

## 14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

### ESTIMATIVA REVISADA DA DISTÂNCIA DA NUVEM MOLECULAR *CHAMAELEON III* USANDO DADOS FOTOMÉTRICOS DA MISSÃO GAIA EDR3

LUIZ HENRIQUE P. SANTOS<sup>1</sup>, DEIDIMAR A. BRISSI<sup>2</sup>, WAGNER J. B. CORRADI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Licenciatura em Física, Voluntário PIVICT, IFSP, Campus Birigui, luiz-henrique102@hotmail.com.

<sup>2</sup> Professor PEEBTT, IFSP, Campus Birigui, deidimar@ifsp.edu.br

<sup>3</sup> Professor Titular de Física, Diretor, Laboratório Nacional de Astrofísica, Itajubá MG, wbcorradi@lna.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.04.03.00-0 Astrofísica do Meio Interestelar

**RESUMO:** O propósito deste trabalho é investigar o meio interestelar local na direção da nuvem escura *Chamaeleon III* (*Cha III*) e sua conexão com as Bolhas Local e Loop I. Dados do Catálogo *Starhorse*, que é baseado na fotometria e astrometria da missão Gaia EDR3, foram utilizados para construir Diagramas de Excesso de cor  $E(b-y)$  por Distância e mapas da distribuição espacial do avermelhamento, que permitiram determinar a distância das nuvens interestelares ao longo dessa linha de visada. Para exclusão dos dados de baixa qualidade, valores de  $E(b-y)$  com incerteza maior que 0.04 mag e erro fracional acima de 20% na distância foram eliminados. Analisando os diagramas e mapas espaciais uma distância de  $d = 160 \pm 15$  pc foi determinada para *Cha III*. O excesso de cor mínimo é  $E(b-y) = 0.05$  mag para as áreas de menor densidade e  $E(b-y) = 0.1$  mag na direção de *Cha III*. Esse resultado concorda com Corradi *et al.* (1997), mas com uma cobertura espacial 10 vezes maior. Como consequência, pode-se inferir que a interface da Bolha Local com a Loop I parece ser responsável pela conexão com as nuvens interestelares *Cha I* e *Cha II*.

**PALAVRAS-CHAVE:** excesso de cor; nuvem *Chamaeleon III*; meio interestelar; astrofísica.

### A REVISED ESTIMATE OF THE DISTANCE TO THE MOLECULAR CLOUD *CHAMAELEON III* USING DATA OF THE GAIA MISSION EDR3

**ABSTRACT:** The purpose of this work is to investigate the local interstellar medium towards the dark cloud *Chamaeleon III* (*Cha III*) and its connection with the Local and Loop I Bubbles. Data of the *Starhorse* Catalog, that is based on the photometric and astrometric data of the Gaia EDR3 mission, have been used to build Colour Excess  $E(b-y)$  by Distance Diagrams and spatial reddening distribution maps that allowed us to determine the distance to the interstellar clouds along the line of sight. Low quality data, with  $E(b-y)$  uncertainty greater than 0.04 mag and distance fractional error above 20% were eliminated. Through the analysis of the diagrams and spatial maps a distance  $d = 160 \pm 15$  pc has been determined to *Cha III*. The minimum color excess in the region is  $E(b-y) = 0.05$  mag for the lowest density areas and  $E(b-y) = 0.10$  mag in the line of sight of *Cha III*. This result agrees with Corradi *et al.* (1997), but with a spatial coverage 10 times higher. Thus, it has been inferred that the Local and Loop I bubble's interface seems responsible for the connection with *Cha I* and *Cha II*.

**KEYWORDS:** colour excess; *Chamaeleon III* cloud, interstellar medium; astrophysics.

## INTRODUÇÃO

Nas galáxias, além das estrelas existe um meio que as permeia e é conhecido como Meio Interestelar (MI). Sua composição é principalmente de gás com densidade média de 1 átomo/cm<sup>3</sup> e poeira (e.g. Corradi, 1998; Dyson e Willians, 2021).

A estrutura espacial do MI é composta por: (i) nuvens de gás frio e denso ( $> 1000$  partículas/cm<sup>3</sup> e  $T < 10$  K), (ii) um meio difuso e frio ( $\sim 100$  partículas/cm<sup>3</sup> e  $T \sim 100$  K), (iii) um meio difuso e morno ( $10$  partículas/cm<sup>3</sup> e  $T \sim 10^4$  K) e um meio muito rarefeito e extremamente quente ( $< 0.1$  partículas/cm<sup>3</sup> e  $T \sim 10^6$  K). Essas nuvens podem ser classificadas como moleculares, escuras, difusas ou tênues, respectivamente, pois as partículas de poeira bloqueiam a luz das estrelas de fundo (Chevance *et al.*, 2023).

