

Formação e Evolução de Estrelas e Planetas

Silvia Alencar (UFMG), Wagner Corradi (UFMG), Ramiro de la Reza (ON/MCT), Gabriel Franco (UFMG), Jane Gregorio-Hetem (IAG/USP), Jacques Lépine (IAG/USP), Claudio Melo (ESO), Marília J. Sartori (LNA/MCT), Carlos Alberto Torres (LNC/MCT), Luis Paulo Vaz (UFMG)

Contato: J. Gregorio-Hetem (jane@astro.iag.usp.br) (11 30912823)

1. Introdução

Há vários anos foi criado no Brasil um grupo de estudos de estrelas jovens, com o objetivo de elaborar estratégias para atingir objetivos de interesse em comum. Apesar de nossas atividades estarem sendo realizadas atualmente de forma dispersa, nossa interação proporcionou a realização de dois importantes eventos internacionais e o nosso envolvimento direto em grandes projetos como o do satélite CoRoT e a campanha NICI do Gemini, entre outros. Nesta chamada da Comissão Especial de Astronomia, por projetos estratégicos para os próximos 10 anos, vemos a oportunidade de reorganizarmos nosso trabalho conjunto, visando uma atuação expressiva da comunidade brasileira nos projetos de alta performance para o estudo da formação e da evolução de estrelas pré-sequência principal, sistemas planetários, associações jovens e aglomerados abertos. Entendemos que tais ações dependem de um futuro participativo em grandes telescópios e o uso de instrumentação de ponta, que nos leva a apresentar nesse documento nosso interesse científico e nossos objetivos observacionais para a próxima década (Sec. 2); o estado atual de nossa área de trabalho (Sec. 3); quais as perspectivas que se apresentam (Sec. 4); e finalmente as recomendações (Sec. 5), tendo em vista colaborações com outros grupos de trabalho (proponentes de *white papers* relacionados).

2. Objetivos

Para identificar a dinâmica e os processos físicos que ocorrem nas primeiras fases da evolução estelar, bem como para caracterizar os discos protoplanetários e entender sua evolução, nossos objetivos são:

Imageamento direto e coronografia no infravermelho; Espectroscopia de alta resolução espectral e espacial; Monitoramento fotométrico, para modelização da variabilidade temporal de estrelas jovens (T Tauri, Herbig Ae/Be); Mapeamento em comprimentos de onda milimétricos, para estudo dos primeiros estágios de formação estelar; Espectro-polarimetria no infravermelho, para avaliação de grãos em envoltórios circumstelares; Descoberta de planetas jovens e estudos das primeiras indicações de formação planetária; Buscas de estrelas variáveis, Estudo da formação e evolução de sistemas binários; Determinação de parâmetros estelares (massas, raios, temperaturas, composição química, etc.); Fotometria e Polarimetria no visível e infravermelho visando a determinação da distância e avermelhamento das nuvens moleculares, sítios da formação estelar, bem como das características de grande escala do meio interestelar local que permitam entender sua conexão com os eventos que desencadeiam a formação estelar; Criação de um banco de dados referentes a aglomerados estelares abertos.

3. Contexto Atual

Nos últimos anos progrediu imensamente nosso conhecimento sobre formação de estrelas, anãs marrons e planetas, devido aos novos dados no infravermelho (telescópio *Spitzer*), novas campanhas em raios-X, como o COUP (*Chandra Orion Ultradeep Projeto*) e o XEST (*X-ray Emission Survey of Taurus*), realizados respectivamente pelos satélites Chandra e XMM-Newton, bem como os resultados da óptica adaptativa e de estudos sinóticos de objetos estelares jovens e objetos subestelares.

Muitas das novas informações foram fornecidas pelos estudos de discos de acreção e jatos, que estão intimamente relacionados aos primeiros estágios da formação e da evolução das estrelas. Observações de alta resolução angular proporcionam imagens surpreendentes de discos protoplanetários em torno de estrelas jovens em diversos estágios evolutivos e ambientes diferentes. Estruturas na forma de jatos também foram resolvidas em escalas de poucas centenas de unidades astronômicas. Resultados mais espetaculares que se referem à dinâmica e à estrutura do disco e do jato já têm sido obtidos a partir de interferometria (VLTI, Keck / I) e imageadores melhorados como HST/ACS.

