



Solução para o desenvolvimento e utilização de protótipo de gerador de sinal gravitacional para medição da velocidade da gravidade

Fernandes CL*, Frajuca C*

** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo.*

Resumo. Esse trabalho visa desenvolver solução para o controle, suspensão e impulsão de um dispositivo que irá gerar um sinal gravitacional periódico para ser utilizado para a medição da velocidade da interação gravitacional (gravidade). Este sinal gerado será analisado na continuidade deste trabalho por uma barra de safira resfriada a 4 K e monitorada por microondas de ultrabaixo ruído. O dispositivo é basicamente uma massa de Silício com uma haste revestida de alumínio que medirá a vibração emitida por uma barra de Safira. Uma das faces da haste terá sua resistência elétrica monitorada, e fase deste sinal será comparada com a fase da barra de Safira. Com o resultado positivo do experimento, apresentar para a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) um projeto temático para a construção de um dispositivo de proporções nanométricas. A velocidade da gravidade é um dos grandes mistérios da natureza e um dos mais difíceis de serem descobertos, pois ao se tentar obter esse valor através de observação de objetos astrofísicos é quase impossível isolar a velocidade da gravitação e o transporte da informação. Outro modo seria através da detecção de ondas gravitacionais, porém, esta se mostra muito difícil, pois até hoje apenas uma onde foi detectada, porém além da detecção de tal onda uma contrapartida luminosa deve ser achada ao mesmo tempo com instrumentos diferentes, o que torna este caminho quase impossível. O melhor é emitir um sinal e detectá-lo, o que se pretende na continuação deste projeto. As ondas gravitacionais são ondulações na curvatura do espaço-tempo que se propagam como ondas, viajando para o exterior a partir da fonte. Previstas em 1916 por Albert Einstein com base em sua teoria da relatividade geral (TRG), as ondas gravitacionais transportam energia na forma de radiação gravitacional.

Palavras-chave. *Velocidade da gravidade; Vibrações, Controle e suspensão magnética, nanotecnologia, nano mecânica.*

Introdução. Em 11 de fevereiro 2016 vai ficar na história da ciência mundial! Este foi o dia em que um grupo de mais de 1000 cientistas anunciou que tinha detectado, pela primeira vez, as

ondas gravitacionais previstas por Einstein cem anos antes. Ondas Gravitacionais previstas por Einstein 100 anos atrás, baseadas na sua teoria da relatividade, conforme fig. 1.

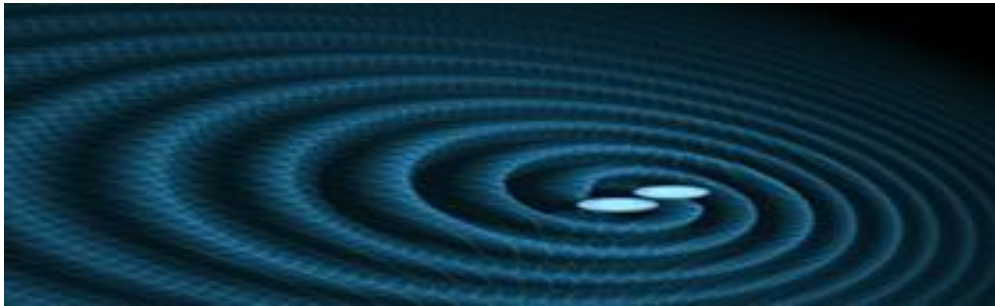


Figura 1. Ondas gravitacionais detectadas conforme a previsão de Einstein.

As fontes potenciais de ondas gravitacionais detectáveis incluem sistemas estelares binários compostos por anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros.

