

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 76 (2018)
Heft: 1

Artikel: Wie weit können wir wirklich in die Vergangenheit schauen? : Geht der Blick weiter als die ersten Sterne?
Autor: Tacchella, Sandro
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-914008>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.02.2025

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

Wie weit können wir wirklich in die Vergangenheit schauen?

Geht der Blick weiter als die ersten Sterne?

■ Von Sandro Tacchella

In der letzten ORION-Ausgabe haben wir die neue Generation von Weltraumteleskopen und deren Möglichkeiten beleuchtet. Die spannendste Frage dabei war; wie weit können wir mit dem machbar Technischen überhaupt sehen? Sind uns irgendwann Grenzen gesetzt oder kommen wir dem Urknall auf ganz anderen Wegen noch ein Stück näher?

Milliarden Jahre bis zu uns gereist ist. Im Frühjahr 2019 startet das James Webb Weltraumteleskop, welches einen mehr als fünfmal so grossen Spiegel wie das Hubble Teleskop besitzt und besonders im Infrarotbereich über erheblich grössere Kapazitäten als Hubble verfügt, womit die ersten Sterne und Galaxien nach dem Urknall entdeckt und untersucht werden können. Es stellt sich dann natürlich die Frage, ob wir jemals noch weiter sehen können. Wo sind uns optisch Grenzen gesetzt? Gibt es Möglichkeiten, noch näher an den Urknall zu schauen?

Eine Zeitreise in die Vergangenheit

Da sich Licht mit einer endlichen Geschwindigkeit von knapp 300'000 Kilometern pro Sekunde ausbreitet, empfangen wir Licht, das vor einiger

