

Das Ende des dunklen Zeitalters

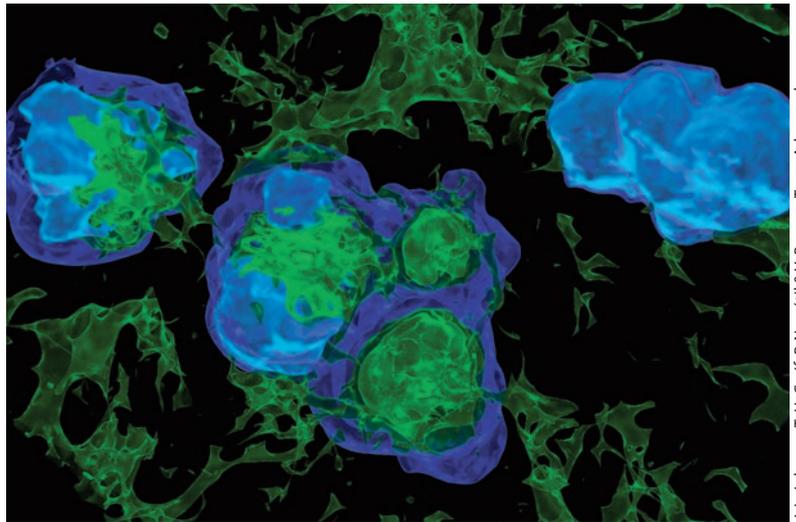
Atemberaubende Fortschritte in Beobachtungstechnik und Computersimulationen entschlüsseln die Reionisation, einen entscheidenden Meilenstein in der Geschichte unseres Kosmos.

Volker Bromm

In jüngster Zeit ist es den Kosmologen gelungen, die grundlegenden Parameter unseres Weltmodells mit hoher Präzision festzulegen. Noch hat unser Weltbild aber eine entscheidende Lücke: Wann und wie haben sich die ersten Sterne und Galaxien gebildet? Deren Entstehung während der ersten Milliarde Jahre nach dem Urknall hatte dramatische Konsequenzen, führte sie doch zu einem kosmischen Phasenübergang von einem neutralen und kalten zu einem fast vollständig ionisierten und heißen Medium. Mit modernsten Beobachtungsmethoden und Computersimulationen sind wir dabei, die immer noch rätselhaften Vorgänge während dieser kosmischen „Epoche der Reionisation“ aufzuklären.

In den 1960er-Jahren stellten wichtige Entdeckungen die Kosmologie auf sichere empirische Grundlagen und bescherten ihr ein erstes Goldenes Zeitalter. Zuvor waren die Forscher auf theoretische Modelle angewiesen, ohne diese wirklich durch Beobachtungen testen zu können. So war die Debatte zwischen den Verfechtern der Urknalltheorie und des stationären Universums vor allem philosophischer Natur. All das änderte sich 1964/65 mit der Entdeckung der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMB, für Cosmic Microwave Background), die schnell als Relikt eines heißen Urknalls interpretiert wurde [1]. Die Photonen des CMB wurden 400 000 Jahre nach dem Urknall ausgesandt, als das expandierende Universum hinreichend abgekühlt war, sodass sich freie Elektronen und Protonen zu Wasserstoffatomen vereinen konnten. Dieses Ereignis heißt „kosmische Rekombination“, was allerdings kein sehr gut gewählter Name ist, da Elektronen und Protonen bis dahin noch nie zu Atomen kombiniert waren. Vor der Rekombination waren die Photonen durch Thomson-Streuung an freien Elektronen eng an das Plasma aus Wasserstoff und Helium gekoppelt, das durch Kernfusion in den ersten Minuten nach dem Urknall entstanden war (sog. primordiale Nukleosynthese). Seither musste das Gas im Universum also in vorwiegend neutraler Form vorliegen haben. Dass sich dies im weiteren Verlauf der kosmischen Geschichte irgendwann wieder geändert haben musste, erkannten Jim Gunn und Bruce Peterson ebenfalls 1965 [2].

Der nach ihnen benannte Effekt ist äußerst wichtig für die Kosmologie, beruht aber auf einem verblüffend



J. L. Johnson, T. H. Greif, P. Navrátil & V. Bromm, Texas Advanced Computing Center

Mit der kosmischen Reionisation, die etliche 100 Millionen Jahre dauerte, entstanden die ersten Sterne und ging die kosmische Dunkelzeit zu Ende. Diese großräumige Simulation zeigt die

„Schweizerkäse-Struktur“ des Kosmos: Sterne waren von Regionen ionisierten Gases umgeben (blau), die als Löcher im großräumig noch neutralen intergalaktischen Medium (grün) erscheinen.

einfachen Gedanken. Kurz gesagt: Neutrale Wasserstoffatome absorbieren mit großer Wahrscheinlichkeit Photonen bei bestimmten UV-Wellenlängen. Das Spektrum einer Quelle, deren Licht eine Wolke neutralen Gases durchlaufen hat, sollte folglich bei diesen Wellenlängen vollständige Absorption aufweisen. Gunn und Peterson fanden aber zu ihrer Überraschung nichts dergleichen, noch nicht einmal für sehr weit entfernte Quellen. Sie hatten Spektren von den ebenfalls gerade neu entdeckten Quasaren, extrem leuchtkräftigen, aber

KOMPAKT

- Aus der Beobachtung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung ist bekannt, dass 400 000 Jahre nach dem Urknall Elektronen und Protonen zu neutralen Wasserstoffatomen rekombinierten.
- Wie Quasar-Daten 2001 gezeigt haben, wurde das Universum aber innerhalb der ersten Milliarde Jahren erneut ionisiert.
- Diese Reionisation hängt eng mit der Entstehung der ersten Sterne und Galaxien zusammen, die in einzelnen Inseln einsetzte.
- Neue Beobachtungsmöglichkeiten zur Kartierung des neutralen Wasserstoffs im Universum werden es künftig erlauben, zwischen den verschiedenen theoretischen Szenarien der Reionisation zu unterscheiden.

Prof. Dr. Volker Bromm, The University of Texas, Department of Astronomy, 1 University Station, C1400, Austin, Texas 78712-0259, USA

auch sehr weit entfernten Objekten, aufgenommen und dabei herausgefunden, dass der spektrale Fluss auf der kurzwelligen Seite der starken Lyman- α -Emissionslinie des Wasserstoffs nicht verschwindet.

