondem a linhas em que há uma grande concentração de energia e têm, tal como o sistema antes da transição de fase que lhes deu origem, simetria axial. Há uma grande variedade de teorias e modelos para o universo primordial que preveem a produção de cordas cósmicas – uma grande parte das Teorias da Grande Unificação, por exemplo – e, por isso, procuramo-las há décadas [6]. Esperávamos encontrar a sua assinatura na radiação cósmica de fundo mas, como interagem gravitacionalmente muito fracamente com a matéria, não houve sinal delas... No entanto, recentemente, com o advento da astronomia de ondas gravitacionais, a esperança de detetá-las foi renovada.

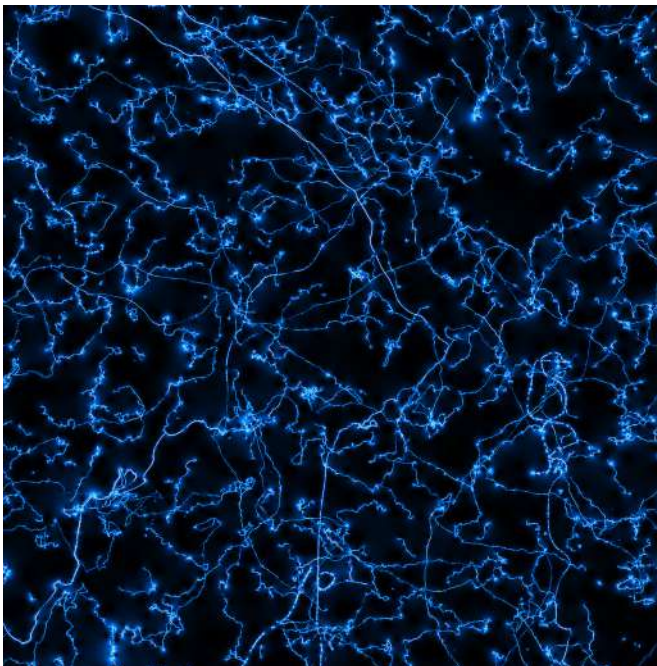


Figura 2: Simulação numérica de uma rede de cordas cósmicas. Imagem: C. Ringeval

As transições de fase com quebra de simetria axial levam à formação de redes de cordas cósmicas, com cordas tão grandes que se estendem ao longo de todo o universo visível (Fig. 2). Estas cordas, tal como as cordas de uma guitarra, têm tensão associada e, por causa dela, as cordas «preferem» estar esticadas: as partes das cordas com maior curvatura aceleram e tendem a colapsar ou vibrar. No entanto, são também esticadas pela expansão do universo, que amortece ainda o seu movimento. Em grande medida, a evolução das redes de cordas cósmicas em grande escala é determinada pela competição entre a aceleração causada pela curvatura e a desaceleração

causada pela expansão. Mas há outro ingrediente essencial: as interações entre cordas. As cordas devem colidir frequentemente na sua evolução e, quando isto acontece, as cordas quebram-se no ponto de contacto e a extremidade de uma corda liga-se à extremidade da outra corda. Diz-se que as cordas trocam de parceiro e reconectam (Fig. 3a). Para os tipos de corda cósmica mais simples este processo, conhecido por intercomutação, acontece sempre que há colisões e espera-se que estas sejam muito frequentes. Formar-se-iam, por isso, em muitas situações – em colisões sucessivas ou em auto-interseções (Figs. 3b e 3c) – argolas fechadas de corda a que chamamos loops. Se estes loops forem suficientemente pequenos, o impacto da expansão do universo na sua evolução é negligenciável e eles deixam de evoluir solidariamente com o resto da rede. A sua dinâmica passa a ser determinada essencialmente pela tensão e passam a oscilar periodicamente, vibrando em vários harmónicos como a corda de uma guitarra. Nestas oscilações os loops de corda atingem velocidades ultra-relativistas e, por isso, devem emitir ondas gravitacionais. À medida que emitem esta radiação, os loops de corda perdem energia e vão-se evaporando lentamente até que desaparecem completamente.