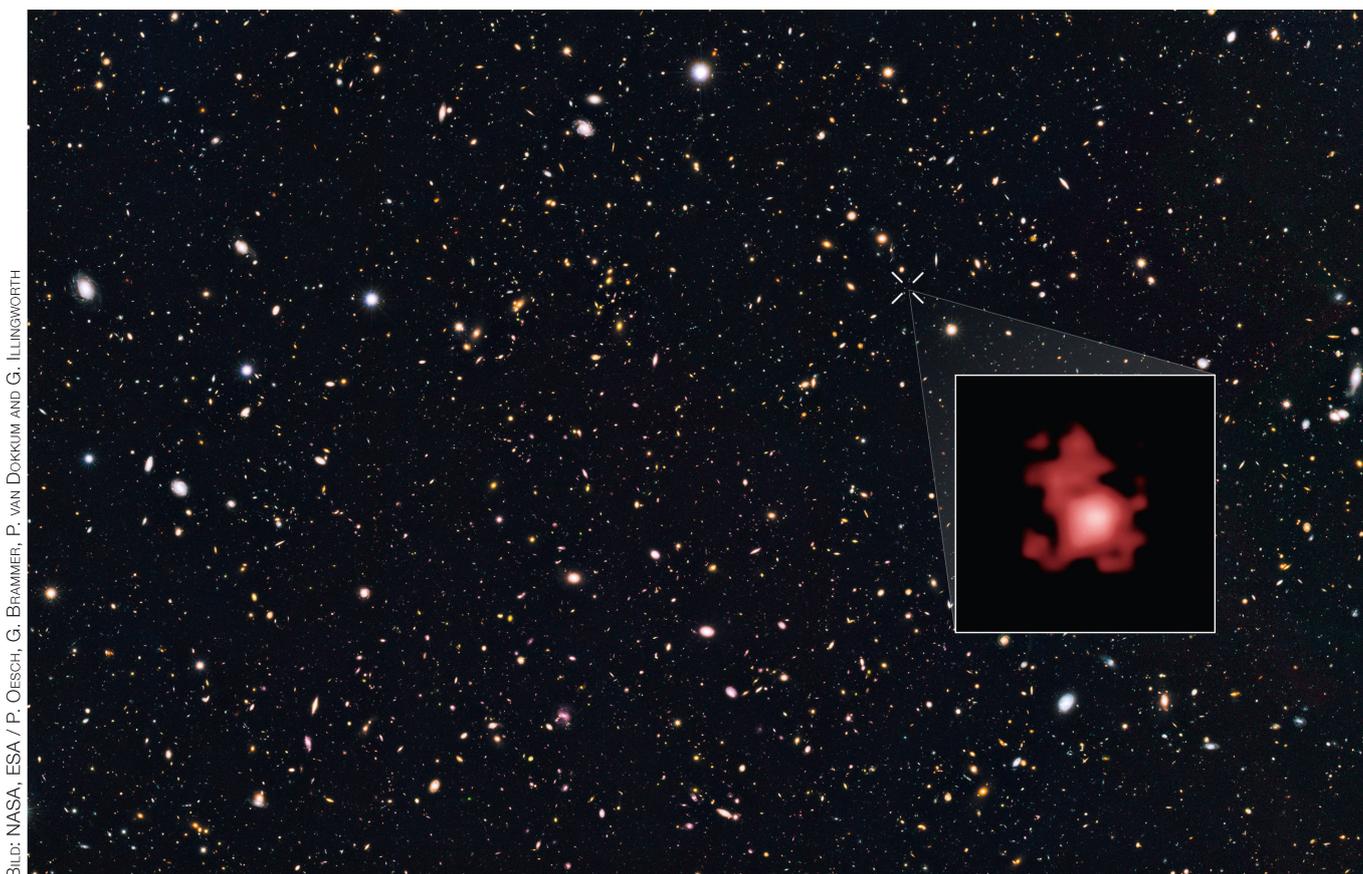


BILD: NASA, ESA / P. OESCH, G. BRAMMER, P. VAN DOORNIK AND G. ILLINGWORTH

Abbildung 1: Das Bild zeigt die Position der am weitesten entfernten Galaxien im GOODS North (Great Observatories Origins Deep Survey North), welches mit dem Hubble-Teleskop aufgenommen wurde. Wir zählen über 10'000 Galaxien!

Das Hubble Weltraumteleskop hat mit seinen Aufnahmen das Forschungsgebiet der Galaxienentwicklung revolutioniert und tiefe Einblicke in die Vergangenheit des Universums ermöglicht. Die heute am weitesten entfernte bekannte

Galaxie im Universum hat die Bezeichnung GN-z11 (Abbildungen 1 und 2) und weist eine spektroskopische Rotverschiebung von 11.1 auf, das heisst, dass das Licht 400 Millionen Jahre nach dem Urknall ausgesendet wurde und es rund 13.3

Zeit in der Vergangenheit ausgesendet wurde. Der Mond liegt rund 400'000 Kilometer von der Erde entfernt. Das Licht braucht etwas mehr als eine Sekunde, um diese Strecke zu überwinden. Wenn wir den Mond beobachten, sehen wir ihn daher,

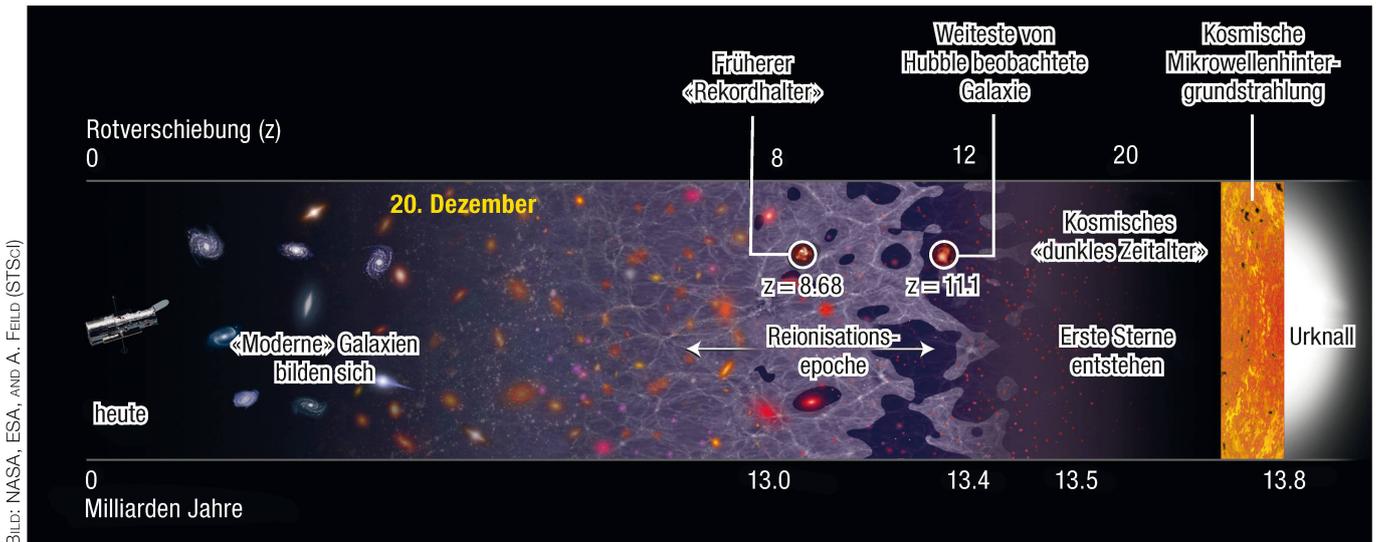


BILD: NASA, ESA, AND A. FEILD (STScI)

