

# Análise de simulações dinâmicas de aglomerados de galáxias em fusão

Pedro Henrique Rocha de Andrade<sup>a</sup>, Ana Cecilia Soja (orientadora)<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto Federal Fluminense - Campus Bom Jesus do Itabapoana - RJ

Março de 2023

## RESUMO

Colisões de aglomerados de galáxias são eventos extremos do Universo cujo estudo, entre outros fatores, permite a compreensão da natureza da matéria escura a partir de seu comportamento durante a colisão. Dada a impossibilidade de observação direta de parâmetros como velocidade relativa dos componentes e evolução ao longo do tempo, uma das estratégias utilizadas para o estudo deste tipo de fenômeno é a análise de simulações dinâmicas. Este projeto se propõe a avaliar a acurácia de uma dessas simulações no tocante à diferenciação entre as diversas passagens temporais dos objetos em interação pelo centro da colisão. Para tanto, foram utilizados dados públicos e conhecimentos de programação. Os resultados indicaram boa eficiência da análise dinâmica, porém com a tendência de devolver valores sistematicamente inferiores aos corretos, o que precisa ser analisado mais profundamente. A metodologia utilizada se mostrou viável para este tipo de análise e deve ser expandida para simulações de diferentes cenários de colisões.

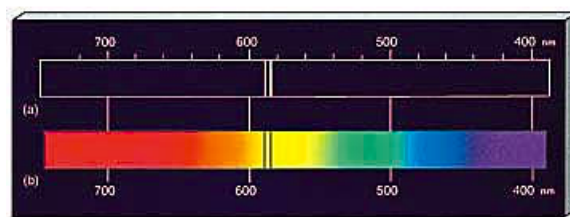
## 1. Introdução

O Universo e seus mistérios fascina a Humanidade desde o início dos tempos. Perguntas como: de onde viemos? para onde vamos? o Universo teve um começo? o Universo terá um fim? existem outros mundos como o nosso ou somos únicos no Cosmos? guiaram gerações de cientistas e seguem sem respostas definitivas.

Apesar disso, séculos de observação e análises cuidadosas nos proporcionaram muitas descobertas. Hoje sabemos, por exemplo, do que as estrelas são feitas e os processos físicos que permitem que elas brilhem (as fusões nucleares no seu interior).

A principal ferramenta para esses estudos é a luz [6]. Ela nos permite entender os objetos celestes a fundo, pois carrega muitas informações. Uma das propriedades mais importantes da luz é que ela viaja a velocidade constante de aproximadamente 300 000 km/s. A partir dessa informação definimos a grandeza anos-luz (AL), que é a distância que a luz percorre em um ano ( $9.46 \times 10^{12} km$ )<sup>1</sup> e um valor de referência para as demais distâncias. Uma consequência desse conceito é que ao olharmos o céu, necessariamente estamos observando fatos que aconteceram num tempo passado, visto que a informação leva tempo para chegar até nós. Quanto mais distante o objeto, mais tempo leva para a luz chegar até nós.

Outra informação que a luz carrega é sobre a natureza da fonte que a gerou. Isso é possível através da espectroscopia, técnica que separa um raio de luz em diferentes comprimentos de onda de acordo com a sua intensidade [5]. A Figura 1 traz como exemplo um espectro de absorção, ou seja, a luz emitida por uma fonte foi absorvida por átomos presentes no gás que estava no caminho entre ela e o observador. No caso do exemplo, as linhas pretas de absorção indicam a presença do elemento químico sódio (Na). É dessa maneira que espectros podem auxiliar na compreensão do que as estrelas são feitas, pois carregam essas "assinaturas" da interação da luz com os elementos químicos presentes no caminho.



**Figura 1:** Exemplo de espectro de absorção. Fonte: [5].

Os espectros também nos ajudam a entender a distância dos objetos e a evolução do Universo em si. Movimentos relativos entre a fonte e o observador podem causar desvios na posição das linhas, o que é conhecido como Efeito Doppler. Se o desvio de uma linha espectral acontece para a direita

<sup>1</sup>Sabendo que em um ano tem  $3.15 \times 10^7$  segundos e que a velocidade da luz é  $3 \times 10^5 km/s$  calcula-se a distância que a luz viaja no vácuo.

