

FONTES ASTROFÍSICAS DE ONDAS GRAVITACIONAIS: SISTEMAS BINÁRIOS DE ESTRELAS

Bruno Woltzenlogel Paleo¹ (ITA, Bolsista PIBIC/CNPq)

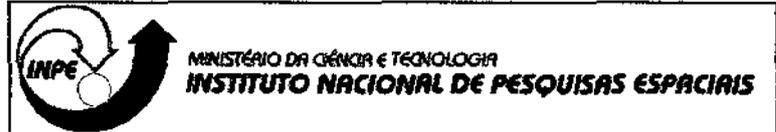
Dr. José Carlos Neves de Araujo² (DAS/CEA/INPE)

RESUMO

Os sistemas binários de estrelas, dos mais variados tipos, são fontes de ondas gravitacionais passíveis de serem detectadas pelos observatórios de ondas gravitacionais de futuro próximo devem entrar em operação. Estudamos, em particular, os sistemas binários que produzem ondas gravitacionais na frequência de operação do futuro detector de ondas gravitacionais do LOG/DAS/INPE, ou seja, $\sim 3,0$ - $3,4$ kHz. Pode-se mostrar que a frequência da onda gravitacional gerada por um sistema binário é o dobro de sua frequência orbital. Sistemas binários de estrelas ordinárias e mesmo estrelas compactas, tais como: anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros, estes últimos fruto da evolução estelar e que teriam massas de algumas vezes a massa do sol, não geram ondas gravitacionais de $\sim 3,0$ kHz. Para gerarem ondas gravitacionais nesta frequência as estrelas deveriam estar a uma distância uma da outra incompatível com os seus tamanhos. Considerando sistemas binários compostos de estrelas de iguais massas, mostramos que somente buracos negros de massas sub-solares, e portanto não provenientes da evolução estelar, podem gerar ondas gravitacionais na frequência $\sim 3,0$ kHz. Em particular obtivemos que estes mini-buracos negros devem ter massas de $< 0,5 M_{\odot}$, e portanto, devem ter origem primordial, pois não podem ser fruto da evolução estelar. É interessante notar que os experimentos destinados ao estudo dos MACHOS ("Massive Compact Halos Objects" - objetos maciços compactos do halo), que fariam parte do halo da nossa galáxia, são consistentes com os valores de massa que encontramos para os mini-buracos negros. Estes poderiam então fazer parte do halo de nossa galáxia na forma dos MACHOS. É importante, no entanto, estudar quantos destes sistemas podem a princípio serem detectados por ano, pelo futuro detector de ondas gravitacionais do LOG/DAS/INPE.

¹ Aluno do Curso de Engenharia Eletrônica, ITA. E-mail: bwp@h8.ita.br

² Pesquisador da Divisão de Astrofísica, Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas. E-mail: jcarlos@das.inpe.br



FONTES ASTROFÍSICAS DE ONDAS GRAVITACIONAIS

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

Bruno Woltzenlogel Paleo (ITA, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: ceiliçan@terra.com.br

Dr. José Carlos Neves de Araújo (DAS/INPE, Orientador)
E-mail: jcarlos@das.inpe.br

COLABORADORES

Dr. Odylio D. Aguiar (DAS/INPE)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 2 – TEORIA DA RELATIVIDADE

- 2.1 Relatividade Restrita
- 2.2 Princípio da Equivalência
- 2.3 Princípio da Covariância
- 2.4 Ondas Gravitacionais

CAPÍTULO 3 –METODOLOGIA

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES

- 4.1 Detector “Mário Schenberg”
- 4.2 Frequência de Emissão de Sistemas Binários
- 4.3 Amplitude de Emissão de Sistemas Binários
- 4.4 Excentricidade das órbitas de Sistemas Binários
- 4.5 Tempo de Coalescência
- 4.6 Estabilidade da órbita
- 4.7 Possíveis Sistemas cujos Parâmetros Satisfazem as Limitações Deduzidas

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

AGRADECIMENTOS

FONTES ASTROFÍSICAS DE ONDAS GRAVITACIONAIS

RELATORIO FINAL

Bolsista: Bruno Woltzenlogel Paleo
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
12228-901 São José dos Campos - SP
ceilican@terra.com.br

Orientador: José Carlos Neves de Araujo
Divisão de Astrofísica
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos - SP
jcarlos@das.inpe.br

RESUMO

Este relatório descreve os resultados obtidos e a metodologia utilizada na pesquisa de iniciação científica em Fontes Astrofísicas de Ondas Gravitacionais (em especial, sistemas binários), realizada ao longo de 1 ano (Agosto de 2001 a Julho de 2002) na divisão de Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sob a orientação do Dr. José Carlos Neves de Araújo.

