

Projeto de Pesquisa

O Potencial de Matéria Escura e a Dinâmica do Gás em Galáxias Esferoidais Anãs

Gustavo Mota Macedo

Orientador: Dr. Gustavo A. Lanfranchi

Núcleo de Astrofísica

São Paulo, abril de 2024

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos	3
3	Fundamentação Teórica	4
4	Metodologia	7
4.1	Matéria Escura em Galáxias dSph	8
4.2	O código hidrodinâmico	9
5	Cronograma de execução	11
6	Anexo 1: link para currículo lattes do orientador	15
7	Anexo 2: parecer do orientador	15

RESUMO

Uma característica comum a todas as Galáxias Esferoidais Anãs clássicas, porém ainda não explicada satisfatoriamente, é a ausência total de gás neutro. A remoção do seu conteúdo gasoso poderia ter sido causada por mecanismos internos (*feedback* estelar ou de um buraco negro de massa intermediária), externos (pressão de arrasto, força de maré), ou ainda por uma combinação dos dois. Neste trabalho, será investigada a evolução do conteúdo gasoso de galáxias esferoidais anãs, levando em conta diferentes distribuições de matéria escura nesses sistemas, o *feedback* estelar e o *outflow* de um buraco negro de massa intermediária. Os efeitos das diferentes formulações propostas para o potencial de matéria escura na evolução dinâmica do conteúdo gasoso dessas galáxias serão analisados com a ajuda de códigos de simulações hidrodinâmicas. Inicialmente, serão analisadas as diferentes propostas existentes na literatura para o potencial do halo de matéria escura nas esferoidais anãs. Essas formulações serão, então, adotadas em um código tridimensional hidrodinâmico ajustado para a galáxia esferoidal Ursa Minor, que será simulada dentro de uma caixa computacional de lado duas vezes maior que o raio de maré da galáxia durante 3 Ganos. A partir dessas simulações, serão analisados, em função do tempo, o padrão da densidade, da temperatura, da pressão e da velocidade do gás da galáxia até seu raio de maré.

1 Introdução

As galáxias Esferoidais Anãs (dSph) do Grupo Local (LG) são sistemas relativamente simples, porém de evolução complexa. Elas não apresentam nenhuma estrutura marcante (núcleo, braços espirais, bojo, barras etc.), têm baixa massa (da ordem de $10^{5-7} M_{\odot}$ - aproximadamente 1 milhão de vez menor que a massa da nossa Galáxia), pequenos raios (~ 1 kpc comparados aos ~ 30 kpc da Via láctea), são pouco enriquecidas (~ 10 -100

vezes menos que o Sol) e contém, na sua maioria, populações estelares antigas (com idades superiores a 10 Ganos), mas com alguns sistemas apresentando também estrelas de idade intermediária (entre 10 e 3 Ganos) e estrelas novas (com idades ~ 1 Gano) (Mateo 98, Tolstoy, Hill & Tosi 2009, McConnachie 2012, Molero et al. 2021, Aguado et al. 2021). Entretanto, diversos estudos recentes indicam que a evolução dessa galáxias é bem mais complexa do que suas propriedades sugerem.

A formação estelar nas dSph, por exemplo, apresenta características diferentes de um sistema para outro. Enquanto galáxias como Ursa Minor e Draco formaram estrelas em um único episódio entre aproximadamente 9 e 13 Ganos atrás (Dolphin et al. 2005), Fornax e Carina, por outro lado, têm indícios de vários episódios de formação estelar ou até formação estelar contínua ocorrendo até épocas recentes (Hurley-Keller, Mateo & Nemec 1998, de Boer et al. 2012a, 2012b). Quais mecanismos seriam os responsáveis por essas diferenças ainda não se sabe. Por outro lado, uma característica comum e surpreendente dessa galáxias é a total ausência de gás neutro no seu meio interestelar. Greivich & Putman (2009) investigaram o ambiente e o conteúdo de HI (hidrogênio neutro) em todas as galáxias dSph do LG usando dados disponíveis do HIPASS (Barnes et al. 2001) e LAB (Kalberla et al. 2005) e não detectaram nenhum sinal de gás neutro em praticamente nenhuma das galáxias. Os autores não chegaram a uma conclusão definitiva sobre qual seria o principal mecanismo responsável pela remoção do gás interestelar dessas galáxias, embora mecanismos externos como pressão de arrasto e forças de maré tenham sido favorecidos (Emerick et al. 2016).

