

Kaum Zeit für die Entstehung ferner Galaxien

James-Webb-Teleskop liefert unerwartete Beobachtungen

Mit dem James-Webb-Teleskop (JWST) können Forscher seit Kurzem Galaxien in weit entfernten, bislang unzugänglichen Bereichen des Universums untersuchen. Nach dem kosmologischen Standardmodell sollten sich diese in einem viel früheren Entwicklungsstadium befinden als nahe gelegene Exemplare. Die neu entdeckten Galaxien besitzen aber überraschend gut ausgebildete Strukturen und sind sehr leuchtkräftig. Ob das Standardmodell an die neuen Daten angepasst werden kann, erscheint fraglich.

Peter Trüb

Introbild Dieses vom James-Webb-Teleskop aufgenommene Bild zeigt die Galaxiengruppe *Stephans Quintett*. (NASA, ESA, CSA, STScI)

Einleitung

Die riesigen Distanzen im Universum wirken wie eine Zeitmaschine. Das Licht, welches heute bei uns eintrifft, hat zum Teil Distanzen von mehreren Milliarden Lichtjahren zurückgelegt. Als dieses Licht in weit entfernten Galaxien entstand, war das Universum nach dem Urknallmodell viel jünger als heute. Durch die Beobachtung extrem weit entfernter Objekte sehen Kosmologen deshalb die einzigartige Möglichkeit, zu untersuchen, wie das Universum kurz nach dem angenommenen Urknall gestaltet war. Aufgrund der Rückblickzeit erwarten sie, weit entfernte Galaxien in einem viel früheren, ursprünglicheren Stadium anzutreffen. Für deren Untersuchung haben die NASA, die ESA und die CSA das *James-Webb-Teleskop* (JWST) als Nachfolger des *Hubble-Space-Teleskops* (HST)

entwickelt (Abb. 3). Bereits die ersten Beobachtungen, die im Juli 2022 veröffentlicht wurden, lieferten einige Überraschungen (TRÜB 2022).

Aus Schöpfungssicht müssen weit entfernte Galaxien nicht zwingend jünger erscheinen. Nach einem Vorschlag von Jason Lisle könnte der Schöpfungsbericht eine andere Gleichzeitigkeitskonvention verwenden als die übliche Einstein-Konvention (LISLE 2010). Vor dem Start des JWST sagte Lisle deshalb voraus, dass er auch in großen Entfernungen voll ausgebildete Galaxien erwartet (LISLE 2022). Nach einem anderen Schöpfungsmodell (FAULKNER 2013) könnten weit entfernte Galaxien jedoch wie im kosmologischen Standardmodell jünger erscheinen als nahe gelegene. Sowohl gleich alt als auch jünger erscheinende weit entfernte Galaxien sind also grundsätzlich mit einer Schöpfungssicht verträglich.

Sowohl gleich alt als auch jünger erscheinende weit entfernte Galaxien sind grundsätzlich mit einer Schöpfungssicht verträglich.

Da sich das Universum immer weiter ausdehnt, trifft das Licht auf der Erde mit einer Wellenlänge ein, die größer ist als zum Zeitpunkt der Entstehung. Wegen dieses Effekts ist das JWST auf Beobachtungen im Infrarotbereich ausgelegt, sodass es untersuchen kann, wie sehr weit entfernte Galaxien in ihrem Ruhesystem im optischen Bereich aussehen. Die *Rotverschiebung* z eines Objekts gibt an, um welchen Faktor das Licht gestreckt wurde, und nimmt mit dessen Entfernung zu. Das kosmologische Standardmodell beschreibt quantitativ, wie sich das Universum seit dem Urknall ausgedehnt hat und beinhaltet deshalb eine eindeutige Beziehung zwischen Entfernung, Rotverschiebung und Alter des Universums (Abb. 1).

In diesem Artikel steht die Frage im Zentrum, wie gut die Ergebnisse des JWST zum kosmologischen Standardmodell passen und ob dieses allenfalls revidiert werden muss. Für diese Konsistenzprüfung werden viele Elemente des Standardmodells als korrekt vorausgesetzt, wie zum Beispiel die Anteile der Dunklen Energie und der Dunklen Materie an der Energiedichte des

Universums oder die Art und Weise, wie Sterne entstehen und sich im Laufe der Zeit verändern. Sollte sich dieses Modell nicht bewähren, wäre damit nicht automatisch die Vorstellung eines Urknalls widerlegt, da es viele weitere Möglichkeiten gäbe, wie sich das Universum seit dem Urknall ausgedehnt haben könnte.

Räumliche Struktur der Galaxien

Eine grundlegende Eigenschaft von Galaxien ist ihre Morphologie, d. h. ihre räumliche Struktur. Um diese zu bestimmen, werden Aufnahmen mit sehr hoher Winkelauflösung benötigt, die durch Wissenschaftler bzw. automatisierte Algorithmen kategorisiert werden. Die heute gebräuchliche *Hubble-Klassifikation* geht auf eine Publikation von Edwin Hubble im Jahre 1926 zurück, wurde im Laufe der Zeit aber überarbeitet und ergänzt. Dieses Schema ist auch bekannt als sogenannte *Hubble-Sequenz*, die aber nicht als zeitliche Abfolge zu verstehen ist. Gemäß Abb. 2 werden die Galaxien in drei große Gruppen eingeteilt: *Elliptische Galaxien* (links), *Spiralgalaxien* (mittig) und *irreguläre Galaxien* (rechts). Die Gruppe der Spiralgalaxien wird weiter unterteilt in Galaxien mit und ohne Balkenstruktur.

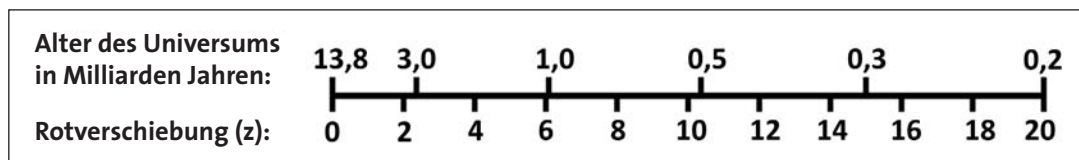


Abb. 1 Zusammenhang zwischen Rotverschiebung z (untere Skala) und Alter des Universums in Milliarden Jahren (obere Skala) gemäß dem kosmologischen Standardmodell ($H_0 = 67,4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0,315$).

