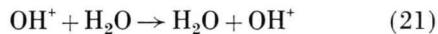
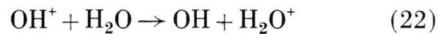


secondary ion would seem to corroborate the above ideas that the high intensities observed for CH_3^+ and C_2H_5^+ cannot be due to scattering of the primary ions. It also indicates that hydride ion transfer



does not occur. The ionization potential of OH seems to be slightly higher than that of water while that of CH_3 is much lower than that of methane (Table 2). In the case of water electron transfer



is expected to compete with reaction (21). Reaction (22) is of interest in considerations of the radiation chemistry of water. It explains the fact that there is no chemical evidence of OH^+ although the mass spectrum of water indicates that OH^+ is formed in high yield by high energy radiation. In the case of hydrogen chloride, the fragment Cl also has a slightly higher ionization potential than the molecule. The reaction $\text{Cl}^+ + \text{HCl} \rightarrow \text{Cl} + \text{HCl}^+$ may therefore partly be responsible for the very low relative intensity of Cl^+ in the secondary mass spectrum of hydrogen chloride.

Isotopie-Effekt und Häufigkeiten der Edelgase in Steinmeteoriten und auf der Erde

Von J. ZÄHRINGER

Aus dem Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
(Z. Naturforsch. 17 a, 460—471 [1962]; eingegangen am 2. April 1962)

The rare gas content of 19 various stone meteorites has been investigated mainly for the abundance of the heavier components. Nine normal chondrites have been selected, which indicated from the $\text{A}^{36}/\text{A}^{38}$ -ratio the presence of primordial rare gases. All of them contain primordial Kr and Xe as well as Xe^{129} -excess. Their content is proportional to the A^{36} -content and increases in the sequence: normal chondrites, enstatite chondrites and carbonaceous chondrites.

The relative abundances of the rare gases in the Staroe Pesjanoe and Kapoeta meteorites follow very closely the SUESS-UREY abundance curve. This may indicate that their composition is very similar to that of an undifferentiated solar nebula.

The isotopic variations of meteoritic and terrestrial Ne and He can be explained by isotope dependant diffusion in solids under the assumptions, that all matter contained the rare gases in solar composition previous to degassing and that Kr and A has been lost to a much smaller extent. A similar process may be responsible for the Xe-anomalies. Heating experiments confirm, that the remaining gases are in thermally resistent components. The Xe^{129} -problem is discussed under these aspects.

Der erste sichere Nachweis von Uredelgasen in Meteoriten gelang GERLING und LEVSKII¹ in dem Achondriten Staroe Pesjanoe. Dieser Meteorit enthält große Mengen an He, Ne und A, die nicht durch radioaktiven Zerfall oder durch Spallationsprozesse entstanden sein können. Ganz ähnliche Edelgasmengen wurden später in dem Achondriten Kapoeta von ZÄHRINGER und GENTNER² und auch in dem Chondriten Pantar von KÖNIG et al.³ und MERRIHUE et al.⁴ festgestellt.

Neben diesen heliumreichen Meteoriten existieren andere, wo überwiegend die schweren Edelgase

außergewöhnlich häufig sind. So fand REYNOLDS⁵ in dem kohligen Chondriten Murray überschüssiges A, Kr und Xe, STAUFFER⁶ in einigen kohligen Chondriten und einem Ureilten kleinere Mengen A und Ne, ZÄHRINGER und GENTNER² und REYNOLDS⁷ in Enstatitchondriten erhöhte A-, Kr- und Xe-Häufigkeiten. Inzwischen hat sich gezeigt, daß das Vorhandensein von Uredelgasen keine Ausnahme darstellt und daß unter günstigen Bedingungen in den meisten Chondriten Urargon zu erkennen ist⁸.

Die Isotopenzusammensetzungen der Uredelgase sind denen der atmosphärischen Edelgase ähnlich.

¹ E. K. GERLING u. L. K. LEVSKII, Dokl. Akad. Nauk, SSSR **110**, 750 [1956].

² J. ZÄHRINGER u. W. GENTNER, Z. Naturforschg. **15 a**, 600 [1960].

³ H. KÖNIG, K. KEIL, H. HINTENBERGER, F. WLOTZKA u. F. BEGEMANN, Z. Naturforschg. **16 a**, 1124 [1961].