(aumentando o comprimento de onda) chamamos esse efeito de *redshift* e isso significa que o objeto está se afastando de nós. O *blueshift* é o inverso, ou seja, o desvio espectral da luz para a esquerda, diminuindo o comprimento de onda, o que significa que o objeto está se aproximando. Para simbolizar o desvio usamos a letra **z** e a partir da variação do comprimento de onda pelo comprimento de onda emitido temos o valor percentual de **z**.

O estudo do *redshift* ganhou importância graças ao trabalho do famoso astrônomo americano Edwin Hubble (1889 – 1953), que ao analisar espectros de galáxias distantes descobriu que quanto mais distantes, mais rapidamente elas se afastavam de nós. Isso indica que o Universo está se expandindo, o que nos faz chegar próximo de uma primeira resposta a uma das perguntas fundamentais (de onde viemos?): como o Universo está se expandindo, é possível que tudo já esteve próximo um dia, tendo começado numa grande explosão.

O exposto acima apresenta de forma resumida um pouco do conhecimento que é possível construir a partir da análise da luz que captamos das estrelas. No entanto, o Universo não é feito apenas de objetos luminosos como estrelas (ou galáxias, que são feitas de estrelas). Na verdade, boa parte do Universo (25%) é feito de uma matéria diferente daquela que nos cerca no dia a dia: a matéria escura [4]. A matéria escura seria uma matéria diferente da que conhecemos justamente por não emitir luz. Sua única interação ocorre através da força da gravidade e ela só pode ser notada em grandes escalas (como galáxias e aglomerados de galáxias).

Desde as primeiras hipóteses de sua existência, na década de 1930, até os dias de hoje, astrônomos têm desenvolvido ferramentas e alternativas para entender o que é a matéria escura, do que é feita e sua relevância para o Universo. Como não é possível recolher uma amostra desta matéria, nem observá-la diretamente (já que é escura e não emite nenhum tipo de luz) ou mesmo fabricá-la na Terra, as possibilidades de estudo se resumem a analisar sua interação com outros objetos.

Um dos campos mais promissores nesse sentido é o estudo de aglomerados de galáxias em colisão. Esses eventos são interessantes porque os aglomerados de galáxias são estruturas muito grandes (as maiores do Universo, com massas bilhões e bilhões de vezes maiores que a massa do Sol), onde a matéria normal e a matéria escura têm relevância parecida. Quando eles se chocam, em eventos que são conhecidos como os mais energéticos do Universo, essas componentes se separam, cada uma interagindo de uma forma. Ao analisar como a matéria escura se comporta, é possível desenvolver hipóteses sobre sua natureza. Um exemplo de colisão de aglomerado de galáxias é o Aglomerado da

Bala (Figura 2), que recebe esse nome por parecer com um tiro. Na imagem, é possível ver em cores diferentes como se comportam de maneiras diversas as componentes do aglomerado: as galáxias, feitas de matéria normal, se atravessam mais fácil que o gás (também feito de matéria normal), enquanto a matéria escura parece seguir o comportamento das galáxias, mas não exatamente, dando a entender que fenômenos físicos ainda não conhecidos podem estar acontecendo ali.



**Figura 2:** Imagem do Aglomerado da Bala, dois aglomerados que já colidiram. A matéria escura é representada com mancha azul, enquanto o gás é representado com a cor vermelha. Na imagem, vemos que cada componente (gás, galáxias e matéria escura) parece se comportar de forma diferente. Fonte: [9]

Dado o contexto, o objetivo principal deste trabalho é contribuir para o estudo da matéria escura utilizando aglomerados de galáxias. O projeto faz parte do programa de pré- iniciação científica do CNPq, tendo sido contemplado com bolsa de Iniciação Científica Júnior no *Edital 94/2022 – Processo de Seleção de Projetos de Pesquisa e de Estudantes Bolsistas de Iniciação Científica (PIBIC – CNPq) e de Iniciação Científica Júnior (ICJ – CNPq)* do Instituto Federal Fluminense. Assim, o objetivo secundário do trabalho é propiciar, através do estudo da Astronomia, um ambiente de desenvolvimento científico do jovem pesquisador, aplicando de forma prática conhecimentos que ele adquiriu ao longo de sua formação técnica.

## 2. Metodologia

Atualmente, o trabalho científico é muito especializado, sendo normalmente feito por grandes grupos de pesquisa onde cada membro é responsável por uma parte do estudo, na qual se aprofunda mais que os outros.