Ao mesmo tempo, espera-se que os projetos observacionais para busca de planetas por meio de trânsito, como a missão CoRoT por exemplo, devam cobrir um novo domínio de massas planetárias e fornecer novos resultados na formação de planetas. Os programas adicionais do CoRoT também são excitantes oportunidades para estudos fotométricos e espectroscópicos da variabilidade de estrelas pré-sequência principal, que apresentam uma rica diversidade de tipos que inclui pulsação, manchas quentes e frias, modos mais elevados de vibrações, multiplicidade estelar, processos de acreção, jatos, discos *debris* passando na frente da estrela, ocultações do tipo Algol, entre muitos outros.

O Comitê Executivo da IAU aprovou a realização da Sessão Especial (SpS7) *Young stars, Brown Dwarfs, and Protoplanetary Disks* durante a Assembléia Geral da IAU, que ocorreu no Rio de Janeiro em agosto de 2009. Apesar de se tratar de um evento de apenas 2,5 dias, a programação foi muito densa, contando com 9 palestras convidadas, 25 apresentações orais e 79 apresentações de posters, e a participação de mais de uma centena de pessoas. A integração entre as apresentações e as discussões proporcionaram uma excelente troca de experiências entre pesquisadores de diferentes especialidades, que levaram a um importante debate a respeito de questões voltadas para a formação e a evolução de estrelas, anãs marrons e planetas.

Os temas discutidos durante a SpS7 resumem muito bem o estado atual da nossa área de estudo, no qual o diagnóstico da formação estelar teve a abrangência de toda a faixa espectral, desde ondas rádio até raios gama. Os fenômenos de alta energia foram citados pelos pesquisadores que trabalham em outras frequências, mostrando que a maioria das pessoas tornou-se recentemente ciente da importância dos fenômenos de alta energia na formação estelar e a evolução do disco (Feigelson et al. 2007). É interessante notar que isso aconteceu nos últimos anos principalmente devido ao *Spitzer*, um telescópio operando no infravermelho, após a detecção de linhas Neônio em estrelas do tipo solar. Verificou-se que aquilo que parecia ser ruído do *Spitzer*, era uma vastidão de linhas de H₂O e Neônio nos espectros dos discos circunstelares de estrelas jovens de massa baixa.

Vários dos trabalhos apresentaram as anãs marrons como sendo apenas uma versão em escala de estrelas T Tauri, apresentando discos de acreção e a mesma variabilidade característica. Elas têm jatos, que ainda são muito difíceis de imagear, mesmo nos telescópios mais potentes, tais como VLT e Gemini, e também se formam em sistemas binários. Apesar de ser difícil encontrar binárias eclipsantes entre as anãs marrons, novas observações de binárias astrométricas estão produzindo maneiras de testar modelos de evolução no regime de massa muito baixa. Simulações numéricas das propriedades estatísticas de estrelas e de anãs marrons, realizadas por Bate et al. (2009a, 2009b), mostram por exemplo que a excentricidade de sistemas binários está relacionada com os processos de acreção.

A atmosfera das anãs marrons permanece como um desafio que, apesar de tudo, evolui rapidamente. São necessários espectros de binárias com massas bem determinadas para testar os complicados modelos de atmosfera. Demorou uma década de trabalho para se atingir o estado-da-arte atual, mas foi um bom investimento de tempo tendo em conta os resultados, como descrevem Allard et al. 2002 e Freytag et al. 2009, por exemplo, em seus modelos de atmosferas de anãs marrons, baseados em radiação hidrodinâmica multi-dimensional.

Foram apresentados os primeiros resultados do satélite CoRoT na região de formação estelar NGC 2264, que incluem as curvas de luz mais detalhadas já obtidas para estrelas jovens de massa baixa. Os sinais de rotação, facilmente mensuráveis, mostraram variações substanciais das medidas obtidas

em solo para a mesma região (Favata et al. 2009). As assinaturas de acreção são bastante impressionantes também, mostrando que, para um número razoável de estrelas, somos capazes de sondar a dinâmica de interação entre disco e estrela (Alencar et al. 2009). No caso do aglomerado jovem distante Dolidze 25 foi identificada uma estrela PMS pulsante do tipo δ Scuti (Ripepi et al. 2009)

O debate prossegue entre os defensores da interação disco-estrela através de modelos de vento-X ou modelos de vento de disco, com modelos complexos muito mais detalhados de cada lado, incluindo campos magnéticos multipolares e simulações MHD (Mohanty et al. 2008, Cabrit 2009).

