

Pesquisa em ondas gravitacionais

Odylio D. Aguiar (INPE/MCTI)

O embrião da ideia de ondas gravitacionais começou com as primeiras discussões sobre a velocidade de propagação da gravidade, ocorridas logo após a formulação da lei da gravidade de Newton, e ganhou sua formulação final no trabalho de Einstein, quando este deduziu matematicamente a existência das ondas gravitacionais. As barras pioneiras de Weber e os detectores construídos até meados dos anos 80 formam, a seguir, o panorama mundial que motivou a entrada do Brasil nessa pesquisa. São descritas depois as primeiras iniciativas brasileiras que começaram nessa década e culminaram com a formação do Grupo Gráviton e a proposta, construção e operação do detector brasileiro de ondas gravitacionais Mário Schenberg. Por fim é descrito o engajamento brasileiro nos projetos mundiais de interferometria, com destaque para o projeto LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) e projetos de interferômetros espaciais.

De Newton a Einstein (Aguiar, 2011)

Logo depois da publicação de *Principia Mathematica* de Newton em 1687, em que ele apresentava a sua lei da gravidade, se iniciou um debate que durou cerca de dois séculos entre estudiosos e cientistas a respeito de qual deveria ser a velocidade de propagação do efeito gravitacional. Foi só depois de 1887, com a confirmação experimental por Hertz da existência das ondas eletromagnéticas, que as suspeitas de que a velocidade de propagação da gravidade era a mesma que a da luz começaram a ser consideradas seriamente. Heaviside (1893: 144, 459, 460 e 466), Lorentz (1900) e Poincaré (1905) são exemplos de cientistas que publicaram como possível/provável essa hipótese. Foi com a teoria da relatividade de Einstein que essa questão da velocidade do efeito gravitacional foi resolvida. Através de uma dedução matemática, a teoria prevê a existência de **ondas gravitacionais** que se propagam com a velocidade da luz no vácuo. O próprio Einstein fez estas deduções em trabalhos publicados em 1916 e 1918.

A relatividade geral foi um grande avanço teórico, pois a gravitação de Newton é uma teoria incompleta, na medida em que ela só fornece a intensidade e a direção da força da gravidade, mas não diz nada, por exemplo, sobre a velocidade com que o efeito gravitacional se propaga. A propósito disto, não é rigorosamente correto se dizer que a teoria da gravitação de Newton afirmava que a velocidade de propagação da gravidade era infinita, ou seja, que o efeito gravitacional se propagava instantaneamente. Isto seria o mesmo que dizer que a lei de Coulomb sobre cargas elétricas afirmava também que o efeito elétrico se propagava instantaneamente. Sabemos que a lei de Coulomb é apenas uma das quatro equações de Maxwell, que definem de forma mais completa os fenômenos eletromagnéticos. Só com o conhecimento de todas as equações de Maxwell é que podemos deduzir a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas e, portanto, da velocidade de propagação dos efeitos elétricos e/ou magnéticos.

Da mesma forma que no eletromagnetismo existe a dualidade eletricidade-magnetismo, no âmbito da gravitação existe a dualidade gravidade-gravitomagnetismo. O problema é que não temos oportunidade de experimentar o gravitomagnetismo no nosso dia a dia. Somente se vivêssemos em um planeta onde os rios tivessem densidades milhões de vezes maiores que a da água e corresse a velocidades próximas à da luz é que sentiríamos os efeitos do gravitomagnetismo. Foi a falta de leis equivalentes às de Ampère, Faraday e Gauss para o gravitomagnetismo, por causa da impossibilidade de se sentir este efeito, que impediu que um outro Maxwell pudesse unificar os efeitos da gravidade com os do gravitomagnetismo. Foi necessário um gênio como Einstein para montar toda a teoria por um outro caminho completamente

diferente: o da relatividade geral. A partir dela podemos entender o que são as **ondas gravitacionais** e quais as suas características principais.

De forma resumida, **ondas gravitacionais** são variações no espaço e no tempo (distorções ou curvaturas no contínuo espaço-tempo) causadas por movimentos de massa e energia nessa região, e que se propagam segundo a teoria da relatividade geral de Einstein, com a velocidade da luz. Apesar de não ter ocorrido ainda uma observação direta confirmada dessas ondas, existem observações indiretas da existência delas, mas irrefutáveis, que deram inclusive o prêmio Nobel de Física para Joseph H. Taylor e Russell Hulse em 1993 (ver o Capítulo “Cosmologia teórica” neste Volume).

Imagine vários relógios em uma cozinha (na parede, em cima da mesa, no seu pulso, no fogão, no aparelho de micro-ondas etc.), todos marcando exatamente a mesma hora. Aí chega uma onda gravitacional e bagunça tudo; os relógios passam a não marcar a mesma hora. Na verdade as diferenças entre os relógios são muito sutis para serem percebidas, mas existem. O tempo não corre mais igual para todos, mas fica oscilando, ora corre mais rápido, ora mais devagar; e estas coisas acontecem em momentos diferentes para cada relógio, dependendo da fase, comprimento e direção da onda. Ninguém vai notar, pois as diferenças serão de bilionésimos de bilionésimos de segundo. Precisaríamos de relógios e dispositivos muito precisos para perceber a diferença.

Simultaneamente ao efeito do diferente transcurso do tempo nos diversos relógios, a passagem da onda gravitacional pela cozinha também causaria mudança nas distâncias entre os relógios. Ora alguns se afastam e outros se aproximam, ora aqueles que se afastaram se aproximam e os que se aproximaram agora se afastam, tudo também depende da fase, comprimento e direção da onda. Se a cozinha tivesse azulejos quadriculados, eles pareceriam estar se esticando em algumas direções e se comprimindo em outras. Porém, normalmente, nada disso é percebido aos olhos humanos, pois aqui também as variações de distância são muito sutis. Basta dizer que ainda não se conseguiu detectá-las, apesar de vários aparelhos muito sensíveis existirem no mundo, construídos especificamente para este propósito. Vamos falar deles mais adiante; por ora vamos surfar um pouco nessas ondas.

As **ondas gravitacionais** têm muita semelhança com as ondas eletromagnéticas macroscópicas. As ondas eletromagnéticas são produzidas quando cargas elétricas são aceleradas, por exemplo, nas antenas de estações de rádio, televisão ou telefonia celular. De forma semelhante, as **ondas gravitacionais** são produzidas quando massas são aceleradas; só que há uma grande diferença: o efeito causado pelas **ondas gravitacionais** na matéria é absurdamente mais sutil que o causado pelas ondas eletromagnéticas.

Uma **onda gravitacional** é caracterizada completamente por apenas quatro grandezas:

- seu comprimento de onda,
- sua amplitude,
- sua polarização,
- sua direção de propagação.

O seu comprimento de onda é o tamanho de um ciclo completo da onda na direção de propagação. Como ela viaja com a velocidade da luz, a distância percorrida pela onda em um segundo, dividida pelo comprimento de onda seria igual ao número de ciclos por segundo da onda, ou seja, a sua frequência.

Já a sua amplitude é o seu tamanho no sentido transversal à direção de propagação da onda. Enquanto os comprimentos de onda são gigantescos, normalmente muito maiores que um quilômetro, as amplitudes das ondas são diminutas, muito menores que o diâmetro de um próton.

Finalmente, as ondas também têm direção e polarização. Através da sua direção de propagação sabemos de onde ela vem (é só considerar a direção oposta), podendo deduzir de onde elas se originaram no céu, ou seja, sua fonte astrofísica ou cosmológica. E a polarização é uma espécie de formato que ela tem no espaço, que nos diz muito sobre o movimento das massas na fonte que a produziu.

Outro aspecto importante a ser frisado é que todas as variações de distâncias ou tempo causadas pela passagem de uma **onda gravitacional** são relativas, não podemos, por exemplo, medi-las com acelerômetros locais presos aos relógios descritos no início desta seção. Somente as acelerações relativas entre os relógios podem ser medidas. Isto é uma consequência do “princípio da equivalência” descoberto por Einstein. Trocando em palavras mais fáceis de entender, seria a razão do porque não podemos medir a aceleração de um corpo caindo na Terra por meio de um acelerômetro preso a este corpo. O acelerômetro não iria detectar nenhuma aceleração, pois o corpo está em queda livre. Porém, se usássemos um outro tipo de acelerômetro, um que medisse a aceleração relativa do corpo em queda à superfície da Terra, por exemplo, aí sim conseguiríamos medir esta aceleração, que seria relativa.

Após os trabalhos de Einstein de 1916 e 1918 sobre as **ondas gravitacionais**, houve um período de quatro décadas no qual ocorreu um debate intenso. A questão que se debatia era se essas ondas realmente existiam fisicamente ou se elas eram apenas um ente matemático da relatividade geral. Foi no fim da década de 50 e início da década de 60 que ficou claro para os teóricos que essas ondas transportavam energia e, portanto, deviam ter realidade física.

