

Projeto de Pesquisa

Aglomerados abertos associados a sub-estruturas da Via Láctea

Orientação: Prof. João Francisco Coelho dos Santos Jr.

1 INTRODUÇÃO

No halo da **Via Láctea (VL)**, o efeito de maré e o atrito dinâmico sobre galáxias anãs e **aglomerados globulares (AGs)** produzem rastros de estrelas identificados como *streams*, evidenciando a dissolução destes objetos e sugerindo que a VL é ativa na canibalização de sistemas estelares menores (Belokurov et al. 2006, 2018; Forbes 2020; Bonaca et al. 2021). Desde a descoberta da galáxia anã de Sagittarius (Ibata et al. 1994), outros sistemas estelares vêm sendo revelados no interior da VL com a crescente qualidade e quantidade de dados astrométricos e espectroscópicos (Helmi et al. 2018; Horta et al. 2021). Outras sub-estruturas mais sutis, como as nuvens de alta velocidade sujeitas ao potencial gravitacional da VL, indicam que o processo de evolução de nossa Galáxia está em pleno desenvolvimento (e.g. Mirabel 1982; Park et al. 2016). De fato, galáxias anãs, AGs e nuvens de alta velocidade colidem com a VL deixando marcas no seu disco e, com o choque, formam estrelas (e.g. Santillán et al. 2007; Salerno et al. 2009; Bajkova & Bobylev 2019). A localização de **aglomerados abertos (AAs)** jovens (< 10 M anos) revela a formação estelar recente demarcando a estrutura espiral imersa no disco da VL (e.g. Camargo et al. 2015; Molina Lera et al. 2018; Dias et al. 2021). Menos massivos que os AGs em geral, mas muito mais numerosos, os AAs se dissolvem no meio Galáctico em poucos bilhões de anos em consequência de interações gravitacionais mútuas entre suas estrelas e com o campo de maré externo (Angelo et al. 2019). AAs observados fora do disco da VL são relevantes na demarcação de sub-estruturas como a dobra do disco e *streams*, embora estes sejam frequentemente associados a objetos mais velhos como AGs e galáxias anãs sem gás. Nuvens de alta velocidade, por outro lado, contém gás suficiente para a formação de AAs em regiões da VL de menor densidade (Santillán et al. 2007).

Neste estudo, propõe-se determinar parâmetros astrofísicos, estruturais e cinemáticos de AAs e obter relações com as características físicas de sub-estruturas da VL evidenciadas através da cinemática.

Observações de HI em rádio demonstraram que há uma dobra do disco externo da VL, com relação ao disco interno plano, que aponta para o norte entre os quadrantes Galácticos I e II, em $\ell \sim 90^\circ$, e para o sul entre os quadrantes III e IV, em $\ell \sim 270^\circ$ (e.g. Burke 1957). A Grande Nuvem de Magalhães (GNM), com centro em $\ell = 280.4652^\circ, b = -32.8884^\circ$, e a Pequena Nuvem de Magalhães (PNM), centrada em $\ell = 302.8084^\circ, b = -44.3277^\circ$, se encontram ao sul do plano Galáctico no quadrante IV, possivelmente influenciando na dobra da VL, embora a força de maré das Nuvens de Magalhães (NMs) sobre a VL seja insuficiente para explicar completamente o fenômeno (López-Corredoira et al. 2002). De fato, considerando a massa total de $\sim 2 \times 10^{10} M_\odot$ para as duas NMs (D’Onghia & Fox 2016), elas teriam que passar a 20 kpc do centro da VL para produzir a dobra observada (Hunter & Toomre 1969), o que não está de acordo com a distância pericêntrica de ~ 50 kpc (de Grijs et al. 2014). Por outro lado, Weinberg & Blitz (2006) mostram, através de um modelo, que a interação do halo de matéria escura com o disco da VL e as ressonâncias entre a órbita das MCs e o disco seriam responsáveis pela distorção observada. A estrutura também foi delineada pela população estelar de campo (Reylé et al. 2009), AAs (Cantat-Gaudin et al. 2020), estrelas Cefeidas (Skowron et al. 2019) e poeira (Marshall et al. 2006). No entanto, o tema continua em debate, não havendo um consenso sobre a natureza dinâmica da dobra e suas causas (Binney 1992; Poggio et al. 2017; Wang et al. 2020).

Com base em dados astrométricos da missão Gaia-DR2 (Gaia Collaboration et al. 2018), um novo estudo (Poggio et al. 2020) determinou que a dobra precessiona com relação ao eixo do disco Galáctico, completando uma rotação em torno do centro da VL em ~ 650 M anos, portanto mais lentamente do que o período orbital do Sol (~ 220 M anos). A provável causa é a colisão com outra galáxia, sendo a galáxia anã de Sagittarius a principal candidata por orbitar regiões internas da VL, onde está sendo destruída pelos efeitos de maré (Poggio et al. 2020).

