

PARA QUÊ ISSO SERVE?

AINDA NÃO SABEMOS. FAZEMOS PESQUISA BÁSICA...

QUE BONITO! A GENTE SE MATANDO CARREGANDO PEDRAS
E ARRASTANDO ANIMAIS SELVAGENS, E OS SENHORES SE
DIVERTINDO FAZENDO COISAS QUE NÃO SERVEM PARA NADA!



tropeck 2011

Detecção das Ondas Gravitacionais

Wiliam Santiago Hipolito Ricaldi

Departamento de Ciências Naturais (DCN)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (São Mateus)

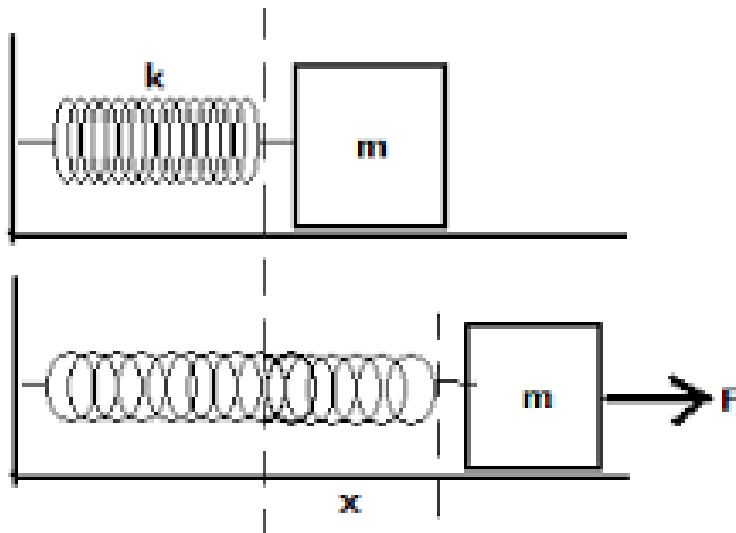
COSMO-UFES

<http://www.cosmo-ufes.org/>

O que são ONDAS?



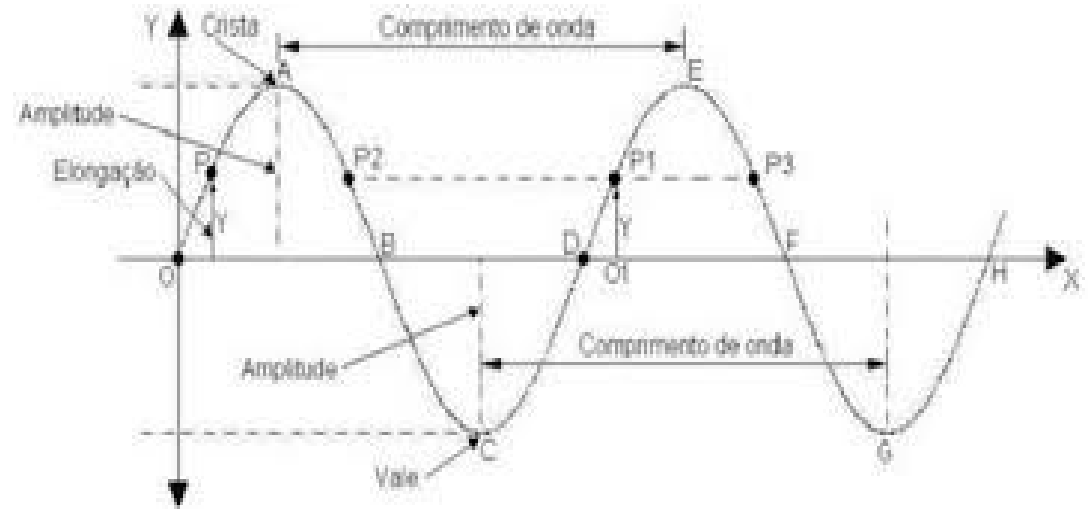
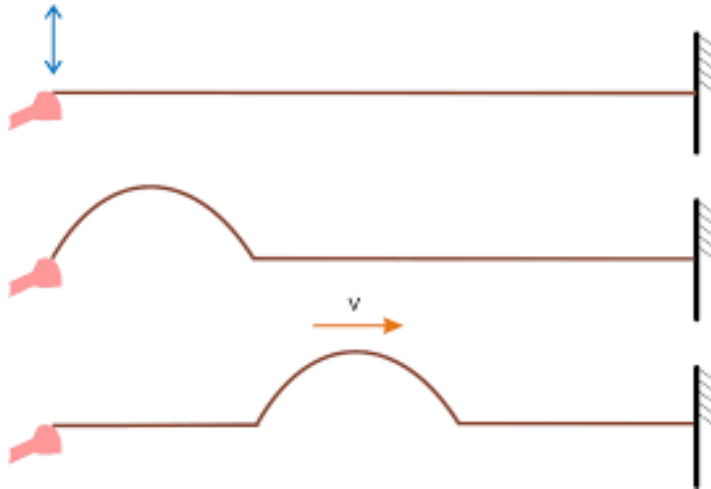
Movimentos Repetitivos (Harmônicos) e suas Características



Características:

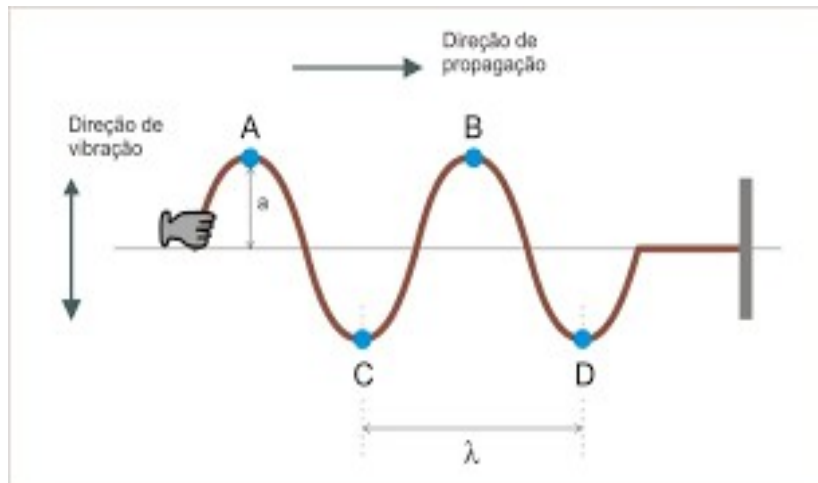
- Frequência
- Amplitude
- Se “Propagam” no tempo.

