

**BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Trần Thị Thái

**NGHIÊN CỨU CÁC NGUỒN TÁI ION HÓA VỮ TRỤ
SỬ DỤNG MÁY QUANG PHỔ ĐA ĐỐI TƯỢNG MUSE
CỦA ĐÀI THIÊN VĂN NAM ÂU (VLT)**

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 - 2024

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:

1. Người hướng dẫn 1: TS. Phạm Tuấn Anh, Trung tâm Vũ trụ Việt Nam
2. Người hướng dẫn 2: TS. Roser Pello, Đại học Aix-Marseille, Cộng hòa Pháp

Phản biện 1: PGS. TS Ngô Ngọc Hoa, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội

Phản biện 2: GS. TS Đào Tiến Khoa, Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam

Phản biện 3: PGS. TS Đỗ Quốc Tuấn, Trường Đại học Phenikaa

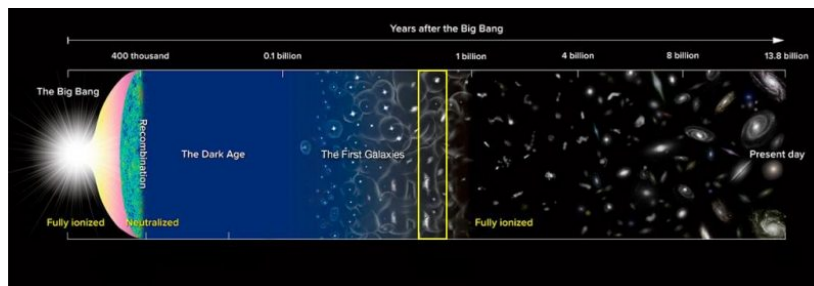
Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi 9 giờ 00, ngày 29 tháng 8 năm 2024

Có thể tìm hiểu luận án tại:

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

1 Giới thiệu

Thành công trong việc đưa vào khai thác các hệ kính thiên văn trong những năm gần đây như JWST, MUSE/VLT, VIMOS Ultra Deep Survey đã thúc đẩy hướng nghiên cứu các thiên hà thời kì đầu Vũ trụ trở nên năng động hơn bao giờ hết. Mục tiêu khoa học trong lĩnh vực này đó là nghiên cứu các thiên hà trong thời kì tái ion hóa và ước lượng đóng góp các nguồn này đối với quá trình tái ion hóa Vũ trụ.



Hình 1.1: Tóm tắt lịch sử Vũ trụ từ sau Vụ nổ lớn theo thời gian. Sau thời gian 380 000 năm, quá trình tái kết hợp bắt đầu xảy ra. Những cấu trúc đầu tiên của Vũ trụ như sao, thiên hà được hình thành sau đó khoảng vài trăm triệu năm đã đánh dấu sự kết thúc của thời kỳ tăm tối Dark Age. Quá trình tái ion hóa Vũ trụ kết thúc tại dịch chuyển đỏ $z \approx 6$. Nguồn: NAOJ.

Vài triệu năm sau vụ nổ Big Bang, nhiệt độ của Vũ trụ vô cùng lớn, các electron và proton không thể kết hợp để hình thành nguyên tử Hydro trung hòa. Theo thời gian, Vũ trụ nguội dần đạt đến $\sim 3000\text{K}$, các electron và proton kết hợp với nhau tạo thành nguyên tử Hydro trung hòa. Lúc này chỉ tồn tại các bức xạ nền CMB mà không có nguồn phát xạ nào khác, Vũ trụ bước vào thời kỳ tăm tối. Theo thời gian, Vũ trụ không ngừng giãn nở và nguội dần, tạo điều kiện cho sự hình thành những cấu trúc đầu tiên trong Vũ trụ như sao, thiên hà. Phát xạ từ chúng ra bên ngoài môi trường xung quanh làm ion hóa nguyên tử Hydro trung hòa, thời kỳ tăm tối kết thúc, Vũ trụ bắt đầu chuyển sang giai đoạn tái ion hóa. Đây được coi là giai đoạn vô cùng quan trọng của quá trình chuyển đổi trạng thái vật chất của Vũ trụ từ trạng thái trung hòa sang trạng thái ion hóa hoàn toàn như hiện nay.

Cho đến nay, hiểu biết về các nguồn chịu trách nhiệm cho quá trình tái ion hóa vẫn chưa rõ ràng, có thể là nhân thiên hà hoạt động (Active Galactic Nuclei AGN) do những tính chất nổi bật như độ trưng lớn, tỉ lệ thoát của các photon ion hóa cao..., nhưng cũng có thể là thiên hà hình thành sao (star forming galaxies) với nguồn cung cấp photon ion hóa từ các sao trẻ và nặng. Tuy nhiên những số liệu quan sát gần đây cho thấy, chỉ có một số ít nhân thiên hà hoạt động được tìm thấy trong khoảng dịch chuyển đỏ $z = 6 - 8$, số lượng này dường như không đủ để duy trì trạng thái ion hóa. Để làm rõ vấn đề này, cách tốt nhất là nghiên cứu sự

đóng góp của chúng vào quá trình tái ion hóa. Trong luận án này, tôi tập trung nghiên cứu đóng góp của các thiên hà hình thành sao bằng việc tìm hiểu sự tiến triển hàm độ trung theo dịch chuyển đỏ, nhờ đó cung cấp những thông tin hữu ích liên quan đến phân bố mật độ thiên hà trong một đơn vị độ trung. Các nghiên cứu trước đó đã dự đoán các thiên hà mờ, khối lượng thấp đóng góp đáng kể cho quá trình tái ion hóa. Để khẳng định dự đoán này, chúng ta cần phải tính toán định lượng vai trò của chúng và xây dựng bức tranh tổng quát hơn. Tuy nhiên những quan sát hiện tại trong trường trống chưa thể đạt đến giới hạn mờ nhất của độ trung, trong khi các quan sát dựa trên hiện tượng thấu kính hấp dẫn lại cải thiện đáng kể số lượng mẫu ở vùng này, do tín hiệu được khuếch đại lên nhiều lần. Luận án này nghiên cứu hàm độ trung của các thiên hà hình thành sao phát xạ vạch Lyman alpha ở sau các thiên hà thấu kính hấp dẫn quan sát bởi MUSE/VLT.

Chương 1 của luận án giới thiệu về chủ đề nghiên cứu, hiểu biết hiện tại về những cấu trúc đầu tiên trong Vũ trụ, trạng thái ion hóa và tái kết hợp diễn ra ngay sau đó; giới thiệu về tính chất phổ của các thiên hà hình thành sao thông qua một số vạch đặc trưng; và cách xác định các thiên hà này từ khối dữ liệu dạng datacube. Hydro là nguyên tố phổ biến nhất trong Vũ trụ, electron ở lớp vỏ có thể bị kích thích để chuyển lên trạng thái có mức năng lượng cao hơn trong môi trường liên sao và phát xạ vạch Lyman alpha. Đây là một trong những vạch có cường độ mạnh nhất có thể quan sát được bằng các kính thiên văn quang học tại mặt đất. Có rất nhiều quan sát được thực hiện để tìm kiếm thiên hà phát xạ vạch Lyman alpha, có thể kể đến như: 10000 thiên hà ở dịch chuyển đỏ $z \geq 4$ được phát hiện trong các quan sát của Hubble Space Telescope [1, 2], khoảng 18000 thiên hà được phát hiện nhờ các quan sát với máy quang phổ thuộc chương trình HETDEX ở dịch chuyển đỏ $z = 2.0 - 3.5$ [3]... Sự đa dạng về số lượng thiên hà được phát hiện đặt ra câu hỏi về mật độ thiên hà có thể quan sát được trong một đơn vị thể tích Vũ trụ và đóng góp của chúng vào quá trình tái ion hóa Vũ trụ. Điều này dẫn đến khái niệm về hàm độ trung: số lượng thiên hà có thể quan sát được trong một khoảng độ trung và thể tích khảo sát. Nghiên cứu sự tiến triển hàm độ trung theo giá trị của dịch chuyển đỏ là một trong những hướng nghiên cứu vô cùng năng động ở thời điểm hiện tại nhằm giải quyết vấn đề đã nêu. Ở chương này, luận án trình bày khái quát những kết quả nghiên cứu gần đây sử dụng dữ liệu về vạch Lyman alpha quan sát từ các đài thiên văn, kết hợp với nhiều cách tiếp cận khác nhau. Tuy nhiên thông tin về các nguồn có độ trung thấp đang bị hạn chế do các quan sát thực hiện trong trường trống chưa đạt được độ sâu cần thiết. Do đó giả thiết về giá trị độ dốc của hàm độ trung trong quá trình khớp hàm Schechter từ các nghiên cứu lý thuyết thường được áp dụng trong những trường hợp này ($\alpha = -1.50, -2.00, -2.50$, [4, 5]). Dữ liệu quan sát ở vùng có độ trung thấp ngày càng trở nên quan trọng. Từ đó luận án gợi mở vấn đề quan sát các thiên hà hình thành sao dựa trên hiện tượng thấu kính hấp dẫn, một hệ quả của thuyết tương đối rộng Anh-xtanh nhằm thu được tín hiệu của các nguồn phát xạ Lyman alpha ở vùng có độ trung thấp.

2 Dự án quan sát thiên hà thấu kính hấp dẫn sử dụng Máy quang phổ đa đối tượng MUSE để tìm kiếm các nguồn phát xạ Lyman Alpha

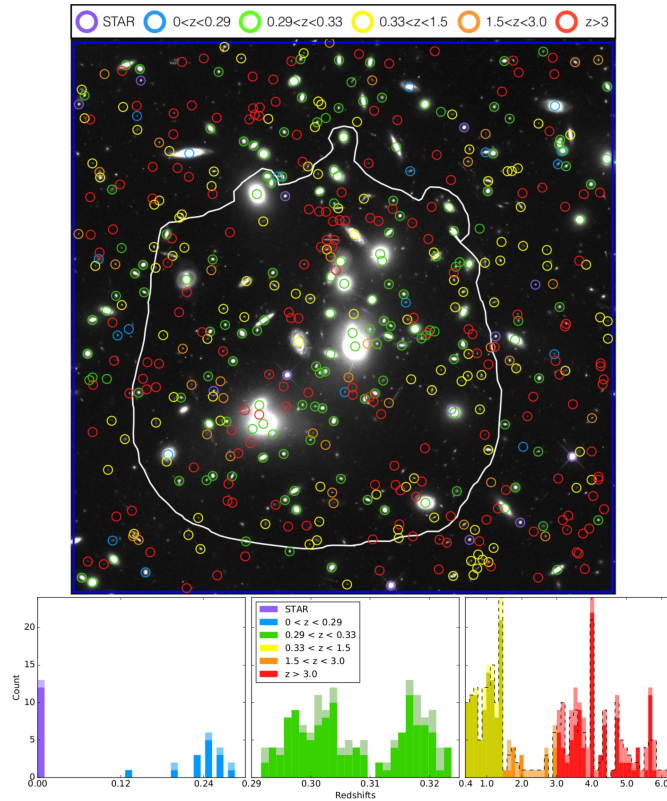
Chương 2 của luận án giới thiệu ngắn gọn các thông số về máy quang phổ đa đối tượng MUSE/VLT, mục tiêu khoa học của hệ thiết bị, những kết quả quan sát ấn tượng gần đây. Hệ thiết bị này cho phép ghi phổ nhiều đối tượng thiên văn trong cùng một trường nhìn. Dữ liệu thu được chứa thông tin về vị trí của các đối tượng trong không gian và vạch phát xạ của các đối tượng ở bước sóng trong khoảng 4750 đến 9370 Å tương ứng với dịch chuyển đỏ của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha trong khoảng $z = 2.9 - 6.7$.