O propósito deste trabalho é investigar as componentes do MI local na direção da nuvem escura *Chamaeleon III* (*Cha III*) e sua conexão com as Bolhas Local e Loop I. Para tanto, dados do Catálogo *Starhorse* (Anders *et al.*, 2022), que é baseado nos dados fotométricos e astrométricos da missão Gaia EDR3 (Gaia Collaboration *et al.*, 2021), foram utilizados para construir Diagramas de Excesso de cor  $E(b-y)$  por Distância ( $d$ ) e Mapas Espaciais do Avermelhamento Interestelar que permitiram determinar a distância das nuvens interestelares ao longo dessa linha de visada. Os primeiros estudos do Complexo de *Chamaeleon* (Camaleão) indicavam que a nuvem escura *Cha III* encontrava-se entre 140 – 160 pc (Whittet *et al.*, 1997; Corradi *et al.*, 1997, Corradi, 1998; Reis & Corradi, 2007; Voirin *et al.*, 2018). A revisão mais recente sugere que a distância até *Cha III* é de 193 +/- 12 pc (Voirin *et al.*, 2018).

## MATERIAL E MÉTODOS

Para definir a distância da nuvem escura *Cha III* foram utilizados os dados da missão Gaia EDR3, disponibilizados pelo catálogo *Starhorse* (Anders *et al.*, 2022). Para tanto, foram executados os procedimentos descritos abaixo:

1 – Foi adotada a coordenada central da nuvem molecular *Cha III* em ascensão reta  $RA = 12^h37^m48^s$  e declinação  $DEC = -80^\circ15'00''$  (e.g. Corradi, 1998).

2 – Utilizando a plataforma Aladin, identificou-se a região estudada, demarcada para comparação com os dados encontrados.

3 – Utilizando o programa de manipulação de dados TOPCAT foram baixados os dados do catálogo *Starhorse*, para uma região de 3 graus de raio em torno da coordenada central.

4 – Para melhor confiabilidade dos resultados obtidos, foi executada uma seleção (“limpeza”), eliminando-se os dados com baixa qualidade. Conforme os parâmetros definidos pelo catálogo, foram removidos da amostra dados com: a) distância acima de 2 kpc; b)  $E(b-y)$  negativo; c) *fidelity* abaixo de 0,5; d) *FlagOut* maior ou igual a 1; e) erro fracional acima de 20% na Distância; f) incerteza maior que 0,04 mag no excesso de cor.

5 – Foram feitos mapas da distribuição espacial do avermelhamento  $E(b-y)$  utilizando as colunas de ascensão reta ( $RA\_ICRS$ ) e declinação ( $DE\_ICRS$ ), ambos em graus, codificadas pelos valores do avermelhamento interestelar.

6 – Foram feitos Diagramas de Excesso de Cor  $E(b-y)$  por Distância ( $d$ ). O avermelhamento, em magnitudes, foi determinado fazendo-se a conversão  $E(b-y) = Av/4,3$  (Strömgren, 1966). A absorção interestelar no filtro V é obtida pela coluna AV50. Para a distância foi tomado o valor do percentil 50, obtido da coluna *dist50*, em kpc.

7 – Uma escala de cores auxiliar, utilizando como base o excesso de cor  $E(b-y)$ , foi utilizada para visualizar a posição das estrelas em função do avermelhamento.

8 – Para construir as barras de erro foram adotadas as seguintes convenções para a incerteza na distância e avermelhamento, respectivamente: (*dist95-dist50*) para a incerteza superior, (*dist50-dist05*) para a incerteza inferior,  $(AV95-AV50)/4,3$  para a incerteza superior e  $(AV50-AV05)/4,3$  para a incerteza inferior.

