

Os pulsares e as ondas gravitacionais: sobre a primeira e a terceira janelas de ondas gravitacionais

Paulo C. C. Freire

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Auf dem Hügel 69, 53131 Bonn, Germany
pfreire@mpifr-bonn.mpg.de

Resumo

O evento de 14 de Setembro de 2015 representou a primeira deteção direta de ondas gravitacionais, mas, importantemente, não foi a primeira evidência. Neste artigo descrevemos a primeira descoberta de ondas gravitacionais, que aconteceu no fim dos anos 70 / princípio dos anos 80, que levou à atribuição do prémio Nobel da Física a Russel Hulse e Joe Taylor em 1993. Iremos falar também da aguardada deteção direta de ondas gravitacionais de muito baixa frequência, que vai ser a terceira janela sobre o espectro das ondas gravitacionais.

Estas duas avenidas de investigação têm em comum o facto de se basearem na cronometragem de pulsares, que é especialmente (mas não exclusivamente) feita na região rádio do espectro, especialmente na década de frequências de 300 MHz a 3000 MHz.

1. O que é um pulsar?

Os pulsares são estrelas de neutrões que parecem pulsar em ondas de rádio e raios gama (e em casos mais raros em outros comprimentos de onda, como os raios X e, ainda mais raramente, em luz visível). Estas pulsações são mais aparentes que reais, e uma consequência da rotação da estrela, que emite ondas de rádio numa direção específica. Quando, na sua rotação, essa região aponta para a Terra, detetamos um aumento súbito da emissão rádio. O fenómeno tem muitas semelhanças com a aparência de um farol, cuja emissão de luz é contínua mas cuja rotação faz com que observadores distantes vejam pulsações luminosas.

Estas pulsações fazem com que os pulsares sejam ferramentas ímpares para estudar as leis fundamentais do nosso Universo. A descoberta do primeiro pulsar rádio em 1967, PSR B1919+21¹ (Hewish et al. 1968) foi uma grande surpresa: Ninguém previu a emissão de rádio dos pulsares, e ainda hoje o assunto permanece envolto em mistério. A descoberta (Staelin & Reifenstein 1968) de um pulsar (PSR B0531+21) perto do centro do remanescente de supernova do Caranguejo (localizado, interessante, na constelação do Touro), e em especial a medição do seu período de pulsação (33 milissegundos), e finalmente o abrandamento dessa rotação mostrou que os pulsares são estrelas de neutrões altamente magnetizadas e em rotação rápida, como foi sugerido por Gold (1968). Estes são objetos de cuja existência se suspeitava desde 1934, ano em que Baade & Zwicky (1934) postularam que se formam no co-

lapso gravitacional de grandes estrelas no final das suas vidas. Esta ideia é confirmada pela localização do PSR B1921+21 muito perto do centro de um remanescente de uma supernova².

As estrelas de neutrões são objetos extremos. A sua estrutura foi calculada em detalhe pela primeira vez por Tolman (1939) e Oppenheimer & Volkoff (1939). Com um diâmetro de pouco mais de 20 km, e massas superiores a 400 000 vezes a massa da Terra, a densidade de matéria no seu centro chega às centenas de milhões de toneladas por centímetro cúbico. Esta densidade, superior à densidade de matéria num núcleo atómico, é tão alta que a composição e estado da matéria nuclear a estas densidades são ainda hoje desconhecidas, o que se traduz em incertezas da ordem de 20 % no raio e momento de inércia destes objetos (Özel & Freire 2016; Lattimer 2021). Este é, hoje em dia, um campo de investigação com intensa atividade.

Devido à sua densidade e gravidade extrema à superfície, milhões de milhões de vezes a força de gravidade da Terra, as estrelas de neutrões podem, em teoria, rodar mais de mil vezes por segundo sem se desagregarem. O pulsar com a rotação mais rápida que se conhece roda sobre si mesmo 716 vezes por segundo (Hessels et al. 2006).

Por estas razões, Anthony Hewish - o diretor do observatório de radioastronomia de Cambridge, onde foi feita a descoberta recebeu o Prémio Nobel da Física em 1974.

2. Pulsares binários

A maioria (~90 %) dos mais de 4000 pulsares rádio conhecidos (Manchester et al. 2005) são objetos solitários. Os restantes fazem parte de sistemas binários. Nestes casos, a cronometragem do pulsar permite medições espantosamente precisas do seu movimento orbital, muitíssimo mais precisas (por um fator de milhares a milhões) do que as medições do movimento de quaisquer outros corpos celestes fora do sistema solar, ou do movimento dos próprios pulsares usando as técnicas comuns de medição dos desvios de Doppler. Esta é uma das principais razões da sua utilidade para o estudo da física, e em especial o estudo da gravidade.