Um diese Beobachtung mit den Eigenschaften des kosmischen Gases zu verbinden, müssen wir etwas ausholen: Die Lyman- α -Linie entspricht dem Übergang zwischen Grund- und erstem angeregten Zustand von atomarem Wasserstoff und ist als Resonanzlinie daher besonders stark. Der Quasar sendet ein breites Strahlungsspektrum aus, vom Röntgenbereich bis hin zu Radiowellen, zusammen mit einer großen Zahl von Emissionslinien, deren stärkste die Lyman- α -Linie ist. Die Wellenlängen aller vom Quasar emittierten Photonen sind durch die kosmische Expansion rotverschoben. Für Photonen, die eine weit entfernte Quelle mit einer gegebenen Wellenlänge λ_{em} emittiert und die ein irdischer Astronom mit der (größeren) Wellenlänge λ_{obs} empfängt, ist die kosmologische Rotverschiebung durch $z = \lambda_{obs}/\lambda_{em} - 1$ definiert. Sie ist auch ein bequemes Maß, um Entfernungen im Kosmos anzugeben.

Durch die Rotverschiebung wächst die Wellenlänge von Photonen, die auf der kurzwelligen Seite der Lyman- α -Linie ausgesandt wurden, bis sie mit der Lyman- α -Resonanz ($\lambda_{\alpha} = 121,6$ nm) zusammenfällt. Nehmen wir an, dass der Quasar von vollständig neutralem Gas, vor allem atomarem Wasserstoff, umgeben ist. Dann müsste ein Wasserstoff-Atom entlang unserer Sichtlinie zum Quasar aufgrund des extrem großen Absorptions-Wirkungsquerschnitts dieser Resonanz ein rotverschobenes Photon absorbieren. Fällt das angeregte Elektron bald darauf in den Grundzustand zurück, so emittiert es zwar wieder ein Lyman- α -

Photon, dessen Richtung allerdings isotrop verteilt ist. Entscheidend ist, dass das Gas alle Photonen, die ursprünglich vom Quasar auf der „blauen“ (kurzweligen) Seite der Lyman- α -Linie emittiert wurden, aus der direkten Sichtlinie zum Quasar herausstreut. Der entsprechende spektrale Fluss hin zu kürzeren Wellenlängen sollte dann gänzlich verschwinden. Daher war es völlig unerwartet, dass die Quasar-Spektren keine solchen „Gunn-Peterson-Tröge“ aufwiesen. Das intergalaktische Medium (IGM) kann also nicht neutral sein, zumindest bis zu den Entfernungen der Quasare mit den höchsten bis dahin gemessenen Rotverschiebungen. Es muss sogar über große kosmologische Entfernungen hin fast vollständig ionisiert sein, wie die quantitative Betrachtung der Wechselwirkung zwischen Photonen und Wasserstoff zeigt (siehe **Infokasten**). Diese Wechselwirkung lässt sich durch die „optische Tiefe“ τ_{GP} charakterisieren, welche die Stärke von Absorptionsvorgängen angibt. Ein gegebener Strahlungsfluss wird dabei im Allgemeinen um einen Faktor $e^{-\tau}$ abgeschwächt, wenn die Strahlung Materie mit einer optischen Tiefe von τ durchläuft. Absorption wird also wichtig für $\tau > 1$; man spricht dann auch von „optisch dickem“ Strahlungstransport. Auf den Gunn-Peterson-Effekt angewandt, ergibt sich $\tau_{GP} \sim 10^5 x_{HI}$ mit dem Bruchteil von neutralen H-Atomen x_{HI} (von Astronomen HI genannt). Da die Gunn-Peterson-Tröge nicht beobachtet werden, muss der Anteil an neutralem Wasserstoff x_{HI} also kleiner als 10^{-5} sein.

Betrachtet man nun das Resultat von Gunn und Peterson im Zusammenhang mit den Argumenten für ein neutrales Medium in der Zeit nach der kosmischen Rekombination, ergibt sich zwingend, dass das Universum irgendwann reionisiert wurde. Und diesmal ist der Name gut gewählt, da das Gas im Kosmos ja wirklich schon einmal, in der Zeit seit dem Urknall bis hin zur Epoche der Rekombination, im ionisierten Zustand vorlag. Wann fand die Reionisation statt, und wie kam es dazu? Um die erste Frage zu beantworten, haben die Astronomen seit 1965 Quasare mit immer größeren Rotverschiebungen beobachtet und erwartet, dass irgendwann der lang ersehnte Gunn-Peterson-Trog im Spektrum eines extrem weit entfernten Quasars auftauchen müsste. Schließlich blickt man mit zunehmender Entfernung und den damit verbundenen Laufzeiten für die Photonen immer näher an den Urknall zurück bis hin zu der Zeit, in der das Universum noch von neutralem Wasserstoff erfüllt war. Die Epoche der Reionisation entzog sich aber der Entdeckung. Als dann in den 1990er-Jahren der Sloan Digital Sky Survey (SDSS) begann, eine große Anzahl von Quasaren bei hohen Rotverschiebungen zu finden, der Effekt aber immer noch ausblieb, machte sich Nervosität unter den Kosmologen breit. Der Durchbruch gelang schließlich 2001, als Xiaohui Fan und Kollegen vom SDSS den ersten überzeugenden Gunn-Peterson-Trog im Spektrum eines Quasars bei $z = 6,28$ sahen [3]. Solch eine hohe Rotverschiebung entspricht einer Zeit, die näher als eine Milliarde Jahre an den Urknall heranreicht. Damit wissen wir nun auch, wann die

WECHSELWIRKUNG VON PHOTONEN UND WASSERSTOFF

Die Wechselwirkung von Photonen, z. B. denen des kosmischen Mikrowellen-Hintergrunds, mit neutralem oder ionisiertem Wasserstoff lässt sich durch den entsprechenden frequenzabhängigen Wirkungsquerschnitt $\sigma(v)$ beschreiben. Wenn ein Photon bei einer Rotverschiebung z , ausgesandt wurde, kann man seine kumulative Wechselwirkung mit den während der gesamten Laufzeit angetroffenen Wasserstoffatomen durch die sog. **optische Tiefe** wie folgt ausdrücken:

$$\tau(v_{obs}) = \int_0^{z_s} n_H(z) \sigma[v_{obs}(1+z)] c |dt/dz| dz$$

Dabei bezeichnet v_{obs} die Frequenz, bei der man beobachtet, und n_H die Dichte der Wasserstoffatome. Das kosmologische Wegelement ist durch $|dt/dz| = H_0^{-1} [\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda(1+z)^2]^{-1/2}$

gegeben mit der Hubble-Konstanten H_0 sowie den Energiedichten Ω_m und Ω_Λ von Materie bzw. der kosmologischen Konstanten. Mit der optischen Tiefe lässt sich nun berechnen, welcher

Anteil der emittierten Strahlung empfangen wird: $f_{obs}(v) = \exp[-\tau(v)] f_{em}(v)$.

