

# A PARTE INFERIOR DA SEQÜÊNCIA PRINCIPAL NA REGIÃO DE ZETA OPHIUCHI

*Sarita Pereira de Carvalho<sup>1</sup>, Gabriel Rodrigues Hicel<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Universidade do Vale do Paraíba, Av. Shishima Hifumi, 2911 – Urbanova  
S. José dos Campos, SP, 12244-000, email: [saritacarvalho@uol.com.br](mailto:saritacarvalho@uol.com.br)

<sup>2</sup> Orientador, Universidade do Vale do Paraíba, Av. Shishima Hifumi, 2911 – Urbanova  
S. José dos Campos, SP, 12244-000, email: [hicel@univap.br](mailto:hicel@univap.br)

**Palavras-chave:** Formação estelar, Fotometria, Infravermelho Próximo, Estrelas: Anãs, Meio interestelar  
**Área do Conhecimento:** I – Ciências Exatas e da Terra

**Resumo-** Neste trabalho selecionamos candidatos a objetos estelares jovens de uma área de  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ , na região em torno de Zeta Ophiuchi ( $l_{gal} = 9^{\circ}$  e  $b_{gal} = 22^{\circ}$ ), situada a uma distância de  $(154 \pm 19)$  pc. Por ser uma região semelhante a Sigma Orionis, com nuvens moleculares sob a ação de intensa radiação ultravioleta, a região em torno de Zeta Ophiuchii é promissora para a formação de anãs marrons e objetos subestelares, com a vantagem de estar cinco vezes mais próxima do Sol. Usando as magnitudes no infravermelho próximo - bandas J ( $1,25\mu\text{m}$ ), H ( $1,65\mu\text{m}$ ) e  $K_s$  ( $2, 17\mu\text{m}$ ) - obtidas do catálogo 2MASS, confeccionamos diagramas cor-cor e cor-magnitude, nos quais as posições das fontes são comparadas com as regiões de ocupação da seqüência principal, gigantes vermelhas, anãs marrons e anãs tipos T e L. Os candidatos a objetos estelares jovens foram selecionados conforme a posição peculiar nos diagramas, qualidade da fotometria e aspecto estelar da sua imagem.

## Introdução

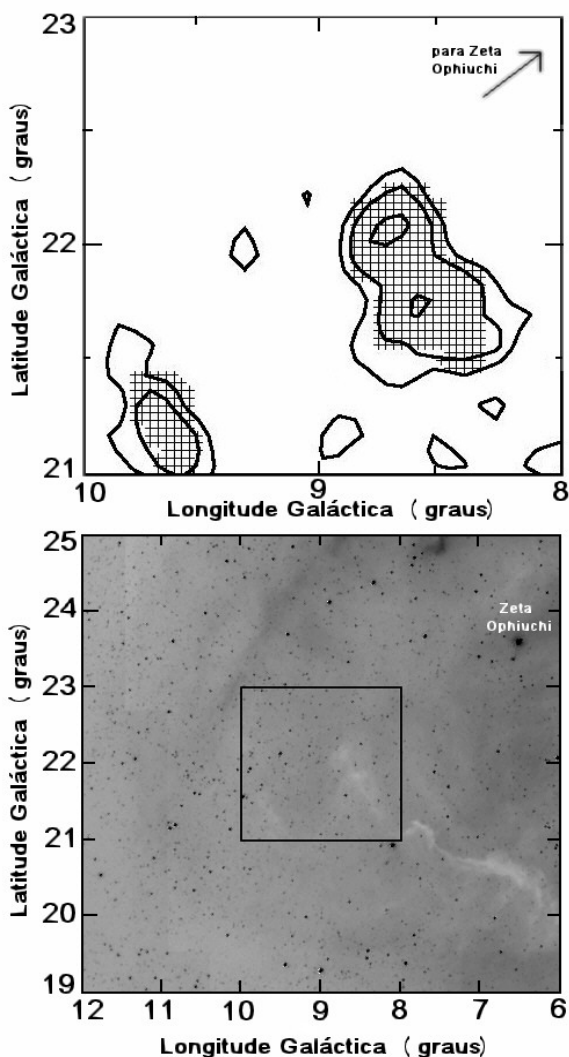
As estrelas nascem nas nuvens interestelares, vastas regiões de gás e poeira com densidades até 10 milhões de vezes maior que a média do meio interestelar. O gás (em mais de 90% constituído de hidrogênio) pode permanecer em equilíbrio magneto-hidrodinâmico em uma nuvem por milhões de anos até que algum tipo de perturbação (colisões entre nuvens, explosões de supernovas ou ação de fontes intensas de radiação ultravioleta) leve ao colapso e fragmentação. Fragmentos instáveis da nuvem entram em processo de auto-colapso gravitacional, marcando o início da formação estelar. O espectro de massa das estrelas que nascem depende diretamente do processo físico predominante que provoca o colapso [1].