1 INTRODUÇÃO

Esta pesquisa de Iniciação Científica, iniciada em agosto de 2001 objetivou a procura de possíveis fontes de ondas gravitacionais cujas características satisficam os requerimentos para serem detectáveis pelo detector brasileiro "Mário Schenberg".

O detector "Schenberg" operará em conjunto com os detectores "Sfera", da Itália, e "Mini-Grail", da Holanda, além de cooperar com diversos outros grupos que visam a detecção de ondas gravitacionais (AGUIAR et al, 2002).

Entre prováveis fontes estão:

- Colapso de núcleos estelares em supernovas
- Estrelas de Nêutrons em Instabilidade Hidrodinâmica
- Oscilações e "Quakes" de Estrelas de Nêutrons, induzidas pela queda de matéria, em sistemas binários.
- Excitação do modo normal do primeiro quadrupolo em buracos negros.
- Rotação de estrelas de bósons ou outros tipos exóticos de matéria.
- Coalescência de Sistemas Binários de Estrelas de Nêutrons ou Buracos Negros.

Esta pesquisa esteve focada primariamente no estudo de Sistemas Binários como fontes de ondas.

2 TEORIA DA RELATIVIDADE

A Teoria da Relatividade Geral constitui a fundamentação teórica do conceito de onda gravitacional, explicando sua produção, propagação e absorção. Sendo assim, um estudo introdutório dessa teoria foi realizado nos primeiros 6 meses de pesquisa. Ao fim desse estudo, iniciou-se de fato a procura por fontes astrofísicas.

O estudo introdutório da Teoria da Relatividade se baseou nos livros citados nas referências bibliográficas e compreendeu os seguintes assuntos, alguns dos quais serão melhor explicitados nas seções seguintes:

- Relatividade Restrita
- O princípio da equivalência
- O princípio da covariância e o Cálculo Tensorial
- A Equação de Einstein
- Testes Experimentais da Teoria
- A Solução de Schwarzschild
- Ondas Gravitacionais
- Cosmologia

2.1 Relatividade Restrita

A Relatividade Restrita postula que as leis da física são iguais para todos os referenciais inerciais e que, nestes referenciais, a velocidade da luz tem sempre o valor C .

Estes postulados resolveram de maneira elegante o conflito existente entre as Equações de Maxwell e as Transformações de Galileu, abandonando estas e deduzindo as Transformações de Lorentz.

Das novas transformações, ficam evidentes algumas das quebras de paradigmas que ocorreram:

- Dois referenciais inerciais com velocidade relativa medem de forma diferente:
 - Comprimentos (Contração do Espaço).
 - A passagem do tempo (Dilatação do Tempo).
- A massa de um objeto é função de sua velocidade.
- Massa e Energia são dois aspectos da mesma "entidade" ($E = m \cdot c^2$).

2.2 Princípio da Equivalência

O princípio da equivalência é um dos princípios mais importantes que estão na base da Teoria Geral da Relatividade e consiste da constatação de que tanto a força gravitacional de Newton quanto as forças inerciais sofridas por um objeto são proporcionais a sua massa (equivalência da massa inercial e da massa gravitacional).

A partir dessa constatação, o princípio da equivalência estabelece que a forças gravitacional e as forças inerciais são localmente indistinguíveis.

2.3 Princípio da Covariância

O princípio da covariância diz que as equações da física devem ser covariantes, isto é, devem ter suas formas independentes do sistema de coordenadas.

Isso é conseguido através do cálculo tensorial e da geometria riemanniana, sendo que a covariância em referenciais não-inerciais ou (equivalentemente) na presença de gravidade acaba por requerer que a geometria do universo seja curva: a massa encurva o universo ao seu redor.

2.4 Ondas Gravitacionais

A teoria prevê que, se uma massa oscila, a curvatura do espaço que ela gera se propagará com velocidade C , gerando assim as Ondas Gravitacionais.

Até hoje, nunca houve uma detecção direta dessas ondas, o que é muito desejável pois:

- Seria mais um teste permitindo comparar a Relatividade Geral com outras teorias de gravitação.
- Abriria uma nova “janela” para o Universo, permitindo obter informações de fenômenos não observáveis através do espectro eletromagnético. Essas informações poderiam alterar de modo significativo o conhecimento cosmológico e de física fundamental.

3 METODOLOGIA

A busca por fontes iniciou-se com sistemas binários. Uma grande dificuldade encontrada com esse tipo de fonte reside na complexidade das equações relativísticas que regem o movimento do sistema, o que exigiria supercomputadores executando simulações para prever com exatidão esse movimento. Esta dificuldade foi contornada através da obtenção de soluções aproximadas utilizando física newtoniana e formalismos pós-newtonianos.