Ở phần thứ 3 của chương này, tôi trình bày một số kết quả nghiên cứu trước đó về 17 cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn, thông tin về mô hình thấu kính hấp dẫn được sử dụng trong luận án. Hình 2.1 là một ví dụ về các nguồn phát xạ vạch quan sát bởi MUSE, vòng tròn có màu sắc khác nhau tương ứng với các nguồn có độ dịch chuyển đỏ khác nhau. Hình 2.2 mô tả quá trình xác định giá trị dịch chuyển đỏ của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha quan sát được đằng sau cụm thiên hà A2667. Để quá trình đánh giá diễn ra khách quan, ba nhóm chuyên gia được yêu cầu làm việc độc lập và họp phiên chung để đi đến thống nhất. Có ba cấp độ để đánh giá độ tin cậy của giá trị dịch chuyển đỏ:

+ Cấp độ thấp nhất ($zconf = 1$). Ở cấp độ này, dịch chuyển đỏ của nguồn được xác định dựa trên tín hiệu của một vạch phát xạ có cường độ yếu. Chúng tôi không có đủ tự tin 100% để khẳng định đây là nguồn phát xạ Lyman alpha, do đó nguồn này sẽ không được sử dụng cho mục đích nghiên cứu sự tiến triển hàm độ trưng trong toàn bộ luận án. Tuy nhiên, chúng tôi đã thảo luận ảnh hưởng của những nguồn này đối với sai số của hàm độ trưng nếu chúng được thêm vào bộ dữ liệu của công việc hiện tại.

+ Cấp độ trung bình khá ($zconf = 2$). Ở cấp độ này, tín hiệu trên nhiễu của các vạch phát xạ cao hơn. Độ tin cậy cũng sẽ được nâng lên ($zconf = 1$ thành $zconf = 2$) nếu ảnh thu được là ảnh của một nguồn đa ảnh được xác định bằng mô hình thấu kính hấp dẫn.

+ Cấp độ tốt ($zconf=3$). Dịch chuyển đỏ của nguồn được xác định dựa trên tín hiệu mạnh của vạch Lyman alpha, hình dáng phổ cùng với nhiều vạch hấp thụ/phát xạ có tín hiệu trên nhiễu cao.



Hình 2.1: Hình phía trên: Sự phân bố không gian của các nguồn phát xạ vạch đẳng sau cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn A2744 từ dữ liệu quan sát của MUSE và RGB HST. Hình phía dưới: Sự phân bố dịch chuyển đỏ ở các khoảng khác nhau. Nguồn: [6].

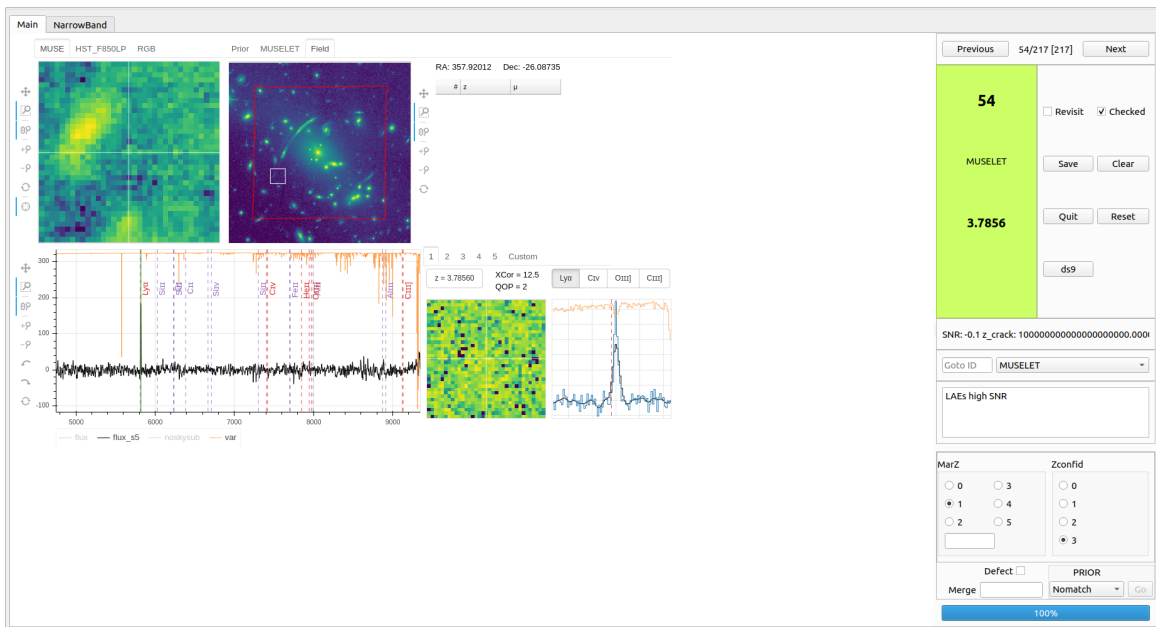
Do ảnh hưởng của hiệu ứng thấu kính hấp dẫn, tín hiệu từ các thiên hà ở xa được khuếch đại nhiều lần, tia sáng bị bẻ cong cho phép quan sát thấy nhiều ảnh của cùng một nguồn. Tuy nhiên, tính toán trong trường hợp này khá phức tạp do quá trình giải ảnh thấu kính đòi hỏi phải được thực hiện qua lại giữa mặt phẳng nguồn và mặt phẳng ảnh nhằm loại bỏ các ảnh hưởng của hiện tượng thấu kính hấp dẫn. Để hạn chế tính toán trùng lặp và tiết kiệm thời gian, trong nghiên cứu này chúng tôi chọn ra một ảnh đại diện đặc trưng cho mỗi hệ dựa trên các tiêu chí về tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu, giá trị độ khuếch đại, ảnh được chọn thường nằm riêng lẻ so với những ảnh khác của cùng một hệ. Chương 2 kết thúc với thông tin chung về 600 nguồn phát xạ Lyman alpha được tìm thấy phía sau 17 cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn có dịch chuyển đỏ nằm trong khoảng $2.9 \leq z \leq 6.7$ (Bảng 2.1), phân bố trong bốn bậc độ trưng $39 \leq \text{textlog}L[\text{erg/s}] \leq 43$ và so sánh thông tin của 600 nguồn này với dữ liệu trong nghiên cứu trước đó được thực hiện bởi [7].

Có hai điểm cần chú ý trong quá trình tính toán độ trưng của nguồn phát xạ Lyman alpha:

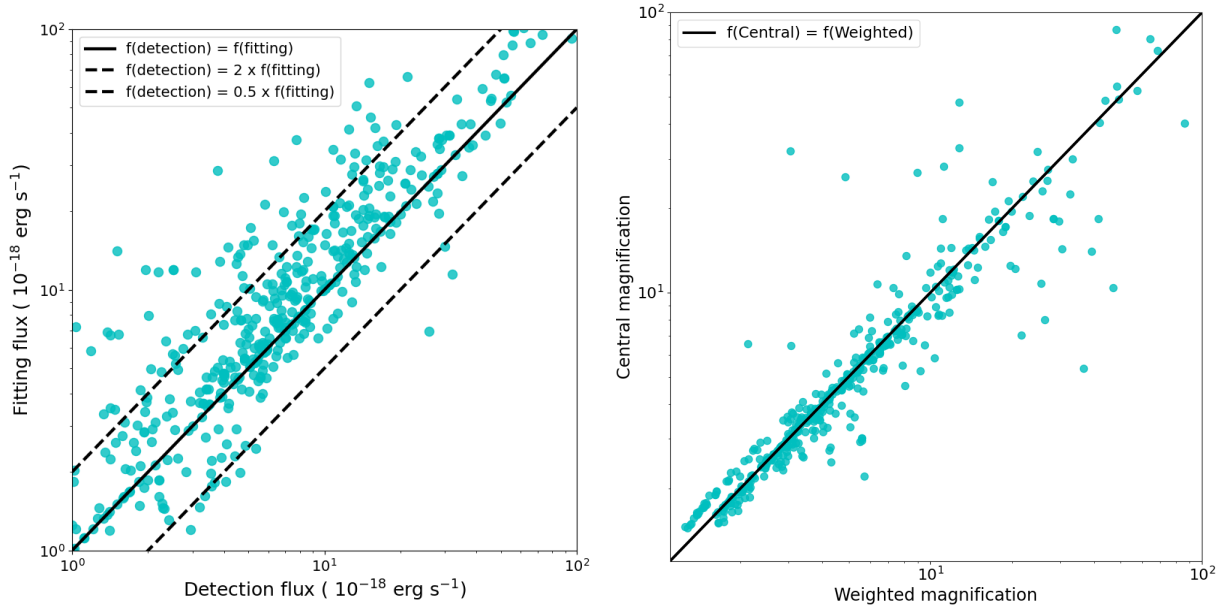
+ Thông lượng của từng nguồn. Dữ liệu thu được từ máy quang phổ đa đối tượng MUSE được lưu lại dưới dạng khối dữ liệu với hai chiều không gian và một chiều bước sóng. Thông lượng của từng nguồn được xác định bằng cách khớp hàm sử dụng phương trình được đề xuất bởi [8]:

$$f(\lambda) = A \exp \frac{-(\lambda - \lambda_0)^2}{2(a(\lambda - \lambda_0) + d)^2} \quad (2.1)$$

Ở đây A là biên độ của phổ phát xạ Lyman alpha, a là giá trị đặc trưng cho tính bất đối xứng hình dạng phổ, d độ rộng nửa chiều cao của phổ (FWHM). Các đại lượng này được xác định trong quá trình khớp hàm bằng việc sử dụng phương trình ở trên đối với khối dữ liệu có kích thước $5'' \times 5'' \times 12.5 \text{ \AA}$ bao quanh vị trí của nguồn. Giá trị trung bình của FWHM và giá trị đặc trưng cho tính bất đối xứng lần lượt là 7 \AA và 0.2 . Tổng thông lượng của từng nguồn được lấy từ bộ dữ liệu của [9]. Trong trường hợp thông lượng của nguồn mờ và không thể đáp ứng với phương trình trên, chúng tôi sử dụng giá trị thu được từ phần mềm Source Extractor để tính tổng giá trị thông lượng trong từng pixel của nguồn. Ưu điểm của sử dụng phần mềm Source Extractor là không cần phải đưa ra giả thiết cho các đại lượng của phổ vạch Lyman Alpha. So sánh giá trị thông lượng thu được sử dụng hai phương pháp được trình bày tại Hình 2.3 (bên trái). Trục hoành hiển thị giá trị thông lượng xác định bằng phần mềm Source Extractor, trục tung hiển thị giá trị thông lượng xác định bằng phương pháp khớp hàm. Kết quả khớp hàm tuyến tính với hệ số 0.9 đã chỉ ra sự tương đồng giữa hai phương pháp.