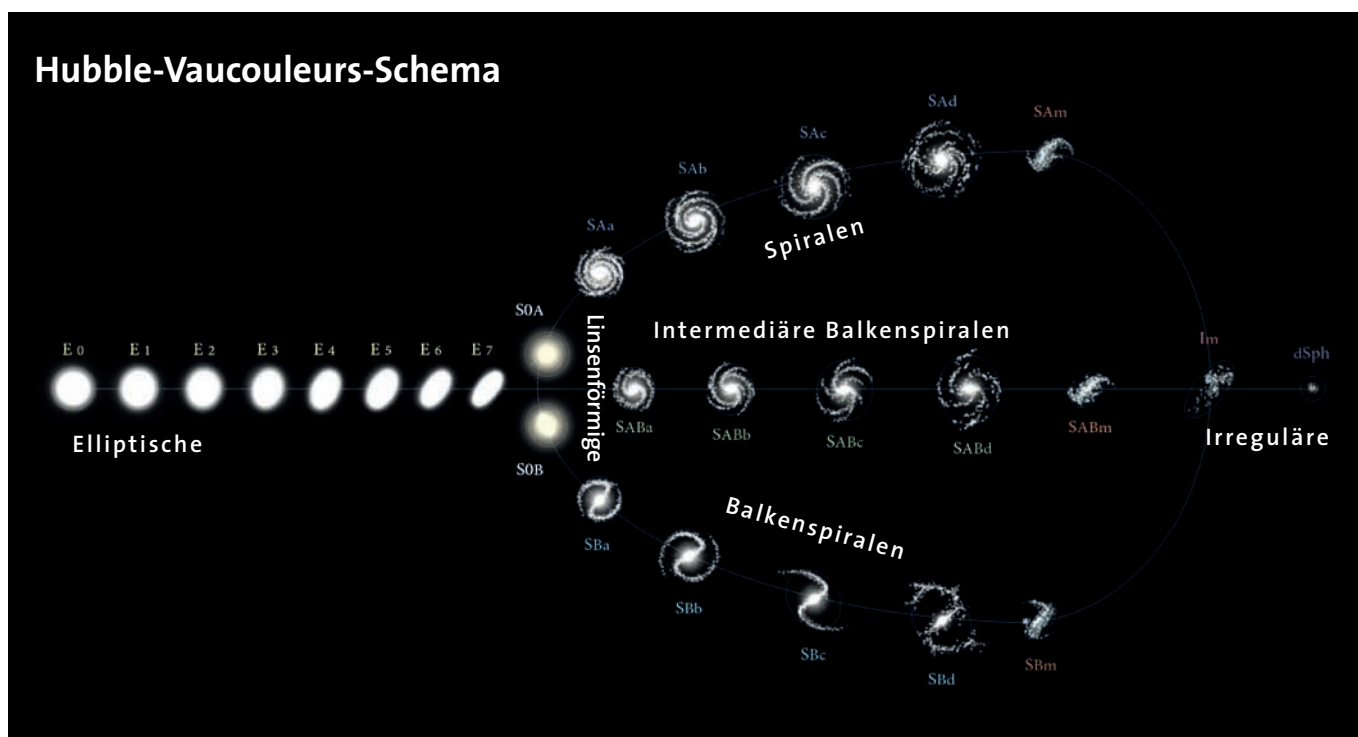


Abb. 2 Klassifikation von Galaxien aufgrund ihrer Morphologie gemäß der Hubble-Sequenz nach DE VAUCOULEURS (1959). (Wikimedia: Cicconorsk, CC-BY-SA-3.0)

Kompakt

Eines der Ziele des James-Webb-Teleskops ist die Erforschung der ersten Galaxien, die sich kurz nach dem angenommenen Urknall gebildet haben sollen. Von diesen sehr weit entfernten Galaxien mit hohen Rotverschiebungen war erwartet worden, dass sie tendenziell klein, leuchtschwach und in ihrer Form irregulär sind. Die unter Voraussetzung des kosmologischen Standardmodells abgeleiteten Größen der neu entdeckten Galaxien entsprechen diesen Erwartungen. Balken- und Spiralstrukturen müssen jedoch viel früher entstanden sein als bisher angenommen. Die größte Überraschung ist jedoch die unerwartet hohe Anzahl sehr leuchtkräftiger Galaxien bei hohen Rotverschiebungen. Um deren Existenz erklären zu können, muss entweder die Sternentstehung kurz nach dem Urknall extrem effizient abgelaufen sein oder das kosmologische Modell muss angepasst werden, damit mehr Zeit für ihre Entstehung zur Verfügung steht. Aus Schöpfungssicht kommt die Entdeckung gut ausgebildeter Galaxien in großen Entfernungen nicht unerwartet.

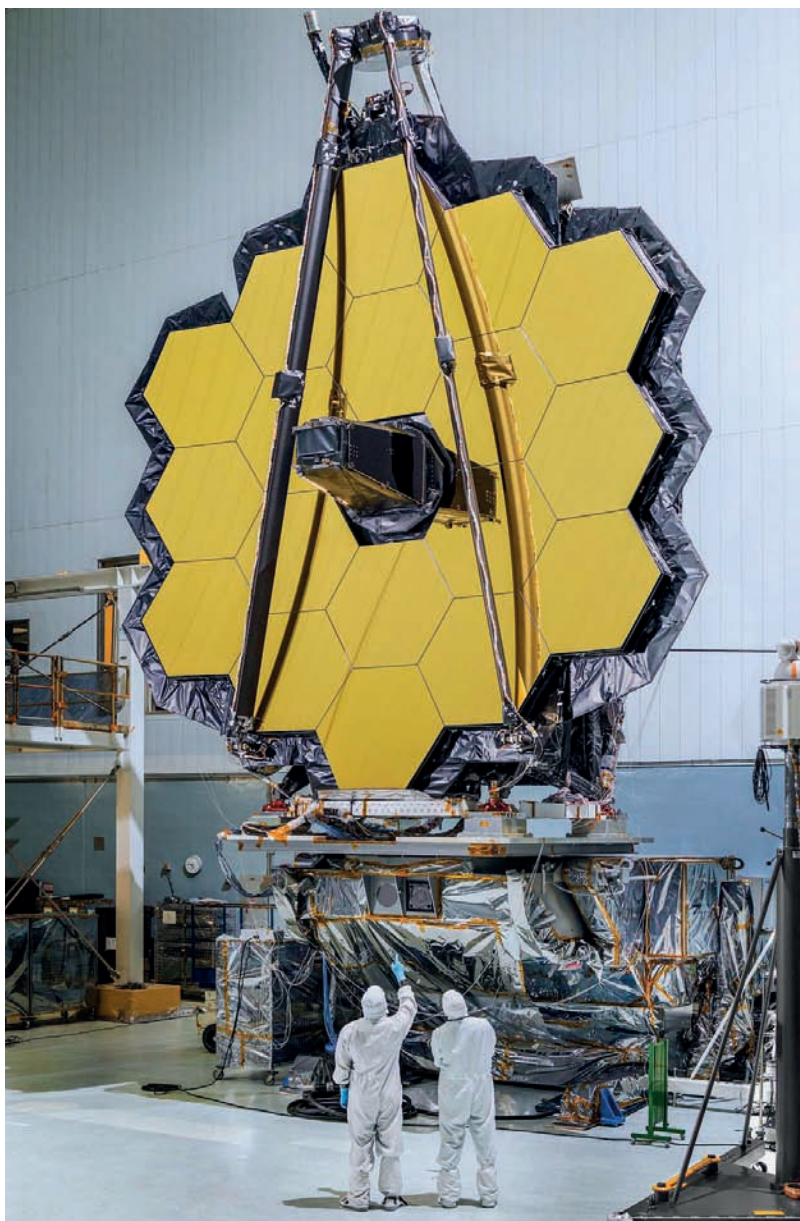


Abb. 3 Zusammenbau des Hauptspiegels des James-Webb-Teleskops im November 2016. Die Fläche des Hauptspiegels beträgt mehr als 25 m² und ist etwa 5,5 mal größer als beim Hubble-Space-Teleskop. (NASA)

