

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Astronomia

Lais Borbolato Soares

**Caracterização das propriedades  
quimiodinâmicas da sobredensidade estelar  
de Monoceros**

São Paulo

2022



Lais Borbolato Soares

# Caracterização das propriedades quimiodinâmicas da sobredensidade estelar de Monoceros

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica

Orientador: Dr. Hélio D. Perottoni

Coorientadora: Prof.<sup>(a)</sup> Dr.<sup>(a)</sup> Silvia Rossi

São Paulo

2022



*Dedico este trabalho aos meus falecidos familiares: meus avós João Borbolato e Maria Lopes Soares e meus tios Márcio Leres dos Santos e Vanessa Aparecida Rizzo.*



# Agradecimentos

À minha família. Em especial aos meus pais, Cristiane Borbolato Soares e José Roberto Soares, pelo apoio que me deram durante toda minha vida e por serem minhas maiores inspirações.

Aos meus amigos da graduação, que estiveram comigo em todos os momentos.

Aos meus orientadores: Hélio Dotto Perottoni e Silvia Cristina Fernandes Rossi. Vocês me deram a receita e os ingredientes para que eu pudesse me tornar a cientista que um dia, quando criança, eu sonhei em ser.

Aos amigos e colaboradores Guilherme Limberg e Yuri Abuchaim de Oliveira, por me ajudarem e tornarem meus dias de trabalho mais felizes.

Ao professor da rede municipal de ensino de Vinhedo, Diego Rodrigues Gonçalves, por me mostrar a beleza das ciências exatas.

À todas as demais pessoas que passaram pela minha jornada e contribuíram para tornar minha graduação uma parte da minha vida que eu vou sempre lembrar com muito amor e carinho.



*“Existem duas formas de viver a vida: uma é como se nada fosse um milagre, a outra é como se tudo fosse um milagre.”*

Albert Einstein

*“O amor é a única coisa que transcende o tempo e o espaço.”*

Dr. Brand, do filme Interestelar (2014)



# Resumo

A sobredensidade estelar de Monoceros foi descoberta como uma extensa subestrutura de baixa latitude, localizada acima e abaixo do disco Galáctico na direção do anticentro, estendendo-se por mais de 100 graus no céu. Sua natureza passou por um extenso debate, podendo esta ter origem Galáctica ou ser remanescente de uma galáxia anã acrescida pela Via Láctea. Trabalhos mais recentes abordam evidências que reforçam a hipótese de uma origem galáctica, além de mostrarem que existe um enorme potencial no uso da combinação de dados de astrometria do *Gaia* com grandes bases de dados espectroscópicos, o qual não foi explorado, ainda, no estudo da sobredensidade de Monoceros. Desse modo, este projeto combina dados espectroscópicos (APOGEE), fotométricos (2MASS e WISE) e astrométricos (*Gaia*) para desvendar a natureza da sobredensidade de Monoceros através das propriedades quimiodinâmicas de suas estrelas.

Primeiramente procuramos caracterizar a sobredensidade de Monoceros com estrelas gigantes M, um traçador mais numeroso e visível a grandes distâncias. Utilizando essa amostra, encontramos evidências dessa sobredensidade através da distribuição espacial no hemisfério sul e norte Galáctico a 13.0 kpc e 14.6 kpc do centro da Galáxia, respectivamente. Uma vez identificados e caracterizados os parâmetros orbitais dessa estrutura, nós fizemos uma análise quimiodinâmica de estrelas dessa sobredensidade com dados do APOGEE DR17. Nossos resultados apontam que essa sobredensidade estelar tem características de uma população estelar *in situ*, mais especificamente do disco fino. Além disso, caracterizamos pela primeira vez a sobredensidade de Monoceros em diversos espaços de parâmetros orbitais e de elementos químicos e comparamos os diferentes hemisférios, que se mostraram compatíveis nos espaços analisados.



# Abstract

The stellar overdensity of the Monoceros was discovered as an extensive low-latitude substructure located above and below the Galactic disk towards the anticenter, extending over 100 degrees across the sky. Since its discovery, its nature has been under discussion, as it may have a Galactic origin or be a remnant of a dwarf galaxy augmented by the Milky Way. More recent works address evidence that reinforces the hypothesis of a galactic origin, in addition to showing that there is enormous potential in combining astrometry data from *Gaia* with large spectroscopic databases which has not yet been explored in the study of the overdensity of Monoceros. Thus, this project combines spectroscopic (APOGEE), photometric (2MASS and WISE) and astrometric (*Gaia*) data to unravel the nature of Monoceros' overdensity through the chemodynamic properties of its stars.

First, we characterized the overdensity of Monoceros with giant stars M, a more numerous galactic structure tracer and visible at great distances. Using this sample, we found evidence of this overdensity through the spatial distribution in the southern and northern Galactic hemispheres at 13.0 kpc and 14.6 kpc from the center of the Galaxy, respectively. Once the orbital parameters of this structure were identified and characterized, we performed a chemodynamic analysis of stars of this overdensity with data from APOGEE DR17. Our results indicate that this stellar overdensity has characteristics of a stellar population *in situ*, more specifically, of the thin disk. Furthermore, we characterized for the first time the overdensity of Monoceros in different spaces of orbital parameters and chemical elements and we compared the different hemispheres, which proved to be compatible in the spaces analyzed.



# Lista de Figuras

3.1	Distribuição espacial das estrelas gigantes M após o corte em altura . . . . .	24
3.2	Distribuição espacial das estrelas gigantes M de acordo com seu intervalo de $v_\phi$ após o corte em altura . . . . .	26
3.3	Histogramas do número de estrelas por raio galactocêntrico de acordo com o intervalo de $v_\phi$ selecionado . . . . .	27
3.4	Aplicação do método GMM . . . . .	28
3.5	Projeção <i>aitoff</i> em coordenadas Galácticas ( $l$ e $b$ ) das estrelas gigantes M selecionadas como membros da estrutura de Monoceros . . . . .	29
4.1	Análise química . . . . .	33
5.1	Parâmetros orbitais . . . . .	35
5.2	Sentido do movimento das estrelas de Monoceros . . . . .	36



# Sumário

1. <i>Introdução</i> . . . . .	17
2. <i>Base de dados</i> . . . . .	19
2.1 Gigantes M . . . . .	19
2.2 APOGEE . . . . .	20
2.3 Distâncias e <i>Crossmatch</i> com o Gaia . . . . .	21
2.4 Parâmetros orbitais . . . . .	21
3. <i>Seleção das estrelas de Monoceros</i> . . . . .	23
3.1 Distância da estrutura . . . . .	27
3.2 Seleção final . . . . .	28
4. <i>Análise química</i> . . . . .	31
5. <i>Análise dinâmica</i> . . . . .	35
6. <i>Conclusões</i> . . . . .	37
<i>Referências</i> . . . . .	39



## Introdução

O desenvolvimento e o aperfeiçoamento das tecnologias empregadas no estudo da astronomia têm permitido obter dados astrométricos, fotométricos e espectroscópicos de milhares de estrelas da nossa Galáxia, a Via Láctea. Podemos citar os levantamentos fotométricos como *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS - York et al. 2000), *Two Micron All Sky Survey* (2MASS - Skrutskie et al. 2006); *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System* (PanSTARRS - Chambers et al. 2016), *Dark Energy Survey* (DES - Collaboration et al. 2005), espectroscópicos como *Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment* (APOGEE - Majewski et al. 2017), *Galactic Archaeology with HERMES* (GALAH - De Silva et al. 2015) e *The Radial Velocity Experiment* (RAVE - Steinmetz 2002) e astrométricos como *Gaia* (Collaboration et al. 2022).

A utilização desses dados têm possibilitado estudar com mais detalhes nossa Galáxia e identificar diversas subestruturas estelares presentes no disco (e.g., Newberg et al. 2002; Majewski et al. 2003; Jurić et al. 2008; Belokurov et al. 2007; Bernard et al. 2016). O estudo dessas regiões é fundamental para conhecermos melhor a estrutura da Via Láctea e a história de sua formação, que são questões chaves da astrofísica.

Nesse trabalho exploramos uma dessas subestruturas conhecida como Monoceros. Descoberta por Newberg et al. (2002) e também nomeada como Estrutura Estelar do Anticentro Galáctico (GASS, *en. Galactic Anticenter Stellar Structure*; Rocha-Pinto et al. 2003), Monoceros se apresenta como uma sobredensidade estelar de baixa latitude Galáctica, situando-se entre  $-30^\circ < b < 30^\circ$  na direção do anticentro. Por sobredensidade, entende-se estruturas que cobrem grandes áreas no céu (até milhares de graus quadrados), podendo ou não ter sua distribuição espacial bem definida (Newberg et al., 2016).

