

# Die entscheidende Rolle der Wasserstoffbildung bei der Sternentstehung im frühen Universum

Stephan Schlemmer\*

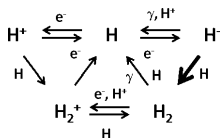
Astrochemie · Laserchemie · Reaktionskinetik · Wasserstoff

Die Chemie des frühen Universums ist scheinbar einfach, da an ihr nur Wasserstoff und Helium in verschiedenen Formen beteiligt waren. Die ersten Sterne bildeten sich aus diesem Urgas nach der dunklen Epoche des Universums, einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall. Wie diese ersten Sterne entstanden, ist eine der aufregendsten Fragen der Astrophysik. Es ist schon lange bekannt, dass die Bildung molekularen Wasserstoffs dabei eine besondere Rolle spielt, denn bei Temperaturen unterhalb von  $10^4$  K wirkt  $H_2$  durch Emission von Strahlung als Kühlmittel. Der effizienteste Prozess zur  $H_2$ -Bildung unter den Bedingungen dieser kosmischen Epoche ist die assoziative Abtrennung (associative detachment, AD) von  $H_2$  gemäß Gleichung (1).



Der Geschwindigkeitskoeffizient dieser Schlüsselreaktion wurde experimentell von Kreckel et al. in Abhängigkeit von der Stoßenergie bestimmt und vor kurzem in *Science* veröffent-

licht.<sup>[1]</sup> Die hohe Qualität der Daten aus den Stoßexperimenten der überlagerten Strahlen aus  $H^-$  und  $H$  ermöglicht es nun, die zeitliche Entwicklung des Urgases genau vorherzusagen und ein klareres Bild von der Entstehung der ersten Sterne zu zeichnen. Insbesondere ist es nun möglich zu bestimmen, wie kalt das Gas vor der Sternentstehung wird und wie viel Gas notwendig ist,<sup>[2]</sup> d. h., wie schwer der neue Stern wird.



**Schema 1.** Chemisches Netzwerk der Entstehung molekularen Wasserstoffs im frühen Universum; dicker Pfeil:  $H_2$ -Bildung durch AD.

Das chemische Netzwerk der Wasserstoffbildung im frühen Universum ist in Schema 1 dargestellt. Helium ist neutral und nimmt nicht aktiv an der Wasserstoffbildung teil. Der Schlüssel zur Kühlung des Urgases liegt im molekularen Wasserstoff.  $H_2$  wird hauptsächlich über einen Zweistufenprozess aus der Anlagerung eines Elektrons an atomaren Wasserstoff unter Aussendung eines Photons (Strahlungsassoziation) und anschließender AD von  $H_2$  gemäß Gleichung (1) gebildet.

Alternativ kann er auch durch Ladungstransfer in  $H_2^+ + H$ -Stößen gebildet werden. Allerdings spielt dieser Weg lediglich in einer noch früheren Phase, in der die kosmische Hintergrundtemperatur höher ist und  $H^-$  noch effektiv durch Photodissoziation zerstört wird, eine Rolle. Lässt man diese Reaktion daher außer Acht, wird die Geschwindigkeit der Wasserstoffbildung durch das Ionisationsverhältnis (d. h. das  $H^+/H$ -Verhältnis) des Gases, das die Geschwindigkeit des ersten Reaktionsschrittes dominiert, und durch den Geschwindigkeitskoeffizienten für die AD, der jetzt von Kreckel et al. ermittelt wurde,<sup>[1]</sup> bestimmt.