A dobra também poderia ter se originado da queda (*infall*) de nuvens de alta velocidade intergalác-

ticas sobre o disco. De acordo com a hipótese de Olano (2004), nuvens de alta velocidade foram ejetadas das NMs como resultado de processos internos nas NMs ativados pela colisão entre a GNM e a PNM cerca de 570 M anos atrás. O modelo do autor para a órbita das nuvens de alta velocidade e das NMs sob o potencial Galáctico, sugere que o disco da VL foi alvejado por muitos impactos dessas nuvens nos últimos 400 Myr, acumulando massa a uma taxa de $0.6 M_{\odot}/\text{ano}$. Os efeitos do fluxo de nuvens de alta velocidade passando pelo disco Galáctico explicam a sua dobra, além de marcas (*shells* e *supershells* de HI) na camada gasosa das partes externas da VL (Olano 2004). Podemos especular que o choque gerado nesses impactos e a massa envolvida produziram regiões de formação estelar com momentum suficiente para explicar a formação de AAs fora do disco Galáctico e possivelmente associados à dobra do disco e outras sub-estruturas. Estes aglomerados teriam idades de 400 M anos ou menos conforme este modelo. Esta ideia é consistente com a relação entre a altura da dobra e a idade da população estelar a diferentes distâncias do centro Galáctico, ou seja, maior distância e menor idade implicam em maior altura da dobra (Wang et al. 2020). A hipótese de queda do gás sobre o disco como origem da dobra naturalmente explicaria as populações estelares jovens, como as Cefeidas (Skowron et al. 2019), que traçam a dobra de forma mais evidente que populações estelares velhas (Wang et al. 2020).

Outra possibilidade para a existência de AAs distantes do disco Galáctico, é a incorporação de galáxias anãs pela VL. Evidência da incorporação e destruição de aglomerados globulares (*globular clusters*, AGs) com baixa metalicidade ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2.0$) foi encontrada em estudos do fluxo de estrelas (*stream*) de Phoenix (Wan et al. 2020; Kruijssen 2020). Cerca de 1/4 da população de AGs da Galáxia observados hoje (ao todo são aproximadamente 160^1 AGs catalogados de acordo com Harris (2010) e Baumgardt et al. (2019)), podem ter se originado da acreção de 6 a 8 galáxias anãs (Forbes & Bridges 2010). Desta forma, galáxias anãs acretadas pela VL há 8-11 G anos atrás, continham muitos AGs que hoje fazem parte do halo de nossa Galáxia (Renaud et al. 2017; Forbes 2020).

Agrupamentos de órbitas determinadas a partir de movimentos próprios da missão Gaia-EDR3 (Gaia Collaboration et al. 2020) permitiram determinar a origem de 23 *streams* estelares na VL (Bonaca et al. 2021). Existiam AAs formados nessas galáxias anãs acretadas ou todos já teriam se dissolvido? O estudo da sobredensidade em Canis Major (Martin et al. 2004), que compartilha posição e velocidade radial com 4 AGs (NGC 1851, 1904, 2298 and 2808), além da posição e distância de 15 AAs coincidentes com a estrutura, sugere uma conexão física entre eles. Particularmente aqueles AAs mais jovens ($\log[t(\text{anos})] < 8.5$) poderiam ter sido formados a partir de uma perturbação do meio interestelar da VL pela galáxia anã acretada provocando um aumento da atividade de formação estelar no disco (Martin et al. 2004). Seria possível que os 27 AAs localizados distantes do disco da VL ($|Z| > 800 \text{ pc}$) estivessem vinculados a uma população de idade intermediária ($\sim 1 \text{ G}$ ano) das galáxias anãs acretadas? Aliada a outras propriedades (como a metalicidade), a análise de parâmetros orbitais (velocidade e distância ao centro da VL) pode produzir vínculos para uma resposta conclusiva.

A população mais velha, incluindo AAs evoluídos, possuiria propriedades cinemáticas e químicas da galáxia anã acretada. Distinguir AAs formados in situ ou acretados usando seus raios característicos parece ser difícil, como demonstrado via simulações (Miholics et al. 2016). Essas simulações são corroboradas por estudo observacional (Santos et al. 2020), que mostra que durante colisões de galáxias, os aglomerados pertencentes a elas sofrem efeitos de maré devido ao potencial gravitacional variável, mas rapidamente reajustam seus raios nuclear e de maré, e assim não evidenciam mudanças estruturais detectáveis. Entretanto, outras propriedades como o parâmetro dinâmico (τ , razão entre idade e tempo de relaxação), podem revelar a origem destes AAs na medida em que objetos muito evoluídos dinamicamente ($\tau \gg 1$) seriam provavelmente acretados, pois teriam mais tempo de evoluir no potencial da galáxia anã, como parece ser o caso de ESO 92-05 (Ortolani et al. 2008).

