

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

THE SOURCES OF COSMIC RE-IONIZATION AS SEEN BY MUSE/VLT

Chuyên ngành: Vật lý nguyên tử và Hạt nhân

Mã số: 9 44 01 06

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ

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 và Trường Đại học Aix-Marseille, Pháp.

Người hướng dẫn khoa học 1:

Người hướng dẫn khoa học 2:

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

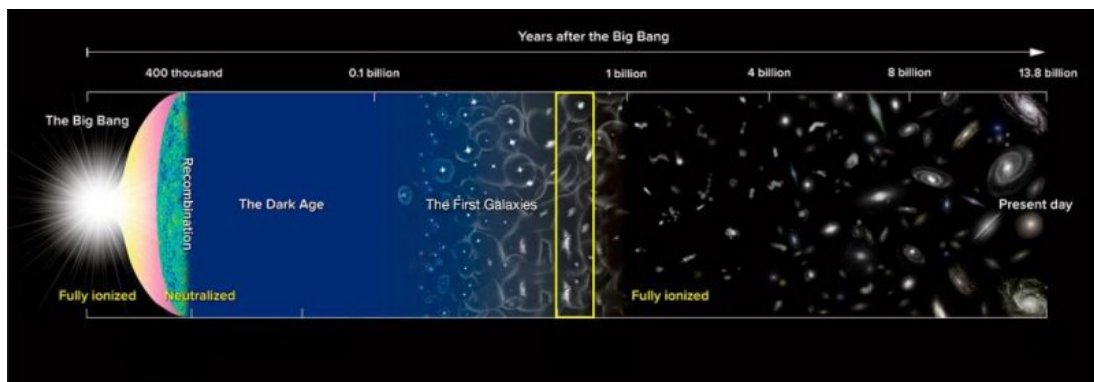
Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp _____, họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi ... giờ ..', ngày ... tháng ... năm 20

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

Tóm tắt

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: 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 $z = 6$. 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 lạnh dần đạt đến mức $\sim 3000\text{K}$, các electron và proton kết hợp với nhau tạo thành nguyên tử Hydro trung hòa. Lúc này chỉ tồn tại các bức xạ phông 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. Những cấu trúc đầu tiên của Vũ trụ được hình thành, phát xạ từ chúng ra bên ngoài môi trường xung quanh làm ion hóa nguyên tử Hydro trung hòa, thời kỳ tăm tối của Vũ trụ kết thúc và 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.

Cho đến nay, hiểu biết về các nguồn chịu trách nhiệm cho quá trình tái ion hóa vẫn chưa rõ ràng, có thể là thiên hà có nhân hoạt động (Active Galactic Nuclei AGN) do những tính chất nổi bật như độ sáng 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 thiên hà có nhân 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 giải quyết câu hỏi 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 giá trị 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 này. Để củng cố cho những lý thuyết này, chúng ta cần phải tính toán định lượng 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 có độ trung mờ nhất, do tín hiệu được phóng 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 ngoài cùng dễ dàng bị kích thích để chuyển lên trạng thái có mức năng lượng cao hơn trong môi trường liên sao, nhờ đó tín hiệu của vạch phát xạ Lyman alpha từ thiên hà trở thành 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 $z > 4$ được phát hiện trong các quan sát của Hubble Space Telescope (Bouwens et al. 2015, Finkelstein et al. 2014), khoảng 18000 thiên hà được phát hiện nhờ các quan sát với máy quang phổ thuộc chương trình HETDEX ở dịch chuyển đỏ $z = 2.0 - 3.5$ (Zhang et al. 2021) ... Sự đa dạng về số lượng thiên hà được phát hiện đưa chúng ta đến 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 chúng ta 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 để nghiên cứu. 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. Sử dụng 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 ($\alpha = -1.50, -2.00, -2.50$, Ouchi et al. 2008; Konno et al. 2018). Khoa học cần dữ liệu quan sát thực nghiệm để khẳng định lại những mô hình lý thuyết. 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-xanh nhằm thu được tín hiệu của các nguồn phát xạ Lyman alpha ở vùng có độ trung thấp.

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 quan sát 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 độ mạnh của vạch phát xạ từ đối tượng ở nhiều bước sóng khác nhau trong khoảng 4750 đến 9370 Å tương ứng với dịch chuyển đỏ của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha trong khoảng $z = 2.9 - 6.7$.

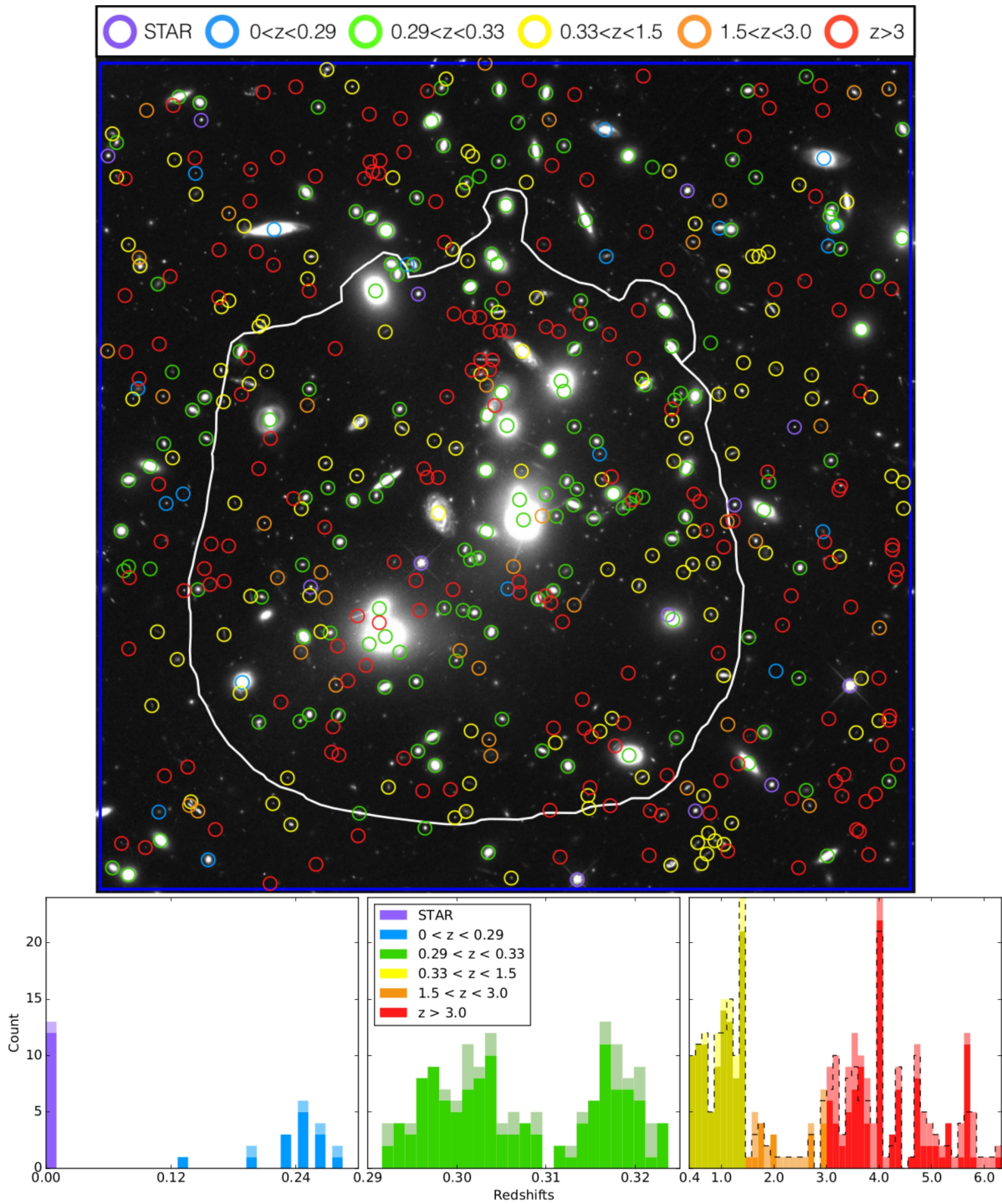
Ở phần thứ 3 của chương này, tôi trình bày một số kết quả nghiên cứu trước đó về 17 cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn, thông tin về mô hình thấu kính hấp dẫn được sử dụng trong luận án. Hình 2 là một ví dụ về các nguồn phát xạ vạch quan sát bởi MUSE, vòng tròn có màu sắc khác nhau tương ứng với các nguồn có độ dịch chuyển đỏ khác nhau. Mục tiêu chính của MUSE/VLT là nghiên cứu các nguồn có dịch chuyển đỏ $z > 2.9$, do đó số lượng

nguồn phân bố trong khoảng này chiếm đa số. Hình 3 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:

