

Evolution kosmischer Materie

Autor(en): **Unsöld, A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali**

Band (Jahr): **148 (1968)**

PDF erstellt am: **28.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-90675>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Evolution kosmischer Materie

A. UNSÖLD

Die kosmische Materie ist zum grössten Teil in Sternen zusammengeballt, deren Massen etwa zwischen 50 und 0,1 Sonnenmassen liegen. Nur ein kleiner Bruchteil erfüllt als *interstellare Materie* den Raum zwischen den Sternen.

1. Energieerzeugung der Sterne

Die Sonne und die Sterne leuchten, weil in ihrem Inneren bei enormen Temperaturen und Drucken Energie durch *Kernprozesse* erzeugt wird.

Die Energieerzeugung beginnt bei etwa 10^7 °K mit der «Verbrennung» – wie man sagt – von Wasserstoff in Helium, zuerst durch den Fusionsprozess und bei etwas höheren Temperaturen vorwiegend durch den CNO-Zyklus. Die Atomkerne von Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff dienen bei diesem Prozess sozusagen nur als Katalysatoren. Ihr *Mengenverhältnis* allerdings stellt sich wie in einem radioaktiven Gleichgewicht ein, und zwar so, dass bei allen in Fragen kommenden Temperaturen ($\sim 10^7$ bis 10^8 °K) der Stickstoff ^{14}N bei weitem überwiegt und das Häufigkeitsverhältnis der Kohlenstoffisotope $^{12}\text{C}:^{13}\text{C} \approx 4$ wird, während es auf der Erde, in Meteoriten und (wie wir seit neustem wissen) auf der Sonne ~ 100 beträgt.

Oberhalb $\sim 10^8$ °K wird dann nach dem Schema $4\ ^4\text{He} \rightarrow\ ^{12}\text{C}$ das Helium zu Kohlenstoff verbrannt. Bei höheren Temperaturen können noch etwas schwerere Kerne gebildet werden. Die Entstehung der bei uns besonders häufigen Eisengruppe beschreibt man besser nicht durch Angabe der einzelnen Kernreaktionen, sondern als eingefrorenes thermodynamisches Gleichgewicht. Um die terrestrische Häufigkeitsverteilung der Gruppe V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni nach diesem «*e*(quilibrium)-Prozess» zu erklären, muss man eine Temperatur von $\sim 4 \cdot 10^9$ °K und ein Protonen:Neutronen-Verhältnis von ~ 300 annehmen.

Die noch schwereren Atomkerne sind nur für Neutronen angreifbar. Dabei muss man noch unterscheiden, ob die Neutronenanlagerung (an leichte oder Fe-Elemente) langsam oder rasch verläuft im Verhältnis zu den konkurrierenden β -Zerfällen; so spricht man von dem *s*(low)- bzw. *r*(apid)-Prozess.

2. Entwicklung und Alter der Sterne

Die mit der geschilderten Folge von Kernprozessen verknüpfte *Entwicklung der Sterne* veranschaulichen wir am besten in dem bekannten *Hertzprung-Russell-(H. R.-)Diagramm* oder dem äquivalenten *Farbenhelligkeitsdiagramm*. Als Ordinaten sind aufgetragen die absoluten Helligkeiten M oder die Leuchtkräfte L der Sterne. (Die absolute Helligkeit der Sonne ist z. B. [visuell] $M_v = +4,79$; ihre Leuchtkraft L – entsprechend der Ausstrahlung von $3,90 \cdot 10^{33}$ erg/sec – benutzt man gewöhnlich als Einheit.) Als Abszisse nimmt man den Spektraltyp Sp oder den Farbindex $B-V$, d. h. die Differenz der Magnitudines im *Blauen* und *Visuellen* Spektralbereich.

Nachdem ein Protostern sich aus interstellarer Materie durch Kontraktion verhältnismässig rasch gebildet hat, steigt seine Zentraltemperatur, bis das *Wasserstoffbrennen* zündet. In diesem Zustand bleibt der Stern auf der *Hauptsequenz* des H.R.-Diagramms, und zwar so lange, bis er einen merklichen Bruchteil seines Wasserstoffs im Innern zu Helium verbrannt hat. Dann wandert die Brennzone nach aussen, darunter beginnt das Heliumbrennen. Der Stern bläht sich auf und wandert als *roter Riesenstern* im H.R.-Diagramm nach rechts oben. Von hier begibt er sich – dies sei ohne Details kurz festgehalten – auf dem Horizontalast nach links (z. T. mit komplizierten Um- bzw. Hin- und Herwegen). Manche Sterne stossen dann eine Hülle ab und bilden einen *planetarischen Nebel*. Am Ende des Entwicklungsprozesses steht das Stadium eines *weissen Zwergsternes*, dessen Inneres aus elektronentarteter Materie von enormer Dichte besteht.

Die Dauer des Hauptsequenzstadiums in der Entwicklung eines Sternes können wir nun leicht folgendermassen abschätzen:

Die Leuchtkraft L gibt uns direkt seinen Energieverbrauch pro Zeiteinheit an. Auf der anderen Seite wissen wir nach EINSTEINS bekannter Relation zwischen Masse und Energie, dass die Vereinigung von je 4 Wasserstoffatomen zu einem Heliumatom einen Energiebetrag von $4,29 \cdot 10^{-5}$ erg liefert. So berechnet man leicht, dass z. B. die Sonne 10% ihres Wasserstoffs innerhalb einer Zeit von 6 Milliarden Jahren verbrennt. Für einen Stern der Masse \mathfrak{M} und der Leuchtkraft L (in Einheiten der Sonnenmasse bzw. -leuchtkraft) wird die entsprechende *Entwicklungszeit*

$$t_E = 6 \cdot 10^9 \frac{\mathfrak{M}}{L} \text{ Jahre} \quad (1)$$

Die Hauptsequenzsterne etwa unterhalb der Sonne können sich also seit ihrer Entstehung (dieser Zeitraum muss ja kürzer sein als das Weltalter) noch nicht merklich verändert haben. Die helleren, insbesondere die sehr hellen blauen O- und B-Sterne dagegen müssen ganz jung sein.

Betrachten wir nun die Farbenhelligkeitsdiagramme einiger Sternhaufen, so werden die unteren Teile der Hauptsequenzen übereinstimmen. Das Abbiegen des oberen Teiles der Hauptsequenz nach rechts

(«Knie») gestattet es andererseits ohne weiteres, nach Gleichung (1) oder in Abbildung 1 an der rechten Skala das Alter des Sternhaufens abzuschätzen. Um genauere Zahlenwerte zu erhalten, muss man *Sternmodelle* durchrechnen und dabei u. a. die Verteilung der Energiequellen im Sterninneren, die ursprüngliche Zusammensetzung der Sterne, den Energieverlust durch Neutrinos usw. berücksichtigen. Solche Rechnungen, die recht diffizil werden, wenn man das Alter nicht nur bis auf einen Faktor 2–3, sondern auf 10–15% genau erhalten will, sind in neuerer Zeit von I. IBEN, J. FAULKNER, R. KIPPENHAHN u. a. durchgeführt worden. Während die jüngsten galaktischen (offenen) Sternhaufen, wie $h+\chi$ Persei, kaum eine Million Jahre alt sind, findet man – dies ist höchst bemerkenswert – für die ältesten galaktischen Haufen, wie M67 und NGC188, und für die Kugelsternhaufen, wie M92, M15, M3, fast dasselbe maximale Alter, dessen Zahlenwert sich (je nach den zugrundegelegten Annahmen) zu $t_M = 7$ bis $15 \cdot 10^9$ Jahre ergibt. Dies ist offenbar zugleich das *Alter der Milchstrasse*.