De acordo com a Teoria da Relatividade Geral, um buraco negro é uma região do espaço da qual nada, nem mesmo partículas que se movem na velocidade da luz, podem escapar. Este é o resultado da deformação do espaço-tempo, causada após o colapso gravitacional de uma estrela, com uma matéria astronomicamente maciça e, ao mesmo tempo, infinitamente compacta e que, logo depois, desaparecerá dando lugar ao que a Física chama de singularidade, o coração de um buraco negro, onde o tempo para e o espaço deixa de existir. Um buraco negro começa a partir de uma superfície denominada horizonte de eventos, que marca a região a partir da qual não se pode mais voltar (1).

O adjetivo negro em buraco negro se deve ao fato de este não refletir a nenhuma parte da luz que venha atingir seu horizonte de eventos, atuando assim como se fosse um corpo negro perfeito em termodinâmica (2).

Acredita-se, também, com base na mecânica quântica, que buracos negros emitam radiação térmica, da mesma forma que os corpos negros da termodinâmica a temperaturas finitas. Esta temperatura, entretanto, é inversamente proporcional à massa do buraco negro, de modo que observar a radiação térmica proveniente destes objetos torna-se difícil quando estes possuem massas comparáveis às das estrelas (3).

Entretanto, somente 6% dos objetos nas vizinhanças do Sol são anãs brancas, fig.2. Estrelas com até 10 MSol não são massivas o suficiente para que a temperatura em seu núcleo seja suficientemente alta para que possam fundir carbono em reações de nucleossíntese. Após terem se tornado gigantes vermelhas durante a fase de queima nuclear de Hélio/Hidrogênio, elas ejetarão sua camada externa, formando uma nebulosa planetária e deixando para trás um núcleo composto praticamente de carbono e oxigênio. Embora este núcleo seja mil vezes mais luminoso que o Sol e com uma temperatura efetiva que pode chegar a 150 000 K, ele não tem uma fonte de

energia adicional e irá gradualmente irradiar sua energia e esfriar. O núcleo, sem o suporte contra o colapso gravitacional oferecido pelas reações de fusão termonucleares, torna-se extremamente denso, com uma massa típica de 0,6 MSol contida em um volume comparável ao da Terra.



Figura 2. Nebulosa planetária NGC 3132. No centro, pode-se ver uma anã branca.

Vários observatórios/ detectores de ondas gravitacionais estão em construção ou em operação ao redor do mundo, conforme fig. 3.



Figura 3. Principais detectores e sua localização geográfica

Fundamentação teórica.

Velocidade da gravidade. Em teorias clássicas da gravitação, as mudanças em um campo gravitacional propagam. Uma alteração da distribuição de energia e do momento da matéria resulta em alteração subsequente, a uma distância, do campo gravitacional, que ela produz. Num sentido mais fisicamente correto, a "velocidade da gravidade " refere-se à velocidade de uma

onda gravitacional, que seria pela teoria da relatividade geral, a mesma velocidade que a velocidade da luz (c).

A velocidade das ondas gravitacionais na teoria da relatividade geral é igual à velocidade da luz no vácuo, (c) (4). Dentro da teoria da relatividade especial, a constante (c) não é exclusivamente sobre a luz; ao contrário, é a maior velocidade possível para qualquer interação na natureza. Formalmente, (c) é um fator de conversão para alterar a unidade de tempo para a unidade de espaço (5). Isso a torna a única velocidade que não depende tanto no movimento de um observador ou uma fonte de luz e / ou gravidade.

Assim, a velocidade da "luz" é também a velocidade das ondas gravitacionais e qualquer outra partícula sem massa. Tais partículas incluem o glúon (portadora da força forte), os fótons que formam a luz, e os grávitons teóricos que compõem as partículas de campo associados da gravidade (no entanto, uma teoria do gráviton requer uma teoria quântica da gravidade).

Campos estáticos. A velocidade das mudanças físicas em um campo gravitacional ou eletromagnética não deve ser confundida com "mudanças" no comportamento dos campos estáticos que são devidos a efeitos puros dos observadores. Estas mudanças em direção de um campo estático, devido a considerações relativistas, são as mesmas para um observador, quando uma carga distante está em movimento, como quando um observador (preferencialmente) decide se mover com respeito a uma carga distante.

