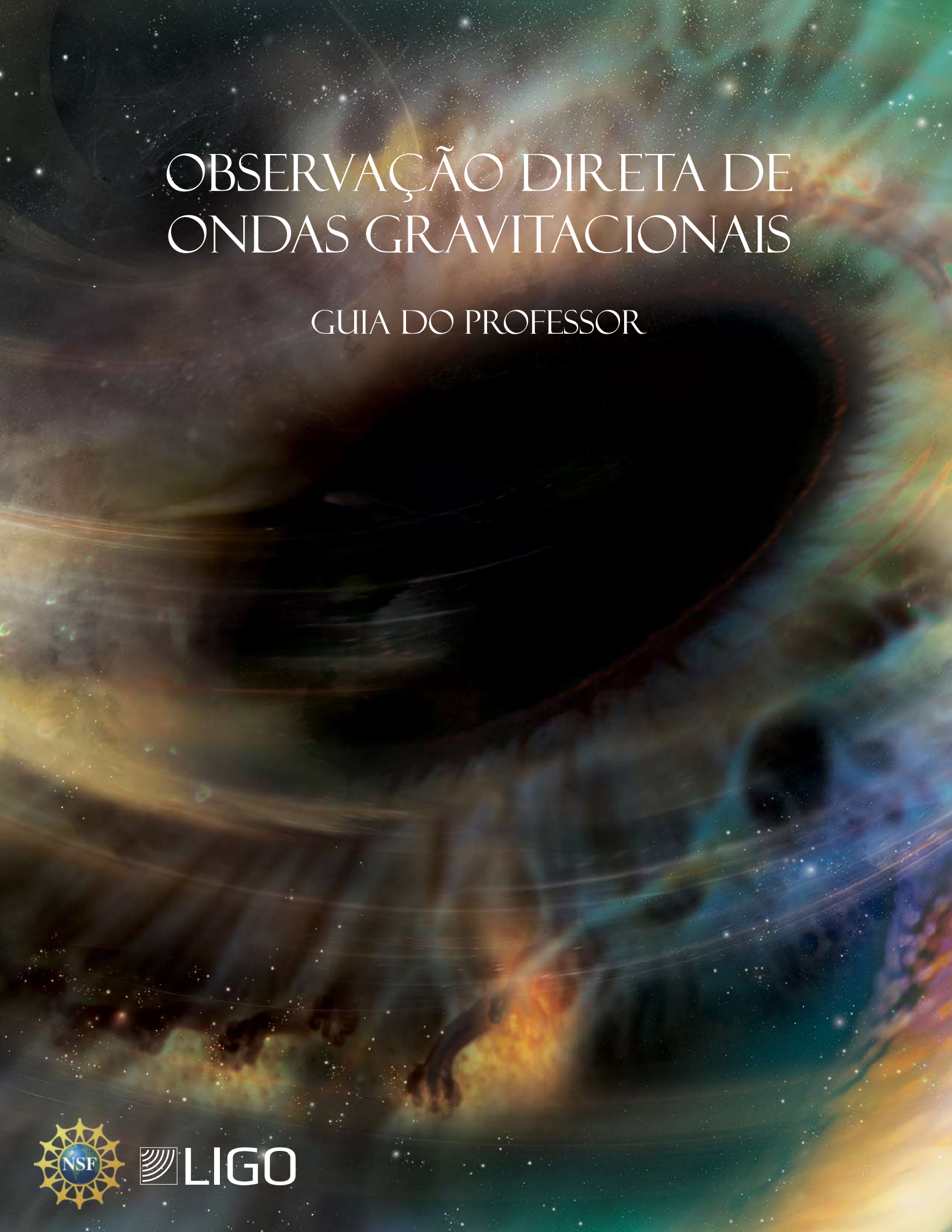


OBSERVAÇÃO DIRETA DE ONDAS GRAVITACIONAIS

GUIA DO PROFESSOR

NSF LIGO

OBSERVAÇÃO DIRETA DE ONDAS GRAVITACIONAIS

GUIA DO PROFESSOR

http://www.ligo.org

Conteúdo

Introdução página 3

Background página 4

Ondas gravitacionais como um sinal do Universo página 4

Gravidade de Newton a Einstein página 5

Ondas Gravitacionais página 8

A Observação Direta de Ondas Gravitacionais pelo LIGO página 10

Buracos Negros página 13

Atividades página 14

- **Atividade 1 - Buracos Negros Coalescentes** página 14
- **Atividade 2 - Deformação do espaço-tempo** página 16

Diretrizes científicas para a próxima geração página 18

Apêndice A - Glossário página 19

Apêndice B - Recursos página 20

Apêndice C - Informações de compra página 21

LIGO Guia do professor — Este guia foi escrito por Kevin McLin, Carolyn Peruta e Lynn Cominsky. Layout e Design por Aurore Simonnet. SSU Education and Public Outreach Group, Sonoma State University, Rohnert Park, CA - http://epo.sonoma.edu

Agradecemos os comentários e revisão de Beverly Berger, Joey Key, William Katzmaz, Dale Ingram, David Tanner e Nelson Christensen. Este trabalho foi apoiado como suplementar a NSF PHY-1404215.

Atualizações podem ser baixadas em https://dcc.ligo.org/LIGO-P1600015/public

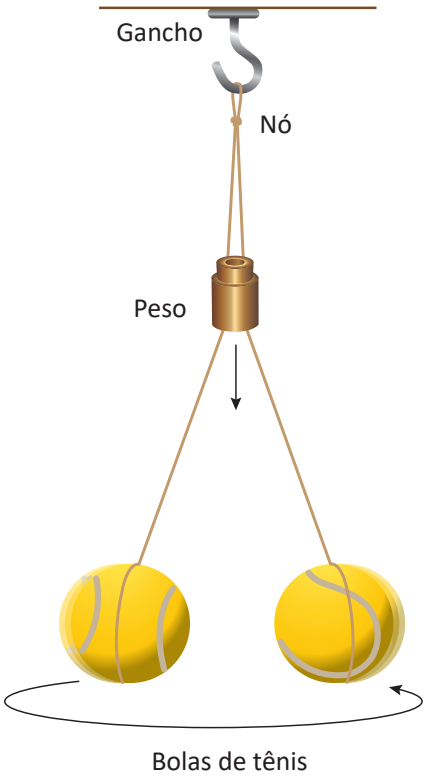
Este Guia em português foi traduzido por Ana Luiza Sério com layout e design por Malena Stariolo do ICTP-SAIFR (International Centre for Theoretical Physics - South American Institute for Fundamental Research - http://www.ictp-saifr.org) com apoio do Instituto Serrapilheira.

ICTP | International Centre for Theoretical Physics
SAIFR | South American Institute for Fundamental Research

serrapilheira

Introdução

Em 14 de setembro de 2015, o Observatório de Ondas Gravitacionais com Interferômetro a Laser (LIGO) recebeu os primeiros sinais confirmados de ondas gravitacionais. Agora conhecido como GW150914[1], o evento representa a coalescência de dois buracos negros que anteriormente estavam em órbita mútua. A empolgante descoberta do LIGO fornece evidências diretas do que é possivelmente a última grande previsão não confirmada da Teoria Geral da Relatividade de Einstein. Este Guia do Professor fornece uma breve introdução ao LIGO e às ondas gravitacionais, juntamente com duas atividades simples de demonstração que você pode fazer em sua sala de aula para envolver seus alunos na compreensão da descoberta do LIGO. Recursos adicionais também são fornecidos para ampliar suas explorações do Universo de Einstein.



Atividade 1 – Buracos Negros Coalescentes

Visão Geral:

Os alunos interagem com uma demonstração de esferas em órbita que têm uma frequência orbital crescente à medida que coalescem.

Conceitos Científicos:

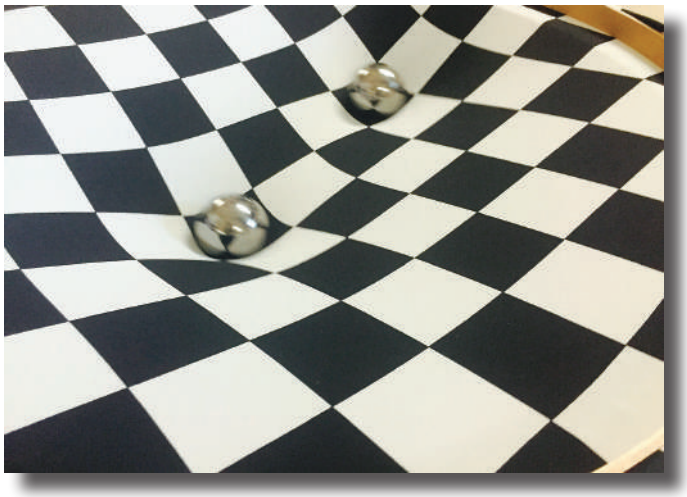
As ondas gravitacionais são ondulações no espaço-tempo produzidas por alguns dos eventos mais violentos do cosmos, como as colisões e fusões de estrelas compactas massivas ou buracos negros. Essas ondulações viajam na velocidade da luz através do Universo, carregando informações sobre suas origens.

Duração: 30 min

Pergunta essencial:

O que acontece quando dois buracos negros entram em espiral um em direção ao outro?

Séries: 8º ano do fundamental ao ensino médio



Atividade 2 - Distorção do Espaço-Tempo

Visão Geral:

Os alunos exploram o comportamento de duas esferas em órbita no espaço-tempo.

Conceitos Científicos:

Um par de buracos negros em órbita irá produzir ondas gravitacionais, que são ondulações no tecido do espaço-tempo. Ondas gravitacionais levarão energia para longe do par, fazendo com que sua distância orbital encolha e seu período orbital diminua. Eventualmente, os buracos negros irão coalescer. Os detectores do LIGO podem medir as ondas gravitacionais produzidas pelo sistema durante a coalescência.

Duração: 30 min

Pergunta essencial:

Como os buracos negros binários distorcem o espaço-tempo?

Séries: 8º ano do fundamental ao ensino médio

[1] O título GW150914 indica o fenômeno: GW (Gravitational Waves); e a data em que os sinais foram recebidos: 15 (ano) 09 (mês) 14 (dia)

Ondas Gravitacionais como Sinais do Universo

Ondas gravitacionais são "ondulações" no tecido do espaço-tempo causada pela aceleração de massas, como a colisão de buracos negros, a explosão de estrelas e até mesmo o nascimento do próprio Universo. Albert Einstein previu a existência de ondas gravitacionais em 1916, derivada de sua Teoria Geral da Relatividade. A matemática de Einstein mostrou que objetos de aceleração massiva iriam perturbar o espaço-tempo de tal maneira que ondas de espaço distorcido iriam irradiar da fonte. Essas ondulações viajam na velocidade da luz através do Universo, carregando informações sobre suas origens, bem como pistas sobre a natureza da gravidade em si. Dois buracos negros em órbita mútua girarão em torno uns dos outros emitindo ondas gravitacionais e perdendo energia orbital como ilustrado na Figura 1. Com o tempo, a perda de energia faz com que as estrelas se aproximem e orbitem umas às outras cada vez mais rapidamente até se fundirem. ou coalescerem. Esse tipo de fusão nunca foi diretamente observado, e é o tipo de evento que emitiu as ondas gravitacionais detectadas pelo LIGO em 14 de setembro de 2015.

Figura 1: Simulação numérica da fusão de dois buracos negros. Crédito: SXS.

Historicamente, os cientistas se basearam principalmente em observações com radiação eletromagnética (luz visível, raios-X, ondas de rádio, micro-ondas, etc., veja a Figura 2) para aprender e entender fenômenos no Universo. Além disso, alguns tipos de partículas subatômicas, incluindo neutrinos e raios cósmicos, têm sido usados para estudar objetos cósmicos. Os cientistas constroem diferentes tipos de telescópios e observatórios para detectar esses diferentes tipos de sinais. Alguns telescópios estão localizados no solo (por exemplo, telescópios de luz visível e rádio), alguns estão localizados em satélites orbitando a Terra (para raios-x e raios gama, bem como o Telescópio Espacial Hubble que imagens luz visível e ultravioleta), e outras ainda estão enterradas no gelo (detectores de neutrinos) ou são subterrâneas (detectores de partículas). Cada um fornece uma visão diferente e complementar do Universo, com cada nova janela trazendo descobertas excitantes.