Inserido nesse contexto de colaboração, palavra chave do desenvolvimento da Astronomia de grandes observações, esse trabalho tem como foco a análise de apenas um parâmetro importante para

o estudo de aglomerados de galáxias em colisão: o tempo decorrido entre a colisão e a observação atual do objeto. Esse parâmetro é de especial importância pois ajuda a entender em que momento da colisão os aglomerados se encontram (estão indo colidir? já colidiram e vão colidir novamente?); assim, ter certeza da precisão de sua determinação é imprescindível para o estudo dos componentes dos aglomerados em geral.

Um dos métodos mais utilizados para a medida do tempo da colisão é o desenvolvido por Dawson et. al 2013 [2]. Nele é utilizado o método estatístico de Monte Carlo para estimar a idade a partir de parâmetros observacionais relativamente simples de se obter (massas relativas, *redshift* e separação projetada). O código utilizado foi escrito na linguagem de programação Python e está disponível para uso público <sup>2</sup>.

Assim, para cumprir o objetivo de contribuir para a ciência de aglomerados de galáxias em fusão, nos propomos a analisar a acurácia da medida do tempo de colisão pelo método de Dawson [2]. Para isso, utilizamos seu código em situações controle de forma a verificar sua eficiência.

Como não é possível fazer experimentos reais que reproduzam o que está acontecendo no espaço, uma alternativa é o uso de simulações computacionais para o estudo de fenômenos astronômicos. Essas simulações "criam" universos artificiais, onde todos os parâmetros são bem conhecidos. Assim mesmo, ao estudar os dados oriundos desse universo "fake" podemos verificar se nossa análise está correta.

A simulação escolhida para este trabalho foi a de ZuHone et al. 2017 [10]. Ela é interessante por possuir alta resolução e nove grupos de amostras diferentes. As amostras são divididas de acordo com a razão entre as massas dos aglomerados envolvidos na colisão e o parâmetro de impacto, que quantifica a distância entre os centros dos aglomerados. Para as razões de massa há três possibilidades: 1:1 (os aglomerados têm a mesma massa), 1:3 (um dos aglomerados tem três vezes mais massa do que outro e 1:10 (um dos aglomerados tem dez vezes mais massa do que o outro). Já o parâmetro de impacto é dividido entre 0, 500 e 1000 kpc <sup>3</sup>. A combinação entre eles dá origem aos nove subgrupos. Neste trabalho, optamos por analisar a princípio apenas as simulações que definiam um parâmetro de impacto de 0kpc, indicando que a colisão aconteceu no plano do céu.

<sup>2</sup>O código em questão está disponível no endereço: <https://github.com/MCTwo/MCMAC>.

<sup>3</sup>kpc é uma medida de distância equivalente a 1000 pc. O *parsec* é definido como tendo uma paralaxe de 1 segundo de arco, o que equivale a 3.26 anos luz.

Assim, o trabalho consiste em aplicar o código de Dawson [2] nos dados simulados de ZuHone [10], verificando a correspondência entre eles. Para uma melhor organização, separamos as etapas necessárias para a conclusão do trabalho, apresentadas a seguir:

1. familiarização com o problema e com conceitos de Astronomia;
2. compilação e entendimento do método e do código de Dawson;
3. obtenção e entedimento dos dados de ZuHone;
4. aplicação do método de Dawson para cada uma das simulações disponíveis e análise dos resultados.

Os resultados obtidos são apresentados em mais detalhes na próxima seção.

### 3. Resultados

#### 3.1. Etapa 1:familiarização com o problema e com conceitos de Astronomia

Esta primeira etapa foi fundamental para o cumprimento do objetivo secundário do trabalho, ou seja, a iniciação científica através da pesquisa básica em Astronomia.

O estudo começou a partir de material de divulgação em Astronomia, como o livro "*À Luz das Estrelas*

[6]. Esse material é voltado para o público geral, e através de uma linguagem fácil, introduz conceitos que são fundamentais para a pesquisa científica sobre o Universo. Neste estudo, seguiu-se a ordem pedagógica proposta pelo livro, do mais próximo (Sistema Solar) até o mais o distante (galáxias).