Assim, o movimento constante de um observador em relação a uma carga estática e o seu campo estático estendido (um campo gravitacional ou elétrico) não altera o campo. Para campos estáticos, tais como o campo eletrostático ligado com carga elétrica, ou o campo gravitacional ligado a um objeto com massa, o campo se estende até ao infinito, e não se propaga. Movimento de um observador não causa alteração da direção de uma área, e por considerações de simetria, alterar o referencial do observador, para que a carga pareça se mover a uma velocidade constante, também não provoca a direção do seu campo se alterar, mas exige que este continue com "ponto" na direção da carga, em todas as distâncias da carga.

A consequência disto é que os campos estáticos (elétricos ou gravitacionais) sempre apontam diretamente para a posição real dos corpos a que estão ligados, sem qualquer atraso que é devido a viagem do "sinal" (ou propagação) da carga, ao longo de uma distância do observador. Esta continua a ser verdade se os corpos carregados e seus observadores são feitos para "mover" (ou não), simplesmente mudando referenciais. Este fato, por vezes, causa confusão sobre a "velocidade" de tais campos estáticos, que às vezes parecem mudar infinitamente rapidamente quando as mudanças no campo são meros artefatos do movimento do observador ou da observação.

Em tais casos, nada realmente muda infinitamente rapidamente, salvo o ponto de vista de um observador do campo. Por exemplo, quando um observador começa a mover-se com respeito a um campo estático já que se estende ao longo de anos-luz, parece que "imediatamente" a todo o campo, juntamente com a sua fonte, começou a mover-se com a velocidade do observador. Isto, é claro, inclui as partes estendidas do campo. No entanto, essa "mudança" no comportamento

aparente da fonte de campo, juntamente com o seu campo distante, não representa qualquer tipo de propagação que seja mais rápido do que a luz.

Gravitação Newtoniana. A velocidade das mudanças físicas na formulação da lei de força gravitacional de Isaac Newton requer que cada partícula com massa responda instantaneamente a qualquer outra partícula com massa, independentemente da distância entre elas. Em termos modernos, a gravitação newtoniana é descrita pela equação de Poisson, segundo a qual, quando a distribuição da massa de um sistema de muda, o seu campo gravitacional ajusta instantaneamente. Portanto, a teoria supõe a velocidade da gravidade ser infinita. Esta hipótese foi adequada para explicar todos os fenômenos com a precisão de observação da época. Até o século 19 só uma anomalia em observações astronômicas que não poderia ser conciliada com o modelo gravitacional newtoniano de ação instantânea: o astrônomo francês Urbain Le Verrier determinou em 1859 que a órbita elíptica do planeta Mercúrio precisava a uma taxa significativamente diferente do previsto pela teoria newtoniana (6).

Laplace. A primeira tentativa de combinar uma velocidade gravitacional finita com a teoria de Newton foi feita por Laplace em 1805. Com base na lei da força de Newton ele considerou um modelo em que o campo gravitacional é definido como um campo de radiação ou um fluido. Alterações no movimento do corpo de captação são transmitidos por algum tipo de ondas (7). Por conseguinte, os movimentos dos corpos celestes devem ser modificados na ordem V / C , em que v é a velocidade relativa entre os corpos e c é a velocidade da gravidade. O efeito de uma velocidade finita da gravidade vai para zero à medida que c vai até ao infinito, mas não como $1 / C^2$ como faz em teorias modernas. Isto levou Laplace para concluir que a velocidade de interações gravitacionais é pelo menos 7×10^6 vezes a velocidade da luz . Esta velocidade foi usada por muitos no século 19 para criticar qualquer modelo baseado em uma velocidade finita da gravidade, como explicações elétricas ou mecânicas da gravitação.