Elliptische Galaxien und Spiralgalaxien unterscheiden sich nicht nur bezüglich ihrer Morphologie. Spiralgalaxien besitzen beispielsweise größere Mengen an kaltem Gas und ihr Licht ist insgesamt blauer. Ein detaillierter Vergleich ihrer Spektren mit Sternentwicklungsmodellen ergibt, dass Spiralgalaxien sowohl aus

jungen, blauen als auch aus alten, roten Sternen bestehen (CIMATTI et al. 2020, 4.1.5). Aufgrund der Existenz junger Sterne und der Präsenz kalter Gase als Voraussetzung für Sternbildung werden Spiralgalaxien als sternbildende Galaxien angesehen. Elliptische Galaxien beinhalten hingegen fast ausschließlich rote, alte und metallreiche Sterne und kaum kaltes Gas (CIMATTI et al. 2020, 5.1.3). Sie gelten deshalb als eher passive Galaxien.

Viele Fragen zur Entstehung der verschiedenen Galaxientypen sind noch offen. Gemäß dem kosmologischen Standardmodell entstehen Galaxien in fast kugelförmigen *Halos* aus Dunkler Materie. Für elliptische Galaxien werden zwei Entstehungsmechanismen diskutiert: Durch den Kollaps von Gas in Halos mit niedrigem Drehimpuls oder durch die Kollision und Verschmelzung mehrerer Scheibengalaxien, welche dabei ihre scheibenförmige Geometrie verlieren. Scheibengalaxien ihrerseits sollen aus dem Kollaps von Halos mit höherem Drehimpuls entstehen. In den dabei entstehenden rotierenden Gasscheiben könnten durch Instabilitäten Balken und Spiralarms entstehen (CIMATTI et al. 2020, Kap. 10). Nach diesem Szenario erwartet man, dass kurz nach dem Urknall der Anteil irregulärer Galaxien sehr hoch war und der Anteil an elliptischen Galaxien und Scheibengalaxien dann allmählich zunahm. Da das Verständnis der Entstehung von Galaxien aber vor allem auf semi-analytischen Modellen und numerischen Simulationen beruht, ist es schwierig, dazu präzise quantitative Vorhersagen zu machen.

Analysen von Daten des HST schienen eine Zunahme von irregulären Galaxien bei hohen Rotverschiebungen zu bestätigen. Mit dem HST konnte allerdings wegen der Rotverschiebung die Morphologie von weit entfernten Galaxien nur im UV-Bereich (bezogen auf ihr Ruhesystem) direkt bestimmt werden. Mit Hilfe einer morphologischen Korrektur hat man versucht, daraus die Morphologie im optischen Bereich abzuleiten (CIMATTI et al. 2020, 3.1.1). Wie die neuen Resultate des JWST nun zeigen, führte unter anderem diese Korrektur dazu, dass man den Anteil irregulärer Galaxien deutlich überschätzt hatte (FERREIRA et al. 2023).

Scheibengalaxien und elliptische Galaxien gibt es in viel größeren Distanzen als bisher erwartet.

Die Aufnahmen des JWST zeigen, dass es Scheibengalaxien und elliptische Galaxien in viel größeren Distanzen gibt als bisher erwartet. Ende Dezember 2023 fassten LEE et al. (2023) die Situation so zusammen, dass die Hubble-Sequenz bereits bei Rotverschiebungen von

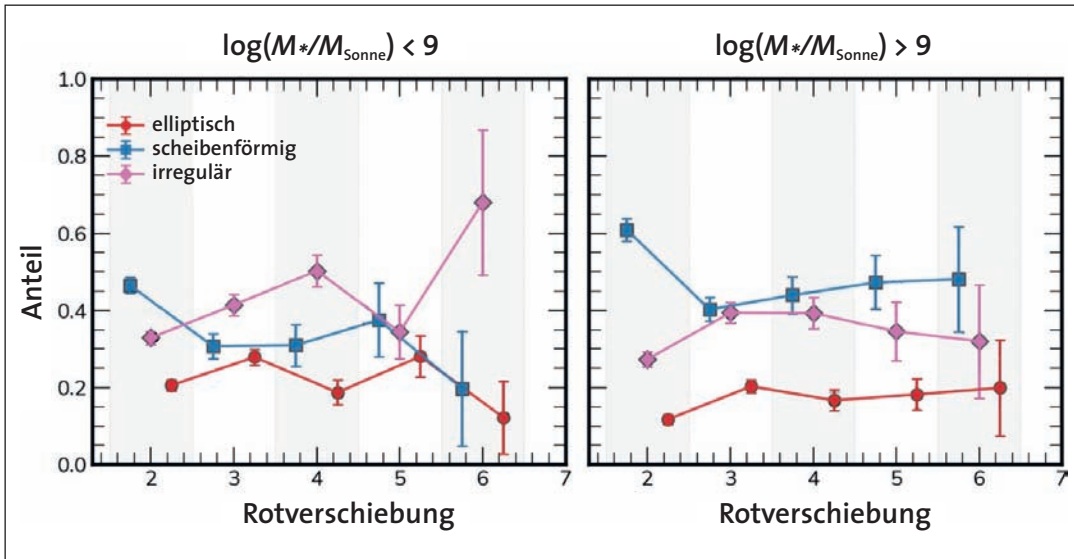


Abb. 4 Anteil der verschiedenen Morphologieklassen in Abhängigkeit der Rotverschiebung für leichte (links) und schwere (rechts) Galaxien. (FERREIRA et al. 2023, CC-BY-4.0)

$z = 8-9$ etabliert gewesen sein muss und nicht erst bei $z = 2$ (CIMATTI et al. 2020, 11.3.1). Damit steht für die Bildung der ersten morphologisch ausgebildeten Galaxien nur noch ein Zeitraum von einigen hundert Millionen Jahren zur Verfügung. Noch keine Einigkeit besteht darüber, wie stark sich die Morphologie der Galaxien über die letzten Milliarden Jahre verändert hat. HUERTAS-COMPANY et al. (2023) stellen eine starke Zunahme von irregulären Galaxien bei Rotverschiebungen $z > 3$ fest. Nach FERREIRA et al. (2023) nimmt der Anteil irregulärer Galaxien auf Kosten der Scheibengalaxien ebenfalls tendenziell zu, allerdings nur bei leichten Galaxien (s. Abb. 4). Nach KARTALTEPE et al. (2023) und LEE et al. (2023) findet keine signifikante Zunahme irregulärer Galaxien bis zu Rotverschiebungen von $z = 7-8$ statt. Eventuell gehen diese Abweichungen auf Unterschiede bezüglich Auswahl der Galaxien, verwendeter Kategorien und Kategorisierungsmethoden zurück.