Monoceros divide-se em duas partes, uma em cada um dos hemisférios Galácticos. Estu-

dos anteriores indicam que as partes da subestrutura de Monoceros situadas nos hemisférios norte e sul galácticos encontram-se a diferentes distâncias. Xu et al. (2015) utilizaram o ajuste de isócronas para estimar a distância da subestrutura para diferentes longitudes e latitudes Galácticas. Seus resultados apontam que a parte norte da subestrutura está a 16 kpc do centro da Galáxia, enquanto a parte sul está a 13 kpc. Morganson et al. (2016) utilizaram o *software* MATCH (Dolphin 2002) para identificar a subestrutura, a partir de diagramas cor-magnitude, e estimar suas distâncias, apontando os valores de 16 e 14 kpc para os hemisférios norte e sul, respectivamente. Por outro lado, Carballo-Bello et al. (2021) utilizaram o diagrama cor-magnitude de estrelas do tipo *Blue Plume* (BP) para estimar a distância de Monoceros, resultando em distâncias heliocêntricas de 7 kpc e 4 kpc, para os hemisférios norte e sul, respectivamente. As diferenças entre os valores encontrados podem ser devidas tanto à escassez de dados a essas distâncias como aos diferentes métodos de seleção da subestrutura adotados pelos autores mencionados.

Assim como para as outras sobredensidades estelares, as hipóteses sobre a origem de Monoceros dividem-se em origem Galáctica e extragaláctica. A origem Galáctica engloba diversos cenários, podendo-se citar entre eles o empenamento e esgarçamento do disco (e.g. Momany et al. 2004), aquecimento de parte do disco Galáctico devido a passagem de uma galáxia satélite pelo disco (e.g., Hayes et al. 2018; Bergemann et al. 2018) e a corrugação do disco Galáctico (Xu et al. 2015; Price-Whelan et al. 2015). Por galáxia satélite podemos entender, nesse cenário, como galáxias de menor massa e tamanho que orbitam a Via Láctea. A origem extragaláctica indica que a sobredensidade poderia ser uma corrente mareal distribuída em uma grande área (Newberg et al. 2002; Rocha-Pinto et al. 2003) ou um anel circungaláctico (Ibata et al. 2003; Yanny et al. 2003). Atualmente, a origem Galáctica é a mais aceita pela comunidade científica (e. g., Laporte et al. 2020).

Diante desse cenário, o intuito deste projeto é combinar dados espectroscópicos, fotométricos e astrométricos disponíveis na literatura para caracterizar quimiodinamicamente a sobredensidade de Monoceros de uma forma ainda não abordada. Pretende-se explorar os sinais químicos e dinâmicos da estrutura nos dois hemisférios individualmente e discutir suas semelhanças e diferenças. Esperamos também que os resultados encontrados possam também fornecer evidências adicionais acerca de sua origem.

## Base de dados

### 2.1 Gigantes M

Para estudar as propriedades das sobredensidades de Monoceros, primeiro precisamos obter uma grande amostra de estrelas dessa subestrutura. Devido à cobertura limitada do anticentro galáctico em amostras espectroscópicas, compilamos um catálogo de estrelas gigantes M para a identificação espacial de verdadeiros membros dessas subestruturas de maneira homogênea. Além de ser uma amostra estatisticamente significativa, estrelas gigantes M são bons traçadores de estruturas na Galáxia (Majewski et al., 2003; Rocha-Pinto et al., 2003; Sharma et al., 2010; Price-Whelan et al., 2015), uma vez que são muito luminosas e podem ser identificadas a grandes distâncias.

Com o objetivo de construir a amostra de estrelas gigantes M, utilizamos o serviço CDS X-match para cruzar o *Point Source Catalog* de 471 milhões do 2MASS com os 747 milhões de fontes do AllWISE *Source Catalog* (AllWISE; Wright et al. 2010; Cutri et al. 2021) considerando-se um raio de 1 arcsec. O 2MASS mapeou o céu em três bandas fotométricas no infravermelho próximo 1,2 ( $J_S$ ), 1,6 ( $H$ ) e 2,2 ( $K_S$ ) microns, enquanto o levantamento WISE obteve dados em 3,4 ( $W1$ ), 4,6 ( $W2$ ), 12 ( $W3$ ) e 22 ( $W4$ ) microns. A partir da obtenção dos dados, estabelecemos cortes de qualidade para obter uma amostra fotométrica mais precisa e confiável. Como somente os filtros W1 e W2 foram utilizados, selecionamos apenas as fontes do AllWISE sem contaminação de objetos próximos (`ccf == 0`), com boa qualidade fotométrica (`qph == A`), objetos de fontes pontuais (`ext < 2`), não variáveis (`var < 6`), e não saturadas ( $W1 > 8$  mag e  $W2 > 7$  mag). No que se refere ao 2MASS, foram selecionadas apenas fontes pontuais com boa qualidade fotométrica (`qf1 == A`).

Embora a fotometria do 2MASS tenha uma boa eficiência para a seleção de estrelas gigantes M, a inclusão das bandas WISE melhora a qualidade da seleção desses objetos, como mostrado didaticamente em Koposov et al. (2015) e Li et al. (2016). Assim, foram adotados os seguintes critérios de seleção com base na seleção de gigantes M de Li et al. (2016)<sup>1</sup>:

$$\begin{aligned} -0.23 < (W1 - W2)_0 < 0.02, \\ 0.80 < (J - K)_0 < 1.3, \\ (J - K)_0 > 1.45 \times (W1 - W2)_0 + 1.05. \end{aligned} \tag{2.1}$$

O avermelhamento e a extinção em  $J$ ,  $K_S$ ,  $W1$  e  $W2$  foram calculados considerando-se  $(A_{J_S}, A_{K_S}, A_{W1}, A_{W2}) = (0,72, 0,306, 0,18, 0,16) \times E_{B-V}$ , onde os coeficientes de extinção são obtidos de Yuan et al. (2013) e o  $E_{B-V}$  é dado em Schlegel et al. (1998). Apesar dessas melhorias, impomos um limite superior de  $E_{B-V} \leq 0,55$  com o objetivo de se evitar que o avermelhamento afetasse a amostra ou fosse estimado de forma imprecisa. Como resultado da remoção das regiões de alta extinção, dos cortes de qualidade e dos cortes de seleção nos dados fotométricos de 2MASS e AllWISE, a amostra gigante M apresenta 230983 estrelas.

## 2.2 APOGEE

Para a realização de uma análise química, foi necessário escolher uma base de dados espectroscópios uma vez que o catálogo construído de gigantes M não incluem esse tipo de dados. Escolhemos o levantamento espectroscópico APOGEE DR17 (DR17; Abdurro'uf et al. 2022) para obter estrelas com abundâncias químicas de alta qualidade. O APOGEE é um levantamento espectroscópico estelar realizado em alta resolução ( $R \approx 22.500$ ), realizado na porção do infravermelho próximo (banda H) do espectro eletromagnético. Diante dessas características, aplicamos cortes de limpeza para gerar uma amostra com boas bandas espectroscópicas (ASPCAPFLAG == 0), com bom ajuste espectral sintético (ASPCAP CHI2 < 25) e boas estimativas abundâncias de [Fe/H], [Mg/Fe], [Al/Fe], [Mn/Fe],

<sup>1</sup> Adotamos uma pequena mudança selecionando objetos com  $(J - K)_0 > 0,8$  para selecionar mais estrelas gigantes M pobres em metal. Há uma pequena interseção com gigantes K que não afeta os objetivos do presente trabalho. Além disso, qualquer possível contaminação de estrelas anãs próximas é descartada com a precisão das distâncias usadas neste trabalho.

[Ni/Fe], [C/Fe], [N/Fe], and [O/Fe] (i.e., flagged == 0). Além disso, foram selecionadas apenas gigantes ( $4000 < \text{Teff}/\text{K} < 6000$ ,  $\log g < 3$ ) para garantir dados espectroscópicos mais confiáveis. A amostra final contém 91898 estrelas.

### 2.3 Distâncias e Crossmatch com o Gaia

Para todas as estrelas, adotamos as distâncias estimadas com o código Bayesiano de ajuste de isócronas `StarHorse`<sup>2</sup> (Santiago et al. 2016; Queiroz et al. 2018). O `StarHorse` combina dados do levantamento espectroscópico APOGEE DR17, com dados fotométricos de fontes como Pan-STARRS1, 2MASS e AllWISE, além das paralaxes do Gaia Early Data Release 3 (EDR3, Collaboration et al. 2022) para estimar as distância heliocêntricas. As velocidades radiais vieram do próprio levantamento espectroscópico utilizado.

O catálogo de estrelas gigantes M e a amostra de estrelas do APOGEE DR17 foram combinados com o Gaia EDR3 para se obter os movimentos próprios absolutos e suas incertezas. Também foram aplicados critérios para selecionar estrelas com boas soluções astrométricas, mantendo-se estrelas com `paralaxe_over_error`  $> 5$  e aplicando erros de peso unitário renormalizados dentro da faixa recomendada ( $\text{RUWE} \leq 1,4$ ; Lindegren et al. 2020).