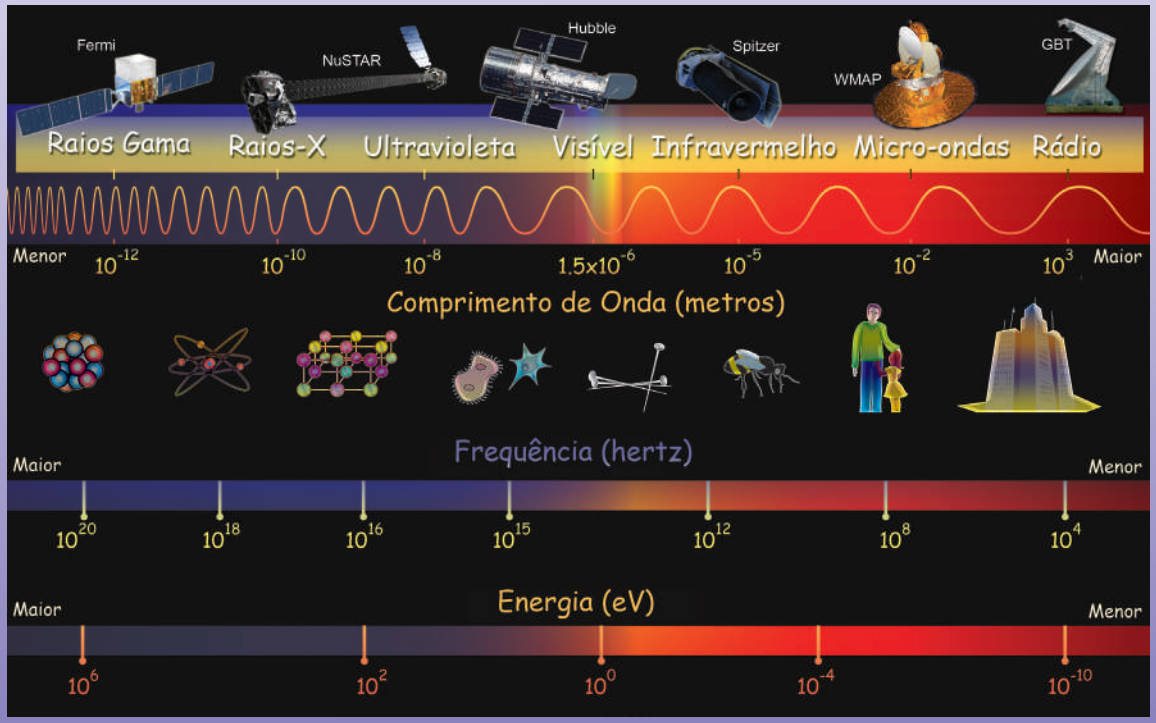


Figura 2: Espectro Eletromagnético. Crédito: S S U P E O/Aurore Simonnet.

Assim como objetos cósmicos diferentes geram diferentes comprimentos de onda em todo o espectro eletromagnético, espera-se que diferentes sistemas físicos gerem diferentes faixas de comprimento de onda de ondas gravitacionais. Estes, por sua vez, podem ser observados por diferentes tipos de observatórios. A Figura 3 ilustra as deformações esperadas da onda gravitacional, geralmente chamadas *h*, faixas de comprimento de onda e tipos de fontes esperadas em cada faixa. O LIGO (e outros interferômetros terrestres, de tamanho similar, como Virgo, na Itália) são sensíveis a ondas gravitacionais com frequências na faixa de 10 - 2000 Hz.

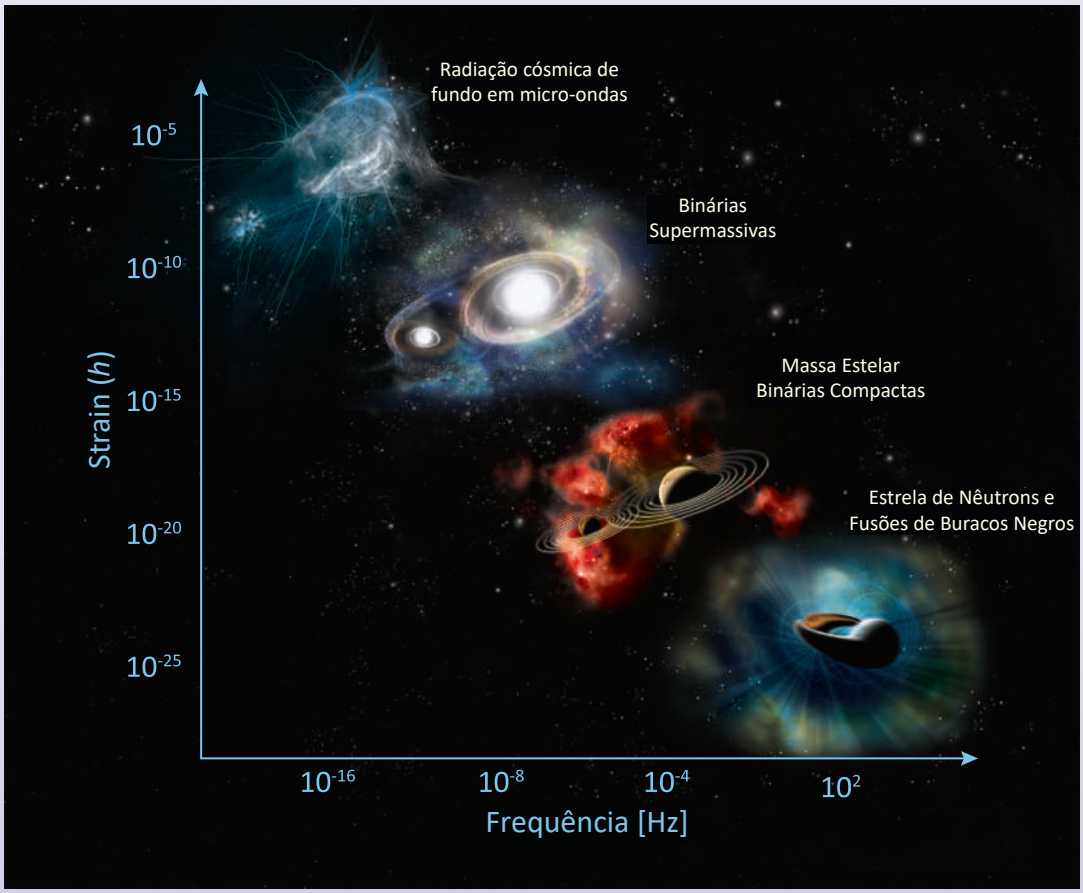


Figura 3: Espectro de Ondas Gravitacionais. Esta figura traça a strain prevista (h, eixo y) versus a frequência de ondas gravitacionais esperadas em Hz (eixo x) para diferentes tipos de objetos cósmicos. Crédito: S S U P E O/Aurore Simonnet.

Gravidade de Newton a Einstein

Diz a lenda que Isaac Newton teve um momento de inspiração sobre a gravidade quando foi atingido na cabeça por uma maçã que caiu de uma árvore sob a qual estava sentado. Hoje, ele é creditado com a expressão matemática que explica como a força de atração gravitacional entre dois objetos depende de suas massas e da distância entre elas - chamada de Lei da Gravitação de Newton. Na realidade, nossa compreensão da gravidade cresceu lentamente a partir de muitas observações astronômicas feitas por antigos babilônios, egípcios e gregos. Eles estavam tentando entender os movimentos dos planetas e prever as ocorrências de eventos celestes, como eclipses do Sol ou da Lua.

Na Grécia Antiga, a visão mais difundida era a de que a Terra era o centro do sistema solar, e que o Sol e os planetas giravam em torno dela. De fato, esta foi a visão dominante do cosmos por muitos séculos. No início dos anos 1500, esse paradigma foi radicalmente desafiado pelos esforços do astrônomo polonês Nicolau Copérnico. Sua obra, que colocou o Sol no centro, e a Terra apenas como um dos muitos planetas em órbita ao seu redor, foi publicada em 1543. Nos 100 anos seguintes, os trabalhos dos astrônomos Tycho Brahe, Johannes Kepler e Galileu Galilei também foram importantes para a descrição dos movimentos exatos dos planetas em nosso Sistema Solar.

Em 1687, a Física começou a se separar da Astronomia com a invenção de um formalismo matemático, conhecido como cálculo, por Isaac Newton. O cálculo permitiu que Newton escrevesse sua famosa lei da Gravitação Universal e entendesse que a mesma lei que descrevia a órbita da Lua, descrevia a queda de uma maçã caindo sobre sua cabeça na Terra. Newton percebeu, pela primeira vez, que esses dois fenômenos muito diferentes poderiam ser unificados

por uma regra matemática. Em sua homenagem, agora expressamos a intensidade de qualquer tipo de força em newtons, e ensinamos a Lei da Gravitação de Newton:

$$F = \frac{G\, m_1\, m_2}{r^2}$$

onde m_1 e m_2 são as massas de dois objetos, r é a distância entre eles e G é uma constante de proporcionalidade chamada Constante Gravitacional Universal. Seu valor foi determinado experimentalmente pelo cientista britânico Henry Cavendish, em 1798.

A Lei da Gravitação de Newton descreve corretamente o movimento da maioria dos corpos no sistema solar, bem como o movimento de objetos na Terra. No entanto, em certos casos, os cientistas descobriram discrepâncias entre as previsões da formulação de Newton e o que realmente observaram. Uma delas é a órbita de Mercúrio, que tem uma anomalia peculiar que discutiremos a seguir.

Figura 4: Newton, maçãs e a Lua. Crédito: S S U E P O/Aurore Simonnet.

Na década de 1890, o adolescente Albert Einstein iniciou um caminho que acabaria por levar a uma noção mais abrangente da gravidade do que a proposta por Newton. O trabalho do físico James Clerk Maxwell, na década de 1870, uniu os conceitos de eletricidade e magnetismo em uma estrutura poderosa. Maxwell percebeu que as flutuações no campo eletromagnético, como aquelas produzidas por cargas elétricas vibrantes, produziam ondas eletromagnéticas — ondas de luz. Na adolescência, Einstein imaginou se mover ao lado de uma onda de luz à velocidade da luz. Ele percebeu que nesse sistema de referência a onda de luz pareceria congelar. Os campos elétrico e magnético oscilavam no tempo, como mostrado na Figura 5, mas ele não veria a onda se afastando desses campos. Os problemas associados a essa imagem de "onda congelada" levaram Einstein à percepção fundamental de que a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, independentemente de seu estado de movimento. Ele também assumiu que as leis da física devem ser as mesmas para todos os observadores.

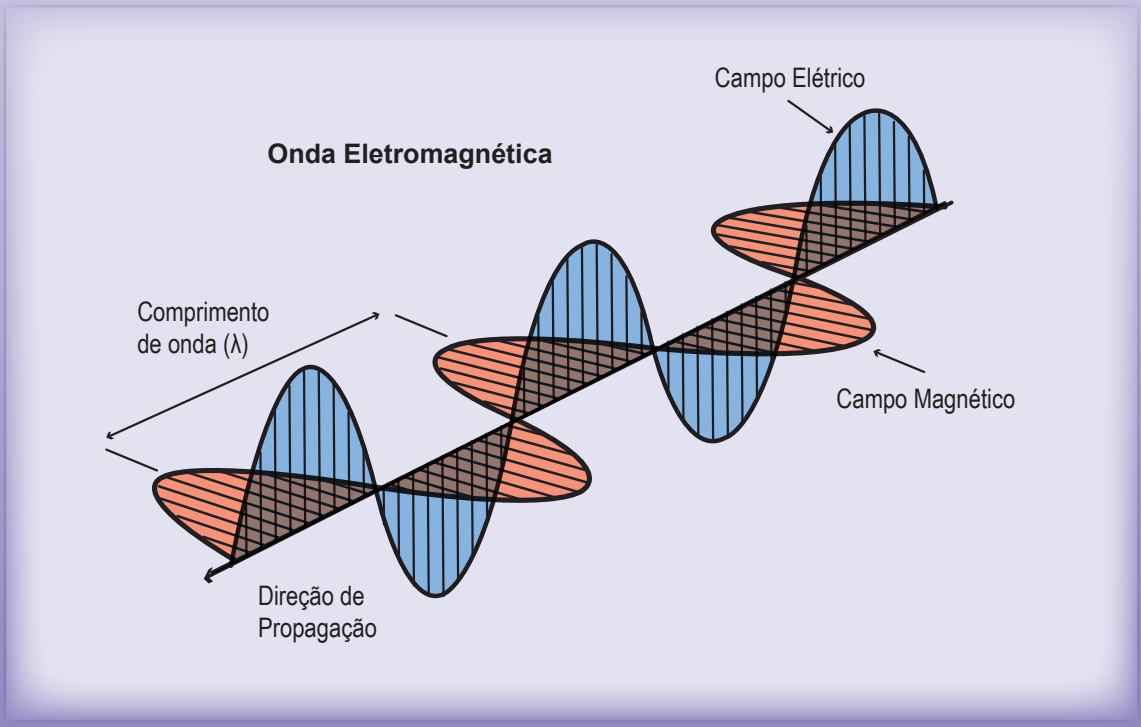


Figura 5: Onda Eletromagnética. Crédito: S S U E P O/Aurore Simonnet.