Por outro lado, processos físicos internos não devem ser desprezados. Vários estudos teóricos (Mac Low & Ferrara 1999, Grebel, Gallagher & Harbeck 2003, Fragile et al. 2003, Ruiz et al. 2013, Recchi 2014, Caproni et al. 2015, 2017) apontam que uma alta fração (acima de 90 %, dependendo das condições iniciais) do meio gasoso de uma galáxia dSph pode ser removido por ventos galácticos originados por explosões de supernovas

(SNe). Um outro mecanismo interno, ainda não explorado em estudos de galáxias anãs, é o *outflow* de um buraco negro de massa intermediária ($M \sim 10^4 M_\odot - 10^6 M_\odot$) no centro da galáxia. Em galáxias espirais, tanto trabalhos observacionais quanto teóricos procuram estimar a contribuição do *feedback* de um buraco negro central supermaciço (SMBH) ($M > 10^6 M_\odot$) para a remoção de gás da galáxia hospedeira (Aalto et al. 2012, Cicone et al. 2014, Genzel et al. 2014; Tombesi et al. 2015, Melioli & de Gouveia Dal Pino 2015). Enquanto observações indicam intensa perda de massa, Melioli & de Gouveia Dal Pino (2015) alegam que o jato sozinho não é capaz de causar perda intensa de gás, mas pode esporadicamente acelerar material que está saindo da galáxia. Em galáxias anãs é esperada a existência de um buraco negro de massa intermediária no seu centro (Maccarone et al. 2005, Lora et al. 2009, Nucita et al. 2013, Manni et al. 2015), que, assim, como no caso dos SMBH deve afetar o meio interestelar do sistema.

2 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são:

- 1) estudar as diferentes propostas para os **potenciais de matéria escura** em galáxias esferoidais anãs do **Grupo Local** e o seus efeitos na evolução química dessas galáxias, em especial na ocorrência ou não de ventos galácticos, e as consequências em parâmetros como distribuição de metalicidade e razões de abundâncias químicas;
- 2) aplicar os resultados dos modelos de evolução química e as diferentes propostas para a matéria escura em códigos de simulação hidrodinâmica a fim de analisar seus efeitos na **dinâmica interna** desses sistemas.
- 3) A partir dos resultados obtidos com os códigos de evolução química e de simulações hidrodinâmicas comparados a dados observados, procuraremos vincular qual cenário para a distribuição da matéria escura melhor se adapta a esse tipo de galáxia.

3 Fundamentação Teórica

Entre as galáxias anãs, as menos luminosas e menos maciças conhecidas são as galáxias dSph, tanto as clássicas (Sculptor, Fornax, Ursa Minor, Lei I, Leo II, Draco, Sextans, Carina e Sagittarius) quanto as chamadas *ultra-faint*, recém descobertas em análises de fotometria profunda multi-cor do Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (Willman et al. 2005A, 2005B, Zucker et al. 2006A, 2006B, Belokurov et al. 2006, Belokurov et al. 2007, Irwin et al. 2007, Walsh et al. 2007, Belokurov et al. 2008, Belokurov et al. 2009, Grillmair 2009, Watkins et al. 2009, Belokurov et al. 2010). As dSph clássicas são sistemas pequenos (raio de *core*: $r_c \sim 0,3 - 1 \text{ kpc}$) quando comparados a galáxias espirais ou elípticas, relativamente simples (sem estruturas marcantes), com baixa luminosidade superficial ($M_v > -14 \text{ mag}$), baixa massa total e bariônica ($\sim 10^7 M_\odot$), pouco enriquecidos (com metalicidades médias da ordem de 1/10 - 1/100 do valor solar), com uma população estelar antiga (e alguns traços de populações com idades intermediárias), dominados por matéria escura (razões M/L de ~ 100 até ~ 3000 em algumas *ultra-faint*), com completa ausência de gás neutro detectável na sua região central e uma variedade de histórias de formação estelar (Mateo 98, Tolstoy, Hill & Tosi 2009, McConnachie 2012) .

Além dessas propriedades, nos últimos anos uma série de estudos relacionados às dSph analisaram desde abundâncias químicas (Molero et al. 2021, Aguado et al. 2021, Lemasle et al. 2014, Hendricks et al. 2014, Letarte et al. 2006, 2010, Larsen et al. 2012, Kirby et al. 2010, 2011) até as histórias de formação estelar (de Boer et al. 2012a, 2012b, Dolphin et al. 2005), passando pelo estudo das populações estelares, dos mecanismos de remoção do gás, entre outros tópicos. Entretanto, os mecanismos que governam a evolução dessas galáxias ainda não são completamente conhecidos e várias hipóteses já foram levantadas. Uma característica marcante nesse tipo de galáxia é que, com certeza, teve influência na