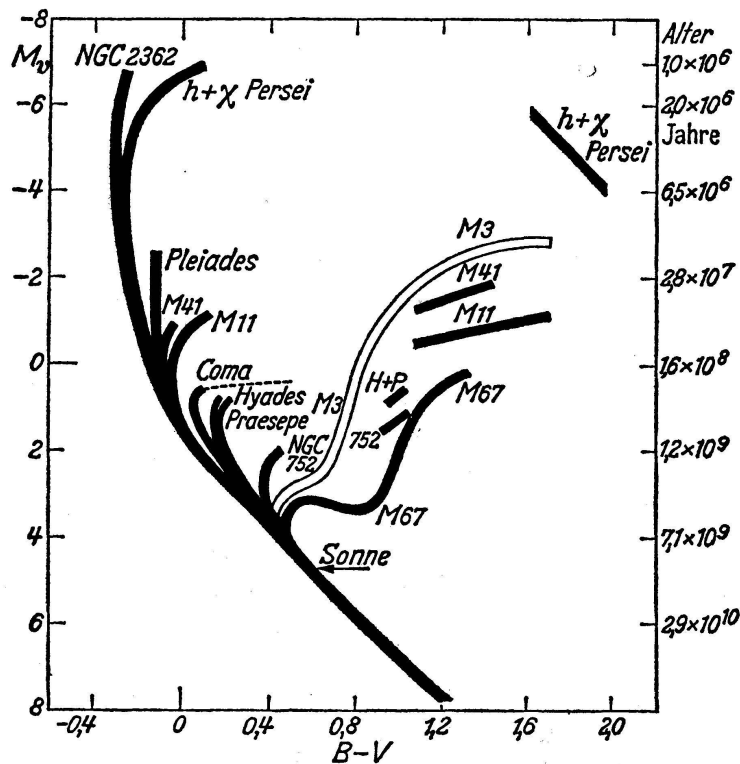


Abbildung 1

Farbenhelligkeitsdiagramme galaktischer Sternhaufen (nach A. R. SANDAGE)

Aufgetragen sind die absoluten Helligkeiten M_v über den Farbenindizes $B-V$. Das Abbiegen der Hauptsequenz nach rechts («Knie») gestattet es, an der Skala rechts das Alter des Sternhaufens abzulesen. – Zum Vergleich ist der Kugelsternhaufen M3 mit eingezeichnet. Er ist ungefähr ebensoalt wie die ältesten galaktischen Haufen, z. B. M67

3. Struktur und Sternpopulationen der Milchstrasse

Betrachten wir zwischendurch an Hand unserer etwas schematischen Abbildung 2 den *Aufbau der Milchstrasse*. Der Kürze wegen müssen wir uns dabei auf eine Beschreibung ohne detaillierte Begründung beschränken.

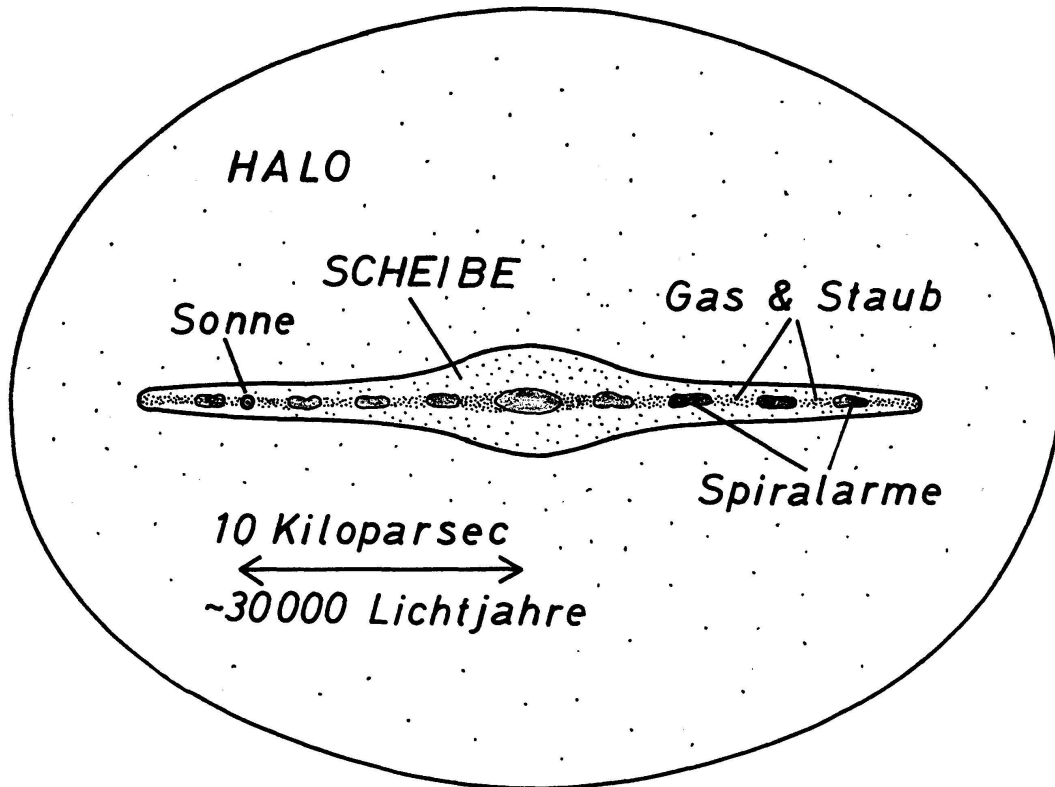


Abbildung 2

Die Milchstrasse (schematischer Axialschnitt) mit den wichtigsten Sternpopulationen

Der Hauptteil der Sterne befindet sich in der stark abgeplatteten Scheibe. Deren Kern ist optisch durch Dunkelwolken verdeckt, das Radioteleskop durchdringt diese und enthüllt dort die Radioquelle Sagittarius A. Die Sterne der Scheibe bilden die sogenannte *Scheibenpopulation*. Hierzu gehört auch unsere Sonne, deren Abstand vom galaktischen Zentrum 10000 parsec oder 32000 Lichtjahre beträgt. Alle diese Sterne umlaufen das Zentrum in Kreisbahnen, die Sonne z. B. mit einer Geschwindigkeit von 250 km/sec in einer Zeit von 250 Millionen Jahren.

In die Scheibe eingebettet sind die *Spiralarme*. Hier bilden sich bis in unsere Tage durch Zusammenballung von interstellarem Gas die jungen galaktischen Sternhaufen der sogenannten *Spiralarmpopulation I*. Dazu gehören z. B. der Doppel-Sternhaufen $h + \chi$ Persei und der bekannte Gasnebel im Orion mit den darinliegenden Sternhaufen (u. a. den Trapezzernen).

