UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Física

*“O detector de ondas gravitacionais Mario
Schenberg: uma antena esférica criogênica com
transdutores paramétricos de cavidade fechada”*

Sérgio Turano de Souza

Tese apresentada ao Instituto de
Física da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título
de Doutor em Ciências.

Orientador:

Prof. Dr. Odylio Denys de Aguiar

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Armando Paduan – IFUSP

Prof^a. Dr^a. Fátima Salete Correra – POLI – USP

Prof. Dr. Luis Raul Weber Abramo – IFUSP

Prof. Dr. Odylio Denys de Aguiar – INPE

Prof. Dr. Rubens de Melo Marinho Junior - ITA

São Paulo
2012

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus agradecimentos às pessoas cujos ensinamentos, assistências e encorajamentos contribuíram para que este trabalho fosse realizado. Primeiro gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Odylio Denys de Aguiar pelo apoio, dedicação e por guiar o Projeto GRAVITON. Ao Prof. Nei Fernandes de Oliveira Júnior pela oportunidade e ensinamentos. Aos colegas do Projeto, que compartilham os mesmos objetivos: Dr. Xavier P. M. Gratens, Dr. Fabio da Silva Bortoli, Dr. Sergio Ricardo Furtado (*in memoriam*), Ms. Leandro de Paula e todos os outros.

Aos funcionários do LESBT: Olimpio Ribeiro da Fonseca Neto, Walter Soares de Lima, Carlos Alberto Barioni “Carlinhos”, Eronides Alves de Almeida “Eron”, Cecília Aparecida Cavalheiro Maia, Rui Fernandes de Oliveira, Vagner Aparecido Braghim, Marco Antônio Meira “Marcão”, Paulo Sérgio Martins da Silva “Magoo”, Tatiana Costa Lacerda Dejean, Francisco de Paula Oliveira “Paulinho”, etc.

Aos professores Dr. José Carlos da Silva Lacava e Dr. José Kleber da Cunha Pinto que me ajudaram muito na parte eletrônica.

Obrigado a todos

Sergio

Dedicatória

Se você também está lendo isto, todo o trabalho aqui é dedicado a você.

RESUMO

A existência de ondas gravitacionais foi confirmada indiretamente pela observação astronômica de pulsares binários. Detectores de ondas gravitacionais tem sido desenvolvidos desde o trabalho pioneiro de Weber nos anos 60. Esforços estão sendo realizados no sentido de aumentar a sensibilidade dos detectores e realizar uma detecção direta, que ainda não foi confirmada.

O Grupo GRAVITON está aperfeiçoando e melhorando a sensibilidade de um detector de ondas gravitacionais que se encontra no Laboratório de Estado Sólido e Baixas Temperaturas do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (LESBT/IFUSP), na cidade de São Paulo com apoio da FAPESP (processo 2006/56041-3). Esse detector, denominado MARIO SCHENBERG, é composto por uma massa ressonante esférica de CuAl(6%) com 65 cm de diâmetro, com aproximadamente 1150 kg, que deverá atingir a sensibilidade $h \sim 10^{-22}$ ($h = 2\delta\ell/\ell$) em uma banda passante de 50 Hz, em torno de 3200 Hz, quando estiver operando a temperaturas da ordem de 0,05 K. Atualmente o detector já tem toda a sua infraestrutura criogênica montada e testada para resfriamentos a 4 K e toda a suspensão da esfera bem como todo o sistema de filtragem mecânica construídos e montados.

Já foram realizadas as primeiras corridas comissionadas em 2006, 2007 e 2008, quando foram realizados vários diagnósticos sobre o sistema e desde então vem sendo desenvolvidos os transdutores para colocar o detector novamente em operação com melhor sensibilidade. Paralelamente, foram realizadas melhorias no próprio detector em razão dos diagnósticos realizados.

O trabalho aqui apresentado está associado ao projeto acima. O autor desenvolveu atividades associadas à construção e desenvolvimentos do detector, que podem ser divididas em três partes principais: na parte mecânica, foi desenvolvido, instalado e testado um novo sistema de isolamento vibracional da suspensão da esfera; na parte criogênica foram feitas novas conexões térmicas, cálculos de gastos de hélio líquido e feitos

desenvolvimentos para o funcionamento do refrigerador por diluição; e na parte eletrônica foi feita a instalação da eletrônica responsável pela transdução do sinal, além do desenvolvimento de um novo par de antenas de microfita.

ABSTRACT

The existence of gravitational waves has been confirmed indirectly by astronomical observation of binary pulsars. Gravitational wave detectors have been developed since the pioneering work of Weber in the 60s. Efforts are being made to increase the sensitivity of the detectors and perform a direct detection, wich has not been confirmed yet.

The GRAVITON Group is enhancing and improving the sensitivity of a gravitational wave detector which is at the Laboratório de Estado Sólido e Baixas Temperaturas of the Instituto de Física of the Universidade de São Paulo (LESBT / IFUSP), in São Paulo city and is supported by FAPESP (processo 2006/56041-3). This detector, called MARIO SCHENBERG, consists of a spherical resonant mass of CuAl (6%) with 65 cm in diameter, and approximately 1150 kg, which should reach the sensitivity of $h \sim 10^{-22}$ ($h = 2\delta\ell/\ell$) in a bandwidth of 50 Hz around 3200 Hz, when operating at temperatures of 0.05 K. Currently the detector already has all its infrastructure assembled and tested for cryogenic cooling down to 4 K and the whole suspension of the sphere as well as all mechanical isolation system constructed and assembled.

Commissioning runs have already been done in 2006, 2007 and 2008, when several diagnoses on the system were performed and since then there have been many developments on the transducers to put back the detector into operation with improved sensitivity. At the same time, improvements have been made within the detector itself due to the diagnoses.

The work presented here is associated with the above project. The author has developed activities and developments associated with the detector construction, which can be divided into three main parts: the mechanical part, in which a new system of vibration isolation was designed for the sphere suspension, installed and tested; the cryogenic part, in which new connections and thermal calculations of liquid helium boil-off rate were made as well as other developments for the operation of a dilution refrigerator; and the

electronic part, in which the installation of the electronic signal responsible for the transduction was made, besides the development of a new pair of micro-strip antenna.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	8
2. ONDAS GRAVITACIONAIS	12
2.1 O que são ondas gravitacionais?	13
2.2 Detectores de ondas gravitacionais	18
2.3 O detector Mario SCHENBERG	20
2.3.1 A esfera e as massas de filtragem	22
2.3.2 O transdutor paramétrico	23
3. MECÂNICA	25
3.1 A haste de sustentação	26
3.2 O sistema de isolamento vibracional	28
3.2.1 Segurança e facilidade de montagem	29
3.2.2 Transferência de calor	30
3.2.3 Função de transferência do isolamento vibracional	30
3.2.3.1 Função de transferência do sistema de isolamento com “C’s”	32
3.2.3.2 Função de transferência do sistema de isolamento com barras	34
4. CRIOGENIA	43
4.1 Resfriamentos 2005-2006	44
4.2 Resfriamento 2008	47
4.3 O refrigerador por diluição	50
4.3.1 Princípio de operação	50
4.3.2 O refrigerador do detector	53
5. ELETRÔNICA	60
5.1 Eletrônica nas primeiras corridas comissionadas	61
5.2 Cabeamento e Fiação	63
5.3 Termorresistores	66
5.4 Antenas de microfita	67
5.4.1 Antena de microfita no detector SCHENBERG	69
5.4.2 Antena de microfita – Desenvolvimentos teóricos	75
5.4.2.1 Patch retangular	75
5.4.2.1.1 Localização do ponto de inserção	78
5.4.2.2 Novo modelo de antena com um patch retangular	80
5.4.2.3 Antena de microfita circular	83
5.4.2.4 Antenas de microfita com patches triangulares	85
5.4.3 Antenas de microfita – Desenvolvimentos práticos	87
5.4.3.1 Antena de microfita no detector SCHENBERG	88
5.4.3.2 Construção e testes	92
6. CONCLUSÕES	102
7. REFERÊNCIAS	104

1. INTRODUÇÃO

A comunidade científica internacional está convencida da existência de ondas gravitacionais. Ondas gravitacionais foram previstas pela teoria da relatividade geral de Einstein e outras teorias da gravitação e sua primeira detecção e observação regular estão, certamente, entre os objetivos científicos e desafios tecnológicos mais importantes deste início de milênio. Elas vão abrir uma nova janela para a observação do Universo.

As ondas gravitacionais são, segundo a Teoria da Relatividade Geral, perturbações na curvatura local do espaço-tempo que viajam pelo vácuo à velocidade da luz. Essas ondas são produzidas por qualquer distribuição não esférica de massa-energia sofrendo aceleração e cobrem um espectro de mais de 20 ordens de grandeza em frequência. Depois de várias décadas de desenvolvimento, chegamos a um estágio tecnológico em que a sensibilidade prevista dos dispositivos de detecção sendo construídos atinge valores compatíveis com as previsões teóricas. Assim, é de se prever que em futuro próximo estas ondas venham a ser detectadas, e que este fato produza um novo patamar em áreas das ciências físicas como a Astronomia e a Cosmologia.

Países em todo o mundo, como Estados Unidos, Alemanha, Itália, Reino Unido, Holanda, Japão e Austrália estão envolvidos em um esforço para desenvolver detectores com sensibilidade suficiente para detectar as primeiras ondas gravitacionais. Existem dois tipos de detectores, os de massa-ressonante e por interferometria a laser. No Brasil, foi criado o Projeto GRAVITON que propõe a construção de um detector de ondas gravitacionais, do tipo massa ressonante, de uma nova geração, operando em frequência de 3,2 kHz. Um financiamento da FAPESP permitiu a implementação deste projeto.

O detector proposto no Projeto GRAVITON difere dos já construídos, com exceção do holandês MiniGRAIL, por ser esférico e super-resfriado. Até aqui os detectores ressonantes construídos são cilíndricos e feitos de uma liga de alumínio, com exceção do projeto australiano NIOBE, com um cilindro feito de nióbio. A forma esférica é muito mais apropriada ao caráter quadrupolar das ondas gravitacionais, propiciando um ganho de quase duas ordens de grandeza na seção de choque para transferência de energia¹. A utilização de

uma liga de cobre, por sua vez, permite um resfriamento mais eficiente permitindo temperaturas finais bem menores do que a das antenas de alumínio².

A necessidade de ultra baixas temperaturas (pretende-se uma temperatura final de 20 mK) tornou natural o envolvimento do LESBT, o Laboratório de Estado Sólido e Baixas Temperaturas da USP, com sua infraestrutura e tecnologia criogênica. É nele que se está desenvolvendo a construção do SCHENBERG, o primeiro do projeto GRAVITON. Uma figura do detector SCHENBERG é mostrada na Figura 1.

Figura 1 - Ilustração do detector de ondas gravitacionais Mario SCHENBERG.

Com relação às fontes de ondas gravitacionais, espera-se poder detectar eventos tais como: formação de estrelas compactas em supernovas; excitações de alguns modos de estrelas de nêutrons; excitações dos modos quasi-normais de buracos negros de 4-9 massas

solares; e instabilidades de estrelas de nêutrons em alta rotação³. As fontes previstas hoje são provavelmente apenas uma fração do que mediremos quando os detectores atingirem a sensibilidade suficiente.

Nesta tese relatamos os desenvolvimentos ocorridos em de toda a infraestrutura mecânica, criogênica e eletrônica da antena. Desde o primeiro resfriamento (a 4 K) até o ponto atual na instalação do sistema para temperaturas de 1 K; e a instalação de eletrônica requerida no sistema de transdução da antena. Um destaque é o projeto de antenas de microfita que fazem parte da instalação eletrônica e necessitaram de pesquisa e desenvolvimento.

O texto está dividido nas seguintes partes:

1. INTRODUÇÃO;
2. ONDAS GRAVITACIONAIS;
3. MECÂNICA;
4. CRIOGENIA;
5. ELETRÔNICA;
6. CONCLUSÕES;
7. REFERÊNCIAS.

2. ONDAS GRAVITACIONAIS

2.1 O que são ondas gravitacionais?

Ondas gravitacionais são distorções da métrica do espaço-tempo, que se propagam com a velocidade da luz, segundo a teoria da Relatividade Geral de Einstein, e foram previstas por esta teoria em 1916, mas nunca foram diretamente detectadas. Elas interagem muito fracamente com a matéria e assim chegam até nós na sua forma original, nos dando informação direta de suas fontes, como explosões de supernovas, formação de buracos negros, instabilidades de estrelas de nêutron, etc ⁴.

Pouco após a confirmação da existência das ondas eletromagnéticas por Hertz em 1887, estudos foram realizados sobre a existência das ondas gravitacionais. Os principais foram realizados por Heaviside em 1893, Lorentz em 1900 e Poincaré em 1905. Entretanto, só foi possível chegar à equação matemática das ondas gravitacionais com a formulação da teoria da Relatividade Geral. Em 1916, Einstein previu a existência das ondas gravitacionais a partir da solução das equações de campo da teoria da Relatividade Geral, dadas por ⁵:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu\nu} + \lambda$$

onde,

$R_{\mu\nu}$ representa a curvatura do espaço-tempo (tensor de Ricci)

$T_{\mu\nu}$ é o tensor matéria-energia

$g_{\mu\nu}$ é a métrica do espaço-tempo

R é o escalar de curvatura

G é constante universal da gravitação

c é a velocidade de propagação da luz no vácuo

λ é o termo da constante cosmológica.

Desprezando a constante cosmológica λ , e sabendo-se, que no vácuo o tensor energia-momento $T_{\mu\nu} = 0$ (ausência de matéria), podemos reescrever as equações de campo de forma mais simples:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = G_{\mu\nu} = 0$$

onde, $G_{\mu\nu}$ é o tensor de Einstein.

As equações são diferenciais de segunda ordem, isto torna difícil obter uma solução analítica para elas. Entretanto, soluções aproximadas podem ser obtidas a partir de métodos numéricos computacionais.

A aproximação de campo fraco, é empregada em regiões onde a distribuição de massa na vizinhança de interesse é muito menor do que o raio da distribuição de massa multiplicado por c^2/G , ou seja, onde o campo gravitacional é fraco. Neste caso, o espaço é aproximadamente plano e o tensor métrico pode ser escrito como

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

onde, $\eta_{\mu\nu}$ é a métrica de Minkowsky e $h_{\mu\nu} \ll 1$ é uma perturbação da métrica do espaço-tempo que corresponde à amplitude da onda gravitacional.