Ondas: Mov. Harmônico que se propaga no espaço



Características:

- Frequência
- Amplitude
- Se “Propagam” no tempo.
- Comprimento de onda
- Se “Propagam” no espaço..



O que são Ondas? São perturbações (vibrações) que se transmitem no espaço e no tempo transportando energia.

Matematicamente: Satisfaz a eq. Da onda

$$\rightarrow \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v_x^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Alguns exemplos:

Ondas em cordas e na água

Nas cordas:



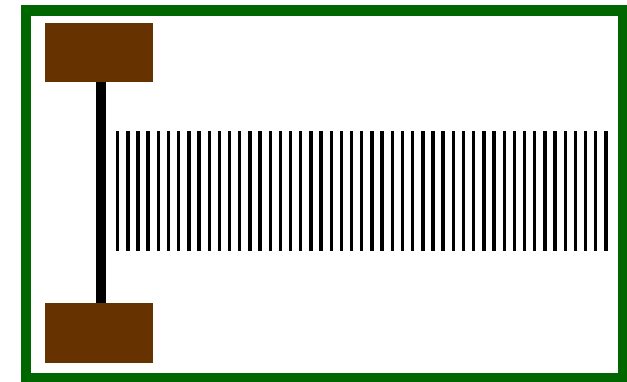
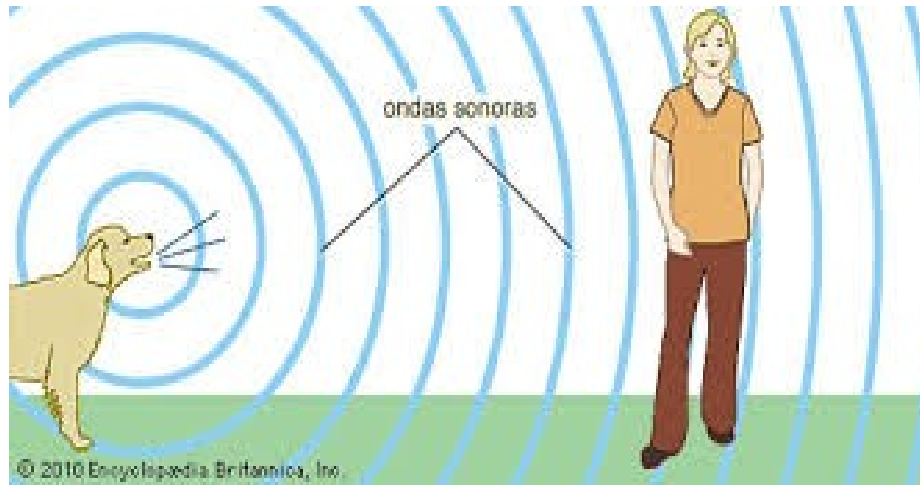
- Precisam da corda para se propagar.
- São transversais.
- Se propagam em uma dimensão (na verdade 2.)

Nas água:



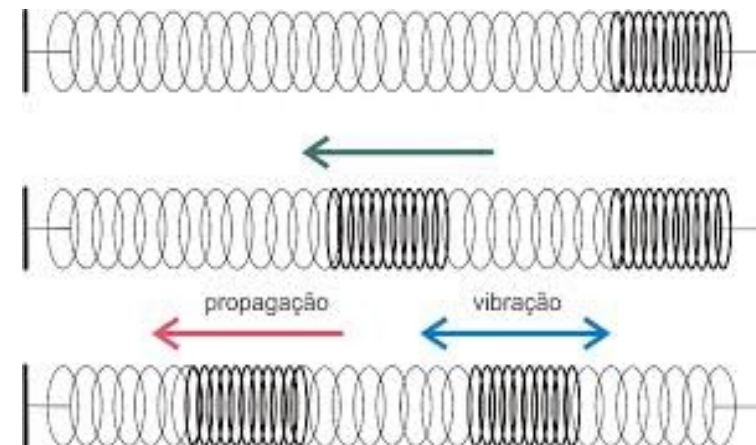
- Precisam da água para se propagar.
- São “transversais”.
- Se propagam em duas dimensões (na verdade 3.)

Ondas de pressão (Som)



Exemplo de ondas longitudinais:

- Precisam do ar (ou outro meio) para se propagar.
- São longitudinais.
- Se propagam em três dimensões (na verdade 4.)