Experimentelle Werte für den thermischen AD-Geschwindigkeitskoeffizienten  $\alpha(T)$  der Reaktion (1) wurden bereits früher in Flussreaktoren bestimmt, allerdings nur in einem sehr begrenzten und für die astrophysikalischen Simulationen viel zu kühlen Temperaturbereich von 250–350 K.<sup>[3–5]</sup> Theoretische Werte des AD-Geschwindigkeitskoeffizienten aus Streurechnungen<sup>[6–9]</sup> auf dem anziehenden  $X^2\Sigma_u^+$ -Potential weichen um einen Faktor 2–3 von den experimentellen Werten ab, und je nach Rechnung unterscheiden sich die theoretischen Daten, insbesondere bei hohen Temperaturen, ebenfalls stark voneinander. Diese Situation konnte nun durch die experimentellen Werte von Kreckel et al. deutlich verbessert werden. In dem Experiment wird ein  $H^-$ -Strahl in der Apparatur auf ca. 10 keV beschleunigt. Photonen eines Hochleistungslasers lösen die Elektronen eines Teils der  $H^-$ -Ionen ab und bilden so einen überlagerten H-Atomstrahl. Eine leichte Beschleunigung der Ionen durch ein zusätzliches elektrisches Feld bestimmt die Stoßenergie von Reaktion (1). Die gebildeten Wasserstoffmoleküle werden anschließend durch eine Kammer mit Heliumgas geleitet. Die beim Zusammenstoß mit einem Heliumatom freigesetzte Energie ist groß genug, um ein Elektron von den Wasserstoffmolekülen abzuspalten; das so entstehende  $H_2^+$  wird anschließend nachgewiesen. Zwar ist die Bestimmung des energieabhängigen Geschwindigkeitskoeffizienten  $\alpha(E)$  aus diesen Messungen durch acht Fehlerquellen mit einem Fehler behaftet, dieser konnte aber auf lediglich 25 % begrenzt werden. Die thermischen Geschwindigkeitskoeffizienten  $\alpha(T)$  wurden schließlich durch thermisches Mitteln der Messungen im Energiebereich  $E/k = 0.1\text{--}10^5$  K bestimmt.<sup>[1b]</sup>

Auf der Basis des nun sehr viel exakteren Wertes für  $\alpha(T)$  führten Kreckel und Mitarbeiter Simulationen der kosmologischen Entwicklung des Urgases durch. Wie man aus Schema 1 ersehen kann, wurde die chemische Entwicklung von

[\*] Prof. Dr. S. Schlemmer  
I. Physikalisches Institut, Universität zu Köln  
50937 Köln (Deutschland)  
E-Mail: schlemmer@ph1.uni-koeln.de

sechs Spezies  $e^-$ ,  $H^+$ ,  $H$ ,  $H^-$ ,  $H_2^+$  und  $H_2$  zeitlich verfolgt. Berücksichtigte man die Tatsache, dass Ladung und Menge der Protonen erhalten bleiben, konnte die Zahl der Spezies auf vier reduziert werden.  $H^-$  und  $H_2^+$  erreichen sehr schnell ein Gleichgewicht auf der Zeitskala der Simulation. Ihre Konzentration konnte durch die entsprechenden Gleichgewichtswerte angenähert werden. So konnte schließlich die zeitliche Entwicklung des Urgases über die explizite Entwicklung von nur zwei Spezies berechnet werden. Diese Rechnungen zeigen eine effiziente Wasserstoffbildung über die AD-Reaktion (1) aufgrund einer hohen Elektronenkonzentration. Die  $H_2$ -Konzentration erreicht dabei einen konstanten Wert, der wesentlich von  $\alpha(T)$  und der Gasdichte abhängt. Für eine maximale  $H_2$ -Konzentration von 2.5 Promille kühlt die Molekülwolke auf ca. 300 K ab. Bei diesen Temperaturen kühlt HD die Wolke wesentlich effektiver als  $H_2$  und muss daher mitberücksichtigt werden, auch wenn das D/H-Verhältnis nur  $2.6 \times 10^{-5}$  beträgt. Die HD-Konzentration erreicht einen Wert von ca. 1 ppm über einen effektiven D-H-Austausch durch  $D^+ + H_2$ -Stöße. Schließlich kühlt die Wolke noch stärker und erreicht eine Minimaltemperatur von unter 200 K. Nun sind Bedingungen erreicht, unter denen das Gas kollabiert und ein Stern gebildet wird.