Die ganze Scheibe endlich ist eingehüllt von dem viel weniger abgeplatteten Halo. Dessen verhältnismässig dünn verteilte Bewohner, die Kugelsternhaufen und die sog. Subdwarfs oder Unterzwerge (so genannt, weil man sie ursprünglich im H.R.-Diagramm «unterhalb» der Hauptsequenz mit ihren gewöhnlichen Zwergsternen fand), bilden die sogenannte *Halopopulation II*. Sie umlaufen das galaktische Zentrum in langgestreckten ellipsenartigen Bahnen. Deshalb kann man sie auch als sogenannte *Schnellläufer* finden. Die Sterne der Scheibenpopulation nämlich «schwimmen» in unserer Umgebung neben der Sonne her; ihre Geschwindigkeit relativ zur Sonne ist daher klein, etwa 5–50 km/sec. Die Sterne der Halopopulation II dagegen bewegen sich schief zur Bewegungsrichtung der Sonne; deshalb beobachten wir Relativgeschwindigkeiten von der Grössenordnung der galaktischen Rotation, d.h. etwa 70–400 km/sec.

Die Sternpopulationen des Milchstrassensystems, die wir bisher nur räumlich und dynamisch beschrieben haben, unterscheiden sich nun auch durch ihr *Alter*, das wir aus den Farbenhelligkeitsdiagrammen der darin enthaltenen Sterngruppen bestimmen können. Danach ist der *Halo* mit seinen Kugelsternhaufen usw. ganz im Anfang der galaktischen Entwicklung, also vor etwa $7-15 \cdot 10^9$ Jahren (wegen eines genaueren Zahlenwertes s. u.), entstanden. In der *Scheibe* sind die ältesten offenen Sternhaufen (z.B. NGC 188) altersmässig davon zurzeit nicht zu trennen. Unsere Erde und, wie wir weiter schliessen müssen, die Sonne und das Planetensystem entstanden – nach den neuesten radioaktiven Altersbestimmungen – vor $4,7 \cdot 10^9$ Jahren. Daneben gibt es jüngere und, besonders in den Spiralarmen, ganz junge Sterne. Die Entstehung der hellsten Orionsterne müssen unsere – leider astronomisch noch wenig interessierten – Urvorfahren wohl noch miterlebt haben!

4. Weitere Altersangaben: Expansion des Weltalls; radioaktive Elemente

Neben den angeschriebenen galaktischen Zeiträumen merken wir zum Vergleich noch zwei wichtige Daten vor:

- Die Fluchtbewegung (Rotverschiebung) ferner Galaxien führt – zurzeit leider noch mit grosser Unsicherheit – auf das Weltalter. Aus der neuesten Diskussion von A. SANDAGE ergibt sich $19,5 \cdot 10^9 > t_0 > 3,4 \cdot 10^9$ Jahre.
- Aus den Zerfallskonstanten und dem heutigen terrestrischen Häufigkeitsverhältnis der Uranisotope 235 und 238 kann man auf deren Entstehungszeit zurückschliessen. Geht man aus von einem (kernphysikalisch begründeten) anfänglichen Verhältnis $^{235}\text{U} : ^{238}\text{U} = 1,65$ und rechnet mit plötzlicher Entstehung, so berechnet man leicht das «Alter des Urans» zu $6,6 \cdot 10^9$ Jahren.

Die Zerfallsprozesse von anderen «elternlosen» radioaktiven Elementen führen auf ähnliche Zahlen. Mit der Hypothese einer zeitweiligen Nachlieferung erhält man selbstverständlich etwas längere Zeiträume. Nach

Abschätzung aller Unsicherheiten kann man für das *Alter der radioaktiven Elemente* t_R wohl $6 \cdot 10^9 < t_R < 7 \cdot 10^9$ Jahre angeben.

5. *Quantitative Analyse der Sternspektren*

Einen neuen und sehr wirksamen Zugang zu den Problemen der Sternentwicklung und der Evolution der kosmischen Materie erschliesst uns die spektroskopische Bestimmung der *chemischen Zusammensetzung der Sterne*. Genauer gesagt, können wir selbstverständlich nur die Zusammensetzung ihrer äussersten Schichten, der Sternatmosphären, ermitteln. Das Sterninnere ist der direkten Beobachtung unzugänglich; hier führt weiter nur die Theorie des inneren Aufbaus der Sterne, EDDINGTONS berühmte «analytical boring machine».

Zunächst einige Bemerkungen zur Methodik: Den Ausgangspunkt bilden *Spektren* grosser Dispersion, wie man sie z. B. mit dem ortsfesten Coudé-Spektrographen am 100"-Hooker-Spiegelteleskop des Mt. Wilson Observatory aufnehmen kann. Mit dem Mikrophotometer misst man sodann die Intensitätsverteilung in den Linien, die sog. *Linienprofile* und deren Flächen, die *Äquivalentbreiten der Linien* als Mass der absorbierten Energie.

Ist diese ziemlich langwierige Messarbeit beendet, so tritt der Theoretiker in Tätigkeit und konstruiert *Modelle von Sternatmosphären*. Man geht dabei aus von den quantenmechanisch berechneten Eigenschaften der Materie bei kosmischen Temperaturen und Drucken. Die Temperaturverteilung in der Atmosphäre hängt zusammen mit der Art des Energie-transportes. Dieser erfolgt im allgemeinen durch Strahlung; wir sprechen dann von *Strahlungsgleichgewicht*. Die Druckverteilung erhält man unter Zuhilfenahme der *hydrostatischen Gleichung*. Die tatsächliche Durchführung dieser komplizierten Rechnungen wird heute sehr erleichtert durch die grossen elektronischen Rechenautomaten. Bei der Ermittlung atomarer Grössen, wie Übergangswahrscheinlichkeiten, Druckverbreiterungskonstanten usw., gibt uns die experimentelle Plasmaphysik vielfach wirksame Unterstützung.

Für solche theoretischen Modelle berechnet man nun die *Äquivalentbreiten der Spektrallinien*, die Energieverteilung im kontinuierlichen Spektrum usw. und passt das Modell dann schrittweise immer besser an die Beobachtungen an. Dabei erhält man zunächst die zwei Parameter, welche den Aufbau der Sternatmosphäre beschreiben, nämlich die *effektive Temperatur* T_e und die *Schwerebeschleunigung* g an der Sternoberfläche. Die effektive Temperatur ist dabei so definiert, dass sie in Verbindung mit dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz die Gesamtausstrahlung an der Sternoberfläche je cm^2 und sec darstellt. Für die Sonne ist z. B. $T_e = 5780$ °K und $g = 2,74 \cdot 10^4$ cm sec^{-2} . Sodann erhält man aus den Fraunhofer-Linien der im Spektrum vertretenen Elemente deren *Häufigkeit*. Wir geben sie gewöhnlich an als Logarithmen der Atomzahlen, bezogen auf $\log \epsilon = 12$ für Wasserstoff, der fast überall das häufigste Element ist. Für die Genauigkeit einer Sternanalyse ist es

sehr wesentlich, dass man dabei die allgemeinen Parameter, insbesondere die effektive Temperatur T_e – welche die Ionisation bestimmt –, sehr genau ermittelt. Die Fehlergrenzen einer sorgfältig ausgeführten Analyse dürften zurzeit etwa $\Delta \log \varepsilon = \pm 0,3$ entsprechen. Nach diesen Vorbemerkungen wenden wir uns den Häufigkeitsverteilungen der Elemente in verschiedenartigen Sternen zu.