9 – Com os mapas espaciais definimos 3 regiões (de forma aproximada e manual): região central da nuvem, halo em torno da nuvem e uma região sem a presença da nuvem. Com essas 3 regiões analisamos os diagramas e mapas espaciais conjuntamente para determinar com maior precisão a distância e o excesso de cor ao longo da linha de visada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As nuvens escuras, na qual se classifica o objeto estudado, são nuvens normalmente frias podendo variar a sua temperatura entre 10 K e 100 K, e pode levar a uma absorção de 5 a 10 magnitudes de uma fonte (Corradi, 1998; Chevance *et al.*, 2023). Nos estudos sobre a absorção da luz, do ultravioleta ao infravermelho, concluiu-se que devam existir dentro do MI pelo menos três tipos de partículas que causam a extinção interestelar da luz, sendo elas, partículas *grandes*, *pequenas* e *muito pequenas*, respectivamente responsáveis pela polarização e espalhamento na região do óptico, extinção no ultravioleta e extinção no infravermelho (Laureijs, 1989). A extinção interestelar, existente entre um observador e uma fonte de luz, é determinada pela dependência do brilho de um objeto com o comprimento de onda. Existem diversos catálogos com estimativas individuais de avermelhamento interestelar (e.g. Mermilliod, 1998; Reis *et al.*, 2011; Gontcharov, 2023). O tamanho do grão pode ser determinado pela polarização interestelar e o gás interestelar por espectroscopia (Corradi, 1998).

O avermelhamento interestelar ocorre devido ao fato da luz de comprimentos de onda no vermelho sofrer uma extinção menor do que a luz com comprimentos de onda no azul, fazendo com que comprimentos de onda maiores sofram menor extinção. Assim, a magnitude de uma estrela  $m_\lambda$ , em comprimentos de onda diferentes  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , terá uma diferença entre as absorções  $A(\lambda_1)$  e  $A(\lambda_2)$ . Essa diferença  $E(\lambda_1 - \lambda_2) = A(\lambda_1) - A(\lambda_2)$  é chamada de excesso de cor ou normalmente de avermelhamento interestelar, a despeito de estar ocorrendo um efeito de de-azulamento (e.g. Corradi, 1998).

Quando realizamos observações na direção de nuvens moleculares, podemos encontrar objetos estelares envoltos em sua poeira, que possuem um avermelhamento elevado. Nessas regiões, normalmente o grão tem tamanhos maiores e a razão  $R = A_V / E(b-y)$  da extinção total  $A_V$  para a extinção seletiva  $E(b-y)$  é diferente de 4,3, sendo geralmente maior. Ao mesmo tempo, podemos encontrar estrelas mais velhas que por estarem em uma região com grande densidade de gás e poeira tenham sua magnitude muito extinta, fazendo com que esses objetos se confundam em análises preliminares com estrelas muito avermelhadas, sendo necessário um estudo mais aprofundado para definição das fontes (Brissi, 2007).

Na região da constelação do *Camaleão*, existe um complexo de nuvens moleculares conhecidas como o Complexo de *Camaleão*, tendo dispostas em três nuvens com o tamanho de alguns graus, são conhecidas por *Chamaeleon I (Cha I)*, *Chamaeleon II (Cha II)* e *Chamaeleon III (Cha III)*, sendo essa última nosso objeto de estudo. A literatura registra formação estelar em *Cha I* e *Cha II*, mas não foram detectadas estrelas jovens em *Cha III*, e menos estudado (e.g. Galli *et al.*, 2021). Os níveis de extinção são moderados na região do Complexo de Camaleão quando comparado à outras regiões próximas onde ocorre intensa formação estelar, como *Ophiuchus* e *Taurus*. Essa característica, somada a sua estrutura compacta e seu isolamento devido à sua alta latitude Galáctica, faz com que o complexo seja alvo de diversos estudos de formação estelar de baixa massa (Galli *et al.*, 2021). A coordenada central da nuvem molecular *Cha III* é RA = 12<sup>h</sup>37<sup>m</sup>48<sup>s</sup> e DEC = -80°15'00". Para auxiliar a investigação foi feito um círculo concêntrico indicando a área estudada, com raio de 3 graus, mostrado na Figura 1.



FIGURA 1. Imagem do Digitized Sky Survey para a nuvem *Cha III* no óptico.

Utilizando o TOPCAT foram extraídas 244.827 fontes do catálogo *Starhorse*, dentro desse raio de 3 graus. Após a aplicação dos critérios de exclusão restaram 1.219 fontes. De forma aproximada e manual foram recortadas a região central da nuvem com 84 fontes, halo em torno da nuvem com 205 fontes e uma região sem a presença da nuvem com 244 fontes. A Figura 2 apresenta os mapas de distribuição espacial do avermelhamento em ascensão reta (RA\_ICRS) por declinação (DE\_ICRS), ambas em graus, para a região após a limpeza (esquerda) e após os cortes manuais (direita).

