

Universidade do Vale do Paraíba  
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

DINO BEGHETTO JUNIOR

UM ESTUDO NUMÉRICO SOBRE A FORMAÇÃO DE GALÁXIAS  
COM ANEL POLAR

São José dos Campos - SP

2015



Dino Beghetto Junior

UM ESTUDO NUMÉRICO SOBRE A FORMAÇÃO DE  
GALÁXIAS COM ANEL POLAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, como complementação dos créditos necessários para a obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

**Orientador:** Prof. Dr. Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho

São José dos Campos - SP

2015

Beghetto Junior, Dino.

Um Estudo Numérico sobre a Formação de Galáxias com Anel Polar. / Dino Beghetto Junior. Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho . São José dos Campos, 2015.

66p.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de **Física e Astronomia** do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, 2015.

Dinâmica de Galáxias; Galáxias com Anel Polar; Simulação Numérica de N-corpos; Astrofísica Extragaláctica; Galáxias em interação

CDU 000.000

Autorizo exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta Dissertação de Mestrado, por processos fotocopiadores ou transmissão eletrônica, desde que citada a fonte.

Assinatura do aluno:

Data:

DINO BEGHETTO JUNIOR

UM ESTUDO NUMÉRICO SOBRE A FORMAÇÃO DE GALÁXIAS  
COM ANEL POLAR

Presidente: Profa. Dra. Ângela Cristina Krabbe

---

Membro da Banca/UNIVAP  
São José dos Campos - SP

Prof. Dr. Maximiliano Faúndez Abans

---

Membro da Banca/LNA  
Itajubá - MG

Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira

---

Membro da Banca/UNIVAP  
São José dos Campos - SP

Prof. Dr. Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho

---

Orientador/UNIVAP  
São José dos Campos - SP

Prof. Dr.

Diretor do IP&D – UNIVAP

São José dos Campos, (data de aprovação).



O tempo dura bastante para aqueles que sabem aproveitá-lo.

LEONARDO DA VINCI (1452 — 1519)



## AGRADECIMENTOS

Agradecer. Taí uma coisa que eu gosto de fazer. E o farei aqui sem (quase) me preocupar com ordem, com polidez, com nada. Só com o simples e profundo ato de agradecer mesmo!

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro durante os 2 anos de mestrado.

Agradeço aos membros da banca da entrevista que fiz ao ingressar no programa de mestrado em Física e Astronomia da UNIVAP, professor Oli, professora Alessandra, e minha amiga Priscila: me aceitarem como aluno do programa foi gratificante, e foi quando fui alertado de que (cursando o fim de uma graduação junto com o mestrado) envelheceria 10 anos em 2. Não foi exatamente isso o que ocorreu, mas posso dizer que cansei 10 anos em 2 - envelhecer é um ato de espírito, e estudar e pesquisar é o tipo de trabalho que imagino ser o que fazemos quando crianças! As crianças estudam, pesquisam, aprendem e dormem... Tô precisando do último agora.

Agradeço aos meus colegas e amigos mestrados e doutorandos do programa, por serem sempre eles mesmos, auxiliando cada um de um jeito, seja com brincadeiras, estudos, trabalhos, pequenas dicas, grandes dicas, e até recebendo ajuda (sim, ajudar é também ser ajudado!)

Agradeço a todos os professores do LFA - Laboratório de Física e Astronomia, pelas aulas, pelos papos, pelas dicas, pelos cafés, pelo convívio! Aprendi e aprendo a cada instante!

Agradeço à minha mãe, dona Lola Mandi Candi, *per tutte le cose!!!* “Tá cansado, né? Mas tá dando tudo certo!”

Agradeço à minha irmã e ao meu cunhado por serem eles mesmos, e sempre se oferecerem pra um lanche, uma partida de videogame, um papo furado qualquer!

Agradeço à Clara Clarinha Clarrô, por ser assim, clareante!, deixando essa reta final (que sempre dizem ser amarga) com gosto de baunilha entre *abraços!* Sabe?! “Tá escrevendo?? Analisando?? Prestenção!!! <3 ”

Agradeço aos meus amigos de fora do mestrado, por serem sempre meus amigos, de verdade!! “Quando acaba essa tua bagunça toda, cara?? Vamos sair pra comemorar quando terminar: a gente bebe e você fica olhando!”

Agradeço ao Edu, meu amigo e camarada, por ser O cara! Sem ele amaciando aquele cluster, eu nunca tacaria-le-pau naquelas simulações! Valeu MESMO, sem você

essa dissertação não sairia!!!

Agradeço aos professores Alexandre e Ângela por terem gentilmente aceitado participar da banca da apresentação final desta dissertação, e também pelas sugestões feitas após o exame de qualificação.

Agradeço ao Max, pesquisador do LNA, por também gentilmente aceitar participar da banca da apresentação final deste trabalho.

E, por fim (é, aqui me preocupei com ordem: deixei pro final, mas por uma questão estética, não - MESMO - por ter menos importância), agradeço fortemente ao professor Irapuan, que me orientou de meio de 2010 até fim de 2012, quando eu era aluno de Iniciação Científica, me orientou durante este mestrado, e no meio disso tudo acabou se tornando um grande amigo. Muito obrigado MESMO, Irapa, o que eu aprendi e aprendo contigo não cabe aqui! Agradeço mesmo por ter acreditado em mim!!

Como dizia Gonzaguinha, “toda pessoa sempre é as marcas das lições diárias de outras tantas pessoas”!

Trabalho desenvolvido com o uso de recursos do Cluster Hiper cubo (Projetos FINEP 01.10.0661-00, FAPESP 2011/13250-0 e FAPESP 2013/17247-9) do Instituto de Pesquisa Desenvolvimento (IPD) da Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP).

# UM ESTUDO NUMÉRICO SOBRE A FORMAÇÃO DE GALÁXIAS COM ANEL POLAR

## RESUMO

A interação entre galáxias é um evento que ocorre com frequência no universo. Para determinadas interações, sistemas conhecidos como Galáxias com Anel Polar (PRGs, do inglês *Polar Ring Galaxies*) podem ser formados. Tais sistemas são constituídos por uma galáxia chamada hospedeira e um anel de gás e estrelas orbitando um plano quase perpendicular com relação ao seu plano principal. Neste trabalho foi desenvolvida uma primeira biblioteca de simulações de N-corpos com o objetivo de investigar o espaço de parâmetros necessários à formação de PRGs. Tal biblioteca está em constante crescimento por meio de novas simulações tomando como base estes primeiros resultados aqui apresentados. Pela geometria de uma PRG, sua formação não pode ser devida a processos seculares intrínsecos de galáxias isoladas. Sendo assim, estes sistemas são formados (a) por interações entre galáxias ou (b) por acréscimo de gás frio dos filamentos cósmicos por uma galáxia. Acredita-se que os mecanismos mais comuns são os do caso (a), e é nele que estamos interessados neste trabalho, principalmente quando ocorre acréscimo de gás de uma galáxia por outra, sem necessidade de uma fusão entre elas. A formação por interação requer órbitas com geometrias específicas para que o acréscimo de matéria ocorra formando um anel polar. Na nossa biblioteca estamos explorando diferentes razões de massa, inclinações e energias orbitais. A base de dados a ser construída com os resultados das simulações poderá auxiliar futuras pesquisas em interação de galáxias, principalmente sobre formação de anéis polares.

**Palavras-chave:** Galáxias com Anel Polar; Dinâmica de Galáxias: morfologia e cinemática; Simulações de N-corpos.



# A NUMERICAL STUDY ABOUT FORMATION OF POLAR RING GALAXIES

## ABSTRACT

*The interaction between galaxies is an event which happens very often in the universe. In certain interactions, systems known as Polar Ring Galaxies (PRGs) can be formed. Such systems are constituted by a galaxy called Host and a ring made of gas and stars orbiting a plan near perpendicular to its main plane. In this work a data-base of N-body simulations was developed, in order to investigate the parameters space needed to PRG formation. This data-base is growing with more simulations, taking as start point the simulations presented here. Because of PRG's geometry, its formation cannot be due to secular inner processes in isolated galaxies. Therefore, these systems can be formed (a) by interactions between galaxies or (b) gas accretion of cosmic filaments by a galaxy. It's believed that the most common mechanisms are those in the case (a), which is the main subject of this work, specially when one galaxy accrets gas from other, with no merging needed. The formation by interaction requires orbits with specific geometries for the matter accretion to occur and create a polar ring. In our study, we are exploring different mass ratios, inclinations and orbital energies. The data-base to be constructed with the simulations could help future researchs in galaxies interactions, mainly about the formation of polar rings.*

**Keywords:** *Polar Ring Galaxies; Galaxy Dynamics: morphology and kinematics; N-body Simulations.*



# SUMÁRIO

Pág.

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE TABELAS

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>Conceitos Básicos em Dinâmica de Galáxias</b>	<b>21</b>
2.1	Tratamento contínuo do sistema	21
2.2	Tempo no sistema	22
2.3	Relaxação a dois corpos	23
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>Galáxias com Anel Polar</b>	<b>27</b>
3.1	Classificação e identificação de PRGs	28
3.2	Cenários de formação de PRGs	30
3.3	PRGs e Matéria Escura	32
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Modelamento Numérico</b>	<b>35</b>
4.1	O código GADGET-2	35
4.1.1	Dinâmica não-colisional - Estrelas e Matéria Escura	36
4.1.2	TreeCode - Algoritmo em Árvore	38
4.1.3	O método SPH e a implementação TreeSPH	40
4.1.4	Curva de Peano-Hilbert	41
4.2	Programas adicionais	44
4.2.1	MakeNewDisk	44
4.2.2	pot_din_fric	44
4.2.3	UNSIO	44
4.2.4	Glnemo2	44
4.3	Condições Iniciais	45
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>Simulações</b>	<b>47</b>
5.1	Simulações simAC-q8	49
5.2	Simulações simAD-q8	50
5.3	Simulações simAC-q12	52
5.4	Simulações simAD-q12	52
5.5	Simulações simAB-q20	53
5.6	Consumo computacional	54

5.7	Discussão dos resultados e Planejamentos futuros . . . . .	56
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>. . . . .</b>	<b>63</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Exemplo unidimensional de um sistema de $N$ partículas. O potencial gerado pela soma do potencial individual de cada partícula é dado pela linha irregular, enquanto a linha contínua é uma aproximação contínua para o mesmo potencial. Fonte: (LIMA-NETO, 2001). . . . .	22
2.2 Geometria de um encontro de dois corpos (BINNEY e TREMAINE, 2008). . . . .	24
3.1 Imagem gerada pelo telescópio Gemini da galáxia com anel polar NGC-660. Disponível em <a href="http://apod.nasa.gov/apod/ap121110.html">http://apod.nasa.gov/apod/ap121110.html</a> . . . . .	27
3.2 Exemplos de PRGs: (a) AM-0226-320 (Spindle sem sobra de material), (b) NGC4650-A (Spindle com sobra de material), (c) HRG-54103 (Saturn). Fonte: <a href="http://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/vo/datascope/init.pl">http://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/vo/datascope/init.pl</a> . . . . .	29
3.3 A aparência de uma PRG como vista de várias orientações. Fonte: (WHITMORE <i>et al.</i> , 1990). . . . .	30
3.4 Cenário de fusão (evolução temporal na modelagem): Azul: intrusa (estrelas), Vermelho: vítima (estrelas), Verde: vítima (gás e estrelas formadas a partir deste gás após o anel). Fonte: (BOURNAUD e COMBES, 2003). . . . .	33
3.5 Cenário de Acréscimo (evolução temporal na modelagem): Azul: hospedeira (estrelas); Vermelho: doadora (estrelas); Verde: vítima (gás e estrelas formados a partir deste gás após o anel). Fonte: (BOURNAUD e COMBES, 2003). . . . .	34
4.1 Curva de preenchimento de Peano-Hilbert em duas (abaixo) e três (acima) dimensões (SPRINGEL, 2005). . . . .	42
4.2 Relação entre o TreeCode e a curva de Peano-Hilbert para o caso bidimensional (SPRINGEL, 2005). . . . .	43
5.1 Condições iniciais para a simulação que tem o modelo A tanto como hospedeira (à esquerda) quanto como doadora (à direita). A cor verde representa as estrelas e a barra de cores representa o gás. . . . .	48
5.2 Interação entre as duas galáxias na simulação simAC-q8-v0, após 2,4 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada muito fraca. A cor verde representa as estrelas e a barra de cores representa o gás. . . . .	50
5.3 Interação entre as duas galáxias na simulação simAC-q8-v10, após 2,3 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada fraca. A cor verde representa as estrelas e a barra de cores representa o gás. . . . .	50

5.4	Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q8-v0, após 2,8 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul). . . . .	51
5.5	Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q8-v10, após 2,8 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul). . . . .	51
5.6	Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q8-v10, após 3,0 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul). . . . .	52
5.7	Interação entre as duas galáxias na simulação simAC-q12-v0, após 2,0 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul). . . . .	53
5.8	Interação entre as duas galáxias na simulação simAC-q12-v10, após 2,1 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul). . . . .	53
5.9	Interação entre as duas galáxias na simulação simAC-q12-v20, após 2,3 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul). . . . .	54
5.10	Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q12-v0, após 2,6 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul). . . . .	54
5.11	Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q12-v10, após 2,7 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul). . . . .	55
5.12	Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q12-v20, após 2,9 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul). . . . .	55
5.13	Interação entre as duas galáxias na simulação simAB-q20-v10, após 1,7 <i>Gyr</i> . A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul). . . . .	56
5.14	Condições iniciais para a simulação simAD-q12-v20-yrot90. A galáxia hospedeira está à esquerda. A cor verde representa as estrelas e a barra de cores representa o gás. . . . .	58

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
5.1 Parâmetros para cada distância de pericentro. As posições estão em kpc, as velocidades relativas iniciais $v_0$ estão em km/s. . . . .	48
5.2 Formação ou não de anéis na grade de simulações. . . . .	49
5.3 Média de tempo de execução da simulação de evolução temporal para cada tipo de modelo de par de galáxia. . . . .	56



# CAPÍTULO 1

## Introdução

O estudo de galáxias em interação é extremamente importante para o entendimento da história do Universo, pois tais encontros modificam de maneira bastante contundente as estruturas cósmicas ao longo de toda sua evolução. Estes fenômenos são implacavelmente determinados pelo caráter puramente atrativo da força gravitacional, que por sua vez induz na interação dos grandes sistemas, a força de maré, o atrito dinâmico, etc (RODRIGUES, 1999).

O processo de modelagem de um sistema real é feito escolhendo-se as equações adequadas e identificando-se os parâmetros corretos que caracterizam bem o sistema em estudo. Em se tratando de galáxias, sistemas bastante complexos, é impossível criar equações que as representem perfeitamente. Dessa forma, deve-se ter em mente que a modelagem é uma representação de um sistema ideal, ou seja, contém apenas algumas das características do sistema real. Logicamente, pode-se deixar o modelo mais preciso elevando sua complexidade. No entanto, deve-se estabelecer uma boa correspondência entre a simplicidade do modelo e a precisão dos resultados obtidos.

Ao lado da Física Teórica e da Física Experimental, a Física Computacional tem se tornado uma ferramenta indispensável no tratamento de problemas astrofísicos (NAAB, 2006). A simulação numérica de sistemas gravitantes de  $N$ -corpos, ou seja, de sistemas de  $N$  partículas interagindo gravitacionalmente (TRENTI e HUT, 2008), é uma das técnicas mais poderosas para o estudo de sistemas astronômicos como aglomerados de estrelas, galáxias e estruturas em larga escala. Esse tratamento computacional só é possível devido ao estudo teórico prévio através da modelagem matemática da dinâmica desses sistemas de interesse.

Galáxias, em aglomerados, estão relativamente próximas umas das outras (KEPLER e SARAIVA, 2004). Sendo assim, estão em constante interação entre si, ocorrendo inclusive colisões.