Trotz einiger Unterschiede sehen KARTALTEPE et al. (2023) ihre Resultate in ermutigender Übereinstimmung mit numerischen Simulationen. Sowohl LEE et al. (2023) als auch FERREIRA et al. (2023) sehen ihre Resultate sogar als Bestätigung von Vorhersagen von Simulationen, obwohl sie zum Teil doch recht unterschiedliche Häufigkeiten für die verschiedenen Galaxientypen angeben. Die kosmologische Simulation *HR5* ergab tatsächlich, dass im Rotverschiebungsbereich $z = 5-7$ Scheibengalaxien die häufigste Art von Galaxien sind (PARK et al. 2022). Dies passt gut zu den Ergebnissen von LEE et al. (2023), aber schlecht zu den Ergebnissen von HUERTAS-COMPANY et al. (2023), welche für $z > 3$ vor allem irreguläre Galaxien finden. Sowohl in Bezug auf die Beobachtungen als auch auf die numerischen Simulationen gibt es also deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Publikationen.

Während das Auftreten von frühen Scheibengalaxien nicht grundsätzlich im Widerspruch zu Simulationen zu stehen scheint, gibt es in Bezug auf manche Unterstrukturen doch Spannungen. In der Zeitschrift *Nature* berichten COSTANTIN et al. (2023) über die Entdeckung einer Balkengalaxie bei einer Rotverschiebung von $z \approx 3$. Balken-Strukturen erwartet man aber eher nicht so früh im Universum, da Gas-Turbulenzen deren Entstehung unterdrückt haben sollten. Die Autoren fassen die Ergebnisse von Simulationen so zusammen, dass ihre Entstehung in einigen Galaxien zwar schon bei $z \approx 4$ begonnen haben könnte, dass aber Simulationen immer noch Schwierigkeiten hätten, Balkengalaxien vor $z > 1,5$ zu reproduzieren. Dies gilt insbesondere für den Bereich geringer Galaxienmassen, in welchen die beobachtete Galaxie mit einer Sternenmasse von etwa $4 \times 10^9 M_{\text{Sonne}}$ fällt (COSTANTIN et al. 2023). KUHN et al. (2023) berichten, dass es bei $z \approx 3$ auch bereits eine überraschend hohe Anzahl an Galaxien mit Spiralarmen gibt und dass diese ebenfalls früher als bisher angenommen entstanden sein müssen. Noch unklar ist, ob die als scheibenförmig klassifizierten Galaxien tatsächlich eine Scheibenform wie unsere Milchstraße haben oder ob es sich dabei um eher längliche, zigarrenförmige Objekte handelt (PANDYA et al. 2023).

Größe der Galaxien

Während die räumliche Struktur von Galaxien bestimmt werden kann, ohne sich auf ein bestimmtes kosmologisches Modell festzulegen, ist dies für die Ermittlung ihrer Größe nicht möglich. Direkt messbar ist lediglich der Winkel, unter dem eine Galaxie am Himmel erscheint. Um ihre Größe zu berechnen, müssen zusätzlich ihre Entfernung sowie die Raumkrümmung des Universums bekannt sein. Für

das kosmologische Standardmodell ergibt sich wegen der Krümmung des Raumes die merkwürdige Situation, dass ab einer Rotverschiebung von $z \approx 1,6$ Galaxien mit zunehmender Entfernung unter immer größer werdendem Winkel erscheinen (CIMATTI et al. 2020, 2.1.4).

Im kosmologischen Standardmodell wird erwartet, dass weit entfernte Galaxien kleiner sind als nahe gelegene. Für sternbildende Galaxien beobachtet man, dass Sterne in den Außenbereichen blauer leuchten und metallärmer sind als im Zentrum. Beides deutet auf jüngere Sternpopulationen hin, was einem Wachsen der Galaxien von innen nach außen entspricht. Auch durch das Verschmelzen von mehreren Galaxien und durch die Akkretion von neuem Gas sollten Galaxien im Laufe der Zeit größer werden (CIMATTI et al. 2020, 11.3.1). Bisherige Auswertungen mit dem HST passten zu dieser Erwartung und Analysen mit dem JWST bestätigen, dass dieser Trend bis zu einer Rotverschiebung von $z = 5,5$ anhält (WARD et al. 2023). Legt man den Daten hingegen ein statisches Modell des Universums zu Grunde, sind weit entfernte Galaxien genau so groß wie nahe gelegene (LOVYAGIN et al. 2022).

Abb. 5 Die UV-Leuchtkraftfunktion in Abhängigkeit der Rotverschiebung im Bereich $z = 4\text{--}16$. Auf der y-Achse aufgetragen ist die Anzahl Galaxien pro Volumen mit einer bestimmten Leuchtkraft M_{UV} . Entgegen den Erwartungen nimmt bei hohen Rotverschiebungen die Anzahl sehr heller Galaxien (stark negative M_{UV} -Werte) nicht mehr weiter ab. (HARIKANE et al. 2023, CC-BY-4.0)

Leuchtkraft der Galaxien

Für die größten Überraschungen in Bezug auf die Eigenschaften weit entfernter Galaxien sorgte die Entdeckung einer großen Anzahl sehr leuchtkräftiger und massereicher Objekte mit hohen Rotverschiebungen. Bereits wenige Wochen nach der Veröffentlichung der ersten Bilder im Juli 2022 sorgte dies für Erstaunen (z. B. YAN et al. 2022) – und die Diskussion

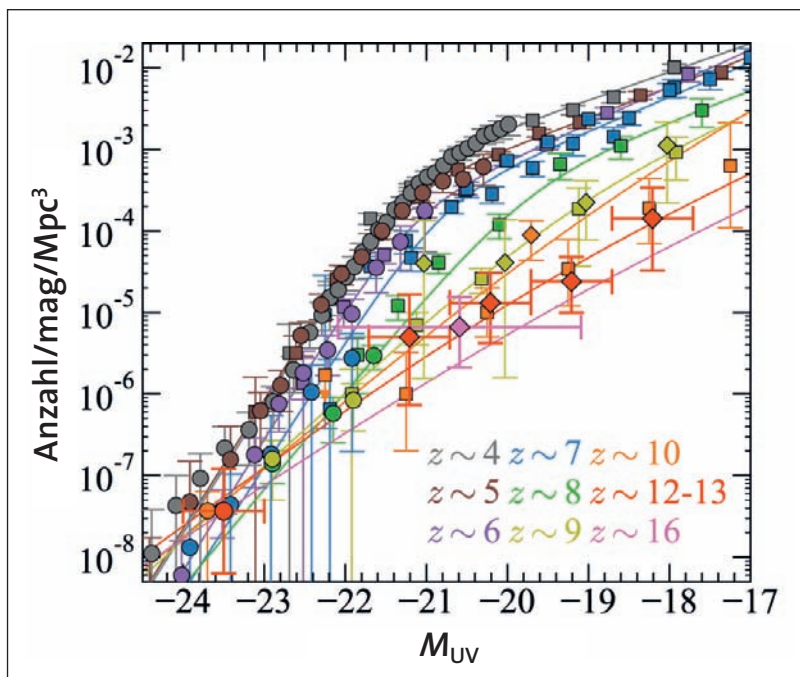
über deren Ursprung dauert nach wie vor an. Aufgrund der Ergebnisse des HST und wegen theoretischer Überlegungen war erwartet worden, dass Galaxien mit einer Rotverschiebung $z > 10$ sehr selten sind. Im Vergleich dazu hat das JWST nun 10–100 mal so viele leuchtkräftige Galaxien bei hohen Rotverschiebungen entdeckt (CHEMERYNSKA et al. 2023). Im kosmologischen Standardmodell stehen für die Entstehung dieser Galaxien nur wenige hundert Millionen Jahre zur Verfügung und es bestehen Zweifel, dass sich massereiche Galaxien derart schnell bilden könnten (MELIA 2023).