Para mais, devido à sua formação, a maioria dos pulsares em sistemas

¹Os nomes de todos os pulsares (e de muitos outros tipos de corpos celestes) refletem as coordenadas da sua localização no céu: a ascensão recta e a declinação. Os prefixos B são relativos ao equinócio de 1950, os prefixos J são relativos ao equinócio de 2000.

²Neste caso, uma "estrela hóspede" observada na China, Coreia e Japão no ano 1054 d.C. (Stephenson & Green 2002).

binários são pulsares "reciclados", isto é, a sua rotação foi acelerada pela absorção de matéria da estrela companheira. Além disso, neste processo o enorme campo magnético da estrela de neutrões é significativamente degradado. Esta rotação rápida permite medições especialmente precisas do movimento orbital do pulsar, a degradação do campo magnético permite uma extraordinária estabilidade rotacional a longo prazo (para uma referência detalhada, ver Tauris & van den Heuvel 2023).

A maioria das estrelas companheiras dos pulsares reciclados são também elas objetos compactos: outras estrelas de neutrões ou anãs brancas. Isto significa que os componentes da maioria dos pulsares binários se comportam como massas pontuais. Isto tem uma consequência fundamental: as pequenas perturbações relativistas no movimento orbital previstas pela relatividade geral (RG) não se misturam com quaisquer efeitos newtonianos causados pelas marés ou pela rotação dos componentes. A precisão da cronometragem destes pulsares é tal que algumas dessas perturbações relativistas são mensuráveis pelas pequenas variações que causam nos tempos de chegada dos pulsos. Muitos pulsares em sistemas binários são, por estas razões, não só instrumentos de medição extremamente precisos, mas os sistemas binários em si são também laboratórios extremamente limpos para o estudo da gravidade.

2.1. O sistema de Hulse-Taylor

O exemplo mais conhecido do que pode ser alcançado através da cronometragem de pulsares em sistemas binários é o estudo do primeiro pulsar binário, PSR B1913+16. O sistema foi descoberto em 1974 por Russel Hulse, então um estudante de doutoramento da Universidade do Massachusetts em Amherst, e o seu supervisor, Joseph Hooton Taylor. Para isso, usaram o radiotelescópio de Arecibo, localizado perto de Arecibo, em Porto Rico, para procurar pulsares rádio no plano da Via Láctea. Com um refletor primário de 305 metros de diâmetro, este foi até recentemente o maior e mais sensível radiotelescópio do mundo³.

Entre os muitos pulsares descobertos por Hulse e Taylor, o pulsar designado por PSR B1913+16 distinguia-se pelo seu período de rotação de 59 milissegundos, o segundo mais pequeno conhecido ao tempo, depois do pulsar da nebulosa do Caranguejo. Isto levou a que Hulse e Taylor começassem a seguir este pulsar com especial atenção.

O que se segue foi mais interessante: ao contrário de todos os pulsares então conhecidos, o período de rotação do PSR B1913+16 parecia variar de um modo errático. As observações seguiam-se dia após dia, e o mistério adensava-se, com o período de rotação a variar cada vez mais... até que um dia a variação foi de tal modo extrema e esclarecedora que todas as dúvidas desapareceram.

As variações observadas eram devidas à variação do fator de Doppler associada à velocidade orbital, que muda constantemente. A órbita do pulsar é muito apertada (o seu período orbital é de 7 horas e 45 minutos) e excêntrica ($e = 0,61$). A amplitude de variação da velocidade orbital indicava uma estrela companheira com uma massa da ordem de uma massa solar. Com a órbita determinada, tornou-se possível prever o período de rotação com grande precisão. As notícias rapidamente se espalharam, confirmando a descoberta do primeiro pulsar binário, que foi publicada no ano seguinte (Hulse & Taylor 1975).

2.2. Cronometragem do pulsar binário

No entanto, o melhor estava para vir. Uma coisa é prever os períodos de rotação observados do pulsar, outra coisa completamente diferente é ser capaz de prever os tempos de chegada dos pulsos individuais. Esta é a característica que distingue os pulsares de outros objetos celestes. Para isso é necessária uma precisão muitíssimo maior na medição dos parâmetros da órbita e do período de rotação. Para isso, foi necessário um esforço intenso de desenvolvimento em 1975 e 1976, especialmente de programas computadorizados capazes de fazer os cálculos dos tempos de chegada dos pulsos com precisão suficiente. Em 1976 foi publicado, pela primeira vez, um modelo capaz de prever com precisão a chegada de cada pulso (Taylor et al. 1976). De repente, podia-se determinar o período da órbita, a excentricidade e o período de rotação intrínseco com 30, 20 e 40000 vezes mais precisão usando exatamente os mesmos dados, sendo a única diferença estar-se agora a fazer a análise dos tempos de chegada das pulsações em vez de fazer a análise dos períodos de rotação aparentes. Medições subsequentes aumentaram grandemente a precisão destes parâmetros.

