

Aglomerados de estrelas, remanescentes e associações: perspectivas da pesquisa no Brasil

A pesquisa em Astronomia é fundamentada na busca da caracterização e entendimento dos diversos objetos que compõem o Universo. No Brasil, aproximadamente 500 astrônomos, entre professores pesquisadores, pós-graduandos e pós-doutorandos, desenvolvem pesquisas que cobrem desde o rádio aos raios cósmicos e ondas gravitacionais, segundo a recente compilação do Dr. João Steiner. A maior parte dos estudos situa-se na região do óptico, especialmente no visível e infravermelho. Os alvos na Galáxia incluem, por exemplo, estrelas, aglomerados estelares e componentes do Sistema Solar. Fotometria e espectroscopia são os principais métodos de observação empregados. No momento em que nossa comunidade é convidada a apontar os rumos da pesquisa em Astronomia para os próximos anos, devemos levar em conta o perfil dos pesquisadores e da ciência que vem sendo produzida. É fundamental promovermos interações com as diferentes subáreas no que diz respeito a investimentos em instrumentação e ao acesso a diferentes observatórios clássicos e virtuais. A seguir apresentamos um breve sumário do que tem sido feito no Brasil na subárea (Seção 1), nossas expectativas em uma escala de 5 a 10 anos e propostas de investimentos (Seção 2). Encerramos com alguns comentários finais (Seção 3).

1. Que ciência produzimos hoje?

Aglomerados, remanescentes e associações estelares fornecem uma ampla visão dos processos de formação e evolução estelar na nossa Galáxia e fora dela. No país, a pesquisa nesta subárea não está associada a um único grupo que congregue todos os pesquisadores. Ao contrário, estes estão associados aos seus pares por regiões ou áreas de interesse. Como consequência, a subárea engloba uma gama de linhas de pesquisas correlacionadas. As descobertas de cada grupo são importantes ingredientes para os demais, qualificando, assim, o trabalho de todos. Diferentes pesquisadores têm estudado a origem, formação, evolução dinâmica de (i) aglomerados embebidos, (ii) aglomerados abertos, (iii) associações R, OB, T e pós TT e (iv) aglomerados globulares/núcleos de galáxias anãs. Tais objetos são estudados na Via Láctea e em outras galáxias.

Os sistemas de aglomerados se correlacionam com as propriedades das galáxias que os hospedam, impondo vínculos aos processos de formação e evolução. Os sistemas de aglomerados permitem identificar os principais episódios de formação estelar numa hospedeira, e sua relação com eventos dinâmicos e efeitos ambientais. Tais estudos exigem imageamento profundo e de alta resolução para que os sistemas de aglomerados sejam amostrados a grandes distâncias, cobrindo um amplo domínio de luminosidades. Fotometria multibanda e espectroscopia são muito importantes para a identificação de distintas sub-populações químico-cinemáticas de aglomerados numa galáxia.

Aglomerados da Galáxia são também traçadores do potencial gravitacional. Efeitos de maré atuantes sobre aglomerados e galáxias satélites deixam caudas estelares no halo. A identificação dessas correntes estelares, utilizando-se dados fotométricos e espectroscópicos de grande cobertura angular (como o SDSS, SDSS-3 e futuramente o DES), constitui uma área ativa da pesquisa contemporânea. Técnicas de identificação e caracterização de sub-estruturas do halo envolvem algoritmos de detecção de sinais (como *matched-filter*) e simulações realistas de diagramas cor-magnitude (CMD).

1.1 Aglomerados estelares

As nuvens moleculares são progenitoras dos aglomerados e associações estelares, e os processos de expulsão do gás promovidos, por exemplo, por ventos estelares e supernovas, levam à dissolução da maior parte dos aglomerados embebidos. A sobrevivência do aglomerado - e posterior evolução - chegando aos remanescentes de aglomerados abertos, são temas que os astrônomos brasileiros têm trabalhado intensamente nos últimos anos [1,2]. Os estudos passam pelo desenvolvimento de modelos, ajuste clássico ou estatístico de

isócronas ao CMD para obtenção de parâmetros fundamentais e físicos, identificação de estrelas membros e estudo da evolução estelar [3], metalicidades, funções de luminosidade e massa em aglomerados resolvidos. Catalogação de parâmetros de aglomerados abertos [4], bem como pesquisas sobre a formação, localização e dinâmica de braços espirais [5], dos subsistemas da Galáxia e suas origens são feitas há vários anos.