Definindo,

$$\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} h \text{ (condição de Lorentz)}$$

e substituindo na equação obtemos:

$$\square^2 \bar{h}_{\mu\nu} = 0$$

onde $\square^2 \equiv \left(\frac{-1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2 \right)$, é o operador d'Alambertiano.

O tensor $h_{\mu\nu}$ possui divergência nula (*gauge* de Lorentz), não têm traço e é transverso a direção de propagação da onda.

A equação de $\square^2 \bar{h}_{\mu\nu}$ admite uma solução da forma: $\bar{h} = A_{\mu\nu} e^{[ik(z-ct)]}$, a qual

representa uma onda monocromática propagando-se ao longo da direção $+z$ à velocidade da luz c , com frequência $\omega = kc$, transportando energia e momento. Estas ondas, distorções na curvatura do espaço-tempo, são chamadas de ondas gravitacionais.

Ainda segundo a teoria da Relatividade Geral, ondas gravitacionais são ondas transversais que se propagam perpendicularmente ao plano de deformação; e tem como primeiro momento, o momento de quadrupolo. Elas ocorrem em dois estados de polarização, usualmente conhecidos como “ $\times$ ” e “ $+$ ” (“cruz” e “mais”). A polarização “ $\times$ ” indica uma diferença de 45° no espaço, em relação à polarização “ $+$ ”.

Isto significa que uma onda gravitacional plana propagando-se na direção z , segundo a Relatividade Geral, produziria uma deformação em um conjunto de partículas teste dispostas no formato de uma circunferência ou anel no plano xy (perpendicular à direção de propagação da onda), que poderia ser decomposta nas duas componentes h_+ e $h_\times$ de polarização. A Figura 2 mostra o efeito da interação de uma onda gravitacional com polarização linear “ $+$ ” e “ $\times$ ” com um anel formado de partículas teste, posicionado em um plano perpendicular à direção de propagação da onda.

Figura 2 - A distorção de um anel de partículas teste durante um ciclo de uma onda propagando-se na direção z . Os eixos x e y são paralelos à folha de papel. As duas polarizações são equivalentes, exceto por uma rotação de 45° em torno do eixo de propagação.

À medida que a onda propaga-se no eixo z , passado um quarto do ciclo, ela distorce o anel circular de partículas para o formato de uma elipse. Meio período de onda mais tarde distorce o anel de partículas para o formato de uma elipse perpendicular à anterior. Após a passagem de um ciclo completo da onda o anel de partículas volta ao seu formato inicial. A amplitude de uma onda gravitacional é medida pela diferença relativa de espaço entre as massas. Isto é, a amplitude da onda h é dada por $2\delta\ell/\ell$, onde ℓ é o espaço em equilíbrio e $\delta\ell$ é a variação de espaço entre duas massas.

O problema com a detecção das ondas gravitacionais é que, mesmo para as ondas mais intensas previstas, a distorção de comprimento provocada é muito pequena. O fraco acoplamento das ondas gravitacionais com a matéria é consequência da enorme rigidez elástica do espaço-tempo. Como exemplo, as deformações previstas para ondas gravitacionais geradas pela explosão de uma supernova no centro de nossa galáxia ⁶ é $h \sim 10^{-18}$. Ou seja, a deformação causada em um detector de um metro de comprimento é $\sim 10^{-18}$ m, que é 1 mil vezes menor que o diâmetro de um próton.

A Astrofísica nos fornece uma série de sistemas candidatos com frequências de 10^{-18} Hz até 10^{10} Hz, que devem ser observáveis no espectro das ondas gravitacionais. Entre os candidatos, espera-se detectar radiação gravitacional da formação de buracos negros e estrelas de nêutron, da coalescência de sistemas binários de estrelas de nêutron e do colapso final destes binários na formação de buracos negros. Devemos esperar não apenas fontes discretas, mas também sinais de fundo contínuas, criados por um grande número de fontes discretas. Também podem ser possíveis de observar ondas gravitacionais da era inflacionária do *big bang*.

As fontes astrofísicas e cosmológicas de ondas gravitacionais são classificadas em três tipos: *fontes impulsivas*, as que apresentam poucos ciclos coerentes e uma largura de banda grande. Neste caso, os sinais emitidos mantêm a coerência durante um tempo correspondente a poucos ciclos da onda (exemplos: o colapso de uma estrela resultando em uma estrela de nêutrons ou um buraco negro, a coalescência de binárias compactas e a queda de estrelas, ou pequenos buracos negros, em buracos negros massivos) ⁷; *fontes*

periódicas que emitem sinais periódicos contínuos e mantêm a coerência durante um tempo longo (exemplos: a rotação de estrelas de nêutrons ou pulsares axialmente assimétricos e os sistemas binários ⁸⁾; e *fontes estocásticas* que emitem sinais estocásticos que correspondem à somatória de uma distribuição aleatória, portanto não coerente de sinais (exemplos: o *background* causado por sistemas binários na Via Láctea e em galáxias próximas e as ondas gravitacionais primordiais oriundas do período inflacionário do Universo ou oriundas de cordas cósmicas ou colisões de bolhas ⁹⁾). Um gráfico do espectro das fontes de ondas gravitacionais é mostrado da Figura 3.

Figura 3 - Espectro das fontes de ondas gravitacionais, com as sensibilidades dos detectores LISA e LIGO. Graphic (c) by LISA Science Case LISA-LIST-RP-436 Version 1.0.

Embora uma detecção direta de ondas gravitacionais esteja ainda por ser feita, existem evidências indiretas comprovadas. A binária pulsar PSR 1913+16, descoberta em 1974 por Hulse e Taylor é o melhor exemplo ¹⁰⁾. O monitoramento contínuo desde então vem demonstrando que o decrescimento do período orbital coincide, com grande precisão, à perda de energia sob forma de ondas gravitacionais previstas pela teoria de Einstein ²⁾. Por este trabalho, ambos foram agraciados com o Prêmio Nobel em 1993.

2.2 Detectores de ondas gravitacionais

Meio século após a previsão de Einstein, Joseph Weber realizou um trabalho pioneiro de construção do primeiro detector de ondas gravitacionais ¹¹. A componente chave do detector de Weber era uma pesada barra cilíndrica, de uma liga de alumínio com um alto fator de qualidade mecânica, isolada o máximo possível de vibrações externas. Weber, em 1969, operando com dois detectores distantes aproximadamente 1000 km um do outro ¹² registrou eventos coincidentes entre os dados fornecidos pelos dois instrumentos que ele considerou como “evidências de ondas gravitacionais”.

A detecção de ondas gravitacionais empregando a técnica de massa ressonante consiste em monitorar os modos normais de vibração de corpos rígidos, geralmente barras cilíndricas ou esferas, por transdutores eletromecânicos. Quando uma onda gravitacional atinge uma massa ou antena ressonante, ela transfere energia para a mesma. A energia transferida excita os modos fundamentais (frequências características de oscilação da massa ressonante). Uma medida dos deslocamentos relativos das massas é uma medida da onda. As oscilações produzidas na antena são então convertidas em sinais elétricos pelos transdutores eletromecânicos e enviadas para um sistema de aquisição de dados. A idéia de uma massa ressonante esférica é de detectar não apenas a amplitude da onda gravitacional, mas também a direção da onda e a sua polarização.

Desde os primeiros relatos de Weber, que nunca foram confirmados, a melhoria nos detectores foi muito grande. Novas antenas ressonantes foram construídas, com a mesma geometria, mas com tecnologia mais moderna e operando em baixas temperaturas e por isso melhorando muito a sensibilidade. Podemos citar as antenas deste tipo construídas até agora: a batizada com o nome de NAUTILUS em Frascati, Itália; a AURIGA em Legnaro, também na Itália; a EXPLORER também operada por um grupo italiano, mas nos laboratórios do CERN na Suíça; ALLEGRO, em Baton Rouge, Louisiana nos Estados Unidos; e NIOBE em Perth na Austrália. Todas alcançam uma sensibilidade de $h = 2\delta\ell/\ell \sim 10^{-19}$ para sinais impulsivos ¹, e a mais fria (Nautilus) opera perto de 0,1 K.

Uma grande melhoria das antenas pós-Weber deu-se nos transdutores, que transformam as vibrações mecânicas das barras em sinais elétricos. Os cristais piezelétricos utilizados por Weber foram substituídos por dispositivos mais complexos e muito mais sensíveis. A melhoria na sensibilidade dos transdutores obrigou a melhorias nos sistemas de isolamento mecânico e ao resfriamento a temperaturas cada vez mais baixas. A sensibilidade atual, em princípio, seria suficiente para detectar grandes eventos em nossa galáxia, como explosões de supernovas. Infelizmente a previsão otimista para a ocorrência de tais eventos é da ordem de um em dez anos, o que torna uma detecção um evento relativamente raro.

Outra técnica também utilizada é a da interferometria laser. Que consiste em dois braços em formato de “L” com espelhos no final e lasers percorrendo o caminho. Seis detectores deste tipo estão espalhados pelo mundo em operação ou em fase de construção. Os braços destes interferômetros variam de 300 m a 4 km. Os caminhos ópticos (distâncias entre os espelhos) dos dois braços são ajustados para que exista o cancelamento perfeito entre os dois feixes luminosos que percorreram cada um dos dois braços. A onda gravitacional, quando chega na direção e polarização adequadas, causa uma variação relativa entre esses caminhos ópticos, modificando a situação de interferência perfeita, permitindo que alguma luz chegue até o fotodetector, acusando, desta forma, a passagem da onda gravitacional.

O projeto americano, batizado de LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) é o maior deles com dois interferômetros de 4 km de comprimento, um localizado ao centro-sul (Hanford, no estado de Washington) e outro no noroeste do país (Livingston, Louisiana). Há ainda projetos semelhantes na Alemanha (GEO600 em Hannover), Itália (VIRGO), Japão (TAMA300). Ainda em construção temos na Austrália (AIGO – *Australian International Gravitational Observatory*) e outro no Japão (LCGT – *Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope*) e a possibilidade da construção de mais um na Índia (INDIGO). Em sua primeira fase, o LIGO deverá atingir sensibilidades de $h \sim 10^{-21}$ para sinais impulsivos em frequências em torno de 2×10^2 Hz¹³. Os detectores interferométricos têm como principal vantagem o fato de atuarem em uma faixa larga de

frequência, bem mais larga que os de massa ressonante. Por outro lado apresentam algumas desvantagens em relação aos de massa ressonante como: serem cegos para certas direções e polarizações das ondas gravitacionais; serem muito mais caros; e não poderem responder sobre a quantização das ondas gravitacionais, enquanto os de massa ressonante poderão.

Outro projeto importante, são os detectores espaciais já em desenvolvimento. Um é o LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*), uma produção em conjunto da NASA e da ESA e será um interferômetro com braços em forma de triângulo equilátero de 5 milhões de quilômetros de comprimento, com a finalidade de detectar ondas na faixa de 0,03 miliHertz a 0,1 Hz ¹⁴ e lançamento previsto para 2020. Outro é o DECIGO (*DECI-hertz Interferometer Gravitational-wave Observatory*) japonês previsto para 2027. E ainda o projeto *Einstein Telescope* (ET) europeu, em forma de triângulo, mas debaixo da Terra ¹⁵.

O programa brasileiro se encaixa neste quadro de forma sensata. As características novas dos detectores ressonantes propostos propiciam previsões de ganhos que os colocam no mesmo nível de sensibilidade dos demais interferômetros que estão sendo construídos, embora em uma faixa de frequência muito mais estreita. Assim, será possível contribuir, além de dados de ondas gravitacionais, com a direção delas, o que é muito importante. Vale ressaltar também aqui que o projeto brasileiro tem parceiros fora. Projetos de antenas idênticas estão sendo desenvolvidos, um na Holanda e outro na Itália. O projeto em Leiden na Holanda, dirigido pelo Prof. G. Frossati, desenvolve-se em contato estreito com o nosso.

2.3 O detector Mario SCHENBERG

O detector Mario SCHENBERG consiste em uma antena esférica de 1150 kg e 65 cm de diâmetro feita de CuAl (94%-6%) ¹⁶, que será equipada com nove transdutores paramétricos de cavidade fechada de dois modos, para monitorar as vibrações da antena. A frequência de ressonância é 3,2 kHz e a faixa de detecção, com transdutores de dois modos, é de 3,17 a 3,23 kHz.

O vaso criogênico, ou *dewar*, foi projetado pelo Prof. G. Frossati e colaboradores e é uma das peças mais importantes do projeto, pois deve proporcionar um espaço criogênico para a esfera de 65 cm de diâmetro e para o sistema de isolamento vibracional, com um total em torno de 2 toneladas.

O *dewar* é em sua maioria é feito de alumínio e plástico que, vazio, tem cerca de 800 kg. O diâmetro externo é de 1 metro e a altura é de 3 metros, dividida em duas partes iguais. A parte superior do criostato contém os reservatórios de hélio líquido e de nitrogênio líquido. O tanque de hélio tem uma capacidade de 340 litros e o de nitrogênio de 205 litros. Todas as conexões do *dewar* estão na parte superior. O criostato é organizado em duas câmaras de vácuo: a câmara de vácuo externa (OVC – *outer vacuum chamber*) e a câmara de vácuo interna (IVC – *internal vacuum chamber*). A OVC funciona como uma câmara de isolamento entre o meio ambiente e o espaço interno e entre os reservatórios de nitrogênio e hélio líquido. A IVC proporciona um espaço de vácuo para a esfera e o sistema de isolamento vibracional.

O detector está em uma das salas do Edifício Mario Schenberg do IFUSP, que foi reservada para a instalação da antena. Para acomodar toda a estrutura de suporte foi construído um fosso que rebaixa o piso em 1,8 metros e um sistema hidráulico que pode erguer em 2,0 m a base de concreto de 4 toneladas onde está apoiado o *dewar*, a esfera, as massas e todo o restante do detector, com uma massa aproximada total de 6,5 toneladas.

Figura 4 - O Detector de Ondas Gravitacionais Mario SCHENBERG.