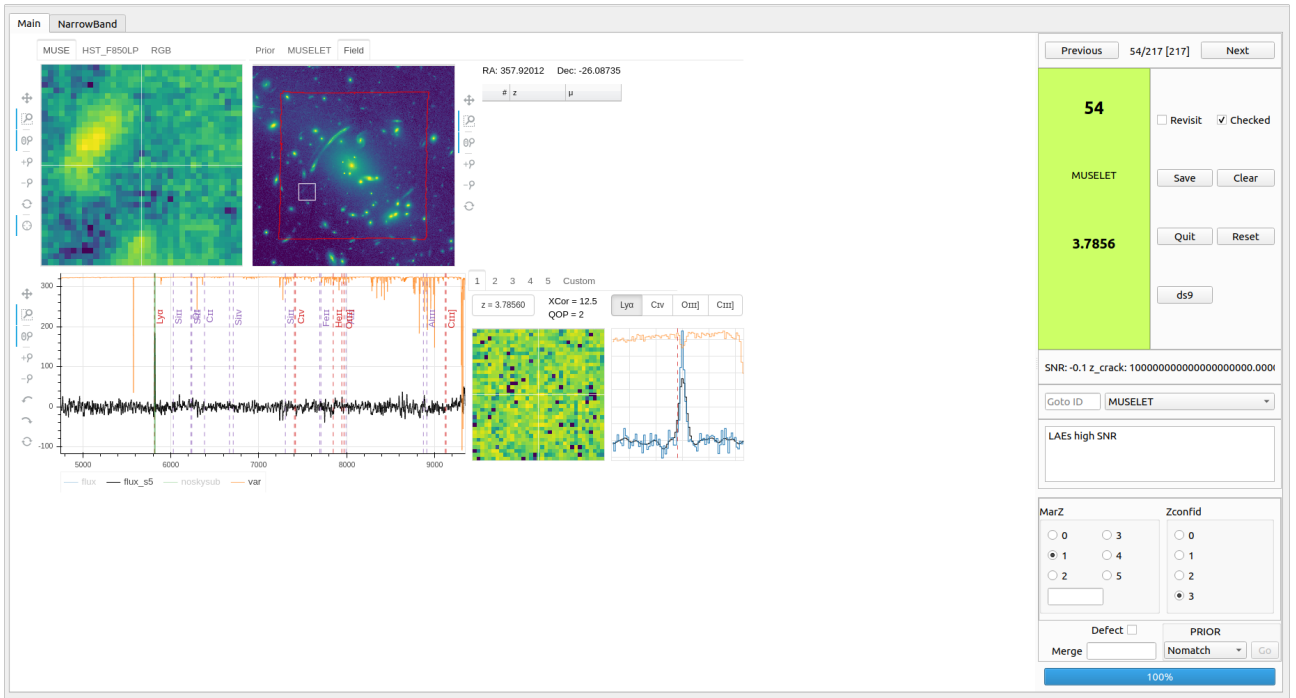
+ Cấp độ thấp nhất ($zconf = 1$). Ở cấp độ này, dịch chuyển đỏ của nguồn được xác định dựa trên tín hiệu của một vạch phát xạ có cường độ yếu. Chúng tôi không có đủ tự tin 100% để khẳng định đây là nguồn phát xạ Lyman alpha, do đó nguồn này sẽ không được sử dụng cho mục đích nghiên cứu sự tiến triển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

+ Cấp độ trung bình khá ($zconf = 2$). Ở cấp độ này, độ tin cậy về giá trị dịch chuyển đỏ được nâng lên cao hơn khi phổ phát xạ của nguồn có thông tin của nhiều vạch đi kèm. Độ tin cậy cũng sẽ được nâng lên ($zconf = 1$ thành $zconf = 2$) nếu ảnh thu được kết hợp với một vài ảnh khác được chứng minh là ảnh quan sát của cùng một nguồn đằng sau cụm thiên hà 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 mạnh.



Hình 2: Hình phía trên: Sự phân bố không gian của các nguồn phát xạ vạch đằng sau cụm thiên hà thấu kính hấp dẫn A2744 từ dữ liệu quan sát của MUSE và RGB HST. Hình phía dưới là sự phân bố dịch chuyển đỏ ở các khoảng khác nhau. Nguồn: Mahler et al. 2018.



Hình 3: 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.

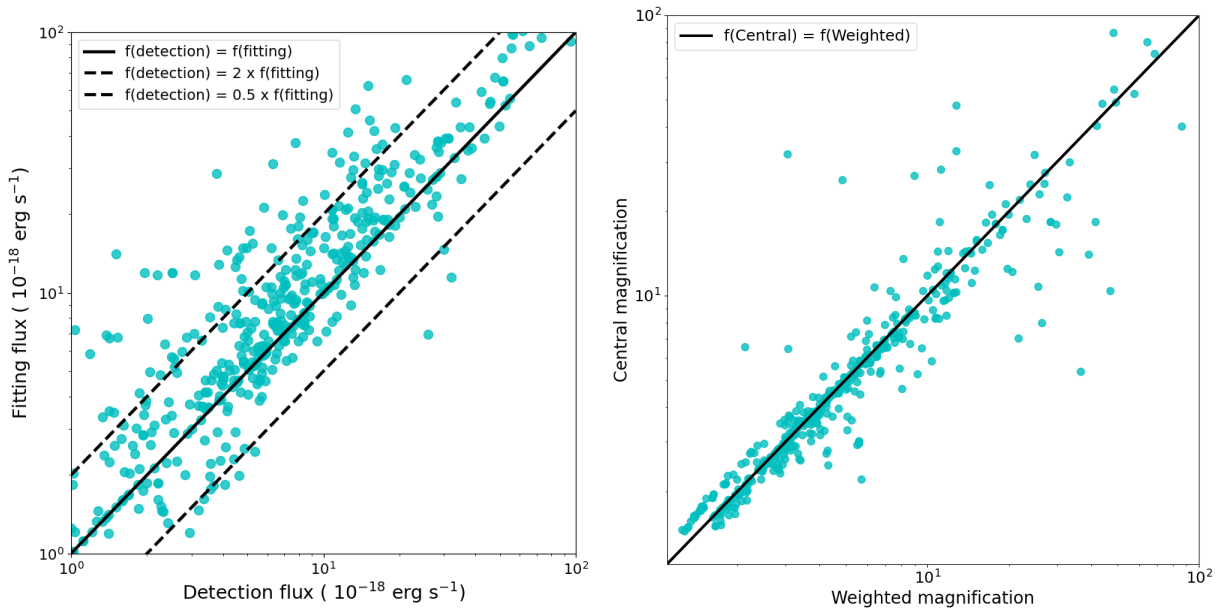
Do ảnh hưởng của hiệu ứng thấu kính hấp dẫn, tín hiệu từ các thiên hà ở xa được phóng đại nhiều lần, hình ảnh bị bẻ cong cho phép quan sát thấy nhiều ảnh của cùng một nguồn. Tuy nhiên, tính toán trong trường hợp này khá phức tạp do quá trình giải ảnh đòi hỏi phải được thực hiện qua lại giữa mặt phẳng 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 phóng 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 $2.9 < z < 6.7$ (Bảng 1), phân bố trong bốn bậc độ trưng $39 < \log L[\text{erg/s}] < 43$ và so sánh thông tin của 600 nguồn này với dữ liệu trong nghiên cứu trước đó được thực hiện bởi DLV 2019.