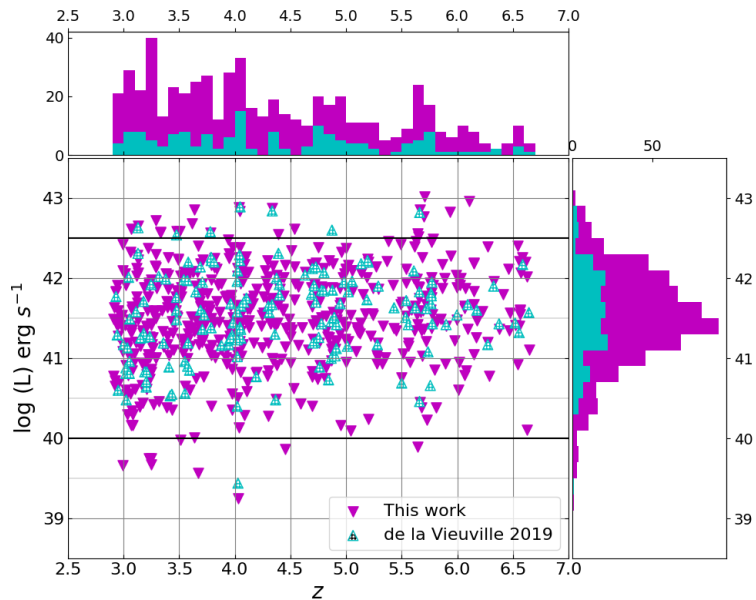
Hình 2.2: Giao diện làm việc của phần mềm Source Extractor. Ví dụ về quá trình xác định nguồn phát xạ Lyman alpha M54 đằng sau cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn A2667 sử dụng hình ảnh từ HST và dữ liệu của MUSE. Nguồn M54 dường như không được phát hiện trong quan sát của HST (ảnh trên cùng bên trái). Hình ảnh trên cùng bên phải hiển thị vị trí phát hiện nguồn (ô vuông nhỏ màu đỏ) trong trường quan sát của MUSE (ô vuông to màu đỏ). Phổ phát xạ của nguồn được hiển thị ở hình cuối cùng bên trái. Tín hiệu của nguồn quan sát bởi MUSE hiển thị ở hình ở giữa hàng dưới. Hình dưới cùng bên phải là hình ảnh phóng to phổ phát xạ Lyman alpha của nguồn. Độ tin cậy trong quá trình xác định giá trị dịch chuyển đỏ được xác định bởi tính chất phổ và được ghi lại bởi cột ngoài cùng bên phải.



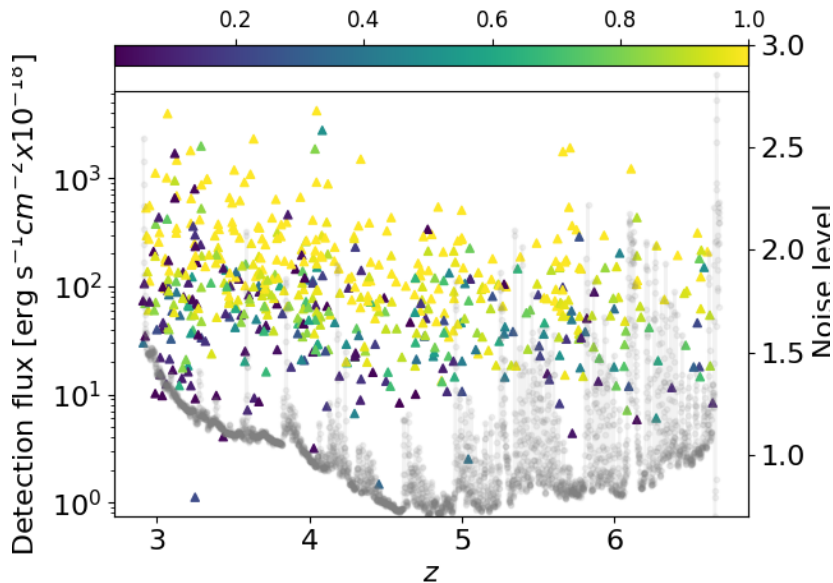
Hình 2.3: Trái: So sánh giá trị thông lượng thu được từ hai phương pháp đo: khớp hàm (trục y) và từ SExtractor (trục x). Phải: So sánh giá trị khuếch đại của nguồn tại vị trí trung tâm (trục y) và khi được lấy trung bình (trục x).

+ Giá trị khuếch đại của thiên hà. Giá trị này được [9] áp dụng tại vị trí tâm của nguồn. Tuy nhiên, khi không phải là nguồn điểm, giá trị khuếch đại tại các vị trí khác nhau là khác nhau. Điều này đặt ra yêu cầu về việc lấy giá trị trung bình độ khuếch đại để đại diện tốt hơn cho nguồn. Xuyên suốt trong luận án này, chúng tôi đề xuất sử dụng giá trị khuếch đại trung bình thay vì giá trị tại tâm của nguồn. Sự khác biệt giữa hai giá trị này được thể hiện ở Hình 2.3 (bên phải).

So với dữ liệu nghiên cứu trước đây của [7] khi nghiên cứu các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha phía sau bốn cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn, số lượng nguồn trong nghiên cứu hiện tại nhiều gấp bốn lần. So sánh giá trị độ trung ở những giới hạn mờ nhất $\log L[\text{erg/s}] \sim 40$ cho thấy số lượng nguồn trong nghiên cứu hiện tại nhiều hơn đáng kể so với nghiên cứu trước đó. Vì vậy, dữ liệu được sử dụng trong luận án giúp cải thiện đáng kể về phân bố độ trung ở những khoảng giới hạn mờ nhất, đồng thời cũng cải thiện thống kê của ở vùng này. Hình 2.4 so sánh dữ liệu hiện tại và dữ liệu trước đó được sử dụng trong [7].



Hình 2.4: Hình giữa mô tả sự phân bố của độ trưng theo giá trị độ dịch chuyển đỏ, hình bên trên hiển thị sự phân bố giá trị dịch chuyển đỏ, hình bên phải hiển thị phân bố giá trị độ trưng. Phần màu tím hiển thị dữ liệu được sử dụng trong luận án. Phần màu xanh là dữ liệu so sánh từ bài báo [7]



Hình 2.5: Thông lượng đo đạc và nhiễu theo dịch chuyển đỏ của các nguồn LAEs trong mẫu khảo sát hiện tại. Trục bên trái hiển thị thông lượng được phát hiện, trục bên phải hiển thị mức nhiễu, thanh ngang phía trên cung cấp giá trị hoàn chỉnh cho các nguồn riêng lẻ. Các chấm tròn xám biểu thị sự phụ thuộc của nhiễu theo dịch chuyển đỏ trong khối dữ liệu của MUSE.

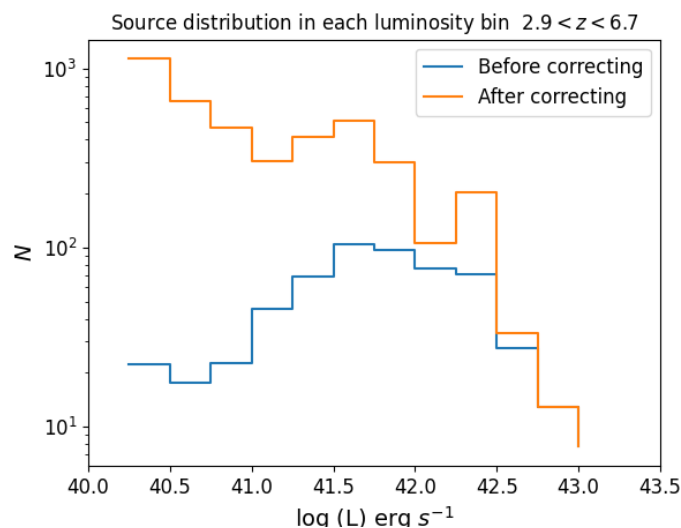
Thông tin chung của 17 cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn.

Cluster	RA	DEC	z	Programme ID	Notes	Seeing value	MUSE depth (hrs)	N. LAEs	
A2390	21:53:36.823	+17:41:43.59	0.228	094.A-0115		0.75	2	7	
A2667	23:52:28.400	-26:05:08.00	0.233	094.A-0115		0.62	2	14	
A2744	00:14:20.702	-30:24:00.63	0.308	094.A-0115, 095.A-0181	MACS, FF	0.61	3.5-7	128	
A370	02:29:53.122	-01:34:56.14	0.375	094.A-0115, 096.A-0710	FF	0.66	1.5-8.5	41	
AS1063	22:48:43.975	-44:31:51.16	0.348	60.A-9345, 095.A-0653	FF	1.02	3.9	20	
BULLET	06:58:38.126	-55:57:25.87	0.296	094.A-0115		0.56	2	11	
MACS0257	02:57:41.070	-22:09:17.70	0.322	099.A-0292, 0100.A-0249	MACS	0.52	8	24	
MACS0329	03:29:41.568	-02:11:46.41	0.450	096.A-0105	MACS, CLASH	0.69	2.5	16	
MACS0416N	04:16:09.144	-24:04:02.95	0.397	094.A-0115, 0100.A-0763	MACS, CLASH	0.53	17	45	
MACS0416S	04:16:09.144	-24:04:02.95	0.397	094.A-0525	MACS, CLASH	0.65	11-15	32	
MACS0451	04:51:54.647	+00:06:18.21	0.430	098.A-0502, 0104.A-0489	MACS	0.58	8	21	
MACS0520	05:20:42.046	-13:28:47.58	0.336	098.A-0502, 0104.A-0489	MACS	0.57	8	19	
MACS0940	09:40:53.698	+07:44:25.31	0.335	098.A-0502, 0101.A-0506	MACS	0.571	8	48	
MACS1206	12:06:12.149	-08:48:03.37	0.438	095.A-0181, 097.A-0269	MACS, CLASH	0.521	4-9	49	
MACS2214	22:14:57.292	-14:00:12.91	0.502	099.A-0292, 0101.A-0506	MACS	0.55	7	17	
RXJ1347	13:47:30.617	-11:45:09.51	0.451	095.A-0525, 097.A-0909	MACS, CLASH	0.551	2-3	72	
SMACS2031	20:31:53.256	-40:37:30.79	0.331	60.A-9100	MACS	0.79	10	20	
SMACS2131	21:31:04.831	-40:19:20.92	0.442	0101.A-0506, 0102.A-0135	MACS	0.59	7	16	
Total:								107-128	600

Bảng 2.1

3 Tính toán Hàm độ trưng của các nguồn phát xạ Lyman alpha

Chương 3 mô tả quy trình tính toán đại lượng V_{\max} đặc trưng cho thể tích khảo sát mà từng nguồn riêng lẻ có thể được tìm kiếm. Phương pháp này lần đầu tiên được giới thiệu bởi [10]. Nghiên cứu hiện tại thực hiện trong 18 vùng quan sát khác nhau, do đó giá trị V_{\max} của từng nguồn riêng lẻ phải tính đến trong tất cả các vùng này, bao gồm cả những vùng nguồn không xuất hiện. Việc tính toán giá trị V_{\max} trên mặt phẳng ảnh cho từng nguồn sẽ dẫn đến giá trị thu được vượt xa giá trị thực tế. Do đó, trong luận án này, việc tính toán V_{\max} được thực hiện trên mặt phẳng nguồn, trên khối dữ liệu ba chiều của từng nguồn.