Lorentz. Em 1900 Hendrik Lorentz tentou explicar a gravidade sobre a base de sua teoria éter e as equações de Maxwell. Depois de propor (e rejeitar) um modelo tipo Le Sage, ele assumiu como Ottaviano Fabrizio Mossotti e Johann Karl Friedrich Zöllner que a atração de partículas carregadas opostos é mais forte que a repulsão de partículas carregadas iguais. A força líquida resultante é exatamente o que é conhecido como a gravidade universal, em que a velocidade da gravidade é a da luz. Isto leva a um conflito com a lei da gravidade de Isaac Newton, em que foi demonstrado por Pierre Simon Laplace que uma velocidade finita de gravidade leva a algum tipo de aberração e, portanto, faz com que as órbitas sejam instáveis. No entanto, Lorentz mostrou que a teoria não é abrangida pela crítica de Laplace, porque, devido à estrutura das equações de Maxwell apenas efeitos na ordem V^2 / C^2 surgem. Mas Lorentz calculou que o valor para o avanço do periélio de Mercúrio era muito baixo. Ele escreveu: “As formas especiais desses termos podem, talvez, serem modificados. No entanto, o que foi dito é suficiente para mostrar

que a gravitação pode ser atribuída às ações que são propagadas com qualquer maior velocidade maior do que a da luz” (8).

Em 1908, Henri Poincaré examinou a teoria gravitacional de Lorentz e classificou-o como compatível com o princípio da relatividade, mas (como Lorentz) criticou a indicação imprecisa do avanço do periélio de Mercúrio. (9).

Einstein. A relatividade geral prevê que a radiação gravitacional deveria existir e propagar como uma onda à velocidade da luz: um campo gravitacional evoluindo lenta e fracamente iria produzir, de acordo com a relatividade geral, efeitos como os da gravitação newtoniana.

De repente, deslocando uma das duas partículas massivas interagindo iria, após um atraso correspondente à velocidade da luz, fazer com que a outra sentisse a partícula deslocada: acelerações devido à alteração no momento quadrupolo de sistemas de massas.

A velocidade finita da interação gravitacional na relatividade geral não conduz aos tipos de problemas como a aberração da gravidade que Newton estava originalmente preocupado, porque não existe tal aberração em efeitos de campo estático. Uma vez que a aceleração da Terra relativamente ao Sol é pequena (ou seja, em uma boa aproximação, os dois corpos pode ser) considerados como viajando em linhas retas umas sobre as outras com uma velocidade constante os resultados orbitais calculados pela relatividade geral são as mesmas daqueles da gravidade newtoniana com ação instantânea na mesma distância, porque eles são modelados pelo comportamento de um campo estático com velocidade constante de movimento relativo, e sem aberração para as forças envolvidas (10).

Esse trabalho visa desenvolver solução para o controle, de um dispositivo que irá gerar um sinal gravitacional periódico para ser utilizado para a medição da velocidade da interação gravitacional (gravidade), conforme fig.4.