As estrelas passam a maior parte de sua evolução na seqüência principal, transformando hidrogênio em hélio por fusão nuclear. Entretanto, desde o seu nascimento até atingir o equilíbrio na seqüência principal, as estrelas passam por fases distintas no processo de formação. O tempo total deste processo depende diretamente da massa da estrela [2]. Como as estrelas nascem em regiões de grande densidade e portanto, de grande opacidade óptica, observar os seus estágios iniciais requer a utilização de regiões do espectro eletromagnético menos sujeitas à extinção provocada pelos grãos de poeira interestelares. Além deste fato, as próprias

estrelas ainda não completamente formadas terão sua emissividade concentrada no infravermelho (1 a  $100\mu\text{m}$ ), o que leva esta faixa do espectro a ser a mais indicada para estes estudos.

Neste trabalho, buscamos por objetos estelares jovens (OEJs) na área em torno de Zeta Ophiuchi ( $l_{gal} = 9^{\circ}$  e  $b_{gal} = 22^{\circ}$ ), situada a  $(154 \pm 19)$  pc do Sol. Esta região (Figura 1) possui nuvens moleculares que estão sujeitas à ação de intensa emissão de fótons no ultravioleta, vinda da estrela Zeta Ophiuchi (O9.5V), uma componente da associação estelar Scorpius OB2 [3]. A ação fotoionizante de Zeta Ophiuchi nestas nuvens provoca frentes de choque e alta turbulência [4], forçando a massa crítica de colapso decorrente do processo de fragmentação para valores menores que o limite necessário para dar condições de reações termonucleares de queima de hidrogênio ( $0,07 M_{\odot}$ ). Isto significa que esta região é muito propícia à formação de anãs marrons e objetos sub-estelares, a exemplo de Sigma Orionis [5], com a vantagem de ser cinco vezes mais próxima do Sol.

Para efetuar a busca, utilizamos o catálogo fotométrico do 2 MASS (*Two Micron All Sky Survey*) [6], no infravermelho próximo (1 a  $3\mu\text{m}$ ) para selecionar candidatos a OEJs, baseando-se no índice de cor e magnitude das fontes.



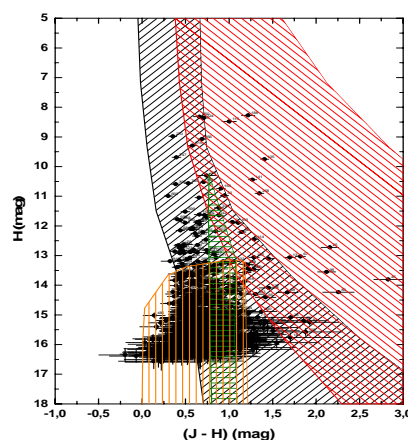
**Figura 1** – (alto) A região de estudo deste trabalho, mostrando as nuvens moleculares (contornos) observadas na linha de emissão rotacional  $J = 1-0$  da molécula de  $^{13}\text{CO}$  [7]. (embaixo) Uma visão mais ampla da região (quadrado central) na emissão de  $\text{H}\alpha$  [8], mostrando o gás ionizado (preto) e o gás denso neutro (regiões claras). A estrela Zeta Ophiuchi é indicada na figura.

### Metodologia e Redução de Dados

Utilizamos uma pequena área de  $2^\circ \times 2^\circ$  próximo a Zeta Ophiuchi, que para facilitar a redução dos dados, foi dividida em 36 campos de  $20' \times 20'$ , apresentando em média 1200 fontes por campo. Utilizamos, então, dados fotométricos do catálogo 2MASS onde constam fontes observadas em 3 bandas do infravermelho próximo: J ( $1,25\mu\text{m}$ ), H ( $1,65\mu\text{m}$ ) e Ks ( $2,17\mu\text{m}$ ). A maior parte das fontes catalogadas é puntiforme (estrelas), mas o catálogo traz também galáxias distantes e desta forma, para obter candidatos a OEJs, utilizamos os critérios para redução de dados descritos a seguir.