### 2.4 Parâmetros orbitais

A análise dinâmica da estrutura depende do estudo dos parâmetros orbitais de suas estrelas. Para obtermos esses parâmetros, empregamos o potencial Galáctico axissimétrico de McMillan (2017). A distância adotada do Sol ao centro galáctico foi de 8.2 kpc (Bland-Hawthorn e Gerhard 2016), na qual a velocidade circular nesta posição é  $v_{\text{circ}} = 232.8$  km.s<sup>-1</sup> e o movimento peculiar do Sol em relação à órbita circular local é  $(U, V, W)_{\odot} = (11.10; 12.24; 7.25)$  km.s<sup>-1</sup> (Schönrich et al. 2010). As orbitais foram integradas considerando um tempo para frente de 10 Gyr. Para cada estrela, construímos um conjunto de 100 condições iniciais usando uma técnica de Monte Carlo, levando-se em consideração as incertezas observacionais em  $d$ , movimentos próprios e as velocidades de linha de visão. Os parâmetros dinâmicos finais foram tomados como as medianas das distribuições derivadas

<sup>2</sup> [https://www.sdss.org/dr16/data\\_access/value-added-catalogs/?vac\\_id=apogee-dr17-starhorse-distances,-extinctions,-and-stellar-parameters](https://www.sdss.org/dr16/data_access/value-added-catalogs/?vac_id=apogee-dr17-starhorse-distances,-extinctions,-and-stellar-parameters)

e as incertezas associadas são os percentis 16 e 84.

## Seleção das estrelas de Monoceros

Para analisar as propriedades químiodinâmicas de Monoceros, precisamos inicialmente selecionar estrelas pertencentes às subestruturas nomeadas como Monoceros nos hemisférios norte e sul. Essas sobredensidades estão localizadas a baixas latitudes Galácticas, aproximadamente entre  $-30^\circ < b < -15^\circ$  no hemisfério sul e  $15^\circ < b < 30^\circ$  no hemisfério norte (Newberg et al. 2002; Morganson et al. 2016), em uma região conhecida como *outer disk*. Por ser muito próxima ao plano Galáctico, a grande quantidade de estrelas do disco pode dificultar o estudo da região do *outer disk* e das subestruturas presentes nele. De forma a localizar mais claramente a estrutura de Monoceros, fez-se necessário minimizar a quantidade de estrelas do disco presente na amostra. Assim, a exemplo de Morganson et al. (2016), aplicamos um corte em altura em relação ao plano Galáctico ( $Z$ ). Excluimos estrelas da amostra de gigantes M da região  $-2.5 < Z(\text{kpc}) < 3$  de forma que duas novas amostras foram criadas: (I) Estrelas do hemisfério norte com  $Z > 3\text{kpc}$ ; (II) estrelas do hemisfério sul com  $Z < -2.5\text{kpc}$ . Deve-se notar que os limites são diferentes para cada hemisfério. Isso é devido ao fato de Monoceros Sul ser mais próximo do plano Galáctico do que no hemisfério norte. Morganson et al. (2016) utilizam o valor de  $Z < -2,0\text{kpc}$  para estrelas do hemisfério sul. Entretanto, na nossa mostra, a quantidade de estrelas pertencentes ao disco da Galáxia no anticentro nessa altura dificulta a visualização da estrutura nesse hemisfério.

A Figura 3.1 mostra a distribuição espacial das estrelas após o corte em altura. O primeiro painel apresenta a distribuição no plano  $[X_{GC}, Y_{GC}]$  das estrelas do hemisfério norte. O painel do meio, similar ao primeiro painel, contém as estrelas do hemisfério sul. A linha tracejada apresentada nesses dois primeiros painéis indica o raio galactocêntrico do Sol. As estrelas localizadas internamente a esse raio aparecem com maior transparência

pois estão na direção oposta ao nosso objeto de estudo. A faixa hachurada indica a posição esperada para Monoceros segundo Morganson et al. (2016). O último painel mostra a distribuição das estrelas no plano  $[X_{GC}, Z_{GC}]$  e a linha tracejada indica o plano Galáctico. Podemos observar na Figura 3.1 que a amostra de estrelas na região do *outer disk* atinge as distâncias, no plano  $[X_{GC}, Y_{GC}]$ , necessárias para estudarmos a estrutura.

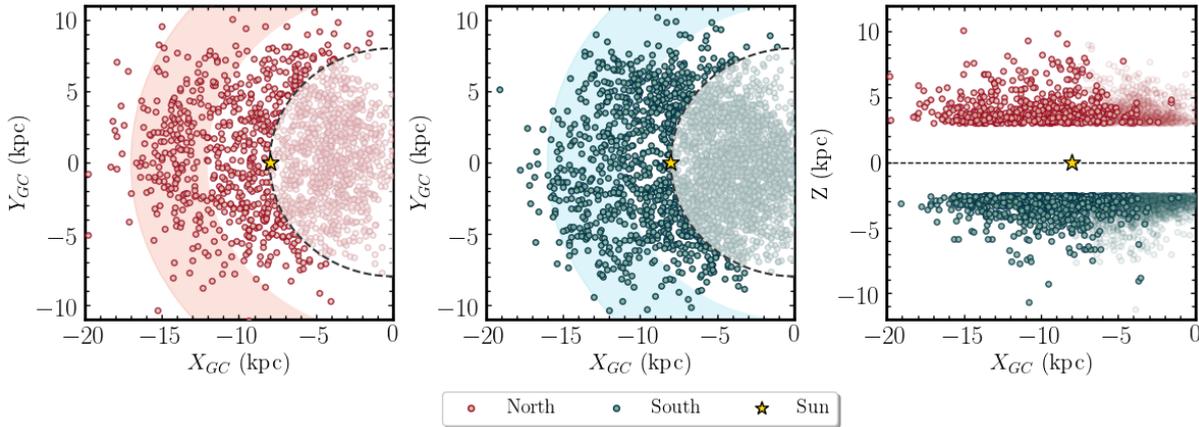


Figura 3.1: O primeiro e o segundo painéis apresentam a distribuição espacial dos dados no espaço  $[X_{GC}, Y_{GC}]$  para o hemisfério norte e hemisfério sul, respectivamente. A faixa hachurada indica a posição esperada para Monoceros segundo Morganson et al. (2016). A linha tracejada indica o raio galactocêntrico do Sol  $R_{GC} \approx 8$  kpc e a região interna a essa marcação possui maior transparência por não ser a região de interesse desse estudo. A estrela amarela indica a posição do Sol ( $[X_{GC}, Y_{GC}] = [-8, 0]$ ). O último painel indica a distribuição espacial no plano  $[X_{GC}, Z_{GC}]$ , a linha tracejada indica o plano Galáctico. As estrelas do hemisfério norte encontram-se acima de 3kpc de altura e as do hemisfério sul abaixo de 2.5kpc.

Não podemos assumir que todas as estrelas localizadas na região esperada para a estrutura pertencem a ela. Precisamos verificar inicialmente a existência de uma assinatura característica das estrelas de Monoceros para melhor selecioná-las. A busca por essa assinatura é motivada pelo fato de ainda observarmos Monoceros como uma estrutura espacialmente coesa, em ambos os hemisférios. Então, esperamos que a estrutura ainda seja coesa em alguns espaços cinemáticos, como o espaço de velocidades.

Iniciamos a busca verificando a velocidade em torno do centro Galáctico ( $v_\phi$ ) das estrelas. Estrelas das diferentes componentes da Galáxia, como disco e halo, possuem valores de  $v_\phi$  diferentes. A Figura 3.2 mostra a separação das estrelas presentes na Figura 3.1 de acordo com intervalos de  $v_\phi$ , permitindo visualizar espacialmente as estrelas com cada um desses intervalos separadamente.

Os painéis superiores da Figura 3.2 apresentam a distribuição espacial dos dados do hemisfério norte no espaço  $[X_{GC}, Y_{GC}]$ , enquanto o hemisfério sul é apresentado nos painéis

inferiores. Cada uma das cinco colunas representa um intervalo de  $v_\phi$ :  $0 < v_\phi$  (km/s)  $< 50$ ;  $50 < v_\phi$  (km/s)  $< 100$ ;  $100 < v_\phi$  (km/s)  $< 150$ ;  $150 < v_\phi$  (km/s)  $< 200$  e  $200 < v_\phi$  (km/s)  $< 250$ . O conteúdo sobreposto de cada intervalo de  $v_\phi$  é o que forma a distribuição mostrada na Figura 3.1.

Os dois primeiros intervalos da Figura 3.2, correspondendo ao intervalo total de  $0 < v_\phi$  (km/s)  $< 100$ , são tipicamente associados às velocidades de estrelas do halo (Bland-Hawthorn e Gerhard 2016). Notamos a presença de algumas estrelas na região esperada para Monoceros em ambos os hemisférios, mas não há a formação visual de uma estrutura. No terceiro e quarto painéis, correspondendo ao intervalo total de  $100 < v_\phi$  (km/s)  $< 200$ , associado ao intervalo de velocidades do disco espesso (Bland-Hawthorn e Gerhard 2016), observamos um comportamento semelhante ao analisado para os primeiros painéis. Notamos a existência de uma concentração de estrelas na faixa esperada para a estrutura no painel inferior da quarta coluna, na região em torno de  $[X_{GC}, Y_{GC}] = [-12; -5]$ . Essa concentração pode estar associada a Monoceros, mas é necessário estudos mais detalhados para confirmar essa hipótese. Por fim, analisamos os painéis da quinta coluna, intervalo de  $200 < v_\phi$  (km/s)  $< 250$ , associado tipicamente a estrelas do disco fino (Bland-Hawthorn e Gerhard 2016). As estrelas do disco fino encontram-se majoritariamente até  $Z \approx 1$  kpc (Bland-Hawthorn e Gerhard 2016), por esse motivo não espera-se encontrar uma concentração de estrelas nesse intervalo, mas observamos a formação de uma estrutura sobreposta à faixa indicada para Monoceros em ambos os hemisférios, sendo mais acentuada no hemisfério norte. Notamos também que há menos estrelas na região entre a faixa hachurada e o raio galactocêntrico do Sol nos painéis da quinta coluna em comparação com os demais painéis, reforçando que não é esperado muitas estrelas nesse intervalo de velocidades nessa altura do plano Galáctico. Por esse motivo, acreditamos que as concentrações de estrelas aparente nos painéis da quinta coluna sejam correspondentes à estrutura de Monoceros.