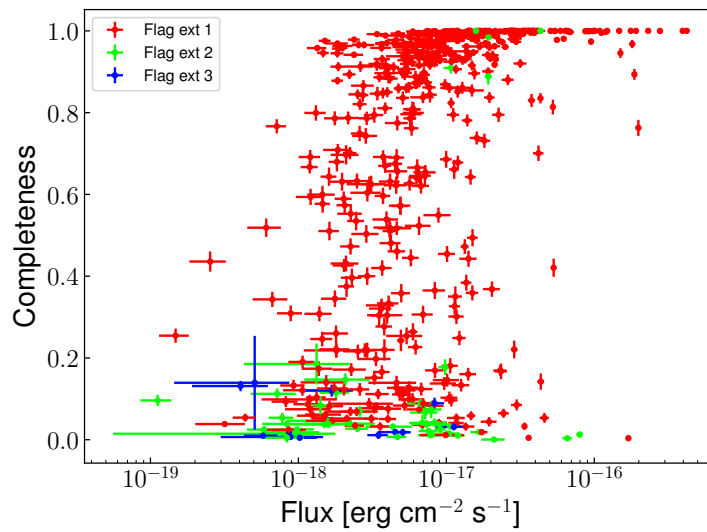


Hình 3.1: Phân bố của nguồn có dịch chuyển đỏ trong khoảng $2.9 \leq z \leq 6.7$ trong mỗi khoảng độ trưng có độ rộng 0.25 theo thang logarit. Đường màu xanh hiển thị số lượng nguồn trước khi tính đến hệ số hoàn chỉnh (completeness). Đường màu cam hiển thị phân bố số lượng nguồn khi việc hiệu chỉnh được tính đến.

Quy trình này được phát triển trước đó bởi [7] khi nghiên cứu hàm độ trưng của 128 nguồn phát xạ Lyman alpha phía sau bốn cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn. Do đó, ở chương này chúng tôi tóm tắt những bước chính và trình bày một số cải tiến mới trong quy trình tính toán, so sánh thể tích khảo sát thu được từ nghiên cứu này với những kết quả nghiên cứu trước đó. Kết quả nghiên cứu hiện tại đã chỉ ra tổng thể tích khảo sát đã hiệu chỉnh cho quá trình giãn nở Vũ trụ khoảng $50\,000 \text{ Mpc}^3$, nhiều hơn gấp 3 lần so với [7]. Tuy nhiên, giá trị thể tích này nhỏ hơn đáng kể so với các nghiên cứu được thực hiện trong trường trống, do nghiên cứu hiện tại chịu sự ràng buộc về giá trị độ khuếch đại gây ra bởi thấu kính hấp dẫn.

Cụm thiên hà	Tổng thể tích khảo sát [Mpc ³]
A2390	735
A2667	885
A2744	10500
A370	5350
AS1063	1970
BULLET	895
MACS0257	730
MACS0329	1225
MAC0416N	3420
MACS0416S	1670
MACS0451	1210
MACS0520	765
MACS0940	5760
MACS1206	2980
MACS2214	1100
RXJ1347	7920
SMACS2031	1675
SMACS2131	920
Total	49710

Bảng 3.1: Thể tích khảo sát của 17 cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn trong khoảng dịch chuyển đỏ $2.9 \leq z \leq 6.7$.



Hình 3.2: Hệ số hoàn chỉnh so với thông lượng thu được của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha trong công việc hiện tại. Các màu sắc khác nhau hiển thị chất lượng quá trình trích xuất nguồn từ Source Extractor.

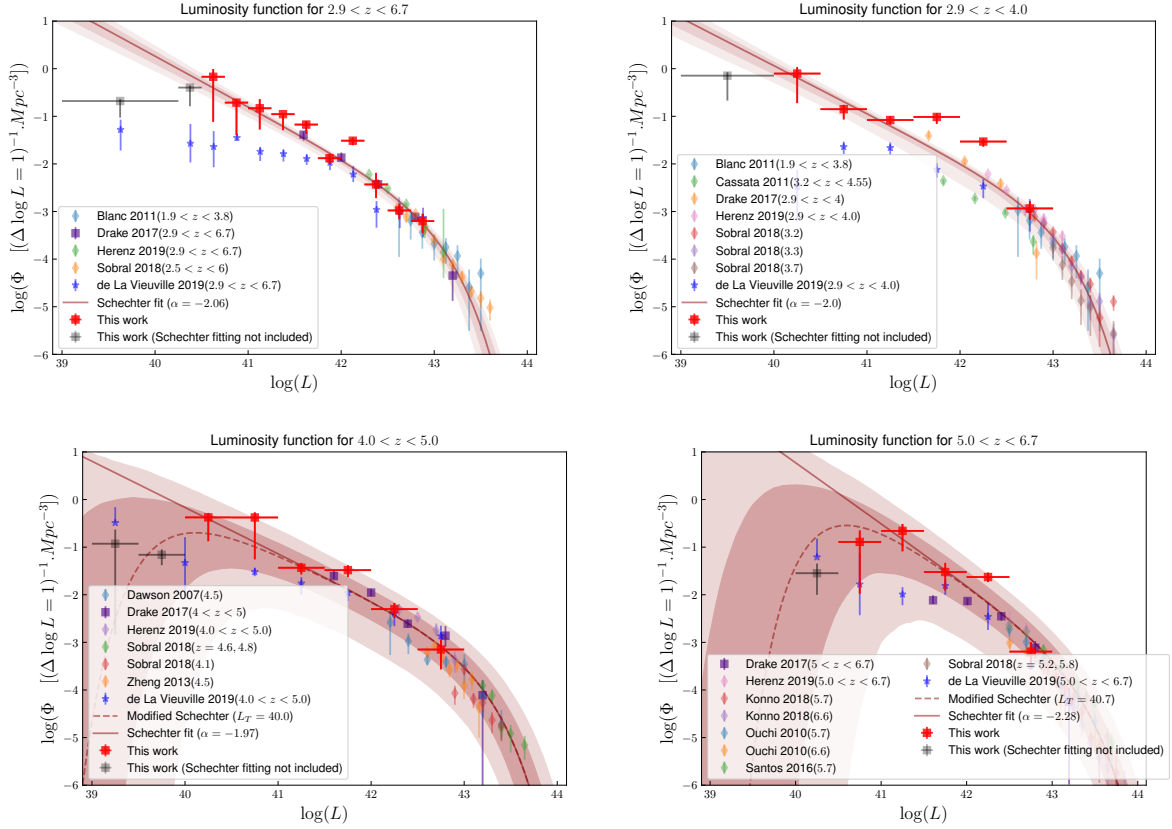
4 Tiến triển của Hàm độ trưng theo giá trị dịch chuyển đỏ

Chương 4 của luận án trình bày những kết quả chính nghiên cứu hàm độ trưng của 600 nguồn phát xạ vạch Lyman alpha trong bốn khoảng dịch chuyển đỏ. Theo định nghĩa, hàm độ trưng là đại lượng mô tả số lượng thiên hà ứng với một đơn vị độ trưng và một đơn vị thể tích khảo sát khi đã tính đến sự giãn nở Vũ trụ. Tuy nhiên, không phải tất cả các nguồn trong mẫu đều có xác suất được phát hiện 100%, do đó cần phải hiệu chỉnh cho xác suất thực sự tìm thấy nguồn trong khối dữ liệu (completeness). Quy trình này được thực hiện cho từng nguồn bằng cách sử dụng phân bố độ sáng của thiên hà trong mặt phẳng ảnh và gieo nó một cách ngẫu nhiên vào các vị trí khác nhau trong không gian. Nguồn được coi là được phát hiện thành công khi độ lệch tối đa giữa vị trí thêm vào ngẫu nhiên và vị trí được phát hiện là 0.8 giây cung. Hệ số hoàn chỉnh được tính bởi tỷ lệ giữa số lần phát hiện nguồn thành công, với các điều kiện tương tự như đối với nguồn ban đầu, trên tổng số lần thử. Về điểm này, luận án có một số khác biệt so với [7] liên quan tới việc chọn ngưỡng cắt của hệ số hoàn chỉnh cũng như ảnh hưởng của việc chọn nguồn.

- Chúng tôi chỉ ra kích thước của ảnh (chứa nguồn) ảnh hưởng tới hệ số hoàn chỉnh. Kích thước ảnh phải đủ lớn để đặc trưng cho nhiều trên toàn bộ kênh (channel) mà ở đó phát xạ vạch Lyman alpha của nguồn đạt cực đại. Do đó, để tính toán hệ số hoàn chỉnh cho khả năng tìm thấy nguồn, chúng tôi đã tăng kích thước ảnh gấp 2.5 lần so với công việc của [7] (từ 30" × 30" lên 80" × 80").

- Với mục tiêu tận dụng tối đa số lượng nguồn trong mẫu ban đầu cho quá trình tính toán hàm độ trưng và nghiên cứu sự tiến triển ngay sau đó, chúng tôi loại bỏ những nguồn có giá trị hệ số hoàn chỉnh nhỏ hơn 1%, trong khi nghiên cứu của [7] đã loại bỏ những nguồn có giá trị hoàn chỉnh nhỏ hơn 10%. Việc sử dụng ngưỡng cắt 1% cho hệ số hoàn chỉnh là một cách tiếp cận hoàn toàn hợp lý vì giá trị dịch chuyển đỏ của các nguồn được xác định với độ tin cậy cao và vị trí của ảnh đã được xác nhận bởi mô hình thấu kính hấp dẫn.

- Độ sáng đo được, độ dịch chuyển đỏ, tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu và giá trị hoàn chỉnh của từng nguồn riêng lẻ được trình bày ở Hình 2.5. Hình 3.1 chỉ ra số lượng nguồn trước và sau khi tính đến hệ số hoàn chỉnh. Hầu hết số lượng nguồn có độ trưng yếu đều có hệ số hoàn chỉnh rất nhỏ. Do đó, khi tính đến việc hiệu chỉnh tham số này, số lượng nguồn trong các khoảng độ trưng này tăng lên đáng kể. Ở khoảng $42.25 \leq \log L[\text{erg/s}] \leq 42.5$ (Hình 3.1) có gia tăng đáng kể số lượng nguồn sau khi tính tới hệ số điều chỉnh. Sự gia tăng này là do sự xuất hiện của nguồn có giá trị hoàn chỉnh thấp.