Für den Gunn-Peterson Effekt ergibt sich das obige Integral zu:

$$\tau_{GP} = 6,5 \times 10^5 x_{HI} \left(\frac{1+z}{10}\right)^{3/2}$$

mit dem Anteil des neutralen Wasserstoffs x_{HI} . Daraus folgt, dass $x_{HI} < 10^{-5}$ sein muss, um irgendwelche Strahlung auf der blauen Seite der Lyman- α -Linie zu beobachten.

Im Fall der Thomson-Streuung ist die Wechselwirkung von Photonen mit ionisiertem Wasserstoff, genauer den durch die Ionisation erzeugten freien Elektronen, zu betrachten. Der Wirkungsquerschnitt ist in diesem Fall besonders einfach, da er nicht von der Frequenz abhängt: $\sigma(v) = \sigma_T = 0,66 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$. Das entsprechende Integral für die optische Tiefe ist dann

$$\tau_e = \int_0^{z_s} n_e(z) \sigma_T c |dt/dz| dz,$$

mit der Dichte der freien Elektronen, $n_e(z)$. Der WMAP-Satellit hat diese Größe zu $\tau_e = 0,09 \pm 0,03$ gemessen.

Reionisation stattfand (Abb. 1). Um zu verstehen, wie das Universum reionisiert wurde, müssen wir uns als Nächstes der Entstehung von Strukturen im frühen Universum zuwenden.

Strukturen im kosmischen Dunkel

Unser gegenwärtiges Bild von der Frühphase des Universums geht davon aus, dass die kosmische Entwicklung von ungemein einfachen Anfangsbedingungen ausging und dass sich der Kosmos dann über die Äonen hinweg in einen Zustand zunehmender Komplexität verwandelt hat [4, 5]. Diese anfängliche Einfachheit drückte sich vor allem in der extrem gleichförmigen Dichte der kosmischen Materie aus. Es gab aber winzige Fluktuationen in der Dichte der Dunklen Materie, von der wir glauben, dass sie den Großteil der kosmischen Masse ausmacht, wohingegen die normale „baryonische“ Materie (d. h. Elektronen, Protonen und Neutronen) nur etwa 15 % zur Gesamtmasse beiträgt. Die Dunkle Materie wird als kalt angenommen, man nennt sie daher auch CDM (für „Cold Dark Matter“), was sich auf die gegenüber der Lichtgeschwindigkeit kleinen Geschwindigkeiten der CDM-Teilchen bezieht [6]. Die Gravitation hat die Dichtefluktuationen im Laufe der Zeit immer mehr verstärkt. Das herrschende Standardmodell für die kosmische Strukturbildung, das sog. Λ CDM-Modell, sagt vorher, dass es auf allen Massen- oder Längenskalen Fluktuationen gibt, dass

diese auf kleinen Skalen aber am größten sind. Mit anderen Worten: Vergleicht man den Masseninhalt von vielen kugelförmigen Volumina gleicher Größe im Universum, so variiert dieser umso mehr, je kleiner die Volumina sind. Die Schwerkraft konnte daher kleine Massenbereiche als erste so weit verdichten, dass diese sich von der allgemeinen Expansion des Universums „abkoppeln“ und schließlich sogar in sich zusammenstürzen konnten. Am Ende dieses gravitativen Kollapses steht die „Virialisierung“, als deren Ergebnis ein ungefähr kugelförmiges Objekt entstanden ist, bestehend aus Gas (Baryonen) und Dunkler Materie, von den Kosmologen Halo genannt. Die Dunkle Materie in solch einem virialisierten Halo hat näherungsweise ein Gleichgewicht zwischen kinetischer und potentieller Gravitationsenergie erreicht: $E_{\text{kin}} \sim -\frac{1}{2} E_{\text{pot}}$ (Infokasten Virialsatz).

Das Λ CDM-Modell sagt eine hierarchische Entstehung der Strukturen voraus. Halos mit kleinen Massen und entsprechend großen anfänglichen Dichtefluktuationen kollabieren zuerst. Diese Halos wachsen dann im Lauf der Zeit weiter an, indem sie mit benachbarten Halos verschmelzen und umliegende Materie „auf-sammeln“ (Akkretion) [7, 8]. All das bezieht sich aber nur auf das Verhalten der Dunklen Materie, deren Entwicklung allein durch die Gravitation beeinflusst wird. Für die Entstehung von Galaxien, Sternen und Quasaren muss man aber die baryonische (gasförmige) Komponente betrachten. Nur wenn es gelingt, diese extrem zu verdichten, weit über den virialisierten

DER VIRIALSATZ IN DER ASTROPHYSIK

In einem System im virialen Gleichgewicht hängen der zeitliche Mittelwert der kinetischen und potentiellen Energie wie folgt zusammen:

$$E_{\text{kin}} \approx -\frac{1}{2} E_{\text{pot}} .$$

Wenn das System eine Gesamtmasse M_{vir} und einen Radius R_{vir} aufweist und sich die Teilchen darin mit einer mittleren (quadratischen) Geschwindigkeit \bar{v}^2 bewegen, definiert man:

$$E_{\text{kin}} \approx \frac{1}{2} M_{\text{vir}} \bar{v}^2 \text{ und } E_{\text{pot}} \approx -G M_{\text{vir}}^2 / R_{\text{vir}} .$$

Kennt man nun den Radius und die mittlere Geschwindigkeit einer Ansammlung von Teilchen von der Beobachtung her, kann man die zur Aufrechterhaltung eines Gleichgewichts erforderliche Masse mithilfe des obigen Virialsatzes abschätzen:

$$M_{\text{vir}} \approx R_{\text{vir}} \bar{v}^2 / G .$$

Im Jahr 1933 wandte der Astronom Fritz Zwicky den Virialsatz auf den Coma-Galaxienhaufen an. Dabei entdeckte er, dass die viriale Masse ungefähr zehnmal so groß ist, wie die aller sichtbaren Galaxien zusammengenommen. Zwicky schloss daraus auf die Existenz einer unsichtbaren, nur durch die Schwerkraft bemerkbaren **Dunklen Materie**. Die moderne Kosmologie hat Zwicky mittlerweile Recht gegeben.