Simulações numéricas de galáxias em colisão podem ser feitas buscando um estudo da sua dinâmica baseado na morfologia e medidas de velocidades estelares e do gás interestelar das galáxias, obtidas observacionalmente. A partir dos melhores ajustes entre simulação e dados reais é possível inferir a idade da interação, a qual pode ser comparada com a idade das populações de estrelas, refazendo a história complexa do sistema e prevendo o seu futuro.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma biblioteca de simulações de

N-corpos para investigar o espaço de parâmetros necessários à formação de Galáxias com Anel Polar, que são sistemas constituídos por uma galáxia hospedeira e um anel de gás e estrelas orbitando um plano quase perpendicular com relação ao seu plano principal. Pela geometria do sistema, sua formação não pode ser devida a processos seculares intrínsecos de galáxias isoladas. Através de dados observacionais e de simulações numéricas feitas por diversos autores, citados durante este trabalho, acredita-se que o mecanismo mais comum de formação destes sistemas é o de interações entre duas galáxias. O estudo de tais mecanismos requer uma exploração de diferentes razões de massa, inclinações e energias orbitais entre duas galáxias para que se formem galáxias com anel polar. Tal exploração é feita neste trabalho.

No Capítulo 2 são introduzidos alguns conceitos básicos ao estudo de dinâmica de galáxias. Uma discussão sobre classificação, identificação, e cenários de formação de galáxias com anel polar é feita no Capítulo 3. O Capítulo 4 foi escrito no intuito de mostrar as principais ferramentas para o estudo numérico dos sistemas de interesse, com foco no código GADGET-2 (SPRINGEL, 2005), terminando com uma breve apresentação de outros códigos utilizados e escritos durante este programa de mestrado. Resultados das simulações feitas são apresentados e discutidos no Capítulo 5, assim como algumas palavras sobre planejamentos futuros. Por fim, conclusões gerais são feitas no Capítulo 6.

## CAPÍTULO 2

### Conceitos Básicos em Dinâmica de Galáxias

A Dinâmica Estelar é o campo da Física Teórica que estuda a estrutura e evolução de sistemas gravitacionais de muitos corpos, em que as estrelas são um elemento sempre presente. Esses sistemas são chamados de Sistemas Estelares, e seus comportamentos são determinados pelas leis newtonianas de movimento e da gravidade. As galáxias, em particular, são sistemas que se enquadram nessa classificação.

O estudo da dinâmica estelar é superficialmente ligado ao estudo de mecânica celeste e à teoria de movimentos planetários, entretanto o formalismo matemático dessas áreas não é de muito uso para o estudo de sistemas estelares, pois é baseado em expansões de perturbações que não convergem quando aplicadas à maioria dos sistemas estelares (BINNEY e TREMAINE, 2008). O tratamento matemático encontrado na mecânica estatística clássica é mais adequado ao estudo de dinâmica estelar, devido a quantidade muito grande de corpos dos sistemas estelares.

De acordo com Contopoulos e Efstathiou (2011), o movimento de estrelas e de elementos de matéria escura é governado puramente pela força gravitacional. O estudo desses movimentos e suas combinações para formar configurações mecânicas estatísticas auto-consistentes, tem papel extremamente importante no estudo de Dinâmica Estelar, e constitui a abordagem central do estudo da Dinâmica de Galáxias.

#### 2.1 Tratamento contínuo do sistema

É surpreendentemente difícil responder à pergunta “o que é uma galáxia?”. Muitos astrônomos se contentam em dizer “eu reconheço uma quando a vejo”. Mas, uma possível definição pode ser dada da seguinte forma: uma galáxia é um sistema auto-gravitante de estrelas e partículas de matéria escura (BARNES, 2009), contendo uma quantidade de estrelas que pode variar entre aproximadamente  $10^7$  e  $10^{12}$  estrelas (BINNEY e TREMAINE, 2008). Mesmo que uma definição precisa não exista como consenso entre os astrônomos, a quantidade de estrelas em uma galáxia é notoriamente muito grande.

As equações de movimento dadas pela física Newtoniana para um sistema desse tipo podem ser escritas como:

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i, \quad \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_{j \neq i}^N Gm_j \frac{\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^3}, \quad (2.1)$$

em que estamos considerando  $N$  massas pontuais;  $\mathbf{r}_i$  se refere à posição da  $i$ -ésima massa,

$v_i$  se refere à velocidade da  $i$ -ésima massa e  $m$  é a massa da  $i$ -ésima partícula.  $G$  é a constante gravitacional. Entretanto, é muito mais conveniente adotar um tratamento contínuo do sistema; quando consideram-se valores típicos de  $N \approx 10^5$  para um aglomerado globular ou  $10^{11}$  para uma galáxia de tamanho médio, mostra-se claro que as equações da física Newtoniana não são uma boa alternativa de uso (POWER, 1999).

Ao contrário do que ocorre com partículas em um gás difuso (que possuem interações de curto alcance), o campo gravitacional que age entre as estrelas de uma galáxia é de longo alcance, e a força que age sobre uma estrela não varia rapidamente. Assim, pode-se supor que cada estrela acelera suavemente nesse campo de força que é gerado pela galáxia como um todo (BINNEY e TREMAINE, 2008), ou seja, é possível tratar a força gravitacional que age nas estrelas como se fosse oriunda de uma distribuição suave em vez de um conjunto de massas pontuais. Isto é exemplificado pela figura 2.1 para um caso unidimensional de um sistema com densidade de partículas aumentando em direção ao centro.

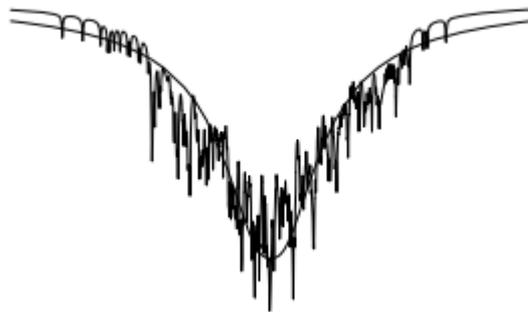


Figura 2.1 - Exemplo unidimensional de um sistema de  $N$  partículas. O potencial gerado pela soma do potencial individual de cada partícula é dado pela linha irregular, enquanto a linha contínua é uma aproximação contínua para o mesmo potencial. Fonte: (LIMA-NETO, 2001).

## 2.2 Tempo no sistema

Em se tratando de objetos astronômicos, descrever fenômenos dinâmicos em termos da quantidade de vezes que um corpo efetuou uma rotação é mais razoável do que em anos ou segundos (LIMA-NETO, 2001). Definimos, então, o **tempo dinâmico**  $t_d$  como sendo, para um objeto de raio  $R$  em que as partículas possuem uma velocidade típica  $v$ , a seguinte relação:

$$t_d = \frac{R}{v}. \quad (2.2)$$

Assim definido, também pode ser chamado de **tempo de cruzamento**, denotado por  $t_{cr}$ , que é o tempo necessário para uma estrela típica cruzar a galáxia uma vez (BINNEY e TREMAINE, 2008). Sistemas diferentes possuem parâmetros diferentes, desta forma existem outras definições para  $v$  e  $R$  (e consequentemente,  $t_d$  e  $t_{cr}$ ) para diferentes sistemas físicos.

O tempo que um sistema leva para atingir um estado de equilíbrio é chamado de tempo de relaxação ( $t_{relax}$ ). Para uma galáxia isso nunca ocorre, mas mesmo sem atingir exatamente um estado de equilíbrio estacionário, os sistemas gravitacionais podem se aproximar deste estado. Dessa forma, define-se o tempo de relaxação para esses sistemas como sendo o tempo necessário para que a variação da velocidade  $\Delta v$  de uma partícula seja da ordem de grandeza da própria velocidade  $v$  da partícula (LIMA-NETO, 2001). O tempo de relaxação define a escala de tempo sobre o qual uma estrela que se move em um sistema de  $N$  estrelas é desviada significativamente por encontros com partículas em sua trajetória (NAAB, 2006).

### 2.3 Relaxação a dois corpos

Para o que se costuma chamar de relaxação a dois corpos, pode-se escrever:

$$t_{relax} = n_{relax} t_{cr}, \quad (2.3)$$

em que

$$n_{relax} \approx \frac{v^2}{\Delta v^2} \quad (2.4)$$

é o número de vezes que uma estrela deve atravessar a galáxia para que  $\Delta v^2 \approx v^2$ .

Essa aproximação contínua é válida onde as colisões entre as partículas são desprezíveis durante sua existência ( $t_{relax} \gg t_{cr}$ ). Sistemas dessa forma são chamados de **sistemas sem colisões** (LIMA-NETO, 2001). O termo “sistema sem colisões” significa que o movimento de uma estrela em uma galáxia é determinado pelo potencial total do sistema em vez de por interações com estrelas próximas (NAAB, 2006).

Suponha uma galáxia de raio  $R$  composta de  $N$  estrelas, cada uma de massa  $m$ . Assim, duas estrelas vão interagir gravitacionalmente conforme a Figura 2.2. Seja  $F_{\perp}$  a componente perpendicular da força que atua entre estas duas estrelas de massa  $m$  separadas por uma distância  $r^2 = b^2 + x^2$ . A velocidade da estrela sofrerá uma variação  $\delta v_{\perp}$  causada pela força  $F_{\perp}$ , que pode ser expressa como:

$$F_{\perp} = \frac{Gm^2}{b^2 + x^2} \cos(\theta) = \frac{Gm^2}{(b^2 + x^2)} \frac{b}{(b^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{Gm^2}{b^2} \frac{b^3}{(b^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{Gm^2}{b^2} \left[ 1 + \left( \frac{x}{b} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}}, \quad (2.5)$$

em que  $G$  é a constante gravitacional universal e  $b$  é o parâmetro de impacto.

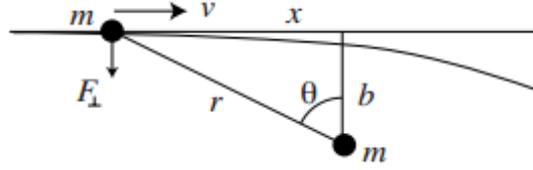


Figura 2.2 - Geometria de um encontro de dois corpos (BINNEY e TREMAINE, 2008).

Assume-se que as estrelas estão distribuídas de maneira homogênea, com movimentos praticamente retilíneos uniformes ( $\frac{\delta v_{\perp}}{v} \ll 1$ ) (BINNEY e TREMAINE, 2008).

Sabendo pela segunda lei de Newton que  $F = m\dot{v} \Rightarrow |\delta v_{\perp}| = \frac{1}{m} \int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp} dt$ , temos que, sendo  $x = vt$ :

$$|\delta v_{\perp}| = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Gm}{b^2} \left[ 1 + \left( \frac{vt}{b} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} dt. \quad (2.6)$$

Fazendo  $\frac{vt}{b} = \tan(u) \Rightarrow dt = \frac{b[\sec(u)]^2}{v} du$ , obtemos:

$$|\delta v_{\perp}| = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{Gm}{bv} [1 + (\tan(u))^2]^{-\frac{3}{2}} [\sec(u)]^2 du = \frac{Gm}{bv} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos(u) du = \frac{2Gm}{bv}. \quad (2.7)$$

Logo, a variação  $\delta v_{\perp}$  pode ser entendida como a aceleração na região de encontro mais próxima ( $\frac{Gm}{b^2}$ ) multiplicada pela duração dessa aceleração ( $\frac{2b}{v}$ ). E, como essas interações entre as estrelas são aleatórias, o valor médio dessas variações será  $\delta v_{\perp} = 0$ , mesmo com o valor de  $\delta v^2$  aumentando com o tempo (LIMA-NETO, 2001). A equação 2.7 se torna inválida quando  $\delta v_{\perp} \approx v_{\perp}$  (só é válida quando o movimento da partícula se altera pouco, ou seja, é praticamente retilíneo uniforme).

Seja  $\delta n$  a quantidade de colisões que uma estrela sofre ao atravessar uma galáxia,

com parâmetro de impacto entre  $b$  e  $b + db$ . Pode-se estimar o valor de  $\delta n$  como sendo o produto da densidade superficial de estrelas pela sela seção de choque correspondente. Dessa forma, tem-se que

$$\delta n = \frac{N}{\pi R^2} 2\pi b db = \frac{2N}{R^2} 2b db, \quad (2.8)$$

e a variação quadrática da velocidade assume a forma

$$\delta v_{\perp}^2 \cong \delta v_{\perp(1 \text{ colisão})}^2 \delta n = \left( \frac{2Gm}{bv} \right)^2 \frac{2N}{R^2} 2b db. \quad (2.9)$$

Integrando  $\delta v_{\perp}^2$ , obtém-se a variação total de velocidade após a travessia pela galáxia por inteiro,  $\Delta v_{\perp}^2$ . Para termos essa integral convergente, temos que limitar o parâmetro de impacto entre um  $b_{min}$  e um  $b_{max}$ :

$$\Delta v_{\perp}^2 = \int_{b_{min}}^{b_{max}} \left( \frac{2Gm}{bv} \right)^2 \frac{2N}{R^2} 2b db = 8N \left( \frac{Gm}{Rv} \right)^2 \ln(\Lambda), \quad (2.10)$$

em que  $\ln(\Lambda) = \ln \left( \frac{b_{max}}{b_{min}} \right)$  é chamado de logaritmo de Coulomb.

De acordo com as hipóteses tomadas no início, podemos ter, com uma perda muito pequena de acurácia (BINNEY e TREMAINE, 2008), os valores  $b_{max} = R$  (o próprio raio característico da galáxia) e  $b_{min} = \frac{Gm}{v^2}$  (parâmetro de impacto correspondente a  $\delta v_{\perp} \approx v$ ). Também, vale a relação  $v^2 = \frac{GNm}{R}$ . Assim, obtém-se  $\Delta v_{\perp}^2 = \frac{8\ln(\Lambda)}{N} v^2$  e, de acordo com as equações 2.3 e 2.4, a expressão  $t_{relax} = \frac{N}{8\ln(\Lambda)} t_{cr}$ . Ainda, usando novamente a relação para  $v^2$  acima, pode-se escrever  $\Lambda = \frac{b_{max}}{b_{min}} = R \frac{v^2}{Gm} = \frac{R}{Gm} \frac{GNm}{R} = N$ . Portanto, tem-se finalmente:

$$t_{relax} = \frac{N}{8\ln(N)} t_{cr}. \quad (2.11)$$

Esta aproximação contínua é válida para sistemas com número de partículas,  $N$ , suficientemente grande (vale lembrar que galáxias médias possuem  $N \approx 10^{11}$ ). No limite  $N \rightarrow \infty$ , esta aproximação tende a ser exata. O  $N$  “suficientemente grande” tem que ser tal que  $t_{relax} \gg t_{cr}$  (como foi dito no início desta seção). É fácil perceber que a equação 2.11 satisfaz esta condição.



## CAPÍTULO 3

### Galáxias com Anel Polar

Galáxias com Anel Polar (PRGs, do inglês “*Polar Ring Galaxies*”) são uns dos objetos mais marcantes da grande família de galáxias aneladas não-barradas (FINKELMAN *et al.*, 2012). Uma PRG é formada por uma galáxia hospedeira do tipo precoce, lenticular ou elíptica, rodeada por um anel de gás e estrelas orbitando um plano quase perpendicular com relação ao plano principal da galáxia hospedeira. Existe um caso raro de galáxia hospedeira espiral (RESHETNIKOV *et al.*, 2005), no entanto geralmente são do tipo S0.

Ainda que menos de 1% das galáxias S0 possuam anéis polares, estas características são vistas normalmente apenas na borda, uma vez que possuem brilho superficial muito baixo, portanto estima-se que a real proporção de galáxias com essas características seja maior (MACCIÒ *et al.*, 2006). Um limite inferior para o universo local é de que 4.5% das galáxias com características de hospedeiras possuam anel polar (WHITMORE *et al.*, 1990). Conjectura-se que os anéis são mais novos do que a própria galáxia hospedeira por possuírem maior concentração de gás interestelar.



Figura 3.1 - Imagem gerada pelo telescópio Gemini da galáxia com anel polar NGC-660. Disponível em <http://apod.nasa.gov/apod/ap121110.html> .

