

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE FÍSICA  
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA

SAULO DE OLIVEIRA CANTANHÊDE

ESTUDO CINEMÁTICO DE ESTRELAS GIGANTES  
EM AGLOMERADOS ABERTOS DA GALÁXIA

PORTO ALEGRE  
2018



SAULO DE OLIVEIRA CANTANHÊDE

ESTUDO CINEMÁTICO DE ESTRELAS GIGANTES  
EM AGLOMERADOS ABERTOS DA GALÁXIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do Prof. Dr. Alan Alves Brito, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Física: Astrofísica.

PORTO ALEGRE  
2018



*“Levantem os olhos para o alto e vejam. Quem criou estas coisas? Aquele que faz sair o seu exército de estrelas, todas bem-contadas, as quais ele chama pelo nome; por ser ele grande em força e forte em poder, nem uma só vem a faltar.”*

Isaías 40:26



## AGRADECIMENTOS

Àquele que é capaz de fazer infinitamente mais do que tudo o que pedimos ou pensamos, Deus, agradeço por ter me dado a oportunidade e me apoiar em fazer este curso. Agradeço ao Seu cuidado, amor, bondade, paciência e proteção por mim durante esses quatro anos que estive longe de casa.

Agradeço a minha família, pai (Liosmar Cantanhêde), mãe (Rute Cantanhêde) e minha irmã (Ester Cantanhêde), pelo apoio que me deram, apesar da saudade, da distância e dos choros de despedida. Este trabalho também é a coroação da dedicação de vocês: de cada noite sem dormir, horas extras, cada serão e aperreio valeram a pena. Eu não seria nada sem o apoio de vocês. Muito obrigado!

Agradeço aos meus avôs e avós, tios e tias, primos e primas, especialmente: Mário Cantanhêde, Selvina Cantanhêde, Damião Oliveira, Marly Oliveira, Manoel Rodrigues, Heloísa Santos, Wellington Santos, Dalete Oliveira, Antônio Marcos, Reche Oliveira, Vanderson Bravim, Midian Oliveira, Anderson Subtil, Zaine Oliveira, Eva Oliveira, Matheus Oliveira, Leonete Cantanhêde e Luís Mário Cantanhêde pelo apoio e ligações. Sem vocês seria difícil conseguir essa vitória.

Agradeço ao Prof. Dr. Alan Alves Brito pela orientação durante os três anos de Iniciação Científica e também deste trabalho. Obrigado pelas correções, direcionamentos e transmissão de conhecimentos imprescindíveis na minha formação acadêmica.

Agradeço também aos professores do Ensino Médio, afinal, como disse o físico Isaac Newton: “Se vi mais longe, é porque me coloquei sobre o ombro de gigantes”. Especialmente estes que me fizeram ter um apreço pelas ciências exatas: Maria Madalena, Juscenilton Vasconcelos, Antônio Filho, Pessoa Junior (professores de matemática), Rafael Christ, Jonhnata Patrício (professores de física), Alan Catarino e Aparecida Serejo (professores de química). Obrigado por me iniciarem e incentivarem a subir a escada do saber.

Agradeço ao Antônio Pereira, Cláudia Lopes e família pelo apoio e confiança durante os 4 anos do curso. Aprendi muito mais que dividir um imóvel ou móveis; aprendi a conviver com um grande amigo e filho. Agradeço ao Emerson e Bruno Pianção pela confiança e amizade desde que cheguei em Porto Alegre, apesar das dificuldades que aconteceram. Sem o apoio de todos vocês a realização deste trabalho seria muito mais difícil de se concretizar. Muito obrigado!

Agradeço aos irmãos da Igreja Adventista do Sétimo Dia Central de Porto Alegre e da Central de Santa Inês III pelo apoio e orações de perto e de longe. Obrigado por sempre lembrarem de mim em suas orações. Vocês foram um ombro amigo e um apoio onde estive. Vocês são minha família!

Em especial, quero agradecer: Robert de Jesus, Nádia Chaves e família (sou grato pela amizade, apoio e incentivo, principalmente, ao vir para Porto Alegre) Norton Cardoso e família (obrigado pelo apoio desde que cheguei aqui em Porto Alegre, naquele sábado 3 de janeiro de 2015), Paulo e Josi Trein e família (obrigado por me mostrarem que *existem*

físicos adventistas, além de todo apoio, carinho e cuidado comigo), Eduardo Lütz e família (obrigado pelos direcionamentos, conselhos e conversas sobre fé e ciência, pude refletir e continuar firme nesta jornada; que Deus continue os usando), Yuri Mendes (obrigado por escrever o livro “Os Mistérios de Órion”, pois depois da leitura, senti um apreço maior pelos céus e decidi cursar astronomia/astrofísica) e Pr. Luciano e Alice Mânica (obrigado pelos abençoados conselhos, direcionamentos e me mostrar como posso servir ao SENHOR de uma forma mais intensa; que Deus continue abençoando o ministério de vocês). Muito obrigado!

Agradeço aos meus amigos de perto que me acolheram assim que cheguei, especialmente: Robson Rodrigues, Giovanna Carvalho, Matheus Soper, Thallis Vieira, Tiago Rigoni, Leonardo Magalhães, Rhaíssa Mattiello, Marcelo e Cassione Gastaud. Obrigado pela compreensão, apoio e conselhos.

Agradeço aos meus amigos de longe, mas que moram no meu coração. A despeito e da saudade, obrigado pelas conversas, ligações, encontros e abraços. Em especial: Isabelle Queiroga, Débora Queiroga, Romildo Araújo, Ronald Penha, Mônica Melo e Patrícia Nascimento. Agradeço aos meus amigos das exatas: Rodrigo Lopes, André Barros, Jardson Sampaio, Lucas Vieira, Solano Felício, Bruno Henrique e Idenilton Silva. Obrigado pelo companheirismo nesta tão grande área desde o princípio. Que saudade das nossas “reuniões” para resolver questões de física e matemática. A princípio tão simples, mas ajudaram a fomentar um espírito de pesquisador. Muito obrigado!

Agradeço aos meus colegas de ensino médio do Colégio Atuação 3º ano B e IFMA Eletroeletrônica 2012 pelas contribuições feitas em meu desenvolvimento acadêmico. Não tenho palavras para descrever o quanto sou grato por cada uma das manhãs e tardes que passei por mais de 3 anos com vocês.

Agradeço aos meus colegas de curso que fizeram parte da minha vida nestes 4 anos: Daniel Grün, Jamile Fritzen e Tuila Ziliotto. Obrigado pelas conversas, apoio e incentivo também.

Agradeço ao Departamento de Astronomia e ao Instituto de Física da UFRGS que me proporcionaram as ferramentas para a aprendizagem e desenvolvimento deste projeto.

Agradeço ao povo brasileiro que através da Pró-Reitoria de Pesquisa da UFRGS (PROPESQ-UFRGS) e Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) financiaram as bolsas de Iniciação à Popularização da Ciência e Iniciação Científica durante a minha graduação.

Agradeço aqueles que direta e indiretamente contribuíram para a minha formação acadêmica. Agradeço a cada conselho, conversa, almoço, carona. Obrigado pelo apreço e incentivo. Deus os abençoe grandemente!

## RESUMO

Os aglomerados estelares são essenciais para estudar a idade, a distribuição espacial, a dinâmica, a cinemática e a composição química de diferentes populações estelares em diferentes componentes Galácticas. Neste projeto, analisamos espectroscopicamente a cinemática de uma amostra de estrelas gigantes do tipo K em aglomerados abertos, totalizando 30 espectros estelares do UOCS (UFRGS Open Cluster Survey). Com a velocidade radial heliocêntrica podemos estimar a pertinência das estrelas ao aglomerado. Os espectros foram obtidos com o espectrógrafo Goodman do SOAR (Southern Astrophysical Research) Telescope de 4,1 m, em Cerro Pachón, Chile durante as noites de 8 a 11 de março de 2016. Os espectros têm baixa resolução ( $R=2800$ ), alta razão sinal-ruído ( $S/N > 60$  em torno de  $3800 \text{ \AA}$ ) e cobertura espectral de  $3500$  a  $6160 \text{ \AA}$ . Foram obtidas as velocidades radiais médias para a amostra usando o deslocamento das linhas dos espectros (Efeito Doppler) através do software IRAF (Image Reduction and Analysis Facility). Os valores parciais encontrados no projeto são, em módulo, muito elevados quando comparados com a velocidade de escape da Galáxia, indicando que as estrelas não estariam ligadas gravitacionalmente à Via Láctea. Desta forma, possíveis problemas estariam associados com a resolução espectral ou calibração em comprimento de onda. Através da velocidade radial heliocêntrica calculada para estrelas de tipo espectral similar a da amostra (F, G, K e M) em aglomerados como IC 2391 e NGC 6475, propomos que a resolução espectral não influencia os resultados. Desta forma, os nossos dados apresentam provavelmente problemas relacionados com a calibração em comprimento de onda dos espectros. Este problema deve estar associado com a dificuldade, durante o processo de redução dos dados, em identificar o pico correspondente às linhas de emissão e de linhas próximas no espectro das lâmpadas de calibração.

**Palavras-chave:** Galáxia. Aglomerados estelares. Aglomerados abertos. Cinemática.



## ABSTRACT

Stellar clusters are key to study the age, the spatial distribution, the dynamic, the kinematics and the chemical composition of different Galactic stellar populations in different Galactic components. In this project, we spectroscopically analysed the kinematics of a sample of K-type giant stars in open clusters, totalizing 30 stellar spectra from the UOCS (UFRGS Open Cluster Survey). With the radial heliocentric velocity we can estimate the star cluster membership. The spectra were obtained with the Goodman spectrograph at SOAR (Southern Astrophysical Research) 4,1 m Telescope, in Cerro Pachón, Chile, during the nights of March, 8 to 11, 2016. The spectra have low resolution ( $R=2800$ ), high signal-to-noise ( $S/N > 60$  around of  $3800 \text{ \AA}$ ) and spectral range of  $3500$  to  $6160 \text{ \AA}$ . We obtained the mean radial velocities using the shift of spectral lines (Doppler Effect) through the software IRAF (Image Reduction and Analysis Facility). The preliminary values found in the project are, in modulus, very high when compared with Galaxy escape speed, indicating that stars is not gravitationally bound to Milky Way. Therefore, there are likely problems associated with the spectral resolution or wavelength calibration. Through the radial heliocentric velocities calculated for stars of similar spectral type of the sample (F, G, K and M) in clusters like IC 2391 and NGC 6475, we propose that the spectral resolution do not influence the results. Therefore, our data likely present problems related to the spectra wavelength calibration. This problem might be associated with the difficulty, during the reduction process of the data, in identifying the peak corresponding to the emission lines and near lines in the spectral calibration lamp.

**Keywords:** Galaxy. Stellar clusters. Open clusters. Stars. Kinematics.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Componentes e estruturas presentes na Galáxia . . . . .  | 20 |
| Figura 2 – Diagramas cor-magnitude (CMDs) para aglomerados aberto e globular  | 22 |
| Figura 3 – Diagramas cor-magnitude (CMDs) compostos de aglomerados abertos<br>de idades diferentes com indicação do RGB do aglomerado mais velho .          | 23 |
| Figura 4 – Distribuição de aglomerados abertos e globulares no plano da Galáxia .   | 24 |
| Figura 5 – Distribuição de aglomerados abertos no plano ( $Z, d_{XY}$ ) . . . . .   | 25 |
| Figura 6 – Distribuição dos aglomerados abertos na Galáxia presentes no UOCS e<br>analisados neste trabalho . . . . .                                       | 29 |
| Figura 7 – Identificação das estrelas observadas espectroscopicamente em cada<br>aglomerado aberto analisado no trabalho . . . . .                          | 30 |
| Figura 8 – Identificação de algumas estrelas analisadas espectroscopicamente em<br>cada aglomerado-teste . . . . .  | 31 |
| Figura 9 – Representação das componentes do movimento de uma estrela . . . . .  | 33 |
| Figura 10 – Representação esquemática do efeito Doppler . . . . .   | 34 |
| Figura 11 – Espectro típico de uma estrela do tipo K . . . . .  | 38 |
| Figura 12 – Espectro de uma estrela do aglomerado MWSC 5319 com a indicação<br>das linhas espectrais utilizadas para calcular a velocidade radial . . . . . | 40 |
| Figura 13 – Comparação entre os espectros de diferentes resoluções espectrais para<br>estrelas dos aglomerados-teste IC 2391 e NGC 6475 . . . . .           | 44 |
| Figura 14 – Ilustração da geometria envolvida na demonstração do efeito Doppler<br>relativístico . . . . .  | 65 |



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Dados dos aglomerados abertos a serem analisados pelo UOCS . . . . .  | 28 |
| Tabela 2 – Dados dos aglomerados abertos analisados no trabalho . . . . .  | 29 |
| Tabela 3 – Dados dos aglomerados-teste analisados no trabalho . . . . .  | 31 |
| Tabela 4 – Linhas espectrais identificadas nos espectros das estrelas e utilizadas para calcular a velocidade radial . . . . .   | 39 |
| Tabela 5 – Velocidades radiais observada ( $v_r$ ) e heliocêntricas ( $V_h$ ) para as estrelas da amostra . . . . .  | 41 |
| Tabela 6 – Velocidades radiais heliocêntricas médias ( $V_h$ ) obtidas . . . . .   | 42 |
| Tabela 7 – Velocidades radiais heliocêntricas do aglomerado IC 2391 . . . . .  | 45 |
| Tabela 8 – Velocidades radiais heliocêntricas do aglomerado NGC 6475 . . . . .   | 45 |
| Tabela 9 – Comparação das velocidades radiais heliocêntricas médias das estrelas dos aglomerados IC 2391 e NGC 6475 em alta e em baixa resolução com a literatura . . . . .                | 46 |
| Tabela 10 – Velocidades radiais heliocêntricas das estrelas do aglomerado NGC 6475 em baixa resolução . . . . .  | 46 |
| Tabela 11 – Velocidades radiais heliocêntricas das estrelas do aglomerado IC 2391 em baixa resolução . . . . .   | 47 |
| Tabela 12 – Velocidades radiais heliocêntricas médias das estrelas dos aglomerados IC 2391 e NGC 6475 selecionando muitas e poucas linhas espectrais comparando com a literatura . . . . . | 47 |
| Tabela 13 – Comparação da velocidade radial heliocêntrica ( $V_h$ ) dos dados do UOCS com os dados do <i>Gaia</i> DR2 e da literatura . . . . .  | 49 |
| Tabela 14 – Linhas espectrais identificadas nos espectros das estrelas dos aglomerados-teste . . . . .   | 57 |



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

|               |   |
|---------------|---|
| A. R.         | Ascensão Reta   |
| ASCII         | American Standard Code for Information Interchange                      |
| b             | Longitude galáctica   |
| BDA           | Base Données Amas   |
| CCD           | Charge Coupled Device   |
| CMD           | Colour Magnitude Diagram  |
| Dec.          | Declinação  |
| DR2           | Data Release 2  |
| DSS           | Digitized Sky Survey  |
| ESO           | European Southern Observatory   |
| IRAF          | Image Reduction and Analysis Facility                                   |
| IC            | Index Catalogue   |
| l             | Longitude galáctica   |
| MWSC          | Milky Way Star Clusters (Schmeja et al., 2014)                          |
| MOS           | Multiobject Spectroscopy  |
| MP            | Multiple Population   |
| NIST          | National Institute of Standards and Technology                          |
| NOAO          | National Optical Astronomy Observatories                                |
| NGC           | New General Catalogue   |
| PI            | Principal Investigator  |
| R             | Resolução Espectral   |
| RAVE          | Radial Velocity Experiment  |
| SDSS          | Sloan Digital Sky Survey  |
| SSP           | Simple Stellar Population   |
| SOAR          | Southern Astrophysical Research   |
| UOCS          | UFRGS Open Cluster Survey   |
| UVES          | Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph Paranal Observatory Project |
| $v_r$         | Velocidade radial observada   |
| $V_h$         | Velocidade radial heliocêntrica   |
| WEBDA         | Web version of Base Données Amas (Dias et al., 2002)                    |
| $\Lambda$ CDM | Lambda Cold Dark Matter   |
| $\sigma$      | Incerteza   |
| Å             | Ångström ( $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ )                         |



## SUMÁRIO

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | INTRODUÇÃO . . . . .  | 19 |
| 1.1 | Objetivos . . . . .   | 26 |
| 2   | DADOS OBSERVACIONAIS . . . . .  | 27 |
| 2.1 | UOCS . . . . .  | 27 |
| 2.2 | Objetos Estudados . . . . .   | 29 |
| 2.3 | Observações . . . . .   | 32 |
| 3   | METODOLOGIA . . . . .   | 33 |
| 3.1 | Velocidade radial . . . . .   | 33 |
| 3.2 | Efeito Doppler . . . . .  | 34 |
| 3.3 | Conexão entre velocidade radial heliocêntrica e efeito Doppler          | 35 |
| 3.4 | Cálculo das velocidades radiais . . . . .                               | 38 |
| 4   | RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .  | 41 |
| 5   | CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS . . . . .                                     | 51 |
|     | REFERÊNCIAS . . . . .   | 53 |
|     | APÊNDICE A – LINHAS ESPECTRAIS . . . . .                                | 57 |
|     | APÊNDICE B – EQUAÇÃO PARA O EFEITO DOPPLER RELATI-<br>VÍSTICO . . . . . | 65 |



# 1 Introdução

A Via Láctea é a Galáxia que melhor entendemos quando consideramos a quantidade e a precisão das observações astronômicas realizadas quando comparado a outras galáxias. Através da cinemática e química das componentes, estruturas e objetos presentes na própria Galáxia podemos obter informações sobre a sua formação. Os modelos clássicos para a formação da Via Láctea foram propostos por Eggen et al. (1962) e Searle & Zinn (1978).