Nessas quatro décadas também ocorreram avanços tecnológicos que permitiram a proposta dos primeiros detectores de **ondas gravitacionais** na virada da década de 50 para a de 60. Joseph Weber (Figura 1), um teórico competente e experimentalista brilhante, fez duas dessas propostas e foi o primeiro a implementar uma delas: a das **barras ressonantes**. Ele também foi um dos que independentemente propôs o detector utilizando interferometria laser (ver **Interferômetros laser**).



Figura 1. Joseph Weber junto a uma das suas antenas (**barra**) de **ondas gravitacionais** (Cortesia do grupo da antena *Allegro* da Universidade Estadual da Louisiana, LSU)

Barras de Weber (Aguiar, 2011)

Weber propôs detectar **ondas gravitacionais** utilizando uma **barra** cilíndrica horizontal de alumínio maciço, equilibrada no meio por um cabo em torno da sua “cintura”, e colocada em um ambiente de vácuo para que pudesse oscilar livremente no seu modo de oscilação longitudinal, no qual ela ficaria ora com o seu comprimento alongado, ora comprimido sem sofrer atenuação, devido à ausência de ar. Ao mesmo tempo, a existência do vácuo impediria que o som externo atingisse a **barra**. Os sensores utilizados eram cristais piezoelétricos que têm a propriedade de produzir uma voltagem elétrica quando são defor-

mados (usa-se este tipo de cristal para se gerar faísca elétrica em acendedores de fogões). Weber colocou vários desses cristais na superfície da **barra** cilíndrica, próximos da sua “cintura”.

O princípio de funcionamento do detector de **ondas gravitacionais** dele era simples: a onda ao chegar, colocava a **barra** cilíndrica em oscilação longitudinal que, por sua vez, causava a contração e alongação dos cristais piezoelétricos e, conseqüentemente, um sinal elétrico que poderia ser amplificado e registrado em fita magnética.

Weber propôs essa técnica de **barras ressonantes** em 1960. Em 1965 já tinha uma delas funcionando com boa sensibilidade e em 1969 afirmou ter detectado pulsos coincidentes de **ondas gravitacionais** em suas duas **barras**, uma na Universidade de Maryland e outra no Laboratório Nacional de Argonne a cerca de mil km de distância, e que a probabilidade de que todas essas coincidências fossem acidentais era incrivelmente pequena. Naquele tempo Weber registrava a saída de cada detector em um registrador de papel, como os que até hoje são usados para registrar terremotos ou atividade sísmica. Em torno de 1973, ele afirmava ter registrado um excesso de coincidências acima da média estatística de cerca de sete eventos por dia, que mostrava um pico na direção do centro galáctico. Estas e outras observações subsequentes foram recebidas com grande euforia, contudo as amplitudes dos sinais medidos implicavam que os sinais de **ondas gravitacionais** na fonte deviam ser muito mais fortes que os esperados pelos modelos astrofísicos relativísticos. Nos anos seguintes, vários experimentalistas construíram **barras** com maiores sensibilidades, incluindo **barras** resfriadas à temperatura de ebulição do hélio líquido para minimizar o ruído browniano. Entretanto, nenhuma delas pôde confirmar as detecções de Weber.

De qualquer forma, o trabalho pioneiro de Weber foi decisivo para o crescimento inicial da comunidade interessada em **ondas gravitacionais**. Graças aos resultados reportados por Weber em 1969, de ter encontrado sinais de **ondas gravitacionais**, cerca de 20 experimentos novos foram propostos no mundo nas duas décadas seguintes e, conseqüentemente, as bases da detecção de **ondas gravitacionais** foram definitivamente estabelecidas.

Os grupos que conduziram estes experimentos foram:

- um na Rússia, Moscou;
- sete nos EUA:
 - BTL (Laboratórios Bell), NJ;
 - Rochester, em Rochester, NY;
 - IBM, Yorktown Heights, NY;
 - Stanford (**barra** criogênica);
 - LSU, Universidade Estadual da Louisiana (**barra** criogênica);

- Caltech, *California Institute of Technology* (**interferômetro laser**);
- MIT, *Massachusetts Institute of Technology* (**interferômetro laser**);
- dois na Inglaterra (Bristol e Reading-Lab. Rutherford);
- um na Escócia (Glasgow);
- um no Japão (Universidade de Tóquio);
- um na Alemanha, Munique (**interferômetro laser**);
- dois na China (Universidade de Zhongshan, em Guangzhou e Universidade de Beijing, na capital);
- um na França (Meudon);
- dois na Itália (Frascati e Legnaro);
- um na Austrália, Universidade da Austrália Ocidental (**barra** criogênica);
- um no Canadá, Universidade de Regina (paralelepípedo formado por cristal de quartzo criogênico);
- e um alemão-italiano (Munique-Frascati).

A maioria dessas iniciativas, entretanto, teve existência pouco duradoura. Já no fim da década de 80, os únicos grupos que ainda permaneciam nesta pesquisa experimental eram:

- o de Moscou, na Rússia,
- o de Glasgow, na Escócia,
- o da Universidade de Tóquio, no Japão,
- os dois grupos da China,
- quatro grupos no EUA (Stanford, LSU, Caltech e MIT),
- o da Universidade de Roma, na Itália,
- o da Universidade da Austrália Ocidental, na Austrália,
- e o de Munique, na Alemanha.

Na década seguinte (1990) os grupos da Rússia, China (Beijing e Guangzhou) e Stanford também encerraram suas atividades. Em compensação, surgiu um grupo novo na Itália: Legnaro (**barra** supercriogênica, pois seria resfriada até a temperatura de 0,1 K ou ainda mais baixas).

Entretanto, ainda no início da década de 80, a Caltech e MIT se uniram para estudar a construção de um grande projeto interferométrico (ver **Interferômetros laser**) nos EUA: LIGO (braços de 4 km). A França e a Itália juntaram esforços para construir também um grande projeto interferométrico: VIRGO (braços de 3 km) e o Reino Unido e a Alemanha fizeram o mesmo para outro projeto um pouco menor em tamanho, mas de grande qualidade: GEO 600 (braço de 0,6 km). Também nessa década os planos para a construção de **barras** supercriogênicas (NAUTILUS e AURIGA) foram iniciados.

Foi nesse ambiente de **barras** criogênicas e supercriogênicas e planos para **interferômetros** de braços longos que as primeiras iniciativas brasileiras ocorreram.

Primeiras iniciativas brasileiras (Aguiar, 2011)

As três primeiras teses de doutorado de brasileiros sobre a detecção de **ondas gravitacionais**, defendidas em 1990 e 1992, marcam as primeiras iniciativas brasileiras nessa área.

Em 27 de novembro 1990 o autor deste Capítulo, com bolsa americana de assistente de pesquisa e licença de afastamento não remunerado (a essas alturas) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), de São José dos Campos, SP, do qual já era servidor contratado, defendeu na LSU em Baton Rouge, LA, a primeira delas, que descrevia resultados de pesquisa experimental com **transdutores** ressonantes paramétricos (ver **Transdutores eletromecânicos paramétricos**) relacionados com a **barra** criogênica Allegro. Além do tema da tese, teve também a oportunidade de trabalhar em alguns outros aspectos dessa pesquisa, como isolamento vibracional e análise de dados de detectores de **barra**, na época os da LSU (*Allegro*), Stanford, Roma (*Explorer*, que estava no CERN) e o chinês que estava em Guangzhou¹. Em 1986 participou da análise de dados das **barras** criogênicas da LSU, Stanford e Roma (Amaldi *et al.*, 1989). Lá na LSU também teve o privilégio de conviver com William Hamilton (chefe do grupo), Warren Johnson (orientador da tese de doutorado) e colegas brilhantes na área experimental, como Bu-Xin Xu e Norbert Solomonson. Durante aquele período, em meados de 1987 participou do primeiro Simpósio Internacional de Física Experimental Gravitacional, em Guangzhou (China) quando se encontrou com Adalberto Giazotto, chefe do grupo italiano no projeto VIRGO, que ficou sabendo que o Brasil tinha um estudante de doutorado trabalhando na LSU no tema de detecção de **ondas gravitacionais**, fato que pode ter contribuído para o interesse dos italianos em iniciar colaboração com os brasileiros em detecção de **ondas gravitacionais** dois anos depois. Quando retornou ao Brasil já trazia na bagagem a ideia de um projeto de antena ressonante esférica (ver **Esferas ressonantes**), que estava sendo intensamente estudado por Johnson com outros estudantes dele.