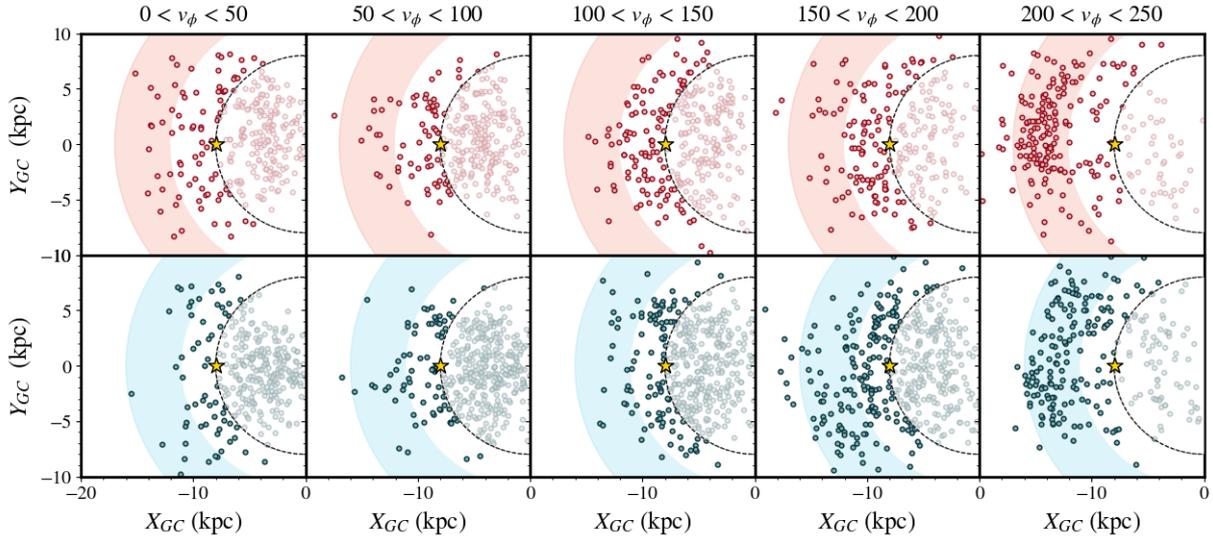


Figura 3.2: Distribuição espacial das estrelas no plano  $[X_{GC}, Y_{GC}]$  de acordo com sua velocidade ao redor do centro Galáctico ( $v_\phi$ ). As colunas indicam os intervalos de  $v_\phi$  considerados. Os painéis superiores apresentam as estrelas do hemisfério norte com  $Z > 3\text{kpc}$  e os painéis inferiores apresentam as estrelas do hemisfério sul com  $Z < -2.5\text{kpc}$ . As faixas hachuradas indicam a localização esperada para Monoceros segundo Morganson et al. (2016).

De modo a confirmar a sobredensidade observada, transformamos os dados presentes na Figura 3.2 em histogramas da quantidade de estrelas por raio galactocêntrico. A Figura 3.3 apresenta esses histogramas. Novamente, os painéis superiores indicam os dados do hemisfério norte, enquanto o painéis inferiores apresentam os dados do hemisfério sul. As colunas indicam os intervalos de  $v_\phi$  e a linha tracejada em todos os painéis indica um raio galactocêntrico referente à posição do Sol. A parte interior a essa linha apresenta transparência como na Figura 3.2. Com os histogramas, a identificação das sobredensidades torna-se mais fácil. Não é observado um pico de estrelas na região de interesse nas quatro primeiras colunas, mas podemos notar um pico significativo coincidente com essa região no intervalo de  $200 < v_\phi \text{ (km/s)} < 250$ . A diminuição do número de estrelas na região próxima ao Sol nesses painéis também pode ser observada.

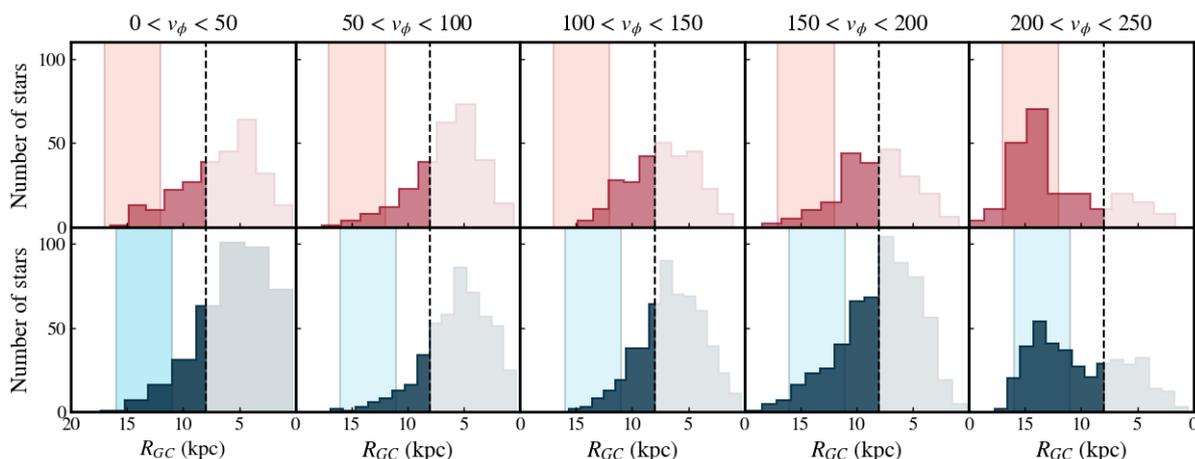


Figura 3.3: Histogramas do número de estrelas por raio galactocêntrico ( $R_{GC}$ ) de acordo com o intervalo de  $v_\phi$  selecionado. Os intervalos de  $v_\phi$  estão indicados na parte superior da Figura. Os painéis superiores apresentam os dados do hemisfério norte, enquanto os inferiores mostram os dados do hemisfério sul. A faixa hachurada indica a posição esperada para Monoceros. A linha vertical tracejada indica o raio galactocêntrico do Sol

### 3.1 Distância da estrutura

Identificamos visualmente a sobredensidade de Monoceros nos dois hemisférios. No entanto, precisamos realizar uma análise estatística para determinar com maior confiabilidade a posição da estrutura.

Escolhemos o *Gaussian Mixture Models* (GMM) para selecionar as estrelas de Monoceros. O GMM consiste em ajustar uma combinação de  $N$  distribuições gaussianas. O melhor ajuste indica  $N = 2$  gaussianas para os painéis do intervalo  $200 < v_\phi < 250$ , nos quais identificamos a sobredensidade. Nós utilizamos o `scikit-learn` (Pedregosa et al. 2011) do pacote `GaussianMixture`, e a maximização do algoritmo foi baseada em Dempster et al. (1977) para encontrar o melhor modelo. A Figura 3.4 mostra os ajustes gaussianos. O padrão da linha referente ao raio galactocêntrico do Sol e a transparência da região interna foi mantida. O painel da esquerda apresenta o ajuste para as estrelas do hemisfério norte com  $200 < v_\phi < 250$  e o painel da direita o ajuste para o hemisfério sul entre  $200 < v_\phi < 250$ . Os valores de  $\mu$  e  $\sigma$  indicados representam a média e o desvio padrão, respectivamente, das gaussianas associadas a estrutura. A média e o intervalo de  $1\sigma$  foram identificado pelas linhas coloridas.

Encontramos que a subestrutura no hemisfério norte está localizada centralmente em  $R_{GC} = 14.6\text{kpc}$  e estende-se aproximadamente de  $12.7\text{kpc}$  a  $16.5\text{kpc}$  do centro Galáctico.

Já a subestrutura no hemisfério sul apresenta  $R_{GC} = 13.0\text{kpc}$  e estende-se de  $11.2\text{kpc}$  a  $14.8\text{kpc}$ . Morganson et al. (2016) indicam o valor de  $16\text{kpc}$  para o hemisfério norte e  $14\text{kpc}$  para o hemisfério sul. Li et al. (2017) indicam  $15\text{kpc}$  e  $13\text{kpc}$  para o norte e sul, respectivamente. Nosso resultado está em concordância com os valores apresentados por trabalhos anteriores. O fato de ser uma subestrutura extensa, além dos diferentes métodos de medição utilizados para determinar sua posição podem justificar os diferentes valores apresentados para a posição de Monoceros.

Em nossa análise, utilizaremos o valor de  $1\sigma$  para a extensão da subestrutura de modo a selecionar a região de maior concentração das estrelas e proporcionar um estudo químico e dinâmico minimizando a contaminação de estrelas não pertencentes à Monoceros.