Hình 4.1: Từ trên xuống dưới, từ trái sang phải, Kết quả nghiên cứu sự tiến triển của hàm độ trưng theo dịch chuyển đỏ $2.9 \leq z \leq 6.7$, $2.9 \leq z \leq 4.0$, $4.0 \leq z \leq 5.0$ và $5.0 \leq z \leq 6.7$. Các dấu thập màu đỏ là kết quả của công việc nghiên cứu hiện tại, các dấu màu khác thu được từ những nghiên cứu trước đây. Đường nét liền màu nâu đỏ hiển thị giá trị khớp hàm Schechter của công việc hiện tại. Phần dấu thập màu xám không được tính đến trong quá trình khớp hàm. Phần màu xanh là kết quả nghiên cứu từ [7] được sử dụng nhằm mục đích so sánh. Đường nét đứt màu nâu đỏ là hàm đưa vào gợi ý cho hình thái “quay đầu” của hàm độ trưng.

Giá trị hàm độ trưng trong một khoảng độ trưng và dịch chuyển đỏ cho trước được tính bởi phương trình:

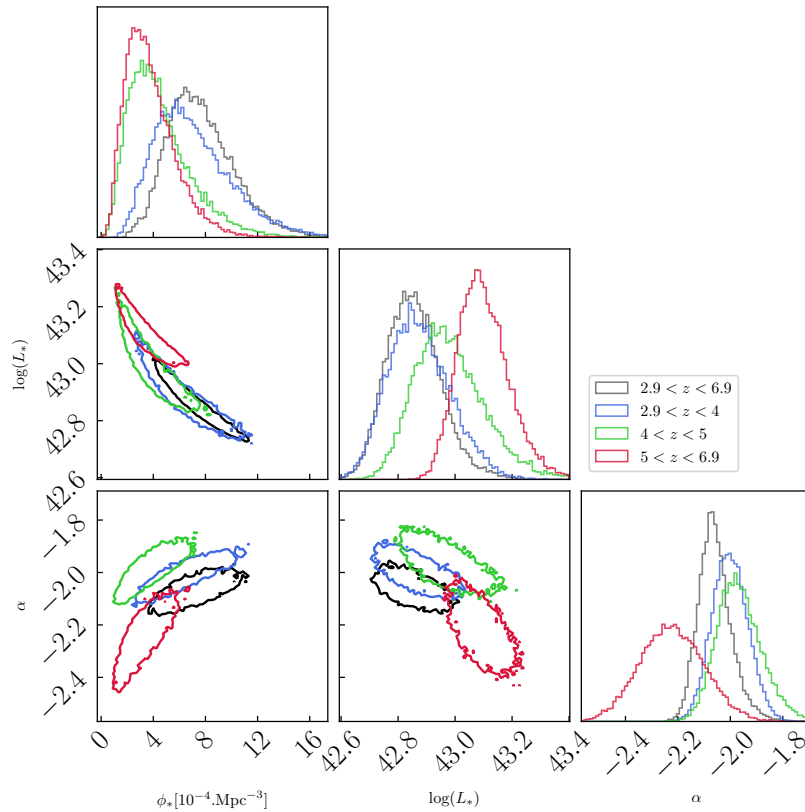
$$\Phi(L_i) = \frac{1}{\Delta \log L_i} \sum_j \frac{1}{C_j V_{\max, j}} \quad (4.1)$$

trong đó, C_j, V_j là hệ số hoàn chỉnh và thể tích khảo sát của nguồn thứ j , $\Delta \log L_i$ là độ rộng của độ trưng ở bin i . Các điểm LF thu được từ mẫu đang khảo sát được khớp hàm Schechter dạng:

$$\Phi(\log L) d(\log L) = \left(\frac{L}{\log e} \right) \left(\frac{\Phi^*}{L^*} \right) \left(\frac{L}{L^*} \right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L^*}\right) d(\log L) \quad (4.2)$$

trong đó α là giá trị độ dốc của hàm Schechter về phía độ trưng mờ, L^* là giá trị đặc trưng của hàm Schechter khi chuyển từ hàm exponential (phía có độ trưng lớn) sang hàm mũ (phía có độ trưng nhỏ), Φ^* là hệ số chuẩn hóa. Sự tiến triển này được nghiên cứu trong bốn khoảng dịch chuyển đỏ $2.9 \leq z \leq 6.7$, $2.9 \leq z \leq 4.0$, $4.0 \leq z \leq 5.0$ và $5.0 \leq z \leq 6.7$. Việc sử dụng dữ liệu từ cụm thấu kính hấp dẫn đã cho thấy hiệu quả trong nghiên cứu hàm độ trưng ở phía

có độ trưng mờ, tuy nhiên dữ liệu này lại kém hiệu quả khi nghiên cứu ở vùng lân cận hoặc cao hơn giá trị L^* . Để giải quyết vấn đề này, chúng tôi lấy trung bình các kết quả nghiên cứu trước đó về hàm độ trưng trong cùng khoảng dịch chuyển đỏ, trong cùng khoảng độ trưng. Chúng tôi sử dụng chúng để ràng buộc ở phía độ trưng lớn. Hình 4.1 hiển thị kết quả khớp hàm Schechter nói trên, những dấu chấm thập màu xám không tham gia vào quá trình khớp hàm.



Hình 4.2: Mối liên hệ của ba tham số trong hàm Schechter ở bốn khoảng dịch chuyển đỏ. Đường đồng mức hiển thị mức độ tin cậy 68% trong quá trình khớp hàm.

Kết quả tốt nhất khi khớp hàm Schechter được trình bày ở Bảng 4.1, độ dốc của hàm Schechter cho thấy một sự tiến triển nhỏ theo giá trị dịch chuyển đỏ nhưng sai số vẫn lớn để có thể khẳng định chắc chắn. Giá trị khớp hàm L^* và Φ^* trong phạm vi sai số phù hợp với các kết quả nghiên cứu trước đó. Ở Hình 4.1, các dấu chấm thập màu xám không được sử dụng cho quá trình khớp hàm Schechter do đa số các nguồn trong khoảng độ trưng này có độ khuếch đại lớn, giá trị hệ số hoàn chỉnh nhỏ. Hình 4.2 hiển thị mối tương quan của ba tham số tự do của hàm Schechter khi khớp hàm với độ tin cậy 68%. Giá trị hàm độ trưng trong mỗi khoảng dịch chuyển đỏ và độ trưng nhất định được trình bày tại Bảng 4.2.

Đáng chú ý, hàm độ trưng ở những khoảng dịch chuyển đỏ lớn $4.0 \leq z \leq 5.0$ và $5.0 \leq z \leq 6.7$ cho thấy sự sụt giảm mật độ thiên hà ở vùng có độ trưng thấp, gợi ý sự quay đầu của hàm độ trưng. Điều này đã được thảo luận trong các nghiên cứu trước đó về hàm độ trưng UV ([11], [12]). Để tính tới sự thay đổi này của hàm độ trưng, chúng tôi đã sửa đổi hàm Schechter bằng cách thêm một phần hàm mũ mô tả sự "quay đầu" dạng:

Bảng 4.1: Giá trị khớp hàm tốt nhất cho hàm Schechter ở bốn khoảng dịch chuyển đỏ.

Redshift	Φ_* [10^{-4}Mpc^{-3}]	$\log L_*$ [erg/s]	α
$2.9 \leq z \leq 6.7$	$7.41_{-2.20}^{2.70}$	$42.85_{-0.10}^{0.10}$	$-2.06_{-0.05}^{0.07}$
$2.9 \leq z \leq 4.0$	$6.56_{-2.40}^{3.20}$	$42.87_{-0.1}^{0.11}$	$-2.00_{-0.07}^{0.07}$
$4.0 \leq z \leq 5.0$	$4.06_{-1.70}^{2.70}$	$42.97_{-0.11}^{0.13}$	$-1.97_{-0.08}^{0.09}$
$5.0 \leq z \leq 6.7$	$3.49_{-1.50}^{2.11}$	$43.09_{-0.08}^{0.10}$	$-2.28_{-0.12}^{0.12}$

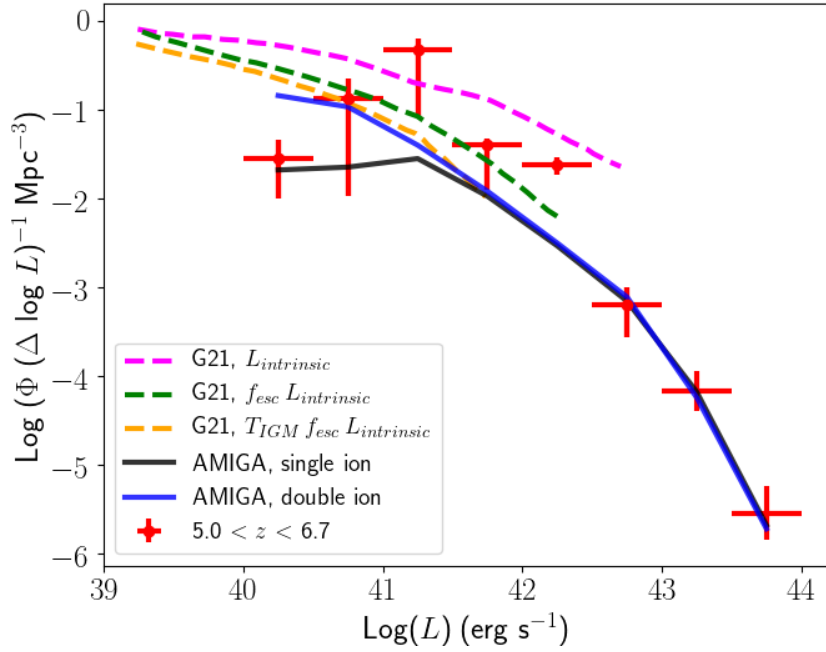
$$\Phi(L)\exp(-L_T/L)^m = \frac{\Phi_*}{L_*} \left(\frac{L}{L_*}\right)^\alpha \exp(-L/L_*)\exp(-L_T/L)^m \quad (4.3)$$

Trong đó L_T là giá trị mà tại đó $d\phi/dL = 0$, hay nói một cách khác đây là giá trị mà tại đó hàm Schechter bắt đầu chuyển hướng, m là chỉ số hiển thị xu hướng của hàm, $m \geq 0$ hàm có xu hướng đi xuống, $m \leq 0$ hàm có xu hướng đi lên. Hình dáng của hàm được hiển thị ở Hình 4.1 (dưới). Kết quả cho thấy giá trị của $m = 1$ và L_T bằng 10^{40} và $10^{40.7}$ erg/s tương ứng với hai khoảng dịch chuyển đỏ $4.0 \leq z \leq 5.0$ và với $5.0 \leq z \leq 6.7$. Các quan sát dựa trên hiện tượng thấu kính hấp dẫn để nghiên cứu sự tiến triển của hàm độ trưng theo giá trị dịch chuyển đỏ cho phép chúng ta khảo sát ở những vùng có độ trưng thấp hơn so với các quan sát được thực hiện trong trường trống.