Es bestehen Zweifel, dass sich massereiche Galaxien derart schnell bilden könnten.

Die Häufigkeit von Galaxien mit bestimmter Leuchtkraft wird durch die sogenannte *Leuchtkraftfunktion* (engl. *luminosity function*) ausgedrückt. Dabei wird die Anzahl der Galaxien mit einer gegebenen Leuchtkraft innerhalb eines Volumens von 1 Mpc^3 ($1 \text{ pc} \approx 3,26$ Lichtjahre) als Funktion der Leuchtkraft aufgetragen (wobei das Volumen an die jeweilige Ausdehnung des Universums bei einer bestimmten Rotverschiebung angepasst wird). Die *Leuchtkraft* oder *absolute Helligkeit* einer Galaxie wird aus der scheinbaren Helligkeit und der aus der Rotverschiebung abgeleiteten Entfernung berechnet. Für weit entfernte Galaxien ist dies nur unter Voraussetzung eines bestimmten kosmologischen Modells möglich.

Vor dem Start des JWST war erwartet worden, dass die Leuchtkraftfunktion im UV-Bereich bis $z \approx 2$ ansteigt, um dann bei noch höheren Rotverschiebungen kontinuierlich abzunehmen (MASON et al. 2015). Der UV-Bereich der Leuchtkraftfunktion ist von besonderem Interesse, da dieser durch kurzlebige blaue Sterne dominiert wird und deshalb als Maß für die aktuelle Sternbildungsrate gilt. Dies entspricht einem Szenario, in dem die Sternbildungsrate während der ersten Jahrmilliarden nach dem Urknall kontinuierlich zunahm, da die Galaxien durch ihre Schwerkraft immer mehr Gas aufnahmen. Nach etwa vier Milliarden Jahren begann die Sternbildungsrate leicht zu sinken, da allmählich immer weniger kaltes Gas für die Entstehung neuer Sterne zur Verfügung stand.

Abb. 5 zeigt die UV-Leuchtkraftfunktion inklusive der neuen JWST-Ergebnisse im Bereich $z > 9$ von HARIKANE et al. (2023). M_{UV} bezeichnet die Leuchtkraft der Galaxien im UV-Bereich, wobei tiefe Werte für eine hohe Leuchtkraft stehen. Die Anzahl leuchtschwacher Galaxien nimmt mit zunehmender Rot-



verschiebung kontinuierlich ab. Bei den wenigen sehr hellen Galaxien (links im Diagramm) geht die Anzahl bei hohen Rotverschiebungen aber kaum – oder zumindest deutlich weniger – zurück. Die Fehlerbalken sind bei den sehr hohen Rotverschiebungen aufgrund der großen Entfernungen und der noch geringen Anzahl gefundener Galaxien naturgemäß recht groß, alle durchgeführten Studien kommen aber qualitativ zu den gleichen Ergebnissen (z. B. BOUWENS et al. 2023; CHEMERYNSKA et al. 2023).

Mögliche Erklärungsversuche für die hohe Anzahl leuchtkräftiger Galaxien können in drei Gruppen eingeteilt werden. Die erste Möglichkeit besteht darin, dass es sich bei den gefundenen Objekten (1) gar *nicht um sehr weit entfernte Galaxien* handelt. Zweitens (2) wäre es denkbar, dass sich die *physikalischen Rahmenbedingungen im frühen Universum* stark von denen zu späteren Zeiten unterscheiden. Die weitreichendste Option wäre, dass (3) *das kosmologische Standardmodell revidiert werden muss*.

(1) Anhand der ersten Aufnahmen des JWST bestand die Möglichkeit, dass es sich bei den vermeintlich sehr weit entfernten Galaxienkandidaten tatsächlich um näher gelegene Galaxien handelte, deren Rotverschiebung aufgrund ihres durch Staub geröteten Lichts falsch abgeschätzt wurde. Inzwischen durchgeführte Untersuchungen zeigen aber, dass bei der Mehrheit der Galaxienkandidaten die Rotverschiebungen korrekt sind. BUNKER et al. (2023) konnten beispielsweise für etwa 80 % der Galaxienkandidaten die relativ ungenauen photometrischen Rotverschiebungen durch präzise spektroskopische Messungen bestätigen. Nach wie vor offen ist, wie stark genau Galaxienkerne mit aktiven Schwarzen Löchern zur UV-Helligkeitsfunktion beitragen, ein Anteil, der nicht auf eine erhöhte Sternbildungsrate im frühen Universum zurückzuführen wäre (CHEMERYNSKA et al. 2023). HARIKANE et al. (2023) schreiben, dass in ihren Daten wegen der räumlich aufgelösten Morphologie der Galaxienkandidaten der Beitrag aktiver Galaxienkerne kleiner als 10 % sei.

(2) Die meisten Erklärungsversuche der unerwartet hohen UV-Leuchtkraftfunktion gehen von einer physikalischen Ursache aus. Beispielsweise wurde vorgeschlagen, dass die bei einer hohen Sternentstehungsrate auftretende Strahlung Staub aus weit entfernten Galaxien hinausdrängen könnte, sodass sie heller erscheinen (FERRARA 2023). Der Vorteil dieses Lösungsvorschlages ist, dass er sich mit Hilfe der vermehrt verfügbar werdenden spektroskopischen Daten überprüfen lassen sollte. Alternativ könnte es im frühen Universum weniger UV-Strahlung von Galaxien und aktiven Galaxienkernen gegeben

haben, sodass sich das vorhandene Gas weniger aufgeheizt hat und die Sternentstehung deshalb effizienter ablief (DEKEL et al. 2023). Auch wäre es möglich, dass es in der statistischen Variation an Galaxien mit langsamer und schneller Sternentstehung mehr Ausreißer nach oben gibt (MASON et al. 2023). Diese beiden Ideen lassen sich aktuell allenfalls durch theoretische Modellierungen plausibilisieren. Vielleicht war aber auch die erste Generation an Sternen im Durchschnitt etwas schwerer, was zu einer höheren UV-Leuchtkraft pro Sternenmasse führen würde. Damit wären weit entfernte Galaxien zwar sehr hell im UV-Bereich, aber ihre Sternenmasse wäre vereinbar mit bisherigen Modellen zur Entstehung von Galaxien (HARIKANE et al. 2023). Diese Hypothese lässt sich momentan jedoch nicht überprüfen, da es nach wie vor keinen eindeutigen Nachweis für die erste Generation von Sternen gibt, die kurz nach dem Urknall entstanden sein soll.