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

+ Tính toán 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 tính toán bằng phương pháp khớp hàm sử dụng phương trình được đề xuất bởi Shibuya et al. 2014:

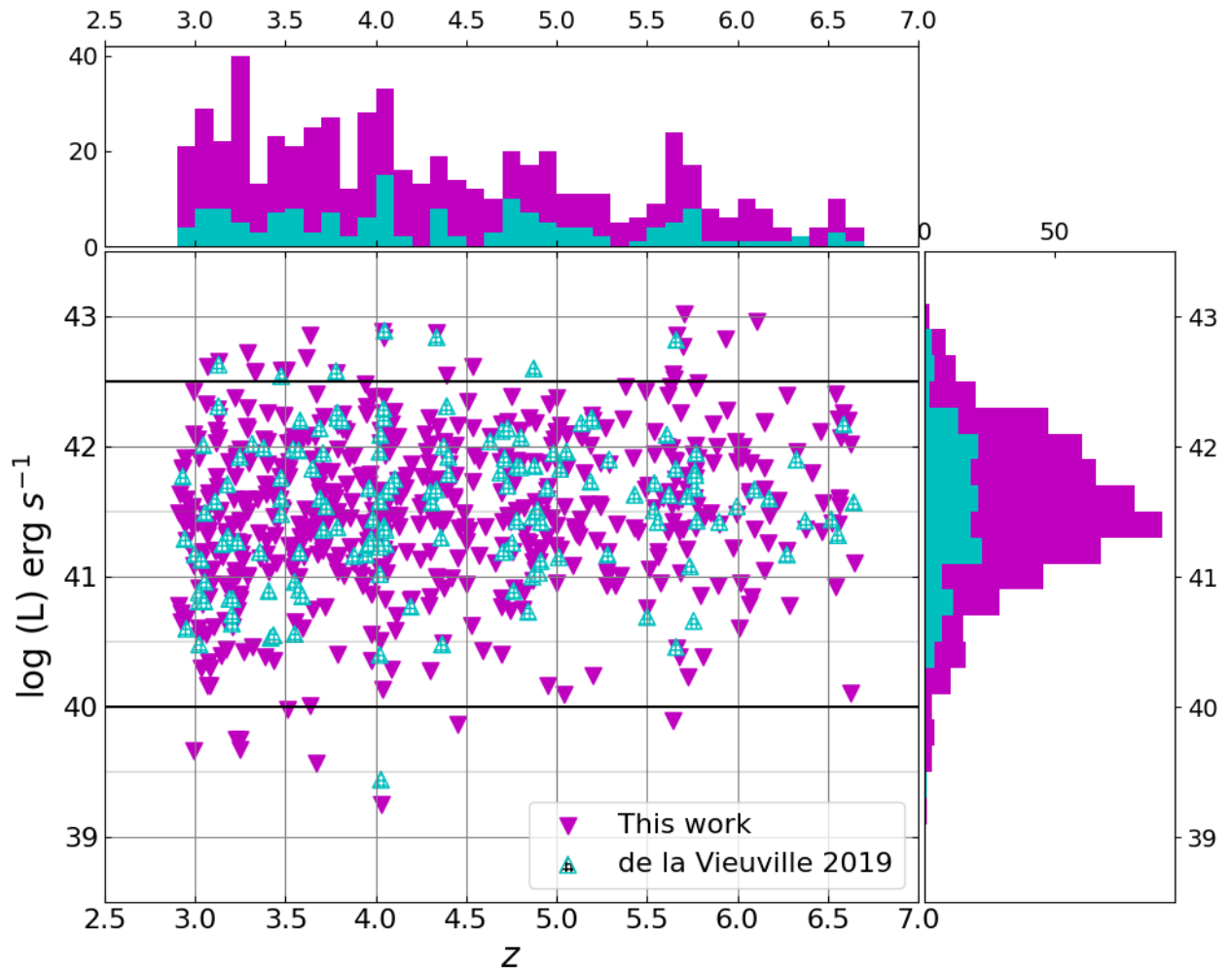
$$f(\lambda) = A \exp \frac{-(\lambda - \lambda_0)^2}{2(a(\lambda - \lambda_0) + d)^2} \quad (0.1)$$

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 đối xứng là 7 \AA và 0.2 . Tổng thông lượng của từng nguồn được lấy từ bộ dữ liệu của Claeysens et al. 2022. 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 SExtractor để tính tổng giá trị thông lượng trong từng pixel của nguồn. Ưu điểm của sử dụng phần mềm SExtractor 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 4 (bên trái). Trục hoành hiển thị giá trị thông lượng xác định bằng phần mềm SExtractor, trục tung hiển thị giá trị thông lượng xác định bằng phương pháp khớp hàm. Khớp hàm tuyến tính với hệ số 0.9 đã chỉ ra sự tương đồng giữa hai phương pháp.



Hình 4: 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 phóng đại của nguồn tại vị trí trung tâm (trục y) và khi được lấy trung bình (trục x).

+ Tính toán giá trị phóng đại của thiên hà. Giá trị này được Claeysens et al. 2022 áp dụng tại vị trí tâm của nguồn. Tuy nhiên, khi không phải là nguồn điểm, giá trị phóng đại tại các vị trí khác nhau là khác nhau. Điều này đặt ra yêu cầu về việc lấy giá trị trung bình độ phóng đại để đặc trưng tốt hơn cho nguồn. Xuyên suốt trong luận án này, chúng tôi đề xuất sử dụng giá trị phóng đại trung bình thay vì giá trị tại tâm của nguồn. Sự khác biệt trong hai giá trị này được thể hiện ở Hình 4 (bên phải).

