

# Simulações Gravitacionais de N-Corpos para Sistemas com Buracos Negros

Arthur Eduardo da Mota Loureiro (Bolsista INCT-A, IF-UFRGS), Guilherme G. Ferrari (IF-UFRGS), Horacio A. Dottori (Orientador, IF-UFRGS)

## Resumo

Observações realizadas por pesquisadores da UFRGS demonstram a existência de chute gravitacional de um buraco negro do centro da galáxia M83. Em sua dissertação de mestrado, Guilherme Gonçalves Ferrai desenvolveu um código para estudar o recuo gravitacional de um buraco negro no processo de fusão de 2 ou 3 destes corpos inseridos em um aglomerado de estrelas. Neste estudo utilizaram-se métodos de integração simpléticos dentro de uma aproximação Pós-Newtoniana da Relatividade Geral em ordem 3.5, sem introduzir a interação de spin dos buracos negros nestas simulações, devido ao grande número de termos envolvidos. Este trabalho de Iniciação Científica objetiva colaborar na implementação desta interação e no desenvolvimento de um módulo de regularização de dois corpos que posteriormente será implementado ao código de N-corpos original, a fim de tratar a formação dinâmica de binárias durante uma simulação no qual os buracos negros estão inseridos.

## O chute gravitacional da galáxia M83:

Observações indicam que o rádio-quasar J133658.3-295105 [1][2], supostamente em  $z \geq 1$ , possui um estranho alinhamento com o núcleo óptico da galáxia M83 (distância de 4.5 Mpc) que por si não corresponde ao centro cinemático da mesma. Dottori et al. [1] baseados em espectroscopia H $\alpha$  afirmam que o rádio-quasar é um objeto que fora ejetado do centro óptico de M83. Em uma nova análise, Dottori et al. [2] observaram que J133658.3-295105 apresenta uma linha de emissão Fe-K $\alpha$  com um redshift compatível com a distância de M83. Estas observações sugerem que tal efeito decorra de um recuo gravitacional proveniente da fusão de 2 ou 3 Buracos Negros Super Massivos (SMBH's) no núcleo da galáxia.

Simulações numéricas realizadas por Ferrari, G.G. utilizando aproximações Pós-Newtonianas mostram que o cenário com 3 SMBH's é mais apropriado para a reprodução do efeito de recuo gravitacional do rádio-quasar J133658.3-295105, causando simultaneamente o deslocamento do centro óptico em relação ao centro cinemático da galáxia.

