



**Universidade de Brasília**

FACULDADE UNB-PLANALTINA

CIÊNCIAS NATURAIS

**ONDAS GRAVITACIONAIS: UMA COMPROVAÇÃO DA  
TEORIA DA RELATIVIDADE**

AUTOR (A): LORRANY FERNANDA LOPES DA SILVA  
ORIENTADOR: ARMANDO DE MENDONÇA MAROJA

PLANALTINA-DF

2017/1



**Universidade de Brasília**

FACULDADE UNB-PLANALTINA  
CIÊNCIAS NATURAIS

ONDAS GRAVITACIONAIS: UMA COMPROVAÇÃO DA  
TEORIA DA RELATIVIDADE

AUTOR (A): LORRANY FERNANDA LOPES DA SILVA  
ORIENTADOR: ARMANDO DE MENDONÇA MAROJA

*Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Banca Examinadora, como  
exigência parcial para a obtenção de título  
de Licenciado do Curso de Ciências  
Naturais, da Faculdade UnB Planaltina, sob  
a orientação do Prof. Armando de  
Mendonça Maroja.*

## DEDICATÓRIA

Dedico a toda minha família, em especial a minha mãe Maria de Jesus que tanto lutou para me proporcionar uma formação, aos meus queridos e amados irmão Aline Fabiana, Aliky Matheus e Rikelme Henrique.

Dedico ao namorado Daniel Batista que acompanhou toda a minha jornada da graduação, me apoiando e estimulando sempre.

Dedico ao meu querido professor e orientador Armando de Mendonça Maroja, que me estimulou a realizar essa pesquisa, me dando todo apoio necessário.

Dedico a todo corpo docente do curso de ciências naturais que me acompanhou durante a graduação, contribuindo para meu desenvolvimento intelectual e pessoal.

Dedico a todos os colegas de curso em especial aos meus amigos Juliana Marques, Tiago Dione, Leandro Macêdo.

Dedico ainda a meu grande amigo Matheus Batista, que sempre me apoiou e me incentivou a nunca desistir.

## SUMÁRIO

1.0	Introdução	7
2.0	Ondas gravitacionais	11
3.0	LIGO	15
4.0	Banner	17
5.0	Resultados e discussão	19

Referências

Anexo

## Resumo

Desde os primórdios da humanidade que o céu tem sido um motivo de admiração e curiosidade, os povos primitivos trataram de associar os aspectos do céu aos fenômenos naturais. Antes da criação do telescópio acreditava-se que a Terra era o centro do sistema solar. Após a ampliação da resolução do telescópio realizada por Galileu pode-se constatar que o Sol era o centro do sistema solar e todos os planetas orbitavam a sua volta. O telescópio de Galileu permitiu uma ampliação da visão sobre o universo conhecido até então. No último século a astronomia foi constituída através da observação do universo com base na espectroscopia, utilizando das ondas eletromagnéticas de rádio, de raios-X, de raios gama, no infravermelho entre outras. A espectroscopia possibilitou o conhecimento sobre a natureza dos astros e também impulsionou os estudos sobre as ondas gravitacionais através do fenômeno do decaimento orbital. Quase tudo que sabemos sobre o universo foi proporcionado pela espectroscopia, contudo a espectroscopia é baseada no estudo das ondas eletromagnéticas e, e essas ondas podem ser deformadas e atenuadas à medida que viajam no espaço-tempo, e até mesmo por obstáculos no caminho até a Terra, sendo assim não conseguimos detectar a onda original liberada. Em 1915 Albert Einstein propôs a existência de ondas gravitacionais, através da reformulação do modelo de gravidade proposto por Newton. Einstein através da teoria da relatividade geral explicou que a força gravitacional era resultado da deformação do espaço-tempo pelos corpos, onde essa deformação libera energia em forma de ondas gravitacionais quando os corpos estão acelerados. A comprovação da existência de ondas gravitacionais só foi possível em 2015 graças aos experimentos realizados pelo Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser (LIGO), que conseguiu detectar simultaneamente através dos seus dois detectores um sinal de uma onda gravitacional liberado pela fusão de um par de buracos negros. Esse trabalho tem o objetivo de produzir um banner como recurso didático para auxiliar do ensino física na educação básica com tema central Ondas Gravitacionais, apresentando os detalhes dessa espetacular descoberta da Ciência Moderna e também mostro como essa descoberta é mais uma comprovação da teoria da relatividade geral proposta por Einstein. A teoria da relatividade contribuiu significativamente para construção da era tecnológica em que vivemos, é necessário compreendê-la e entender até que ponto essa comprovação científica da existência de ondas gravitacionais pode interferir em nossas vidas. As detecções das ondas gravitacionais podem mudar completamente a astronomia que conhecemos, pois as ondas gravitacionais não sofrem interferência do meio que se propaga, logo a onda detectada é a onda original liberado por eventos cósmicos, como a do big bang. Existe a expectativa de que no futuro poderemos

compreender a dinâmica do universo que provocou o big bang ou até mesmo verificar se realmente o big bang existiu ou ainda se ocorreu outro tipo evento, através da leitura da onda liberada por esse evento que devido a sua intensidade de força ainda se propaga no espaço-tempo.

**Palavras-chave:** Astronomia. Espectroscopia. Ondas gravitacionais. Teoria da relatividade. LIGO.

## Abstract

From the earliest days of humanity, heaven has been a source of admiration and curiosity, primitive peoples have tried to associate aspects of heaven with natural phenomena. Before the creation of the telescope it was believed that the Earth was the center of the solar system. After enlarging Galileo's telescope resolution, it can be seen that the Sun was the center of the solar system and all the planets orbited it. Galileo's telescope allowed an amplification of the view on the universe known until then. In the last century astronomy was constituted by observing the universe based on spectroscopy, using electromagnetic waves of radio, X-rays, gamma rays, infrared among others. Spectroscopy made possible the knowledge about the nature of the astros and also stimulated the studies on the gravitational waves through the phenomenon of the orbital decay. Almost everything we know about the universe has been provided by spectroscopy, however, and spectroscopy is based on the study of electromagnetic waves, and these waves can be deformed and attenuated as they travel in space-time, and even by obstacles on the way to the Earth, so we can not detect the original wave released. In 1915 Albert Einstein proposed the existence of gravitational waves, through the reformulation of the gravity model proposed by Newton. Einstein through the theory of general relativity explained that gravitational force was the result of the deformation of space-time by bodies, where this deformation releases energy in the form of gravitational waves when bodies are accelerated. Gravity wave evidence was only possible in 2015 thanks to the experiments conducted by the Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO), which was able to detect simultaneously through its two detectors a signal of a gravitational wave released by the fusion of a pair of Black holes. This work aims to produce a banner as a didactic resource to assist physical education in basic education with central theme Gravitational Waves, presenting the details of this spectacular discovery of Modern Science and also show how this discovery is another proof of the theory of general relativity Proposed by Einstein. The theory of relativity contributed to the construction of the technological age in which we live, it is necessary to understand it and to understand to what extent this scientific proof of the existence of gravitational waves can interfere in our lives. Detections of gravitational waves can completely change the astronomy we know, because gravitational waves do not suffer interference from the medium that propagates, so the wave detected is the original wave released by cosmic events, such as the big bang. There is the expectation that in the future we will be able to understand the dynamics of the universe that provoked the big

bang or even verify if the big bang really existed or if another type event occurred, by reading the wave released by that event due to its intensity Of force still propagates in space-time.

