Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 81 (2023)
Heft: 2

Artikel: Auf der Spur der ersten Galaxien
Autor: Vonarburg, Barbara
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1049485

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Man nennt sie «Grüne Erbsen»

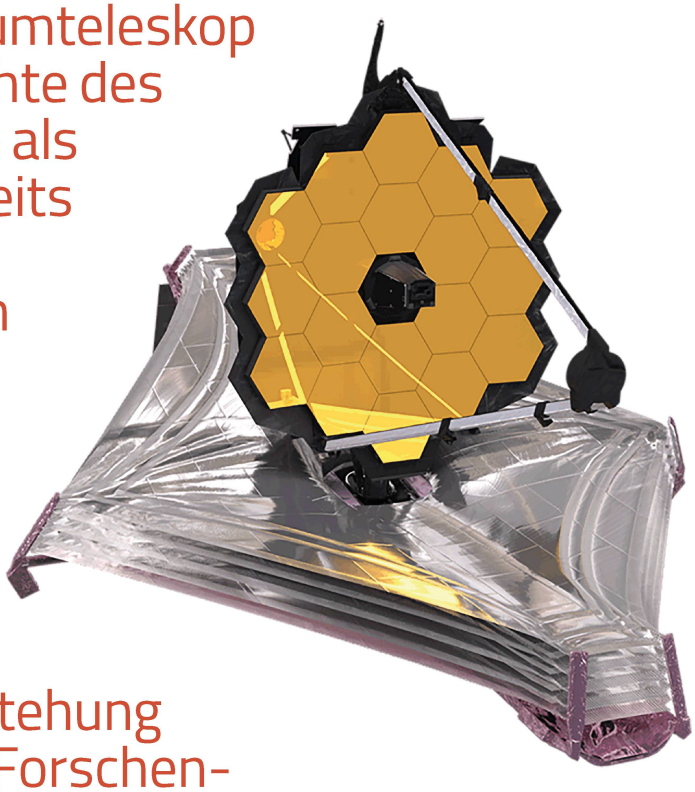
Auf der Spur der ersten Galaxien

von Barbara Vonarburg

Abell 2744 ist das Beobachtungsziel des «UNCOVER»-Programms, das von einem internationalen Team durchgeführt wird. Auf dem Bild, aufgenommen vom James-Webb-Weltraumteleskop, sind schätzungsweise 50'000 Infrarot-Quellen zu sehen. Die hellen, weissen, von einem diffusen Nebel umgebenen Quellen sind die Galaxien des Pandora-Haufens, die als Gravitationslinse wirken und viel weiter entfernte Lichtquellen sichtbar machen. Diese erscheinen auf dem Bild rot und oft als längliche Bögen, weil sie durch die Gravitationslinse verzerrt werden. Bei vielen dieser Quellen handelt es sich um Galaxien aus dem frühen Universum.

Bild: NASA, ESA, CSA, I. Labbe (Swinburne University of Technology), R. Bezanson (University of Pittsburgh), A. Pagan (STScI)

Das James-Webb-Weltraumteleskop kann weiter in die Geschichte des Universums zurückblicken als bisher möglich. Es hat bereits Hunderte von Galaxien gefunden, die in der ersten Milliarde Jahren nach dem Urknall entstanden sind, darunter viele sogenannte «Green Peas» – grüne Erbsen. Diese kompakten Galaxien mit ihrer intensiven Sternentstehung sind ein Spezialgebiet der Forschenden an der Universität Genf.



Als das Universum mit dem Urknall vor 13.8 Milliarden Jahren seinen Anfang nahm, war es in einer ersten Phase ungeheuer heiss. Es bestand aus einem dichten Plasma aus geladenen Teilchen, bis es sich nach etwa 380'000 Jahren genügend ausgedehnt und abgekühlt hatte, so dass sich aus den Elektronen, Protonen und Neutronen neutrale Wasserstoff- und Heliumatome formen konnten. Noch bevor die ersten Sterne entstanden, durchlief das Universum eine Zeitspanne, welche die Fachleute als dunkles Zeitalter bezeichnen. Denn das neutrale Gas absorbierte Licht wie ein dichter Nebel. Dies änderte sich erst, als energiereiche Strahlung die intergalaktischen Wasserstoffatome wieder in Elektronen und Protonen aufspaltete, also wieder ionisierte. Dieser Prozess wird denn auch kosmische Reionisation genannt.

«Die ersten Sterne und Galaxien entstanden und wuchsen in den ersten paar hundert Millionen Jahren nach dem Urknall», sagt *Daniel Schaerer*, Professor an der Universität Genf: *«Eine Milliarde Jahre nach dem Urknall war die Phase der Reionisation abgeschlossen.»* Doch welche Quellen lieferten damals die ungeheuren Energiemengen, die es zur Reionisation der intergalaktischen Materie brauchte? Diese Frage wird seit langem heftig debattiert. *Schaerers* vielversprechendste Kandidaten tragen einen Namen, der nicht gerade Grosses erahnen lässt: «Green Pea Galaxies», auf Deutsch Grüne-Erbsen-Galaxien.