Em outubro de 1989 pesquisadores italianos em **ondas gravitacionais** fizeram contato, primeiro com o professor Mauro Cattani do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF/USP). Depois se juntaram à colaboração, Armando Turtelli do Instituto de Física “Gleb Wataghin” da Unicamp (IFGW/Unicamp), Nilton O. Santos do Observatório Nacional (ON), Carlos Escobar (IF/USP) e José Antônio de Freitas Pacheco do Instituto Astronômico

¹ Cidade no Brasil conhecida erradamente como Cantão que, na verdade, é o nome da região/estado.

e Geofísico da USP (IAG/USP). A ideia inicial era uma colaboração brasileira no projeto VIRGO, que estava surgindo de uma colaboração entre franceses e italianos. Fruto desta colaboração, duas teses de doutorado foram produzidas: as de Walter Ferreira Velloso Júnior e Nadja Simão Magalhães. Walter foi orientado por Freitas Pacheco e desenvolveu a sua tese de doutorado na Itália, no grupo do VIRGO. Já Nadja foi orientada por Escobar que, na época, se encontrava no IF/USP (atualmente se encontra na Unicamp). Assim, em 1992 ocorreram as outras duas defesas, ambas na USP. Walter defendeu no IAG em meados de 1992, tese sobre trabalho relacionado com isolamento vibracional do projeto VIRGO e Nadja defendeu em dezembro daquele ano, no IF, trabalho teórico de análise de dados relacionado com detecção de sinais contínuos (quase monocromáticos) que o grupo de Tóquio vinha realizando no Japão.

Grupo Gráviton (Aguiar, 2011)

Já de volta ao Brasil no início de 1991, o autor procurou alguns dos brasileiros envolvidos na colaboração com o projeto VIRGO e propôs a eles que se envolvessem no projeto de uma antena ressonante esférica (ver **Esferas ressonantes**) criogênica. Por ser ressonante, ela teria a sua sensibilidade centrada no modo quadrupolar fundamental de oscilação mecânica que, no caso, estaria em torno de 1 kHz. Além disso, seria criogênica, ou seja, resfriada até temperaturas próximas do zero absoluto, para redução do ruído térmico. A proposta, que foi apresentada a convite em vários seminários, teve boa acolhida e a maioria achou que faria mais sentido uma construída no Brasil. **Interferômetros laser** eram muito caros para o país construir sozinho, fato já sabido pelo autor desde os primeiros anos da década de 80, antes de ir para a LSU através de consulta a vários grupos sobre o custo desses detectores.

Infelizmente a aceitação da proposta comprometeu a colaboração brasileira no projeto VIRGO a longo prazo, seja porque os cientistas optaram pelo projeto brasileiro da antena esférica, seja porque não havia recursos humanos no país nessa área experimental naquela época para uma participação ativa em mais de um projeto. Este dano ao projeto VIRGO poderia ter sido compensado se o projeto da antena esférica fosse logo aprovado, mas isto não aconteceu. Na verdade, mesmo este projeto brasileiro da antena esférica teve que esperar cerca de nove anos para receber apoio financeiro da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo).

O nome do projeto brasileiro em **ondas gravitacionais** surgiu de uma conversa informal em fevereiro de 1991, na casa do professor Mario No-

vello, pesquisador do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), com o grupo de colaboradores dele do CBPF. Eram feitos planos para a construção de um detector esférico e num determinado momento se perguntou como deveria se chamar o projeto. Luiz Alberto Rezende de Oliveira, pesquisador do CBPF, propôs o nome Gráviton, que cunhou definitivamente o nome do Grupo (Figura 2), que no início contava com 26 participantes (Aguiar, 1992) e do qual já fizeram parte mais de 90 pessoas. Atualmente ele conta com cerca de 40 integrantes mais ativos (Aguiar, 2012) sendo experimentais menos da metade.



Figura 2. Alguns integrantes paulistas do Grupo Gráviton em 1992. Da esquerda para a direita, o professor Reuven Opher, Walter F. Velloso Jr., Nadja S. Magalhães, o autor e José Carlos Neves de Araujo (Nellie Solitrenick, "O Globo" de 17/5/92)

Anos do convencimento (Aguiar, 2011)

Não foi de forma alguma fácil convencer as fontes de apoio científico no país a pagar o custo da construção de uma antena esférica brasileira para detecção de **ondas gravitacionais**. Chegamos a submetê-lo ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) em meados da década de 90, mas nunca tivemos uma resposta. Vários trabalhos foram apresentados em encontros nacionais e internacionais lançando a proposta da construção desta antena esférica no Brasil (Aguiar *et al.*, 1992; Aguiar *et al.*, 1996 e Velloso *et al.*, 1997). Do momento do lançamento do projeto até a sua aprovação passaram-se mais de nove anos (janeiro de 1991 até abril de 2000). Além disso, para que o projeto fosse aprovado, o tamanho da **esfera** teve que ser significativamente reduzido.

Inicialmente a proposta era a construção de uma antena de alumínio (liga 5056) em formato de buckybola, ou seja, de um icosaedro truncado de 3 m de diâmetro que pesava cerca de 36 t, como no projeto americano TIGA. Com a entrada de Giorgio Frossati, professor da Universidade de Leiden (Holanda) no projeto (quando ele também iniciou o projeto holandês do Mini-GRAIL) em 1993, e a descoberta por ele de uma liga especial de cobre-alumínio (94% cobre — 6% alumínio) que tinha um fator de qualidade mecânica muito bom e apresentava vantagens no resfriamento até temperaturas inferiores a 1 k, a antena mudou de composição metálica e do formato de buckybola para o de **esfera** ganhando muito mais massa, chegando a ter um peso previsto de 113 t. Essa antena de 3 m de diâmetro chegou a ser batizada de Einstein.

Em 15 de janeiro de 1997 a ideia desta proposta mudou. Após vários trabalhos apresentados em conferências internacionais e no país e contatos feitos anteriormente no CNPq, numa reunião com o então ministro do MCT (hoje MCTI, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação) todas as esperanças do projeto brasileiro se iniciar pela construção de uma antena de 3 m de diâmetro foram por terra. Entretanto, no voo de retorno para São Paulo, o professor Nei Fernandes de Oliveira Jr., do IF/USP, convenceu o autor a partir para um projeto menor a ser submetido para a FAPESP.

FAPESP. Detector Mário Schenberg (Aguiar, 2011)

Quase dois anos foram necessários para a preparação da proposta do detector Mário Schenberg, que foi submetida à FAPESP em 3 de novembro de 1998, após várias reuniões com o professor Luiz Nunes de Oliveira, da FAPESP, que orientou nessa preparação. Segundo ele, a proposta tinha que ser feita com texto em inglês para ser julgada por um corpo de árbitros estrangeiros.

Um dos motivos da demora foi uma divergência com o professor Nei na concepção do projeto. Ele o concebia como uma etapa preliminar do desenvolvimento da tecnologia de antenas esféricas, visando à construção futura de um detector propriamente dito. Assim, para ele a proposta era apenas do protótipo de uma antena de **ondas gravitacionais**, que poderia até mesmo detectar **ondas gravitacionais**, mas que não teria sido construído para operar continuamente como detector, mesmo porque segundo ele, o protótipo não teria um reservatório de hélio líquido grande o suficiente (ver a próxima seção) para manter a operação sem interrupções frequentes para recarga (o reservatório dura apenas 9

dias). Entretanto o autor e o professor Frossati concebiam o projeto para a construção de um detector propriamente dito, capaz de realizar detecções regulares após atingir a sensibilidade necessária para isto (apesar de saberem que uma **esfera** de massa maior teria chances muito maiores de detecção). Talvez o professor Nunes também compartilhasse essa opinião, o que teria causado uma discussão entre ele e o professor Nei, o que acabava adiando sucessivamente a submissão do projeto. No final o professor Nei desistiu de insistir na sua visão e deixou que o autor submetesse o projeto de um detector propriamente dito. Aparentemente a FAPESP teve dificuldade para promover o julgamento do projeto, pois o resultado, no caso favorável, só saiu em abril de 2000. Finalmente, em 1º de maio de 2000 teve início o projeto do detector Schenberg (Aguiar *et al.*, 2002a e 2002b).

Construção. Primeira operação da antena (Aguiar, 2011)

A construção da antena até a sua primeira operação comissionada em 8 de setembro de 2006 levou um pouco mais de seis anos e quatro meses. Foi necessário prorrogar por três anos o prazo inicial de quatro anos que tinha sido concedido a um projeto especial da FAPESP. A falta de engenheiros (na grande maioria dos casos só se pôde contar com os membros da equipe e estudantes que seguem o “ritmo” de suas teses, ou seja, seguem o cronograma dos prazos da tese e não os prazos do projeto) foi um dos motivos importantes do atraso.