Depois do processo de formação de uma PRG, quando o anel já se estabilizou, perde-se muito da “memória” do processo de formação, tornando difícil o estudo da sua história dinâmica. Os resultados observacionais obtidos para uma PRGs em estudo poderão ser confrontados com as simulações da base de dados e, a partir da análise do *best match*, sua dinâmica atual e pregressa poderão ser investigadas.

As altas velocidades rotacionais observadas em discos de galáxias fazem supor a presença de um halo de matéria escura ao seu redor. A presença de duas componentes (galáxia e anel polar) em planos dinâmicos perpendiculares em sistemas como PRGs permite um estudo mais apurado da forma desses halos, sendo, assim, de grande importância para o entendimento do comportamento da matéria escura. Mais especificamente, ao se comparar medidas simultâneas de curvas de rotação no plano da galáxia principal e no plano do anel polar, obtém-se informação sobre a forma do potencial gravitacional. Ainda, comparações estatísticas entre velocidades rotacionais máximas nos anéis polares e luminosidades da galáxia principal apontam para um achatamento significativo nos halos de matéria escura (KHOPERSKOV *et al.*, 2014).

Simulações numéricas de sistemas como esse, realizadas com diversas condições iniciais, auxiliam na compreensão de sua formação e de sua história dinâmica, dando a possibilidade de entender estruturas antes observadas como bizarras.

### 3.1 Classificação e identificação de PRGs

PRGs foram classificadas primeiramente por Whitmore *et al.* (1990). Pelas suas observações, e outras mais recentes (DRIEL *et al.*; IODICE *et al.*; IODICE *et al.*; DRIEL *et al.*, 2000, 2002a, 2002b, 1995 apud BOURNAUD e COMBES, 2003), as principais propriedades que um cenário de formação de PRGs deve levar em consideração podem ser resumidas da seguinte forma (IODICE, 2001):

- Galáxias hospedeiras são geralmente do tipo S0 ou galáxias do tipo precoce: elas morfologicamente se parecem com S0s, mas suas fotometrias são típicas de espirais precoces, como mostrado por Iodice *et al.* (2002a), Iodice *et al.* (2002b). Algumas são elípticas, como em AM 2020-504, ou espirais do tipo tardio ricas em gás, como em NGC 660;
- Aproximadamente 0.5% das possíveis galáxias hospedeiras no Universo local (S0 e tipo-precoce) são observadas possuindo um anel polar ou um candidato a anel polar. Ainda, somente uma linha-de-visada específica torna possível a detecção do anel. Por isso, Whitmore *et al.* (1990) estima que um limite baixo para a porcentagem real seja por volta de 4.5%;
- Anéis polares podem ser tão massivos quanto as galáxias hospedeiras. O mesmo vale para o brilho;
- Raios de anéis polares podem ser da mesma ordem ou até muito maiores que o tamanho do disco da hospedeira;

- Muitos anéis estão inclinados de menos de  $25^\circ$  do eixo polar da galáxia hospedeira, mas algumas inclinações mais altas foram observadas, por exemplo em NGC 660, cujo anel é inclinado de aproximadamente  $45^\circ$  (DRIEL *et al.*, 1995);
- Alguns anéis polares contêm uma população estelar velha, o que indica que eles são estruturas estáveis com um tempo de vida de pelo menos alguns Gyrs;
- Anéis polares mostram várias morfologias internas, tais como anéis helicoidais, anéis duplos, ou anéis com braços espirais.

Existia uma classificação de PRGs em três famílias (FAÚNDEZ-ABANS e OLIVEIRA-ABANS, 1998), porém hoje a terceira família (a saber, chamada *Worm-like*, que deveriam possuir bojo mais alongado e com anel geralmente mostrando um nó nos pontos em que se encontra com o bojo) já foi descartada como uma família de PRGs. Portanto, faz-se a classificação em duas famílias:

- *Spindle*: PRGs tradicionais, apresentam um eixo em forma de protuberância (galáxia). O anel polar é quase perpendicular com relação ao eixo principal da galáxia hospedeira. Se tem o anel bem definido ou não contém sobras de material proveniente da interação que a formou, é chamada de Spindle I. Caso contenha sobras de material, é chamada de Spindle II.
- *Saturn*: bojo esférico. Rodeadas por anel brilhante.

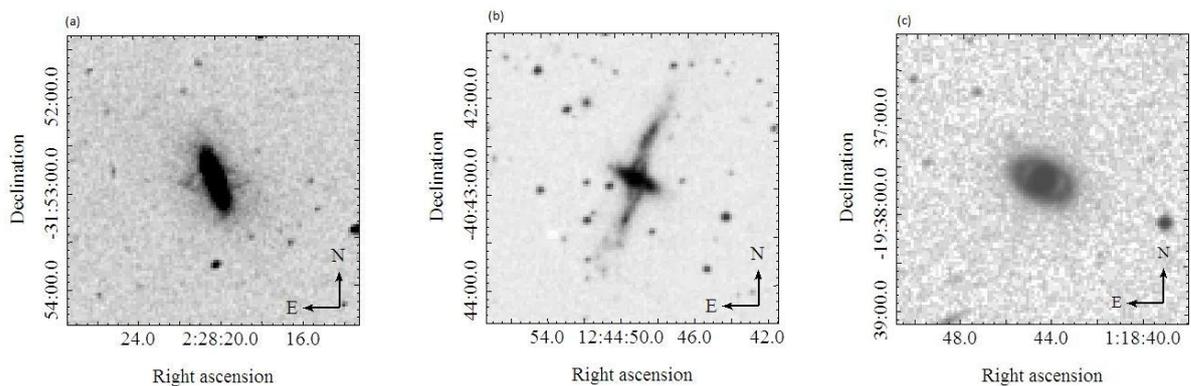


Figura 3.2 - Exemplos de PRGs: (a) AM-0226-320 (Spindle sem sobra de material), (b) NGC4650-A (Spindle com sobra de material), (c) HRG-54103 (Saturn). Fonte: <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/vo/datascope/init.pl>.

Para identificar uma PRG, é necessário que o anel e a galáxia hospedeira tenham velocidades sistêmicas semelhantes, e que os seus centros estejam praticamente coincidentes (FREITAS-LEMES, 2010). A figura 3.3 mostra algumas variações dos ângulos de rotação

com relação aos eixos horizontal (alfa) e vertical (beta). Note que em menos da metade é possível identificar o sistema como uma PRG. O catálogo de PRGs feito por [Whitmore et al. \(1990\)](#) é dividido em quatro categorias, baseadas nas confiabilidades dadas pelas combinações desses ângulos de rotação:

- Categoria A: Galáxias cinematicamente confirmadas;
- Categoria B: Boas candidatas;
- Categoria C: Possíveis candidatas;
- Categoria D: Sistemas possivelmente relacionados à PRGs.

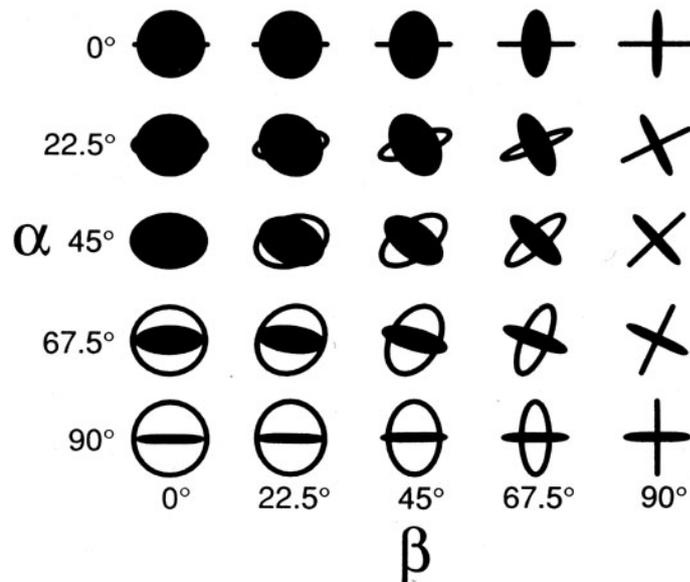


Figura 3.3 - A aparência de uma PRG como vista de várias orientações. Fonte: ([WHITMORE et al., 1990](#)).

### 3.2 Cenários de formação de PRGs

Existem dois principais cenários propostos para a formação de PRGs por meio de interação entre pares de galáxias ([BOURNAUD e COMBES, 2003](#)): (i) fusão de duas galáxias espirais com discos ortogonais em colisão frontal (figura 3.4), e (ii) acréscimo de gás, de uma galáxia doadora para a galáxia hospedeira, durante um encontro próximo (figura 3.5). Além desses, também existe o cenário de formação de anel polar por (iii) acréscimo de gás dos filamentos cósmicos ([MACCIÒ et al., 2006](#)). Em qualquer desses cenários teóricos, os anéis polares se formam por interações entre galáxias ou de uma galáxia com o seu entorno cósmico. Uma evidência disso é que os anéis polares observados parecem sempre

mais jovens do que as respectivas galáxias hospedeiras. Um pouco mais detalhadamente, tem-se:

Mecanismos de formação de PRGs por interação entre galáxias:

- (i) Fusão: Este cenário foi simulado pela primeira vez por Bekki (1997), Bekki (1998). Uma das galáxias é chamada de “intrusa”, enquanto a outra é chamada de “vítima”. Quando a velocidade relativa das galáxias em colisão é alta, é sabido que esse evento acaba por formar um anel do tipo “roda de carruagem”, que não é um anel polar pelo fato de não rodear a galáxia hospedeira. Entretanto, em velocidades mais baixas, mostra-se que as duas galáxias em colisão se fundem, por fricção dinâmica, formando uma PRG, na qual a galáxia vítima se torna a hospedeira e o conteúdo gasoso da galáxia intrusa forma o anel polar. O mecanismo pode perfeitamente formar até anéis duplos (RESHETNIKOV *et al.*, 2005).
- (ii) Acréscimo: O cenário de acréscimo foi primeiramente proposto por Schweizer *et al.* (apud COMBES, 2006), porém a primeira simulação foi feita por Reshetnikov e Sotnikova (1997). Nesse caso, duas galáxias interagem, porém não é necessária uma fusão entre elas (ainda que elas possam se fundir depois da formação do anel). No cenário de acréscimo, a formação de um anel polar requer que a galáxia doadora esteja em uma órbita aproximadamente polar em relação à galáxia hospedeira.

Mecanismo de formação de PRGs por interação de uma galáxia com seu entorno cósmico:

- (iii) Acréscimo de gás por filamentos cósmicos: A formação de anéis polares pode também ocorrer sem nenhuma interação ou fusão, através do gás que flui dos filamentos cósmicos em direção às galáxias e se acumula devido à ação da sua gravidade (COMBES, 2006). Macciò *et al.* (2006) mostraram que anéis polares podem ocorrer naturalmente em um universo hierárquico onde galáxias de massa mais baixa são formadas através do acréscimo de gás frio ao longo de estruturas de filamentos em escala de megaparsec. Esse tipo de acréscimo de gás frio pode ser a maneira mais provável pela qual galáxias adquirem gás (KEREŠ *et al.*, 2005 apud COMBES, 2006).

Acredita-se que os anéis polares sejam normalmente formados durante um evento secundário próximo a uma galáxia pré-existente. O colapso de uma nuvem protogaláctica poderia criar dois sistemas desalinhados, o que implica a possibilidade da formação

simultânea da galáxia hospedeira e do anel polar. Entretanto, os anéis polares observados parecem ser mais jovens do que as respectivas galáxias hospedeiras: eles são azuis e ricos em gás, enquanto as galáxias hospedeiras possuem uma quantidade bastante menor de gás; Ainda, anéis polares possuem populações estelares jovens, enquanto as galáxias hospedeiras contêm estrelas mais velhas. Portanto, parece razoável admitir que PRGs são feitas de uma galáxia hospedeira previamente formada e uma estrutura polar mais recente.

De acordo com análise feita por Bournaud e Combes (2003) de dados obtidos através de simulações, a probabilidade de uma possível galáxia hospedeira desenvolver um anel polar por acréscimo é significativamente maior do que durante um evento de fusão (de dados estatísticos das condições iniciais, estimou-se que o cenário de acréscimo é de 3 a 5 vezes mais provável de formar anéis polares). O espaço de parâmetros para formação por fusão é menor do que o do cenário de acréscimo, o que indica que a maioria das PRGs não deve ter sido formada através de eventos de fusão (COMBES, 2006).

### 3.3 PRGs e Matéria Escura

Velocidades rotacionais observadas em discos galácticos são muito altas se relacionadas à quantidade de matéria bariônica, o que leva a conjecturar que deve existir, ao redor das galáxias, um halo contendo uma quantidade relativamente alta de matéria escura.

Muitos estudos anteriores sobre formação de PRGs discordam em alguns aspectos, mas todos concordam somente neste ponto (COMBES, 2013): tais sistemas devem ser realmente embutidos em um halo de matéria escura. No entanto, a forma desses supostos halos é desconhecida. Todos estes estudos apresentam a conclusão da suposta existência deste halo, mas para formas tridimensionais diferentes: halos quase esféricos para Whitmore *et al.* (1987), halos *flat* ao longo do plano equatorial para Sackett *et al.* (apud COMBES, 2013), ou *flat* ao longo do plano do anel para Combes e Arnaboldi (apud COMBES, 2013), este último confirmado em várias PRGs, por um estudo a partir de diagrama de Tully-Fisher, por Iodice *et al.* (apud COMBES, 2013).

As PRGs, por conterem dois sistemas rotacionando em planos perpendiculares, permitem o estudo mais apurado da forma desses supostos halos, algo crucial na busca pelo entendimento da natureza da matéria escura. Logo, é de considerável importância o estudo da formação desses sistemas, ainda que sejam minoria no universo.

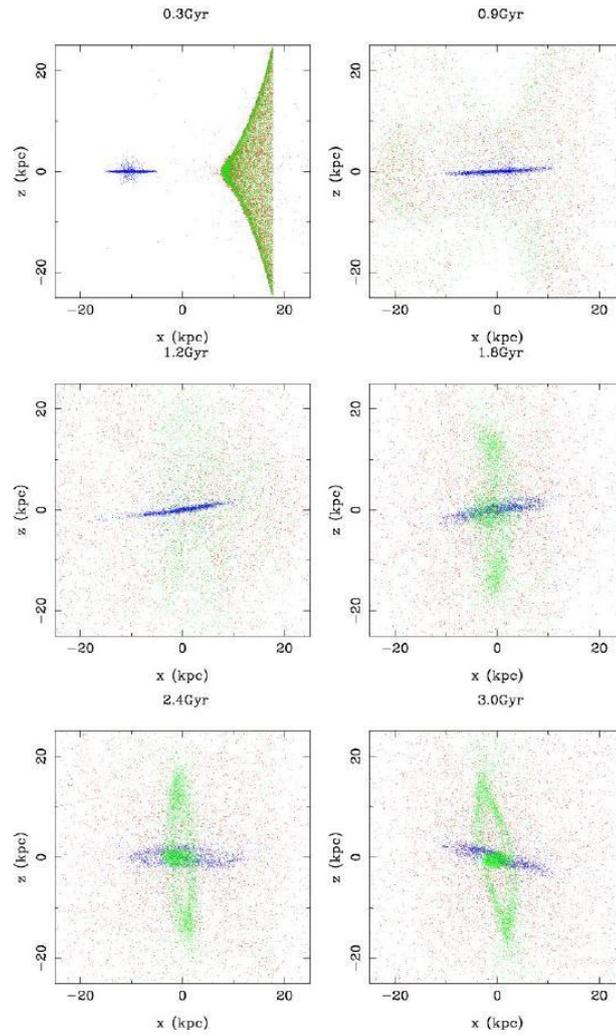


Figura 3.4 - Cenário de fusão (evolução temporal na modelagem): Azul: intrusa (estrelas), Vermelho: vítima (estrelas), Verde: vítima (gás e estrelas formadas a partir deste gás após o anel). Fonte: (BOURNAUD e COMBES, 2003).

