

■ Problematisches Lithium

Erstmals gemessene Wirkungsquerschnitte bestätigen die Diskrepanz zwischen vorhergesagten und beobachteten Lithiumhäufigkeiten bei der primordialen Nukleosynthese.

Der Urknall gilt heute zwar als allgemein akzeptiertes Modell zur Entstehung des Universums, bis in die 1970er-Jahre war es jedoch sehr umstritten. So prägte der britische Astrophysiker Sir Fred Hoyle die Bezeichnung „Big Bang“ nur, um den Ansatz, das Universum sei aus einem singulären Ereignis entstanden, lächerlich zu machen. Die Wende brachten erst Beobachtungen, insbesondere der 3-K-Hintergrundstrahlung durch Wilson und Penzias, die sich als Nachhall des Urknalls interpretieren lässt. Weitere Hinweise auf die erste Phase des Urknalls liefern die Inhomogenitäten in der Hintergrundstrahlung, die durch die Satelliten COBE und WMAP vermessen wurden. Ein drittes wichtiges Indiz ist die Produktion der ersten leichten, „primordialen“ Elemente von Helium bis Lithium, die im rasch expandierenden Universum zwischen der dritten und zehnten Minute in einer Folge schneller Fusionsprozesse zwischen Protonen und Neutronen entstanden sind. Danach war die Dichte so weit gesunken, dass die Teilchen entkoppelten und keine weiteren Kernreaktionen mehr stattfinden konnten. Da in der Natur keine stabilen Atomkerne mit Masse 5 und 8 existieren und Dichte und Temperatur für komplexere Kernreaktionen zur Überbrückung dieser Lücken nicht ausreichen, war die Synthese schwererer Elemente in dieser Phase weitgehend unterdrückt. Erst 400 Millionen Jahre nach dem Big Bang war die Dichte in Sternen der ersten Generation hoch genug, damit diese schwerere Elemente wie Kohlenstoff und Sauerstoff produzieren konnten.

Die beobachteten Häufigkeiten der primordialen Isotope ^1H , ^2H , ^3He , ^4He sowie ^6Li und ^7Li gelten als wichtiges Indiz für die Verlässlichkeit der Big-Bang-Theorie und werden zur Bestimmung der Dichte von Materie (Baryonen) im Universum genutzt. Die Vorhersagen

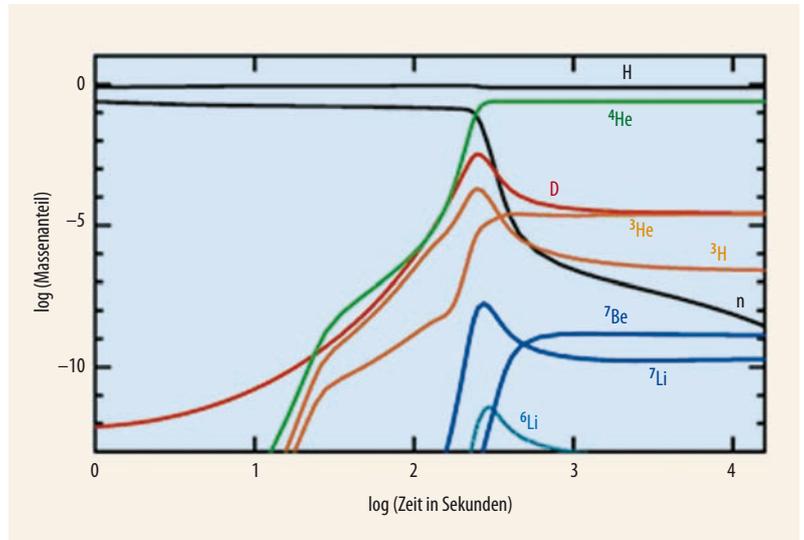


Abb. 1 Im Standard-Big-Bang-Modell haben sich die primordialen Isotopenhäufigkeiten in den ersten zehn Minuten des Universums sehr unterschiedlich

entwickelt. Die Häufigkeit von ^6Li sollte um einen Faktor 4000 kleiner sein als die von ^7Li und deswegen unterhalb der Beobachtungsgrenze liegen.

zu ihrer Entstehung im kosmologischen Standardmodell hängen nicht nur von den Annahmen zu Dichte und Temperatur im sich rasch ausdehnenden frühen Universum ab, sondern insbesondere auch von der genauen Kenntnis der Fusionsreaktionen bei diesen Bedingungen (Abb. 1). Entsprechende Rechnungen ergeben zwar konsistente Resultate für die Wasserstoff- und Heliumisotope, aber starke Diskrepanzen zwischen vorhergesagten und beobachteten Häufigkeiten der beiden Lithium-Isotope ^6Li und ^7Li . Dieses „Lithium-Problem“ hat das französische Astronomenehepaar Monique und François Spite zum ersten Mal aufgrund der beobachteten Lithiumhäufigkeiten in alten („metallarmen“) Sternen unserer Galaxis postuliert [1], bevor andere Messungen und Beobachtungen es bestätigt haben. Demnach wird viermal weniger ^7Li beobachtet als vorhergesagt, aber tausendmal mehr ^6Li , was weitgehende Diskussionen über die Implikationen für das Standardmodell nach sich zog [2].