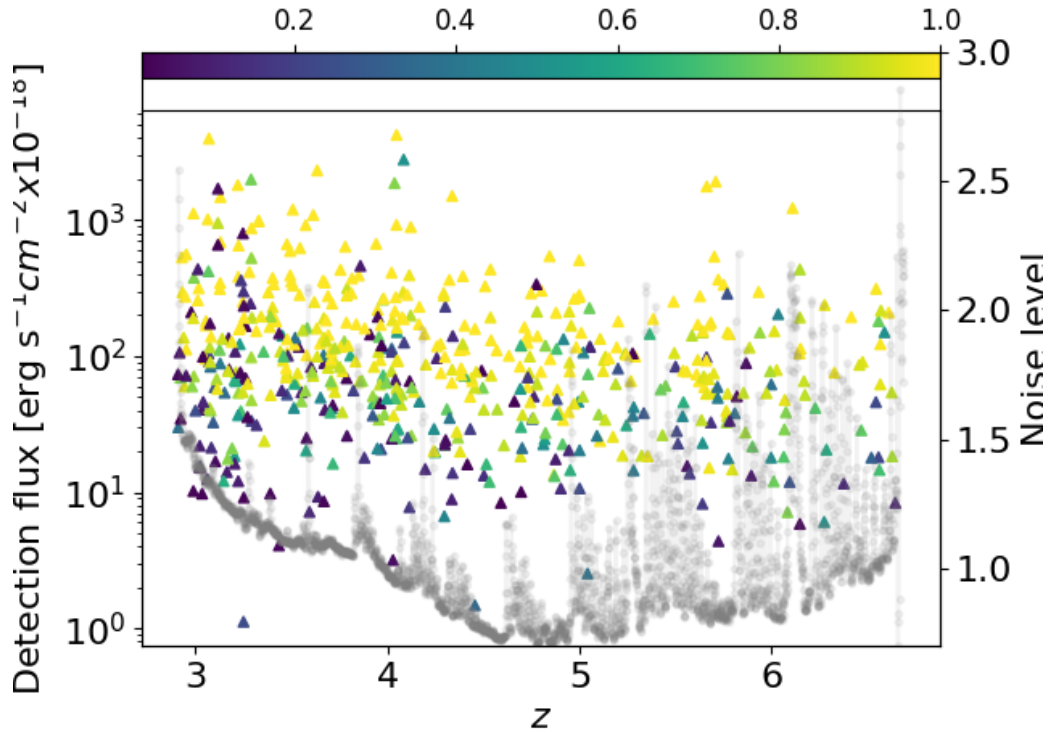


Hình 5: Hình giữa mô tả sự phân bố của độ trưng theo giá trị độ dịch chuyển đỏ, hình bên trên hiển thị sự phân bố giá trị dịch chuyển đỏ, hình bên phải hiển thị phân bố giá trị độ trưng. Phần màu tím hiển thị dữ liệu được sử dụng trong luận án. Phần màu xanh là dữ liệu so sánh từ bài báo DLV 2019

So với dữ liệu nghiên cứu trước đây của DLV 2019 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 trưng ở những giới hạn mờ nhất $\log L[\text{ergs}^{-1}] \sim 40$ 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 trưng ở những khoảng giới hạn mờ nhất, đồng thời cũng cải thiện thống kê của ở vùng này. Hình 5 so sánh dữ liệu hiện tại và dữ liệu trước đó được sử dụng trong DLV 2019.

Bảng 1: 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

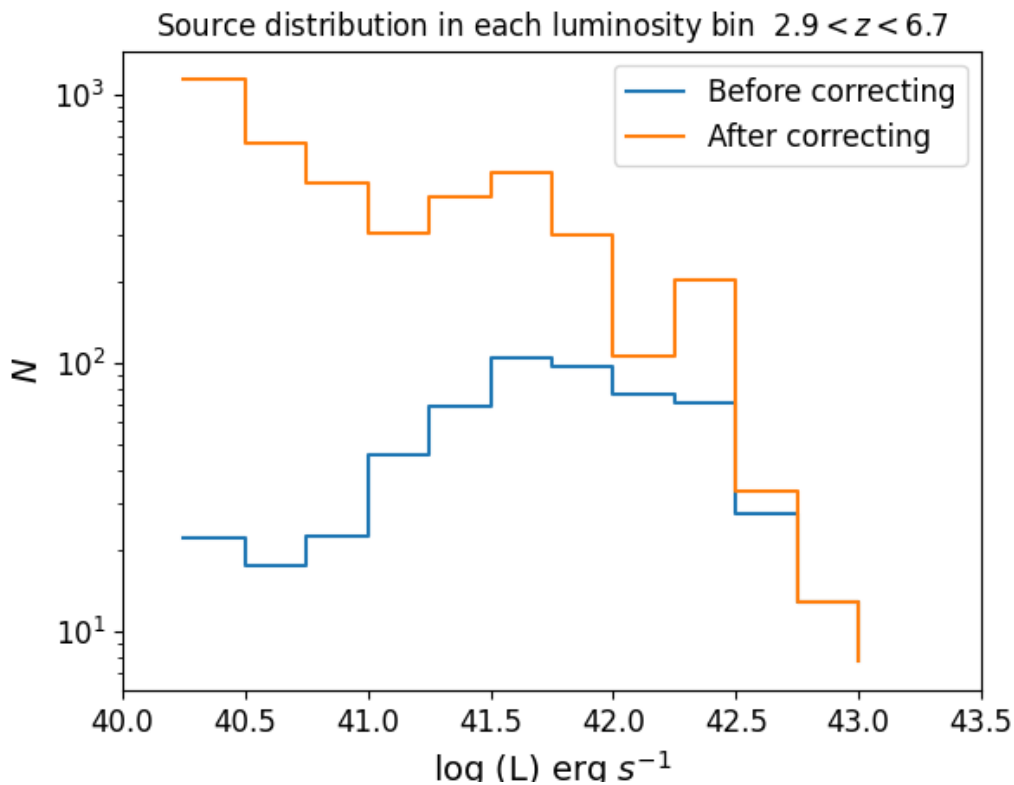


Hình 6: Thông lượng đo đạc và nhiễu theo dịch chuyển đỏ của các nguồn LAEs trong mẫu khảo sát hiện tại. Trục bên trái hiển thị thông lượng được phát hiện, trục bên phải hiển thị mức nhiễu và thang ngang phía trên cung cấp giá trị hoàn chỉnh cho các nguồn riêng lẻ. Các vòng tròn xám biểu thị sự phụ thuộc của nhiễu theo dịch chuyển đỏ trong khối dữ liệu dạng datacube của MUSE.

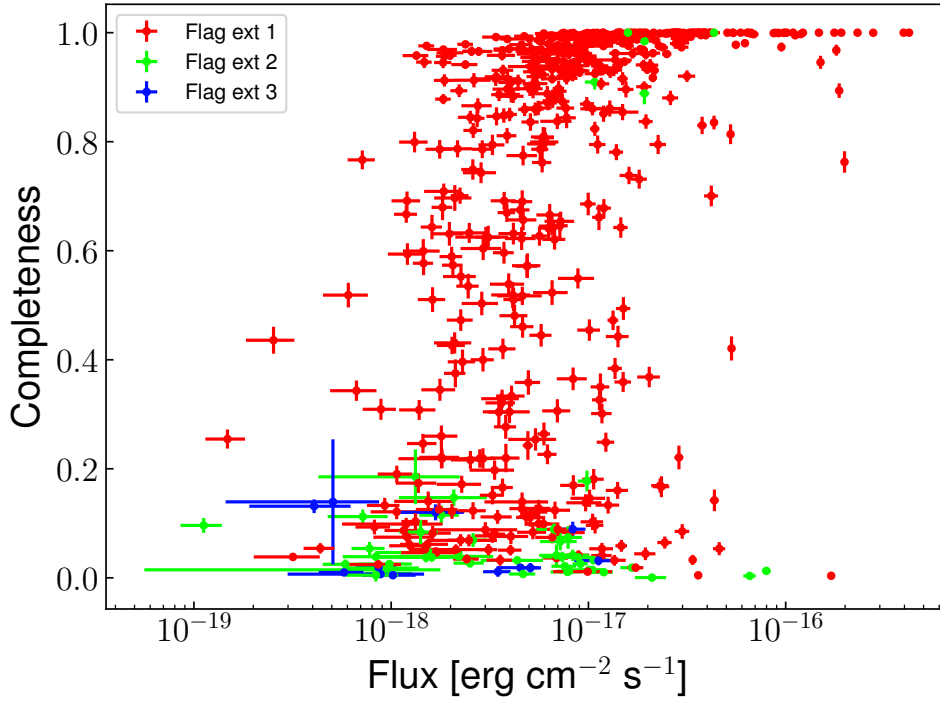
Chương 3 mô tả quy trình tính toán đại lượng V_{\max} đặc trưng cho thể tích khảo sát mà từng nguồn riêng lẻ có thể được tìm kiếm. Phương pháp này lần đầu tiên được giới thiệu bởi Schmidt et al. 1968. Nghiên cứu hiện tại được thực hiện trong 18 vùng quan sát khác nhau, do đó giá trị V_{\max} của từng 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. Quy trình này được phát triển trước đó bởi DLV 2019 khi nghiên cứu hàm độ trung 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 Mpc^3 , nhiều hơn gấp 3 lần so với DLV 2019. Tuy nhiên, giá trị thể tích này nhỏ hơn đáng kể so với các nghiên cứu được thực hiện trong trường tổng, do nghiên cứu hiện tại chịu sự ràng buộc về giá trị độ phóng đại gây ra bởi thấu kính hấp dẫn, làm giảm hiệu quả trường nhìn.