Abbildung 2: Diese Illustration zeigt einen Zeitstrahl des Universums, der sich vom heutigen Tag (links) zurück zum Urknall vor 13.8 Milliarden Jahren erstreckt (rechts). Die Galaxie GN-z11 ist mit einer Rotverschiebung von 11.1, die 400 Millionen Jahre nach dem Urknall entspricht, die bisher am weitesten entfernte Galaxie. Die Position des vorherigen Rekordhalters wird ebenfalls identifiziert. Die ersten Galaxien und Sterne bildeten sich in einem Universum, das voll von neutralem Wasserstoff war. In den kommenden Jahren wird es dank des Radioteleskops SKA möglich sein, die Verteilung dieses Wasserstoffs zu messen. Das entfernteste «Objekt», das die Menschheit je aufgenommen hat, ist die sogenannte kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung (hier abgebildet in orange-rot). Um noch weiter als die Hintergrundstrahlung an den Urknall heranzuschauen, muss man auf exotischere Informationsträger wie Gravitationswellen oder Neutrinos zurückgreifen.

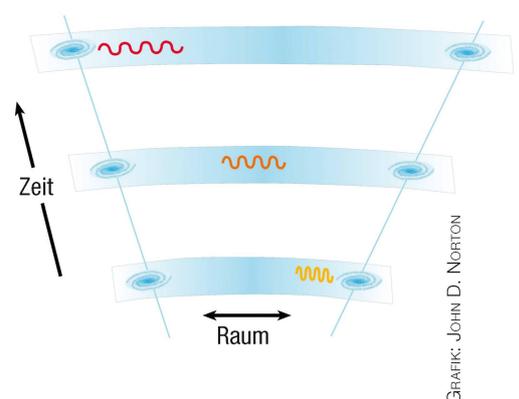
wie er vor einer Sekunde ausgesehen hat. Andere astronomische Objekte liegen natürlich noch viel weiter von der Erde entfernt. Dabei wird dieser Effekt vom «In-die-Vergangenheit-Schauen» noch viel ausgeprägter: Bei der Sonne blicken wir 8 Minuten in die Vergangenheit und bei Alpha Centauri (nächster Stern ausserhalb unseres Sonnensystems) bereits etwas über 4 Jahre. Unsere nächste grössere Nachbargalaxie ist Andromeda, welche 2.5 Millionen Lichtjahre von uns entfernt liegt. Das heisst; wir sehen sie heute so, wie sie uns vor 2.5 Millionen Jahren erschienen wäre. Die meisten Galaxien liegen natürlich noch viel weiter entfernt als die Andromedagalaxie. Hubble und andere Astronomen haben festgestellt, dass Galaxien, welche weiter von uns entfernt liegen, sich auch schneller von uns entfernen. Diese Beobachtung von der Zunahme der räumlichen Ausdehnung des Universums wird als Expansion des Universums bezeichnet. Es ist nicht so, dass sich Galaxien in der Raumzeit voneinander entfernen (Relativbewegung), aber es ist der Raum selbst, der sich ausdehnt, und die Galaxien werden mitbewegt. Gemäss Urknall-Theorie hat sich die Expansion des Universums in den ersten Milliarden Jahren seiner

Existenz (nach der Inflation kurz nach seiner Entstehung) verlangsamt. Es wurde jedoch beobachtet, dass seit einigen Milliarden Jahren diese Ausdehnungsgeschwindigkeit immer weiter zunimmt. Diese beschleunigte Expansion ist noch überhaupt nicht verstanden und Gegenstand aktueller Forschung (Dunkle Energie).