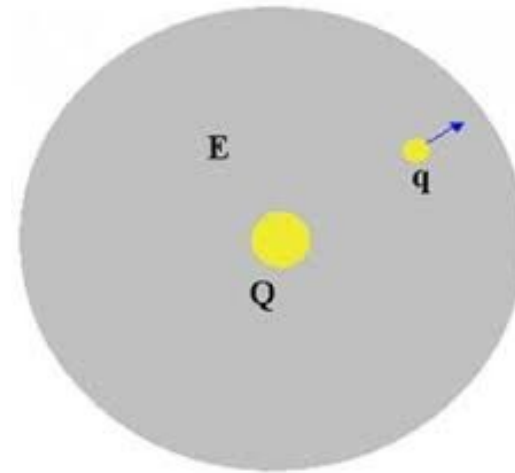
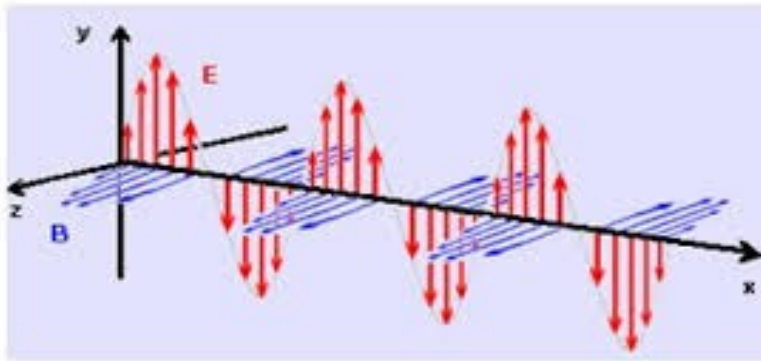


Ondas Mecânicas: Precisam de um meio mecânico para se propagar.

Existem ondas que se propaguem no vácuo?

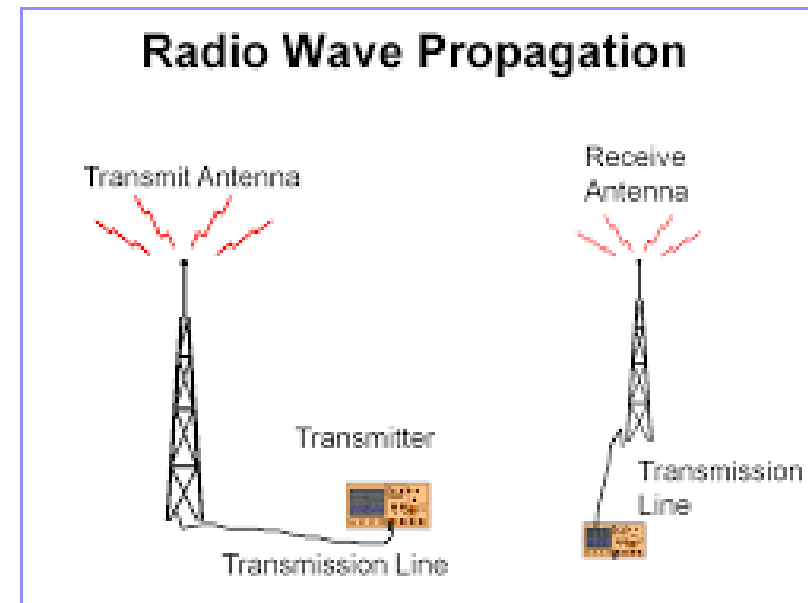
Ondas eletromagnéticas

Vibrações do campo eletromagnético. Não podem ser vistas mas sim detectadas. Satisfazem a eq. Da onda.

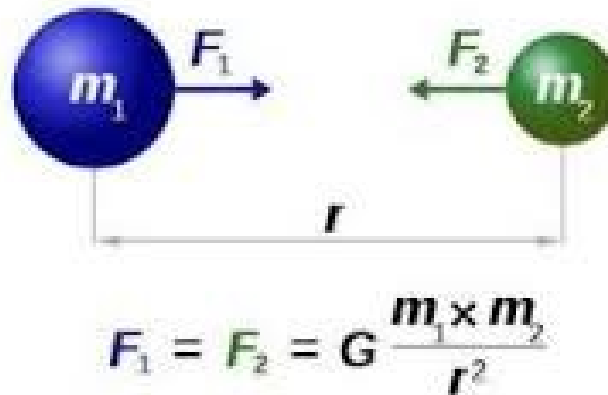


Equação das Ondas Eletromagnéticas:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{E} = 0$$
$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{B} = 0$$



Então as ondas gravitacionais são vibrações do campo gravitacional e satisfazem uma equação de onda?

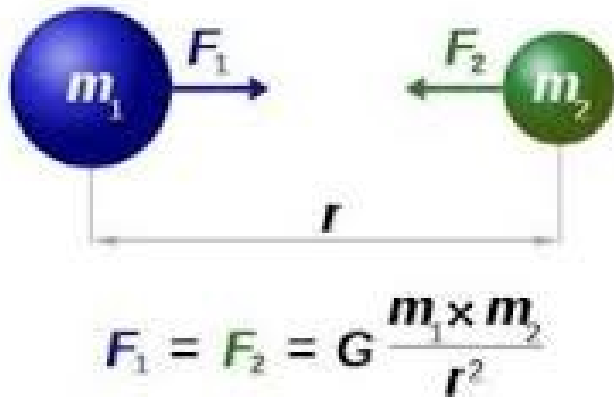


Mas como dois corpos que se atraem podem gerar uma onda?

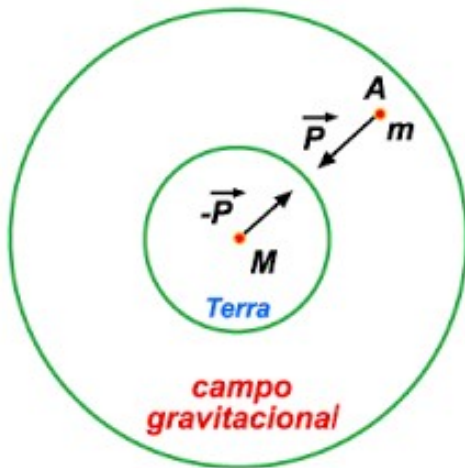
Formas de entender a GRAVITAÇÃO?