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

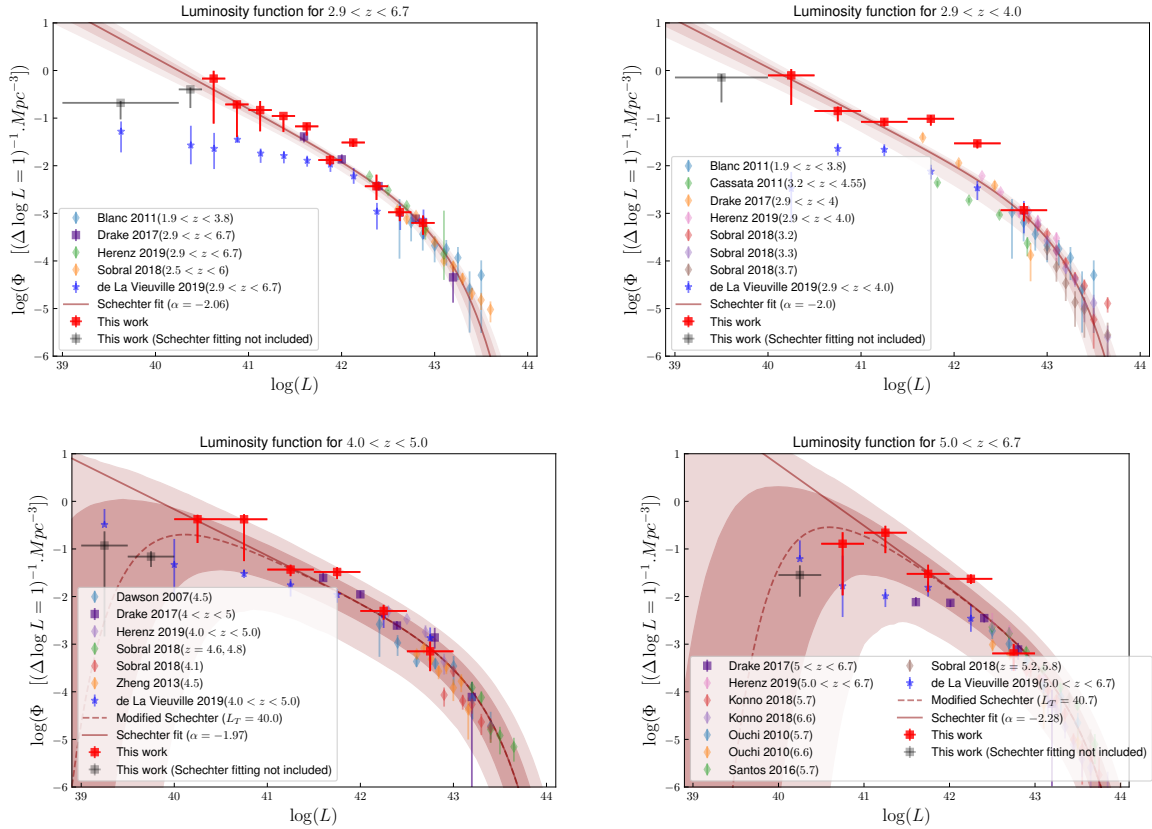


Hình 7: Phân bố của nguồn có dịch chuyển đỏ trong khoảng $2.9 < z < 6.7$ trong mỗi khoảng độ trưng có độ rộng 0.25 theo thang logarit. Đường màu xanh hiển thị số lượng nguồn trước khi tính đến hệ số hoàn chỉnh (completeness). Đường màu cam hiển thị phân bố số lượng nguồn khi việc hiệu chỉnh được tính đến.



Hình 8: 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. Ở đây chỉ xem xét các nguồn trong những vùng không bị loại bỏ, trên kênh bước sóng cực đại mà nguồn được tìm thấy.

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 đưa nó một cách ngẫu nhiên vào các vị trí khác nhau trong không gian. Nguồn được coi là được phát hiện khi độ lệch tối đa giữa vị trí thêm vào ngẫu nhiên và vị trí được phát hiện lại 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 DLV 2019 liên quan tới việc chọn ngưỡng cắt của hệ số hoàn chỉnh cũng như ảnh hưởng của việc chọn nguồn.



Hình 9: Từ trên xuống dưới, từ trái sang phải, Kết quả nghiên cứu sự tiến triển của hàm độ trung theo dịch chuyển đỏ $2.9 < z < 6.7$, $2.9 < z < 4.0$, $4.0 < z < 5.0$ và $5.0 < z < 6.7$. 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 DLV 2019 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 trung.

- 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 DLV 2019 (từ $30'' \times 30''$ lên $80'' \times 80''$).

- Với mục tiêu tận dụng tối đa số lượng nguồn trong mẫu ban đầu cho quá trình tính toán hàm độ trung 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 DLV 2019 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, được thể hiện trong các kết quả nghiên cứu gần đây khi các nguồn được cho là thực do đã được khẳng định bằng các 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 6. Hình 7 chỉ ra số lượng nguồn được sử dụng cho hàm độ trung trong toàn bộ khoảng dịch chuyển đỏ, trước và sau khi hiệu chỉnh cho hệ số hoàn chỉnh. Hầu hết số lượng nguồn có độ trung yếu đều rất thấp. Tuy nhiên, khi tính đến việc hiệu chỉnh tham số này, số lượng nguồn trong các khoảng độ trung này tăng lên đáng kể. Ở khoảng $42.25 < \log L [\text{ergs}^{-1}] < 42.5$ (Hình 7) có sự xuất hiện bất thường

Bảng 3: 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^{-1}]	α
$2.9 < z < 6.7$	$7.41^{+2.70}_{-2.20}$	$42.85^{+0.10}_{-0.10}$	$-2.06^{+0.07}_{-0.05}$
$2.9 < z < 4.0$	$6.56^{+3.20}_{-2.40}$	$42.87^{+0.11}_{-0.1}$	$-2.00^{+0.07}_{-0.07}$
$4.0 < z < 5.0$	$4.06^{+2.70}_{-1.70}$	$42.97^{+0.13}_{-0.11}$	$-1.97^{+0.09}_{-0.08}$
$5.0 < z < 6.7$	$3.49^{+2.11}_{-1.50}$	$43.09^{+0.10}_{-0.08}$	$-2.28^{+0.12}_{-0.12}$

của một đỉnh trong phân bố là do sự tồn tại của một nguồn có giá trị hệ số hoàn chỉnh nhỏ được nằm trong khoảng độ trung đã cho.