Die kosmologische Rotverschiebung

Wenn sich nun das Licht durch den ausdehnenden Raum bewegt, vergrössert sich die Wellenlänge um den gleichen Faktor, wie sich das Universum vergrössert. Das heisst, dass das Licht von weitentfernten Galaxien durch die Expansion des Universums «rot» verschoben wird (Rotverschiebung; Abbildung 3). Diese kosmologische Rotverschiebung ist von der Dopplereffekt zu unterscheiden, welche selbst nur von der relativen Geschwindigkeit der Galaxien abhängt. Das optische Licht wird also in den infraroten Wellenbereich verschoben: Eine Galaxie mit Rotverschiebung $z = 10$ müssten wir bei einer Wellenlänge von 5.5 Mikrometern beobachten, wenn wir das optische Licht mit einer Wellenlänge von 500

Nanometern messen wollen. Leider (aus astronomischer Sicht) absorbiert und streut die Luft das einfallende Licht, was dazu führt, dass wir von der Erde aus nur einige wenige «atmosphärische Fenster» haben, in welchen die Atmosphäre der Erde weitgehend durchlässig (transparent) ist (Abbildung 4). Das optische Fenster erlaubt Beobachtun-



GRAFIK: JOHN D. NORTON

Abbildung 3: Kosmologische Rotverschiebung. Wenn sich nun das Licht durch den ausdehnenden Raum bewegt, vergrössert sich die Wellenlänge um den gleichen Faktor, wie sich das Universum vergrössert. Das heisst, dass das Licht von weitentfernten Galaxien durch die Expansion des Universums «rot» verschoben wird.

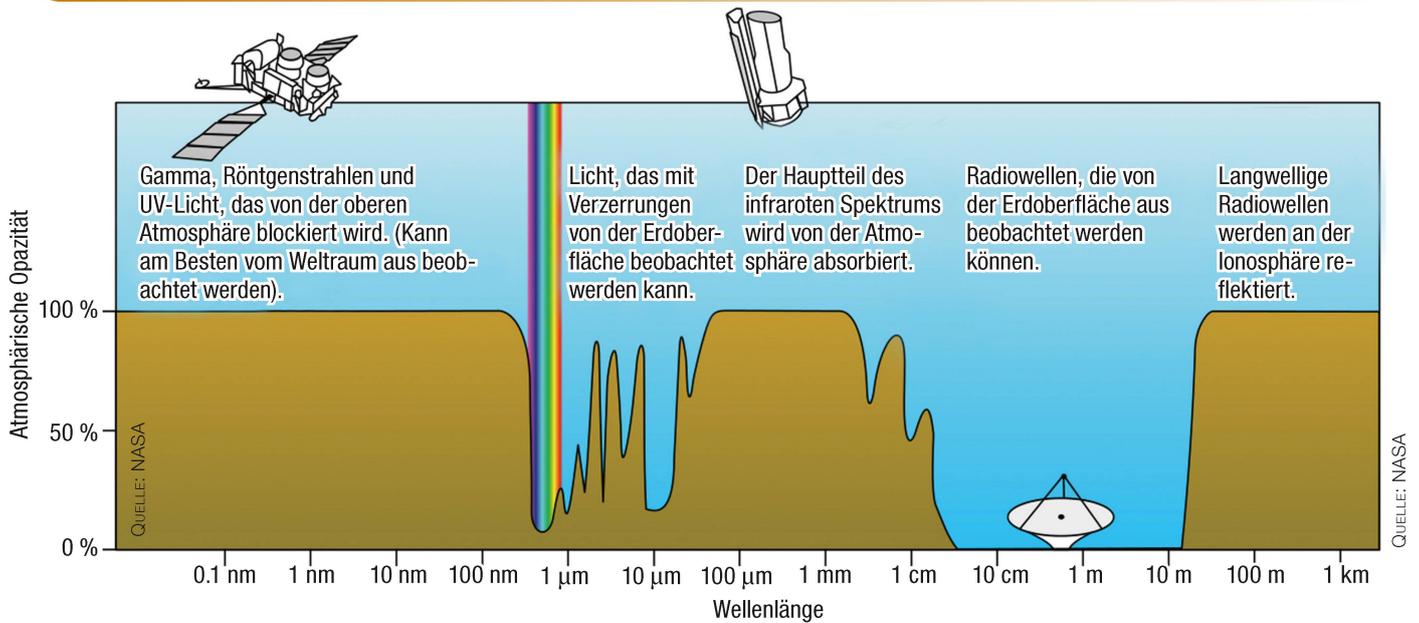


Abbildung 4: Durchlässigkeit der Atmosphäre für elektromagnetische Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen. Das optische Fenster erlaubt der beobachtenden Astronomie die Beobachtung astronomischer Objekte im Bereich des sichtbaren Lichtes und im nahen Infraroten, das Radiofenster die Beobachtung astronomischer Objekte mit Methoden der Radioastronomie vom Erdboden aus.

