



## **Previsão e Descoberta das Ondas Gravitacionais**

José Carlos Teixeira de Oliveira

*Departamento de Física, Universidade Federal de Roraima, Campus do Paricarana, Av. Cap. Ene Garcez, 2413, Bairro Aeroporto, 69310-000, Boa Vista-RR. E-mail: jose.oliveira@ufrr.br*

### **Abstract**

*In this article, we show how gravitational waves were predicted and discovered. We also show that the first direct detection of gravitational waves resulted from the merger of two black holes.*

**Keywords:** Gravitational Waves; Theory of General Relativity; LIGO Observatory; Laser Interferometer.

### **1. INTRODUÇÃO**

A formulação teórica das Ondas Gravitacionais (OG) foi proposta, em 1916, pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955) através da Teoria da Relatividade Geral (TRG). O cálculo matemático de Einstein mostrou que objetos supermassivos que se movem em acelerações extremas (como, por exemplo, estrelas de nêutrons ou buracos negros orbitando uns aos outros) perturbariam o espaço-tempo de tal forma que as ondas do espaço-tempo ondulante se propagariam em todas as direções, afastando-se da fonte. Essas ondulações cósmicas viajariam na velocidade da luz, levando consigo informações sobre suas origens, assim como pistas sobre a natureza da própria gravidade [1].

### **2. CONTEXTO HISTÓRICO E TEORIA DAS ONDAS GRAVITACIONAIS**

A formulação da existência de OG e principalmente da sua elaboração como teoria passou por um processo árduo, principalmente devido às interrupções causadas pela eclosão tanto da Primeira Guerra Mundial (1914-1918), quanto da Segunda Guerra (1939-1945), fazendo com que boa parte das pesquisas da época entrasse no total esquecimento. Um caso, em particular, que praticamente entrou em parcial esquecimento foi justamente a Teoria da Relatividade Geral

de Einstein, por ser, na época, uma teoria especulativa, sem uma formulação matemática convincente e um pouco vazia de conteúdo físico. No entanto, devido à grande indagação por parte da comunidade científica, sobre a existência das ondas gravitacionais, a TRG, posteriormente, foi retomada [2].

Além da imposição das guerras nos países europeus, muitas discordâncias, até do próprio Einstein, ainda persistiam, possuindo porém, em contrapartida, muitas aprovações e crenças de sua existência, envolvendo um número de físicos empenhados em trazer para a comunidade científica algo tão vislumbrado pela sua ideia inicial de unificação e resolução de problemas que a mecânica newtoniana não era capaz de resolver.

Dessa forma, o conceito das ondas gravitacionais surgiu como resposta para algumas questões que a teoria gravitacional newtoniana não era capaz de prever e explicar como, por exemplo, o prolongamento do periélio do planeta Mercúrio.

Para os físicos que adentravam aos estudos gravitacionais, o problema do planeta Mercúrio sempre foi uma “pedra no sapato”. Por ser um sistema de dois corpos e Mercúrio o planeta mais próximo do Sol com órbitas de maior excentricidade (parâmetro adimensional que determina o quanto sua órbita em torno do Sol se desvia de um círculo

perfeito), exatamente 0,2056, as relações gravitacionais envolvidas nesse sistema são mais atenuantes do que em qualquer outro sistema de dois corpos, daí então a sua complexidade e visibilidade por parte de estudos.

Em 1908, o físico francês Jules Henri Poincaré (1854-1912) já mencionava a existência de ondas gravitacionais, sob a influência da teoria eletromagnética do físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), como resposta para a discrepância no prolongamento do periélio do planeta Mercúrio em forma de perda energética, afirmando que “(...) a emissão de ondas gravitacionais a partir da órbita deste planeta interno que se deslocava rapidamente estava removendo energia suficiente de seu movimento para aparecer na forma do deslocamento do periélio” [2].

Vale mencionar também que a utilização do termo de ondas gravitacionais como resposta ao prolongamento do periélio do planeta Mercúrio foi debatido anos depois e desmistificado por Einstein em seus trabalhos de escolha de coordenadas para o estudo de ondas gravitacionais.