DAS FRÜHE UNIVERSUM IST VOLLER GRÜNER ERBSEN

Entdeckt wurden diese Sternsysteme erstmals im Jahr 2007 von Amateurforschenden, die im Rahmen des Citizen-Science-Projekts «Galaxy Zoo» halfen, Galaxien in einer Online-Datenbank zu klassifizieren. Sie stiessen dabei auf eine Anzahl Objekte, die durch ihre geringe Grösse und ihre leuchtend grüne Farbe auffielen und tauften

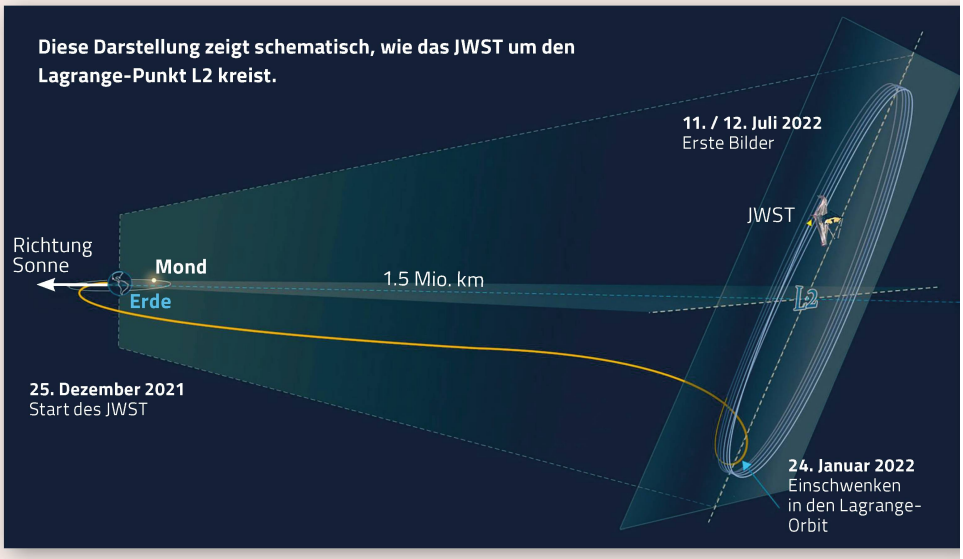
ASTRONOMIE EINFACH ERKLÄRT!

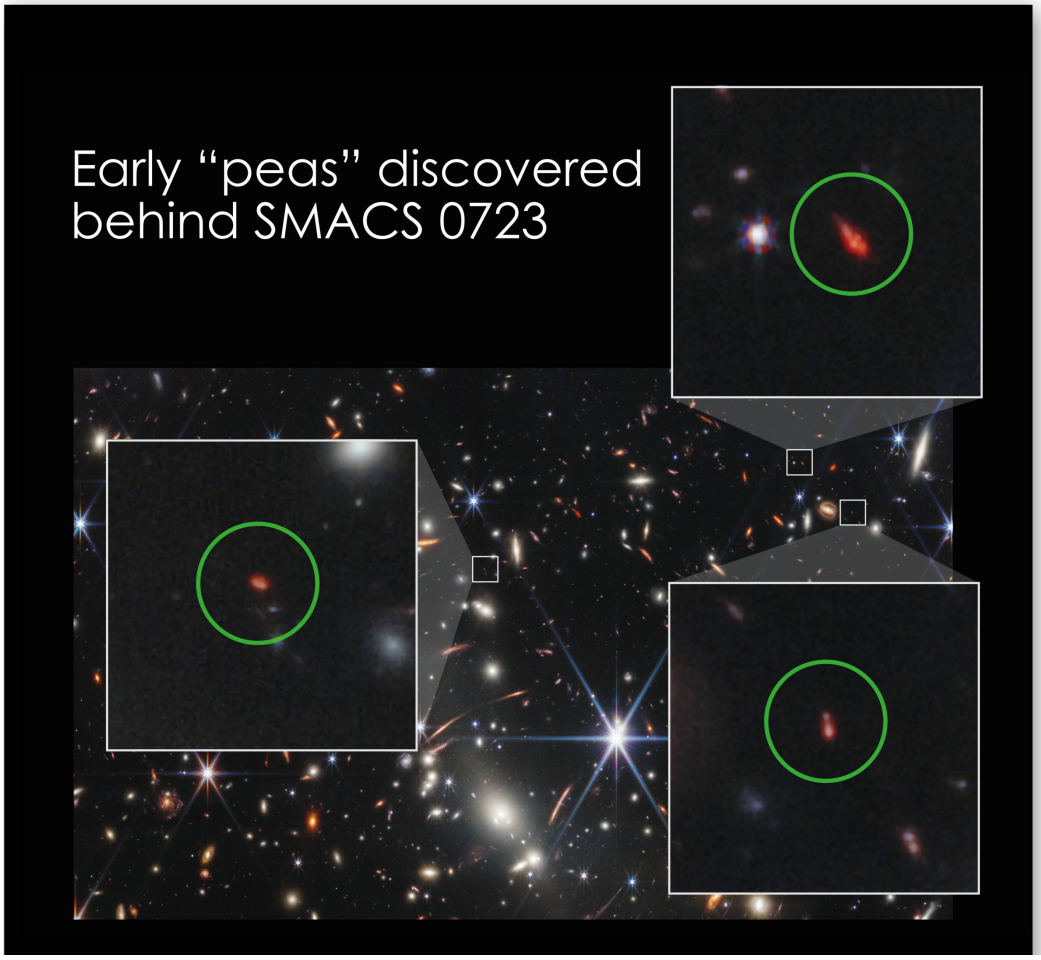
Warum kreist das JWST im Langrange-Punkt L2?