O conteúdo estelar dos aglomerados abertos e globulares, bem como de aglomerados embebidos (e.g. [6]), é também fundamental para o melhor entendimento desses objetos, sendo estudado através de fotometria e espectroscopia (integrada ou de estrelas individuais) [7] de baixa, média e alta resolução, e também imageamento visando a determinação de movimentos próprios. Buscam-se abundâncias químicas [8], velocidades radiais e tangenciais para compor velocidades espaciais [9]. Estudos com grandes amostras de estrelas de campo [10] são fundamentais para comparações com estrelas de aglomerados. Diferentes estudos têm identificado estrelas variáveis e analisado estágios avançados de evolução estelar em aglomerados, por exemplo, pela presença de anãs brancas [11]. A utilização de dados em raios-X [12] tem permitido a busca de estrelas binárias interagentes (incluindo de contato), inclusive em ambientes fora do Grupo Local. As velocidades espaciais permitem a reconstrução de órbitas no potencial da Galáxia e a gênese de aglomerados por choques no disco [13]. As colunas de poeira podem ser estudadas por meio de aglomerados ou galáxias [14].

Podemos citar outros tópicos relacionados a aglomerados estelares, entre eles, os que envolvem: (i) meio interestelar, (ii) pré-sequência principal, (iii) estrelas (abundâncias, cinemática, evolução), (iv) proto-nebulosas planetárias e nebulosas planetárias em aglomerados, (v) determinação de abundâncias químicas e gradientes no disco via aglomerados abertos, (vi) estudo das abundâncias químicas no esferoidal via aglomerados globulares e formação do halo e bojo da Galáxia, (vii) gravitação (N-corpos), (viii) hidrodinâmica, (ix) dinâmica de aglomerados na Galáxia, (x) formação e evolução de galáxias a partir de sistemas de aglomerados, (xi) braços espirais e formação estelar em nuvens moleculares, (xii) formação de aglomerados abertos induzida por aglomerados globulares.

Além dos aglomerados Galácticos, alguns grupos no Brasil dedicam-se a aglomerados das Nuvens de Magalhães [15,16], do Grupo Local e a sistemas de aglomerados extragalácticos em geral. Com VLT/ISAAC a indução da formação estelar por braços espirais em galáxias além do Grupo Local é também estudada [17]. O estudo do conteúdo estelar de galáxias próximas ou distantes utiliza também métodos de síntese de população estelar, tendo como base informações obtidas de aglomerados observados, sintéticos ou outros métodos [18, 19, 20].

Os dados para as pesquisas acima citadas são obtidos tanto a partir de bancos de dados públicos como o 2MASS, SDSS e UCAC3, ou através de imageamento, fotometria e espectroscopia obtidos em turnos de observação no SOAR e Gemini, além de instituições como o ESO e o HST. Em todos os assuntos citados, a comunidade astronômica brasileira tem desfrutado de reconhecimento internacional. Os pesquisadores brasileiros que estudam associações têm, igualmente, recebido este reconhecimento.

1.2 Associações

A pesquisa brasileira deu uma contribuição fundamental a respeito de estrelas jovens fora de nuvens moleculares, num momento em que a análise na literatura lidava com o interior das nuvens. Isto deveu-se aos *surveys* do Pico dos Dias (PDS) e busca de associações contendo estrelas jovens (SACY).

A dinâmica estelar, concebida a partir do cálculo rigoroso do movimento das estrelas partindo de um potencial geral da Galáxia, é um instrumento poderoso para a determinação (i) das idades de grupos estelares jovens, (ii) das regiões de formação e, (iii) dos possíveis mecanismos de formação de tais grupos. No primeiro caso, o confinamento orbital fixa a idade média do grupo e mostra que este é geneticamente coevo. Possíveis intrusos são facilmente detectados devido a suas órbitas divergentes em relação à região de confinamento. O cálculo é realizado a partir das posições e velocidades atuais. O método pode ser generalizado para o estudo dinâmico simultâneo de grupos e aglomerados abertos jovens.