**Keywords:** Astronomy. Spectroscopy. Gravitational waves. Theory of relativity. LIGO.



## 1.0 – Introdução:

Esse trabalho foi motivado pela notícia da espetacular detecção das ondas gravitacionais em fevereiro de 2015, e assim surgiu o objetivo de produzir um recurso didático informativo sobre as ondas gravitacionais e como elas comprovam a teoria da relatividade de Einstein. A relatividade e os estudos referentes às ondas foram à base para o desenvolvimento tecnológico, como as tecnologias GPS, celulares, aparelho de televisão entre outros, logo se torna necessário compreender como essa nova descoberta irá nós impactar.

A astronomia é considerada a mais antiga dentre as ciências, ela é um tema central a ser estudado durante o ensino fundamental. O PCN (1998) traz o tema astronomia dentro do ensino de “Terra e Universo”, na disciplina de Ciências Naturais, cujo objetivo é proporcionar uma compreensão do universo, pois essa compreensão possibilita a ampliação da visão para além dos limites terrestres. As ciências naturais no ensino fundamental têm como foco desenvolver as competências necessárias para que o aluno consiga compreender o mundo e atuar nele como cidadão, utilizando conhecimentos de natureza científica e tecnológica.

O céu sempre foi e sempre será um grande mistério a ser desvendado. O homem primitivo em busca de garantir sua sobrevivência tratou de associar os fenômenos que afetavam de alguma forma sua vida com a composição do céu. Após grandes períodos de observações celestes, o homem primitivo percebeu que existia certa relação entre a forma em que a Lua e as estrelas se apresentavam com o tipo de clima e variação da temperatura. A falta de conhecimento em relação aos astros gerou ao homem primitivo um misto de sentimentos entre a admiração e o medo, levando-os a acreditar na divindade dos corpos celestes, pois isso explicaria a influência que eles possuem sobre a vida terrestre. Durante um longo período da história da humanidade as estrelas foram utilizadas para estabelecer um padrão de passagem de tempo como o calendário, com o intuito de prever o melhor período climático para plantação e colheita, e como mapa de orientação terrestre ou marítima (OLIVEIRA e SARAIVA, 2016).

O primeiro passo para desvendar os mistérios do céu foi estabelecido por um método que distinguia estrelas de planetas de acordo com seu movimento, ou seja, os estudiosos da antiguidade acreditavam que as estrelas eram os pontos luminosos fixos no céu, já os planetas eram os pontos luminosos que se moviam conforme o passar das noites, ou ainda que só se apresentavam no céu em períodos determinados. Atualmente já sabemos que as estrelas sofrem fusões nucleares por isso emitem luz, já os planetas apenas podem refletir a luz que

incide sobre eles, logo eles só aparecem no céu quando existe algum feixe de luz incidindo sobre ele, isso explica por que eles aparecem em períodos determinados no céu. Essa diferenciação entre planetas e estrelas foi o ponto de partida para estruturação dos modelos de sistema solar a qual conhecemos (HETEM e PEREIRA, 2000).

Através da observação do movimento dos astros vários modelos de sistema solar foram propostos. Até o século XVI acreditava-se que a Terra era o centro do universo, ou seja, todos os outros planetas orbitavam a sua volta, sendo assim quanto maior fosse a distância entre a Terra e o astro, mais tempo o astro levaria para dar uma volta em torno da Terra. Essa percepção gerou a seguinte ordem de localização dos planetas conhecidos até então: 1º Terra, 2º Lua, 3º Mercúrio, 4º Vênus, 5º Sol, 6º Marte, 7º Júpiter e 8º Saturno. Nesse período ainda não existia uma distinção entre astros e planetas, por isso o Sol e a Lua foram ordenados juntamente com os outros planetas. Esse modelo ficou conhecido como geocêntrico, ele foi construído com base nos estudos de Aristóteles e Ptolomeu e foi aceito por muitos séculos. Porém esse modelo tinha falhas e não conseguia explicar por que os planetas realizavam um movimento diferente das estrelas (HETEM e PEREIRA, 2000).

Durante o século XVI Nicolau Copérnico propôs o modelo heliocêntrico que trazia o Sol no centro do sistema solar e todos os outros planetas orbitando a sua volta. Esse modelo já havia sido proposto anteriormente por Aristarco de Samos 2.000 anos antes de Copérnico, ele baseou sua teoria através de estimativas dos tamanhos e distâncias do Sol e da Lua, concluindo que a Terra gira em torno do Sol e que as estrelas estão localizadas distantes dos planetas em pontos fixos. Porém a teoria de Aristarco não foi aceita, por que as medidas não eram precisas e o modelo não tinha muita distinção do modelo geocêntrico. Os estudos de Copérnico revolucionaram a astronomia, no entanto ele não pode explicar por que os planetas orbitavam em torno do Sol e não podia prever as posições (STEINER, 2006).

Através do modelo de telescópio holandês constituído pela união de duas lentes, que possuía aumento entre três e quatro vezes, Galileu em 1609 fabricou seu próprio telescópio com aumento de nove vezes o tamanho original do corpo a ser observado. Ao apontar seu telescópio para o céu Galileu constatou que a Lua possuía uma superfície irregular, e que no céu havia muito mais estrelas do que as que podemos observar a olho nu. Galileu ainda pode observar que as nebulosidades do céu, como a nossa via láctea era constituída de aglomerados de estrelas. Entretanto a maior descoberta de Galileu ao observar o céu foi às quatro luas de Júpiter, pois essa descoberta era uma forte evidência para derrubar de vez a teoria geocêntrica. Isso porque o geocentrismo acreditava que se a Terra girasse em torno do Sol, seria

impossível que ela carregasse a Lua durante seu movimento. A descoberta de Galileu comprovou que se Júpiter pode carregar quatro luas, por que a Terra não iria ser capaz de carregar apenas uma Lua? Através de suas observações ele ainda pode perceber que Vênus possuía fases como a Lua e que os planetas não emitem luz apenas refletem a luz do Sol, isso comprova que todos os planetas giram em torno do Sol, provando assim a teoria de Copérnico e derrubando o geocentrismo. As descobertas de Galileu revolucionaram a astronomia, ele usou o princípio da inércia e da relatividade para comprovar que a Terra não era estática, pois o fato de não sentirmos o seu movimento não quer dizer que ela esteja parada. Um bom exemplo para isso seria um viajante dentro de um navio que se desloca em uma velocidade constante, o viajante não sente o movimento do navio, todavia ele está se movendo e assim é a Terra (DINIZ, 2013).

O telescópio modificou completamente a forma de observar o sistema solar, permitiu a descoberta das órbitas dos planetas e ainda possibilitou certa noção a cerca da gravidade de Newton. Contudo o telescópio não podia explicar a composição dos astros e nem o que provocava seu movimento. A descoberta de ondas eletromagnéticas foi crucial para ampliação do conhecimento a cerca dos corpos celestes, pois compreender a natureza das ondas, nós forneceu dados sobre a matéria que compõem os corpos celestes.

Por meio de estudos sobre o espectro, ou comprimento das ondas, podemos distingui-las de acordo com sua frequência e comprimento. A utilização de técnicas para uma análise qualitativa referente à observação do espectro de uma dada substância recebe a nomeação de espectroscopia. A espectroscopia nós forneceu dados a cerca do espectro, da frequência e da radiação eletromagnética, absorvida ou emitida por um dado material. Através desses dados podemos classificar modelos de acordo com a estrutura atômica que compõem o material. Com base nos estudos sobre o espectro das estrelas e dos planetas, podem-se conhecer os elementos e substância que constituem a matéria da qual eles são feitos. Através do estudo do espectro de luz visível que um dado material emite podemos conhecer sua composição química e até mesmo a sua temperatura (LEITE e PRADO, 2012).