Das James Webb-Teleskop kreist bekanntlich nicht wie das Hubble-Weltraumteleskop in einem Orbit um die Erde. Man hat es ca. 1.5 Millionen km weit von der Erde im sogenannten Lagrange-Punkt 2 [L2] positioniert. Dieser befindet sich in der Verbindungslinie Sonne – Erde, respektive in dessen Verlängerung. Streng genommen befindet sich das Teleskop aber nicht genau an diesem Punkt, sondern auf einer Bahn um ihn herum. Diese Bahn ist dabei grösser als die Bahn des Mondes um die Erde! Dieser Punkt bietet für Weltraumteleskope einen wesentlichen Vorteil, da ein Körper beim Umlauf um die Sonne die Orientierung in Bezug zur Erde beibehält. Seit dem 24. Januar 2022 befindet sich das JWST in einem sogenannten «Halo-Orbit» um diesen Punkt.
Die Lagrange-Punkte werden auch Librationspunkte genannt, abgeleitet vom lateinischen Begriff libra «Waage» oder *librare*, was so viel heisst wie «das Gleichgewicht halten». In einem Zweikörpersystem wie Erde und Sonne gibt es fünf solcher Punkte. Am ehesten stellt man sich diese Punkte wie Wellenberge oder Wellentäler vor. Einst hat jemand dies wie ein Herbstblatt in einem Wasserstrudel verglichen, das dort unendlich lange seine Kreise zieht, ohne dass irgendeine äussere Kraft es beeinflusst.

Das JWST braucht für eine Runde sechs Monate und entfernt sich dabei bis zu 800'000 km vom L2. Diese Bahn ist so berechnet, dass immer nur sehr wenig Schub aus den Steuerdüsen nötig ist, um das Teleskop auf korrektem Kurs zu halten. Nach den Keplerschen Gesetzen müsste James Webb in grösserer Entfernung von der Sonne langsamer als die Erde um die Sonne ziehen und daher allmählich hinter unserem Planeten zurück bleiben. Doch das Zusammenspiel der Kräfte am L2 führt dazu, dass auch das JWST in genau einem Jahr die Sonne umkreist. Das Teleskop tanzt gewissermassen durch das All. Während es im Gleichschritt mit der Erde um die Sonne zieht, macht es alle sechs Monate eine Runde um den Lagrange-Punkt und blickt dabei in die Tiefen des Weltalls.

Diese Darstellung zeigt schematisch, wie das JWST um den Lagrange-Punkt L2 kreist.





Der Galaxienhaufen SMACS 0723 aufgenommen mit dem James-Web-Weltraumteleskop. Die drei eingekreisten Objekte sind weit entfernte Galaxien, die durch den davor liegenden Galaxienhaufen vergrössert und verzerrt wurden. Sie gleichen den «Green Pea Galaxies», den Grüne-Erbsen-Galaxien, die auch im lokalen Universum vorkommen, aber hier sehr selten sind.

Bild: NASA, ESA, CSA, and STScI

diese neue Klasse von Galaxien deshalb auf den Namen «Green Peas». Maschinelle Detektionsalgorithmen hatten die kompakten Objekte zuvor irrtümlich als Sterne klassifiziert. Die «Green Peas» sind zwar rund zwanzigmal kleiner als unsere Milchstrasse und haben hundertmal weniger Masse, doch sie produzieren Sterne etwa hundertmal schneller, als man aufgrund ihrer Masse erwarten würde. *«Im heutigen Universum sind diese Objekte sehr selten, im frühen Universum sind sie hingegen die Norm, wie die Beobachtungen mit dem James-Webb-Teleskop klar zeigen»,* sagt *Schaerer*: *«Die typische Galaxie 500 Millionen bis eine Milliarde Jahre nach dem Urknall ist eine Green Pea.»*

Mit dem Hubble-Teleskop hat *Schaerers* Gruppe im Rahmen eines internationalen Teams Galaxien dieser Klasse im lokalen Universum bereits früher untersucht und dabei im Jahr 2016 eine interessante Entdeckung gemacht: Bei der starken Sternentstehung wird UV-Strahlung produziert, die so intensiv ist, dass ein Teil davon die Galaxie verlassen kann. *«Auch in einer normalen Galaxie entsteht UV-Strahlung»,* erklärt der Astrophysiker: *«Deren Photonen haben genug Energie, um lokal den Wasserstoff zu ionisieren und so die schönen Nebulae zu erzeugen.»* Entweichen können diese Photonen aus einer Galaxie wie unserer Milchstrasse aber nicht. Anders bei den «Green Peas». Die Hubble-Daten zeigten, dass diese Galaxien tatsächlich ionisierende Photonen mit einer ungeheuren Intensität ausstossen.