O modelo do *colapso monolítico* formulado por Eggen et al. (1962) a partir de observações da metalicidade, idade e momento angular de estrelas anãs cujas órbitas cruzam a vizinhança solar, afirma que a Galáxia foi formada de um colapso ordenado e rápido, da ordem de  $10^8$  anos (Eggen et al., 1962). Entretanto, ao analisar uma amostra de estrelas gigantes de aglomerados globulares do halo Galáctico, Searle & Zinn (1978) concluíram que o modelo de Eggen et al. (1962) era inconsistente, sugerindo assim que a formação do halo ocorreu por fragmentação da nuvem protogaláctica. Desta forma, segundo esse outro modelo, a Galáxia foi formada a partir da aglutinação de pequenos fragmentos de nuvens e outras galáxias menores num processo caótico e lento, da ordem da idade do universo (Searle & Zinn, 1978). Recentemente, observações de galáxias distantes e simulações computacionais sofisticadas de formação de grandes estruturas (como *voids* e superaglomerados de galáxias), em concordância com o modelo  $\Lambda$ CDM (Lambda Cold Dark Matter), indicam que o processo de formação Galáctico ocorreu segundo esse *cenário hierárquico*, a partir de eventos de fusão (*merging*) e/ou acreção de pequenas estruturas (Steinmetz et al., 2006).

Estruturalmente, a Via Láctea é formada por 3 componentes principais: halo, bojo e disco (Freeman & Bland-Hawthorn, 2002; Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016). Além de outros objetos, essas componentes podem ser traçadas por estrelas gigantes de campo e/ou em aglomerados e associações estelares.

Existem duas componentes esferoidais na Galáxia: bojo e halo. O halo Galáctico apresenta um diâmetro de pelo menos 100 kpc (Chiappini, 2001) onde podem ser encontradas estrelas velhas (cerca de 10 bilhões de anos), com alta velocidade, pobres em metais<sup>1</sup> em aglomerados globulares e também nuvens de hidrogênio neutro (Sparke & Gallagher, 2007).

<sup>1</sup> Estrelas pobres em metais ( $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ ) são objetos com menor abundância de Fe quando comparado a abundância solar do mesmo elemento, onde  $[\text{Fe}/\text{H}] = \log \left( \frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\star} - \log \left( \frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\odot}$ ,  $N_{\text{Fe}}$  e  $N_{\text{H}}$  são as densidades numéricas para o Fe e H, respectivamente (Asplund et al., 2009).

O halo Galáctico também é composto por uma componente escura: um halo de matéria escura mais ou menos esférico, que continua entre os mais enigmáticos dos problemas em aberto da Astrofísica. O bojo Galáctico tem cerca de 2 kpc de raio; as estrelas pertencentes ao bojo são estrelas velhas, pobres em metais e apresentam velocidades altamente aleatórias (Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016).

A componente discoidal da Galáxia se divide em disco fino e espesso. O disco fino se eleva até cerca de 300 a 400 pc abaixo e acima do plano Galáctico, contendo 95% das estrelas do disco e sendo composto por estrelas jovens massivas (tipo espectral O e B) além de gás e poeira (Sparke & Gallagher, 2007). Os aglomerados abertos se distribuem ao longo do disco fino da Galáxia (Schmeja et al., 2014). O disco espesso é mais velho que o disco fino e se eleva cerca de 1 kpc abaixo e acima do plano Galáctico (Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016). O Sol está localizado no disco fino da Galáxia a cerca de  $8,2 \pm 0,1$  kpc do centro Galáctico (Chiappini, 2001; Bland-Hawthorn & Gerhard, 2016).

Assim, podemos sintetizar as principais componentes da Galáxia esquematicamente na Figura 1.

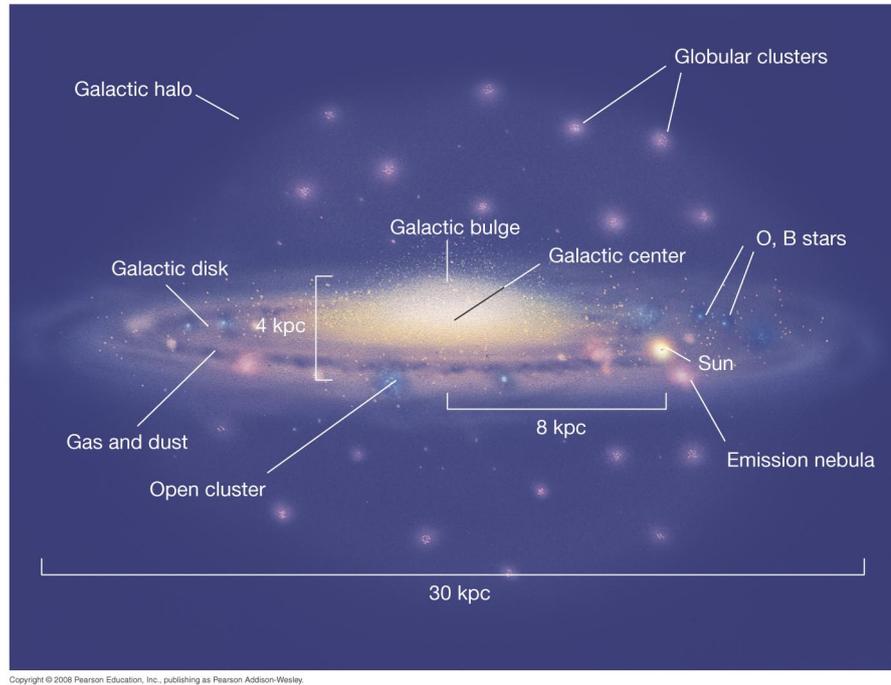


Figura 1 – Esquema representando as componentes da Galáxia, além de algumas estruturas presentes em cada uma delas. Disco: aglomerados abertos, gás e poeira, nebulosas de emissão e estrelas do tipo espectral O e B; bojo/halo: aglomerados globulares. O diâmetro e espessura da Galáxia, bem como a distância do Sol ao centro da Galáxia são indicados na figura, com  $1 \text{ kpc} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ km}$  (Addison-Wesley, 2008).

Existem dois tipos de aglomerados estelares na nossa Galáxia. Os aglomerados globulares estão localizados no bojo e no halo e são constituídos por milhões de estrelas ligadas gravitacionalmente que têm idades médias entre 10 a 12 bilhões de anos (Benacquista, 2006; Conroy & Spergel, 2011). Os aglomerados abertos, por sua vez, localizados no disco Galáctico, são formados por dezenas a poucos milhares de estrelas jovens (de 1 milhão de anos) até relativamente velhas (5 bilhões de anos) que apresentam a mesma composição química e também estão ligadas gravitacionalmente (Conrad et al., 2014; Cantat-Gaudin et al., 2018). Os aglomerados abertos são úteis para oferecer informações sobre a Galáxia, tais como os mecanismos de formação estelar e a própria estrutura e evolução estelar, além de traçar as regiões de formação estelar e o enriquecimento químico do disco Galáctico (Cantat-Gaudin et al., 2018; Castro-Ginard et al., 2018). De forma geral, podemos afirmar que os aglomerados estelares são essenciais para estudar a idade, a distribuição, aspectos dinâmicos, cinemáticos e de composição química de diferentes populações e componentes da Galáxia (Joshi, 2017a,b; Dib et al., 2018).

Nas Figuras 2a e 2b podemos observar as diferenças entre os aglomerados globulares e abertos nos diagramas cor-magnitude (CMD) destes objetos. Além de parâmetros estelares, tais como idade, extinção e módulo de distância, encontramos diferenças na população de estrelas de cada objeto. A principal diferença é que no CMD dos aglomerados abertos, estes objetos são dominados por estrelas jovens, enquanto que os aglomerados globulares são dominados por estrelas velhas. Vale ressaltar que em aglomerados abertos mais velhos há a presença de estrelas gigantes vermelhas (tipo espectral K e M), como pode ser constatado na Figura 2b. Em primeira aproximação, os aglomerados abertos são exemplos de objetos com população estelar simples<sup>2</sup> (SSP) (Cantat-Gaudin et al., 2018), enquanto que podemos verificar múltiplas populações estelares (MP) em aglomerados globulares (Bastian & Lardo, 2018).

---

<sup>2</sup> Uma população estelar simples (SSP) é aquela que é formada por um conjunto de estrelas que apresentam um único padrão de idade e abundância química, dentro de uma pequena tolerância (Bastian & Lardo, 2018).

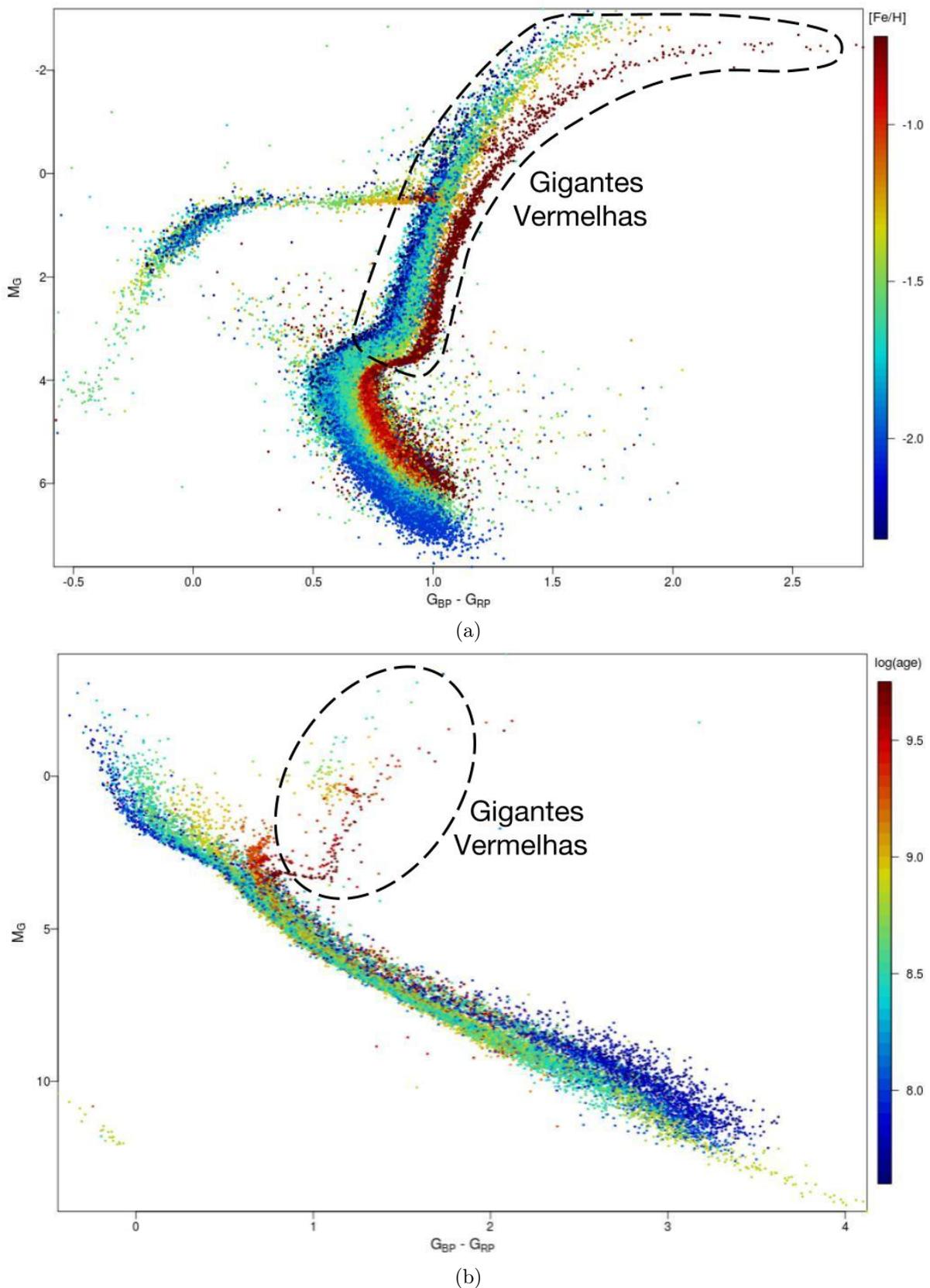


Figura 2 – CMDs compostos obtidos com os dados do *Gaia* DR2 (Data Release 2; Gaia Collaboration et al. 2018) para (a) 14 aglomerados globulares, coloridos segundo a metalicidade (abundância de  $[Fe/H]$ ), e (b) 32 aglomerados abertos, coloridos segundo a idade usando a extinção e o módulo de distância e com a indicação das estrelas gigantes vermelhas.  $G_{BP}$  e  $G_{RP}$  são bandas passantes do *Gaia* entre 3300 a 6800 Å e 6300 a 10500 Å, respectivamente, e  $M_G$  é a magnitude absoluta na banda G para estrelas individuais.

Na Figura 3 podemos constatar a diferença entre os CMDs de dois aglomerados abertos de idades diferentes. Ruprecht 91 tem idade de cerca de  $8 \cdot 10^7$  anos (Turner et al., 2005). Apesar de não ser calculada a idade para o aglomerado Gulliver 1 na literatura, quando comparamos o seu CMD com o da Figura 2b, concluímos que o aglomerado Gulliver 1 é mais antigo que Ruprecht 91. Desta forma, observamos que os aglomerados abertos mais velhos apresentam estrelas no ramo das gigantes vermelhas (RGB).

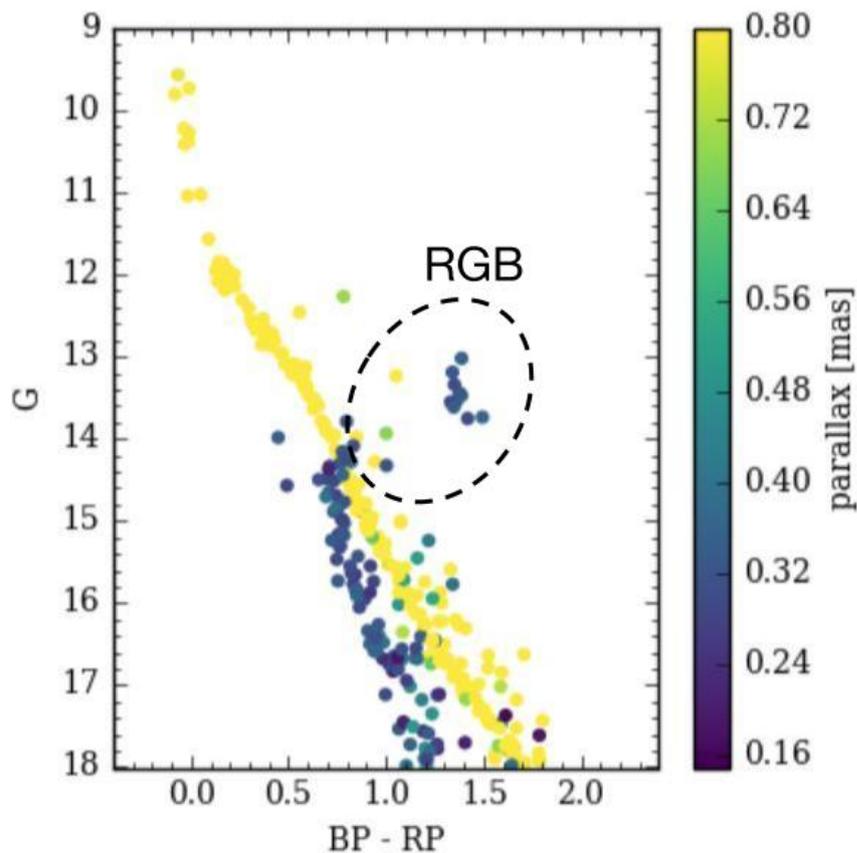


Figura 3 – CMDs compostos de aglomerados abertos de idades diferentes com indicação do RGB do aglomerado mais velho. Pontos mais claros correspondem ao CMD do aglomerado aberto Ruprecht 91 e pontos mais escuros correspondem ao CMD do aglomerado aberto Gulliver 1. As estrelas dos aglomerados estão dispostas segundo as suas paralaxes, identificando os dois aglomerados.  $BP$  e  $RP$  são bandas passantes do *Gaia* e  $G$  é a magnitude absoluta na banda  $G$  para estrelas individuais. (Cantat-Gaudin et al., 2018).

O RGB é uma região no CMD composta por estrelas gigantes vermelhas de baixa massa (entre  $0,8M_{\odot}$  e  $\sim 2M_{\odot}$ ) que têm uma camada de hidrogênio em fusão e ainda não começaram a fundir hélio em seus núcleos (Sparke & Gallagher, 2007; Pols, 2011). As estrelas gigantes vermelhas são do tipo espectral K e M muito maiores ( $R_{\star} \gtrsim 10R_{\odot}$ ) e mais luminosas ( $L_{\star} \gtrsim 10L_{\odot}$ ) que estrelas da sequência principal de mesma temperatura

efetiva (Karttunen et al., 2007). As estrelas do tipo espectral K têm temperatura efetiva entre 3900 a 5200 K, com espectro dominado por linhas metálicas e linhas fortes de  $H$ ,  $K$  e banda G. Arcturus ( $\alpha$  Bötis), Pollux ( $\beta$  Geminorum) e Aldebaran ( $\alpha$  Tauri) são exemplos de estrelas do tipo K (Karttunen et al., 2007; Comins & Kaufmann III, 2010).