Der Virialsatz ist von großer Allgemeinheit, kann es sich bei den „Teilchen“, die das System ausmachen, doch um so physikalisch unterschiedliche Objekte wie Galaxien, Sterne, Atome oder WIMPs (weakly interacting massive particles) handeln. Letztere werden gegenwärtig als attraktive Kandidaten für die noch immer rätselhafte Dunkle Materie angesehen.

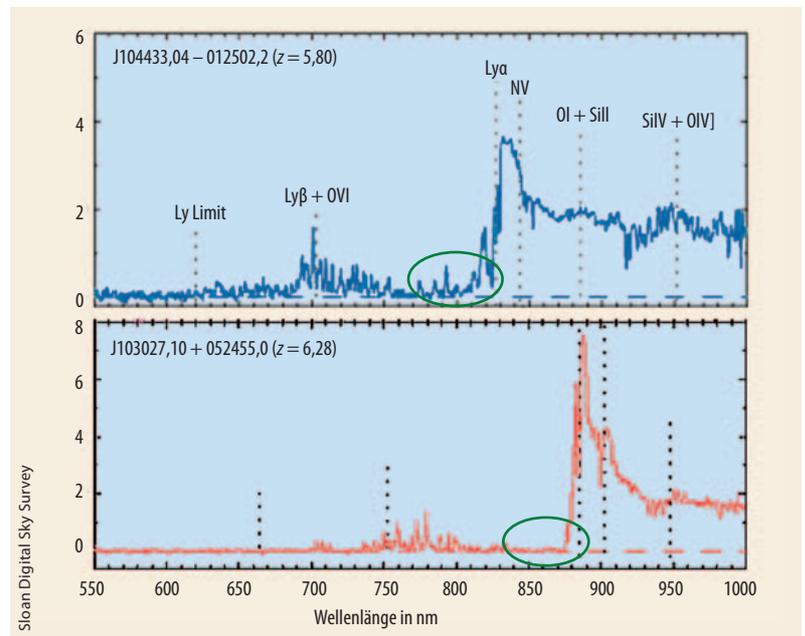


Abb. 1 In Spektren weit entfernter Quasare sind zahlreiche Linien zu sehen, insbesondere die starke Lyman- α -Linie (Ly α). Bei einem mit $z = 5,80$ noch etwas näheren Quasar verschwindet der Fluss auf der kurzwelligen Seite der Ly α -Linie nicht (oben). Das umgebende intergalaktische Medium (IGM) muss daher noch hochgradig ionisiert sein. Der mit $z = 6,28$ weiter entfernte Quasar zeigt den ersten jemals beobachteten Gunn-Peterson-Trog: vollständig unterdrückter Fluss jenseits der Ly α -Resonanz als Indikator für ein IGM, das neutral zu werden beginnt. Aufgrund der unterschiedlichen Rotverschiebung z ist die Ly α -Linie auf der Erde bei unterschiedlichen Wellenlängen zu beobachten.

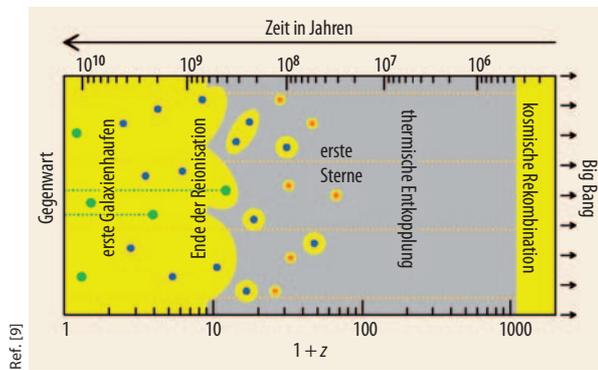


Abb. 2 In dieser kurzen Geschichte des Kosmos vom Urknall (rechts) zur Gegenwart (links) sind Regionen, in denen der Wasserstoff ionisiert ist, gelb dargestellt und solche mit neutralem Wasserstoff grau. Die vertikale Ausdehnung entspricht einer räumlichen Dimension. Quellen für die Reionisation sind die ersten Sterne (rote Punkte), die ersten Galaxien (blaue Punkte) und normale Galaxien (grüne Punkte).¹⁾

Endzustand der Dunklen Materie hinaus, können Galaxien und letztendlich auch Sterne entstehen. Das Gas stürzt zunächst zusammen mit der Dunklen Materie in die sich bildenden Halos, wird dabei aber durch adiabatische Kompression erhitzt, bis irgendwann der wachsende thermische Druck der Schwerkraft die Waage hält und das Gas sich nicht weiter verdichten kann. Wenn es dabei bliebe, wären niemals Galaxien und Sterne entstanden. Unser Universum wäre dann auf ewig dunkel geblieben. Natürlich wissen wir, dass die „kosmische Dunkelzeit“, die mit der Aussendung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung 400 000 Jahre nach dem Urknall begann, als die Photonen des primordialen Feuerballs in den infraroten Wellenbereich rotverschoben worden waren, irgendwann zu Ende gegangen sein muss. Die fundamentale Frage, deren Antwort wir immer noch fieberhaft suchen, ist dann: Wann und wie ging die kosmische Dunkelzeit zu Ende? Die Entstehung der ersten Sterne und Galaxien, mit der die Dunkelzeit zu Ende ging, ist auch für die Reionisation des Universums entscheidend, waren jene ersten Lichtquellen doch die treibende Kraft hinter dieser gewaltigen kosmischen Metamorphose (Abb. 2).

Die Geburt der Leuchtriesen

Wie wir oben gesehen haben, konnten die ersten Sterne und Galaxien nur entstehen, wenn es dem Gas im Inneren eines virialisierten Halos irgendwie gelang, den thermischen Druck zu verringern, der andernfalls einen weiteren Kollaps verhindert hätte. Das Gas musste also abkühlen. Oberhalb einer Temperatur von 10 000 K kann jedes Gas, ob primordial (H/He) oder schon mit schwereren Elementen angereichert, aufgrund des immer vorhandenen atomaren Wasserstoffs sehr gut kühlen. Wenn ein anderes Teilchen, vor allem ein Elektron, mit dem H-Atom kollidiert, regt es dieses in einen höheren gebundenen Zustand an (Stoßanregung) oder ionisiert es gleich ganz.²⁾ Das Elektron fällt dann – im zweiten Fall nach der Rekombination

mit einem Proton – Schritt für Schritt auf den Grundzustand zu, und mit großer Wahrscheinlichkeit wird schließlich die verbliebene Anregungsenergie per Lyman- α -Photon abgestrahlt. Wenn diese Photonen aus der Gaswolke entkommen können, also für geringe optische Tiefen, führt dies dazu, dass die thermische Anregungsenergie verloren geht und damit letztlich das Gas kühlt. Für die extrem starke Kühlung ist der Resonanzcharakter der Linie verantwortlich.