Por solução entende-se aqui a determinação dos parâmetros massa, excentricidade, eixo-maior e distância de um sistema binário para que este emita ondas gravitacionais detectáveis pelo detector “Schenberg”.

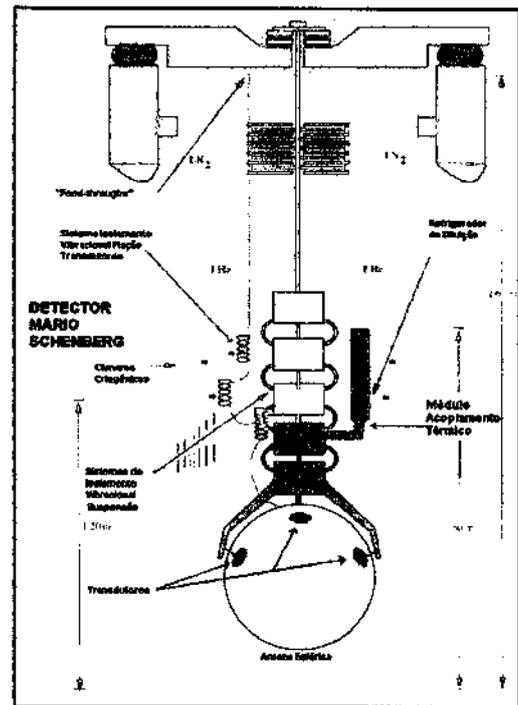
Formalismos pós-newtonianos são técnicas que aproximam os resultados obtidos newtonianamente dos obtidos relativisticamente

Para a realização dos cálculos e geração de gráficos, foi freqüentemente utilizado o software Mathematica 4.0.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Detector “Mário Schenberg”

O detector brasileiro usará a técnica da “massa ressonante”: Uma esfera de 65cm de diâmetro, construída a partir de uma liga de cobre-alumínio (94%-6%), é inserida num sistema cujo objetivo é isolá-la de ruídos indesejáveis. Ao ser atingida por uma onda gravitacional, ela será deformada juntamente com o espaço-tempo e passará a sofrer oscilações que serão detectadas eletronicamente.



Com essa técnica e devido às características já mencionadas da esfera será possível: (AGUIAR et al., 2002)

- Detectar ondas com frequência entre 3kHz e 3,4Khz e com amplitudes maiores que 10^{-20} .
- Analisar a polaridade e a direção das ondas incidentes.

A amplitude de uma onda gravitacional é definida como:

$$h = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

Onde:

- ΔL é a deformação sofrida por uma barra de comprimento L ao ser atingida perpendicularmente pela onda gravitacional.

4.2 Frequência de Emissão de Sistemas Binários

Sistemas Binários com órbitas circulares emitem ondas gravitacionais cuja frequência, no harmônico fundamental, é duas vezes a frequência orbital. (SHAPIRO and TEUKOLSKY, 1983)

$$f_G = f = 2 \cdot f_0 \quad (2)$$

Para órbitas não-circulares, quanto maior a excentricidade, mais significativa é a emissão nos harmônicos não-fundamentais.

A terceira lei de Kepler fornece o período de órbita de um sistema binário como função das massas dos astros envolvidos e da distância entre eles.

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{G(M_1 + M_2)}} \quad (3)$$

Onde:

- M_1 e M_2 são as massas dos astros.
- R é o semi-eixo maior da elipse descrita pelo vetor de posição relativa entre os astros.
- G é a constante universal da Gravitação, sendo seu valor igual a: $(6,673 \pm 0,010) \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$.

Utilizando as equações (2) e (3), obtém-se a dependência da frequência fundamental das ondas gravitacionais produzidas como função das massas dos astros e da distância de separação.

$$f = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{c^6}{8 \cdot G^2 M_0^2 (m+n)^2 \cdot k^3}} \quad (4)$$

Onde:

- $M_0 = 1,989 \cdot 10^{30} kg$ é a Massa Solar.
- $m = \frac{M_1}{M_0}$ e $n = \frac{M_2}{M_0}$
- $c = 299792458 \frac{m}{s}$ é a velocidade da Luz.
- $k = \frac{R}{S_1 + S_2}$
- S_1 e S_2 são os raios de Schwarzschild dos astros envolvidos.

De uma maneira, a equação (4) e a faixa de detecção do "Schenberg" impõe o seguinte limite aos parâmetros do sistema.

$$3kHz \leq f \leq 3,4kHz \quad (5A)$$

$$6,71943 \leq X_s \cdot k^{\frac{3}{2}} \leq 7,61535 \quad (5B)$$

Onde:

- $X_s = m + n$

Para o caso particular em que $n = m$, os resultados podem ser vistos no gráfico 1.