Os dados obtidos do catálogo 2MASS totalizaram cerca de 45.000 fontes. O primeiro

critério para redução de dados foi a posição das fontes nos diagramas cor-magnitude  $\text{Hx}(J-H)$  e  $\text{Kx}(H-K)$ , e cor-cor  $(J-H)\text{x}(H-K)$ . Nestes diagramas foram plotados, além dos dados obtidos no catálogo 2MASS, as regiões de ocupação da seqüência principal, gigantes vermelhas, anãs tipos T e L. Separamos, em cada campo, as fontes posicionadas fora da região de ocupação da seqüência principal, levando-se em conta as barras de erro. Embora a região à direita da seqüência principal seja a região natural de ocupação das gigantes vermelhas, ela também é a provável região onde espera-se encontrar os OEJs. Estas fontes separadas nas regiões de interesse serão tratadas de agora em diante de candidatos a OEJs. Com este critério separamos 592 candidatos a OEJs.



**Figura 2** – Diagrama Cor-Magnitude  $\text{Hx}(J-H)$ . As áreas hachuradas são as regiões esperadas para a ocupação (levando-se em conta a distância e a extinção interestelar de  $A_v = 1,25 \text{ mag/kpc}$ ) das estrelas da seqüência principal (em preto), das gigantes vermelhas (em vermelho), das anãs tipo T (em verde) e das anãs tipo L (em laranja). Os pontos pretos com barras de erros são fontes extraídas do catálogo do 2MASS, para um determinado campo.

O segundo critério para a redução de dados foi verificar a qualidade de fotometria no catálogo do 2MASS. Somente utilizamos fontes com qualidade de fotometria **A** ou **B**. De acordo com os critérios adotados pelo 2MASS, qualidade de fotometria **A** significa que a fonte tem uma relação sinal-ruído maior que 10 e **B** significa que a fonte tem uma relação sinal-ruído maior que 7.

O terceiro critério de redução de dados foi a verificação das imagens do candidato através do Skyview Virtual Observatory [9], especificamente nas bandas ópticas B e R (Digital Sky Survey) e nas bandas do infravermelho próximo J, H e Ks (2MASS). Candidatos a OEJs que nas imagens apresentavam-se puntiformes, evidenciando o formato estelar, foram considerados como reais candidatos. Outras fontes que apresentavam formas extensas ou que tinham outras fontes muito próximas, de modo a prejudicar a fotometria, foram desconsideradas.

Os candidatos situados à esquerda da seqüência principal, selecionados nos diagramas cor-magnitude, como possíveis anãs tipo L foram desprezados quando apareciam nas imagens na banda óptica B. As anãs de pequena massa e anãs marrons são caracterizadas por temperaturas efetivas abaixo de 2800K [10], de modo que o pico de emissividade será no infravermelho próximo. A chance de observar um destes objetos na banda B (0,43  $\mu$ m), é praticamente nula.

Uma vez atendidos os critérios de separação de candidatos, chegamos a 264 fontes que podem ser visualizadas no diagrama cor-magnitude da figura 3. Dadas as coordenadas galáctica (na direção do bojo) e área de cobertura, esperamos encontrar em torno de 62 estrelas gigantes vermelhas (AGB) nos nossos dados [11]. Portanto cerca de 200 fontes devem ser reais candidatos a objetos estelares jovens.

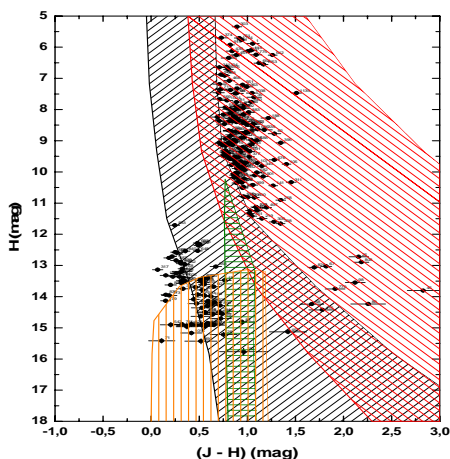


Figura 3 – Diagrama Cor-Magnitude Hx(J-H) dos 264 candidatos separados por região de ocupação.