Gravitação

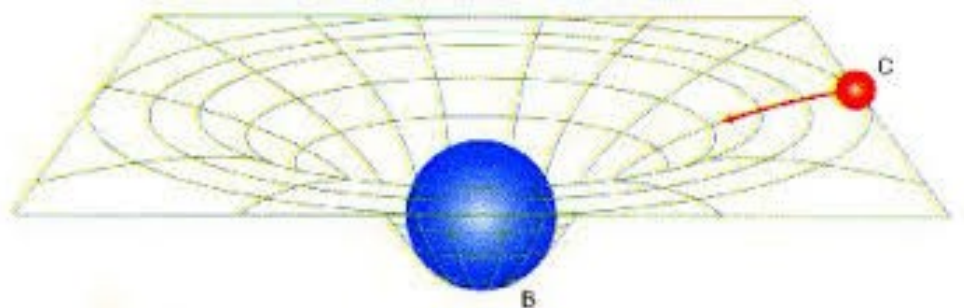
Newton (Interação-Força)



Campo gravitacional relacionado à força



Einstein (geometria)



Campo gravitacional relacionado à curvatura do espaço-tempo.

$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$

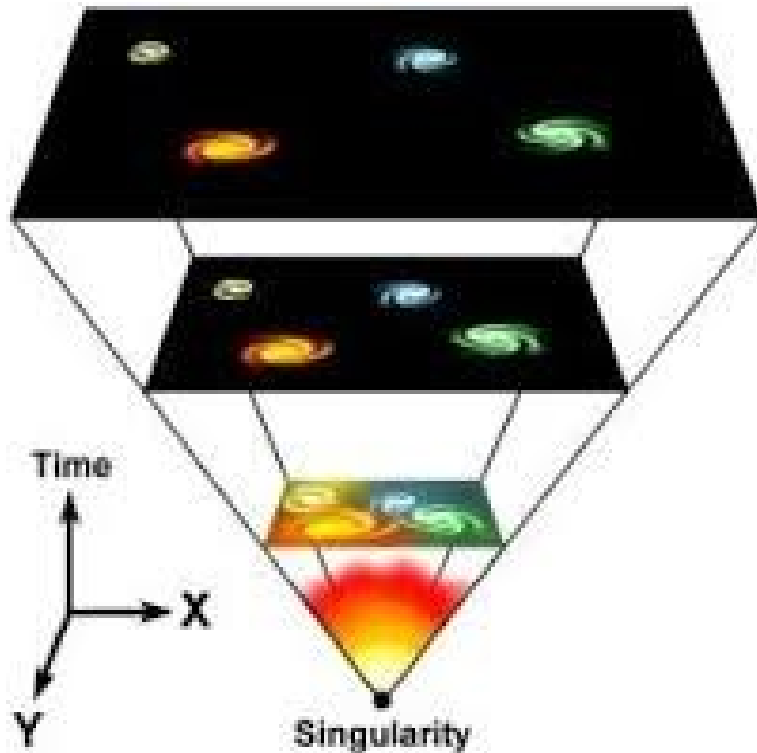
Espaço-tempo?

Todo ponto precisa de 4 coordenadas para ser descrito. 3 espaciais e 1 temporal.

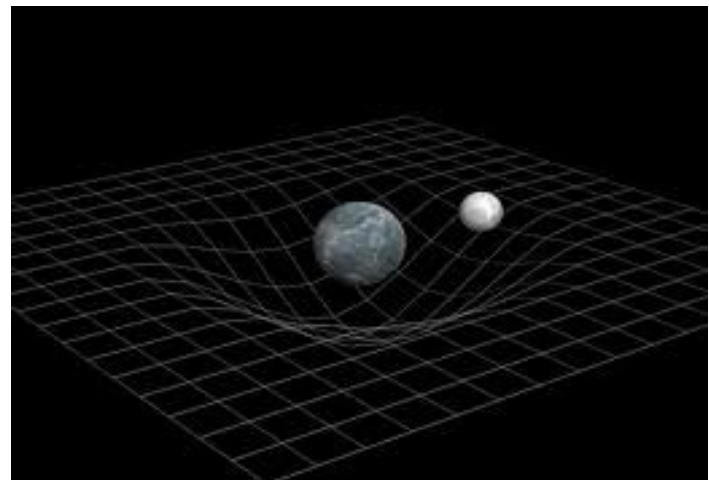


- O conjunto de todos os pontos (t, x, y, z) formam o espaço-tempo
- A forma de medir distâncias no espaço-tempo é diferente na Física Newtoniana e na Relatividade.

Aparência em 3 dimensões



Para cada tempo, temos uma superfície Bidimensional.

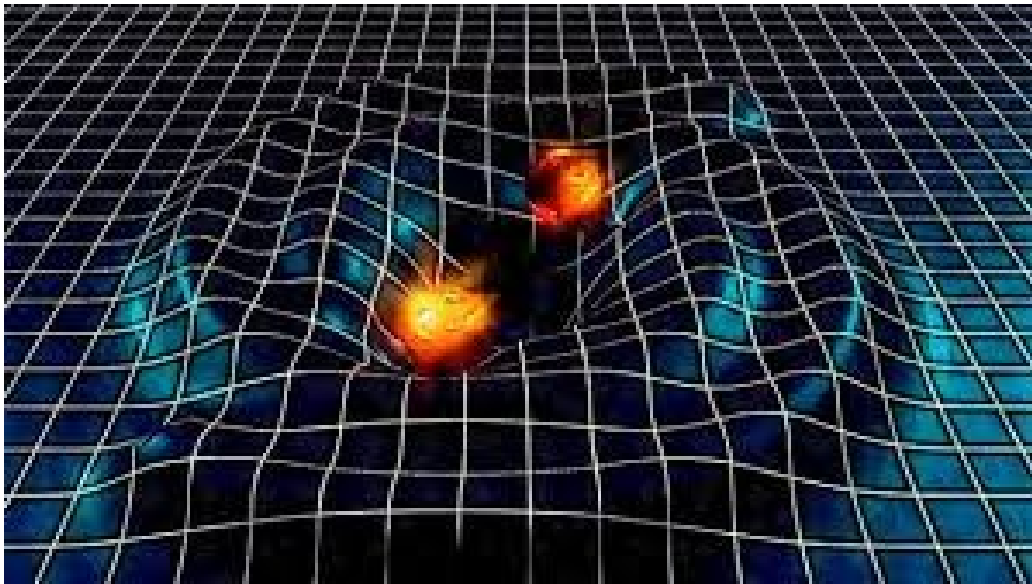


- Como na relatividade geral o campo gravitacional está relacionado ao espaço-tempo.
Então:

ONDAS GRAVITACIONAIS SÃO FLUTUAÇÕES (VIBRAÇÕES) NO ESPAÇO-TEMPO !