Podemos evidenciar diferenças na distribuição espacial na Galáxia dos aglomerados abertos e globulares a partir das Figuras 4 e 5. Como pode ser observado na Figura 4, constatamos que a distribuição de aglomerados abertos, com parâmetros astrofísicos calculados (Kharchenko et al., 2013), é próximo à nossa posição na Galáxia ( $d_{XY} < 1,8$  kpc) e, pela Figura 5, observamos que os aglomerados abertos se distribuem no disco da Galáxia. Desta forma, encontrar aglomerados abertos distantes é difícil devido a poeira existente no disco da Galáxia, de forma que, observacionalmente, é mais fácil obter informações de aglomerados próximos.

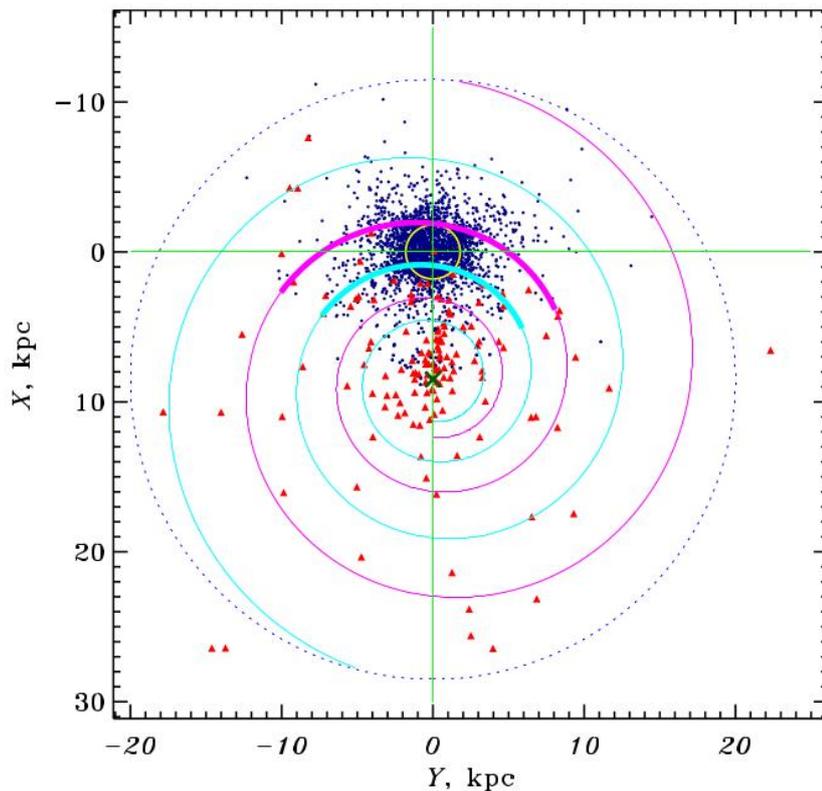


Figura 4 – Distribuição de aglomerados abertos e globulares do *survey* MWSC (Milky Way Star Clusters) projetados no plano da Galáxia, onde  $X$  e  $Y$  são coordenadas retangulares Galácticas. Pontos são aglomerados abertos e associações, triângulos marcam aglomerados globulares (Kharchenko et al., 2013).

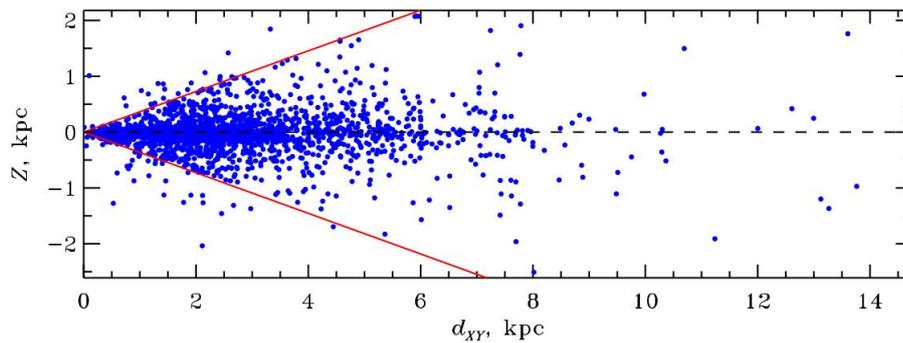


Figura 5 – Distribuição de aglomerados abertos da Galáxia no *survey* MWSC no plano  $(Z, d_{XY})$ , onde  $d_{XY}$  é a distância no plano Galáctico a partir do Sol e  $Z$  é a distância até o plano Galáctico. A linha cheia mostra os limites correspondentes a latitude Galáctica  $b = \pm 20^\circ$ . A linha tracejada marca o plano Galáctico (Schmeja et al., 2014).

A partir da cinemática de aglomerados abertos podemos obter informações sobre a estrutura do disco Galáctico bem como a sua evolução (Cantat-Gaudin et al., 2018; Soubiran et al., 2018). Por isso, devemos caracterizar uma amostra de dados observados através da velocidade radial para considerar o pertencimento das estrelas ao aglomerado (ver, por exemplo, Carraro et al. (2016)). O RAVE (Radial Velocity Experiment; Steinmetz et al. 2006) é um exemplo de *survey* recente que buscou analisar a velocidade radial e outros parâmetros atmosféricos estelares de forma a obter informações sobre as estruturas e a cinemática da Galáxia.

Na literatura, os estudos que apresentam as mais completas compilações de aglomerados abertos conhecidos são Dias et al. (2002) e Kharchenko et al. (2013), suplementados por Schmeja et al. (2014), Scholz et al. (2015) e Froebrich (2017). Dois catálogos, em particular, se destacam: WEBDA<sup>3</sup> (Web version of Base Données Amas; Dias et al. 2002) e MWSC<sup>4</sup> (Kharchenko et al., 2013). O WEBDA tem como objetivo auxiliar astrônomos profissionais e amadores. No catálogo são obtidas informações sobre os aglomerados por meio da navegação no conteúdo do banco de dados. WEBDA é um catálogo de aglomerados abertos com uma versão disponível na internet do banco de dados de aglomerados abertos-BDA (Base Données Amas; Dias et al. 2002). O MWSC é um catálogo que apresenta em sua maioria aglomerados abertos (cerca de 93,4% da amostra do *survey*), mas aglomerados globulares também estão presentes (Kharchenko et al., 2013).

<sup>3</sup> <http://webda.physics.muni.cz/>

<sup>4</sup> <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/558/A53>

## 1.1 Objetivos

O objetivo central do nosso Grupo de Pesquisa é, primeiro, caracterizar espectroscopicamente e, segundo, determinar a velocidade radial heliocêntrica de uma amostra de centenas de estrelas gigantes do tipo K em aglomerados abertos da Galáxia, no contexto do *survey* UOCS (UFRGS Open Cluster Survey, conforme explicado na Seção 3.4). Neste trabalho, em particular, analisamos uma subamostra de 7 aglomerados abertos, totalizando cerca de 30 espectros de estrelas gigantes. Além de determinar as velocidades radiais que são importantes para calcular a probabilidade de pertinência das estrelas aos aglomerados estudados, nós também testamos métodos de análise que serão aplicados a todo o *survey*.

## 2 Dados Observacionais

### 2.1 UOCS

Os dados aqui estudados fazem parte de uma proposta observacional mais ampla que busca analisar aglomerados abertos da Galáxia, UOCS (UFRGS Open Cluster Survey). O *survey* tem como PI (Principal Investigator) o orientador do presente trabalho, o Prof. Dr. Alan Alves Brito, além de englobar professores, pós-doutorandos e estudantes do Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS. O *survey* esteve em curso entre os semestres de 2016.1 e 2017.2 e, no momento, os dados encontram-se em fase de redução e análise.

O UOCS tem como objetivos:

- aumentar o número de aglomerados abertos que têm sido estudados espectroscopicamente;
- calcular as velocidades radiais para estrelas da amostra;
- compreender a distribuição química da amostra do *survey*;
- ajudar a melhor entender o fenômeno de múltiplas populações estelares (MPs) em aglomerados estelares.

Enquanto as MPs têm sido amplamente observadas nos aglomerados globulares, a existência delas em aglomerados abertos é ainda debatida na literatura (Bastian & Lardo, 2018). Desta forma, como um primeiro estudo do projeto mais amplo, analisamos aqui, cinematicamente, estrelas gigantes em aglomerados abertos velhos da Galáxia para cálculo de pertinência das estrelas. Este passo é importante para posterior análise química, que será utilizada para buscar variações de abundâncias na amostra ao se investigar as MPs em aglomerados abertos mais velhos.

Como essas variações de abundância são observadas em estrelas do RGB, a amostra do UOCS é composta de 530 estrelas gigantes do tipo espectral K de 30 aglomerados abertos da Galáxia. Considerando a análise química a ser realizada, foram obtidos espectros das estrelas de tipo K tendo em vista que, para este tipo espectral, a banda G é intensa. Os dados dos aglomerados abertos analisados no UOCS foram obtidos a partir dos catálogos WEBDA (Dias et al., 2002) e MWSC (Kharchenko et al., 2013) e podem ser observados na Tabela 1. Os dados analisados neste trabalho foram retirados da amostra do UOCS.

Tabela 1 – Dados dos aglomerados abertos a serem analisados pelo UOCS, obtidos nos catálogos WEBDA (Dias et al., 2002) e MWSC (Kharchenko et al., 2013).

| Objeto      | A. R.*<br>(hh:mm:ss) | Dec.*<br>(° : ' : ") | l (°)   | b (°)   | Distância (pc) | Idade<br>(10 <sup>9</sup> anos) |
|-------------|----------------------|----------------------|---------|---------|----------------|---------------------------------|
| NGC 2184    | 06:11:12,00          | -03:26:00,00         | 211,41  | -10,52  | 640            | 0,23                            |
| NGC 2204    | 06:15:33,00          | -18:39:54,00         | 226,01  | -16,11  | 2629           | 0,79                            |
| NGC 2243    | 06:29:34,00          | -31:17:00,00         | 239,48  | -18,01  | 4458           | 1,08                            |
| NGC 2287    | 06:46:01,00          | -20:45:24,00         | 231,02  | -10,44  | 693            | 0,24                            |
| Alessi 3    | 07:16:24,00          | -46:36:00,00         | 257,84  | -15,37  | 288            | 0,74                            |
| Melotte 66  | 07:26:23,00          | -47:40:00,00         | 259,56  | -14,24  | 4313           | 2,79                            |
| NGC 2394    | 07:28:36,00          | +07:05:12,00         | 210,78  | 11,47   | 660            | 1,12                            |
| Berkeley 39 | 07:46:42,00          | -04:36:00,00         | 223,46  | 10,10   | 4780           | 7,94                            |
| ASCC 42     | 07:52:51,00          | -53:00:35,00         | 266,41  | -12,85  | 800            | 0,37                            |
| NGC 2539    | 08:10:37,00          | -12:49:06,00         | 233,71  | 11,11   | 1363           | 0,37                            |
| NGC 2548    | 08:13:43,00          | -05:45:00,00         | 227,87  | 15,39   | 769            | 0,36                            |
| ASCC 51     | 09:18:00,00          | -69:41:24,00         | 286,24  | -14,08  | 500            | 0,34                            |
| Turner 5    | 09:33:51,00          | -36:36:54,00         | 264,23  | 11,05   | 400            | 0,31                            |
| MWSC 5060   | 10:10:28,20          | -14:02:42,00         | 254,381 | 33,254  | 1445           | 5,01                            |
| MWSC 5062   | 10:12:21,60          | -09:10:52,00         | 250,618 | 37,050  | 5232           | 2,82                            |
| NGC 3680    | 11:25:38,00          | -43:14:36,00         | 286,760 | 16,920  | 938            | 1,19                            |
| MWSC 5117   | 11:40:19,20          | -17:50:06,00         | 279,955 | 41,844  | 1380           | 2,29                            |
| NGC 5460    | 14:07:27,00          | -48:20:36,00         | 315,750 | 12,630  | 678            | 0,16                            |
| MWSC 5279   | 15:11:36,60          | -21:25:41,00         | 341,397 | 30,783  | 2066           | 1,26                            |
| MWSC 5295   | 15:34:39,00          | -13:22:48,00         | 352,490 | 33,365  | 1764           | 2,29                            |
| MWSC 5312   | 16:11:34,80          | -15:57:36,00         | 357,392 | 25,109  | 2910           | 1,26                            |
| MWSC 5318   | 16:20:42,00          | -17:14:06,00         | 357,893 | 22,621  | 1169           | 3,85                            |
| MWSC 5319   | 16:21:00,00          | -15:08:35,00         | 359,690 | 23,908  | 1326           | 3,16                            |
| MWSC 5321   | 16:26:49,90          | -08:55:37,00         | 6,076   | 26,616  | 7655           | 1,86                            |
| MWSC 5323   | 16:27:03,60          | -07:10:12,00         | 7,707   | 27,606  | 1925           | 2,37                            |
| MWSC 5326   | 16:32:47,40          | -17:08:35,00         | 359,941 | 20,449  | 1637           | 3,06                            |
| MWSC 5731   | 20:02:49,90          | -16:13:12,00         | 25,792  | -22,905 | 3377           | 1,84                            |
| MWSC 5751   | 20:35:46,30          | +07:59:06,00         | 52,837  | -18,912 | 1532           | 1,78                            |
| NGC 6994    | 20:59:00,00          | -12:38:00,00         | 35,710  | -33,940 | 620            | 2,51                            |
| NGC 5764    | 21:09:34,20          | +19:29:10,00         | 320,970 | 5,870   | 2800           | 0,20                            |

\* Coordenadas equatoriais J2000.

## 2.2 Objetos Estudados

Na Tabela 2 estão os dados obtidos a partir do catálogo MWSC (Schmeja et al., 2014) para uma amostra de 7 aglomerados abertos retirados da amostra do UOCS e analisados neste trabalho. A maioria dos objetos da amostra não têm suas velocidades radiais calculadas na literatura. Assim, os resultados encontrados serão novos e deverão ser conferidos por meio de testes. Na Figura 6 estão indicados os aglomerados abertos analisados comparados com a amostra do UOCS e na Figura 7 estão os *finding charts* dos aglomerados da subamostra indicando as estrelas que foram analisadas espectroscopicamente.

Tabela 2 – Dados dos aglomerados abertos analisados no trabalho obtidos no catálogo MWSC (Schmeja et al., 2014).

| Objeto    | A. R.*<br>(hh:mm:ss) | Dec.*<br>(° :' :") | l (°)   | b (°)  | Distância (pc) | Idade<br>(10 <sup>9</sup> anos) |
|-----------|----------------------|--------------------|---------|--------|----------------|---------------------------------|
| MWSC 5117 | 11:40:19,20          | -17:50:06,00       | 279,955 | 41,844 | 1380           | 2,29                            |
| MWSC 5279 | 15:11:36,60          | -21:25:41,00       | 341,397 | 30,783 | 2066           | 1,26                            |
| MWSC 5295 | 15:34:39,00          | -13:22:48,00       | 352,490 | 33,365 | 1764           | 2,29                            |
| MWSC 5312 | 16:11:34,80          | -15:57:36,00       | 357,392 | 25,109 | 2910           | 1,26                            |
| MWSC 5318 | 16:20:42,00          | -17:14:06,00       | 357,893 | 22,621 | 1169           | 3,85                            |
| MWSC 5319 | 16:21:00,00          | -15:08:35,00       | 359,690 | 23,908 | 1326           | 3,16                            |
| MWSC 5323 | 16:27:03,60          | -07:10:12,00       | 7,707   | 27,606 | 1925           | 2,37                            |

\* Coordenadas equatoriais J2000.

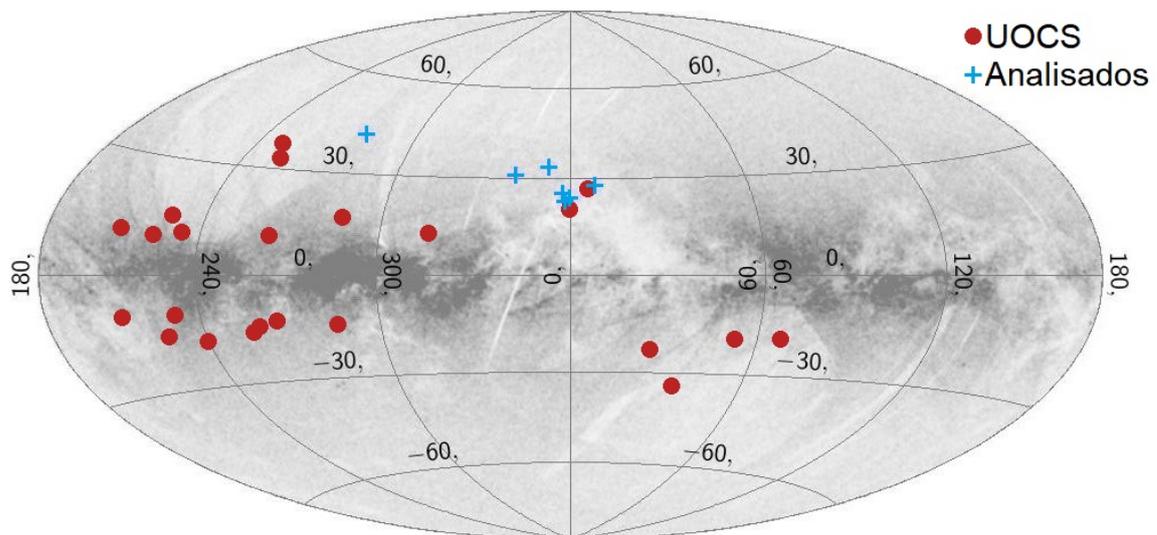


Figura 6 – Distribuição dos aglomerados abertos na Galáxia presentes no UOCS e analisados neste trabalho.