sua evolução, é a completa ausência de gás neutro (Grcevich & Putman 2009, Spekkens et al. 2014), ainda não explicada satisfatoriamente. Modelos de evolução química são capazes de reproduzir uma série de dados observados de dSph clássicas e *ultra-faint* naturalmente se forem consideradas uma baixa eficiência de formação estelar e a ocorrência de intensos ventos galácticos capazes de remover uma grande fração do gás do meio interestelar (Lanfranchi & Matteucci 2003, 2004, 2010, Vincenzo et al. 2014). Nesse modelos, o vento galáctico ocorre quando a energia cinética do gás do meio interestelar iguala ou supera a energia de ligação da galáxia. A energia cinética do gás é fortemente dependente da fração de energia térmica liberada pelas estrelas (em explosões de supernovas ou ventos estelares) que é convertida em cinética, enquanto a energia de ligação depende da massa total da galáxia (matéria luminosa mais matéria escura) e da sua distribuição. A hipótese de que a energia resultante das explosões estelares seja capaz de remover o conteúdo gasoso da galáxia ainda gera debates na literatura. Vários estudos a partir de modelos numéricos sugerem que ventos galácticos deflagrados pela formação estelar não são capazes de remover completamente o gás do ISM das dSph, sendo tal fato possível somente para sistemas com massas de até $\sim 5 \times 10^6 M_{\odot}$ (Mc Low & Ferrara 1999, Fragile et al. 2003, Revaz et al. 2009, Revaz & Jablonka 2012). Deve-se realçar entretanto que, para sistemas com massa na mesma faixa daquelas observadas nas dSph, uma boa fração (até $\sim 75\%$) do gás poderia ser perdida, incluindo quase a totalidade do gás quente enriquecido e injetado no ISM pelas explosões de supernovas (SNe). Entretanto essas conclusões dependem fortemente da história de formação estelar adotada (Ruiz et al. 2013): uma formação estelar intensa com alta taxa de explosões de supernova facilita a perda de gás do ISM, enquanto uma baixa taxa de SNe não é suficiente para uma remoção significativa do gás do meio.

Apesar disso, no caso específico de Ursa Minor, Caproni et al. (2015, 2017) argumentam que somente o *feedback* de SNe não é capaz de explicar a ausência quase completa de

gás na região central da galáxia: em alguns casos até aproximadamente 30% do conteúdo gasoso do meio permanece no sistema após 3 Ganos (tempo de duração da simulação). Um outro fator não analisado nesses trabalhos e que pode desempenhar um papel importante na remoção quase completa do conteúdo gasoso das dSph seria a presença de um buraco negro central na galáxia. Tanto a radiação emitida pela matéria caindo no buraco negro quanto o próprio jato de partículas típico de núcleo de galáxias ativas (AGN) podem remover o gás da região central da galáxia gerando um vento galáctico, conforme sugerem evidências observacionais. Tombesi et al. (2015), por exemplo, a partir de observações de ventos moleculares em galáxias ultraluminosas no infravermelho, afirmam que o vento do disco de acreção do buraco negro pode transferir energia de uma maneira eficiente para o ISM da galáxia hospedeira removendo o gás da região central da galáxia, tornando seu núcleo observável. Fenômeno similar poderia ter ocorrido em galáxias anãs e desempenhado papel importante na sua evolução, removendo o gás que alimenta a formação de estrelas, diminuindo sua intensidade ou cessando-a completamente e afetando, dessa maneira, a evolução desse tipo de galáxia.

A quantidade e a distribuição de matéria escura nas dSph influem diretamente em ambos os cenários propostos para a remoção do gás interestelar. Tanto mecanismos internos quanto externos têm que ter energia suficiente para vencer a energia potencial de ligação das galáxias, a qual depende da massa total desses sistemas. Visto que nessas anãs é sugerido que a massa dinâmica seja até 100 vezes maior que a massa luminosa, é essa primeira que irá definir quase completamente a energia de ligação da galáxia. Além disso, saber se o poço de potencial é profundo ou não, se é concentrado ou estendido, influi na dinâmica do gás do meio interestelar e define se é possível que esse conteúdo gasoso seja removido ou não, ou qual a fração que pode ser removida.

Acredita-se que as galáxias anãs sejam o tipo de galáxia que, proporcionalmente, possui a maior quantidade de matéria escura em relação à matéria luminosa (Walker et

al. 2010). Em algumas galáxias locais, a razão massa-luminosidade estimada chega a ser maior que 100 no caso da dSph clássicas e acima de 1000 no caso das *Ultra Faint Dwarfs* (UfD). A maneira como essa matéria se distribui nessas galáxias, porém, ainda é motivo de discussão, conhecida como o problema *cusp-core*: se em um halo extenso e com densidade aproximadamente constante nas regiões internas da galáxia ou se em um potencial com comportamento de lei de potência elevada (veja De Blok 2010 para uma revisão). Analisar, portanto, todos esses cenários e sua influência na evolução desses sistemas é de suma importância na busca pela compreensão de como essas galáxias se formaram e evoluíram. Os efeitos da matéria escura na evolução dinâmica e química da esferoidais locais podem ser testados a partir de modelos teóricos adotando os cenários propostos na literatura para os potenciais de matéria escura nesses objetos.

4 Metodologia

Como parte deste projeto de pesquisa, será analisada a evolução de galáxias esferoidais anãs locais, em particular os efeitos do halo de matéria escura na dinâmica do seu conteúdo gasoso e nas suas propriedades químicas. O cenário para a remoção do gás através de ventos galácticos será testado com diferentes formulações para a distribuição e quantidade de matéria escura presente nesses objetos.

Trabalhos sobre a presença e distribuição da matéria escura em galáxias anãs (Vera-Ciro et al. 2012, Governato et al. 2012, Walker 2013 e referências), com uma visão mais detalhada sobre esse assunto, fornecem vínculos importantes para caracterizar esse tipo de galáxia nas simulações. As diferentes propostas para a distribuição de matéria escura nessas galáxias existentes nesses e em outros trabalhos serão coletadas e analisadas para serem, posteriormente, incluídas nos modelos de evolução química e no código de simulação hidrodinâmica. A partir daí, a dinâmica do gás será analisada e a ocorrência e a intensidade dos ventos galácticos serão investigadas e suas consequências nas propriedades químicas

desses sistemas analisadas.