Um dos parâmetros mensuráveis com muito maior precisão na cronometragem era o avanço do periastro (o ponto em que o pulsar está mais próximo da estrela companheira), que em 1979 era de perto de $(4,22 \pm 0,04)^\circ$ por ano. Este fenómeno é basicamente o mesmo que o avanço anómalo do periélio da orbital de Mercúrio detetado no Século XIX, que representou a primeira confirmação da relatividade geral. No entanto, há uma diferença significativa de magnitude: o avanço do periastro do pulsar binário num dia é equivalente ao avanço anómalo do periélio de Mercúrio num século! Esta medição foi importante: assumindo que a RG é a teoria que corretamente descreve a gravidade, pode-se imediatamente estimar a massa total do sistema binário: 2,83 vezes a massa do sol!

No entanto, o melhor estava para vir. Com o decorrer dos anos, e do acumular de medições cada vez mais precisas de mais tempos de chegada dos pulsos, dois efeitos relativistas adicionais tornaram-se mensuráveis (Taylor et al. 1979). O primeiro deve-se à dilatação do tempo próprio do pulsar em relação ao tempo de observadores distantes: este efeito varia de acordo com a fase orbital, sendo mais intenso perto do periélio, quando o pulsar viaja mais rapidamente e está mais próximo da estrela companheira. Isto causa, do ponto de vista dos observadores distantes, um abrandamento da rotação média do pulsar quando este está próximo do periastro. Medindo este efeito - conhecido como atraso de Einstein - e assumindo outra vez a validade da RG, foi possível determinar as massas dos dois componentes: perto de $(1,44 \pm 0,15)$ massas solares para o pulsar e $(1,39 \pm 0,15)$ massas solares para a estrela companheira, valores muito próximos dos aceites atualmente. A estrela companheira nunca foi detetada, mas há todas as razões para crer que se trata de uma segunda estrela de neutrões (a formação destes sistemas é revista em detalhe por Tauris et al. 2017).

Mais importante ainda foi a deteção de um terceiro efeito na cronometragem do pulsar: a variação do período da órbita. A RG prevê que o sistema deveria estar a perder energia orbital devido à emissão de ondas gravitacionais. Isto implica que o sistema está-se a afundar cada mais no seu próprio poço gravitacional, com os componentes cada vez mais próximos um do outro e a orbitarem em torno um do outro cada vez mais rapidamente. Se as massas derivadas até agora para os dois componentes assumindo a RG são verdadeiras, então de acordo com a própria RG, o período orbital de 7h e 45 min deveria diminuir em 75 microssegundos todos os anos - para esta previsão, é preciso somente conhecer as duas massas, o período orbital e a excentricidade, todos

³O autor deste artigo teve a honra de trabalhar, entre 2001 e 2009, no National Astronomy and Ionosphere Center, a entidade que geria o radiotelescópio de Arecibo, que era ela própria administrada pela Universidade de Cornell, em Ithaca, estado de Nova Iorque, EUA. O telescópio sofreu uma falha catastrófica no dia 1 de Dezembro de 2020, depois disso não mais foi utilizado para observações astronómicas.

parâmetros bem conhecidos. No artigo de 1979, este efeito foi medido pela primeira vez, mostrando que o sistema estava de facto a perder energia devido à emissão de ondas gravitacionais, e a fazê-lo a um ritmo consistente com as previsões da RG.

Na década seguinte, com o acumular de dados de cronometragem, a variação do período orbital foi sendo medida com cada vez mais precisão (Taylor & Weisberg 1982). Em 1989, a variação do período orbital coincidia com a previsão da RG dentro da margem de erro de 1 % da medição (Taylor & Weisberg 1989).

Na década de 90, a precisão das medições do decaimento orbital continuam a melhorar, mas a estimativa do decaimento intrínseco do sistema (i.e., o decaimento que seria observado num referencial inercial estacionário em relação ao pulsar) esbarraram no facto de a distância do sistema ser mal conhecida, o que impede uma estimativa precisa da sua aceleração no campo de gravidade da nossa Galáxia (Damour & Taylor 1991), situação que perdura até ao presente (Weisberg & Huang 2016).