A sala 108 do prédio Mário Schenberg do LESBT (Laboratório de Estado Sólido e Baixas Temperaturas) do IF/USP, que foi utilizada como sítio do detector, tinha o pé direito insuficiente. Foi necessária a construção de um fosso de quase 2 m. Além disso, foram construídos uma ponte rolante no teto e um sistema hidráulico para levantar e abaixar a plataforma de concreto sobre a qual seria montado o conjunto das câmaras criogênicas, para a montagem da antena. O projeto da ponte rolante foi todo concebido pelo professor Nei, que também foi o responsável pela modificação no sistema hidráulico (Figura 3), que permitiu que ele funcionasse mais suavemente (a versão instalada antes pela empresa contratada tinha sérios problemas de operação). Alguns anos depois, para permitir a instalação de **transdutores** mais sensíveis, a plataforma foi imobilizada a uma altura que permitisse a montagem das câmaras criogênicas por baixo e também a introdução da linha de transferência de hélio líquido por cima. Afinal, as construções já estavam prontas. Para elas é que era necessária uma plataforma com mobilidade vertical. A imobilização da plataforma

também cumpriu uma função extremamente importante, a de não danificar **transdutores** sensíveis que fossem instalados na **esfera**. Aliás esta foi a razão principal para a imobilização da plataforma.



Figura 3. O professor Nei realizando teste no sistema hidráulico da plataforma de concreto em 2001. Foto tirada com câmera do Projeto do Detector Mário Schenberg

O passo seguinte foi a instalação das câmaras criogênicas. Elas foram fabricadas pela Kadel, IN, EUA. O valor real delas seria algo em torno de US\$ 100 mil, mas foram pagas apenas US\$ 12,5 mil. A razão disto foi que três unidades foram fabricadas, uma para o grupo brasileiro, outra para o grupo de Leiden (Frossati) e outra para o grupo de Roma (Eugenio Coccia) e Frossati havia projetado essas câmaras de forma que a Kadel não precisasse fabricar nenhuma ferramenta ou peça para a sua linha de montagem, ou seja, a Kadel só teve despesas com a matéria-prima das câmaras e mão-de-obra. A câmara saiu muito barata, mas, em contrapartida, o seu reservatório para o hélio líquido era pequeno. Ele não tinha capacidade para permitir longos períodos de operação da antena, tendo sido projetado para a duração normal de um experimento de física a baixas temperaturas.

As câmaras chegaram em abril de 2002 e em junho de 2002 elas já estavam montadas pelo pessoal da oficina mecânica do laboratório, sob a coordenação do professor Nei.

Aí foi a vez da **esfera**. Ela foi fundida na Italbronz e em Arujá, SP, no km 106 da rodovia Dutra, e era a segunda **esfera** fundida pela companhia. A primeira (Figura 4) havia sido enviada para o grupo de Leiden. Esse grupo também ficou com a terceira, que foi fundida com diâmetro um pouco maior, 68 cm, em vez dos 65 cm das duas anteriores.

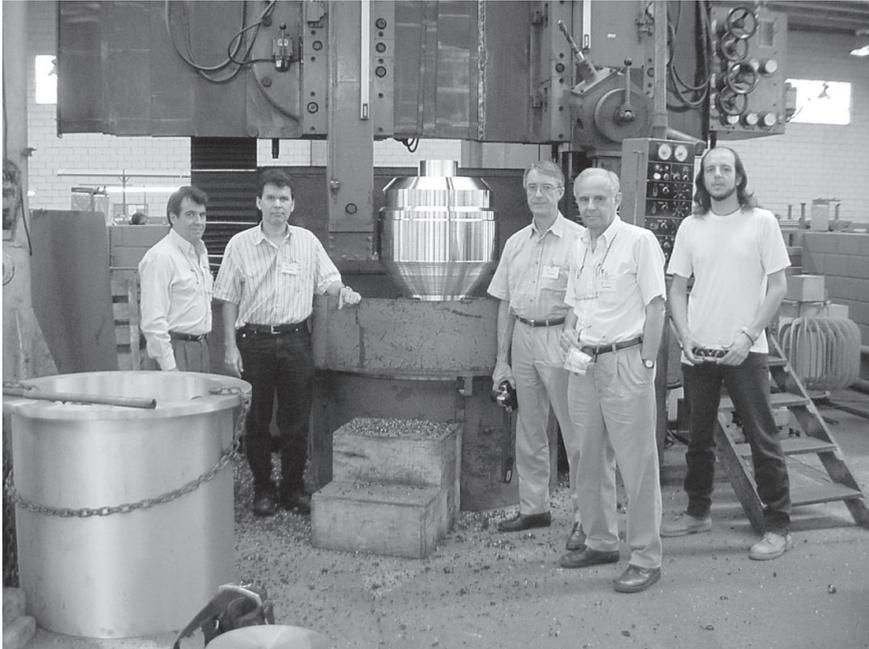


Figura 4. A primeira **esfera**, que foi para o Mini-GRAIL em Leiden, sendo usinada na Italbronz e em Arujá, SP, no km 106 da rodovia Dutra, e era a segunda **esfera** fundida pela companhia. A primeira (Figura 4) havia sido enviada para o grupo de Leiden. Esse grupo também ficou com a terceira, que foi fundida com diâmetro um pouco maior, 68 cm, em vez dos 65 cm das duas anteriores. Foto tirada com câmera do Projeto do Detector Mário Schenberg

A **esfera** do detector Schenberg chegou ao IF/USP em 11/10/2002 (Figura 5). Um caminhão *munck* do INPE trouxe-a da Italbronz e em Arujá, SP, no km 106 da rodovia Dutra, e era a segunda **esfera** fundida pela companhia. Ela já veio com nove orifícios para **transdutores**. Seis dos orifícios na configuração proposta por Johnson e Merkwitz (1993) e outros três orifícios para **transdutores** extras (que podem ser utilizados para testar **transdutores**, realizar redundância com os já existentes ou monitorar outros modos de oscilação da **esfera**, como o modo monopolar, que também é chamado de modo de “respiração”, pois nele a **esfera** mantém a sua forma, mas varia o seu diâmetro. Alguns desses furos podem ser vistos na Figura 6.



Figura 5. A esfera do detector Schenberg sendo descarregada no LESBT-IF/USP em 11/10/2002. Da esquerda para a direita: José Luiz Melo (aluno de doutorado), Isac Carneiro dos Santos (motorista do INPE), Sérgio Ricardo Furtado (na época aluno de mestrado), Rui Fernandes de Oliveira (irmão do professor Nei) e Sérgio Turano de Souza (na época aluno de mestrado)



Figura 6. O professor Nei aciona o guincho da ponte rolante para suspender a esfera sob o olhar atento do técnico Francisco de Paula Oliveira, o "Paulinho", em 4/12/2002

Com a chegada da **esfera**, pôde-se dar início à montagem de toda a sua suspensão, isolamento vibracional e aterramento térmico (Figura 7). A suspensão era composta por quatro filtros mecânicos: uma mola de ar (que nada mais é do que uma mola pneumática) no topo, ainda à temperatura ambiente, uma haste longa de titânio-vanádio, de baixa condução térmica, aterrada nos dois reservatórios de líquidos frios (o de hélio e o de nitrogênio, logicamente em pontos diferentes), um conjunto criogênico de 5 massas e molas metálicas de baixa condutividade térmica (foi preciso trocar as molas iniciais em formato de “C”, que apresentavam alta condutividade térmica e dificultavam que a **esfera** fosse mantida a baixa temperatura) e a haste final de cobre, de alta condutividade térmica, que ligava a última das 5 massas à **esfera**.

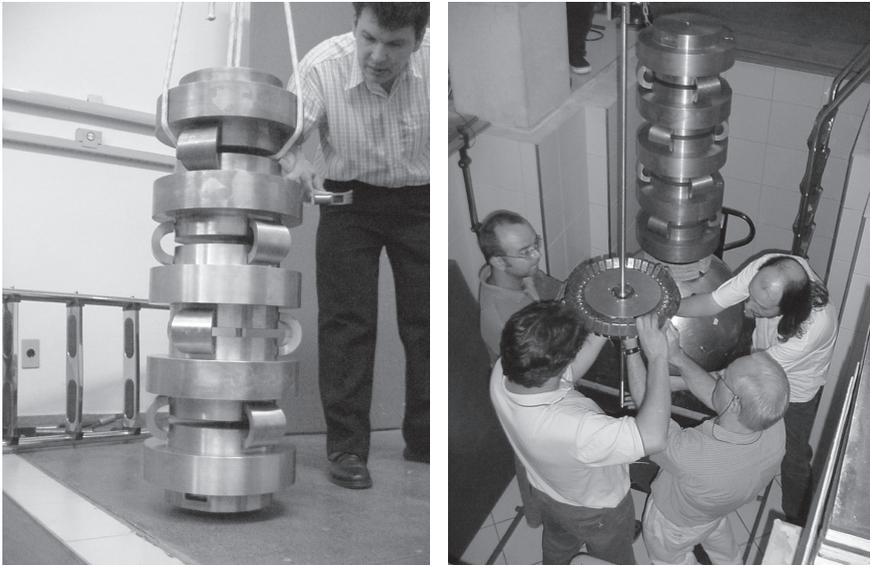


Figura 7. Montagem das partes da suspensão, isolamento vibracional e aterramento térmico da **esfera**. À esquerda, o autor encaixando as molas em formato de “C” do filtro de isolamento mecânico, em 17/12/2002. À direita, a montagem de um dos aterramentos térmicos da suspensão, em 11/3/2003. Da esquerda para a direita, José L. Melo (“Zemelo”), Sérgio R. Furtado, o professor Nei F. Oliveira Jr e Sérgio T. de Souza

