

BỘ GIÁO DỤC  
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC  
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

**HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**



**Nguyễn Thị Bích Ngọc**

**VAI TRÒ CỦA TỬ TRƯỜNG  
TRONG QUÁ TRÌNH HÌNH THÀNH SAO**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT**

**Ngành: Vật lý nguyên tử và hạt nhân  
Mã số: 9 44 01 06**

*Hà Nội - 2026*

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học:

- Người hướng dẫn: PGS.TS. Phạm Ngọc Diệp - Trung tâm Vũ trụ Việt Nam
- Người hướng dẫn: GS.TS. Hoàng Chí Thiêm - Viện Khoa học Vũ trụ và Thiên văn Hàn Quốc/Đại Học Khoa Học và Công Nghệ Hàn Quốc

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi ..... giờ ....., ngày ..... tháng ..... năm .....

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

# Mở đầu

## 1. Tính cấp thiết của luận án

Các ngôi sao hình thành như thế nào là một trong những câu hỏi quan trọng nhất của vật lý thiên văn đương đại. Chúng thường được hình thành trong những đám mây khí phân tử đậm đặc và lạnh. Trong vài thập kỷ qua, bức tranh tổng quát về sự hình thành sao thông qua sự co sụp hấp dẫn của lõi đậm đặc đã được nghiên cứu rất tích cực. Tuy nhiên, tốc độ hình thành sao thu được từ quan sát của Dải Ngân hà chỉ khoảng 0.68–1.45 khối lượng Mặt Trời mỗi năm [1], thấp hơn khoảng mười lần so với dự đoán của các mô hình co sụp hấp dẫn đơn giản [2]. Điều này cho thấy co sụp hấp dẫn đơn thuần không thể giải thích được tốc độ hình thành sao quá thấp được quan sát trên toàn thiên hà. Tuy vậy, phát hiện này khẳng định vai trò quan trọng của các quá trình vật lý khác bên cạnh hấp dẫn như từ trường, nhiễu loạn và phản hồi sao; những yếu tố này có tác dụng giúp đám mây phân tử chống lại sự co sụp hấp dẫn, điều tiết quá trình phân mảnh và hạn chế quá trình chuyển đổi khí thành sao. Chi tiết của bức tranh này, như vai trò và đóng góp tương đối của từng yếu tố, rất cần được làm sáng tỏ. Trong các yếu tố này, từ trường đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành các đám mây phân tử, tác động tới phân mảnh, định hướng và dẫn dòng vật chất trong quá trình co sụp.

Để giải quyết các vấn đề này, cần có những nghiên cứu từ các quan sát về hình thái và cường độ từ trường trên nhiều đối tượng với các điều kiện vật lý khác nhau, từ đó có thể so sánh kết quả quan sát với mô hình

lý thuyết. Nhờ những tiến bộ của công nghệ hiện đại và việc đưa vào hoạt động của các đài thiên văn có trang bị máy đo phân cực mới, dữ liệu phân cực ngày càng có độ phân giải không gian và độ nhạy cao. Tiêu biểu trong đó là việc trang bị máy phân cực cho các kính thiên văn đĩa đơn như Kính thiên văn James Clerk Maxwell (JCMT), Đài quan sát Thiên văn Hồng ngoại Tầng bình lưu (SOFIA), và Thí nghiệm Atacama Pathfinder (APEX), các hệ thiên văn giao thoa như Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) và Northern Extended Millimeter Array (NOEMA), cũng như các đài quan sát không gian như *WMAP* and *Planck*. Sự phát triển này cho phép chúng ta nghiên cứu từ trường trên nhiều phạm vi, từ các thiên hà đến môi trường liên sao, các vùng hình thành sao, đám mây phân tử và quanh các sao trẻ.

Gần đây, bức xạ nhiệt phân cực của bụi đã được sử dụng rộng rãi để nghiên cứu từ trường trong quá trình hình thành sao (ví dụ, [3]) nhờ hiện tượng các hạt bụi phi cầu có xu hướng định hướng theo từ trường do Mô-men xoắn Bức xạ (RAT) [như, 4]. Mặc dù cơ chế định hướng bụi bằng lý thuyết RAT (viết tắt là RAT-A) đã được kiểm nghiệm thành công với phân cực ánh sáng sao [5], nhưng các thử nghiệm quan sát mô hình RAT, bao gồm RAT-A và phá huỷ bụi bằng RAT (viết tắt là RAT-D) - một hiệu ứng vật lý mới được phát hiện bởi [6] vẫn chưa được thực hiện bằng cách sử dụng phân cực từ bức xạ nhiệt của bụi. Cơ chế RAT dự đoán rằng sự định hướng của các hạt bụi với từ trường có thể thay đổi tùy thuộc vào cường độ bức xạ, đặc tính khí cục bộ (ví dụ: mật độ và nhiệt độ) và đặc tính hạt bụi (kích thước và thành phần) [xem thêm, 7]. Do đó, việc nghiên cứu sự thay đổi của sự định hướng và phá vỡ hạt bụi ở các vùng khác nhau có thể làm sáng tỏ cả đặc tính và vật lý

cơ bản của bụi, cũng như đặc tính của từ trường trong các vùng hình thành sao.

## 2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

Luận án Tiến sĩ này nhằm nghiên cứu vai trò và các đặc trưng của từ trường và vật lý bụi trong quá trình hình thành sao. Cụ thể, gồm 2 mục tiêu là: (1) khảo sát vai trò của từ trường trong môi trường hình thành sao bằng cách đo cấu trúc và cường độ của từ trường trong các đám mây phân tử khác nhau; và (2) kiểm nghiệm cơ chế RAT bằng các quan sát phân cực và mô hình số.

Tôi tập trung kết hợp dữ liệu phân cực từ các thiết bị mạnh, như JCMT/POL-2 và SOFIA/HAWC+, để nghiên cứu phân cực bụi nhiệt trong năm vùng hình thành sao tiêu biểu: Auriga ( $LkH\alpha$  101), M17, G11.11–0.12, Musca, và OMC-1. Sự đa dạng của các vùng này cho phép chúng tôi khảo sát các môi trường có mật độ, nhiệt độ, và trường bức xạ khác nhau.

## 3. Nội dung nghiên cứu chính của luận án

Bố cục luận án như sau:

**Chương 1: Giới thiệu** trình bày tổng quan về quá trình hình thành sao và môi trường liên sao, cùng bối cảnh rộng hơn của từ trường và bụi trong hình thành sao. Chương này cũng nêu lý do thúc đẩy nghiên cứu và các mục tiêu của luận án.