2.3. Outros sistemas de estrelas de neutrões

Entretanto, centenas de sistemas de pulsares binários foram descobertos. A grande maioria tem estrelas anãs brancas como companheiras, mas perto de 20 consistem, como o sistema de Hulse-Taylor, em sistemas de duas estrelas de neutrões.

Entre todos estes sistemas, merece especial destaque o "pulsar duplo" (PSR J0737–3039A e B). Este sistema tem um período orbital de 2h e 27min, portanto bastante mais compacto que o sistema de Hulse-Taylor (Burgay et al. 2003). Isto significa que os efeitos relativistas na sua órbita são muito maiores e por isso mais facilmente (e precisamente) mensuráveis. Acresce que este sistema está muito mais próximo do nosso sistema solar, o que torna mais fácil estimar a sua aceleração no campo de gravidade da nossa Galáxia.

Mas, acima de tudo, a segunda estrela de neutrões é, caso único, ela mesma detectável como um pulsar, PSR J0737–3039B (Lyne et al. 2004), o que permite uma medição precisa e independente do quociente de massas do sistema. É por esta razão que este sistema é conhecido como o "pulsar duplo".

A cronometragem do PSR J0737–3039A levou a alguns dos testes mais precisos da RG em campos fortes (Kramer et al. 2021):

– O teste mais preciso das propriedades radiativas da gravidade: o decaimento orbital medido ($-39,3770 \pm 0,0025$) ms por ano, incerteza de um desvio padrão) coincide, dentro da precisão experimental de 0,0063 %, com a previsão da relatividade geral para a perda de energia da órbita devido à emissão de ondas gravitacionais. Isto é 25 vezes mais preciso do que a medição atual do sistema binário de Hulse-Taylor!

– Interessantemente, de todos os pulsares binários conhecidos, o sistema tem a inclinação orbital mais próxima de 90 graus ($(89,35 \pm 0,05)^\circ$). Isto leva não só a uma deteção precisa do atraso de Shapiro (Shapiro 1964), mas também à deteção, pela primeira vez, de efeitos de segunda ordem deste atraso! Esta experiência investigou a propagação da radiação num espaço-tempo com uma curvatura 106 vezes superior à das experiências no Sistema Solar! Além disso, o facto de esta curvatura do espaço-tempo ser causada por uma estrela de neutrões torna esta experiência especialmente instrutiva, uma vez que as previsões de muitas alternativas da RG divergem grandemente neste caso.

– Além disso, existem também efeitos de segunda ordem no avanço do periastro. Um deles é o efeito Lense-Thirring, o arrasto de referencias inerciais causado pela rotação do pulsar A. Este último efeito, quando medido com mais precisão, será importante para medir o momento de inércia do pulsar A (Hu et al. 2020). Esta medição é importante para testar modelos do estado e da composição da matéria nuclear no centro das estrelas de neutrões (ver, por exemplo, Özel & Freire 2016).

Em 2018, foram anunciados dois sistemas semelhantes ao binário de Hulse-Taylor e ao pulsar duplo, mais ainda mais compactos, respetivamente PSR J1757–1854 (Cameron et al. 2018) e PSR J1946+2052 (Stovall et al. 2018). No primeiro caso, a grande distância e a incerteza associadas são, como no caso do binário de Hulse-Taylor, entraves a uma medição precisa do decaimento orbital intrínseco do sistema (Cameron et al. 2023).

3. A promessa das ondas gravitacionais

Devido à importância da sua descoberta, Russel Hulse e Joe Taylor foram galardoados com o Prémio Nobel da Física em 1993, "pela descoberta de um novo tipo de pulsar, que abriu novas possibilidades no estudo da gravitação". A descoberta foi de facto importante por muitas razões.

Esta medição atingiu dois objetivos que não podem ser alcançados por experiências no Sistema Solar: acima de tudo, confirmou experimentalmente a realidade física das ondas gravitacionais (GWs) - estas transportam de facto energia através do espaço. A existência das ondas gravitacionais havia sido discutida desde que Einstein sugeriu a ideia (Einstein 1916, 1918), mas o próprio Einstein nunca teve certeza da sua existência física. As dúvidas continuaram praticamente até ao tempo da confirmação experimental (para uma discussão detalhada, ver Damour 2015).