Contribuição da Comunidade Brasileira (anterior e atual)

Durante os anos 80, várias pesquisas individuais foram dedicadas principalmente às populações de estrelas recém-formadas em nuvens moleculares como Chamaleon, Lupus etc (Gregorio-Hetem et al. 1988). No entanto, foi na busca de estrelas jovens fora das nuvens formadoras, que a pesquisa brasileira deu uma contribuição importante adquirindo notória reputação internacional. Isto foi devido a dois *surveys* de todo o Hemisfério Sul. O primeiro, chamado *Pico dos Dias Survey* (PDS), foi baseado em fontes IRAS (estrelas com excesso no infravermelho distante). Este foi realizado com o espectrógrafo coude do OPD entre 1989 até perto do fim dos anos 90. Estudos detalhados da grande amostra de estrelas T Tauri e estrelas Herbig Ae/Be descobertas no PDS foram apresentados em diferentes trabalhos, tais como Gregorio-Hetem & Hetem (2002), Vieira et al. (2003), Guimarães et al. (2006), Hetem & Gregorio-Hetem (2007), Pogodin et al. (2008), Rojas et al. (2008), Rodrigues et al. (2009), Sartori et al. (2010).

Outro resultado importante do PDS foi a descoberta da primeira associação de estrelas post-T Tauri em volta de estrela TW Hya (de la Reza et al. 1989, Gregorio-Hetem et al. 1992). Mais tarde, desde o início de 2000 até hoje, um outro *survey*, desta vez baseado em fontes de raios-X realizado principalmente com o espectrógrafo FEROS nos telescópios de 1.5m e 2.2m do ESO (acordo ON/ESO) permitiu detectar e ampliar 9 novas associações (sem contar aquelas associadas ao complexo de Sco Cen) (Torres et al. 2006, 2008).

É importante assinalar que as associações mais jovens estão diretamente relacionadas com as etapas de formação planetária e a processos relativos ao enriquecimento metálico das estrelas hospedeiras (Winter et al. 2007). Esta grande base de dados permitiu estudar as abundâncias metálicas destas associações (Viana Almeida et al. 2009), bem como a distribuição do lítio como indicador de idade (da Silva et al. 2009). No estudo de aglomerados abertos e associações, Dias e colaboradores buscam aprofundar a descoberta das velocidades iniciais das estrelas e aglomerados abertos, na época em que estes se formam. Eles pretendem criar um grande banco de dados, do tipo WEBDA, referentes a aglomerados estelares abertos. Corradi e colaboradores têm trabalhado na caracterização de aglomerados jovens (Corradi et al. 2009) e na determinação da distância das nuvens moleculares onde ocorre formação estelar (Corradi et al. 1997, Reis & Corradi 2008). Lépine e colaboradores pretendem realizar simulações de hidrodinâmica de gás atravessando braços espirais, bem como explicar as correlações de posições e velocidades das associações descobertas por Torres e colaboradores no projeto SACY.

4. Perspectivas

Do ponto de vista observacional, para os próximos 10 anos prevemos para nosso grupo duas linhas de projetos principalmente no infravermelho, mas também no óptico: (i) uso de grandes telescópios para estudos detalhados de objetos de interesse, que requerem altas sensibilidade, resolução espacial e resolução espectral, (ii) uso de telescópios de médio porte, para *follow-up* de observações espaciais; monitoramento; busca e seleção de candidatos a serem estudados em detalhes. Mencionamos aqui algumas das técnicas relacionadas ao nosso interesse científico.

Imageamento direto é a ferramenta mais interessante para revelar a morfologia das estruturas e

subestruturas circunstelares, que podem ser detectadas em imagens de alta resolução. A dispersão da luz estelar linearmente polarizada pelos grãos de poeira pode ser avaliada através de polarimetria NICMOS/HST. Uma correta determinação dos parâmetros de discos e envoltórios permite um melhor ajuste da distribuição espectral de energia e o estabelecimento de modelos de disco mais realistas para estudar as condições físicas, acreção e perda de massa em envoltórios circunstelares.