gen im Bereich des sichtbaren Lichtes und im nahen Infraroten, das Radiofenster Beobachtungen im Frequenzbereich von 15 MHz bis zu 100 GHz (Wellenlängen von 20 m bis zu einigen Millimetern). Da die ersten Sterne und Galaxien alle eine hohe Rotverschiebung haben ($z \geq 10$), wird deren optisches Licht in den infraroten Wellenlängenbereich verschoben, welches

von der Erde aus nur begrenzt beobachtet werden kann. Weltraumteleskope bieten natürlich eine Abhilfe, um diese atmosphärische Absorption zu überwinden. In den letzten Jahren hat vor allem das Hubble Weltraumteleskop (auch in der Kombination mit dem Spitzer Weltraumteleskop) grosse Fortschritte bei der Suche nach den ersten Galaxien gemacht. Neben dem

Rekordhalter GN-z11 mit einer Rotverschiebung von $z = 11.1$ (Abbildungen 1 und 2) wurden viele hunderte Galaxien mit Rotverschiebungen zwischen $z = 6 - 10$ gefunden. Das Hubble Teleskop verfügt nur über begrenzte Möglichkeiten, Spektren von diesen Galaxien zu messen. Daher haben viele dieser Galaxien nur eine ungenaue, sogenannte photometrische Rotverschiebung, wel-

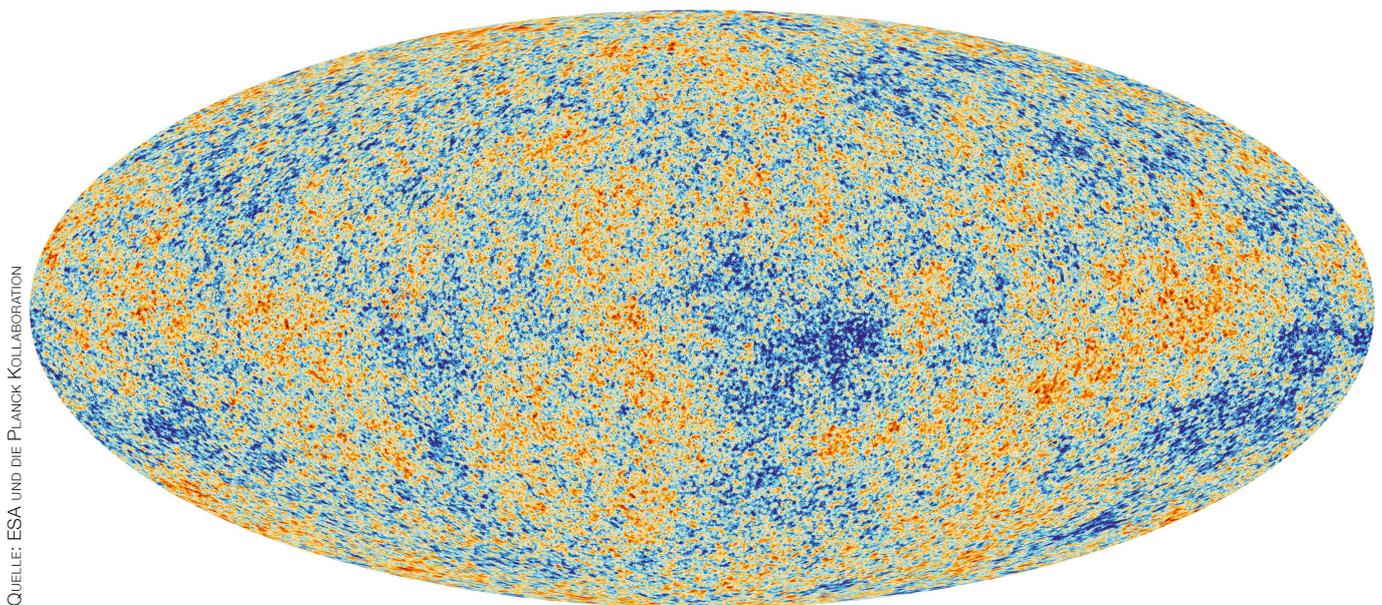


Abbildung 5: Die von Planck beobachteten Anisotropien des kosmischen Mikrowellenhintergrunds. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist eine Momentaufnahme des ältesten Lichts in unserem Universum, das ausgesendet wurde, als das Universum nur 380'000 Jahre alt war. Sie zeigt winzige Temperaturschwankungen, die Regionen mit leicht unterschiedlichen Dichten entsprechen und die Geburtsorte aller zukünftigen Strukturen darstellen: Die Sterne und Galaxien von heute.

che von breiten Filtern eruiert wurden. Um die Rotverschiebungen zu bestätigen, müssen spektroskopische Nachuntersuchungen mit anderen Instrumenten (zum Beispiel mit dem MUSE-Instrument am Very Large Telescope) durchgeführt werden.