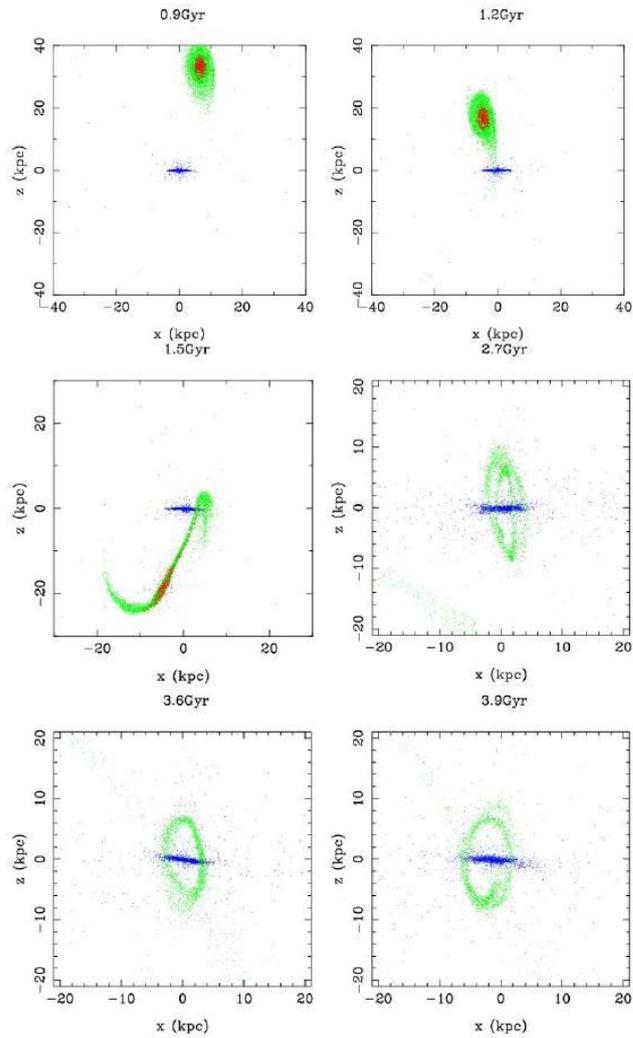


Figura 3.5 - Cenário de Acréscimo (evolução temporal na modelagem): Azul: hospedeira (estrelas); Vermelho: doadora (estrelas); Verde: vítima (gás e estrelas formados a partir deste gás após o anel). Fonte: (BOURNAUD e COMBES, 2003).

## CAPÍTULO 4

### Modelamento Numérico

São gerados, primeiramente, modelos de galáxias isoladas, que posteriormente são colocados em um único arquivo de entrada para a simulação da interação e evolução temporal. Tal evolução é feita com o código GADGET-2, escrito para ser executado em computadores paralelos, brevemente descrito na seção 4.1. Códigos adicionais, utilizados para geração dos modelos com as condições iniciais e tratamento dos arquivos de entrada e saída estão listados e sucintamente apresentados na seção 4.2. A seção 4.3 apresenta os principais pontos a serem levados em consideração na construção das condições iniciais.

As simulações numéricas foram executadas no Hipercubo, que é o *cluster* HPC<sup>1</sup> dos programas de pós-graduação em Física e Astronomia e em Engenharia Biomédica do IP&D-UNIVAP. Na configuração atual, o cluster Hipercubo tem 16 nodos de processamento, totalizando 244 *cores* em processadores *intel* Xeon. Tem um nodo de *storage* que faz o papel de nodo principal/mestre. O Hipercubo tem 1TB de memória RAM total, 50TB de espaço em disco, e duas GPUs Tesla-Fermi com 896 *cores* CUDA.

#### 4.1 O código GADGET-2

O GADGET-2<sup>2</sup> (SPRINGEL, 2005) é um código para simulações de sistemas de N-corpos, desenvolvido por Volker Springel (Instituto Max Planck de Astrofísica - Alemanha) como um aperfeiçoamento do código GADGET (SPRINGEL *et al.*, 2001), escrito como parte de seu doutoramento. O programa calcula a força gravitacional que age nas componentes de um sistema de  $N$  partículas e simula sua evolução temporal. O GADGET-2 é um programa de código aberto, distribuído sob licença GNU<sup>3</sup>, e vem sendo muito utilizado em simulações cosmológicas e de galáxias em interação (foi usado para computar a primeira simulação cosmológica de N-corpos com mais de  $10^{10}$  partículas de matéria escura, conforme SPRINGEL, 2005), sendo perfeito para o estudo numérico de formação de PRGs em particular.

As componentes das galáxias a serem modeladas são gás, estrelas e matéria escura. A dinâmica das estrelas e matéria escura (parte não-colisional do sistema) é descrita através da Equação de Boltzmann não-colisional (CBE<sup>4</sup>): a seção 4.1.1 foi escrita para sucintamente discutir a abordagem computacional utilizada para esta parte não-colisional.

<sup>1</sup>Do inglês *High Performance Computing*, Computação de Alto Desempenho.

<sup>2</sup>o nome é um acrônimo de *GALaxies with DARK matter and Gas intERACT*.

<sup>3</sup>GNU é um acrônimo recursivo (em inglês: *GNU is Not Unix*) para um tipo de licença pública conhecida como *General Public License*. Mais detalhes podem ser encontrados em <http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>.

<sup>4</sup>Do inglês *Collisionless Boltzmann Equation*.

A dinâmica do gás (parte colisional do sistema) é descrita pelo método *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) (LUCY, 1977; GINGOLD e MONAGHAN, 1977). Tanto a CBE quanto o SPH são tratados hierarquizados pelo método TreeCode (comentado na seção 4.1.2) para o cálculo da força da gravidade por meio do código TreeSPH (HERNQUIST e KATZ, 1989; KATZ *et al.*, 1995), brevemente explicado na seção 4.1.3. A grande quantidade de partículas, o número de interações e a complexidade das equações tornam o problema de N-corpos um desafio computacional. Para otimizar os cálculos reduzindo o custo computacional, o GADGET-2 implementa a curva de Peano-Hilbert (seção 4.1.4).

Existe também uma compilação do GADGET-2 que utiliza outro esquema de integração, chamado *Particle Mesh*. Este esquema não foi utilizado neste trabalho, portanto não será detalhado.

#### 4.1.1 Dinâmica não-colisional - Estrelas e Matéria Escura

Adotando a descrição contínua do sistema, conforme visto no capítulo 2, não se faz necessário especificar massas, posições e velocidades para todos os elementos; em vez disso, define-se uma função de distribuição de massa e trabalha-se em um espaço de fase  $6N$ -dimensional, em que  $N$  é o número de corpos do sistema. Para se poder evoluir o modelo ao longo do tempo, permitindo, assim, estudar qualquer estado deste sistema, se faz necessário determinar como a função de distribuição evolui no espaço de fase.

Sendo  $\mathbf{r}$  a posição e  $\mathbf{v}$  a velocidade de um corpo, a massa no ponto  $(\mathbf{r}, \mathbf{v})$  no espaço de fase no tempo  $t$  pode ser definida em termos da função de distribuição  $f$ , dada por:

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{r}d\mathbf{v} = M_t(\mathbf{r}, \mathbf{v}), \quad (4.1)$$

em que  $M_t(\mathbf{r}, \mathbf{v})$  é a massa em  $d\mathbf{r}d\mathbf{v}$ .

Além disso, faz-se a distinção entre estrelas e matéria escura escrevendo a função de distribuição como  $f = f_s + f_d$ , em que  $f_s$  é a função de distribuição das estrelas, e  $f_d$  é a função de distribuição de matéria escura (POWER, 1999).

Tem-se que  $f \geq 0$  em todo o espaço de fase. Para encontrar uma equação dinâmica para a função de distribuição, assume-se que o fluxo de matéria através do espaço de fase  $6N$ -dimensional é governado pelo campo vetorial suave de  $6N$  dimensões:

$$(\dot{\mathbf{r}}, \dot{\mathbf{v}}) = (\mathbf{v}, -\nabla\Phi), \quad (4.2)$$

em que  $\Phi$  é o potencial gravitacional. Por hipótese, as forças que regem os movimentos das partículas (o fluxo no espaço de fase) são dadas pelo gradiente do potencial.

Na ausência de colisões de qualquer alcance, e com a hipótese de que estrelas não são criadas nem destruídas, o fluxo no espaço de fase deve conservar massa. Assim, pelo princípio da conservação de massa:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left( f \dot{\mathbf{r}} + \frac{\partial(f\dot{\mathbf{v}})}{\partial \mathbf{v}} \right) = 0. \quad (4.3)$$

Ainda:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} - \nabla \Phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0. \quad (4.4)$$

Essa é a **Equação de Boltzmann não-colisional** (CBE), também chamada de **Equação de Vlasov**, e é um caso especial do Teorema de Liouville (BINNEY e TREMAINE, 2008). A interpretação da CBE, do ponto de vista da astrofísica, é que o fluxo de pontos estelares no espaço de fase é incompressível, ou o espaço de fase de densidade ao redor do ponto de fase de qualquer estrela se mantém constante.

Note que, como  $f = f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ , e  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ ,  $\mathbf{v} = \mathbf{v}(t)$ , tem-se que:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} \frac{d\mathbf{r}}{dt} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} \frac{d\mathbf{v}}{dt} \Rightarrow \frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} - \nabla \Phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}}. \quad (4.5)$$

Comparando com a equação 4.4, obtém-se:

$$\frac{df}{dt} \equiv \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} - \nabla \Phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0. \quad (4.6)$$

Ou seja, o valor de  $f$  em torno do ponto do espaço de fase permanece o mesmo para todo instante, ou “o ‘fluido’ de partículas neste espaço é incompressível”. Tal afirmação é conhecida como Teorema de Liouville.

Escrita dessa forma, a CBE pode parecer uma “simples” equação diferencial parcial linear em  $f$ . Porém, ela é na verdade uma complicada equação integro-diferencial, pois a força gravitacional (proporcional à aceleração  $\frac{dv}{dt} = -\nabla \Phi$ ) é uma função da densidade que, por sua vez, é uma integral de  $f$  sobre o espaço de todas as velocidades (MURDIN, 2002). O perfil de densidade  $\rho(\mathbf{r}, t)$  é relacionado à integral da função de distribuição sobre todo o espaço de fase pela **Equação de Poisson** para o campo gravitacional:

$$\nabla^2\Phi(\mathbf{r}, t) = 4\pi G\rho(\mathbf{r}, t) = 4\pi G \int f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)d\mathbf{v}. \quad (4.7)$$

As equações 4.6 e 4.7 descrevem completamente a evolução do sistema auto-gravitante. Se  $f$  satisfaz tais equações, então  $f$  fornece uma solução auto-consistente para o problema não-colisional (POWER, 1999; NAAB, 2006).

Resumindo, estrelas e matéria escura são modeladas como fluidos não-colisionais auto-gravitantes, ou seja, suas funções de distribuição  $f$  no espaço de fase satisfazem a CBE, com o potencial auto-consistente sendo solução da equação de Poisson.

Para resolver este sistema, utiliza-se a abordagem de N-corpos: o fluido de fase é representado por  $N$  partículas, cada uma representando um elemento finito no espaço de fase, que se movimentam ao longo das curvas características da CBE, que são trajetórias Newtonianas ordinárias descritas pelas equações 4.2, com o potencial auto-consistente  $\Phi$  sendo solução da equação 4.7.

Estas partículas são integradas ao longo destas curvas características (SPRINGEL, 1999). Este é essencialmente um método Monte Carlo, aproximando  $f$  contínua por uma amostragem de  $N$  corpos, cada um com massa  $m_i$ , posição  $\mathbf{r}_i$  e velocidade  $\mathbf{v}_i$ , para todo  $i \in \{1, \dots, N\}$  (RODRIGUES, 1999). Em simulações auto-consistentes, o campo gravitacional  $\Phi$  é gerado pelos  $N$  corpos. Não se deve confundir os corpos em um modelo de simulação com as estrelas do sistema físico real, pois cada corpo numa simulação pode representar um conjunto de muitas estrelas de um sistema estelar real.

#### 4.1.2 TreeCode - Algoritmo em Árvore

Para simplificar a integração numérica do sistema de equações 4.2, suaviza-se o campo gravitacional sobre um comprimento de *softening*. A expressão do potencial gravitacional para cada partícula  $i \in \{1, \dots, N\}$  é dada pelo Potencial de Plummer (SPRINGEL, 1999):

$$\Phi(\mathbf{r}_i) = -G \sum_{i \neq j} \frac{m_j}{[|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^2 + \varepsilon^2]^{\frac{1}{2}}}, \quad (4.8)$$

com  $\varepsilon$  sendo o chamado “parâmetro de *softening*”. Desta forma, procura-se evitar a obtenção de valores extremamente altos para o potencial quando duas partículas estão a uma distância  $|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$  muito pequena.

O método mais simples de se calcular a força exercida em cada par de partículas

é a óbvia soma direta sobre cada par. Dessa forma, o resultado seria, para um sistema de  $N$  partículas,  $N(N - 1)$  pares, ou seja, obteria-se um algoritmo de complexidade  $\mathcal{O}(N^2)$ . Uma técnica amplamente utilizada para reduzir o custo computacional em simulações é o algoritmo em árvore hierárquica TreeCode, que explora o fato de a interação de uma partícula com as suas vizinhas ser muito mais importante que a sua interação com partículas individuais distantes, isto é, o método leva em consideração a distância entre as partículas do sistema.

Para a execução do TreeCode, existem duas fases distintas: a construção da árvore de acordo com a estrutura do sistema e o cálculo da força em cada partícula seguindo a hierarquia definida pela composição da árvore.

No processo de construção da árvore considera-se primeiramente uma célula que contenha todas as partículas do sistema. Tal célula é denominada célula raiz. A intersecção entre as células é chamada de nó. A célula é dividida em 8 células cúbicas iguais. Neste ponto, contamos o número de partículas em cada célula. Se na célula não há partículas a célula é ignorada. Se na célula há uma partícula ela é armazenada como um nó folha. Se na célula existe mais de uma partícula ela é gravada como um nó-galho e voltamos ao passo anterior (subdividí-la até termos uma só partícula por célula). Este processo foi proposto inicialmente por Barnes e Hut (apud RODRIGUES, 1999), e por isso será denotada daqui por diante por Árvore BH. Note que tal árvore é uma árvore octal, dada a divisão de cada célula por 8 durante o processo de construção. A complexidade do TreeCode é  $\mathcal{O}(N \log N)$  (HERNQUIST e KATZ, 1989).

O algoritmo usa soma direta para calcular a força entre pares de partículas próximos, enquanto a contribuição das partículas distantes é computada levando em consideração células maiores (pseudo-células), que representam um conjunto de partículas. Dessa forma, poupa-se tempo de computação significativa para sistemas com  $N$  grande. Para definir critérios de proximidade entre partículas, utiliza-se um parâmetro  $\theta$ , chamado de **parâmetro de tolerância**, da seguinte forma: seja  $d$  a separação entre uma dada partícula e um grupo de partículas contido em uma célula de tamanho  $s$ . Se a desigualdade

$$\frac{s}{d} \leq \theta \tag{4.9}$$

for satisfeita, então a distribuição interna de partículas pode ser esquecida e a interação computada usando uma expansão de baixa ordem do potencial do grupo de partículas em relação ao seu centro de massa. Assim, a força para cada nó é calculada seguindo o algoritmo abaixo:

- **Passo 1:** Escolha uma partícula como sendo um nó raiz.
- **Passo 2:** Calcule o valor de  $\frac{s}{d}$  referente ao nó determinado no passo anterior.
- **Passo 3:** Se  $\frac{s}{d} \leq \theta$ , então a estrutura interna é calculada para a célula como um todo. Caso contrário, suba um nível na árvore e volte ao Passo 1.