O primeiro aprendizado se deu sobre o conceito de paralaxe, que é um método trigonométrico antigo para a determinação de distância. Em resumo, paralaxe é a mudança aparente na posição de um objeto em relação a um observador em diferentes posições. Existem dois tipos de Paralaxe: geocêntrica e heliocêntrica. A paralaxe geocêntrica (Diurna) é utilizada para medir distâncias a partir da observação do objeto em deslocamento de dois pontos da Terra; é um método antigo, utilizando triangulação. Utiliza o diâmetro da Terra como base para fazer os cálculos. Já a paralaxe heliocêntrica (Anual) é utilizada para medir distância de estrelas, feita em dois momentos, em um intervalo de 6 meses, devido ao movimento de translação da Terra ao redor do Sol. Esse conhecimento é fundamental porque é a primeira forma de medida de distância e nela são baseadas todas as outras (como anos-luz e *parsec*).

O próximo passo foi entender um pouco mais a respeito de estrelas. As estrelas são formadas nas

galáxias a partir da poeira que nelas ficam. Formadas a partir de nuvem de gás, elas se tornam protoestrelas, onde começam fundir Hidrogênio em Hélio em seu núcleo, realizando o fenômeno conhecido como nucleossíntese. Em sua formação, elas têm uma determinada quantidade de Hidrogênio no núcleo que será queimada até o fim do ciclo de sua vida. Durante seu ciclo de vida, seu núcleo estará ativo e realizando fusão nuclear constantemente.

Quando a estrela está transformando Hidrogênio em Hélio no seu núcleo, dizemos que ela está na Sequência principal. Nela, temos as estrelas do tipo Amarelas e Azuis; as amarelas, são estrelas com massa inferior a  $10 M_{\odot}$ <sup>4</sup> e as azuis com massa superior a  $10 M_{\odot}$ . A massa da estrela define como será sua evolução. As menores (amarelas), tendem a evoluir para Gigante Vermelha, como por exemplo o Sol, posteriormente ela implode em uma Nebulosa Planetária, por fim chegando se tornar uma Anã Branca. Já as azuis são maiores e conhecidas como gigantes. Elas evoluem para Supergigante Vermelha e, com o tempo, o núcleo vai queimando diversos elementos químicos até que não consegue queimar o Ferro; a estrela explode em uma supernova, um dos eventos mais energéticos que conhecemos atualmente. Dependendo da massa restante do núcleo de Ferro após sua explosão, ela pode se tornar uma Estrela de Neutrons ou um Buraco Negro.

Estrelas podem ser classificadas em classes, de acordo com o espectro de luz decomposto. A classificação pode ser em 7 classes diferentes, representadas pelas letras **OBAFGKM**, onde **O** são quentes e **M** são frias<sup>5</sup>. Cada uma das letras é dividida conforme a seguir:

- O – Azuis
- B – Branco Azuladas
- A – Brancas
- F – Branco-Amareladas
- G – Amarelas (Sol)
- K – Alaranjadas
- M – Vermelhas

No final do ciclo de sua vida, as estrelas podem se tornar uma das três opções, de acordo com sua massa:

- Anãs Brancas: É o resultado após a estrela se tornar uma nebulosa planetária.
- Estrela de Nêutrons: quando o núcleo (Fe) após a explosão da Supernova é entre 2 e 3 massas solares.
- Buraco Negro: quando o núcleo (Fe) após a explosão da Supernova é maior que 3 massas solares.

Entendido o processo de evolução e classificação das estrelas, bem como os parâmetros mais importantes (cor e massa), passou-se ao estudo das galáxias. Para isso, foi utilizado um material didático mais avançado, o livro "Astronomia e Astrofísica" [8], que é voltado para estudantes de graduação em Astronomia. Isso foi possível graças à familiarização com o tema proporcionado pelo primeiro estudo.

Galáxias são objetos celestes enormes, gravitacionalmente ligados, formados basicamente por estrelas, matéria na forma de gás e poeira, e um componente ainda não bem compreendido, a matéria escura. Edwin Hubble em seus estudos sobre galáxias definiu uma sequência de galáxias, dividindo-as em três grupos principais:

- Elípticas (E): Possuem uma forma esférica ou em forma de elipse. Formada principalmente por estrelas idosas e nascem de forma acelerada, elas são classificadas de acordo com o grau de achatamento, dada pela Hubble. Possuem menos gás e menos poeira, portanto a formação de novas estrelas é raro de acontecer.
- Espirais (S): As galáxias espirais podem ser definidas com: núcleo, disco, halo, e braço (que dão origem aos braços). Utiliza-se a letra **S** para classificar, do inglês Spiral. São divididas em 3 classes, sendo elas Sa (núcleo grande, braço pequeno), Sb (intermediário) e Sc (núcleo pequeno, braço grande). Também podem apresentar barras (SBa, SBb e SBc). A nossa Galáxias (Via Láctea) e Andrômeda (galáxia mais próxima de nós) são exemplos de galáxias espirais.
- Irregulares (I): não possuem estrutura definida e, por possuir muito gás em sua formação, possui muitas estrelas jovens em formação. Exemplos visíveis são as Nuvens de Magalhães.

