



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Autorizada pelo Decreto Federal nº 77.496 de 27/04/76

Recredenciamento pelo Decreto nº 17.228 de 25/11/2016



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

XXIV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2020

Ondas Gravitacionais: Simulações de um modelo semi-clássico

Pedro Jeronimo Santos da Silva¹ and Rainer Karl Madejsky²

¹Bolsista PROBIC/UEFS, Graduando em Bacharelado em Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: pedroparker2@hotmail.com

²Orientador, Departamento de DFIS, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: madejsky@uefs.br

PALAVRAS-CHAVE: Ondas gravitacionais; Simulações numéricas; Fusão de buracos negros.

INTRODUÇÃO

De acordo com a teoria da relatividade geral, uma massa acelerada emite ondas gravitacionais (OG) (EINSTEIN, 1978). Em sistemas binários de estrelas de nêutrons ou buracos negros, as acelerações podem ser altas quando a distância entre as duas estrelas ou buracos negros é muito pequena, da ordem de poucos mil quilômetros. Nesse caso, o sistema binário converte uma parte considerável de sua energia orbital em energia para emissão de ondas gravitacionais. A taxa de perda de energia orbital devido à emissão de ondas gravitacionais é tão alta que as duas estrelas de nêutrons ou os dois buracos negros rapidamente fusionam. As primeiras ondas gravitacionais foram detectadas em 2015 pelo observatório LIGO que usa uma versão moderna do interferômetro de Michelson (ABBOTT et al., 2016). As ondas gravitacionais foram detectadas durante o último décimo segundo antes da fusão de dois buracos negros com massas de 29 e 36 massas solares (M_{\odot}). O buraco negro formado pela fusão possui uma massa de 62 massas solares, a diferença com as massas antes da fusão sendo emitida pelas ondas gravitacionais. A potência $P = dE/dt$ das ondas gravitacionais emitidas de acordo com a teoria da relatividade geral é proporcional à quinta potência da massa e da inversa distância dos objetos em órbitas em torno do centro de massa. A correspondente taxa de conversão de energia deve ser considerada nos cálculos semi-clássicos. A ideia principal do presente plano de trabalho é realizar cálculos semi-clássicos, considerando a perda de energia orbital devido à emissão de ondas gravitacionais de acordo com a teoria da relatividade geral. Usaremos, adicionalmente, simulações numéricas para calcular as características orbitais de duas massas que possuem um raio que corresponde ao raio de Schwarzschild. Nessas simulações será considerada explicitamente a taxa de perda de energia devido à emissão de ondas gravitacionais.

MATERIAL E MÉTODOS OU METODOLOGIA (ou equivalente)

Para análise e coleta de dados utilizar-se-á uma abordagem metodológica quantitativa de natureza descritiva e explicativa. Os dados utilizados para realização do projeto estão presentes no artigo Observation of gravitational waves from a binary black hole merger (ABBOTT et al., 2016). Os valores consequentes serão concebidos utilizando ferramentas numéricas e conceitos físicos descritos na mecânica clássica. Posteriormente, analisar-se-á a dinâmica durante a colisão de dois buracos negros em uma aproximação semi-clássica. Far-se-á a abordagem utilizando ferramentas numéricas, como o integrador REBOUND, com implementações necessárias para compreensão da variação da dinâmica com a presença da Onda Gravitacional.

RESULTADOS E/OU DISCUSSÃO (ou Análise e discussão dos resultados)

Considerando o problema de dois corpos e a simetria do problema proposto, primeiramente foi definido um referencial teórico, como mostrado na Figura 1. O movimento relativo entre os corpos tem como parâmetro um referencial inercial.