Para determinar a temperatura efetiva de cada candidato ajustamos a função de corpo negro às distribuições espectrais de energia (densidades de fluxo por freqüência), obtidas dos catálogos (Figura 4). Os candidatos que não apresentaram distribuições espectrais de energia ajustáveis pela Lei de Planck tiveram suas temperaturas determinadas pela temperatura bolométrica [12].

As luminosidades dos candidatos foram determinadas de acordo com o fluxo integrado de suas distribuições espectrais de energia:

$$L = 4\pi D^2 \int S_\nu d\nu ,$$

onde  $D$  é a distância entre o OEJ e a Terra. Neste trabalho adotamos a distância de (154  $\pm$  19) pc para todos os candidatos. Esta distância foi obtida da paralaxe média de um grupo de 6 estrelas com paralaxe determinada pelo satélite Hipparchos, dentro de nossa região de estudo.

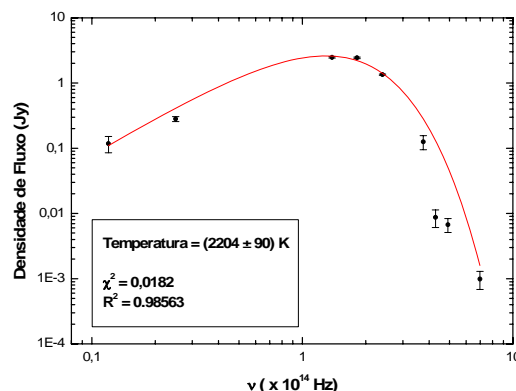
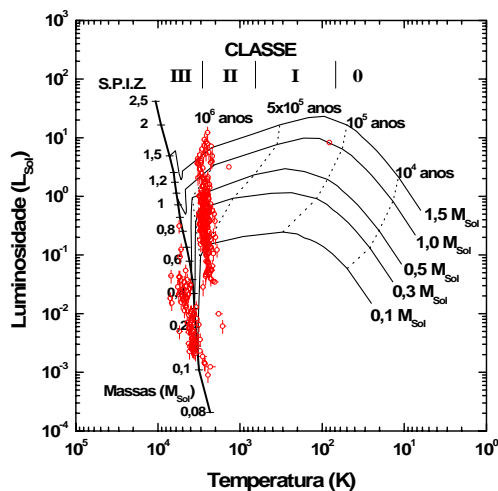


Figura 4 – Distribuição Espectral de Energia de um dos candidatos a OEJ. A linha vermelha representa a função de Planck ajustada às densidades de fluxo por freqüência, obtidas dos catálogos.

## Resultados

A figura 5 mostra o diagrama luminosidade x temperatura para os 264 candidatos a OEJs. Este diagrama caracteriza as propriedades físicas de objetos estelares de pequena massa. Claramente temos 2 populações na nossa amostra: estrelas que aparecem à esquerda e sobre a S.P.I.Z. e reais candidatos a OEJs que aparecem à direita da S.P.I.Z. Ao todo, 86 candidatos a OEJs revelaram-se como estrelas da seqüência principal, ou seja, estrelas comuns com massas entre 0,1 e 0,7 massas solares. É importante frisar que como a luminosidade depende da distância ao quadrado, muitos destes objetos podem estar com luminosidades (e portanto, massas) subestimadas.

Dos 178 reais candidatos a OEJs apenas 4 se destacam do grupo principal. Dois deles são objetos com grande luminosidade e são fontes observadas no infravermelho médio e distante, o que caracteriza objetos ainda embebidos em nuvens moleculares. A grande maioria de nossos candidatos a OEJs têm massas entre 0,07 e 2 massas solares, com idades entre  $3 \times 10^5$  e  $2 \times 10^6$  anos, estando na fronteira entre Classe II e III. A concentração dos candidatos a OEJs neste estágio evolutivo é compatível com o cenário [13] de formação estelar estimulada a partir da explosão de uma supernova em uma estrela binária da qual Zeta Ophiuchi fazia parte. Neste cenário, Zeta Ophiuchi é arremessada da Associação Estelar Scorpius Superior pela explosão, ocorrida a cerca de  $1,5 \times 10^6$  anos atrás. A explosão e a ação de Zeta Ophiuchi devem ser, portanto, as responsáveis pelo surto de formação estelar na nossa região de estudo.