As ondas gravitacionais, também chamadas de ondas de aceleração, surgiram inicialmente com dois propósitos:

1. Explicar as adversidades nos estudos do planeta Mercúrio e seu periélio, como também explicar qualquer influência gravitacional que se propague pelo espaço, já que a ideia de uma força gravitacional instantânea do físico inglês Isaac Newton (1643-1727) estava perdendo sua concepção, dando a ideia de que se ondas gravitacionais se propagam, deveriam assim fazer com velocidade finita, pois nada poderia superar a velocidade da luz;

2. Conseguir fazer uma correlação entre gravidade e eletromagnetismo. A eletricidade e o magnetismo já haviam sido unificados anos atrás por James Clerk Maxwell, gerando então, o eletromagnetismo. Einstein também compartilhava dessa ideia de que era possível mensurar todo o nosso conhecimento físico em uma única força que pudesse explicar tudo. Morreu tentando fazer isso; e as ondas gravitacionais, como já mencionadas, nada mais são do que uma tentativa de fazer essa unificação entre o eletromagnetismo e a gravitação.

Através de Maxwell, não veio apenas o eletromagnetismo ou a quantização da velocidade da luz, mas também adentrou ao meio físico o ideal de campo. Campo como entidade física, mesmo com sua complexidade no quesito entendimento filosófico, pode ser bem aplicado em diversas situações físicas, dando novas explicações de funcionamento. Esse mesmo ideal, veio parar na gravitação, saindo do termo força e entrando no termo campo, e aí onde está a primeira base analógica entre eletromagnetismo e gravitação [2].

Tendo o conhecimento que campos eletromagnéticos podem gerar ondas eletromagnéticas, Maxwell, se pergunta: não poderia então campos gravitacionais gerar ondas gravitacionais? Essa é a pergunta primordial da sua fundamentação, fazendo uma analogia para então fundamentar as ondas gravitacionais.

O número de opositores à Teoria da Relatividade Geral sempre sucumbiu aqueles que a apoiavam, mesmo após anos de estudos e desenvolvimento da teoria. Muitos daqueles que eram opositores acabaram por se tornar fontes indispensáveis no desenvolvimento das ondas gravitacionais. Dentre eles, temos o físico e astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) com sua contribuição matemática, conhecida como solução de Schwarzschild, quanto ao entendimento mais profundo das ondas gravitacionais. A solução de Schwarzschild tem propriedades matemáticas que permitem a identificação e interpretação de propriedades físicas como momento e energia transportados pelas ondas gravitacionais, resolvendo de maneira inequívoca as questões acerca da realidade física destas ondas. São tão físicas como qualquer outro fenômeno ondulatório encontrado na Natureza, sendo caracterizadas pelas mesmas quantidades como frequência, comprimento de onda e velocidade de propagação [3].

Um dos grandes opositores da ideia da existência das ondas gravitacionais foi o astrofísico inglês Arthur Stanley Eddington (1882-1944), que questionava uma série de problemas que de fato existiam nos primórdios da idealização de Einstein, como a propagação de onda e energia, a “incapacidade” de demonstração experimental para a época e principalmente no que diz respeito à velocidade de propagação da onda proposta por Einstein. Eddington foi tão grande opositor, da ideia de onda gravitacional se propagando mediante corpos massivos no espaço-tempo, que formulou uma das frases mais irônicas na época da elaboração teórica das ondas gravitacionais, em mencionar que as referidas ondas se propagavam na “velocidade do pensamento”.

No decorrer de todo o processo de construção das ondas gravitacionais, a maior dificuldade se deu na sua comprovação experimental, processo crucial na validação teórica, onde a menção inicial seria de que o modelo proposto para supostamente irradiar as ondas mencionadas seria um sistema binário de estrelas, mas depois sendo mencionada a possibilidade de buracos negros também irradiarem, como proposto por Schwarzschild [2].

As estimativas iniciais, feitas pelo próprio Einstein, apontavam corretamente que as amplitudes típicas das ondas gravitacionais seriam minúsculas, talvez não detectáveis na prática [3].

### 3. A DESCOBERTA DAS ONDAS GRAVITACIONAIS

Segundo a definição do LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), “as ondas gravitacionais são ‘ondinhas’ no tecido espaço-tempo causado por alguns dos processos mais violentos e energéticos do Universo” [1]. Em outras palavras, ondas gravitacionais são oscilações espaço-temporais ocasionadas por corpos supermassivos que ao colidirem por perda energética, liberam energia em forma de ondas que curvam o espaço-tempo e se propagam na velocidade da luz.

Na época do entendimento sobre as ondas gravitacionais, mesmo com todo avanço da teoria ondulatória da gravitação, o maior problema da passagem das ondas gravitacionais de “simples” teoria para se tornar algo aplicável e real, foi sempre

a sua experimentação. Era compreensiva a falta de preparo tecnológico para a detecção das ondas gravitacionais na época, sabendo que as revoluções tecnológicas somente tomaram impulso apenas na metade do século XX, mas mesmo assim se tornou um grande empecilho na fundamentação da teoria [2].