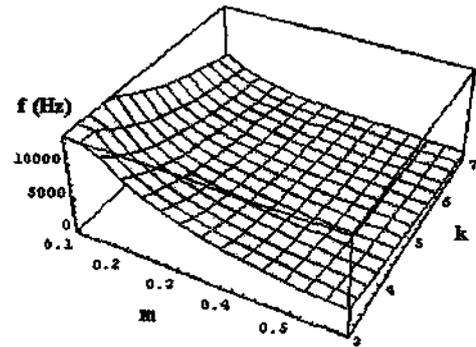


Gráfico 1: Frequência das Ondas Gravitacionais

Uma análise do gráfico 1 mostra claramente que, na faixa de frequências detectáveis pelo detector brasileiro ((3-3,4) kHz), as massas dos astros teriam que ser menores do que 0,75 massas solares. Massas maiores seriam possíveis apenas se k fosse muito pequeno, uma situação não-desejável por razões que serão discutidas mais adiante.

O Gráfico 2 é um corte do gráfico 1, para o caso em que $k = 3$.

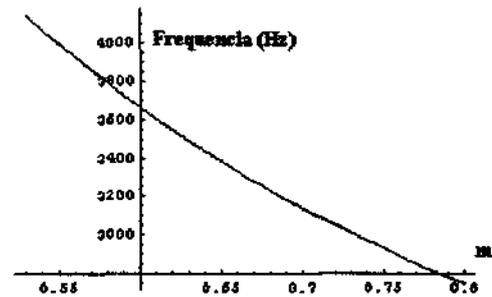


Gráfico 2: Corte do Gráfico 1 para $k=3$

4.3 Amplitude de Emissão de Sistemas Binários

A amplitude de uma onda emitida por um sistema binário é dada por (NAKAMURA,1997):

$$h = 4 \cdot 10^{-21} \left(\frac{M_{Chrp}}{M_0}\right)^{\frac{5}{6}} \left(\frac{f}{100Hz}\right)^{-\frac{1}{6}} \left(\frac{D}{20Mpc}\right)^{-1}$$

Onde:

$$M_{Chrp} = \frac{(M_1 \cdot M_2)^{\frac{3}{5}}}{(M_1 + M_2)^{\frac{1}{5}}}$$

- f é a frequência de emissão.
- D é a distância do sistema ao detector.

A amplitude emitida precisa ser suficientemente alta para sensibilizar o detector, cuja amplitude detectável mínima é:

$$h_s \cong 10^{-20} \quad (7)$$

Isso impõe mais um limite aos parâmetros do sistema:

$$h \geq h_s \Rightarrow \frac{D}{X_s \cdot k^4} \leq A \quad (8)$$

Onde:

- A é um fator que depende de como a massa do sistema está distribuída entre dois astros.
- $A = 1,6178 Mpc$ para astros com massas iguais. Este é o caso em que a onda emitida tem maior amplitude.

4.4 Excentricidade das órbitas de Sistemas Binários

Nas seções seguintes será frequentemente assumido que a excentricidade das órbitas dos sistemas é 0, ou seja, a órbita é circular. Essa suposição não é totalmente arbitrária, visto que, à medida que ondas gravitacionais são emitidas, a excentricidade tende a diminuir (PETERS, 1964).

4.5 Tempo de Coalescência

A medida que ondas gravitacionais são emitidas, o sistema perde energia e os astros espiralam até se chocarem.

O tempo que é necessário para que haja o choque, considerando que os astros tenham velocidade de espiralação inicial nula e que suas massas sejam pontuais é dado pela seguinte expressão:

$$T = T_0 \cdot \left(\frac{R}{R_0}\right)^4 \cdot (1 - e^2)^{\frac{7}{2}} \quad (9)$$

Onde:

- $T_0 = 10^{10}$ anos
- $R_0 = 2 \cdot 10^9 \left(\frac{M_1 + M_2}{2 \cdot M_0}\right)^{\frac{3}{4}}$
- e é a excentricidade da órbita.

A exigência de massas pontuais é satisfeita no caso de buracos negros. No caso de outros eventuais tipos de astros, o tempo de coalescência pode ser usado como estimativa do tempo de choque real.

Simplificando a expressão (9) e assumindo órbita circular, obtém-se:

$$T = (0,137068 \cdot s) \cdot k^{\frac{5}{2}} \quad (10)$$

Esta expressão também impõe algum limite para k , pois se este for muito pequeno, o sistema emitirá ondas na faixa de detecção apenas durante um tempo muito curto.

Além disso, quanto menor for o tempo de coalescência, mais comprometida fica a aproximação clássica que utiliza a lei de Kepler para o cálculo da frequência.