Em segundo lugar, confirmou a auto-consistência da RG para objetos extremamente compactos. Isto é importante, porque algumas teorias alternativas da gravidade que passam todos os testes no Sistema Solar produzem previsões substancialmente diferentes no caso de estrelas de neutrões. Em especial, a teoria de Jordan-Fierz-Brans-Dicke, uma das alternativas mais simples e melhor estudadas à RG, prevê não só a emissão de ondas gravitacionais quadrupolares, como a RG, mas também a emissão de radiação dipolar (Eardley 1975), o que aumentaria potencialmente o ritmo de decaimento da órbita para valores inconsistentes com as observações. Para uma discussão detalhada dos testes de teorias de gravidade com pulsares rádio, ver Freire & Wex (2024).

No entanto, a descoberta transcende o estudo da gravitação: as ondas gravitacionais não são apenas mais um efeito relativista que podemos usar para testar a RG. São mensageiras que transportam informação através de vastas distâncias. Isto significa que, se construirmos um detetor de ondas gravitacionais extremamente sensível, podemos, em princípio, detetar objetos distantes ouvindo as ondas gravitacionais que emitem.

Será que um tal detetor ouviria realmente alguma coisa? É aqui que se torna clara a importância da descoberta do pulsar binário. O decaimento orbital do sistema implica que este perderá continuamente energia orbital sob a forma de ondas gravitacionais. A cada órbita, as duas estrelas de neutrões aproximam-se uma da outra 3 milímetros. À medida que se vão aproximando, este ritmo de aproximação vai aumentando, o que resulta inevitavelmente numa colisão das duas estrelas de neutrões daqui

a 300 milhões de anos. Nessa altura, emitirão uma gigantesca explosão de ondas gravitacionais: durante uma fração de segundo, a potência de ondas gravitacionais emitidas é comparável à potência luminosa de todas as estrelas no Universo visível! Como já foram observados vários sistemas de duas estrelas de neutrões na nossa Galáxia, devem existir muitos outros sistemas deste tipo no Universo, com muitos deles a colidir em cada ano. Este processo é tão comum no nosso Universo que se pensa que está na origem da maioria dos elementos pesados da tabela periódica, como o ouro, a platina, o chumbo e o urânio!

Isto significa que um detetor suficientemente sensível deverá certamente "ouvir" muitas destas colisões⁴. Foi graças a esta certeza que os detetores de ondas gravitacionais como o LIGO e o Virgo puderam ser construídos. Como é explicado neste volume, a deteção a 14 de Setembro de 2015 pelo LIGO da colisão de dois buracos negros de 30 massas solares (o evento conhecido como GW150914) abriu uma nova janela para o Universo, com a descoberta de um evento inesperado!

Dois anos depois, detetou-se a primeira colisão de duas estrelas de neutrões (o evento conhecido como GW170817), evento que foi além disso detectado em todo o espectro eletromagnético. Aqui estava, finalmente, cumprida a promessa feita pela descoberta do primeiro pulsar binário!

Na sequência da deteção direta de ondas gravitacionais com o LIGO, Rainer Weiss, Barry Barish e Kip Thorne foram galardoados com o Prémio Nobel da Física em 2017.

4. Deteção direta de ondas gravitacionais de baixa frequência

A descoberta dos pulsares, com o seu sinal periódico preciso vindo de um lugar muito distante, abriu outras possibilidades, desta vez na deteção direta de ondas gravitacionais. No fim dos anos 70, Sazhin (1978) e Detweiler (1979) sugeriram que a cronometragem de pulsares poderia ser usada para detetar diretamente ondas gravitacionais de grande amplitude e baixa frequência (i.e., com períodos de meses a anos, onde a técnica de cronometragem dos pulsares tem mais sensibilidade), produzidas, por exemplo, por sistemas binários de dois buracos negros supermassivos⁵.

Mais tarde, Bertotti et al. (1983) calcularam, com base nos limites de irregularidades na cronometragem de alguns pulsares então conhecidos, que a densidade de ondas gravitacionais de baixa frequência é uma fração pequena da densidade de energia do Universo. Contudo, estes limites estavam ainda muito longe de quaisquer previsões realistas para o fundo de ondas gravitacionais muito longas.

4.1. Pulsares milissegundo

Em 1982, usando também o radiotelescópio de Arecibo, foi descoberto o primeiro pulsar milissegundo, PSR B1937+21 (Backer et al. 1982). Rodando sobre si mesmo quase 642 vezes por segundo, este pulsar era quase 20 vezes mais rápido que o pulsar da nebulosa do Caranguejo. Nas décadas seguintes, foram descobertos centenas destes objetos.