Será possível detectar um fluxo (componentes de velocidade) único conectando determinados AAs, AGs e *streams*? Particularmente para o sul da VL, onde a densidade de AAs é mais alta e onde as NMs se situam? Tem sido proposto que as NMs podem levar com elas galáxias anãs menores (Jahn et al. 2019; Bica et al. 2020) e ser a origem de nuvens de alta velocidade (Mirabel 1982; Olano 2004). No passado (poucos G anos atrás), alguma destas galáxias menores teria sido acretada e destruída por forças de maré na interação com a VL, formando os *streams* e a dobra observados hoje.

Determinações de idade, cinemática e estrutura de AAs associados à dobra e outras sub-estruturas

¹ <https://people.smp.uq.edu.au/HolgerBaumgardt/globular/>

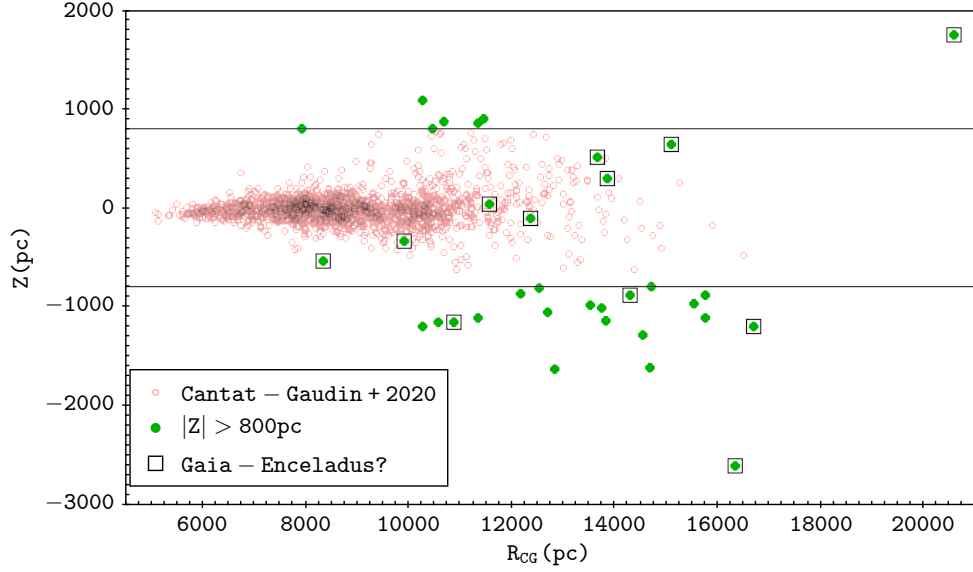


Figura 1. Distância ao plano Galáctico versus distância Galactocêntrica para AAs catalogados por [Cantat-Gaudin et al. \(2020\)](#) (círculos abertos) e a amostra de AAs selecionados neste trabalho: objetos com $|Z| \geq 800$ pc (círculos preenchidos) e objetos possivelmente conectados fisicamente à estrutura Gaia-Enceladus (quadrados abertos). As linhas horizontais demarcam o limite $|Z| \geq 800$ pc.

produzirão vínculos para resgatar suas origens e, portanto, são relevantes para o conhecimento da evolução da VL, possivelmente envolvendo a interação com as NMs.

2 OBJETIVO

O objetivo imediato é caracterizar uma amostra de 36 AAs e relacionar suas propriedades com a dobra do disco da VL. A caracterização dos AAs envolverá a determinação de seus parâmetros astrofísicos e estruturais e a análise da distribuição espacial e cinemática destes objetos. O objetivo mais geral do projeto é determinar parâmetros com métodos homogêneos para uma amostra grande de AAs e mapeá-los em relação a várias sub-estruturas (streams, galáxias anãs e AGs) da VL em busca de possíveis conexões estruturais e cinemáticas.