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

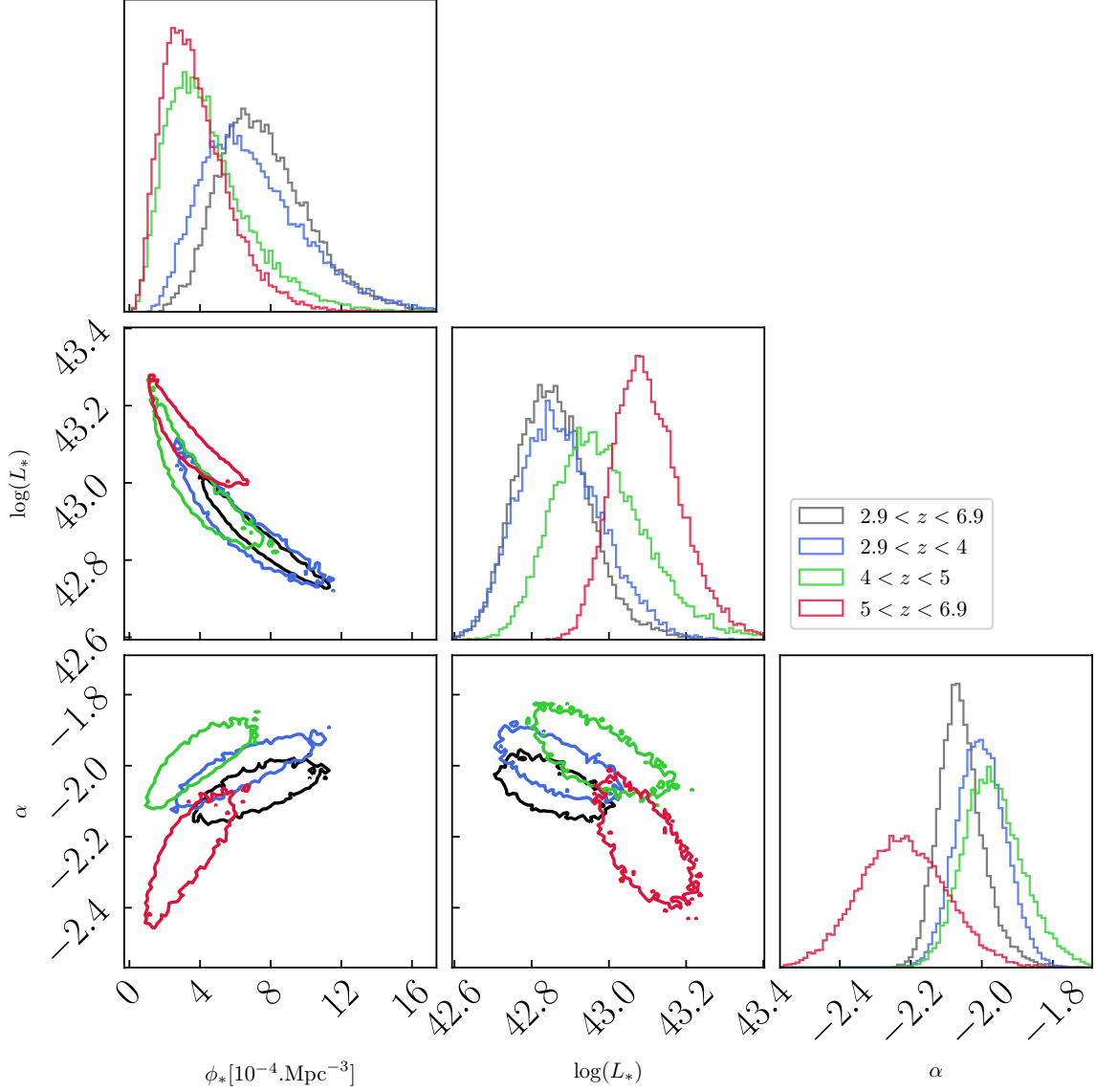
$$\Phi(L_i) = \frac{1}{\Delta \log L_i} \sum_j \frac{1}{C_j V_{\max, j}} \quad (0.2)$$

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 trung ở bin i . Các điểm LF thu được từ mẫu đang khảo sát được khớp hàm Schechter dạng:

$$\Phi(\log L) d(\log L) = \left(\frac{L}{\log e} \right) \left(\frac{\Phi^*}{L^*} \right) \left(\frac{L}{L^*} \right)^\alpha \exp \left(-\frac{L}{L^*} \right) d(\log L) \quad (0.3)$$

trong đó α là giá trị độ dốc của hàm Schechter về phía độ trung mờ, L^* là giá trị đặc trưng của hàm Schechter khi chuyển từ hàm exponential (phía có độ trung lớn) sang hàm mũ (phía có độ trung nhỏ), Φ^* là hệ số chuẩn hóa. Sự tiến triển này được nghiên cứu trong 4 khoảng dịch chuyển đỏ $2.9 < z < 6.7$, $2.9 < z < 4.0$, $4.0 < z < 5.0$ và $5.0 < z < 6.7$. Việc sử dụng dữ liệu từ cụm thấu kính hấp dẫn đã cho thấy hiệu quả trong nghiên cứu hàm độ trung ở phía có độ trung mờ, tuy nhiên dữ liệu này lại kém hiệu quả khi nghiên cứu ở vùng lân cận giá trị L^* và cao hơn. Để xử lý vấn đề này, chúng tôi lấy trung bình các kết quả nghiên cứu trước đó về hàm độ trung trong cùng khoảng dịch chuyển đỏ, trong cùng khoảng độ trung. Chúng tôi sử dụng chúng để ràng buộc ở phía độ trung lớn. Hình 9 hiển thị kết quả khớp hàm Schechter nói trên, những dấu chữ thập màu xám không tham gia vào quá trình khớp hàm.

Kết quả tốt nhất khi khớp hàm Schechter được trình bày ở Bảng 3, 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 9, các dấu chữ thập màu xám không được sử dụng cho quá trình khớp hàm Schechter do đa số các nguồn trong khoảng độ trung này có độ phóng đại lớn, giá trị hệ số hoàn chỉnh nhỏ. Hình 10 hiển thị mối tương quan của ba tham số tự do trong phương trình Schechter khi khớp hàm với độ tin cậy 68%. Giá trị hàm độ trung trong một khoảng dịch chuyển đỏ và độ trung nhất định được trình bày tại Bảng 4.



Hình 10: 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.

Có điểm đáng chú ý, hàm độ trung ở những khoảng dịch chuyển đỏ lớn hơn $4.0 < z < 5.0$ và $5.0 < z < 6.7$ đã cho thấy sự sụt giảm ở những khoảng giới hạn mờ nhạt, gợi ý một thay đổi quan trọng, sự quay đầu của hàm độ trung. Điều này đã được thảo luận trong các nghiên cứu trước đó về hàm độ trung UV Atek et al. 2018, Bouwens et al. 2022. Để tính tới sự thay đổi này của hàm độ trung, chúng tôi đã sửa đổi hàm Schechter bằng cách thêm một phần hàm mũ mô tả sự "quay đầu" dạng:

$$\Phi(L)\exp(-L_T/L)^m = \frac{\Phi_*}{L_*} \left(\frac{L}{L_*}\right)^\alpha \exp(-L/L_*)\exp(-L_T/L)^m \quad (0.4)$$

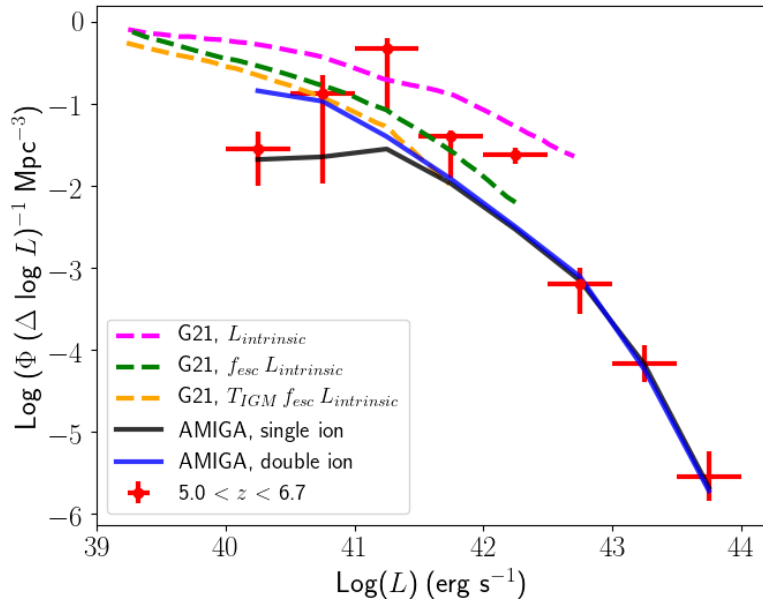
Trong đó L_T là giá trị mà tại đó $d\Phi/dL = 0$, hay nói một cách khác đây là giá trị mà tại đó hàm Schechter bắt đầu chuyển hướng, m là chỉ số quay đầu hiển thị xu hướng của hàm, $m > 0$ hàm có xu hướng đi xuống, $m < 0$ hàm có xu hướng đi lên. Hình dáng của hàm được hiển thị Hình 9 (dưới). Kết quả cho thấy giá trị của $m=1$ và L_T bằng 10^{40} và $10^{40.7}$ erg s⁻¹ tương ứng với hai khoảng dịch chuyển đỏ $4.0 < z < 5.0$ và với $5.0 < z < 6.7$. Các quan sát dựa trên

Bảng 4: 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.