### 4.1.3 O método SPH e a implementação TreeSPH

A evolução do gás interestelar é modelada numericamente usando a técnica SPH (do inglês *Smoothed Particle Hydrodynamics*) de maneira completamente compatível com a estrutura em árvore do algoritmo TreeCode. O gás é tratado como um fluido suavizado, obedecendo à equação de Navier-Stokes para um gás compressível, com átomos e moléculas exercendo pressão e forças viscosas uns nos outros, que não são representadas pela CBE. O campo de densidade do gás é representado por partículas que carregam informações capazes de descrever as propriedades termodinâmicas e hidrodinâmicas locais do fluido, incluindo uma viscosidade artificial que trata as altas densidades nos choques e fontes de geração de entropia para contabilizar o aquecimento e o resfriamento do gás (RODRIGUES, 1999).

As equações dinâmicas são obtidas a partir da forma Lagrangeana das leis de conservação para fluidos compressíveis:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} &= -\frac{1}{\rho} \nabla P, \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) u + P \nabla \cdot \mathbf{v} &= -\mathcal{L},\end{aligned}$$

em que  $\rho$  é a densidade,  $\mathbf{v}$  é a velocidade,  $P$  é a pressão,  $u$  é a energia térmica por unidade de massa e  $\mathcal{L}$  é a função de perdas de energia, que inclui todas as fontes e sumidouros de energia não adiabáticos (LANDAU e LIFSHITZ, 1959).

Devido à sua natureza, o método SPH é completamente Lagrangeano e naturalmente implementável em três dimensões, o que facilita sua unificação com o TreeCode. A implementação TreeSPH, de Hernquist e Katz (1989), faz essa unificação. O TreeSPH é consideravelmente mais flexível que outros esquemas numéricos similares, sendo utilizado pelo GADGET-2 no tratamento de fluidos auto-gravitantes tridimensionais, com e sem matéria não-colisional.

A finalidade do método é a descrição das características do fluido por interpolação de um conjunto de partículas. A interpolação é realizada usando um *kernel* de suavização  $W$  (*smoothing kernel*), que é a média ponderada das partículas dentro de um volume especificado por um comprimento de suavização  $h$  (*smoothing length*).  $W$  é normalizado por  $\int W(\mathbf{r}, h) d\mathbf{r} = 1$ , e existem diversas técnicas para a sua escolha: todas elas assumem que não há interação significativa entre partículas distantes. Assim, consegue-se um melhor desempenho dos cálculos das forças. A interpolação permite que qualquer função seja expressa em termos dos seus valores em um conjunto de pontos desordenados (as partículas). Sendo  $\langle f(\mathbf{r}) \rangle$  o valor médio de um campo  $f(\mathbf{r})$ , a integral de interpolação que permite encontrar tal valor médio é dada por  $\langle f(\mathbf{r}) \rangle = \int W(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, h) f(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'$  (GINGOLD e MONAGHAN, 1977; SPRINGEL, 2005).

De fundamental importância para qualquer formulação SPH é a estimação da densidade. Para tal, o GADGET-2 usa a seguinte equação:

$$\rho_i = \sum_{j=1}^N m_j W(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|, h_i), \quad (4.10)$$

com cada  $h_i$  sendo o comprimento de suavização adaptativo da  $i$ -ésima partícula.

#### 4.1.4 Curva de Peano-Hilbert

Quanto maior a quantidade de partículas, mais preciso se torna um modelo de um sistema físico real. No entanto, obviamente, o custo computacional também aumenta proporcionalmente. Dessa forma, o uso de supercomputadores se torna cada vez mais comum, pois reduz o tempo de integração, permitindo aumentar o número de partículas do sistema, melhorando a acurácia do modelo. Uma estratégia empregada por Springel (2005) a fim de potencializar o sistema computacional empregado nas simulações é utilizar a curva de preenchimento de Peano-Hilbert. A ideia da utilização desta curva em um código em árvore foi primeiramente proposto por Warren e Salmon; Warren e Salmon (apud SPRINGEL, 2005).

A curva de Peano-Hilbert é uma curva contínua fractal de preenchimento de espaço (atravessam todos os pontos da região a ser coberta), descrita pela primeira vez pelo matemático alemão David Hilbert (1862-1943) em 1891, como uma variante das curvas de preenchimento de espaço descobertas pelo matemático Giuseppe Peano (1858-1932) no ano anterior.

Pode ser construída recursivamente, a partir de uma curva-base - uma forma “U” para o caso bidimensional, ou uma curva um pouco mais complexa para o caso tridimen-

sional - através de regras específicas: Para duas dimensões, cada “U” deve ser substituído por duas cópias menores do subjacente “U”, enquanto que, nas duas extremidades, deve ser rotacionado e cópias espelhadas têm de ser colocadas. Pela aplicação repetida destas regras, podemos construir uma curva de preenchimento de área para *grids* arbitrariamente grandes de tamanho  $2^n \times 2^n$ . Em três dimensões, uma curva-base definida em um *grid*  $2 \times 2 \times 2$  pode ser estendida de forma análoga, em conjunto com regras de mapeamento um pouco mais complicadas. A Figura 4.1 mostra as curvas nos casos bi e tridimensionais.

A curva de Peano-Hilbert é utilizada na implementação do GADGET-2 como esquema de decomposição de domínio, estritamente independente do número de processadores utilizado. Tal decomposição é feita da seguinte forma: divide-se o número total de partículas do modelo pelo número de processadores disponíveis, fazendo com que todos os processadores tenham a mesma quantidade de partículas para trabalhar. Isto evita que um processador fique sobrecarregado enquanto outro fique esperando.

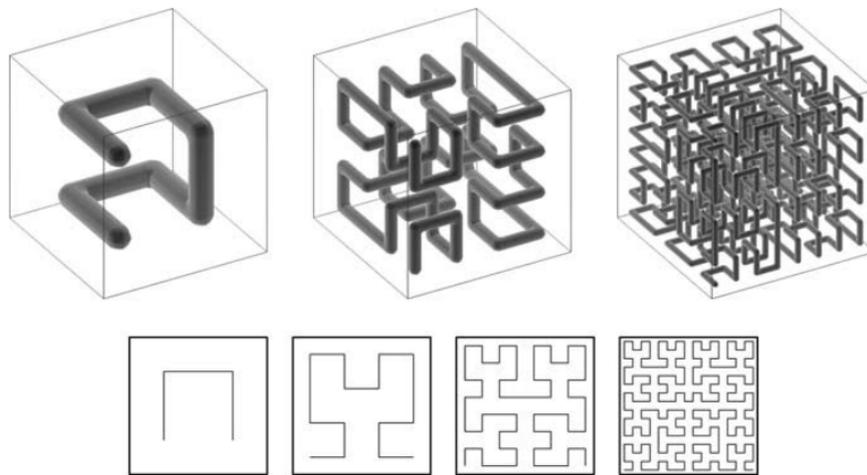


Figura 4.1 - Curva de preenchimento de Peano-Hilbert em duas (abaixo) e três (acima) dimensões (SPRINGEL, 2005).

Três propriedades da curva em particular são bastante importantes:

- 1) Auto-similaridade: suponha ser descrita uma curva de Peano-Hilbert que preencha um *grid*, de tamanho  $2^n \times 2^n \times 2^n$ , com um mapeamento injetor  $p_n(i, j, k)$ , em que o valor  $p_n \in [0, \dots, n^3 - 1]$  da função é a posição da célula  $(i, j, k)$  ao longo da curva. Então, tem-se que  $p_{\frac{n}{2}}(i/2, j/2, k/2) = p_n(i, j, k)/8$ , em que todas as divisões são entendidas como serem divisões inteiras. Dessa forma, pode-se facilmente “contrair” uma dada curva de Peano-Hilbert e novamente obter uma de ordem mais baixa. Tal propriedade é explorada no código do GADGET-2.

- 2) Pontos suficientemente próximos ao longo da curva unidimensional estão, em geral, também próximos no espaço tridimensional: isto é, o mapeamento preserva a localidade das partículas. Esta é uma propriedade altamente desejável, que reduz os custos de comunicação entre domínios vizinhos.
- 3) Existe uma correspondência próxima entre a decomposição espacial obtida pela Árvore BH e a obtida segmentando uma curva de Peano-Hilbert: considere uma curva de Peano-Hilbert que preenche uma caixa (o nó-raiz) que engloba todo o conjunto de partículas do modelo. Cortar esta curva em oito longos pedaços iguais e então recursivamente cortar cada segmento em, novamente, oito pedaços iguais regenera a estrutura octal do espaço da correspondente Árvore BH. Assim, se designa-se um segmento arbitrário da curva a um processador, então o volume correspondente é compatível com a estrutura de nós da árvore BH coberta pelo volume todo. Por causa desta propriedade, obtém-se uma árvore cuja geometria não é afetada pelo método de paralelização (o que justifica a independência com relação ao número de processadores utilizado, como dito anteriormente).

A relação entre o TreeCode e a curva de Peano-Hilbert é exemplificada, para o caso bidimensional por simplicidade, na Figura 4.2.

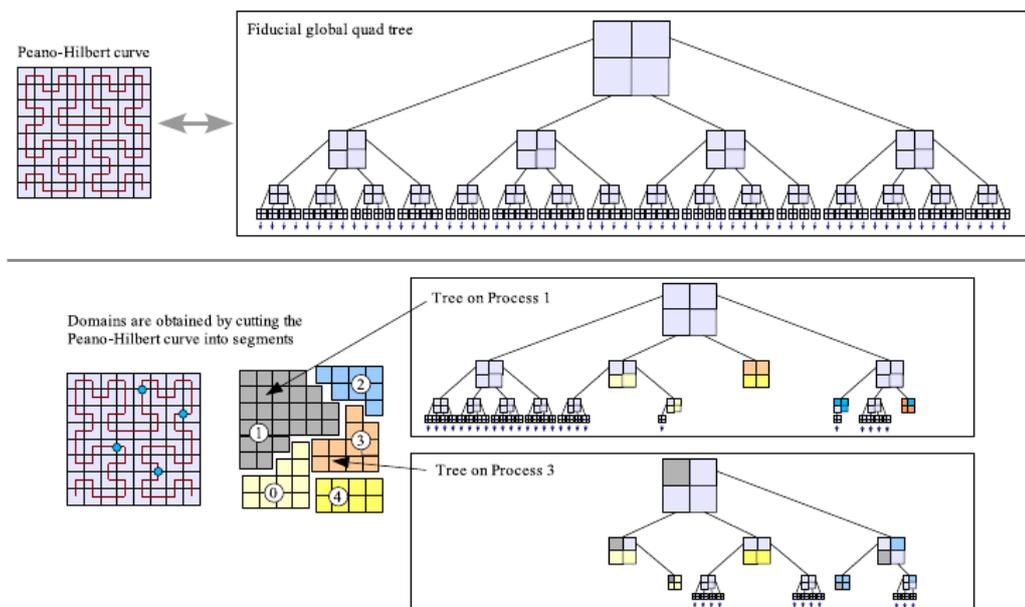


Figura 4.2 - Relação entre o TreeCode e a curva de Peano-Hilbert para o caso bidimensional (SPRINGEL, 2005).

Note que os nós maiores designados a cada processador desta forma não precisam ser todos do mesmo tamanho. Em vez disso, o método pode ser flexivelmente ajustado

para distribuições de partículas altamente aglomeradas, se necessário.

## 4.2 Programas adicionais

Além do GADGET-2, outros programas são utilizados neste trabalho, para geração de modelos de galáxias, com condições iniciais de massa e tamanho (quantidade de partículas, distribuição por tipo de elemento, fatores de escala), e tratamento de tais modelos com as posições específicas e velocidades iniciais, formando o modelo de par de galáxias em interação que são evoluídos temporalmente.

### 4.2.1 MakeNewDisk

O código *MakeNewDisk*, também escrito por Volker Springel, é utilizado para gerar modelos de galáxias, ou seja, os arquivos de condições iniciais para cada modelo. Este programa não é distribuído livremente, mas seu código fonte foi gentilmente cedido pelo autor.

### 4.2.2 pot\_din\_fric

O *pot\_din\_fric* é um código escrito em linguagem C pelo aluno de mestrado Fernando Silvério, do programa de pós-graduação em Física e Astronomia da UNIVAP. O programa faz cálculos para o potencial do sistema envolvendo atrito por fricção dinâmica.

### 4.2.3 UNSIO

O UNSIO<sup>5</sup> (LAMBERT, 2014) é uma API<sup>6</sup> que executa as operações de entrada e saída de dados de uma forma genérica, e em diferentes formatos de arquivos de N-corpos, permitindo ao usuário escrever somente um programa de análise, que funcionará para todos os formatos de arquivo conhecidos suportados. A API é compatível com várias linguagens, como C, C++, Fortran e Python. O UNSIO é um código aberto, podendo ser utilizado nos termos da licença CeCILL2.

### 4.2.4 Glnemo2

O *Glnemo2* (LAMBERT, 2012) é um programa interativo de visualização tridimensional de arquivos de dados de simulação numérica de sistemas estelares. Permite que o usuário escolha quais componentes (gás, estrelas, disco, bojo, halo de matéria escura) sejam mostradas. Aceita arquivos de entrada em vários formatos, entre eles o do GADGET-2.

---

<sup>5</sup>o nome é um acrônimo de *Universal N-body Snapshot Input Output*

<sup>6</sup>*Application Programming Interface*, em português: Interface de Programação de Aplicativos. É um conjunto de rotinas e padrões estabelecidos por um software para a utilização das suas funcionalidades por aplicativos que não pretendem envolver-se em detalhes da implementação, mas apenas usar seus serviços.

É uma ferramenta muito útil quando se trabalha com simulações de N-corpos, desde galáxias isoladas até estruturas de ordem cosmológica, pois permite a visualizar o sistema simulado em cada estado, ajudando na identificação de formas, áreas mais densas e formação de estruturas como braços espirais, barras e anéis.

O Glnemo2 é um código aberto, liberado para uso nos termos da licença CeCILL2. Foi escrito em C++ usando a biblioteca OpenGL e a API Nokia QT 4.X.

### 4.3 Condições Iniciais

Testes numéricos feitos por Bournaud e Combes (2003) mostram que parâmetros internos das galáxias doadora e hospedeira (massas dos discos, dos bojos e dos halos, assim como os raios dos discos) não são os mais relevantes se comparados ao conteúdo gasoso (massa e extensão radial) da doadora. Em um sistema de par de galáxias em interação, os seguintes parâmetros orbitais são extremamente importantes para a formação de PRGs pelo cenário de acréscimo:

- 1) A velocidade relativa antes do encontro.
- 2) O ângulo entre o plano do disco da doadora e o plano equatorial da hospedeira, antes do evento de acreção de material.
- 3) O ângulo entre o plano orbital da doadora com relação à hospedeira, e o plano equatorial da hospedeira.
- 4) O raio mínimo entre o centro da hospedeira e o centro da doadora.

Os modelos gerados pelo código *MakeNewDisk* eram escritos no formato GADGET-1<sup>7</sup>. O programa foi modificado para escrever os arquivos de condições iniciais no formato GADGET-2. Estes modelos podem ser rotacionados em um sistema de referência cartesiano tridimensional com o uso do código *uns\_rotate.cc*. Por fim, o código *uns\_stack.cc* faz com que dois modelos no novo formato sejam unidos em um mesmo arquivo de condições iniciais, com a distância entre os modelos definida, assim como a velocidade relativa inicial da galáxia doadora com relação a hospedeira. Os três códigos foram escritos em linguagem C++ com a API UNSIO, tendo o *uns\_rotate.cc* sido desenvolvido pelo autor desta dissertação em conjunto com o orientador, tomando como base outros códigos disponibilizados pelo autor da API.

---

<sup>7</sup>O GADGET-1 é a primeira versão do código GADGET-2, porém, obviamente, escrito pelo mesmo autor. O programa GADGET-2, utilizado neste trabalho, suporta também o antigo formato, porém é vantajosa a atualização do arquivos, pois permite um melhor aproveitamento do programa.