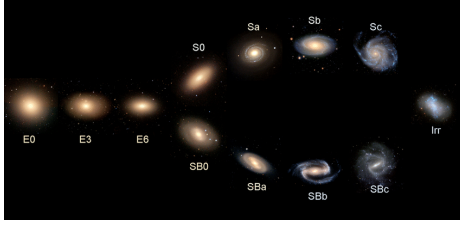
A Figura 3 exemplifica a classificação das galáxias elaborada por Hubble e utilizada até os dias de hoje.

Por fim, tendo-se entendido o que são estrelas e galáxias, partiu-se para a compreensão do que são aglomerados de galáxias (um exemplo deste

<sup>4</sup> $M_{\odot}$  é o símbolo utilizado para definir uma massa solar, que é a massa do Sol (aproximadamente  $2 \times 10^{30} kg$ ).

<sup>5</sup>Os termos "frio" e "quente" são utilizados aqui em relação às estrelas e não ao conceito comum de temperatura. Assim, uma estrela fria tem em torno de 3000K e uma estrela quente, 10000K.





**Figura 3:** A Sequência de Hubble. À direita, temos as galáxias elípticas e à esquerda as espirais, divididas entre barradas (abaixo) e não barradas (acima). Fonte: [1]

tipo de objeto pode ser visto na Figura 4). Eles podem ser entendidos como as maiores estruturas gravitacionalmente ligadas do Universo [7], tendo em sua composição galáxias, gás intraglomerado e matéria escura. Como cada uma das componentes possui características diferentes, são utilizadas técnicas diversas para seu estudo. As galáxias são formadas por estrelas e emitem luz principalmente na região do visível. Então, para seu estudo, são utilizados principalmente telescópios ópticos e técnicas como espectroscopia. O gás emite principalmente no comprimento de ondas de raios-X, então são necessários telescópios espaciais, já que esse comprimento de onda não entra na Terra devido a sua atmosfera. E por fim, para estudar a matéria escura são utilizadas técnicas como lentes gravitacionais, que é o estudo da distorção da luz ao passar por objetos grandes (como aglomerados). Um exemplo da distorção causada pelo fenômeno de lentes gravitacionais pode ser vista na Figura 4.



**Figura 4:** Imagem do aglomerado de galáxias Abell 611, obtida pelo Telescópio Espacial Hubble. Na imagem, é possível ver a formação de arcos gravitacionais, que ocorrem devido à distorção sofrida pela luz ao passar pelo aglomerado. Fonte: [3]

### 3.2. Etapa 2: compilação e entendimento do método e do código de Dawson

Concluído os estudos dos conceitos fundamentais, a próxima etapa foi a análise do código dinâmico de Dawson [2]. Antes de compilar o código propriamente, foi necessário entender seu funcionamento. O primeiro passo foi instalar e testar as bibliotecas necessárias, mostradas na Figura 5. Essas bibliotecas são públicas e de fácil uso/instalação.

```
from __future__ import division
import numpy
import scipy.integrate
import pickle
import profiles
import time
import sys
import cosmo
```

**Figura 5:** Resumo das bibliotecas em Python necessárias para o uso do código de Dawson. Fonte: [2]

Em seguida, buscamos entender as constantes definidas pelo código (Figura 6). Ficou claro que são grandezas conhecidas da natureza, como por exemplo a constante da Gravitação Universal ( $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ ) escrita em unidades mais apropriadas para o contexto de aglomerados de galáxias (em função de Mpc, por exemplo), e transformações de unidades, como de **kg** para **Mpc** e graus para radianos.

```
# Constants and conversions
G = 4.3*10**(-9) #newton's constant in units of Mpc*(km/s)**2 / M_sun
c = 3e5 #speed of light km/s
sinDyr = 31556926.*10**9 # s in a Giga-year
kginMsun = 1.98892*10**30 # kg in a solar mass
kminMpc = 3.08568025*10**19 # km in a Megaparsec
minMpc = 3.08568025*10**22 # m in a Megaparsec
r2d = 180/numpy.pi # radians to degrees conversion factor
```