**Chương 2: Quan sát phân cực ở bước sóng hồng ngoại xa và**

**dưới-milimét** giới thiệu dữ liệu quan sát và các thiết bị được sử dụng. Chương này cũng giới thiệu các vùng hình thành sao được nghiên cứu trong luận án: Auriga (LkH $\alpha$  101), M17, G11.11–0.12, Musca và OMC-1.

**Chương 3: Từ trường trong các vùng hình thành sao** tập trung phân tích từ trường bằng dữ liệu phân cực, trình bày các kết quả về hình thái và cường độ của từ trường, và thảo luận vai trò của từ trường trong quá trình hình thành sao.

**Chương 4: Nghiên cứu quan sát về định hướng và tiên hóa của hạt bụi** khảo sát vật lý bụi và các cơ chế định hướng của hạt bụi thông qua các nghiên cứu quan sát đối với Auriga, M17 và G11.11–0.12. Tôi xem xét sự biến thiên của tỉ lệ phân cực theo cường độ bức xạ tổng, nhiệt độ bụi và mật độ khí, đồng thời đánh giá vai trò của các cơ chế định hướng (RAT-A) và phá huỷ bụi (RAT-D) do RAT. Đồng thời, mức độ nhiễu loạn của từ trường cũng được đánh giá. Bằng chứng về sự tăng cường từ tính và sự tăng trưởng kích thước hạt bụi trong môi trường có mật độ cao được đưa ra.

**Chương 5: Mô hình số phân cực bụi nhiệt** trình bày mô hình số của phân cực bụi nhiệt sử dụng lý thuyết RAT bằng DustPOL-py. Tôi áp dụng mô hình số này cho Musca và OMC-1 để kiểm nghiệm các hiệu ứng RAT-A và RAT-D tại các vùng hình thành sao này.

**Chương 6: Tổng kết** tóm tắt các phát hiện chính của luận án, thảo luận ý nghĩa của chúng đối với vật lý bụi và vai trò của từ trường trong hình thành sao, đồng thời đề xuất các hướng nghiên cứu tiếp theo.

## Chương 1: Giới thiệu

Chương 1 cung cấp bức tranh chung của sự hình thành sao, mô tả vật chất liên sao, khí và bụi phân tán trong môi trường liên sao, cũng như sự hình thành các lõi đậm đặc và tiền sao. Hai kịch bản hình thành sao khối lượng thấp và sao nặng được giới thiệu. Các đám mây phân tử khí có cấu trúc sợi (filament), nơi hoạt động hình thành sao diễn ra sôi động, được trình bày. Tổng quan về các phương pháp quan sát từ trường, bao gồm hiệu ứng Zeeman, Faraday, và đặc biệt là phân cực bụi, đã được trình bày. Ngoài ra, Chương 1 giới thiệu về bụi liên sao, bao gồm thành phần và phân bố kích thước, những yếu tố quan trọng để diễn giải quan sát phân cực bụi. Chương này cũng trình bày về Mô-men xoắn bức xạ RAT [e.g., 4, 6], là mô hình hàng đầu hiện nay để giải thích cơ chế phân cực bụi, trong đó bức xạ bất đẳng hướng gây ra mô-men xoắn lên các hạt bụi có hình dạng bất đối xứng làm chúng quay và định hướng với từ trường ngoài. Cơ chế định hướng hạt bụi do RAT (viết tắt, RAT-A) dự đoán hiệu suất định hướng phụ thuộc vào điều kiện cục bộ: tăng theo cường độ trường bức xạ và giảm theo mật độ khí. Ngoài ra, cơ chế phá vỡ hạt bụi do mô-men xoắn bức xạ (viết tắt, RAT-D) là cơ chế mà dưới trường bức xạ mạnh, hạt bụi có thể quay nhanh đến mức ứng suất ly tâm trở nên lớn hơn độ bền kéo của hạt bụi, dẫn tới hạt bụi bị vỡ. Hai quá trình vật lý, RAT-A và RAT-D, cấu thành nền tảng lý thuyết của mô hình momen-xoắn bức xạ (RAT paradigm), sẽ được khai thác xuyên suốt luận án.

## **Chương 2: Quan sát phân cực ở bước sóng hồng ngoại xa và dưới-milimét**

Chương 2 giới thiệu các dữ liệu quan sát chính sử dụng trong luận án từ thiết bị đo phân cực, bao gồm JCMT/POL-2 và SOFIA/HAWC+. Các dữ liệu quan sát thu được từ những môi trường hình thành sao đa dạng: Auriga–California (vùng LkH $\alpha$  101), M17, G11.11 -0.12 (còn được gọi ngắn gọn là G11 hay đám mây cấu trúc sợi hình con rắn), Musca, và OMC-1; những vùng có trường bức xạ, mật độ và giai đoạn tiến hóa khác nhau. Dữ liệu phụ trợ phục vụ nghiên cứu, bao gồm nhiệt độ bụi, mật độ cột khí, cũng được trình bày trong chương này.

Thông tin liên quan về dữ liệu phân cực sử dụng trong luận án này được tóm tắt ở Bảng 2.1.

**Bảng 2.1:** Thông tin về các mục tiêu, thiết bị và quan sát phân cực được nghiên cứu.

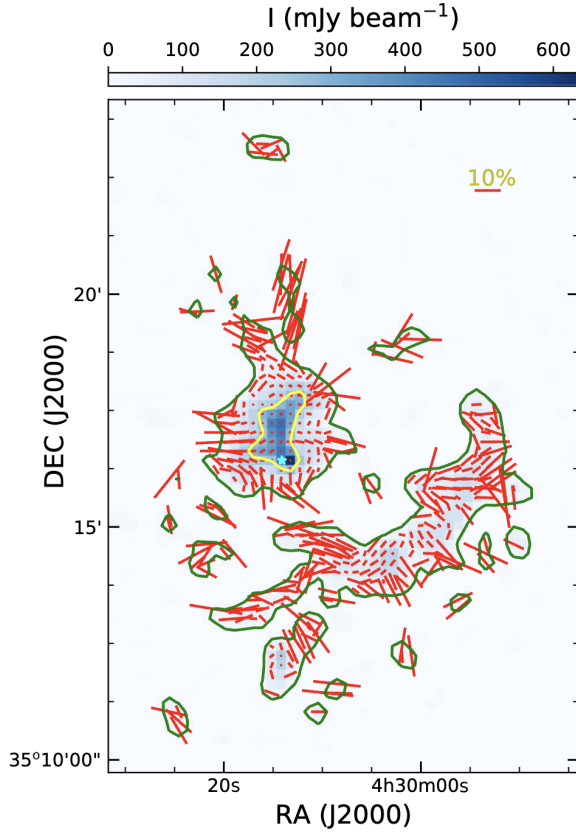
Đối tượng	Khoảng cách pc	Thiết bị	Bước sóng $\mu\text{m}$	Độ phân giải	Đại diện cho
Auriga	466	JCMT	850	14''/6	Hình thành sao khối lượng thấp
M17	1980	SOFIA	154	13''/6	Vùng quang phân ly
G11	3600	SOFIA	214	18''/2	Đám mây hồng ngoại tối
Musca	170	<i>Planck</i>	850	5'	Cấu trúc sợi đơn giản
OMC-1	388	SOFIA	214	18''/2	Hình thành sao khối lượng lớn