## CAPÍTULO 5

### Simulações

Primeiramente foram feitos quatro modelos de galáxias:

- Modelo **A** - Galáxia discoidal, tomando como base os parâmetros gerais da Via-Láctea. Este modelo foi concebido para se tornar a galáxia hospedeira de uma eventual PRG.
- Modelo **B** - Galáxia com 50% da massa do modelo A. Disco de gás mais estendido, o que facilita a captura desse material pela hospedeira para formar o anel do sistema.
- Modelo **C** - Similar ao modelo B, mas com 20% da massa do modelo A.
- Modelo **D** - Similar ao modelo B, mas com 10% da massa do modelo A.

A grade de simulações consiste em interagir o modelo A com todos os demais, o que configura a razão de massa entre galáxias o primeiro parâmetro a ser testado. Dessa forma, obtém-se quatro grupos de simulações: **AA**, **AB**, **AC** e **AD**.

Em um sistema cartesiano  $xyz$ , o plano orbital nestes quatro grupos é o plano  $xy$ , e o pericentro da órbita ocorre sobre a seção positiva do eixo  $y$ . O modelo A é inclinado de 90 graus com relação ao eixo  $x$ , sendo todos os modelos originalmente criados com o plano no disco paralelo ao plano  $xy$ . Ou seja, o modelo A, nestes grupos, tem o plano do disco paralelo ao plano  $xz$ . A Figura 5.1 exemplifica esta geometria com a hospedeira e a doadora sendo o modelo A, em uma órbita com distância de pericentro igual a 8 kpc.

Em todas as figuras referentes às simulações feitas, a legenda de referência localizada no canto inferior direito deve ser entendida da seguinte forma: o eixo de cor vermelha é o eixo  $x$ , o de cor verde é o eixo  $y$  e o de cor azul (com orientação saindo da imagem) é o eixo  $z$ .

Mais dois parâmetros são testados nesta grade: a distância de pericentro  $q$  (para o que foram estipulados os valores de 8, 12 e 20 kpc) e a velocidade relativa inicial  $v$  (três valores distintos). Os valores de  $v$  foram calculados para cada grupo de simulações, sendo o menor aquele que leva a uma órbita de energia nula (que no caso kepleriano seria uma parábola) que será denotado por  $v_0$  (a velocidade de escape da órbita da galáxia doadora com relação à hospedeira), e os outros dois valores  $v_{10} \equiv 1.1v_0$  e  $v_{20} \equiv 1.2v_0$ . A grade tem, portanto, 36 simulações. A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros utilizados para cada uma das distâncias de pericentro.

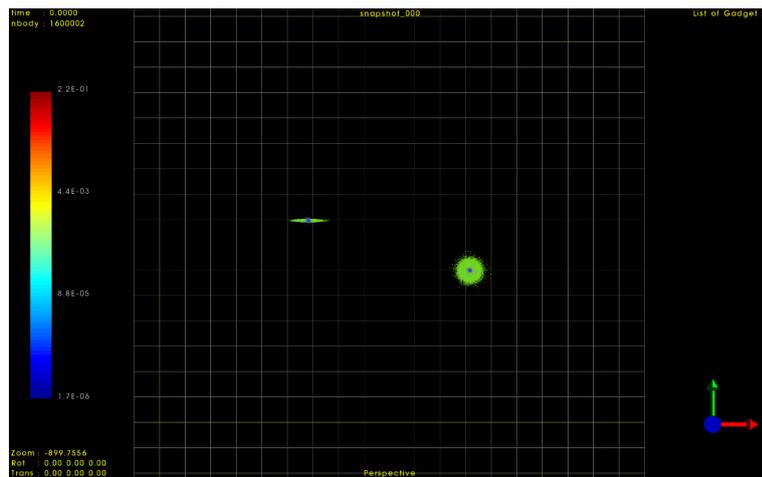


Figura 5.1 - Condições iniciais para a simulação que tem o modelo A tanto como hospedeira (à esquerda) quanto como doadora (à direita). A cor verde representa as estrelas e a barra de cores representa o gás.

As alterações de velocidade nas condições iniciais em cada modelo da grade significam alterações na energia orbital: para velocidade  $v_0$ , a energia orbital é nula, e a órbita é uma parábola perfeita. Para energia orbital estritamente positiva (velocidades maiores do que  $v_0$ ), pode-se esperar que a força de maré e a fricção dinâmica arrastem matéria para a formação de anel; para órbita com energia total negativa, o decaimento da órbita é mais rápido e violento, dificultando que um possível anel se forme.

As órbitas são não-keplerianas. Ao se calcular as velocidades de escape no pericentro para cada simulação, é possível obter as coordenadas iniciais de velocidade e posição da galáxia secundária com relação a principal. Desta forma, foram obtidas as distâncias iniciais entre os dois modelos em cada par de galáxias simuladas. A velocidade no início de cada simulação foi deduzida negligenciando-se os efeitos causados por fricção dinâmica, por meio de integração temporal reversa.

Distância de pericentro	Posição inicial da doadora (x,y,z)	$v_0$ (x,y,z)
8 kpc	(253, 231; -78.825; 0, 0)	(-185, 364; 73, 8154; 0, 0)
12 kpc	(239, 547; -83, 331; 0, 0)	(-169, 095; 82, 4456; 0, 0)
20 kpc	(227, 804; -84, 863; 0, 0)	(-155, 013; 94, 7741; 0, 0)

Tabela 5.1 - Parâmetros para cada distância de pericentro. As posições estão em kpc, as velocidades relativas iniciais  $v_0$  estão em km/s.

A seguinte notação para designar as simulações é utilizada:

$$\text{sim}XY-qn-v_j ,$$

em que  $X$  e  $Y$  são os modelos em interação, com distância de pericentro  $n$  kpc e velocidade relativa inicial  $v_j$  com  $j \in \{0, 10, 20\}$ . Na Tabela 5.2 constam informações sobre a formação ou não de anéis em cada simulação da grade.

Todos os modelos de pares tiveram simuladas suas interações por um período de 3  $Gyr$ , o que de acordo com Bournaud e Combes (2003) deve ser tempo suficiente para que um anel polar se forme pelo cenário de acréscimo.

<b>Simulação</b>	$v_0$	$v_{10}$	$v_{20}$
simAA-q8	-	-	-
simAB-q8	-	-	-
simAC-q8	anel muito fraco	anel fraco	-
simAD-q8	anel médio	anel médio	anel fraco
simAA-q12	-	-	-
simAB-q12	-	-	-
simAC-q12	anel fraco	anel muito fraco	anel muito fraco
simAD-q12	anel muito fraco	anel muito fraco	anel muito fraco
simAA-q20	-	-	-
simAB-q20	-	anel fraco	-
simAC-q20	-	-	-
simAD-q20	-	-	-

Tabela 5.2 - Formação ou não de anéis na grade de simulações.

As próximas seções apresentam os resultados das simulações com ocorrência de formação de anéis, conforme a Tabela 5.2. Tais discussões podem servir (e, de fato, servirão) de guia para futuras simulações, assunto abordado na seção 5.7 que encerra esse capítulo.

### 5.1 Simulações simAC-q8

As simulações com velocidades relativas iniciais iguais a  $v_0$  e a  $v_{10}$  apresentaram formação de estruturas aneladas. A simulação simAC-q8- $v_0$  mostrou, após aproximadamente 2,4  $Gyr$ , um anel muito fraco (Figura 5.2), que rapidamente é destruído com o choque da galáxia doadora, resultando numa fusão dos dois modelos, sem formação de anéis. Aqui o anel formado é chamado de “muito fraco” pelo motivo de não durar muito tempo. Entretanto, a estrutura do anel é bem delineada.

Uma estrutura anelada fraca é formada na simulação simAC-q8- $v_{10}$ . Neste caso a transferência de gás da doadora para a hospedeira é mais intensa do que no caso anterior (Figura 5.3), porém também o anel é destruído rapidamente com um choque entre as duas

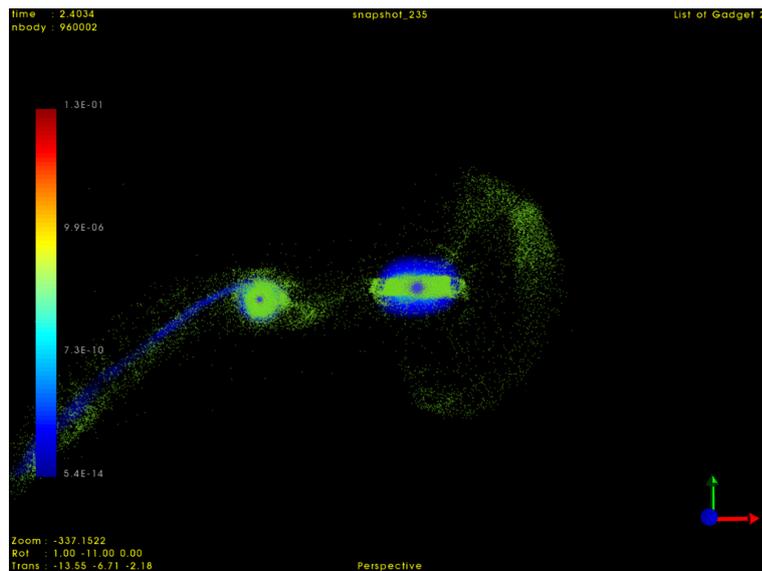


Figura 5.2 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAC-q8-v0, após 2,4 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada muito fraca. A cor verde representa as estrelas e a barra de cores representa o gás.

galáxias. A estrutura que se forma após a fusão dos modelos não resulta em anéis.

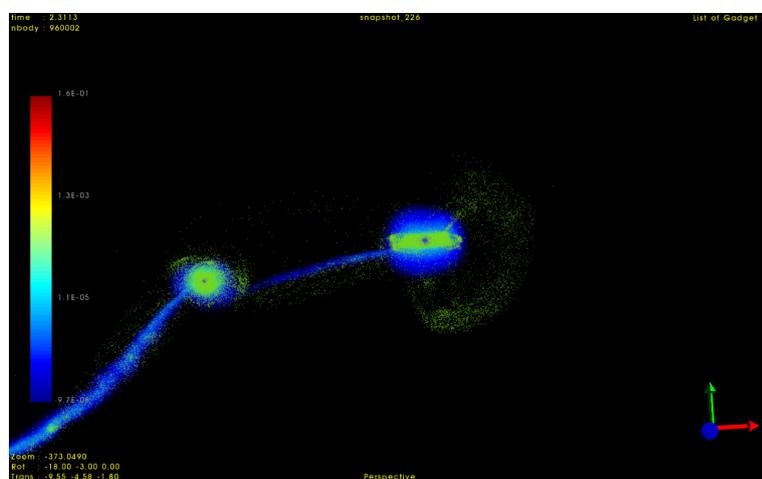


Figura 5.3 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAC-q8-v10, após 2,3 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada fraca. A cor verde representa as estrelas e a barra de cores representa o gás.

## 5.2 Simulações simAD-q8

Para as três velocidades ( $v_0$ ,  $v_{10}$  e  $v_{20}$ ), esta configuração de massas e distância de pericentro apresentou formação de estrutura anelada de forma mediana. Nos três casos a galáxia doadora não retorna após o choque inicial para um novo choque (e eventual fusão) até os 3 *Gyr*, que foi o tempo de interação total simulado para todos os grupos da grade.

A Figura 5.4 apresenta o caso com velocidade  $v_0$  após aproximadamente 2,8 *Gyr*. Há a ocorrência de um anel polar mediano, assim como no caso com velocidade  $v_{10}$  (Figura 5.5).

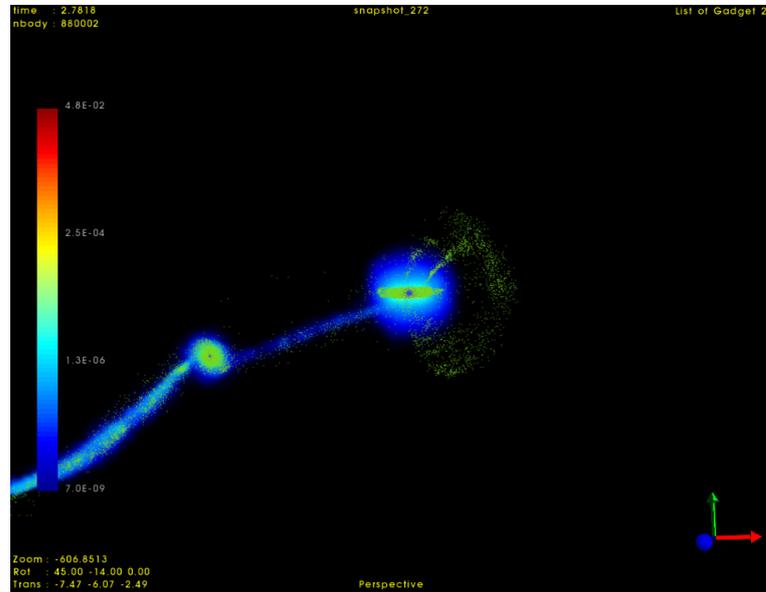


Figura 5.4 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q8-v0, após 2,8 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul).

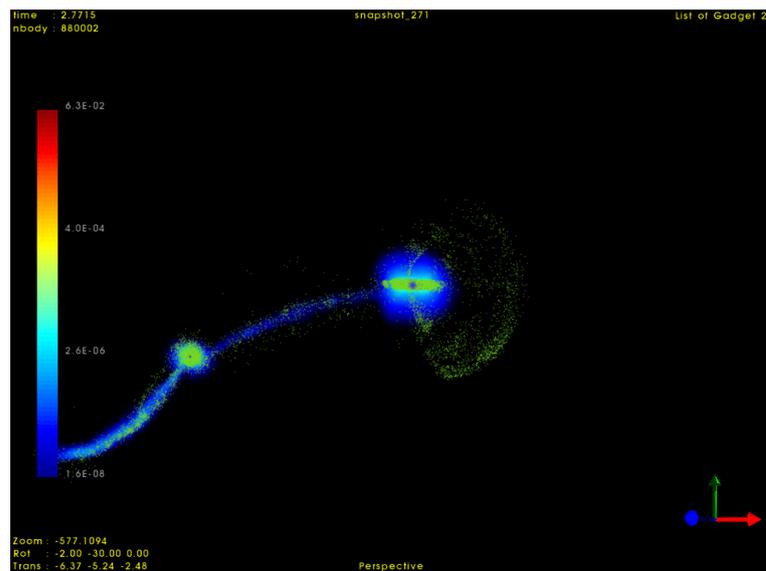


Figura 5.5 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q8-v10, após 2,8 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul).

A simulação com velocidade  $v_{20}$  apresentou uma formação de anel polar fraco, conforme explicitado na Figura 5.6.

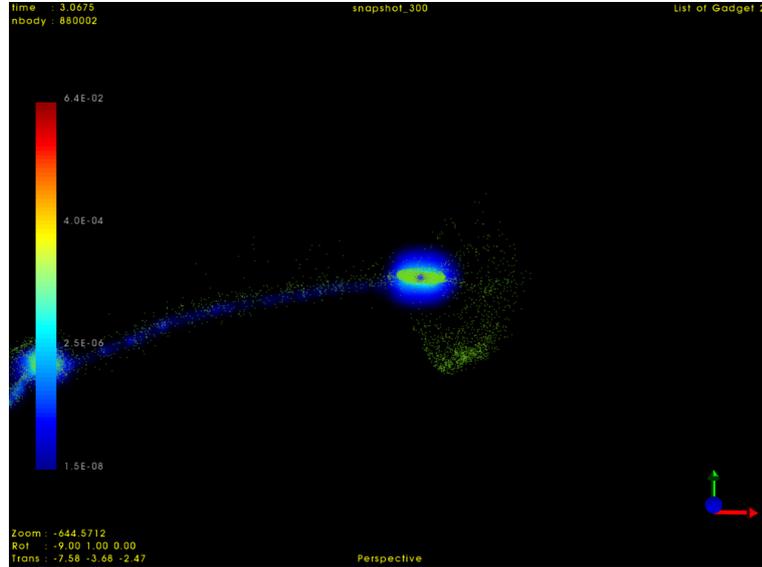


Figura 5.6 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q8-v10, após 3,0 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul).