5.6 Estabilidade da Órbita

Para que a órbita circular de uma partícula de teste numa métrica de Schwarzschild seja estável e necessário que o raio da órbita seja no mínimo três vezes maior que o raio de Schwarzschild (CARROLL, 1997).

O conceito de estabilidade não se aplica perfeitamente aos sistemas binários, pois estes, ao contrário de partículas de teste, possuem massa não-desprezível e emitem ondas gravitacionais, o que provoca, inevitavelmente, a coalescência. No entanto, o limite imposto pode ser visto também como uma medida da exatidão das aproximações newtonianas e formalismos pós-newtonianas.

Dois “zonas de instabilidade” (para partículas de prova com órbitas circulares) ficam delimitadas, uma em torno de cada astro:

$$S \leq r \leq 3S \quad (11)$$

Assumindo-se órbita circular, tem-se:

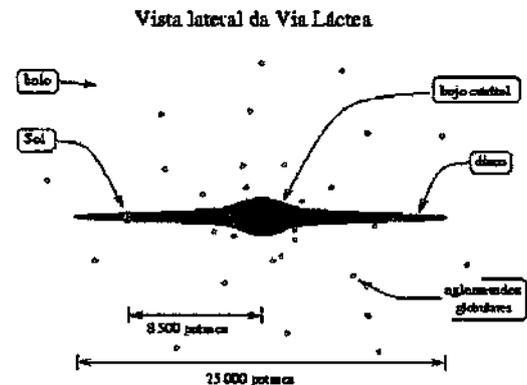
$$k \geq 3 \quad (12)$$

5.7 Possíveis Sistemas cujos Parâmetros Satisfazem as Limitações Deduzidas

As equações (5), (8), (10), (12) exprimem as condições que devem ser satisfeitas pelo sistema para que suas ondas sejam detectáveis pelo detector “Schenberg”.

O possibilidade mais promissora consiste de sistemas formados por Buracos Negros MaCHO (Massive Compact Halo Objects).

Como o próprio nome diz, MaCHO são objetos massivos e compactos supostamente localizados nos halos de galáxias espirais. Sua existência é sugerida para tentar explicar anomalias na velocidade de rotação dessas galáxias.



A massa desses objetos é estimada em (ALCOCK, 1996):

$$M = 0,5^{+0,3}_{-0,2} M_0 \quad (13)$$

Para esse valor de massa, a equação (5) impõe:

$$2,603 \leq k \leq 5,44117 \quad (14)$$

Para essa faixa de valores para a massa e para k , a onda de amplitude mais baixa ocorrerá, por (8), para $Xs = 0,6$ e $k = 5,44117$, mesmo nessa situação, ainda pela equação (8), o sinal poderá ser detectado pelo "Schenberg" a uma distância máxima de 1,48252 Mpc.

Para sistemas binários de MaCHO na Via Láctea ($D \leq 25kpc$), a amplitude da onda é pelo menos 59 vezes maior que a amplitude mínima detectável pelo "Schenberg"

A possibilidade de sistemas binários formados por estrelas de nêutrons está sendo estudada. Outras alternativas serão abordadas futuramente.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Diante do impacto que uma detecção pode causar no conhecimento científico, diversos grupos ao redor do mundo tem buscado construir diferentes tipos de detectores, inserindo-se aí o detector brasileiro.

Nos capítulos anteriores foi mostrada a importância da detecção das Ondas Gravitacionais e como esta pesquisa se insere nesta busca da Ciência moderna, ao tentar determinar que sistemas binários podem ser detectados pelo detector "Schenberg".

A pesquisa foi bem-sucedida em seguir o cronograma previsto inicialmente.

Cabe ressaltar que os resultados são aproximações newtonianas com alguns formalismos pós-newtonianos. Dois aspectos podem ser fontes de erro nesse tipo de aproximação, ao gerar efeitos relativísticos:

- A velocidade dos astros pode ser comparável a da Luz.
- A intensidade do campo gravitacional na região considerada pode ser significativamente alta.

Futuramente, serão estudados com maior profundidade:

- O tempo de coalescência do sistema, visando determinar a duração da passagem do sistema na banda de detecção do "Schenberg".
- A influência de órbitas não-circulares.

- Uma estimativa do número de sistemas binários que o "Schenberg" estará em condições de detectar por ano.
- A necessidade e exatidão dos usos de técnicas pós-newtonianas de aproximação.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa.