**Figura 6:** Resumo das constantes necessárias para o uso do código de Dawson. Fonte: [2]

O código possui diversas funções, que vão devolvendo as informações de interesse a partir dos parâmetros de entrada. Primeiramente, o código foi testado usando os dados do *Bullet Cluster* disponíveis em [2], no caso, massas de  $1.5 \times 10^{14} M_{\text{solar}}$  e  $1.5 \times 10^{15} M_{\text{solar}}$  e distância projetada de 720 kpc. O resultado para o tempo foi compatível com o do trabalho original, mostrando que a compilação estava correta.

A função de interesse (MCEngine) possui diversos parâmetros. Os principais valores fornecidos na entrada do programa são "Nmc", que é o número de amostras desejadas do usuário; "M1" que é a massa do primeiro aglomerado e "M2" do segundo, ambas em unidades de massas solares; "Z" representa os *redshifts* de cada aglomerado e "dproj" é a distância

Razão de Massas	Instante da primeira colisão (Ganos)
1:1	1.32
1:3	1.20
1:10	1.04

**Tabela 1:** Relação dos instantes da primeira colisão identificados na amostra de [10] para cada uma das razões de massa apresentadas.

projetada, dada em Mpc. Essa função gera parâmetros aleatórios de acordo com o método estatístico de Monte Carlo e calcula a cinemática da fusão dos aglomerado.

Inicialmente, foram sendo feitos pequenos testes no programa com o número de amostras entre 1 e 100, utilizando para a execução 10.000 como número de amostras. Observou-se que a partir de 1000 interações já havia convergência dos resultados, sendo esse o valor selecionado para o uso do programa.

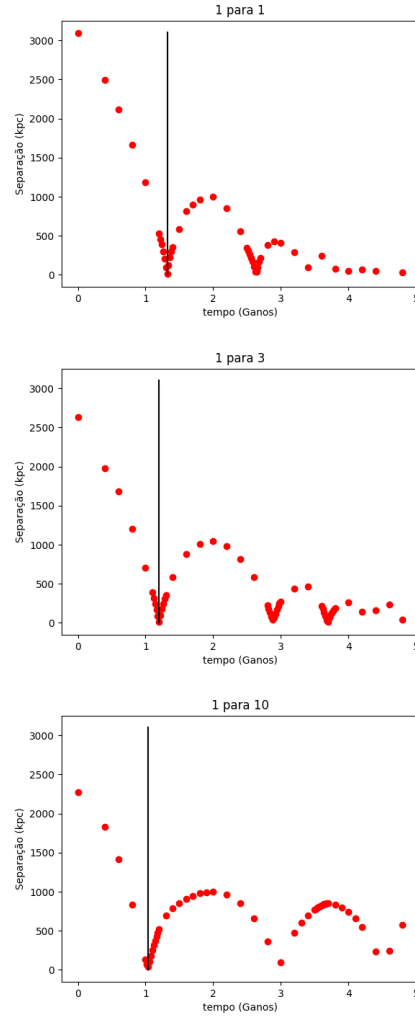
Assim, o próximo passo foi o entendimento dos dados do catálogo de [10] para que o código fosse nele utilizado.

### 3.3. Etapa 3: obtenção e entendimento dos dados de ZuHone

Os dados da simulação de ZuHone estavam separados de acordo com os parâmetros de entrada já discutidos na Seção 2. Como cada arquivo contém muitas informações, optou-se por baixar um para testar a metodologia. O escolhido foi de razão de massa 1:1 e parâmetro de impacto 0kpc, cujo tamanho em disco era de 10Gb.

Cada set de simulação contém arquivos (tabelas) com os diversos parâmetros simulados.

Assim, o desafio foi realizar a leitura de cada um dos arquivos de interesse e organizar seus dados em tabelas que pudessem ser analisadas pelo catálogo, ou seja, que relacionassem os parâmetros ao tempo. Isso foi feito para o primeiro catálogo da seleção com sucesso, sendo aplicado aos demais. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 7, onde se vê o padrão de colisão simulado. A simulação se inicia quando há o máximo afastamento entre os aglomerados até o momento de mínimo afastamento (indicado pela linha vertical preta nos gráficos). Em seguida há um novo afastamento máximo, dessa vez menor que o primeiro por conta da perda de energia na colisão, seguida de uma nova aproximação, e assim por diante. Os valores dos instantes de colisão são mostrados na Tabela 1.