Einstein elevou essas duas suposições a princípios físicos chamados *princípios da Relatividade Especial*. Eles se aplicam a situações em que observadores ou objetos estão se movendo a uma velocidade constante (em módulo e direção). Sua teoria, a *Teoria da Relatividade Especial*, embora inconsistente com nossas percepções de senso comum do mundo, mostrou-se inteiramente consistente e com precisão extremamente alta em todos os testes experimentais.

Quando Albert Einstein publicou seu primeiro artigo sobre a relatividade especial em 1905, ele ainda não compreendia totalmente sua natureza geométrica. Ele passou a apreciar esses aspectos da teoria nos próximos anos, enquanto trabalhava com o matemático Hermann Minkowski (1864–1909). Minkowski desenvolveu a ideia do espaço-tempo, na qual os eventos ocorrem em um "espaço" quadridimensional que inclui as três dimensões do espaço e mais uma dimensão do tempo — daí o nome. Em 1915, Einstein publicou um novo trabalho sobre uma Teoria Geral da Relatividade, que consistia em um novo formalismo matemático para estender sua teoria especial a situações em que objetos eram capazes de se acelerar. Foi o culminar de uma década de esforço concentrado.

Como qualquer objeto que está se movendo em uma órbita circular está acelerando (já que sua direção muda constantemente, mesmo que sua velocidade permaneça constante), a Teoria da Relatividade Geral tem ampla aplicabilidade a objetos massivos no Universo. Em particular, pode ser aplicada a objetos que pareciam violar as previsões feitas usando o formalismo mais simples de Newton, como o movimento orbital do planeta Mercúrio.

Ao contrário dos outros planetas, a órbita de Mercúrio tem uma ligeira variação em relação ao previsto pela teoria gravitacional newtoniana. A órbita não é uma elipse fechada, como prevê a teoria. Tem um pequeno deslocamento. Isso significa que a órbita inteira está girando lentamente enquanto o planeta orbita o Sol. Isso quer dizer que o ponto de maior aproximação do Sol, chamado de periélio, gira lentamente em torno do Sol, assim como o ponto de maior afastamento do Sol, o afélio (veja a Figura 6).

A quantidade deste deslocamento orbital é muito pequena e causada em maior parte por "puxões" gravitacionais exercidos pelos outros planetas — principalmente Júpiter — em Mercúrio enquanto circulam o Sol. No entanto, mesmo quando os efeitos gravitacionais dos outros planetas são contabilizados usando a Lei da Gravitação de Newton, Mercúrio ainda viaja um extra de 2,9 x 10^{-5} graus de rotação (além dos 360 graus) para cada órbita. Tal quantidade tão pequena não pode ser percebida em uma única órbita, mas essa quantidade se acumula com o tempo. Depois de um século, Mercúrio fez um acréscimo de 0,012 grau além das previsões da gravidade newtoniana. Este ainda é um pequeno ângulo, mas é mensurável.

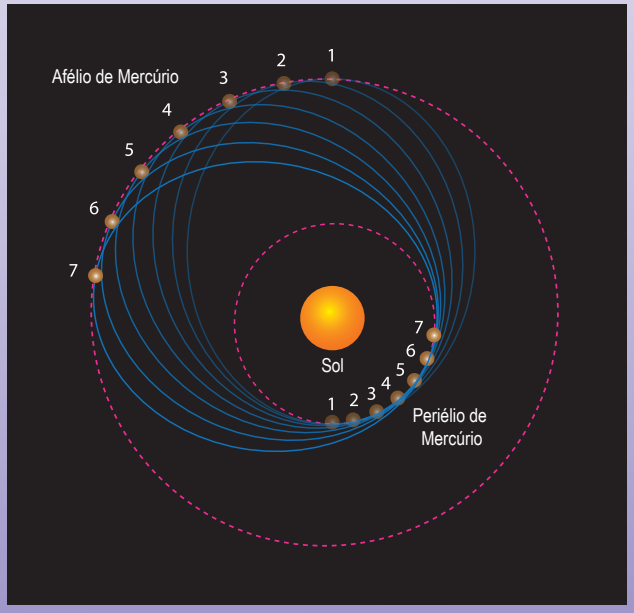


Figura 6: Conforme Mercúrio orbita o Sol, sua órbita lentamente se desloca ao redor do Sol. Isso significa que a posição do periélio e do afélio circulam o Sol lentamente. A gravidade newtoniana não pode explicar todo esse movimento, mas a Relatividade Geral sim. A excentricidade da órbita foi bastante exagerada nesta figura. Crédito: S S U P E O/Aurore Simonnet.

Albert Einstein estava ciente da órbita anômala de Mercúrio. Quando sua nova teoria parecia completa o suficiente para ser aplicada à órbita, ele fez o cálculo. Não havia parâmetros livres na Teoria Geral de Einstein que pudessem ser usados para ajustá-lo ao valor correto. As únicas entradas relevantes foram a massa do Sol e o tamanho e a excentricidade da órbita de Mercúrio. Quando Einstein fez o cálculo, sua teoria previu que Mercúrio deveria realizar precessão em torno do Sol precisamente a quantidade da anomalia observada.

O conceito de que as massas distorcem o espaço-tempo — o sistema de quatro dimensões de coordenadas matemáticas mencionado anteriormente — é essencial para a teoria de Einstein. Essa distorção é frequentemente chamada de curvatura, mas esse não é um termo muito descritivo. Alongamento é provavelmente melhor. Você possivelmente pode entender melhor essa ideia intuitivamente se imaginar tentar colar uma folha plana de papel milimetrado na superfície de um globo. Você não poderá fazê-lo sem rasgar ou enrugar o papel, fazendo com que as linhas fiquem desalinhadas de várias maneiras. Se você tivesse uma folha de borracha com linhas como papel quadriculado, em vez de rasgar, poderia esticar a borracha em algumas áreas e comprimi-la em outras. Se fosse cuidadoso o suficiente, você poderia cobrir completamente o globo desta maneira sem nenhuma lágrima. Esse alongamento e compressão distorceriam as linhas da folha, assim como a gravidade distorce as coordenadas no espaço-tempo. De fato, a gravidade *é* essa distorção das coordenadas. Isso significa que em alguns lugares um "centímetro" é menor do que um centímetro em outros lugares onde a força do campo gravitacional é diferente. Isso também significa que um "segundo" em alguns lugares é um intervalo de tempo maior do que em outros lugares - essa é a parte da distorção do tempo do espaço-tempo.

É difícil visualizar algo em quatro dimensões, por isso os cientistas

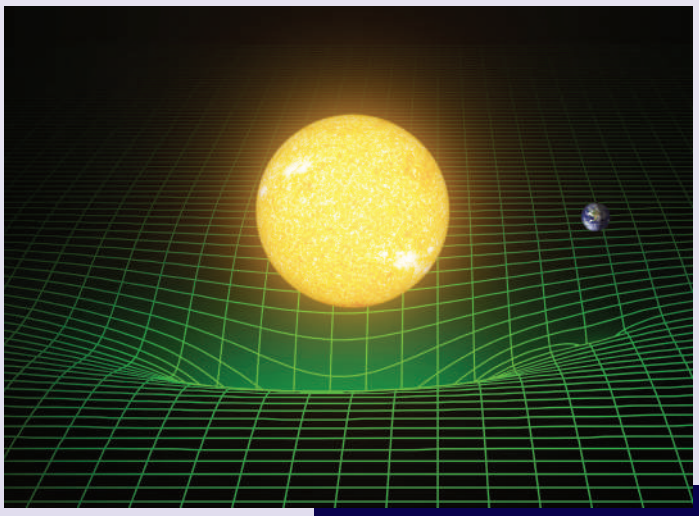


Figura 7a (acima): O Sol cria uma distorção mais profunda no tecido do espaço-tempo quando comparado à Terra, um corpo muito menos massivo.
Crédito: LIGO/T. Pyle.

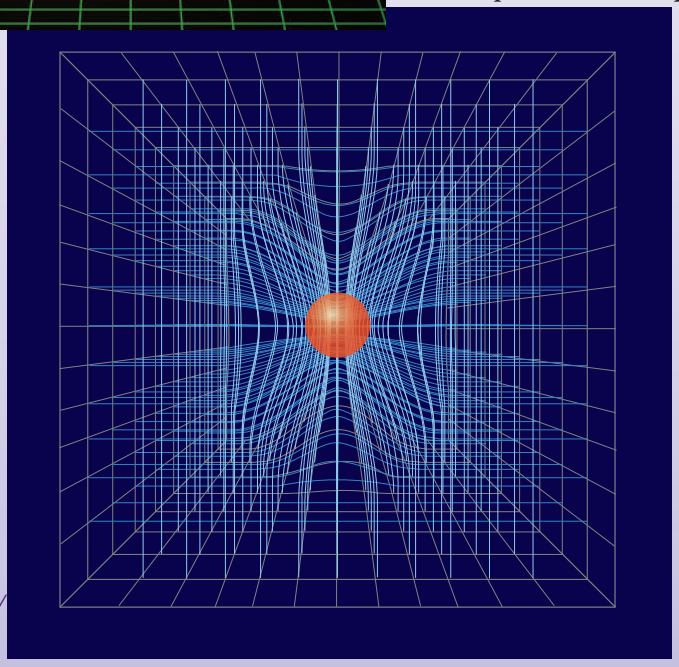


Figura 7b (direita): Melhor representação da curvatura do espaço-tempo perto de um objeto massivo do que o tradicional diagrama de imersão. Crédito: S S U E P O/ Aurore Simonnet.

geralmente usam uma representação chamada diagrama de imersão para indicar o quanto um objeto de determinada massa deformaria duas dimensões do espaço, retratado como um tipo de folha de borracha. Neste tipo de visualização, mostrado na Figura 7a, objetos mais massivos criam depressões mais profundas na folha de borracha do espaço-tempo. Qualquer objeto que se mova através do espaço-tempo encontrará áreas distorcidas, e como consequência seguirá caminhos curvos enquanto viaja. Isto é verdade até mesmo para os raios de luz.

É importante não interpretar literalmente os diagramas de imersão. Eles são apenas apoio à visualização — por isso enganosas. No espaço-tempo real, nosso espaço tridimensional não tem que ser incorporado em um espaço quadridimensional, nem nosso espaço-tempo quadridimensional precisa estar incorporado em uma quinta dimensão. A distensão e a compressão do espaço-tempo não exigem a existência de nenhuma dimensão maior, assim como você poderia desenhar um conjunto estendido e comprimido de coordenadas em uma mesa plana bidimensional (pense na projeção de Aitoff para um mapa-múndi), a distensão e a compressão do espaço-tempo ocorre em um espaço de quatro dimensões, sem necessidade de nenhuma dimensão extra. Em particular, buracos negros não têm "forma de funil" mais do que estrelas. Essas imagens são apenas uma maneira de ajudar a visualizar como a massa afeta o espaço-tempo. A Figura 7b mostra uma melhor representação da curvatura do espaço-tempo perto de um objeto massivo, embora também seja limitada pela superfície bidimensional desse guia.

Ondas gravitacionais

Para entender a previsão de ondas gravitacionais de Einstein, vamos revisitar a Lei da Gravitação de Newton, descrita anteriormente. Não há nada nesta lei que descreva como os efeitos da gravidade são transmitidos de um lugar para outro. De fato, de acordo com essa lei, se movermos uma das massas para um ponto diferente no espaço, a outra massa "saberá" disso instantaneamente e reagirá de acordo. Essa capacidade da gravidade de agir instantaneamente em qualquer distância intrigou muitos contemporâneos de Newton. Também viola a Teoria Especial da Relatividade de Einstein, pois não é possível que qualquer sinal ou informação atravesse o espaço mais rapidamente do que a luz pode viajar.