4.1 Matéria Escura em Galáxias dSph

Em 1933, Zwicky descobriu que a matéria luminosa é responsável apenas por uma fração da massa do Universo. Calculando a **velocidade radial de 8 galáxias** no aglomerado de Coma, ele encontrou uma velocidade de dispersão muito maior que a esperada. Tendo como base essas velocidades, a **massa no aglomerado** deveria ser 400 vezes maior que aquela estimada a partir da matéria luminosa. A matéria que estaria faltando foi chamada, por ele, de **matéria fria escura** e seria muito mais abundante que a luminosa. O mesmo resultado foi obtido, posteriormente, para o aglomerado de Virgo (Smith 1936) e para o Grupo Local (Kahn & Woltjer 1959). Em 1939, as velocidades de rotação de objetos nas regiões externas de M31 foram medidas, com valores muito altos. A **curva de rotação de Andrômeda** mostrava que as velocidades de rotação não seguiam um padrão kepleriano: elas permaneciam **constante** entre 16 a 30 kpc do centro da galáxia ao invés de decair. Ou seja, a massa da galáxia nessas regiões deveria crescer, embora a luminosidade diminuísse. A partir disso foi concluído que M31 também deveria possuir matéria escura em quantidade maior que a luminosa. O mesmo foi observado em todo tipo de galáxias espirais e em galáxias elípticas, onde a massa dinâmica é inferida a partir do **teorema do virial**.

As galáxias anãs também são caracterizadas por massa dinâmica superior à luminosa, porém em uma **escala** muito maior. Em galáxias dSph clássicas do Grupo Local a razão massa-luminosidade estimada é da ordem de 100, ou maior, e nas UFD (*Ultra Faint Dwarfs*) pode chegar a valores superiores a 1000 (Mateo 1998, Walker 2009). Há uma aparente relação entre essa razão e a luminosidade da galáxia: quanto menor a luminosidade, maior a razão (Walker 2013). Entretanto a quantidade exata e a forma do potencial

de matéria escura nas dSph ainda não são conhecidas com exatidão. Enquanto modelos de **simulação** cosmológica preveem que a densidade de matéria escura em galáxias anãs é aproximadamente constante na regiões centrais desses sistemas (Navarro et al. 1996, 1997, Diemand et al. 2005), **observações** dinâmicas sugerem que o potencial de matéria escura nessas mesmas galáxias se comporte como uma **lei de potência intensa** - *cored* - em escalas sempre superiores a algumas centenas de parsec, densidades centrais típicas entre 10 - 22 **Gev/cc** e com halos maciços - $M_h > 5 \times 10^7 M_\odot$ (Gilmore et al. 2007).

4.2 O código hidrodinâmico

Simulações hidrodinâmicas **tridimensionais não cosmológicas** do gás de uma típica galáxia **dSph isolada** são realizadas para analisar os efeitos do potencial de matéria escura na dinâmica do gás de galáxias eferoidais anãs, através do **mesmo código utilizado em trabalhos anteriores do grupo** (Caproni et al. 2015, Caproni et al. 2017, Lanfranchi et al. 2021). Assumindo uma proporção inicial de matéria bariônica-matéria escura derivada da **radiação cósmica de fundo de micro-ondas** e um potencial gravitacional de matéria escura estático e nuclear, a distribuição galáctica do gás é evoluída por 1 Gano levando em consideração o *outflow* de um IMBH central e o *feedback* de supernovas do tipo II e do tipo Ia. A configuração inicial da simulação é exatamente a mesma adotada para a **dSph Ursa Minor** (usada como modelo para uma galáxia dSph clássica), descrita em detalhes em Lanfranchi et al. (2021). O meio interestelar está **inicialmente em equilíbrio hidrostático** com o potencial da matéria escura (como adotado por Mac Low & Ferrara (1999)).

O código desenvolvido em Caproni et al. (2015, 2017) e Lanfranchi et al. (2021) para a galáxia Ursa Minor e utilizado nesse projeto se baseia no código *PLUTO*¹, um código fluidodinâmico escrito em linguagem de programação C que utiliza elementos finitos para

¹<http://plutocode.ph.unito.it/>

integrar o sistema de equações diferenciais na forma conservativa (ignone et al. (2007)):

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{T}(\vec{U}) + \vec{S}(\vec{U}) \quad (1)$$

onde U representa as **quantidades físicas conservadas**, T é **tensor** de segunda ordem associado ao fluxo das quantidades U e S representa os **termos fontes** associados ao problema.

No caso hidrodinâmico, as quantidades conservadas U são da forma $U = [\rho, m, E]^T$, sendo ρ a **densidade** volumétrica, $m = \rho v$, v a **velocidade** e E a densidade de **energia** de um dado elemento de fluido.