2.3.1 A esfera e as massas de filtragem

Uma pequena vibração induzida na esfera devido à passagem de uma onda gravitacional é facilmente mascarada não apenas pelo ruído térmico (fazendo-se necessário esfriar a esfera), mas também por ruídos acústicos e mecânicos. O ruído acústico vindo de todo o meio ambiente do laboratório é suprimido colocando-se a esfera em uma câmara de vácuo. O maior desafio é reduzir o ruído mecânico devido a vibrações do solo, causado por qualquer veículo em movimento ou uma pessoa andando perto da antena e, principalmente, pelo ruído sísmico. Para minimizar o problema, a suspensão da esfera incorpora um sistema de filtros mecânicos constituídos basicamente por uma sucessão de conjuntos massas mola que se constituem em um filtro passa-baixa.

A esfera de 650 mm de diâmetro e feita de uma liga de cobre com 6% de alumínio é erguida por uma haste presa à um sistema de isolamento vibracional. O sistema é composto de cinco massas de 120 kg cada, sendo duas de cobre e três de CuAl6%. Os desenvolvimentos do novo sistema de isolamento vibracional são mostrados no Capítulo 3.

Figura 5 - A esfera e o sistema de isolamento vibracional durante a montagem.

2.3.2 O transdutor paramétrico

Cada um dos cinco modos quadrupolares da esfera tem uma massa efetiva de oscilação de 287 kg ¹⁷. Os transdutores são acoplados com estes modos e apresentam uma primeira massa oscilante de 53,6 g e uma segunda de 10 mg. Todas as massas estão afinadas a uma frequência de ressonância de 3,2 kHz.

O transdutor corresponde ao dispositivo que transforma a energia mecânica em energia elétrica, ou seja, as vibrações mecânicas em um sinal elétrico detectável. No detector SCHENBERG decidiu-se utilizar um transdutor do tipo paramétrico.

Transdutores paramétricos, como os projetados para o detector SCHENBERG, são transdutores “bombeados” com sinais AC, que utilizam a variação de um parâmetro do circuito que relaciona uma variável mecânica com uma variável elétrica de forma não linear¹⁸. Uma característica do transdutor paramétrico é que ocorre uma amplificação de potência no processo de transdução, pelo fato de que a informação da oscilação mecânica é transduzida da frequência da antena ($\sim 3,2$ kHz) para a frequência do oscilador (~ 10 GHz).

Um exemplo de transdutor paramétrico do tipo cavidade reentrante em frequência de micro-ondas, já esteve em funcionamento no detector NIOBE, localizado na University of Western Austrália (UWA).

O sistema de transdução do detector Mario SCHENBERG consistirá de seis a nove transdutores fixados na superfície da esfera e as suas respectivas eletrônicas de amplificação, demodulação e digitalização, que irão operar de forma independente. Para evitar que ruídos sísmicos cheguem à esfera através do cabeamento dos transdutores, a conexão entre os transdutores e as suas respectivas eletrônicas (do sinal portador e amplificação do sinal modulado) é feita através de pares de antenas de microfita, um para cada transdutor, que devem ter a melhor transmissão possível e menor perda na região da frequência de ressonância da cavidade.

O princípio de transdução entre a antena de microfita e o transdutor, pode ser resumido assim: um sinal (portadora) entre 10,0 e 10,5 GHz é produzido por um oscilador de baixo ruído de fase. O sinal entra no *dewar* por *feed-throughs* e por cabos coaxiais de aço inox, chegam até a região fria do criostato e é enviado para a cavidade reentrante do transdutor através do par de antenas de microfita.

As vibrações na esfera, provocadas pelas ondas gravitacionais, modulam a frequência ressonante do transdutor, o qual, por sua vez, modula o sinal do oscilador, produzindo bandas laterais. As bandas laterais são as que transportam a informação. As bandas laterais e o sinal da portadora (oscilador) retornam. Este sinal é analisado, em busca da presença de ondas gravitacionais.

3. MECÂNICA

A fim de se medir movimentos da ordem de 10^{-20} metros, vibrações sísmicas devem ser filtradas a este nível na frequência de ressonância da esfera (3,2 kHz). Isto está sendo feito suspendendo a esfera através de um sistema de isolamento vibracional, que consiste em um conjunto de massas e molas. A frequência do sistema massa-mola é determinada pela massa e pela constante elástica da mola. A função de transferência do sistema pode ser determinada excitando a base na qual a mola está suspensa e medindo a resposta na massa suspensa.

3.1 A haste de sustentação

A primeira modificação realizada após os primeiros testes criogênicos realizados em 2002 e demonstrados detalhadamente na referência ¹⁵, foi a substituição da haste de aço inox que sustentava todo o conjunto massa-mola. O primeiro resfriamento mostrou que a transmissão de calor através da haste permitia uma considerável entrada de calor, impedindo que a esfera permanecesse fria. A primeira pesquisa feita foi a busca de um material que respeitasse três regras: que fosse mais resistente que o aço inox, que apresentasse baixa condutividade térmica e cujas propriedades permitissem que fosse resfriado até baixas temperaturas mantendo as características mecânicas.

O material escolhido foi uma liga de titânio-vanádio (90Ti 6Al 4V). O material foi levado a um ensaio de tração, que foi realizado pelo Laboratório de Avaliação Mecânica de Materiais e Componentes/AMAEI/DME do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Uma amostra da haste de aço inox que estava sendo utilizada anteriormente também foi levado para termos de comparação. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Medidas da resistência à tração de barra de aço inox e da liga 90Ti 6Al 4V realizadas no IPT.

	Aço Inox 1	Aço Inox 2	90Ti 6Al 4V
Corpo-de-prova (diâmetro)	$\varnothing 1/2''$	$\varnothing 5/8''$	$\varnothing 5/8''$
Resistência à tração (MPa)	610 ± 4	762 ± 4	979 ± 8
Alongamento após a ruptura em 40 mm (%)	$56,8 \pm 0,9$	$42,7 \pm 0,8$	$20,0 \pm 0,7$

Face à característica de 979 MPa de resistência de tração da barra de titânio-vanádio, permitiu-se diminuir o diâmetro da haste de aço inox de $3/4''$ (~19 mm) para 11 mm de titânio para sustentar os aproximadamente 1800 kg do sistema esfera/massas, mantendo um grau de segurança maior do que quatro.

O segundo passo realizado, para se diminuir a entrada de calor na esfera pela haste, foi a partição da mesma em seções, aumentando o contato entre a haste e os tanques de nitrogênio e de hélio. Substituiu-se a haste de aço inox de 1580 mm de comprimento e 19 mm de diâmetro por 3 hastes de titânio com 520, 553 e 431 mm de comprimento, $5/8''$ (~15,9 mm) de diâmetro na rosca e 11 mm de diâmetro ao longo das hastes. Na parte superior do *dewar*, no “pescoço”, há faixas de alumínio em contato com os reservatórios de nitrogênio e hélio. As hastes foram conectadas entre si por peças de cobre com roscas que foram conectadas às placas em contato com os reservatórios frios por fitas de cobre. O objetivo disso foi permitir um bom contato térmico sem haver vibração mecânica para a haste e, conseqüentemente, para a esfera.

A condutividade térmica a baixas temperaturas da liga Titânio/Alumínio/Vanádio ainda não foi totalmente estudada, mas à temperatura de 23°C é de $5,8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Para o Aço Inox 304, na mesma temperatura, é de $16,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, segundo dados do *site* <http://www.goodfellow.com>. Espera-se que a diferença entre as condutividades térmicas permaneça proporcional à baixas temperaturas. Assim, além de podermos diminuir o diâmetro da haste, por utilizar um material mais resistente, ainda teremos uma diminuição da condução térmica devido às características do material. O novo projeto é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Haste de titânio-vanádio para a sustentação do isolamento vibracional da esfera.

Com as novas características da haste a temperatura de operação da massa 1 caiu de 80 K para 5 K.

3.2 O sistema de isolamento vibracional

A segunda alteração feita no suporte da antena foi no sistema de isolamento vibracional, composto por cinco massas de 120 kg cada, sendo duas de cobre e três de CuAl(6%). As massas foram conectadas umas as outras por três barras em formato de “C” que funcionam como molas extremamente rígidas.

Este sistema de isolamento vibracional, constituído pela sucessão de massa-mola, funciona como um filtro passa-baixa e teoricamente produz uma atenuação de 300 dB em 3200 Hz.

Três motivos nos levaram a esta modificação do filtro mecânico: a segurança e facilidade na montagem; a transferência de calor; e o isolamento vibracional.

Figura 7 - Sistema de isolamento vibracional original (desenho e foto).

3.2.1 Segurança e facilidade de montagem

Devido ao formato que possuem, estava sendo impossível montar, ao mesmo tempo, os três “C’s” que ligavam cada massa. Era necessário forçar o encaixe dos “C’s” e nem sempre isso era alcançado. Em uma ocasião um dos “C’s” desprendeu-se e caiu, causando um desmonte do sistema de isolamento vibracional. Nada grave aconteceu, mas neste momento foi decidido que um novo sistema era imprescindível. A solução foi a retirada de todos os “C’s” e o projeto de um novo sistema para que as massas fossem conectadas por barras rosqueadas nas massas. Assim, no lugar dos três “C’s” entre as massas, foram feitas roscas nas partes superiores das laterais das massas e roscas esferdas nas partes inferiores das laterais das massas. Com este novo modelo, a montagem ficou mais fácil e mais segura.

3.2.2 Transferência de calor

Após o primeiro resfriamento da antena, foi analisada a transferência de calor entre as massas e concluímos que seria melhor diminuir a transferência de calor entre as três massas superiores, ou seja, as três massas de cobre-alumínio. A solução foi, não só modificar o formato das conexões, mas modificar também o material utilizado. Assim, substituímos os “C’s” de cobre-alumínio por barras da liga de titânio/vanádio que já estava sendo utilizado na haste superior.

3.2.3 Função de transferência do isolamento vibracional

No início de 2004, com a ajuda da Dra. Arlette de Ward do grupo MiniGRAIL da Holanda, foram realizados estudos da função de transferência do isolamento vibracional original, ainda com os “C’s” conectando as massas. A função de transferência determina como cada frequência do sinal de entrada é amplificada ou suprimida.

Os primeiros testes foram das frequências de ressonâncias dos componentes de atenuação do sistema. As medidas foram realizadas utilizando piezoelétricos excitadores e receptores, grudados nos materiais e o sinal medido em um Analisador de Espectro. O primeiro teste foi o das frequências de ressonância da mola de CuAl(6%), suspensa livremente. As frequências (em Hertz) encontradas são mostradas na Tabela 2. Todas as medidas foram realizadas à temperatura ambiente.

Tabela 2 - Frequências de ressonância da mola “C” de CuAl(6%) suspensa livremente, em Hertz.

1255,9	4867,2
2119,1	5593,8
2342,8	5713,9
2826,2	5954,1
3103,5	6438,5
3297,9	6907,2
3611,3	7183,6
3746,1	7773,5
4397,5	8010,8

Em seguida, medimos as frequências de ressonância das massas:

Tabela 3 - Frequência de ressonância das massas do sistema de isolamento vibracional, em Hertz.

Mass 1 - CuAl	3769 3781
Mass 2 - CuAl	3574 3613
Mass 3 - CuAl	3820 3852
Mass 4 – Cu	3640 3715
Mass 5 – Cu	3494 3564

E finalmente as frequências de ressonância da esfera:

Tabela 4 - Frequências de ressonância da esfera, em Hertz.

3045,4
3057,6
3086,4
3095,7
3103,0

Assim, já notamos o primeiro problema, pois uma das frequências da mola ($f \approx 3103$ Hz) tem o mesmo valor de uma das frequências de ressonância da esfera.

3.2.3.1 Função de transferência do sistema de isolamento com “C’s”

Para se determinar quantos estágios do sistema de atenuação podem ser medidos no ar, um PZT utilizado como excitador, chamado aqui de “*shaker*”, foi colado no centro da massa superior (massa 1) e excitado com 10 V. A voltagem de saída nas massas 1, 2, 3 e 4 na banda de frequência entre 10 e 4700 Hz, foi medida com o PZT 2. A montagem pode ser vista na Figura 8 e os resultados nas Figuras 9 e 10.

A função de transferência é definida e calculada por:

$$20 \log \left(\frac{C}{B} \right)$$

onde B é a medida do sinal no excitador e C é a medida do sinal nos estágios inferiores. A quantidade máxima de estágios em que a função de transferência pode ser medida, nesta configuração, é de três. O estágio 4 (posição D) apenas apresenta um resultado razoável entre 100 e 800 Hz. Para o estágio 3 (posição C), o nível de ruído é muito alto, entre 820 e 1600 Hz, de forma que esta banda de frequência teve que ser descartada na função de transferência.

Figura 8 - Posição dos PZT's durante as medidas da função de transferência no sistema de isolamento original.

Figura 9 - Voltagem de saída dos PZT's, colados com fita dupla-face nas posições A até D, como mostrado na Figura 8. A Massa 1 é excitada em seu centro com 10 V. O ruído de fundo (BG) foi adicionado, para comparação.

Figura 10 - A função de transferência entre as massas 1 e 2 (estágio 2 - linha vermelha) e entre as massas 2 e 3 (estágio 3 - linha azul). O estágio 2 dá uma atenuação em torno de 20 dB em torno da frequência de ressonância da esfera e o estágio 3 entre 30 e 35 dB.

Três experimentos adicionais foram feitos a fim de se medir a função de transferência entre os dois estágios de CuAl e os dois estágios de Cu: Função de transferência entre as massas 2 e 3, *shaker* na massa 1; Função de transferência entre as massas 4 e 5, *shaker* na massa 2; Função de transferência entre as massas 4 e 5, *shaker* massa 3.

3.2.3.2 Função de transferência do sistema de isolamento com barras

Os nove “C’s” de CuAl(6%) foram então substituídos por nove barras de titânio-vanádio, mesmo material utilizado na haste de sustentação, com roscas de 5/8” e 6,5 mm de diâmetro ao longo da barra. Já os três “C’s” de cobre foram substituídos por 3 barras de cobre com 5/8” de diâmetro, isto foi feito para que o conjunto formado pelas duas massas de cobre mais a haste de sustentação da esfera apresentasse uma boa condução térmica e a mesma temperatura. Ver Figura 11.