3 METODOLOGIA

A amostra preliminar de aglomerados selecionada para análise consiste em objetos localizados a distâncias Galactocêntricas $R_{CG} > 10$ kpc e com distâncias ao plano Galáctico $|Z(\text{pc})| \geq 800$ ([Cantat-Gaudin et al. 2020](#)). A distribuição destes AAs apresenta uma assimetria no sentido de que há ~ 3.5 vezes mais AAs ao sul do plano da VL (20) do que ao norte (6), evidenciando a dobra do disco Galáctico. Para completar a amostra, foram também incluídos NGC 6791 ($R_{CG} \sim 7.9$ kpc, $Z \sim 800$ pc) e AAs identificados por [Martin et al. \(2004\)](#) como possíveis membros de galáxia anã acretada (inicialmente denominada Canis Major e posteriormente Gaia-Enceladus, que incorpora 28 AGs ([Forbes 2020](#)) formando uma estrutura maior). Dolidze 25 ($R_{CG} \sim 12.4$ kpc, $Z \sim -100$ pc), apesar de imerso no disco da VL ([Negueruela et al. 2015](#)) e não ser catalogado por [Cantat-Gaudin et al. \(2020\)](#), também foi incluído na amostra por estar associado à mesma estrutura ([Martin et al. 2004](#)). A Tabela 1 e a Fig. 1 apresentam a amostra de 36 AAs selecionados.

A Fig. 1 mostra a distribuição de AAs conforme a distância ao plano Galáctico (Z) e a distância Galactocêntrica (R_{CG}). Os círculos abertos indicam AAs confirmados como sistemas físicos por ([Cantat-Gaudin & Anders 2020](#)), os círculos preenchidos correspondem à amostra de AAs selecionados para este estudo e os quadrados indicam AAs possivelmente associados aos restos da galáxia anã Gaia-Enceladus.