A ideia era isolar a **esfera** dos ruídos sísmicos e sonoros (as câmaras eram mantidas em vácuo) e minimizar os ruídos térmicos (com o resfriamento da **esfera**), para que fossem detectadas as minúsculas amplitudes das oscilações nos modos quadrupolares (um milhão de vezes menores que o diâmetro de um próton, no caso do Schenberg), causadas pelas **ondas gravitacionais** chegando

na **esfera**. Esta detecção seria obtida através da conversão, nos **transdutores**, dos movimentos oscilatórios da superfície da **esfera** em sinais modulados na portadora pura em 10 GHz (de ultrabaixo ruído) injetada nos **transdutores**. Para que o sinal fosse maior que os ruídos, esses **transdutores** precisariam ter altos fatores de qualidade (energia armazenada no modo muito maior que a energia dissipada por ciclo), tanto mecânicos (maiores que um milhão), como elétricos (maiores que 200 mil), e uma taxa de variação da frequência de ressonância elétrica da cavidade de micro-ondas (em torno de 10 GHz) com o movimento da membrana de nióbio supercondutor acima de 0,5 GHz/mm. Estes requisitos não são fáceis de serem obtidos e têm sido, até hoje, objeto de intenso trabalho no INPE, onde os **transdutores** são desenvolvidos (Aguiar *et al.*, 2003). Aliás, merece menção o fato que o INPE construiu em 2001 no prédio CEA I um grande laboratório (16 m x 6 m) com 12 m de altura, que inclui três salas de mezanino na vertical para a linha de pesquisa em Ondas Gravitacionais da Divisão de Astrofísica (ONG/DAS). Este laboratório poderia abrigar até duas antenas esféricas do mesmo material do detector Schenberg (cobre-alumínio na proporção 94%-6%) de até 1,7 m de diâmetro (centrada na frequência de 1,2 kHz). Na verdade o prédio tinha sido preparado para a montagem da primeira antena, mas a decisão da montagem no IF/USP adiou o uso desse laboratório para essa finalidade e o fez se dedicar para uso nos testes dos **transdutores** (foi inclusive adquirido um reliquefator de hélio líquido, que tanto é capaz de reliquefazer o hélio em um circuito fechado, como liquefazê-lo a partir do gás) e um projeto dentro da colaboração LIGO (que será detalhada mais adiante). O eventual uso deste laboratório para uma segunda antena ainda não está descartado, mas dependeria dos resultados satisfatórios do detector Schenberg no IF/USP.

A primeira **corrida** criogênica da **esfera** ocorreu em julho de 2003 (Aguiar, 2004). Nela foram medidas as frequências dos modos quadrupolares e o fator de qualidade mecânico da **esfera** até a temperatura de 2 K. Para este encontramos valores da ordem de 2,7 milhões, o que é muito satisfatório. As frequências ficaram em torno de 3,2 kHz, como era esperado. Uma das conclusões importantes desta **corrida** foi a de que as molas “C” e a haste de aço inox da suspensão estavam conduzindo muito calor para a **esfera**, dificultando a manutenção da baixa temperatura dela e aumentando o consumo de hélio líquido. Modificações foram feitas em 2004. As molas “C” assim como a haste de aço inox foram substituídas por pinos e haste de titânio-vanádio, respectivamente (Aguiar *et al.*, 2005). Além disso, foi preparado o *software* para a aquisição e análise dos dados da primeira **corrida** comissionada com **transdutores** (Aguiar *et al.*, 2006).

Em 2006, a primeira geração de **transdutores** composta por três deles ficou pronta e pôde ser testada no Schenberg. Em 8 de setembro de 2006 ocorria a primeira **corrida** com **transdutores** (a segunda **corrida** geral) (Aguiar *et al.*, 2008). O circuito eletrônico montado na **esfera** pode ser visto na Figura 8 e detalhe do posicionamento de uma das antenas microfita, que são responsáveis pelo envio do sinal puro de micro-ondas e recebimento do sinal já modulado, em frente a um dos **transdutores**, pode ser visto na Figura 9.

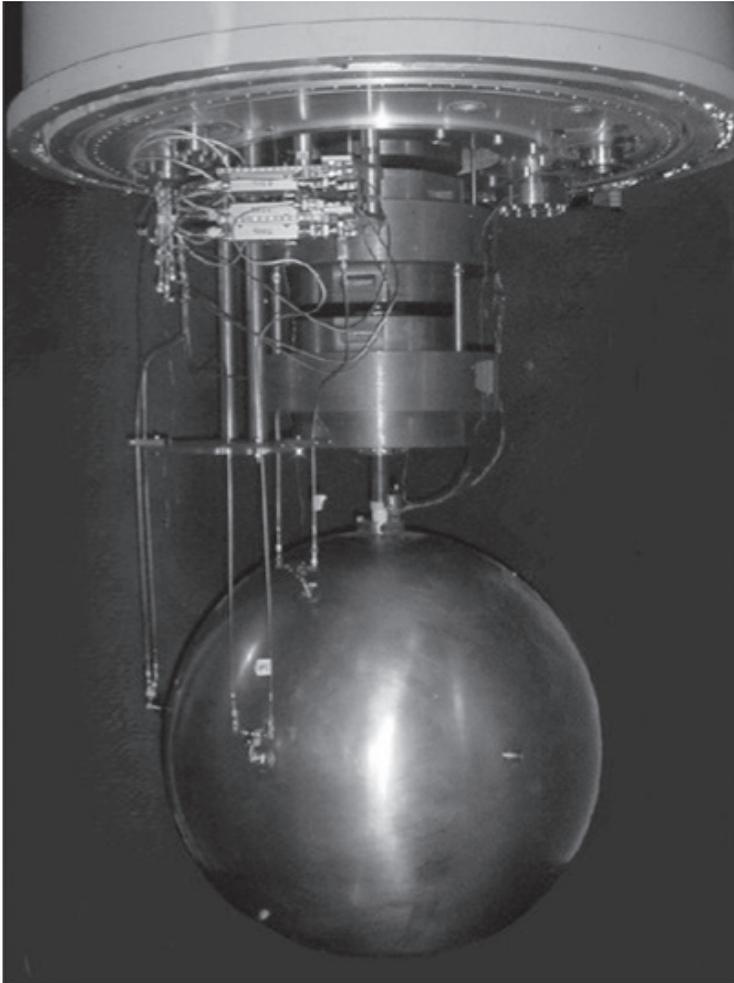


Figura 8. A primeira **corrida** com **transdutores**, ocorrida em 2006, utilizou três deles. Podem ser vistos os cabamentos das três antenas microfita e os amplificadores criogênicos no topo, próximos à base do reservatório de hélio líquido

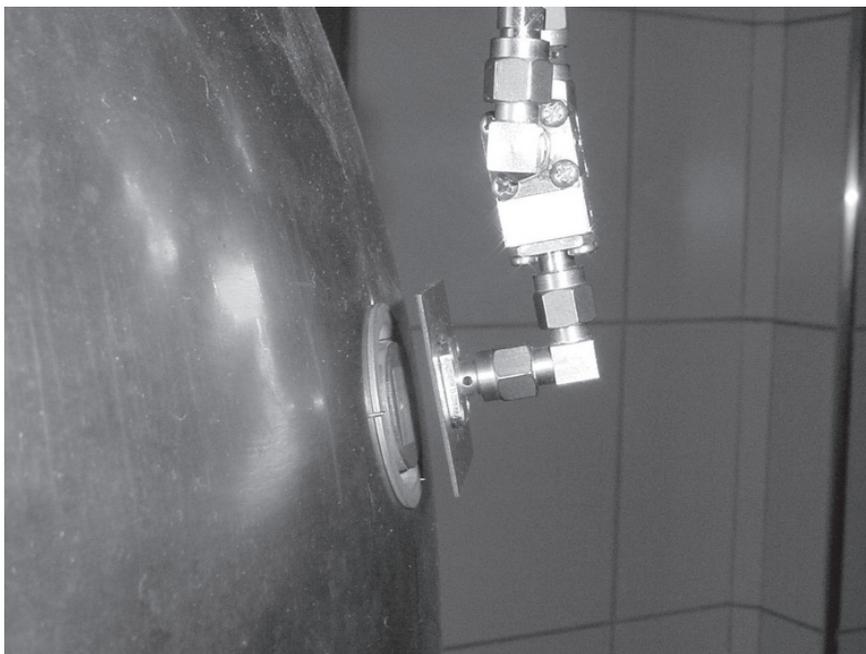


Figura 9. O sinal que ativava os **transdutores** era enviado e recebido (neste caso modulado) por pares de antenas microfitas. Nenhum cabo ou fio tocava a **esfera**, de forma a evitar a introdução de ruído sísmico ou vibracional