Figura 11 - Sistema de isolamento vibracional com barras.

Assim, os testes da função de transferência entre as massas foram refeitos. Primeiro foi medida a frequência de ressonância da nova haste de titânio; as medidas podem ser vistas na Figura 12.

Figura 12 - Frequências de ressonância da barra de Ti, medidas com um pequeno PZT colado na barra entre as massas 3 e 4.

Comparando estes resultados com os valores mostrados na Tabela 4 já notamos que as frequências de ressonância na haste de titânio não coincidem com as frequências de ressonância da esfera. Medimos e calculamos então todas as funções de transferência entre as massas. Os gráficos mais importantes são mostrados a seguir:

Figura 13 - Função de transferência, *shaker* na massa 1, medidas na massa 1 e massa 2. Atenuação em torno da frequência de ressonância da esfera em torno de 10 dB.

Figura 14 - Função de transferência, *shaker* na massa 2, medidas na massa 2 e massa 3. Atenuação em torno da frequência de ressonância da esfera em torno de 20 dB.

Figura 15 - Função de transferência, *shaker* na massa 3, medidas na massa 3 e massa 4. Atenuação em torno da frequência de ressonância da esfera em torno de 15 dB.

Figura 16 - Função de transferência, *shaker* na massa 4, medidas na massa 4 e massa 5. Atenuação em torno da frequência de ressonância da esfera em torno de 30 dB.

Resumindo, podemos considerar o sistema de isolamento vibracional com uma boa atenuação entre as massas de cada estágio. É importante notar que as frequências de ressonância não coincidem com as frequências da esfera.

3.3 O sistema hidráulico do detector

Durante o resfriamento de 2008, descobrimos por meio de um detector de vazamento, a existência de um fluxo de gás na parte superior dos vasos criogênicos, entre a câmara de vácuo e a câmara interna da antena. Este vazamento é suficientemente pequeno e não impede o resfriamento da antena. E o fato de estar localizado na parte superior dos vasos criogênicos, em uma área de difícil acesso, sem desmontar inteiramente o detector, nos fez decidir prosseguir o desenvolvimento do detector sem consertar o vazamento.

A origem do vazamento foi atribuída às movimentações do detector por meio do sistema hidráulico. Este sistema é composto por quatro pistões que elevam toda a estrutura do detector para sua montagem e desmontagem, em aproximadamente por 2 metros.

Detalhes do sistema hidráulico e seus primeiros problemas foram apresentados em minha dissertação de Mestrado. Decidimos então, imobilizar a plataforma. Para que haja acesso a todo sistema, a plataforma foi imobilizada em uma posição 1,34 metro acima da posição antiga, permitindo a operação do detector sem uso do sistema hidráulico. A imobilização da plataforma é realizada por 4 pilares, colocados nas 4 bases do sistema hidráulico. Estes pilares são compostos de um tubo e duas chapas de ferro galvanizado de uma polegada de espessura. Um furo central permite a passagem do pistão hidráulico na hora da instalação dos pilares.

A instalação dos pilares foi realizada, em março 2009, por meio de pilares auxiliares de diâmetro menor e altura levemente superior à altura dos pilares de apoio. A Figura 17 mostra a atual posição de trabalho do detector, com a parte inferior do *dewar* aberta.

Figura 17 - Vista da atual posição do detector.

3.4 Cálculo do Isolamento Vibracional do Sistema

Para estimar o isolamento vibracional do sistema como um todo, e entendermos o ruído que chega até a esfera, levamos em consideração os isolantes vibracionais do sistema, que são, analisando do topo até a esfera: um pneumático, a haste de titânio-vanádio, o filtro mecânico composto pelas massas cilíndricas e uma haste de cobre presa no centro da esfera.

A unidade de medida das amplitudes de vibração, o *decibel* (dB) é definido em termos da base 10 logaritma do quadrado da razão das amplitudes de dois sinais ¹⁹. Sendo assim, definido por:

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{x_1}{x_2} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{x_1}{x_2}$$

Como em um sistema de isolamento de um estágio a relação entre as amplitudes (x_i) inicial e atenuada em função da frequência $\omega = 2\pi f$ é dada por $(\omega/\omega_0)^2$, onde $\omega_0 = 2\pi f_0$ e f_0 é a frequência natural de oscilação do modo do oscilador harmônico, temos para frequências a relação:

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^4 = 40 \log_{10} \frac{f_1}{f_2}$$

O pneumático é a primeira atenuação do sistema, está localizado na parte superior e isola a haste de sustentação da esfera da base de concreto onde está apoiado o *dewar*. O modelo utilizado é um *Firestone Airmount*® *single convolution 113*, segundo dados do manual fornecido pelo fabricante, com frequência natural $f_n = 2,4$ Hz. Assim o amortecimento do pneumático, é dado por:

$$a_p = 40 \log \left(\frac{f_n}{f_R} \right)$$

onde f_R é a frequência de ressonância da esfera 3200 Hz. Assim, obtemos o amortecimento do pneumático de -125 dB.

Para a atenuação devido à haste de titânio-vanádio, precisamos desmembrar esta parte do sistema em movimento vertical e pendular. Para o movimento pendular, o período é dado por:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

onde l é o comprimento da barra ($l = 143,9$ cm, considerando a barra partida como uma barra única) e g a aceleração da gravidade ($g = 978,622$ cm/s², g local de São Paulo, medido no Laboratório Didático do IFUSP). Assim,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{1,439}{9,786}} = 2,41s$$

E a frequência de ressonância é:

$$f_{R_v} = \frac{1}{T} = 0,415Hz$$

Assim, a transmissão do movimento pendular é dada por:

$$a_{P(Ti-V)} = 40\log\left(\frac{0,415}{3200}\right) = -155dB .$$

Para o movimento vertical, utilizamos o módulo de elasticidade, ou módulo de Young, definido pela equação:

$$Y = \frac{F/A}{\Delta l/l_0}$$

onde F é a força em Newton, A é a área da seção [m²], Δl é a variação do comprimento [m] e l_0 é o comprimento da barra. Podemos reescrever esta fórmula substituindo $F/\Delta l$ pela constante de mola k , ou seja:

$$Y = k \frac{l_0}{A}$$

Sabendo-se, a partir de dados tabelados, que o módulo de elasticidade, ou Módulo de Young, da liga Ti90/Al6/V4, é $Y \cong 110$ GPa, calculamos a constante de mola da barra.

$$k = \frac{AY}{l_0} = \left[\frac{\pi(0,011m)^2}{4} \right] \frac{110 \times 10^9 N/m^2}{1,44m} = 7,26 \times 10^6 N/m$$

Para a massa do sistema, em primeira aproximação consideramos a massa da barra somada à massa da primeira massa de cobre-alumínio, ou seja, 120 kg. Assim, a frequência angular é dada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{7,26 \times 10^6 \text{ N/m}}{120 \text{ kg}}} = 246 \text{ rad/s}$$

E a frequência ressonante vertical é:

$$f_{R_V} = 39,2 \text{ Hz}$$

A transmissão do movimento vertical é dada por:

$$a_{V(Ti-V)} = 40 \log\left(\frac{39,2}{3200}\right) = -76,5 \text{ dB}.$$

Analisando as duas atenuações da haste, consideramos a menor delas em módulo, pois sabemos que pelo menos este valor será atenuado pelo sistema.

O filtro mecânico foi medido com um isolamento individual, mostrado nas Figuras 13, 14, 15 e 16, que pode ser somado: $10 \text{ dB} + 20 \text{ dB} + 15 \text{ dB} + 30 \text{ dB} = 75 \text{ dB}$.

Segundo Merkowitz²⁰ espera-se da haste de suporte presa ao centro da esfera uma atenuação na faixa de 120 a 170 dB.

Ainda segundo Merkowitz, um isolamento total em torno de 350 dB seria satisfatório para este tipo de montagem. O isolamento total do sistema do detector SCHENBERG é dado por:

$$a = a_p + a_{Ti-V} + a_{FM} + a_{Cu} = 125 \text{ dB} + 76,5 \text{ dB} + 75 \text{ dB} + (120 \text{ _ } 170) \text{ dB} = (397 \text{ _ } 447) \text{ dB}$$

um valor mais do que satisfatório, onde a_p é o isolamento do pneumático, a_{Ti-V} é o isolamento da haste de titânio-vanádio, a_{FM} é o isolamento do filtro mecânico e a_{Cu} é o isolamento da haste de cobre de sustentação da esfera.

4. CRIOGENIA

4.1 Resfriamentos 2005-2006

O primeiro resfriamento do detector Mario SCHENBERG foi amplamente discutido em minha dissertação de mestrado ¹⁶. O segundo resfriamento teve início em março de 2005. Durante o resfriamento até a temperatura de nitrogênio (77 K), pudemos estudar as novas conexões térmicas, mostradas no Capítulo 3, envolvendo as diversas partes da antena.

Em um momento foi deixado evaporar o nitrogênio contido em seu reservatório, mas deixou-se nitrogênio no reservatório destinado ao hélio. Com isso a temperatura do disco de alumínio (de ~40 cm de diâmetro, localizado no pescoço do *dewar* e em contato com o reservatório de nitrogênio) subiu rapidamente, mas as temperaturas do disco de cobre, (também no pescoço, abaixo do disco de alumínio, em contato com o reservatório de hélio, mas que estava cheio de nitrogênio), da haste inferior, das massas e da esfera permaneceram frias, indicando que a conexão entre os reservatórios, feita de fitas de cobre, está muito boa e que a nova haste transmite muito pouco calor.

Em 2006 o detector teve seu terceiro resfriamento e sua primeira corrida comissionada, ou seja, com a eletrônica instalada e a primeira tomada de dados ²¹. A Figura 18 mostra a visão esquemática do transdutor utilizado. O transdutor faz o papel de transformar a deformação da esfera em um sinal elétrico. A visão detalhada do par de antenas de microfita pode ser visto da Figura 19. Os transdutores utilizados nesta corrida são de modo único e possuem uma massa ressonante de 53 g, que é um corpo cilíndrico rígido e sólido e que possui a cavidade de micro-ondas klystron e a antena de microfita é presa à superfície da antena (dentro de um dos nove buracos da antena) por um anel. Uma massa de ~60 g é rosqueada a um poste vindo da membrana, fazendo a membrana de metal oscilar com uma frequência de ressonância muito mais baixa do que as frequências de ressonância do modo quadrupolar da esfera. Esta massa ficará então inerte, como uma massa inercial, quando a antena esférica for colocada sob oscilação quadrupolar. Um movimento relativo entre a membrana inerte e a cavidade klystron com o pequeno poste irá causar a modulação do sinal micro-onda da portadora dentro da cavidade.

A antena esférica atingiu a temperatura de 4 K no dia 02 de setembro. Após testes a ~ 5 K em vácuo, o sistema foi ajustado e dados começaram a ser tomados. Iniciou-se então a fase comissionada do detector. Foram 120 horas de tomada de dados, em 7200 arquivos de um minuto tirados dos três transdutores das 21h00 do dia 8 de setembro até as 21h00 do dia 13 de setembro de 2006. A temperatura da esfera variou entre 5 e 6 K durante este período. Muitos testes foram feitos com diferentes frequências de bombeamento, amplitudes e pressão de gás ao redor da esfera. Uma segunda tomada de dados foi feita entre os dias 24 e 25 de outubro com a temperatura em torno dos 55 K, durante o aquecimento da esfera^{22 23}.

Figura 18 - Uma visão esquemática do transdutor não ressonante utilizado nos primeiros testes comissionados.

Figura 19 - Uma visão detalhada do par de antenas de microfita, nenhuma vibração mecânica é transmitida da antena de onda gravitacional através dos cabos coaxiais.

Os primeiros testes com os transdutores foram realizados em julho de 2006, à temperatura ambiente, sem vácuo ao redor da esfera, e foram um sucesso. Os três

transdutores trabalharam, a maior parte do tempo, bombeados com a portadora de micro-onda e retornando o sinal modulado da cavidade elétrica. A Figura 20 mostra as posições dos transdutores e amplificadores criogênicos dispostos na interior do *dewar*.

Figura 20 - Posições dos três transdutores iniciais (T1, T2 e T3) na superfície da esfera. Também são vistas as linhas elétricas indo e voltando destes transdutores e os três amplificadores criogênicos (CMA) instalados perto da parede de baixo do reservatório de hélio líquido. O desenho esquemático pode ser visto na Figura 34.

A Figura 21 mostra as curvas de resfriamento da esfera.

Figura 21 - A curva de temperatura do resfriamento do esfera. E o esquema com as temperaturas de operação, ou seja, as temperaturas estacionárias do sistema.

Os primeiros oito dias de resfriamento da temperatura ambiente até a temperatura de nitrogênio líquido (~ 77 K) poderiam ter sido resumidos em aproximadamente dois dias se o nitrogênio líquido fosse derramado com mais frequência no reservatório, não o deixando acabar. O resfriamento com hélio líquido (de 77 K até ~ 4 K) demorou aproximadamente 2 dias. A temperatura estacionária da esfera entre 5-6 K durou em torno de 12 dias. Após isso, a temperatura aumentou naturalmente pelos próximos 40 dias e então o aquecimento foi forçado. De acordo com os dados obtidos nesta corrida, os 340 litros do reservatório de hélio líquido permitirão ao detector uma autonomia de 9 dias.

4.2 Resfriamento 2008

Foi realizado um novo resfriamento do sistema no início de 2008. Um gráfico do resfriamento apenas da esfera é mostrado abaixo:

Figura 22 - Dados da temperatura da esfera em função do tempo.

A primeira fase do resfriamento, com nitrogênio líquido, levou em torno de 10 dias. A esfera alcançou a temperatura de ~ 80 K e manteve-se esta temperatura por vários dias até o início do resfriamento com hélio. O consumo de hélio líquido para resfriar a esfera caiu de 1360 litros no primeiro resfriamento para 480 litros no resfriamento em 2008.