Essa problemática começa a ter outro rumo a partir das décadas de 1960 e 1970, com o físico americano Joseph Weber (1919-2000) pioneiro na tentativa de detecção das ondas gravitacionais, e seus alunos. Vale lembrar que nessa época as ondas gravitacionais já possuíam uma estrutura matemática e física bem construída, logo faltava apenas a sua detecção. Com a iniciativa de Weber, inicia-se uma verdadeira corrida tecnológica e científica na construção de dispositivos capazes de detectar as tão esperadas ondas gravitacionais.

Outro nome importante na busca pela detecção das ondas gravitacionais de Einstein, é o físico teórico americano Kip Thorne (1940- ) um dos pioneiros e um dos maiores impulsionadores na criação e manutenção do LIGO, responsável atualmente pela detecção direta das ondas gravitacionais.

Desde 1992, o LIGO é implementado como um centro de pesquisa e detecção por Kip Thorne, Ronald Drever, físico escocês do CALTECH (California Institute of Technology), e Rainer Weiss, físico americano do MIT (Massachusetts Institute of Technology). Juntos e com o apoio da NSF (National Science Foundation) e de outros laboratórios como o VIRGO Interferometer, constroem um dos mais emblemáticos e promissores dispositivos experimentais de meio bilhão de dólares, com o objetivo de detectar as famosas ondas gravitacionais [2].

Após 100 anos da predição de Einstein da existência das ondas gravitacionais, e 24 anos de pesquisa e trabalho persistente, no dia 11 de fevereiro de 2016, o LIGO divulga para a mídia mundial a observação direta das ondas gravitacionais, em um artigo intitulado: “Observation of Gravitational Waves from Binary Black Hole Merger”, publicado na revista científica *Physical Review Letters* [4]. A divulgação das detecções ocorreu em 2016, mas as detecções em si ocorreram em duas épocas, a primeira em 14 de setembro de 2015 e a segunda em 26 de dezembro de 2015, trazendo uma segurança a mais na confirmação das ondas gravitacionais [2].

A detecção que o LIGO conseguiu captar teve como origem um processo já esperado entre buracos negros há 1,3 milhões de anos-luz da Terra. Tal momento na história do desenvolvimento científico e tecnológico, ofereceu não só à comunidade científica provas da existência das ondas gravitacionais, como também bases reais da ação e existência de buracos negros. Já era predito que os únicos entes, capazes de gerar ondas gravitacionais que possam se propagar pelo espaço, eram sistemas binários de estrelas ou de buracos negros, devido a sua elevada massa. No caso da detecção do LIGO, o fenômeno ocorreu devido à fusão entre dois buracos negros de massas respectivamente iguais a 36 e 29 vezes a massa do Sol.

Todo o processo de captação das ondas gravitacionais, desde a simulação do sistema binário de buracos negros até a prova concisa da existência das ondas gravitacionais, ocorreu por técnicas de interferômetros de luz instalados em Hanford, Washington, DC (ver Figura 1), e em Livingston, Louisiana, U.S.A. (ver Figura 2), com um equipamento similar ao interferômetro dos físicos americanos Michelson & Morley, construído em 1887, com espelhos suspensos em sistemas a vácuo em braços de 3 a 4 km de extensão que acabavam por gerar padrões de interferência [2].

As ondulações gravitacionais ao passarem pelo interferômetro mudam o padrão de interferência, informando que algo passou por aquela região. Como o sistema inteiro estava a vácuo e livre de qualquer influência externa, a mudança do padrão de interferência só poderia ocorrer em duas situações: pela mudança da fonte (feixe de luz), ou pela mudança dos braços, no quesito movimentação dos espelhos. Com essa logística, ficava mais clara a identificação das ondas gravitacionais.

Dados do artigo do LIGO, publicado em 11 de fevereiro de 2016, mostram que a primeira detecção, identificada por GW150914, chegou até o interferômetro com uma frequência de 35 a 250 Hz e uma amplitude muito baixa de aproximadamente  $1,0 \times 10^{-21}$  m, como já era de se esperar, amplitudes muito baixas que invalidaram por muitos anos a sua detecção. Esse foi um ponto que comprovou que de fato se tratava de ondas gravitacionais. A segunda detecção, identificada por GW151226, apresentou parâmetros semelhantes, com uma frequência que variava de 35 a 450 Hz e uma amplitude de onda de aproximadamente  $3,4 \times 10^{-22}$  m.