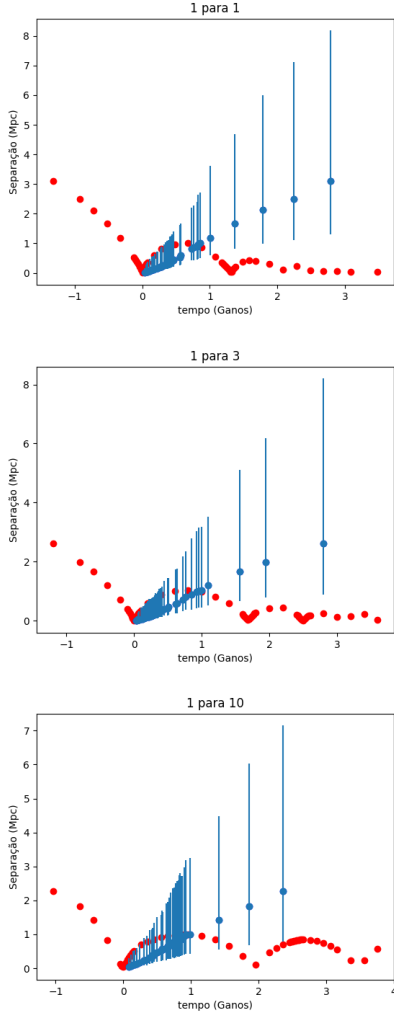


**Figura 7:** Gráfico da distância(Mpc) em função do tempo(Giganos), a linha preta representa aproximadamente o momento da primeira colisão entre os aglomerados de galáxias. Fonte: [10]

### 3.4. Etapa 4: aplicação do método de Dawson para cada uma das simulações disponíveis

Com os catálogos prontos, o passo final foi aplicar o código em cada um dos cenários propostos. Isso significa que para cada um dos pontos mostrados na Figura 7, o código apresenta um resultado possível para o tempo após a colisão, obtido a partir de 1000 iterações de Monte Carlo. O erro para o valor foi estimado a partir da função np.quantile. Os resultados para cada um dos aglomerados são mostrados na figura 8

Para uma melhor interpretação dos resultados, optou-se por destacar a região de maior interesse, no caso, entre a primeira colisão e o subsequente máximo afastamento. Registra-se que depois desse máximo afastamento, o código de [2] não é mais aplicável, visto que seu propósito é determinar o tempo decorrido após a primeira colisão. Os resul-



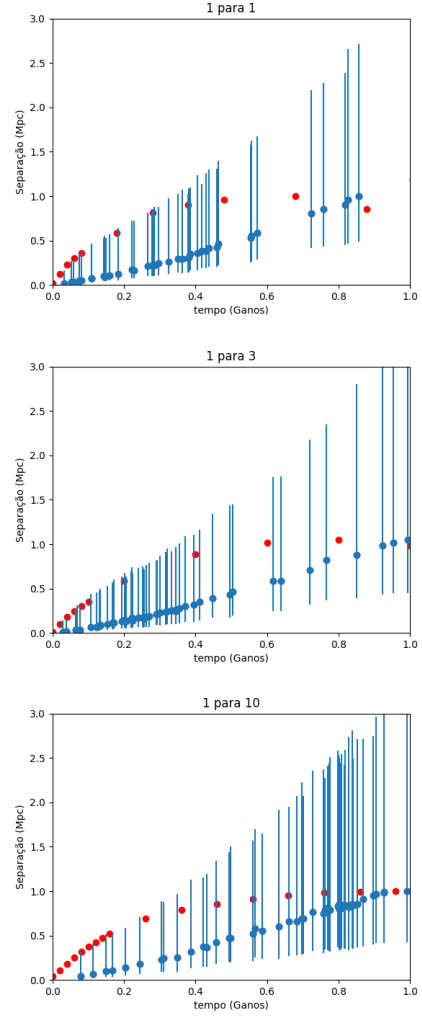
**Figura 8:** Gráfico comparativo entre dados da simulação (ZuHone) e código analítico (Dawson) para cada intervalo de massas. Em azul, Dawson, é possível visualizar a margem de erro da separação (em Mpc) em relação ao vermelho, ZuHone, que é a simulação.

tados detalhados são mostrados na Figura 9.