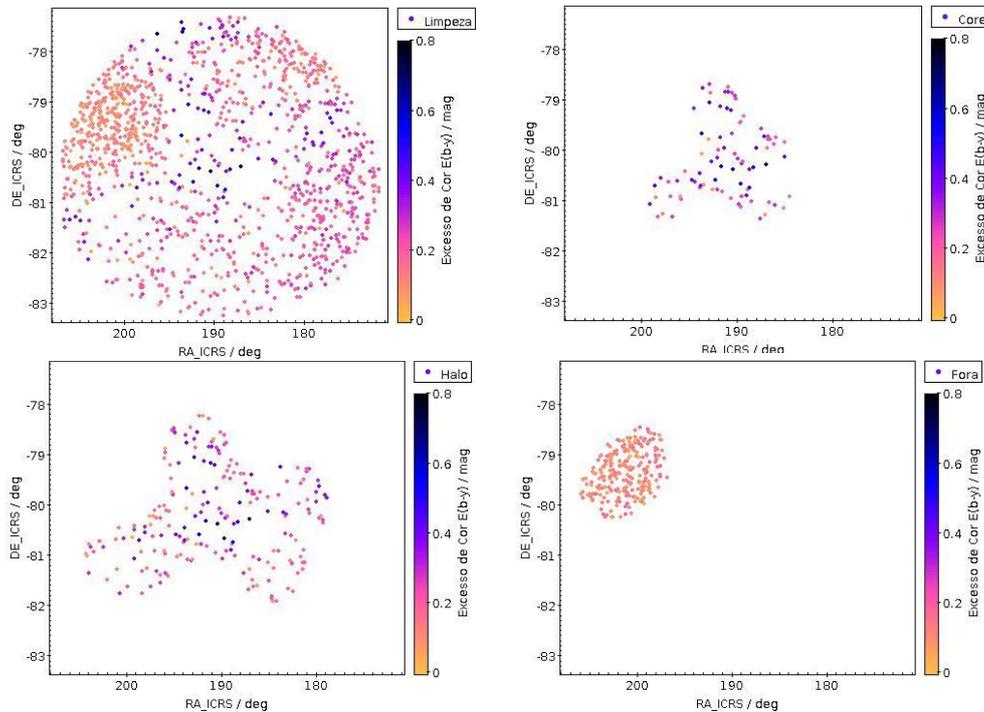


FIGURA 2. Mapas de distribuição espacial do avermelhamento em coordenadas equatoriais, ambas em graus, para a região. Canto superior esquerdo: área total após limpeza e sem cortes manuais. Canto superior direito: região central da nuvem. Canto inferior esquerdo: halo em torno da nuvem. Canto inferior direito: região sem a presença da nuvem.

Após a exclusão dos dados com baixa qualidade, foram construídos Diagramas de Excesso de Cor  $E(b-y)$  por Distância (Figura 3). Uma escala de cores auxiliar foi utilizada tomando como base o avermelhamento, com o intuito de visualizar melhor a posição das estrelas em função do excesso de cor. A incerteza foi superposta aos dados para cada estrela.

Após análise dos dados compilados pode-se perceber que para a região antes da que se espera encontrar a nuvem, existem poucos dados que possam ajudar a caracterizar o início da nuvem. Por isso, foram utilizados dados de Corradi *et al.*, 1997 e Corradi, 1998, também com fotometria Strömgen (vide Figura 4) para auxiliar a análise.

Observe os valores mínimos de  $E(b-y) = 0.1\text{mag}$  na direção da nuvem, a distância é  $150 \pm 15$  pc. De acordo com Reis *et al.*, 2011, o excesso de cor mínimo para regiões fora da linha de visada da nuvem é  $E(b-y) = 0.05$  mag, também na mesma distância, sugerindo a conexão do Complexo de Camaleão com a interface das Bolhas Local e Loop I.

Com base nos dados estimou-se que a distância de *Cha III* seria de  $165 \pm 15$  pc. O excesso de cor mínimo na região é  $E(b-y) = 0.05$  mag para as áreas de menor densidade e, pelo menos,  $0.10$  mag na linha de visada da nuvem *Cha III*.