Masse der Galaxien

(3) Wie bereits angedeutet, ist es weniger die starke Leuchtkraft als vielmehr die hohe Sternenmasse der neu entdeckten Galaxien, die problematisch für das kosmologische Standardmodell ist. Die Gesamtmasse aller Sterne einer Galaxie wird indirekt aus ihrer Leuchtkraft abgeleitet, wodurch sie ebenfalls vom vorausgesetzten kosmologischen Modell abhängig ist (s. o.). Die Leuchtkraft der Galaxie in Abhängigkeit der Wellenlänge wird mit Sternpopulationsmodellen nachgebildet, was eine grobe Abschätzung der Gesamtsternenmasse erlaubt. Dadurch kommen viele systematische Unsicherheiten hinzu, welchen diese Modelle unterliegen. Dazu gehören beispielsweise die initialen Häufigkeiten der Sternmassen oder die Veränderungen des Sternenlichts mit zunehmendem Alter (CIMATTI et al. 2020, 11.1.3).

Den großen Unsicherheiten bezüglich der Sternenmassen von Galaxien stehen die ebenfalls beträchtlichen Ungenauigkeiten der theoretischen und numerischen Vorhersagen bezüglich der Entstehung von Galaxien im kosmologischen Standardmodell gegenüber. Im sogenannten *Dunklen Zeitalter* sollen sich durch den Einfluss der Gravitation die ersten Halos aus Dunkler und baryonischer Materie (aus Atomen aufgebaute Materie) gebildet haben. Etwa 120–180 Millionen Jahre nach dem Urknall könnte sich bei Rotverschiebungen von $z \approx 20$ das Wasserstoffgas genügend abgekühlt haben, sodass aus diesem die erste Generation von Sternen entstehen konnte. Die Strahlung dieser Sterne hätte das Gas allerdings erneut aufgeheizt. Erst nachdem sich

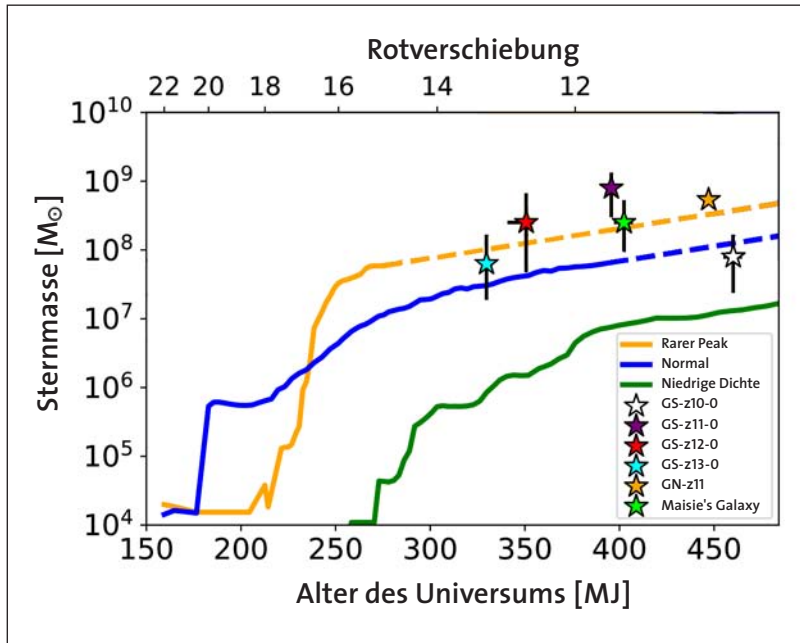


Abb. 6 Entwicklung der massivsten Galaxien in der Renaissance-Simulation in Regionen mit hoher (orange), normaler (blau) und niedriger Dichte (grün). (McCAFFREY et al. (2023), CC-BY-4.0)

das Gas etwa 100 Millionen Jahre später erneut abgekühlt hatte, konnte sich die zweite Generation an Sternen bilden, deren Licht die bisher gefundenen Galaxien dominiert. MELIA (2023) glaubt deshalb, dass die Bestätigung von Galaxienkandidaten mit etwa einer Billion Sonnenmassen bei $z = 16$ – 17 (also bereits 230–250 Millionen Jahre nach dem Urknall) ein signifikantes Problem für das kosmologische Standardmodell wäre.

Das gravitative Wachstum von Materieansammlungen im Universum ist ein nicht-linearer Prozess, der analytisch nicht exakt berechnet werden kann. BOYLAN-KOLCHIN (2023) benutzt eine Näherungsformel, um die maximale Anzahl an Halos mit einer bestimmten Mindestmasse bei gegebener Rotverschiebung abzuschätzen. Im Vergleich zu numerischen Modellen scheint diese Näherung die Anzahl der Halos eher zu überschätzen. Trotzdem kommt er zu dem Schluss, dass die schwersten Galaxienkandidaten im Bereich $z \approx 7$ – 10 nur ganz knapp unterhalb der maximal möglichen Massen liegen. In diesen Galaxien müssten zum Teil mehr als 80% der baryonischen Masse in Form von Sternen vorliegen, wobei dieser Anteil realistischere nur 10–20% betragen sollte (CASEY et al. 2023). Eine spektroskopische Bestätigung dieser Galaxien und ihrer Massen könnte deshalb eine ernste Herausforderung für das kosmologische Standardmodell darstellen (BOYLAN-KOLCHIN 2023). Inzwischen hat eine Gruppe unter Führung der Universität Genf tatsächlich mehrere spektroskopisch bestätigte Galaxien mit einer Rotverschiebung von $z \approx 5$ – 6 gefunden, bei der ebenfalls fast die ganze baryonische Materie in Form von Sternen vorliegen müsste, was die Autoren als Herausforderung für die Entstehungsmodelle von

Galaxien ansehen (XIAO et al. 2023). Auch eine Studie, welche die Anzahl schwerer Galaxien mit Hilfe einer Extremwertanalyse untersucht, findet Spannungen zum kosmologischen Standardmodell (LOVELL et al. 2022).