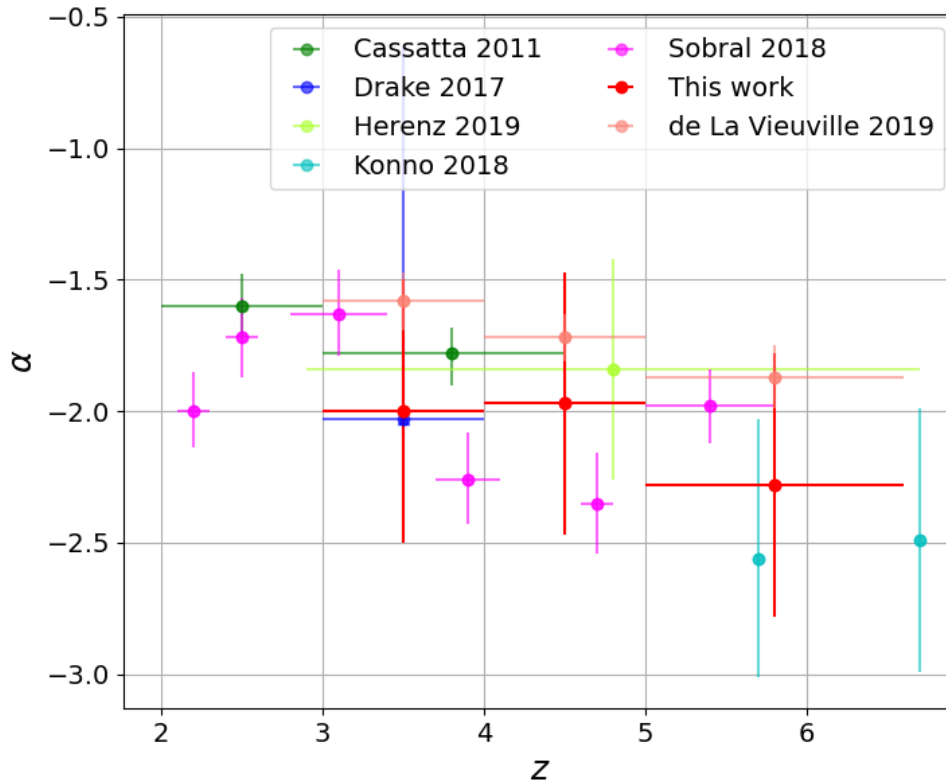
$\log(L)$ [erg s ⁻¹]	$\log(\phi)(\Delta(\log(L)) = 1)^{-1}$ [Mpc ⁻³]	$\langle N \rangle$	$\langle N_{corr} \rangle$	$\langle V_{max} \rangle$ [Mpc ³]
2.9<z<6.7				
39.00<39.63<40.25	-0.68 ^{+0.04} _{-0.35}	22.4	706.0	11827
40.25<40.38<40.50	-0.40 ^{+0.04} _{-0.39}	17.6	645.4	15074
40.50<40.63<40.75	-0.17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

hiện tượng thấu kính hấp dẫn để nghiên cứu sự tiến triển của hàm độ trung theo giá trị dịch chuyển đỏ cho phép chúng ta khảo sát ở những vùng có độ trung 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 trung ở dịch chuyển đỏ $z \sim 6$ là Garel et al. 2021 và Salvador-Solé et al. 2022. 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 Garel et al. 2021 khi áp dụng mô hình phát xạ SPHINX mô tả ảnh hưởng của quá trình động lực học tới sự tiến triển của hàm độ trung thông qua quá trình chuyển đổi phát xạ của các thiên hà trong môi trường liên sao và liên thiên hà. Mô hình thứ hai được phát triển bởi nhóm tác giả Salvador-Solé et al. 2022 sử dụng mô hình AMIGA để tiên đoán 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 đó quá trình tái ion lần thứ hai sẽ lặp lại ở dịch chuyển đỏ $z \sim 10$ sau một giai đoạn tái kết hợp ngắn. Kết quả so sánh được hiển thị trên hình 11. Ở khoảng độ trung $\log L [\text{erg/s}] = 41-42$, 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 trung mờ hơn, các giá trị của hàm độ trung dần khác biệt so với hai mô hình đã nêu. Sai số của phép đo còn lớn, do đó cần nhiều phép đo thực nghiệm hơn để giải thích cho vấn đề này.



Hình 11: So sánh giá trị hàm độ trung trong khoảng dịch chuyển đỏ lớn nhất $5.0 < z < 6.7$. Hai điểm chữ thập màu đỏ nằm trong vùng có độ trung 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 dự đoán từ mô hình AMIGA ứng với quá trình ion hóa đơn và ion hóa kép (Salvador-Solé et al. 2022). Đường nét đứt hiển thị kết quả dự đoán sự tiến triển giá trị hàm độ trung từ mô phỏng SPHINX (Garel et al. 2021) khi tính đến giá trị nội tại của hàm độ trung (đường màu tím), hiệu chỉnh bởi bụi (đường màu xanh), hiệu chỉnh bởi môi trường giữa các thiên hà (đường màu vàng).



Hình 12: 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.

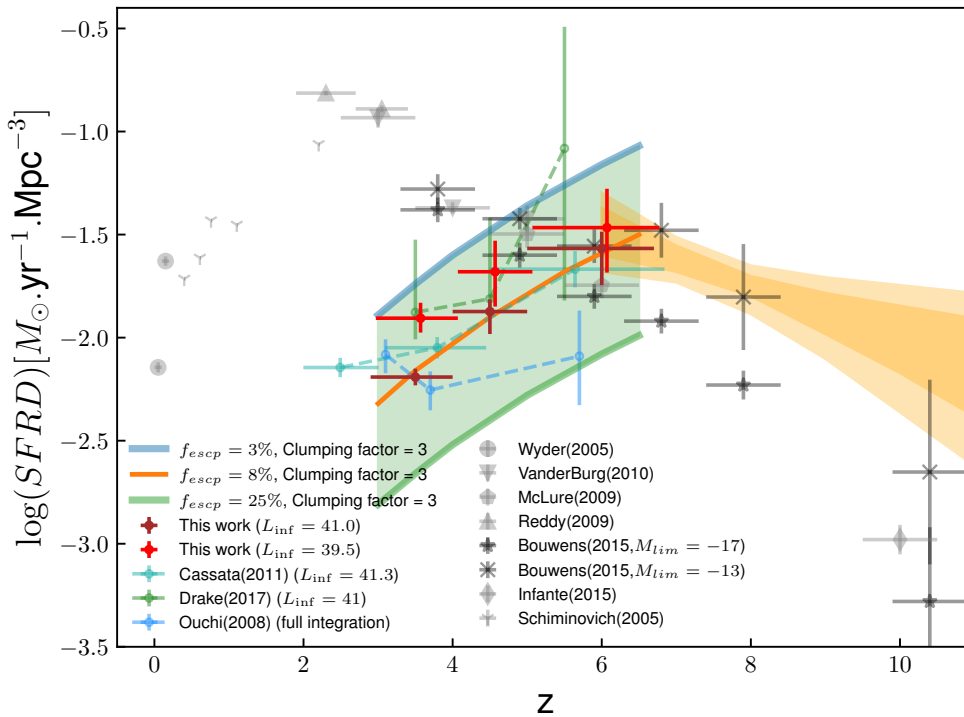
Nghiên cứu trước đó thực hiện bởi DLV 2019, đã loại bỏ các nguồn có giá trị hoàn chỉnh nhỏ hơn 10% trong quá trình tính toán hàm độ trưng. Trong luận án, chúng tôi thảo luận về tác động của tiêu chí lựa chọn giá trị hoàn chỉnh thực hiện bởi DLV 2019 đối với kết quả nghiên cứu hàm độ trưng. Cuối cùng, dù loại bỏ các nguồn có giá trị hoàn chỉnh 1% hay 10%, sự thay đổi “quay đầu” của hàm độ trưng vẫn được quan sát lân cận giá trị $\log L[\text{ergs}^{-1}] \sim 41$.