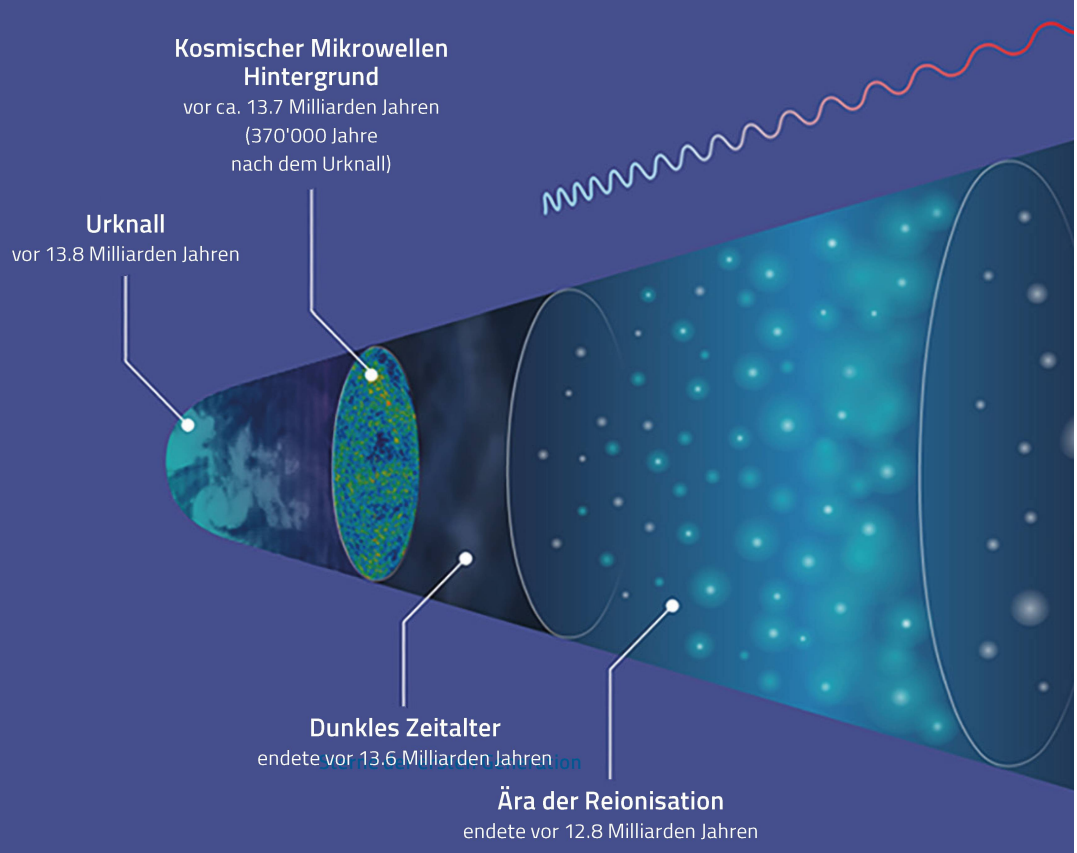
PROBLEM FAST GELÖST

«Wenn es im frühen Universum viele dieser «Green Peas» gibt und sie denjenigen gleichen, die wir mit dem Hubble-Teleskop im lokalen Universum untersucht haben, dann haben wir das Problem der kosmischen Reionisation gelöst», sagt der Astrophysiker. Um das gesamte intergalaktische Medium zu reionisieren, müssten im Durchschnitt zehn bis zwanzig Prozent der in den Grüne-Erbsen-Galaxien produzierten UV-Strahlung

ASTRONOMIE EINFACH ERKLÄRT!

Reionisierungsepoche

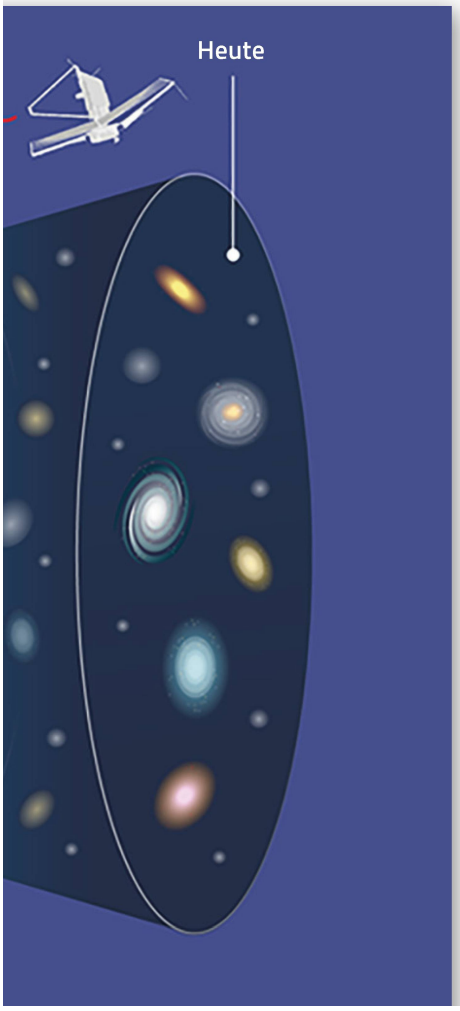
Direkt nach dem Urknall waren die Temperatur und die Energie einzelner Teilchen so hoch, dass Teilchen nicht miteinander interagieren konnten; Protonen und Elektronen existierten nebeneinander. Erst ca. 380'000 Jahre nach dem Urknall kühlte das Universum soweit ab, dass Elektronen von Protonen eingefangen wurden. Aus diesem Prozess entstanden die Wasserstoff- und Heliumatome; das Universum wurde «neutral». Aus diesen Atomen konnten sich die ersten Sterne bilden. Diese regten das neutrale kosmische Wasserstoffgas an. Diese Epoche wird daher «Phase der Reionisation» bezeichnet. Das übrige neutrale Gas wird heute als «Kosmisches Netz» bezeichnet, aus dem vermutlich die ersten Galaxien entstanden.