**Tabela 1:** Tipos de radiações, suas fontes e suas aplicações na astronomia.

**Fonte:** Sartori. Cáp. 4-radiação de corpo negro e efeito fotoelétrico

<b>Radiação</b>	<b>Fonte de Produção</b>	<b>Aplicações na Astronomia</b>
Infravermelho	Qualquer corpo quente, como o Sol e os vulcões.	Fotografias no infravermelho, identificação da temperatura de corpos distantes, lasers e telescópio.
Luz visível	Sua produção ocorre através de corpos quentes e pela reordenação de átomos e moléculas	Telescópio, espectroscopia do visível, composição das estrelas, Planetas e etc.
Micro ondas	O espaço está repleto de micro-ondas ela ainda pode ser produzida pelo homem	Ela é utilização para comunicação com veículos espaciais e rádio astronomia.
Rádio	São produzidas por meio de circuitos eletrônicos e emitidas por estrelas e galáxias	Rádio telescópico identificação de moléculas interestelares (etilidina CH, CH+, e cianogênio CN entre outras), estudo do Sol e os Planetas.
Raios-X	Binário de raios-X, pulsares, remanescentes de supernovas, galáxias elípticas, aglomerados de galáxias e núcleos galácticos ativos.	Os Raios-X são usados nos satélites como detectores de Raios-X para fotografar quando ocorre a sua emissão no espaço
Raio Gama	Substâncias radioativas como o urânio e o plutônio e explosões cósmicas	São usados em telescópio de raios gama com o objetivo de capturar os fótons de raios gama cósmico
Ultravioletas	Sol e as estrelas	É utilizado para o estudo da radiação térmica e linhas de emissão espectral de estrelas azul quente, nessa e em outras galáxias é para observação das nebulosas planetária, remanescentes de supernovas e núcleos de galáxias ativas.

A tabela 1 mostra que a espectroscopia possibilitou uma vasta compreensão das ondas eletromagnéticas e na visualização do universo e conhecimento em uma escala não imaginada séculos atrás. Ela ainda proporcionou uma percepção a cerca do decaimento orbital próximo de pares de estrelas de nêutrons, através da análise do comprimento de onda que a estrela emite nesse momento. Isso gerou fortes evidencia da existência de ondas gravitacionais proposta por Einstein (FARR. et al., 2012).

O decaimento orbital é provocado pela deformação que o corpo celeste causa no espaço, quanto mais próximo estiver do corpo maior e a deformação, essa deformação do espaço induz a propagação de ondas gravitacionais. As observações de radiações eletromagnéticas nos forneceram dados observacionais para que chegássemos à definição de Universo que temos até em então. Através das observações foi possível identificar a velocidade e a forma de propagação da luz, das ondas de rádio e até de raios gamas, porém essa visão é muito restrita, pois ela fornece informações apenas de objetos que emitem pouca ou nenhuma luz, como os buracos negros e estrelas de nêutrons ( FARR. et al., 2012).

É importante que o ensino da física moderna no ensino de ciências incluir tanto a física quântica, quanto a física de partícula, a relatividade e as ondas gravitacionais de forma ilustrativa ou experimental buscando uma maior compressão dos alunos a cerca dos temas em questão. A física moderna do século XX, juntamente com a relatividade e a mecânica quântica, foi à base para efetivação da terceira revolução industrial, ou seja, revolução da microeletrônica, da robótica e da era dos computadores. A física quântica ainda contribuiu para uma maior compreensão sobre as propriedades químicas, ópticas, magnéticas e elétricas dos materiais. Sabendo da grande importância da física moderna, da mecânica quântica e da relatividade para o atual cenário tecnológico que estamos vivenciando, se torna importante o conhecimento sobre esses conceitos de forma efetiva e não apenas através de conceitos decorados, para um melhor entendimento sobre o funcionamento das tecnologias (PCN, 1998).

A comprovação da existência de ondas gravitacionais sugere modificações no campo da astronomia, devido ao fato das ondas gravitacionais conterem informações sobre ondas originais liberadas por eventos cósmicos que ocorreram a bilhões de anos atrás, logo compreender a natureza dessas ondas será uma base para o entendimento de todas as mudanças no campo da astronomia que estão por vir.

Segundo Moura et al. (2011), Planck foi o propulsor da mecânica quântica, a constante proposta por ele contribui para o entendimento de conceitos físicos e químicos

proposto no ensino médio, contudo pode-se observar que essa constante geralmente é abordada pelos livros didáticos como sendo um valor tabelado, referente à quantidade de energia. Os livros didáticos geralmente abordam as constantes físicas ou químicas como número fixo, sem mostrar sua origem. Moura et al. (2011) traz um experimento feito com materiais de fácil acesso como o led para realizar uma demonstração da obtenção da constante de Planck em sala de aula. O Led é constituído por uma junção de dois semicondutores, ou seja, por uma banda de condução de valência que representa o último nível de energia que entra elétrons, e uma banda de condução que é onde ocorre a corrente elétrica, muito próximos. O primeiro passo do experimento é a introdução de uma tensão no circuito, onde na medida em que aumentamos essa tensão as luzes do Led vão se acendendo e apagando, esse é o ponto de tensão de corte do Led em virtude da corrente aplicada. Cada cor do Led possui um comprimento de onda diferente, logo cada uma irá apresentar diferentes dados a cerca do ponto de corte de tensão em virtude da corrente aplicada. O segundo passo do experimento é aplicar os dados obtidos pelo experimento em um gráfico que apresenta a corrente elétrica versus a tensão de corte, pois ao calcularmos o coeficiente angular da curva podemos encontrar o valor da constante de Planck. Esse tipo de experimento aborda propriedades físicas como o espectro da luz visível, entre outros, tornando sua aprendizagem mais atraente em virtude da experimentação.

Um pôster para o ensino de física de partículas na escola foi produzido por Ostermann e Cavalcante (2001). O pôster destaca as partículas elementares e as interações fundamentais, como os quarks e léptons entre outros e as interações gravitacionais, eletromagnéticas, fracas e fortes de forma ilustrativa e dinâmica como um exemplo de recurso didático para suprir a necessidade de materiais nessa área.

Assim nesse trabalho apresento proposta para ondas gravitacionais motivado pela observação realizada em 2015 com a produção de banner como recurso didático para o ensino de ondas gravitacionais e relatividade no ensino de ciências naturais durante o ensino fundamental.

## 2.0 Ondas Gravitacionais

Ondas gravitacionais são ondulações ou distorções que se propagam no tecido espaço-tempo em forma de ondas, elas possuem uma intensidade capaz de deslocar qualquer corpo celeste, ou seja, inferem diretamente em seu movimento natural. As ondas gravitacionais são produzidas por meio de algum evento cósmico que libere energia em forma de ondas. Elas podem ser produzidas através da fusão de um par de buracos negros, explosões de estrelas que se colapsam em seus núcleos promovendo o evento de supernova, ou ainda através de qualquer massa que esteja acelerada no Universo. Até mesmo o movimento natural das estrelas e dos planetas geram ondas gravitacionais em teoria, contudo não são detectados pela tecnologia atual (STURANI, 2016).

As ondas gravitacionais que se propagam após a fusão de dois buracos negros liberam uma energia de aproximadamente três vezes a massa do Sol, porém devido à distância do epicentro da onda em relação ao planeta Terra não podemos senti-la, apenas instrumentos de alta precisão como os observatórios de ondas gravitacionais por interferometria de laser (LIGO), podem detectá-la (STURANI, 2016)

A primeira detecção de ondas gravitacionais foi causado por um par de buracos negros, cujo eles possuíam massas entre 29 a 36 massas solares aproximadamente, após a fusão dos dois buracos negros detectados pelo LIGO, estimou-se por meio da teoria da relatividade de Einstein que ocorreu uma liberação de uma energia proporcional a 3 vezes a massa do Sol liberada em questão de segundos (STURANI, 2016).