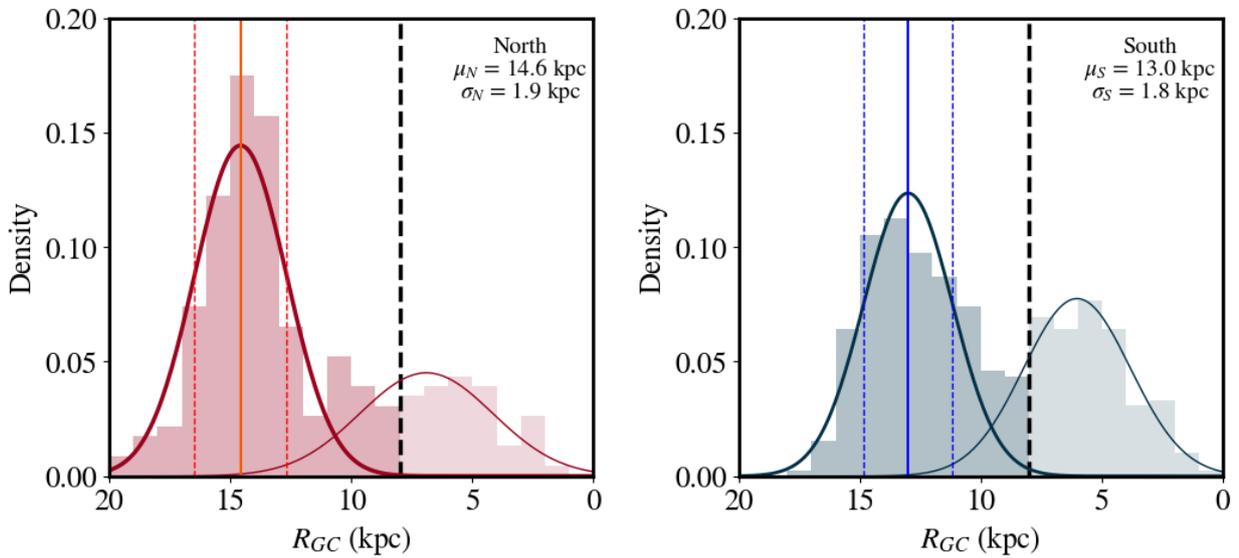


Figura 3.4: Histograma da densidade de estrelas, com  $200 < v_\phi$  (km/s)  $< 250$ , por raio galactocêntrico ( $R_{GC}$ ) dos dados do hemisfério norte (painel da esquerda) e do hemisfério sul (painel da direita). As gaussianas foram ajustadas com o método GMM. As linhas coloridas indicam a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) da gaussiana relacionada ao pico associado à Monoceros. A linha vertical tracejada indica o raio galactocêntrico do Sol  $R_{GC} \approx 8\text{kpc}$ .

### 3.2 Seleção final

Com base nas análises adotadas até o momento, conseguimos identificar espacialmente a estrutura, encontrar uma assinatura cinemática característica de suas estrelas e determinar com maior confiabilidade sua posição. Assim, podemos selecionar estrelas candidatas a pertencerem à estrutura de Monoceros com base nos critérios:

$$\text{Norte} \begin{cases} \text{Altura: } Z > 3 \text{ kpc} \\ \text{Velocidade: } 200 < v_\phi \text{ (km/s)} < 250 \\ \text{Distância: } 12.7 < R_{GC} \text{ (kpc)} < 16.5 \end{cases} \quad \text{Sul} \begin{cases} Z < -2.5 \text{ kpc} \\ 200 < v_\phi \text{ (km/s)} < 250 \\ 11.2 < R_{GC} \text{ (kpc)} < 14.8 \end{cases}$$

Nossa amostra final de estrelas gigantes M candidatas a estrutura de Monoceros no hemisfério norte é formada por 121 estrelas e no hemisfério sul por 143 estrelas.

Em coordenadas Galácticas, o hemisfério norte estende-se entre  $104^\circ < l < 264^\circ$  e  $15^\circ < b < 50^\circ$  e no hemisfério sul entre  $85^\circ < l < 262^\circ$  e  $-55^\circ < b < -15^\circ$ .

A Figura 3.5 mostra a projeção *aitoff* em coordenadas Galácticas das amostras finais de Monoceros. Ao fundo são projetadas todas as estrelas gigantes M da amostra inicial, sem cortes. Essa figura está em concordância com a Figura 2 de Slater et al. (2014).

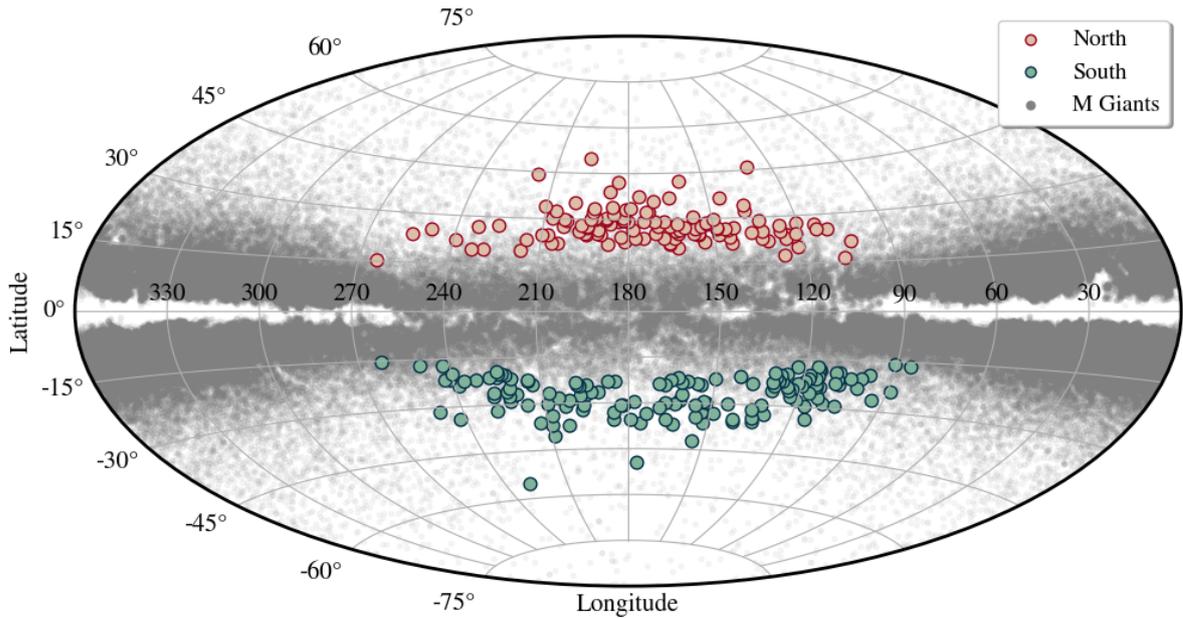


Figura 3.5: Projeção *aitoff* em coordenadas Galácticas ( $l$  e  $b$ ) das estrelas gigantes M selecionadas como membros da estrutura de Monoceros. Ao fundo, todas as estrelas gigantes M do catálogo foram projetadas



## Análise química

Para explorarmos em detalhes os padrões de abundância química das sobredensidades, aplicamos os critérios apresentados na seção 3.2 no banco de dados do levantamento espectroscópico APOGEE DR17, uma vez que as gigantes M não apresentam dados espectroscópicos. Obtivemos 42 estrelas na região de Monoceros no hemisfério norte e 32 estrelas no hemisfério sul.

Analizamos as abundâncias químicas das estrelas de Monoceros nos espaços  $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ - $[\text{Fe}/\text{H}]$ ,  $[\text{Mg}/\text{Mn}]$ - $[\text{Al}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Al}/\text{Fe}]$ - $[\text{Fe}/\text{H}]$ ,  $[\text{Ni}/\text{Fe}]$ - $[(\text{C}+\text{N})/\text{O}]$  (apresentados na Figura 4.1). Os elementos químicos podem ser formados em diferentes eventos. Por exemplos, o Mg é formado principalmente em eventos explosivos como SNe II em estrelas de alta massa (Woosley e Weaver 1995). O Al é sintetizado majoritariamente em estrelas massivas, mas por um processo de nucleossíntese diferente, presente com mais frequência em estrelas que estão na fase de evolução do ramo das gigantes vermelhas (RGB) e do ramo assintótico das gigantes (AGB) (Ventura et al. 2012). No entanto, elementos do pico do ferro, como o Ni e o Fe, são formados principalmente a partir de SN Ia (Iwamoto et al. 1999). Os processos que formam esses e os demais elementos, em ambientes distintos, podem ocorrer em menor ou maior frequência. Com isso, populações acretadas ou aquelas formadas *in situ* podem apresentar padrões de elementos químicos distintos. Dessa forma, analisar o padrão químico em diferentes espaços é importante para determinar a possível origem de Monoceros.

A Figura 4.1 apresenta as abundâncias químicas das estrelas analisadas. A amostra completa de estrelas do APOGEE DR17 é projetada no fundo de todos os painéis. Podemos notar que as estrelas de Monoceros no hemisfério sul sobrepõem-se às estrelas da estrutura no hemisfério norte em todos os painéis, indicando compatibilidade química entre as duas

populações. A análise da metalicidade média das estrelas das subestruturas confirmam esse resultado. Monoceros no hemisfério norte apresenta  $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{média}} \approx -0.59$ , enquanto no hemisfério sul temos  $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{média}} \approx -0.52$ .

