

genannt – und man muss eine bestimmte Statistik der kosmischen Strukturen fordern, damit sich massereiche Halos in einer hinreichenden Zahl bilden.

Loeb argumentiert weiter, dass sich in den Halos extrem massereiche Sterne der so genannten Population III bilden (siehe Glossar), die sehr schnell durch ihren Lebenszyklus laufen und dabei schwere Elemente bilden. Dazu gehören Sauerstoff als Voraussetzung für Wasser, Kalzium und Silizium zur Bildung von Planeten aus Gestein, sowie weitere Elemente wie Kohlenstoff, die für eine komplexe, auf den Planeten ablaufende Chemie erforderlich sind.

Allerdings ist die Zeitspanne, in welcher der Mikrowellenhintergrund die Temperatur hoch genug hält, so dass Wasser in seiner flüssigen Phase existieren kann, sehr kurz. Sie dauert nur etwa zehn Millionen Jahre. Die Lebensdauer von Sternen der Population III ist deutlich kürzer, womit sie als Energielieferant nicht in Frage kommen. Dass in dieser kurzen Zeit Leben entsteht und Evolution stattfindet, klingt sehr unplausibel. Daher erfordern die Überlegungen von Loeb zusätzliche Energiequellen auf den Planeten: In Frage kämen die aus der Akkretionsphase des Planeten stammende Wärme und die Zerfallsenergie kurzlebiger radioaktiver Elemente. Dies würde die habitable Epoche verlängern.

Anthropisches Prinzip

Loeb's Arbeit widmet sich nach der Diskussion dieser Punkte der Frage nach dem anthropischen Prinzip: Ist es Zufall, dass wir in der Kosmologie heute bestimmte Werte für die kosmologischen Parameter messen? Oder haben die kosmologischen Parameter Werte, welche die Entstehung von Leben wahrscheinlicher machen, weil es andernfalls keine Beobachter wie uns gäbe, die diese Parameter messen könnten? Nach seiner Argumentation könnte auch im frühen Universum Leben entstanden sein, als kosmologische Parameter wie die Materiedichte solche Werte hatten, die sich um den Faktor eine Million von dem heutigen Wert unterscheiden. Damit wären die Werte der kosmologischen Parameter, wie wir sie heute beobachten, nicht speziell – was Loeb auch in einer früheren Veröffentlichung über die Entstehung von Planeten in frühen Zwerggalaxien findet.

Vieles an Loeb's Argumentation klingt konstruiert, etwa die Forderung nach ei-

ner speziellen Statistik der kosmischen Materieverteilung. So stellt sich die Frage, warum der Mikrowellenhintergrund für das flüssige Wasser eine Rolle spielt, wenn doch weitere Mechanismen erforderlich sind, die auf viel größeren Zeitskalen Energie bereitstellen. Um Leben zu ermöglichen, darf es kein thermisches Gleichgewicht geben – allerdings würde der Mikrowellenhintergrund genau diese Eigenschaft haben.

Auch wenn es viele spekulative Punkte in Loeb's Arbeit gibt, ist sie ein fantastisches Beispiel unkonventionellen Denkens. Evolution nach unserem Verständnis findet auf kosmologischen Zeitskalen statt, so dass Leben, wie wir es kennen, immer Phänomen in der Spätzeit des Univer-

sums ist. Wir wissen letztlich nicht, wie wir die Entstehung von Leben bewerten sollen – vor allem, weil wir nur das Leben auf der Erde kennen, für das unter Umständen ebenfalls sehr spezielle Bedingungen erforderlich waren.

BJÖRN MALTE SCHÄFER forscht am Zentrum für Astronomie Heidelberg an der Physik des kosmischen Mikrowellenhintergrunds, am schwachen Gravitationslinseneffekt und an kosmischer Strukturbildung.

Literaturhinweis

Loeb, A.: The Habitable Epoch of the Early Universe. arXiv: 1312.0613, 2014

ZUM NACHDENKEN

Hintergrundstrahlung, Temperatur und Rotverschiebung



Am Anfang war das Universum heiß und es besaß eine hohe Dichte. Im Zuge seiner Expansion kühlte es ab und die Dichte des darin enthaltenen Gemischs aus Strahlung und Materie sank ab. Als schließlich hinreichend viele Elektronen aus dem heißen Plasma an die Protonen koppelten und neutrales Wasserstoffgas bildeten, wurde das Universum durchsichtig.

Aufgabe 1: Für eine grobe Abschätzung, bei welcher Temperatur T_t das Universum transparent wurde, betrachtet man das thermische Gleichgewicht der Rekombinationsreaktion $p + e^- \rightleftharpoons H + \gamma$. Die relativen Häufigkeiten der freien Elektronen e^- , Protonen p und H-Atome, wobei γ die Strahlung symbolisiert, beschreibt dann die Saha-Gleichung (s. SuW 6/1986, S. 356 und 7-8/1986, S. 440):

$$\frac{n_p n_e}{n_H} = \left(2 \pi \frac{m_e k T}{h^2} \right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{k T} \right).$$

Darin sind n_p , n_e und n_H die Anzahldichten, $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg die Elektronenmasse, $k = 8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K die Boltzmann-Konstante und $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J s das plancksche Wirkungsquantum; $\exp x = e^x$. Der Anteil der freien Elektronen ist definiert durch $x_e =$

$n_e / (n_p + n_H)$. Man bringe durch Umformen die Saha-Gleichung in die Form:

$$\frac{x_e^2}{1 - x_e} = f(n_p, n_H) \cdot \kappa \quad (1)$$

wobei $\kappa = \left(2 \pi \frac{m_e k T}{h^2} \right)^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{k T} \right)$ ist, und ermittle f unter der Voraussetzung elektrischer Neutralität, also $n_e = n_p$.

Aufgabe 2: Nun hängen die Temperatur und die Summe der Anzahldichten neutralen und ionisierten Wasserstoffs wegen der Expansion des Universums von der Rotverschiebung ab:

$$T = 2,728 \text{ K} (1 + z)$$

$$n_H + n_p = 1,6 \text{ m}^{-3} (1 + z)^3.$$

Unter der Annahme, 50 Prozent der Materie sei ionisiert, also $x_e = 0,5$, suche man nach derjenigen Rotverschiebung, die Gleichung (1) erfüllt, und erhält dabei automatisch die gesuchte Temperatur T_t . AXEL M. QUETZ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **9. Juli 2014** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Haus der Astronomie, MPIA-Campus, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528377. Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern **Preise** verlost: siehe S. 101