## Chương 3: Từ trường trong vùng hình thành sao

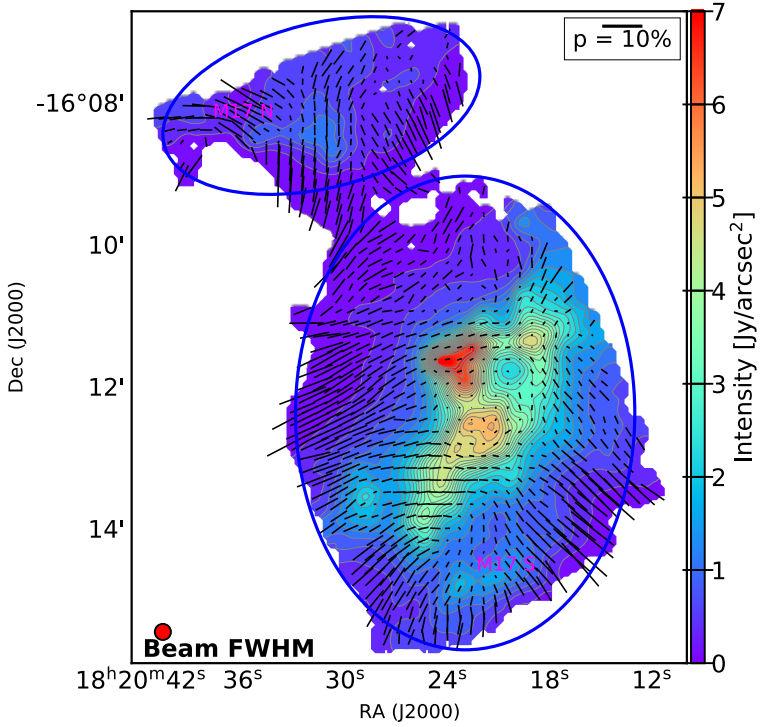
Chương 3 khảo sát hình thái và cường độ từ trường tại các vùng hình thành sao LkH $\alpha$  101, M17 và G11. Cường độ từ trường được tính bằng phương pháp Davis–Chandrasekhar–Fermi (DCF) [8, 9]. Vai trò của từ trường được lượng hóa bằng cách so sánh tầm quan trọng tương đối của nó với các yếu tố khác, như hấp dẫn qua tỷ số khối lượng–trên–từ thông  $\lambda$ , hay nhiễu loạn qua số Mach Alfvén  $\mathcal{M}_A$ .

Luận án trình bày phép đo từ trường đầu tiên của khu vực hình thành sao LkH $\alpha$  101. Bản đồ hướng của từ trường suy ra từ dữ liệu phân cực bụi, thể hiện ở Hình 3.1. Nhìn chung, từ trường có hướng song song với cấu trúc dạng sợi ở dải bụi phía tây nam. Tuy nhiên, từ trường cho thấy cấu hình phức tạp hơn tại vùng trung tâm đậm đặc (quanh ngôi sao trong Hình 3.1). Cường độ từ trường được tính theo phương pháp DCF có giá trị  $\sim 91 \mu\text{G}$  cho vùng trung tâm và  $\sim 138 \mu\text{G}$  cho dải bụi phía tây nam. Mật độ năng lượng từ trường trội hơn năng lượng nhiễu loạn, thể hiện qua điều kiện dưới-Alfvénic ( $\mathcal{M}_A \approx 0.6$ ). Ngoài ra, các vùng trung tâm và dải bụi được xác định là dưới tới hạn về mặt từ (tỷ số khối lượng–trên–từ thông  $\approx 0.3$ ), cho thấy áp suất từ đủ để chống lại co sụp hấp dẫn. Những kết quả này phù hợp với hiệu suất hình thành sao thấp của đám mây khí phân tử Auriga [10, 11].

Ở vùng M17, hình thái từ trường đo được dùng dữ liệu của SOFIA (Hình 3.2) cho thấy cấu trúc dạng đồng hồ cát, đặc biệt ở vùng phía nam (M17-S) nơi có mật độ cao hơn. Hình thái này gợi ý các đường



**Hình 3.1:** Bản đồ hướng từ trường (các đoạn thẳng màu đỏ) của vùng LkH $\alpha$  101 chồng lên bản đồ cường độ ở bước sóng  $850 \mu\text{m}$ . Độ dài đoạn thẳng tỷ lệ với tỉ lệ phân cực  $P(\%)$ . Một đoạn thẳng 10% được hiển thị ở góc trên bên phải để tham chiếu. Các đường đồng mức màu xanh lá biểu thị phát xạ tại  $15 \text{ mJy beam}^{-1}$ , và đường đồng mức màu vàng biểu thị mức  $250 \text{ mJy beam}^{-1}$ . Ngôi sao nặng loại B LkH $\alpha$  101 được đánh dấu bằng ngôi sao màu lục lam.