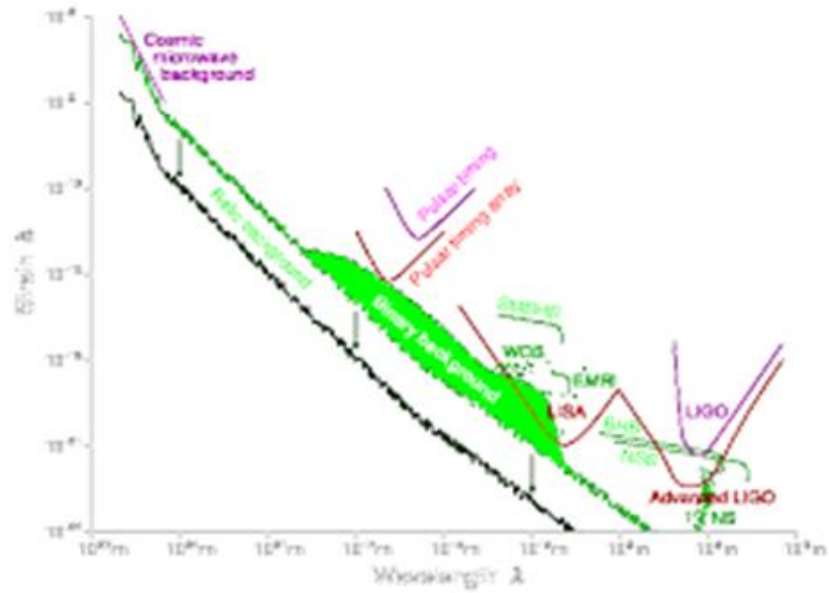


Figura 4. Frequências captadas pelos detectores gravitacionais (8)

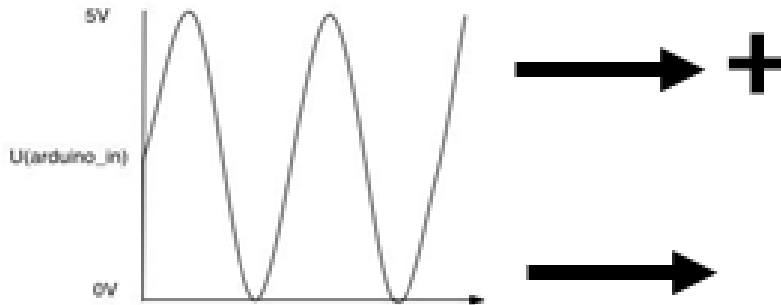


Figura 5. Onda Gravitacional Contínua -Escolhida como parâmetro do estudo do Projeto

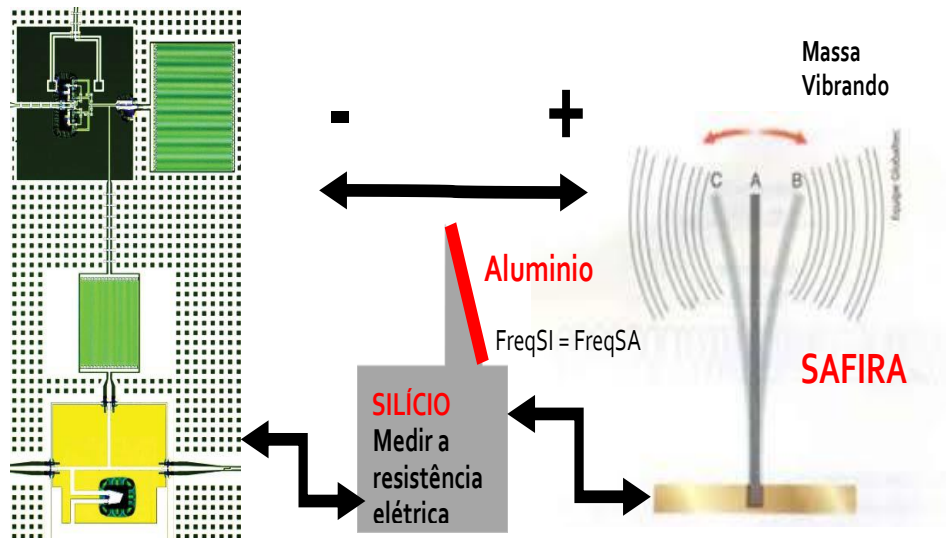


Figura 6. O Projeto que será desenvolvido para medição do sinal Gravitacional

- O dispositivo é basicamente uma massa de Silício com uma haste revestida de alumínio que medirá a vibração emitida por uma barra de Safira.
- Uma das faces da haste terá sua resistência elétrica monitorada
- A fase deste sinal será comparada com a fase da barra de Safira.

Objetivo Experimental – nanotecnologia modelo gerador de sinal gravitacional para medição da velocidade da gravidade: Estado de base quântica e controle de um único PHONON de um ressonador mecânico. PHONON (definição): um fônon ou fonão, na física da matéria condensada, é uma quase-partícula que designa um quantum de vibração em um retículo cristalino rígido. O nome fônon deriva do grego phone , que significa som, voz.