«IM HEUTIGEN UNIVERSUM SIND DIESE OBJEKTE SEHR SELTEN, IM FRÜHEN UNIVERSUM SIND SIE HINGEGEN DIE NORM» DANIEL SCHAERER

ins Universum entweichen. Mit weiteren James-Webb-Beobachtungen will man nun die Spektren der frühen Galaxien messen und versuchen abzuschätzen, wie viel ionisierende Strahlung in den Objekten selbst absorbiert und wie viel ausgestossen wird. *«Bis jetzt sieht alles gut aus, aber es braucht noch mehr Daten»,* sagt *Schaerer.*

Er selbst leitet ein Programm, das die Grundlage für eine bessere Interpretation der Daten aus dem frühen Universum liefern soll. Denn wieviel UV-Strahlung aus den Galaxien entweicht, lässt sich während der Reionisation in den ersten Milliarde Jahren aus fundamentalen Gründen nur indirekt bestimmen. Schaerer und sein international zusammengesetztes Team untersuchen nun mit dem James-Webb-Teleskop Galaxien in einer Entfernung, die der Zeit zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall entspricht. Diese Beobachtungen wollen die Forschenden mit den Daten vergleichen, die sie bei «Green Peas» zehn Milliarden Jahre nach dem Urknall bereits gesammelt haben. *«Wenn wir feststellen, dass das, was bei zehn Milliarden Jahren geschieht, auf die gleiche Weise auch bei zwei Milliarden Jahren passiert, dann können wir die von uns entwickelten*



Schematisches Diagramm zur Entwicklung des Universums. Das Universum befand sich in einem neutralen Zustand ab rund 400'000 Jahren nach dem Urknall bis zu dem Zeitpunkt, als energiereiche Strahlung begann, den Wasserstoff zu ionisieren. Eine Milliarde Jahre nach dem Urknall war die Reionisation abgeschlossen. Das Diagramm ist nicht massstabsgetreu.

Quelle: NASA, ESA, Joyce Kang (STScI) oder NAOJ

ASTRONOMIE EINFACH ERKLÄRT!