O conhecimento do passado permite um novo conhecimento na Astrofísica. Aplicações desta metodologia permitiram determinar as idades de associações jovens como a de Beta Pictoris com 10.8 ± 0.3 Manos [21, 22] e da associação TW Hya (8.3 ± 0.8 Manos) [18]. No que concerne a origem comum de um aglomerado e uma associação, encontrou-se a idade de Epsilon e Eta Chamaleonis (6.7 Manos) [23], do

aglomerado das Pleiades e da associação AB Doradus (119 ± 20 Manos) [24], do aglomerado NGC 2516 e do grupo Mamajek 2 (135 ± 5 Manos) [25]. Por outro lado, a junção do método estelar dinâmico com a ação dos ventos estelares das estrelas OB, forneceu um cenário dinâmico total da evolução da associação OB Sco-Cen com a formação de grupos menores citados acima, assim como do subgrupo mais jovem de Sco-Cen (Upper Sco) [26].

Pretende-se, no futuro, pesquisar se abundâncias químicas de grupos estelares com origem dinâmica comum são semelhantes. Tal resultado seria uma indicação independente da origem comum [27, 28]. Em geral, também se pretende estudar a estrutura detalhada da associação Sco-Cen com base na dinâmica estelar. A pesquisa sobre a realidade genética dos grupos em movimento de Eggen e da denominada "Associação Local" são de grande interesse. Outra aplicação interessante consiste em estudar a possibilidade de estimar a idade e origem de estrelas de campo com discos *debris*.

2. Quais as perspectivas instrumentais para os próximos 5 a 10 anos?

Que questões queremos responder?

Como herança do 2MASS e do SDSS, novos observatórios virtuais mais profundos e em diversas bandas tornaram-se reais. O VISTA já opera. Mais além iniciar-se-á o DES, com participação ativa de pesquisadores brasileiros. Em escala de 10 anos teremos, por exemplo, o LSST. Para que possamos dar respostas às questões ainda em aberto, é necessário que o acesso aos bancos de dados públicos como o 2MASS e outros, bem como aos telescópios atualmente em uso, seja ampliado.

As questões que queremos responder podem ser exemplificadas pelo que segue. Aglomerados globulares supermassivos na Via Láctea são consequência da interação com galáxias anãs, como a canibalização da anã de Sagittarius? Pode-se entender melhor a formação de aglomerados estelares e associações? Pode-se entender a formação de estrelas de campo da nossa Galáxia (e de outras do Grupo Local) a partir dos processos de dissolução de aglomerados estelares e associações? Quais as incertezas nos parâmetros físicos dos aglomerados estelares? Existe uma coerência entre as determinações usando o óptico em relação às determinações baseadas no infravermelho? O que as estrelas binárias nos dizem a respeito da evolução de um aglomerado? Quanto elas interferem na determinação dos parâmetros físicos via análise de CMD? Como explicar a formação de aglomerados estelares das Nuvens de Magalhães com múltiplas populações, que contêm estrelas com idades podendo diferir em mais de 500 milhões de anos? O que a espectroscopia, com suas diferentes técnicas (multi-objeto, alta resolução, integrada, etc), ainda pode nos informar sobre a evolução química da Galáxia via análise de aglomerados estelares e associações? A função de luminosidade (ou massa) de aglomerados é universal? Aglomerados globulares formam uma família estrutural e cinematicamente conexa com galáxias esferoidais, anãs, compactas ou gigantes? Quais as relações entre o processo de formação de um sistema de aglomerados e o da sua galáxia hospedeira?

O caminho para responder às questões acima passa por aumentarmos o limite de detecção e analisarmos de forma objetiva uma quantidade cada vez maior de objetos e seu conteúdo estelar. Isto é essencial para o desenvolvimento dos estudos envolvendo métodos estatísticos de análise e descontaminação por estrelas de campo.

Precisamos da manutenção dos meios atuais e de novos desenvolvimentos em espectroscopia e imageamento. Devemos defender a manutenção do acordo de troca SOAR/Blanco, além de esforços em óptica adaptativa para o SOAR e Gemini. É evidente a necessidade de conhecer em detalhe as populações de aglomerados em galáxias além do Grupo Local, onde a luz integrada cobrindo um grande campo é o único caminho possível atualmente. Neste caso, a determinação de propriedades físicas está sujeita a flutuações nas magnitudes e cores integradas devido a processos estocásticos na população estelar. No infravermelho estes efeitos ainda não são bem determinados. É necessária a geração de populações estelares teóricas para comparação com dados observacionais, a exemplo do que é feito no óptico. Por isso, não podemos prescindir de espectroscopia de alta resolução no infravermelho, além de desenvolvermos instrumentação específica para o SOAR e Gemini. É fundamental o aumento da participação nacional no consórcio. Imageamentos óptico e infravermelho com multifibras são essenciais para nossos objetivos nos estudos de cinemática e abundâncias.