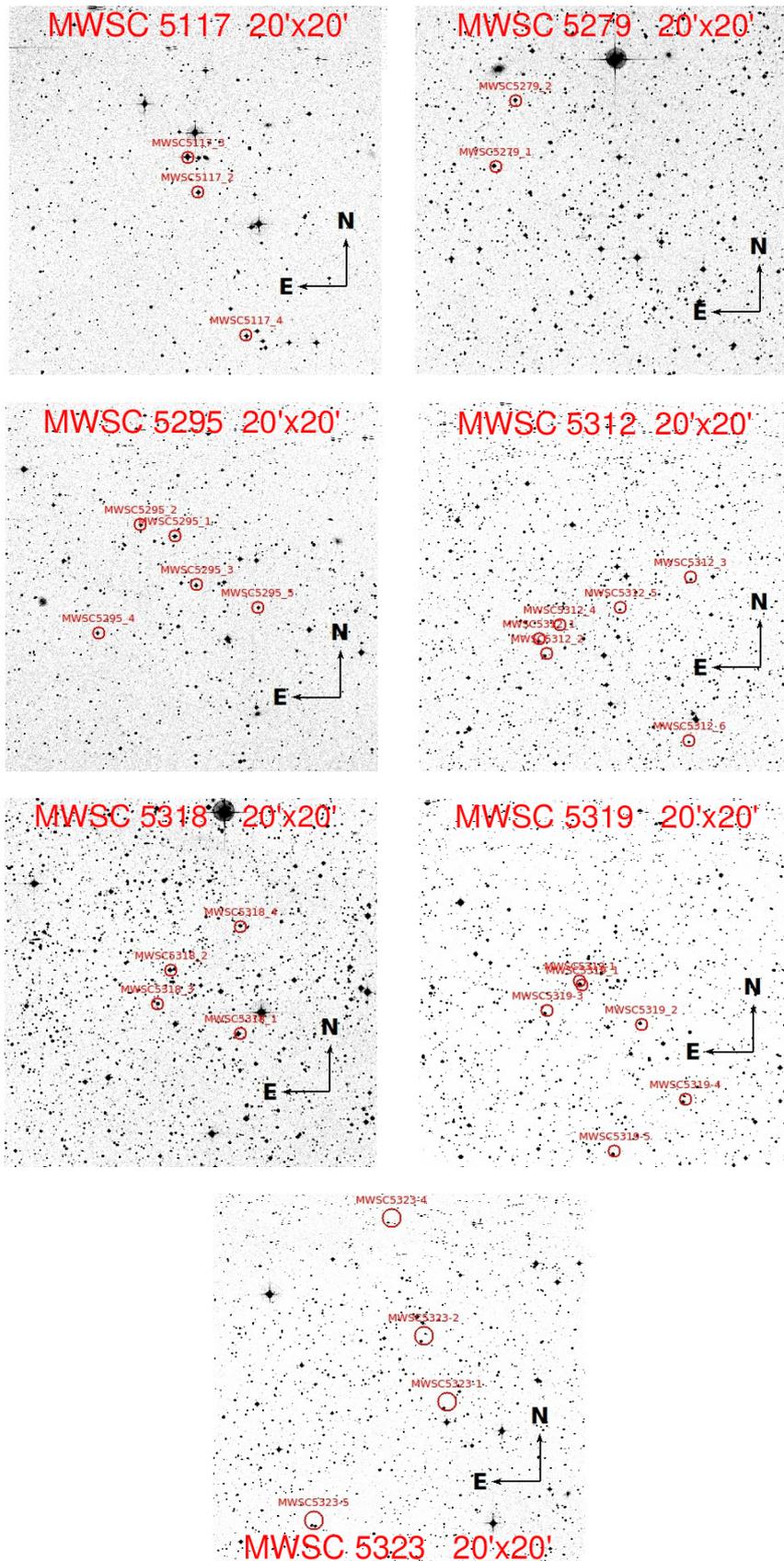


Figura 7 – Identificação das estrelas observadas espectroscopicamente em cada aglomerado aberto analisado no trabalho (ESO - DSS<sup>1</sup>; European Southern Observatory - Digitized Sky Survey).

<sup>1</sup> <http://archive.eso.org/dss/dss>

Também foram estudadas estrelas com velocidade radial heliocêntrica conhecida na literatura dos aglomerados abertos IC 2391 e NGC 6475 que foram utilizados em testes. Desta forma, utilizamos dados públicos do ESO - UVES POP<sup>2</sup> (European Southern Observatory - UVES Paranal Observatory Project) de espectros de estrelas similares a nossa amostra (tipos espectrais F, G, K e M) dos aglomerados abertos IC 2391 e NGC 6475. O aglomerado IC 2391 é um aglomerado aberto da constelação da Vela que está a uma distância de  $\sim 150$  pc, rico em metais ( $[Fe/H] = +0,06 \pm 0,06$ ) e jovem ( $\sim 35$  milhões de anos) (Barrado y Navascués et al., 2004; Platais et al., 2007). O aglomerado aberto NGC 6475 é um aglomerado da constelação do Escorpião que está a uma distância de 300 pc, é rico em metais ( $[Fe/H] = +0,03 \pm 0,01$ ), e tem idade de  $200 \pm 50$  milhões de anos (Villanova et al., 2009).

Foram obtidos 19 espectros de estrelas que pertencem ao aglomerado IC 2391 e 7 espectros de estrelas que pertencem ao aglomerado NGC 6475 já reduzidos e calibrados em comprimento de onda. Os espectros apresentam alta resolução ( $R = 80000$ ) e intervalo de comprimento de onda entre 3060 a 10398 Å ( $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ), para o aglomerado IC 2391, e 3070 a 10399 Å, para o aglomerado NGC 6475. Podemos observar na Tabela 3 os dados dos aglomerados e na Figura 8 a identificação das estrelas observadas em cada um.

Tabela 3 – Dados dos aglomerados-teste analisados no trabalho obtidos no catálogo WEBDA (Dias et al., 2002).

| Objeto   | A. R.*<br>(hh:mm:ss) | Dec.*<br>(° :' :") | l (°)   | b (°)  | Distância (pc) | Idade<br>( $10^6$ anos) |
|----------|----------------------|--------------------|---------|--------|----------------|-------------------------|
| IC 2391  | 08:40:32             | -53:02:00          | 270,362 | -6,839 | 175            | 45,81                   |
| NGC 6475 | 17:53:51             | -34:47:36          | 355,861 | -4,501 | 301            | 298,54                  |

\* Coordenadas equatoriais J2000.

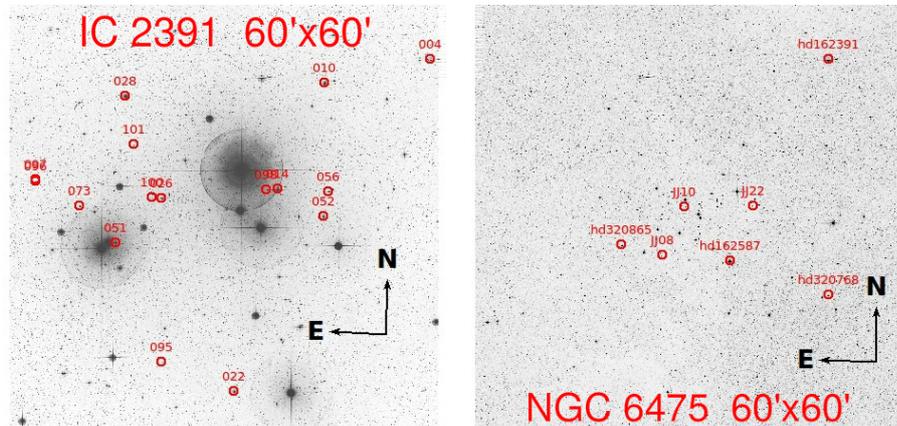


Figura 8 – Identificação de algumas estrelas analisadas espectroscopicamente em cada aglomerado-teste (ESO - DSS).

<sup>2</sup> <http://www.eso.org/sci/observing/tools/uvespop.html>

## 2.3 Observações

As observações do *survey* UOCS para a amostra analisada neste trabalho foram realizadas durante as noites dos dias 8 a 11 de março de 2016 com o espectrógrafo Goodman do SOAR (Southern Astrophysical Research) Telescope de 4,1 m localizado em Cerro Pachón, Chile, e descrito em detalhes por Clemens et al. (2004). Foi utilizado um detector CCD (Charge Coupled Device) com 4096 x 1896 píxeis e com escala de píxeis de 0,15 arcsec/píxel. A região espectral coberta foi de 3500 a 6160 Å. Os espectros obtidos são de baixa resolução ( $R = 2800$ ) e alta razão sinal-ruído ( $S/N > 60$  em torno de 3800 Å). Foram utilizados os modos MOS (Multiobject Spectroscopy) e *longslit* (fenda única) na obtenção dos dados. A fenda da máscara *longslit* utilizada tem aproximadamente 1,03 arcsec. A rede de difração utilizada tem 600 l/mm (0,65 Å/píxel) sem o uso de filtros.

As calibrações em comprimento de onda utilizaram lâmpadas de *CuHeAr* com tempo de exposição de 120 s e lâmpada de quartzo para *flat* com tempo de exposição de 40 s, com e sem rede de difração (sem rede de difração é útil para eliminar luz espalhada). As calibrações foram realizadas para cada estrela observada ao longo da noite.

A redução dos espectros foi realizada por um dos membros da colaboração através de tarefas do *software* IRAF<sup>3</sup> (Image Reduction and Analysis Facility). Conforme cronograma do *survey*, haverá mais estrelas para serem analisadas assim que forem reduzidas.

---

<sup>3</sup> <http://iraf.noao.edu/>

## 3 Metodologia

### 3.1 Velocidade radial

A velocidade real  $\vec{v}$  de uma estrela pode ser decomposta nas componentes: radial ( $\vec{v}_r$ ) e transversal ( $\vec{v}_t$ ), como pode ser observado na Figura 9.

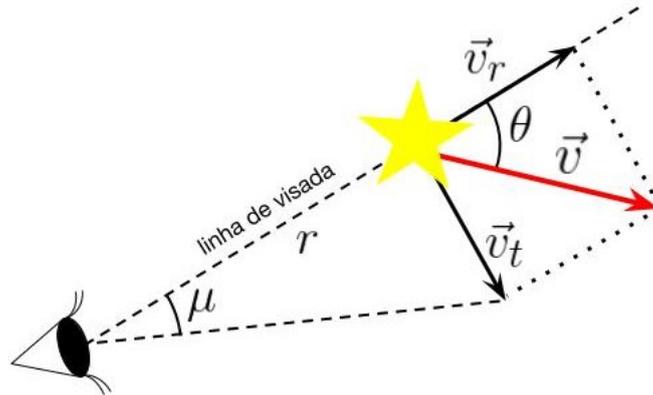


Figura 9 – Representação das componentes radial e tangencial da velocidade real  $\vec{v}$  de uma estrela, do seu movimento próprio  $\mu$ , ângulo  $\theta$  formado pelo seu vetor velocidade real  $\vec{v}$  e a linha de visada e sua distância  $r$  até um observador.

Desta forma, podemos escrever, vetorialmente, a velocidade real da estrela pela equação:

$$\vec{v} = \vec{v}_r + \vec{v}_t. \quad (1)$$

A componente da velocidade real de uma estrela na direção radial, ou seja, ao longo da linha de visada, é denominada de velocidade radial  $\vec{v}_r$ . Desta forma, a velocidade radial é a velocidade com que a estrela se aproxima ou se afasta de nós e é obtida pelo denominado desvio Doppler (ver Seção 3.2). A componente perpendicular à velocidade radial, responsável pelo movimento próprio  $\mu$  da estrela, é denominada de velocidade transversal  $\vec{v}_t$ . A relação entre o movimento próprio  $\mu$  e a velocidade transversal é dada por:

$$v_t = \mu r, \quad (2)$$

onde  $r$  é a distância entre o observador e a estrela (Karttunen et al., 2007).

### 3.2 Efeito Doppler

Christian Doppler (1803-1853), físico e matemático austríaco, deduziu em 1842 que se existe velocidade relativa entre uma fonte de ondas (podendo ser luminosa, como as estrelas, ou sonora, como uma sirene) e um observador, logo há uma variação no comprimento de onda detectado pelo observador. Se observador e fonte se aproximam o comprimento de onda detectado pelo observador é menor do que aquele emitido pela fonte; caso contrário, se o observador e a fonte se afastam, o comprimento de onda detectado pelo observador é maior do que aquele emitido pela fonte. Podemos observar, esquematicamente, esse efeito na Figura 10.

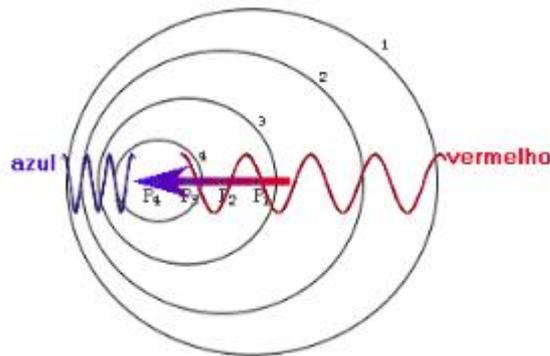


Figura 10 – Representação esquemática do efeito Doppler indicando a diferença de comprimento de onda para uma fonte luminosa se movendo da direita para a esquerda (Kepler & Saraiva, 2014).

Na prática, esse efeito é observado, por exemplo, quando uma sirene de ambulância se aproxima e se afasta de um observador parado em uma avenida. Quando isso acontece, há uma diferença no som da sirene quando a ambulância está se aproximando e quando esta passa pelo observador. Esse mesmo efeito também acontece para a luz proveniente das estrelas ou de galáxias. Por exemplo, dependendo da velocidade relativa de uma estrela a nós, observaremos a luz desta se tornar mais avermelhada (*redshift*), caso esta esteja se afastando, ou mais azulada (*blueshift*), caso estiver se aproximando (Comins & Kaufmann III, 2010).

De forma mais completa, a demonstração da equação para efeito Doppler pode ser encontrada no Apêndice B (Equação 19). Aqui apresentamos apenas o resultado final:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{lab}} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} - 1, \quad (3)$$

com  $\Delta\lambda = \lambda_{obs} - \lambda_{lab}$ , em que  $\lambda_{obs}$  é o comprimento de onda medido pelo observador e  $\lambda_{lab}$  é o comprimento de onda medido em laboratório, isto é, para uma fonte em repouso;  $v$  é o módulo da velocidade real da estrela,  $c$  é a velocidade da luz ( $c = 2,998 \cdot 10^8$  m/s) e  $\theta$  é o ângulo formado pelo vetor velocidade real e a linha de visada (ver Figura 9).

### 3.3 Conexão entre velocidade radial heliocêntrica e efeito Doppler

Sabendo que a velocidade radial é a componente que é responsável pelo efeito Doppler da estrela, podemos considerar a velocidade radial como sendo  $v_r = v \cos \theta$  (ver Figura 9) e o módulo da velocidade da estrela como sendo não relativística ( $v \ll c$ ). Podemos considerar a aproximação não relativística, pois a velocidade das estrelas da Galáxia são muito menores do que a velocidade da luz  $c$ , desta forma, não há erros sensíveis se utilizarmos esta aproximação (Barbieri, 2007). Desta forma, a partir da Equação 3 temos a Equação 4, cuja demonstração detalhada se encontra no Apêndice B (Equação 20):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{lab}} = \frac{v_r}{c}. \quad (4)$$

Ao observarmos o espectro de uma estrela notamos uma curva característica para a distribuição de energia emitida por comprimento de onda da estrela (distribuição de Planck para o corpo negro) e linhas de emissão ou absorção (dependendo da temperatura superficial) características dos elementos que estão presentes na estrela. Para cada tipo de elemento conhecido existe uma série de comprimentos de onda correspondentes aos fótons emitidos ou absorvidos pelo átomo do elemento.

Ao medirmos a variação em comprimento de onda  $\Delta\lambda$  para uma determinada linha espectral entre o comprimento de onda  $\lambda_{obs}$  medido no espectro da estrela e o comprimento de onda  $\lambda_{lab}$  medido em laboratório, podemos calcular a velocidade radial observada da estrela. Desta forma, pela medida da variação do comprimento de onda  $\Delta\lambda$  podemos calcular a velocidade radial  $v_r$  da estrela. De fato, os métodos utilizados para determinar a velocidade radial consistem em medir a variação em comprimento de onda ao longo dos espectros observados.