Ao orientador José Carlos Neves de Araujo, pelos ensinamentos e ajuda tanto em assuntos referentes a pesquisa que vem sendo realizada quanto com relação a Ciência e seu método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER, R. et al., *Introduction to General Relativity* McGraw-Hill Book Company, 1975.
- AGUIAR, O.D. et al., *The Status of the Brazilian spherical detector*, Classical and Quantum Gravity, 1999.
- ALCOCK, C. et al., astro-ph/9606165, 1996.
- CARROLL, S., *Lecture Notes on General Relativity*, gr/qc/9712019, 1997.
- D'INVERNO, R., *Introducing Einstein's Relativity*, Oxford, 1992.
- NAKAMURA, T. and SASAKI, M. and TANAKA, T. and THORNE, K.S., *Gravitational Waves from Coalescing Black Hole MACHO Binaries*, astro-ph/9708060, 1997.
- PETERS, P.C., *Gravitational Radiation and the Motion of Two Point Masses*, Physical Review Volume 136 Number 4B, 1964.
- PRINGLE, J.E. and WADE, R.A., *Interacting Binary Stars*, Cambridge University Press, 1985.
- SHAPIRO, S.L. and TEUKOLSKY, S.A., *Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars*, Wiley and Sons, 1983.
- WILL, C.M., *Was Einstein right?*, Basic Books, 1993.

Relatório Científico

Processo: 562845/2001-1

Bolsa: PIBIC/CNPq

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Projeto: Fontes Astrofísicas de Ondas Gravitacionais

Relatório: 1 (hum)

Período: agosto 2001 – janeiro 2002

Bolsista: Bruno Woltzenlogel Paleo

Orientador: José Carlos Neves de Araujo

FONTES ASTROFÍSICAS DE ONDAS GRAVITACIONAIS

RELATORIO PARCIAL

Bolsista: Bruno Woltzenlogel Paleo
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
12228-901 São José dos Campos - SP
bcilican@terra.com.br

Orientador: José Carlos Neves de Araujo
Divisão de Astrofísica
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos - SP
jcarlos@das.inpe.br

RESUMO

Este relatório descreve o atual estágio da iniciação científica em pesquisa de fontes astrofísicas de ondas gravitacionais, sob a orientação do professor José Carlos Neves de Araujo na Divisão de Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. A pesquisa está focada primariamente em sistemas binários como possíveis fontes astrofísicas de ondas gravitacionais a serem detectadas pelo detector brasileiro em construção. Para a realização da pesquisa tem se mostrado necessário, como previsto, um estudo introdutório da teoria da relatividade geral.

1 INTRODUÇÃO

Neste documento serão apresentados os resultados obtidos até agora na pesquisa de fontes astrofísicas de ondas gravitacionais, a serem detectadas pelo futuro detector brasileiro.

Ele está estruturado nas seguintes seções:

- **Cronograma da Pesquisa** – Discussão do cronograma inicial, mostrando as etapas que foram cumpridas e o que devesse ser feito nos meses seguintes.
- **Teoria da Relatividade Geral** – Resumo dos principais conceitos aprendidos durante o estudo da Relatividade Geral, objetivando explicar qualitativamente como são geradas as ondas que estão sendo procuradas.
- **O Detector Brasileiro** – Informações sobre o detector brasileiro que são relevantes para esta pesquisa.
- **Sistemas Binários** – Apresentação e análise de boa parte dos cálculos que foram feitos até agora para verificar a emissão de ondas gravitacionais por sistemas binários.

2 CRONOGRAMA DA PESQUISA

O cronograma inicial previa o dispêndio de algum tempo para um aprendizado introdutório da teoria da relatividade geral, antes de começar com o estudo de fontes astrofísicas de ondas gravitacionais (GW), visto que essa teoria contém todos os conceitos fundamentais que regem a produção, propagação e absorção das GW.

Os meses de agosto e setembro, bem como alguns meses anteriores ao período de vigência da bolsa (abril, maio, junho) foram então quase inteiramente dedicados ao estudo da Relatividade.

A partir de Outubro a pesquisa foi gradualmente se voltando para o estudo das fontes de GW, iniciando com cálculos da frequência de emissão por sistemas binários de buracos negros, visando determinar sob que condições essa frequência está na faixa detectável pela antena brasileira.

A pesquisa tem, portanto, até agora seguido o cronograma previsto e, futuramente, a intenção é aprofundar os cálculos que já foram iniciados, estudando, por exemplo, a amplitude das ondas emitidas com base na Relatividade Geral.

3 TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL

O estudo introdutório da Teoria da Relatividade se baseou nos livros citados nas referências bibliográficas e compreendeu os seguintes assuntos:

- Relatividade Restrita
- O princípio da equivalência
- O princípio da covariância e o Cálculo Tensorial
- A Equação de Einstein
- Testes Experimentais da Teoria
- A Solução de Schwarzschild
- Ondas Gravitacionais
- Cosmologia

3.1 Relatividade Restrita

A Relatividade Restrita postula que as leis da física são iguais para todos os referenciais inerciais e que, nestes referenciais, a velocidade da luz tem sempre o valor c .