Nun liegen die Temperaturen in den ersten virialisierten Halos aber weit unter 10 000 K. Wie kann das Gas dennoch abkühlen? Im interstellaren Medium der Milchstraße findet Gaskühlung vor allem statt durch Stoßanregung und anschließende Linienemission von Ionen, Molekülen und Staubteilchen, die schwere Elemente wie Kohlenstoff, Sauerstoff, Silizium und Eisen enthalten. Bevor die ersten Sterne entstanden, bestand das kosmische Gas allerdings nur aus Wasserstoff und Helium; alle schwereren Elemente oder „Metalle“ in der Sprache der Astronomen mussten erst im Inneren von Sternen erzeugt und durch Supernova-Explosionen ans Gas zurückgegeben werden.

Das primordiale Gas kann damit weder durch „Metalle“ noch durch die Lyman- α -Linie kühlen [5]. In der hierarchischen Abfolge der Strukturentstehung bilden sich zuerst masseärmere Halos. Wenn das Gas in solche sog. Minihalos von ungefähr einer Million Sonnenmassen bei Rotverschiebungen von $z \sim 20$ stürzt, was einigen hundert Millionen Jahren nach dem Urknall entspricht, wird es durch die adiabatische Kompression lediglich auf einige 1000 K aufgeheizt. Dies liegt einfach daran, dass der von der Dunklen Materie erzeugte Potentialtopf in massearmen Halos nicht sehr tief ist. Hugh Couchman und Martin Rees haben 1986, kurz nach der Einführung der CDM-Idee, gezeigt, dass das primordiale Gas in solchen Minihalos aufgrund von molekularem Wasserstoff (H₂) dennoch kühlen kann. Allerdings ist das kein besonders effizienter Kühlmechanismus, verglichen beispielsweise mit der Metall-Kühlung. Außerdem lassen sich damit nur Temperaturen von ungefähr 200 K erreichen, während in den Sternentstehungsregionen in unserer Milchstraße typischerweise nur ca. 10 K herrschen. Die wesentlich höheren Temperaturen in den primordialen Minihalos haben dramatische Konsequenzen für die Entstehung der ersten Sterne, der sog. Population-III-Sterne [10,11].

Ganz allgemein bilden sich Sterne, wenn die Eigengravitation den entgegenwirkenden Gasdruck überwinden kann [12]. Da der thermische Druck aufgrund der höheren Temperaturen im primordialen Gas entsprechend größer ist, muss dann auch die Masse eines kollabierenden Fragments, in der Theorie der Sternentstehung Jeans-Masse genannt, größer sein. Dies ist der Hauptgrund, weshalb wir glauben, dass die ersten Sterne mit typischerweise 100 Sonnenmassen viel massereicher waren als die Sterne im heutigen Universum. Diese Vorhersage wurde durch eine Reihe von aufwändigen numerischen Simulationen bestätigt (Abb. 3). Aus der vorhergesagten großen Masse der Population-

1) In den allerersten Galaxien, die noch weitgehend frei waren von schweren Elementen, entstanden in kurzer Zeit viele Sterne, bevor es zu einer längeren Unterbrechung kam („Starburst“). In den normalen, massereichen Galaxien wie unserer Milchstraße bilden sich Sterne hingegen kontinuierlich („selbstregulierte Sternentstehung“).

2) Bei einer Temperatur jenseits von 10 000 K ist der hochenergetische Teil des Schwarzkörperspektrums intensiv genug, um die rund 10 eV für den Lyman- α -Übergang aufzubringen.

III-Sterne folgt auch, dass diese sehr heiß waren, mit Effektivtemperaturen von über 100 000 K gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz. Solche Sterne waren auch in der Lage, ionisierende UV-Photonen viel effizienter als masseärmere Sterne zu erzeugen. Dies ist für die erste Phase der Reionisation sehr wichtig. Man kann abschätzen, dass es nur eines kleinen Anteils kosmischer Baryonen in Population-III-Sternen bedurfte, um einen Großteil des Universums zu reionisieren. Die Energieerzeugung durch Kernfusion, genauer durch Wasserstoffbrennen, bei dem vier Protonen in ein α -Teilchen verschmelzen, setzt ca. 1 MeV pro Baryon frei. Es werden aber nur ca. 10 eV pro Wasserstoffatom zur Ionisation benötigt. Dann hätte schon 1/100 000 der Baryonen im Universum, die an der Population-III-Sternentstehung teilgenommen hatten, ausgereicht, um weite Teile des frühen Kosmos zu reionisieren. In jüngster Zeit ist es den Kosmologen gelungen, die Anfangsphase der Reionisation mit großräumigen Simulationen zu erkunden. Die ersten Sterne waren von individuellen Blasen ionisierten Gases, von den Astronomen H-II-Regionen genannt, umgeben. Deren Ausdehnung von einigen kiloparsec ($1 \text{ pc} = 3,09 \times 10^{16} \text{ m}$) war klein gegenüber den Abständen zwischen den einzelnen Sternen. Die initiale „Topologie“ der Reionisation hatte daher Ähnlichkeit mit einem Schweizerkäse: isolierte, näherungsweise kugelförmige Gebiete ionisierten Gases, die von neutralem Gas umgeben waren (Abb. auf S. 29). Wie kam es dann dazu, dass diese Löcher schließlich das gesamte intergalaktische Medium umfassten? Um diese Frage zu beantworten, müssen wir dessen Geschichte etwas näher betrachten.