A velocidade radial obtida é a velocidade radial relativa entre a estrela e o observatório no momento de observação (velocidade radial observada,  $v_r$ ), levando em conta que

o observatório não pode ser considerado um referencial inercial devido aos movimentos do planeta. Desta forma, para caracterizar e poder comparar a velocidade radial nesse instante com outras medidas realizadas ou que serão realizadas, devemos estabelecer um sistema de referência inercial padrão para a sua medida. Portanto, precisamos corrigir a velocidade radial observada  $v_r$  pelos movimentos diurno e anual do observador. Assim, estabelecemos o baricentro do sistema solar como um referencial inercial, no qual, a partir do conhecimento dos movimentos do planeta podemos caracterizar esse referencial. A velocidade radial heliocêntrica ( $V_h$ ) é calculada nesse referencial e é o valor publicado e encontrado na literatura para a velocidade radial de um dado objeto. Podemos expressar esse resultado, a partir da equação:

$$\vec{V}_h = \vec{v}_r + \vec{v}_{rot} + \vec{v}_{\oplus}, \quad (5)$$

onde  $\vec{v}_{rot}$  é a componente da velocidade de rotação do observatório na superfície do planeta na direção da linha de visada, que é calculada sabendo a velocidade de rotação no Equador  $V_{Eq} = 0,465$  km/s, da latitude  $\varphi$  do observatório e das coordenadas da estrela, declinação  $\delta$  e ângulo horário  $H$ , obtida pela equação:

$$v_{rot} = V_{Eq} \cos \varphi \cos \delta \sin H, \quad (6)$$

em que  $\vec{v}_{\oplus}$  é a componente da velocidade da Terra em relação ao baricentro do sistema solar na direção da linha de visada e varia entre 29,3 km/s no afélio e 30,3 km/s no periélio (Barbieri, 2007).

A partir da velocidade radial podemos identificar em uma amostra de estrelas quais são os objetos que estão ligados gravitacionalmente e quais são estrelas de campo. Objetos que apresentem, dentro da incerteza, a mesma velocidade radial, estão ligados gravitacionalmente.

A partir dos espectros podemos calcular o *redshift* (ou *blueshift*)  $z$  segundo Karttunen et al. (2007) como:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{lab}}. \quad (7)$$

Em nosso caso, considerando o limite não relativístico ( $v \ll c$ ) e a velocidade radial  $v_r = v \cos \theta$  ao utilizar a Equação 4, encontramos

$$z = \frac{v_r}{c}. \quad (8)$$

Logo, podemos calcular o *redshift* (ou *blueshift*)  $z$  a partir do resultado obtido para velocidade radial da estrela. Assim, uma velocidade radial positiva  $v_r > 0$  indica um *redshift* ( $z > 0$ ) e uma velocidade radial negativa  $v_r < 0$  indica *blueshift* ( $z < 0$ ).

Nos espectros observados, a razão sinal-ruído  $S/N$  compara o nível do sinal com o nível do ruído de fundo. Quanto mais alto for a razão sinal-ruído, menor é a influência do ruído sobre a medição do sinal. Podemos obter, de maneira geral, nos espectros a razão sinal-ruído  $S/N$  calculada a partir de:

$$S/N = \frac{ng}{\sqrt{ng + (npg)^2}}, \quad (9)$$

onde  $n$  é o número de contagens de fótons,  $g$  é o ganho em elétrons por contagem,  $p$  é a razão média de ganho de um elemento de resolução espectral comparado com outro (Massey & Hanson, 2011).

Na prática, podemos calcular a razão sinal-ruído  $S/N$  através de um *software*. Por exemplo, a tarefa `splot` do IRAF calcula a razão sinal-ruído em uma região  $\Delta\lambda$  do espectro a partir de:

$$S/N = \frac{\text{MÉDIA}}{\text{RMS}}, \quad (10)$$

onde MÉDIA é a média de elementos de resolução na região  $\Delta\lambda$  do contínuo do espectro e RMS é o desvio padrão das medidas dentro da mesma região  $\Delta\lambda$  do espectro.

Outra informação importante presente nos espectros é a resolução espectral. Ela está relacionada com a capacidade de um instrumento resolver detalhes dos espectros observados. Quanto maior a resolução espectral de um instrumento, melhor ele conseguirá obter detalhes do espectro. A resolução espectral  $R$  pode ser calculada por:

$$R = \frac{\lambda_m}{\Delta\lambda}, \quad (11)$$

onde  $\lambda_m$  é o comprimento de onda médio do espectro (Massey & Hanson, 2011). Logo, a



As linhas escolhidas eram linhas de absorção de fácil identificação (linhas mais intensas, dupletos e tripletos) dentre as linhas existente no espectro. Buscamos então, em um banco de dados atômicos e moleculares<sup>1</sup>, qual o comprimento de onda em repouso  $\lambda_{lab}$  seria correspondente a linha desse elemento. Na Tabela 4 estão as linhas identificadas.

Tabela 4 – Linhas espectrais identificadas nos espectros das estrelas e utilizadas para calcular a velocidade radial (NIST, 2017).

| Linhas espectrais | Comprimento de onda $\lambda_{lab}$ (Å) |
|-------------------|---|
| Ca II             | 3933,66                                 |
| Ca II             | 3968,46                                 |
| Ca I              | 4226,73                                 |
| Mg I              | 5167,32                                 |
| Mg I              | 5172,68                                 |
| Mg I              | 5183,60                                 |
| Na I              | 5889,95                                 |
| Na I              | 5895,92                                 |

Para realizar a análise dos dados de forma mais simples e automática, usamos o IRAF, que é um *software* que contém ferramentas de análise de dados astronômicos através de tarefas (*tasks*) de pacotes. Em nosso caso, utilizamos o *software* para calcular a velocidade radial através da análise do espectro de estrelas.

Para o cálculo da velocidade radial heliocêntrica  $V_h$  os espectros obtidos devem apresentar os parâmetros: ascensão reta, declinação, data de observação, época e tempo universal. Para editar o parâmetro correspondente a época de observação *EPOCH* (época da observação), utilizamos a *task* `hedit`. Ela consiste em modificar no *header* do arquivo do espectro o parâmetro correspondente a época de observação. A tarefa, de modo geral, altera um parâmetro quando o usuário insere um outro valor e o salva no arquivo do espectro. Nos espectros analisados, a época de observação corresponde a J2000 (Tabela 2).

A *task* `rvidlines` do IRAF foi utilizada no cálculo das velocidades radiais. O usuário também deve informar à *task* um arquivo de linhas espectrais que serão identificadas no espectro. A partir da tabela de linhas (Tabela 4) criamos um arquivo listando as linhas de absorção que utilizamos para calcular a velocidade radial. A *task* realiza o cálculo numérico da velocidade radial a partir da fórmula para a velocidade radial (Equação 4) para cada linha espectral presente no arquivo de linhas. Como a velocidade radial heliocêntrica  $V_h$  leva em conta a época da observação, também é necessário informar à *task* o local onde foram realizadas as observações e obtido o espectro. Em nosso caso, as observações foram

<sup>1</sup> NIST - National Institute of Standards and Technology - Atomic Spectra Database  
<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

realizadas no telescópio SOAR.

Na execução da *task rvidlines*, buscamos identificar linhas de absorção ao longo do espectro e identificamos (no centroide da curva) o comprimento de onda correspondente às linhas espectrais que queríamos identificar (Figura 12).

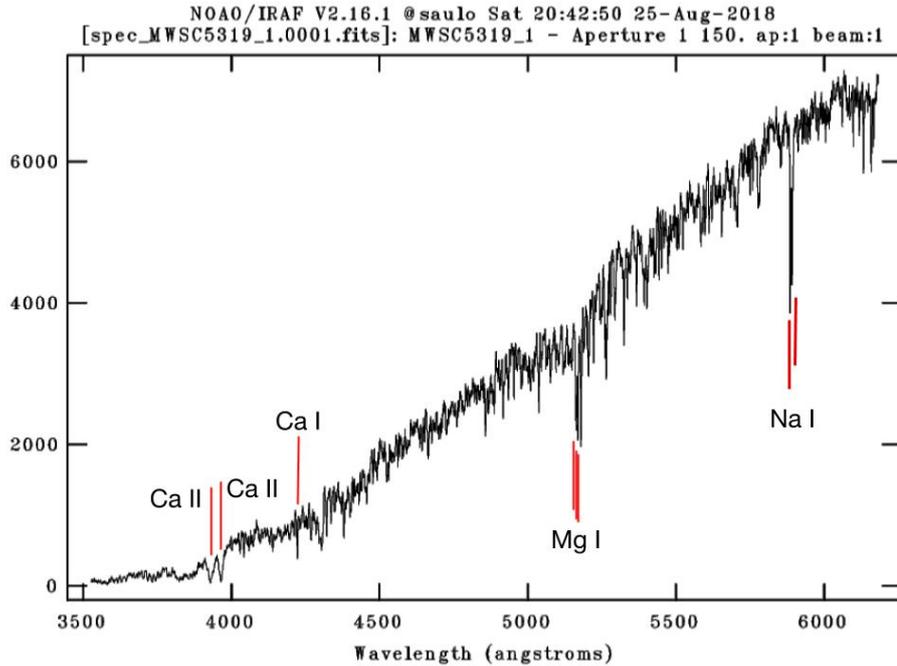


Figura 12 – Espectro de uma estrela do aglomerado MWSC 5319 com a indicação das linhas espectrais da Tabela 4 utilizadas para calcular a velocidade radial.

A *task* calcula a velocidade radial observada  $v_r$  a partir da identificação inicial de algumas linhas espectrais realizadas pelo usuário. Buscamos, assim, identificar linhas ao longo do espectro. Ao se selecionar uma linha, o *software* busca no arquivo qual o comprimento de onda de repouso  $\lambda_{lab}$  que corresponde a linha identificada e espera do usuário uma confirmação ou que ele insira o valor real do comprimento de onda da linha espectral. Depois da identificação manual de algumas linhas espectrais ao longo do espectro, o usuário pode indicar à *task* que esta faça a identificação automática do restante das linhas presentes no arquivo. Desta forma, com base no valor inserido pelo usuário para o comprimento de onda de repouso  $\lambda_{lab}$  e a utilização das linhas espectrais presentes no arquivo de linhas, o *software* calcula a variação em comprimento de onda  $\Delta\lambda$  e a velocidade radial observada  $v_r$  para cada linha. Ao final, a *task* realiza uma média aritmética simples das velocidades radiais observadas para cada linha e calcula a velocidade radial observada  $v_r$  do objeto, que é exibida ao final da execução da *task*. Se os espectros apresentarem todos os parâmetros descritos corretamente, o *software* calcula a velocidade radial heliocêntrica  $V_h$ . Os resultados encontrados são salvos em um arquivo.

## 4 Resultados e discussão

Uma vez aplicada a metodologia explicada na Seção 3.4, apresentamos na Tabela 5 os nossos principais resultados (velocidade radial observada  $v_r$  e heliocêntrica  $V_h$ ) para a subamostra UOCS de estrelas individuais estudadas. Apresentamos, por sua vez, na Tabela 6, os valores médios para velocidade radial heliocêntrica  $V_h$  encontrados para os aglomerados abertos.

Tabela 5 – Velocidades radiais observada ( $v_r$ ) e heliocêntricas ( $V_h$ ) para as estrelas da amostra.

| Estrela    | $v_r$ (km/s) | $\sigma_r$ (km/s) | $V_h$ (km/s) | $\sigma_h$ (km/s) |
|------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
| MWSC5117-2 | 165,170      | 17,022            | 172,890      | 17,022            |
| MWSC5117-3 | 151,720      | 12,150            | 159,500      | 12,150            |
| MWSC5117-4 | 178,8        | 18,784            | 186,510      | 18,784            |
| MWSC5279-1 | 165,170      | 17,022            | 192,140      | 17,022            |
| MWSC5279-2 | 165,170      | 17,022            | 192,110      | 17,022            |
| MWSC5295-1 | -33,761      | 57,152            | -5,930       | 57,152            |
| MWSC5295-2 | -144,340     | 14,462            | -116,460     | 14,462            |
| MWSC5295-3 | -224,390     | 17,205            | -196,540     | 17,205            |
| MWSC5295-4 | -173,280     | 90,173            | -145,450     | 90,173            |
| MWSC5295-5 | -135,980     | 17,577            | -108,200     | 17,577            |
| MWSC5312-1 | -9,196       | 1,956             | 20,051       | 1,956             |
| MWSC5312-2 | 3,040        | 5,857             | 32,273       | 5,857             |
| MWSC5312-3 | 3,040        | 5,857             | 32,230       | 5,857             |
| MWSC5312-4 | -116,770     | 10,517            | -87,581      | 10,517            |
| MWSC5312-5 | -39,473      | 9,501             | -10,315      | 9,501             |
| MWSC5312-6 | -130,130     | 11,857            | -101,000     | 11,857            |
| MWSC5318-1 | -87,826      | 11,549            | -58,205      | 11,549            |
| MWSC5318-2 | -75,310      | 10,633            | -45,700      | 10,633            |
| MWSC5318-3 | -65,926      | 17,678            | -36,334      | 17,678            |
| MWSC5318-4 | -61,261      | 16,645            | -31,708      | 16,645            |
| MWSC5319-1 | -410,430     | 27,468            | -381,400     | 27,468            |
| MWSC5319-1 | -214,110     | 10,056            | -185,020     | 10,056            |
| MWSC5319-2 | -240,630     | 10,376            | -211,560     | 10,376            |
| MWSC5319-3 | -455,570     | 24,655            | -426,560     | 24,655            |
| MWSC5319-4 | -439,650     | 28,653            | -410,670     | 28,653            |
| MWSC5319-5 | -421,280     | 31,660            | -392,320     | 31,660            |
| MWSC5323-1 | -359,580     | 26,783            | -331,140     | 26,783            |
| MWSC5323-2 | -480,360     | 34,699            | -451,950     | 34,699            |
| MWSC5323-4 | -511,390     | 29,942            | -483,010     | 29,942            |
| MWSC5323-5 | -475,660     | 31,868            | -447,260     | 31,868            |

Tabela 6 – Velocidades radiais heliocêntricas médias ( $V_h$ ) obtidas.

| Aglomerado Aberto | $V_h$ (km/s) | $\sigma$ (km/s) |
|-------------------|--------------|-----------------|
| MWSC5117          | 172,967      | 15,985          |
| MWSC5279          | 192,125      | 17,022          |
| MWSC5295          | -114,516     | 39,314          |
| MWSC5312          | -19,057      | 7,591           |
| MWSC5318          | -42,987      | 14,126          |
| MWSC5319          | -334,588     | 22,145          |
| MWSC5323          | -428,340     | 30,823          |

Embora os dados da amostra sejam de aglomerados abertos novos do catálogo MWSC descobertos por Schmeja et al. (2014), não tiveram suas velocidades radiais calculadas. Como se pode notar, alguns desses valores estão, em módulo, muito altos quando comparados com a velocidade de escape da Galáxia (ver, principalmente, MWSC 5319 e MWSC 5323). A velocidade de escape da Galáxia na vizinhança solar é de cerca de  $v_{escape} = 580 \pm 63$  km/s (Monari et al., 2018). Uma velocidade radial próxima da velocidade de escape da Galáxia indica que as estrelas não estariam ligadas gravitacionalmente à Galáxia. Segundo Barbieri (2007) raramente são encontrados valores para a velocidade radial de estrelas típicas da Galáxia de 500 km/s e para estrelas mais próximas, velocidades superiores a 50 km/s são raramente encontradas. Desta forma, esses resultados obtidos nos indicam que os possíveis problemas associados aos dados podem ser:

- (i) Resolução espectral;
- (ii) Calibração em comprimento de onda.

Os resultados obtidos podem ter sido influenciados pela baixa resolução dos espectros ( $R = 2800$ ), além da seleção de poucas linhas no espectro para o cálculo da velocidade radial. Realizamos alguns testes ao calcular a velocidade para objetos com velocidade radial heliocêntrica  $V_h$  conhecida na literatura (aglomerados-teste IC 2391 e NGC 6475, ver Seção 2.2) para verificar se havia algum problema associado a resolução espectral.

Vale ressaltar que os dados foram obtidos como arquivos do tipo `.tfits` e como a tarefa `rvidlines` utiliza arquivos `.fits`, foi necessário aprender e utilizar outras tarefas do IRAF para converter os arquivos e conseguir calcular a velocidade radial heliocêntrica. As tarefas utilizadas foram `trebin`, `tdump` e `rspectext`. A tarefa `trebin` cria uma tabela a partir do arquivo inicial `.tfits` em um arquivo `.tab`, enquanto que a tarefa `tdump` converte a tabela do arquivo `.tab` em formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange), gerando um arquivo `.txt`. Para finalizar, a tarefa `rspectext`

converte o arquivo `.txt` em um arquivo `.fits`, que é o espectro já no formato necessário para se calcular a velocidade radial heliocêntrica.

Nos cálculos das velocidades radiais heliocêntricas consideramos as velocidades obtidas no espectro de alta resolução ( $V_{h,alta}$ ), isto é,  $R = 80000$ , e no espectro com a mesma resolução da amostra ( $V_{h,baixa}$ ), com  $R = 2800$ . Para obter o espectro de baixa resolução foi necessário convoluir o espectro de alta resolução através da tarefa `gauss` presente no IRAF. Esta tarefa convolui um espectro de alta resolução com a função elíptica de Gauss especificado com uma dispersão espectral, de modo que o resultado obtido é o espectro de entrada na *task* com uma resolução menor. Nas Figuras 13a, 13b e 13c, observamos uma comparação entre espectros em alta resolução ( $R = 80000$ ) e em baixa resolução ( $R = 2800$ ).