Antes de se iniciar o resfriamento da esfera foram realizados vários testes de vazamento utilizando um detector por fuga de hélio. Dois métodos são utilizados para verificar a vedação de todo o sistema: o método *sob-vácuo* (ou *spraying*) e o método *sob-pressão* (ou *sniffing*). O método *sob-vácuo* consiste em ligarmos a bomba de vácuo do detector de vazamento por fuga de hélio na peça a ser analisada e borrifarmos gás hélio por fora da peça. Este método é utilizado para detectarmos vazamento no *dewar* externo, vedado por *o-rings* de borracha, com o detector de vazamento ligado junto às bombas de vácuo de isolamento, e assim, verificamos todas as conexões externas do *dewar*. O método *sob-pressão* consiste em inserirmos gás hélio no interior da peça, envolvê-la ou inseri-la em outro *dewar* maior, e fazer vácuo na peça de fora com o detector de vazamento. Qualquer fuga de hélio da peça será notada. Este método foi utilizado, colocando gás hélio no *dewar* interno, ou seja, no espaço da esfera e bombando o espaço de isolamento com o detector de

vazamento. Este teste tem o principal objetivo de verificar a vedação do *o-ring* de índio que sela o *dewar* interno.

Na preparação desta corrida criogênica, os primeiros testes de vazamento do *o-ring* de índio mostraram um pequeno sinal. Com o objetivo de realizarmos mais testes, mas com segurança, entramos em contato com os engenheiros da *Kadel Engineering Corporation*, responsáveis pela construção do *dewar*, para checar a possibilidade de realizarmos o teste de *sob-vácuo* no *o-ring* de índio. Este teste nunca havia sido realizado por nós, pois para isto era necessário fazer vácuo apenas no *dewar* interno, deixando as outras camadas do *dewar* abertas. Como este *dewar* interno é feito de uma fina parede de alumínio, haveria o risco de o *dewar* colapsar, fato já ocorrido com outros detectores de ondas gravitacionais. Os engenheiros garantiram que o *dewar* havia sido construído para suportar este tipo de teste. Mas, ao realizarmos o teste, notou-se uma deformação que se manifesta em um deslocamento deste *dewar* interno quando fazemos vácuo. Ver Figura 23. Estudamos e realizamos novos testes para verificar se este deslocamento é reprodutível quando há vácuo nos *dewars* externos e se pode afetar o sistema.

Figura 23 - Deslocamento do *dewar* interno em vácuo. As fotos superiores mostram dois lados opostos do *dewar* com 1 atmosfera interna e as fotos inferiores mostram o mesmo com vácuo no espaço interno.

Assim, antes do resfriamento de 2008 inserimos uma pequena folha de cobre enrolada entre os *dewars* que se deslocaram. Se ocorresse esse deslocamento novamente, isso seria mostrado pela folha amassada. Não ocorreu, portanto esse deslocamento do *dewar* é apenas causado quando há vácuo no *dewar* interno e uma atmosfera externamente. Logicamente, no nosso método de resfriamento não realizamos este procedimento, ele foi tão somente realizado para verificarmos vazamento no *o-ring* de índio.

4.3 O refrigerador por diluição

Com a sensibilidade que pretendemos atingir com os transdutores, o ruído da antena será dominado pelo ruído térmico, mesmo resfriada à temperatura de 4 K. Para incrementar a sensibilidade até perto do limite quântico, o detector necessita ser resfriado até temperaturas da ordem de 20 mK. O Refrigerador por Diluição é, no momento, o único refrigerador com capacidade de manter estas baixas temperaturas continuamente por um longo período e ainda apresentar potência suficiente para resfriar rapidamente a esfera.

No caso do detector, é preciso resfriar a esfera e parte dos filtros mecânicos, com uma massa de aproximadamente duas toneladas, o que requer uma potência elevada e um projeto com uma geometria compatível com os espaços disponíveis. A conexão entre a fonte fria do refrigerador e as massas também é um ponto importante, pois esta conexão precisa ser termicamente efetiva, mas também precisa transmitir o mínimo de ruído mecânico possível ao sistema. Discutiremos agora o princípio de operação de um refrigerador por diluição de ^3He .

4.3.1 Princípio de operação

O funcionamento de um refrigerador de diluição é baseado nas propriedades especiais de mistura de ^3He e ^4He líquidos. Um diagrama de fases desta mistura, em função da temperatura e da concentração de ^3He , é mostrado na Figura 24. A temperatura de 0,86 K define o ponto triplo. Acima desta temperatura a mistura é homogênea, podendo estar,

dependendo da concentração, em um estado normal ou de superfluido (viscosidade nula). Quando a mistura está abaixo desta temperatura, há a separação em duas fases distintas, que não se misturam e possuem densidades diferentes: uma fase rica em ^3He , chamada de fase *concentrada* (hachurada na Figura); e outra, rica em ^4He , chamada de fase *diluída*.

Figura 24 - Diagrama de fases da mistura ^3He e ^4He .

O processo de refrigeração ocorre quando o ^3He é forçado a passar pela interface de separação entre as fases rica e pobre. Este processo é que gera a capacidade frigorífica do refrigerador de diluição e é chamado de “diluição de ^3He ”.

Figura 25 - Processo de refrigeração em um refrigerador por diluição.

Para haver o resfriamento devemos forçar a passagem de ^3He , a baixa pressão, através da interface. Para que o processo de resfriamento seja contínuo é necessário reinjetar gás ^3He retirado no bombeamento do lado diluído. Liquefazendo e injetando o gás

no lado da fase concentrada temos, na situação de equilíbrio, a interface imóvel. A fim de se minimizar uma carga térmica extra na região mais fria da interface, é preciso resfriar o ^3He o máximo possível antes da reinjeção. Além disso, é preciso manter a circulação de ^3He em valores elevados, uma vez que a potência de refrigeração é proporcional à quantidade de ^3He atravessando a interface.

O que retira o ^3He da fase diluída é o “destilador” (também chamado de *still*). O destilador é um vaso dotado de um aquecedor elétrico, posicionado no topo da coluna da fase diluída. Mantido por um aquecedor a $T \sim 0,8 \text{ K}$, assim forçando a evaporação preferencial do ^3He , que é puxado por um sistema de bombas.

A região mais fria do refrigerador está próxima à separação de fases. Um vaso chamado “câmara de mistura” é ligado ao destilador por um “trocador de calor” de contrafluxo. O trocador de calor pré-resfria o ^3He que retorna das bombas de circulação e desce até a câmara de mistura. A câmara de mistura é onde se localiza a separação de fase e consequentemente a fonte fria do refrigerador.

O ^3He que retorna das bombas de circulação é inicialmente esfriado por um banho térmico a 1 K (conhecido como *1K pot*). O líquido é posto em contato térmico com o destilador, passa pelo trocador de calor, e finalmente é reinjetado na câmara de mistura. Ver Figura 26.

Figura 26 - Esquema do refrigerador por diluição.

Podemos resumir assim os aspectos mais importantes para se obter um alto poder frigorífico e eficiência de um refrigerador por diluição:

- Produzir altas circulações de ^3He ;
- Reinjetar a mistura na temperatura mais baixa possível (maior eficiência possível do trocador de calor);
- Manter o melhor isolamento térmico possível da câmara de mistura;
- Minimizar a quantidade de ^4He no gás circulante.

4.3.2 O refrigerador do detector

Recebemos as diferentes partes do refrigerador de diluição fabricado pelo nosso colaborador o Prof. G. Frossati. O Prof. Frossati apresenta uma experiência acumulada por ter originalmente desenvolvido esta tecnologia. Além disso, como líder do projeto MiniGRAIL (Holanda), este já orientou a construção, com participação direta da Dra. De

Waar, de um refrigerador semelhante ²⁴. A seguir descrevemos as principais partes do refrigerador de diluição do detector Mario SCHENBERG.

Figura 27 - Desenho das diferentes partes do refrigerador de diluição: o destilador, o trocador de calor, a placa de 50 mK e a câmara de mistura.

4.3.2.1 Instalação do 1Kpot

O conjunto que faz o resfriamento e a blindagem do sistema à temperaturas da ordem de 1 Kelvin é composto por: o *1Kpot*, um tubo flexível, portas de conexão, tubos rígidos de bombeamento e válvulas de controle de passagem de hélio.

Dois finos tubos são soldados no fundo do reservatório de hélio líquido, no interior do *dewar*. O hélio líquido alimenta o *1Kpot* e seu fluxo é controlado por válvulas externas, localizadas na parte superior do *dewar*. Junto às válvulas, na mesma peça, é conectada uma bomba de vácuo. O bombeamento de He é o que resfria a temperaturas da ordem de 1 K.

Para sustentar todo o aparato, primeiro foi instalado um disco de cobre de ~75 mm de diâmetro externo, ~35 mm de diâmetro interno e 6 mm de espessura, chamado aqui de placa de 4 K. Esta placa é parafusada no tanque de He.

Alguns centímetros abaixo da placa de 4 K foi instalada uma placa semelhante que serve de apoio ao *1Kpot* e por estar à temperatura de aproximadamente 1 K, servirá de blindagem de temperatura.

Figura 28 - Fotos das diferentes partes constituindo o *1Kpot*.

Figura 29 - Montagem da *1Kpot*.

4.3.2.2 O destilador

O fundo do destilador (*still*) é feito de cobre. A tampa superior, feita de aço inoxidável, é soldada. Dentro dele, temos um medidor de nível de hélio (capacitor), um aquecedor e uma resistência de RuO_2 (termômetro). As duas linhas de condensação tem uma impedância antes de entrar no destilador.

Figura 30 - Foto do destilador e o tubo trocador de calor.

4.3.2.3 O trocador de calor

O trocador de calor consiste em um tubo flexível (de 1,8 metros de comprimento e diâmetro de 10 mm) para a fase diluída e um capilar de 12 metros de CuNi com um diâmetro de 2,5 mm para a fase concentrada. O capilar de CuNi é montado em espiral e colocado dentro do tubo flexível.

4.3.2.4 A placa 50 mK

Abaixo do trocador de calor, uma placa de 50 mK é montada para realizar uma blindagem de radiação em 50 mK. A fase diluída atravessa esta placa.

Figura 31 - Foto do condensador, que ficará na placa de 50 mK.

4.3.2.5 Câmara de mistura

A câmara de mistura é a fonte fria do refrigerador, onde ocorre a separação de fase.

Figura 32 - Foto da câmara de mistura.

4.3.2.6 O sistema de circulação

O sistema de circulação tem por finalidade principal estabelecer um fluxo contínuo de ^3He através da superfície de separação de fases na câmara de mistura. O sistema é constituído de um conjunto de bombas dimensionadas para sustentar os fluxos desejados. Além disso, o sistema prevê a estocagem do gás (quando o refrigerador não está

funcionando) e deverá conter um painel de controle de válvulas capaz de possibilitar todas as operações necessárias. Bombas secas foram escolhidas para a circulação por seu funcionamento ser favorável para longos períodos e pelas bombas convencionais contaminarem o gás com partículas de óleo que precisam ser filtradas antes da reinjeção.

Em dezembro de 2004 foram instaladas 3 bombas de vácuo turbo moleculares *Varian TV 551 Navigator*, com vazão 450 l/s e rotação 42000 rpm, em série, conectadas à 3 bombas secas *BOC Edwards XDS35i*, com vazão de 35 m³/h e pressão final nominal de 0,010 mbar.

Os vasos de estocagem foram instalados em janeiro de 2005 no laboratório e acomodarão todo o gás ³He em uma pressão abaixo da atmosférica (o gás é movimentado pelas bombas de vácuo). São dois tanques de 6 metros de comprimento e 35 cm de diâmetro, totalizando aproximadamente 1200 litros, instalados sob o piso do laboratório. O sistema externo de circulação está sendo planejado pelo Dr. X. Gratens.

O sistema de refrigeração, com os componentes citados instalados, está como é mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Foto do detector com as partes do refrigerador por diluição instaladas e os novos suportes das antenas de microfita (nov/2011).

5. ELETRÔNICA

5.1 Eletrônica nas primeiras corridas comissionadas

O princípio de transdução entre a antena e o transdutor, utilizado na primeira corrida de tomada de dados, funcionou da seguinte maneira: um sinal eletromagnético de aproximadamente 10 GHz é produzido por um oscilador de baixo ruído de fase. A frequência do sinal pode ser ajustada com precisão de até 0,1 Hz. Estão sendo utilizados dois osciladores funcionando em conjunto, uma de até 2,7 GHz da *Anritsu* e outro de 10,2 GHz construído pelo grupo no CETUC da PUC-Rio. O sinal produzido é injetado no circulador que o envia para a cavidade reentrante do transdutor através de antenas de microfita.

As vibrações na esfera, provocadas pelas ondas gravitacionais, modulam a frequência ressonante do transdutor, o qual, por sua vez, modula o sinal do oscilador, produzindo bandas laterais. As bordas laterais são as que transportam a informação. As bandas laterais e o sinal da portadora (oscilador) voltam, então, para o circulador, e deste para o supressor da portadora (uma híbrida de 3 dB que defasa o sinal em 180^0). O sinal do oscilador é suprimido o suficiente de forma a ficar abaixo de -80 dBm, para que um pré-amplificador criogênico de micro-ondas possa trabalhar com baixo nível de ruído²⁵.

O sinal modulado, já fora da parte fria do detector, é então misturado através de um *mixer*, com o sinal do oscilador, após a amplificação. Apenas o sinal elétrico na frequência do ressonador mecânico é obtido na saída do misturador de frequências. Este sinal é analisado, em busca da presença de ondas gravitacionais.

Um esquema dos componentes da parte fria da eletrônica pode ser visto nas Figuras 34a e 34b.

Figura 34 a – Componentes da parte fria da eletrônica na primeira montagem.

Figura 34 b – Esquema da parte fria da eletrônica na primeira montagem.

5.2 Cabeamento e Fiação

Em agosto de 2006, ao se realizar o terceiro resfriamento da esfera, com a finalidade de diminuir a evaporação de hélio, foram estudadas as entradas de calor no sistema, no caso as causadas pelos fios e cabos de entrada/saída do *dewar*. A primeira etapa foi trocar parte da fiação dos termômetros, que antes era toda de cobre, por uma fiação feita de bronze-fosforoso, com menor condutividade térmica.

A segunda etapa se refere ao cabeamento. Um estudo foi realizado da evaporação de hélio causada pelos cabos coaxiais semirrígidos que são utilizados no sistema de transdução. Esses cabos coaxiais são compostos por um condutor externo de aço inox e um condutor interno de BeCu (cobre-berílio), com um filme de prata na superfície e conectam o *feed-through* (à temperatura ambiente) até a parte interna do *dewar*, onde se encontra a esfera e o circuito transdutor, nas temperaturas criogênicas de operação do sistema.