Kann man etwas sehen, bevor es entstanden ist?

Das James Webb Weltraumteleskop, welches als Nachfolger vom Hubble Teleskop gesehen wird, soll Hubbles Leistungen weit übertreffen. Im Gegensatz zu Hubble, welches im sichtbaren, nahen ultravioletten und im nahen infraroten Bereich beobachtet, soll das James Webb Teleskop fast ausschliesslich im Infraroten (Wellenlängen 0.6 – 28 Mikrometer) arbeiten. Dies ermöglicht es, nach dem Licht von den ersten Sternen und Galaxien nach dem Urknall zu suchen. Von kosmologischen Modellen erwartet man, dass die ersten Sterne sich rund 100 bis 250 Millionen Jahre nach dem Urknall bilden konnten. Ein grosser Unterschied zur heutigen Sternentstehung ist, dass die Protogalaxien ausser Wasserstoff und Helium, die noch vom Urknall stammten, kaum andere chemische Elemente enthielten. Die meisten schwereren Elemente bildeten sich erst durch thermonukleare Fusion in dieser ersten Generation von Sternen.

Doch können wir auch etwas im Universum sehen, bevor diese ersten Sterne entstanden sind? Da zu diesem Zeitpunkt das Universum voll von neutralem Wasserstoff (HI) ist, bildet dessen Beobachtung eine gute Möglichkeit, die Struktur des jungen Universums zu erforschen (Abbildung 2). Glücklicherweise emittiert neutraler Wasserstoff die sogenannte Wasserstofflinie, welche durch den Hyperfeinstrukturübergang des neutralen Wasserstoffatoms im 1s-Grundzustand entsteht. Das ist der Energieunterschied zwischen der parallelen und antiparallelen Spin-Orientierung des Elektrons relativ zum Spin des Protons. Diese Emissionslinie hat eine Wellenlänge von 21 Zentimetern und wird daher auch 21 cm-Linie bezeichnet. Obwohl dieser Spin-Flip im Wasserstoffatom äussert selten passiert (im Durchschnitt nur alle 10 Millionen Jahre), kann man die 21 cm-Linie beobachten, da es

sehr viel Wasserstoff im Universum gibt: Die 21 cm-Linie wird zum Beispiel zur Vermessung der Rotationskurven von Galaxien im heutigen Universum verwendet.

Um die Wasserstoffverteilung und daher die Struktur im Universum vor der Entstehung der ersten Sterne zu vermessen, muss man den Himmel bei einer Frequenz zwischen 9 und 200 MHz beobachten, weil auch die 21 cm-Linie (1.4 GHz) rotverschoben wird. Die Schwierigkeit dieser Messung ist, dass das Signal durch die Ionosphäre sowie Rundfunksendeanlagen gestört wird. Eines der vielversprechendsten Instrumente ist das Square Kilometer Array (kurz SKA), welches sich momentan in der Entwicklung befindet. Gebaut wird es in unbewohnten Gebieten mit sehr kleinen künstlichen Radiointerferenzen in Südafrika, Australien und Neuseeland. SKA wird ein Radioteleskop mit einer Gesamt-Sammelfläche von ungefähr einem Quadratkilometer sein. Diese grosse Sammelfläche wird durch die Kombination von tausenden kleinen Radioantennen erreicht. Durch die grosse räumliche Distanz von bis zu 3'000 km wird es möglich, damit ein riesiges Radioteleskop zu simulieren, welches über eine extrem hohe Empfindlichkeit und Winkelauflösung verfügt, um die Gasverteilung im frühen Universum zu vermessen. Die ersten Beobachtungen sind für 2020 geplant. Eine der grössten Herausforderungen liegt der Datenanalyse beziehungsweise Datenspeicherung: SKA wird circa ein Exabyte (also eine Million Terabyte) pro Tag an Rohdaten liefern. Die Astronomen arbeiten bei der Entwicklung der Hardware mit IBM zusammen, um dieses Datenvolumen in den Griff zu bekommen. Als Vergleich: im Jahr 2003 hat RANDALL MUNROE geschätzt, dass Google circa 10 Exabyte an Daten gespeichert hat; Google hat sich geweigert, MUNROES Einschätzung zu kommentieren.