### 5.3 Simulações simAC-q12

A simulação simAC-q12-v0 gerou a formação de um anel fraco, como mostra a Figura 5.7, porém que se dissipa rapidamente com o encontro entre a galáxia doadora e a hospedeira, culminando numa fusão sem anéis.

Na simulação simAC-q12-v10 também foi observada a formação de um anel (Figura 5.8). Entretanto, tal anel se dissipa rapidamente, antes de uma eventual fusão entre as duas galáxias, sendo categorizado como um anel muito fraco. O mesmo ocorre para na simulação simAC-q12-v20, com o anel formado ilustrado na Figura 5.9.

### 5.4 Simulações simAD-q12

A simulação simAD-q12-v0 apresenta a ocorrência de formação de um anel que tem curta duração, se dissipando antes de uma eventual fusão entre as duas galáxias, sendo outro caso de formação de anel muito fraco. A Figura 5.10 mostra o momento em que o anel se forma. O mesmo ocorre com as simulações simAD-q12-v10 (Figura 5.11) e simAD-q12-v20 (Figura 5.12).

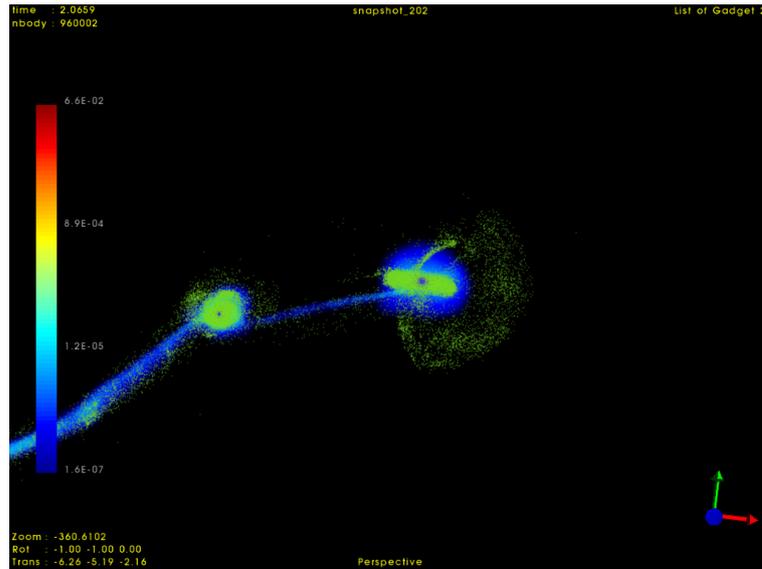


Figura 5.7 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAC-q12-v0, após 2,0 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul).

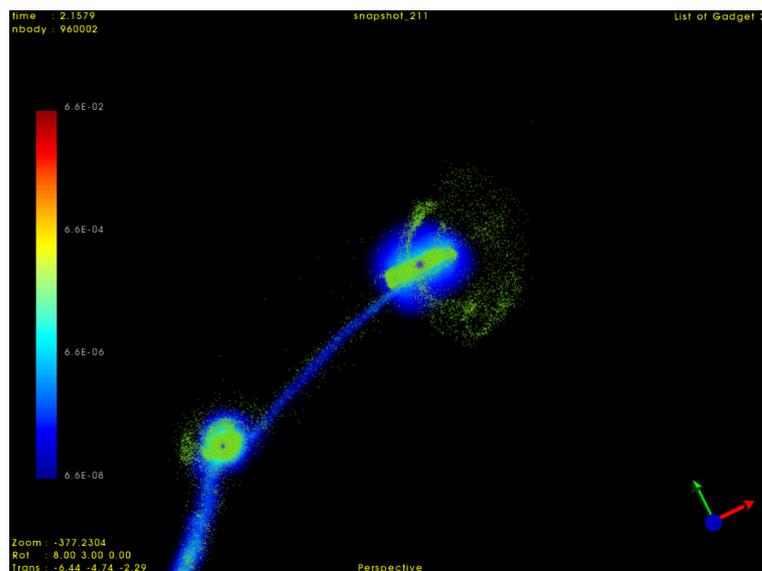


Figura 5.8 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAC-q12-v10, após 2,1 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul).

## 5.5 Simulações simAB-q20

Neste grupo de simulações, a única que apresentou uma formação de anel considerável foi a com velocidade  $v_{10}$ . Porém, o anel que se forma em torno da galáxia hospedeira (Figura 5.13) logo se dissipa com a aproximação da galáxia doadora. Após 3 *Gyr*, o encontro entre a doadora e a hospedeira culmina numa fusão, sem formação de anéis.

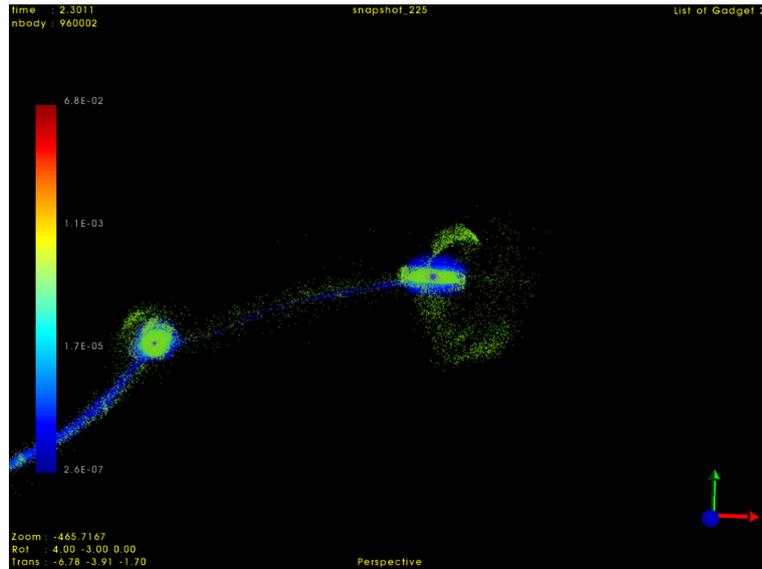


Figura 5.9 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAC-q12-v20, após 2,3 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul).

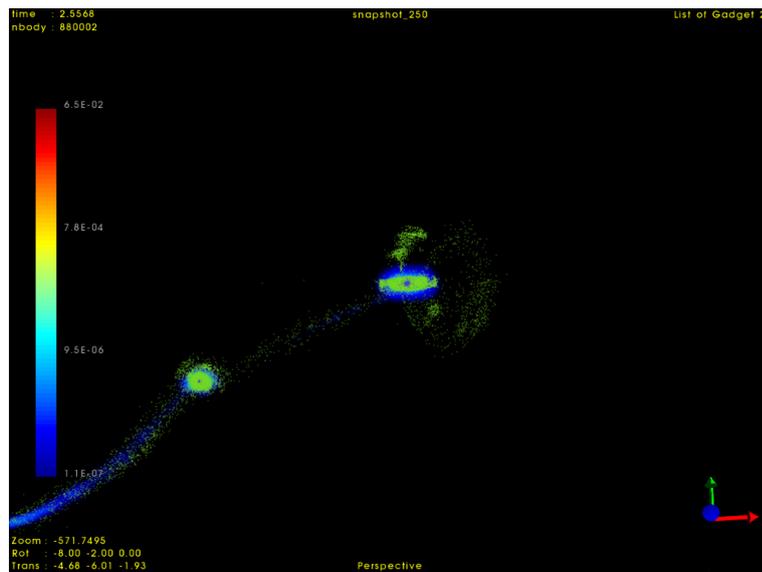


Figura 5.10 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q12-v0, após 2,6 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul).

## 5.6 Consumo computacional

As simulações foram executadas no Hipercubo, *cluster* do IP&D, que possui tanto nodos mais antigos, com 12 *cores* cada, quanto nodos mais novos, com 20 *cores* cada. Cada simulação foi executada em um único nodo, ou seja, a comunicação entre nodos diferentes não foi utilizada. A Tabela 5.3 mostra a média de tempo de execução para cada modelo

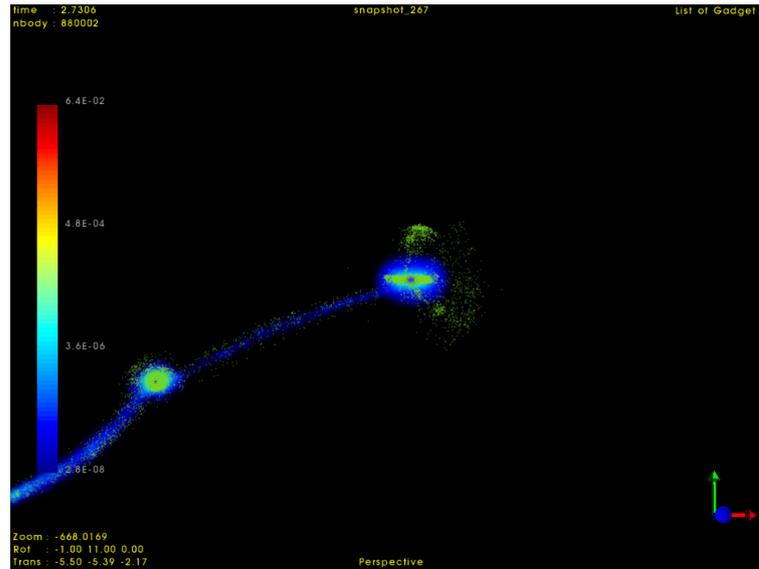


Figura 5.11 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q12-v10, após 2,7 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul).

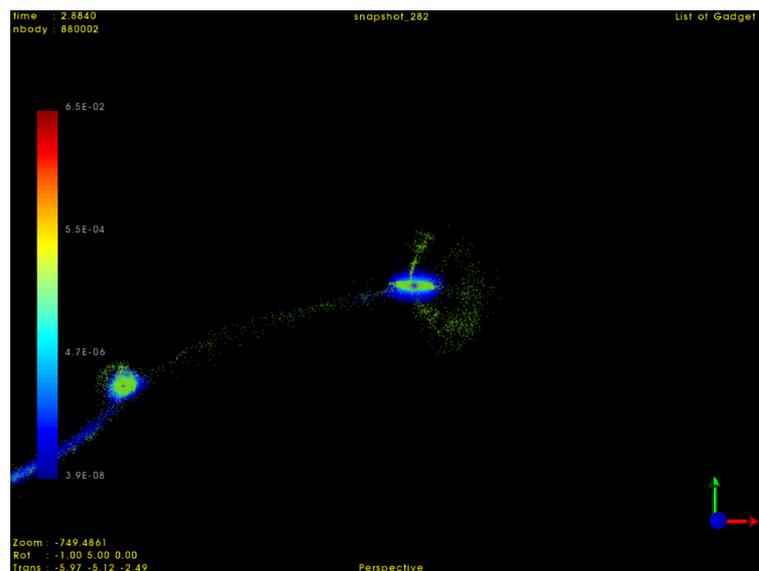


Figura 5.12 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAD-q12-v20, após 2,9 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul).

de par de galáxias, independente da distância de pericentro e velocidade relativa inicial de cada simulação.

As simulações apresentadas na Tabela 5.3 consumiriam aproximadamente 104 dias de processamento se as simulações fossem todas executadas serialmente em um nodo de 20 cores (que são os mais rápidos). Caso o Hipercubo fosse utilizado somente para as

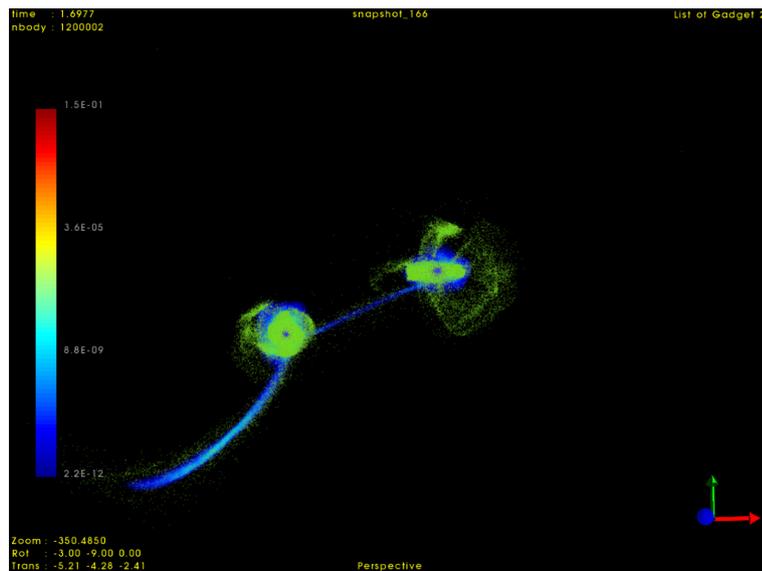


Figura 5.13 - Interação entre as duas galáxias na simulação simAB-q20-v10, após 1,7 *Gyr*. A galáxia à direita é a hospedeira. Note a formação de uma estrutura anelada principalmente de estrelas (verde) e a transferência de gás (azul).

Modelo	tempo para 12 <i>cores</i> (nodos antigos)	tempo para 20 <i>cores</i> (nodos novos)
AA	6,9 dias	3,9 dias
AB	-	2,7 dias
AC	4,9 dias	2,6 dias
AD	4,5 dias	2,3 dias

Tabela 5.3 - Média de tempo de execução da simulação de evolução temporal para cada tipo de modelo de par de galáxia.

simulações deste trabalho <sup>1</sup>, o tempo aproximado de uso do *cluster* seria de 20 dias. Como o Hipercubo não foi exclusivamente usado para estas simulações, o tempo aproximado de utilização foi de 50 dias, distribuídos ao longo dos últimos 4 meses. Antes disso, diversas simulações de teste foram executadas (mas não computadas na grade e, portanto, não foram comentadas neste trabalho).

## 5.7 Discussão dos resultados e Planejamentos futuros

Os resultados da grade de simulações apresentados nas seções anteriores deste capítulo estão sendo utilizados para nortear novas simulações numéricas. O intuito é restringir cada vez mais os parâmetros necessários para a formação de PRGs, tendo como ponto de partida os dados obtidos com a grade original, e desta forma refinar os modelos de pares mais promissores.

<sup>1</sup>O que seria impossível, pois o *cluster* é usado para pesquisas também do laboratório de Engenharia Biomédica do IP&D-UNIVAP.

Em boa parte dos casos que resultaram em anéis, a galáxia doadora permanece próxima da hospedeira após o anel se formar, o que não é algo comum em observações. Como as interações foram simuladas até 3 *Gyr* de evolução temporal, continuando-se a simulação é possível verificar a estabilidade desses anéis com o afastamento da galáxia doadora (se ocorrer tal afastamento).

O grupo de simulações simAD-q12, em particular, apresentou resultados que se mostraram possivelmente mais propícios à formação de anéis mais robustos se a quantidade de gás da doadora fosse maior (a transferência de gás é importante na formação de anéis, pois constantemente se observa formação estelar em anéis polares). Ainda, se a inclinação da hospedeira no início da simulação fosse alterado, novos resultados poderiam ser obtidos.

Assim, foi criado mais um modelo de galáxia, chamado de **Modelo E**, similar ao modelo D, porém com maior fração de massa total associada ao gás. Desta forma, três novos modelos de pares de galáxias foram construídos, com as configurações conforme explicitadas a seguir:

- simAD-q12-v20-yrot90: A doadora é o modelo D e a hospedeira é o modelo A, porém inclinada em 90 graus com relação ao eixo  $y$ , tendo, assim, o plano do disco paralelo ao plano  $xz$  (Figura 5.14). A distância de pericentro é de 12 kpc, e a velocidade relativa inicial é a mesma utilizada na simulação simAD-q12-v20.
- simAE-q12-v20: Possui as mesmas configurações que a simAD-q12-v20, com o modelo E no lugar do modelo D.
- simAE-q12-v20-yrot90: Possui as mesmas configurações que a simAD-q12-v20-yrot90, porém com o modelo E no lugar do modelo D.