Na terceira etapa, os cabos com 10 fios cada, que foram importados para a alimentação e controle dos amplificadores criogênicos apresentavam um comprimento insuficiente para a conexão com o *feed-through*. Estudei então, a substituição dos seus fios por outros, feitos de um metal menos condutor de calor. Comparamos os gastos teóricos das seguintes opções: fio de bronze-fosforoso #36, cobre #38 e cobre #40, que eram os fios disponíveis no laboratório e que poderiam ser utilizados na substituição dos cabos. Os cálculos foram feitos para os 3 cabos de 10 fios cada, que são, respectivamente, o número inicial de amplificadores criogênicos utilizados e o número de fios de controle de cada amplificador criogênico. Estes resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Evaporação de hélio causada pela entrada de calor pelos fios de controle dos amplificadores criogênicos. Dados da tabela da “Cryogenic Data by APD Cryogenics Inc”.

Fios	Phospor Bronze Lakeshore #36 [A.W.G]	Cobre #38 [A.W.G.]	Cobre #40 [A.W.G.]
Integral (Condutividade Térmica X Temperatura) [W/cm.K x K] Área do Gráfico	93,566	1591,00	1591,00
Diâmetro [cm]	0,0127	0,01016	0,00787
A (Cross Sectional Area - $\pi \cdot r^2$) [cm ²]	0,0001267	0,00008107	0,00004864
$\dot{Q} = \frac{A}{L} \int \sigma dt$ [mW] (L=170cm)	0,0697	0,7587	0,4552
Evaporação de Hélio (1watt → 1,377 l/h) [mililitros/hora]	0,096	1,04	0,627
Evaporação para 30 fios	0,003 litros/h	0,031 litros/h	0,019 litros/h

Também foi calculada a taxa de evaporação de hélio causada pelos cabos coaxiais de aço inox, com condutor interno de cobre-berílio. Os resultados encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Evaporação de hélio causada pela entrada de calor pelos cabos coaxiais de aço inox. Totalizando um valor de evaporação para os nove cabos de 0,054 litros/hora. Dados da tabela da “Cryogenic Data by APD Cryogenics Inc”.

Fio UT 85 B-SS MICROSTOCK (medidas da microcoax)	Condutor Externo Aço Inox 304SS	Condutor Interno BeCu
Integral (Condutividade Térmica X Temperatura) [Watt/cm] Tabela	30,6	150
Diâmetro EXT [cm] Diâmetro INT [cm]	0,2159 [0,085"] 0,1676	0,0511
A (Cross Sectional Area = $\pi \cdot (r_0^2 - r_1^2)$) [cm ²]	0,0145	0,00205
$\dot{Q} = \frac{A}{L} \int \sigma dt$ [mW] (L=170cm)	2,61	1,81
Evaporação de Hélio (1watt → 1,377 l/h) [mililitros/hora]	3,59	2,49
Evaporação para 9 cabos	0,032 litros/h	0,022 litros/h

A evaporação causada pelos 30 fios de cobre #38 (0,03 litros/hora) é a metade daquela causada pelos nove cabos de aço inox (0,054 litros/hora); então a melhor solução poderia ser utilizar o fio de bronze para diminuir a taxa de evaporação de hélio. A solução adotada, para facilitar a conexão e qualidade do sinal, foi encomendar novos cabos dos amplificadores *Quinstar X Band Cryogenic Amplifiers X-10-27H*, com o comprimento ideal para a montagem. Os fios de bronze-fosforoso, cuja evaporação foi calculada, foram utilizados na conexão dos termoresistores.

Dezenas de discos de folha alumínio foram dispostos ao redor dos cabos coaxiais de aço inox com o intuito de diminuir a transmissão de calor até a parte interna do *dewar*. Este isolamento foi feito em forma de disco para maximizar a transmissão radial de calor dos cabos para as paredes da tubulação, com a qual se tem contato térmico e as quais, por sua vez, mantém contato térmico com o reservatório de nitrogênio líquido e o topo do reservatório de hélio líquido. A montagem pode ser vista na Figura 35.

Figura 35 - Discos de alumínio dispostos ao longo do cabeamento dos transdutores.

Também foram realizados testes de atenuação nos cabos coaxiais semirrígidos de inox em novembro de 2008. O comprimento médio dos cabos é de 175 mm, pelos quais enviamos sinal de 10 GHz (*Anritsu* + multiplicador) e medimos o sinal de entrada e de saída nos 30 cabos, obtendo-se uma atenuação média de $8,22 \pm 0,06$ dB.

5.3 Termorresistores

Termorresistores foram espalhados por todo o sistema. Utilizamos 7 termorresistores de Platina (Pt1000) ligados com fios AWG 40 de cobre e termorresistores de RuO_2 ligados com fios AWG 36 de bronze (*dual-twist*). Um esquema dos termômetros dispostos na antena é mostrado na Figura 36.

cada transdutor, que devem ter a melhor transmissão possível e a menor perda na região da frequência de ressonância da cavidade.

Antenas de microfita, ou antenas *microstrip*, são de extrema utilidade nos dias de hoje devido ao seu baixo peso, pequeno volume, baixo custo, versatilidade da configuração, sua simplicidade de fabricação e boas características de irradiação.

Como é mostrada na Figura 37, uma antena de microfita consiste em um elemento radiador ou *patch* metálico, um substrato dielétrico (com constante dielétrica $\epsilon_r \leq 10$)²⁶ e um plano terra. O elemento radiador, normalmente de cobre ou ouro, pode assumir, teoricamente, qualquer formato, mas formas regulares são geralmente escolhidas para facilitar a análise e a previsão de desempenho. A alimentação da antena pode ser feita através de uma microlinha de transmissão conectada ao *patch* por meio de um conector SMA de 50 Ω , conectado ao plano terra, com o condutor central atravessando o dielétrico até o *patch*, onde é soldado.

Figura 37 - Configurações de uma antena de microfita. Na esquerda com a linha da transmissão no patch e na direita com a linha atravessando o substrato.

Em geral, antenas de microfita são estruturas na forma de “meio comprimento de onda” e são operadas no modo de ressonância fundamental, com a frequência de

ressonância dada por (válido para uma antena de microfita retangular com um fino substrato)

$$f \cong \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}}$$

onde c é a velocidade da luz, L é o comprimento do *patch* da antena de microfita retangular, e ϵ_r é a permissividade relativa do substrato aterrado.

5.4.1 Antena de microfita no detector **SCHENBERG**

Um modelo de antena de microfita foi criado pelo grupo GRAVITON e teve simulações iniciais realizadas por Pimentel ²⁷. O modelo foi projetado e construído por Vicente Costa, do INPE, usando um substrato *duroid* RT5880 e espessura 0,787 mm e permeabilidade 2,2. O modelo construído é mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Dimensões da antena de microfita fabricada pelo grupo (em mm).

O comprimento do *patch* determina a frequência de ressonância, a largura do *patch* controla a impedância da antena e o ponto onde inserimos o sinal controla o casamento de impedância entre o gerador e o *patch*.

Vários testes de transmissão desta antena foram realizados. O primeiro teste foi o de alinhamento das antenas. Notamos que antenas não alinhadas, ou seja, não posicionadas na mesma direção de comprimento e largura, apresentam uma perda de aproximadamente 20 *dBm* na transmissão. Assim, este é um cuidado muito importante a ser tomado na montagem das antenas.

O segundo teste foi o de transmissão em relação a separação entre o par de antenas. Na montagem do detector, na primeira corrida comissionada, a antena de microfita que envia o sinal está presa ao *dewar*, por cabos semirrígidos e a antena receptora está presa ao transdutor, locado na esfera, que apresenta um suporte separado do *dewar*. Ver Figura 20. Assim, variações de distância entre o par de antenas são comuns e um teste da variação da transmissão se faz necessário.

Primeiro foi realizado um experimento com duas antenas de microfita retangulares, do tipo utilizado na transmissão. A frequência utilizada nestes testes foi a 10 GHz. Notou-se que a perda na transmissão varia muito e apresenta picos de alta e baixa transmissão.

Realizei então um teste com uma das antenas colada ao transdutor. O sinal (10 GHz) foi enviado pelo Gerador de Sinais e amplificado. Através de um circulador o sinal é enviado pela antena de microfita de *patch* retangular e recebido pela antena do transdutor, o sinal modulado na cavidade fechada do transdutor retorna. O sinal retorna pela antena do transdutor e é reenviado para a antena emissora. O sinal é medido na saída do circulador. O esquema é mostrado na Figura 39 e o gráfico obtido é mostrado na Figura 40.

Figura 39 - Esquema de montagem do teste de transmissão das antenas de microfita. O circulator permite que o sinal injetado na porta 2 siga para a porta 3. O sinal injetado em 3, vai para a porta 1 e o sinal injetado em 1 (que não existe neste caso) segue para a porta 2. As outras conexões são bloqueadas pelo circulator.

Figura 40 - Gráfico da perda de transmissão das antenas de microfita com o transdutor em função da separação entre elas.

A explicação para os mínimos abruptos da curva poder ser relativo às distâncias correspondentes a um número inteiro de meios comprimentos de onda ($\lambda = 30$ mm).

O passo seguinte foi a simulação do par de antenas de microfita para a construção de antenas com ótima transmissão em torno da frequência desejada e com poucas perdas em relação à separação entre elas. Para a realização desta atividade foi utilizado o software **CST® Microwave Studio**. O CST® Microwave Studio é um software para simulação de sistemas eletromagnéticos (cavidades, antenas *microstrip*, linhas de transmissão, etc.). De início, tenta-se reproduzir com o CST o que é medido na prática. O programa fornece, entre outras coisas, os gráficos em dB em função da frequência de: [S1,1] que mostra a reflexão da porta 1; [S2,2] que mostra a reflexão da porta 2; [S1,2] que mostra o sinal entrando na porta 2 e sendo transmitido para a porta 1; [S2,1] que mostra o sinal entrando na porta 1 e sendo transmitido para a porta 2. Foi escolhido aqui, mostrar apenas os gráficos mais importantes, o que varia de teste para teste.

A primeira antena desenhada no CST foi a construída pelo grupo, que apresenta *patches* de cobre com 12,3 mm de comprimento, 9,4 mm de largura, ponto de inserção 2,5 mm e espessura 0,2 mm. O substrato *duroid 5880* quadrado tem 30 mm de lado, o circular tem 30 mm de diâmetro, espessura de ambos 0,787 mm e permeabilidade magnética (ϵ) 2,2. O PEC ou terra apresenta as mesmas dimensões do *duroid* mas com espessura 0,3 mm. A alimentação das duas antenas é feita por fios de cobre de 0,15 mm de diâmetro. Escolhemos como porta 1 o sinal que entra na antena com terra circular e porta 2 o sinal que entra na antena com terra quadrado. A Figura 41 mostra o desenho da antena no CST Microwave.

Figura 41 - Desenho da antena de microfita desenvolvida pelo grupo, no CST Microwave.

Os gráficos obtidos são mostrados nas Figuras 42, 43 e 44. As simulações foram feitas em partes, com a distância entre as antenas (d) variando entre 1 e 22 mm, entre 24 e 31 mm e depois entre 35 e 49 mm, na faixa de frequência entre 9,2 e 11,2 GHz.

Figura 42 - Reflexão do sinal no canal 1 da antena de microfita original, com a distância entre as antenas (d) entre 1 e 22 mm.

Figura 43 - Reflexão do sinal no canal 1 da antena de microfita original, com a distância entre as antenas (d) entre 24 e 31 mm.

Figura 44 - Reflexão do sinal no canal 1 da antena de microfita original, com a distância entre as antenas (d) entre 35 e 49 mm.

Analisando os gráficos notamos que a antena testada apresenta um comportamento diferente para distâncias perto de 13, 29 e 45 mm. Nestas distâncias a antena é melhor transmissora em outras frequências, que não a desejada (10 GHz), assim como vemos nas medidas realizadas na prática, o que confirma as simulações. De forma geral, existe uma

clara e acentuada variação da frequência ótima de operação da antena e da transmissão com a distância.

Em uma tentativa de aproximar ainda mais as simulações das medidas, o terra da antena receptora foi aumentado de forma a simular a esfera. Foram testados formatos planos e esféricos. A modificação não teve efeito significativo nas medidas. Assim, para economizar tempo nas simulações o terra foi mantido com 30 mm de diâmetro, o tamanho do transdutor.

5.4.2 Antena de microfita – Desenvolvidos teóricos

Iniciou-se então cálculos das características da antena de microfita. Procuramos uma geometria da antena em que a separação entre elas não influencie tanto na transmissão. Buscamos outros parâmetros de largura, comprimento e ponto de inserção em *patches* retangulares e também testamos outros formatos *patches*, como circulares e triangulares.

5.4.2.1 Patch retangular

O desenho começa com a determinação da espessura do substrato h . Para este valor foi escolhido o mesmo substrato utilizado na primeira antena (dielétrico *RT duroid* 5880 com espessura $h = 0,787$ mm e permissividade $\epsilon_r = 2,2$). Também foi assumido a frequência de alimentação da antena sendo 10,21 GHz, que é a frequência de saída do Gerador de Sinais.

O elemento radiador é definido, além da espessura e permissividade do substrato, pelo seu comprimento L e pela sua largura W ²⁸. Ver Figura 45.

Figura 45 - Estrutura básica de uma antena microstrip de patch retangular. L = comprimento, W = largura e h = espessura do substrato.

O comprimento do *patch* determina a frequência de ressonância, e é um parâmetro crítico no desenho. O comprimento L do *patch*, para o modo ressonância principal é dado, em primeira aproximação, por:

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}}$$

Utilizando os dados: $\epsilon_r = 2,2$; $c = 3 \times 10^8$ m/s e $f_r = 10,21$ GHz, obtemos $L = 9,90$ mm.

Na prática, os campos elétricos não são confinados ao *patch*. Uma fração do campo sai para fora das dimensões $L \times W$. Este campo fora gera o chamado de efeito de borda. Este efeito pode ser calculado para corrigirmos o valor de L .