Kosmische Superblasen

Während der kosmischen Dunkelzeit war das IGM kalt und außerordentlich gleichförmig. Ungefähr 50 Millionen Jahre nach dem Urknall kühlte das Gas im Universum sogar unter die Temperatur des CMB ab. Davor waren Gas und Photonen des CMB noch durch Thomson-Streuung thermisch gekoppelt. Mit der zunehmenden Expansion reichte die Gasdichte aber nicht mehr aus, um die Photon-Gas-Kopplung aufrechtzuerhalten. In einem vollkommen gleichförmigen Kosmos wäre es bei dieser „Eiszeit“ für immer geblieben. Das Universum wies aber, selbst in seiner Frühzeit, Bereiche geringfügiger Verdichtungen auf, die die Gravitation langsam aber stetig verstärkt hat. Entscheidend für die Geschichte des Universums und letztlich für die Reionisation war nun, dass diese Dichtefluktuationen nicht homogen verteilt waren, sondern immer in Gruppen und Haufen auftraten. Kosmologen nennen dies Biasing. Die grundlegende Idee ist wieder ganz einfach, und man veranschaulicht sich dies am besten mit einer irdischen Analogie: Wenn man hohe Berge sucht, sagen wir Fünftausender, wird man Gebirgsketten wie den Himalaya oder die Anden betrachten, wo sich in der Tat solche Riesenberge häufen. Die höchsten Berge sind eben nicht gleich über die ganze Erde verteilt. Wo es

schon eine Gebirgskette gibt, bedarf es nur noch einer kleinen weiteren Erhöhung, um auf große Höhen zu kommen. Diese großskalige Gebirgskette macht es also wahrscheinlich, dass zusätzliche kleinere Hügel in der Addition 5000 m oder mehr ergeben. Der Berghöhe entspricht im Rahmen dieser Analogie die Dichte der jeweiligen Dichtefluktuation. Die ersten virialisierten Halos, die in Gebieten mit den größten Überdichten entstehen, treten also gehäuft auf, wenn schon eine großräumige Überdichte vorliegt.

Das Ende der kosmischen Dunkelzeit verlief demnach „insular“. Zunächst weit voneinander entfernte Gebiete wurden zu den Orten der ersten Stern- und Galaxienbildung. Diese Inseln der ersten Sterne waren dann auch die Quellen für den Beginn der Reionisation. Die H-II-Regionen um die ersten Sterne konnten aufgrund der Häufung der Quellen zu größeren Regionen („Superblasen“) verschmelzen. Diese vereinzelt Gebiete der Sternentstehung, in denen das IGM lokal schon reionisiert vorlag, waren durch riesige Bereiche von noch kaltem, neutralem Gas voneinander getrennt (Abb. 4). Im Lauf der Zeit aber, als die Gravitation einen immer größeren Teil der kosmischen Materie verdichtet hatte, wuchsen die ionisierten Gebiete stetig an. Die unterdichten, kalten und noch neutralen

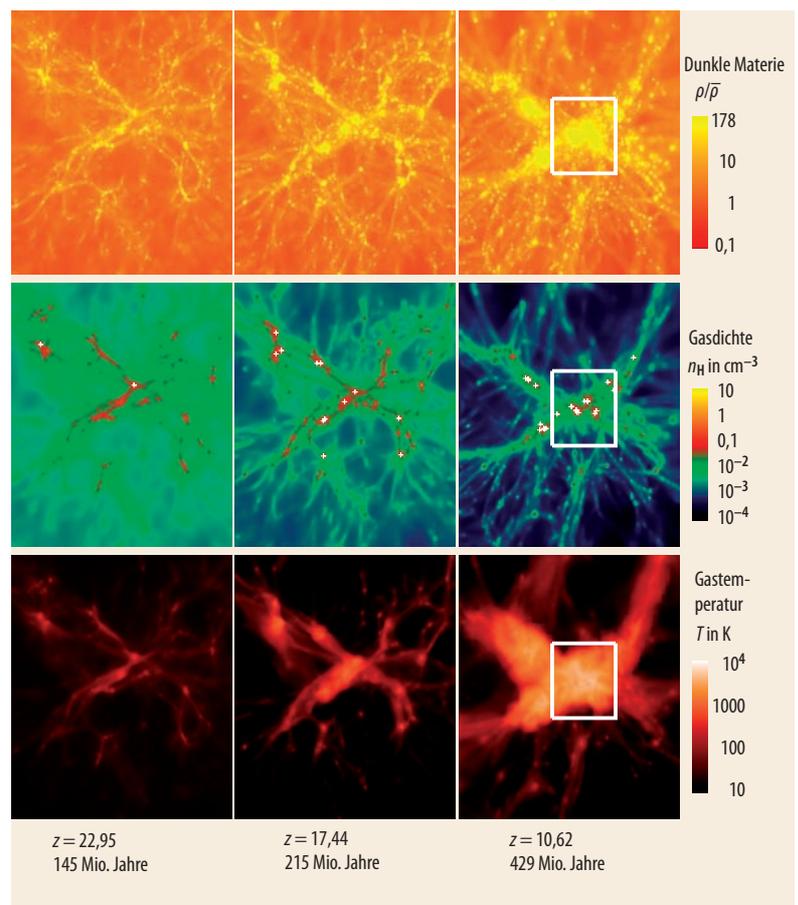
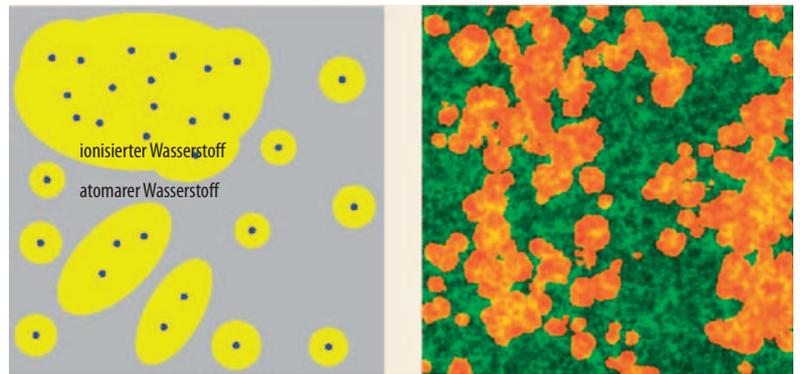


Abb. 3 Diese Supercomputer-Simulation zeigt, wie aufgrund der Schwerkraft Dunkle Materie (oben) und Gas (Mitte) zu einer primordialen Galaxie „klumpen“. Gezeigt ist die Entwicklung zu drei verschiedenen Zeiten (von links nach rechts). Die Kreuze bezeichnen individuelle Population-III-Sterne, die noch vor den ersten Galaxien entstehen. Der Virialisierungsprozess ist von starken Stoßwellen begleitet, die das einfallende Gas auf über 10 000 K aufheizen (unten).

T. H. Greif, J. L. Johnson, R. S. Klessen & V. Bromm, Texas Advanced Computing Center

Abb. 4 Während der Reionisation bilden Gebiete mit großer Überdichte Haufen von Galaxien, deren H-II-Regionen (gelb) sich zu riesigen Superblasen überlappen, während Galaxien, und daher H-II-Regionen, nur selten in unterdichten Gebieten zu finden sind (links). Numerische Simulationen bestätigen dieses Bild (rechts). Die ionisierten Blasen (orange) nehmen einen zunehmend größeren Teil des neutralen Mediums (grün) ein.



