

# Ondas Gravitacionais

## CITAÇÃO

Bertolami, O, Gomes, C (2017)  
Ondas Gravitacionais,  
*Rev. Ciência Elem.*, V5(04):051.  
[doi.org/10.24927/rce2017.051](https://doi.org/10.24927/rce2017.051)

## EDITOR

José Ferreira Gomes,  
Universidade do Porto

## RECEBIDO EM

11 de novembro de 2017

## ACEITE EM

13 de novembro de 2017

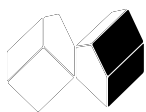
## PUBLICADO EM

06 de dezembro de 2017

## COPYRIGHT

© Casa das Ciências 2017.  
Este artigo é de acesso livre,  
distribuído sob licença Creative  
Commons com a designação  
[CC-BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), que permite  
a utilização e a partilha para fins  
não comerciais, desde que citado  
o autor e a fonte original do artigo.

[rce.casadasciencias.org](http://rce.casadasciencias.org)



Orfeu Bertolami\*, Cláudio Gomes

Departamento de Física e Astronomia/ CFP/ Universidade do Porto

\*orfeu.bertolami@fc.up.pt

**As ondas gravitacionais são perturbações no tecido do espaço-tempo que se propagam transversalmente e à velocidade da luz. Estas perturbações são geradas, por exemplo, aquando da colisão de dois objetos compactos, como buracos negros e estrelas de neutrões.**

Logo após a formulação da Teoria da Relatividade Geral, em novembro de 1915, Albert Einstein descobre, em junho de 1916, que as equações de campo da teoria admitiam soluções do tipo onda no limite de campos fracos, as ondas gravitacionais<sup>1</sup>. Em 1918, Einstein reviu o seu estudo anterior, devido a hipóteses injustificadas relativas às propriedades destas ondas, mostrando a natureza quadripolar das mesmas<sup>2</sup>. Mais tarde, em 1937, já vivendo em Princeton, nos EUA, Einstein mostra, em colaboração com o seu jovem assistente, Nathan Rosen, que as ondas gravitacionais existiam como soluções da teoria completa<sup>3</sup>.

Contudo, somente em 1974 se detetaram indiretamente as ondas gravitacionais, através da observação da perda de energia de um binário de pulsares (estrelas de neutrões com movimento de rotação e que emitem jatos de partículas aceleradas), PSR 1913+16, por Russell Hulse e Joseph Taylor<sup>4</sup>. Pela sua descoberta, ambos receberam o Prémio Nobel da Física em 1993. Em 2015 observou-se pela primeira vez um sinal direto de uma onda gravitacional nos interferómetros dos dois observatórios da colaboração LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)<sup>5</sup>. A conceção e a construção deste interferómetro levou a Academia Real Sueca de Ciências a atribuir o prémio Nobel da Física em 2017 aos pioneiros Rainer Weiss, Barry C. Barish e Kip S. Thorne<sup>6</sup>. Note-se que esta descoberta não foi só relativa a ondas gravitacionais, mas também à primeira deteção da colisão e fusão de dois buracos negros e a subsequente formação de um buraco negro maior. Desde então, mais 4 eventos similares foram detetados, na verdade, em frequências audíveis para um humano<sup>7,9</sup>. Em agosto do presente ano foi anunciada a observação de ondas originadas na fusão de duas estrelas de neutrões, e, simultaneamente, também a observação de radiação gama e no visível<sup>10,11</sup>.

As ondas gravitacionais correspondem a uma perturbação linear do tensor métrico em torno de uma dada geometria do espaço-tempo, que se propaga ao longo deste, obedecendo a uma equação de onda. Na Relatividade Geral, essa onda tem duas polarizações, uma “+” e uma “x” (FIGURA 1 a) e b)). Como a onda gravitacional não transporta matéria, ela ape-

nas distorce o espaço-tempo à sua volta no sentido da sua propagação. Assim, se imaginarmos um anel de partículas cujo centro é atravessado pelo eixo de propagação da onda, o que se observa é uma compressão em torno de  $x$  e uma distensão em torno de  $y$ , e depois uma compressão em torno de  $y$  e distensão em torno de  $x$ , e isto ocorre ciclicamente se a onda é polarizada em cruz "+" (analogamente se pode pensar na polarização cruzada "x" em que os eixos em que estes fenômenos ocorrem são as bissetrizes dos quadrantes).

