

Plano de Orientação de Iniciação Científica

Determinação automática de parâmetros astrofísicos de aglomerados estelares a partir de seus diagramas cor-magnitude

Orientador: João Francisco Coelho dos Santos Jr.

Estudante: João Pedro Pires Thomaz

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a formação e evolução das galáxias vem em grande parte do estudo de aglomerados de estrelas. Isto porque a grande maioria das estrelas não se forma isoladamente, mas em grupos ou aglomerados, a partir da contração gravitacional de nuvens moleculares (Lada & Lada 2003). As estrelas isoladas disseminadas no ambiente galáctico têm origem na dissolução desses aglomerados, provocada principalmente pela evolução dinâmica interna e efeitos de maré da galáxia (Portegies Zwart et al. 2010). As galáxias possuem sistemas de aglomerados que evoluem dinâmica e quimicamente, e cujas idades e metalicidades caracterizam suas populações estelares. Desta forma, uma época em que a formação estelar foi intensa pode ser inferida pela alta frequência de aglomerados com a idade correspondente a essa época. Entre outros aspectos, a distribuição espacial de metalicidade em uma galáxia pode revelar a existência de populações estelares exógenas. Assim, a determinação de idade e metalicidade de aglomerados estelares, aliada ao conhecimento de suas posições nas galáxias traz informações relevantes sobre a estrutura, formação e evolução das galáxias (e.g. Bica et al. 2008; Moitinho 2010; Kruijssen 2011; Kruijssen et al. 2011; Santos et al. 2013; Cezario et al. 2013; Renaud 2018).

A característica mais importante que os aglomerados de estrelas apresentam para o estudo de populações estelares é que eles são o resultado de um único evento de formação estelar confinado em uma pequena região do espaço. Em consequência, suas estrelas ficam à mesma distância de nós, tendo todas aproximadamente a mesma idade e a mesma composição química (metalicidade), idêntica à da nuvem de gás a partir da qual o sistema se formou. Com o passar do tempo, um aglomerado modifica sua estrutura e sua população estelar, o que depende de uma série de fatores como o ambiente em que se originou, a eficiência de formação estelar (quanto do gás da nuvem progenitora é transformado em estrelas) e a interação gravitacional mútua entre suas estrelas e com o campo gravitacional da galáxia. Em resposta a estes fatores, estruturalmente um aglomerado contrai seu núcleo e expande seu halo ou coroa ao mesmo tempo em que a população estelar evolui, ou seja, à medida que as estrelas consomem o H no núcleo, o que é um processo mais rápido para estrelas de maior massa, elas saem da sequência principal e com isso se tornam gigantes/supergigantes, e posteriormente explodem como supernovas caso possuam massa superior a $\sim 8 M_{\odot}$. A astrofísica básica dos aglomerados de estrelas é tratada no capítulo 13 de Kutner (2003) e, mais profundamente, no capítulo 6 de Binney & Merrifield (1998). Além disso, artigos de revisão recentes (Krumholz et al. 2019; Renaud 2018) também abordam estes sistemas estelares.

Uma compreensão satisfatória da evolução estelar tem sido possível através de observações fotométricas de estrelas individuais em aglomerados para a composição de diagramas cor-magnitude (envolvendo um parâmetro observacional sensível ao brilho na ordenada e um parâmetro sensível à temperatura superficial na abscissa). Neste tipo de diagrama (abreviado como CMD), as estrelas pertencentes a um aglomerado não se distribuem aleatoriamente, sendo que suas posições nas várias regiões do diagrama são usadas para determinar a idade e metalicidade do sistema como um todo, a partir da comparação interativa com modelos de evolução estelar.

No contexto das populações estelares em uma galáxia, o CMD fornece um instantâneo fotográfico do estágio evolutivo das estrelas que pertencem à região observada. Os aglomerados de estrelas constituem *populações estelares simples*, ou seja, de uma única geração, com suas estrelas tendo se formado de uma nuvem molecular com certo conteúdo de metais em um intervalo curto de tempo. Assim, todas as estrelas pertencentes a um aglomerado possuem aproximadamente a mesma metalicidade e idade, com isso populando regiões distintas do CMD por se encontrarem em distintos estágios de evolução, o que é determinado predominantemente por suas massas.