Nesse trabalho, conforme descrito em Caproni et al. (2015, 2017) e Lanfranchi et al. (2021) são utilizadas características observacionais da galáxia Ursa Minor, uma dSph clássica típica, para definir as **condições iniciais das simulações**. A massa total do **halo de matéria escura** é estimada a partir do **raio do núcleo** $r_0 = 300$ pc, a velocidade inicial do **som** no meio $c_{s0} = 11,5$ km.s⁻¹ e a **velocidade circular** na Ursa Minor $v_c = 21,1$ km.s⁻¹ (Irwin & Hatzidimitriou 1995, Strigari et al. 2007), resultando em um valor de $M_h = 1,51 \times 10^9 M_\odot$. A partir da relação do **WMAP** entre matéria escura - matéria bariônica, a **massa total inicial** estimada é $M_{g0} \sim 2,94 \times 10^8 M_\odot$ e a **densidade central inicial** é $\rho_0 = 3,11 \times 10^{-22}$ g.cm⁻³.

A quantidade de SNe que será considerada neste projeto e a sua distribuição temporal são retiradas da **taxa de supernovas resultante de modelos de evolução química** que reproduzem as razões entre as abundâncias químicas e diversas outras propriedades químicas de galáxias dSph (Lanfranchi & Matteucci 2004, 2007). Os locais de injeção da energia liberada nas explosões de supernovas são detalhados em Lanfranchi et al.(2024). Em ambos os casos, uma energia de 10^{51} erg é inserida no meio quando t_{snia} ou t_{snii} (**escala de tempo para a ocorrência de uma supernova** do tipo Ia e uma do tipo II, respectivamente) é atingido. O **local onde a energia é inserida**, entretanto, é diferente para cada tipo. No

caso das SNe II, a escolha da célula onde a energia é injetada é feita de acordo com a densidade de gás: quanto maior a densidade, maior a probabilidade da célula ser escolhida. Se houver mais de uma célula com alta densidade, então a escolha entre elas será aleatória. As SNe Ia têm uma escala de tempo para sua ocorrência muito maior (podendo chegar até a ordem de 1 bilhão de anos após a formação das estrelas) por isso podem explodir em locais distantes da região de alta densidade onde foram formadas. Dessa maneira, a escolha da célula onde a energia de cada SN Ia será inserida é totalmente aleatória.

O *feedback* de um IMBH ($M_{BH} \sim 10^3$ a $10^6 M_{\odot}$) é considerado a partir da criação de um *outflow* de matéria saindo de duas células centrais da caixa computacional adotada, com uma densidade de injeção e com uma velocidade de injeção na direção de um dos eixos do sistema de coordenadas retangulares. Os valores de injeção da densidade e da velocidade foram estabelecidos dentro de uma faixa correspondente à massa estimada observacionalmente para o buraco negro central e aos valores de luminosidade de AGN em galáxias anãs (Maccarone et al. 2005, Lora et al. 2009, Nucita et al. 2013, Manni et al. 2015, Mezcuca & Sánchez 2020) e seguindo os resultados de Lanfranchi et al. (2021).

5 Cronograma de execução

Em uma primeira etapa, será dedicada atenção à **procura e leitura de literatura especializada** da área a fim de coletar os dados necessários para o desenvolvimento do projeto e para que o aluno se familiarize com os **processos de busca e coleta de dados científicos** e com os conteúdos específicos da área de desenvolvimento do trabalho. Os dados analisados serão aqueles relacionados à **distribuição e quantidade de matéria escura** presente nas galáxias dSph. Ainda não há um consenso em relação a esse ponto e várias formulações foram propostas nos últimos anos, considerando diferentes massas, densidades e perfis. Cada uma dessas propostas será analisada.

Após o trabalho com os dados observados e tendo familiaridade e experiência com

estes, atenção passará a ser dedicada ao **modelo de evolução química**. Os fundamentos teóricos desse tipo de modelo serão estudados e modelos simples elaborados pelo grupo do orientador serão usados como ferramenta de aprendizagem. Nessa parte do trabalho as **diferentes formulações** de matéria escura encontrados serão **aplicadas ao modelo** e os resultados analisados. Entretanto, não se espera, nessa fase, diferenças muito grandes entre os modelos com diferentes formulações visto que esses **modelos não levam em conta a parte dinâmica do sistema**. Os efeitos da matéria escura, nesse caso, serão percebidos apenas na energia de ligação da galáxia e, conseqüentemente, na ocorrência dos ventos galácticos. Esses, entretanto, são de vital importância na evolução das galáxias dSph.

O projeto terá continuidade, em um segundo período, quando as **diferentes distribuições serão aplicadas a simulações hidrodinâmicas**. Nesse caso, as diferenças serão acentuadas e **resultados mais robustos deverão ser obtidos**.