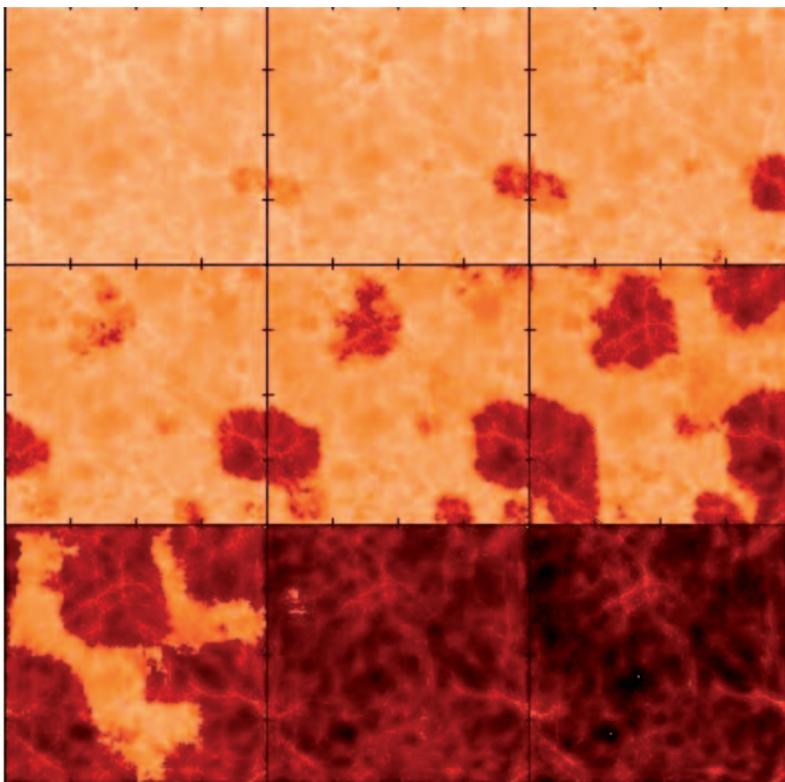
Ref. [9, 13]

Regionen wurden immer kleiner und seltener, bis diese schließlich am Ende des Reionisationsprozesses ganz verschwanden. Dies dürfte bei Rotverschiebungen von $z \sim 6$ der Fall gewesen sein. Man nennt diese Abfolge „Reionisation von innen nach außen“, d. h. Gebiete mit den größten Dichten wurden als erste reionisiert (inside-out).

Die globale Abfolge der Reionisation hätte aber auch ganz anders verlaufen können. Eine implizite Annahme in der Theorie der Reionisation von innen nach außen ist, dass die ersten leuchtkräftigen Quellen aus Sternen bestanden. Die Energie der meisten Photonen lag dann im UV-Bereich, und die von ihnen erzeugten H-II-Regionen waren scharf begrenzt, hatten also dünne Ionisationsfronten. Dies ist letztlich verantwortlich für

die oben erwähnte Schweizerkäse-Topologie. Wenn nun aber die ersten Quellen sog. Mini-quasare waren, also akkretierende Schwarze Löcher mit nicht zu großen Massen, erwartet man die Emission von Photonen vorwiegend im Röntgenbereich. Im Gegensatz zur UV-Strahlung haben solche Photonen einen wesentlich kleineren Wirkungsquerschnitt für die Photoionisation von Wasserstoff. Die mittlere freie Weglänge ist daher viel größer, sodass die ionisierenden Photonen nicht auf die unmittelbare Umgebung der Quellen beschränkt blieben. Sie würden ins allgemeine IGM entkommen und dort vor allem die unterdichten Regionen, die sog. Voids, zuerst ionisieren. Dies ist eine Folge der langen Zeitskalen für die Rekombination bei geringen Dichten: $t_{\text{rec}} \sim 1/n$. Bei hohen Dichten muss daher ein Atom mehrfach ionisiert werden, um die immer wieder erfolgenden Rekombinationen auszugleichen. In Gas geringer Dichte hingegen, z. B. in den Voids, genügt aber schon ein einziges ionisierendes Photon pro Wasserstoffatom zur permanenten Ionisation. Der globale Verlauf der Reionisation wäre dann „von außen nach innen“ (outside-in). Theoretisch kann man beide Szenarien begründen, obwohl das gegenwärtige Standardmodell der Reionisation von stellaren Quellen und daher von einem Verlauf „inside-out“ ausgeht.

Aus der Dichteabhängigkeit der Rekombinations-Zeitskala ergibt sich eine weitere faszinierende Möglichkeit für den zeitlichen Ablauf der Reionisation. Im Jahre 2003 hat Renyue Cen von der Princeton University das Modell der „Doppel-Reionisation“ vorgeschlagen. Cen ging dabei von einer ersten Generation massiver Population-III-Sterne aus, die effiziente Produzenten ionisierender UV-Strahlung waren. Diese Sterne führten zu einer ersten Epoche der zumindest teilweisen Reionisation. Sie waren aber auch sehr kurzlebig und konnten nur ganz am Anfang der kosmischen Sternentstehung auftreten, da spätere Sternengenerationen sich aus Material gebildet haben mussten, das schon mit schweren Elementen angereichert war. Dies war auch erst möglich, als das durch die ersten Sterne aufgeheizte Gas sich wieder hinreichend abgekühlt hatte. Solche Sterne waren der Theorie nach weniger massereich und produzierten damit auch weniger effizient ionisierende Strahlung. Entscheidend ist nun, dass das Universum in gewissem Sinne diese erste Epoche der Reionisation wieder „vergessen“ haben könnte. Bei hohen Rotverschiebungen war das



Ref. [14]

Abb. 5 Diese numerische Simulation zeigt, wie sich mithilfe der rotverschobenen 21-cm-Linie, die neutraler Wasserstoff aussendet, die Struktur des frühen Universums erkunden lässt. Die zeitliche Abfolge der Reionisation, von einem vollständig neutralen Universum vor der

Entstehung der ersten Sterne (oben links) zu einem vorwiegend ionisierten (unten rechts), ist klar in der Stärke des zu beobachtenden 21-cm-Signals zu erkennen. Eine dunklere Färbung bedeutet hier schwächere Radiostrahlung.