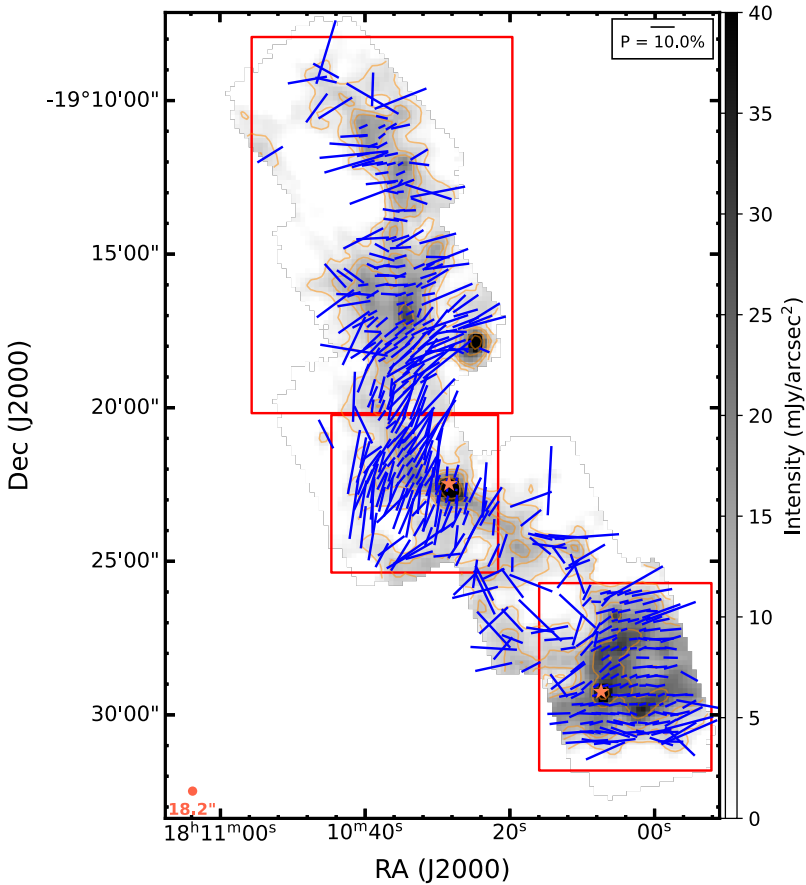


**Hình 3.2:** Bản đồ từ trường vùng hình thành sao M17 quan sát bởi SOFIA/HAWC+. Các đoạn thẳng có độ dài tỷ lệ với phần trăm phân cực, với đoạn tham chiếu tương ứng tỉ lệ 10% phân cực. Thang màu thể hiện tổng cường độ phát xạ theo đơn vị  $\text{Jy}/\text{arcsec}^2$ . Các hình elip màu xanh lam đánh dấu các vùng M17-N và M17-S.

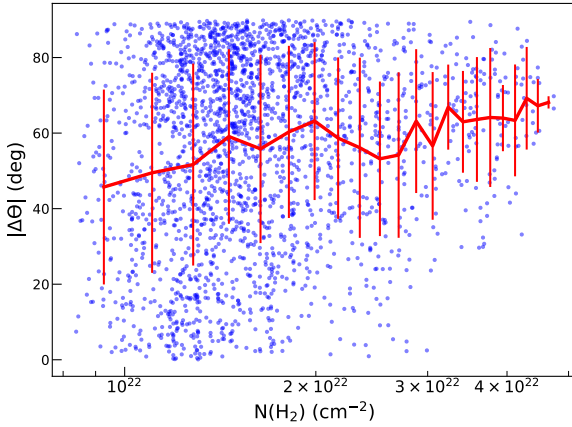
sức từ bị kéo do lực hấp dẫn hướng vào vùng có mật độ cao ở khu vực trung tâm. Theo phương pháp DCF, cường độ từ trường được tính là  $980 \pm 230 \mu\text{G}$  ở M17-N và  $1665 \pm 885 \mu\text{G}$  ở M17-S. Các số Mach Alfvén đều dưới-Alfvénic ( $\mathcal{M}_A < 1$ ) tại cả hai phân vùng, nghĩa là áp suất từ trội hơn áp suất gây ra do chuyển động nhiễu loạn. Thêm

vào đó, các tỷ số khối lượng–trên–từ thông đều dưới tới hạn ( $\lambda < 1$ ). Những kết quả này gợi ý rằng từ trường đóng vai trò quan trọng trong việc điều tiết hình thành sao ở M17, cụ thể kìm hãm sự hình thành sao. Kết quả này phù hợp với các phát hiện trước đó về sự thiếu hụt hình thành sao khối lượng lớn trong vùng M17 [12].

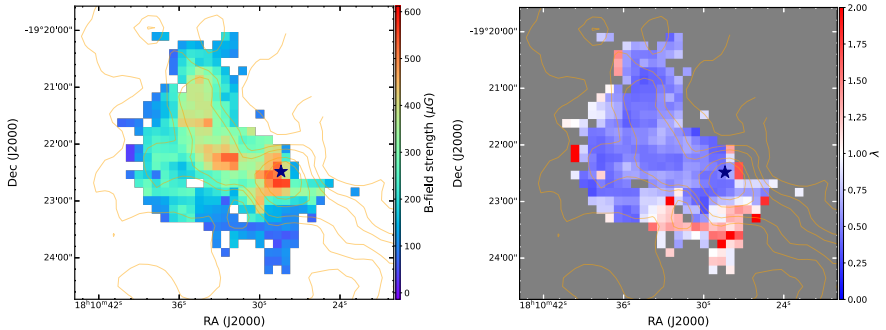
Với đám mây khí phân tử cấu trúc sợi G11.11-0.12, cấu trúc từ trường của nó được thể hiện ở Hình 3.3. Hướng từ trường nhìn chung vuông góc với trục của cấu trúc sợi, như minh họa ở Hình 3.4. Tôi đã áp dụng một phương pháp dựa trên DCF để xác định bản đồ cường độ từ trường cho vùng trung tâm của G11, nơi có đủ dữ liệu phụ trợ (Hình 3.5, trái). Cường độ từ trường nằm trong khoảng từ 100 đến 600  $\mu\text{G}$ , với giá trị cao nhất tập trung gần "xương sống" của cấu trúc sợi nơi có mật độ đậm đặc và nhiệt độ thấp hơn so với vùng bên ngoài. Bản đồ tỷ số khối lượng–trên–từ thông (Hình 3.5, phải) cho thấy vùng này ở trạng thái dưới tới hạn về mặt từ. Các nghiên cứu khác trong luận án cũng cho thấy sợi G11 chủ yếu ở điều kiện dưới-Alfvénic. Những kết quả này gợi ý rằng G11 có từ trường mạnh, đóng vai trò quan trọng trong việc chống đỡ sợi G11 trước sự co sụp hấp dẫn. Điều này phù hợp với giai đoạn tiến hóa sớm trong quá trình tiến hoá của cấu trúc sợi, khi vật chất vẫn đang được bồi tụ dọc theo các đường sức từ.