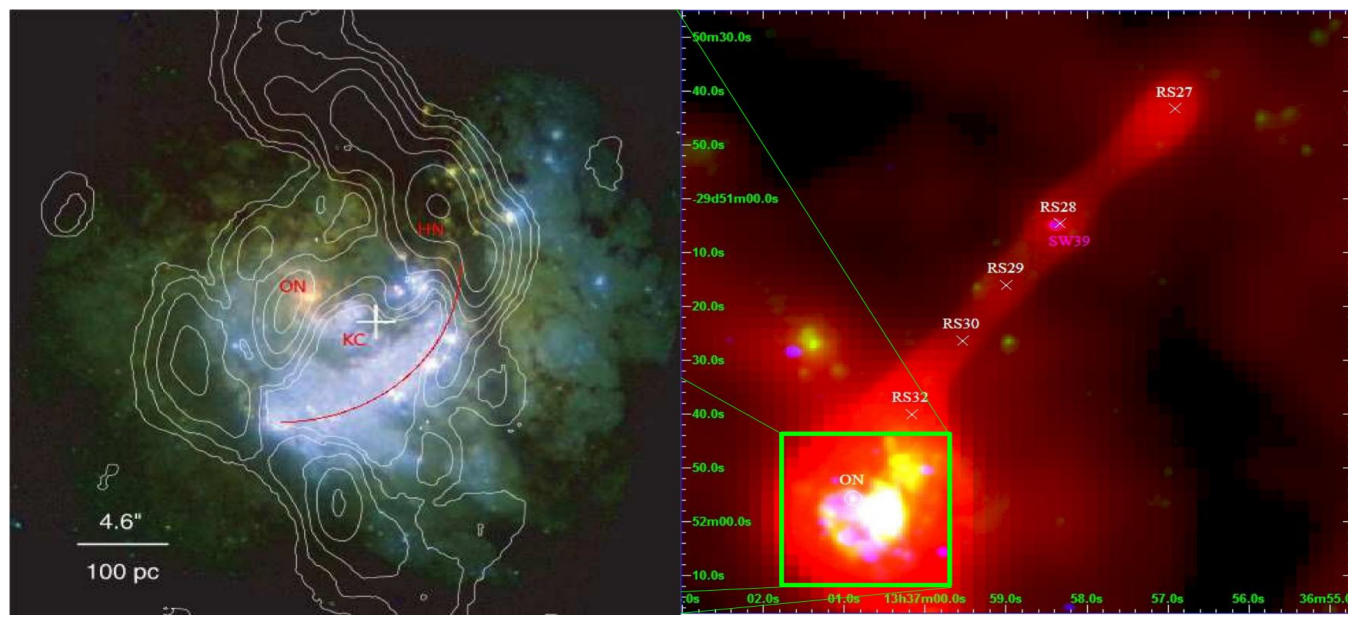


Fig.1: A figura da direita mostra o alinhamento de 5 fontes de rádio com o núcleo óptico da M83. A figura a esquerda mostra o deslocamento de ~60 pc do núcleo óptico com o núcleo cinemático da galáxia.

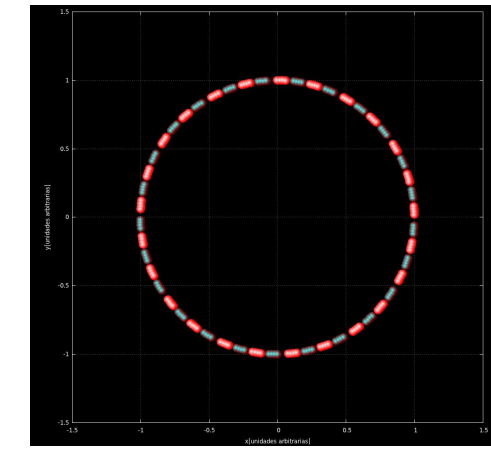


Fig.6: Simulação de um sistema binário com excentricidade zero utilizando o código de N-Corpos regularizado temporalmente

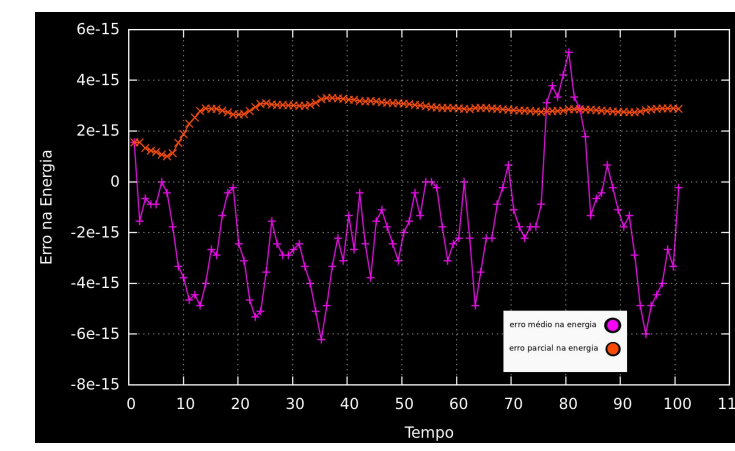


Fig.7: Erro médio e erro parcial na energia do sistema binário com excentricidade zero. Ambos encontram-se na ordem de  $10^{-15}$ .

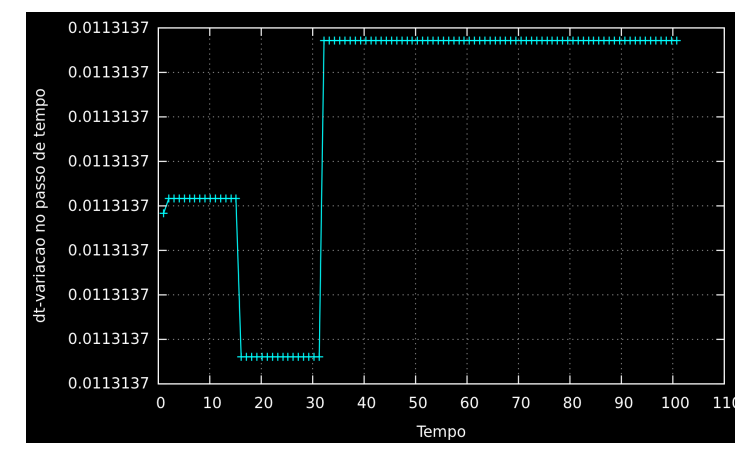


Fig.8: Variação no passo de tempo  $dt$  pelo tempo, mostrando a regularização existente no tempo como variável canônica. Como previsto, não há variação no passo devido ao caráter circular da órbita.