Aglomerado	α deg	δ deg	ℓ deg	b deg	r50 arcsec	N70	μ_α^* mas/yr	$\sigma(\mu_\alpha)^*$ mas/yr	μ_δ mas/yr	$\sigma(\mu_\delta)$ mas/yr	$\tilde{\omega}$ mas	$\sigma(\tilde{\omega})$ mas	$\log(t)$ [yr]	A_V mag	DM mag	d pc	X pc	Y pc	Z pc	R_G pc
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
Hemisfério Galáctico Sul ($b < 0$)																				
Auner 1	106.060	-19.748	231.992	-6.160	0.026	41	-0.280	0.130	1.015	0.128	0.093	0.096	9.49	0.99	14.77	8984	-5500	-7038	-964	15527
Berkeley 73	095.520	-06.321	215.261	-9.393	0.016	45	0.227	0.209	1.110	0.161	0.128	0.160	9.15	0.69	13.95	6158	-4960	-3507	-1005	13755
NGC1193	046.486	+44.383	146.814	-12.162	0.027	215	-0.125	0.281	-0.329	0.244	0.159	0.123	9.71	0.41	13.49	4988	-4081	2669	-1051	12705
ESO92-05	150.801	-64.755	286.184	-7.506	0.043	39	-2.919	0.132	2.397	0.215	0.061	0.082	9.65	0.17	15.47	12444	3438	-11848	-1625	12822
NGC2243	097.395	-31.282	239.478	-18.011	0.046	506	-1.279	0.126	5.488	0.126	0.211	0.060	9.64	0.02	12.85	3719	-1796	-3047	-1150	10584
Melotte 66	111.573	-47.685	259.569	-14.265	0.088	804	-1.474	0.142	2.745	0.142	0.183	0.077	9.63	0.25	13.42	4830	-847	-4604	-1190	10276
Berkeley 56	319.391	+41.835	85.979	-5.197	0.041	68	-1.901	0.112	-1.831	0.138	0.047	0.060	9.47	1.42	14.89	9516	664	9454	-862	12177
Berkeley 75	102.252	-23.999	234.308	-11.191	0.032	39	-0.264	0.132	1.088	0.158	0.088	0.083	9.23	0.29	14.60	8304	-4752	-6616	-1611	14669
ESO92-18 (*)	153.730	-64.611	287.124	-6.658	0.025	54	-3.551	0.128	2.761	0.100	0.032	0.064	9.46	0.47	14.98	9910	2898	-9407	-1149	10867
Berkeley 25	100.317	-16.487	226.613	-9.629	0.019	20	-0.114	0.122	0.845	0.160	0.077	0.037	9.39	1.07	14.16	6780	-4591	-4858	-1134	13814
FSR1419	124.711	-47.786	264.044	-6.613	0.032	11	-2.529	0.135	2.860	0.134	0.036	0.051	9.21	1.25	15.24	11165	-1150	-11031	-1285	14552
AM2(*)	114.683	-33.845	248.123	-5.884	0.026	29	-0.513	0.156	1.225	0.123	0.039	0.060	9.48	1.49	15.35	11751	-4355	-10848	-1204	16699
Czernik 26	097.754	-04.183	214.342	-6.445	0.019	10	0.142	0.087	0.191	0.101	0.060	0.084	8.72	0.88	14.25	7087	-5815	-3973	-795	14702
Berkeley 102	354.660	+56.637	113.006	-4.826	0.049	21	-1.559	0.147	-0.340	0.074	0.050	0.060	9.59	1.11	15.11	10519	-4096	9648	-885	15740
Tombaugh 2 (=Haffner 2)	105.773	-20.820	232.836	-6.880	0.028	224	-0.464	0.170	1.349	0.177	0.079	0.082	9.21	0.83	14.85	9316	-5587	-7370	-1115	15757
Berkeley 20 (*)	083.152	+00.185	203.485	-17.377	0.015	37	0.808	0.258	-0.244	0.160	0.040	0.104	9.68	0.37	14.70	8728	-7639	-3319	-2606	16320
Berkeley 22 (*)	089.618	+07.763	199.874	-8.071	0.022	18	0.648	0.134	-0.473	0.137	0.069	0.065	9.39	1.99	13.97	6225	-5796	-2095	-874	14291
NGC2204	093.882	-18.670	226.016	-16.114	0.098	531	-0.560	0.117	1.964	0.129	0.209	0.066	9.32	0.01	13.01	3991	-2663	-2759	-1107	11344
Dolidze 25 (*)	101.275	+00.300	211.942	-1.273	-	-	-	-	-	-	-	-	6.5	-	-	4500	-3840	-2350	-100	12300
ESO096-04 (=vdBH144) (*)	198.808	-65.920	305.359	-3.161	0.024	73	-5.111	0.362	-0.375	0.204	0.045	0.088	9.11	1.68	14.92	9649	5575	-7857	-532	8329
vdBH66 (=UKS2) (*)	141.314	-54.719	276.000	-3.013	0.023	27	-4.157	0.095	3.599	0.070	0.097	0.042	8.86	1.38	14.00	6301	657	-6258	-331	9908
Gaia1	101.474	-16.733	227.325	-8.736	0.086	185	-0.079	0.122	1.249	0.155	0.145	0.096	9.50	0.59	14.05	6460	-4328	-4694	-981	13510
Gaia2 (=Koposov17)	028.136	+53.058	132.150	-8.716	0.031	6	-1.181	0.162	1.299	0.109	0.099	0.077	9.90	0.50	13.65	5370	-3562	3935	-813	12536
Hemisfério Galáctico Norte ($b > 0$)																				
Berkeley 29 (*)	103.268	+16.930	197.947	7.982	0.014	11	0.151	0.067	-1.010	0.104	0.023	0.053	9.49	0.24	15.50	12604	-11874	-3846	1750	20577
Berkeley 92	321.206	+57.528	97.926	5.063	0.022	35	-2.464	0.145	-2.325	0.080	0.068	0.073	9.44	2.20	14.31	7282	-1000	7185	642	11784
Berkeley 99	350.260	+71.778	115.920	10.148	0.050	88	-3.139	0.126	-0.359	0.133	0.137	0.055	9.53	0.72	13.54	5105	-2196	4520	899	11465
Berkeley 8	030.306	+75.489	127.358	13.220	0.077	250	2.650	0.154	0.439	0.156	0.250	0.074	9.56	1.75	12.62	3339	-1972	2584	763	10631
NGC2420	114.602	+21.575	198.108	19.640	0.053	393	-1.190	0.139	-2.125	0.126	0.363	0.064	9.24	0.04	12.06	2587	-2316	-757	869	10683
NGC6791	290.221	+37.778	69.964	10.906	0.068	1629	-0.421	0.165	-2.269	0.193	0.192	0.084	9.80	0.70	13.13	4231	1423	3903	800	7942
King 8 (*)	087.324	+33.633	176.384	3.101	0.025	84	0.520	0.176	-1.743	0.145	0.131	0.082	8.92	1.38	13.71	5517	-5498	347	298	13842
Berkeley 23 (*)	098.318	+20.535	192.595	5.392	0.038	91	-0.055	0.149	-1.339	0.126	0.151	0.089	9.02	0.83	13.67	5425	-5271	-1177	509	13661
Berkeley 31 (*)	104.406	+08.285	206.240	5.134	0.031	95	0.169	0.186	-0.926	0.161	0.141	0.118	9.45	0.35	14.28	7177	-6412	-3160	642	15087
Haffner18 (*)	118.168	-26.387	243.157	0.449	0.032	62	-2.548	0.098	2.670	0.139	0.185	0.055	7.15	1.52	13.53	5083	-2295	-4535	39	11561
UBC615	104.880	+33.154	183.410	15.980	0.128	17	-0.313	0.198	-2.478	0.324	0.319	0.030	9.29	0.37	12.47	3116	-2990	-178	857	11332
UBC648	142.543	-34.136	262.222	12.378	0.046	19	-4.289	0.058	1.811	0.083	0.172	0.019	9.35	0.46	13.53	5085	-672	-4921	1090	10268
UBC624	119.227	+07.984	213.165	18.176	0.154	26	-0.838	0.246	-1.086	0.342	0.406	0.035	9.3	0.24	12.04	2563	-2039	-1332	799	10464