**Hình 3.3:** Bản đồ hướng từ trường của G11 ở bước sóng  $214 \mu\text{m}$ , quan sát bởi SOFIA/HAWC+; độ dài các đoạn thẳng biểu thị tỉ lệ phân cực. Các đường đồng mức màu cam tương ứng với các mức cường độ  $I = 3.6, 8.4, 12.0, 24.0$  và  $42.0 \text{ mJy arcsec}^{-2}$ . Ba vùng nêu trong nghiên cứu được xác định bởi ba hình chữ nhật đỏ tương ứng các vùng Bắc, Trung tâm và Nam.



**Hình 3.4:** Mối liên hệ của độ chênh lệch góc giữa hướng từ trường và trục đám mây cấu trúc sợi,  $\Delta\Theta$ , vào mật độ cột. Đường đỏ đậm biểu thị giá trị trung bình của  $|\Delta\Theta|$ .

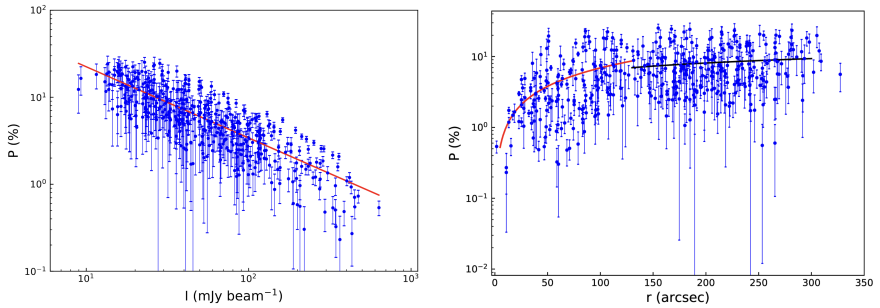


**Hình 3.5:** Trái: Bản đồ cường độ từ trường vùng trung tâm của đám mây khí phân tử G11. Phải: Bản đồ tỷ số khối lượng–trên–từ thông của vùng trung tâm G11. Ngôi sao xanh lam đậm biểu thị vị trí ứng viên tiền sao khối lượng lớn (P1). Các đường đồng mức giống như ở Hình 3.3.

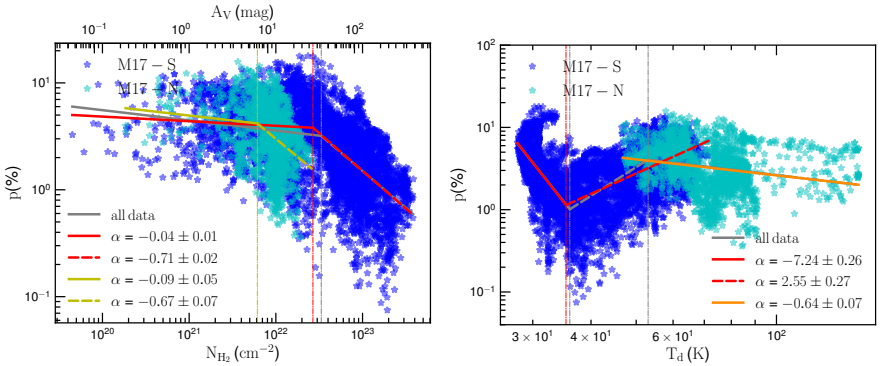
## Chương 4: Nghiên cứu quan sát về định hướng và tiến hóa của hạt bụi

Chương 4 trình bày một phân tích toàn diện quan sát phân cực bụi cho vùng Auriga, M17 và G11.11 -0.12 nhằm nghiên cứu định hướng bụi và kiểm tra các dự đoán của cơ chế RAT-A và RAT-D. “Hố phân cực” là hiện tượng khử phân cực thường thấy trong đo đạc phân cực. Nguyên nhân gây ra hiện tượng này cho đến nay vẫn là một chủ đề được tranh luận, có thể do mất định hướng của hạt bụi, sự rối từ trường hay hiệu ứng chiếu (vì từ trường được quan sát là từ trường được chiếu lên mặt phẳng bầu trời từ không gian 3D thực của nó). Hiệu ứng khử phân cực được thể hiện bằng sự giảm tỉ lệ phân cực ở các vùng có cường độ hoặc mật độ cột cao, được minh họa qua độ dài các đoạn thẳng trong Hình 3.1, 3.2 và 3.3. Hiện tượng này thường được phân tích bằng mối liên hệ tỉ lệ phân cực theo cường độ, như ở Hình 4.1 (trái). Hệ số độ dốc của  $P$  theo  $I$ ,  $\alpha \sim 1$ , nghĩa là bụi mất định hướng hoàn toàn trong các lõi đậm đặc, trong khi  $\alpha < 1$  cho thấy hạt bụi vẫn còn định hướng một phần theo từ trường. Ở Auriga, hệ số độ dốc  $\sim 0.82$  cho thấy hiệu suất định hướng bụi giảm ở vùng đậm đặc hơn. Ở M17, hệ số độ dốc nhỏ hơn ( $\alpha = 0.51$ ), phù hợp với hiệu suất định hướng bụi cao hơn dưới ảnh hưởng của trường bức xạ mạnh. Ở G11, độ dốc này có giá trị cao hơn ( $\alpha \approx 0.80-0.93$ ) cho thấy hiệu ứng khử phân cực khá mạnh nơi thiếu nguồn sáng từ các sao.

Đáng chú ý, ở vùng LkH $\alpha$  101, tỉ lệ phân cực giảm mạnh về phía vị trí của ngôi sao nặng loại B LkH $\alpha$  101 (xem Hình 4.1, phải) mặc dù



**Hình 4.1:** Trái: Mối liên hệ của tỉ lệ phân cực với tổng cường độ phát xạ.  $P$  có xu hướng giảm khi  $I$  tăng. Đường liền thể hiện khớp hàm theo hàm lũy thừa. Phải: Mối liên hệ của  $P$  vào  $r$ . Sự phụ thuộc vào  $r$  của  $P$  được khớp với hàm lũy thừa cho  $r < 130''$  (đường màu đỏ) và  $r > 130''$  (đường màu đen).