Na Relatividade Geral, a gravidade não é uma força como imaginada por Newton. Em vez disso, a gravidade é o resultado da distorção do espaço-tempo, são causadas pela distribuição de massa e energia. Alterar a distribuição de massa-energia geralmente mudará a curvatura do espaço-tempo e, portanto, também os efeitos gravitacionais dos objetos naquele espaço-tempo. No entanto, quando uma distribuição de massa é alterada, os efeitos dessa alteração não são transportados instantaneamente para todos os pontos no espaço. A informação é transportada à velocidade da luz por ondulações no tecido do espaço-tempo — pequenas distensões e compressões nas coordenadas que descrevem o espaço-tempo. Essas ondulações são chamadas de ondas gravitacionais.

Uma analogia pode ajudar a entender como isso funciona. Podemos imaginar um observador vivendo em uma casa flutuante na beira do mar. Se houver uma tempestade no mar, o observador pode não estar ciente do fato, por exemplo, se ela estiver no horizonte. No entanto, as tempestades geralmente têm ventos fortes que criam grandes ondas. Essas ondas se afastam da tempestade em todas as direções, geralmente a velocidades de poucos metros por segundo. Eventualmente, elas atingirão a costa

onde o observador mora, e as grandes ondas farão com que a casa flutue para frente e para trás. Desta forma, o observador pode se tornar consciente da existência da tempestade, mesmo que a tempestade nunca se aproxime da costa - os surfistas estão cientes disso e usam satélites para rastrear tempestades para que possam prever quando as ondas em uma certa praia podem ser boas para surfar. Substitua a tempestade em nossa analogia por um sistema estelar binário e a superfície do mar pelo espaço-tempo. Você pode ver como poderíamos detectar as estrelas, pelo menos a princípio, medindo as ondulações do espaço-tempo causadas pelo movimento das estrelas.

Essas ondas gravitacionais transportam energia, é claro, e como as ondas estão sendo produzidas pelo movimento das estrelas no espaço, o sistema estelar deve estar perdendo parte de sua energia para as ondas, afetando, assim, a órbita binária. Portanto, se as estrelas binárias criam ondas gravitacionais, elas devem espiralar lentamente em direção uma à outra à medida que as ondas levam a energia do sistema para longe.

A teoria de Einstein prevê uma relação exata entre o tamanho da órbita e a taxa em que ela deve encolher conforme as ondas são emitidas. No entanto, para que esses efeitos pudessem ser observados, os cientistas precisavam descobrir um sistema binário no qual dois objetos massivos estivessem orbitando muito próximos um do outro, e uma maneira de medir precisamente as mudanças orbitais.

Tal sistema foi descoberto no início da década de 1970 por dois cientistas que trabalhavam no radiotelescópio de Arecibo, em Porto Rico, na época o radiotelescópio mais sensível do mundo. Um dos pesquisadores, um estudante de pós-graduação chamado Russell Hulse, estava em Arecibo para encontrar pulsares, que são estrelas de nêutrons altamente magnéticas, girando rapidamente, com massas de aproximadamente 1,4 vezes a do Sol. Eles emitem pulsos à medida que giram, que são análogos aos de um farol quando sua luz gira. Os pulsares geralmente têm emissões de pulso muito regulares e, na época, constituíam os mais precisos "relógios" conhecidos. No entanto, um dos pulsares descobertos por Hulse, chamado PSR 1913 + 16, mostrou uma variação periódica na sua separação de pulsos: eles chegavam um pouco antes dos pulsos sucessivos, depois mudavam e chegavam um pouco tarde, repetindo o padrão de variação aproximadamente a cada oito horas.

Depois de discutir este pulsar com seu orientador, Joseph Taylor, ficou claro que o que eles estavam observando era um pulsar em órbita em torno de outra estrela. No entanto, dado o período orbital de apenas oito horas, a companheira deveria ser extremamente pequena — e fraca, já que nenhuma companheira era visível. Outras observações cuidadosas sugeriram que a companheira, em si, também era uma estrela de nêutrons, embora não emitisse pulsos; não era um pulsar.

Ao sincronizar os pulsos do então chamado sistema de pulsares Hulse-Taylor ao longo de muitos anos, os cientistas conseguiram mostrar que o período orbital do sistema está diminuindo lentamente, e as duas estrelas de nêutrons estão gradualmente espiralando uma na outra. A taxa de perda de energia implícita pela espiralação pode ser comparada com a prevista pela radiação gravitacional da Relatividade Geral. Os dois combinam bastante, dentro das incertezas associadas às várias propriedades medidas para o sistema, como visto na Figura 8.

Embora não seja uma detecção direta de ondas gravitacionais, o decaimento orbital do PSR 1913 + 16 é uma evidência convincente de que tais ondas existem na forma que a Relatividade Geral prevê. Hulse e Taylor receberam o Prêmio Nobel de 1993 em física pela descoberta deste sistema pulsar binário. Desde sua descoberta original, foram encontrados outros sistemas que exibem decaimento orbital semelhante, todos sugerindo indiretamente a existência de ondas gravitacionais

Na prática, é extremamente difícil detectar diretamente a presença de ondas gravitacionais porque a distensão e a compressão do espaço-tempo são minúsculas. Elas tendem a ser sobrepostas por efeitos locais não gravitacionais que nada têm a ver com estrelas orbitais distantes.

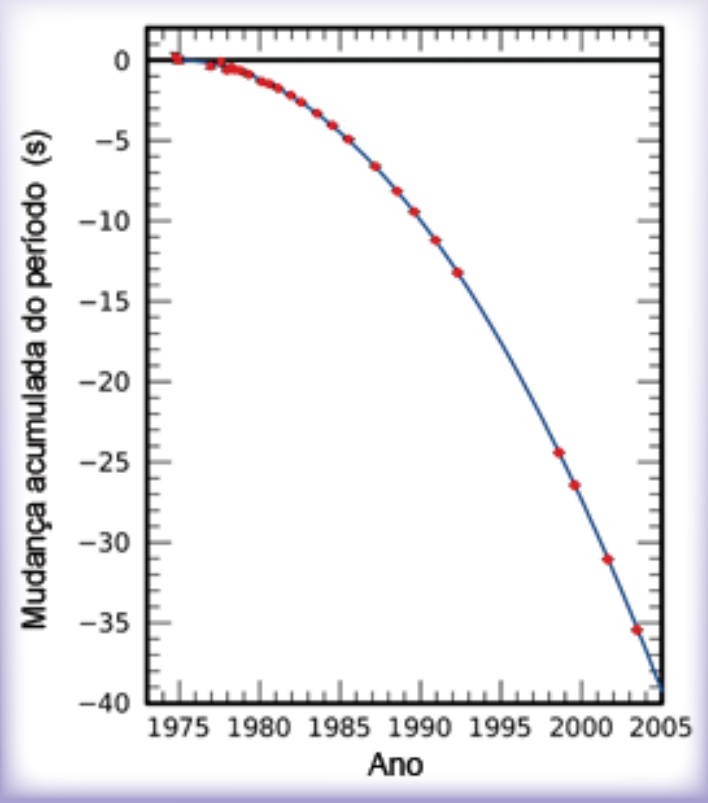


Figura 8: Esta figura mostra quase 30 anos de dados que ilustram a mudança do tamanho da órbita do pulsar binário Hulse-Taylor. O encolhimento da órbita leva a uma mudança no período orbital que é medido a cada ano. Os pontos medidos (quadrados vermelhos) são mapeados juntamente com a previsão teórica (linha azul). Crédito: J. M. Weisberg e J. H. Taylor, ASP Proceedings, 2005.

A observação direta de ondas gravitacionais pelo LIGO

Assim como as ondas eletromagnéticas, as ondas gravitacionais são ondas transversais que viajam na velocidade da luz. A Teoria Geral da Relatividade de Einstein permite prever a força e a frequência dessas ondas, assim como as equações de Maxwell podem ser usadas para prever a força e a frequência das ondas eletromagnéticas emitidas de vários tipos de objetos e processos. No entanto, o eletromagnetismo é uma força muito mais forte do que a gravidade e é fácil detectar um amplo espectro de ondas eletromagnéticas de fontes comuns. Os detectores de ondas gravitacionais ligadas à terra, como o LIGO, consistem em "massas de teste" suspensas e amplamente separadas (espelhos). Os espaçamentos entre essas massas de teste irão mudar quando as ondas gravitacionais passarem por um detector. Mas a mudança será minúscula! Os cientistas esperam que eventos astrofísicos extraordinariamente violentos produzam ondas gravitacionais que, quando passarem por um detector, alteram os espaçamentos entre as massas de teste em não mais do que 10^{-19} metros.

LIGO (Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser) é o maior observatório de ondas gravitacionais do mundo. O LIGO consiste em dois interferômetros de laser localizados a milhares de quilômetros de distância, um em Livingston, Louisiana, e outro em Hanford, Washington. O LIGO usa as propriedades físicas da luz e do próprio espaço para detectar ondas gravitacionais. Foi financiado pela Fundação Nacional de Ciências dos EUA e é gerido pela Caltech e pelo MIT. Centenas de cientistas da Colaboração Científica LIGO, em muitos países, contribuem para a astrofísica e a ciência de instrumentação do LIGO. Há também outros observatórios de ondas gravitacionais no mundo, incluindo Virgo na Itália e GEO 600 na Alemanha.

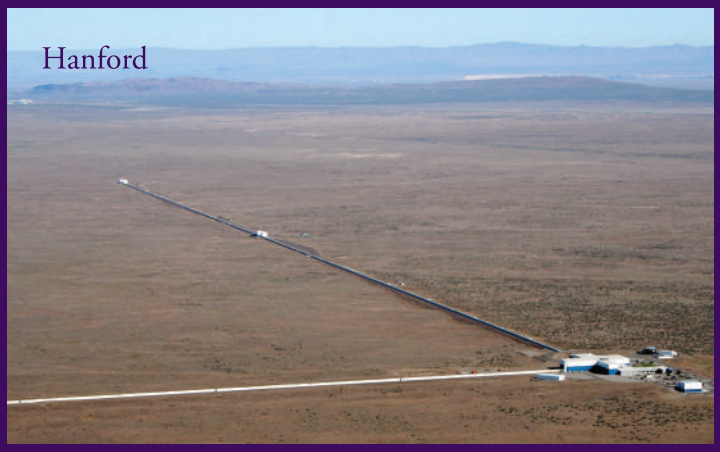


Figura 9: LIGO Hanford e LIGO Livingston. Credit: Caltech/ MIT/ LIGOMIT/LIGO.

O LIGO consiste em dois "braços" perpendiculares de 4 km, conforme representado na Figura 10. Um feixe de laser é disparado em um divisor de feixe que envia metade da luz para um desses braços e metade para o outro. Os espelhos então refletem a luz de volta pelo mesmo caminho, e o divisor de feixe combina os dois feixes de volta em um, enviando o feixe combinado para um detector. O LIGO ajusta cuidadosamente os comprimentos dos braços do detector, de modo que a luz dos braços quase se cancele completamente, ou sofra interferência destrutiva, quando os feixes refletidos se recombinam no divisor de feixe. No entanto, se os comprimentos dos braços mudarem ligeiramente devido à passagem de uma onda gravitacional, as diferenças de comprimento introduzirão uma pequena diferença na fase entre os feixes de diferentes braços. As ondas que se cancelariam no divisor de feixes agora percorrem diferentes comprimentos de trajetória e acabam produzindo alguma luz no detector.