⁴ C. M. MERRIHUE, R. O. PEPIN u. J. H. REYNOLDS, J. Geophys. Res., im Druck.

⁵ J. H. REYNOLDS, Phys. Rev. Letters **4**, 8 u. 351 [1960].

⁶ H. STAUFFER, Geochim. Cosmochim. Acta **24**, 70 [1961].

⁷ J. H. REYNOLDS, Z. Naturforschg. **15 a**, 1112 [1960].

⁸ T. KIRSTEN, D. KRANKOWSKY u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta, im Druck.



Es zeigen sich jedoch einige sehr wesentliche Abweichungen. So enthält das He einen deutlichen Anteil an He^3 , der wiederum nicht durch Spallationsprozesse zu erklären ist, und zwar im Verhältnis $\text{He}^4/\text{He}^3 = 3000 - 4000^{2,3}$. Eine Erhöhung von Ne^{20} um 30% wurde in den Meteoriten Kapoeta und Staroe Pesjanoe⁹, in Pantar^{3,4} und in geringerem Maße in einigen kohlgelben Chondriten gefunden. A und Kr hingegen haben im wesentlichen irdische Zusammensetzung. Die Enstatitochondrite sowie die uredelgashaltigen normalen Chondrite haben stets einen Xe^{129} -Überschuß, und auch die anderen Xe-Isotope haben teilweise stark veränderte Häufigkeiten^{5,10}.

In dieser Arbeit wird über Messungen von Ur-edelgasen verschiedener Meteoritenarten berichtet. Es wurden solche Meteorite untersucht, bei denen das $\text{A}^{36}/\text{A}^{38}$ -Verhältnis auf Vorhandensein von Ur-edelgasen hindeutet. Reines Spallationsargon sollte ein $\text{A}^{36}/\text{A}^{38}$ -Verhältnis von 0,6 besitzen, und bei den meisten Chondriten ist dieses Verhältnis größer. Es war zu untersuchen, ob diese Meteorite stets auch Kr und Xe enthalten und ob eine Beziehung zu dem A^{36} -Überschuß besteht. Ferner wurde das Xe^{129} -Problem weiter verfolgt. Der Xe^{129} -Überschuß wurde bisher immer zusammen mit Ur xenon beobachtet, und es bleibt zu prüfen, wo der J^{129} -Zerfall stattgefunden hat¹¹.

Aus den unterschiedlichen Häufigkeiten und Isotopenzusammensetzungen der Uredelgase kann man erkennen, daß die verschiedenen Meteoritenarten sowie die irdische Materie unterschiedliche Entstehungsgeschichten haben. Es wird darum einmal der Versuch unternommen, diese Edelgase aus einem gemeinsamen solaren Gas abzuleiten, was über die Entstehungsprozesse der planetarischen Materie wichtige Information bringen könnte.

Experimentelles

In einer Voranalyse wurden die Proben ca. 12 Stunden bei 150°C im Vakuum ent gast und die He-, Ne- und A-Isotope bestimmt. Zur Analyse der schweren Edelgase wurden alle gewöhnlichen Chondriten-Proben kurzzeitig auf 400°C erhitzt, um sicher alle Luftverunreinigungen auszutreiben. Dabei gingen stets radiogene Anteile verloren. Das $\text{A}^{36}/\text{A}^{38}$ -Verhältnis hat sich jedoch

in allen Fällen nicht wesentlich verändert. Hieraus wurde geschlossen, daß die gefundenen Edelgase nicht von der Atmosphäre stammen, sondern wirklich in der Probe enthalten sind. Diese hohe Ausheiztemperatur wurde deshalb gewählt, weil alle bisherigen Xe-Analysen oft einen beträchtlichen Anteil Luftverunreinigungen enthielten. Da die Entgasungsexperimente zeigten, daß in Chondriten die Uredelgase erst bei höheren Temperaturen entweichen, kann das Ausheizen die Mengenmessungen der Uredelgase nicht beeinträchtigen, sondern lediglich zuverlässigere Isotopenverhältnisse bewirken. Die in dieser Arbeit untersuchten Probenmengen betrugen alle 0,1 – 1 g.