Estes postulados resolveram de maneira elegante o conflito existente entre as Equações de Maxwell e as Transformações de Galileu, abandonando estas e deduzindo as Transformações de Lorentz.

Das novas transformações, ficam evidentes algumas das quebras de paradigmas que ocorreram:

- Dois referenciais inerciais com velocidade relativa medem de forma diferente:
 - Comprimentos (Contração do Espaço).
 - A passagem do tempo (Dilatação do Tempo).
- A massa de um objeto e função de sua velocidade.
- Massa e Energia são dois aspectos da mesma "entidade" ($E = m \cdot c^2$).

3.2 Princípio da Equivalência

O princípio da equivalência é um dos princípios mais importantes que estão na base da Teoria Geral da Relatividade e consiste na constatação de que tanto a força gravitacional de Newton quanto as forças inerciais sofridas por um objeto são proporcionais a sua massa (equivalência da massa inercial e da massa gravitacional).

A partir dessa constatação, o princípio da equivalência estabelece que as forças gravitacional e as forças inerciais são localmente indistinguíveis.

3.3 Princípio da Covariância

O princípio da covariância diz que as equações da física devem ser covariantes, isto é, devem ter suas formas independentes do sistema de coordenadas.

Isso é conseguido através do cálculo tensorial e da geometria riemanniana, sendo que a covariância em referenciais não-inerciais ou (equivalentemente) na presença de gravidade acaba por requerer que a geometria do universo seja curva: A massa encurva o universo ao seu redor.

3.4 Ondas Gravitacionais

A teoria prevê que, se uma massa oscila, a curvatura do espaço que ela gera se propagará com velocidade c , gerando assim as Ondas Gravitacionais.

Até hoje, nunca houve uma detecção direta dessas ondas, o que é muito desejável pois:

- Seria mais um teste permitindo comparar a Relatividade Geral com outras teorias de gravitação.
- Abriria uma nova "janela" para o Universo, permitindo obter informações de fenômenos não observáveis através do espectro eletromagnético. Essas informações poderiam alterar de modo significativo o conhecimento cosmológico e de física fundamental.

4 O DETECTOR BRASILEIRO

Diante do impacto que uma detecção pode causar no conhecimento científico, diversos grupos ao redor do mundo tem buscado construir diferentes tipos de detectores.

O detector brasileiro usará a técnica da "massa ressonante": Uma esfera de 65cm de diâmetro, construída a partir de uma liga de cobre-alumínio (94%-6%), é inserida num sistema cujo objetivo é isolá-la de ruídos indesejáveis. Ao ser atingida por uma onda gravitacional, ela será deformada juntamente com o espaço-tempo e passará a sofrer oscilações que serão detectadas eletronicamente.

Com essa técnica e devido às características já mencionadas da esfera será possível: (AGUIAR, 2002)

- Detectar ondas com frequência entre 3kHz e 3,4Khz.
- Analisar a polaridade e a direção das ondas incidentes.

5 SISTEMAS BINÁRIOS

Sistemas Binários com órbitas circulares emitem ondas gravitacionais cuja frequência, no harmônico fundamental, é duas vezes maior que a frequência orbital. (SHAPIRO and TEUKOLSKY, 1983)

$$f_G = f = 2 \cdot f_0 \quad (1)$$

Para órbitas não-circulares, quanto maior a excentricidade, mais significativa é a emissão nos harmônicos não-fundamentais.

A terceira lei de Kepler fornece o período de órbita de um sistema binário como função das massas dos astros envolvidos e da distância entre eles.

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{G(M_1 + M_2)}} \quad (2)$$

Onde:

- M_1 e M_2 são as massas dos astros.
- R e a distância de separação.
- G e a constante universal da Gravitação, sendo seu valor igual a: $(6,673 \pm 0,010) \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$.

Utilizando as equações 1 e 2, obtém-se a dependência da frequência fundamental das ondas gravitacionais produzidas como função das massas dos astros e da distância de separação.

$$f = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{c^6}{8 \cdot G^2 M_0^2 (m+n)^2 \cdot k^3}} \quad (3)$$

Onde:

- $M_0 = 1,989 \cdot 10^{30} kg$ é a Massa Solar.
- $m = \frac{M_1}{M_0}$ e $n = \frac{M_2}{M_0}$
- $c = 299792458 \frac{m}{s}$ é a velocidade da Luz.
- $k = \frac{R}{S_1 + S_2}$
- S_1 e S_2 são os raios de Schwarzschild dos astros envolvidos.