Universum noch viel dichter, und die Rekombinations-Zeitskala entsprechend kurz. Genauer kann man berechnen, dass t_{rec} kürzer als das Weltalter (Hubble-Zeit) ist, solange $z > 8$ ist. Die „erste Reionisation“ wäre dann also abgelöst worden durch eine längere, mehrere 100 Millionen Jahre währende Periode mit verminderter Sternentstehung und damit verbundener geringerer Produktion ionisierender Strahlung. Das Universum würde wieder fast gänzlich neutral werden. Schließlich, als die zweite Generation von Sternen entstand, wäre es zu einer zweiten Epoche der Reionisation gekommen, diesmal vollständig und permanent. Cens Modell der Doppel-Reionisation hat großes Aufsehen erregt, aber man fragt sich natürlich, wie es sich durch Beobachtungen testen lässt und wie man empirisch zwischen den konkurrierenden Szenarien entscheiden könnte. Dieser Frage wollen wir uns abschließend zuwenden.

Auflösung im Radiohimmel?

Neben dem oben erwähnten Gunn-Peterson-Effekt, der uns über das Ende der Reionisation Auskunft gibt, besitzen wir seit kurzem auch einen Anhaltspunkt über deren Anfang. Diese Beobachtung verdanken wir dem WMAP-Satelliten (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) der NASA, der seit 2003 außerordentlich erfolgreich die Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund vermisst und damit die Parameter unseres Weltmodells mit hoher Präzision bestimmt [1]. Außerdem hat WMAP gemessen, wie stark die Photonen des CMB während ihrer langen Reise durch den Kosmos von freien Elektronen gestreut wurden (Infokasten Wechselwirkung). Diese Thomson-Streuung führte nämlich auch zu einem geringen Grad an Polarisierung des CMB-Lichts. Je stärker die gemessene Polarisierung, desto mehr Streuungen an freien Elektronen musste es gegeben haben. Eine der großen Überraschungen der WMAP-Ergebnisse war nun, dass die Stärke der Polarisierung, und daher auch die der Thomson-Streuung, größer war als erwartet. Um freie Elektronen zu haben, bedarf es ionisierender Strahlung, die wiederum Sterne erzeugen. Aus dem WMAP-Resultat ergibt sich, dass das Universum schon bei hohen Rotverschiebungen von $z \sim 10$ zumindest teilweise reionisiert sein musste, möglicherweise durch massive Population-III-Sterne. Allerdings konnte die Reionisation auch nicht zu früh eingesetzt haben, da dann das Polarisations-Signal den gemessenen Wert überträfe.

Die Thomson-Streuung wird von der ionisierten Phase des Wasserstoffs hervorgerufen. Es gibt aber noch eine weitere Möglichkeit, den kosmischen Wasserstoff bei hohen Rotverschiebungen zu beobachten, und zwar dessen noch neutralen Anteil (komplementär zur Thomson-Streuung). Dies ist die berühmte 21-cm-Strahlung, erzeugt durch den Spin-Flip-Übergang, wenn der Spin des Elektrons zwischen der parallelen und der antiparallelen Ausrichtung relativ zum Protonenspin springt. Neutrale Bereiche im IGM lassen sich

dann in der rotverschobenen 21-cm-Linie beobachten, wohingegen schon reionisierte Regionen auf 21-cm-Karten als dunkle Flecken erscheinen (Abb. 5). Gegenwärtig sind mehrere Experimente dabei, nach diesem Reionisations-Signal im Meterwellen-Radiohimmel zu suchen. Die beste Aussicht, die erste derartige Beobachtung zu machen, wird dem niederländischen LOFAR (Low-Frequency Array) eingeräumt. Das Potenzial für die 21-cm-Kosmologie ist gewaltig, da sie im Prinzip die dreidimensionale Verteilung des neutralen Wasserstoffs im frühen Universum ausmessen kann. Damit ist es dann auch möglich, zwischen den verschiedenen theoretischen Modellen für die Reionisation zu entscheiden.

Die kosmische Reionisation ist ein atemberaubender Vorgang, der das Universum nachhaltig geprägt hat. Um sie zu verstehen, müssen wir die fundamentale Physik der Dunklen Materie, vor allem deren Dichteverteilung, zusammen mit der Astrophysik der Stern- und Galaxienentstehung betrachten. Mithilfe moderner Supercomputer ist es uns gelungen, ein glaubwürdiges theoretisches Bild der Reionisation zu entwerfen. Neueste Beobachtungen erlauben es uns, die Modelle zu testen und zu verfeinern. Das kommende Jahrzehnt wird voraussichtlich die Lösung dieses alten kosmologischen Rätsels erleben.

Literatur

- [1] G. Börner, Physik Journal, Februar 2005, S. 21
- [2] J. E. Gunn und B. A. Peterson, Astrophys. J. **142**, 1633 (1965)
- [3] X. Fan, C. L. Carilli und B. Keating, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **44**, 415 (2006)
- [4] G. Börner, The Early Universe – Facts and Fiction, Springer, Berlin (2003)
- [5] R. Barkana und A. Loeb, Phys. Rep. **349**, 125 (2001)
- [6] V. Bromm, Science **317**, 1511 (2007)
- [7] V. Springel, Physik Journal, Juni 2003, S. 31
- [8] M. S. Longair, Galaxy Formation, Springer, Berlin (1998)
- [9] R. Barkana, A. Loeb, Rep. Prog. Phys. **70**, 627 (2007)
- [10] R. B. Larson und V. Bromm, Spektrum der Wissenschaft, Februar 2002, S. 26
- [11] V. Bromm und R. B. Larson, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **42**, 79 (2004)
- [12] S. W. Stahler und F. Palla, The Formation of Stars, Wiley-VCH, Weinheim (2004)
- [13] G. Mellema et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **372**, 679 (2006)
- [14] S. R. Furlanetto, A. Sokasian, L. Hernquist, Mon. Not. R. Astron. Soc. **347**, 187 (2004)

DER AUTOR

Volker Bromm studierte Physik an den Universitäten Kiel und Heidelberg. Er promovierte 2000 an der Yale University über Sternentstehung im frühen Universum. Nach Postdoc-Aufenthalten in Cambridge, am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und am Space Telescope Science Institute in Baltimore ist er seit 2004 Professor für Astronomie an der University of Texas in Austin. Bromm erforscht die Entstehung der ersten Sterne und Galaxien mit numerischen Simulationen auf Großrechnern sowie die Eigenschaften von Supernova-Explosionen und Gammastrahlungsblitzen bei hohen Rotverschiebungen.