**Hình 4.2:** Trái: Mối liên hệ giữa tỉ lệ phân cực và mật độ cột. Phải: Mối liên hệ giữa tỉ lệ phân cực và nhiệt độ bụi. Ở cả hai hình,  $\alpha$  là chỉ số mũ của hàm lũy thừa.

trường bức xạ tăng. Điều này mâu thuẫn với dự đoán của RAT-A, lý thuyết này dự đoán mức định hướng của hạt bụi cao hơn trong các môi

trường bức xạ mạnh hơn. Tuy vậy, xu hướng giảm tỉ lệ phân cực này lại có thể được giải thích bằng cơ chế phá vỡ hạt bụi do mô-men xoắn bức xạ RAT-D. Các hiệu ứng khác, như cấu trúc không gian của từ trường và nhiễu loạn, cũng có thể góp phần tăng cường hiệu ứng hô phân cực. Ở vùng phía nam của M17 (M17-S), độ phân cực giảm theo mật độ cột (Hình 4.2, trái), phù hợp với RAT-A, nghĩa là hiệu suất định hướng hạt bụi giảm ở vùng mật độ lớn nơi bức xạ bị hấp thụ và va chạm khí diễn ra với tần suất lớn hơn. Ở M17-N, tỉ lệ phân cực giảm khi nhiệt độ bụi tăng (Hình 4.2, phải), mặc dù mật độ khí tương đối thấp. Cơ chế RAT-A không thể giải thích hiện tượng khử phân cực trong trường hợp này. Ngoài ra, nghiên cứu cho thấy mức độ nhiễu loạn của từ trường hầu như không đổi ở vùng nhiệt độ bụi cao ( $>90$  K); do đó, sự suy giảm phần trăm phân cực không thể quy cho nhiễu loạn của từ trường; điều này cung cấp bằng chứng quan sát cho tác động của RAT-D.

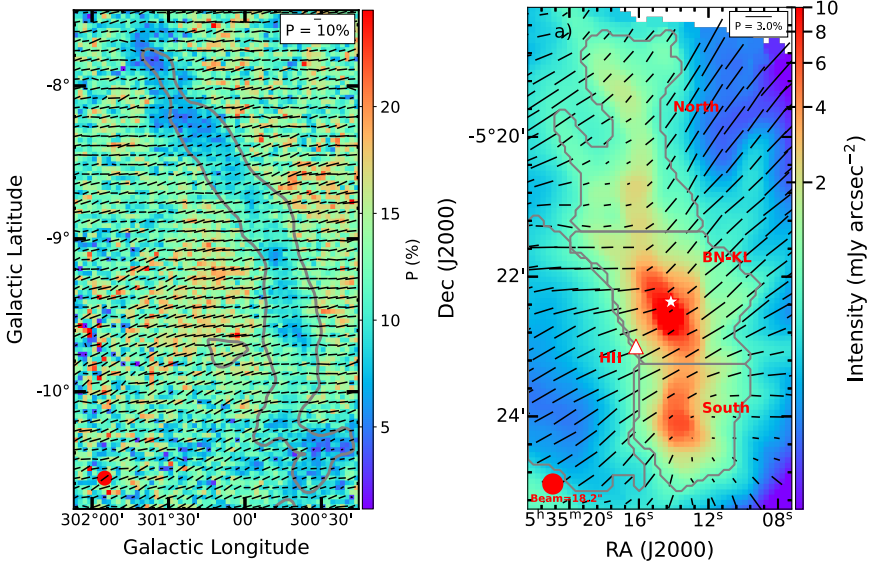
Ở G11, sự tăng trưởng kích thước của hạt bụi trong vùng có mật độ lớn ở vùng xương sống cấu trúc sợi được suy ra từ hệ số độ dốc phân cực ( $\alpha \sim 0.8-0.9 < 1$ ), có nghĩa là bụi ở đây vẫn còn được định hướng và kích thước lớn nhất của bụi lớn hơn  $\sim 0.3 \mu\text{m}$ . Giá trị kích thước ngưỡng này là kích thước nhỏ nhất mà hạt bụi vẫn có thể được định hướng trong từ trường. Chú ý rằng giá trị này lớn hơn kích thước hạt cực đại trong môi trường liên sao,  $\sim 0.25 \mu\text{m}$  (theo phân bố Mathis-Rumpl-Norsieck [13]). Dựa trên cường độ từ trường, sự tăng cường từ tính tính theo MRAT cho giá trị cao, có thể nâng cao hiệu suất định hướng của hạt bụi. Tác động kết hợp của RATs và MRAT có thể giải thích tỉ lệ phân cực cao ( $P \geq 20\%$ ) quan sát ở phần ngoài của G11.

## Chương 5: Mô hình số phân cực bụi nhiệt

Chương 5 trình bày mô hình số cho phân cực từ bức xạ nhiệt của bụi sử dụng DustPOL-py để kiểm tra các dự đoán của lý thuyết Mô-men xoắn bức xạ. Mô hình số được áp dụng cho hai đám mây phân tử khí cấu trúc sợi có tính chất tương phản là Musca và OMC-1 (Hình 5.1). Trước khi xây dựng mô hình, tôi phân tích các xu hướng tỉ lệ phân cực từ dữ liệu quan sát ở những vùng này liên hệ với điều kiện môi trường, bao gồm nhiệt độ bụi, mật độ khí và độ nhiễu loạn của từ trường.

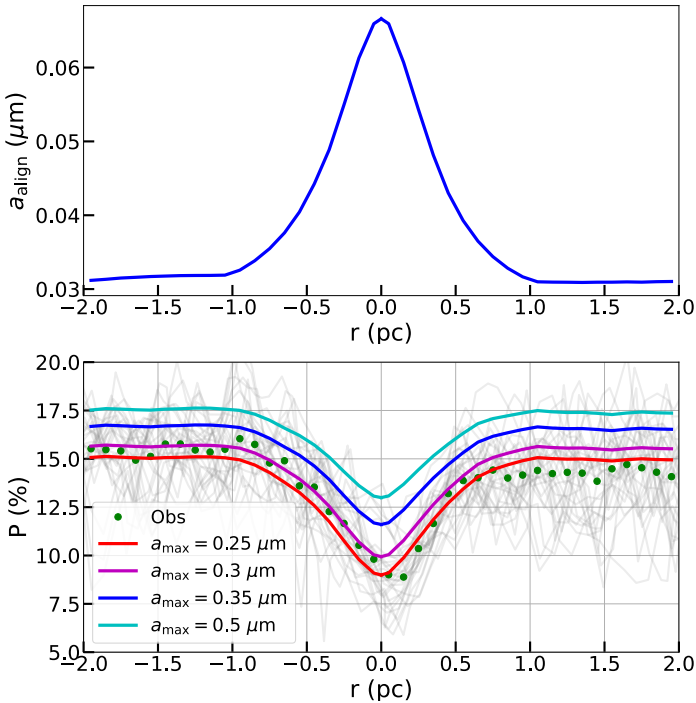
Ở đám mây khí phân tử Musca —một đám mây có cấu trúc sợi đơn giản, tỉ lệ hình thành sao thấp— sự giảm tỉ lệ phân cực về phía xương sống của cấu trúc sợi nơi có mật độ lớn, được mô phỏng lại tốt chỉ với cơ chế RAT-A. Mô hình cho thấy hiệu suất định hướng của hạt bụi giảm (Hình 5.2, hình trên) khi mật độ cột tăng do cường độ trường bức xạ giảm và tần suất va chạm của khí tăng. Kết quả mô hình hoá thành công tỉ lệ phân cực so với quan sát từ phần ngoài vào phần trong của cấu trúc sợi theo  $r$  (Hình 5.2, hình dưới) khẳng định RAT-A có thể giải thích hiệu ứng khử phân cực trong môi trường bức xạ thấp của Musca.