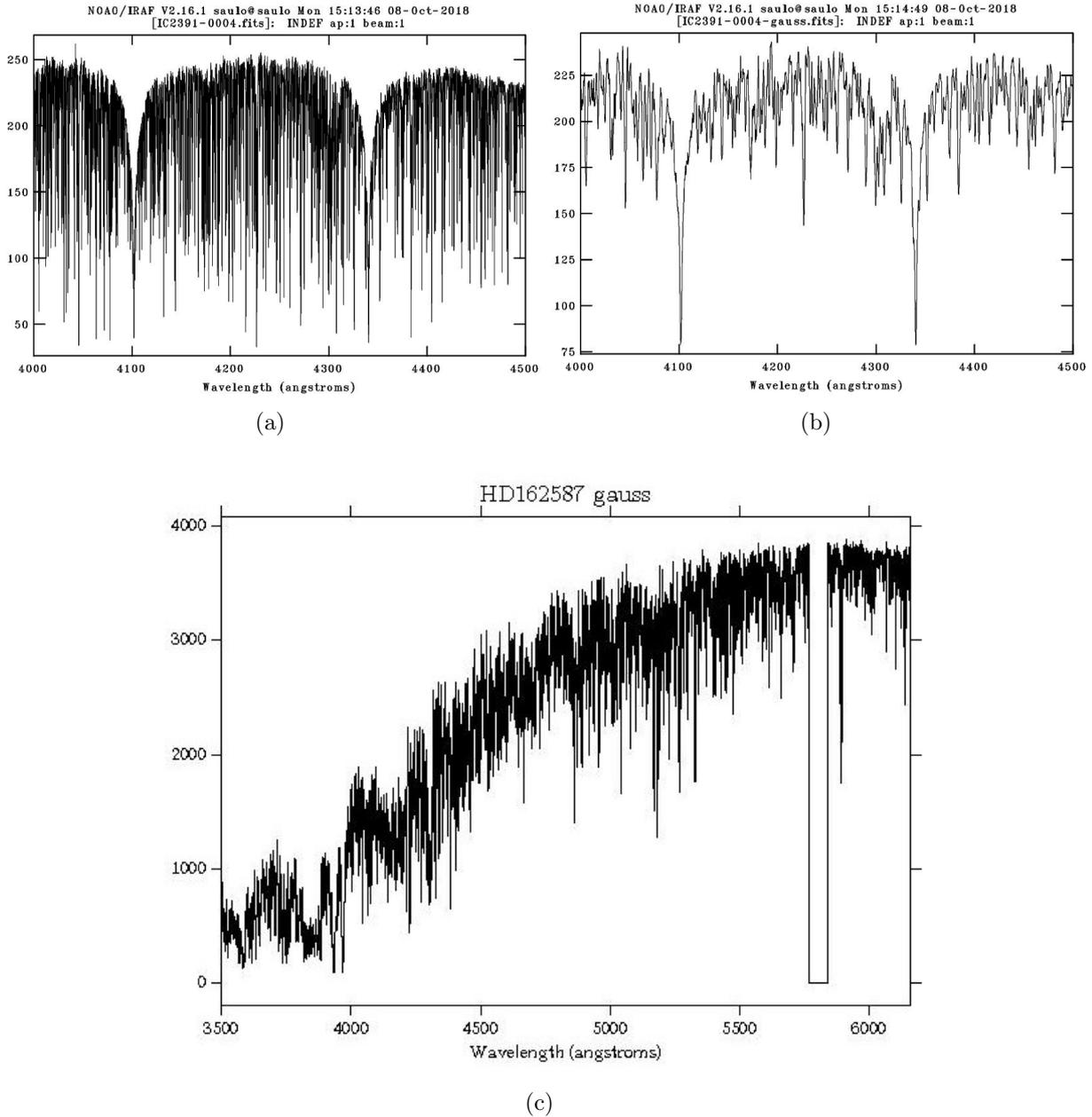


Figura 13 – Comparação entre os espectros de diferentes resoluções espectrais para estrelas dos aglomerados-teste IC 2391 e NGC 6475. Na Figura (a) observamos um espectro com resolução espectral  $R = 80000$  e na Figura (b) o mesmo espectro com resolução espectral  $R = 2800$ . Na Figura (c) observamos um espectro em baixa resolução ( $R = 2800$ ) para uma estrela gigante do tipo espectral K do aglomerado NGC 6475 no mesmo intervalo de comprimento de onda do *survey* UOCS.

Inicialmente, utilizamos o mesmo arquivo de linhas (Tabela 4) para o cálculo da velocidade radial heliocêntrica ( $V_h$ ) de cada espectro dos aglomerados-teste pelo mesmo método empregado na Seção 3.4. Além disso, utilizamos um arquivo de linhas maior (com 297 linhas, ver Tabela 14, em Anexo A) para comparar os resultados obtidos para a velocidade radial heliocêntrica com um arquivo de linhas menor. O arquivo de linhas menor (Tabela 4) foi utilizado no cálculo da velocidade radial em baixa resolução enquanto que o

arquivo de linhas maior (Tabela 14) foi utilizado em alta resolução. Consideramos, nesse teste, os espectros convoluídos na mesma resolução da amostra do projeto ( $R = 2800$ ).

Os resultados obtidos para as velocidades radiais heliocêntricas calculadas em alta e baixa resolução dos espectros dos dois aglomerados-teste, IC 2391 e NGC 6495, pode ser observado nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Velocidades radiais heliocêntricas em alta ( $V_{h,alta}$ ) e baixa ( $V_{h,baixa}$ ) resolução das estrelas do aglomerado IC 2391.

| Estrela | $V_{h,alta}$ (km/s) | $\sigma_{alta}$ (km/s) | $V_{h,baixa}$ (km/s) | $\sigma_{baixa}$ (km/s) |
|---------|---------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|
| 004     | 3,851               | 0,064                  | 3,430                | 0,455                   |
| 005     | -5,130              | 0,291                  | -6,179               | 0,405                   |
| 010     | 14,050              | 0,718                  | 17,771               | 1,391                   |
| 014     | 18,366              | 0,654                  | 17,334               | 0,797                   |
| 022     | 46,522              | 4,402                  | 47,382               | 0,865                   |
| 026     | 43,043              | 3,926                  | 41,398               | 0,999                   |
| 035     | 19,350              | 0,589                  | 16,185               | 0,461                   |
| 036     | 24,164              | 0,313                  | 22,770               | 0,715                   |
| 044     | 27,580              | 0,599                  | 21,856               | 0,951                   |
| 051     | 14,063              | 0,494                  | 12,913               | 0,913                   |
| 052     | 12,037              | 0,254                  | 10,634               | 0,420                   |
| 056     | 12,979              | 0,461                  | 10,640               | 0,589                   |
| 073     | 16,786              | 0,084                  | 15,118               | 0,449                   |
| 095     | 13,383              | 0,327                  | 4,120                | 1,372                   |
| 096     | 12,162              | 0,183                  | 10,462               | 0,378                   |
| 097     | -11,087             | 1,454                  | -14,590              | 1,035                   |
| 098     | 15,347              | 0,171                  | 14,679               | 0,512                   |
| 100     | 14,968              | 0,326                  | 11,889               | 0,318                   |
| 101     | 25,442              | 1,110                  | 17,395               | 0,308                   |

Tabela 8 – Velocidades radiais heliocêntricas em alta ( $V_{h,alta}$ ) e baixa ( $V_{h,baixa}$ ) resolução das estrelas do aglomerado NGC 6475.

| Estrela  | $V_{h,alta}$ (km/s) | $\sigma_{alta}$ (km/s) | $V_{h,baixa}$ (km/s) | $\sigma_{baixa}$ (km/s) |
|----------|---------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|
| HD162391 | -37,114             | 0,292                  | -34,000              | 1,193                   |
| HD162587 | -42,285             | 0,073                  | -40,537              | 0,674                   |
| HD320768 | -35,310             | 0,352                  | -34,668              | 0,951                   |
| HD320865 | -22,391             | 0,734                  | -35,537              | 0,306                   |
| JJ08     | -36,124             | 0,087                  | -34,662              | 0,516                   |
| JJ10     | -36,694             | 0,068                  | -37,583              | 0,594                   |
| JJ22     | -35,711             | 0,316                  | -35,33               | 0,351                   |

Os resultados para a velocidade radial heliocêntrica média, obtidas em alta e baixa resolução, das estrelas dos aglomerados estão reunidos na Tabela 9 e estão comparados com os valores encontrados na literatura.

Tabela 9 – Comparação das velocidades radiais médias heliocêntricas das estrelas dos aglomerados IC 2391 e NGC 6475 em alta ( $V_{h,alta}$ ) e em baixa resolução ( $V_{h,baixa}$ ) com a literatura ( $V_{h,lit}$ ) (Conrad et al., 2014).

| Aglomerado | $V_{h,alta}$ | $\sigma_{alta}$ | $V_{h,baixa}$ | $\sigma_{baixa}$ | $V_{h,lit}$ | $\sigma_{lit}$ |
|------------|--------------|-----------------|---------------|------------------|-------------|----------------|
| Aberto     | (km/s)       | (km/s)          | (km/s)        | (km/s)           | (km/s)      | (km/s)         |
| IC 2391    | 16,73        | 1,438           | 14,486        | 0,756            | 12,487      | 3,533          |
| NGC 6475   | -35,09       | 0,352           | -36,045       | 0,719            | -21,377     | 12,72          |

Pela Tabela 9 observamos que os valores das velocidades radiais média heliocêntrica são semelhantes, considerando as incertezas, tanto para alta resolução, quanto para baixa resolução. Além disso, os valores obtidos para as velocidades radiais são semelhantes ao valor encontrado na literatura, considerando a incerteza dos dados (Conrad et al., 2014). Os dados utilizados por Conrad et al. foram do catálogo de velocidades radiais RAVE (Radial Velocity Experiment; Steinmetz et al. 2006). Apesar de o *survey* RAVE apresentar velocidades radiais heliocêntricas muito acuradas (cerca de 0,005 km/s) e utilizar técnicas de correlação cruzada para o cálculo da velocidade radial (Steinmetz et al., 2006), Conrad et al. utilizou uma média aritmética ponderada pela probabilidade de pertencimento da estrela ao aglomerado no cálculo da velocidade radial do aglomerado a partir de uma amostra de estrelas do campo do aglomerado (Conrad et al., 2014).

Os resultados encontrados para um pequeno número de linhas espectrais (Tabela 4) selecionadas nos espectros dos aglomerados IC 2391 e NGC 6475 podem ser observados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Velocidades radiais heliocêntricas ( $V_h$ ) das estrelas do aglomerado NGC 6475 em baixa resolução ( $R = 2800$ ) a partir das linhas espectrais da Tabela 4.

| Estrela  | $V_h$ (km/s) | $\sigma$ (km/s) |
|----------|--------------|-----------------|
| HD162391 | -17,030      | 6,919           |
| HD162587 | -13,389      | 1,452           |
| HD320768 | -9,284       | 12,763          |
| HD320865 | -13,281      | 1,883           |
| JJ08     | -11,959      | 1,614           |
| JJ10     | -11,915      | 1,563           |
| JJ22     | -15,068      | 3,083           |

Tabela 11 – Velocidades radiais heliocêntricas ( $V_h$ ) das estrelas do aglomerado IC 2391 em baixa resolução ( $R = 2800$ ) a partir das linhas espectrais da Tabela 4.

| Estrela | $V_h$ (km/s) | $\sigma$ (km/s) |
|---------|--------------|-----------------|
| 004     | 7,232        | 1,052           |
| 005     | -2,770       | 3,301           |
| 010     | 13,097       | 14,672          |
| 014     | 22,394       | 5,820           |
| 022     | 54,041       | 2,616           |
| 026     | 50,475       | 2,227           |
| 035     | 20,126       | 3,737           |
| 036     | 28,285       | 6,728           |
| 044     | 27,916       | 7,277           |
| 051     | 17,996       | 5,788           |
| 052     | 11,731       | 2,810           |
| 056     | 15,366       | 1,910           |
| 073     | 19,534       | 1,053           |
| 095     | 13,909       | 1,820           |
| 096     | 20,133       | 4,883           |
| 097     | -1,188       | 26,002          |
| 098     | 14,535       | 2,947           |
| 100     | 11,982       | 0,232           |
| 101     | 20,999       | 4,659           |

Os resultados para a velocidade radial heliocêntrica média das estrelas dos aglomerados com poucas e muitas linhas espectrais selecionadas estão reunidos na Tabela 12. Utilizamos os resultados obtidos na Tabela 10 para a velocidade radial heliocêntrica média com muitas linhas espectrais selecionadas.

Tabela 12 – Velocidades radiais heliocêntricas médias das estrelas dos aglomerados IC 2391 e NGC 6475 selecionando poucas linhas ( $V_{h,p}$ ) (Tabela 4) e muitas ( $V_{h,m}$ ) (Tabela 14) linhas espectrais comparando com a literatura ( $V_{h,lit}$ ) (Conrad et al., 2014).

| Aglomerado | $V_{h,p}$<br>(km/s) | $\sigma_p$<br>(km/s) | $V_{h,m}$<br>(km/s) | $\sigma_m$<br>(km/s) | $V_{h,lit}$<br>(km/s) | $\sigma_{lit}$<br>(km/s) |
|------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| Aberto     |                     |                      |                     |                      |                       |                          |
| IC 2391    | 19,252              | 7,632                | 14,486              | 0,756                | 12,487                | 3,533                    |
| NGC 6475   | -13,132             | 5,744                | -36,045             | 0,719                | -21,377               | 12,72                    |

Considerando que o número de linhas espectrais marcado nos espectros das estrelas dos aglomerados-teste é diferente, não observamos uma variação significativa no valor obtido para a velocidade radial heliocêntrica. Devemos apenas ressaltar que a incerteza encontrada ao se selecionar poucas linhas espectrais é maior do que aquela encontrada com a seleção de muitas linhas. Esse resultado faz sentido, tendo em vista que se há um maior número de linhas identificadas, haverá uma melhor estatística dos valores das velocidades radiais calculadas para cada linha espectral de cada espectro e de cada estrela.

Além disso, há poucas linhas espectrais bem visíveis em baixa resolução. Desta forma, considerando um arquivo de linhas que percorre todo o espectro e, também, um arquivo de linhas com poucas linhas distribuídas ao longo do espectro, encontramos praticamente o mesmo resultado para a velocidade radial heliocêntrica.

Quando comparamos as incertezas obtidas para os nossos dados com a literatura, observamos que elas são menores do que aquela encontrada por Conrad et al. (2014). A maior incerteza  $\sigma_{lit}$  da literatura difere dos resultados encontrados devido ao método empregado no cálculo da velocidade radial do aglomerado.

Assim, esses resultados nos sugerem que o problema não está relacionado com a resolução espectral, pois a despeito do número de linhas selecionadas (presentes no arquivo de linhas) encontramos os mesmos resultados da literatura, dentro da incerteza. Desta forma, para a amostra do UOCS, provavelmente existem problemas associados à calibração em comprimento de onda realizada para os espectros, afetando, portanto, os resultados encontrados.

Recentemente os dados do *Gaia* DR2 foram disponibilizados com uma amostra de quase 1,7 bilhão de objetos e mais de 7,2 milhões de estrelas com a velocidade radial média calculada (Gaia Collaboration et al., 2018). Desta forma, buscamos nos dados do *Gaia* DR2 as estrelas da nossa amostra. Sabendo que o *Gaia* DR2 aumentou o número de aglomerados abertos observados, já que cerca de 50% dos aglomerados abertos detectados pelos *surveys* anteriores estavam até 2 kpc de nós. Esse resultado reflete o fato de que pela diminuição de tamanho angular e luminosidade dos aglomerados com a distância associada com obscuração pela poeira interestelar dificulta a observação desses objetos. (Castro-Ginard et al., 2018). Entretanto, com o *Gaia* DR2 foi possível obter informações de objetos em torno de um raio de 4 kpc ao redor de nós (Cantat-Gaudin et al., 2018).

