

Weichende Horizonte

Mit dem James-Webb-Weltraumteleskop ließen sich die bislang frühesten Galaxien im Universum beobachten.

Dominika Wylezalek

Die Geschichte der Astronomie ist die Geschichte von den sich weitenden Horizonten, so schrieb Edwin Hubble (1889 – 1953) im Jahr 1936 [1]. Zu seinen Lebzeiten ließen sich tatsächlich einige scheinbare Grenzen schlagartig auflösen. Seine Beobachtungen enthüllten, dass die Milchstraße nur eine unter unzähligen Galaxien ist und das Universum viel größer als bis dahin angenommen. Hubble selbst beobachtete als einer der ersten, dass sich Galaxien umso schneller entfernen, je weiter sie von uns entfernt sind – der erste Hinweis darauf, dass wir in einem expandierenden Universum leben.

Hubbles Feststellung ist aktueller denn je. Bessere Teleskope und empfindlichere Messungen lassen immer tiefer in die kosmische Vergangenheit blicken. Das Hubble Space Telescope (HST) beobachtete Galaxien, die existierten, als das Universum gerade einmal 600 Millionen Jahre alt war. Daher ruhen auf dem neuen James Webb Space Telescope (JWST), dem bisher größten und leistungsstärksten Weltraumteleskop, große Hoffnungen.

Die Expansion des Universums verschiebt das Licht ferner Objekte um den Faktor $1+z$ ins Rote, wobei z als die Rotverschiebung bezeichnet wird. Viele wichtige spektrale Signa-

turen von Galaxien, die sich im ultravioletten und optischen Wellenlängenbereich befinden, verschieben sich für große z ins Infrarote. Zu diesen Signaturen gehören auffällige Sprünge im Spektrum, wie der Lyman-Break und die Ly- α -Linie, sowie die Balmer-Emissionslinien. Da das JWST bei 0,8 bis 30 μm arbeitet – das HST nur bis ca. 2 μm –, sollte es Galaxien mit $z > 10$ finden, die nur ein paar hundert Millionen Jahre nach dem Big Bang entstanden sind.

In zwei aktuellen Arbeiten bestätigen Curtis-Lake et al. und Robertson et al. große Rotverschiebungen von 10,3 bis 13,2 in vier Galaxien [2, 3]. Das entspricht einem Alter des Universums von 300 bis 500 Millionen Jahren. Solche und kommende Datensätze des JWST sollen helfen, den großen Fragen der Astrophysik auf den Grund zu gehen: Wann und wie entstanden die ersten Galaxien? Wie beeinflussten sie die Entwicklung des Universums? Wo liegen unsere eigenen kosmischen Ursprünge?

Obwohl das JWST bisher noch ein relativ kleines kosmisches Volumen untersucht hat, ließen sich bereits sehr viele Galaxien präselektieren, die sich bei sehr hohen Rotverschiebungen von $z > 10$ befinden könnten,

also in den Frühphasen des Universums existierten. Mithilfe von Aufnahmen mit verschiedenen, spezifisch ausgesuchten Infrarotfiltern lassen sich solche Objekte schnell finden. Sie werden bei Wellenlängen kleiner 1 μm nicht detektiert, in Filtern $> 1 \mu\text{m}$ jedoch schon. Eine solche photometrische Signatur gibt Hinweise auf einen Lyman-Break einer Galaxie bei $z > 10$. Diese photometrischen Präselektionstechniken kamen bereits standardmäßig beim HST für Aufnahmen von Galaxien mit $z < 10$ zum Einsatz. Sie wurden nun an die JWST-Daten angepasst.

Das kosmologische Standardmodell lässt konkrete Aussagen zu, wie viele Galaxien welcher Masse und Leuchtkraft in verschiedenen kosmischen Epochen existieren sollten. Zu den überraschenden Ergebnissen gehört, dass nach nur 10 Monaten JWST-Beobachtungen deutlich mehr hoch-rotverschobene Galaxien gefunden wurden als erwartet [4].