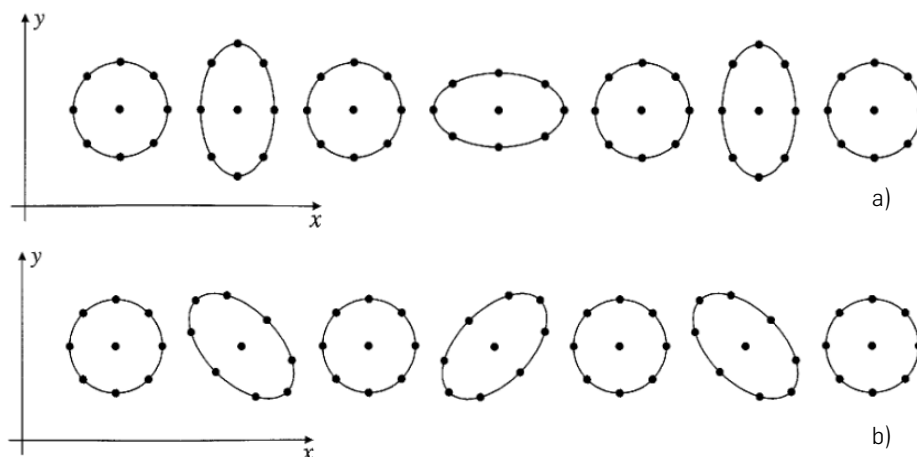


FIGURA 1. a) Onda gravitacional com polarização "+" a passar no sentido da folha de papel para fora num anel de partículas teste. b) Onda gravitacional com polarização "x" a passar no sentido da folha de papel para fora num anel de partículas teste.

Durante décadas, os cientistas aguardaram pela melhoria das técnicas interferométricas dos detetores, até que em 2014, os dois observatórios gémeos (um em Hanford, Washington, e outro em Livingston, Louisiana, nos EUA) da colaboração LIGO atingiram a impressionante precisão de

$$\frac{\Delta L}{L} \approx 5 \times 10^{-22} \text{ (500 Hz)}.$$

Esta precisão significa que para os braços, de 4km cada, do interferómetro LIGO, é possível detetar um deslocamento da ordem de  $10^{-19}$  metros, ou seja, a capacidade de medir uma fração de 10 000 vezes menor que o tamanho de um próton! Este é o interferómetro mais preciso alguma vez contruído! O funcionamento de cada um deles é baseado no interferómetro de Michelson, como mostrado na figura seguinte:

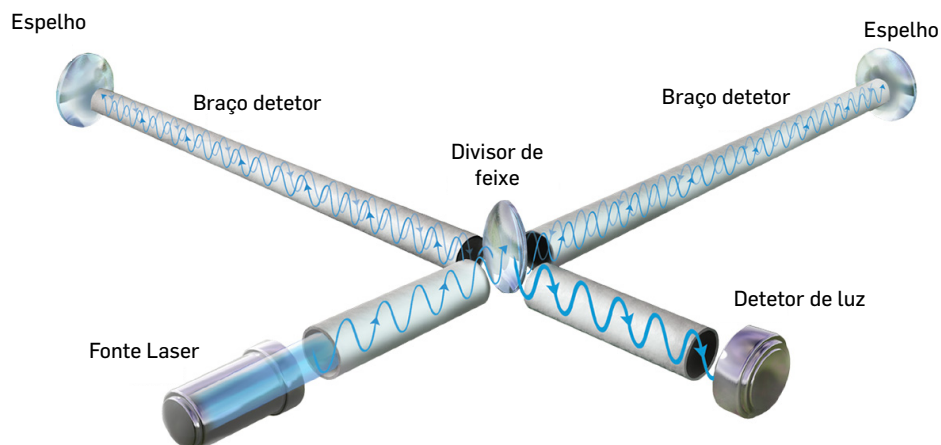


FIGURA 2. Representação esquemática do interferômetro de Michelson. Um feixe de laser segue até a um divisor que envia o sinal para dois espelhos perpendiculares entre si, onde é refletido e chega novamente ao divisor que remete para um detetor<sup>13</sup>.