Dank dem wesentlich genauer bestimmten Wert des Geschwindigkeitskoeffizienten  $\alpha(T)$  für die AD-Reaktion (1) konnte die Ungenauigkeit der Minimaltemperatur der Molekülwolke deutlich verringert und damit die Genauigkeit der charakteristischen Masse der ersten Sterne um einen Faktor 10 verbessert werden. Diese Sterne erzeugen die ersten schwereren Elemente aus dem H/He-Gas. Die Entwicklung des Anreicherungsprozesses hängt empfindlich von der Masse der ersten Sterne ab. Die Sternentstehung im frühen Universum ist über diese Mechanismen mit der kosmologischen Entwicklung bis hin zum heutigen Universum verbunden. Der AD-Geschwindigkeitskoeffizient beeinflusst damit nicht nur die Entwicklung der ersten Sterne. Bromm überlegte, ob auch die Bildung der ersten Galaxien durch den Geschwindigkeitskoeffizienten  $\alpha(T)$  für die AD-Reaktion (1) bestimmt werden könnte.<sup>[10]</sup> Nach dem aktuellen Standardmodell der kosmischen Strukturbildung entstehen die ersten Sterne im Halo kleiner Ansammlungen dunkler Materie. Eine Möglichkeit zur Galaxienbildung besteht im Aufbau eines größeren Systems solcher Sterne. Derartige Vorhersagen werden allerdings erst mithilfe des James Webb Space Telescope (JWST) getestet werden können, das 2014 in den Orbit gebracht werden soll. Zwar wird man mit diesem Te-

leskop keine einzelnen Sterne der ersten Generation beobachten können, wohl aber vielleicht eine Ansammlung solcher Sterne. Diese Möglichkeit hängt von der Masse der einzelnen Sterne ab, die wiederum mit dem Kühlmechanismus korreliert, der für die Entstehung der jeweiligen Ansammlung verantwortlich ist.

Es stellt sich also heraus, dass die kosmologische Entwicklung unseres Universums durch das einfache Netzwerk der  $H_2$ -Bildung bestimmt wird. Insbesondere steuert die Bildung des molekularen Wasserstoffs die Entstehung der Sterne der ersten Generation und möglicherweise auch der ersten Galaxien. Es ist verblüffend, wie ein mikrophysikalischer Prozess so weitreichende Folgen für die Entwicklung des Kosmos haben kann. Die Arbeit von Kreckel et al. zeigt, wie heutige Hochleistungssimulationen astrophysikalische Vorhersagen ermöglichen. Geleitet von einer Empfindlichkeitsanalyse ist es möglich, die dominierenden Prozesse in Laborexperimenten genau zu bestimmen. Die theoretischen Vorhersagen werden anhand von Beobachtungen geprüft, wodurch schließlich das astrophysikalische Bild verfeinert wird. Das Wechselspiel zwischen Labormessungen, Theorie und Beobachtungen hilft uns, den Geheimnissen des Universums auf die Spur zu kommen.

Eingegangen am 21. September 2010

Online veröffentlicht am 8. Februar 2011

- 
- [1] a) H. Kreckel, H. Bruhns, M. Čížek, S. C. O. Glover, K. A. Miller, X. Urbain, D. W. Savin, *Science* **2010**, 329, 69–71; b) Hintergrundinformationen: [www.sciencemag.org/content/329/5987/69/suppl/DC1](http://www.sciencemag.org/content/329/5987/69/suppl/DC1).
- [2] S. C. Glover, D. W. Savin, A.-K. Jappsen, *Astrophys. J.* **2006**, 640, 553–568.
- [3] A. L. Schmeltekopf, F. C. Fehsenfeld, E. E. Ferguson, *Astrophys. J.* **1967**, 148, L155–L156.
- [4] F. C. Fehsenfeld, C. J. Howard, E. E. Ferguson, *J. Chem. Phys.* **1973**, 58, 5841–5842.
- [5] O. Martinez, Jr., Z. Yang, N. B. Betts, T. P. Snow, V. M. Bierbaum, *Astrophys. J.* **2009**, 705, L172–L175.
- [6] J. C. Browne, A. Dalgarno, *J. Phys. B* **1969**, 2, 885–889.
- [7] K. Sakimoto, *Chem. Phys. Lett.* **1989**, 164, 294–298.
- [8] J. M. Launay, M. Le Dourneuf, C. J. Zeppen, *Astron. Astrophys.* **1991**, 252, 842–852.
- [9] M. Čížek, J. Horáček, W. Domcke, *J. Phys. B* **1998**, 31, 2571–2583.
- [10] V. Bromm, *Science* **2010**, 329, 45.