Além disso, a região na qual encontram-se as estrelas da subestrutura é dominada por populações do disco Galáctico (regiões com maior densidade de estrelas na Figura 4.1), sendo mais precisamente do disco fino. Isso indica que as estrelas de Monoceros, nos dois hemisférios, compartilham propriedades químicas mais compatíveis com as da Via Láctea. As propriedades químicas estão em concordância com o intervalo de  $v_\phi$  compatível com o disco fino apresentado por essas estrelas.

Laporte et al. (2020) analisam o espaço  $[\text{Mg}/\text{Fe}]-[\text{Fe}/\text{H}]$  de sua amostra de estrelas da subestrutura do hemisfério norte. Suas estrelas aparecem na região entre  $0.02 < [\text{Mg}/\text{Fe}] < 0.16$  e  $-0.75 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.30$ . Os valores encontrados para as estrelas da nossa seleção estão entre  $0.07 < [\text{Mg}/\text{Fe}] < 0.20$  e  $-0.83 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.44$ . Nosso resultado é compatível com aqueles apresentados em Laporte et al. (2020).

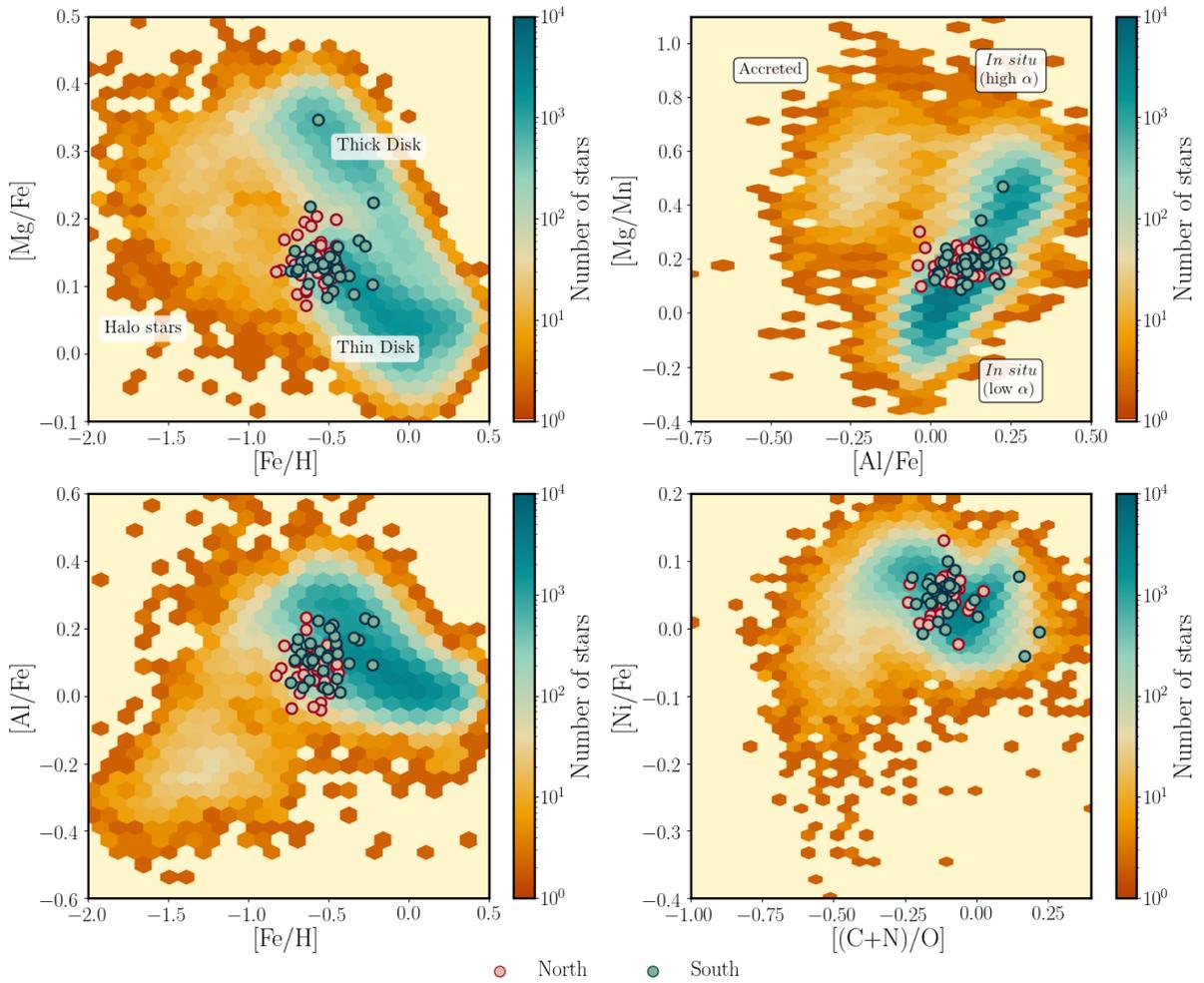


Figura 4.1: As abundâncias químicas das amostras do APOGEE de estrelas de Monoceros nos hemisférios norte e sul no plano  $[Mg/Fe]$ – $[Fe/H]$  (canto superior esquerdo),  $[Mg/Mn]$ – $[Al/Fe]$  (canto superior direito),  $[Al/Fe]$ – $[Fe/H]$  (canto inferior esquerdo) e  $[Ni/Fe]$ – $[(C+N)/O]$  (canto inferior direito). No fundo foram projetadas todas as estrelas do APOGEE DR17.



## Análise dinâmica

Analizamos alguns parâmetros orbitais das estrelas de Monoceros de modo a verificar seu comportamento dinâmico. A Figura 5.1 mostra a análise da energia no painel da esquerda e da excentricidade orbital das estrelas no painel da direita, ambos em relação ao momento angular na direção z. Ao fundo estão projetadas todas as estrelas do APOGEE. A região esperada para estrelas do disco Galáctico é a de maior concentração (em azul) em ambos os painéis. Nossa amostra de estrelas de Monoceros nos dois hemisférios se sobrepõem a essa região esperada para estrelas do disco, estando em concordância com a análise química e as características cinemáticas encontradas anteriormente. A sobreposição das estrelas dos dois hemisférios também pode ser observada.

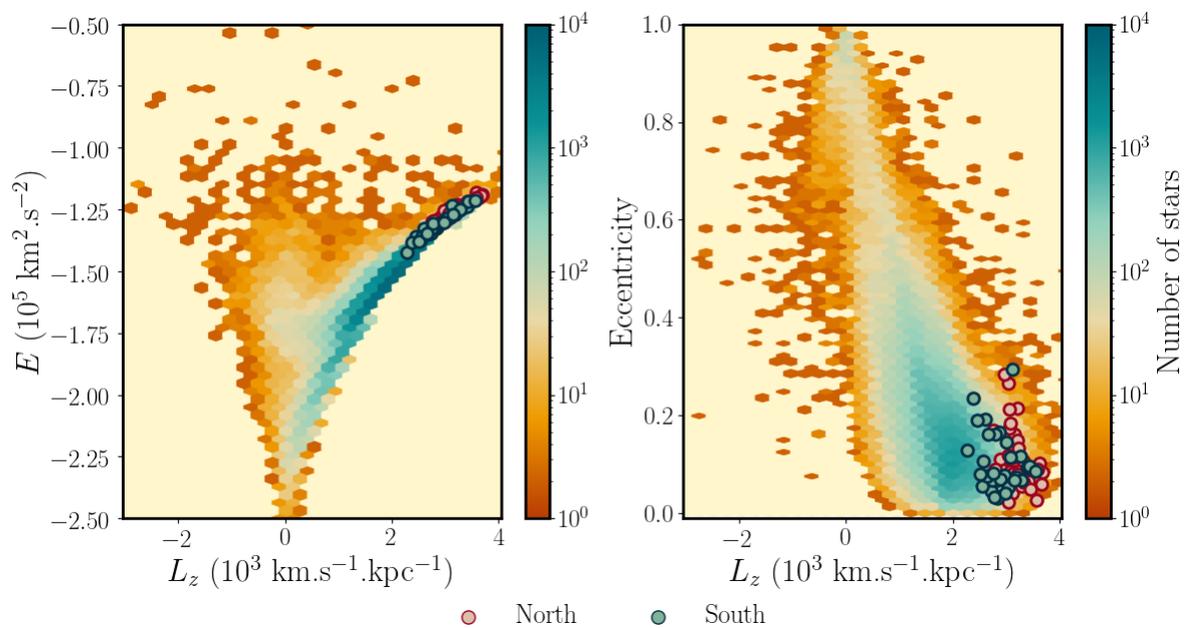


Figura 5.1: Parâmetros orbitais das amostras do APOGEE de estrelas de Monoceros nos hemisférios norte e sul nos planos energia( $E$ ) e momento angular na direção z ( $L_z$ ) no painel da esquerda e excentricidade e  $L_z$  no painel da direita. No fundo foram projetadas todas as estrelas do APOGEE DR17.