Estes sistemas são formados em sistemas binários em que se formam estrelas de neutrões com estrelas companheiras de baixa massa (isto é, que iniciam as suas vidas com menos de oito vezes a massa do Sol). Estas estrelas têm vidas mais longas, e por isso o episódio de acreção

de massa (visível como um binário de raios X) é muito mais longo, o que resulta numa rotação mais rápida para o pulsar. Devido à sua massa, as estrelas companheiras nunca formam estrelas de neutrões, evoluindo em vez disso para estrelas anãs brancas. Perto de 80 % dos pulsares milissegundo são encontrados em sistemas binários com estrelas anãs brancas, ou outros tipos de remanescentes estelares de baixa massa (Tauris & van den Heuvel 2023). Mas interessantemente, e sem que haja uma explicação óbvia, alguns pulsares milissegundo são objetos solitários, como o próprio PSR B1937+21.

A precisão da cronometragem de um pulsar é, sendo tudo o resto igual, proporcional à sua frequência de rotação, o que implica que a nova classe de pulsares deveria ter uma precisão de cronometragem assombrosa. Esta precisão não se traduziu até hoje em testes especialmente precisos de teorias de gravidade como no caso do pulsar duplo, a razão é que, devido à baixa massa da estrela companheira, esta nunca explode numa supernova, evoluindo em vez disso lentamente para o estágio de anã branca. Isto faz com que a excentricidade da órbita do sistema se mantenha sempre em valores extremamente baixos, o que implica que alguns efeitos relativistas, como o avanço do periastro e o atraso de Einstein, que tão importantes foram para medir as massas dos componentes do sistema de Hulse-Taylor, não são simplesmente mensuráveis para estes sistemas.

Isto não é um problema para a deteção de ondas gravitacionais de baixa frequência, onde tudo o que é necessário é um relógio distante - tudo o que interessa neste caso é a precisão da cronometragem do pulsar.

Um dos primeiros pulsares milissegundo binários a ser descoberto, e um dos mais estáveis, tem a designação de PSR B1855+09 (Segelstein et al. 1986). A órbita tem um período de 12,3 dias, sendo a estrela companheira uma anã branca. Depois de oito anos de cronometragem intensa com Arecibo deste pulsar (Kaspi et al. 1994), os dados eram de tal modo precisos que foi possível impor um limite para a densidade de ondas gravitacionais por intervalo de frequência logarítmica inferior a $\sim 6 \times 10^{-9}$ (95 % de confiança) da densidade crítica do Universo, uma melhoria de ordens de magnitude em relação a resultados anteriores e que aproximava grandemente de previsões de um fundo estocástico de ondas gravitacionais de baixa frequência.

4.2. Pulsar timing arrays

No artigo de descoberta do pulsar B1855+09, os autores expressavam a necessidade de descobrir mais pulsares milissegundo estáveis. A razão era simples: uma coisa é introduzir limites à amplitude das ondas gravitacionais de baixa frequência, e uma outra, completamente diferente, é detetá-las. Para isso, um ou dois pulsares milissegundo não bastam. A razão é patente mesmo no artigo de Kaspi et al. (1994): para além da cronometragem do PSR B1855+09, os autores apresentam os resultados de mais de uma década de cronometragem do primeiro pulsar milissegundo, PSR B1937+21, e concluem que o último apresenta, ao contrário do caso do PSR B1855+09, irregularidades na sua rotação. Isto levanta a questão: se forem detetadas irregularidades na cronometragem de pulsares, como distinguir ondas gravitacionais de possíveis perturbações intrínsecas da rotação dos pulsares?

A resposta a esta questão é óbvia: há que cronometrar, com grande

⁴A deteção destas ondas gravitacionais é mais parecida com a audição porque se trata, tal como o sinal de rádio de um pulsar, de um sinal de uma só dimensão no tempo, sendo, para além do mais, que as frequências previstas para o estágio final de uma colisão de estrelas de neutrões (isto é, a frequência da órbita) são de dezenas e centenas de Hertz, bem dentro do espectro audível.

⁵Embora estes buracos negros sejam relativamente comuns no centro de galáxias, a existência e/ou o número de sistemas de dois destes buracos negros que emitem ondas gravitacionais em quantidades detetáveis é ainda hoje muito incerta. Teoricamente, a sua formação deveria resultar da coalescência de galáxias, que eventualmente deveria levar à colisão dos seus buracos negros centrais.

precisão, um número bastante grande de pulsares, e depois procurar o sinal das ondas gravitacionais na correlação entre as irregularidades medidas nos atrasos dos sinais dos pulsares. Em particular, Hellings & Downs (1983) propuseram tirar vantagem da estrutura quadrupolar das ondas gravitacionais previstas pela RG para procurar correlações positivas entre os atrasos nos tempos de chegada dos pulsos de pulsares localizados numa região particular do céu e os pulsares localizados em regiões opostas, e uma anti-correlação com pulsares localizados em regiões do céu a 90 graus das primeiras. A curva de correlações em função da separação angular é hoje conhecida como a curva de Hellings e Downs.