Figura 1: LIGO – Hanford, Washington DC. Fonte: <https://www.ligo.caltech.edu/WA/image/ligo20150731d>



Figura 2: LIGO – Livingston, Louisiana, U.S.A. Fonte: <https://www.ligo.caltech.edu/WA/image/ligo20150731c>

O gráfico da Fig. 3, apresenta as proporções de amplitudes e frequências captadas pelos dois laboratórios. Os detectores foram calibrados com frequências entre 35 a 350 Hz afim de filtrar o máximo as linhas espectrais observadas e suprimir as grandes flutuações não compatíveis com a calibração do equipamento. Segundo os dados, a onda gravitacional GW150914 chegou primeiro no detector de Louisiana (L1) e após, aproximadamente, alguns milissegundos, chegou ao detector de Hanford (H1), com comprimentos de onda na ordem de gerar os padrões de confirmação.

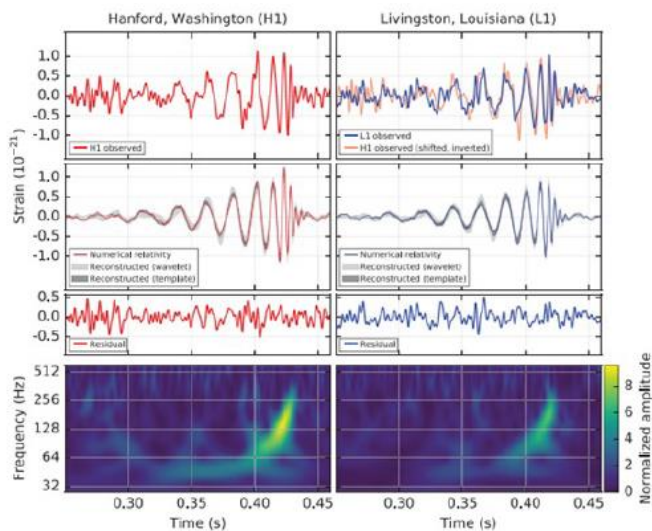


Figura 3: Gráficos das amplitudes e frequências das ondas gravitacionais detectadas pelo LIGO. Fonte: Ref. [4].

Os dois parâmetros (L1 e H1) são sobrepostos de forma invertida em termo de 94%, como é possível ver no primeiro gráfico do lado direito (parte superior), em L1, para que fossem subtraídas as formas das ondas e filtrado os resíduos

para melhor análise das curvas da onda, mostrados na terceira linha. A última linha dos gráficos mostra as ondas sendo compatíveis com a calibração do detector, mantendo sua frequência aumentada com o tempo [2,5].

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A detecção feita pelo LIGO demonstra a existência de sistemas binários de buracos negros. Esta é a primeira detecção direta de ondas gravitacionais e a primeira observação de uma fusão de uma binária de buracos negros.

Embora muitos astrofísicos já tivessem dado os buracos negros como existentes, o certo é que a comprovação de sua existência só ficou demonstrada através da detecção de ondas gravitacionais: *o que se confirmou foi a existência de buracos negros em pares, orbitando um em torno do outro. Isso a astrofísica ainda não havia confirmado. Agora está confirmado* [6].

Em 2017, os físicos Rainer Weiss do MIT (Massachusetts Institute of Technology), Barry Barish e Kip Thorne do Caltech (California Institute of Technology) foram laureados com o Prêmio Nobel de Física, pela então detecção das ondas gravitacionais.

Através da detecção das ondas gravitacionais se abriu caminho para novos estudos da Astronomia Gravitacional.

#### REFERÊNCIAS

- [1] LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). <https://www.ligo.caltech.edu/page/what-are-gw>. Página acessada em 17 de dezembro de 2022.
- [2] Barros, B. S. M. e Souza, E. V., Estudo das ondas gravitacionais no ensino médio: uma abordagem teórica e experimental. arXiv: 2003.08543v1 [physics.ed-ph] 19 Mar 2020.
- [3] Saa, A., Cem anos de buracos negros: o centenário da solução de Schwarzschild. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, nº 4, e4201 (2016).
- [4] Abbott, B. P. et al., Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Physical Review Letters, 116, 061102 (2016).
- [5] Cattani, M. e Bassalo, J. M. F., Gravitational waves observation: brief comments. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, nº 4, e4202 (2016).
- [6] Aguiar, O. D., Ondas gravitacionais existem: A grande descoberta do observatório LIGO. Palestra ministrada na Ciência às 19 horas, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, em 16 de março de 2018. <https://ciencia19h.ifsc.usp.br/ondas-gravitacionais-existem-a-grande-descoberta-do-observatorio-ligo-2/> Página acessada em 19 de dezembro de 2022.