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 $z_{conf} = 2, 3$ trong quá trình xác định và đánh giá độ dịch chuyển đỏ. Chúng tôi loại bỏ những nguồn được đánh giá $z_{conf} = 1$ bởi tỷ 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 $z_{conf} = 1$ để kiểm tra ảnh hưởng của chúng vào mẫu hiện tại. Kết quả cho thấy các nguồn $z_{conf} = 1$ không ảnh hưởng đáng kể tới hình dạng của hàm độ trưng. Bên cạnh hiệu ứng lựa chọn nguồn $z_{conf} = 1$, chúng tôi cũng thảo luận một số nhân tố khác ảnh hưởng tới độ dốc α , bao gồm việc lựa chọn các cắt khác nhau với hệ số hoàn chỉnh để loại bỏ nguồn yếu, 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 5 và được dùng để ước tính sai số hệ thống liên quan tới độ dốc α ở vùng độ trưng mờ.

Bảng 5: 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

Ở chương 5 của luận án, dựa trên các kết quả nghiên cứu đạt được về hàm độ trung, chúng tôi lấy tích phân đường 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 nhạt, hình dáng hàm độ trung bị ảnh hưởng nhiều bởi các yếu tố chọn lựa và giới hạn tìm kiếm các nguồn nên cận dưới của tích phân là yếu tố gây ảnh hưởng nhiều đến kết quả cuối cùng. Trong phần này, chúng tôi lựa chọn hai cận dưới của tích phân, $\log L[\text{ergs}^{-1}] = 39.5$ nhằm mục đích bao phủ toàn bộ khoảng độ trung của dữ liệu hiện tại, và $\log L[\text{ergs}^{-1}] = 41$ 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, để chuyển đổi sang mật độ hình thành sao tối thiểu, 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.



Hình 13: Tiến triển mật độ hình thành sao theo dịch chuyển đỏ. Dấu thập màu đỏ ứng với giới hạn dưới $\log L[\text{ergs}^{-1}] = 39.5$, dấu thập đỏ nâu ứng với giới hạn dưới $\log L[\text{ergs}^{-1}] = 41.0$ 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.

Chương 6 trình bày thảo luận chung về kết quả cuối cùng và triển vọng tương lai. Tôi hy vọng sẽ tiếp tục công việc nghiên cứu sự tiến triển hàm độ trung theo dịch chuyển đỏ của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha bằng cách sử dụng dữ liệu được thu thập phía

sau 25 cụm thấu kính thuộc chương trình MUSE GTO hoặc đã có trên kho lưu trữ của ESO. Trong quá trình thực hiện luận án, bên cạnh việc xác định giá trị dịch chuyển đỏ của các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha, danh mục các nguồn phát xạ vạch Balmer, OII-3727 cũng đã được thiết lập. Do đó tôi sẽ nghiên cứu sự tiến triển hàm độ trưng của các nguồn phát xạ những vạch này nhưng ở khoảng dịch chuyển đỏ thấp hơn. Tôi cũng đã lên kế hoạch làm việc với dữ liệu của JWST và Euclid để tìm kiếm các nguồn phát xạ vạch Lyman alpha ở những khoảng dịch chuyển đỏ lớn hơn. Những kết quả nghiên cứu này cho phép xác định sự tiến triển toàn cục (global evolution) của các nguồn tái ion hóa theo hàm dịch chuyển đỏ. Sự kết hợp tuyệt vời giữa JWST và MUSE cũng mang đến cơ hội phân tích hiệu quả của quá trình tạo ra các photon ion hóa

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

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 trung 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 trung trong khoảng $39.0 < \log L < 44.0$. So sánh với bộ dữ liệu trước đây của DLV 2019, 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 trung mờ ($\log L < 41.0$) - 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 DLV 2019 với một số các 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 phóng đại đối với thể tích quan sát của từng nguồn riêng lẻ. Đặc biệt đối với các nguồn có độ phóng 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 phóng đại nhỏ, một hàm tuyến tính biểu thị cho mối tương quan được chỉ ra.

+ Tiến triển của hàm độ trung theo dịch chuyển đỏ được trình bày trong bốn khoảng $2.9 < z < 6.7$, $2.9 < z < 4.0$, $4.0 < z < 5.0$ và $5.0 < z < 6.7$. Tổng thể tích khảo sát cỡ $50\,000\text{ Mpc}^3$ được cho là lớn gấp 3 lần so với kết quả của DLV 2019, 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 phóng 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 $2.9 < z < 6.7$ lần lượt là $\alpha = -2.06^{+0.07}_{-0.05}$, $\Phi * [10^{-4}\text{Mpc}^{-3}] = 7.41^{+2.70}_{-2.20}$, $\log L[\text{erg}/\text{s}] = 42.85^{+0.10}_{-0.10}$.

+ Các giá trị của hàm độ trung LF khi $\log L > 42$ ở phần độ trung 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 trung mờ, đóng góp của các nguồn mờ, có độ phóng đại lớn được xác định. Mật độ các nguồn trong vùng này được xác định thông qua giá trị độ dốc của hàm Schechter $\alpha \sim -2.0$. 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 Drake et al. 2017 trong bốn khoảng dịch chuyển đỏ, phù hợp với kết quả nghiên cứu của Herenz et al. 2019 ở khoảng dịch chuyển đỏ $2.9 < z < 6.7$, độ dốc của hàm Schechter lớn hơn khoảng 20% so với giá trị tìm thấy của DLV 2019. 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 DLV 2019, 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 lớn $4.0 < z < 5.0$ và $5.0 < z < 6.7$ khi độ trung $\log L < 41$ được tìm thấy trong kết quả nghiên cứu của luận án. Hình thái này được giải thích do sự suy giảm của dòng khí lạnh

trong những quãng vật chất tối có khối lượng thấp (Jaacks et al. 2013; Yue et al. 2016).

+ Kết quả nghiên cứu tiến triển hàm độ trung 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. Hình thái của hàm độ trung khi $\log L < 41$ được cho là nguyên nhân gây ra sự tăng cường đáng kể mật độ hình thành sao SFRD ở khoảng dịch chuyển đỏ $z = 3.0 - 6.0$. 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

Đây là bộ dữ liệu lớn nhất về các nguồn phát xạ Lyman alpha quan sát được nhờ hiệu ứng thấu kính hấp dẫn sử dụng máy quang phổ đa đối tượng MUSE đặt tại Đài Thiên văn Nam Âu. Những nghiên cứu trước đây về tiến triển hàm độ trưng theo dịch chuyển đỏ chưa thể đạt đến vùng có độ trưng mờ $\log L < 41$, do đó dữ liệu cũng như kết quả nghiên cứu của luận án là nguồn thông tin quan trọng cho những hiểu biết nghiên cứu trong lĩnh vực này.

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 $3 < z < 7$ 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 $2.9 < z < 6.7$. *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.