Para levar a cabo esta estratégia foi necessário, em primeiro lugar, descobrir não só um grande número de pulsares milissegundo, mas também descobri-los em zonas do céu menos estudadas, isto é, no caso dos pulsares, em regiões longe do plano da nossa Galáxia. Em parte por esta razão, foram empreendidas nos anos 90 e nas décadas seguintes muitas buscas sistemáticas de pulsares que englobaram o céu inteiro. Em paralelo, houve também um grande esforço para melhorar toda a instrumentação usada na cronometragem dos pulsares milissegundo, nas técnicas de análise dos dados e na deteção do fundo de ondas gravitacionais.

Até ao princípio do Séc. XXI, estes esforços eram largamente executados por observatórios ou institutos de investigação individuais. Foi a partir de meio da década de 2000 que estes esforços começaram a ser organizados à escala continental, com o "North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves" (NANOGrav) na América do Norte⁶, o "European Pulsar Timing array" (EPTA) na Europa⁷, o "Parkes Pulsar Timing Array" (PPTA) na Austrália⁸. A estes juntaram-se mais recentemente as versões chinesa, CPTA (Chen et al. 2025) e Sul-Africana, o "MeerKAT pulsar timing array", MPTA⁹; estes dois últimos consórcios usam novos radiotelescópios extremamente sensíveis: O Five Hundred Meter Aperture Spherical Telescope (FAST) na província de Guizhou, China, e o MeerKAT (ou "Karoo Array Telescope) na Província de Northern Cape, África do Sul. A nível mundial, estes esforços são coordenados pelo International Pulsar Timing Array¹⁰.

4.3. No limiar da abertura da terceira janela

Depois de quase duas décadas de esforços coordenados e contínuos, estamos atualmente no limiar de deteção do fundo estocástico de ondas gravitacionais de muito baixa frequência, com deteções da curva de Hellings e Downs que se aproximam constantemente de um limiar estatisticamente seguro, mas também de previsões teóricas para a amplitude deste fundo estocástico. Até agora, os melhores resultados vêm de consórcios individuais: Agazie et al. (2023) para o NANOGrav, EPTA Collaboration et al. (2023) para o EPTA, Reardon et al. (2023) para o PPTA, Xu et al. (2023) para o CPTA e mais recentemente Miles et al. (2025) para o MPTA. É de prever que a combinação de todos estes dados por parte do IPTA leve finalmente a uma deteção inequívoca.

O resultado do MPTA merece especial destaque: a deteção efetuada com o radiotelescópio MeerKAT, na África do Sul, apesar de ter sido obtida com apenas 3,5 anos de dados, é comparável em sensibilidade com os resultados dos outros consórcios com mais de 15 anos de dados. Isto deve-se ao facto de o MeerKAT ser de longe o radiotelescópio

mais sensível no hemisfério Sul, o que é excelente uma vez que a maioria dos pulsares estão localizados no Hemisfério Sul do céu¹¹. É assim de prever que os resultados do MPTA venham a ultrapassar a curto prazo a sensibilidade de todos os outros consórcios.

Depois da deteção segura, a acontecer nos próximos anos, segue-se a exploração do Universo nesta nova janela de frequência de ondas gravitacionais. Quem pode adivinhar que surpresas iremos encontrar?