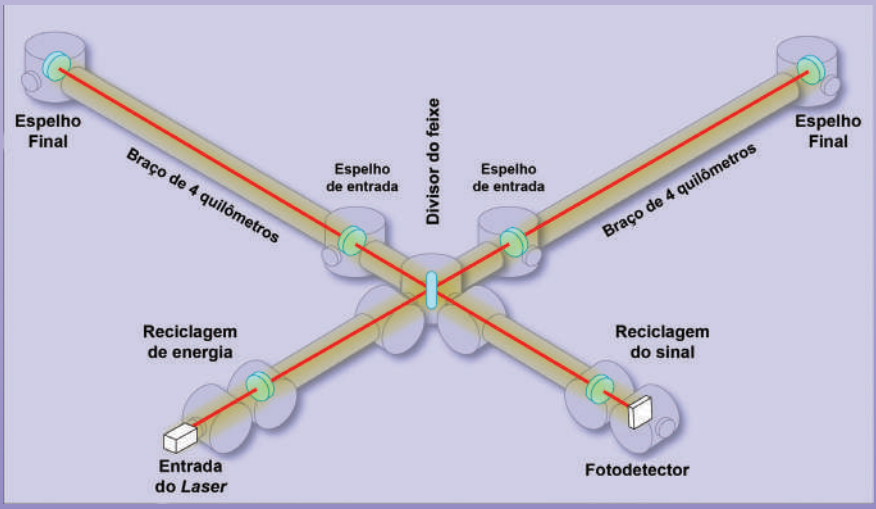
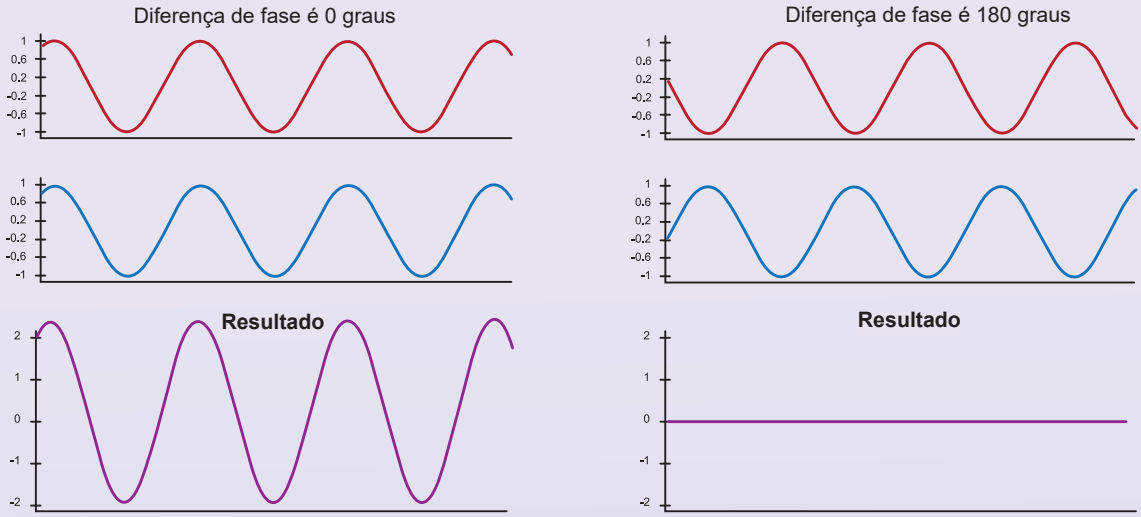


Figura 10: Projeto básico dos interferômetros LIGO. Crédito: LIGO/Shane Larson.

É essa propriedade de interferência da luz que é explorada pelo LIGO para detectar ondas gravitacionais. Quando uma onda gravitacional passa, a distensão e a compressão do espaço fazem com que os braços do interferômetro se alonguem e encurtem alternadamente, ficando um mais comprido enquanto o outro fica mais curto, e vice-versa. À medida que os braços dos interferômetros mudam de comprimento, os feixes de laser que viajam pelos braços percorrem diferentes distâncias, resultando em uma mudança na "interferência" entre as ondas. A mudança no comprimento de um braço dividida pelo comprimento desse braço é o parâmetro chamado de strain (ou *h*, veja a Figura 3).



Figuras 11a e 11b: Ilustração do padrão de interferência produzido por duas ondas que são a) em fase eb) 180 graus fora de fase. Crédito: S S U P E O/Aurore Simonnet.

Os cientistas do LIGO pesquisam os dados para encontrar o padrão de mudanças no comprimento do braço previsto pela Relatividade Geral de diferentes tipos de fontes de ondas gravitacionais. À medida que um sistema binário se une (ou "espirala"), a frequência das ondas gravitacionais emitidas aumentará até que os dois objetos se fundam — após esse evento cataclísmico, o sistema "tocará" por algum tempo. Os cientistas então calculam o formato exato da onda prevista para sistemas com objetos de massa diferentes e, em seguida, comparam essas curvas previstas com os dados para determinar as massas dos objetos (e o tipo de objetos) que se fundiram. A Figura 12 mostra os dados recebidos pelos dois interferômetros LIGO em Livingston e Hanford em 14 de setembro de 2015, juntamente com as formas de onda gravitacionais mais adequadas - um sistema binário com dois buracos negros, aproximadamente 30 a 35 vezes maior que o Sol, localizado em uma distância que está, pelo menos, a 1 bilhão de anos-luz!

Os dois principais gráficos da Figura 12 mostram os dados recebidos em Livingston e Hanford, juntamente com as previsões teóricas (curvas mais suaves). Essas previsões representam modelos dos sinais de ondas gravitacionais de uma coalescência de buraco negro, com base nas equações da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein. O tempo é mapeado no eixo X e strain (*h*) no eixo Y. A strain representa a fração minúscula pela qual as distâncias são distorcidas.

Como os gráficos mostram, os dados do LIGO correspondem muito de perto às previsões de Einstein. Além disso, as curvas

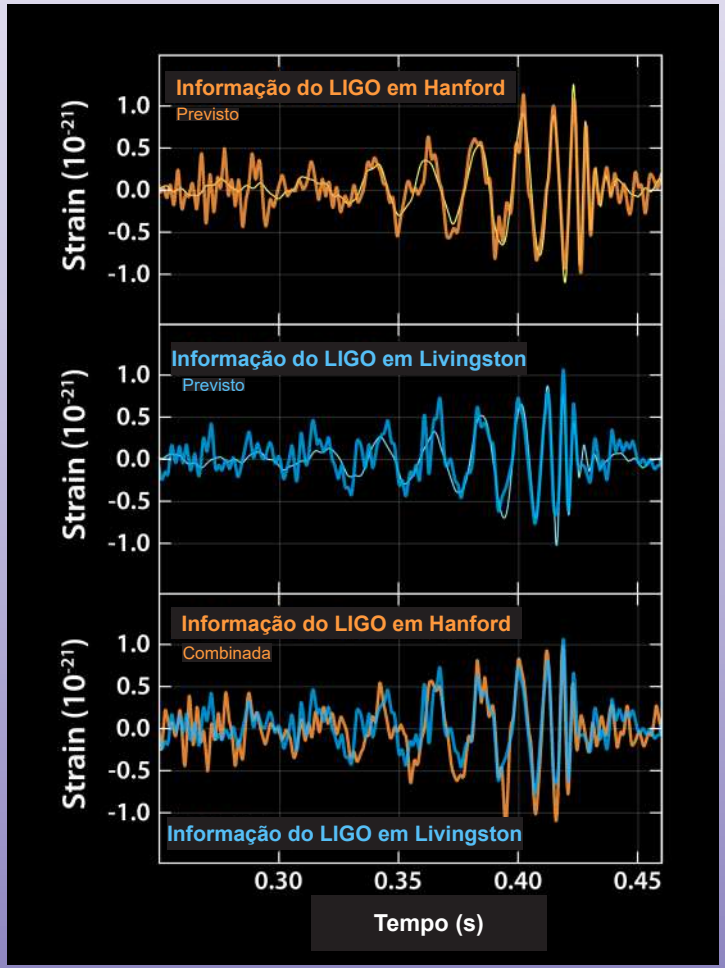


Figura 12: Dados e Modelos de Melhor Ajuste para a Detecção Direta de Ondas Gravitacionais do LIGO. Crédito: LIGO.

teóricas foram ajustadas aos dados separadamente para cada observatório e retornaram os mesmos resultados!

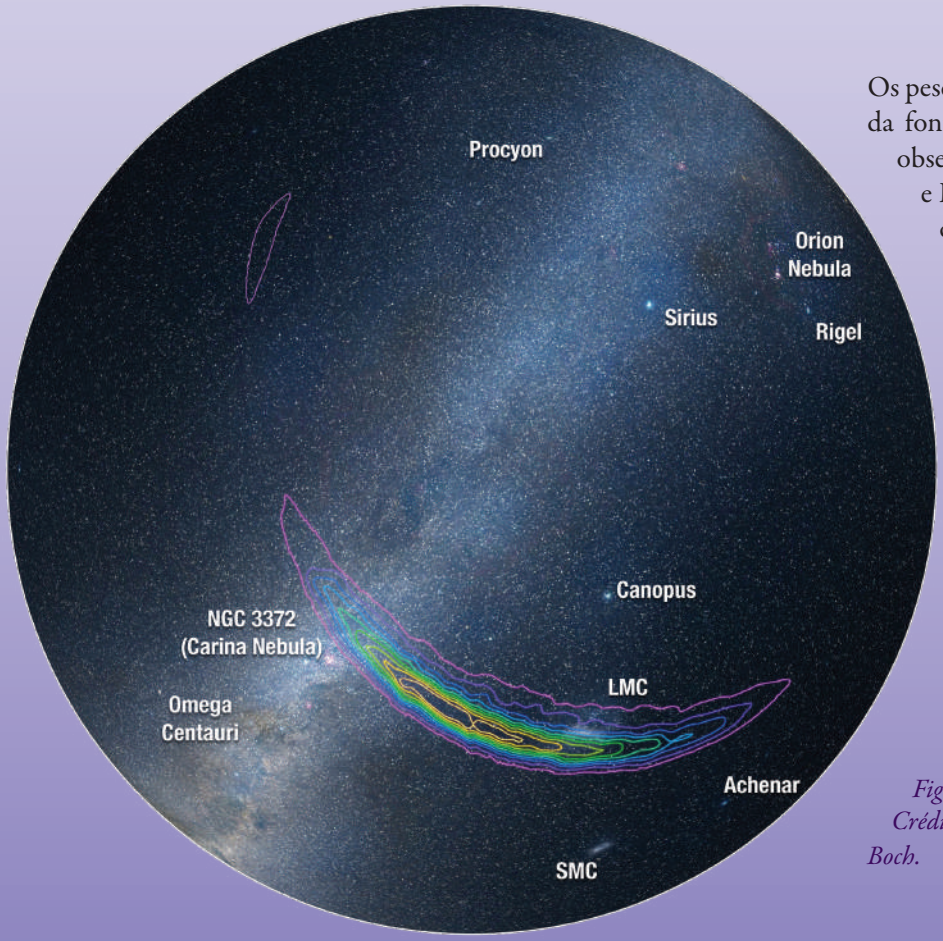
O último gráfico da Figura 12 compara os dados de ambos os detectores. Os dados de Hanford foram invertidos para comparação, devido às diferenças de orientação dos detectores nos dois locais. Os dados também foram deslocados para corrigir o tempo de viagem dos sinais de ondas gravitacionais entre Livingston e Hanford. (a onda de Livingston foi observada 7 milissegundos antes de Hanford.) Isso demonstra que ambos os detectores testemunharam o mesmo evento, confirmando a detecção.

A Tabela 1 fornece alguns dos parâmetros mais importantes medidos pelo LIGO para a descoberta desse evento, chamado de GW150914 em referência à data em que foi observado.

A localização aproximada da fonte de ondas gravitacionais detectada em 14 de setembro de 2015 pelos observatórios do LIGO é mostrada na Figura 13, sobreposta em um visível mapa celeste do hemisfério sul. As linhas coloridas representam probabilidades diferentes para a origem do sinal: a linha roxa define a região de dentro da qual o sinal foi emitido, com 90% de confiança. A linha amarela interna define a região de confiança de 10%.

Tabela 1 - Parâmetros importantes do GW150914

Tempo detectado	14 de Setembro, 2015 09:50:45 UTC	
Massa (em unidades de massas solares)	Buraco Negro 1	36^{+5}_{-4}
	Buraco Negro 2	29 ± 4
	Massa Final	62 ± 4
Energia OG	$3.0 \pm 0.5\ M_{\odot} c^2$	
Distância	410^{+160}_{-180} Mpc ~1.34 x 10^9 anos-luz	
Redshift	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	
Observing band	35-350 Hz	
Pico de strain *h*	1.0×10^{-21}	



Os pesquisadores conseguiram descobrir a localização da fonte de ondas gravitacionais usando dados dos observatórios do LIGO em Livingston, Louisiana, e Hanford, Washington. As ondas gravitacionais chegaram a Livingston 7 milissegundos antes de chegarem a Hanford. Este atraso de tempo revelou um pedaço particular do céu, ou anel, de onde o sinal deve ter vindo. Uma análise mais aprofundada da strain variável do sinal em ambos os detectores excluiu partes do anel, deixando a mancha restante mostrada neste mapa.