Trái lại, OMC-1 là vùng hình thành sao hoạt động mạnh và có môi trường bức xạ cao. RAT-A không thể giải thích xu hướng  $P - T_d$  quan sát được. Tỉ lệ phân cực tăng theo nhiệt độ bụi rồi giảm ở vùng nhiệt độ lớn hơn  $\sim 65$  K. Xu hướng tăng-giảm này là dấu hiệu cho thấy tác động của cơ chế RAT-D, khi các hạt bụi lớn bị phá vỡ bởi bức xạ cường độ cao, làm giảm số lượng hạt bụi được định hướng. DustPOL-py, tính đến cả hiệu ứng định hướng, phá vỡ và rời từ trường, có thể tái tạo



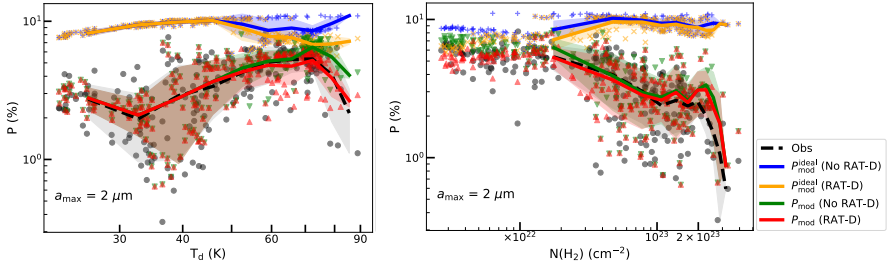
**Hình 5.1:** Trái: Bản đồ hướng từ trường của Musca quan sát bởi *Planck*. Độ dài đoạn thẳng tỷ lệ với tỉ lệ phân cực  $P$ . Phải: Bản đồ hướng từ trường của OMC-1 quan sát ở bước sóng  $214 \mu\text{m}$  bởi SOFIA/HAWC+. Các đường đen biểu thị hướng của từ trường chồng lên bản đồ cường độ bức xạ nhiệt. Ba vùng North, BN-KL và South được đánh dấu.

các quan hệ  $P - T_d$  và  $P - N(\text{H}_2)$  (hồ phân cực) quan sát, thể hiện ở Hình 5.3. Mô hình “lý tưởng” về phân cực (đường xanh lam và cam) không khớp tốt với dữ liệu quan sát (đường màu đen), trong khi mô hình phân cực thực tế (đường màu đỏ) xét RAT-A, RAT-D và nhiễu loạn từ trường ( $P_{\text{mod}}$ ) phù hợp nhất với dữ liệu quan sát của  $P - T_d$  và  $P - N(\text{H}_2)$  (xem Mục 5.4.2 trong luận án để biết chi tiết). Việc kiểm chứng thành công cơ chế RAT thông qua mô hình hóa phát xạ phân



**Hình 5.2:** Musca. Hình trên: Kích thước hạt bụi tối thiểu được định hướng theo từ trường dựa trên cơ chế RAT. Hình dưới: So sánh tỉ lệ phân cực từ mô hình (đường đậm) với dữ liệu quan sát. Các đường màu xám thể hiện  $P$  theo  $r$  (khoảng cách đến trục sợi) cho các lát cắt xuyên tâm dọc trục sợi từ dữ liệu quan sát. Các chấm xanh lục biểu diễn giá trị trung bình quan sát của  $P$  tại một giá trị  $r$  nhất định. Các đường màu liền nét biểu diễn tỉ lệ phân cực từ mô hình với  $a_{\text{max}}$  khác nhau. Sự tăng nhanh kích thước tối thiểu định hướng về phía xương sống của cấu trúc sợi,  $r = 0$ , dẫn đến sự giảm tỉ lệ phân cực, tái tạo thành công “hố phân cực” như theo dữ liệu quan sát được.

cực theo từng điểm ảnh so sánh với dữ liệu quan sát cho hai trường hợp tương phản— Musca và OMC-1— mang lại một cách tiếp cận để kiểm chứng cơ chế RAT và nghiên cứu tính chất hạt bụi trong các môi trường khác nhau.



**Hình 5.3:** OMC-1. Hình trái: So sánh mối quan hệ tỉ lệ phân cực theo nhiệt độ bụi từ các mô hình khác nhau (các đường màu) với dữ liệu quan sát (đường màu đen). Hình phải: Mối quan hệ  $P - N(H_2)$ . Vùng bóng mờ biểu thị độ lệch  $1-\sigma$ , các điểm dữ liệu được thể hiện bằng chấm (đen cho dữ liệu quan sát và màu cho dữ liệu từ mô hình).

## Chương 6: Tổng kết

Cuối cùng, Chương 6 trình bày các phát hiện chính của luận án và thảo luận các hướng nghiên cứu dự kiến trong tương lai gần. Hình thái và cường độ từ trường đã được nghiên cứu chi tiết cho các đám mây khí phân tử LkH $\alpha$  101, M17 và G11.11 -0.12, cho thấy từ trường mạnh so với hấp dẫn và nhiễu loạn. Phân tích dữ liệu phân cực theo cơ chế RAT cho thấy RAT-A phù hợp với hiệu suất định hướng bụi giảm ở các vùng có mật độ cao và bức xạ thấp (ví dụ như Musca và G11); RAT-D có thể giải thích sự suy giảm tỉ lệ phân cực do phá vỡ hạt bụi trong môi trường bức xạ cao (ví dụ, M17, OMC-1, LkH $\alpha$  101). Bằng chứng về sự tăng trưởng kích thước hạt bụi và hiệu suất định hướng nâng cao do tính chất từ của bụi được tìm thấy ở G11. Mô hình số với DustPOL-py tái tạo thành công các xu hướng phân cực từ dữ liệu quan sát cho 2 đám mây khí phân tử Musca và OMC-1.