Bevor man jedoch grundsätzliche Annahmen über die Gültigkeit eines Modells infrage stellt,

sollte man die messbaren Parameter überprüfen. Die wichtigsten sind hier die Reaktionsraten der verschiedenen Kernprozesse, die zum Aufbau von ^6Li und ^7Li führen. Dazu gilt es, die Instabilitätslücke bei Masse 5 mit Fusionsreaktionen zwischen Wasserstoff- und Helium-Isotopen zu überbrücken. Gegenwärtig basieren die Modellrechnungen auf den Reaktionen $^2\text{H}(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$ sowie $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ mit nachfolgendem ^7Be -Zerfall als die wichtigsten Quellen für ^6Li und ^7Li (Abb. 2). Hinzu kommen andere Prozesse wie $^3\text{H}(^3\text{He},\gamma)^6\text{Li}$, $^3\text{H}(\alpha,n)^6\text{Li}$ oder $3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$ für ^6Li bzw. ^7Li , die allerdings bedingt durch den Mangel an Tritium (^3H) wesentlich schwächer sind [3]. Die Reaktionsraten hängen von der eigentlichen Stärke der Reaktion, also dem Wirkungsquerschnitt, und der Häufigkeit der fusionierenden Isotope ab.

Die Wirkungsquerschnitte von $^2\text{H}(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$ und $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ waren für die Energien, die den Temperaturen in den ersten Minuten entsprechen, weitgehend unbekannt und basierten nur auf theoretischen Vorhersagen. Da die Wirkungsquerschnitte extrem niedrig sind, ist eine verlässliche Messung unter

Laborbedingungen in Beschleuniger-Experimenten sehr schwierig, denn der von der kosmischen Strahlung hervorgerufene starke Untergrund behindert den Nachweis der emittierten γ -Strahlung. Erst im vergangenen Jahr wurde die Reaktion ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ erstmals verlässlich über einen weiten Energiebereich gemessen und theoretisch interpretiert. Dadurch ließ sich die zugehörige Unsicherheit bei der ${}^7\text{Li}$ -Produktion erheblich reduzieren [4]. Nun ist es am LUNA-Beschleuniger im italienischen Gran-Sasso-Labor gelungen, auch die Reaktion ${}^2\text{H}(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$ zu vermessen [5]. Das Labor liegt tief unter der Erde in einem Autobahntunnel, wobei das fast 2000 m hohe Gran-Sasso-Massiv als Abschirmung für die kosmische Strahlung dient. Trotz der starken Abschirmung der Detektoren war der γ -Untergrund immer noch erheblich höher als das γ -Signal von der Kernreaktion. Die Auswertung erforderte deswegen eine komplexe statistische Analyse des gemessenen Gamma-Spektrums, um signifikante Aussagen über den Wirkungsquerschnitt machen zu können. Die Ergebnisse bestätigen die bisherigen theoretischen Vorhersagen zum Wirkungsquerschnitt und reduzieren gleichzeitig die kernphysikalischen Unsicherheiten, die nun noch in

den Raten der verschiedenen Abbaureaktionen der beiden Lithium-Isotope bestehen. Das Lithium-Problem bleibt somit bestehen, seine grundsätzliche Lösung könnte aber auch woanders liegen.

Auch wenn über den Einfluss von Elementarteilchen oder auch Dunkler Materie auf die Prozesse zur Lithium-Produktion spekuliert wurde [6], deuten Beobachtungsergebnisse von Lithium-Häufigkeiten im interstellaren Staub von metallarmen Galaxien wie der kleinen Magellanschen Wolke auf andere Erklärungen hin. Die dort vorhandenen ${}^7\text{Li}$ -Häufigkeiten stimmen gut mit den Vorhersagen des kosmologischen Standardmodells überein [7]. Für die Abweichungen in den stellaren Häufigkeiten könnten deswegen wohl auch bislang nicht klar identifizierte stellare Nukleosynthese-Prozesse in der ersten Generation von Sternen verantwortlich sein, da diese, bedingt durch ihren primordialen Kernbrennstoff, anders brennen müssten als heutige Sternengenerationen.