Tais simulações foram feitas, sem resultados de anéis nos modelos com rotação da hospedeira em 90 graus com relação ao eixo  $y$ . O pequeno aumento na fração de massa gasosa feito no modelo simAE-q12-v20 apresentou resultados muito próximos aos encontrados na simulação simAD-q12-v20.

Novas simulações, partindo-se do modelo simAE-q12-v20, com menor fração de massa de gás da hospedeira serão testados buscando-se uma maior diferença entre as frações de massa de gás entre a hospedeira e a doadora.

Além destes, outros modelos de pares estão sendo projetados, visando novas simulações com melhores resultados. Os modelos simAC-q12-v0 e simAC-q12-v10 foram os que apresentaram anéis mais robustos, porém com relativamente pouco gás. Sendo assim, mo-



Figura 5.14 - Condições iniciais para a simulação simAD-q12-v20-yrot90. A galáxia hospedeira está à esquerda. A cor verde representa as estrelas e a barra de cores representa o gás.

delos de pares contendo a doadora com maior fração de gás partindo destas configurações de massa, velocidade e distância de pericentro serão confeccionados.

Também, novas configurações serão testadas, como inclinações diferentes da galáxia hospedeira no início da evolução temporal (conforme foi feito nos modelos simAD-q12-v20-yrot90 e simAE-q12-v20-yrot90) e novas distâncias de pericentro  $q$ : de acordo com os resultados obtidos na grade original com  $q = 20$  kpc, se a inclinação da galáxia hospedeira é de 90 graus com relação ao eixo  $x$  não há ocorrência de anéis. Entretanto, os resultados para inclinação de 90 graus com relação ao eixo  $y$  podem gerar dados bem diferentes, conforme resultados obtidos nas simulações simAD-q12-v20-yrot90 e simAE-q12-v20-yrot90 quando comparados com os modelos simAD-q12-v20 e simAE-q12-v20, respectivamente. Nestes casos, os modelos originais apresentaram formação de estruturas aneladas, enquanto os novos não. Algo inverso pode ocorrer com os modelos com  $q = 20$  kpc. De acordo com Bournaud e Combes (2003), é possível uma PRG se formar pelo cenário de acréscimo com a galáxia hospedeira na posição como está a hospedeira na Figura 5.14.

Sobre os dados de consumo computacional das simulações, o uso dos nodos com 20 *cores* se mostrou muito mais vantajoso. O aumento de *cores* não representa necessariamente diminuição linear de tempo de execução de processos, pois o tempo de comunicação entre cores internos em um mesmo nodo deve ser considerado. Porém, neste caso, o aumento de 12 para 20 *cores* internos em um mesmo nodo foi interessante.

Entretanto, nem sempre o aumento gradativo de quantidade de *cores*, quando se trata de nodos distintos usados em paralelo pelo mesmo processo, leva a uma diminuição do tempo de execução, pois o tempo de comunicação entre os nodos (que é mais lenta do que a comunicação entre *cores* em um mesmo nodo) deve ser levado em consideração. As novas simulações previstas serão executadas entre combinações de nodos distintos. Desta forma, a comunicação entre nodos (tanto somente entre os nodos novos quanto somente entre os nodos velhos, assim como entre nodos velhos e novos) poderá ser testada.

É importante mencionar que tais simulações foram todas feitas utilizando a compilação do programa GADGET-2 para uso de N-corpos com esquema árvore hierárquica TreeCode e SPH (como descrito no Capítulo 4). Tempos de execução diferentes dos apresentados na Tabela 5.3 podem ser obtidos com a compilação do programa utilizando o esquema *Particle Mesh*, que faz as integrações de forma diferente. Testes com este esquema serão feitos em algumas novas simulações, de forma que os tempos de execução com os dois esquemas possam ser comparados. Desta forma, uma tabela combinando os tempos demandados com cada compilação e quantidades de *cores* e nodos utilizados poderá ser feita, objetivando fornecer dados estatísticos que permitam otimizar ainda mais os tempos de processamento de futuras simulações.



## CAPÍTULO 6

### Conclusões

Neste trabalho foram realizadas várias simulações numéricas utilizando o Hiper-cubo, *cluster* HPC do IP&D-UNIVAP. Esta dissertação é o primeiro trabalho feito por um aluno do programa de pós-graduação em Física e Astronomia que utiliza massivamente o Hiper-cubo. Portanto, os dados de tempo de execução apresentados no Capítulo 5 são úteis para futuras simulações de N-corpos, auxiliando na otimização do uso dos processadores por pesquisadores e alunos do programa.

Apesar de as simulações executadas não terem resultado na formação de anéis polares robustos, o espaço de parâmetros para o cenário de acréscimo foi restringido, facilitando a construção de novos modelos de condições iniciais para futuras simulações.

Pelo cenário de acréscimo, para a hospedeira inclinada de 90 graus com relação ao eixo  $x$ , a formação de PRGs por interação de galáxias de massas próximas parece ser menos provável, dado o baixo resultado de anéis em modelos AA e AB (ver Tabela 5.2): destes, somente o modelo AB com distância de pericentro igual a 20 kpc apresentou resultados consideráveis, o que leva a crer que talvez seja possível encontrar formação de PRGs com esta geometria e razão de massa somente se a distância de pericentro for um pouco maior. A tendência parece ser, para esta geometria das condições iniciais, que anéis polares se formem pelo cenário de acréscimo quando a doadora possui massa inferior a 50% da massa da hospedeira, e a distância de pericentro da órbita da doadora com relação à hospedeira seja inferior a 20 kpc.

Como muitas PRGs observadas têm a galáxia hospedeira sendo do tipo  $S0$ , novas simulações com a hospedeira com pouco gás (ou até sem gás) estão sendo feitas, abaixando a fração de massa de gás do modelo A e re-executando as simulações que resultaram em anéis, mesmo sendo fracos.

Poucas simulações com posição inicial da hospedeira diferente da descrita acima foram discutidas neste trabalho. Entretanto, elas estão sendo feitas, e os resultados serão apresentados na defesa desta dissertação, que por fim acabará por conter ainda mais dados.

Simulações para os modelos de galáxias apresentados no Capítulo 5 montados com geometria propícia à formação de PRGs pelo cenário de fusão serão feitos, apesar de, como visto no Capítulo 3, este cenário ser menos provável para formação de PRGs do que o cenário de acréscimo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARNES, J. **Galaxies**. 2009.  
[http://www.ifa.hawaii.edu/~barnes/ast626\\_s09/ast626.html](http://www.ifa.hawaii.edu/~barnes/ast626_s09/ast626.html). Acessado em 10/06/2014. 21
- BARNES, J.; HUT, P. A hierarchical  $\mathcal{O}(n \log n)$  force-calculation algorithm. Nature Publishing Group, 1986. 39
- BEGHETTO, D.; RODRIGUES, I. Códigos para preparação de condições iniciais em simulações de colisões de galáxias. **XV INIC - Encontro Latino Americano de Iniciação Científica**, 2011.
- BEKKI, K. Formation of polar ring s0 galaxies in dissipative galaxy mergers. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 490, n. 1, p. L37, 1997. 31
- \_\_\_\_\_. Formation of a polar ring galaxy in a galaxy merger. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 499, n. 2, p. 635, 1998. 31
- BINNEY, J.; TREMAINE, S. **Galactic Dynamics**. [S.l.]: Princeton university press, 2008. 15, 21, 22, 23, 24, 25, 37
- BOURNAUD, F.; COMBES, F. Formation of polar ring galaxies. **arXiv preprint astro-ph/0301391**, 2003. 15, 28, 30, 32, 33, 34, 45, 49, 58
- COMBES, F. Polar ring galaxies and warps. **EAS Publications Series**, Cambridge Univ Press, v. 20, p. 97–104, 2006. 31, 32
- \_\_\_\_\_. Polar rings and the 3d-shape of dark matter. **arXiv preprint arXiv:1312.6475**, 2013. 32
- COMBES, F.; ARNABOLDI, M. The dark halo of polar-ring galaxy ngc 4650a: flattened towards the polar ring? **Astronomy and Astrophysics**, v. 305, p. 763, 1996. 32
- CONTOPOULOS, G.; EFTHYMIPOULOS, C. Galactic dynamics. **Scholarpedia**, v. 6, n. 5, p. 10670, 2011. 21
- DRIEL, W. V.; ARNABOLDI, M.; COMBES, F.; SPARKE, L. A neutral hydrogen survey of polar ring galaxies. iii. nançay observations and comparison with published data. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 141, p. 385–408, 2000. 28
- DRIEL, W. V.; COMBES, F.; CASOLI, F. e. . a.; GERIN, M.; NAKAI, N.; MIYAJI, T.; HAMABE, M.; SOFUE, Y.; ICHIKAWA, T.; YOSHIDA, S. *et al.* Polar ring spiral galaxy ngc 660. **The Astronomical Journal**, v. 109, p. 942–959, 1995. 28, 29

- FAÚNDEZ-ABANS, M.; OLIVEIRA-ABANS, M. de. On the morphology of peculiar ring galaxies. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 129, p. 357–361, 1998. [29](#)
- FINKELMAN, I.; SJ, J. G. F.; BROSCHE, N. Polar ring galaxies in the galaxy zoo. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 422, n. 3, p. 2386–2398, 2012. [27](#)
- FREITAS-LEMES, P. **Espectroscopia e imageamento da galáxia com anel polar AM2020-504**. Disserta[U+FFFFD] (Mestrado) — Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento - Universidade do Vale do Paraíba, 2010. [29](#)
- GINGOLD, R. A.; MONAGHAN, J. J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. **Monthly notices of the royal astronomical society**, Oxford University Press, v. 181, n. 3, p. 375–389, 1977. [36](#), [41](#)
- HERNQUIST, L.; KATZ, N. Treesph—a unification of sph with the hierarchical tree method. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 70, p. 419–446, 1989. [36](#), [39](#), [40](#)
- IODICE, E. **Formation scenarios for Polar Ring Galaxies**. Tese (Doutorado) — SISSA - Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati, 2001. [28](#)
- IODICE, E.; ARNABOLDI, M.; BOURNAUD, F.; COMBES, F.; SPARKE, L.; DRIEL, W. V.; CAPACCIOLI, M. Polar ring galaxies and the tully-fisher relation: Implications for the dark halo shape. **The Astrophysical Journal**, IOP Publishing, v. 585, n. 2, p. 730, 2003. [32](#)
- IODICE, E.; ARNABOLDI, M.; LUCIA, G. D.; III, J. G.; SPARKE, L.; FREEMAN, K. The puzzle of the polar structure in ngc 4650a. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 123, n. 1, p. 195, 2002. [28](#)
- IODICE, E.; ARNABOLDI, M.; SPARKE, L.; GALLAGHER, J.; FREEMAN, K. Near-infrared photometry in the j, h and kn bands for polar ring galaxies: I. data, structural parameters. **arXiv preprint astro-ph/0206055**, 2002. [28](#)
- KATZ, N.; WEINBERG, D. H.; HERNQUIST, L. Cosmological simulations with treesph. **arXiv preprint astro-ph/9509107**, 1995. [36](#)
- KEPLER, K. d. S. O. F.; SARAIVA, M. d. F. O. **Astronomia e astrofísica**. [S.l.]: Ed. Universidade/UFRGS, 2004. [19](#)
- KEREŠ, D.; KATZ, N.; WEINBERG, D. H.; DAVÉ, R. How do galaxies get their gas? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 363, n. 1, p. 2–28, 2005. [31](#)

KHOPERSKOV, S.; MOISEEV, A.; KHOPERSKOV, A.; SABUROVA, A. To be or not to be oblate: the shape of the dark matter halo in the polar ring galaxies. **ArXiv e-prints**, abr. 2014. 28

LAMBERT, J. Glnemo2: An interactive 3d visualization program for n-body data. In: **Astronomical Data Analysis Software and Systems XXI**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 461, p. 897. 44

\_\_\_\_\_. Unsio: Universal nbody snapshot input output. In: **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**. [S.l.: s.n.], 2014. v. 485, p. 429. 44

LANDAU, L.; LIFSHITZ, E. **Fluid Mechanics**. [S.l.]: Pergamon Press, 1959. 40

LIMA-NETO, G. **Introdução à Dinâmica Estelar**. 2001.

<http://www.if.ufrgs.br/~fausti/gastao.pdf>. Acessado em 10/02/2014. 15, 22, 23, 24

LUCY, L. B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. **The astronomical journal**, v. 82, p. 1013–1024, 1977. 36

MACCIÒ, A. V.; MOORE, B.; STADEL, J. The origin of polar ring galaxies: evidence for galaxy formation by cold accretion. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 636, n. 1, p. L25, 2006. 27, 30, 31

MURDIN, P. Encyclopedia of astronomy and astrophysics. **Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics**, v. 1, 2002. 37

NAAB, T. **N-body Simulations and Galaxy Formation**. 2006. [http://www.usm.uni-muenchen.de/people/puls/lessons/numpraktnew/nbody/nbody\\_manual.pdf](http://www.usm.uni-muenchen.de/people/puls/lessons/numpraktnew/nbody/nbody_manual.pdf). Acessado em 10/02/2014. 19, 23, 38

POWER, C. **The Collisionless Boltzmann Equation**. 1999. <http://www.cv.nrao.edu/~jhibbard/students/CPower/dynamics/cbe/cbe.html>. Acessado em 10/02/2014. 22, 36, 38

RESHETNIKOV, V.; BOURNAUD, F.; COMBES, F.; FAÚNDEZ-ABANS, M.; OLIVEIRA-ABANS, M. de. Am 1934-563: a giant spiral polar-ring galaxy in a triplet. **arXiv preprint astro-ph/0509738**, 2005. 27, 31

RESHETNIKOV, V.; SOTNIKOVA, N. Global structure and formation of polar-ring galaxies. **arXiv preprint astro-ph/9704047**, 1997. 31

RODRIGUES, I. **Interação de Sistemas Estelares**. Tese (Doutorado) — Instituto de Física - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 19, 38, 39, 40

SACKETT, P. D.; RIX, H.-W.; JARVIS, B. J.; FREEMAN, K. C. The flattened dark halo of polar ring galaxy ngc 4650a: A conspiracy of shapes? **arXiv preprint astro-ph/9406015**, 1994. 32

SCHWEIZER, F.; WHITMORE, B.; RUBIN, V. Colliding and merging galaxies. ii-s0 galaxies with polar rings. **The Astronomical Journal**, v. 88, p. 909–925, 1983. 31

SPRINGEL, V. **On the Formation and Evolution of Galaxies**. Tese (Doutorado) — Ludwig-Maximilians-Universität München, 1999. 38

SPRINGEL, V. The cosmological simulation code gadget-2. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 364, n. 4, p. 1105–1134, 2005. 15, 20, 35, 41, 42, 43

SPRINGEL, V.; YOSHIDA, N.; WHITE, S. D. Gadget: a code for collisionless and gasdynamical cosmological simulations. **New Astronomy**, Elsevier, v. 6, n. 2, p. 79–117, 2001. 35

TRENTI, M.; HUT, P. N-body simulations (gravitational). v. 3, n. 5, p. 3930, 2008. revision 91544. 19

WARREN, M. S.; SALMON, J. K. A parallel hashed oct-tree n-body algorithm. In: **ACM. Proceedings of the 1993 ACM/IEEE conference on Supercomputing**. [S.l.], 1993. p. 12–21. 41

\_\_\_\_\_. A portable parallel particle program. **Computer Physics Communications**, Elsevier, v. 87, n. 1, p. 266–290, 1995. 41

WHITMORE, B. C.; LUCAS, R. A.; MCELROY, D. B.; STEIMAN-CAMERON, T. Y.; SACKETT, P. D.; OLLING, R. P. New observations and a photographic atlas of polar-ring galaxies. **The Astronomical Journal**, v. 100, p. 1489–1522, 1990. 15, 27, 28, 30

WHITMORE, B. C.; MCELROY, D. B.; SCHWEIZER, F. The shape of the dark halo in polar-ring galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 314, p. 439–456, 1987. 32