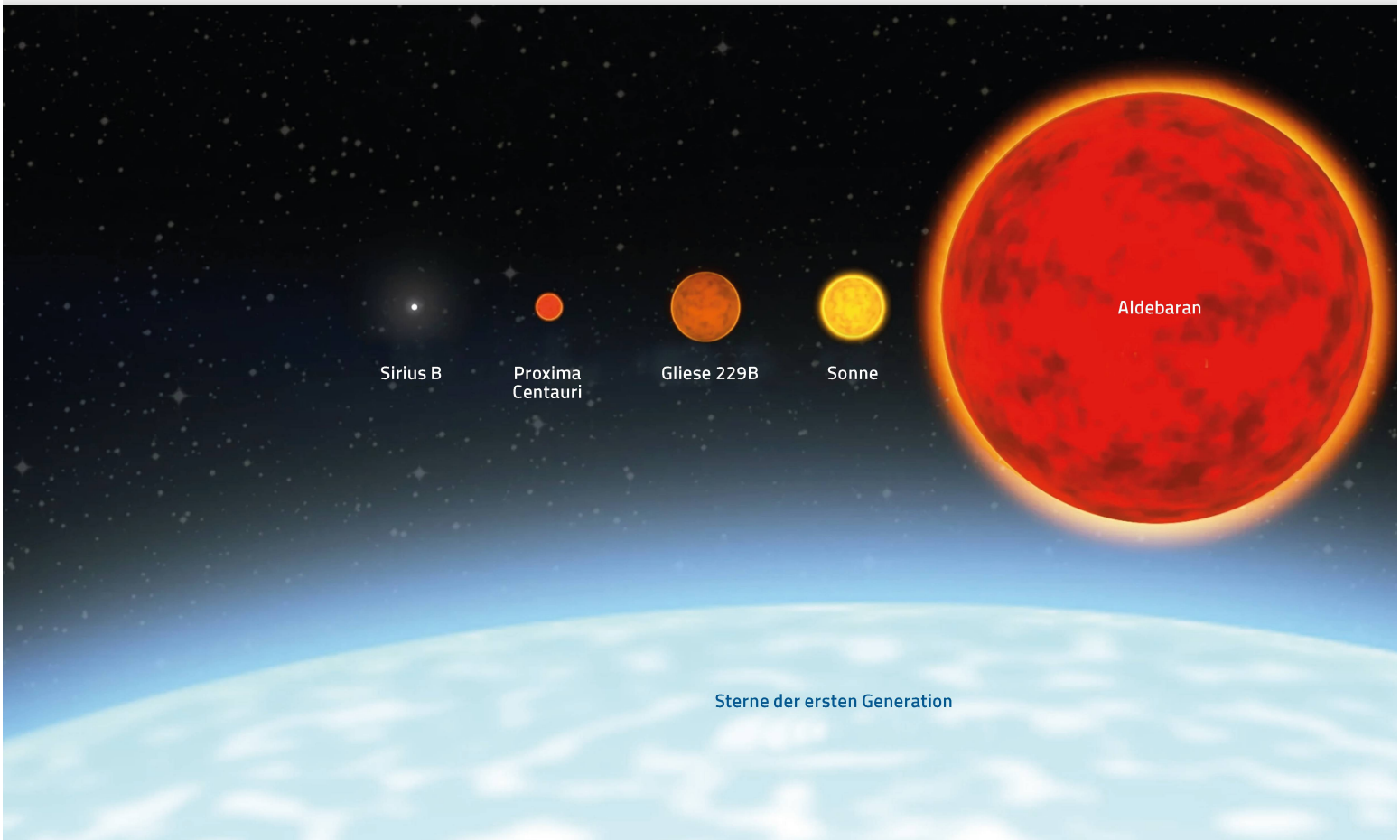
Galaxien, die es gar nicht geben dürfte

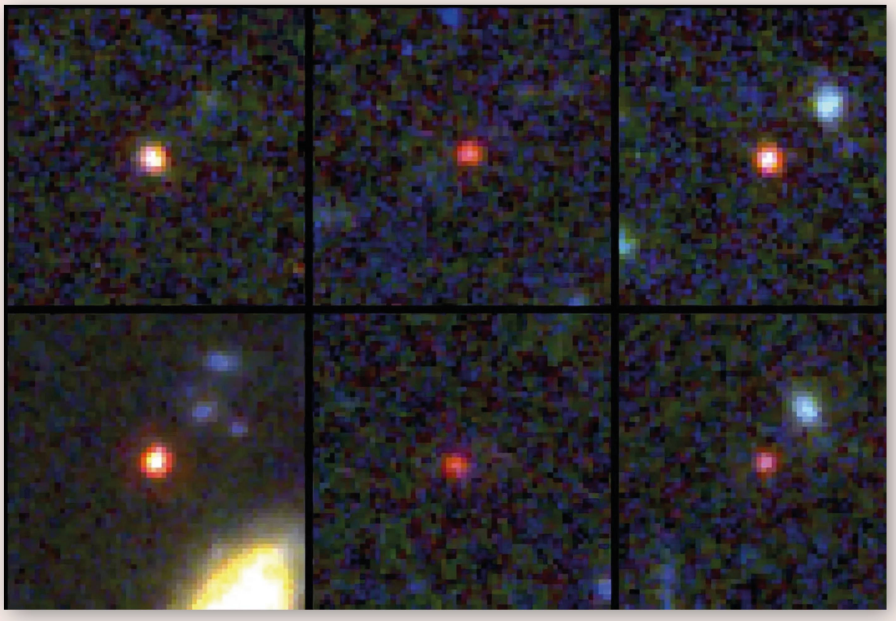
Astronomen haben mit dem James-Webb-Teleskop Galaxien entdeckt, die für ihr Alter viel zu massereich sind. Konkret handelt es sich um sechs Galaxien aus der Frühzeit des Universums, die gemäss heute gängiger Theorien so gar nicht existieren dürften. Natürlich stellt sich in diesem Zusammenhang die drängende Frage: Braucht es eine fundamental neue Physik oder müssen aktuelle Modelle grundlegend neu überdacht werden, wie manche glauben?
Die Astronomen gingen bislang davon aus, dass sich die ersten Sterne erst rund 400 Millionen Jahre nach dem Urknall bildeten. In diesem Stadium dehnte sich das Universum innert kürzester Zeit extrem schnell aus. Stabile Atome konnten sich erst nach etwa 300'000 bis 400'000 Jahren bilden. Während des sogenannten «dunklen Zeitalters» mussten sich die Gase erst abkühlen. Erst jetzt konnten sich die ersten Sterne bilden, und rund 1 Milliarde Jahre nach dem Urknall Galaxien aus Sternen, Gas- und Staubwolken formieren, die immer grösser und massereicher wurden; so die Theorie.
Nun haben Forscher auf Bildern des James Webb Teleskops vom vergangenen Juli rote Punkte entdeckt, die auf Galaxien hindeuten, die ungewöhnlich gross und hell sein müssen. Das rote Licht deutet darauf hin, dass es sich um sehr alte Objekte handeln muss. Wir sprechen von der Rotverschiebung, denn wie Schallwellen werden auch Lichtwellen aufgrund der Ausdehnung des Universums gedehnt, wodurch sie rötlich erscheinen.
Die brennende Frage stellt sich nun, wie sich so kurz nach dem Urknall, also nach etwa 500 bis 700 Millionen Jahre, Galaxien mit rund zehn Milliarden Sonnenmassen bilden konnten. Sie sollen bereits 100 Mal mehr Masse haben, als man für dieses frühe Stadium des Universums vermutete. Eine mögliche Erklärung für diese merkwürdigen Galaxien wäre, dass die Materie-Dichte im jungen Universum etwa zwei- bis fünfmal grösser gewesen sein könnte als bisher angenommen. Möglich ist aber auch, dass die Galaxien auf eine andere, bisher unbekannte Weise entstanden sein könnten. Derzeit werden Folgemessungen durchgeführt, um einerseits zu bestätigen, dass es sich bei den beobachteten Punkten tatsächlich um Galaxien handelt, und andererseits, um alternative Erklärungen auszuschliessen. Obwohl die Daten darauf hindeuten, dass es sich wahrscheinlich um Galaxien handelt, kursieren weitere Theorien, etwa, dass sich einige dieser Objekte als supermassereiche Schwarze Löcher entpuppen.