Essa estimativa é realizada por meio de um dos postulados de Einstein sobre a teoria da relatividade que diz que o espaço é ligado ao tempo, assim como a massa é ligada com a energia, isso porque mesmo quando certa massa não interage com o meio em que ela se encontra, ela possui energia de existência, logo ela é uma energia em repouso. Com isso Einstein propôs a seguinte equação, que relaciona massa  $M$  e energia  $E$ : (HEIWETT, 2000).

$$E=MC^2, \quad \text{Eq. 01}$$

Onde  $C$  corresponde à velocidade da luz. A estimativa da quantidade de energia liberada após da fusão dos dois buracos negros foi realizada a partir dessa equação, onde podemos observar que a quantidade de energia liberada é muito grande, pois o Sol demoraria

bilhões de anos para liberar uma mesma quantidade de energia da mesma ordem de grandeza liberada nesse evento em questão de “segundos”.

O fenômeno gravitacional é causado pela força que uma determinada massa exerce sobre outra massa, ou seja, é uma interação entre corpos que não estão em contato. Conforme a mecânica Newtoniana essa força ocorre, pois uma partícula é capaz de modificar o espaço a sua volta formando um campo gravitacional, proporcionando assim uma ação à distância. Isso explica a atração entre a Lua e a Terra. Podemos dizer que o campo gravitacional é na verdade um campo de força, em que um corpo de massa qualquer ao se aproximar a outro corpo sofre ação dessa força, sendo que a força gravitacional é mais forte à medida que os corpos se aproximam. Logo o campo gravitacional terrestre se torna mais intenso à medida que se aproxima da Terra (HEWITT, 2000).

Segundo Hewitt (2000), no início do século XX Einstein propôs a teoria geral relatividade, através da reformulação do modelo da gravidade proposto anteriormente por Newton, que acreditava que a gravidade era proporcional à somatória das massas inversamente proporcional ao quadro da distância entre elas. Einstein percebeu que o campo gravitacional era consequência de uma curvatura geométrica no espaço-tempo tetradimensional. Essa curvatura ocorre, pois os corpos provocam uma deformação no espaço-tempo a sua volta. Podemos exemplificar através da seguinte analogia: Ao colocar uma esfera maciça sobre um colchão de água, a mesma irá deformar o espaço a sua volta, e se lançamos uma esfera de menor massa nesse mesmo colchão distante da esfera maciça a nossa pequena esfera seguira em linha reta, porém se ela for lançada próxima à esfera maciça ele seguira uma trajetória curva devido à deformação do espaço provocada pela esfera maciça. A teoria da relatividade geral proposta por Einstein aplica-se apenas a sistemas de referenciais acelerados. Sendo assim podemos dizer que o efeito da massa gravitante, nada mais é do que o movimento que uma segunda massa faz no espaço distorcido ou deformado pela primeira massa.

Com isso podemos dizer que para Einstein a gravidade não se trata de uma “força” como Newton propôs, mais sim de uma “deformação” do espaço-tempo que viaja pelo espaço com a velocidade da luz quando uma onda gravitacional é produzida. Essa deformação do espaço-tempo explica a força que atrai quaisquer dois corpos, cujo Newton não pode explicar.

A passagem da onda gravitacional pelo espaço-tempo provoca uma deformação, causando um aumento e diminuição simultânea da distância entre as moléculas. Essa deformação do espaço-tempo é medida como uma Tensão, análoga a tensão sobre uma



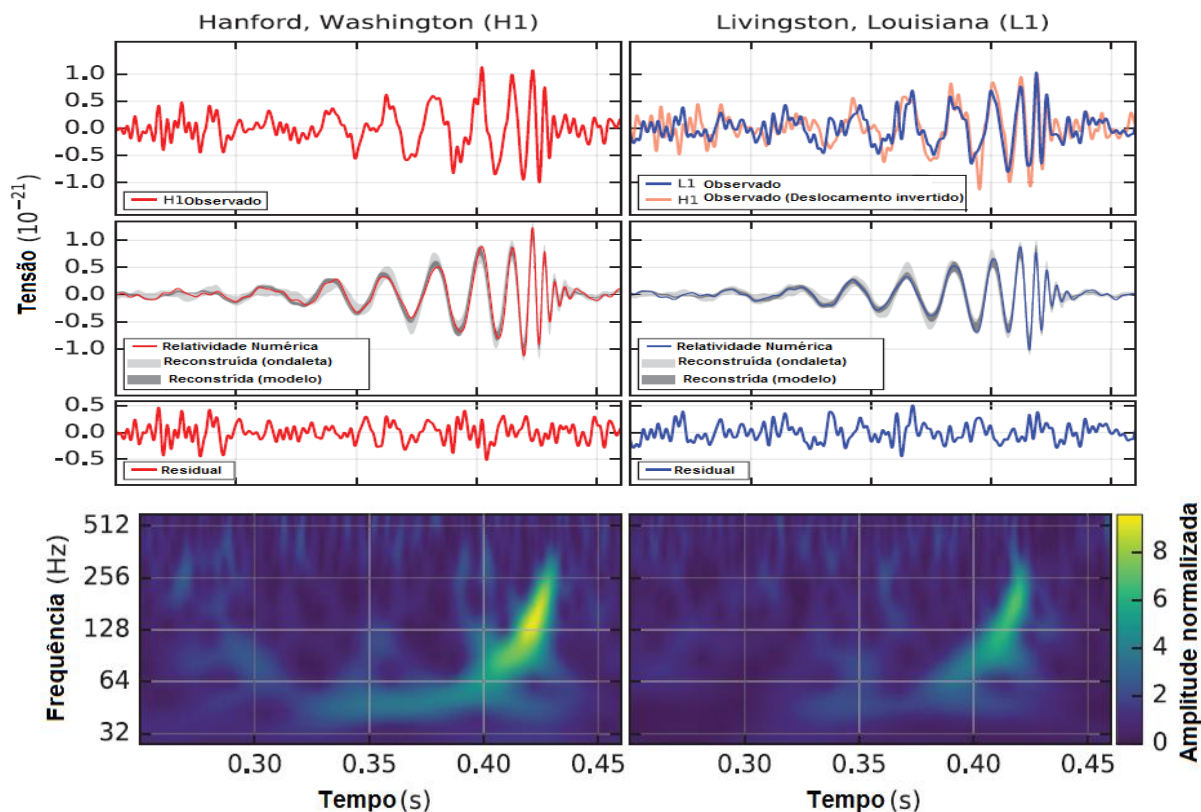
membrana elástica esticada. Quanto maior é o comprimento  $L$  do "objeto" a ser deformado maior será a deformação  $\Delta L$  provocada pela passagem da onda gravitacional. Para o LIGO  $\Delta L$  é da ordem de  $10^{-21}$  para o fenômeno de colisão de dois buracos negros e os braços do espectrômetro da ordem de quilômetros,  $10^3$  m, logo temos que (WHEELER, 2013):

$$\text{Tensão} = \frac{\Delta L}{L} \rightarrow \Delta L = \text{Tensão} \times L \rightarrow \Delta L = 10^{-21} \times 10^3 = 10^{-18} \text{m}, \quad \text{Eq. 02}$$

Observa-se que  $\Delta L$  é extremamente pequeno, sendo menor que as dimensões do núcleo do átomo de hidrogênio.