O estudo dos fônons é importante na física por facilitar a compreensão de muitas propriedades como o calor específico, a condução térmica, a condutividade elétrica e a propagação do som.

Em uma descrição quântica os fônons equivalem a um tipo especial de movimento vibratório, conhecido como modos normais de vibração em mecânica clássica, em que cada parte de uma rede oscila com a mesma frequência. Estes modos normais são importantes, devido a um resultado bem conhecido em mecânica clássica, qualquer vibração arbitrária de movimento de uma rede pode considerar-se como uma superposição de modos normais com diversas frequências; neste sentido, os modos normais são as vibrações elementares de uma rede.

Controle de Ressonador com base em mecânica quântica através de PHONON. O ressonador é uma fina película de nitrato de alumínio intercalado entre dois eletrodos de

alumínio, sendo que a parte ativa da estrutura é suspensa mecanicamente. O ressonador responde a tensões ao expandir ou contrair na direção perpendicular aos eletrodos metálicos, com uma frequência de ressonância fundamental:

$$fr = 5v / 2t$$

Onde (v) é a média da velocidade do som e (t) é a espessura do ressonador.

Fontes de ondas gravitacionais. As Ondas Gravitacionais são classificadas em quatro tipos, definidos pela quantidade de q, o que corresponde ao número de ciclos coerentes apresentados pelo sinal, sendo assim, é possível determinar a largura da banda para uma frequência característica:

$$f_c \rightarrow \text{Frequência Característica}$$

$$\Delta f = \frac{f_c}{q}$$

Onde:

Δf - Largura de banda.

f_c - Frequência característica e emissão da fonte.

q - Número de ciclos coerentes apresentados pelo sinal.

A – Fontes Impulsivas (Bursts)

Fontes de ondas que mantêm a coerência durante um tempo correspondente a poucos ciclos da própria onda (q pequeno). **Exemplo:** Supernovas (SN's), colapsos de estrelas ou aglomerados de estrelas para formar um buraco negro (BN), coalescência de binárias compactas - estrelas de nêutrons (EN's) e BN supermassivos, e instabilidades em EN's em rotação.

B - Fontes Periódicas

Fontes de sinais emitidos continuamente que mantêm a coerência durante um tempo longo (q grande). **Exemplo:** EN's e estrelas binárias.

C - Fontes Estocásticas

Fontes correspondentes ao somatório de uma distribuição aleatória e, portanto, não coerentes (q→0). **Exemplo:** Superposições de estrelas binárias, estrelas de população III, OG's primordiais, transições de fase e possíveis cordas cósmicas.

D - Fontes Espiralantes ("Chirp")

Fontes emissoras de OG's na fase final de espiralação de um sistema binário (q variável).

Fontes de og e métodos de detecção. Com base na classificação citada, é possível associar a frequência da OG com o tipo da fonte emissora e com isso, o melhor método para sua detecção, conforme exposto na tabela 1.

Tabela 1. Fonte das Ondas Gravitacionais e Método de Detecção.(12)

Frequência	Fonte	Método de detecção
10^{-16} Hz	Primordial	Anisotropia da radiação cósmica de fundo em micro-ondas
10^{-9} Hz	Primordial Cordas Cóslicas	Tempo de pulsar de ms
10^{-4} - 10^{-1} Hz	Estrelas binárias super massivas BN ($10^3 - 10^7$ Ms)	Interferometria laser no espaço.
10 - 10^3 Hz	Espiral de EN e BN binários ($1 - 10^3$ Ms)	Interferometria laser na Terra
10^3 Hz	Coalescência de EN e BN binários - Supernovas	Detectores de massa ressonante

Como exemplo da geração de radiação gravitacional, pode-se supor um sistema binário composto por duas massas pontuais, M1 e M2, em órbita circular com raio (a), uma em torno da outra, sendo (a1) e (a2) as distâncias respectivas entre as massas e o centro de massa (0) do sistema, como mostra a Figura 7.