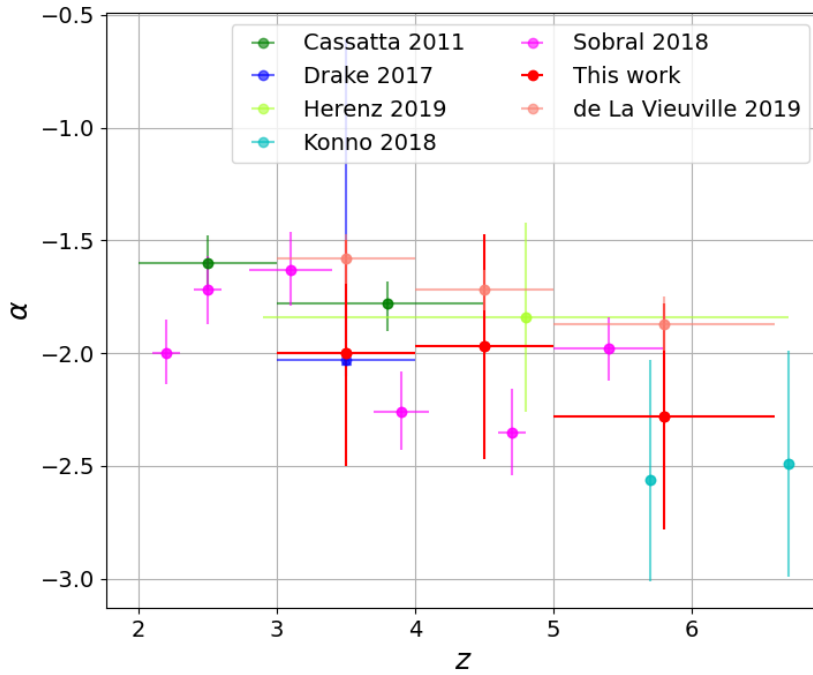
Gần đây có hai nhóm nghiên cứu lí thuyết dự đoán sự tiến triển của hàm độ trưng ở dịch chuyển đỏ $z \sim 6$ là [13] và [14]. Do đó việc so sánh kết quả nghiên cứu từ luận án với những mô hình hiện có là cần thiết. Mô hình thứ nhất được xây dựng bởi nhóm tác giả [13] khi áp dụng mô hình phát xạ SPHINX mô tả ảnh hưởng động lực học của quá trình truyền phát xạ từ môi trường liên sao ra môi trường giữa các thiên hà. Mô hình thứ hai được phát triển bởi nhóm tác giả [14] sử dụng mô hình AMIGA với các giả sử về quá trình tái ion hóa đơn và tái ion hóa kép. Theo đó, quá trình tái ion hóa đơn xảy ra ở dịch chuyển đỏ $z \sim 6$, trong khi quá trình tái ion kép sẽ xảy ra một lần nữa ở dịch chuyển đỏ $z \sim 10$ sau khi có một quá trình tái kết hợp. Kết quả so sánh được hiển thị trên Hình 4.3. Ở khoảng độ trưng $\log L$ [erg/s] = 41-42, các mô phỏng về quá trình tái ion hóa kép từ mô hình AMIGA hoàn toàn phù hợp với mô hình SPHINX sau khi hiệu chỉnh ảnh hưởng của môi trường liên thiên hà, cũng như phù hợp với kết quả nghiên cứu hiện tại của luận án. Tuy nhiên, ở vùng độ trưng mờ, các giá trị của hàm độ trưng dần khác biệt so với hai mô hình đã nêu. Sai số của phép đo còn lớn, do đó cần nhiều dữ liệu thực nghiệm hơn để giải thích cho vấn đề này.

Bảng 4.2: Các giá trị hàm độ trung trong từng khoảng dịch chuyển đỏ và khoảng độ trung được sử dụng cho quá trình khớp hàm Schechter.

$\log(L)$ [erg/s]	$\log(\phi)(\Delta(\log(L))=1)^{-1}$ [Mpc ⁻³]	N	N_{corr}	V_{max} [Mpc ³]
$2.9 \leq z \leq 6.7$				
$39.00 \leq 39.63 \leq 40.25$	$-0.68^{0.04}_{-0.35}$	22.4	706.0	11827
$40.25 \leq 40.38 \leq 40.50$	$-0.40^{0.04}_{-0.39}$	17.6	645.4	15074
$40.50 \leq 40.63 \leq 40.75$	$-0.17^{0.16}_{-0.95}$	22.8	429.3	28457
$40.75 \leq 40.88 \leq 41.00$	$-0.71^{0.06}_{-0.68}$	45.2	301.5	31613
$41.00 \leq 41.13 \leq 41.25$	$-0.83^{0.19}_{-0.45}$	68.9	415.7	37344
$41.25 \leq 41.38 \leq 41.50$	$-0.96^{0.03}_{-0.33}$	105.0	547.9	41321
$41.50 \leq 41.63 \leq 41.75$	$-1.17^{0.07}_{-0.19}$	96.4	305.5	42227
$41.75 \leq 41.88 \leq 42.00$	$-1.88^{0.09}_{-0.11}$	76.4	105.1	46139
$42.00 \leq 42.13 \leq 42.25$	$-1.51^{0.07}_{-0.09}$	70.4	202.5	45795
$42.25 \leq 42.38 \leq 42.50$	$-2.43^{0.24}_{-0.29}$	27.5	33.5	47554
$42.50 \leq 42.63 \leq 42.75$	$-2.98^{0.13}_{-0.19}$	12.9	13.0	49295
$42.75 \leq 42.88 \leq 43.00$	$-3.20^{0.15}_{-0.25}$	7.7	7.8	49258
$2.9 \leq z \leq 4.0$				
$39.00 \leq 39.63 \leq 40.00$	$-0.15^{0.07}_{-0.52}$	6.64	415.33	1712
$40.00 \leq 40.25 \leq 40.50$	$-0.10^{0.13}_{-0.62}$	14.19	920.22	6114
$40.50 \leq 40.75 \leq 41.00$	$-0.85^{0.09}_{-0.22}$	34.0	396.17	11397
$41.00 \leq 41.25 \leq 41.50$	$-1.08^{0.07}_{-0.10}$	83.7	473.6	14529
$41.50 \leq 41.75 \leq 42.00$	$-1.01^{0.08}_{-0.14}$	69.5	148.0	15914
$42.00 \leq 42.25 \leq 42.50$	$-1.53^{0.06}_{-0.11}$	35.6	101.55	16327
$42.50 \leq 42.75 \leq 43.00$	$-2.93^{0.15}_{-0.23}$	10.0	10.0	17320
$4.0 \leq z \leq 5.0$				
$39.00 \leq 39.25 \leq 39.50$	$-0.93^{0.30}_{-1.91}$	1.0	38.0	730
$39.50 \leq 40.00 \leq 40.0$	$-1.16^{0.11}_{-0.22}$	2.4	48.3	4904
$40.0 \leq 40.25 \leq 40.5$	$-0.38^{0.09}_{-0.50}$	7.4	311.4	3159
$40.5 \leq 40.75 \leq 41.00$	$-0.38^{0.11}_{-0.88}$	19.6	205.1	7662
$41.00 \leq 41.25 \leq 41.50$	$-1.43^{0.10}_{-0.14}$	51.4	161.2	11044
$41.50 \leq 41.75 \leq 42.00$	$-1.48^{0.1}_{-0.15}$	55.0	148.5	12164
$42.00 \leq 42.25 \leq 42.50$	$-2.30^{0.13}_{-0.18}$	30.0	32.2	13182
$42.50 \leq 42.75 \leq 43.00$	$-3.15^{0.20}_{-0.42}$	4.7	4.8	13433
$5.0 \leq z \leq 6.7$				
$40.00 \leq 40.25 \leq 40.50$	$-1.55^{0.20}_{-0.45}$	6.0	23.8	4725
$40.50 \leq 40.75 \leq 41.00$	$-0.89^{0.24}_{-1.08}$	14.3	116.5	11105
$41.00 \leq 41.25 \leq 41.50$	$-0.66^{0.15}_{-0.43}$	38.9	705.5	13545
$41.50 \leq 41.75 \leq 42.00$	$-1.52^{0.19}_{-0.39}$	48.2	122.9	16190
$42.00 \leq 42.25 \leq 42.50$	$-1.63^{0.09}_{-0.11}$	32.3	105.2	16705
$42.50 \leq 42.75 \leq 43.00$	$-3.19^{0.2}_{-0.37}$	5.9	5.9	18542



Hình 4.3: So sánh giá trị hàm độ trưng trong khoảng dịch chuyển đỏ $5.0 \leq z \leq 6.7$. Hai điểm chữ thập màu đỏ nằm trong vùng có độ trưng lớn nhất là giá trị lấy trung bình từ các kết quả trước đó. Đường nét liền màu xanh và màu đen là kết quả từ mô hình AMIGA ứng với quá trình ion hóa đơn và ion hóa kép ([14]). Đường nét đứt hiển thị kết quả từ mô phỏng SPHINX ([13]) khi tính đến giá trị nội tại của hàm độ trưng (đường màu tím), hiệu chỉnh bởi bụi (đường màu xanh), hiệu chỉnh bởi môi trường giữa các thiên hà (đường màu vàng).



Hình 4.4: Tiến triển giá trị độ dốc hàm Schechter theo dịch chuyển đỏ. Đường sai số theo trục hoành hiển thị khoảng dịch chuyển đỏ trong các khảo sát tương ứng.

Nghiên cứu trước đó thực hiện bởi [7], đã loại bỏ các nguồn có giá trị hoàn chỉnh nhỏ

hơn 10% trong quá trình tính toán hàm độ trưng. Trong luận án, chúng tôi thảo luận về ảnh hưởng của lựa chọn giá trị hoàn chỉnh đối với kết quả nghiên cứu hàm độ trưng. Cuối cùng, dù loại bỏ các nguồn có giá trị hoàn chỉnh 1% hay 10% , sự suy giảm mật độ thiên hà vẫn được quan sát lân cận giá trị $\log L[\text{erg/s}] \sim 41$.