Bibliografia

- Aguado, D. S., Myeong, G. C. , Belokurov, Vasily ., Wyn Evans N., Koposov, S. E., Prieto, C. A., Lanfranchi G. A., Matteucci, F. et al. 2021, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 500, 1.
- Bradamante F., Matteucci F. & D’Ercole A., 1998, A&A, 337, 338
- Caproni, A., Lanfranchi, G. A., Luiz da Silva, A. & Falceta-Gonçalves, D., 2015, The Astrophysical Journal, 805, 109.
- Caproni, A., Lanfranchi, G. A., Baio, G. H. C., Kowal, G., Falceta-Gonçalves, D., 2017, The Astrophysical Journal, 838.
- Greggio L. & Renzini A., 1983, A&A, 118, 217
- Irwin, M., & Hatzidimitriou, D., 1995, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 277, 1354.
- Lanfranchi G. A., & Matteucci F., 2003, MNRAS, 345, 71
- Lanfranchi G. A., & Matteucci F., 2004, MNRAS, 351, 1338
- Lanfranchi, G. A., & Matteucci, F., 2004, MNRAS, 345, 1338.
- Lanfranchi, G. A., & Matteucci, F., 2007, Astronomy & Astrophysics, 468, 927.
- Lanfranchi, G. A., Hazenfratz R., Caproni A., Silk J., 2021, The Astrophysical Journal, 914, 32.
- Lanfranchi, G. A., Soares, J. F., Caproni A., 2024, MNRAS, submetido.
- Lora, V., Sanchez-Salcedo, F., J., Raga, A., Esquivel, A., 2009, The Astrophysical Journal, 699, 113.
- Maccarone, T.J., Fender, R.P. & Tzioumis, A.K., 2005, Astrophysics and Space Science, 300, 239.
- Mac Low, M-M., & Ferrara, A., 1999, The Astrophysical Journal, 513, 142.
- Manni, L., Nucita, A. A., De Paolis, F., Testa, V., Ingrosso, G. A., 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 451, 2735.
- Marconi G., Matteucci F. & Tosi M., 1994, MNRAS, 270, 35
- Matteucci F., 1992, ApJ, 397, 32
- Matteucci F., 1996, FCPh, 17, 283
- Matteucci F. & Tornambé A., 1987, A&A, 185, 51
- McConnachie, A. W., 2012, The Astrophysical Journal, 144, 4.
- Mignone, A., Bodo, G., Massaglia, S., et al., 2007, The Astrophysical Journal, 170, 228.
- Mezcua, M., and Sánchez, H. D., 2020, The Astrophysical Journal Letters, 898, 2.
- Molero, M., Romano, D., Reichert, M., Matteucci, F., Arcones, A., Cescutti, G., Simonetti, P., Hansen C. J., Lanfranchi, G. A. 2021, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 505, 2.
- Nomoto K., et al., 1997, Nuclear Physics A, 616, 79
- Nucita, A. A., De Paolis, F., Manni, L., Ingrosso, G., 2013, Nature, 23, 107.
- Recchi S., Matteucci F. & D’Ercole A., 2001, MNRAS, 322, 800
- Recchi S., Matteucci F., D’Ercole A. & Tosi M., 2002, A&A, 384, 799
- Salpeter E. E., 1955, ApJ, 121, 161
- Spekkens, K., Urbancic, N., Mason, B. S., Willman, B., Aguirre, J. E., 2014, The Astrophysical Journal , 795, 5.
- Strigari, L. E., Bullock, J. S., Kaplinghat, M., et al., 2007, The Astrophysical Journal, 669, 676.
- Tinsley B.M., 1980, FCPh, 5, 287

- Van den Hoeck L.B. & Groenwegen M.A.T., 1997, A&AS, 123 , 305
- Walker, M.G.; Mateo, M.; Olszewski, E.W.; Peñarrubia, J.; Wyn Evans, N.; Gilmore, G., 2009 , ApJ, 704, 1274
- Walker, M.G.; McGaugh, S.S.; Mateo, M.; Olszewski, E. W.; Kuzio de Naray, R., 2010, ApJ, 717, 87
- Walker, M. G., 2013, Planets, Stars and Stellar Systems Vol. 5, by Oswalt, Terry D.; Gilmore, Gerard, ISBN 978-94-007-5611-3. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013, p. 1039
- Woosley S. E. & Weaver T. A., 1995, ApJS, 101, 181

6 Anexo 1: link para currículo lattes do orientador

Prof. Dr. Gustavo A. Lanfranchi
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4920024724994011>

7 Anexo 2: parecer do orientador

DECLARAÇÃO

São Paulo, 18 de abril de 2024

Declaro para os devidos fins que o aluno Gustavo Mota Macedo, R.G.M.: 30410746, matriculado no 5o. semestre do Curso de Ciência da Computação, é meu orientado no programa de Iniciação Científica, na área de Astrofísica Extragaláctica, com projeto de pesquisa intitulado *O Potencial de Matéria Escura e a Dinâmica do Gás em Galáxias Esferoidais Anãs*.

A pesquisa desenvolvida pelo aluno está dentro do projeto "Aplicação de Modelos Teórico-Computacionais em Astrofísica" dentro da linha de pesquisa de Astrofísica Galáctica e Extragaláctica do Programa de Pós-graduação em Astrofísica e Física Computacional. Toda a pesquisa desenvolvida no projeto mencionado conta com a colaboração de professores e pesquisadores de universidades e institutos nacionais e internacionais, destacando-se a Profa. Dra. Francesca Matteucci da Università Degli Studi di Trieste (Itália).