6. Häufigkeitsverteilung der Elemente in den Atmosphären normaler Sterne

Mehr als 90% der Sterne lassen sich bekanntlich in die Morgan-Keenan- oder kurz MK-Klassifikation mit den zwei Parametern Spektraltyp Sp und Leuchtkraftklasse LC einordnen. An Stelle von Sp und LC kann man ebensogut z. B. den Farbindex $B-V$ und die absolute Helligkeit M , d. h. Ort des Sterns im H.R.-Diagramm, verwenden. Im Sinne der Theorie heisst dies, dass das Spektrum eines «normalen» Sternes eindeutig durch seine *effektive Temperatur* T_e und *Schwerebeschleunigung* g bestimmt ist. Das heisst: *Die chemische Zusammensetzung der Atmosphären aller «normalen» Sterne ist gleich.* Die quantitative Analyse der Spektren bestätigt diesen Schluss auf das schönste. Sie liefert darüber hinaus die Zahlenwerte von T_e und g und die *Häufigkeiten* $\log \varepsilon$ der in den Spektren vertretenen Elemente. In Abbildung 3 haben wir die zurzeit wohl genauesten Analysen einiger Sterne aufgetragen, deren sonstige Daten in der Unterschrift der Abbildung zusammengestellt sind. Die Streuung der Punkte dürfte nirgends die zu erwartenden Fehlergrenzen überschreiten. Hieraus schliessen wir zunächst, dass die *chemische Zusammensetzung* der Atmosphären der meisten Sterne *unabhängig ist von ihrem Entwicklungszustand*: τ Scorpii ist ein ganz junger Hauptsequenzstern, ξ Persei hat schon das Übergigantenstadium erreicht, die planetarischen Nebel¹ stellen ein noch späteres Entwicklungsstadium dar. Die Sonne ist ein alter Hauptsequenzstern. δ Eridani endlich fällt im Farbenhelligkeitsdiagramm auf den Riesenast von NGC 188 und ist daher einer der ältesten Bewohner der galaktischen Scheibe. Während der so erfassten Spanne der Sternentwicklung muss die Zusammensetzung des Sterninneren durch Kernprozesse erheblich verändert werden. Es findet also *keine Vermischung der Atmosphärenmaterie mit dem Sterninneren* statt. Da die Entstehung der betrachteten Sterne aus interstellarer Materie über den ganzen Zeitraum seit der Entstehung der galaktischen Scheibe bzw. der ältesten galaktischen Sternhaufen verteilt ist, so müssen wir schliessen, dass über diesen ganzen Zeitraum hinweg *die chemische Zusammensetzung der interstellaren Materie* innerhalb der heutigen Messgenauigkeit *gleichgeblieben* ist. Für die absolute Dauer dieses Zeitraumes liefern die schon erwähnten Rechnungen über die Sternentwicklung in Haufen Zahlenwerte von etwa 7–20 Milliarden Jahren. Eine genauere Festlegung soll im folgenden noch versucht werden.

¹ Auf die besonderen Methoden zur quantitativen Analyse der Spektren von planetarischen und Gasnebeln können wir hier nicht eingehen.

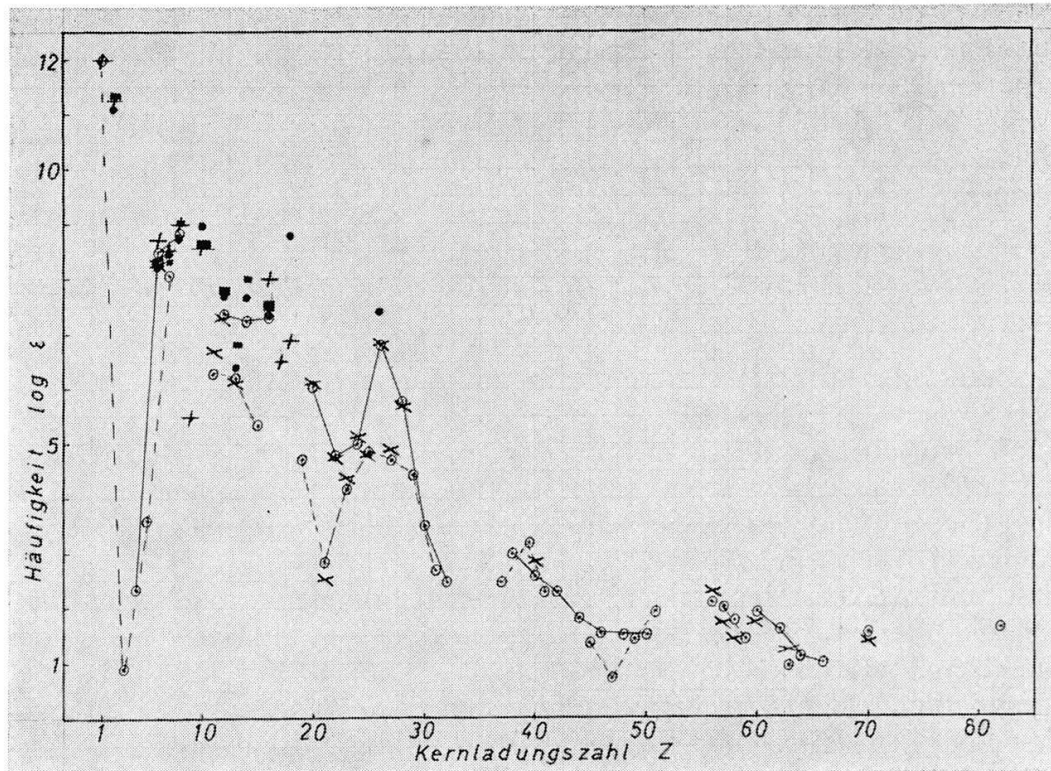


Abbildung 3

Häufigkeitsverteilung in den Atmosphären «normaler» Sterne (bezogen auf $\log \varepsilon = 12$ für Wasserstoff)

	Stern	MK-Typ	Entwicklungsstadium, Alter	Literatur
●	τ Scorpii	Bo V	Hauptsequenz, jung	M. SCHOLZ: Z. Astrophys. 65, 1; 1967. M. SCHOLZ et al.: ebd. 66, 246; 1967
■	ζ Persei	B1 Ib	Übergigant, jung	R. CAYREL: Ann. Astrophys., Suppl., Nr. 6; 1958
+	Planetarische Nebel	—	Spätes Entwicklungsstadium	L. H. ALLER: Publ. Astr. Soc. Pac. 76, 279; 1964
○	Sonne	G2 V	Hauptsequenz, alt, kaum entwickelt	L. GOLDBERG, E. A. MÜLLER, L. H. ALLER: Astrophys. J., Suppl. 5, Nr. 45; 1960; revidiert von E. A. MÜLLER, Symp. Paris 1967
×	δ Eridani	Ko IV	Unterriese (Subgigant), sehr alt	J. HAZLEHURST: Observatory 83, 128; 1963, und B. E. J. PAGEL: Observatory 83, 133; 1963

7. Spektroskopische Anzeichen von Kernreaktionen in Sternen

Neben den besprochenen «normalen» Sternen gibt es die viel selteneren anomalen Sterne – «peculiar stars» –, welche in der chemischen Zusammensetzung ihrer Atmosphären deutliche Spuren von Kernreaktionen erkennen lassen. Ihre quantitative Erforschung befindet sich noch in den Anfängen. Wir begnügen uns daher mit einer kurzen Besprechung der interessantesten Klassen.