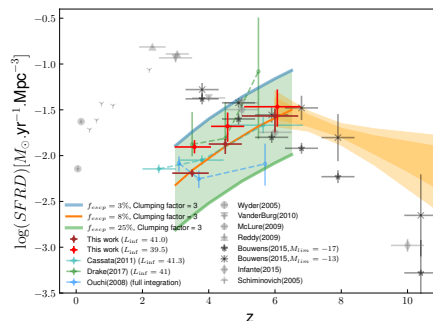
Luận án cũng trình bày ảnh hưởng của phương pháp chọn nguồn đối với kết quả nghiên cứu của hàm độ trưng theo dịch chuyển đỏ. Cần lưu ý rằng, trong nghiên cứu hiện tại chúng tôi chỉ sử dụng những nguồn với độ tin cậy $zconf = 2,3$ trong quá trình xác định và đánh giá độ dịch chuyển đỏ. Chúng tôi loại bỏ những nguồn được đánh giá $zconf = 1$ bởi tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu thấp, hình dáng của phổ phát xạ và các vạch đi kèm không thực sự rõ ràng để nhận biết. Do đó, chúng tôi tiến hành hai phép thử (thêm 50% và thêm 100%) số lượng nguồn $zconf = 1$ để kiểm tra ảnh hưởng của chúng vào mẫu hiện tại. Kết quả cho thấy các nguồn $zconf = 1$ không ảnh hưởng đáng kể tới hình dạng của hàm độ trưng. Bên cạnh hiệu ứng lựa chọn nguồn $zconf = 1$, chúng tôi cũng thảo luận một số nhân tố khác ảnh hưởng tới độ dốc α , bao gồm việc lựa chọn các ngưỡng cắt khác nhau với hệ số hoàn chỉnh, việc xác định thông lượng đo đặc của nguồn LAEs dựa theo hai phương pháp khác nhau, việc lựa chọn mô hình khác nhau để khớp hàm. Các kết quả này được trình bày trong Bảng 4.3 và được dùng để ước tính sai số hệ thống liên quan tới độ dốc α ở vùng độ trưng mờ.

Bảng 4.3: Kết quả độ dốc hàm Schechter với các phép thử khác nhau

	z_{35}	z_{45}	z_{60}	z_{all}
Schechter fitting				
Hiệu chỉnh 1%	-2.00 ± 0.07	-1.97 ± 0.09	-2.28 ± 0.12	-2.06 ± 0.07
Hiệu chỉnh 10%	-1.78 ± 0.06	-1.83 ± 0.12	-1.75 ± 0.10	-1.46 ± 0.05
Hiệu chỉnh 1% sử dụng giá trị độ sáng đo được từ Source Extractor	-2.10 ± 0.06	-1.97 ± 0.08	-2.24 ± 0.11	-1.82 ± 0.03
Hiệu chỉnh 1% và thêm vào tất cả các nguồn $z_{conf}=1$	-1.83 ± 0.17	-1.92 ± 0.09	-1.94 ± 0.10	-2.29 ± 0.09
Linear fit				
Hiệu chỉnh 1%	-1.76 ± 0.27	-1.99 ± 0.17	-1.96 ± 0.54	-2.12 ± 0.16
Hiệu chỉnh 10%	-1.55 ± 0.17	-1.63 ± 0.21	-1.66 ± 0.24	-1.64 ± 0.12
Giá trị độ dốc cuối cùng	-2.00 ± 0.50	-1.97 ± 0.50	-2.28 ± 0.50	-2.06 ± 0.60

5 Tiến triển của tốc độ hình thành sao theo hàm của dịch chuyển đỏ và đánh giá đóng góp của thiên hà hình thành sao vào quá trình tái ion hóa Vũ trụ

Ở chương 5 của luận án, dựa trên các kết quả nghiên cứu đạt được về hàm độ trung, chúng tôi lấy tích phân của hàm độ trung theo L để nghiên cứu mật độ độ trung và chuyển đổi đại lượng này sang mật độ hình thành sao theo hàm của dịch chuyển đỏ. Hình dáng hàm độ trung ở phía có độ trung lớn hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu trước đó và không bị ảnh hưởng bởi các yếu tố về hệ số hoàn chỉnh cũng như hiệu ứng chọn nguồn. Do đó, cận trên của tích phân đường không gây ra bất cứ ảnh hưởng nghiêm trọng nào đến kết quả về mật độ độ trung và mật độ hình thành sao. Tuy nhiên, trong những khoảng độ trung mờ, hình dáng hàm độ trung bị ảnh hưởng nhiều bởi các yếu tố chọn lựa và giới hạn tìm kiếm các nguồn, do đó giới hạn dưới của tích phân cần được thảo luận và tính toán cẩn thận.



Hình 5.1: Tiến triển mật độ hình thành sao theo dịch chuyển đỏ. Dấu thập màu đỏ ứng với giới hạn dưới $\log L[\text{erg/s}] = 39.5$, dấu thập đỏ nâu ứng với giới hạn dưới $\log L[\text{erg/s}] = 41.0$ trong quá trình lấy tích phân đường của hàm độ trung. Đường nét liền màu xanh nước biển, vàng, xanh lá cây ứng với giới hạn mật độ hình thành sao thu được khi giả sử tỉ lệ thoát của các photon ion hóa lần lượt là 3%, 8% và 25%, hệ số cụm (clump) bằng 3 áp dụng cho tất cả các giả thuyết.

Trong phần này, chúng tôi lựa chọn hai cận dưới của tích phân, $\log L[\text{erg/s}] = 39.5$ nhằm mục đích bao phủ toàn bộ khoảng độ trung của dữ liệu hiện tại, và $\log L[\text{erg/s}] = 41$ nhằm đảm bảo độ tin cậy cao của các nguồn được dùng cho xây dựng hàm độ trung. Dựa trên những giả thuyết về mật độ photon ion hóa tối thiểu đủ để ion hoá Vũ trụ sơ khai luận án ước tính tỉ lệ thoát photon ion hóa trung bình trong các thiên hà $\sim 8\%$ và số lượng cụm phổ biến (clumpy) bằng 3.

6 Thảo luận và kế hoạch

Luận án trình bày một nghiên cứu mới về đóng góp của các thiên hà hình thành sao đối với quá trình tái ion hóa Vũ trụ thông qua nghiên cứu tiến triển hàm độ trưng của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha ở dịch chuyển đỏ $z = 2.9 - 6.7$ đằng sau 17 cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn quan sát bởi máy quang phổ đa đối tượng MUSE đặt tại Đài Thiên văn Nam Âu.

Dữ liệu nghiên cứu của luận án là ảnh của 600 nguồn phát xạ vạch Lyman alpha, có độ trưng trong khoảng $39.0 \leq \log L [\text{erg/s}] \leq 44.0$. So sánh với bộ dữ liệu trước đây của [7], dữ liệu này khẳng định tính đa dạng về số lượng mẫu (nhiều hơn bốn lần), đồng thời chứa nhiều thông tin hơn về các nguồn có độ trưng mờ ($\log L [\text{erg/s}] \leq 41.0$) - hạn chế lớn nhất của các quan sát hiện tại. Để nghiên cứu đóng góp của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha quan sát được nhờ hiện tượng thấu kính hấp dẫn nhờ vào hệ máy quang phổ đa đối tượng MUSE/VLT, nghiên cứu sinh sử dụng phương pháp V_{max} như trong nghiên cứu của [7] với một số cải tiến về quy trình tính toán và ảnh hưởng của các thông số. Kết quả chính của luận án được liệt kê và thảo luận như sau:

- + Liên quan đến thuật toán, nghiên cứu sinh đã tính toán đến ảnh hưởng của độ khuếch đại đối với thể tích quan sát của từng nguồn riêng lẻ. Đặc biệt đối với các nguồn có độ khuếch đại lớn, mối liên hệ này có thể được thể hiện thông qua một hàm số mũ. Trong trường hợp ngược lại, khi nguồn có độ khuếch đại nhỏ, một hàm tuyến tính biểu thị cho mối tương quan được chỉ ra.

- + Tiến triển của hàm độ trưng theo dịch chuyển đỏ được trình bày trong bốn khoảng $2.9 \leq z \leq 4.0$, $4.0 \leq z \leq 5.0$ và $5.0 \leq z \leq 6.7$. Tổng thể tích khảo sát cỡ 50 000 Mpc^3 , lớn gấp 3 lần so với kết quả của [7], nhưng lại nhỏ hơn kết quả của các nghiên cứu sử dụng dữ liệu quan sát trong trường trống. Sự khác biệt này được giải thích do những ràng buộc về độ khuếch đại làm cho thể tích khảo sát với thiên hà thấu kính hấp dẫn giảm đi đáng kể. Các nguồn quan sát được đằng sau cụm thiên hà A2744 đóng góp đáng kể cho tổng thể tích khảo sát trong nghiên cứu này.

- + Các giá trị khớp hàm của hàm Schechter trong khoảng dịch chuyển đỏ $2.9 \leq z \leq 6.7$ lần lượt là $\alpha = -2.06_{-0.05}^{+0.07}$, $\Phi * [10^{-4} \text{Mpc}^{-3}] = 7.41_{-2.20}^{+2.70}$, $\log L [\text{erg/s}] = 42.85_{-0.10}^{+0.10}$.

- + Các giá trị của hàm độ trưng LF khi $\log L [\text{erg/s}] \geq 42$ ở phần độ trưng lớn hoàn toàn phù hợp với các nghiên cứu trước đây quan sát trong trường trống của MUSE cũng như nhiều cách quan sát khác.

- + Ở vùng độ trưng mờ, đóng góp của các nguồn mờ, có độ khuếch đại lớn được xác định. Giá trị độ dốc thu được khi khớp hàm tuyến tính và khớp hàm Schechter đạt được sự

thống nhất trong phạm vi sai số. Kết quả nghiên cứu này hoàn toàn phù hợp với nghiên cứu trước đây của [15] trong bốn khoảng dịch chuyển đỏ, phù hợp với kết quả nghiên cứu của [16] ở khoảng dịch chuyển đỏ $2.9 \leq z \leq 6.7$, độ dốc của hàm Schechter lớn hơn khoảng 20% so với giá trị tìm thấy của [7]. Tính toán sai số của phép đo khi kể đến ảnh hưởng của quá trình đo thông lượng nguồn, ngưỡng cắt khác nhau của giá trị hiệu chỉnh completeness, ảnh hưởng của phép lựa chọn nguồn, giá trị độ dốc của hàm Schechter trong bốn khoảng dịch chuyển đỏ lần lượt là -2.00 ± 0.50 , -1.97 ± 0.50 , -2.28 ± 0.50 và -2.06 ± 0.60 . Những kết quả này hoàn toàn phù hợp trong phạm vi sai số $1 - \sigma$ so với các nghiên cứu trước đây.

+ So sánh trực tiếp với kết quả nghiên cứu của [7], giá trị độ dốc của hàm Schechter tiến triển theo hàm của dịch chuyển đỏ, tuy nhiên sai số trong công việc hiện tại vẫn còn lớn. Hình thái quay đầu "turn-over" của hàm Schechter ở những khoảng dịch chuyển đỏ $4.0 \leq z \leq 5.0$ và $5.0 \leq z \leq 6.7$ khi độ trưng $\log L [\text{erg/s}] \leq 41$ được tìm thấy trong kết quả nghiên cứu của luận án. Sự suy giảm mật độ thiên hà trong vùng này được giải thích do hiệu suất hình thành sao thấp trong các quần thể vật chất tối có khối lượng nhỏ hơn 10^9 khối lượng Mặt Trời ([17, 18]).