## Método de integração numérica para N-Corpos:

Partindo da equação da Gravitação Newtoniana:

$$\vec{F}_i = - \sum_{j \neq i}^N G \frac{m_i m_j (\vec{r}_i - \vec{r}_j)}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3} - \vec{\nabla} \cdot \phi_{ext}(\vec{r}_i) \quad (1)$$

Introduzimos um termo  $\epsilon$  para evitar a singularidade presente em sistemas colisionais:

$$\vec{F}_i = - \sum_{j \neq i}^N G \frac{m_i m_j (\vec{r}_i - \vec{r}_j)}{(|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^2 + \epsilon^2)^{3/2}} \quad (2)$$

Aplicamos um método de regularização[3] introduzindo uma transformada temporal do tipo  $ds=Udt$  de forma que o Hamiltoniano transformado fique:

$$(3) \quad \Gamma = \frac{T - U + P_t}{U} \quad \text{Onde } P_t = -E_0 \text{ é o momentum canônico conjugado ao tempo.}$$

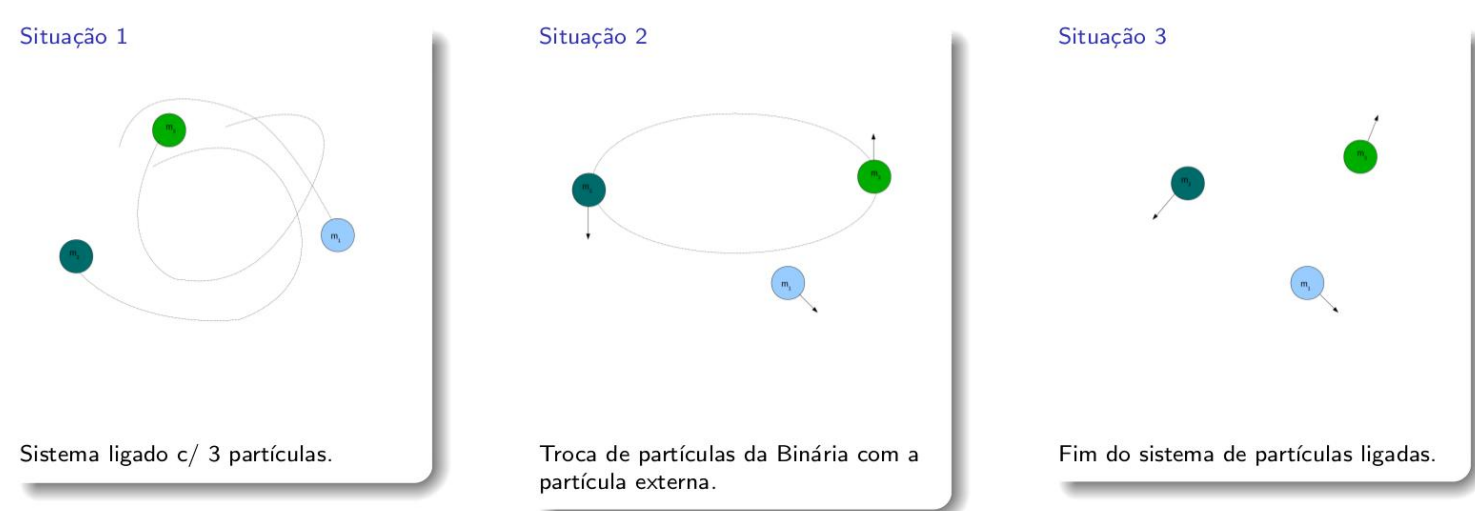
Finalmente aplicamos uma transformação canônica de forma que o novo Hamiltoniano do sistema fique:

$$\tilde{\Gamma} = \log(1 + \Gamma) \quad (4)$$

As equações de movimento resultantes são integradas de acordo com o método de Leap-Frog. Este método do Hamiltoniano Logarítmico possui erro apenas na coordenada temporal na ordem  $O(\Delta t^5)$ .