Aperfeiçoamentos

A **corrida** acima marcou o início da fase comissionada da antena (Costa, 2008). Ainda ocorreu mais uma naquele ano de 2006 e outra em 2007. Também foram feitos vários testes a temperatura ambiente, pois o sistema **transdutor** funcionava também nessa temperatura. Em 2008, já tinham sido realizados testes suficientes para se decidir o que precisava ser modificado/melhorado. Começaram então a ser realizadas várias modificações, desde um sistema de controle da pressão na mola de ar, até modificação nas antenas microfitas, que foram substituídas por sondas acopladas remotamente aos orifícios das cavidades de micro-ondas. Em vez de enviar e receber o sinal de micro-ondas através de antenas microfitas, que só aceitam operar em uma faixa muito restrita de frequências (em torno de apenas 200 MHz), optou-se por utilizar sondas que têm uma faixa passante mais do que dez vezes maior, após descobrirmos que os altos fatores elétricos de qualidade das cavidades permitiam um acoplamento com essas sondas, mesmo que elas fossem colocadas a 4 mm de distância da

entrada do orifício aberto na cavidade de micro-ondas. Também foi mudado o esquema do circuito eletrônico, pois foi descoberto que alguns dos acopladores e circuladores não funcionavam adequadamente em baixas temperaturas, como deveriam. O circuito ficou mais simples. Todo o cabeamento também foi mudado para possibilitar a operação de um conjunto de até nove **transdutores** e foi instalado o *1K pot* do refrigerador por diluição, que é uma das partes básicas desses refrigeradores, de modo que na próxima **corrida a esfera** poderá ser resfriada a temperaturas menores que 2K.

Na parte “pesada” do detector foi feito algo radical. Como já foi dito, o sistema hidráulico da base de concreto foi imobilizado. Com essa providência, **transdutores** muito mais sensíveis podem agora ser instalados, sem serem danificados pelo movimento de sobe e desce da base. Com a base de concreto na altura fixa foi montado um assoalho (removível) logo abaixo da **esfera** que permite trabalhar no mesmo nível do piso do laboratório, sem a necessidade de descer ao fosso (Aguiar *et al.*, 2012). Esta nova configuração pode ser vista na Figura 10.

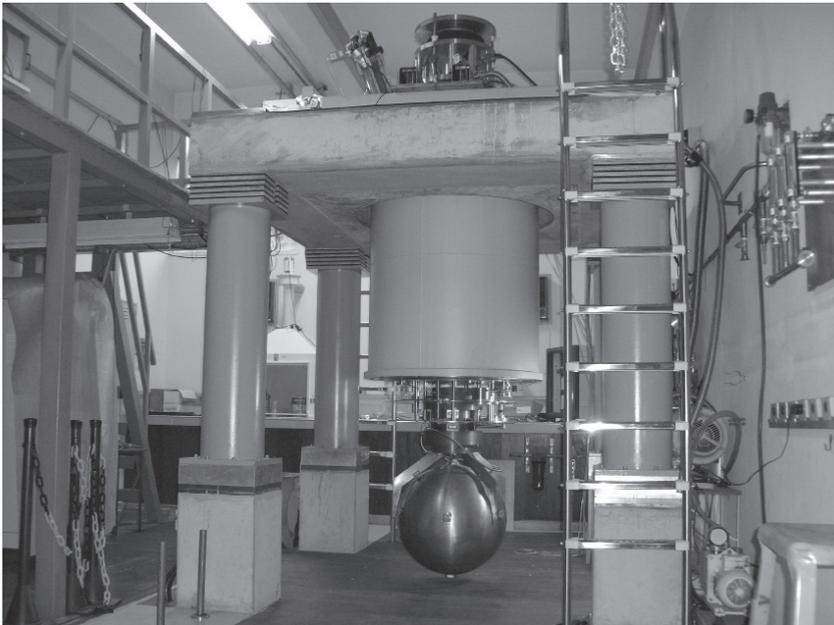


Figura 10. Visão mais recente do detector Schenberg, já com a plataforma de concreto imobilizada para proteção dos **transdutores**, em altura adequada para o fechamento da câmara criogênica por baixo (pois o assoalho é removível) e introdução da linha de transferência por cima. O sistema de aquisição e processamento dos dados fica no mezanino à esquerda. O *1K pot* do refrigerador por diluição já se encontra instalado

Paralelamente foi realizado extenso desenvolvimento nos **transdutores**, infelizmente sem a ajuda de engenheiros, mas sim com ajuda de estudantes talentosos que, apesar de muito capazes, realizavam a pesquisa, como foi dito acima, no ritmo de suas teses. Foram testados vários modelos de **transdutores** buscando, como já mencionado, altos fatores de qualidade, tanto mecânicos quanto elétricos. Nessa busca foram construídos e testados cinco tipos/conjuntos diferentes de **transdutores**. Finalmente os resultados dos testes do último desses modelos (Figura 11) foram bons o suficiente para que fosse decidida a sua utilização na próxima **corrida** do Schenberg. No momento estão sendo ajustadas as frequências de micro-ondas das cavidades dentro da faixa de operação dos amplificadores criogênicos (9 a 11 GHz), para serem iniciados os preparativos da próxima **corrida**. A expectativa é alcançar uma sensibilidade de, pelo menos, $h \sim 2 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$ em uma banda de 50 Hz em torno de 3,2 kHz. A grandeza h define a sensibilidade em termos da amplitude da **onda gravitacional**. A unidade $\text{Hz}^{-1/2}$ vem do fato de que esta sensibilidade em amplitude depende da raiz quadrada de uma densidade espectral de ruído (a sensibilidade em energia dependeria de Hz^{-1}). Teoricamente o Schenberg pode chegar a sensibilidades tão boas quanto $h \sim 10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$ ou até melhores se for possível realizar *squeezing* de sinal (através do qual pode-se ultrapassar o limite quântico padrão, medindo-se uma das componentes com a sensibilidade que se deseja e deixando que toda a incerteza recaia na outra componente), algo possível com o tipo de **transdutor** paramétrico que está sendo utilizado.



Figura 11. À esquerda: conjunto de oito **transdutores** do sexto e último modelo testado. O corpo dos **transdutores** é de nióbio muito puro (pureza da ordem de 99,99%). Uma das suas metades fica firmemente presa ao orifício da **esfera**, quando ela se resfria até temperaturas criogênicas. A outra metade pode, então, oscilar na frequência de 3,2 kHz, a mesma da **esfera**, por causa da "mola" na parte central, vista no detalhe da Figura à direita.

Evolução do Grupo Gráviton

A construção e operação do detector Schenberg não é a única atividade importante do Grupo Gráviton. A pesquisa teórica das próprias **ondas gravitacionais** e de suas fontes astrofísicas e cosmológicas, inclusive em teorias alternativas da gravitação, são também importantes.

Com este objetivo, o projeto especial da FAPESP que possibilitou a construção do detector Mário Schenberg foi continuado num projeto temático, também da FAPESP, com o título “Nova Física no Espaço: Ondas Gravitacionais”. Este projeto é mais amplo que o anterior e visa também o apoio ao estudo teórico no tema das **ondas gravitacionais**.

A presença significativa da FAPESP, desde o ano 2000, no apoio à pesquisa em **ondas gravitacionais** teve consequências no perfil da comunidade brasileira nessa área. Existem, é verdade, iniciativas em outros estados brasileiros, se destacando as empreendidas no CBPF (Novello *et al.*, 1999) e Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ (Soares *et al.*, 2006), no Rio de Janeiro, mas a grande maioria da pesquisa nessa área ocorre no Estado de São Paulo. Talvez pudesse ter sido diferente se aquela reunião no MCT, em 1997, tivesse tido outro desfecho.

Do ponto de vista das bolsas dos estudantes de iniciação científica, mestrado e doutorado e dos pós-doutores e pesquisadores visitantes, a divisão é mais equânime. Tanto a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), CNPq e FAPESP (talvez FAPERJ, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro também) participam, sem destaque significativo numa ou noutra.

Existem vários grupos realizando trabalhos teóricos importantes em **ondas gravitacionais** e suas fontes astrofísicas a começar pelos encabeçados por José Carlos N. de Araujo e Oswaldo D. Miranda, ambos pesquisadores do INPE. Se destacam também os realizados por Alberto Saa e Patrício Letelier (Unicamp, Universidade Estadual de Campinas), Cecília Chirenti (UFABC, Universidade Federal do ABC), Ivano Soares (CBPF), Henrique Oliveira (UERJ), Fernando Kokubun (FURG, Universidade Federal do Rio Grande), Marcos Maia (UnB, Universidade de Brasília), Ruben Aldrovandi (IFT/UNESP, Instituto de Física Teórica/Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”), Luís Carlos B. Crispino (UFPA, Universidade Federal do Pará), Nazira A. Tomimura (UFF, Universidade Federal Fluminense) e Miguel de Campos (UFRR, Universidade Federal de Roraima) entre muitos outros. É importante mencionar também os trabalhos teóricos pioneiros, alguns até anteriores à década de 90, de Márcio R. G. Maia (UFRN, Universi-

dade Federal do Rio Grande do Norte) e Marcelo E. Araújo (UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro) e Anzhong Wang (UERJ). Logicamente nem todos esses trabalhos são realizados por membros do Grupo Gráviton.