Os resultados mostrados na Figura 9 mostram que dentro das incertezas o código de [2] está de acordo com a realidade simulada no intervalo a qual se propõe para todos os cenários analisados (razões de massa 1:1, 1:3 e 1:10). No entanto, há uma tendência de que os valores principais estejam sempre subestimados em relação aos dados simulados, situação que precisa analisada com mais profundidade.

#### 4. Considerações Finais

O objetivo principal da pesquisa - contribuir para o conhecimento da matéria escura através do estudo de aglomerados de galáxias em colisão - foi



**Figura 9:** Gráficos com destaque para o intervalo de maior interesse, entre o ponto mínimo e ponto máximo de afastamento dos aglomerados de galáxias. As barras azuis representam a margem de erro do tempo decorrido desde a colisão para os diferentes cenários.

concluído com êxito, tendo-se demonstrado que o método escolhido para a análise é viável.

Conclui-se que o código proposto por [2] tem boa confiabilidade dentro dos intervalos de erros para situações de intervalo entre a primeira colisão e o afastamento para diferentes razões de massa. No entanto, verificou-se uma tendência a apresentar dados sempre inferiores à realidade, o que necessita ser investigado com mais cuidado por trabalhos posteriores.

Dada a viabilidade do método, a perspectiva é aplicá-lo novamente para os outros conjuntos de dados da simulação de [10], no caso, com parâmetros de impacto inclinados em relação ao plano do céu.

Já o objetivo secundário - a formação de um jovem pesquisador, principal foco da modalidade de iniciação científica júnior do CNPq - foi concluído

plenamente, visto que o autor realizou uma pesquisa de natureza básica cumprindo todas as etapas de desenvolvimento de um trabalho científico. Destaca-se também o papel importante da Astronomia nesse processo, pois sua capacidade de fascinar as pessoas com suas perguntas fundamentais contribuiu motivando a realização deste trabalho.

## Referências

- <sup>1</sup>Y. Cui, Y. Xiang, K. Rong, R. Feris e L. Cao, «A spatial-color layout feature for representing galaxy images», em *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision* (2014), pp. 213–219, [10.1109/WACV.2014.6836098](https://doi.org/10.1109/WACV.2014.6836098).
- <sup>2</sup>W. A. Dawson, «THE DYNAMICS OF MERGING CLUSTERS: A MONTE CARLO SOLUTION APPLIED TO THE BULLET AND MUSKET BALL CLUSTERS», *The Astrophysical Journal* **772**, 131 (2013) [10.1088/0004-637X/772/2/131](https://doi.org/10.1088/0004-637X/772/2/131).
- <sup>3</sup>B. Downer, *Hubble celebrates the spooky season with Abell 611 — a cobweb of galaxies held together by a dark secret*, ESA, (2022) <https://esahubble.org/news/heic2213/> (acedido em 30/10/2022).
- <sup>4</sup>M. de Fátima Oliveira Saraiva, *O conteúdo do Universo*, UFRGS, (s.d) <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/ead/universo-atual.htm> (acedido em 02/08/2022).
- <sup>5</sup>IF–UFRGS, *Espectroscopia*, UFRGS, (s.d) <http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm> (acedido em 18/07/2022).
- <sup>6</sup>L. I. A. Prado, *À luz das Estrelas*, 1ed (DP A Editora LTDA, 2006), ISBN: 8574903051.
- <sup>7</sup>A. C. Soja, *O Aglomerado de Galáxias RXC J1504-0248*, 2011.
- <sup>8</sup>K. de Souza Oliveira, *Astronomia e Astrofísica*, 4ed (Livraria da Física, 2017), ISBN: 8578614852.
- <sup>9</sup>D. Vergano, *Astronomers Spy Bullet Galaxy Blasting Through Other Galaxies*, National Geographic, (2015) <https://www.nationalgeographic.com/adventure/article/150114-bullet-cluster-space-newton> (acedido em 02/08/2022).
- <sup>10</sup>J. Zuhone, K. Kowalik, E. Öhman, E. Lau e D. Nagai, «The Galaxy Cluster Merger Catalog: An Online Repository of Mock Observations from Simulated Galaxy Cluster Mergers», *The Astrophysical Journal Supplement Series* **234**, 4 (2018) [10.3847/1538-4365/aa99db](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aa99db).