+ Kết quả nghiên cứu tiến triển hàm độ trưng theo hàm của dịch chuyển đỏ được sử dụng để tính toán đóng góp của các thiên hà hình thành sao đối với quá trình tái ion hóa Vũ trụ. Điều này một lần nữa khẳng định vai trò quan trọng của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha đối với quá trình tái ion hóa Vũ trụ.

+ Đóng góp của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha là đáng kể nhằm duy trì trạng thái ion hóa của nguyên tử Hydro trong Vũ trụ. Ở dịch chuyển đỏ $z \sim 6$, đóng góp của chúng tương đương đối với các nguồn LBGs.

Như trình bày ở trên, sai số của phép đo còn khá lớn khi tính toán đóng góp của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha đối với quá trình tái ion hóa của Vũ trụ. Sử dụng dữ liệu quan sát từ nhiều hệ kính ở các vùng bước sóng khác nhau là cơ sở để củng cố thêm cho kết quả nghiên cứu của luận án.

NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

1. Với 600 nguồn phát xạ vạch Lyman alpha có khoảng dịch chuyển đỏ $2.9 < z < 6.7$, đây là bộ dữ liệu lớn nhất về các thiên hà phát xạ Lyman alpha quan sát được nhờ hiệu ứng thấu kính hấp dẫn sử dụng máy quang phổ đa đối tượng MUSE đặt trên Kính VLT (Very Large Telescope) tại Đài Thiên văn Nam Âu. Các nguồn phát xạ Lyman alpha trong tập mẫu này không bị ảnh hưởng bởi bất kì chọn lọc trắc quang nào trước đó (thường ưu tiên các nguồn phát xạ liên tục mạnh). Tập mẫu này có độ trưng trải dài trong khoảng từ 10^{39} tới 10^{43} erg/s, giúp ràng buộc hiệu quả hàm độ trưng của thiên hà vùng mờ nhạt tới 10^{40} erg/s, cũng như sự tiến triển của nó theo hàm của dịch chuyển đỏ. Do đó dữ liệu cũng như kết quả nghiên cứu của luận án là nguồn thông tin tham khảo quan trọng cho nghiên cứu trong lĩnh vực này.

2. Chúng tôi đã phát triển thành công một gói tính toán tự động xác định thể tích Vũ trụ (V_{max}) chiếm bởi từng thiên hà được phát hiện trong khảo sát cho một lượng lớn 17 cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn. Đây là đại lượng quan trọng nhất trong việc xây dựng hàm độ trưng nhằm xác định mật độ thiên hà trong một đơn vị thể tích Vũ trụ, trong một đơn vị độ trưng.

3. Độ dốc lớn của hàm độ trưng Schechter tiếp tục được quan sát ở vùng độ trưng mờ nhạt hơn mười lần so với các khảo sát trường trống trước đó. Xu hướng tăng nhẹ của độ dốc này theo dịch chuyển đỏ cũng tiếp tục được khẳng định.

4. Sai số hệ thống ảnh hưởng tới hàm độ trưng cũng được đánh giá, liên quan tới: hệ số khuếch đại từ mô hình thấu kính hấp dẫn; cách đo đặc thông lượng nguồn; do quá trình lựa chọn ngưỡng cắt để loại bỏ các nguồn mờ nhạt; tính đến các nguồn có độ tin cậy thấp hơn.

5. Kết quả của luận án chỉ ra mật độ tốc độ hình thành sao của loại thiên hà phát xạ vạch Lyman alpha tăng theo hàm của dịch chuyển đỏ. Chúng đóng góp đáng kể vào quá trình tái ion hóa Vũ trụ sơ khai.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. T. T. Thai, P. Tuan-Anh, R. Pello, I. Goovaerts, J. Richard, A. Claeysens, G. Mahler, D. Lagattuta, G. de la Vieuville, E. Salvador-Solé, T. Garel, F. E. Bauer, A. Jeanneau, B. Clément, and J. Matthee. Probing the faint-end luminosity function of Lyman-alpha emitters at $3 \leq z \leq 7$ behind 17 MUSE lensing clusters. AA, 2023, 678, A139.

2. Ilias Goovaerts, Roser Pello, Tran Thi Thai, Pham Tuan-Anh, Johan Richard, Adélaïde Claeysens, Emile Carinos, Geoffroy de la Vieuville, Jorryt Matthee. Evolution of the Lyman- α emitting fraction and UV properties of lensed star-forming galaxies between $2.9 \leq z \leq 6.7$. AA, 2023, 678, A174.

3. T. T. Thai, P. Tuan-Anh, R. Pello, I. Goovaerts. Studying the luminosity function of Lyman alpha emitters selected behind 17 lensing clusters from multi-unit spectroscopic explorer (muse/vlt) observations. Proceeding in 16th OMEG conference.

Bibliography

- [1] R. J. Bouwens et al. “UV Luminosity Functions at Redshifts $z \sim 4$ to $z \sim 10$: 10,000 Galaxies from HST Legacy Fields”. In: 803.1, 34 (Apr. 2015), p. 34. DOI: [10.1088/0004-637X/803/1/34](https://doi.org/10.1088/0004-637X/803/1/34). arXiv: [1403.4295](https://arxiv.org/abs/1403.4295) [[astro-ph.CO](#)] (cit. on p. 2).
- [2] Steven L. Finkelstein et al. “The Evolution of the Galaxy Rest-frame Ultraviolet Luminosity Function over the First Two Billion Years”. In: 810.1, 71 (Sept. 2015), p. 71. DOI: [10.1088/0004-637X/810/1/71](https://doi.org/10.1088/0004-637X/810/1/71). arXiv: [1410.5439](https://arxiv.org/abs/1410.5439) [[astro-ph.GA](#)] (cit. on p. 2).
- [3] Yechi Zhang et al. “First HETDEX Spectroscopic Determinations of Ly α and UV Luminosity Functions at $z = 2$ -3: Bridging a Gap between Faint AGNs and Bright Galaxies”. In: 922.2, 167 (Dec. 2021), p. 167. DOI: [10.3847/1538-4357/ac1e97](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac1e97). arXiv: [2105.11497](https://arxiv.org/abs/2105.11497) [[astro-ph.GA](#)] (cit. on p. 2).
- [4] Masami Ouchi et al. In: 176.2 (June 2008), pp. 301–330. DOI: [10.1086/527673](https://doi.org/10.1086/527673). arXiv: [0707.3161](https://arxiv.org/abs/0707.3161) [[astro-ph](#)] (cit. on p. 2).
- [5] Akira Konno et al. “SILVERRUSH. IV. Ly α luminosity functions at $z = 5.7$ and 6.6 studied with ~ 1300 Ly α emitters on the 14 - 21 deg 2 sky”. In: 70, S16 (Jan. 2018), S16. DOI: [10.1093/pasj/psx131](https://doi.org/10.1093/pasj/psx131). arXiv: [1705.01222](https://arxiv.org/abs/1705.01222) [[astro-ph.GA](#)] (cit. on p. 2).
- [6] G. Mahler et al. “Strong-lensing analysis of A2744 with MUSE and Hubble Frontier Fields images”. In: 473.1 (Jan. 2018), pp. 663–692. DOI: [10.1093/mnras/stx1971](https://doi.org/10.1093/mnras/stx1971). arXiv: [1702.06962](https://arxiv.org/abs/1702.06962) [[astro-ph.GA](#)] (cit. on p. 4).
- [7] G. de la Vieuville et al. “Faint end of the $z \sim 7$ luminosity function of Lyman-alpha emitters behind lensing clusters observed with MUSE”. In: *A&A* 628 (2019), A3. DOI: [10.1051/0004-6361/201834471](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834471). URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834471> (cit. on pp. 4, 6, 7, 9, 11, 12, 16, 20, 21).
- [8] Takatoshi Shibuya et al. In: *The Astrophysical Journal* 785.1 (Mar. 2014), p. 64. DOI: [10.1088/0004-637X/785/1/64](https://doi.org/10.1088/0004-637X/785/1/64). URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/785/1/64> (cit. on p. 4).
- [9] A. Claeysens et al. “The Lensed Lyman-Alpha MUSE Arcs Sample (LLAMAS). I. Characterisation of extended Lyman-alpha halos and spatial offsets”. In: 666, A78 (Oct. 2022), A78. DOI: [10.1051/0004-6361/202142320](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142320). arXiv: [2201.04674](https://arxiv.org/abs/2201.04674) [[astro-ph.GA](#)] (cit. on pp. 5, 6).
- [10] Maarten Schmidt. “Space Distribution and Luminosity Functions of Quasi-Stellar Radio Sources”. In: 151 (Feb. 1968), p. 393. DOI: [10.1086/149446](https://doi.org/10.1086/149446) (cit. on p. 9).

- [11] Hakim Atek et al. “The extreme faint end of the UV luminosity function at $z \sim 6$ through gravitational telescopes: a comprehensive assessment of strong lensing uncertainties”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 479.4 (July 2018), pp. 5184–5195. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/sty1820](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1820). eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/479/4/5184/25207621/sty1820.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1820> (cit. on p. 13).
- [12] R. J. Bouwens et al. “ $z \sim 2-9$ Galaxies Magnified by the Hubble Frontier Field Clusters. II. Luminosity Functions and Constraints on a Faint-end Turnover”. In: *The Astrophysical Journal* 940.1 (Nov. 2022), p. 55. DOI: [10.3847/1538-4357/ac86d1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac86d1). URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ac86d1> (cit. on p. 13).
- [13] T. Garel et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 504.2 (Apr. 2021), pp. 1902–1926. DOI: [10.1093/mnras/stab990](https://doi.org/10.1093/mnras/stab990). URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stab990> (cit. on pp. 14, 16).
- [14] Eduard Salvador-Solé et al. In: *The Astrophysical Journal* 936.2 (Sept. 2022), p. 178. DOI: [10.3847/1538-4357/ac874c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac874c). URL: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac874c> (cit. on pp. 14, 16).
- [15] Alyssa B. Drake et al. In: 471.1 (Oct. 2017), pp. 267–278. DOI: [10.1093/mnras/stx1515](https://doi.org/10.1093/mnras/stx1515). arXiv: [1609.02920](https://arxiv.org/abs/1609.02920) [astro-ph.GA] (cit. on p. 21).
- [16] Edmund Christian Herenz et al. In: 621, A107 (Jan. 2019), A107. DOI: [10.1051/0004-6361/201834164](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834164). arXiv: [1810.05037](https://arxiv.org/abs/1810.05037) [astro-ph.GA] (cit. on p. 21).
- [17] Jason Jaacks et al. In: *The Astrophysical Journal* 766.2 (Mar. 2013), p. 94. DOI: [10.1088/0004-637X/766/2/94](https://doi.org/10.1088/0004-637X/766/2/94). URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/766/2/94> (cit. on p. 21).
- [18] Bin Yue et al. “On the faint-end of the high- z galaxy luminosity function”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463.2 (Aug. 2016), pp. 1968–1979. ISSN: 0035-8711. DOI: [10.1093/mnras/stw2145](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2145). eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/463/2/1968/9686521/stw2145.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2145> (cit. on p. 21).