Em 11 de fevereiro de 2016 foram anunciadas duas grandes descobertas que comprovam a teoria da relatividade, a primeira detecção direta de ondas gravitacionais e a fusão de um par de buracos negros, esse evento ficou conhecido como GW150914. A fusão dos dois buracos negros citados ocorreu cerca de 1,3 bilhões de anos atrás, e liberou certa energia em forma de ondas que só agora foi possível sua detecção. Essa detecção ocorreu em 14 de setembro de 2015 graças ao sistema de interferometria a laser (LIGO), os buracos negros detectados possuem uma massa entre 36 a 29 massa solares, através da relatividade geral de Einstein pode-se deduzir que a energia onda gravitacional liberada nesse evento foi correspondente a aproximadamente 3 vezes a massa solar, sendo que grande parte da onda gravitacional foi emitida em questão de segundos. Essa detecção comprova a teoria da relatividade proposta por Einstein, abre uma nova forma de observação do universo pelas ondas gravitacionais e provoca uma revolução na astronomia conhecida até então (STURANI, 2016).

A figura 1 resume os resultados da detecção comparando os resultados experimentais com resultados obtidos a partir de modelagem utilizando a teoria da relatividade. Observa-se a excelente sobreposição entre experimento e teoria.



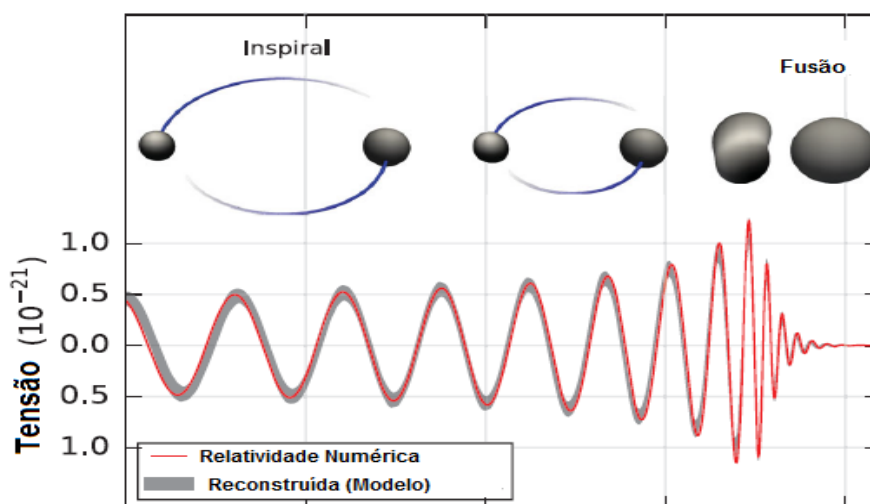
**Figura 1-** Detecção da fusão de um par de buracos negros nos detectores LIGO de Hanford e Livingston (Louisiana) localizados nos Estados Unidos da América  
**Fonte:** (B. P. Abbott et al., 2016). Adaptado pela autora.

A imagem apresenta a onda gravitacional detectada pelos dois interferômetros, sendo que o lado esquerdo mostra a leitura da onda H1 pelo LIGO de Hanford (Washington) e o da direita mostra a onda L1 lida pelo LIGO de Livingston (Louisiana), com superposição da onda invertida H1. A onda gravitacional do evento GW150914 chegou primeiro no detector L1 em questão sete milésimos de segundo chegou em H1, relativo ao tempo que a luz leva para viajar de um detector a outro. A última faixa da imagem representa a frequência entre 35 e 350 Hz observado pela onda, sendo que as linhas contínuas correspondem à onda de relatividade numérica de acordo com os parâmetros recuperados do GW150914 confirmando o evento em 99,9 % de certeza. O aumento da frequência de 35 até 350 Hz mostra o momento em os dois buracos negro estavam se aproximando de forma espiralada até a sua fusão em aproximadamente 350 Hz. A terceira faixa apresenta a onda filtrada após a subtração numérica do tempo em relação às duas detecções, ou seja, os resíduos. A ultima linha apresenta o tempo e a frequência da onda detectada, cuja onda tem sua frequência aumentada ao longo tempo, onde podemos perceber que ambas as detecções apresentam uma combinação

do tempo de propagação, com isso podemos perceber a evolução da amplitude da onda produzida pelo evento (B. P. Abbott et al., 2016).

O fato dos dois detectores estarem posicionados em locais distintos com certa distância possibilita uma maior confiabilidade na detecção, podendo assim distinguir a onda gravitacional de outra onda qualquer, pois para ser considerada uma onda gravitacional os dois detectores devem ter sido capaz de realizar a leitura simultaneamente, havendo apenas uma pequena diferença de tempo de 7 ms dada a diferença de percurso entre os dois detectores (STURANI, 2016).

A figura abaixo apresenta a simulação da trajetória dos buracos negros que se espiralaram um entorno do outro até a fusão, seguido pela representação da onda provocada pelo evento:



**Figura 2-** Etapas do processo de fusão de dois buracos negros.  
**Fonte:** B. P. Abbott et al., 2016. Adaptado pela autora.

Através da análise do gráfico podemos perceber que a onda gravitacional detectada pelo LIGO possui uma amplitude de tensão extremamente pequena da ordem de  $10^{-21}$ , em unidades de tensão que corresponde a uma deformação do espaço da ordem de  $10^{-18}$  m conforme a EQ.2. Observe que essa deformação é da ordem de 1/1000 do diâmetro do núcleo do átomo de hidrogênio (que é da ordem de  $10^{-15}$  m), o que justifica a dificuldade da detecção dessas ondas que só foi possível depois da última atualização de precisão do LIGO que ocorreu em 2015.

O sistema LIGO usa de mecanismo para garantir a confiabilidade da onda detectada, como o monitoramento de ruído de fundo, cujo o sistema armazena e analisa dados referente a ruídos ambientais como movimentação do solo, variação de temperatura, abalos sísmicos

entre outros. Por meio dos dados armazenados o LIGO conseguiu distinguir uma onda provocada por ruído comum de uma onda gravitacional (STURANI, 2016).

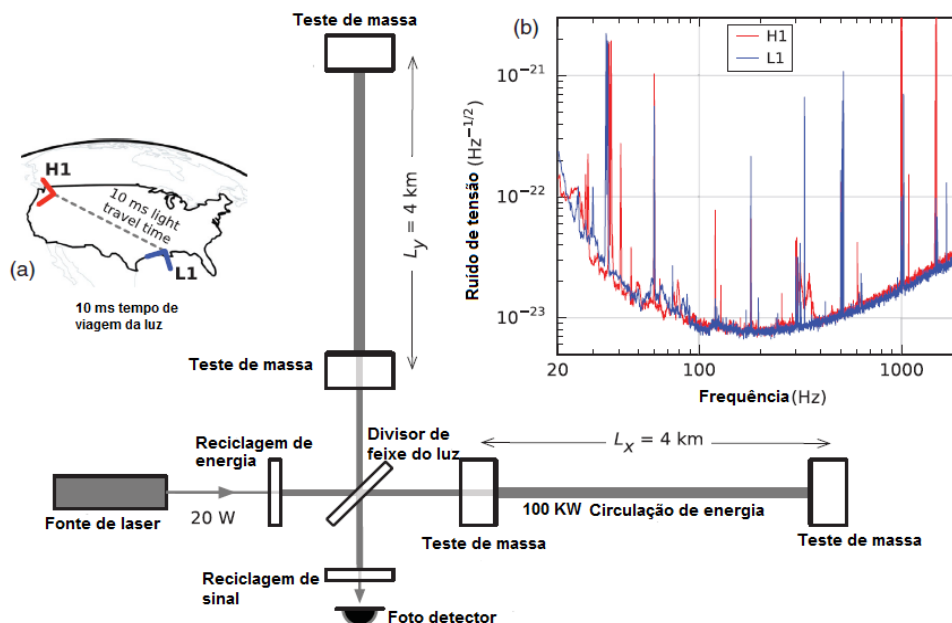
A detecção de ondas gravitacionais que ocorreu em 14 de setembro de 2015 não foi um fato isolado, após essa detecção em dezembro de 2015 o LIGO realizou a sua segunda detecção é em janeiro de 2017 a sua terceira detecção. Ambas as ondas detectadas pelo LIGO foram resultado de fusão de um par de buracos negros, sendo que na primeira detecção os buracos negros estavam a 1,3 bilhões de anos luz de distância da Terra, na segunda eles estavam a 1,4 bilhões de anos luz e na terceira eles estavam cerca de 3 bilhões de anos luz da Terra ( CLAVIN, CALTECH. Adp: FERREIRA, 2017).