A campanha NICI (coronografia infravermelha com 50 noites de observação no Gemini), para a busca de planetas por imageamento direto, começa a apresentar seus primeiros resultados (Wahhaj et al. 2010). Esta campanha conta com a participação brasileira e deve permitir avanços no nosso conhecimento dos detalhes de formação de planetas, através da modelização e análise de discos *debris*, um dos subprodutos a serem detectados nessa busca por exoplanetas. Os resultados da coronografia infravermelha são os mais iminentes para nossos projetos próximos futuros.

Espectropolarimetria é indicada para verificar variabilidades espectrais e polarimétricas de curto termo, como indicativos de inhomogeneidades circunstelares, rotação, ventos, campos magnéticos (Beskrovnaya et al. 1995, Catala et al. 1999, Harrington et al. 2009, entre outros). A exemplo dos trabalhos realizados por Donati et al. (2007, 2008), utilizando o Espadons no CFHT, Alencar e Bouvier pretendem obter uma série temporal de observações de estrelas jovens, com objetivo de fazer a ligação entre o campo magnético da superfície estelar, cuja intensidade e topologia são diretamente medidas pela espectropolarimetria e a estrutura da zona de acreção magnetosférica é reconstruída a partir da modelização dos perfis de linhas de emissão observados e suas variações.

Análise espectroscópica detalhada de estrelas hospedeiras de sistemas planetários, para obter uma melhor determinação de tipo espectral e classe de luminosidade, que podem ser avaliados através das linhas espectrais sensíveis às alterações na gravidade. O uso de síntese espectral, que requer alta resolução, é importante para determinação de abundâncias, metalicidade e outros parâmetros fundamentais.

Espectroscopia no infravermelho próximo e médio deve proporcionar indicativos importantes na análise da composição química e na distribuição de tamanhos de grãos, além da avaliação da presença de linhas de H₂O e Neônio, características dos discos circunstelares de estrelas jovens de massa baixa.

Radio-observações e dados no milimétrico são de grande interesse nos estudos cinemáticos dos ambientes onde ocorrem os primeiros estágios de formação estelar, bem como nos episódios de ejeção e na estruturas de cavidades, reveladas pela emissão no contínuo. No outro extremo da banda espectral, fótons de alta energia do ultravioleta e em raios-X, podem ionizar e dissociar moléculas presentes nos envoltórios circunstelares, revelando as condições físicas e o estágio evolutivo dos envoltórios circunstelares.

O CoRoT teve sua missão estendida por mais 3 anos e assim poderá observar novamente NGC2264 ou alguma outra região de formação estelar. A reobservação de NGC2264 com o CoRoT (a ser solicitada por Favata, Alencar e colaboradores) permitirá a verificação de possíveis mudanças e como as variações se mantêm (ou não) em escalas de tempo grandes. Pretende-se realizar observações simultâneas entre o CoRoT e o Spitzer (em colaboração com John Stauffer).

Grande parte das detecções de exoplanetas são feitas em estrelas velhas, sendo raras as descobertas em estrelas muito jovens. A construção de um detector novo como o Super IR HARPS (ver WP de R. de Medeiros e colaboradores) com uma precisão de menos de 1 m/s e com um ponto no infravermelho (para minimizar o contraste dos planetas com os efeitos das manchas estelares) permitirá um grande avanço nesta perspectiva. Outro aspecto interessante que pretendemos realizar no futuro é de detectar por imageamento a interação na parte mais interna nos discos das primeiras manifestações da formação planetária. De fato, estas manifestações aparecem durante a transição entre discos de estrelas protoplanetárias (ricas em gás) e os discos *debris* (ricos em poeira) durante os primeiros 11 Ma (Chavero & de la Reza 2009). Os primeiros planetesimais (tamanhos ~10 Km), planetóides (da ordem de alguns milhares de km) e planetas gigantes formados nas etapas finais dos discos protoplanetários, interagem na região mais interna dos discos onde os planetóides

provocam colisões em cascata dos planetesimais formando uma nova poeira fina (*debris*) (Kenyon & Bromley 2008). Assim, a evolução dos discos é realizada de dentro para fora num longo período de tempo, podendo alcançar 10 Ga (Chavero & de la Reza 2009, Kenyon & Bromley 2008). Para detetar estas manifestações deveremos utilizar novas técnicas como a interferometria no VLT (Le Bouquin et al. 2009) que recentemente está alcançando resoluções espaciais de alguns milissegundos de arco. Até a chegada do ALMA, outras técnicas usando coronografia de alto contraste estarão sendo usadas no VLT como o SPHERE (Martinez et al. 2009) a partir de 2011. Deve se notar que outras técnicas estarão disponíveis no futuro com o ELT como o EPICS (Martinez et al. 2009).