É de se destacar também o excelente trabalho na área experimental que o professor Anderson C. Fauth, da Unicamp, vem realizando na construção de um sistema que veta **raios cósmicos**, composto de cintiladores plásticos, para o detector Mário Schenberg. Por esse sistema, em todos os momentos em que uma grande quantidade de **raios cósmicos** chegar (“chuveiros” de **raios cósmicos**), o sistema de aquisição de dados veta esses momentos na busca de **ondas gravitacionais**.

Finalmente, sempre foi e continua sendo importante a divulgação científica para o público leigo (de Araujo *et al.*, 2006) e (Aguiar e Oliveira Jr., 2012).

Perspectivas e colaborações

A perspectiva de detecção de **ondas gravitacionais** pelas versões avançadas do LIGO e VIRGO (atualmente em reforma para melhoria de sensibilidade) a partir de 2015-2016 e a perspectiva do detector Schenberg alcançar a sua sensibilidade para iniciar **corridas** científicas nesse mesmo período, abre possibilidades muito interessantes e estimulantes. De forma a poder participar de ambas as frentes de pesquisa, o grupo do INPE assinou um MoU (*Memorandum of Understanding*) ou acordo bilateral com a LSC (*LIGO Scientific Collaboration*). Dentro desse acordo, o Grupo GWINPE, como foi cunhado para a LSC o nome do grupo de **ondas gravitacionais** (*Gravitational Waves*) do INPE, desenvolve trabalhos colaborativos na área de isolamento vibracional para versões futuras do LIGO, caracterização do detector LIGO avançado (aLIGO), trabalho desenvolvido por César A. Costa que passou recentemente dois anos nos EUA, na LSU, e modelamento de sinais e análise de dados, envolvendo uma equipe total de seis pessoas (o autor, dois pós-doutores, um aluno de doutorado, um aluno de mestrado e um técnico).

Na parte de desenvolvimento de isolamento vibracional para versões futuras do LIGO (versões que virão depois do aLIGO), foi inventado um sistema de pêndulos multianinhados, isto é, um dentro do outro (Aguiar and Constâncio Jr., 2012) que tem alto desempenho no isolamento, sem a necessidade de uso de muito espaço vertical dentro das câmaras de vácuo dos **interferômetros**. Na Figura 12 pode-se visualizar este sistema que está sendo desenvolvido no Laboratório de Ondas Gravitacionais (LOG) do INPE



Figura 12. À direita: sistema de isolamento vibracional formado por pêndulos multi-aninhados, que estão sendo desenvolvidos no LOG do INPE para utilização nas versões futuras do LIGO. Márcio Constâncio Jr., um dos alunos envolvidos neste trabalho, pode ser visto à esquerda para referência de tamanho

Esta colaboração com o LIGO e suas versões avançadas e futuras abrem também perspectivas para colaboração no VIRGO avançado, no KAGRA (*Kamioka Gravitational Wave Detector*), detector avançado do Japão e no ET (*Einstein Telescope*), detector avançado europeu.

Na área espacial está em curso uma colaboração do INPE com o pesquisador Massimo Tinto, do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), com a participação do pesquisador Márcio Alves, da UNESP (Universidade Estadual Paulista), S. J. Campos, SP, no estudo de um projeto espacial de detecção de **ondas gravitacionais** utilizando satélites geoestacionários (de Araujo *et al.*, 2012), o que torna o projeto mais barato e atrativo até para a Agência Espacial Brasileira (AEB), que vem desenvolvendo estudos para projetos com este tipo de satélite/órbita.

Paralelamente está em andamento uma colaboração com o professor Marbey Mosso, do CETUC (Centro de Telecomunicações da PUC do Rio de Janeiro) e colaboradores de lá e da UFF, na qualificação de osciladores de ultrabaixo ruído de fase (um tipo de ruído eletrônico que tem a ver com a estabilidade da fase da oscilação senoidal do sinal puro) para uso espacial. Já se sabe construir este tipo de osciladores para o Schenberg que terão que ser modificados para poderem suportar o lançamento do foguete e a operação nas condições do espaço.

Em conclusão, com a real perspectiva de detecção nos próximos anos, estamos prestes a vivenciar e participar de momentos históricos na área de **ondas gravitacionais** em nível mundial.

Referências

Aguiar, Odylio D. (2011), Past, present and future of the Resonant-Mass gravitational wave detectors, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 11, 1-42.

Aguiar, Odylio D.; Andrade, Luiz Alberto de; Barroso, Joaquim José; Bortoli, Flávio S.; Carneiro, Leandro A.; Castro, Pedro José de; Costa, César A.; Costa, Kátia M. F.; de Araujo, José Carlos N.; Lucena, Antônio U.; de Paula, Wayne; de Rey Neto, Edgard C.; de Souza, Sergio T.; Fauth, Anderson C.; Frajuca, Carlos; Frossati, Giorgio; Furtado, Sérgio R.; Magalhães, Nadja S.; Marinho Jr., Rubens de M.; Matos, Emílio S.; Melo, José Luiz; Miranda, Oswaldo D.; Oliveira Jr., Nei de; Paleo, Bruno W.; Remy, Marco A.; Ribeiro, Kilder L.; Stellati, Claudemir; Velloso Jr., Walter F. and Weber, Jorge (2005), The Brazilian gravitational wave detector Mario Schenberg: progress and plans, *Classical and Quantum Gravity*, 22, S209-S214.

Aguiar, Odylio D.; Andrade, Luiz Alberto de; Barroso, Joaquim José; Bortoli, Flávio S.; Carneiro, Leandro A.; Castro, Pedro José de; Costa, César A.; Costa, Kátia M. F.; de Araujo, José Carlos N.; Lucena, Antônio U.; de Paula, Wayne; de Rey Neto, Edgard C.; de Souza, Sergio T.; Fauth, Anderson C.; Frajuca, Carlos; Frossati, Giorgio; Furtado, Sérgio R.; Magalhães, Nadja S.; Marinho Jr., Rubens de Melo; Melo, José Luiz; Miranda, Oswaldo D.; Oliveira Jr., Nei F. de; Ribeiro, Kilder L.; Stellati, Claudemir; Velloso Jr., Walter F. and Weber, Jorge (2006), The Brazilian gravitational wave detector Mario Schenberg: status report, *Classical and Quantum Gravity*, 23, S239-S244.

Aguiar, Odylio D.; Andrade, Luiz Alberto de; Barroso, Joaquim José; Camargo Filho, Lúcio; Carneiro, Leandro A.; Castro, Claudio de S.; Castro, Pedro José de; Costa, Cesar A.; Costa, Kátia M. F.; de Araujo, José Carlos N.; Lucena, Antônio U.; de Paula, Wayne; de Rey Neto, Edgard C.; de Souza, Sérgio T.; Fauth, Anderson C.; Frajuca, Carlos; Frossati, Giorgio; Furtado, Sérgio R.; Lima, Liana C.; Magalhães, Nadja S.; Marinho Jr., Rubens de M.; Matos, Emílio S.; Melo, José Luiz; Miranda, Oswaldo D.; Oliveira Jr., Nei F. de; Paleo, Bruno W.; Remy, Marco A.; Ribeiro, Kilder L.; Stellati, Claudemir; Velloso Jr., Walter F. and Weber, Jorge (2004), The Brazilian Spherical Detector: progress and plans, *Classical and Quantum Gravity*, 21, S457-S463.

Aguiar, Odylio D.; Andrade, Luis Alberto; Barroso, Joaquim José; Castro, Pedro José de; Costa, César A.; de Souza, Sérgio T.; de Waard, Arllete; Fauth, Anderson C.; Frajuca, Carlos; Frossati, Giorgio; Furtado, Sérgio R.; Gratens, Xavier; Maffei, Tiago M. A.; Magalhães, Nadja S.; Marinho, Rubens M.; Oliveira Jr., Nei F.; Pimentel, Guilherme L.; Remy, Marco A.; Tobar, Michael E.; Abdalla, Élcio; Alves, Márcio E. S.; Bessada, Denis F. A.; Bortoli, Flávio S.; Brandão, Cláudio S. S.; Costa, Kátia M. F.; de Araújo, Helmo A. B.; de Araujo, José Carlos N.; de Gouveia Dal Pino, Elisabete

M.; de Paula, Wayne; de Rey Neto, Edgard C.; Evangelista, Edgard F. D.; Lenzi, César H.; Marranghello, Guilherme Frederico; Miranda, Oswaldo D.; Oliveira, Samuel R.; Opher, Reuven; Pereira, Eduardo S.; Stellati, Claudemir and Weber, Jorge (2008), The Schenberg spherical gravitational wave detector: the first commissioning runs, *Classical and Quantum Gravity*, 25, 114042.