O LIGO continua em pleno funcionamento com o objetivo de ampliar e melhorar cada vez mais a sua tecnologia com o intuito de detectar ondas gravitacionais de eventos cósmicos cada vez mais antiga. Após a primeira detecção de ondas gravitacionais foram realizadas mais 2 detecções, sendo a segunda detecção em dezembro de 2015 e a terceira em janeiro de 2017, mostrando que a detecção GW150914 não foi um evento isolado.

### **3.0 LIGO**

A figura 3 ilustra o diagrama sem escala do detector de ondas gravitacionais por interferometria de laser (LIGO). O sistema é um interferômetro composto por dois braços perpendiculares de 4km de extensão cada, sendo que cada braço possui em sua extremidade um espelho. Cada um desses espelhos reflete parte do feixe de laser que interferem no foto detector produzindo o sinal mostrado no quadro (b) na parte superior direita da figura 3 (que traduz a interferência entre esses dois feixes de luz). Quando uma onda gravitacional passa por esse sistema ocorre um aumento e uma diminuição simultânea das dimensões dos braços do interferômetro, essa diferença de comprimento entre os braços está diretamente ligada à intensidade do sinal medido no fotodetector. O sistema é capaz de diferenciar uma onda gravitacional de uma onda comum, como a onda provocada por um terremoto, ou pela passagem de um caminhão, pois o sinal dos eventos que provocam ondas gravitacionais passíveis de serem medidos pelo LIGO tem característica distinta dos fenômenos cotidianos. A primeira detecção direta de ondas gravitacionais e a primeira observação da colisão ou fusão de um par de buracos negros só foi possível graças ao LIGO. Os detectores LIGO são instrumentos de medidas mais precisos construídos pela humanidade. Essas descobertas

abrem uma nova visão de Universo, pois possibilitam um novo meio de observação de fenômenos astronômicos (STURANI, 2016).



**Figura 3-** Diagrama sem escala do detector LIGO Fonte: B. P. Abbott et al., 2016). Adaptado por: Lorrany F. Lopes

Explicando melhor a figura destaque que na fonte de laser ocorre à liberação do feixe de luz, que passa pela reciclagem de energia, e por séries de reflexões seguindo até o divisor de laser, onde o feixe de luz que foi emitido pela fonte é dividido em duas partes e cada uma segue um braço do interferômetro circulando por dentro de um tubo de vácuo extremo, passando pelos pontos de teste de massa que constituem o sistema de isolamento do ruído sísmico. Ao final de cada braço está localizado um espelho, que reflete o raio de luz que se propaga em formato de onda, e essa onda então retorna ao detector, sendo que se for uma onda comum elas se anulam, pois ocorre uma interferência destrutiva. Porém se for uma onda gravitacional ela irá deforma o espaço-tempo, logo ocorre uma variação na distância percorrida pela onda, com isso as duas ondas se somam quando se encontram no foto detector, devido ao padrão interferência construtiva.

O quadro “a” mostra que o tempo de viagem da luz de um interferômetro ao outro é de 10ms, sendo que H1 está localizado na cidade de Hanford em Washington e L1 na cidade de Livingston na Louisiana. Já a figura “b” mostra o ruído detectado por cada uma dos interferômetros e também o tempo de detecção do sinal, sendo que o gráfico expressa a densidade espectral da amplitude. O quadro “b” mostra ainda diversos outros ruídos com

menores frequências em superposição com ruído da onda gravitacional (B.P ABBOTT et al., 2016)

#### **4.0 Banner**

O processo de aprendizagem da astronomia pode ser construído em ambientes formais, informais, não formais e através de atividades que possuem o objetivo de popularizar a ciências. A educação formal ocorre em um local determinado, ou seja, em um local planejado intencionalmente para essa prática de aprendizagem que possui um objetivo comum a todos que ali estão. A educação formal ocorre por meio da sistematização do conhecimento. Na maioria das vezes muitos conceitos da astronomia no ensino formal não são abordados durante o ensino fundamental, médio e até superior, ou ainda são abordados de forma errônea, é isso gera sérias consequências aos futuros professores, pois os mesmo não sabem como ensinar certos conceitos, abordado diversas vezes de forma errada dificultando o processo de ensino e aprendizagem e criando mitos sobre os fenômenos astronômicos, gerando uma insatisfação por parte dos alunos. A educação não formal por sua vez ocorre em ambientes fora do contexto escolar, como em museus de astronomias, planetários, cursos livres, feiras, comunidades religiosas. A educação não formal apesar de não ser obrigatório possui certa intencionalidade, pois ocorre de forma organizada e sistematizada com um objetivo comum. Já a educação informal é livre de intencionalidades, pois ocorre de forma espontânea sem nenhum tipo de sistematização, ou local definido (LANGHI e NARDI, 2010).

De acordo com Ostermann e Cavalcanti (2011), nas ultimas décadas o ensino de física principalmente na rede publica de ensino, vem sofrendo certa depreciação, com a má qualificação dos professores e a desmotivação de professores e alunos, esse fato se deve ao ensino baseado da física formalística, com foco no ensino da cinemática, por exemplo, deixando de lado o ensino da física moderna e contemporânea. Por outro lado podemos perceber que a escassez de materiais didáticos referentes ao ensino da física moderna e contemporânea e muito grande é isso dificulta na abordagem de certos temas. Ostermann e Cavalcanti (2011) apresentaram à utilização de pôster como meio de amenizar essa falta de recurso didático no ensino de astronomia na rede escolar brasileira, com o intuito de inserir os tópicos partículas elementar e interações fundamentais no ensino formal. Para eles o tema

deve ser introduzida de forma gradativa e atualizada, deixando de lado a velha concepção química sobre a matéria.

Conhecendo essa falta de recurso didático no ensino de física, a pesquisa em questão tem como produto final a construção de um banner como recurso didático para divulgação dos conceitos físicos e astronômicos básicos sobre a teoria da relatividade e as ondas gravitacionais.

O banner é um recurso didático visual composto por diversas figuras, ele pode ser usado pelo professor de ciências naturais com o foco no ensino de ondas gravitacionais e teoria da relatividade de Einstein. Por meio do recurso o professor pode ensinar sobre os tipos de ondas gravitacionais possíveis de serem detectadas ao mesmo tempo em que ele demonstra suas fontes geradoras. O professor ainda pode trabalhar com a questão de escalas relacionadas ao “tamanho” das ondas, com ênfase na dificuldade de detecção da onda gravitacional devido a sua amplitude ser extremamente pequena. Ainda pode mostrar como ocorre a detecção da onda gravitacional pelo LIGO e relacionar a detecção de ondas gravitacionais com a comprovação da teoria da relatividade de Einstein.