Primeiro calcularemos o valor da largura W . A largura do *patch* controla a impedância da antena. Para obtermos a resistência de 50Ω , W é dado por:

$$W = \sqrt{h \lambda_d} \left[\ln \left(\lambda_d / h \right) - 1 \right]$$

onde

$$\lambda_d = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$$

$$\lambda_0 = c / f_0$$

obtemos então $W = 8,78$ mm.

Para a correção do valor de L , substituímos ϵ_r por ϵ_{re} , que é a constante dielétrica efetiva da linha de microfita, e é calculada por:

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u} \right)^{-ab}$$

onde

$$u = W/h$$

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left\{ \frac{u^4 + (u/52)^2}{u^4 + 0,432} \right\} + \frac{1}{18,7} \ln \left\{ 1 + \left(\frac{u}{18,1} \right)^3 \right\}$$

$$b = 0,564 \left(\frac{\epsilon_r - 0,9}{\epsilon_r + 0,3} \right)^{0,053}$$

assim obtemos o valor $\epsilon_{re} = 2,022$

Adicionamos agora o efeito de borda do *patch*, mostrado na Figura 46, ou seja, ao longo de L .

Figura 46 - Efeito de borda em uma antena *microstrip*.

Esse efeito pode ser adicionado por:

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{re}}} - 2\Delta L$$

onde

$$\Delta L = 0,412 h \frac{\epsilon_{re} + 0,300}{\epsilon_{re} - 0,258} \frac{W/h + 0,264}{W/h + 0,813}$$

obtendo $\Delta L = 0,407$ mm. E assim, podemos calcular o novo valor de L , chamado agora de L_f , obtendo $L_f = 9,49$ mm.

5.4.2.1.1 Localização do ponto de inserção

Após definirmos as dimensões L e W do dado substrato, o próximo passo é determinar o ponto para inserirmos o sinal (a uma distância R da borda L e em $W/2$, como mostra a Figura 47) de modo a obter um casamento de impedância entre a impedância do gerador e a do *patch* ²⁹.

Figura 47 - Localização do ponto de alimentação da antena.

Vários métodos são utilizados para a determinação desta dimensão ²⁶. Para o casamento de 50Ω podemos utilizar, em primeira aproximação, o seguinte:

$$R = \frac{L}{2\sqrt{\varepsilon_{re}(L)}}$$

onde $\varepsilon_{re}(L)$ é definido por:

$$\varepsilon_{re}(L) = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} F\left(\frac{L}{h}\right)$$

onde, para o nosso caso de $a/h \geq 1$, temos:

$$F\left(\frac{a}{h}\right) = (1 + 12 h/a)^{-1/2}$$

assim obtemos $\varepsilon_{re}(L) = 2,029$ e $R = 3,33$ mm.

Obtemos assim, o desenho final da antena de microfita, mostrado na Figura 48.

Figura 48 - Projeto da antena de microfitas com um *patch* retangular. Dimensões em mm.

Na simulação desta antena notamos que esta apresenta uma grande variação na transmissão e mesmo para distâncias pequenas a transmissão tem perda de aproximadamente 20 dBm.

5.4.2.2 Novo modelo de antena com um *patch* retangular

Outra antena com *patch* retangular foi calculada através do programa *Microstrip Patch Antenna Calculator* fornecido gratuitamente no site <http://www.emtalk.com>. Para características fornecidas de $\epsilon_r = 2,216$, $h = 0,787$ mm e $f = 10,21$ GHz os resultados do programa são: $L = 9,42$ mm, $W = 11,59$ mm e impedância de entrada com o conector na borda do *patch* $Z = 144,72 \Omega$.

Seguindo ainda os dados fornecidos, calculamos o ponto de inserção para o casamento de impedância em 50Ω , utilizando:

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L$$

obtendo $R = 2,826$ mm. Assim, a antena apresenta as características apresentadas na Figura 49.

Figura 49 - Nova antena de microfita com parâmetros calculados pelo *Microstrip Patch Antenna Calculator*. Dimensões em mm.

A simulação desta antena foi feita em partes, com a separação entre as antenas, sendo analisada variando de: 1 a 8 mm; 9 a 16 mm; e 17 a 24 mm. Os gráficos mostrados na Figura 50 mostram os resultados obtidos.

Figura 50 – Perda de retorno da entrada da antena simulada para várias distâncias (em mm).

Analisando estes gráficos, juntamente com os [S2,1], notamos que esta antena apresenta perdas sensíveis para a distância entre 10 e 13 mm, mas para distâncias menores ou maiores do que isso, a transmissão tem perdas entre 3 e 7 dB e não apresenta picos, e um ajuste para a frequência de ressonância em 10,0 GHz deve ser realizado.

5.4.2.3 Antena de microfita circular

Antenas circulares apresentam características semelhantes às antenas retangulares. Os discos circulares (Figura 51) tendem a serem um pouco menores do que os *patches* retangulares, que podem ser úteis em alguns casos. Além disso, os discos circulares podem ser modificados facilmente para se obter valores de impedância e frequência ressonante diferentes.

Figura 51 - Esquema de uma antena de microfita com *patch* circular.

A frequência de ressonância de uma antena circular de raio a , pode ser obtida através da fórmula:

$$f = \frac{\chi c}{2\pi a_e \sqrt{\epsilon_r}}$$

onde c é a velocidade da luz; $\chi = ka$ e $k = (2\pi\sqrt{\epsilon_r})/\lambda_0$.

Devido ao efeito de borda na periferia do disco condutor, um disco com raio físico a apresenta um raio efetivo a_e , de modo que $a_e > a$. Temos então que a relação entre a e a permissividade, dada por:

$$a = \frac{1,841}{k_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

deve ser substituída por:

$$a_e = \frac{1,841}{k_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

A relação entre a e a_e pode ser definida por:

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi a \epsilon_r} \left[\ln \left(\frac{a}{2h} \right) + (1,41 \epsilon_r + 1,77) + \frac{h}{a} (0,268 \epsilon_r + 1,65) \right] \right\}^{1/2}$$

Para o desenho da antena, o valor desejado de a_e , para operar na frequência de ressonância f é obtido por:

$$a_e = \frac{1,841}{k_0 \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{8,794}{f \sqrt{\epsilon_r}} \text{ cm } (f \text{ em GHz})$$

Assim é obtido o valor de $a_e = 5,807$ mm. E o valor de a é obtido após algumas interações como sendo $a = 5,184$ mm.

Esta antena foi simulada no CST e o resultado é mostrado nas Figuras 52 e 53.

Figura 52 – Perda de retorno de entrada da antena de microfita com *patch* circular.

Figura 53 - Transmissão entre duas antenas de microfita com *patches* circulares separadas pela distância d (d em mm).

Analisando as Figuras 52 e 53 temos que a antena tem boa transmissão na frequência desejada, com perdas entre 2 e 8 dB, mas apresenta uma grande variação na frequência de transmissão máxima, o que pode atrapalhar em caso de variação da distância entre as antenas.

5.4.2.4 Antenas de microfita com *patches* triangulares

Antenas *microstrip* com *patches* triangulares já foram estudadas teórica e experimentalmente e apresentam características de radiação similares às antenas retangulares, mas apresentam um tamanho reduzido.

A geometria de um triângulo equilátero e seu sistema de coordenadas são mostradas na Figura 54.

Figura 54 - Geometria da *microstrip* triangular equilátero. Coordenadas:

$$A = \left(\frac{a}{2\sqrt{3}}, \frac{a}{2} \right); B = \left(\frac{a}{2\sqrt{3}}, -\frac{a}{2} \right); C = \left(-\frac{a\sqrt{3}}{2}, 0 \right).$$

Aproximações são feitas para obtermos a frequência de ressonância do *patch*. Uma expressão para a_e , sendo o comprimento efetivo de a , testado teórica e experimentalmente na literatura é dada, no modo principal da frequência de ressonância por:

$$f_{10} = \frac{2c}{3a_e\sqrt{\epsilon_r}}, \text{ onde } c \text{ é a velocidade da luz.}$$

com

$$a_e = a \left[1 + 2,199 \frac{h}{a} - 12,853 \frac{h}{a\sqrt{\epsilon_r}} + 16,436 \frac{h}{a\epsilon_r} + 6,182 \left(\frac{h}{a} \right)^2 - 9,802 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right]$$

Obtemos assim $a_e = 13,21$ mm e finalmente $a = 12,44$ mm. O ponto de alimentação d foi escolhido 2,2 mm.

A antena simulada apresentou um gráfico sem picos na faixa de frequência estudada, o que é bom, mas a perda média é em torno de 25 dB. Para distâncias entre 6 e 18 mm e em torno de 28 dB entre 20 e 32 mm, na frequência de ressonância, o que é muito alto.

5.4.3 Antenas de microfita – Desenvolvidos práticos

Após o desenvolvimento, construção e primeiros testes de todo o aparato da eletrônica e transdução do detector de ondas gravitacionais Mario SCHENBERG relatados, uma importante modificação foi proposta.

Testes realizados pelo Dr. Sergio Ricardo Furtado indicaram que os circuladores da marca *Ditom Microwave*, modelo D3C6012, que estavam sendo utilizados no sistema de transdução do detector, poderiam não ter o funcionamento esperado quando resfriados à temperatura de 4 K. Estudos para temperaturas abaixo disso, que serão as temperaturas de operação do detector, não foram realizados.

Assim, uma modificação no circuito eletrônico se fez necessária. O sinal, agora de 10,0 GHz, será enviado diretamente para a antena de microfita, sem passar por um circulador. Agora, a antena de microfita deve ter dois pares de *patches*, ou elementos radiadores, em cada substrato. Um par dos elementos radiadores para enviar o sinal senoidal puro da portadora ao transdutor e outro para trazer o sinal de volta, já modulado. Este sinal que sai do transdutor é enviado diretamente para o amplificador criogênico. Também não é cancelada a portadora do sinal com a híbrida. O sinal amplificado é enviado para fora do criostato, onde é analisado em busca de sinais de ondas gravitacionais.

Esta modificação resulta em uma simplificação no projeto da parte criogênica da eletrônica. Para os nove transdutores, serão necessários 18 cabos para o envio e recebimento do sinal, ao contrário dos 27 cabos projetados anteriormente. Os componentes eletrônicos também são modificados, sendo retirados do interior do *dewar* os circuladores, isoladores (que podem apresentar o mesmo problema dos circuladores) e as híbridas, ficando apenas o amplificador criogênico e as antenas de microfita, como é mostrado na Figura 55.

Figura 55 - Esquema da eletrônica.

5.4.3.1 Antena de microfita no detector *SCHENBERG*

Os aprimoramentos no desenho e desenvolvimento das novas antenas de microfita, assim como a utilização do software *CST[®] Microwave Studio*, foram realizados com a ajuda do prof. Dr. José Carlos da Silva Lacava (Divisão de Engenharia Eletrônica e Computação – CTA/ITA) e do Dr. Marcelo Bender Perotoni (*CST Consultant, Sales and Application Engineer*).

O suporte das antenas de microfita utilizado até a última corrida apresentava dois problemas: a posição relativa entre as antenas do par de antenas podia variar de forma

incontrolável com o subir e descer da plataforma de concreto e o ruído sísmico no laboratório poderia modular diretamente o sinal que atravessava o par de antenas. A razão destes problemas residia no fato de que uma das antenas de microfita de cada par estava conectada ao *dewar*, por cabos coaxiais e montagens de barras e placas de cobre, enquanto a outra (de cada par) estava presa a um transdutor fixado na superfície da esfera, já mostrados na Figura 20. Como o movimento pendular da esfera é independente do movimento do *dewar*, o simples movimento de subida e descida da base de concreto podia causar um desalinhamento dos pares de antenas, e as vibrações sísmicas do laboratório chegavam às duas antenas de cada par, de forma desigual.

No sistema atual as primeiras antenas (que eram suportadas pelos cabos coaxiais) estarão presas à última massa por meio de uma rígida peça de cobre, ver Figura 56. Como a esfera está conectada rigidamente a esta última massa por uma haste de cobre, não deverão existir movimentos relativos significativos entre as antenas de microfita de cada par, mesmo após movimentos da base de concreto ou durante vibrações sísmicas no laboratório.

Figura 56 - Foto do atual suporte das antenas de microfita (11/2011)

Com o novo suporte e a separação entre o par de antenas fixo, a pesquisa foi na direção da melhor transmissão. Assim, as antenas de microfita sofreram importantes modificações no seu projeto. Em cada substrato foram colocados dois elementos radiadores. Como os quatro elementos radiadores estão muito próximos, por sugestão do prof. Lavaca, os pares de antena emissor/receptor estão dispostos perpendicularmente, como mostra a Figura 57. Deste modo o sinal emitido pela antena A, só será recebido pelo receptor da antena B.

Figura 57 - Antenas de microfita com dois patches cada.

Outra sugestão, feita pelo prof. Odylio, foi a troca do substrato original de *duroid* por um de alumina (constante dielétrica $\epsilon \sim 10$). O intuito desta troca é garantir um ótimo fator de qualidade (Q) na oscilação mecânica do transdutor, além de uma diminuição do tamanho do elemento radiador e melhoria da transmissão/recepção do sistema.

Um desenho inicial do novo elemento radiador foi calculado utilizando o *Microstrip Patch Antenna Calculator*, obtendo-se o comprimento $L = 4,54$ mm e largura $W = 6,40$ mm. A distância entre a borda e a linha de transmissão deve ser de $R = 1,80$ mm.

Uma proposta minha foi a utilização da mesma geometria nos pares de substrato, deixando os dois circulares, de forma a facilitar o estudo e construção das antenas de

microfitas. Um desenho da antena de microfita com suas medidas pode ser visto na Figura 58.

Figura 58 - Desenho esquemático da antena de microfita com dois *patches*. À esquerda a antena de envio e recebimento de sinal, à direita a antena presa ao transdutor na esfera.

Seguindo sugestões do Dr. Perotoni, na simulação de antenas de microfitas com o *software* CST, as espessuras dos componentes podem ser diminuídas da realidade, ganhando em tempo de simulação, sem interferir nos resultados obtidos. Assim, as dimensões utilizadas na simulação foram: o plano terra (PEC) com raio de 15 mm e espessura 0,1 mm; o substrato dielétrico de alumina também com raio de 15 mm e espessura 0,1 mm; o elemento radiador, de cobre, com dimensões de comprimento 4,06 mm e largura 5,28 mm; e a posição da alimentação deslocada 0,47 mm do centro. As medidas do comprimento e largura do *patch* de cobre foram feitas por teste e acerto, a partir das medidas fornecidas pelo *software* até chegar a uma ótima ressonância em 10,0 GHz.