Avanços, a exemplo do que encontramos na óptica adaptativa multiconjugada do MAD/ESO, irão contribuir para estas análises. O estudo do meio interestelar, no rádio e milimétrico, é importante para o entendimento da formação de aglomerados e associações. Também são de interesse o UV em sítios altos, e o UV distante por satélite. Imageamento óptico, infravermelho próximo e médio por solo ou espaço, bem como iniciativas nacionais ou colaborações em telescópios de raios-X, levarão ao desenvolvimento da pesquisa e progressos tecnológicos no país.

Temos que definir desde já nossa participação em projetos de grande porte em andamento. Para a subárea de aglomerado/associações um destes seria o E-ELT, no Galáctico e extragaláctico com imageamento e espectroscopia.

3. Comentários Finais

A proposta de *white papers* veio contribuir para a mobilização dos pesquisadores na subárea de aglomerados estelares, remanescentes e associações. Possibilitou o relato da participação e contribuição da comunidade na Astrofísica brasileira e mundial, dimensionando o impacto de sua produção e suas necessidades futuras. Ressaltamos que a subárea de aglomerados/associações se entrelaça com muitas outras subáreas que estão também produzindo *white papers*, tais como: (i) formação e evolução de estrelas e planetas, (ii) computação astronômica com GPUs, (iii) projeto LLAMA. Esse entrelaçamento é fundamental, pois permite prever investimento em possíveis instrumentações de interesse comum, bem como a participação em projetos de telescópios clássicos e sua instrumentação, além dos observatórios virtuais. A subárea de aglomerados, remanescentes e associações permite estudar uma riqueza de processos físicos, e várias das questões fundamentais a serem resolvidas pela Astrofísica moderna poderão ser analisadas através dela.

Alguns pesquisadores manifestaram intenções ou projetos de realizar estudos que hoje estão no limite da instrumentação disponível ou que requerem tecnologias ainda a serem desenvolvidas. Lopes de Oliveira et al. investigam a população emissora em raios-X de aglomerados e remanescentes, como estrelas ativas e binárias de raios-X. Pavani et al. objetivam estudar a contrapartida óptica de aglomerados remanescentes e informações cinemáticas das estrelas membros. Bonatto et al. visam a imageamento profundo para compor funções de massa e suas implicações dinâmicas. Dias et al. buscam obter velocidades iniciais das estrelas de associações e aglomerados no momento da formação. Lépine et al. pretendem realizar simulações hidrodinâmica do gás atravessando os braços espirais, e explicar correlações entre posições e velocidades nas associações do SACY. Medeiros et al. buscam detectar planetas em aglomerados abertos possivelmente associados a anãs, subgigantes e gigantes, medindo abundâncias das estrelas hospedeiras. Bica et al. visam imageamento profundo e de alta resolução nas Nuvens de Magalhães de aglomerados embebidos e aglomerados abertos velhos pouco massivos. Barbuy et al. buscam ampliar o horizonte de observação na alta resolução espectral para estudar várias magnitudes abaixo na MS em aglomerados globulares através da Via Láctea. Santiago et al. têm como objetivo estudar caudas de maré de globulares da Galáxia, assim como remanescentes de eventos de acreção, bem como ampliar a base de dados de sistemas de aglomerados em galáxias early-type. Riffel et al. têm o objetivo de testar os modelos de populações estelares simples (SSPs), na região do infravermelho, usando espectros integrados de aglomerados estelares, bem como construir uma base de espectros integrados de aglomerados estelares na região do infravermelho próximo para realizar síntese de população estelar em galáxias.

Na escolha de onde investir temos que planejar o desenvolvimento de instrumentação e participações em consórcios e projetos internacionais que consigam, o máximo possível, convergir as diferentes necessidades das distintas subáreas da pesquisa em Astrofísica no Brasil. É fundamental para os astrônomos brasileiros o domínio de técnicas de tratamento de dados, bem como o desenvolvimento de ferramentas computacionais adaptadas aos domínios espectrais, já que uma quantidade crescente de dados de alta qualidade deverão estar à disposição para análise. Tornar a Astronomia cada vez mais atraente para novos pesquisadores e estimular a fixação de astrônomos em instituições de pesquisa sem tradição em Astronomia, é também um desafio a ser vencido.

Quais as necessidades instrumentais para tal amplo grupo de pesquisadores com objetivos comuns? É importante enfatizar que, pela sua amplitude, o tema se beneficia de diferentes configurações instrumentais, sendo importante ocorrer a diversidade instrumental em termos de campo de telescópio, resolução e cobertura espectral e resolução fotométrica, para que a pesquisa na subárea avance.