## O problema com os sistemas binários:

Para o sistema como um todo, podemos tratar um sistema binário como uma partícula única contendo a massa do sistema e evoluindo-o como o movimento de uma partícula fictícia contendo a massa reduzida da binária orbitando o centro de massa. Porém, quando uma terceira partícula se aproxima, alguns casos podem acontecer:



Em todos os casos, o custo computacional para integrar o sistema como um todo, em um código de N-Corpos, é muito alto, de forma que integrar o sistema binário separadamente torna-se computacionalmente importante.

## Resultados - Sistemas Binários:

A fim de testar o código, simulamos dois sistemas binários, sendo um deles com excentricidade nula e observamos o comportamento das órbitas, da variação da variável tempo e da energia pelo tempo. O método de regularização pelo Hamiltoniano Logarítmico exige que um passo de tempo menor ocorra quando a partícula estiver próxima ao centro de massas do sistema.

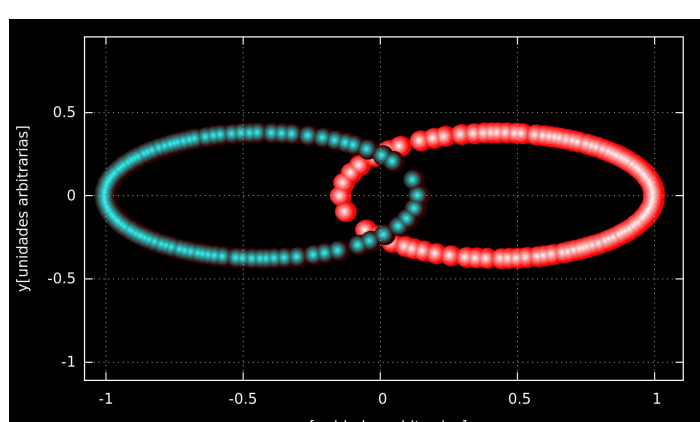


Fig.2: Órbitas de um sistema binário com excentricidade entre 0 e 1 geradas pelo programa de N-Corpos com regularização.

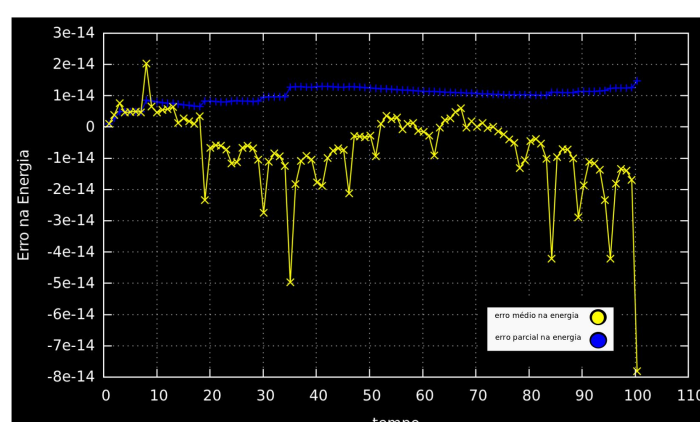


Fig.4: Erro médio e erro parcial na energia do sistema binário com excentricidade entre 0 e 1. Ambos encontram-se na ordem de  $10^{-14}$ .

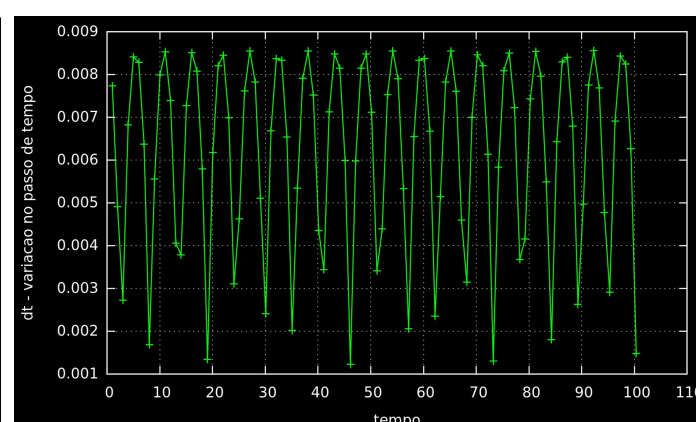


Fig.5: Variação no passo de tempo  $dt$  pelo tempo, mostrando a regularização existente no tempo como variável canônica. O passo de tempo inicial é da ordem de  $10^{-5}$ .