Entdeckung der Mikrowellenhintergrundstrahlung

Obwohl das SKA unser Verständnis über die Entstehung der ersten Galaxien revolutionieren wird, dürfte es nicht sehr nahe an den Urknall schauen können. Das Entfernteste, das die Menschheit je aufgenommen

hat, ist die sogenannte kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung (Abbildungen 2 und 5), welche aus der Zeit etwa 380'000 Jahre nach dem Urknall stammt (Rotverschiebung $z = 1089$). Es kam zur Bildung dieser Strahlung 380'000 Jahre nach dem Urknall, weil die Temperatur im ausdehnenden Universum unter 3'000 Kelvin sank, wobei dann die Protonen und Elektronen sich zu Wasserstoff vereinen konnten. Dies führte dazu, dass die Lichtteilchen (Photonen) nicht mehr mit der Materie wechselwirken und sich daher frei ausdehnen konnten – das Universum wurde «durchsichtig». Obwohl dieses Licht am Anfang eine typische Temperatur von ca. 3'000 Kelvin hatte (Wellenlänge von circa 100 Nanometern im ultravioletten Bereich), können wir es heute mit einer Temperatur von 2.7 Kelvin im Mikrowellenbereich (Wellenlänge von 1 Millimeter) beobachten. Die Entdeckung der Mikrowellenhintergrundstrahlung brachte PENZIAS und WILSON 1978 den Physik Nobelpreis ein; einen weiteren gab es im Jahre 2006 für SMOOT und MATHER für deren genaue Vermessung mit dem COBE Satelliten. Weitere Untersuchungen durch bodengebundene Experimente, Ballonteleskope und besonders die Raumsonden WMAP und Planck haben die Stärke der Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung in Abhängigkeit von ihrer Winkelausdehnung am Himmel noch wesentlich besser charakterisiert (Abbildung 5). Die gute Übereinstimmung der gemessenen Eigenschaften des Mikrowellenhintergrundes mit den theoretischen Vorhersagen stellt einen der herausragenden Belege für die Gültigkeit der Urknalltheorie dar.

Die kosmische Hintergrundstrahlung bildet die fundamentale Grenze des sichtbaren Universums bezüglich des Lichts. Es gibt jedoch andere Informationsträger, welche es uns ermöglichen, noch weiter zum Urknall «hinzusehen». Zum einen können Gravitationswellen, welche indirekt via Pulsar 1913+16 von HULSE und TAYLOR (Physik-Nobelpreis 1993) sowie direkt mit dem LIGO Detektor (Physik-Nobelpreis 2017) nachgewiesen wurden, Indizien zur Inflation geben, also jener Phase im Universum, welche unmittelbar nach dem Urknall stattgefunden hat. Mit dem BICEP-Experiment versucht man die Polarisation (sogenannte B-Mode) der kosmischen

Mikrowellenhintergrundstrahlung zu messen, um dabei Gravitationswellen von der Inflation zu entdecken. Im März 2014 wurde von der Kollaboration BICEP die Entdeckung der B-Mode in der Hintergrundstrahlung vermeldet. Im September 2014 veröffentlichte dann jedoch die Planck Kollaboration eine Analyse ihrer Daten, nach der die BICEP-Daten durch polarisierte Emission von kosmischem Staub der Milchstrasse verursacht worden sein könnte. Im Januar 2015 wurde die Entdeckung der B-Mode von den Forschern offiziell zurückgezogen. In der Zwischenzeit wurde weiter fleissig Daten gesammelt, und wir können hoffen, dass wir bald Neues von diesem Experiment hören werden.

Die Grenzen des «Lichtes» sind erreicht

Ein weiterer Informationsträger vom frühen Universum neben Licht und Gravitationswellen sind Neutrinos, also elektrisch neutrale Elementarteilchen mit sehr geringer Masse. Wie der kosmische Mikrowellenhintergrund ist der kosmische Neutrino hintergrund ein Überrest des Urknalls: Er geht auf die Entkopplung der Neutrinos von der Materie rund zwei Sekunden nach dem Urknall zurück. Da der Mikrowellenhintergrund entstand, als das Weltall rund 380'000 Jahre alt war, kann der Neutrino hintergrund mehr Details vom Urknall liefern. Da Neutrinos mit einer geringen Energie nur sehr schwach mit Materie in Wechselwirkung treten, sind sie sehr schwierig nachzuweisen. Es gibt jedoch überzeugende indirekte Hinweise auf sein Bestehen. Das geplante Experiment PTOLEMY hat als Ziel, den Neutrino hintergrund direkt zu messen.