Bei sehr hohen Rotverschiebungen $z > 10$ scheinen die bislang spektroskopisch bestätigten Galaxienmassen kompatibel mit entsprechenden numerischen Simulationen zu sein. Zu diesem Schluss kommt eine Gruppe, die sechs Galaxien mit Ergebnissen der Simulation *Renaissance* verglichen hat (McCAFFREY et al. 2023). In Regionen hoher Dichte könnte es bereits 400 Millionen Jahre nach dem Urknall einige Galaxien im Massenbereich 10^8 – $10^9 M_{\text{Sonne}}$ gegeben haben (s. Abb. 6). Da aber diese Simulationen nicht mit experimentellen Labordaten kalibriert werden können, sind solche Vergleiche nicht sehr aussagekräftig. Selbst wenn manche ihrer Ergebnisse mit Beobachtungen übereinstimmen, ist unklar, wie akkurat sie die realen physikalischen Prozesse abbilden. Wie MELIA (2023) schreibt, sind die Entscheidungen, welche Funktionen und physikalischen Prozesse zusätzlich in Simulationen eingebaut werden, oft dadurch motiviert, Abweichungen zu den Beobachtungen zu minimieren. Deshalb ist es nicht so erstaunlich, wenn Simulationen zunehmend mit einer immer früheren Entstehung von Galaxien kompatibel sind.

Um die sehr massiven Galaxien bei hohen Rotverschiebungen mit dem kosmologischen Standardmodell zu vereinbaren, wurden verschiedene Anpassungen vorgeschlagen. BOYLAN-KOLCHIN (2023) schreibt, dass Modelle mit Früher Dunkler Energie mit der Bildung von Galaxien bei höheren Rotverschiebungen vereinbar wären (KLYPIN et al. 2021). Wenn es neben der Dunklen Energie im kosmologischen Standardmodell im frühen Universum eine zusätzliche zweite Art von Dunkler Energie gegeben hätte, könnte dies auch erklären, wieso Bestimmungen der Hubble-Konstante im lokalen und im fernen Universum zu unterschiedlichen Werten führen (z. B. RIESS et al. 2019). Auf der anderen Seite tendieren diese Modelle dazu, andere kosmologische Schwierigkeiten zu vergrößern (POULIN et al. 2023). Ein weiterer Vorschlag lautet, dass die Größe des Universums linear mit der Zeit zugenommen habe (MELIA 2023). In diesem Modell wäre das Universum bei $z = 15$ bereits 900 Millionen Jahre alt, womit mehr Zeit für die Entwicklung weit entfernter Galaxien zur Verfügung stehen würde. Allerdings passen die vorhergesagten Häufigkeiten der leichten Elemente nach diesem Modell nicht zu den Beobachtungen (LEWIS et al. 2016).

Schlussfolgerungen

In ihrem Lehrbuch schreiben CIMATTI et al. (2020), dass das Studium der Evolution der Galaxien ein relativ junges und sich rasch wandelndes Fachgebiet ist. Erst Mitte der 1990er-Jahre wurde es mit dem HST und anderen Instrumenten möglich, weit entfernte Galaxien zu untersuchen. Viele Forscher scheinen die Gültigkeit der bisherigen Ergebnisse deutlich überschätzt zu haben, sonst wären sie durch die neuen Resultate des JWST nicht so überrascht worden. Für CIMATTI et al. (2020) galt es beispielsweise als eines der robustesten Resultate, dass sich die Hubble-Sequenz bei $z \approx 2$ herauszubilden begann, was sich nun als falsch herausgestellt hat. Zwar war man sich bewusst, dass die für die HST-Daten benötigte morphologische Korrektur Unsicherheiten mit sich bringt, hat deren Ausmaß aber offenbar unterschätzt. Es ist zu hoffen, dass solche Erfahrungen wieder zu etwas mehr Bescheidenheit in Bezug auf die Verlässlichkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse führen. Dies ist natürlich auch für diejenigen zu beachten, die in den Ergebnissen des JWST nach Inkonsistenzen zum kosmologischen Standardmodell Ausschau halten.

Die Bestimmung vieler Eigenschaften weit entfernter Galaxien ist vom kosmologischen Modell abhängig.

Beim Studium sehr weit entfernter Galaxien ist es wichtig, sich bewusst zu sein, dass viele ihrer Eigenschaften vom kosmologischen Modell abhängig sind. Die Bestimmung ihrer Leuchtkraft, Masse und Größe setzt voraus, dass das kosmologische Standardmodell die Geometrie und Expansion des Raumes korrekt beschreibt. Dass Galaxien bei hohen Rotverschiebungen viel kleiner sind, ist zwar im Rahmen des Standardmodells korrekt, unter Voraussetzung eines *statischen Modells* kommt man aber zu dem Ergebnis, dass weit entfernte Galaxien genau so groß sind wie nahe gelegene. Untersuchungen, wie sich diese modellabhängigen Größen als Funktion der Rotverschiebung verändern, sind wichtig, um Modelle zu entwickeln und ihre Konsistenz zu validieren, aber geben nicht zwingend die realen physikalischen Trends wieder.

Insgesamt zeigen die Resultate des JWST, dass Galaxien im Standardmodell deutlich früher entstanden sein müssen als bisher angenommen. Die Hubble-Sequenz scheint bereits 600 Millionen Jahre nach dem Urknall bestanden zu haben. Spiralen- und Balkengalaxien hat man bei Rotverschiebungen von $z \approx 3$ gefunden, also 2 Milliarden Jahre nach dem Urknall.

Damit steht zur Entstehung dieser Strukturen recht wenig Zeit zur Verfügung, was eine Herausforderung für entsprechende numerische Simulationen ist. Durch den gezielten Einbau neuer physikalischer Effekte hat man solche Erkenntnisse in der Vergangenheit allerdings immer wieder in bessere Übereinstimmung mit den Beobachtungen bringen können.

Die größte Überraschung ist, dass es bereits 300–400 Millionen Jahre nach dem Urknall relativ viele leuchtkräftige Galaxien mit einer Sternenmasse von bis zu einer Milliarde Sonnenmassen gegeben zu haben scheint. Im Rotverschiebungsbereich $z = 5–10$ wurden zudem Galaxien entdeckt, die so schwer sind, dass fast die ganze verfügbare baryonische Materie in Form von Sternen vorliegen müsste. Um die Existenz dieser Galaxien mit dem kosmologischen Standardmodell zu vereinbaren, müssen die physikalischen Rahmenbedingungen und Prozesse im entfernten Universum deutlich anders gewesen sein als in der lokalen, heutigen Umgebung. Grundsätzlich ist das zwar plausibel, aber dass die Effizienz der Sternentstehung wirklich bei fast hundert Prozent gelegen haben soll, erscheint unrealistisch. Deshalb wird auch eine Anpassung des kosmologischen Standardmodells diskutiert, sodass mehr Zeit für die Entstehung der frühesten Galaxien zur Verfügung steht. Dies ist aber gar nicht so einfach, ohne dabei in Konflikt mit anderen Daten zu kommen. Ob dies tatsächlich nötig ist, wird sich zeigen, wenn in der nächsten Zeit für immer mehr Galaxienkandidaten spektrometrische Daten verfügbar werden und vielleicht sogar massereiche Galaxien mit Rotverschiebungen von $z \approx 16$ bestätigt werden. In einem Schöpfungsmodell wie dem von Lisle wären strukturierte, sehr massereiche Galaxien selbst in diesen Distanzen zu erwarten.