Notas: As colunas da tabela correspondem a: (1) identificação do AA, (2) ascensão reta, (3) declinação, (4) longitude Galáctica, (5) latitude Galáctica, (6) raio que contém metade das estrelas-membro, (7) número de estrelas-membro com probabilidade de pertinência $> 70\%$, (8) movimento próprio em ascensão reta ($\mu_\alpha \cos \delta$), (9) incerteza no movimento próprio em ascensão reta, (10) movimento próprio em declinação, (11) incerteza no movimento próprio em declinação, (12) paralaxe, (13) incerteza na paralaxe, (14) logaritmo da idade, (15) extinção na banda visual, (16) módulo de distância verdadeiro, (17) distância heliocêntrica, (18) posição X em coordenadas Galácticas cartesianas ($X = d \cos \ell \cos b$), (19) posição Y em coordenadas Galácticas cartesianas ($Y = d \sin \ell \cos b$), (20) posição Z em coordenadas Galácticas cartesianas ($Z = d \sin b$), (21) distância Galactocêntrica.

(*) AAs indicados por [Martin et al. \(2004\)](#) como possíveis membros da galáxia anã acretada Canis Major. Posteriormente, [Forbes \(2020\)](#) identifica mais membros (AGs) associados a essa estrutura, agora chamada de Gaia-Enceladus (28 AGs). Parâmetros determinados por [Cantat-Gaudin et al. \(2020\)](#), exceto para Dolidze 25 ([Negueruela et al. 2015](#)).

Tabela 1. Amostra de aglomerados abertos e seus parâmetros astrofísicos.

O desenvolvimento do trabalho seguirá as etapas seguintes:

- extração dos dados astrométricos e fotométricos da missão Gaia em torno das coordenadas centrais de cada AA;
- determinação das estrelas-membro a partir de medidas da paralaxe, movimento próprio, fotometria e velocidade radial (quando disponível);
- investigação das propriedades do meio interestelar a partir de diagramas cor-cor envolvendo três bandas, o que permitirá evidenciar se a lei de avermelhamento é normal ou anômala na direção e no meio intra-aglomerado conforme [Maurya & Joshi \(2020\)](#);
- determinação da idade, metalicidade, distância e avermelhamento a partir do ajuste de isócronas de PARSEC ([Bressan et al. 2012](#));
- construção do perfil de densidade estelar radial (RDP) a partir de um centro estimado para o aglomerado e ajuste do modelo de ([King 1962](#)) a este perfil, permitindo a determinação de propriedades estruturais, como raio nuclear, raio a meia massa e raio de maré;
- estimativa da função de massa estelar dos aglomerados bem como da sua massa total e escala de tempo de relaxação, visando determinar seus estágios de evolução dinâmica.

Para a realização de cada atividade deverão ser utilizados programas computacionais em IDL elaborados por nosso grupo, bem como novos programas computacionais a serem desenvolvidos em linguagem IDL ou PYTHON. Dada a facilidade na aquisição, edição e plotagem dos dados no programa TOPCAT, este também será utilizado como ferramenta auxiliar de análise.

As propriedades astrofísicas dos AAs determinadas neste estudo serão comparadas àquelas existentes na literatura. Parâmetros obtidos com a análise da estrutura e da função de massa dos objetos serão analisados em função de Z e R_{CG} para identificação de tendências produzidas pelo efeito de maré Galáctico. Velocidades espaciais serão determinadas com base nos movimentos próprios e distâncias usando o último *release* da missão Gaia (além de velocidades radiais, quando disponíveis). Dispersões de velocidade intrínsecas, associadas à massa dos AAs, poderão ser então determinadas e escalas de tempo evolutivas calculadas, culminando com a caracterização do grau de evolução dinâmica de cada AA. Velocidade e R_{CG} serão empregadas para localizar os AAs em um diagrama da energia orbital em função do momento angular na direção Z , para identificar associações dos AAs com os *streams* ([Bonaca et al. 2021](#)) e identificar uma possível relação com as NMs.

4 PLANO DE TRABALHO

4.1 Atividades

Inicialmente, o estudante deverá se familiarizar com as ferramentas básicas de busca de artigos, imagens e catálogos astronômicos (ADS/NASA², SIMBAD/CDS³, WEBDA⁴, ALADIN/CDS⁵) e com as técnicas usadas na descoberta e caracterização dos 62 aglomerados UFMG ([Ferreira et al. 2019, 2020, 2021](#)), empregando o software livre TOPCAT⁶ ([Taylor 2005](#)) e, para análises mais detalhadas, programas existentes (em linguagem IDL) e novos programas (em linguagem IDL ou PYTHON). As tarefas com o respectivo cronograma são indicados a seguir.