A Figura 5.2 mostra a direção de movimento das estrelas no plano  $[X_{GC}, Y_{GC}]$  (painel da esquerda) e no plano  $[Y_{GC}, Z_{GC}]$  (painel da direita). Podemos observar que os vetores de velocidade mostram uma co-rotação com o disco da Galáxia. Esse comportamento é similar ao esperado para estrelas *in situ*. No caso de estrelas acretadas, elas não tenderiam a seguir a direção de rotação do disco Galáctico, mas um movimento mais excêntrico e com grande afastamento do plano Galáctico ( $Z_{GC} \sim 10$  kpc). Esse resultado contribui como mais uma evidência que reforça a origem Galáctica.

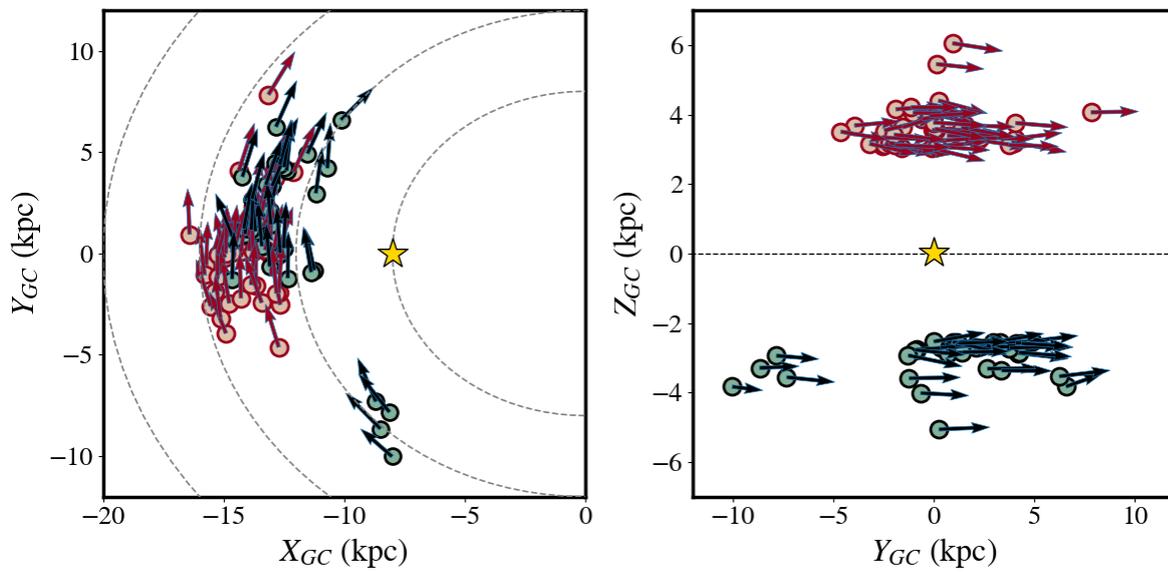


Figura 5.2: O painel da esquerda apresenta o espaço  $[X_{GC}, Y_{GC}]$ , enquanto o painel da direita apresenta  $[Y_{GC}, Z_{GC}]$ . As setas indicam o sentido de movimento das estrelas. A estrela amarela indica a posição do Sol. No primeiro painel, as linhas tracejadas indicam intervalos de raio galactocêntrico, enquanto a linha tracejada no segundo painel indica o plano Galáctico

## Conclusões

Nesse trabalho, apresentamos uma análise inédita das propriedades quimiodinâmicas das estrelas da sobredensidade estelar de Monoceros, em ambos os hemisférios Galácticos. Para isso, construímos um catálogo de estrelas gigantes M a partir de dados fotométricos do 2MASS e WISE e selecionamos dados do levantamento espectroscópico de alta resolução APOGEE DR17.

Com a utilização das estrelas gigantes M, encontramos uma maneira de selecionar membros da estrutura com critérios simples e facilmente reprodutíveis, baseados em sua posição espacial e cinemática. Identificamos que a estrutura, em ambos os hemisférios, apresenta um intervalo bem definido de velocidades em torno do centro Galáctico, sendo  $200 < v_\phi \text{ (km/s)} < 250$ .

As estrelas membros de Monoceros apresentaram química compatível com estrelas tipicamente pertencentes ao disco fino da Galáxia em diferentes espaços de abundâncias químicas. Além disso, a estrutura no hemisfério norte e sul apresentam composição química similar, o que sugere que as estruturas do hemisfério norte e sul podem ter se formado a partir de um mesmo evento. No entanto, um estudo da idade das estrelas dessa estrutura é necessário para confirmar essa hipótese.

Os resultados obtidos a partir da análise dinâmica estão em concordância com os resultados do estudo químico. Todas as análises indicaram uma população compatível com populações formadas no disco fino da Via Láctea, mas que se encontram a 5 kpc do plano da Galáxia.

Esse trabalho abre portas para futuros estudos do processo de formação dessas subestruturas. A determinação da idade da formação dessas subestruturas tem vínculo com o mecanismo de formação delas. Ou seja, se a origem de Monoceros foi a perturbação

do disco via a passagem da galáxia anã de Sagittarius, como sugerido por Laporte et al. (2020), será possível associar a passagem da galáxia satélite com a idade estimada para as estrelas dessa subestrutura.

## Referências Bibliográficas

- Abdurro'uf Accetta K., Aerts C., Aguirre V. S., Ahumada R., Ajsaonkar N., Ak N. F., Alam S., Prieto C. A., Almeida A., Anders F., et al., The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2022, vol. 259, p. 35
- Belokurov V., Evans N. W., Bell E. F., Irwin M. J., Hewett P. C., Koposov S., Rockosi C. M., Gilmore G., Zucker D. B., Fellhauer M., Wilkinson M. I., Bramich D. M., Vidrih S., Rix H. W., Beers T. C., Schneider D. P., Barentine J. C., Brewington H., Brinkmann J., Harvanek M., Krzesinski J., Long D., Pan K., Snedden S. A., Malanushenko O., Malanushenko V., The Hercules-Aquila Cloud, *ApJ*, 2007, vol. 657, p. L89
- Bergemann M., Sesar B., Cohen J. G., Serenelli A. M., Sheffield A., Li T. S., Casagrande L., Johnston K. V., Laporte C. F., Price-Whelan A. M., et al., Two chemically similar stellar overdensities on opposite sides of the plane of the Galactic disk, *Nature*, 2018, vol. 555, p. 334
- Bernard E. J., Ferguson A. M. N., Schlafly E. F., Martin N. F., Rix H.-W., Bell E. F., Finkbeiner D. P., Goldman B., Martínez-Delgado D., Sesar B., Wyse R. F. G., Burgett W. S., Chambers K. C., Draper P. W., Hodapp K. W., Kaiser N., Kudritzki R.-P., Magnier E. A., Metcalfe N., Wainscoat R. J., Waters C., A Synoptic Map of Halo Substructures from the Pan-STARRS1  $3\pi$  Survey, *MNRAS*, 2016, vol. 463, p. 1759
- Bland-Hawthorn J., Gerhard O., The galaxy in context: structural, kinematic and integrated properties, arXiv preprint arXiv:1602.07702, 2016

- Bland-Hawthorn J., Gerhard O., The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties, *ARA&A*, 2016, vol. 54, p. 529
- Carballo-Bello J. A., Martínez-Delgado D., Corral-Santana J. M., Alfaro E. J., Navarrete C., Vivas A. K., Catelan M., A revised view of the Canis Major stellar overdensity with DECam and Gaia: new evidence of a stellar warp of blue stars, *MNRAS*, 2021, vol. 501, p. 1690
- Chambers K. C., Magnier E., Metcalfe N., Flewelling H., Huber M., Waters C., Denneau L., Draper P., Farrow D., Finkbeiner D., et al., The pan-starrs1 surveys, arXiv preprint arXiv:1612.05560, 2016
- Collaboration D. E. S., et al., The dark energy survey, arXiv preprint astro-ph/0510346, 2005
- Collaboration G., Galluccio L., Delbo M., De Angeli F., Pauwels T., Tanga P., Mignard F., Cellino A., Brown A., Muinonen K., et al., Gaia Data Release 3: Reflectance spectra of Solar System small bodies, *Astronomy & Astrophysics*, 2022
- Cutri R. e., Wright E., Conrow T., Fowler J., Eisenhardt P., Grillmair C., Kirkpatrick J., Masci F., McCallon H., Wheelock S., et al., VizieR online data catalog: AllWISE data release (Cutri+ 2013), *VizieR Online Data Catalog*, 2021, pp II–328
- De Silva G. M., Freeman K. C., Bland-Hawthorn J., Martell S., De Boer E. W., Asplund M., Keller S., Sharma S., Zucker D. B., Zwitter T., et al., The GALAH survey: scientific motivation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, vol. 449, p. 2604
- Dempster A. P., Laird N. M., Rubin D. B., Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1977, vol. 39, p. 1
- Dolphin A. E., Numerical methods of star formation history measurement and applications to seven dwarf spheroidals, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2002, vol. 332, p. 91
- Hayes C. R., Majewski S. R., Hasselquist S., Beaton R. L., Cunha K., Smith V. V., Price-Whelan A. M., Anguiano B., Beers T. C., Carrera R., Fernández-Trincado J. G.,