5. Recomendações

Manifestamos nossa intenção de frequentemente realizar encontros regionais para discussões de trabalho e regularmente organizar eventos científicos internacionais, para os quais esperamos contar com apoio financeiro das agências de fomento.

Dada a gama de oportunidades em termos de recursos instrumentais, que atendem a diversidade de interesses científicos no estudo da formação e da evolução de estrelas pré-sequência principal e de sistemas planetários, não há um projeto específico de aplicação de recursos a ser pleiteado neste documento. Por outro lado, considerando que vários projetos de interesse comum estão sendo apresentados em *white papers* de outros grupos, manifestamos aqui nosso apoio e nosso interesse em colaborações junto aos mesmos:

- Participação brasileira em grandes telescópios por exemplo VLT (caso o Brasil entre no ESO); ELT; ALMA etc.
- Projeto LLAMA (radioastronomia) coordenado por Jacques Lépine e colaboradores.
- Projeto de Telescópio Robótico, coordenado por Claudia Mendes de Oliveira e colaboradores.
- *White paper* coordenado por J. Renan de Medeiros para construir um instrumento do tipo HARPS no infravermelho (SUPER IR-HARPS),
- *White paper* do grupo de estudo de Aglomerados Estelares, coordenado por Daniela Pavani e colaboradores.

6. Referências

- Alencar, S., et al. 2009, Highlights of Astronomy, Vol. 15, Ian Corbett, ed.
- Alecian, E., et al. 2008, MNRAS, 385, 391
- Allard, F., et al. 2001, ApJ, 556, 357
- Bate, M.R. 2009A, MNRAS, 392, 590
- Bate, M.R. 2009b, MNRAS, 392, 1363
- Beskrovnaya, N. G. et al. 1995, A&A, 298, 585
- Cabrit, S. 2009, Highlights of Astronomy, Vol. 15, Ian Corbett, ed.
- Corradi, WJB, et al. 1997, A&A 326, 1215
- Corradi, WJB, et al. 2009, IAU Symp. 266, in press (arXiv:0910.0108)
- Catala, C. et al., 1999, A&A, 345, 884
- Chavero & de la Reza (2009) subm. ao AJ
- de la Reza et al. 1989, ApJ 343, L61
- da Silva et al. 2009, A&A 508, 833
- Donati, J.-F., et al. 2007, MNRAS, 380, 1297
- Donati, J.-F., et al. 2008, MNRAS, 386, 1234
- Favata, F., et al. 2009, Highlights of Astronomy, Vol. 15, Ian Corbett, ed.
- Feigelson, E. et al. 2007 in: B. Reipurth et al. (eds.), Protostars and Planets V, p. 313
- Freytag, B., Allard, F., et al. 2009, A&A, in press
- Gregorio-Hetem et al. 1988, A&AS 76, 347
- Gregorio-Hetem et al. 1992, AJ 103, 549
- Gregorio-Hetem, & Hetem, 2002, MNRAS 336, 197
- Guimaraes M.M., et al. 2006, A&A 457, 581
- Harrington, D. M., Kuhn, J. R., 2009, ApJS, 180, 138
- Hetem & Gregorio-Hetem, 2007, MNRAS 382, 1707
- Kenyon & Bromley, 2008, ApJS 179, 2
- Le Bouquin et al. 2009, The Messenger 137, 25
- Martinez et al. 2009, The Messenger 137, 18
- Mohanty, S., Shu, F. 2008, ApJ 687, 1323
- Pogodin M., et al., 2008, OAP, 21, 97
- Ripepi V., et al. 2009, Ap&SS 247
- Reis W., Corradi WJB, A&A 486, 471
- Rodrigues et al., 2009, ApJ 698, 2031
- Rojas et al. 2008, MNRAS 387, 1335
- Sartori et al., 2010, AJ 139, 27
- Torres et al., 2006, A&A 460, 695
- Torres et al., 2008, Handbook of Star forming regions (ASP)
- Viana Almeida et al. 2009, A&A 501, 965
- Vieira et al. 2003, AJ 126, 2971
- Wahhaj et al. 2010, 215th AAS meeting
- Winter et al., 2007, MNRAS 378, 1418