**Figura 5** – Diagrama Luminosidade x Temperatura para os 264 candidatos a OEJs (pontos vermelhos). A Luminosidade é dada em luminosidades solares. O gráfico mostra a Sequência Principal de Idade Zero (S.P.I.Z.) [13], com a posição de diversas massas estelares (em massas solares). Trajetórias evolutivas de OEJs [12] para 5 massas diferentes e 4 isócronas (linhas tracejadas) também são plotadas. As classes evolutivas, conforme suas temperaturas, têm os limites indicados no alto do gráfico.

## Referências

[1] MAC LOW, M.-M.; KLESSEN, R.S. Control of star formation by supersonic turbulence. **Reviews of Modern Physics** V.76, p.125-194, 2004.

[2] BATE, M.R.; BONNELL, I.A.; BROMM, V. The formation mechanism of brown dwarfs. **Monthly Notices of Royal Astron. Soc.** V.332, n. 3, p.L65-L68, 2002.

[3] DE GEUS, E.J.; DE ZEEUW, P.T.; LUB, J. Physical parameters of stars in the Scorpio-Centaurus OB association. **Astronomy and Astrophysics** V.216, n.1-2, p.44-61, 1989.

[4] TACHIHARA K.; ABE, R.; ONISHI, T.; MIZUNO, A.; FUKUI, Y. Molecular clouds around a runaway O star,  $\zeta$  Ophiuchi. **Publ. Astron. Soc. Japan** V.52, p.1147-1155 and plate 51-53, 2000.

[5] BÉJAR, V.J.S.; CABALLERO, J.A.; REBOLO, R.; ZAPATERO OSORIO, M.R.; Y NAVASCUÉS, D.B. The substellar population in the young  $\sigma$  Orionis cluster, spatial distribution. **Astrophysics and Space Science** V.292, n.1, p.339-346, 2004.

[6] Cutri, R.M.; Skrutskie, M. F.; van Dyk, S.; Beichman, C. A.; Carpenter, J. M.; Chester, T.; Cambresy, L.; Evans, T.; Fowler, J.; Gizis, J.; Howard, E.; Huchra, J.; Jarrett, T.; Kopan, E. L.; Kirkpatrick, J. D.; Light, R. M.; Marsh, K. A.;

McCallon, H.; Schneider, S.; Stiening, R.; Sykes, M.; Weinberg, M.; Wheaton, W. A.; Wheelock, S.; Zacarias, N. 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources. **VizieR On-line Data Catalog: II/246**. Originally published in: **University of Massachusetts and Infrared Processing and Analysis Center, (IPAC/California Institute of Technology)**, 2003. Disponível em: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>. Acessos entre Agosto/2004 e Maio/2005

[7] TACHIHARA K.; T.; MIZUNO, A.; FUKUI, Y.  $C^{18}O$  observations of the dense cloud cores and star formation in Ophiuchus. **The Astrophysical Journal** V.528, p.817-840, 2000.

[8] GAUSTAD, J.E.; McCULLOUGH, P.R.; WAYNE, R.; VAN BUREN, D. A Robotic Wide-Angle H-alpha Survey of the Southern Sky. **Publ. Astron. Soc. Pacific** V.113, n.789, p.1326-1348, 2001.

[9] MCGLYNN, T., SCOLLICK, K., WHITE, N., SkyView: The Multi-Wavelength Sky on the Internet, McLean, B.J. et al., New Horizons from Multi-Wavelength Sky Surveys, Kluwer Academic Publishers, 1996, **IAU Symposium No. 179**, p465.

[10] LEGGETT, S. K., ALLARD, F., GEBALLE, T. R., HAUSCHILDT, P. H., & SCHWEITZER, A. Keck NIRC Observations of Planetary-mass Candidate Members in the sigma Orionis Open Cluster. **The Astrophysical Journal**. V.548, p.908-, 2001.

[11] ORTIZ, R.; MACIEL, W.J. AGB Stars: densities and formation rates obtained from OH/IR stars. **Astronomy and Astrophysics** V.313, p.180-190, 1996.

[12] MYERS, P.C.; LADD, E.F. Bolometric temperatures of young stellar objects. **The Astrophysical Journal**. V.413, n.1, p.L47-L50, 1993.

[13] PREIBISCH, T.; ZINNECKER, H. The History of low-mass star formation in the Upper Scorpius OB Association. **The Astronomical Journal** V.117, p.2381-2397, 1999.