Obwohl viele der Kandidaten bisher „nur“ photometrisch identifiziert und noch nicht spektroskopisch bestätigt wurden, zeigen die neuesten Ergebnisse, dass die weniger aufwändige und günstigere photometrische Präselektion bisher sehr gut funktioniert.

Spektroskopische Daten bestätigen den rotverschobenen Lyman-Break und damit die großen Rotverschiebungen von $z = 10,3 - 13,2$ von vier photometrisch präselektierten Galaxien [2] (**Abb. 1**). Bei der Analyse der JWST-Daten dieser Galaxien zeigt sich, dass diese „metallarm“ (d. h. wenig Elemente jenseits von Wasserstoff und Helium) und relativ klein sind [3]. Zudem enthalten sie sehr viele Sterne mit einem Alter von weniger als 100 Millionen Jahren, die sehr dicht gepackt sind. Aus diesen ersten Beobachtungen lässt sich schließen, dass die Galaxien schnell und mit intensiven internen Strahlungsfeldern entstanden sind.

Die Analysen aus den zwei Veröffentlichungen [2, 3] beschränken sich lediglich auf vier Galaxien. Photometrisch gelang es bereits, viele weitere hoch-rotverschobene Galaxien nachzuweisen. Aus deren Eigenschaften und Vorkommen leitet sich ab, dass die ersten Galaxien sehr früh und schnell entstanden sein müssen. Das unerwartet hohe Vorkommen hoch-rotverschobener Galaxien weist darauf hin, dass Modelle angepasst oder überdacht werden müssen.

Noch ist es aber zu früh, voreilige Schlüsse zu ziehen und das kosmologische Modell infrage zu stellen [5]. Nicht zuletzt haben Beobachtungen gezeigt, dass das Universum noch ein paar Überraschungen für uns bereithält. So deutete die photometrische Präselektion Ende 2022 auf eine Ga-

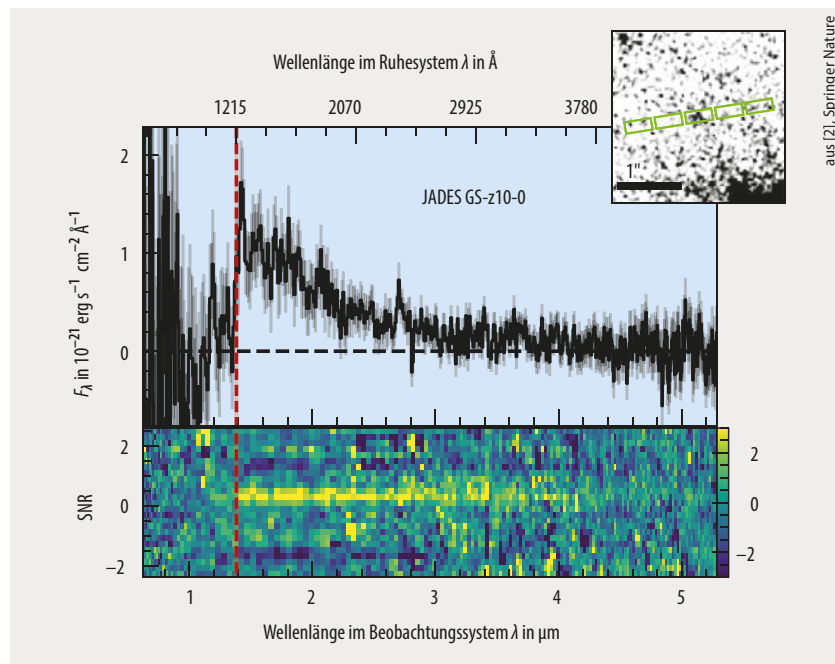


Abb. 1 Eines der vier Spektren der Galaxien mit Rotverschiebung $z > 10$, die für die erste detaillierte spektroskopische Beobachtung der JADES-Durchmusterung ausgewählt wurden. Gezeigt ist das 1D-Spektrum (oben), wobei F_λ die spektrale Flussdichte ist. Das untere Feld ist das 2D-Diagramm des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses (SNR). Die rechten oberen Felder zeigen die Bilder des NIRC2-Filter F444W. Die rote gestrichelte Linie zeigt 1215,67 Å, die Ly- α -Wellenlänge, bei der beobachteten Rotverschiebung z_{1216} .