- (a) extração e análise de dados da missão Gaia para os 36 aglomerados da Tabela 1 de acordo com [Ferreira et al. \(2020\)](#), que envolve a determinação de valores médios de coordenadas centrais, paralaxe, movimento próprio e raio visual de cada aglomerado e definição de uma subamostra de estrelas para estimativa de probabilidade de pertinência e caracterização dos objetos; mais especificamente:

(i) leitura de tabela de dados da missão Gaia para a região de cada aglomerado (tipicamente 30 minutos de arco de raio), aplicação de filtros de qualidade estabelecidos por [Arenou et al. \(2018, eqs. 1, 2 e 3\)](#), cortes fotométricos ($G < 18$ e $G_{BP} - G_{RP} < 2.5$) e plotagem gráfica de observáveis [carta celeste (α, δ), VPD (μ_α, μ_δ), CMD ($G_{BP} - G_{RP}, G$), paralaxe versus G ($G, \tilde{\omega}$)];

² <https://ui.adsabs.harvard.edu/>

³ <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

⁴ <https://webda.physics.muni.cz/navigation.html>

⁵ <https://aladin.u-strasbg.fr/>

⁶ <http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>

(ii) extração, a partir dos gráficos, de valores visuais iniciais de coordenadas centrais, movimento próprio e paralaxe médios;

(iii) definição de uma caixa no VPD com ~ 1 mas/ano de lado, a partir do CMD filtrado, contendo o aglomerado e campo adjacente;

(iv) estimativa inicial das coordenadas (α, δ) centrais do aglomerado e seu raio visual (em minutos de arco) na carta celeste, considerando a subamostra previamente selecionada com os filtros de magnitude e cor no CMD e de movimento próprio no VPD;

(v) uma subamostra contendo somente estrelas dentro do raio visual com a informação de todos os parâmetros iniciais é então submetida a um programa que utiliza histogramas de paralaxe, movimento próprio e coordenadas e diversas técnicas estatísticas para refinar esses parâmetros;

(vi) determinação do raio limite (a partir do RDP) e centro dos aglomerados através do cálculo do centróide das coordenadas das estrelas;

- (b) utilização do programa de descontaminação astrométrica (Angelo et al. 2019) com a produção de uma lista de estrelas-membro com suas probabilidades de pertinência ao aglomerado; as estrelas-membro deverão ser então correlacionadas (match) com a fotometria do catálogo 2MASS;

- (c) avaliação das propriedades do meio interestelar na direção dos aglomerados em TCDs (diagramas cor-cor, por exemplo $(G_{RP} - K_s)$ versus $(G_{BP} - G_{RP})$);

- (d) determinação da idade, metalicidade, avermelhamento e distância para as estrelas-membro através de ajuste de isócronas PARSEC;

- (e) determinação da função de massa dos aglomerados utilizando a relação massa-luminosidade da melhor isócrona ajustada;

- (f) cálculo da massa dos aglomerados a partir da integração da função de massa e, independentemente, usando as magnitudes integradas e idades dos aglomerados (Maia et al. 2014);

- (g) determinação dos parâmetros estruturais (ajuste do modelo de King ao RDP) como raio nuclear e de maré, e dinâmicos como tempo de relaxação, tempo de cruzamento, dispersão de velocidades (Angelo et al. 2019);

- (h) interpretação dos resultados em conexão com estruturas morfológicas identificadas na Galáxia.

Referências

- Angelo M. S., Santos J. F. C., Corradi W. J. B., Maia F. F. S., 2019, *A&A*, **624**, A8
Arenou F., et al., 2018, *A&A*, **616**, A17
Bajkova A. T., Bobylev V. V., 2019, *MNRAS*, **488**, 3474
Baumgardt H., Hilker M., Sollima A., Bellini A., 2019, *MNRAS*, **482**, 5138
Belokurov V., et al., 2006, *ApJ*, **642**, L137
Belokurov V., Erkal D., Evans N. W., Koposov S. E., Deason A. J., 2018, *MNRAS*, **478**, 611
Bica E., Westera P., Kerber L. d. O., Dias B., Maia F., Santos João F. C. J., Barbuy B., Oliveira R. A. P., 2020, *AJ*, **159**, 82
Binney J., 1992, *ARA&A*, **30**, 51
Bonaca A., et al., 2021, *ApJ*, **909**, L26
Bressan A., Marigo P., Girardi L., Salasnich B., Dal Cero C., Rubele S., Nanni A., 2012, *MNRAS*, **427**, 127
Burke B. F., 1957, *AJ*, **62**, 90
Camargo D., Bonatto C., Bica E., 2015, *MNRAS*, **450**, 4150
Cantat-Gaudin T., Anders F., 2020, *A&A*, **633**, A99
Cantat-Gaudin T., et al., 2020, *A&A*, **640**, A1
D’Onghia E., Fox A. J., 2016, *ARA&A*, **54**, 363
Dias W. S., Monteiro H., Moitinho A., Lépine J. R. D., Carraro G., Paunzen E., Alessi B., Vilella L., 2021, *MNRAS*,
Ferreira F. A., Santos J. F. C., Corradi W. J. B., Maia F. F. S., Angelo M. S., 2019, *MNRAS*, **483**, 5508
Ferreira F. A., Corradi W. J. B., Maia F. F. S., Angelo M. S., Santos J. F. C. J., 2020, *MNRAS*, **496**, 2021