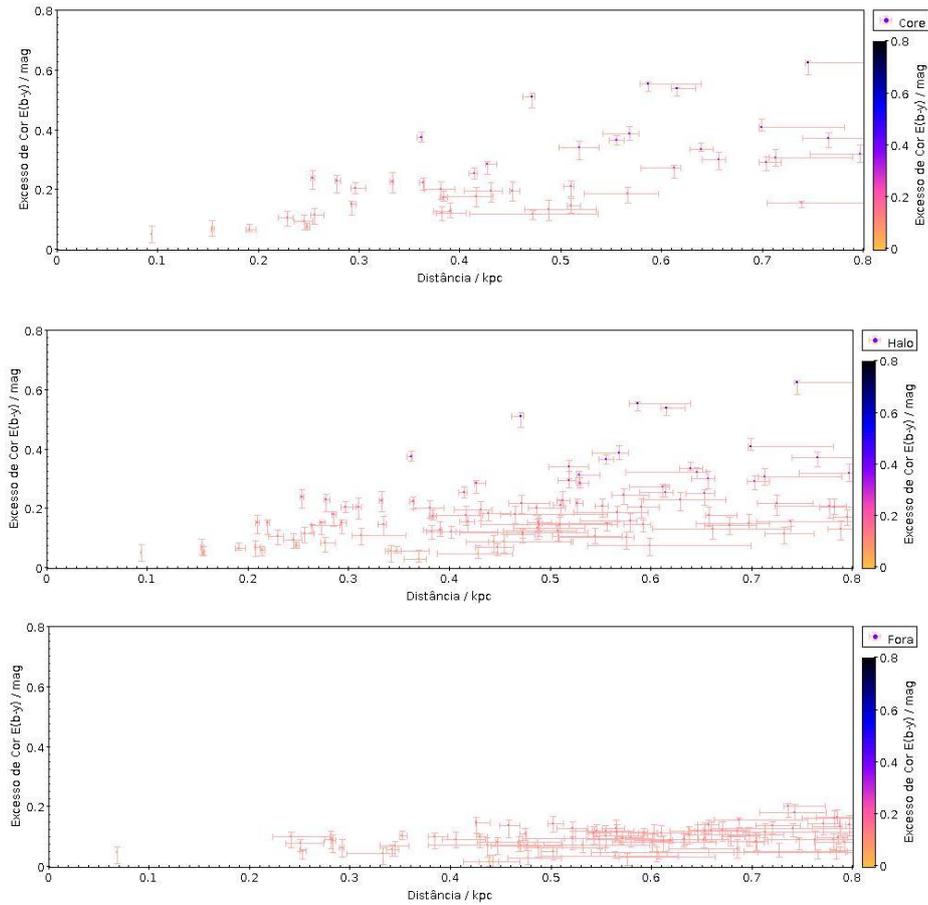


FIGURA 3. Diagrama de Excesso de Cor  $E(b-y)$  por Distância  $d$  (kpc). Acima: região central da nuvem. No meio: halo em torno da nuvem e da nuvem. Em baixo: região sem nuvem.

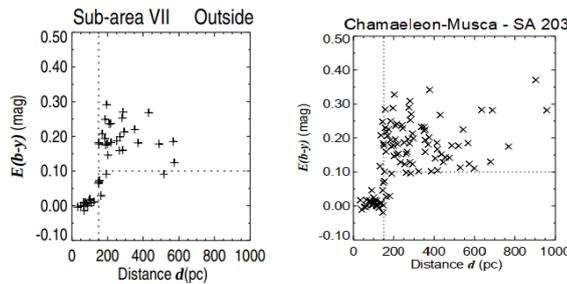


FIGURA 4. Diagrama de excesso de cor por distância, adaptado de Corradi *et al.*, 1997, na direção do Complexo do Camaleão. Observe o  $E(b-y)$  mínimo a partir de 150 pc em ambas as direções.

## CONCLUSÕES

A distância da nuvem *Cha III* determinada neste trabalho foi  $d = 160 \pm 15$  pc, que corrobora os resultados anteriores, porém com cobertura espacial 10 vezes maior. O excesso de cor mínimo  $E(b-y) = 0,05$  fora da linha de visada da nuvem e  $E(b-y) = 0,10$  mag na direção da nuvem, com transições abruptas em ambos os casos (observe que a partir da distância da nuvem não existem estrelas com valores menores de excesso de cor), demonstram que a nuvem tem estrutura laminar. Como consequência, pode-se inferir que a interface da Bolha Local com a Loop I, nessa direção, parece ser a responsável por conectar *Cha III* as nuvens *Chamaeleon I e II*.