Methoden auch auf den Zeitraum von 500 Millionen bis eine Milliarde Jahre nach dem Urknall ausdehnen», fasst *Schaerer* zusammen: *«Das hört sich zwar etwas technisch an, wir werden daraus aber viel lernen können.»*

WARTEN AUF SPEKTROSKOPISCHE MESSUNGEN

Generell entdeckte das James-Webb-Teleskop im frühen Universum viel mehr und hellere Galaxien als erwartet, darunter einige mit mehr als zehn Milliarden Sonnenmassen. *«Wie innerhalb einer astronomisch kurzen Zeit von nur ein paar Millionen*



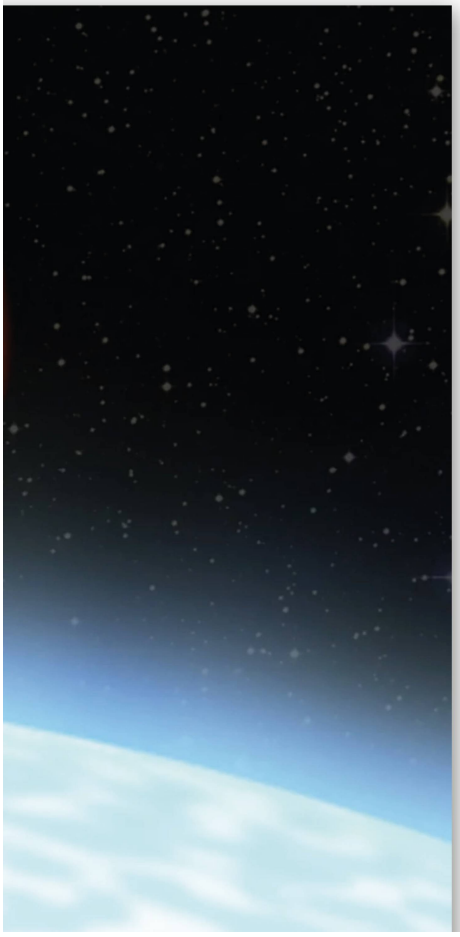


Die sechs roten Punkte könnten Galaxien aus der Frühzeit des Universums sein. Die unten links abgebildete Galaxie dürfte so viele Sterne enthalten wie unsere eigene Milchstrasse.

Bild: NASA / ESA

Jahren so viele Sterne produziert werden konnten, weiss man bisher nicht», sagt *Schaerer*. Dass man deshalb aber gleich das kosmologische Standardmodell ersetzen muss, glaubt er nicht. Denn noch gibt es grosse Unsicherheiten in den Daten (siehe Interview mit *Robert Feldmann*). Gespannt warten die Astrophysiker und Astrophysikerinnen auf die Messung der Spektren der Galaxien, die eine genaue Entfernungsbestimmung erlaubt.

Wo bereits spektroskopische Messungen gemacht wurden, zeigen diese, dass in den sehr weit entfernten, frühen Galaxien neben Wasserstoff und Helium auch bereits



Die grössten Sterne im heutigen Universum sind ein paar hundert Mal massereicher als unsere Sonne. Die ersten Sterne könnten bis zu 100'000 Sonnenmassen gehabt haben.

Quelle: Merrill Sherman/Quanta Magazine

Vergleich J122052+491255 und 04590: Die Grüne-Erbse-Galaxie (links) wurde vom «Sloan Digital Sky Survey» aufgenommen und befindet sich 170 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Das Infrarot-Bild (rechts) zeigt eine Grüne Erbse, entdeckt vom James-Webb-Weltraumteleskop. Ihr Licht brauchte 13.1 Milliarden Jahre, um uns zu erreichen.