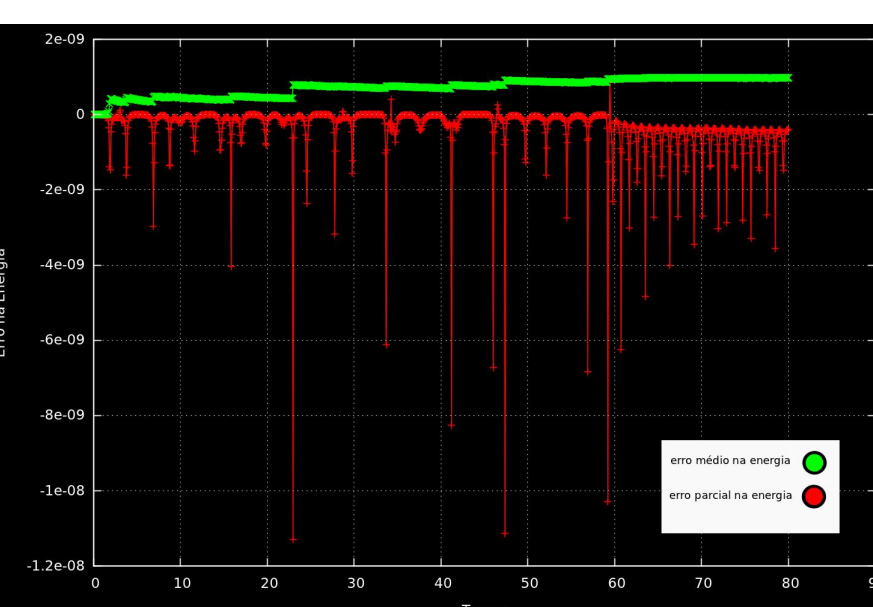


Fig.11: Erro médio e erro parcial na energia do sistema pitagórico. Ambos encontram-se na ordem de  $10^{-9}$ .

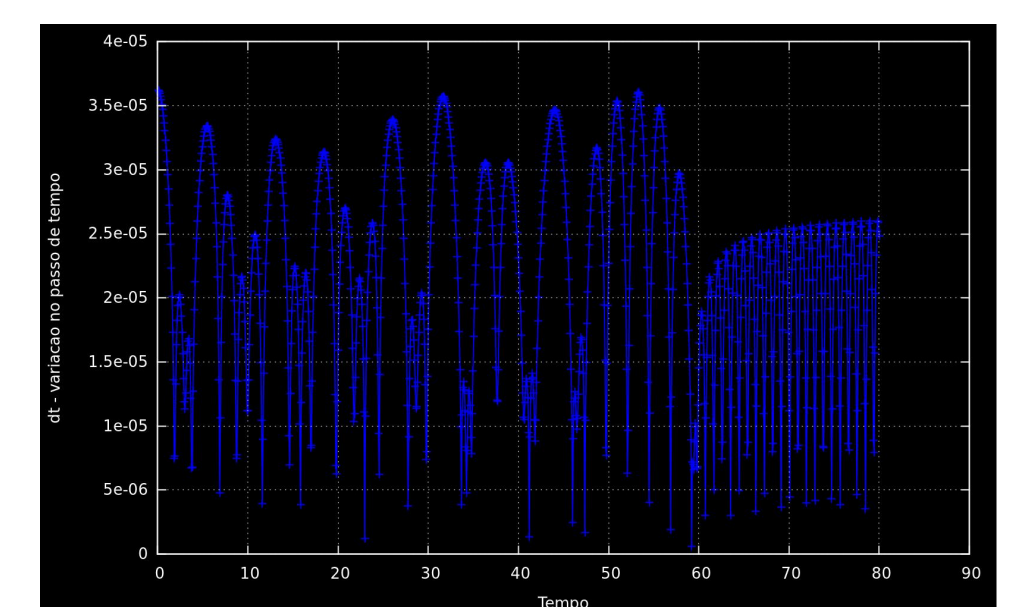


Fig.12: Variação no passo de tempo  $dt$  pelo tempo, mostrando a regularização existente no tempo como variável canônica. Pode-se perceber o tempo onde ocorre o chute gravitacional e a formação do sistema binário recuado.

## Resultados – Sistema Pitagórico:

Um excelente exemplo para modelos de chutes gravitacionais é o sistema conhecido como Pitagórico. As condições iniciais deste sistema, mostradas na figura abaixo, são tais que, após um complicado movimento ressonante, o sistema expulsa o corpo de menor massa e se liga em um sistema binário que sofre um certo recuo gravitacional. Tal modelo é muito importante para o estudo de sistemas com chutes gravitacionais como o caso da galáxia M83.