*

Vielen Dank für Diskussion und nützliche Hinweise gehen an Brian Fields von der University of Illinois, Urbana Champaign, und Frank Strieder von der South Dakota School of Mines and Technology.

Michael Wiescher

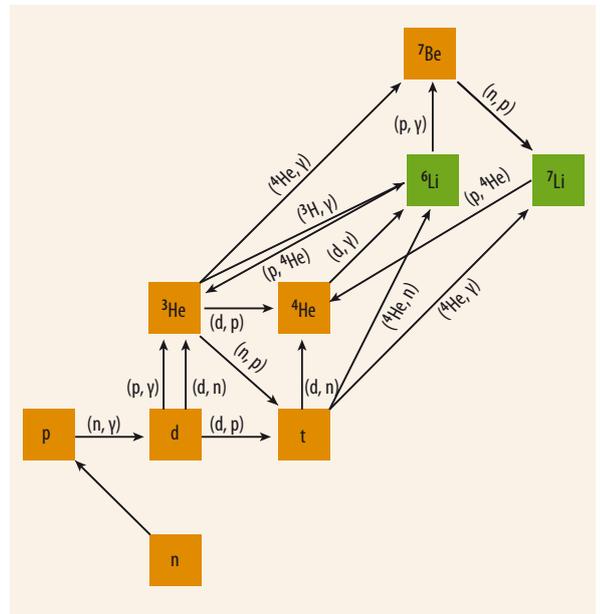


Abb. 2 Zum Aufbau der primordialen Isotope nach dem Urknall trägt ein komplexes Reaktionsnetzwerk bei.

- [1] M. Spite und F. Spite, *Nature* **297**, 483 (1982)
- [2] B. D. Fields, *Ann. Rev. Nuclear Particle Sci.* **61**, 47 (2011)
- [3] M. S. Smith, L. H. Kawano und R. A. Malaney, *Astrophys. J. Suppl.* **85**, 219 (1993)
- [4] A. Kontos, E. Uberseder, R. deBoer, J. Görres, C. Akers, A. Best, M. Couder und M. Wiescher, *Phys. Rev. C* **87**, 065804 (2013)
- [5] M. Anders et al. (LUNA Coll.), *Phys. Rev. Lett.* **113**, 042501 (2014)
- [6] R. H. Cyburt, J. Ellis, B. D. Fields, F. Luo, K. A. Olive und V. C. Spanos, *J. of Cosm. & Astropart. Phys.* **5**, 14 (2013)
- [7] J. C. Howk, N. Lehner, B. D. Fields und G. J. Mathews, *Nature* **489**, 121 (2012)

Die Körperform macht's

Formanisotropie kann für die Orientierung von Mikroorganismen im Gravitationsfeld sorgen.

Für Mikroorganismen ist es lebensnotwendig, sich an äußeren Feldern zu orientieren – eine Eigenschaft, die man „Taxis“ nennt. So können Bakterien entlang eines chemischen Gradienten schwimmen und damit ihre Nahrungsaufnahme verbessern (Chemotaxis). Sie verwenden dazu auf molekularer Ebene einen Sensor für die Stoffkonzentration. Andere Mikroorganismen, wie Algen oder Pantoffeltierchen, schwimmen gegen die Gravitation nach oben (negative Gravitaxis), wo sie ebenfalls ein besseres Nahrungsangebot,

mehr Sauerstoff oder mehr Licht für die Photosynthese vorfinden. Allerdings ist derzeit immer noch unklar, ob die Mikroorganismen einen speziellen Sensor für die Richtung des Gravitationsfeldes besitzen. Rein physikalische Prinzipien reichen eigentlich schon aus, damit sie den Weg „nach oben“ finden [1].

In einer Zusammenarbeit von Experiment und Theorie haben sich Forscher um Clemens Bechinger (Stuttgart) und Hartmut Löwen (Düsseldorf) mit einem dieser physikalischen Prinzipien genauer be-

schäftigt und kürzlich gezeigt, dass die Form eines Mikroschwimmers maßgeblich sein Schwimmverhalten im Gravitationsfeld beeinflusst [2]. Insbesondere demonstrieren sie sehr eindrucksvoll die negative Gravitaxis mit einem formanisotropen Schwimmer in Gestalt eines L.

Künstlich fabrizierte Mikroschwimmer haben den Vorteil, dass man ausgeklügelte Sensoren für das Schwerfeld ausschließen kann. Ihr Verhalten ist daher mit rein physikalischen Mechanismen zu erklären. Zudem erlauben es künstliche Mikroschwimmer auch,