O CMD de um aglomerado é corriqueiramente interpretado através do ajuste visual de isócronas que modelam teoricamente os estágios evolutivos das estrelas de massa diferente a uma mesma idade e metalicidade. Idealmente, a formação simultânea de todas as estrelas em um aglomerado constitui uma isócrona natural no CMD e permite a comparação com os modelos. No entanto, no mundo real, as observações envolvem erros fotométricos que crescem para as estrelas mais fracas, causando um espalhamento de sua cor e magnitude que é mais significativo à medida que se avança para o limite

instrumental. Além disso, aspectos intrínsecos aos aglomerados também produzem espalhamentos no CMD, como a presença de estrelas binárias não resolvidas (Romani & Weinberg 1991), rotação não uniforme entre as estrelas (Marino et al. 2018), formação estelar em intervalo de tempo grande comparado à idade média do aglomerado (Lim et al. 2016), entre outros. Os aglomerados podem apresentar avermelhamento diferencial devido a nuvens interestelares heterogêneas na linha de visada, ou mesmo associadas ao aglomerado, especialmente se for jovem. Este efeito também leva a uma distribuição de cor e magnitude não prevista pelos modelos de evolução, mas que deve ser considerado.

A forma do CMD de um aglomerado pode ser melhor interpretada através da simulação de populações simples baseadas em isócronas (e.g. Santos & Frogel 1997). Uma informação importante na comparação do CMD simulado com o observado é a densidade de estrelas em cada região do CMD. Desta forma, fases evolutivas rápidas tem menor peso do que fases evolutivas lentas onde a densidade de estrelas é maior. Tal aspecto não pode ser levado em conta quando se ajusta diretamente uma isócrona (com todos os pontos tendo o mesmo peso) ao CMD de um aglomerado.

Métodos estatísticos automáticos incorporando ou não os efeitos mencionados acima tem sido desenvolvidos por diferentes grupos de pesquisa (e.g. Flannery & Johnson 1982; Tolstoy & Saha 1996; Frayn & Gilmore 2002; Kerber et al. 2002; Kerber & Santiago 2005; Naylor & Jeffries 2006; von Hippel et al. 2006; Rio et al. 2015; Hoq & Clemens 2015; Bonatto et al. 2015; Bonatto 2019).

As determinações de idade e metalicidade de aglomerados estelares são frequentemente baseadas em ajustes visuais de isócronas teóricas à posição de suas estrelas em um CMD, construído a partir da fotometria em diferentes bandas. Nesta investigação, métodos de ajuste de isócronas automáticos que permitam a determinação dos parâmetros astrofísicos (idade e metalicidade) dos aglomerados com suas incertezas serão explorados. Além destes parâmetros intrínsecos dos aglomerados, que definem a forma de cada isócrona, o avermelhamento e a distância produzem um deslocamento transversal das estrelas no CMD. Estes outros dois parâmetros podem ser restritos por observações independentes ou obtidos diretamente no ajuste. Há muitos métodos envolvendo a comparação do CMD observado com simulações de Monte-Carlo de uma população estelar simples baseada em modelos de evolução estelar e uma função de massa estelar, como as simulações apresentadas em Santos & Frogel (1997). Os primeiros métodos utilizados na comparação de CMD de aglomerados com modelos teóricos para determinação das suas idades foram baseados em regiões fixas do CMD como o ponto de saída da sequência principal (*turnoff point*, ou TOP) e a luminosidade das estrelas variáveis RR Lyrae (Flannery & Johnson 1982).

No contexto atual, em que recursos computacionais e de software são facilmente implementados, ajustes com métodos estatísticos e automáticos são mais vantajosos do que ajustes visuais, na medida em que proporcionam a determinação dos parâmetros astrofísicos de um sistema estelar de forma robusta, retornando tanto seus valores médios quanto suas incertezas.

A proposta deste estudo envolve inicialmente uma automatização do processo de ajuste, em etapas que permitam determinar o módulo de distância e a idade de um aglomerado simulado (portanto de parâmetros conhecidos).

2 OBJETIVO

Estabelecer um método de ajuste de isócronas automático ao CMD de aglomerados estelares que possibilite determinar seus parâmetros (idade, metalicidade, avermelhamento e distância) juntamente com suas incertezas.