Aguiar, Odylio D.; Andrade, Luiz Alberto de; Camargo Filho, Lúcio; Costa, Cesar A.; de Araujo, José Carlos N.; de Rey Neto, Edgard C.; de Souza, Sergio T. de; Fauth, Anderson C.; Frajuca, Carlos; Frossati, Giorgio; Furtado, Sérgio R.; Furtado, Valéria G. dos S.; Magalhães, Nadja S.; Marinho Jr., Rubens de Melo; Matos, Emílio S.; Meliani, Mara T.; Melo, José Luiz; Miranda, Oswaldo D.; Oliveira Jr., Nei F. de; Ribeiro, Kilder L.; Salles, Karla Beatriz M.; Stellati, Claudemir and Velloso Jr., Walter F. (2002a), The Status of the Brazilian Spherical Detector, *Classical and Quantum Gravity*, 19, 1949-1953.

Aguiar, Odylio D.; Barroso, Joaquim José; Carneiro, Leandro A.; Castro, Pedro José de; Costa, César A.; Furtado, Sérgio R.; Melo, José Luiz; Remy, Marco A.; Ribeiro, Kilder L.; Andrade, Luiz Alberto de; Frajuca, Carlos; Mosso, Marbey M. and Podcameni, Abelardo (2003), Transducers for the Schenberg Detector, *Programa e Resumos do XXIV Encontro Nacional de Física de Partículas e Campos*, Sociedade Brasileira de Física, 44.

Aguiar, Odylio D.; Barroso, Joaquim José; Carvalho, Natália C.; Castro, Pedro José de; Cedeño-Montaña, Carlos Eduardo; Da Silva Costa, Carlos Filipe; de Araujo, José Carlos N.; Evangelista, Edgard F. D.; Furtado, Sérgio R.; Miranda, Oswaldo D.; Moraes, Pedro Henrique R. S.; Pereira, Eduardo S.; Silveira, Patrick R.; Stellati, Claudemir; Oliveira Jr., Nei Fernandes de; Gratens, Xavier; de Paula, Leandro A. N.; de Souza, Sérgio T.; Marinho Jr, Rubens M.; Oliveira, Fernanda G.; Frajuca, Carlos; Bortoli, Flávio S.; Pires, Ricardo; Bessada, Denis F. A.; Magalhães, Nadja S.; Alves, Márcio E. S.; Fauth, Anderson C.; Macedo, Rodrigo P.; Saa, Alberto; Tavares, Dennis B.; Brandão, Cláudio S. S.; Andrade, Luiz Alberto; Marranghello, Guilherme Frederico; Chirenti, Cecilia B. M. H.; Frossati, Giorgio; de Waard, Arlette; Tobar, Michael E.; Costa, César A.; Johnson, Warren W.; de Freitas Pacheco, José Antônio and Pimentel, Guilherme L. (2012), Status Report of the Schenberg Gravitational Wave Antenna, *Journal of Physics. Conference Series*, 363, 012003.

Aguiar, Odylio D. and Constâncio Jr., Márcio (2012), ‘Multi-Nested Pendula’: a new concept for vibration isolation and its application to gravitational wave detectors, *Review of Scientific Instruments* (submitted).

Aguiar, Odylio D. e Oliveira Jr., Nei F. de (2012), “Contribuição da supercondutividade na detecção de ondas gravitacionais”, *Revista USP*, 31 de janeiro, 167-175.

Aguiar, Odylio D.; Oliveira Jr., Nei F. de; Frossati, Giorgio; De Araujo, José Carlos N.; Miranda, Oswaldo D.; Marinho Jr., Rubens de M.; Magalhães, Nadja S.; Frajuca, Carlos; de Souza, Sergio T. and Furtado, Sérgio R. (2002b), The Gravitational Wave Detector ‘Mario Schenberg’: Status of the Project, *Brazilian Journal of Physics*, 32, 866-868.

Aguiar, Odylio D.; Velloso Jr., Walter F.; Mosquera-Cuesta, Herman Julio; de Araujo, José Carlos; Horvath, Jorge Ernesto; Freitas-Pacheco, José Antonio; Novello, Mario;

Freitas, Luciene R.; Magalhães, Nadja S.; Frajuca, Carlos; Escobar, Carlos O.; Oliveira, Samuel R. e Araújo, Marcelo E. (1996), “Objetivos Científicos do Telessensor de Ondas Gravitacionais”, comunicação 22ª Reunião Anual da SAB, *Boletim da SAB*, 16, 164.

Aguiar, Odylio D.; Villela Neto, Thyrso; Neri, José Angelo C. F.; Cattani, Mauro S. D.; Escobar, Carlos O.; Magalhães, Nadja S.; de Araujo, José Carlos N.; Freitas-Pacheco, José Antônio; Raffaelli, George; Velloso Jr., Walter F.; Chinelatto, José A.; Turtelli Jr, Armando; Novello, Mário; de Oliveira, Luis Alberto R.; Pinto Neto, Nelson; Santoro, Alberto F. S.; Soares, Ívano, D.; Svaiter, Nami F.; Lemos, José, P.S.; Santos, Nilton, Oscar S.; Rapp, Raul E.; Maia, Marcos; Vilhena, Rodolpho; Bruno, Antonio Carlos; Costa Ribeiro, Paulo E. L. e Silva, Mariano (1992), “Projeto Gráviton — Astrofísica de Ondas Gravitacionais no Brasil” in *Anais da 44ª Reunião anual da SBPC*, SBPC.

Amaldi, Edoardo; Aguiar, Odylio D.; Bassan, Massimo; Bonifazi, P.; Carelli, P.; Castellano, M. G.; Cavallari, G.; Coccia, Eugenio; Cosmelli, C.; Fairbank, William M.; Frasca, Sergio; Foglietti, V.; Habel, R.; Hamilton, William O.; Henderson, J.; Johnson, Warren; Lane, K. R.; Mann, Antony G.; McAshan, M. S.; Michelson, Peter F.; Modena, Ivo; Pal-lottino, G. V.; Pizzella, Guido; Price, John C.; Rapagnani, R.; Ricci, Fulvio; Solomonson, Norbert; Stevenson, Thomas R.; Taber, R. C. and Xu, Bu-Xin (1989), First gravity wave coincidence experiment between resonant cryogenic detectors — Louisiana-Rome-Stanford, *Astronomy and Astrophysics*, 216, 325-332.

Costa, César A.; Aguiar, Odylio D.; Oliveira Jr., Nei F.; Gratens, Xavier; de Souza, Sérgio T. and Furtado, Sergio R. (2008), The Schenberg data acquisition and analysis: results from its first commissioning run, *Classical and Quantum Gravity*, 25, 184002.

de Araujo, José Carlos N.; Aguiar, Odylio D.; Alves, Márcio E. S. and Tinto, Massimo (2013), Searching for Gravitational Waves with a Geostationary Interferometer, *Astroparticle Physics*, 48, 50-60.

de Araujo, José Carlos N.; Aguiar, Odylio D.; Miranda, Oswaldo D. e Marranghello, Guilherme Frederico (2006), “Detecção por Ondas Gravitacionais”, *Scientific American Brasil*, 31 de maio, 60-65.

Heaviside, O. (1893), *Electromagnetic Theory*, New York: Dover Publications, Inc.

Johnson, W. W. and Merkowitz, S. M. (1993), Truncated icosahedral gravitational wave antenna, *Phys. Rev. Lett.*, 70, 2367-2370.

Lorentz, H. A. (1900), Consideration sur la pesanteur, *Versl. K. Akad. Wet Amsterdam*, 8, 603.

Novello, Mario; De Lorenci, Vitorio A.; Freitas, Luciene R. and Aguiar, Odylio D. (1999), The Velocity of Gravitational Waves, *Physics Letters*, A 254, 245-250.

Poincaré, M. (1905), Sur la dynamic de l'Électron, *Rend. Circolo Matematico di Palermo*, 21, 129-175.

Soares, Ivano D.; Oliveira, Henrique P. and Tonini, Eduardo V. (2006), Black Hole Bremsstrahlung: can it be an efficient source of gravitational waves?, *International Journal of Modern Physics D*, 15, 2203-2208.

Velloso Jr., Walter F.; Aguiar, Odylio D. and Magalhães, Nadja S., Eds. (1997), *Proceedings of the First International Workshop for an Omnidirectional Gravitational Radiation Observatory*, São José dos Campos, SP, Brazil, 26-31 May 1996, River Edge, NJ: World Scientific.