Assim, para uma maior confiabilidade nos dados, utilizamos os *finding charts* dos aglomerados (Figura 7). O resultado das velocidades radiais obtidas pelo *Gaia* DR2, disponíveis anteriormente na literatura e calculados neste projeto para estrelas individuais foram comparados na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparação da velocidade radial heliocêntrica ( $V_h$ ) dos dados do UOCS com os dados do *Gaia* DR2 e da literatura.

| Estrela    | <i>Gaia</i> ***     |              |                 | Literatura             |              |                 | UOCS         |                 |              |                 |
|------------|---------------------|--------------|-----------------|------------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
|            | ID                  | $V_h$ (km/s) | $\sigma$ (km/s) | ID                     | $V_h$ (km/s) | $\sigma$ (km/s) | $V_h$ (km/s) | $\sigma$ (km/s) | $V_h$ (km/s) | $\sigma$ (km/s) |
| MWSC5117-2 | 3546857870771240704 | 11,82        | 2,19            | —                      | —            | —               | —            | —               | 172,890      | 17,022          |
| MWSC5117-3 | 3546859073362086912 | 20,83        | 0,28            | —                      | —            | —               | —            | —               | 159,500      | 12,15           |
| MWSC5117-4 | 3546839106057149312 | 1,49         | 1,03            | TYC 6089-251-1**       | 19,463       | 0,646           | —            | —               | 186,510      | 18,784          |
| MWSC5279-1 | 6255554759216548480 | 8,18         | 2,01            | —                      | —            | —               | —            | —               | 192,140      | 17,022          |
| MWSC5279-2 | 6255559569580076672 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | 192,110      | 17,022          |
| MWSC5295-1 | 6266425317146176640 | 11,52        | 2,05            | UCAC2 27113848*        | 6,205        | 1,706           | —            | —               | -5,930       | 57,152          |
| MWSC5295-2 | 6266415082245706624 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -116,460     | 14,462          |
| MWSC5295-3 | 6266413055021139200 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -196,540     | 17,205          |
| MWSC5295-4 | 6266412024228976640 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -145,450     | 90,173          |
| MWSC5295-5 | 6266330797806366464 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -108,200     | 17,577          |
| MWSC5312-1 | 6249858773591078144 | -6,99        | 1,89            | —                      | —            | —               | —            | —               | 20,051       | 1,956           |
| MWSC5312-2 | 6249858670511862784 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | 32,273       | 5,857           |
| MWSC5312-3 | 6250590154980714240 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | 32,230       | 5,857           |
| MWSC5312-4 | 6250609362074444288 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -87,581      | 10,517          |
| MWSC5312-5 | 6250610358506864384 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -10,315      | 9,501           |
| MWSC5312-6 | 625058362629849344  | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -101,000     | 11,857          |
| MWSC5318-1 | 4324885522787878272 | -11,94       | 0,49            | —                      | —            | —               | —            | —               | -58,205      | 11,549          |
| MWSC5318-2 | 4324887588670706944 | 25,57        | 6,38            | —                      | —            | —               | —            | —               | -45,700      | 10,633          |
| MWSC5318-3 | 4324887279433043328 | —            | —               | UCAC4 364-074065*      | -19,6060     | 5,309           | —            | —               | -36,334      | 17,678          |
| MWSC5318-4 | 4324935589225246464 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -31,708      | 16,645          |
| MWSC5319-1 | 4328427913032130688 | 45,52        | 0,48            | RAVE J162105.7-150841* | 30,1870      | 2,961           | —            | —               | -381,400     | 27,468          |
| MWSC5319-2 | 4328427913032130688 | 45,52        | 0,48            | RAVE J162105.7-150841* | 30,1870      | 2,961           | —            | —               | -185,020     | 10,056          |
| MWSC5319-3 | 4328239965264555392 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -211,560     | 10,376          |
| MWSC5319-4 | 4328419597975610624 | 7,98         | 0,42            | —                      | —            | —               | —            | —               | -426,560     | 24,655          |
| MWSC5319-5 | 4328231512768900992 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -410,670     | 28,653          |
| MWSC5323-1 | 4351825692270196608 | 23,58        | 1,90            | —                      | —            | —               | —            | —               | -392,320     | 31,66           |
| MWSC5323-2 | 4351827066659896960 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -331,140     | 26,783          |
| MWSC5323-3 | 4351854588810195328 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -451,950     | 34,699          |
| MWSC5323-4 | 4351774083943108992 | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -483,010     | 29,942          |
| MWSC5323-5 | —                   | —            | —               | —                      | —            | —               | —            | —               | -447,260     | 31,868          |

ID: Identificador da estrela

\* Kunder et al. (2017)

\*\* Munari et al. (2014)

\*\*\* Gaia Collaboration et al. (2018)

Observamos que os valores para a velocidade radial média encontrada pelo *Gaia* DR2 e neste projeto para os mesmos objetos se encontram bem diferentes (entre 17,45 km/s e 426,92 km/s). O método utilizado para o cálculo da velocidade radial pelo *Gaia* é obtido através da correlação cruzada para um espectro no intervalo de comprimento de onda próximo ao tripleto de Ca II (8450 a 8720 Å)(Gaia Collaboration et al., 2018).

Vale ressaltar que as incertezas encontradas pelo *Gaia* DR2 são até duas ordens de magnitude menores do que aquelas encontradas pela nossa amostra, além de que nem todas as estrelas da nossa amostra tiveram a velocidade radial obtidas pelo *Gaia* DR2, sem contar que o *Gaia* não tem uma resolução tão alta ( $R = 11500$ ) além de usar uma lista de linhas limitada, dado que o intervalo espectral utilizado no cálculo da velocidade radial é pequeno.

## 5 Conclusões e perspectivas

Neste trabalho consideramos uma amostra de 7 aglomerados abertos, cerca de 30 espectros estelares, retirados do *survey* UOCS. Os espectros analisados tiveram suas velocidades radiais heliocêntricas obtidas por meio do desvio Doppler através de tarefas do *software* IRAF. Para um dado espectro de uma estrela, buscamos analisar as linhas de absorção presentes no intervalo de comprimento de onda considerado do espectro. Para cada linha, consideramos seu comprimento de onda medido em laboratório  $\lambda_{lab}$ , isto é, em repouso e disponível em um banco de dados atômicos e moleculares. O *software* calcula a velocidade radial, a partir da Equação 4, ao comparar o comprimento de onda da linha medido  $\lambda_{obs}$  no espectro com o comprimento de onda da linha em repouso  $\lambda_{lab}$  e realiza uma média aritmética simples das velocidades das estrelas para a obtenção das velocidades radiais médias heliocêntricas para cada aglomerado.

Os dados preliminares analisados neste projeto apresentam resultados cujo módulo da velocidade radial heliocêntrica é bem elevado quando comparados com a velocidade de escape da Galáxia ( $v_{escape} = 580 \pm 63$  km/s; Monari et al. 2018). Conforme Barbieri (2007), a velocidade radial típica de estrelas da Galáxia não poderia adquirir estes valores encontrados no projeto, pois indicaria que as estrelas não estariam ligadas gravitacionalmente à Galáxia. Podemos observar tais resultados ao comparar os valores encontrados pelo *Gaia* DR2 aos nossos dados (Tabela 13).

Dois problemas poderiam estar afetando os dados: resolução espectral ou calibração em comprimento de onda dos espectros. Para verificar se há algum problema associado a resolução espectral, analisamos dados da literatura para aglomerados-teste IC 2391 e NGC 6475, buscando calcular a velocidade radial heliocêntrica para estrelas de tipo espectral similar a da amostra. A velocidade radial heliocêntrica encontrada para os aglomerados está de acordo com a literatura, dentro da incerteza. Consideramos também que utilizar uma lista de linhas espectrais a ser identificadas de poucas ou muitas linhas não afeta grandemente o valor médio encontrado para a velocidade radial da amostra, bem como a resolução do espectro (alta ou baixa) não influencia grandemente no valor médio encontrado para a velocidade radial.

Desta forma, estes resultados sugerem com base nos aglomerados-teste IC 2391 e NGC 6475 que provavelmente existem problemas associados à calibração em comprimento de onda dos espectros que afetaram os resultados encontrados na amostra do projeto. Esse

problema deve estar associado com a dificuldade, durante o processo de redução dos dados, em identificar o pico correspondente às linhas de emissão e de linhas próximas no espectro das lâmpadas de calibração.

Como perspectivas do presente trabalho destacados a utilização de outros métodos para avaliar o pertencimento das estrelas aos aglomerados abertos observados. Uma possibilidade para estimar o pertencimento das estrelas é utilizar métodos probabilísticos bayesianos considerando o movimento próprio obtido do *Gaia* DR2 para os objetos. Além disso, a partir dos conceitos aprendidos e desenvolvidos neste projeto, durante a Iniciação Científica e a graduação, o trabalho sumarizado aqui será continuado, na medida do possível, como parte de trabalho de Mestrado Acadêmico ao analisar toda a amostra do UOCS cinemática e quimicamente.

# REFERÊNCIAS

- Addison-Wesley, P. (2008). Boston: Pearson Education.
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., & Scott, P. (2009). The Chemical Composition of the Sun. *ARA&A*, *47*, 1, 481–522.
- Barbieri, C. (2007). *Fundamentals of Astronomy*. Boca Raton: Taylor & Francis Ltd.
- Barrado y Navascués, D., Stauffer, J. R., & Jayawardhana, R. (2004). Spectroscopy of Very Low Mass Stars and Brown Dwarfs in IC 2391: Lithium Depletion and H $\alpha$  Emission. *ApJ*, *614*, 1, 386–397.
- Bastian, N. & Lardo, C. (2018). Multiple Stellar Populations in Globular Clusters. *AR&A*, *56*, 83–136.
- Benacquista, M. J. (2006). Relativistic Binaries in Globular Clusters. *Living Reviews in Relativity*, *9*, 2.
- Bland-Hawthorn, J. & Gerhard, O. (2016). The Galaxy in Context: Structural, Kinematic & Integrated Properties. *ARA&A*, *54*, 529–596.
- Cantat-Gaudin, T., Jordi, C., Vallenari, A., Bragaglia, A., Balaguer-Núñez, L., Soubiran, C., Bossini, D., Moitinho, A., Castro-Ginard, A., Krone-Martins, A., Casamiquela, L., Sordo, R., & Carrera, R. (2018). A Gaia DR2 view of the Open Cluster population in the Milky Way. *ArXiv e-prints*.
- Carraro, G., Semenko, E. A., & Villanova, S. (2016). Radial Velocities and Metallicities of Red Giant Stars in the Old Open Cluster NGC 7762. *ApJ*, *152*, 6, 224, 6.
- Castro-Ginard, A., Jordi, C., Luri, X., Julbe, F., Morvan, M., Balaguer-Núñez, L., & Cantat-Gaudin, T. (2018). A new method for unveiling Open Clusters in Gaia: new nearby Open Clusters confirmed by DR2. *ArXiv e-prints*.
- Chiappini, C. (2001). The Formation and Evolution of the Milky Way. *American Scientist*, 506–515.
- Clemens, J. C., Crain, J. A., & Anderson, R. (2004). The Goodman spectrograph. *SPIE*, *5492*, 331–340.

- Comins, N. F. & Kaufmann III, W. J. (2010). *Descobrimos o universo*. Porto Alegre: Bookman.
- Conrad, C., Scholz, R.-D., Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Schilbach, E., Röser, S., Boeche, C., Kordopatis, G., Siebert, A., Williams, M., Munari, U., Matijević, G., Grebel, E. K., Zwitter, T., de Jong, R. S., Steinmetz, M., Gilmore, G., Seabroke, G., Freeman, K., Navarro, J. F., & et al. (2014). A RAVE investigation on Galactic open clusters. I. Radial velocities and metallicities. *A&A*, 562, A54, 16.
- Conroy, C. & Spergel, D. N. (2011). On the Formation of Multiple Stellar Populations in Globular Clusters. *ApJ*, 726, 1, 13.
- Dias, W. S., Alessi, B. S., Moitinho, A., & Lépine, J. R. D. (2002). New catalogue of optically visible open clusters and candidates. *A&A*, 389, 871–873.
- Dib, S., Schmeja, S., & Parker, R. J. (2018). Structure and mass segregation in Galactic stellar clusters. *MNRAS*, 473, 1, 849–859.
- Eggen, O. J., Lynden-Bell, D., & Sandage, A. R. (1962). Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed. *ApJ*, 1, 225, 357–379.
- Freeman, K. & Bland-Hawthorn, J. (2002). The New Galaxy: Signatures of Its Formation. *ARA&A*, 40, 487–537.
- Froebrich, D. (2017). New Compact Star Cluster Candidates in the Galactic Plane. *MNRAS*, 469, 2, 1545–1552.
- Gaia Collaboration, Babusiaux, C., van Leeuwen, F., Barstow, M. A., Jordi, C., Vallenari, A., Bossini, D., Bressan, A., Cantat-Gaudin, T., van Leeuwen, M., & et al. (2018). Gaia Data Release 2: Observational Hertzsprung-Russell diagrams. *ArXiv e-prints*.
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A. L., Biermann, M., Evans, D. W., Eyer, L., & et al. (2018). Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties. *A&A*, 616, A1, 22.
- Joshi, Y. C. (2017a). Open star clusters and Galactic structure. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 330, 227–228.

- Joshi, Y. C. (2017b). Probing Nearby Galactic Structure Through Open Star Clusters. *Stars: From Collapse to Collapse*, 510, 81.
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., & Donner, K. J. (2007). *Fundamental Astronomy*. Berlin: Springer.
- Kepler, S. O. & Saraiva, M. F. O. (2014). *Astronomia e Astrofísica*. São Paulo: Livraria da Física.
- Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Schilbach, E., Röser, S., & Scholz, R.-D. (2013). Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters. *A&A*, 558, A53, 8.
- Kunder, A., Kordopatis, G., Steinmetz, M., Zwitter, T., McMillan, P. J., Casagrande, L., Enke, H., Wojno, J., Valentini, M., Chiappini, C., & et al. (2017). The Radial Velocity Experiment (RAVE): Fifth Data Release. *AJ*, 153, 2, 75.
- Landau, L. & Lifshitz, E. (1971). *The Classical Theory of Fields*. London: Pergamon Press.
- Massey, P. & Hanson, M. M. (2011). Astronomical spectroscopy. *ArXiv e-prints*.
- Monari, G., Famaey, B., Carrillo, I., Piffl, T., Steinmetz, M., Wyse, R. F. G., Anders, F., Chiappini, C., & Janßen, K. (2018). The escape speed curve of the Galaxy obtained from Gaia DR2 implies a heavy Milky Way. *A&A*, 616, L9, 5.
- Munari, U., Henden, A., Frigo, A., Zwitter, T., Bienaymé, O., Bland-Hawthorn, J., Boeche, C., Freeman, K. C., Gibson, B. K., Gilmore, G., & et al. (2014). APASS Landolt-Sloan BVgri Photometry of RAVE Stars. I. Data, Effective Temperatures, and Reddenings. *AJ*, 148, 5, 81.
- NIST (2017). *Atomic Spectra Database*. <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database/> Acesso em 2 de agosto de 2018.
- Platais, I., Melo, C., Mermilliod, J.-C., Kozhurina-Platais, V., Fulbright, J. P., Méndez, R. A., Altmann, M., & Sperauskas, J. (2007). WIYN open cluster study. XXVI. Improved kinematic membership and spectroscopy of IC 2391. *A&A*, 461, 2, 509–522.
- Pols, O. (2011). *Stellar Structure and Evolution*. Utrecht: Astronomical Institute Utrecht.

- Schmeja, S., Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Röser, S., Schilbach, E., Froebrich, D., & Scholz, R.-D. (2014). Global survey of star clusters in the Milky Way. III. 139 new open clusters at high Galactic latitudes. *A&A*, *568*, A51, 9.
- Scholz, R.-D., Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Röser, S., & Schilbach, E. (2015). Global survey of star clusters in the Milky Way. IV. 63 new open clusters detected by proper motions. *A&A*, *581*, A39, 15.
- SDSS (2005). *Spectral cross-correlation templates*. <http://classic.sdss.org/dr5/algorithms/spectemplates/> Acesso em 2 de agosto de 2018.
- Searle, L. & Zinn, R. (1978). Compositions of halo clusters and the formation of the galactic halo. *ApJ*, *136*, 748.
- Soubiran, C., Cantat-Gaudin, T., Romero-Gomez, M., Casamiquela, L., Jordi, C., Vallenari, A., Antoja, T., Balaguer-Núñez, L., Bossini, D., Bragaglia, A., & et al. (2018). Open cluster kinematics with Gaia DR2. *ArXiv e-prints*.
- Sparke, L. & Gallagher, J. (2007). *Galaxies in the Universe: An Introduction*. New York: Cambridge University Press.
- Steinmetz, M., Zwitter, T., Siebert, A., Watson, F. G., Freeman, K. C., Munari, U., Campbell, R., Williams, M., Seabroke, G. M., Wyse, R. F. G., & et al. (2006). The Radial Velocity Experiment (RAVE): First Data Release. *AJ*, *132*, 4, 1645–1668.
- Turner, D. G., Forbes, D., van den Bergh, S., Younger, P. F., & Berdnikov, L. N. (2005). The Open Cluster Ruprecht 91 and Its Cepheids. *AJ*, *130*, 3, 1194–1205.
- Villanova, S., Carraro, G., & Saviane, I. (2009). A spectroscopic study of the open cluster NGC 6475 (M7). Chemical abundances from stars in the range  $T_{eff} = 4500-10000$  K. *A&A*, *504*, 3, 845–852.