O que são ondas gravitacionais?

Ondas: Perturbações (de gravidade) do espaço tempo



$$\bar{h}^{\alpha\beta} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_+(t-r, \theta, \phi) & A_\times(t-r, \theta, \phi) \\ 0 & 0 & A_\times(t-r, \theta, \phi) & -A_+(t-r, \theta, \phi) \end{bmatrix}$$

$$\equiv \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_+(t-r, r, \theta, \phi) & h_\times(t-r, r, \theta, \phi) \\ 0 & 0 & h_\times(t-r, r, \theta, \phi) & -h_+(t-r, r, \theta, \phi) \end{bmatrix},$$

Representação matemática:

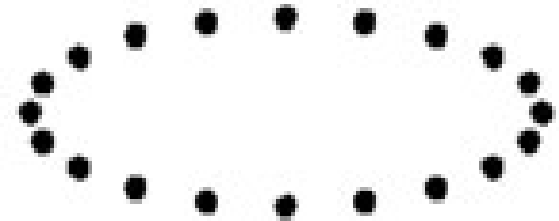
$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = 0$$

Qual o efeito das ondas gravitacionais?

Se a onda gravitacional passar perpendicular o plano da tela.

Características:

- Frequência
- Amplitude
- Se “Propagam” no espaço-tempo.
- Comprimento de onda
- .



Porém : efeito muito pequeno para ser detectado.

Como detectar ondas gravitacionais?...uma das formas usando interferômetros. LIGO

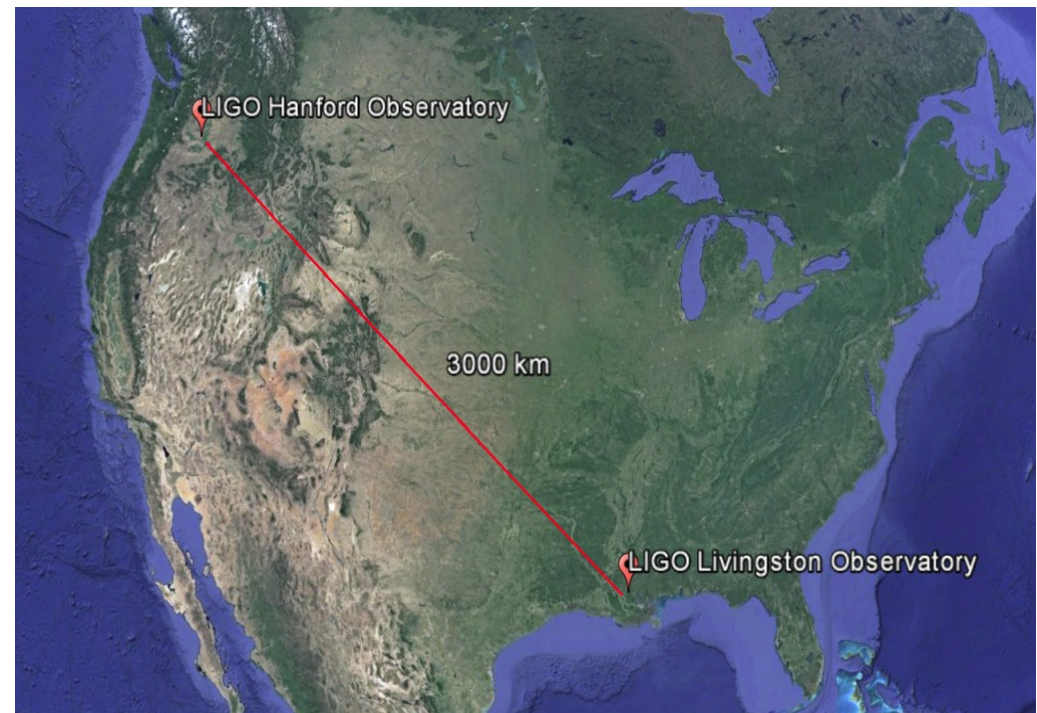
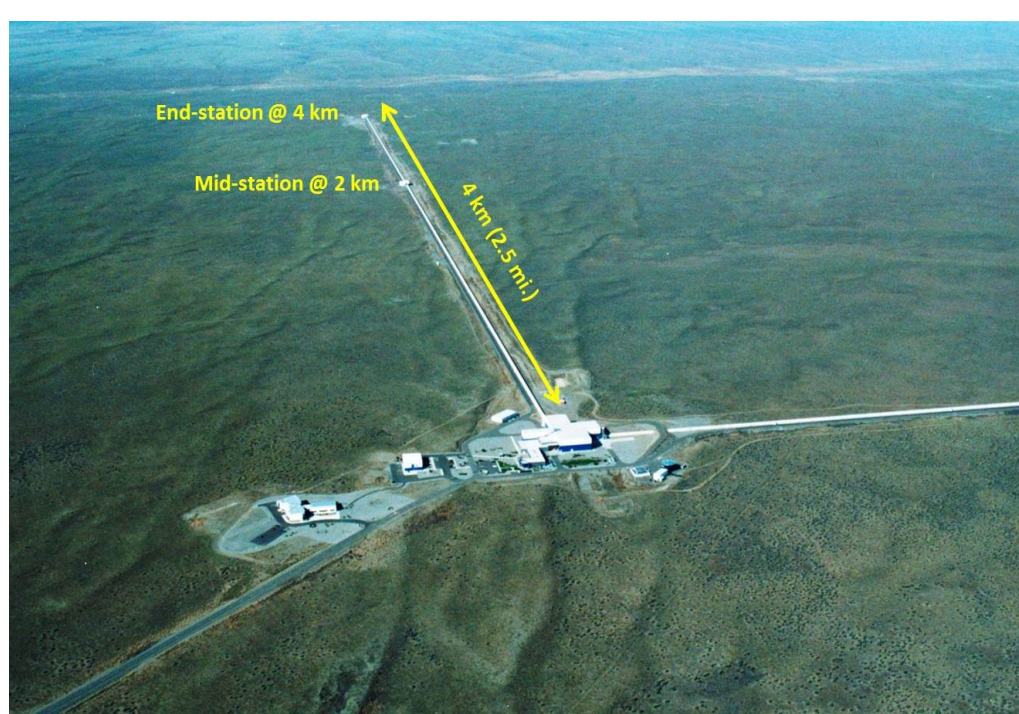
Descoberta das **ondas gravitacionais** pelo **LIGO**