Dank. Herzlichen Dank an Dr. Peter Korvaar für seine hilfreichen Verbesserungsvorschläge!

Literatur

- BOUWENS R, ILLINGWORTH G et al. (2023) UV luminosity density results at $z > 8$ from the first *JWST* / NIRCam fields: limitations of early data sets and the need for spectroscopy. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 523, 1009–1035.
- BOYLAN-KOLCHIN M (2023) Stress Testing Λ CDM with High-redshift Galaxy Candidates. *Nature Astronomy* 7, 731–735.
- BUNKER AJ, CAMERON AJ et al. (2023) JADES NIRSpec Initial Data Release for the Hubble Ultra Deep Field: Redshifts and Line Fluxes of Distant Galaxies from the Deepest *JWST* Cycle 1 NIRSpec Multi-Object Spectroscopy (Version 1), arXiv:2306.02467.
- CASEY CM, AKINS HB et al. (2023) COSMOS-Web: Intrinsically Luminous $z \geq 10$ Galaxy Candidates Test Early Stellar Mass Assembly, arXiv:2308.10932.

- CHEMERYNSKA I, ATEK H et al. (2023) JWST UNCOVER: The Overabundance of Ultraviolet-luminous Galaxies at $z > 9$, arXiv:2312.05030.
- CIMATTI A, FRATERNALI F & NIPOTI C (2020) Introduction to galaxy formation and evolution: from primordial gas to present-day galaxies. Cambridge University Press, Cambridge; New York, NY.
- COSTANTIN L, PÉREZ-GONZÁLEZ PG et al. (2023) A Milky Way-like barred spiral galaxy at a redshift of 3. *Nature* 623, 499–501.
- DE VAUCOULEURS G (1959) Classification and Morphology of External Galaxies. In: FLÜGGE S (ed) *Astrophysik IV: Sternsysteme / Astrophysics IV: Stellar Systems* (Bd. 11 / 53, S. 275–310). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- DEKEL A, SARKAR KC et al. (2023) Efficient formation of massive galaxies at cosmic dawn by feedback-free starbursts. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 523, 3201–3218.
- FAULKNER D (2023) A proposal for a new solution to the light travel time problem. *Answers Research Journal* 6, 279–284.
- FERRARA A (2023) Super-early JWST galaxies, outflows and Lyman alpha visibility in the EoR. arXiv:2310.12197.
- FERREIRA L, CONSELICE CJ et al. (2023) The JWST Hubble Sequence: The Rest-frame Optical Evolution of Galaxy Structure at $1.5 < z < 6.5$. *Astrophys. J.* 955, 94.
- HARIKANE Y, OUCHI M et al. (2023) A Comprehensive Study of Galaxies at $z \approx 9$ –16 Found in the Early JWST Data: Ultraviolet Luminosity Functions and Cosmic Star Formation History at the Pre-reionization Epoch. *Astrophys. J. Supplement Series* 265, 5.
- HUERTAS-COMPANY M, IYER KG et al. (2023) Galaxy Morphology from $z \sim 6$ through the eyes of JWST. arXiv:2305.02478.
- KARTALTEPE JS, ROSE C et al. (2023) CEERS Key Paper III: The Diversity of Galaxy Structure and Morphology at $z=3$ –9 with JWST. *Astrophys. J. Lett.* 946, L15.
- KLYPIN A, POULIN V et al. (2021) Clustering and halo abundances in early dark energy cosmological models. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 504, 769–781.
- KUHN V, GUO Y et al. (2023) JWST Reveals a Surprisingly High Fraction of Galaxies Being Spiral-like at $0.5 < z < 4$. arXiv:2312.12389.
- LEE JH, PARK C et al. (2023) Morphology of Galaxies in JWST Fields: Initial distribution and Evolution of Galaxy Morphology. arXiv:2312.04899.
- LEWIS GF, BARNES LA, & KAUSHIK R (2016) Primordial Nucleosynthesis in the $R_h = ct$ cosmology: Pouring cold water on the Simmering Universe. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 460, 291–296.
- LISLE JP (2010) Anisotropic Synchrony Convention – A Solution to the Distant Starlight Problem. *Answers Research Journal* 3, 191–207.
- LISLE JP (2022) The James Webb Space Telescope, <https://biblicalscienceinstitute.com/astronomy/the-james-webb-space-telescope/>.
- LOVELL CC, HARRISON I et al. (2022) Extreme Value Statistics of the Halo and Stellar Mass Distributions at High Redshift: are JWST Results in Tension with Λ CDM? *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 518, 2511–2520.
- LOVYAGIN N, RAIKOV A et al. (2022) Cosmological Model Tests with JWST. *Galaxies* 10, 108.
- MASON CA, TRENTI M, & TREU T (2015) The Galaxy UV Luminosity Function Before the Epoch of Reionization. *Astrophys. J.* 813, 21.
- MASON CA, TRENTI M, & TREU T (2023) The brightest galaxies at cosmic dawn. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 521, 497–503.
- MCCAFFREY J, HARDIN S et al. (2023) No Tension: JWST Galaxies at $z > 10$ Consistent with Cosmological Simulations. *The Open Journal of Astrophysics* 6, 10.21105/astro.2304.13755.
- MELIA F (2023) The cosmic timeline implied by the JWST high-redshift galaxies. *Mon. Not. R. Astron. Soc. Letters* 521, L85–L89.
- PANDYA V, ZHANG H et al. (2023) Galaxies Going Bananas: Inferring the 3D Geometry of High-Redshift Galaxies with JWST-CEERS (Version 1), arXiv:2310.15232.
- PARK C, LEE J et al. (2022) Formation and Morphology of the First Galaxies in the Cosmic Morning. *Astrophys. J.* 937, 15.
- POULIN V, SMITH TL, & KARWAL T (2023) The Ups and Downs of Early Dark Energy solutions to the Hubble tension: a review of models, hints and constraints circa 2023. arXiv:2302.09032.
- RIESS AG, CASERTANO S et al. (2019) Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics beyond Λ CDM. *Astrophys. J.* 876, 85.
- TRÜB P (2022) Überraschende erste Beobachtungen des James-Webb-Teleskops. *Stud. Integr. J.* 29, 120–121.
- WARD EM, DE LA VEGA A et al. (2023) Evolution of the Size-Mass Relation of Star-forming Galaxies Since $z=5.5$ Revealed by CEERS. arXiv:2311.02162.
- XIAO M, OESCH P et al. (2023) Massive Optically Dark Galaxies Unveiled by JWST Challenge Galaxy Formation Models. arXiv:2309.02492.
- YAN H, MA Z et al. (2022) First Batch of Candidate Galaxies at Redshifts 11 to 20 Revealed by the James Webb Space Telescope Early Release Observations, arXiv:2207.11558.

Anschrift des Verfassers:

Peter Trüb, SG Wort und Wissen,

Peter-Stein-Str. 4, 72250 Freudenstadt;

E-Mail: peter.trueb@wort-und-wissen.de