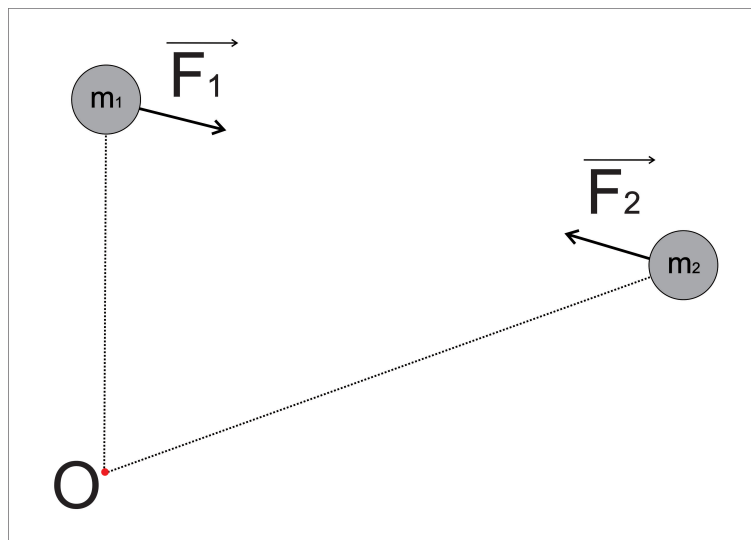


Figura 1: Representação esquemática de um sistema de dois corpos com um referencial inercial (O).

Os corpos apresentam interação gravitacional mútua, portanto, a massa do primeiro corpo (m_1) atrai o segundo corpo (m_2) e vice-versa. Posteriormente, é definido que os corpos a serem observados se tratam de buracos negros, então algumas considerações devem ser feitas. O raio de Schwarzschild (r_s) é o raio da extensão do horizonte de eventos de um buraco negro, ou seja, não se trata do raio físico do buraco negro, mas do limite do potencial gravitacional de onde nem mesmo a luz consegue escapar (EINSTEIN, 1978). Para o cálculo do Raio de Schwarzschild é utilizada a conservação de energia (E), ou seja, a energia total do sistema é igual a zero.

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

É conhecido que para um raio menor que o r_s as informações físicas e matemáticas ainda são desconhecidas. Nesse sentido, por tratar-se de um modelo aproximado, os cálculos posteriores

foram simulados considerando o raio da superfície de um buraco negro.

A linguagem de programação utilizada para a confecção do código é o C e o integrador numérico utilizado é o pacote de integração REBOUND. Para o presente problema, dentro os integradores do pacote, o integrador utilizado foi o IAS15, por se trata de um integrador não simplético de alta precisão com passos de tempo adaptativo (REIN; SPIEGEL, 2015). Com os valores de massa é possível calcular o valor do Raio de Schwarzschild. Como parâmetro para a dinâmica de colisão é utilizada a distância relativa entre os corpos. O código apresentado até o presente momento descreve a dinâmica de dois buracos negros através das equações presentes na Mecânica Clássica, portanto não há dissipação por onda gravitacional. O comportamento da dinâmica de dois buracos negros, com 30 massas solares (30Mo), em função do tempo para uma distância de 1800km com uma velocidade de 20000Km/s na direção \vec{x} é apresentado na Figura 2

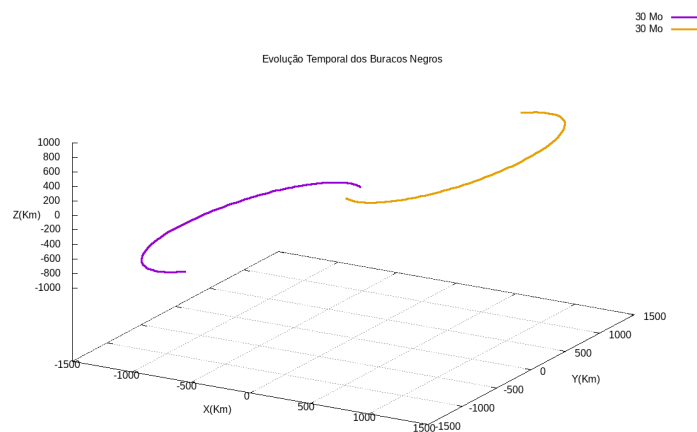


Figura 2: Trajetória dos buracos negros com velocidade inicial de 20.000Km/s na direções \vec{x} e \vec{y}

Após diversas variações de posições e velocidades para a validação física do algoritmo, foi implementada a taxa de variação da energia dissipada por onda gravitacional. O resultado obtido para o sistema, considerando a convenção de massa em potência das ondas gravitacionais, sobre as mesmas condições iniciais apresentadas anteriormente, é mostrado a seguir com seus respectivos valores de massa dissipada e potência.