(Anunciado em 11/02/2016)



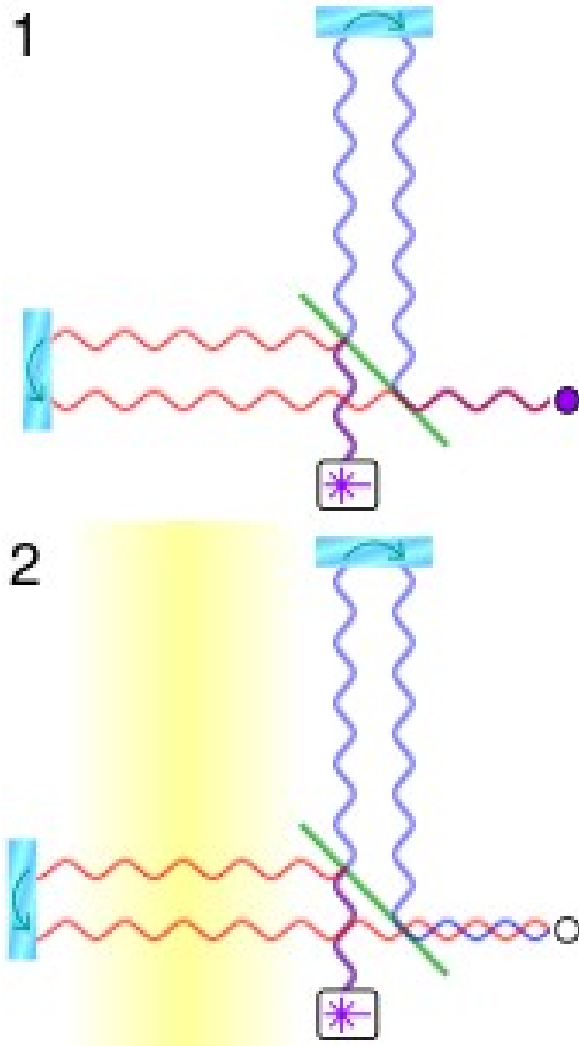
Descoberta das ondas gravitacionais

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)

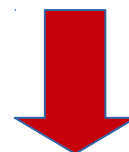


Detectado 14/09/2015, anunciado em 11/02/2016

Como funciona um interferômetro?