3 METODOLOGIA

Considerando que avermelhamento e distância produzem um deslocamento das estrelas de um aglomerado no CMD, primeiramente, a partir de uma isócrona de referência, deve-se determinar estes parâmetros por simples deslocamentos da isócrona no sentido horizontal (produzindo a isócrona avermelhada com $(B - V) = (B - V)_o + E(B - V)$) e vertical (transformando a magnitude absoluta da isócrona na magnitude aparente através do módulo de distância, $V = M_v + (V - M_v)$).

Um ajuste linear do CMD de um aglomerado e um ajuste linear de isócrona de referência, ambos com sigma-clipping visando excluir gigantes, permitirá a determinação da distância (e avermelhamento) a partir da diferença de magnitude aparente e absoluta:

$$V - M_v = aE(B - V) + (b - b_o)$$

onde a é o coeficiente angular da reta (suposto idêntico para o aglomerado e a isócrona) e $(b - b_o)$ é a diferença entre os coeficientes lineares das retas. O avermelhamento poderá ser desconsiderado inicialmente e posteriormente variado entre 0 e 1 na busca de um melhor ajuste entre aglomerado e a isócrona no CMD.

Em outro método, os parâmetros de um aglomerado deverão ser calculados através de uma função que busca o valor

global do deslocamento $(\delta_{cor}, \delta_{mag})$, no plano do CMD, que minimiza uma soma ponderada da distância ao quadrado entre a posição de cada estrela observada e o ponto mais próximo da isócrona (Beauchamp et al. 1994):

$$F(\delta_{cor}, \delta_{mag}) = \sum_i^N W_i D^2(cor_i - \delta_{cor}, mag_i - \delta_{mag})$$

onde a soma é realizada sobre todas as N estrelas; W_i é o peso de cada estrela, proporcional ao seu fluxo ($10^{(mag_i - mag_o)/2.5}$, em que mag_o é uma constante de ponto zero); a função $D(cor_i - \delta_{cor}, mag_i - \delta_{mag})$ é a distância perpendicular entre os pontos da isócrona e a posição de cada estrela no CMD (cor_i, mag_i) para uma translação de $(\delta_{cor}, \delta_{mag})$. Essa distância perpendicular tem sua geometria detalhada na fig. 4 de Frayn & Gilmore (2002).

A base de isócronas utilizada (Marigo et al. 2017) pode ser acessada em <http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd> e o CMD de um aglomerado simulado conforme Santos & Frogel (1997) será usado para validação do método.

Em uma segunda etapa, método estatístico deverá ser implementado (preferencialmente em linguagem python, IDL, ou Fortran) para realização automática do ajuste. Python tem sido uma linguagem bastante popular entre astrônomos nos últimos anos, com muitos recursos desenvolvidos e publicados visando ferramentas estatísticas para a análise de dados astronômicos, entre eles destacam-se Ivezić et al. (2020) e as páginas web <http://www.astroml.org/> e <https://python4astronomers.github.io/>. Neste sentido, o emprego da simulação de Monte-Carlo (amostrando aleatoriamente a massa das estrelas conforme uma distribuição de probabilidade específica – a função de massa) será uma ferramenta útil e servirá como ponto de partida para o desenvolvimento do método. Técnicas de amostragem do espaço de parâmetros (idade, metalicidade, distância e avermelhamento) serão exploradas conforme estatística χ^2 (Janes et al. 2013) e estatística Bayesiana usando máxima verossimilhança (Hoq & Clemens 2015). Implementações destas técnicas em Fortran e python com aplicações em Astrofísica foram publicadas (Naylor & Jeffries 2006; Foreman-Mackey et al. 2013) e estão disponíveis em <http://www.astro.ex.ac.uk/people/timn/tau-squared/> and <http://dfm.io/emcee/current/>, respectivamente. Um trabalho abrangente com foco astrofísico relacionado com estas técnicas foi publicado por Sharma (2017), onde são abordados de forma aprofundada a estatística Bayesiana para interpretação de dados observados e o método de amostragem de uma distribuição denominado Markov Chain Monte Carlo (MCMC), enfatizando o benefício de seu uso combinado. O algoritmo correspondente (em python), com exemplos, foi disponibilizado em <https://github.com/sanjibs/bmcmc/>.