O banner é apresentado na última página. Na página seguinte as referências específicas do Banner. Ao realizar a impressão do banner obrigatoriamente as referências devem constar no verso.

## **5.0 Discursões e Conclusões**

A detecção das ondas gravitacionais abre caminho para uma grande revolução na astronomia em um futuro próximo, pois quase tudo que se conhece sobre o universo é baseado no conhecimento adquirido através da observação do universo por meio da detecção das radiações eletromagnética, porém esse conhecimento não é absoluto, pois as ondas eletromagnéticas sofrem mudanças durante o seu percurso e são facilmente refletidas e absorvidas. Já as ondas gravitacionais não são refletidas e nem absorvidas, isso nos permite observar a onda original liberada por grandes eventos que ocorreram no passado como o big bag.

Segundo a teoria da relatividade geral de Einstein, um corpo de massa  $M$  deforma o espaço-tempo a sua volta fazendo com que um corpo de massa  $M$  menor permaneça na sua órbita. O efeito geométrico da curvatura do espaço-tempo ocorre em três dimensões, sendo

assim podemos dizer que um corpo de massa  $M$  curva o espaço-tempo a sua volta, essa curvatura por sua vez libera uma energia em forma de onda gravitacional e essa onda influencia diretamente sobre um corpo de massa menor. Em um evento de fusão de buracos negros como o GW150914 detectado pela tecnologia do LIGO, podemos perceber que na medida em que eles se espiralam se aproximando um do outro, uma quantidade extraordinária de energia estimada em algumas massas Solares é liberada em questão de segundos na forma de ondas gravitacionais que viajam pelo espaço com a velocidade da luz.

Nessa detecção espetacular os dados experimentais medidos pelo LIGO sobrepõe perfeitamente a modelagem realizada utilizando-se a teoria da relatividade de Einstein.

Essa comprovação irá mudar a nossa concepção a cerca de eventos cósmicos, é poderá contribuir significativamente para evolução da tecnologia atual.

O banner proposto tem como objetivo divulgar e expandir a compreensão dos conteúdos relacionados com as ondas gravitacionais e a teoria da relatividade geral de Einstein no ensino básico.



## 6.0 Referencias:

Brasil. Secretaria de Educação Fundamental. Parâmetros curriculares nacionais : Ciências Naturais / Secretaria de Educação Fundamental. Brasília : MEC / SEF, 1998. pg.138;

B. P. Abbott et al. Observação de ondas gravitacionais de uma fusão de buracos negros binários (LIGO Scientific Collaboration e Virgo Collaboration). Tradução nossa. 2016;

CLAVIN. CALTECH. Adp: FERREIRA, Elvis Camilo/ INPE. Revisado por: AGUIAR, Odylio Denys. STURANI, Riccardo. LIGO Detecta Ondas Gravitacionais pela Terceira Vez. 2017;

DINIZ, Leonardo Gabriel. Astronomia no Vale do Aço. Galileu Galilei: O mensageiro das estrelas, 2013 Disponível em: <http://astronomianovaleoaco.blogspot.com.br/2012/03/galileu-galilei-o-mensageiro-das.html>, acessado 21/05/17 às 14: 26;

FARR, Benjamin. SCHLBERT, Gion Matthias Schelbert. TROUILLE, Laura .Gravitational wave science in the high school classroom. Am. J. Phys. 80, 898 (2012); doi: 10.1119/1.4738365. American Association of Physics Teachers. Tradução nossa;

HETEM, Jane Gregorio. Pereira, Vera Jatenco. Fundamentos de astronomia: Mécânica do sistema solar. Cáp 1, p. 2-4 . 2000;

Hewitt, Paul G. Física Conceitual – 9ª edição, Editora Artmed, Catálogo Bookman, p.297, 298, 137 e 140. 2000;

LANGHI, R.; NARDI, R. Ensino de astronomia no Brasil: educação formal, informal, não formal e divulgação científica. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.31, n.4, 4402, 2009;

LEITE, Diego de Oliveira. Prado, Rogério Junqueira. Revista Brasileira de Ensino de Física. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio. Mato Grosso. v. 34, n. 2, 2504,2012;

MOURA. Sílio Lima. Silva, Francisco Ivan. Silva, Francisco Carlos Marques. Santos, José Aroldo Viana.Física quântica: QUÍMICA NOVA NA ESCOLA Constante de Planck Vol. 33, Nº 4, novembro, 2011;

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Sousa, SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. Astronomia Antiga. Disponível em Acesso em 20/05/2017 às 14:30;

OSTERMANN, F. CAVALCANTI, C. J. H. Um Pôster para ensinar Física de Partículas na escola. Física na Escola, vol. 2, n. 1, 2001;

RESNICK ,HALLIDAY, KRANE. Física. Rio de Janeiro. ed. Editora LTC Vol. 2. 4º, p. 47. 1991;

SARTORI, Cláudio S., Física Moderna- Cáp. 04 - Radiação de corpo negro e efeito fotoelétrico;


Steiner João. A origem do universo. Estudos avançados. vol.20 (58), p.235, 236. São Paulo Sept./Dec. 2006;

Sturani Riccardo. Observação de ondas gravitacionais geradas pela fusão de um sistema binário de buracos negros. Instituto de Física Teórica –UNESP/ICTP-SAI FR. 17 fev. de 2016;

WHEELER, Jim. Gravitational Waves. Relativistic Astrophysics – Lecture. Tradução nossa. 2013.



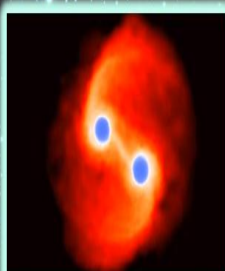
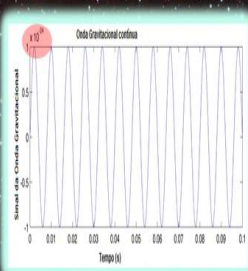
Abaixo segue o banner proposto:



# Ondas Gravitacionais: Uma comprovação da Teoria da Relatividade

## Tipos e Fontes das Ondas Gravitacionais

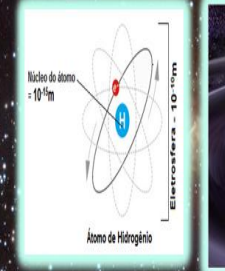

**1) Contínuas** **Estrelas Binárias**

O intervalo de tempo entre as detecções em L1 e H1 foi de 7ms, compatível com os 10ms da viagem da Luz. Os detectores estão localizados a uma distância de 3002 km.

A fusão de Buracos Negros produz ondas gravitacionais de grande intensidade.

**2) "Inspiral"** **Fusão de Buracos Negros**

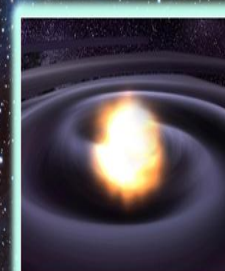
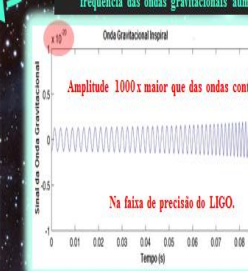



Conforme os buracos negros se aproximam da fusão a frequência das ondas gravitacionais aumenta.

Amplitude 1000x maior que as ondas contínuas.

Na faixa de precisão do LIGO.

**3) Estocásticas**

O que produziu o big bang? Apenas as ondas gravitacionais podem escapar dos primeiros momentos do big bang.