Ferreira F. A., Corradi W. J. B., Maia F. F. S., Angelo M. S., Santos J. F. C. J., 2021, *MNRAS*, **502**, L90

Forbes D. A., 2020, *MNRAS*, **493**, 847

Forbes D. A., Bridges T., 2010, *MNRAS*, **404**, 1203

Gaia Collaboration et al., 2018, *A&A*, **616**, A1

Gaia Collaboration Brown A. G. A., Vallenari A., Prusti T., de Bruijne J. H. J., Babusiaux C., Biermann M., 2020, arXiv e-prints, p. [arXiv:2012.01533](#)

Harris W. E., 2010, arXiv e-prints, p. [arXiv:1012.3224](#)

Helmi A., Babusiaux C., Koppelman H. H., Massari D., Veljanoski J., Brown A. G. A., 2018, *Nature*, **563**, 85

Horta D., et al., 2021, *MNRAS*, **500**, 1385

Hunter C., Toomre A., 1969, *ApJ*, **155**, 747

Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J., 1994, *Nature*, **370**, 194

Jahn E. D., Sales L. V., Wetzel A., Boylan-Kolchin M., Chan T. K., El-Badry K., Lazar A., Bullock J. S., 2019, *MNRAS*, **489**, 5348

King I., 1962, *AJ*, **67**, 471

Kruijssen J. M. D., 2020, *Nature*, **583**, 687

López-Corredoira M., Betancort-Rijo J., Beckman J. E., 2002, *A&A*, **386**, 169

Maia F. F. S., Piatti A. E., Santos J. F. C., 2014, *MNRAS*, **437**, 2005

Marshall D. J., Robin A. C., Reylé C., Schultheis M., Picaud S., 2006, *A&A*, **453**, 635

Martin N. F., Ibata R. A., Bellazzini M., Irwin M. J., Lewis G. F., Dehnen W., 2004, *MNRAS*, **348**, 12

Maurya J., Joshi Y. C., 2020, *MNRAS*, **494**, 4713

Miholics M., Webb J. J., Sills A., 2016, *MNRAS*, **456**, 240

Mirabel I. F., 1982, *ApJ*, **256**, 120

Molina Lera J. A., Baume G., Gamen R., 2018, *MNRAS*, **480**, 2386

Negueruela I., Simón-Díaz S., Lorenzo J., Castro N., Herrero A., 2015, *A&A*, **584**, A77

Olano C. A., 2004, *A&A*, **423**, 895

Ortolani S., Bica E., Barbay B., 2008, *MNRAS*, **388**, 723

Park G., Koo B.-C., Kang J.-h., Gibson S. J., Peek J. E. G., Douglas K. A., Korpela E. J., Heiles C. E., 2016, *ApJ*, **827**, L27

Poggio E., Drimmel R., Smart R. L., Spagna A., Lattanzi M. G., 2017, *A&A*, **601**, A115

Poggio E., Drimmel R., Andrae R., Bailer-Jones C. A. L., Fouesneau M., Lattanzi M. G., Smart R. L., Spagna A., 2020, *Nature Astronomy*, **4**, 590

Renaud F., Agertz O., Gieles M., 2017, *MNRAS*, **465**, 3622

Reylé C., Marshall D. J., Robin A. C., Schultheis M., 2009, *A&A*, **495**, 819

Salerno G. M., Bica E., Bonatto C., Rodrigues I., 2009, *A&A*, **498**, 419

Santillán A., Sánchez-Salcedo F. J., Franco J., 2007, *ApJ*, **662**, L19

Santos J. F. C., et al., 2020, *MNRAS*, **498**, 205

Skowron D. M., et al., 2019, *Science*, **365**, 478

Taylor M. B., 2005, in Shopbell P., Britton M., Ebert R., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 347, Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*. p. 29

Wan Z., et al., 2020, *Nature*, **583**, 768

Wang H. F., et al., 2020, *ApJ*, **897**, 119

Weinberg M. D., Blitz L., 2006, *ApJ*, **641**, L33

de Grijs R., Wicker J. E., Bono G., 2014, *AJ*, **147**, 122