7.1 Heliumsterne

In den Spektren dieser heißen Sterne sind die Wasserstofflinien ungewöhnlich schwach oder fehlen, dagegen sind die Heliumlinien sehr stark ausgeprägt. Die Ergebnisse der quantitativen Analysen lassen sich folgendermassen zusammenfassen: In dem Stern HD 160641 ist aller Wasserstoff in Helium verwandelt. Die schweren Elemente von C bis Si dagegen bilden – nach Masse – den normalen Anteil der Materie. Hier dürfte die jetzt in der Atmosphäre befindliche Materie daher nur durch den Fusionsprozess beeinflusst sein. Wie alle Kernprozesse kann dieser selbstverständlich nur im Sterninneren stattgefunden haben.

In einem anderen Heliumstern, HD 30353, ist fast aller Wasserstoff zu Helium verbrannt ($H:He = 10^{-4}$). Die schweren Elemente, hier erst ab Neon, dürften normal sein. Dagegen ist die CNO-Gruppe grossenteils in Stickstoff übergeführt. Hier muss also auch (bei höheren Temperaturen) der CNO-Zyklus bei der Wasserstoffverbrennung in Gang gekommen sein. Die übrigen Heliumsterne lassen sich wohl zwischen die geschilderten Extremfälle einordnen.

7.2 Kohlenstoffsterne

Dies sind rote, d.h. kühle Riesensterne. Die Verstärkung der Bandenspektren von CH, C₂, CN und der Linien des Kohlenstoffatoms weist auf einen Überschuss an Kohlenstoff hin. Das genauere Studium der Spektren und ihre quantitative Analyse lassen mehrere Untergruppen erkennen, die man etwa so charakterisieren kann:

Die *CH-Sterne* sind metallarme Sterne der Halopopulation II. Gegenüber deren gewöhnlichen Mitgliedern (s.u.) sind der Kohlenstoff etwa 5mal und die ganz schweren Elemente von ⁵⁶Ba an etwa 15mal häufiger. Die grosse Häufigkeit des Kohlenstoffs deutet auf Heliumbrennen, die der schweren Elemente auf Neutronenprozesse hin.

Besonders interessant ist, dass man aus den Banden der kohlenstoffhaltigen Moleküle das Häufigkeitsverhältnis der Isotope ¹²C:¹³C bestimmen kann. Auf der Erde und auf der Sonne (aus CH-Banden) ist es bekanntlich ~98. Unter den CH-Sternen zeigen manche Objekte ein Isotopenverhältnis von der Grössenordnung dieses «normalen» Wertes. Manche CH-Sterne aber haben ein Verhältnis ¹²C:¹³C ≈ 5, was auf eine Mitwirkung des CNO-Zyklus hindeutet.

Bei den *gewöhnlichen Kohlenstoffsternen* der jüngeren Sternpopulationen dagegen scheint das Verhältnis ¹²C:¹³C immer bei 5 zu liegen.

In den *wasserstoffarmen Kohlenstoffsternen*, wie R-Coronae Borealis, ist zunächst einmal der grösste Teil des Wasserstoffs zu Helium verbrannt; von diesem wiederum wurde ein Teil in Kohlenstoff ^{12}C umgewandelt.

Das Verhältnis $^{12}\text{C}:^{13}\text{C}$ ist jedenfalls gross; es wäre natürlich wichtig, seinen Zahlenwert zu kennen. Die schweren Elemente vom Stickstoff bis zum Barium scheinen ziemlich normal zu sein; Neutronen haben hier also offenbar keine wesentliche Rolle gespielt.

7.3 Bariumsterne

Dies ist anders in den Bariumsternen mit ihren starken Ba II-Linien und in den sich nach kühleren Temperaturen hin anschliessenden S-Sternen mit ihren starken Linien und Banden der schweren Elemente wie Zr, La, Y, Sr, Ba und ZrO, LaO, YO...

Dass hier Neutronen am Werke sind, wird bestätigt durch MERRILLS Entdeckung der Linien des auf der Erde erst künstlich hergestellten Elementes Technetium. Dessen langlebigstes Isotop Tc_{43}^{99} hat nach Laboratoriumsmessungen eine Halbwertszeit von $2 \cdot 10^5$ Jahren. Sie passt durchaus zu den Zeiträumen, welche die Theorie der Sternentwicklung für das Rote-Riesen-Stadium erlaubt.

An dieser Stelle erhebt sich nun die allgemeine Frage, warum nur einige wenige Sterne Zeichen nuklearer Prozesse aufweisen, die dann gleich sehr deutlich hervortreten, während die Atmosphären der überwiegenden Mehrheit der Sterne keinerlei Spuren von Kernumwandlungen erkennen lassen?

In der Tat fordert die Theorie der Entwicklung von *Einzelsternen*, dass im allgemeinen *keine* Durchmischung der inneren Brennzonen mit der Atmosphäre stattfindet. Eine solche ist dagegen – unter geeigneten Voraussetzungen – möglich bei *engen Doppelsternen*. Auf dieser Basis hat neuerdings VAN DEN HEUVEL in die sehr komplizierten Phänomene der «Peculiar A-stars» der Ap-Sterne und der «Metallliniensterne» Am Ordnung gebracht. Daneben muss man aber wohl auch an das *Flash-Phänomen* und vielleicht auch an die zurzeit noch bestehenden Unsicherheiten in der *Theorie konvektiver Zonen* in den Sternen denken.