No futuro, quando o detector de ondas gravitacionais Virgo, na Itália, estiver em funcionamento, e mais tarde o detector KAGRA, no Japão, os cientistas serão capazes de identificar melhor as localizações e as fontes de sinais.

Figura 13: Localização aproximada dos sinais LIGO. Crédito: LIGO/Roy Williams, Shane Larson e Thomas Boch.

Buracos Negros

A maioria das pessoas pensa em um buraco negro como um redemoinho voraz no espaço, sugando tudo ao seu redor. Mas isso não é verdade. Um buraco negro é um lugar no espaço onde a gravidade é tão forte que a matéria ou a energia só poderiam escapar dele viajando mais rápido do que a velocidade da luz, o que não é possível de acordo com as leis da física. Se você pegar um objeto e diminuí-lo em tamanho, ou pegar um objeto e acumular massa nele, sua gravidade (e velocidade de escape) aumentará. Em algum momento, se você continuar fazendo isso, terá um objeto com tanta gravidade que a velocidade de escape poderá exceder a velocidade da luz. Como esse é o limite de velocidade máximo do Universo, qualquer coisa que se arrisque muito perto ficaria presa para sempre. A distância do buraco negro em que nenhuma luz pode escapar é chamada de horizonte de eventos. Um buraco negro com a massa do nosso Sol tem um horizonte de eventos com um raio de apenas 3 km. Em outras palavras, você teria que comprimir toda a massa do nosso Sol para caber dentro de uma esfera com um raio de 3km para transformá-la em um buraco negro! A compressão de um objeto a tal ponto faz com que ele colapse, já que nenhuma força conhecida pode suportá-lo contra seu próprio peso neste ponto. Sua matéria é espremida da existência, convertida em energia pura do campo gravitacional. Os cientistas pensam que tudo o que resta de tal objeto é uma região do espaço-tempo altamente distorcida da qual nada pode escapar - um buraco negro.

Figura 14: Buraco negro voraz no centro de uma galáxia, tendo uma refeição gourmet. Crédito: S S U P E O/Aurore Simonnet.

Uma maneira de se formar um buraco negro é a partir de uma supernova, uma estrela explosiva. Quando uma estrela com mais de 25 vezes a massa do Sol termina sua vida, ela explode. A parte externa da estrela é lançada para fora em alta velocidade, mas a parte interna da estrela, seu núcleo, colapsa. Se houver massa suficiente, a gravidade do núcleo em colapso vai comprimir tanto que pode se tornar um buraco negro. No caso do GW150914, deve ter havido originalmente duas estrelas muito massivas relativamente próximas uma da outra. Elas envelheceram aproximadamente na mesma taxa e as explosões de suas supernovas resultantes não perturbaram o sistema binário. Isso aconteceria se a maior parte da massa do sistema fosse capturada pelos núcleos em colapso, em vez de expelida do sistema pela explosão. Os núcleos que desmoronaram em buracos negros tinham massa de aproximadamente 30 a 35 vezes a do Sol. Até a descoberta do GIG150914 pelo LIGO, os cientistas nunca haviam observado a fusão de dois buracos negros.

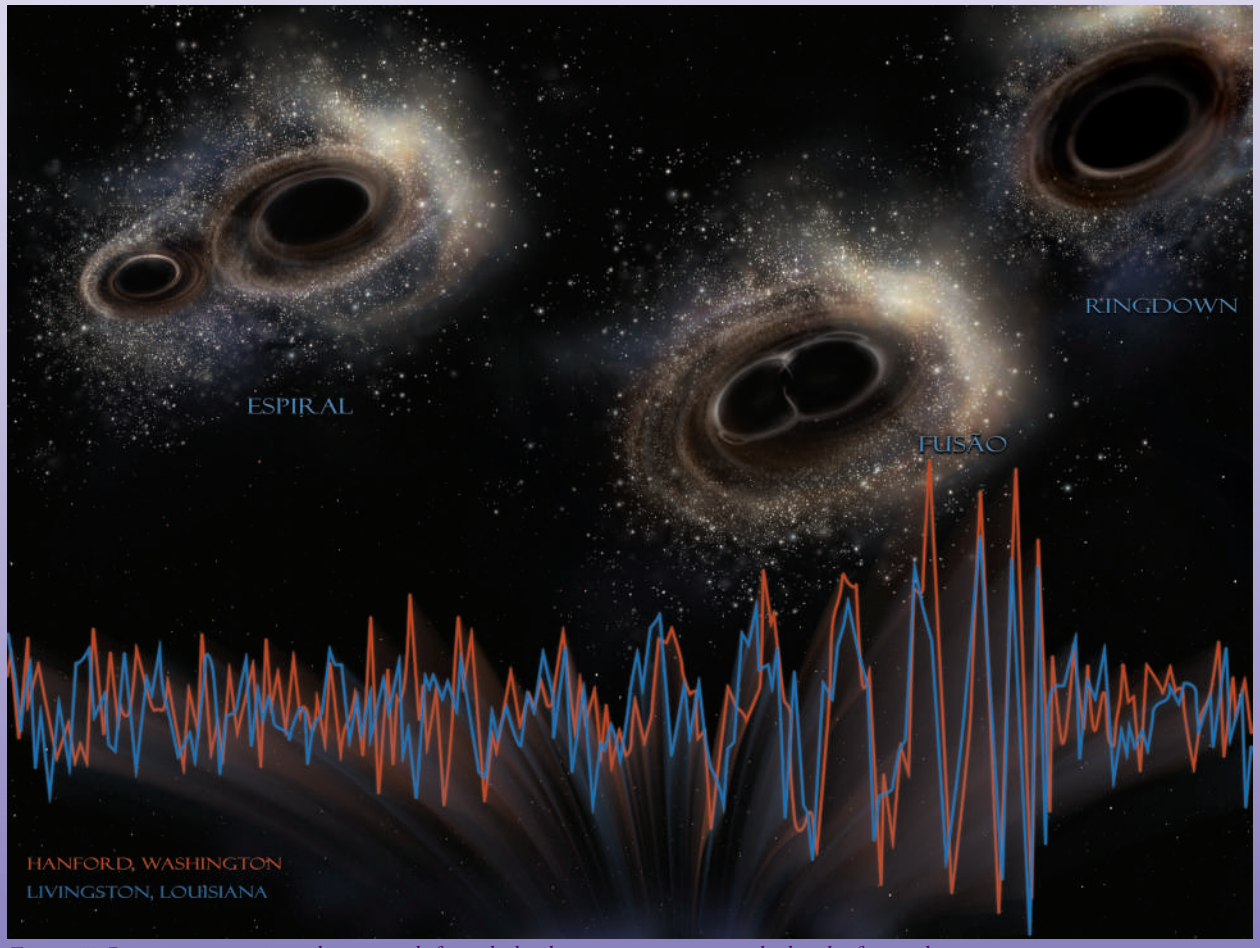


Figura 15: Representação artística do processo de fusão de dois buracos negros, acompanhado pelas formas de onda reais detectadas pelos detectores LIGO Hanford e Livingston. Crédito: S S U P E O/Aurore Simonnet.

Atividades

Atividade 1 - Buracos Negros Coalescentes

Duração: 30 min

Questão Essencial:

O que acontece quando dois buracos negros espiralam um em direção ao outro?

Objetivos:

Os alunos observarão que a frequência orbital aumenta à medida que a separação orbital entre os dois objetos diminui.

Conceitos Científicos:

As ondas gravitacionais são ondulações no espaço-tempo produzidas por alguns dos eventos mais violentos do cosmos, como as colisões e fusões de estrelas compactas massivas ou buracos negros. Essas ondulações viajam na velocidade da luz através do Universo, carregando consigo informações sobre suas origens.

Quando dois objetos compactos orbitam um ao outro, eles irradiam ondas gravitacionais. Isso reduz a energia, diminuindo a distância orbital e aumentando a velocidade orbital. A forma de onda resultante é conhecida como chilro porque a frequência e a amplitude da onda estão aumentando. Ao escalar essa onda para frequências na faixa de áudio, você pode ouvir esse chilro.

A demonstração apresentada aqui modela os estágios finais da espiralização binária com as mesmas propriedades de uma fonte de ondas gravitacionais como GW150914.

A figura 1 apresenta os principais resultados da análise do GW150914. A parte central da figura mostra a reconstrução do padrão de strain da onda gravitacional, como visto pelo detector de Hanford.

Note, em particular, a concordância impressionante entre este padrão (mostrado em cinza) e a melhor correspondência de onda computada (mostrado em vermelho), para os dois buracos negros coalescentes, como previsto pela Relatividade Geral.

Um desenho representando as três etapas do evento é mostrado no topo da figura: o espiral, enquanto os dois buracos negros se aproximam; a fusão à medida que os buracos negros se juntam e o subsequente ringdown, quando o único buraco negro que recentemente se formou oscila brevemente antes de se estabelecer.

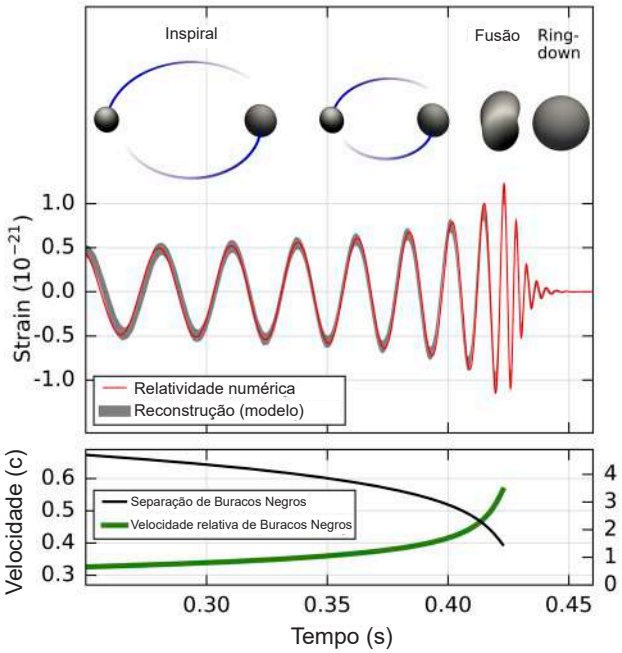


Figura 1: Modelos do GW150914. Crédito: LIGO.

Materiais:

Para cada sala de aula, para usar como demonstração

- Corda - fio de nylon ou linha de pesca de espessura média funcionam melhor, mas qualquer corda lisa deve ser suficiente;
- Peso - uma bucha de latão, pilha de arruelas ou pilha de nozes;
- 2 bolas - duas bolas de tênis podem ser as mais fáceis de serem vistas em uma sala de aula grande. Bolas de golfe ou de argila também funcionam.

Opcionais

- Argila ou tinta preta;
- 2 campainhas piezoelétricas - 12 mm funcionam melhor;
- 2 baterias tipo moeda - baterias LR44 de 1,5V encaixadas entre os terminais das campainhas de 12 mm;
- Módulo de som gravável ou caixa de som;
- Computador com alto-falantes.

Preparando a atividade:

Esta demonstração é melhor feita em uma área aberta na qual você possa pendurar a corda. Pode ser do alto do batente de uma porta, em um gancho no teto ou em um suporte simples.

1. Corte um pedaço de corda de 1-2 metros;
2. Anexe duas bolas em cada extremidade da corda. Se estiver usando bolas de tênis, use uma navalha ou faca para cortar um entalhe de 2-4 cm na bola. Aperte a bola para abrir o entalhe e empurre a ponta da corda;
3. Pegue a corda no centro e passe-a pelo peso;
4. Faça um pequeno laço na corda no seu ponto central. Pendure o laço no gancho. As bolas de tênis devem ficar lado a lado na mesma altura. O peso descansará na parte inferior da corda logo acima das bolas de tênis;
5. Pendure a demonstração em um espaço aberto.