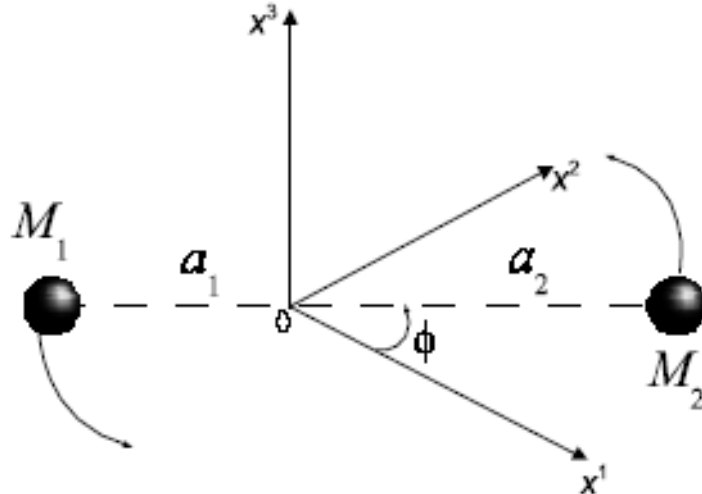


Figura 7. Representação de um sistema binário emissor de ondas gravitacionais (13)

Processo de parametrização das ondas propagadas (+ -). Sensores Ultrassônicos – para parametrizar o tamanho das ondas emitidas (+ -), sensor de grande utilidade em automação, sensoriamento de obstáculos para robô, de objetos em linhas de montagem é o sensor ultrassônico. Sem precisar de contato físico com o objeto ou ainda de propriedades especiais desse objeto, ele não só detecta sua presença como ainda tem recursos para determinar a distância em que ele se encontra. Sensores Ultrassônicos – para parametrizar o tamanho das ondas emitidas (+ -).

Conclusão. Para se medir diretamente a velocidade da gravidade é proposto um emissor de sinal gravitacional e um detector para receber este sinal. A velocidade será obtida pela diferença de fase entre os dois dispositivos ponderada pela distância. O princípio de funcionamento deste tipo de sensor tem algo a ver com a biônica, pois se baseia no sonar dos morcegos. As ondas se propagam a uma velocidade de 331,5 metros por segundo no ar em condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Com a elevação da temperatura, essa velocidade aumenta da ordem de 0,61 metros por segundo para cada grau centígrado. Atingindo nossos ouvidos, dando-nos a sensação sonora se estiverem, entretanto, numa faixa bem definida de frequências. De fato, partindo do zero, só podemos começar a ouvir alguma coisa quando o número de vibrações ultrapassar 16 por segundo ou 16Hz. À medida que as vibrações vão se tornando mais rápidas, vamos tendo a sensação de sons cada vez mais agudos até que em torno de 18.000Hz, deixamos de ter qualquer sensação auditiva. É justamente acima dessas 18 000 vibrações por segundo ou 18 kHz, que estão os ultrassons Ondas Sonoras, quando um objeto vibra como, por exemplo, uma lâmina de metal presa a uma morsa, esse objeto produz ondas de compressão e descompressão do ar. Os sons e ultrassons, como qualquer tipo de vibração possuem uma



intensidade, frequência e comprimento de onda. O comprimento de onda, que nos interessa em especial, é a distância entre dois pontos de compressão máxima ou mínima de uma onda. Se a frequência do som aumenta, a distância entre esses pontos diminui, ou seja, temos comprimentos de onda menores. Esse comprimento é importante, pois determina as dimensões dos objetos em que ele pode refletir. Assim, se desejamos que um sensor seja capaz de detectar pequenos objetos por reflexão, o som emitido deve ter pequeno comprimento de onda, ou seja, deve ter uma frequência muito alta, na faixa dos ultrassons. Um sinal de 33 kHz, por exemplo, tem um comprimento de onda de 1 cm. Essa será, portanto, a ordem de grandeza do menor objeto que um sensor que use um sinal desta frequência pode detectar. A medição da velocidade da gravidade será um feito científico considerável, já que nenhum grupo no mundo está trabalhando neste sentido, e será um dos primeiros resultados em gravitação experimental no Brasil, já que o grupo gráviton não está produzindo resultados com pesquisas no país. Ao longo do caminho as soluções tecnológicas encontradas (a estrutura do emissor de ondas e o receptor manométrico) serão passíveis de patenteamento.