Fast am Urknall

Zusammenfassend kann man sagen, dass wir beim Informationsträger «Licht» mit der kosmischen Mikrowellenstrahlung an unsere Grenze gelangt sind: Weiter weg können wir nicht sehen. Es stehen uns aber mit den Gravitationswellen und Neutrinos andere Informationsträger zur Verfügung, mit denen wir das Universum mit einem Alter von lediglich 10^{-35} Sekunden erforschen können. ■

Es geschah in einer weit, weit entfernten Galaxis ...

Kosmischer Paukenschlag

■ Von Dr. Hansjürg Geiger

Eine kosmische Kollision liess das Weltall erzittern. Gravitationsphysiker hier auf der Erde empfangen die Signale, gerieten ins Schwärmen, wussten plötzlich, woher das viele Gold stammt und kassierten Nobelpreise. Wieso?

Für einen Physiker muss es eine schmerzliche Erkenntnis gewesen sein. ALBERT EINSTEIN hatte eine neue Theorie entwickelt, eine sensationelle, völlig neue Weltsicht erarbeitet, welche die alten Überzeugungen

nur noch als Spezialfall einer viel komplexeren Wahrheit erschienen liessen. Aber jede Idee eines Naturwissenschaftlers ist bekanntlich nur gerade so gut, wie die Ergebnisse der Versuche, die er zur Über-

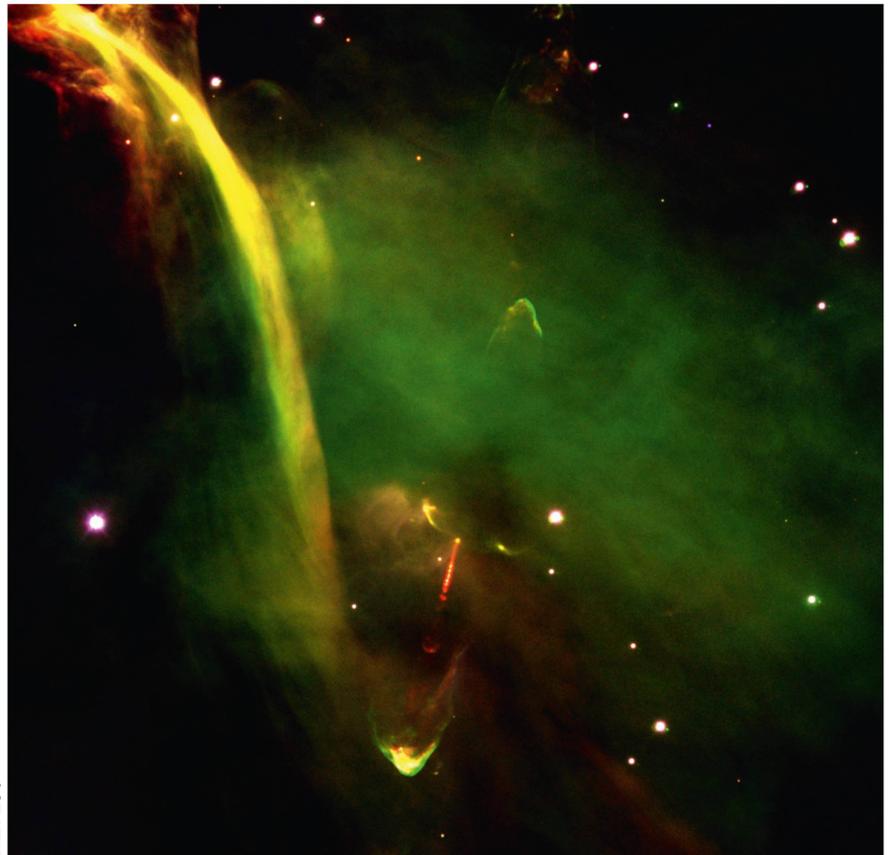


Bild: ESO

Abbildung 1: Schon bei der Geburt von Sternen kommt es zu gewaltigen Strahlungsausbrüchen. Die Aufnahme zeigt das Objekt HH-34 im Sternbild Orion, 1500 Lichtjahre von uns entfernt. Der junge Stern produziert zwei Jets, die mit grosser Wucht in das umgebende interstellare Umfeld dringen. Im «unteren» Jet, im rot leuchtenden Strahl, sind mehrere Blasen erkennbar, die von einzelnen Strahlungsausbrüchen stammen.