Big Bang mais 10<sup>-36</sup> segundos: Inflação: big bang + 10<sup>-36</sup> segundos

Big Bang mais 10<sup>-32</sup> segundos: Radiação cósmica de fundo em micro-ondas liberada pelas sementes da estrutura do universo e pelas ondas gravitacionais.

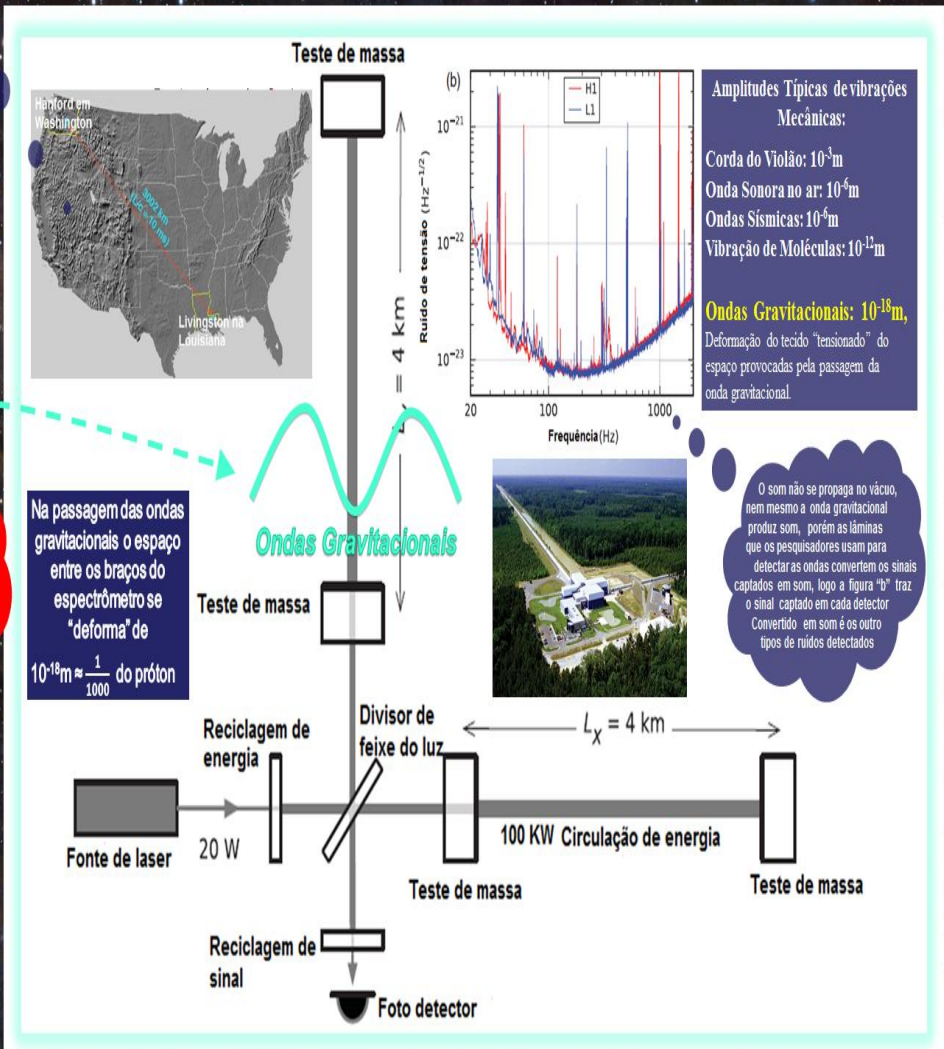
Big Bang mais 300 mil anos: Luz

Big Bang mais 15 bilhões de anos: Hoje

Só as Ondas gravitacionais tem informações dos "segundos" iniciais depois de big bang. FUTURO!

## LIGO

### Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser



Na passagem das ondas gravitacionais o espaço entre os braços do espectrômetro se "deforma" de  $10^{-18}m \approx \frac{1}{1000}$  do próton

Amplitudes Típicas de vibrações Mecânicas:  
 Corda do Violão:  $10^{-3}m$   
 Onda Sonora no ar:  $10^{-4}m$   
 Ondas Sísmicas:  $10^{-6}m$   
 Vibração de Moléculas:  $10^{-12}m$   
**Ondas Gravitacionais:  $10^{-18}m$ ,**  
 Deformação do tecido "tensionado" do espaço provocadas pela passagem da onda gravitacional.


O som não se propaga no vácuo, nem mesmo a onda gravitacional produz som, porém as lâminas que os pesquisadores usam para detectar as ondas convertem os sinais captados em som, logo a figura "b" traz o sinal captado em cada detector. Convertido em som é os outros tipos de ruídos detectados.

A primeira Detecção na história da Humanidade

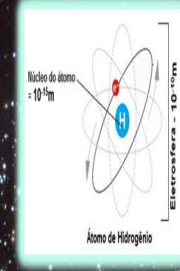
A energia liberada na forma de Ondas Gravitacionais foi da ordem 3Ms  $E=3Ms^2=5,4 \times 10^{47}J$

**E a Relatividade!**

A detecção de ondas gravitacionais comprovam a teoria da relatividade geral proposta por Einstein em 1915. A comprovação da existência de ondas gravitacionais nos dá informações sobre a origem do universo e proporciona uma nova janela para observação do Céu.



Atomo de H



Elétron a  $10^{-10}m$

Atomo de Hidrogênio

Reciclagem de energia

Reciclagem de sinal

Fonte de laser 20 W

Divisor de feixe do luz

Teste de massa

Teste de massa

Teste de massa

Foto detector

100 KW Circulação de energia

$L_x = 4 km$

Amplitude 10000x maior que as ondas Contínuas

Tensão  $(10^{-21})$

Relatividade Numérica

Reconstruída (Modelo)

Wavelength  $\lambda = 10^{-6}m$  e  $10^{-18}m$

O que temos de medir: Tensão da Onda Gravitacional

Grandezas a ser medidas: Anão pelo aparato Experimental

O que podemos controlar: as dimensões do experimento

Tensão  $= \frac{\Delta L}{L}$

Onda vermelha representa a onda estimada por Einstein em 1915, a onda cinza representa a reconstrução da onda detectada pelo LIGO.

Um astro deforma o espaço ao se movimentar produzindo a onda gravitacional tal como as Ondas de um barco que cruza um lago plácido.

**Referencias do Banner:**

B. P. Abbott et al. Observação de ondas gravitacionais de uma fusão de buracos negros binários (LIGO Scientific Collaboration e Virgo Collaboration). Tradução nossa. 2016;

Hewitt, Paul G. Física Conceitual – 9ª edição, Editora Artmed, Catálogo Bookman, p.297, 298, 137 e 140. 2000. ;



Sturani Riccardo. Observação de ondas gravitacionais geradas pela fusão de um sistema binário de buracos negros. Instituto de Física Teórica – NESP/ICTP-SAIFR. 17 fev. de 2016

**Referencia das figuras usadas no banner:**

B. P. Abbott et al., 2016. Adaptado por: Lorrany F. Lopes ;

SITE: <http://professorbonito.blogspot.com.br/> , acessado 28-06-17 / adaptado: Lorrany F. Lopes às 09:00 horas;

SITE: <https://br.pinterest.com/explore/nature-publishing-group/>, acessado 14-06-2017 às 14:00 horas;

SITE:<https://www.pensador.com/autor/>, acessado 28-06-17 às 09: 45;

SITE: <http://www.ligo.org/science/GW-Stochastic.php>, acessado 27-06-17 às 10: 24;

SITE: <http://ligo.org/detections/GW170104.php>, acessado 14-06-17 às 14:00 horas.