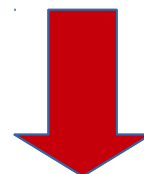


Sem ondas gravitacionais



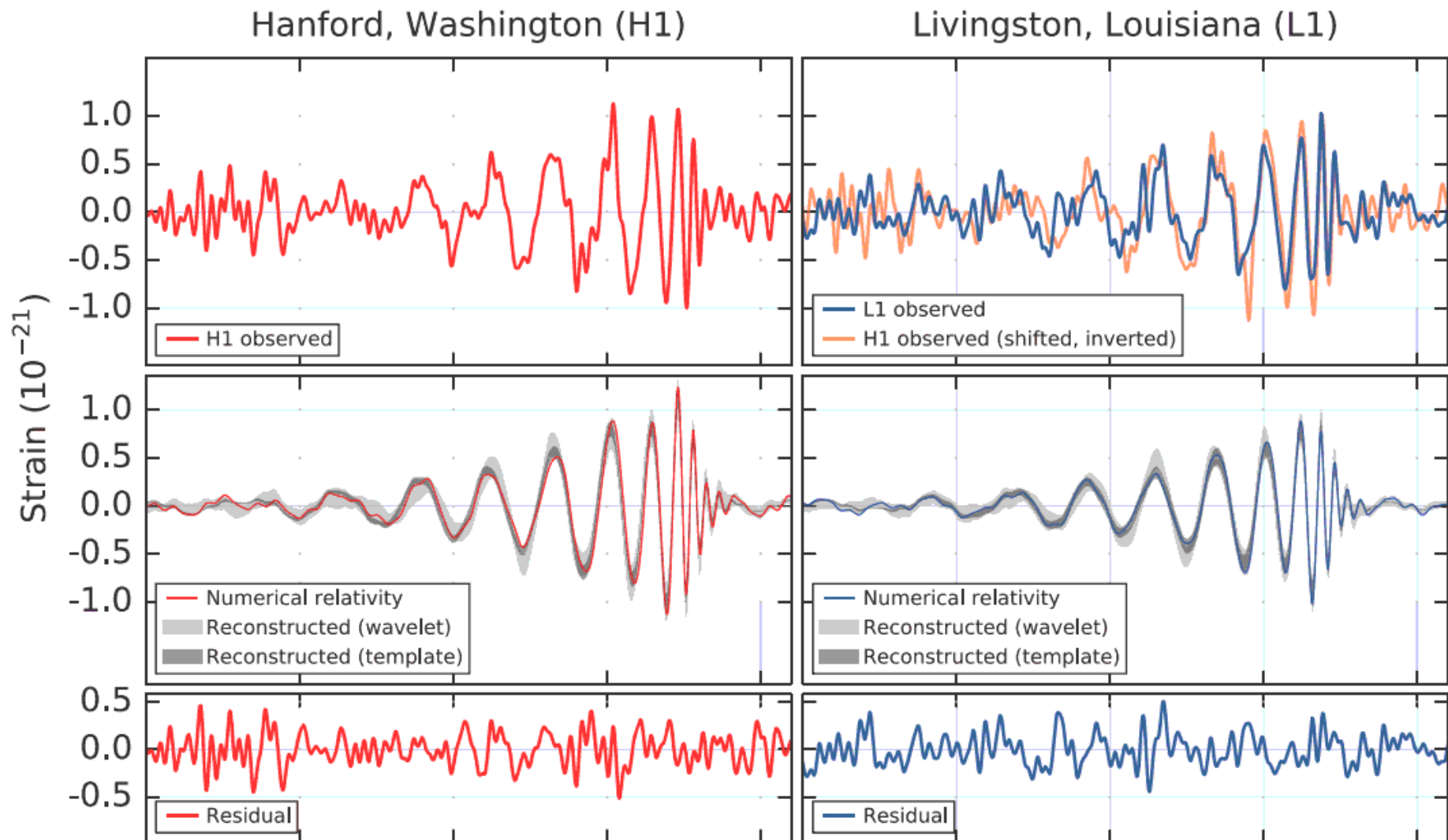
Não parecem figuras de interferência

Com ondas gravitacionais



Aparecem figuras de interferência

Resultados do LIGO



O que gerou as ondas gravitacionais detectadas?

- Dois buracos negros colidindo, formando um buraco negro maior, faz 1.3 bilhoes de anos



$$G_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}$$





Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4}M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4}M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4}M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5}M_{\odot}c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

QUESTÃO DE ESCALA (Medidas em metros)

0,00001

Tamanho de uma célula humana

0,00000000001

Tamanho de um átomo de hidrogênio

0,0000000000000000000084184

Tamanho de um próton, de acordo com as
mais recentes medições

Segunda e terceira detecções



GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 31 May 2016; published 15 June 2016)

We report the observation of a gravitational-wave signal produced by the coalescence of two stellar-mass black holes. The signal, GW151226, was observed by the twin detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) on December 26, 2015 at 03:38:53 UTC. The signal was initially identified within 70 s by an online matched-filter search targeting binary coalescences. Subsequent off-line analyses recovered GW151226 with a network signal-to-noise ratio of 13 and a significance greater than 5σ . The signal persisted in the LIGO frequency band for approximately 1 s, increasing in frequency and amplitude over about 55 cycles from 35 to 450 Hz, and reached a peak gravitational strain of $3.4^{+0.7}_{-0.9} \times 10^{-22}$. The inferred source-frame initial black hole masses are $14.2^{+8.3}_{-3.7} M_{\odot}$ and $7.5^{+2.3}_{-2.3} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $20.8^{+6.1}_{-1.7} M_{\odot}$. We find that at least one of the component black holes has spin greater than 0.2. This source is located at a luminosity distance of 440^{+180}_{-190} Mpc corresponding to a redshift of $0.09^{+0.03}_{-0.04}$. All uncertainties define a 90% credible interval. This second gravitational-wave observation provides improved constraints on stellar populations and on deviations from general relativity.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.241103



GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific and Virgo Collaboration)

(Received 9 May 2017; published 1 June 2017)

We describe the observation of GW170104, a gravitational-wave signal produced by the coalescence of a pair of stellar-mass black holes. The signal was measured on January 4, 2017 at 10:11:58.6 UTC by the twin advanced detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory during their second observing run, with a network signal-to-noise ratio of 13 and a false alarm rate less than 1 in 70 000 years. The inferred component black hole masses are $31.2^{+8.4}_{-6.0} M_{\odot}$ and $19.4^{+5.3}_{-5.9} M_{\odot}$ (at the 90% credible level). The black hole spins are best constrained through measurement of the effective inspiral spin parameter, a mass-weighted combination of the spin components perpendicular to the orbital plane, $\chi_{\text{eff}} = -0.12^{+0.21}_{-0.30}$. This result implies that spin configurations with both component spins positively aligned with the orbital angular momentum are disfavored. The source luminosity distance is 880^{+450}_{-390} Mpc corresponding to a redshift of $z = 0.18^{+0.08}_{-0.07}$. We constrain the magnitude of modifications to the gravitational-wave dispersion relation and perform null tests of general relativity. Assuming that gravitons are dispersed in vacuum like massive particles, we bound the graviton mass to $m_g \leq 7.7 \times 10^{-23}$ eV/ c^2 . In all cases, we find that GW170104 is consistent with general relativity.

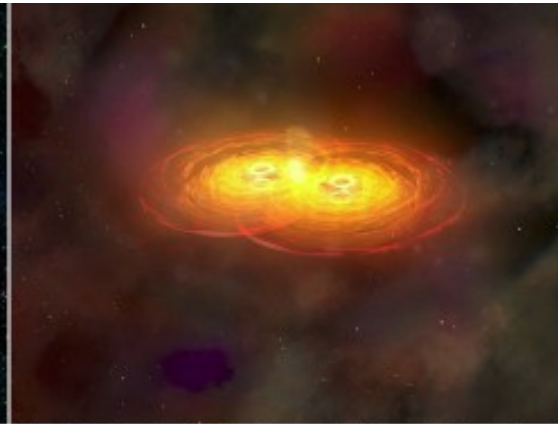
DOI: [10.1103/PhysRevLett.118.221101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.221101)

Outras fontes de Ondas Gravitacionais?