8. Metallarme Sterne des galaktischen Halos

Neben den mannigfaltigen Gruppen der Sterne mit ausgesprochenen «Entwicklungsstörungen» gibt es die viel zahlreicheren sog. *metallarmen Sterne*. Die quantitative Analyse ihrer Spektren zeigt, dass relativ zum Wasserstoff alle schweren Elemente, von C bis Ba, im Vergleich zur Sonne oder anderen «normalen» Sternen um einen konstanten Faktor seltener sind. Dieses «Metall-/Wasserstoff-Verhältnis» M/H (für die Sonne per def. gleich Eins gesetzt) kann alle Werte von $\sim 1/200$ (bei dem extremen Subdwarf HD 140283) bis etwas über 1 annehmen. Sehr bemerkenswert ist, wie gesagt, dass die relativen Häufigkeitsverhältnisse aller schweren Elemente von C bis Ba (auf das Helium werden wir noch besonders

eingehen) in den metallarmen und in den normalen Sternen innerhalb der heutigen Messgenauigkeit *dieselben* sind. Es sind zwar in der Literatur immer wieder individuelle Effekte einzelner Elemente behauptet worden, aber diese dürften auf Analysefehlern beruhen. Sie sind stets von der Grössenordnung der sonstigen Messfehler, und sie zeigen keine Korrelation mit dem allgemeinen Metall-/H-Verhältnis. Die wichtigsten Fehlerursachen liegen in ungenauer Bestimmung der Sterntemperatur und der die Linienintensitäten auch beeinflussenden Strömungen in den Sternatmosphären, der sog. Turbulenz. Solche metallarmen Sterne kommen nur im Halo – man kann noch genauer die Halopopulation II und die «gemässigte» mittlere Population II unterscheiden – vor; man erkennt sie daher in kinematischer Hinsicht als Schnellläufer (high velocity stars). Eine Altersbestimmung ist möglich an Hand der Farbenhelligkeitsdiagramme der zur Halopopulation II gehörenden Kugelsternhaufen. Diese bilden danach (zusammen mit den alten galaktischen Sternhaufen, wie NGC 188) die älteste Bevölkerungsgruppe unserer Milchstrasse. Auch die Schnellläufer mit verschiedenen Metallhäufigkeiten können nach ihrem Farbenhelligkeitsdiagramm nicht viel jünger sein. Zusammenfassend können wir also sagen, dass *es metallarme Sterne nur unter den ältesten Sternen des Milchstrassensystems gibt*. Die Genauigkeit der Altersbestimmung aus den Farbenhelligkeitsdiagrammen reicht (insbesondere angesichts der verschiedenen Zusammensetzung) nicht aus, um einen Altersunterschied zwischen den metallarmen Kugelhaufen und den galaktischen Sternhaufen normaler Metallhäufigkeit mit einiger Sicherheit festzustellen.

Die Entwicklungsgeschwindigkeit ist auch bei den metallarmen Sternen in erster Linie von ihrer Masse abhängig. Sterne mit weniger als $\sim 1 M_{\odot}$ befinden sich noch auf ihrer ursprünglichen Hauptsequenz. Früher hat man solche Sterne mit schwachen Metalllinien «zu früh» klassifiziert; so kamen sie im H.R.-Diagramm unter die Hauptsequenz zu liegen, und man nannte sie Subdwarfs oder Unterzwerge; diesen Namen hat man beibehalten. Ein typisches Beispiel ist der sonnenähnliche HD 140283 mit $M/H \approx 1/200$. Der rote Riesenstern HD 122563 mit einem vielleicht sogar noch etwas kleineren M/H -Verhältnis hat offenbar im Inneren schon einen wesentlichen Bruchteil seines Wasserstoffs verbraucht. Der Schnellläufer HD 161817 – mit der grössten bekannten Radialgeschwindigkeit von 363,4 km/sec – hat $M/H = 1/13$; er hat im Farbenhelligkeitsdiagramm schon den Horizontalast erreicht. Und in dem Kugelsternhaufen M 15 kennt man sogar einen metallarmen planetarischen Nebel K 648! Auch bei allen diesen Sternen haben die Kernprozesse im Sterninneren die Zusammensetzung der Atmosphären nicht beeinflusst.

9. Helium in galaktischen Objekten

Da bei der nuklearen Verbrennung des Wasserstoffs das Helium zunächst sozusagen als Asche zurückbleibt, so ist das Verhältnis H/He von ganz besonderem Interesse. Leider sind die Anregungsenergien der He-

iumlinien so gross, dass man sie nur bei ziemlich hohen Temperaturen überhaupt erwarten kann. Eine Ausnahme macht die Sonne, in deren Protuberanzen mit ihren sehr ungewöhnlichen Anregungsverhältnissen die gelbe Heliumlinie seinerzeit entdeckt wurde.

Fassen wir zunächst die Analysen der Objekte mit normalem Metallgehalt zusammen, d.h. heisse Hauptsequenzsterne und Übergiganten, galaktische Gasnebel (aus denen sie entstehen), planetarische Nebel und die Sonnenprotuberanzen², so erhält man im Mittel $H:He = (6,2 \pm 0,8):1$.

Die nächste – höchst aufregende – Frage ist selbstverständlich: «Sind die metallarmen Objekte auch heliumarm oder nicht?» Sie ist schwer zu beantworten, da die alten Sterne der metallarmen Population II erst in den letzten, kurzlebigen und daher seltenen Stadien ihres Weges durch das Farbenhelligkeitsdiagramm so hohe Temperaturen erreichen, dass Heliumlinien überhaupt ggf. entstehen können. Noch dazu sind solche Objekte meist weit entfernt und daher sehr lichtschwach. Mit leidlicher Genauigkeit konnte man analysieren den Halo-B-Stern BD + 33° 2642, den Stern Barnard 29 im Kugelhaufen M 13, den schon erwähnten planetarischen Nebel in dem Kugelhaufen M 15 und einen planetarischen Nebel hoher Geschwindigkeit NGC 6644 (über die schwereren Elemente ist bei letzterem nichts bekannt). Es zeigte sich überraschenderweise, dass alle diese Objekte normale Heliumhäufigkeit, $H:He \approx 5,5-9:1$, haben! Es gibt zwar auch «heliumschwache B-Sterne», aber deren Spektren zeigen (soweit man es bei so schwachen Objekten erkennen kann) auch andere anomale Züge, die auf einen ungewöhnlichen Entwicklungsweg hinweisen. In unserer Milchstrasse haben also *alle* Sterne, unabhängig von der Metallhäufigkeit, in ihren Atmosphären oder Hüllen (soweit keine Durchmischung mit teilweise verbrannter Materie stattgefunden hat) *dasselbe* Häufigkeitsverhältnis $H:He = 6,2$.

10. Andere Galaxien

Die nächsten Nachbarn unserer Milchstrasse im Weltraum sind die grosse und die kleine Magellanische Wolke (LMC und SMC). In der Hubble-Sequenz der Galaxien (Abb. 4) stehen sie ganz an einem Ende als Irr I-Galaxien mit viel interstellarer Materie. Spektroskopisch untersuchen konnte man bis jetzt eine Anzahl extrem heller Übergiganten. Diese unterscheiden sich von analogen Sternen unserer Milchstrasse in keiner Weise; die Häufigkeiten von Helium und Metallen relativ zum Wasserstoff stimmen daher (mindestens bis auf einen Faktor $\sim 1,5$) überein. Dies wird bestätigt durch die quantitativen Analysen von Gasnebeln, aus denen die erwähnten Sterne ja entstanden sind. Das Verhältnis $H:He$ kennt man weiterhin für Gasnebel in der Sc-Galaxis M 33 und in der unserem System ähnlichen Andromeda-Galaxis M 31, hier sogar für verschiedene Abstände vom Zentrum. In elliptischen Galaxien, am an-

² Messungen in der solaren Ultrastrahlung und dem Sonnenwind haben wir nicht herangezogen, da sich hier der Unterschied im Verhältnis von Ladung zu Masse zwischen H und He auswirken könnte.