Para que a órbita circular de uma partícula de teste numa métrica de Schwarzschild seja estável e necessário que o raio da órbita seja no mínimo três vezes maior que o raio de Schwarzschild (CARROLL, 1997).

Isso impõe um limite inferior para os valores de k . Duas "zonas de instabilidade" (para partículas de prova com órbitas circulares) ficam delimitadas, uma em torno de cada astro:

$$S \leq R \leq 3S \quad (4)$$

A situação na qual essas duas regiões se interpenetram ainda não foi estudada, tendo sido assumido, até o presente momento que:

$$k \geq 3 \quad (5)$$

Para o caso em que $n = m$, os resultados podem ser vistos no gráfico 1.

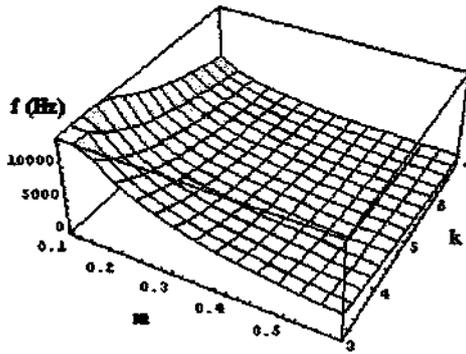


Gráfico 1: Frequência das Ondas Gravitacionais

Uma análise do gráfico 1 mostra claramente que, na faixa de frequências detectáveis pelo detector brasileiro ((3-3,4) kHz), as massas dos astros teriam que ser menores do que 1 massa solar. Caso esses astros sejam buracos negros, seriam muito pouco-massivos e não poderiam se originar de um processo de evolução estelar padrão, devendo ter origens mais exóticas.

O Gráfico 2 é um corte do gráfico 1, para o caso em que $k = 3$.

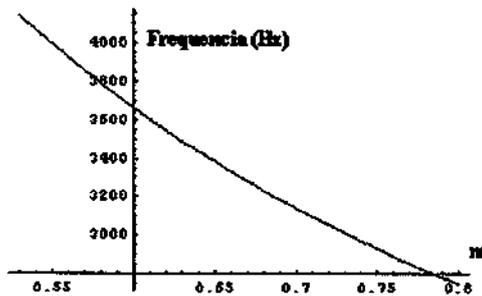


Gráfico 2: Corte do Gráfico 1 para $k=3$

Para esse caso ($k = 3$), a velocidade dos astros foi calculada:

$$v = 1,2239 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cong 0,4c \quad (6)$$

É importante notar que os resultados apresentados foram obtidos através da uso da 3 Lei de Kepler, que é deduzida da gravitação newtoniana e não da Relatividade Geral. Eles devem ser vistos, portanto, como uma aproximação clássica.

Dois aspectos podem ser fontes de erro nessa aproximação clássica, ao gerar efeitos relativísticos:

- A velocidade dos astros é comparável a da Luz.

- A intensidade do campo gravitacional na região considerada pode ser significativamente alta.

Faz-se necessária, portanto, uma análise mais cuidadosa da exatidão dos cálculos clássicos.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Nas seções anteriores foi mostrada a importância da detecção das Ondas Gravitacionais e como esta pesquisa se insere nesta busca da Ciência moderna.

A pesquisa tem seguido seu cronograma inicial e os cálculos e descobertas que foram feitos até agora têm levado a novas indagações, cujas respostas serão continuamente buscadas nos próximos meses de pesquisa.

Por esses motivos, a pesquisa tem sido bem-sucedida ao atuar como uma *iniciação científica*.

Futuramente, serão estudadas as condições sob as quais o detector poderá vir a detectar as ondas gravitacionais dos sistemas binários estudados até agora, incluindo aí o cálculo das amplitudes das ondas.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa.

Ao orientador José Carlos Neves de Araujo e aos professores Odylio Denys Aguiar e Rubens Marinho, pelos ensinamentos e ajuda tanto em assuntos referentes a pesquisa que vem sendo realizada quanto com relação a Ciência e seu método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER, R. et al., *Introduction to General Relativity* McGraw-Hill Book Company, 1975.
- AGUIAR, O.D. et al, *Classical and Quantum Gravity*, em impressão, 2002.
- CARROLL, S., *Lecture Notes on General Relativity*, gr/qc/9712019.
- D'INVERNO, R., *Introducing Einstein's Relativity*, Oxford, 1992.
- PRINGLE, J.E. and WADE, R.A., *Interacting Binary Stars*, Cambridge University Press, 1985.
- SHAPIRO, S.L. and TEUKOLSKY, S.A., *Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars*, Wiley and Sons, 1983.
- WILL, C.M., *Was Einstein right?*, Basic Books, 1993.