Referências

- Beauchamp A., Moffat A. F. J., Drissen L., 1994, *ApJS*, **93**, 187
- Bica E., Bonatto C., Dutra C. M., Santos J. F. C., 2008, *MNRAS*, **389**, 678
- Binney J., Merrifield M., 1998, *Galactic Astronomy*. Princeton University Press
- Bonatto C., 2019, *MNRAS*, **483**, 2758
- Bonatto C., Campos F., Kepler S. O., Bica E., 2015, *MNRAS*, **450**, 2500
- Cezario E., Coelho P. R. T., Alves-Brito A., Forbes D. A., Brodie J. P., 2013, *A&A*, **549**, A60
- Flannery B. P., Johnson B. C., 1982, *ApJ*, **263**, 166
- Foreman-Mackey D., Hogg D. W., Lang D., Goodman J., 2013, *PASP*, **125**, 306
- Frayn C. M., Gilmore G. F., 2002, *MNRAS*, **337**, 445
- Hoq S., Clemens D. P., 2015, *AJ*, **150**, 135
- Ivezić Ž., Connolly A., Vanderplas J., Gray A., 2020, *Statistics, Data Mining and Machine Learning in Astronomy*. Princeton University Press
- Janes K., Barnes S. A., Meibom S., Hoq S., 2013, *AJ*, **145**, 7
- Kerber L. O., Santiago B. X., 2005, *A&A*, **435**, 77
- Kerber L. O., Santiago B. X., Castro R., Valls-Gabaud D., 2002, *A&A*, **390**, 121
- Kruijssen J. M. D., 2011, PhD thesis, Utrecht University, email:kruijssen@astro.uu.nl, <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/205085>
- Kruijssen J. M. D., Pelupessy F. I., Lamers H. J. G. L. M., Portegies Zwart S. F., Icke V., 2011, *MNRAS*, **414**, 1339
- Krumholz M. R., McKee C. F., Bland-Hawthorn J., 2019, *ARA&A*, **57**, 227
- Kutner M. L., 2003, *Astronomy: A Physical Perspective*. Cambridge University Press
- Lada C. J., Lada E. A., 2003, *ARA&A*, **41**, 57
- Lim B., Sung H., Kim J. S., Bessell M. S., Hwang N., Park B.-G., 2016, *ApJ*, **831**, 116
- Marigo P., et al., 2017, *ApJ*, **835**, 77
- Marino A. F., Milone A. P., Casagrande L., Przybilla N., Balaguer-Núñez L., Di Criscienzo M., Serenelli A., Vilardell F., 2018, *ApJ*, **863**, L33
- Moitinho A., 2010, in de Grijs R., Lépine J. R. D., eds, *International Astronomical Union Symposium Vol. 266, Star Clusters: Basic Galactic Building Blocks Throughout Time and Space*. pp 106–116 ([arXiv:0911.1459](https://arxiv.org/abs/0911.1459)), doi:10.1017/S1743921309990949
- Naylor T., Jeffries R. D., 2006, *MNRAS*, **373**, 1251
- Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., Gieles M., 2010, *ARA&A*, **48**, 431
- Renaud F., 2018, *New Astron. Rev.*, **81**, 1
- Rio J., Jordi C., Antiche E., Luri X., Roelens M., Palmer M., 2015, in Cenarro A. J., Figueras F., Hernández-Monteagudo C., Trujillo Bueno J., Valdivielso L., eds, *Highlights of Spanish Astrophysics VIII*. pp 547–552

- Romani R. W., Weinberg M. D., 1991, [ApJ](#), **372**, 487
- Santos Jr. J. F. C., Frogel J. A., 1997, [ApJ](#), **479**, 764
- Santos J. F. C., Dottori H., Grosbøl P., 2013, [A&A](#), **553**, A74
- Sharma S., 2017, [ARA&A](#), **55**, 213
- Tolstoy E., Saha A., 1996, [ApJ](#), **462**, 672
- von Hippel T., Jefferys W. H., Scott J., Stein N., Winget D. E., De Gennaro S., Dam A., Jeffery E., 2006, [ApJ](#), **645**, 1436