Các kỹ thuật phân tích phát triển trong luận án này, đặc biệt cho phân tích dữ liệu phân cực và mô hình hóa theo từng điểm ảnh, được áp dụng lần đầu tiên cho Musca và OMC-1. Cách tiếp cận này đã được các cộng tác viên quốc tế áp dụng cho những vùng hình thành sao khác, trong khuôn khổ dự án BALLAD-POL [14, 15, 16]. Công việc tương lai sẽ tập trung mở rộng sang các thang không gian đa dạng hơn nữa, như lõi tiền sao, tích hợp phân tích phân cực đa bước sóng, và khám phá cấu trúc ba chiều của từ trường, qua đó nâng cao hiểu biết của chúng ta về tính chất hạt bụi và vai trò của từ trường trong quá trình hình thành sao.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Thomas P. Robitaille and Barbara A. Whitney. The Present-Day Star Formation Rate of the Milky Way Determined from Spitzer-Detected Young Stellar Objects. *ApJ*, 710(1):L11–L15, 2010.
- [2] Christopher F. McKee and Eve C. Ostriker. Theory of Star Formation. *ARA&A*, 45(1):565–687, 2007.
- [3] K Pattle and L Fissel. Submillimeter and Far-infrared Polarimetric Observations of Magnetic Fields in Star-Forming Regions. *Front. Astron. Space Sci. Sciences*, 6:15, 2019.
- [4] A. Lazarian and T. Hoang. Radiative torques: analytical model and basic properties. *MNRAS*, 378(3):910–946, 06 2007.
- [5] BG Andersson, A Lazarian, and John E Vaillancourt. Interstellar dust grain alignment. *ARA&A*, 53:501–539, 2015.
- [6] T. Hoang, Le Ngoc Tram, Hyeseung Lee, and Sang-Hyeon Ahn. Rotational disruption of dust grains by radiative torques in strong radiation fields. *Nature Astronomy*, 3:766–775, May 2019.
- [7] Le Ngoc Tram and Thiem Hoang. Recent progress in theory and observational study of dust grain alignment and rotational disruption in star-forming regions. *Front. Astron. Space Sci. Sciences*, 9:923927, 2022.
- [8] Leverett D. The strength of interstellar magnetic fields. *Phys. Rev.*, 81(5):890, 1951.
- [9] Subrahmanyan Chandrasekhar and Enrico Fermi. Problems of gravitational stability in the presence of a magnetic field. *ApJ*,

118:116, 1953.

- [10] Hannah Broekhoven-Fiene, Brenda C Matthews, P Harvey, et al. The jcmt gould belt survey: A first look at the auriga–california molecular cloud with scuba-2. *ApJ*, 852(2):73, 2018.
- [11] Enrique Vázquez-Semadeni, Alejandro González-Samaniego, and Pedro Colín. Hierarchical star cluster assembly in globally collapsing molecular clouds. *MNRAS*, 467(2):1313–1328, 2017.
- [12] Quang Nguyen-Luong, Fumitaka Nakamura, Koji Sugitani, Tomomi Shimoikura, Kazuhito Dobashi, et al. Large-scale molecular gas distribution in the m17 cloud complex: Dense gas conditions of massive star formation? *ApJ*, 891(1):66, 2020.
- [13] John S Mathis, William Rumpl, and Kenneth H Nordsieck. The size distribution of interstellar grains. *ApJ*, 217:425–433, 1977.
- [14] Saikhom Pravash, Archana Soam, Pham Ngoc Diep, et al. BALLAD-POL. III. Grain Alignment and Disruption Mechanisms in G34.43+0.24 Using Polarization Observations from JCMT/POL-2. *ApJ*, 981(2):128, 2025.
- [15] Saikhom Pravash, Thiem Hoang, Archana Soam, et al. BALLAD-POL: IV. Grain alignment mechanisms in Cocoon Nebula (IC 5146) using polarization observations from JCMT/POL-2. *arXiv e-prints*, page arXiv:2507.07205, 2025.
- [16] Sadhana Singh, Thiem Hoang, Pham Ngoc Diep, Nguyen Bich Ngoc, and Woojin Kwon. Magnetic Field and Dust Grain Alignment in Serpens Main. In *AAS Meeting*, volume 245 of *AAS Meeting*, page 174.03, 2025.

## **DANH MỤC CÁC BÀI BÁO ĐÃ XUẤT BẢN LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN**

**1. Observations of magnetic fields surrounding LkH $\alpha$  101 taken by the BISTRO survey with JCMT-POL-2**

Nguyen Bich Ngoc and BISTRO collaboration 2021,

The Astrophysical Journal, 908(1), p.10. DOI:

10.3847/1538-4357/abd0fc

**2. Studying Magnetic Fields and Dust in M17 Using Polarized Thermal Dust Emission Observed by SOFIA/HAWC+**

Thuong Duc Hoang, Nguyen Bich Ngoc, Pham Ngoc Diep, Le Ngoc

Tram, et al., 2022, ApJ, 929, 27. DOI:10.3847/1538-4357/ac5abf2

**3. B-fields And dust in interstellAr fiLAments using Dust**

**POLarization (BALLAD-POL): I. The massive filament G11.11 -0.12**  
observed by SOFIA/HAWC+

Nguyen Bich Ngoc, Pham Ngoc Diep, Thiem Hoang, Le Ngoc Tram, et al., 2023,

The Astrophysical Journal, 953(1), p.66. DOI:

10.3847/1538-4357/acdb6e

**4. B-fields And dust in interstellAr fiLAments using Dust**

**POLarization (BALLAD-POL): II. Testing the Radiative Torque Paradigm in Musca and OMC-1**

Nguyen Bich Ngoc, Thiem Hoang, Pham Ngoc Diep, and Le Ngoc Tram, 2024,

The Astrophysical Journal, 974(1), 118. DOI:

10.3847/1538-4357/ad6a5e