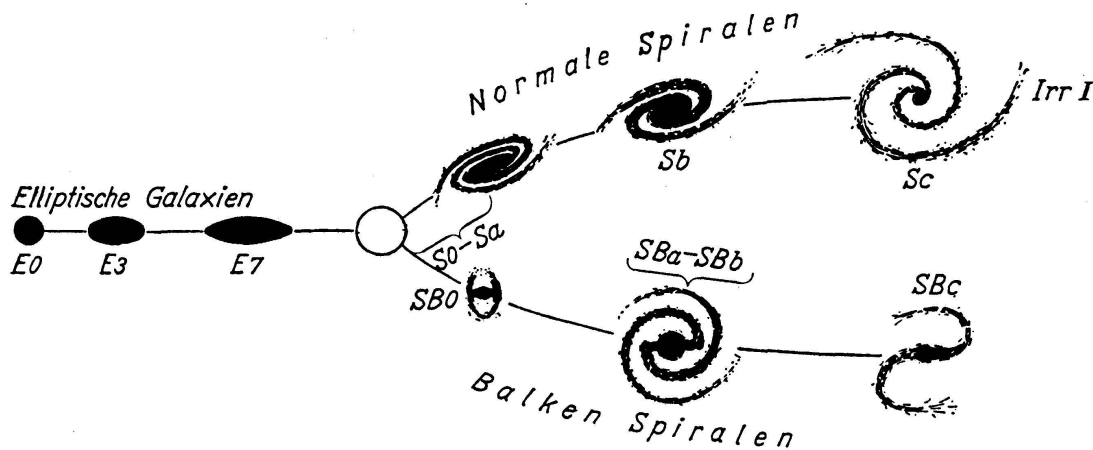


Abbildung 4

Hubble-Klassifikation der Galaxien

deren Ende der Hubble-Sequenz, kann man zwar keine einzelnen Sterne spektroskopieren, aber das integrierte Spektrum z. B. der Galaxis NGC 205 weist darauf hin, dass sie im wesentlichen aus normalen Sternen zusammengesetzt ist.

Daneben findet man auch in fernen Galaxien metallarme Objekte, wie Kugelhaufen und helle rote Riesen, die sich hinsichtlich ihrer Lage im Farbenhelligkeitsdiagramm als gleichartig mit analogen galaktischen Objekten erweisen (Spektren kann man von diesen sehr lichtschwachen Objekten nicht erhalten).

Das Studium der fernen Galaxien führt uns also zu zwei Erkenntnissen, deren Bedeutung bis jetzt meist nicht genügend gewürdigt wurde:

- Der Heliumgehalt und die maximale Metallhäufigkeit sind in allen Galaxien gleich, unabhängig von deren Gehalt an interstellarer Materie und von ihrer sonstigen Struktur, wie Hubble-Typ, Masse usw.
- Das Vorhandensein einer metallarmen und einer metallreichen Sternpopulation ist unabhängig davon, ob die Galaxis eine ausgesprochene Gliederung in Halo und Scheibe aufweist (wie bei uns und in M31, d. h. im mittleren Teil der Hubble-Sequenz) oder nicht (bei den elliptischen bzw. Irr I-Galaxien an beiden Enden der Hubble-Sequenz).

11. Die Entstehung der chemischen Elemente

Bis vor etwa 10 Jahren, als man nur die gleichartige Zusammensetzung der Materie in den «normalen» Sternen sowie der Erdkruste und den Meteoriten kannte, versuchte man diese im Anschluss an LEMAÎTRE, GAMOW und andere zu erklären durch die Hypothese des Urknalls oder des «Big Bang», einer gewaltigen Explosion, welche die Expansion des Weltalls einleitete.

Kernphysikalische Schwierigkeiten sowie die Entdeckung der metallarmen Halo-Sterne und -Sternhaufen ebneten den Weg für die 1957 von dem Ehepaar BURBIDGE, FOWLER und HOYLE vorgeschlagene B²FH-

Hypothese (wie man sie kurz nennt). Danach bestand die Welt ursprünglich aus Wasserstoff. Unsere Galaxis, auf deren Betrachtung sich die genannten Autoren in der Hauptsache beschränken, war im Anfang eine fast kugelförmige Wolke aus Wasserstoff, sozusagen der Ur-Halo. In diesem bildeten sich die metallarmen Halo-Sterne. Erst mit der Entwicklung mehrerer Generationen von Sternen und ihrer Wiederauflösung (etwa durch Supernova-Explosionen) in das interstellare Medium entstand nach B^2FH die immer metallreichere Materie, aus der sich schliesslich die Sterne der Scheiben- und Spiralpopulationen bilden konnten. Parallel mit dieser nuklearen Entwicklung müsste sich ein ebenso gewaltiger dynamischer Vorgang abgespielt haben, nämlich die Bildung der galaktischen Scheibe durch Zusammensturz eines grossen Teils der Halo-Materie.

Als bekannt wurde, dass das Häufigkeitsverhältnis $H:He$ in den metallreichen und den metallarmen Sternen dasselbe ist, holte man zunächst die «Big-Bang»-Theorie wieder in einer eingeschränkten Form hervor, die unter dem Schlagwort «Little Bang» oder – etwas pompöser – «The Big Fireball» bekannt wurde. Sie erklärte in plausibler Weise das beobachtete Verhältnis $H:He$ und die inzwischen mit Radioteleskopen im Gebiet der mm- bis dm-Wellen entdeckte kosmische $3^\circ K$ -Hohlraumstrahlung. Letztere wird zurückgeführt auf die beim «Little Bang» entstandene Hohlraumstrahlung extrem hoher Temperaturen, die bei der Expansion adiabatisch abgekühlt wurde.

Auch so können wir aber m. E. den in den vorhergehenden Abschnitten zusammengetragenen (und einigen weiteren) Beobachtungen noch nicht gerecht werden, und wir wollen versuchen, einige wichtige Punkte neu durchzudenken.

Zunächst noch einmal zum Alter des Universums: Die heute üblichen Zahlenangaben überdecken einen weiten Bereich, etwa von $7-20 \cdot 10^9$ Jahren, einerseits wegen der Ungenauigkeit der Hubble-Konstante und andererseits besonders wegen der Abhängigkeit der Altersberechnung der ältesten Sternhaufen von den dabei gemachten Annahmen. Wir können dem heute eine sehr viel präzisere Überlegung entgegenstellen: Wir sahen, dass die schweren Elemente (genauer gesagt: mehr als 70% derselben) schon am Anfang der galaktischen Scheibe vorhanden waren. Wie man sich auch immer die Entstehung der schweren Elemente vorstellen mag, es kann demnach kein Zweifel bestehen, dass ihr Alter dem der Milchstrasse und dem des gesamten Kosmos so nahe kommt, dass eine Unterscheidung nicht möglich ist. Andererseits aber kann man, wie wir sahen, das Alter der elternlosen radioaktiven Elemente auf der Erde sehr genau angeben zu $\sim 7 \cdot 10^9$ Jahren. Wir müssen diese Zahl daher zugleich als *Weltalter* akzeptieren und sie in Zukunft sozusagen als Grenzbedingung für Sternentwicklungsrechnungen und kosmologische Weltmodelle ansehen.