Estrelas de neutrons
Girando e colidindo



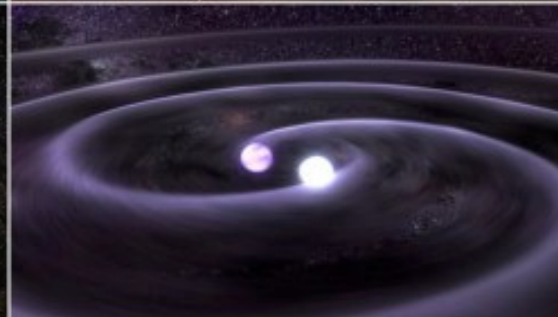
Fusão de buracos
negros supermassivos



Captura de estelas
supermassivas por
buracos negros



Binarias de anãs
brancas



Remasecentes do
universo primordial



Explosões de
supernovas



E daí?



Voltando a 1861-1862



Equações de Maxwell:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

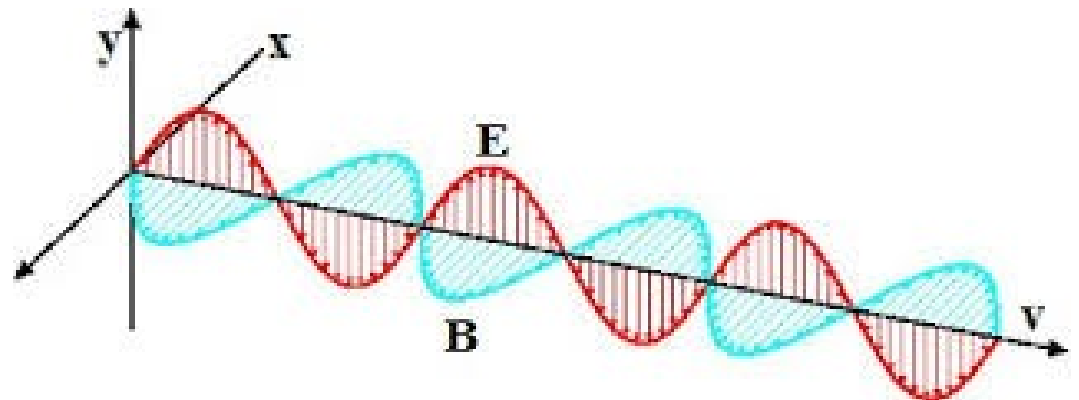
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



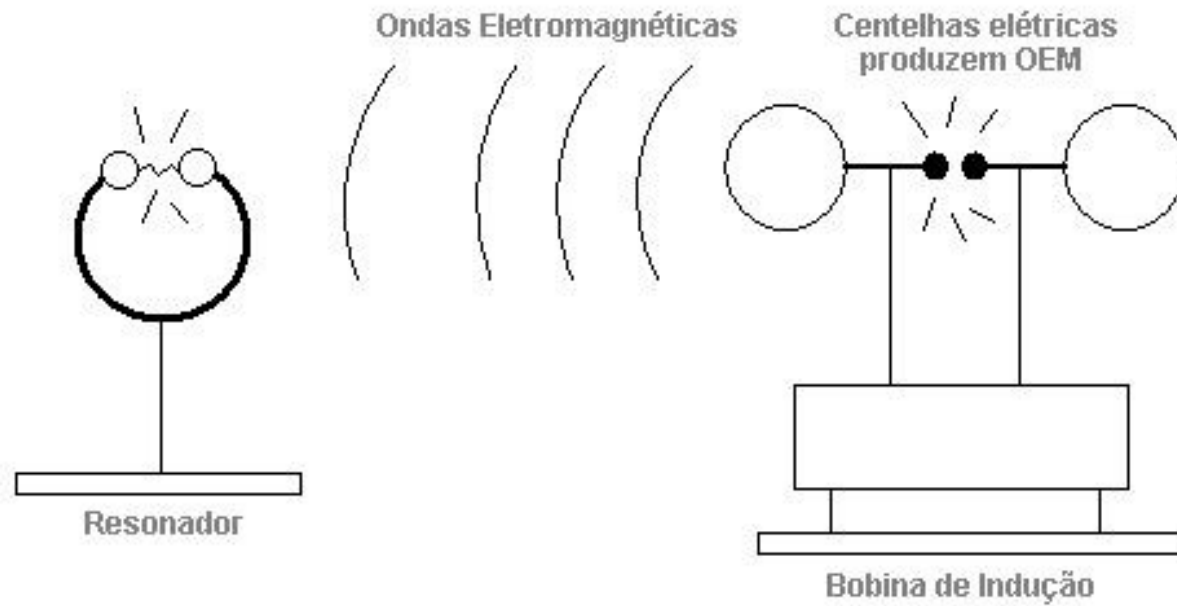
$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{E} = 0$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{B} = 0$$

Devem existir ondas
eletromagneticas !!!



Voltando a 1885 (15 de março)



Detecção das Ondas eletromagneticas!!!

Um pouco de história...



⇒ **Maxwell** (1831–1879) previa a existência de **ondas electromagnéticas**, idênticas às ondas luminosas. A sua teoria foi muito contestada na época;

Einstein?



⇒ Por volta de **1885**, o alemão **Heinrich Hertz**, realizou uma série de experiências que **comprovaram** que as **ondas electromagnéticas** previstas por Maxwell existiam mesmo e que podiam ser detectadas à distância. Estas ondas ficaram conhecidas por ondas hertzianas;

LIGO?



⇒ O italiano **Guglielmo Marconi**, em **1899**, iniciou a era das comunicações a longas distâncias, estabelecendo a 1.ª comunicação por ondas de rádio entre a Europa e a América. Surgia a telegrafia sem fios.

????

132 anos depois.....