laxie mit einer Rotverschiebung von $z \sim 16$ hin. Ihre Eigenschaften wie Größe und Leuchtkraft passten allerdings nicht dazu. Spektroskopische Aufnahmen im März 2023 zeigten dann, dass sich die Galaxie bei $z = 4,9$ befindet. Eine besondere Kombination der Rotverschiebung, eines roten Kontinuums der Galaxie und sehr starker Emissionslinien führte dazu, dass $z \sim 16$ überhaupt in Betracht kam [6].

Solche Ereignisse erinnern uns daran, dass das JWST erst ein knappes Jahr im wissenschaftlichen Betrieb arbeitet und dass gerade das Verständnis der allerersten, frühesten Galaxien noch längere Beobachtungen und größere durchmusterter Himmelsvolumina benötigt. Die Ergebnisse des ersten Jahres bestätigen aber das enorme Entdeckungspotenzial dieses Weltraumteleskops, das sicher weitere neue Horizonte eröffnen wird.

Kurzgefasst

In Attosekunden mikroskopieren

Einem Team der Universität Konstanz ist es gelungen, Elektronenmikroskopie mit einer Zeitauflösung von Attosekunden zu realisieren. Dazu versetzte ein Dauerstrichlaser eine 200 nm dicke Siliziummembran in Schwingung. Diese beschleunigte manche Elektronen im Strahl des Mikroskops, andere bremste sie ab, sodass ultrakurze Elektronenpulse entstanden. Ähnlich wie ein Stroboskop erzeugen diese eine Reihe von Standbildern mit Zeitabständen entsprechend der Frequenz des Laserlichts. Das ermöglicht es beispielsweise, die Licht-Materie-Wechselwirkung direkt zu messen.

D. Nabben et al., *Nature* (2023)
DOI: 10.1038/s41586-023-06074-9

Turbo für das Quanteninternet

Eine Forschungsgruppe der Universität Innsbruck hat einen grundlegenden Baustein für Quantenrepeater entwickelt und getestet. Der Netzknoten besteht aus einer Ionenfalle, in der sich zwei $^{40}\text{Ca}^+$ -Ionen befinden. Laserpulse bringen diese in einen angeregten Zustand; beim Zerfall emittieren sie verschränkte Photonen. Diese bringt ein Wandler auf eine Wellenlänge von 1550 nm, die sich bestens im Glasfasernetz ausbreitet. Damit gelang es, Quanteninformation in einer 50 km langen Glasfaser zu transportieren, wobei sich der Repeater genau in der Mitte der Strecke befand.

V. Krutyanskiy et al., *Phys. Rev. Lett.* **130**, 213601 (2023)

- [1] E. P. Hubble, *Realm of the Nebulae*, Yale University Press, New Haven (1936), dt.: *Im Reich der Nebel*, Vieweg, Braunschweig (1938)
- [2] E. Curtis-Lake et al., *Nat. Astron.* **7**, 622 (2023)
- [3] B. E. Robertson et al., *Nat. Astron.* **7**, 611 (2023)
- [4] S. L. Finkelstein et al., *ApJL* **946**, L13 (2023)
- [5] M. Boylan-Kolchin, *Nat. Astron.* (2023), doi:10.1038/s41550-023-01937-7
- [6] P. Arrabal Haro et al., *arXiv*:2303.15431 (2023)

Die Autorin

Dr. Dominika Wylezalek, Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg, Astronomisches Rechen-Institut, Mönchhofstr. 12 – 14, 69120 Heidelberg