# APÊNDICE A – Linhas espectrais

Tabela 14 – Linhas espectrais identificadas nos espectros das estrelas dos aglomerados-teste (NIST, 2017).

| Linha espectral | Comprimento de onda $\lambda_{lab}$ (Å) |
|-----------------|---|
| FeI             | 3859,9110                               |
| FeI             | 3865,5230                               |
| FeI             | 3872,5010                               |
| FeI             | 3878,0180                               |
| FeI             | 3878,5730                               |
| FeI             | 3899,7070                               |
| TiII            | 3900,5400                               |
| FeI             | 3902,9460                               |
| SiI             | 3905,5230                               |
| FeI             | 3906,4800                               |
| FeI             | 3917,1800                               |
| FeI             | 3920,2580                               |
| FeI             | 3922,9120                               |
| FeI             | 3930,2970                               |
| CaII            | 3933,6630                               |
| AlI             | 3944,0100                               |
| FeI             | 3949,9530                               |
| FeI             | 3951,1640                               |
| AlI             | 3961,5200                               |
| CaII            | 3968,4690                               |
| HI              | 3970,0720                               |
| FeI             | 4005,2420                               |
| TiII            | 4012,3850                               |
| FeI             | 4045,8120                               |
| FeI             | 4063,5940                               |
| FeI             | 4067,9777                               |
| FeI             | 4070,7707                               |
| FeI             | 4071,7380                               |
| FeI             | 4073,7623                               |
| SrII            | 4077,7100                               |
| HI              | 4101,7400                               |
| FeI             | 4121,8026                               |
| FeI             | 4132,0580                               |
| FeI             | 4136,9977                               |
| FeI             | 4143,8680                               |
| FeII            | 4178,8620                               |
| FeI             | 4181,7540                               |
| FeI             | 4187,0390                               |
| FeI             | 4187,7950                               |
| FeI             | 4198,2750                               |

*Continua na próxima página*

Tabela 14 – *Continuação*

| Linha espectral | Comprimento de onda $\lambda_{lab}$ (Å) |
|-----------------|---|
| FeI             | 4199,0950                               |
| SrII            | 4215,5200                               |
| FeI             | 4216,1838                               |
| FeI             | 4222,2131                               |
| CaI             | 4226,7300                               |
| FeI             | 4227,4266                               |
| FeII            | 4233,1720                               |
| FeI             | 4233,6028                               |
| FeI             | 4235,9370                               |
| ScII            | 4246,8220                               |
| FeI             | 4250,1195                               |
| FeI             | 4250,7869                               |
| CrI             | 4254,3300                               |
| FeI             | 4260,4744                               |
| FeI             | 4271,1538                               |
| FeI             | 4271,7605                               |
| CrI             | 4274,7980                               |
| FeI             | 4282,4030                               |
| CrI             | 4289,7160                               |
| FeI             | 4294,1240                               |
| TiII            | 4300,0500                               |
| TiII            | 4301,9140                               |
| CaI             | 4302,5300                               |
| FeI             | 4307,9020                               |
| FeI             | 4325,7620                               |
| HI              | 4340,4700                               |
| FeI             | 4383,5450                               |
| FeI             | 4389,2440                               |
| TiII            | 4395,0300                               |
| TiII            | 4399,7700                               |
| FeI             | 4404,7504                               |
| FeI             | 4415,1225                               |
| FeII            | 4416,8300                               |
| TiII            | 4417,7200                               |
| CaI             | 4425,4400                               |
| FeI             | 4427,3100                               |
| FeI             | 4442,3390                               |
| TiII            | 4443,8000                               |
| FeI             | 4454,3810                               |
| CaI             | 4454,7800                               |
| FeI             | 4461,6528                               |
| FeI             | 4466,5518                               |
| TiII            | 4468,5000                               |
| FeI             | 4469,3756                               |
| FeI             | 4489,7391                               |

*Continua na próxima página*

Tabela 14 – *Continuação*

| Linha espectral | Comprimento de onda $\lambda_{lab}$ (Å) |
|-----------------|---|
| FeII            | 4491,4050                               |
| TiIII           | 4501,2700                               |
| FeII            | 4508,2880                               |
| FeII            | 4515,3390                               |
| FeII            | 4520,2240                               |
| FeII            | 4522,6340                               |
| FeI             | 4531,1482                               |
| TiI             | 4533,2400                               |
| TiIII           | 4533,9700                               |
| FeII            | 4541,5240                               |
| BaII            | 4554,0400                               |
| FeII            | 4555,8930                               |
| TiIII           | 4563,7650                               |
| MgI             | 4571,0956                               |
| TiIII           | 4571,9750                               |
| FeII            | 4576,3400                               |
| FeII            | 4583,8370                               |
| CrII            | 4588,1990                               |
| TiIII           | 4589,9500                               |
| FeI             | 4602,0010                               |
| FeI             | 4602,9410                               |
| SrI             | 4607,3300                               |
| FeI             | 4607,6469                               |
| TiI             | 4623,0900                               |
| FeI             | 4625,0453                               |
| FeI             | 4630,1203                               |
| FeI             | 4635,8462                               |
| FeI             | 4637,5034                               |
| FeI             | 4643,4634                               |
| TiI             | 4645,1870                               |
| CrI             | 4651,2800                               |
| CrI             | 4652,1560                               |
| TiIII           | 4657,2060                               |
| FeI             | 4678,8458                               |
| FeI             | 4683,5597                               |
| FeI             | 4690,1380                               |
| TiI             | 4693,6700                               |
| FeI             | 4700,1579                               |
| MgI             | 4702,9910                               |
| FeI             | 4721,0006                               |
| FeI             | 4729,0192                               |
| FeII            | 4731,4530                               |
| FeI             | 4735,8439                               |
| FeI             | 4736,7734                               |
| FeI             | 4741,5297                               |

*Continua na próxima página*

Tabela 14 – *Continuação*

| Linha espectral | Comprimento de onda $\lambda_{lab}$ (Å) |
|-----------------|---|
| FeI             | 4757,5780                               |
| TiI             | 4759,2760                               |
| TiII            | 4779,9850                               |
| FeI             | 4786,8070                               |
| FeI             | 4788,7569                               |
| FeI             | 4802,8797                               |
| TiI             | 4820,4150                               |
| VI              | 4831,6430                               |
| FeI             | 4845,6482                               |
| HI              | 4861,3300                               |
| FeI             | 4869,4639                               |
| FeI             | 4871,3180                               |
| FeI             | 4872,1380                               |
| VI              | 4875,4870                               |
| FeI             | 4875,8776                               |
| FeI             | 4882,1434                               |
| FeI             | 4885,4306                               |
| FeI             | 4886,3318                               |
| FeI             | 4890,7550                               |
| FeI             | 4891,4920                               |
| FeI             | 4892,8589                               |
| FeI             | 4907,7318                               |
| FeI             | 4909,3835                               |
| FeI             | 4910,0169                               |
| FeI             | 4910,3258                               |
| FeI             | 4910,5648                               |
| TiI             | 4913,6180                               |
| FeI             | 4917,2300                               |
| FeI             | 4918,0125                               |
| FeI             | 4918,9940                               |
| FeI             | 4920,5031                               |
| CrI             | 4922,2750                               |
| FeII            | 4923,9270                               |
| FeI             | 4924,7695                               |
| TiI             | 4928,3360                               |
| FeI             | 4930,3154                               |
| FeI             | 4938,8138                               |
| FeI             | 4939,2391                               |
| FeI             | 4939,6867                               |
| FeI             | 4946,3881                               |
| FeI             | 4950,1060                               |
| FeI             | 4957,2986                               |
| FeI             | 4957,5968                               |
| FeI             | 4962,5719                               |
| FeI             | 4969,9176                               |

*Continua na próxima página*

Tabela 14 – *Continuação*

| Linha espectral | Comprimento de onda $\lambda_{lab}$ (Å) |
|-----------------|---|
| TiI             | 4981,7400                               |
| FeI             | 4982,4999                               |
| FeI             | 4983,8529                               |
| FeI             | 4994,1295                               |
| TiI             | 4999,5070                               |
| TiI             | 5001,0090                               |
| FeI             | 5002,7927                               |
| TiI             | 5009,6480                               |
| FeI             | 5014,9425                               |
| TiI             | 5016,1660                               |
| FeII            | 5018,4400                               |
| TiI             | 5020,0300                               |
| FeI             | 5022,2355                               |
| FeI             | 5028,1264                               |
| TiI             | 5039,9540                               |
| FeI             | 5044,2114                               |
| TiI             | 5064,6570                               |
| FeI             | 5068,7658                               |
| FeI             | 5074,7483                               |
| FeI             | 5083,3386                               |
| FeI             | 5090,7740                               |
| FeI             | 5107,4474                               |
| FeI             | 5107,6411                               |
| FeI             | 5109,6520                               |
| FeI             | 5123,7200                               |
| FeI             | 5127,3593                               |
| FeI             | 5131,4687                               |
| FeI             | 5133,6885                               |
| FeI             | 5137,3822                               |
| FeI             | 5162,2729                               |
| FeI             | 5166,2822                               |
| FeII            | 5169,0330                               |
| FeI             | 5171,5964                               |
| MgI             | 5172,6840                               |
| MgI             | 5183,6040                               |
| FeII            | 5197,5770                               |
| CrI             | 5206,0400                               |
| FeI             | 5225,5261                               |
| FeI             | 5226,8623                               |
| FeI             | 5227,1895                               |
| FeI             | 5232,9403                               |
| FeII            | 5234,6250                               |
| FeI             | 5247,0500                               |
| FeI             | 5250,2080                               |
| FeI             | 5266,5554                               |

*Continua na próxima página*

Tabela 14 – *Continuação*

| Linha espectral | Comprimento de onda $\lambda_{lab}$ (Å) |
|-----------------|---|
| FeI             | 5269,5374                               |
| FeI             | 5369,9620                               |
| FeI             | 5383,3692                               |
| FeI             | 5393,1676                               |
| FeI             | 5397,1280                               |
| FeI             | 5404,1510                               |
| FeI             | 5405,3580                               |
| FeI             | 5405,7752                               |
| FeI             | 5410,9098                               |
| FeI             | 5415,1993                               |
| FeI             | 5424,0682                               |
| FeI             | 5429,6967                               |
| FeI             | 5434,5238                               |
| FeI             | 5445,0424                               |
| FeI             | 5446,9168                               |
| FeI             | 5501,4653                               |
| FeI             | 5506,7791                               |
| MgI             | 5528,4050                               |
| FeI             | 5569,6181                               |
| FeI             | 5572,8424                               |
| FeI             | 5576,0888                               |
| CaI             | 5581,9650                               |
| FeI             | 5586,7559                               |
| CaI             | 5588,7490                               |
| CaI             | 5594,4620                               |
| FeI             | 5661,3480                               |
| FeI             | 5701,5440                               |
| FeI             | 5705,4640                               |
| FeI             | 5775,0800                               |
| FeI             | 5793,9140                               |
| FeI             | 5809,2180                               |
| FeI             | 5855,0760                               |
| CaI             | 5857,4510                               |
| NaI             | 5889,9500                               |
| NaI             | 5895,9240                               |
| FeI             | 5902,4730                               |
| FeI             | 5916,2470                               |
| FeI             | 5956,6940                               |
| FeI             | 6024,0580                               |
| FeI             | 6027,0500                               |
| FeI             | 6065,4822                               |
| FeI             | 6093,6440                               |
| FeI             | 6096,6650                               |
| CaI             | 6102,7200                               |
| FeI             | 6120,2490                               |

*Continua na próxima página*

Tabela 14 – *Continuação*

| Linha espectral | Comprimento de onda $\lambda_{lab}$ (Å) |
|-----------------|---|
| CaI             | 6122,2200                               |
| FeI             | 6136,6153                               |
| FeI             | 6136,9940                               |
| FeI             | 6151,6180                               |
| CaI             | 6162,1730                               |
| FeI             | 6165,3600                               |
| FeI             | 6173,3350                               |
| FeI             | 6187,9900                               |
| FeI             | 6200,3130                               |
| FeI             | 6213,4300                               |
| FeI             | 6219,2810                               |
| FeI             | 6240,6460                               |
| FeI             | 6246,3188                               |
| FeI             | 6252,5554                               |
| FeI             | 6393,6013                               |
| FeI             | 6400,0012                               |
| CaI             | 6439,0700                               |
| NiI             | 6482,7980                               |
| CaI             | 6493,7810                               |
| FeI             | 6495,7420                               |
| FeI             | 6498,9390                               |
| H $\alpha$      | 6562,8100                               |
| FeI             | 6574,2280                               |
| FeI             | 6648,0810                               |
| FeI             | 6677,9870                               |
| FeI             | 6703,5670                               |
| LiI             | 6707,8350                               |
| CaI             | 6717,6850                               |
| FeI             | 7723,2080                               |
| CaI             | 8498,0200                               |
| CaI             | 8542,0900                               |
| CaI             | 8662,1400                               |



## APÊNDICE B – Equação para o efeito Doppler relativístico

A partir da geometria disposta na Figura 14, demonstramos a fórmula do efeito Doppler relativístico. A demonstração consiste em utilizar as transformações de Lorentz para o momento do fóton emitido com comprimento de onda  $\lambda'$  por uma estrela em movimento com velocidade  $\vec{v}$  na direção  $x'$  em um referencial instantâneo de repouso  $S'$  em relação a um referencial  $S$  onde um observador detecta o fóton (Landau & Lifshitz, 1971).

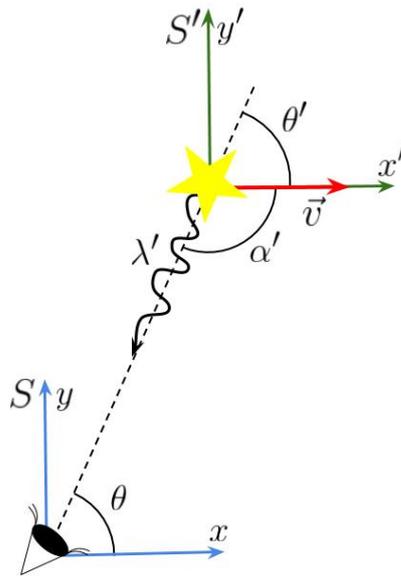


Figura 14 – Ilustração da geometria envolvida na demonstração do efeito Doppler relativístico.

Desta forma, para encontrar a fórmula do efeito Doppler relativístico devemos procurar as componentes do quadrivetor momento  $P^\mu$  no sistema de referências  $S$  em repouso em relação ao sistema  $S'$ . Sabemos que no referencial  $S'$ , o quadrivetor momento  $P'^\mu$  pode ser descrito como (Equação 13):

$$P'^\mu = \left( \frac{E'}{c}, \vec{p}' \right) \quad (13)$$

Para o fóton  $E' = h\nu$  e  $\vec{p}' = \hbar \vec{k}'$ . Sabendo que  $c = \lambda'\nu'$  e  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  então podemos escrever  $E = \frac{hc}{\lambda}$  e  $\vec{p}' = \frac{h}{\lambda} \hat{k}$ , onde  $\hat{k}$  é a direção do vetor de onda da luz. Como os ângulos  $\alpha'$  e  $\theta'$  são suplementares, isto é,  $\alpha' + \theta' = \pi$ , podemos expressar o momento do fóton em

termos do ângulo entre a velocidade da estrela e da linha de visada. Assim, pela Equação 13 obtemos que o quadrivetor momento do fóton (Equação 14):

$$\begin{aligned}
 P'^{\mu} &= \left( \frac{h}{\lambda'}, \frac{h}{\lambda'} \hat{k} \right) \\
 P'^{\mu} &= \left( \frac{h}{\lambda'}, \frac{h}{\lambda'} \cos \alpha', \frac{h}{\lambda'} \sin \alpha' \right) \\
 P'^{\mu} &= \left( \frac{h}{\lambda'}, -\frac{h}{\lambda'} \cos \theta', \frac{h}{\lambda'} \sin \theta' \right)
 \end{aligned} \tag{14}$$

Para escrever as componentes do momento nas coordenadas do sistema  $S$  utilizamos a expressão (Equação 15):

$$P^{\mu} = \Lambda^{\mu}_{\nu} P'^{\nu} \tag{15}$$

onde  $\Lambda^{\mu}_{\nu}$  são os elementos da matriz de transformação de Lorentz (Equação 16) do sistema  $S'$  para o sistema  $S$ , considerando que sistema  $S'$  se move com velocidade  $\vec{v}$  constante e na direção de  $x'$  positivo do sistema  $S'$ . Vale ressaltar que  $\beta = \frac{v}{c}$  e  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$  é o fator de Lorentz:

$$\Lambda^{\mu}_{\nu} = \begin{bmatrix} \gamma & \beta\gamma & 0 \\ \beta\gamma & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

Para a coordenada espacial do momento  $P^0$  no referencial  $S$ , isto é,  $\mu = 0$ , usando a Equação 15, obtemos:

$$\begin{aligned}
 P^0 &= \Lambda^0_{\nu} P'^{\nu} \\
 \frac{h}{\lambda} &= \gamma \frac{h}{\lambda'} - \beta\gamma \frac{h}{\lambda'} \cos \theta' \\
 \frac{1}{\lambda} &= \frac{\gamma}{\lambda'} - \frac{\beta\gamma}{\lambda'} \cos \theta' \\
 \frac{1}{\lambda} &= \frac{\gamma}{\lambda'} (1 - \beta \cos \theta') \\
 \lambda &= \frac{\lambda'}{\gamma(1 - \beta \cos \theta')}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Analogamente para a primeira e segunda coordenadas do momento, pela Equação 15, obtemos, para  $\mu = 1$  e  $\mu = 2$ , respectivamente:

$$P^1 = \Lambda^1_{\nu} P'^{\nu}$$

$$\begin{aligned}
\frac{h}{\lambda} \cos \theta &= \beta \gamma \frac{h}{\lambda'} - \gamma \frac{h}{\lambda'} \cos \theta' \\
\frac{\cos \theta}{\lambda} &= \frac{\beta \gamma}{\lambda'} - \frac{\gamma}{\lambda'} \cos \theta' \\
\frac{\cos \theta}{\lambda} &= \frac{\gamma}{\lambda'} (\beta - \cos \theta')
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
P^2 &= \Lambda^2 {}_{\nu} P^{\nu} \\
\frac{h}{\lambda} \text{sen } \theta &= \frac{h}{\lambda'} \text{sen } \theta' \\
\frac{\text{sen } \theta}{\lambda} &= \frac{\text{sen } \theta'}{\lambda'}
\end{aligned}$$

Podemos calcular a diferença de comprimento de onda detectada  $\lambda$  pelo observador no referencial  $S$  e a emitida pela estrela  $\lambda'$  no referencial  $S'$ .

$$\begin{aligned}
\Delta \lambda &= \lambda - \lambda' \\
\Delta \lambda &= \frac{\lambda'}{\gamma(1 - \beta \cos \theta')} - \lambda' \\
\frac{\Delta \lambda}{\lambda'} &= \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta'} - 1
\end{aligned} \tag{19}$$

Considerando agora o limite para baixas velocidades ( $v \ll c$ ) e sabendo que a velocidade radial  $v_r = v \cos \theta'$  e  $\beta = \frac{v}{c}$  encontramos o seguinte resultado (Equação 20):

$$\begin{aligned}
\frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta'} &\approx 1 + \beta \cos \theta' \\
\frac{\Delta \lambda}{\lambda'} &= \beta \cos \theta' \\
\frac{\Delta \lambda}{\lambda'} &= \frac{v \cos \theta'}{c} \\
\frac{\Delta \lambda}{\lambda'} &= \frac{v_r}{c}
\end{aligned} \tag{20}$$