É importante ainda mencionar que o candidato já está inserido em estágio de iniciação científica desde fevereiro de 2024, tendo, nesse período, estudado tópicos gerais de Astronomia assim como assuntos específicos relacionados a área de conhecimento do projeto de pesquisa a ser desenvolvido, demonstrando grande interesse e dedicação.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Gustavo A. Lanfranchi
Núcleo de Astrofísica
Universidade Cidade de São Paulo

DADOS DO(A) CANDIDATO(A)

Nome completo: Gustavo Mota Macedo R.G.M.: 30410746
Link do currículo lattes do CNPq (opcional):
Curso: Ciência da Computação Semestre: 5o. Período: Diuno Campus: Tatuapé
Universidade: Universidade Cidade de São Paulo Média geral do extrato escolar: 8,35

DADOS DO(A) ORIENTADOR(A)

Nome completo: Gustavo Amaral Lanfranchi
Link do currículo lattes do CNPq (obrigatório): <http://lattes.cnpq.br/4920024724994011>

CARTA DE ACEITAÇÃO DE ORIENTAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

São Paulo, 18 de abril de 2024

De acordo com a normas do Edital PIBIC e PIBITI da Universidade Cruzeiro do Sul e da Universidade Cidade de São Paulo, declaro que aceito orientar o/a estudante *Gustavo Mota Macedo*, do Curso de *Ciência da Computação*, como bolsista do Programa de Iniciação Científica, no projeto de pesquisa intitulado: "*O Potencial de Matéria Escura e a Dinâmica do Gás em Galáxias Esferoidais Anãs*".

Declaro, ainda, que o(a) estudante participou na elaboração e discussão do projeto de pesquisa, especificamente, das seguintes etapas: *introdução, metodologia e cronograma*. A pesquisa desenvolvida no projeto mencionado conta com a colaboração do Prof. Dr. Anderson Caproni e do Prof. Dr. Pedro Henrique Ribeiro da Silva Moraes, também docentes do Programa de Pós-graduação em Astrofísica e Física Computacional.

Confirmo que os dados acima informados estão corretos e que estou ciente e de acordo com as regras estabelecidas no Manual do PIBIC e PIBITI da Universidade Cruzeiro do Sul e da Universidade Cidade de São Paulo.

Atenciosamente,



Prof.(a.) Dr.(a.) Gustavo A. Lanfranchi

Curso de Ciência da Computação e Programa de pós-graduação em Astrofísica e Física Computacional, Universidade Cruzeiro do Sul, Universidade Cidade de São Paulo

CNPJ: 43395177000147 - UNIVERSIDADE CIDADE DE SÃO PAULO (417)

Rua Cesário Galeno, 432 - 03071000 - SÃO PAULO - SP

PORTARIA Nº 757, DE 20/07/2016, D.O.U Nº 139, DE 21/07/2016, SEÇÃO 1, PÁGINA 55

HISTÓRICO ESCOLAR

DADOS DO(A) ALUNO(A)

RGM: 30410746 **Nome:** Gustavo Mota Macedo

Data de Nascimento: 25/05/2004 **UF:** BA **Nacionalidade:** BRASILEIRA

CPF: 07441242550 **Documento de Identificação:** 2042253294 **Estado emissor:** BA

DADOS DE INGRESSO

Forma de acesso: Enem **Data:** 16/03/2022

DADOS DO CURSO

Código e-MEC: 20041 **Curso:** Ciência da Computação (Bacharelado)

Ato Legal: PORTARIA Nº 919, DE 27/12/2018, D.O.U Nº 249, DE 28/12/2018, SEÇÃO 1

Disciplina	Período	C/Horária	Média	Situação	Docente / Titulação
6831 - APLICAÇÕES PARA INTERNET	2022/1	60	9.0	Aprovado	CARLOS ALBERTO MAJER - Especialização
8607 - LÍNGUA BRASILEIRA DE SINAIS	****	40	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10534 - LÓGICA COMPUTACIONAL	2022/1	60	8.5	Aprovado	RODRIGO RODRIGUES - Mestrado
6836 - MATEMÁTICA APLICADA	2022/1	80	7.0	Aprovado	VINICIUS AZEVEDO BORGES - Mestrado
10233 - ORGANIZAÇÃO E ARQUITETURA DE COMPUTADORES	2022/1	60	9.5	Aprovado	SERGIO RICARDO MASTER PENEDO - Mestrado
10554 - PENSAMENTO COMPUTACIONAL	2022/1	60	8.0	Aprovado	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10531 - PROGRAMAÇÃO DE COMPUTADORES	2022/1	60	8.0	Aprovado	FRANCISCO DE ASSIS CAVALLARO - Doutorado
10573 - CIRCUITOS LÓGICOS	2022/2	40	9.0	Aprovado	RAIMUNDO NONATO DA ROCHA FILHO - Mestrado