Referências

- [1] Hewish, A., Bell, S. J., Pilkington, J. D. H., Scott, P. F., & Collins, R. A. 1968, *Nature*, 217, 709
- [2] Staelin, D. H. & Reifenstein, III, E. C. 1968, *Science*, 162, 1481
- [3] Gold, T. 1968, *Nature*, 218, 731
- [4] Baade, W. & Zwicky, F. 1934, *Proceedings of the National Academy of Science*, 20, 25
- [5] Tolman, R. C. 1939, *Physical Review*, 55, 364
- [6] Oppenheimer, J. R. & Volkoff, G. M. 1939, *Physical Review*, 55, 374
- [7] Özel, F. & Freire, P. 2016, *ARA&A*, 54, 401
- [8] Lattimer, J. M. 2021, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 71, 433
- [9] Hessels, J. W. T., Ransom, S. M., Stairs, I. H., et al. 2006, *Science*, 311, 1901
- [10] Manchester, R. N., Hobbs, G. B., Teoh, A., & Hobbs, M. 2005, *AJ*, 129, 1993
- [11] Tauris, T. M. & van den Heuvel, E. P. J. 2023, *Physics of Binary Star Evolution. From Stars to X-ray Binaries and Gravitational Wave Sources*
- [12] Hulse, R. A. & Taylor, J. H. 1975, *ApJ*, 195, L51
- [13] Taylor, J. H., Hulse, R. A., Fowler, L. A., Gullahorn, G. E., & Rankin, J. M. 1976, *ApJ*, 206, L53
- [14] Taylor, J. H., Fowler, L. A., & McCulloch, P. M. 1979, *Nature*, 277, 437
- [15] Tauris, T. M., Kramer, M., Freire, P. C. C., et al. 2017, *ApJ*, 846, 170
- [16] Taylor, J. H. & Weisberg, J. M. 1982, *ApJ*, 253, 908
- [17] Taylor, J. H. & Weisberg, J. M. 1989, *ApJ*, 345, 434
- [18] Damour, T. & Taylor, J. H. 1991, *ApJ*, 366, 501
- [19] Weisberg, J. M. & Huang, Y. 2016, *ApJ*, 829, 55
- [20] Burgay, M., D'Amico, N., Possenti, A., et al. 2003, *Nature*, 426, 531
- [21] Lyne, A. G., Burgay, M., Kramer, M., et al. 2004, *Science*, 303, 1153
- [22] Kramer, M., Stairs, I. H., Manchester, R. N., et al. 2021, *Physical Review X*, 11, 041050
- [23] Shapiro, I. I. 1964, *Phys. Rev. Lett.*, 13, 789
- [24] Hu, H., Kramer, M., Wex, N., Champion, D. J., & Kehl, M. S. 2020, *MNRAS*, 497, 3118
- [25] Cameron, A. D., Champion, D. J., Kramer, M., et al. 2018, *MNRAS*, 475, L57
- [26] Stovall, K., Freire, P. C. C., Chatterjee, S., et al. 2018, *ApJ*, 854, L22
- [27] Einstein, A. 1916, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 688
- [28] Einstein, A. 1918, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 154
- [29] Damour, T. 2015, *Classical and Quantum Gravity*, 32, 124009
- [30] Eardley, D. M. 1975, *ApJ*, 196, L59
- [31] Sazhin, M. V. 1978, *Soviet Ast.*, 22, 36
- [32] Detweiler, S. 1979, *ApJ*, 234, 1100
- [33] Bertotti, B., Carr, B. J., & Rees, M. J. 1983, *MNRAS*, 203, 945
- [34] Backer, D. C., Kulkarni, S. R., Heiles, C., Davis, M. M., & Goss, W. M. 1982, *Nature*, 300, 615
- [35] Segelstein, D. J., Rawley, L. A., Stinebring, D. R., Fruchter, A. S., & Taylor, J. H. 1986, *Nature*, 322, 714
- [36] Kaspi, V. M., Taylor, J. H., & Ryba, M. F. 1994, *ApJ*, 428, 713
- [37] Hellings, R. W. & Downs, G. S. 1983, *ApJ*, 265, L39
- [38] Agazie, G., Anumalapudi, A., Archibald, A. M., et al. 2023, *ApJ*, 951, L8
- [39] EPTA Collaboration, InPTA Collaboration, Antoniadis, J., et al. 2023, *A&A*, 678, A50
- [40] Reardon, D. J., Zic, A., Shannon, R. M., et al. 2023, *ApJ*, 951, L6
- [41] Xu, H., Chen, S., Guo, Y., et al. 2023, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 23, 075024
- [42] Miles, M. T., Shannon, R. M., Reardon, D. J., et al. 2025, *MNRAS*, 536, 1489
- [43] International Pulsar Timing Array (IPTA). Disponível em: <https://ipta4gw.org>



Paulo Freire tirou a Licenciatura em Engenharia Física Tecnológica no Instituto Superior Técnico em 1994, Mestrado em Física no Instituto Superior Técnico em 1997 e Doutoramento em Radioastronomia pela Universidade de Manchester em 2001. Trabalhou no Observatório de Arco-íris / Universidade de Cornell, no período 2001-2009. Atualmente, encontra-se no Instituto Max Planck para Radioastronomia, em Bona, desde 2009.

¹¹ A razão disto deve-se à localização do centro da nossa Galáxia na constelação do Sagitário, a uma declinação de -29 graus, portanto bem.

⁶ <https://nanograv.org>

⁷ <https://www.epta.eu.org>

⁸ <https://www.atnf.csiro.au/projects/science/pulsars/research-pulsar-ppta/>

⁹ <https://mpta-gw.github.io>

¹⁰ <https://ipta4gw.org>