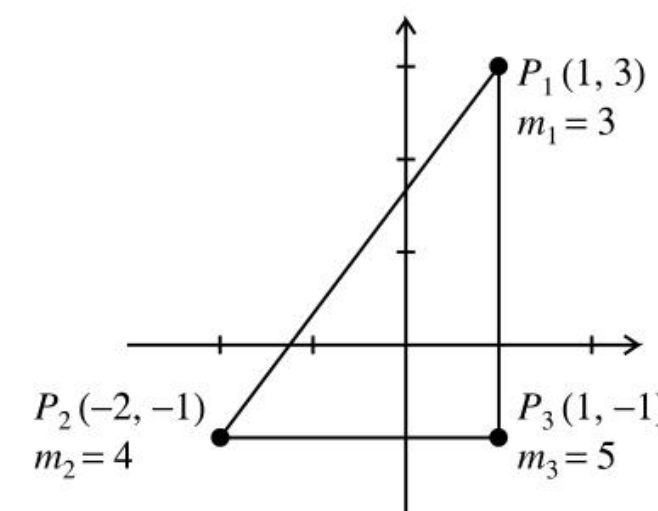


Fig.9: As condições iniciais para o sistema pitagórico.

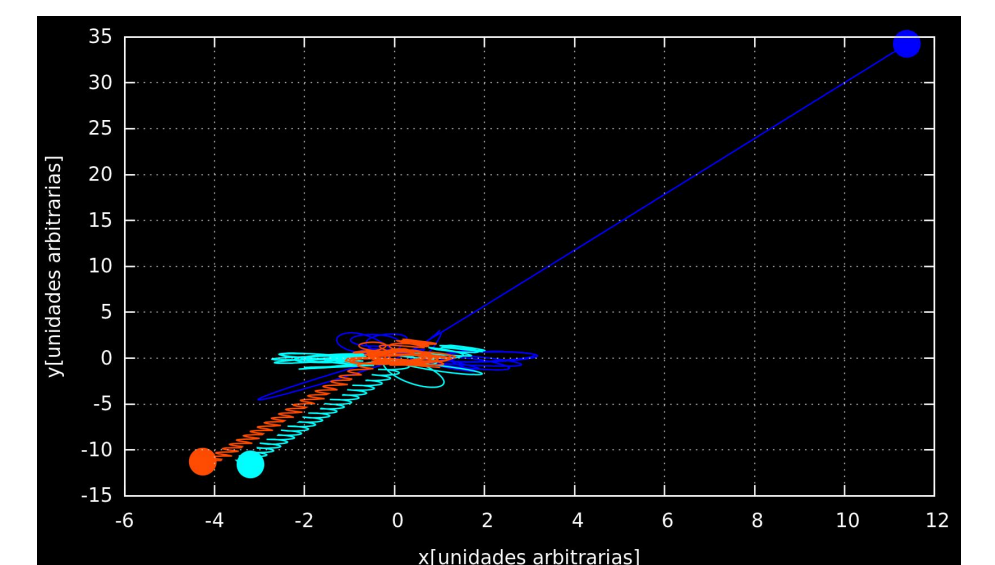


Fig.10: Trajetórias do sistema pitagórico, mostrando o chute gravitacional no corpo com a menor massa (azul) e a formação do sistema binário com um recuo gravitacional.

## Conclusões:

O método de regularização pela transformação canônica do Hamiltoniano logarítmico de um sistema gravitacional de N-Corpos nos proporciona um satisfatório método de variação do passo temporal do código, mostrando-se versátil nas diversas ocasiões apresentadas. Tal método será futuramente implementado para regularizar binárias formadas no código de N-Corpos criado por G. G. Ferrari tornando-o mais eficiente.

## Referências:

- [1] H. Dottori, R. J. Díaz, and D. Mast. *AJ*, 136:2468-2472, 2008
- [2] H. Dottori, R. J. Díaz, J. Facundo Albacete-Colombo, and D. Mast. *ApJL*, 717:L42-L46, 2010
- [3] S. Mikkola and S. Aarseth, *CeMDA*, 74:287-295, 1999
- [4] S. Mikkola and S. Aarseth, *CeMDA*, 84:343-354, 2002
- [5] S. Mikkola and K. Tanikawa, *MNRAS*, 310:745-749, 1999