Als nächsten Punkt betrachten wir kritisch die Entstehung der galaktischen Scheibe durch Kollaps aus dem Halo. Aus mechanischen Gründen müsste dieser Vorgang sich in einem Zeitraum abgespielt haben, der

dem freien Fall und damit grössenordnungsmässig den Umlaufzeiten im galaktischen System entspricht, d.h. $\sim 2 \cdot 10^8$ Jahren. EGGEN, LYNDEN-BELL und SANDAGE haben diesen Schluss bestätigt durch eine Untersuchung der adiabatischen Invarianten des Systems. Noch ein Stück weiter führt die Betrachtung der axialen Komponente des galaktischen Bahndrehimpulses pro Masseneinheit, einerseits im Halo und andererseits in der galaktischen Scheibe. Nach den Grundprinzipien der Mechanik müsste nämlich diese Grösse beim Kollaps erhalten bleiben. Eine genauere Diskussion der galaktischen Bewegungen der metallarmen RR-Lyrae-Veränderlichen, die zu den ältesten Mitgliedern der Halopopulation II gehören, zeigt, dass der Drehimpuls pro Masseneinheit im Halo wesentlich geringer ist als in der Scheibe. Wenn dem so ist, so dürfte kaum etwas anderes übrigbleiben, als die ganze Kollapshypothese aufzugeben und uns – im Anschluss an AMBARZUMIAN – vorzustellen, dass zuerst die galaktische Scheibe da war und dass sich der Halo dann gleich im Anfang der galaktischen Entwicklung aus dem drehimpulsarmen Kern der Galaxis heraus durch eine gigantische Explosion gebildet hat.

Die Annahme derartiger galaktischer Explosionen, die Massen von der Grössenordnung einer mittleren Galaxis erfassen, wäre noch vor wenigen Jahren völlig phantastisch erschienen. Inzwischen hat uns die Radioastronomie darüber belehrt, dass die Radiogalaxien wie Cygnus A so entstanden sein müssen und dass in der Radioquelle Centaurus A jedenfalls zwei, vielleicht sogar drei solche Explosionen stattgefunden haben. In der Galaxis M82 können wir eine derartige galaktische Katastrophe auch optisch beobachten. In den vieldiskutierten Quasars spielt sich Ähnliches vielleicht noch in viel grösserem Massstab ab.

Wo und wie ist nun die Entstehung der schweren Elemente vor sich gegangen?

Nach der B^2FH -Hypothese sollen die schweren Elemente in dem sehr kurzen Zeitraum von $\sim 2 \cdot 10^8$ Jahren im Ur-Halo gebildet worden sein. Es erscheint aber andererseits ganz unverständlich, dass die nach B^2FH dazu notwendigen Prozesse der Entstehung und Wiederauflösung von Sternen in dem Ur-Halo mit seiner extrem geringen Dichte mit so viel grösserer Geschwindigkeit vor sich gegangen sein sollen als später in der galaktischen Scheibe oder z.B. in den Magellanischen Wolken mit ihrer erheblich grösseren Gasdichte. Warum soll sodann in allen Galaxien der verschiedenen Hubble-Typen als Endergebnis sich genau dasselbe Verhältnis H:He: schwere Elemente eingestellt haben? Warum endlich sollen die als Endergebnis höchst komplizierter Prozesse entstandenen relativen Häufigkeitsverhältnisse der schweren Elemente in der Scheibe und den Spiralarmlen genau dieselben sein wie in den geringen Spuren der schweren Elemente, die wir in extrem metallarmen Halo-Sternen finden?

Über die ganz andersartigen Änderungen der Häufigkeitsverteilung der schweren Elemente in der Stellarmaterie durch die bekannten Kernprozesse geben uns ja die verschiedenen Klassen anomaler Sternspektren weitgehend Auskunft.

Von der Astronomie her gesehen dürfte kaum ein anderer Ausweg bleiben, als zu der Vorstellung zurückzukehren, dass die metallreiche Materie, aus der der grösste Teil der Galaxien besteht, mit ihrer universellen Häufigkeitsverteilung im Anfang der Expansion des Weltalls entstand. Mit anderen Worten: Man müsste versuchen, die kernphysikalischen Schwierigkeiten der Lemaître-Gampowschen Hypothese zu überwinden.

Den Ursprung der metallarmen Halo-Sterne hätte man sich in diesem Rahmen etwa so vorzustellen, dass bei der schon erwähnten gigantischen Explosion im Kern unserer Galaxis Materie herausgeschleudert wurde, die vorwiegend aus Wasserstoff und Helium in etwa dem «kosmischen Mischungsverhältnis» bestand. Dass so etwas möglich ist, wird durch Rechnungen der Fowlerschen Schule zur Theorie des «Little Bang» nahegelegt. Diese metallfreie Materie hätte dann nach Mischung mit der älteren metallreichen Materie aus der Scheibe zur Bildung der metallarmen Halo-Sterne geführt. Die bisherigen Altersberechnungen lassen übrigens – innerhalb ihrer Fehlergrenzen – durchaus die Möglichkeit offen, dass die Kugelsternhaufen nicht älter sind als die ältesten Objekte der galaktischen Scheibe. Die Zuordnung der metallarmen Sterne zu einem Halo und der metallreichen Sterne zur Scheibe ist offenbar schon deswegen auf Galaxien mittlerer Typen beschränkt, weil man bei vielen anderen Galaxien an den Enden der Hubble-Sequenz gar nicht von einem Halo und einer Scheibe sprechen kann.

Wir haben gesehen, dass die bisherigen Vorstellungen über die Evolution der Elemente erheblichen Einwänden ausgesetzt sind. Auch die Grundzüge unserer neuartigen Vorstellungen bedürfen sicher in vieler Hinsicht noch weiterer Ausarbeitung und wohl auch Verbesserung. Feststehen dürfte aber, dass die quantitative spektroskopische Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der Elemente in den Atmosphären von Sternen verschiedener Herkunft und verschiedenen Alters uns sehr wirkungsvolle Möglichkeiten an die Hand gibt zum Studium der grossen Probleme der kosmischen Evolution.

LITERATUR

Wir verzichten auf eine Zusammenstellung der sehr umfangreichen Detailliteratur und geben eine Reihe zusammenfassender Darstellungen an, die ausführliche Literaturangaben enthalten:

BURBIDGE, E. M., BURBIDGE, G. R., FOWLER, W. A., and HOYLE, F.: Synthesis of the Elements in Stars. *Rev. mod. Phys.* 29, 547; 1957.

SANDAGE, A.: The Time Scale of Creation. In: *Galaxies and the Universe*. Ed. L. WOLTJER. Columbia University Press. New York, London 1968.

SCHWARZSCHILD, M.: *Structure and Evolution of the Stars*. Dover Publ. Inc. (S1479), New York 1965.

Stars and Stellar Systems, Vol. 8: *Stellar Structure*. Ed. L. H. ALLER and D. B. McLAUGHLIN. University of Chicago Press, Chicago 1965.

UNSÖLD, A.: *Der neue Kosmos*. Heidelberger Taschenbücher Nr. 16/17. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1967. Englische Übersetzung ebd. 1968.

UNSÖLD, A.: *Stellar Abundances and the Origin of the Elements*. *Science*. Erscheint 1969.