Opcional

6. Cubra as bolas com argila ou tinta preta para simular buracos negros;
7. Cole duas campainhas piezoelétricas dentro das bolas para simular os sons do espiral e ringdown (nota: você está realmente ouvindo o efeito Doppler de cada bola, mas as batidas aceleram à medida que as bolas espiralam);
8. Use um módulo de som gravável ou caixa de som para gravar o som de GW150914 em *http://losc.ligo.org//events/GW150914/*. O evento é muito rápido. Você pode usar o software de áudio para retardá-lo.
9. Use um computador com alto-falantes para reproduzir os vídeos no seguinte site: *http://mediaassets.caltech.edu/gwave*

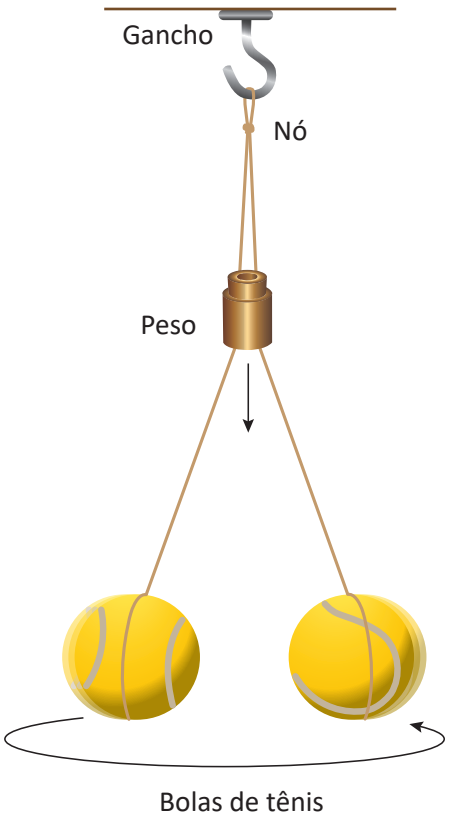


Figura 2: Demonstração do procedimento. Crédito: S S U E P O/Aurore Simonnet.

Procedimento:

1. Afaste as duas bolas puxando o peso até o topo da corda.
2. Cuidadosamente, lance as duas bolas de modo que elas orbitem na mesma direção (no sentido horário ou no sentido anti-horário) com a mesma velocidade. Isso pode precisar de pouco de prática até dar certo.

À medida que a massa cai lentamente e a corda acaba, a órbita se contrai e as duas bolas aceleram. As bolas acabarão por "fundir" ou se juntar. Isso imita o chilrear do sinal de ondas gravitacionais.

Questões:

1. O que as duas bolas representam?
2. A massa deslizando pela corda remove energia do sistema. Ao que isso é análogo no sistema binário de buracos negros?

Respostas:

1. Cada bola representa um dos buracos negros.
2. A massa está absorvendo a energia desse sistema orbital simples. Com a fusão dos buracos negros responsáveis pelo GW150914, as ondas gravitacionais estão levando essa energia.

Atividade 2 - A Distorção do Espaço-Tempo

Duração:
30 min

Questão Essencial:

Como os buracos negros binários distorcem o espaço-tempo?

Objetivos:

Os alunos observarão ondulações em um tecido representando o espaço-tempo como objetos massivos orbitam e se fundem.

Conceitos Científicos:

Esta demonstração permite uma representação visual do efeito de massas em órbita em uma representação bidimensional do tecido do espaço-tempo. Newton viu objetos com massa crescente tendo uma velocidade de escape crescente, enquanto Einstein os via como fazendo "depressões" mais profundas no tecido do espaço-tempo. Um buraco negro faz uma "depressão" tão profunda que forma um poço sem fundo. Os lados do poço são tão íngremes que até a luz não pode escapar depois de ter passado pelo horizonte de eventos. Estrelas e até outros buracos negros podem orbitar com segurança fora desse horizonte de eventos. Quando dois buracos negros estão orbitando perto o suficiente um do outro, as ondas gravitacionais transportam energia para longe do sistema, eventualmente fazendo com que os buracos negros se fundam em um único buraco negro, mais massivo. Embora não possamos ver essas ondas em nosso modelo bidimensional simples, veremos os grandes amassados criados pelos dois pesos maciços.

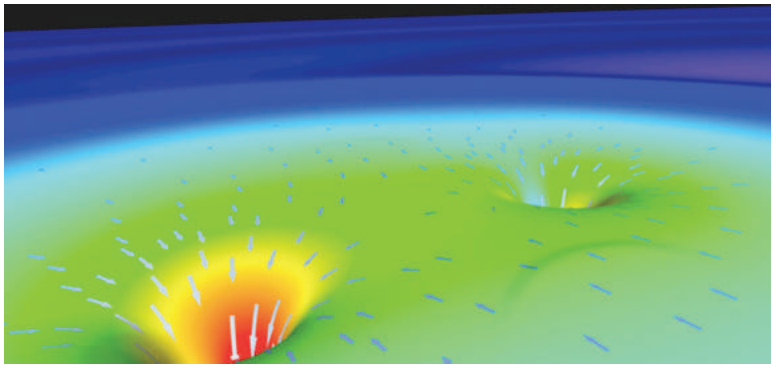


Figura 1: Simulação computacional da strain do espaço-tempo em torno de dois buracos negros colidindo, observados pelo LIGO em 14 de setembro de 2015. Perto dos buracos negros, as cores representam a taxa na qual o tempo flui. Nas regiões verdes fora dos buracos, o tempo flui em sua taxa normal. Nas regiões amarelas, ela é reduzida em 20 ou 30%. Nas regiões vermelhas, o tempo é extremamente lento. Longe dos buracos, as faixas azul e roxa retratam ondas gravitacionais, produzidas pelo movimento orbital e colisão dos buracos negros. Crédito: SXS.

Materiais:

Para cada grupo de 4 ou 5 alunos ou para usar como demonstração em sala de aula:

- 1 bastidor para bordado ~ 23 ½ pol. (60 cm) de diâmetro;
- Tecido de spandex ~ 91 cm × 91 cm;
- 2 rolamentos esféricos cromados de 2 polegadas (5 cm) de diâmetro;
- 2 bolas "pula-pula".

Procedimento:

Esta demonstração começa com uma descrição da gravidade como uma propriedade geométrica do espaço-tempo. Ela terminará com uma demonstração de dois objetos de "buraco negro" orbitando um ao outro e inspirando.

EVITE CONCEPÇÕES EQUIVOCADAS: Esta demonstração é apenas uma representação bidimensional do real. Para evitar equívocos, certifique-se de fazer perguntas aos seus alunos tais como: O que está no "outro lado "do buraco negro em 3 dimensões? O espaço age mesmo em todas as 3 dimensões. Não há frente e verso para um buraco negro. É uma "depressão" esférica no espaço-tempo.

Preparando a atividade:

Estique o tecido pelo bastidor de bordar e puxe-o de maneira firme e reta. Talvez seja preciso 2 a 3 pessoas

Figura 2: Preparação do tecido espaço-tempo.

para realizar essa tarefa. Deixe o lado impresso do tecido e também o aro virados para cima, como se fosse uma tigela.

Parte 1: Buraco negro único ou outro objeto massivo

1. Comece explicando que a gravidade intensa em torno de grandes objetos massivos distorce dramaticamente o tecido do espaço-tempo. É por isso que as coisas "caem" nos buracos negros e gravitam em direção aos objetos grandes, assim como a Terra e os planetas "grudam" ao redor do Sol em suas órbitas.

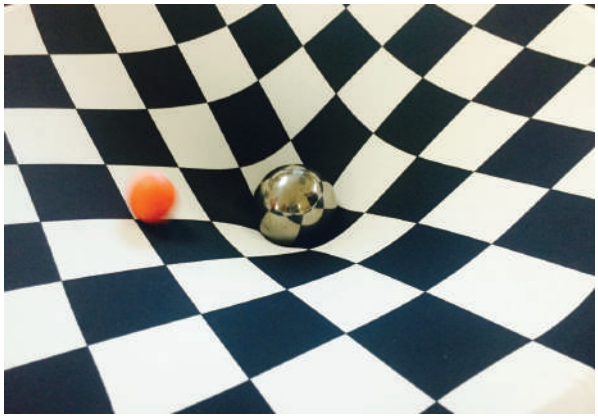


Figura 3: Buraco negro único.

2. Use pelo menos três alunos para segurar o aro do espaço-tempo, de modo que fique horizontal e a borda do aro esteja voltada para cima como uma tigela (para que as bolas não caiam quando forem colocadas no tecido). Peça aos alunos que imaginem que estão segurando um pedaço do espaço-tempo. Note que é muito plano e liso sem a presença de qualquer objeto massivo.
3. Coloque cuidadosamente uma esfera cromada no centro do bastidor. Pergunte aos alunos o que isso representa. (Eles devem dizer um buraco negro ou pelo menos uma estrela.)
4. Agora segure duas bolinhas e pergunte o que eles acham que elas devem representar. (Eles devem dizer estrelas.) Se a primeira resposta deles não for "estrelas", pergunte se eles conseguem pensar em algo no espaço que orbitaria em torno de um buraco negro. Continue fazendo perguntas que os levem à resposta das estrelas. (Nota: se eles disserem planetas, isso não é totalmente incorreto, mas todos os planetas que foram observados orbitam em torno das estrelas, e nenhum deles ainda foi observado em galáxias próximas a buracos negros).
5. Agora, deixe um ou dois outros estudantes tentarem fazer as estrelas orbitarem o buraco negro. Peça ao grupo que registre o que eles vêem acontecendo com o tecido do espaço-tempo e as estrelas. Certifique-se de que eles incluam o que o buraco negro e as estrelas estão fazendo na descrição.
6. Depois de terem registrado suas observações, comece a discutir como essa distorção do espaço-tempo acontece com todos os objetos massivos, até mesmo conosco! Peça que vejam como as pequenas bolas na verdade fazem uma pequena depressão no tecido. É assim que os objetos menos massivos curvam o espaço-tempo.
7. Agora, em vez de um buraco negro, peça para eles imaginarem que o peso é o Sol. Pergunte o que as bolas pula-pula representam. (Eles devem dizer planetas). Assim como um buraco negro ou qualquer objeto massivo, o Sol mantém os planetas gravitacionalmente ligados a ele.
8. Depois de ter explicado o conteúdo acima, deixe os alunos jogarem mais alguns minutos com os bastidores. Um desafio divertido é ver qual aluno pode fazer com que sua estrela orbite o buraco negro para o maior número de revoluções antes que ele caia.

Parte 2: Fundindo buracos negros

1. Remova as bolas pula-pula e pegue a segunda bola cromada. Comece perguntando o que aconteceria se você colocasse cada esfera na borda do tecido. Uma vez que eles não têm velocidade inicial e ambos estão criando grandes depressões, eles rapidamente rolam em direção um ao outro.
2. Pergunte aos alunos o que seria necessário para colocar os dois pesos em órbita ao redor um do outro. Aguarde alguns momentos de teste com os dois pesos. Os alunos devem eventualmente descobrir que as duas bolas precisam de um peteleco, um empurrão inicial para colocá-las em órbita. De fato, qualquer órbita requer que um objeto tenha uma velocidade perpendicular inicial.
3. Você pode confirmar isso colocando o "buraco negro" no centro do tecido e tentando rolar uma das bolas em uma linha perpendicular à direção do objeto central. O caminho irá curvar naturalmente, levando a uma órbita.
4. Agora concentre-se no som que faz quando as bolas se espiralam e finalmente se fundem. Pergunte aos alunos o que eles acham que está causando o som. Na verdade, são as duas bolas tocando-se umas contra as outras. Primeiro você terá um alto tinido seguido por um badalar lentamente decadente. Esta é uma onda sonora que se parece grosseiramente com as ondas gravitacionais emitidas durante as fases de fusão e de ringdown do GW150914.

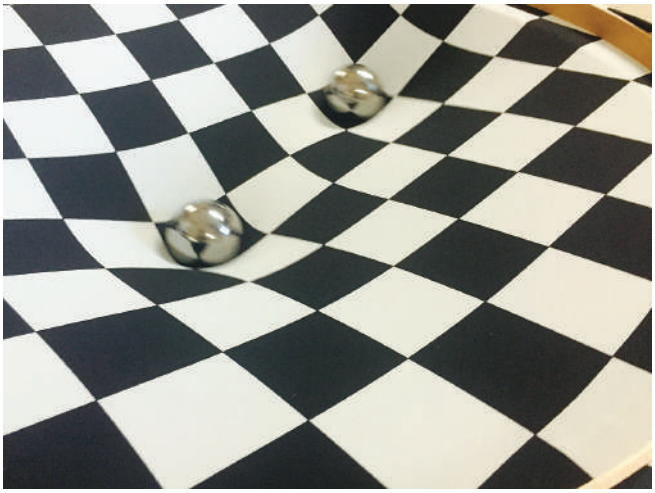


Figura 4: Fusão de buracos negros.