4. Referências

- [1] Bonatto, C & Bica, E. 2008, A&A, 477, 829
- [2] Pavani, D.B. & Bica, E. 2007, A&A, 468,139
- [3] Kerber, L. O.; Santiago, B. X.; Brocato, E. 2007, A&A, 462, 139
- [4] Dias, W.S, Alessi, B.S., Moitinho, A., Lépine, J.R.D. 2002, A&A, 389, 871
- [5] Lépine, J. R. D.; Mishurov, Yu. N.; Dedikov, S. Yu 2001, ApJ, 546, 234
- [6] Soares, J. B.; Bica, E.; Ahumada, A. V.; Clariá, J. J. 2008, A&A, 478,419
- [7] Santos, J. F. C Jr.; Piatti, A. E. 2004, A&A, 428, 79
- [8] Barbuy, B.; Zoccali, M.; Ortolani, S. et al. 2009, A&A, 507, 405
- [9] Maciel, W. J.; Lago, L. G.; Costa, R. D. D 2005, A&A, 433, 127
- [10] Pompéia, L.; Barbuy, B.; Grenon, M. 2003, ApJ, 592, 1173
- [11] Winget, D. E.; Kepler, S. O.; Campos, S. et al. 2009, ApJ, 693, L6
- [12] Lopes de Oliveira, R.; Motch, C.; Negueruela, I.; Haberl, F.; Janot-Pacheco, E. 2006, ESASP, 604, 93
- [13] Salerno, G. M.; Bica, E.; Bonatto, C.; Rodrigues, I 2009, A&A, 498, 419
- [14] Dutra, C. M.; Ahumada, A. V.; Clariá, J. J. et al. 2003, A&A, , 408, 287
- [15] Bica, E.; Bonatto, C.; Dutra, C. M.; Santos, J. F. C. 2008, MNRAS, 389, 678
- [16] Santiago, B.X 2008, A&A, 492, 23
- [17] Grosbol, B.; Dottori, H. 2009, A&A, 499, L21
- [18] Riffel, R.; Pastoriza, M. G .; Rodríguez-Ardila, A.; Bonatto, C. 2009, MNRAS, 400, 273
- [19] Cid Fernandes, R.; Schoenell, W.; Gomes, J. M. et al. 2009, RmxAC, 35, 127
- [20] Coelho, P.; Mendes de Oliveira, C; Cid Fernandes, R. 2009, MNRAS, 396, 624
- [21] Ortega, V.G.; de la Reza, R.; Jilinski, E.; Bazzanella, B. 2002, ApJ 575, L75
- [22] Ortega, V.G.; de la Reza, R.; Jilinski, E.; Bazzanella, B. 2004, ApJ 609, 243
- [23] de la Reza, R.; Jilinski, E.; Ortega, V. G.E.; 2006, AJ 131, 2609
- [24] Jilinski, E.; Ortega, V. G.; de la Reza, R. 2005, ApJ, 619, 945
- [25] Ortega, V. G.; Jilinski, E.; de La Reza, R.; Bazzanella, B. 2008, MNRAS 377, 441
- [26] Ortega, V.G; Jilinski, E.; de la Reza, R.; Bazzanella, B. 2009, AJ 137, 3922
- [27] Jilinski, E.; Ortega, V.G.; de la Reza, R.; Drake, N. A.; Bazzanella, B. E. 2009, ApJ, 691, 212
- [28] D'Orazi, V.; Randich, S.; Flaccomio, E. et al. 2009, A&A, 501, 553

Abaixo estão os signatários deste *white paper*.

Ana Leonor Chies-Santos (UU), Basilio X. Santiago (UFRGS), Bruno Dias (IAG/USP), Carlos Alberto Torres (LNA), Carlos M. Dutra (UNIPAMPA), Charles Bonatto (UFRGS), Daniela Borges Pavani (UFRGS), Eduardo Bica (UFRGS), Fabricio Ferrari (UNIPAMPA), Horacio Dottori (UFRGS), João Francisco Coelho dos Santos Junior (UFMG), Jules B. Soares (UESC), Leandro Kerber (UESC), Miriani G. Pastoriza (UFRGS), Raimundo Lopes de Oliveira (USP), Ramiro de la Reza (ON), Rogério Riffel (UFRGS), Virginia Mello Alves (UFPEL)