No caso dos interferômetros do LIGO, existe um atraso de meio comprimento de onda no percurso de um dos braços de tal modo que o sinal que é observado no detetor resulta de sinal em oposição de fase, cuja soma é nula. Assim, quando o sinal é não nulo estamos na presença de algo que perturbou o sistema. Notemos que os dois observatórios têm muitos outros sistemas de interferência de modo a excluir falsos positivos, sejam sísmos, a passagem de veículos, comboios, etc. Quando uma onda gravitacional atinge o sistema, a distância entre os espelhos varia e a onda é detetada. O comportamento sinusoidal da onda é observado no evento ilustrado na (FIGURA 3):

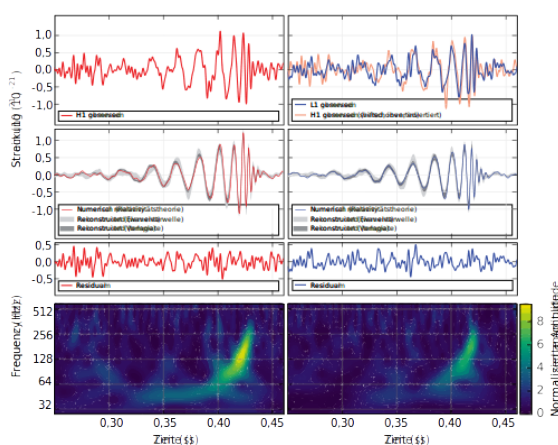


FIGURA 3. Primeiro sinal da propagação de ondas gravitacionais resultantes da colisão e fusão de dois buracos negros, em que a frequência aumenta no processo da fusão e decresce para zero na formação do buraco negro final<sup>5</sup>.

Apesar de as ondas gravitacionais descritas acima serem, em geral, analisadas a se propagarem no vácuo, é possível estudá-las na presença de matéria, ou, por exemplo, com a inclusão da constante cosmológica ou de um fluido de energia escura. Pode-se também estudar as ondas originadas em teorias alternativas da gravitação, por exemplo, em teorias com um acoplamento não-mínimo entre matéria e curvatura<sup>14</sup>.

De facto, dadas as observações diretas de sinais de ondas gravitacionais, há agora ferramentas para estudar a natureza da gravidade e, em particular, confrontar a Teoria da Relatividade Geral com outras teorias alternativas da gravitação, algumas das quais explicam as observações sem incluir matéria escura e energia escura na descrição cosmológica<sup>15-17</sup>. Estamos, pois, numa nova era de grandes descobertas na Física e na Astronomia!

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> A. EINSTEIN, Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin, part 1: 688–696 (1916).
- <sup>2</sup> A. EINSTEIN, Über Gravitationswellen, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin, Part 1: 154–167 (1918).
- <sup>3</sup> A. EINSTEIN, N. ROSEN, On gravitational waves, Journal of the Franklin Institute, 223, 43–54 (1937).
- <sup>4</sup> R. A. HULSE AND J. H. TAYLOR, Discovery of a pulsar in a binary system, Astrophys. J. 195, L51 (1975).
- <sup>5</sup> B. P. ABBOTT ET AL., [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, Phys. Rev. Lett. 116, no. 6, 061102 (2016).
- <sup>6</sup> Prémio Nobel da Física 2017: [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2017/](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/)
- <sup>7</sup> B. P. ABBOTT ET AL., [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence, Phys. Rev. Lett. 116, 241103 (2016).
- <sup>8</sup> B. P. ABBOTT ET AL., [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2, Phys. Rev. Lett., 118, 22, 221101 (2017).
- <sup>9</sup> B. P. ABBOTT ET AL., [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence, Phys. Rev. Lett. 119, 141101 (2017).
- <sup>10</sup> B. P. ABBOTT ET AL., [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, The Astrophys. J. Lett., 848, L12 (2017).
- <sup>11</sup> D. A. COULTER ET AL., Swope Supernova Survey 2017a (SSS17a), the optical counterpart to a gravitational wave source, Science 10.1126/science.aap9811 (2017).
- <sup>12</sup> *Spacetime and Geometry: Introduction to General Relativity*, Sean Carroll (Addison Wesley, 2004).
- <sup>13</sup> *Science News*, Vol. 189, No. 5, March 5, 2016, p. 22.
- <sup>14</sup> O. BERTOLAMI, C. GOMES, F. S. N. LOBO, Gravitational waves in theories with a non-minimal curvature-matter coupling, arXiv:1706.06826 [gr-qc] (2017).
- <sup>15</sup> O Livro das Escolhas Cósmicas, Orfeu Bertolami (Ed. Gradiva 2006).
- <sup>16</sup> BERTOLAMI, O, "O Big Bang: a origem do Universo", in *Do Big Bang ao Homem* (U. Porto Edições 2016).
- <sup>17</sup> BERTOLAMI, O, PÁRAMOS, J, *Seis Breves Apontamentos de Cosmologia Contemporânea* (U. Porto Edições 2017).