Referências.

- (1) Steven Weinberg (1972). *Gravitation and Cosmology. Principles and applications of the General Theory of Relativity*. New York: Wiley. ISBN 0471925675
- (2) Davies, P. C. W. (1978). «Thermodynamics of Black Holes» (PDF). *Rep. Prog. Phys.* 41: 1313–1355. doi:10.1088/0034-4885/41/8/004
- (3) Astrônomos flagram buraco negro devorando estrela, acessado em 4 de maio de 2012
- (4) Hartle, JB (2003). *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. Addison-Wesley. p. 332. ISBN 981-02-2749-3.
- (5) Laplace, P.S.: (1805) "A Treatise in Celestial Mechanics", Volume IV, Book X, Chapter VII, translated by N. Bowditch (Chelsea, New York, 1966)
- (6) Carlip, S. (2000). "Aberration and the Speed of Gravity". *Phys. Lett. A* 267 (2–3): 81–87. arXiv:gr-qc/9909087. Bibcode:2000PhLA..267...81C. doi:10.1016/S0375-9601(00)00101-8.
- (7) Abbott, Benjamin P.; et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger". *Phys. Rev. Lett.* 116 (6): 061102. arXiv:1602.03837. Doi: 10.1103/PhysRevLett.116.061102.



- (8) Castelvechi, Davide; Witze, Alexandra (11 February 2016). "Einstein's gravitational waves found at last". Nature News. doi:10.1038/nature.2016.19361. Retrieved 11 February 2016.
- (9) The Editorial Board (16 February 2016). "The Chirp Heard Across the Universe". New York Times. Retrieved 16 February 2016.
- (10) Abbott, Benjamin P.; et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) (11 February 2016). "Tests of general relativity with GW150914". LIGO. Retrieved 12 February 2016.
- (11) Paulo Fernandes Junior - Desenvolvimento de Dispositivo para Calibração do Detector Schenberg.

Abstract. This work aims to develop a solution for the control, suspension and impulsion of a device that will generate a periodic gravitational signal to be used to measure the speed of gravitational interaction (gravity). This generated signal will be analyzed in the continuity of this work by a sapphire bar cooled to 4 K, and monitored by microwaves of ultra-low noise. The device is basically a silicon mass with an aluminum coated rod that will measure the vibration emitted by a Sapphire bar. One of the faces of the rod will have its electrical resistance monitored, and phase of this signal will be compared to the phase of the Sapphire bar. With the positive result of the experiment, it will be presented to FAPESP (Foundation for Research Support of the State of São Paulo). It is a thematic project for the construction of a device of nanometric proportions. The speed of gravity is one of the great mysteries of nature and one of the most difficult to be discovered, because trying to obtain this value through observation of astrophysical objects is almost impossible to isolate the speed of gravitation and the transport of information. Another way would be through the detection of gravitational waves, however, this is very difficult, because until today only one where it has been detected, but besides the detection of such a wave a light counterpart must be found at the same time with different instruments, which makes This path almost impossible. It is best to issue a signal and detect it, which is intended in the continuation of this project. Gravitational waves are ripples in the curvature of spacetime that propagate like waves, traveling outward from the source. Predicted in 1916 by Albert Einstein based on his theory of general relativity (TGR), gravitational waves carry energy in the form of gravitational radiation

Key words: *Speed of gravity; Vibrations, Control and magnetic suspension, nanotechnology, nano mechanics.*