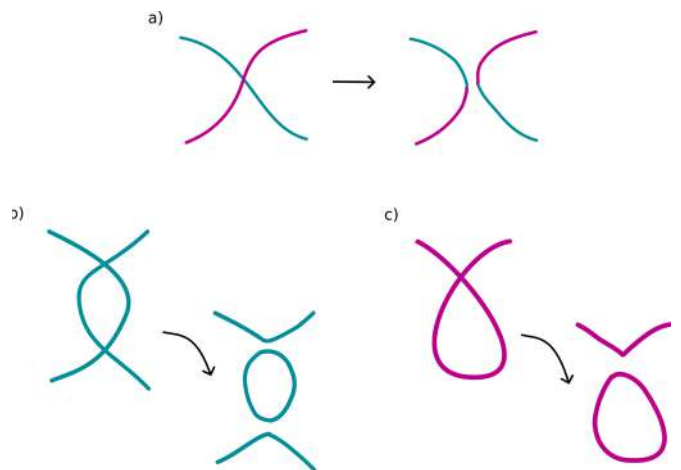


Figura 3: Interações entre cordas cósmicas: a) Intercomutação; b) produção de um loop em colisões entre cordas curvas; c) produção de um loop numa auto-interseção.

Deve haver produção de loops ao longo de quase toda a evolução da rede de cordas cósmicas e, portanto, ao longo de uma grande parte da vida do universo. Assim, prevê-se que haja, em cada momento da história do universo, muitíssimos loops de corda cósmica a emitir ondas gravitacionais em todas as direções e a sobreposição de todos estes sinais transitórios deve dar origem a um fundo estocástico de radiação gravitacional [7]. Como este fundo é gerado ao longo de quase toda a história cósmica, é dos sinais de origem cosmológica potencialmente mais ruidosos que conhecemos. Certos tipos de transição de fase, por exemplo, também podem gerar um fundo de ondas gravitacionais, mas a radiação é apenas emitida num curto período de tempo no universo primordial. Chegar-nos-ia então muito diluída pela expansão do universo e, por isso, o sinal seria muito mais fraco. A amplitude do fundo estocástico de ondas gravitacionais gerado pelos loops de cordas é, em grande medida, determinada pela tensão das cordas, que determina quão forte é a sua interação gravitacio-

nal e quão rapidamente estes se evaporam. Esta tensão é determinada pela escala de temperatura a que se dá a transição de fase que leva à formação das cordas, sendo mais elevada e a amplitude do sinal maior se esta ocorrer mais cedo na vida do universo. Assim, se detetarmos este sinal, podemos demonstrar não só que houve uma transição de fase com quebra de simetria axial no universo primordial mas inferir também, a partir da sua amplitude, a que temperatura esta terá ocorrido. Isto permitir-nos-ia validar ou excluir modelos de física de partículas para o universo primordial e ajudar-nos-ia então a perceber que propostas, do vasto leque que existe, vão na direção certa.

Mas há mais coisas que podemos aprender com este espectro. Com o passar do tempo e porque o universo se está a expandir, os loops vão-se formando com extensões cada vez maiores e, por isso, vão emitindo ondas gravitacionais com frequências cada vez menores. O fundo estocástico de ondas gravitacionais gerado por cordas estender-se-ia, por isso, por uma vasta gama de frequências (abarcando, em certos casos, mais de 20 ordens de magnitude) e pode então ser testado com vários tipos de detetores de ondas gravitacionais. Quanto mais alta for a frequência que observamos, mais cedo na vida do universo foram geradas estas ondas gravitacionais e, como este espectro é muito sensível à evolução e às propriedades do universo, pode também ser usado para testar e reconstituir a sua história em alturas em que a luz ainda não podia viajar livremente. Para além disso, as propriedades e fenomenologia das cordas cósmicas dependem da natureza dos campos e das quebras de simetria que lhes dão origem. Há modelos em que há mais do que um tipo de corda e se formam redes altamente emaranhadas com junções. Noutros modelos as cordas podem ser supercondutoras e percorridas por correntes eletromagnéticas e, por isso, os loops podem também emitir radiação eletromagnética. Outros há em que as cordas são metaestáveis e as redes decaem quando universo atinge uma determinada temperatura crítica. Em cada um destes casos, e em muitos outros que não referi, a evolução da rede de cordas cósmicas e o número de loops produzidos podem ser distintos e a quantidade de energia dos loops que é convertida em ondas gravitacionais pode também alterar-se. Assim, esperamos que haja diferenças na forma e na amplitude do espectro da radiação gravitacional de fundo gerado em cada um dos modelos e estas diferenças podem ser usadas como impressões digitais para distinguir também entre modelos específicos de física das partículas para o universo primordial. Assim, as cordas cósmicas podem vir a permitir-nos usar os detetores de ondas gravitacionais como experiências de física das partículas e, nesse caso, permitir-nos-iam aceder a escalas de energia muito para além das que conseguimos atingir nos nossos aceleradores de partículas.