Disciplina	Período	C/Horária	Média	Situação	Docente / Titulação
10572 - CÁLCULO DIFERENCIAL E INTEGRAL I	2022/2	80	8.5	Aprovado	CLAUDIO MARCIO RIBEIRO MAGALHAES - Doutorado
6845 - INTERFACE HUMANO-COMPUTADOR	2022/2	40	8.5	Aprovado	CLAUDIO BENOSSI - Mestrado
10574 - LABORATÓRIO DE DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS	2022/2	60	7.0	Aprovado	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10575 - PROGRAMAÇÃO WEB	2022/2	60	9.5	Aprovado	CARLOS ALBERTO MAJER - Especialização
10235 - TÉCNICAS DE DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS	2022/2	60	8.5	Aprovado	SERGIO RICARDO MASTER PENEDO - Mestrado
10576 - CÁLCULO DIFERENCIAL E INTEGRAL II	2023/1	80	9.5	Aprovado	CLAUDIO MARCIO RIBEIRO MAGALHAES - Doutorado
10577 - ESTRUTURAS DE DADOS I	2023/1	60	7.0	Aprovado	JULIANO RATUSZNEI - Mestrado
10578 - MATEMÁTICA DISCRETA	2023/1	60	8.5	Aprovado	FRANCISCO DE ASSIS CAVALLARO - Doutorado
8683 - MODELAGEM DE DADOS	2023/1	80	7.5	Aprovado	JESSICA BARBARA DA SILVA RIBAS - Mestrado
10579 - PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS	2023/1	60	9.0	Aprovado	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
6871 - REDES DE COMPUTADORES	2023/1	60	7.5	Aprovado	CLEBER SILVA FERREIRA DA LUZ - Doutorado
10546 - ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS	2023/2	60	7.5	Aprovado	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10544 - ENGENHARIA DE SOFTWARE	2023/2	80	9.0	Aprovado	VINICIUS HELTAI PACHECO - Doutorado
10545 - ESTRUTURAS DE DADOS II	2023/2	60	8.0	Aprovado	JULIANO RATUSZNEI - Mestrado
8807 - PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA	2023/2	80	9.5	Aprovado	LUCIANO DE OLIVEIRA FONTES - Especialização
10248 - SISTEMAS OPERACIONAIS	2023/2	60	8.0	Aprovado	FRANCISCO DE ASSIS CAVALLARO - Doutorado

Disciplina	Período	C/Horária	Média	Situação	Docente / Titulação
10224 - BANCO DE DADOS	2024/1	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
8105 - CÁLCULO NUMÉRICO	2024/1	80	*****	Pendente	FRANCISCO AGUSTIN MACHADO ECHALAR - Doutorado
12755 - LÍNGUA INGLESA: BÁSICO	2024/1	80	*****	Pendente	JOCELMO CASSIO DE ARAUJO LEITE - Doutorado
10115 - OPTATIVA	****	80	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10547 - PROCESSAMENTO DE IMAGENS	2024/1	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10548 - SISTEMAS CLIENTE/SERVIDOR	2024/1	60	*****	Pendente	CLEBER SILVA FERREIRA DA LUZ - Doutorado
8947 - TEORIA DOS GRAFOS	2024/1	60	*****	Pendente	JULIANO RATUSZNEI - Mestrado
7862 - ARQUITETURA DE SISTEMAS DISTRIBUÍDOS	****	40	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10535 - COMPUTABILIDADE E COMPLEXIDADE DE ALGORITMOS	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
7088 - COMPUTAÇÃO GRÁFICA	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
7089 - COMPUTAÇÃO PARALELA E DISTRIBUÍDA	****	80	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10253 - OPTATIVA	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10537 - PROGRAMAÇÃO PARA DISPOSITIVOS MÓVEIS	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
7863 - BIG DATA	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
7864 - FUNDAMENTOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado

Disciplina	Período	C/Horária	Média	Situação	Docente / Titulação
10536 - LINGUAGENS FORMAIS E AUTÔMATOS	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10247 - QUALIDADE DE SOFTWARE	****	40	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
8985 - TRABALHO DE GRADUAÇÃO INTERDISCIPLINAR I	****	140	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
12100 - TÓPICOS AVANÇADOS EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO I	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
7865 - CIÊNCIA DE DADOS E APRENDIZAGEM DE MÁQUINA	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10549 - COMPUTAÇÃO EM NUVEM	****	80	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
12840 - LABORATÓRIO DE BANCO DE DADOS AVANÇADO	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
10508 - PROJETO DE LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO	****	60	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
8986 - TRABALHO DE GRADUAÇÃO INTERDISCIPLINAR II	****	140	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
6604 - ÉTICA GERAL E CIDADANIA	****	40	*****	Pendente	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado

Atividades Complementares

Ensino, Pesquisa e Extensão	274	TATIANA DA SILVA HORTELANO VIECO - Mestrado
-----------------------------	-----	---------------------------------------------

Legendas

A - Aprovado S - Satisfatório I - Insatisfatório * - Aproveitamento de estudos

Dados Complementares

Carga Horária Prevista: 3200 horas

Carga Horária Integralizada: 1634 horas

Enade/2022: Estudante não habilitado ao Enade em razão do calendário do ciclo avaliativo ou em razão da natureza do projeto pedagógico do curso.

Informações Adicionais

Média Global: 8.35