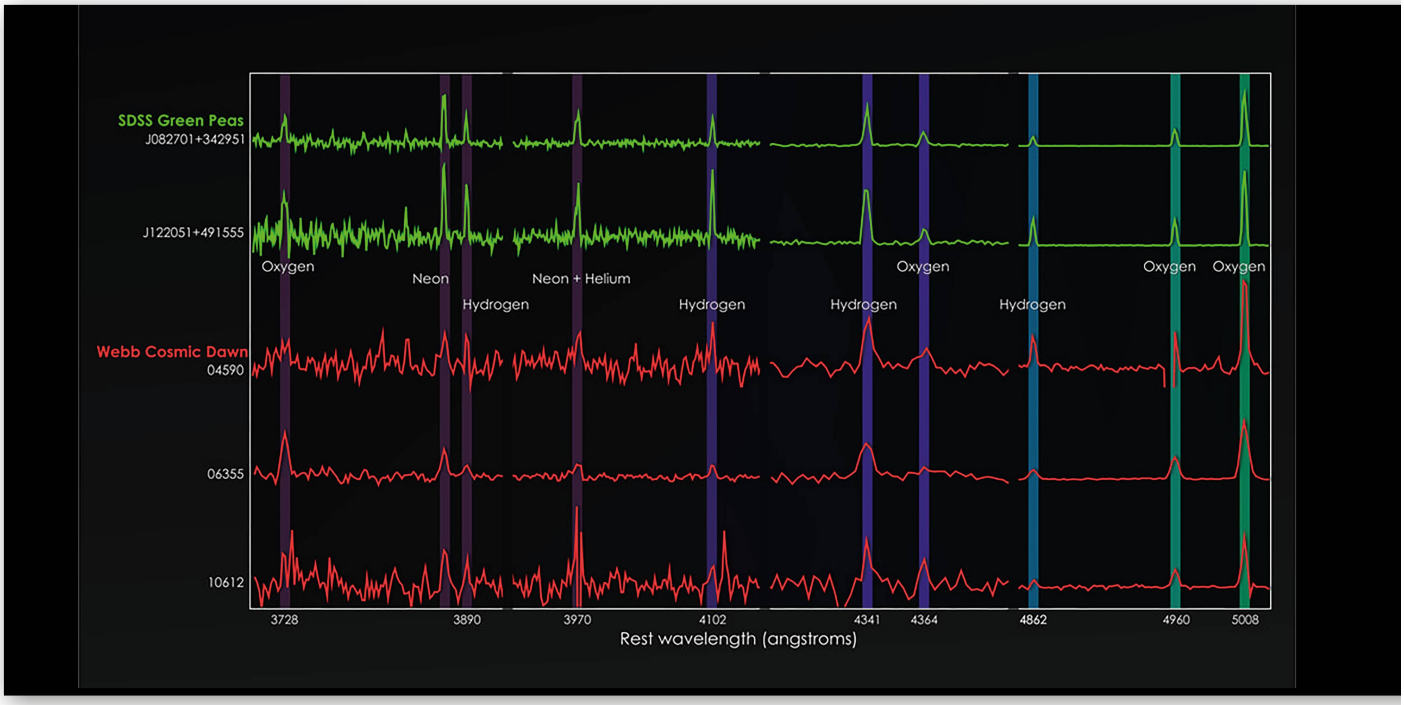
Bild: SDSS und NASA, ESA, CSA und STScI

Sauerstoff, Kohlenstoff und Stickstoff vorhanden sind. Dort müssen bereits Supernova-Explosionen stattgefunden haben, bei denen diese schwereren Elemente produziert wurden. *«Dies ist also nicht die erste Generation von Sternen, die wir sehen»,* sagt *Schaerer*. Die Fachleute teilen die Sterne in drei Populationen ein – eine Klassifizierung, die auf den deutschen Astronomen *Walter Baade* zurückgeht. Die meisten Sterne in unserer Milchstrasse, so auch die Sonne, gehören zur Population I. Sie haben einen relativ grossen Anteil an schweren Elementen, die in früheren Sterngenerationen entstanden sind. Sterne der Population II sind älter und haben weniger schwere Elemente. Die ersten Sterne, die kurz nach dem Urknall nur aus Wasserstoff und Helium entstanden sind, bilden die Population III.

Obwohl noch keine Sterne der Population III gesichtet wurden, weiss man, dass es sie geben musste, denn der Urknall produzierte keine schwereren Elemente als Wasserstoff und Helium. *«Die erste Frage ist, ob man sie überhaupt erkennen kann»,* sagt Schaerer, *«die zweite, wie lange sie existierten.»* Eine Antwort auf die erste Frage lieferte der Astrophysiker bereits im Jahr 2002 – bestimmte Vorhersagen, die noch immer als Referenz benutzt werden. Weil diese Sterne viel heisser sind als normale und keine schwereren Elemente enthalten, ist auch ihr Spektrum anders. Es zeigt charakteristische Spektrallinien von Helium und Wasserstoff, deren Präsenz die Existenz der ersten Sterne enthüllen würde. Vor allem die Signatur von vollständig ionisiertem Helium, sogenanntem Helium II, wäre ein starker Hinweis. Die Antwort auf die zweite Frage zeigt aber, dass es schwierig ist, diese Objekte zu finden. Denn die erste Sternengeneration muss sehr kurzlebig gewesen sein.

SPEKULATIONEN UND WETTEN

Im Dezember 2022 veröffentlichte eine Forschungsgruppe um *Xin Wang* von der «University of Chinese Acadamy of Science» in Peking eine Arbeit, in der sie angab, mit



Ein Vergleich der Spektren von «Grean Pea»-Galaxien in der Nähe (grün) und in grosser Distanz (rot). Korrigiert man bei den weit entfernten Galaxien die Streckung der Wellenlängen, die durch die Expansion des Universums über Jahrmilliarden verursacht wurde, zeigt sich eine verblüffende Ähnlichkeit.

Bild: NASA's Goddard Space Flight Center/Rhoads et al. 2023

dem James-Webb-Teleskop die charakteristische Signatur von Helium II im Spektrum einer Galaxie entdeckt zu haben, die 620 Millionen Jahre nach dem Urknall existiert hatte. *«Präsenz von Population-III-Sternen?»* hiess es im Titel des Papers, das *Wang* auf der Plattform «arxiv.org» publizierte, bevor es von Experten begutachtet wurde. Das Fragezeichen steht offenbar zu Recht. *«Eine sehr spekulative Publikation»,* urteilt *Schaerer.*

Tatsächlich werden in Astronomie-Kreisen Wetten abgeschlossen, ob man die ersten Sterne im Universum je entdecken werde. *«Manche sagen, das James-Webb-Teleskop werde diese Population-III-Sterne nie sehen; andere meinen, es könnte schon morgen soweit sein»,* erzählt *Schaerer.* Die Schwierigkeit werde wahrscheinlich darin bestehen, alternative Erklärungen auszuschliessen, wofür man wohl viel Zeit aufwenden müsse. Denn bei einer so wichtigen Entdeckung dürften keine Zweifel bestehen. Er selbst gibt sich optimistisch und meint: *«Ich denke, man wird die ersten Sterne in den nächsten Jahren finden.»* <