- Frinchaboy P. M., García-Hernández D. A., Lane R. R., Nidever D. L., Nitschelm C., Roman-Lopes A., Zamora O., Disk-like Chemistry of the Triangulum-Andromeda Overdensity as Seen by APOGEE, *ApJ*, 2018, vol. 859, p. L8
- Ibata R. A., Irwin M., Lewis G., Ferguson A., Tanvir N., One ring to encompass them all: a giant stellar structure that surrounds the Galaxy, *MNRAS*, 2003, vol. 340, p. L21
- Iwamoto K., Brachwitz F., Nomoto K., Kishimoto N., Umeda H., Hix W. R., Thielemann F.-K., Nucleosynthesis in Chandrasekhar mass models for type IA supernovae and constraints on progenitor systems and burning-front propagation, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 1999, vol. 125, p. 439
- Jurić M., Ivezić Ž., Brooks A., Lupton R. H., Schlegel D., Finkbeiner D., Padmanabhan N., Bond N., Sesar B., Rockosi C. M., et al., The Milky Way tomography with SDSS. I. Stellar number density distribution, *ApJ*, 2008, vol. 673, p. 864
- Koposov S. E., Belokurov V., Zucker D. B., Lewis G. F., Ibata R. A., Olszewski E. W., López-Sánchez Á., Hyde E., Exposing Sgr tidal debris behind the Galactic disc with M giants selected in WISE $\cap$  2MASS, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, vol. 446, p. 3110
- Laporte C. F., Belokurov V., Koposov S. E., Smith M. C., Hill V., Chemodynamical properties of the Anticentre Stream: a surviving disc fossil from a past satellite interaction, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 2020, vol. 492, p. L61
- Li T., Balbinot E., Mondrik N., Marshall J. L., Yanny B., Bechtol K., Drlica-Wagner A., Oscar D., Santiago B., Simon J. D., et al., Discovery of a stellar overdensity in Eridanus–Phoenix in the Dark Energy Survey, *ApJ*, 2016, vol. 817, p. 135
- Li T. S., Sheffield A. A., Johnston K. V., Marshall J. L., Majewski S. R., Price-Whelan A. M., Damke G. J., Beaton R. L., Bernard E. J., Richardson W., et al., Exploring Halo Substructure with Giant Stars. XV. Discovery of a Connection between the Monoceros Ring and the Triangulum–Andromeda Overdensity?, *The Astrophysical Journal*, 2017, vol. 844, p. 74
- Lindegren S., Albertsson P., Bäck T., Jensen H., Palm S., Aneheim E., Realizing clinical

- trials with astatine-211: the chemistry infrastructure, *Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals*, 2020, vol. 35, p. 425
- Majewski S. R., Schiavon R. P., Frinchaboy P. M., Prieto C. A., Barkhouser R., Bizyaev D., Blank B., Brunner S., Burton A., Carrera R., et al., The apache point observatory galactic evolution experiment (APOGEE), *The Astronomical Journal*, 2017, vol. 154, p. 94
- Majewski S. R., Skrutskie M. F., Weinberg M. D., Ostheimer J. C., A Two Micron All Sky Survey View of the Sagittarius Dwarf Galaxy. I. Morphology of the Sagittarius Core and Tidal Arms, *ApJ*, 2003, vol. 599, p. 1082
- McMillan P. J., The mass distribution and gravitational potential of the Milky Way, *MNRAS*, 2017, vol. 465, p. 76
- Momany Y., Zaggia S. R., Bonifacio P., Piotto G., De Angeli F., Bedin L. R., Carraro G., Probing the Canis Major stellar over-density as due to the Galactic warp, *A&A*, 2004, vol. 421, p. L29
- Morganson E., Conn B., Rix H.-W., Bell E. F., Burgett W. S., Chambers K., Dolphin A., Draper P. W., Flewelling H., Hodapp K., Kaiser N., Magnier E. A., Martin N. F., Martinez-Delgado D., Metcalfe N., Schlafly E. F., Slater C. T., Wainscoat R. J., Waters C. Z., Mapping the Monoceros Ring in 3D with Pan-STARRS1, *ApJ*, 2016, vol. 825, p. 140
- Newberg H. J., Carlin J. L., et al., Tidal Streams in the Local Group and Beyond, *Astrophysics and Space Science Library*, 2016, vol. 420
- Newberg H. J., Yanny B., Rockosi C., Grebel E. K., Rix H.-W., Brinkmann J., Csabai I., Hennessy G., Hindsley R. B., Ibata R., et al., The ghost of Sagittarius and lumps in the halo of the Milky Way, *ApJ*, 2002, vol. 569, p. 245
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., et al., Scikit-learn: Machine learning in Python, *the Journal of machine Learning research*, 2011, vol. 12, p. 2825

- Price-Whelan A. M., Johnston K. V., Sheffield A. A., Laporte C. F., Sesar B., A reinterpretation of the Triangulum–Andromeda stellar clouds: a population of halo stars kicked out of the Galactic disc, *MNRAS*, 2015, vol. 452, p. 676
- Queiroz A. B. d. A., Anders F., Santiago B. X., Chiappini C., Steinmetz M., Dal Ponte M., Stassun K. G., da Costa L. N., Maia M. A. G., Crestani J., et al., StarHorse: a Bayesian tool for determining stellar masses, ages, distances, and extinctions for field stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, vol. 476, p. 2556
- Rocha-Pinto H. J., Majewski S. R., Skrutskie M., Crane J. D., Tracing the Galactic anti-center stellar stream with 2MASS M giants, *ApJ*, 2003, vol. 594, p. L115
- Santiago B. X., Brauer D. E., Anders F., Chiappini C., Queiroz A. B., Girardi L., Rocha-Pinto H. J., Balbinot E., Da Costa L. N., Maia M. A., et al., Spectro-photometric distances to stars: A general purpose Bayesian approach, *Astronomy & Astrophysics*, 2016, vol. 585, p. A42
- Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M., Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds, *ApJ*, 1998, vol. 500, p. 525
- Schönrich R., Binney J., Dehnen W., Local kinematics and the local standard of rest, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, vol. 403, p. 1829
- Sharma S., Johnston K. V., Majewski S. R., Muñoz R. R., Carlberg J. K., Bullock J., Group Finding in the Stellar Halo Using M-giants in the Two Micron All Sky Survey: An Extended View of the Pisces Overdensity?, *ApJ*, 2010, vol. 722, p. 750
- Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R., Weinberg M. D., Schneider S., Carpenter J. M., Beichman C., Capps R., Chester T., Elias J., Huchra J., Liebert J., Lonsdale C., Monet D. G., Price S., Seitzer P., Jarrett T., Kirkpatrick J. D., Gizis J. E., Howard E., Evans T., Fowler J., Fullmer L., Hurt R., Light R., Kopan E. L., Marsh K. A., McCallon H. L., Tam R., Van Dyk S., Wheelock S., The Two Micron All Sky Survey (2MASS), *AJ*, 2006, vol. 131, p. 1163
- Slater C. T., Bell E. F., Schlafly E. F., Morganson E., Martin N. F., Rix H.-W., Peñarrubia J., Bernard E. J., Ferguson A. M., Martinez-Delgado D., et al., The complex structure

of stars in the outer Galactic Disk as revealed by Pan-STARRS1, *The Astrophysical Journal*, 2014, vol. 791, p. 9

Steinmetz M., RAVE: The radial velocity experiment, arXiv preprint astro-ph/0211417, 2002

Ventura P., D'Antona F., Di Criscienzo M., Carini R., D'Ercole A., et al., SUPER-AGB-AGB EVOLUTION AND THE CHEMICAL INVENTORY IN NGC 2419, *The Astrophysical Journal Letters*, 2012, vol. 761, p. L30

Woosley S., Weaver T. A., , 1995 Technical report The evolution and explosion of massive Stars II: Explosive hydrodynamics and nucleosynthesis. Lawrence Livermore National Lab.(LLNL), Livermore, CA (United States)

Wright E. L., Eisenhardt P. R., Mainzer A. K., Ressler M. E., Cutri R. M., Jarrett T., Kirkpatrick J. D., Padgett D., McMillan R. S., Skrutskie M., et al., The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): mission description and initial on-orbit performance, *The Astronomical Journal*, 2010, vol. 140, p. 1868

Xu Y., Newberg H. J., Carlin J. L., Liu C., Deng L., Li J., Schönrich R., Yanny B., Rings and radial waves in the disk of the Milky Way, *ApJ*, 2015, vol. 801, p. 105

Yanny B., Newberg H. J., Grebel E. K., Kent S., Odenkirchen M., Rockosi C. M., Schlegel D., Subbarao M., Brinkmann J., Fukugita M., Ivezić Ž., Lamb D. Q., Schneider D. P., York D. G., A Low-Latitude Halo Stream around the Milky Way, *ApJ*, 2003, vol. 588, p. 824

York D. G., Adelman J., Anderson Jr J. E., Anderson S. F., Annis J., Bahcall N. A., Bakken J., Barkhouser R., Bastian S., Berman E., et al., The sloan digital sky survey: Technical summary, *The Astronomical Journal*, 2000, vol. 120, p. 1579

Yuan H. B., Liu X. W., Xiang M. S., Empirical extinction coefficients for the GALEX, SDSS, 2MASS and WISE passbands, *MNRAS*, 2013, vol. 430, p. 2188