Na Figura 59 mostramos um dos gráficos obtidos, na simulação com o CST, com a frequência obtida em 10 GHz.

Figura 59 – Coeficiente de reflexão (perda de retorno) da antena de microfita com dois *patches*.

5.4.3.2 Construção e testes

A construção e os testes da antena foram realizados em conjunto com o prof. José Kleber da Cunha Pinto no Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da USP. A fim de facilitar a construção do protótipo da antena, duas modificações ainda foram realizadas no desenho. A primeira foi do formato do substrato para um quadrado de lado de uma polegada, isto facilita a construção, pois este formato já existe à disposição no laboratório. A outra modificação foi na inserção do sinal. Ao invés do sinal injetado por trás da antena, foi feita a inserção pela lateral do radiador, usando-se uma microlinha de transmissão e um conector SMA. Novas simulações foram realizadas e o desenho final do protótipo é mostrado na Figura 60.

Figura 60 - Desenho da antena de microfita construída para testes. Medidas em mm

Com um fotolito feito do desenho, o par de antenas foi construído pelo engenheiro Mario Sanematsu no Laboratório de Microeletrônica da Poli.

Desenhei uma estrutura de latão a fim de fixar as duas antenas, de forma a possibilitar a variação da separação entre elas reguladas por quatro parafusos e, ao mesmo tempo, manter as delicadas antenas de alumina fixas. As antenas foram soldadas nas placas de latão de aproximadamente 1 mm pelo técnico Jair Pereira de Souza no mesmo Laboratório. Uma foto das antenas é mostrada na Figura 61.

Figura 61 - Foto da uma das antenas de microfita construídas para os testes (21/09/2011).

O desenho da montagem do sistema das antenas é mostrado na Figura 61, onde a antena A recebe o sinal de entrada e o transmite para a antena B. As duas portas de B são conectadas através de um cabo coaxial semirrígido. O sinal é então transmitido da antena B para A onde é feita a medida do sinal.

Figura 62 - Esquema de montagem do sistema de duas antenas. A antena A recebe o sinal de entrada e o transmite para a antena B, que retorna o sinal para a antena A.

O primeiro teste realizado foi com os cabos coaxiais que seriam utilizados na conexão entre os conectores da Antena B. Foram escolhidos cabos já existentes no laboratório do Detector e os testes foram analisados em um *Scalar Network Analyzer Hewlett Packard 8757D*. O cabo escolhido foi o coaxial semirrígido de cobre UT-141 de ~30 cm de comprimento, cujo sinal é mostrado na Figura 62.

Figura 63 - Perda de 1,35 dB no cabo coaxial semirrígido de cobre UT-141 de ~30 cm de comprimento.

O gráfico mostra a perda de 1,35 dB na frequência de 10 GHz. Outros cabos de diferentes espessuras e comprimentos também foram testados e este se mostrou com a menor perda.

Com a montagem das antenas no suporte, foram soldados os conectores SMA. Testes de impedância na linha de transmissão de 50 Ω foram realizados com um refletômetro *Tektronix 11801B Digital Sampling Oscilloscope*. Os testes mostraram que as linhas estavam com a impedância correta, com pequenas variações entre 50 e 51 Ω .

Testes de ressonância das 4 antenas foram realizados com o *Scalar Network Analyzer* e obtivemos a frequência de ressonância esperada de 10 GHz na antena A e próximo disso na antena B, como mostram as Figuras 64 a 67.

Figura 64 - Coeficiente de reflexão em 10,0 GHz do *patch* central da Antena A.

Figura 65 - Coeficiente de reflexão em 9,91 GHz do *patch* lateral da Antena A.

Figura 66 - Coeficiente de reflexão em 9,42 GHz do *patch* central da Antena B.

Figura 67 - Coeficiente de reflexão em 9,42 GHz do *patch* lateral da Antena B.

O passo seguinte é a montagem do sistema de transmissão com as 4 antenas. Uma foto da montagem é mostrada na Figura 68.

Figura 68 - Foto da montagem do sistema de transmissão com as 4 antenas (21/09/2011).

E na Figura 69 uma foto da montagem com os equipamentos de análise.

Figura 69 - Foto do sistema montagem com os equipamentos de análise.

Um esquema da montagem com os equipamentos utilizados é mostrado na Figura 70.

Figura 70 - Esquema da montagem de teste das antenas, com os equipamentos utilizados.

O sinal, que variou de 8,0 a 12,0 GHz, foi enviado por um gerador de função, passou pela transmissão das antenas de microfita e foi capturado pelo analisador. A Figura 71 mostra o gráfico obtido na transmissão para uma distância de 31 mm entre as microfita.

Figura 71 - Gráfico obtido na transmissão para uma distância de 31 mm entre as microfita. O sinal superior mostra a reflexão na antena A (*patch* emissor) em 10,0 GHz e o sinal inferior é a recepção na mesma antena A (*patch* receptor).

A curva superior representa o sinal na transmissão da antena A (*patch* emissor) e a curva inferior representa o sinal na recepção, na mesma antena A (*patch* receptor). Diminuindo a distância entre o par de antenas para 25 mm, a transmissão melhora, como era de se esperar, mas não é possível ter certeza se o sinal está realmente sendo transmitido ou só refletindo diretamente.

6. CONCLUSÕES

Durante o período de desenvolvimento deste projeto de doutoramento, colaborei intensamente no estudo, desenho e projeto dos desenvolvimentos necessários para a melhoria da sensibilidade da antena de ondas gravitacionais Mario SCHENBERG. Em especial, na parte mecânica, no novo sistema de isolamento vibracional da suspensão da esfera, com uma nova haste de sustentação do sistema, que causou uma queda de temperatura de operação de 80 K para 5 K, na primeira massa. Desenvolvemos também novas conexões entre as massas do sistema de isolamento, gerando mais segurança e facilidade na montagem, diminuindo a transferência de calor e obtendo um isolamento vibracional (medido) de 75 dB.

Além disso, na parte criogênica, vários desenvolvimentos foram realizados para minimizar a transmissão de calor pelos cabos e fios. As novas conexões térmicas resultaram em uma queda no gasto de hélio para resfriamento da esfera de 1360 para 480 litros. E a minha participação e conhecimentos foram muito importantes nos projetos e desenvolvimentos das melhorias necessárias para os novos resfriamentos a temperaturas abaixo de 4 K, com o estudo e instalação do *IKpot*, que permitirá que a esfera seja resfriada até temperaturas da ordem de 1 kelvin

Na parte eletrônica do projeto, foram realizados estudos teóricos e práticos das antenas de microfita, onde desenvolvemos o projeto de um par duplo dessas antenas, ressonantes em 10,0 GHz, cujo protótipo foi construído, testado e aprovado para utilização no detector.

Os resultados indicam que o isolamento vibracional da suspensão é mais do que suficiente para a sensibilidade projetada do detector, que o isolamento térmico da antena deve ser suficiente para a operação inicial da antena a temperaturas abaixo de 1 K e que desenvolvemos o projeto de um par duplo de antenas de microfita que satisfaz os critérios de perdas e transmissão necessários para o bom funcionamento dos transdutores do detector.

7. REFERÊNCIAS

¹ Aguiar, O. D., et al. “The GRAVITON Project - Construction of a Gravitational Wave Observatory in Brazil, (First Phase) - The MÁRIO SCHENBERG DETECTOR - Proposal for the design, construction and operation of a Spheroidal Gravitational Wave Detector of 0.6-meter diameter”. Proposta à FAPESP (1988).

² Blair, D. G., “The Detection of Gravitational Waves”, Cambridge University Press (1991).

³ Aguiar, O. D.; Araújo J. C. N.; Miranda O. D. & Velloso W. F., Jr. “Prováveis fontes candidatas à observação pelo detector de ondas gravitacionais MARIO SCHENBERG”, XXV^a Reunião Anual da SAB, 1999.

⁴ Houser, J. L. Centrella J. M. and Smith, S. C. “Gravitational radiation from nonaxisymmetric instability in a rotating star”. *Physical Review Letters* **72** (9), (1994) 1314-1317.

⁵ Aguiar, O. D. *Parametric motion transducers for gravitational waves detectors*. Baton Rouge. 98 p. Thesis (PhD in Physics) - Louisiana State University, 1990.

⁶ Michelson, P. F. et al. (1987) “Resonant Mass Detectors of Gravitational Radiation”, *Science* 10 Jul 87, 237, p150-57.

⁷ Thorne, K. S. “Gravitational radiation” in: Hawking S., Israel W. ed. “*300 years of gravitation*”. Cambridge: Cambridge University Press (1987), Cap. 9, p. 330-445.

⁸ Hulse, R.A., Taylor, J.H. “Discovery of a pulsar in a binary system”. *Astrophysical Journal Letter*, **195** (2), (1975) 51-53.

⁹ Turner, M.; Wilczek, F. “Relic gravitational waves and extended inflation”. *Phys. Rev. Lett.* **65**, 3080–3083 (1990)

-
- ¹⁰ Ruthen, R., “Catching the Wave”, Scientific American, March 1992, p72-p81.
- ¹¹ Weber, J. “Detection and Generation of Gravitational Waves”. Phys. Rev. (1960) 117 (1) 306-313.
- ¹² Weber, J. “Evidence for discovery of gravitational radiation” Phys. Rev. Lett. (1969) 22 (24) 1320-1324.
- ¹³ Sigg, D. “Commissioning of LIGO Detectors”, Presented talk at 5th Edoardo Amaldi Conference, July 7, 2003.
- ¹⁴ <http://lisa.nasa.gov/science/index.html>
- ¹⁵ Gravitational Wave International Committee <http://gwic.ligo.org/>
- ¹⁶ Souza, Sérgio Turano de. *Instalação criogênica de uma antena gravitacional de baixíssima temperatura*. São Paulo, SP - 2003. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. Instituto de Física – Depto. de Física dos Materiais e Mecânica.
- ¹⁷ O D Aguiar, L A Andrade, J J Barroso, F Bortoli, L A Carneiro, P J Castro, C A Costa, K M F Costa, J C N de Araujo, A U de Lucena, W de Paula, E C de Rey Neto, **S T de Souza**, A C Fauth, C Frajuca, G Frossati, S R Furtado, N S Magalhães, R M Marinho Jr, J L Melo, O D Miranda, N F Oliveira Jr, K L Ribeiro, C Stellati, W F Velloso Jr and J Weber. “The Brazilian gravitational wave detector Mario Schenberg: status report” *Class. Quantum Grav.* **23** No 8 (21 April 2006) S239-S244.
- ¹⁸ Veith P. J. “Parametric transducer”. In: Blair D. G. ed. *The detection of gravitational waves*. Cambridge: Cambridge University Press (1991), Cap. 8, p. 186-225.
- ¹⁹ Inman, Daniel J. “Engineering Vibration”. Second Edition. Prentice Hall International, Inc. 2001.

²⁰ Merkowitz, Stephen M.; Coccia, Eugenio; Fafone, Viviana; Raffone, Guido; Schipilliti, Maria; Visco, Massimo. “Final isolation stage for a spherical gravitational wave antenna” *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 1553 (1999).

²¹ O D Aguiar, L A Andrade, J J Barroso, P J Castro, C A Costa, **S T de Souza**, A de Waard, A C Fauth, C Frajuca, G Frossati, S R Furtado, X Gratens, T M A Maffei, N S Magalhães, R M Marinho Jr, N F Oliveira Jr, G L Pimentel, M A Remy, M E Tobar, E Abdalla, M E S Alves, D F A Bessada, F S Bortoli, C S S Brandão, K M F Costa, H A B de Araújo, J C N de Araujo, E M de Gouveia Dal Pino, W de Paula, E C de Rey Neto, E F D Evangelista, C H Lenzi, G F Marranghello, O D Miranda, S R Oliveira, R Opher, E S Pereira, C Stellati and J Weber. “The Schenberg spherical gravitational wave detector: the first commissioning runs” *Class. Quantum Grav.* **25** No 11 (7 June 2008) 114042 (10pp) .

²² César A Costa, Odylio D Aguiar, Nei F Oliveira Jr, Xavier Gratens, **Sérgio T de Souza** and Sergio R Furtado “The Schenberg data acquisition and analysis: results from its first commissioning run” *Class. Quantum Grav.* **25** (21 September 2008) 184002 (10pp).

²³ O D Aguiar, L A Andrade, J J Barroso, P J Castro, C A Costa, **S T de Souza**, A de Waard, A C Fauth, C Frajuca, G Frossati, S R Furtado, X Gratens, T M A Maffei, N S Magalhães, R M Marinho Jr, N F Oliveira Jr, G L Pimentel, M A Remy, M E Tobar, E Abdalla, M E S Alves, D F A Bessada, F S Bortoli, C S S Brandão, K M F Costa, H A B de Araújo, J C N de Araujo, E M de Gouveia Dal Pino, W de Paula, E C de Rey Neto, E F D Evangelista, C H Lenzi, G F Marranghello, O D Miranda, S R Oliveira, R Opher, E S Pereira, C Stellati and J Weber. “The Schenberg spherical gravitational wave detector: the first commissioning runs”. 2008 *Class. Quantum Grav.* **25** 114042.

²⁴ A. de Waard, “MiniGRAIL, The first spherical gravitational wave antenna”, Tese de Doutorado, Universidade de Leiden, Holanda, 2003.

²⁵ Ivanov, E. N.; Hartnett, J. G. and Tobar, M. E. “Cryogenic Microwave Amplifiers for Precision Measurements”, IEEE Trans Ultra. Fer. Freq. Control **47** (6), (2000) 1273-1274.

²⁶ WONG, Kin-Lu. “Compact and broadband microstrip antennas”. Wiley-Interscience (2002).

²⁷ PIMENTEL, Guilherme Leite. “O detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg: análise teórica de vibração, estudo do sistema de transdução e de transmissão de dados”. 2006. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos.

²⁸ GARD, Ramesh. “Microstrip antenna design handbook / Ramesh Garg ... [et al]”. Artech House, 2001.

²⁹ ANTENNA-THEORY.com. The Online Source For Learning About And Understanding Antennas. <http://www.antenna-theory.com>