Como descrito anteriormente, a taxa de variação da energia é proporcional à quinta da inversa distância, então quanto menor a distância maior será a potência, e, proporcionalmente, maior conversão de massa em onda gravitacional. No caso apresentado, por se tratar de corpos extremamente densos com uma atração gravitacional forte, o tempo de encontro das telas compactas é curto, contudo os valores de massa convertida e taxa de variação da energia podem ser observados de forma evidente em escala logarítmica na figura 3. Como as massas foram transformadas, então as velocidades dos corpos aumentam, reduzindo o tempo para colisão. Portanto, o tempo de colisão dos buracos negros é menor quando inserida taxa de variação da energia. Os resultados apresentados nos gráficos apresentam uma intensidade de potência e massa transformada com ordem de grandeza semelhantes ao que está presente na literatura.

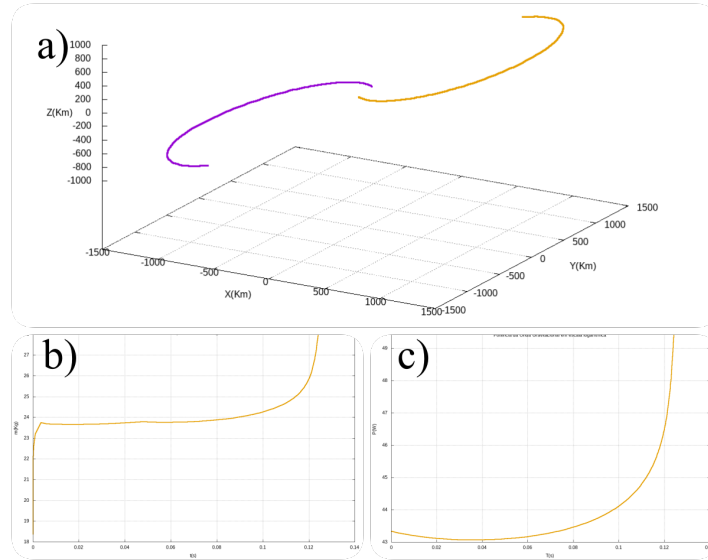


Figura 3: a) Trajetória dos buracos negros 20.000Km na direção x e y . b) Massa dissipada em função do tempo em escala logarítmica. c) Taxa de variação da energia dissipada por onda gravitacional em escala logarítmica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS (ou Conclusão)

Com os resultados apresentados, verificou-se uma variação na dinâmica do sistema com a emissão de ondas gravitacionais. Também foi observado a alteração temporal quando inserida o termo de potência. As mudanças observadas se distinguem das apresentadas na literatura, por se tratar de um modelo aproximado que utiliza a mecânica clássica com o efeito das ondas gravitacionais, que é de natureza relativística. Contudo, os resultados se assemelham com os presentes na literatura.

Referências

ABBOTT, B. P. et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger.

Physical review letters, APS, v. 116, n. 6, p. 061102, 2016.

EINSTEIN, A. Os fundamentos da teoria da relatividade geral. A. Einstein, H. Lorentz, H. Weyl e H. Minkowski, *O Princípio da Relatividade*, p. 141–214, 1978.

NEWTON, I. The principia: Mathematical principles of natural philosophy (ib cohen & a. whitman, trans.). Berkeley: University of California Press (third edition of Principia originally published 1727), 1999.

REIN, H.; SPIEGEL, D. S. Ias15: a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 446, n. 2, p. 1424–1437, 2015.