Já detetámos, em 2023, o primeiro fundo estocástico de ondas gravitacionais. Poderia ser de cordas cósmicas, mas também de paredes de domínio ou de várias outras fontes exóticas [8], mas o mais provável é que seja gerado por buracos negros supermassivos com massas milhões ou milhares de milhões de vezes superiores à do Sol. Mas, de momento, não podemos ter a certeza: só o detetámos numa gama muito estreita de

frequências muito baixas, onde estes sinais podem ser todos muito parecidos. Só quando formos capazes de estudar estes sinais em frequências mais elevadas é que poderemos saber que rumor é este que estamos a ouvir. Para isso, no entanto, vamos precisar de uma nova geração de detetores de ondas gravitacionais mais sensíveis, como a Antena Espacial de Interferometria por Laser (LISA) que a Agência Espacial Europeia espera lançar para o espaço daqui a cerca de 10 anos (Fig. 4). Até lá, temos de nos preparar: estudar em detalhe os sinais dos vários tipos de cordas e encontrar as suas assinaturas distintivas para que os nossos detetores as possam distinguir. Temos de aprender a ouvir o que este rumor primordial tem para nos revelar.

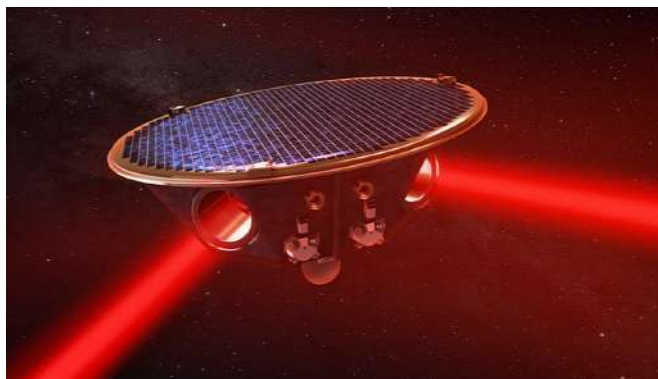


Figura 4: Um dos satélites da constelação LISA, que será o primeiro detetor de ondas gravitacionais no espaço. Imagem: Max Planck Institute for Gravitational Physics

Referências

- [1] S. Weinberg, *The First Three Minutes. A Modern View of the Origin of the Universe*, Bantam Books, 1977
- [2] Planck Collaboration, *Planck 2018 results: I. Overview and the cosmological legacy of Planck*, *Astronomy & Astrophysics* 641 (2020) A1.
- [3] E. Conover, *In her short life, mathematician Emmy Noether changed the face of physics*, *Science News*, Jun. 12, 2018
- [4] N. Wolchover, *Theories of Everything, Mapped*, *Quanta Magazine*, Aug. 3, 2015
- [5] T.W.B Kibble, *Topology of Cosmic Domains and Strings*, *Journal of Physics A: Mathematical and General* 9 (1976) 1387-1398
- [6] M. Frankel, *How the Universe's hidden 'scars' could unlock time travel*, *BBC Science Focus*, Nov. 9, 2004
- [7] A. Vilenkin, *Gravitational radiation from cosmic strings*, *Physics Letters B*, 107, 47
- [8] NanoGrav Collaboration, *The NANOGrav 15 yr Data Set: Search for Signals from New Physics*, *The Astrophysical Journal Letters* 951 (2023) 1, L11



Lara Sousa concluiu a licenciatura em Física/Matemática Aplicada (Astronomia) na FCUP em 2006, o mestrado em Campos Quânticos e Forças Fundamentais no Imperial College (Londres) em 2007 e o doutoramento em Física na FCUP em 2011. É investigadora no Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço/Centro de Astrofísica da Universidade do Porto desde 2012. Trabalha em Cosmologia, focando-se principalmente na evolução e assinaturas observacionais de cordas cósmicas e outros defeitos topológicos. Tem mais de 30 artigos publicados em revista internacionais e participa ativamente, desde 2014, no Consórcio que prepara a missão LISA.