Que outros fenômenos você pode modelar?

Práticas de ciência e engenharia	Ideias disciplinares centrais	Conceitos transversais
Desenvolvendo e usando modelos A modelagem em 9-12 baseia-se em experiências do K-8 e progride para o uso, síntese e desenvolvimento de modelos para prever e mostrar relações entre variáveis e entre sistemas e seus componentes no(s) mundo(s) natural(ais) e projetado(s). • Desenvolva um modelo baseado em evidências para ilustrar as relações entre sistemas ou entre componentes de um sistema (HS-ESS21), (HS-ESS2-3), (HS-ESS2-6). • Use um modelo para fornecer relatos mecanicistas dos fenômenos (HS-ESS2-4).	**ESS1.A - O Universo e Suas Estrelas**	**Causa e efeito** Mecanismo e explicação. Eventos têm causas, às vezes simples, às vezes complexas. Uma das principais atividades científicas é pesquisar e explicar as relações causais e os mecanismos pelos quais elas são mediadas. Tais mecanismos podem ser testados em determinados contextos e usados para prever e explicar eventos em novos contextos.
	PS2.B - Tipos de Interações	**Sistemas e Modelagem de Sistemas** Definir o sistema em estudo - especificando seus limites e explicitando um modelo desse sistema - fornece ferramentas para entender e testar ideias que são aplicáveis em toda a ciência e engenharia.
	PS3.A - Definições de Energia	**Energia e matéria** Fluxos, ciclos e conservação. O rastreamento de fluxos de energia e matéria dentro e fora dos sistemas ajuda a entender as possibilidades e limitações dos sistemas.
	PS3.B - Conservação de Energia e Transferência de Energia	
	PS3.C - Relação entre Energia e Forças	
	PS4.A - Propriedades de Onda	

Apêndice A - Glossário

B **Buraco Negro:** Uma região do espaço-tempo com um campo gravitacional tão intenso que nenhuma matéria ou radiação pode escapar de dentro do horizonte de eventos.

C **Constante gravitacional:** G, a constante de proporcionalidade na lei da gravitação de Newton. G = $6{,}67 \times 10^{-11}$ N m^2 kg^{-2}.

E **Espaço-Tempo:** Um sistema de coordenadas 4-dimensional, com três dimensões de espaço e uma dimensão de tempo, que são usadas para localizar objetos e/ou eventos.

Espiral: Objetos em um sistema binário que estão perdendo energia devido à emissão de ondas gravitacionais. À medida que as ondas gravitacionais transportam energia para longe do sistema binário, a órbita decai e os objetos acabam se fundindo.

Estrela de Nêutrons: As menores e mais densas estrelas conhecidas. Em vez de serem feitas de átomos com núcleos e elétrons, essas estrelas são compostas quase inteiramente de nêutrons ou outras partículas subatômicas mais exóticas.

G **Gravidade:** Uma força atrativa entre quaisquer dois objetos que depende de sua massa e separação (no formalismo newtoniano).

I **Interferômetro:** Um dispositivo que funciona dividindo um feixe de luz em dois feixes separados que percorrem diferentes caminhos de luz ao longo de dois braços. Os espelhos no final dos braços refletem os feixes de volta ao divisor de feixe, onde interferem ao serem recombinados. O padrão de interferência, tipicamente um conjunto de listras brilhantes e escuras alternadas, chamadas de franjas, exibe diferenças sutis entre o comprimento dos dois braços.

L **Lei da Gravitação (Newtoniano):** Quaisquer dois corpos no Universo se atraem com uma força diretamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles $F = Gm_1m_2/r^2$.

LIGO: Um acrônimo para o Observatório de Ondas Gravitacionais com Interferômetro a Laser.

O **Ondas gravitacionais:** Ondulações na curvatura do espaço-tempo, que se propagam como ondas viajando para fora a partir de massas aceleradas.

P **Pulsares:** Uma estrela de nêutrons girando que emite um raio de radiação. Conforme o feixe atinge repetidamente um detector na Terra, nós o visualizamos como pulsos de radiação.

R **Radiação eletromagnética:** Um tipo de radiação de energia que inclui luz visível, luz infravermelha, luz ultravioleta, ondas de rádio, raios gama e raios-x. As ondas eletromagnéticas são produzidas sempre que as partículas carregadas são aceleradas.

Relatividade Especial: Uma descrição do espaço-tempo, no caso especial de referências, movendo-se a velocidades constantes entre si e com base em duas hipóteses: 1) as leis da física são idênticas em todos os referenciais inerciais; e 2) a velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os observadores.

S **Sistema binário:** Um sistema no qual dois objetos próximos orbitam em torno de seu centro de massa comum.

Strain (h): Medida de quanto uma onda gravitacional distorce o espaço-tempo e equivale à mudança na distância entre dois objetos dividida pela distância original $h = \Delta L / L$. As deformações de ondas gravitacionais são extremamente pequenas quando emitidas a partir de objetos cósmicos e detectadas na Terra. No momento, o LIGO pode detectar um desvio de 1 parte em 5×10^{22}. O pico de tensão de onda gravitacional detectado a partir do GW150914 é 1×10^{-21}, que corresponde à alteração do raio da órbita da Terra em torno do Sol pelo diâmetro de um único átomo.

T **Teoria Geral da Relatividade:** Uma descrição da gravidade como uma propriedade geométrica do espaço e do tempo (espaço-tempo) onde a curvatura do espaço-tempo está diretamente relacionada com a massa ou energia da matéria.

Apêndice B - Recursos

Colaboração Científca LIGO
http://ligo.org/
Novidades, objetivos científicos, multimídia e mais

Laboratório do LIGO no Caltech
https://ligo.caltech.edu/

Laboratório do LIGO no MIT
http://space.mit.edu/LIGO/

Visite o LIGO
http://www.ligo.org/students_teachers_public/visit.php
Os Observatórios LIGO em Hanford, WA e Livingston, LA convidam você a visitar as instalações. Cada site tem programas para alunos, professores e público.

Tour Virtual no LIGO – Livingston, LA
http://www.net3.hu/ligo/

Projeto de Simulação de Espaço-Tempo Extremo (SXS) - animações, vídeos e mais
http://www.black-holes.org

Site do LIGO do evento científico aberto GW150914 (arquivos de som)
https://losc.ligo.org/s/events/GW150914/audio/

Site de Arquivos de Mídia do Caltech para o comunicado de imprensa e briefing do GW150914
http://mediaassets.caltech.edu/gwave

Jogos e aplicativos para explorar buracos negros e ondas gravitacionais
https://www.laserlabs.org/
http://www.blackholehunter.org

Observação Direta de Ondas Gravitacionais de uma colisão de Buraco Negro Binário **- publicação da Physical Review Letters**
http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102

Material para professores
http://www.ligo.org/teachers.php

Atividades sobre ondas gravitacionais para sala de aula adicionais
www.einsteinsmessengers.org/activities.htm

Material para estudantes
http://www.ligo.org/students.php

Envie sua própria pergunta para o LIGO
https://ligo.caltech.edu/page/ask-ligo

Indicações de leitura e multimídia
https://ligo.caltech.edu/page/recommended-reading

Padrões de Ciência da Próxima Geração
http://www.nextgenscience.org

Siga-nos:

Twitter: @LIGO

e

Facebook:
https://www.facebook.com/LigoScientificCollaboration/

Apêndice C - Informações de compra

Atividade 1 - Buracos Negros Coalescentes

Fio de nylon/Linha de pesca
http://amzn.com/B000FT09CU

Bucha de latão
http://amzn.com/B005ZCR5EC

Bolas de tênis
http://amzn.com/B0000BYRT0

Ítens opcionais:

Tinta Preta
http://amzn.com/B000F8QVVO

Campainha de 12mm
http://amzn.com/B00B0Q4KKO

Baterias tipo moeda LR 44
http://amzn.com/B00IHICPV4

Módulo de som gravável
http://amzn.com/B006NFHLLW

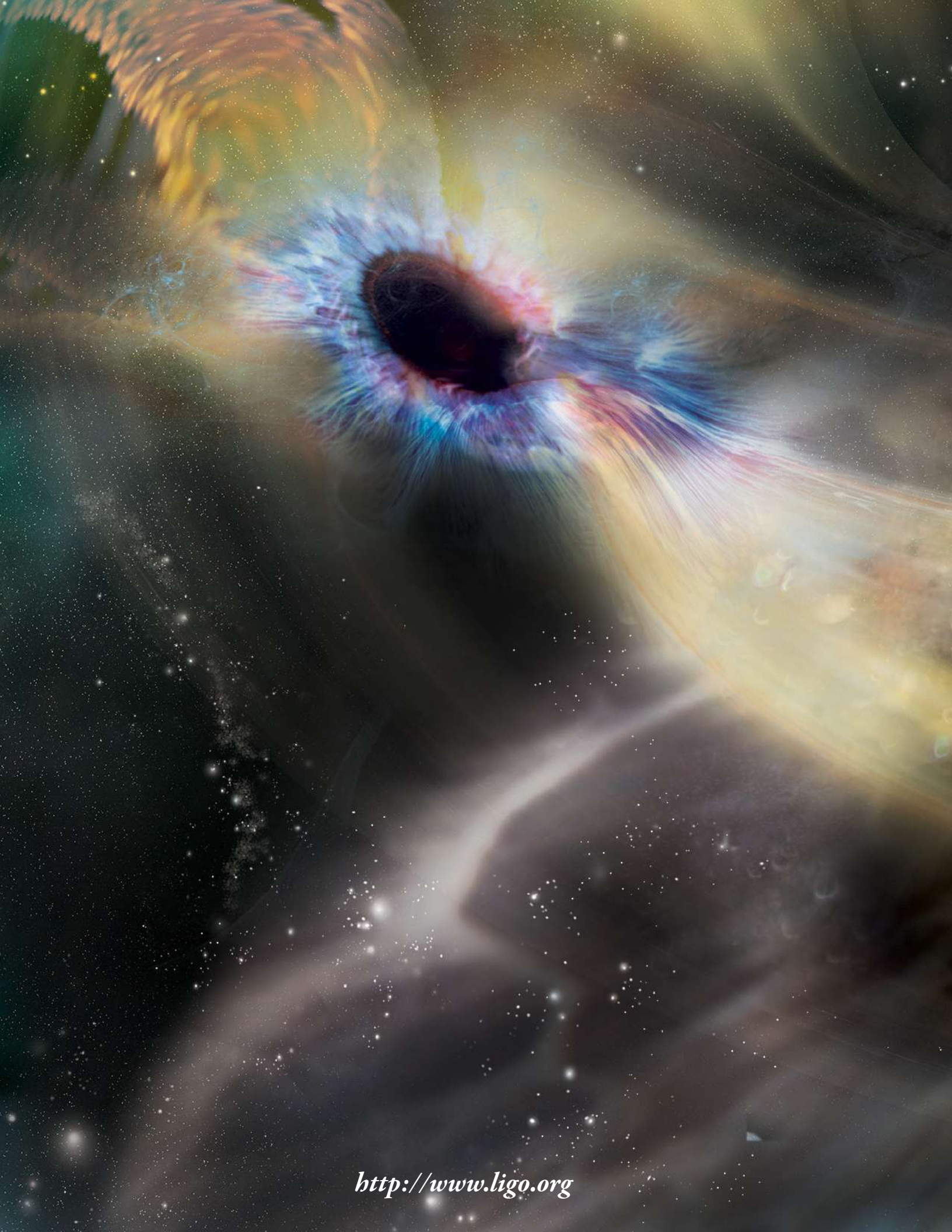
Atividade 2 - A Distorção do Espaço-Tempo

Bastidor para bordado de 60cm
http://amzn.com/B000B836GG

2 rolamentos esféricos cromados de 2 polegadas (5 cm) de diâmetro;
http://amzn.com/B007B2A3VQ

Tecido de spandex com estampa xadrez
http://amzn.com/B00O72ZEQ2 or http://spandexworld.com/c3/catalog/product/9806

Bolas "pula-pula"
http://amzn.com/B010LD0QTA


http://www.ligo.org