No futuro, pretende-se, solicitar pedido de tempo para utilização da técnica de polarimetria com os telescópios do Observatório do Pico dos Dias (LNA/Brasil), equipados com o IAGPOL, visando melhorar o entendimento das componentes do meio interestelar nessa região, por meio da determinação da polarização interestelar. A vantagem é que a polarização consegue detectar, com maior precisão, quantidades menores de poeira interestelar. Além disso, permitir determinar a orientação do campo magnético ao longo da linha de visada, o que nos permite, em última instância, impor vínculos mais restritivos aos modelos da estrutura do meio interestelar local.

### CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

L.H.P.S procedeu com a metodologia e experimentos. L.H.P.S, D.A.B e W.J.B.C., contribuíram com a curadoria, análise dos dados, redação, revisão e aprovaram a versão submetida.

### AGRADECIMENTOS

A CPI do IFSP Campus Birigui pelo apoio. A equipe do LNA e UFMG pela parceria. Este trabalho utilizou dados da missão Gaia (ESA) e fez uso do "Aladin Sky Atlas" (CDS, França) e TOPCAT (Taylor M.B. 2005 ADASS XIV, 347,29).

### REFERÊNCIAS

- ANDERS, F., *et al.* **“Photo-astrometric distances, extinctions, and astrophysical parameters for Gaia EDR3 stars brighter than  $G = 18.5$ ”**, A&A 658 (2022). doi:10.1051/0004-6361/202142369.
- CHEVANCE, M., *et al.* **THE LIFE AND TIMES OF GIANT MOLECULAR CLOUDS**. PP VII 534, 1 (2023) doi:10.48550/arXiv.2203.09570.
- BRISSI, D.A. **PROCURA POR OBJETOS ESTELARES JOVENS E SUBSTELARES EM TORNO DA NUVEM DE MUSCA**. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - UNIVAP, São José dos Campos, 2006.
- CORRADI *et al.* **Physical association between the Southern Coalsack and the Chamaeleon-Musca dark clouds?**, A&A 326, 1215 (1997).
- CORRADI, W.J.B. **O Meio Interestelar Local na Direção das Nuvens Escuras Saco de Carvão e Chamaeleon-Musca**. Tese (Doutorado em Física), UFMG, Belo Horizonte, 1998.
- DYSON, J.E.; WILLIAMS, D.A. **The Physics of the Interstellar Medium**. 3. ed. Boca Raton e Oxon: CRC Press, 2021.
- GAIA COLLABORATION *et al.* **Gaia Early Data Release 3 (Gaia EDR3)**, GAIA 2021. Disponível em: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/data-release-3>. Acesso em 26 de jun. 2023.
- GALLI, P.A.B.; *et al.* **Chamaeleon DANCe Revisiting the stellar populations of Chamaeleon I and Chamaeleon II with Gaia-DR2 data\*** A&A 646, A46, (2021).
- GONTCHAROV, G. A., **A Three-Dimensional Analytical Model of the Interstellar Extinction within the Nearest Kiloparsec**, 2023. doi:10.48550/arXiv.2302.03871.
- HAUCK, B.; MERMILLIOD, M. **uvbybeta photoelectric photometric catalogue**. A&AS 22, 235 (1975).
- LAUREIJS, R. J. *et al.* **Dust emission from an isolated interstellar cloud**. A&A 220, 226 (1989).
- REIS W. & CORRADI W.J.B. **Mapping the interface between the Local and Loop I bubbles using Strömgren photometry** A&A 486, 471 (2008).
- REIS *et al.* **INTERSTELLAR REDDENING IN THE LOCAL BUBBLE AND LOOP I REGION: INSIGHT FROM STRÖMGREN PHOTOMETRY ANALYSIS AND THREE-DIMENSIONAL MODELING**. ApJ 734, 1, 2011 DOI 10.1088/0004-637X/734/1/8
- STRÖMGREN, B. **Spectral Classification through Photo-Electric Narrow-Band Photometry**. ARA&A 1, 433 (1966).
- VOIRIN J., MANARA C.F. and PRUSTI T., **A revised estimate of the distance to the clouds in the Chamaeleon complex using the Tycho–Gaia Astrometric Solution**. A&A, 610 (2018) A64.
- WHITTET, D. C. B. *et al.* **On the distance to the Chamaeleon I and II associations**. A&A 327, 1194 (1997).