Die He-, Ne- und A-Werte wurden nach dem früher beschriebenen Verfahren bestimmt. Kr und Xe wurden an einem U-Rohr mit flüssiger Luft ausgefroren und das Argon durch Einlassen ins Spektrometer abgetrennt. Dabei wurden etwa 30% Kr zusammen mit dem A gemessen, während Xe quantitativ festgehalten wird. Anschließend wurden durch Auftauen das restliche Kr und Xe zusammen ins Spektrometer eingelassen und im statischen Betrieb analysiert.

Die Schwierigkeiten der Xe-Messungen wurden stets durch den *memory*-Effekt verursacht, der nur dann merkbar wird, wenn Xe selbst oder sehr große Mengen anderer Gase ins Spektrometer eingelassen werden. Zur Kontrolle wurden die Xe-Spektren längere Zeit beobachtet und ein eventueller Anstieg verfolgt oder mit Xe^{128} -carrier der Untergrund der Apparatur kontrolliert. Hiermit wurden auch die quantitativen Xe-Bestimmungen durchgeführt. Das Xe^{128} wurde im Reaktor aus KJ-Salz hergestellt.

Der Fehler der Kr- und Xe-Mengen wird auf Grund der erwähnten Schwierigkeiten auf 20 – 30% geschätzt, während er für die anderen Edelgase unter 5% liegt. Die Genauigkeit vom $\text{Xe}^{129}/\text{Xe}^{132}$ -Verhältnis wird durch Luftverunreinigungen begrenzt und wird für die ungünstigsten Fälle bei Kapoeta und Staroe Pesjanoe auf ca. 10% geschätzt.

Ergebnisse

In Tab. 1 sind die Edelgasresultate nach steigendem Uredelgasgehalt angeordnet. Bei allen untersuchten Proben hat sich die Vermutung bestätigt, daß neben Urargon auch Kr und Xe als Urgase vorhanden sind. Der Urargongehalt wurde errechnet, indem vom gesamten A³⁶-Gehalt das Spallationsargon mit $\text{A}^{38}/\text{A}^{36} = 1,6$ abgezogen wurde. Dieser Wert wurde Eisenmeteoriten entnommen und könnte für Steinmeteorite wegen des Ca-Anteils einen etwas anderen Wert haben. In Tab. 1 ist für die Meteorite, die Urneon enthalten, das $\text{Ne}^{20}/\text{Ne}^{22}$ -Verhältnis

⁹ J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta, im Druck.

¹⁰ W. B. CLARKE u. H. G. THODE, J. Geophys. Res. **10**, 3578 [1961].

¹¹ J. ZÄHRINGER u. W. GENTNER, Z. Naturforsch. **16a**, 239 [1961].

	He ³	He ⁴	Ne ²⁰	Ne ²¹	Ne ²²	A ³⁶	A ³⁸	A ⁴⁰	A ³⁶ _{ur}	Kr ⁸⁴	Xe ¹³²	Xe ¹²⁹ /Xe ¹³²	K-A Alter in 10 ⁹ a	(Ne ²⁰) _{ur}	(Ne ²⁰) _{ur}
<i>Achondrite</i>															
Staroe Pesjanoe	220	630000	2080	23	184	148	27,6	2700	148	≤ 0,06	≤ 0,008	1,0	4,5	15	12,5
Spallationsanteil	60	~ 300	17	18	19										
Kapoeta	55	205000	2220	7,5	166	88	17	1140	88	≤ 0,03	≤ 0,006	1,0	4,4	24	13,5
Spallationsanteil	5	~ 25	1,4	1,5	1,6										
<i>Kohlige Chondrite</i>															
Felix	78	2400	16	12	14	135	26	2475	135	0,75	0,61	1,15	4,1	—	—
Mighei	2	3700	13	0,65	2,2	62	11,5	850	62	0,92	1,0	1,09	2,4	0,2	8,3
Cold															
Bokkeveld	0,5	2800	10,0	0,07	1,2	43	7,8	(600)	43	0,55	0,60	1,02	(1,2)	0,2	9,0
Murray	3,4	8900	40,7	1,1	5,1	68	12,3	340	68	0,70	0,86	1,10	1,6	0,5	9,7
Orgueil	7,7	24800	47,3	0,9	5,1	67	12	400	67	0,90	1,0	1,08	1,3	0,7	11
Atmosphäre in Vol.-% · 10 ⁴	(5,2)		16,3	0,047	1,6	31	5,8	—	31	0,57	0,02	0,98		0,53	10,2
	He ³	He ⁴	Ne ²⁰	Ne ²¹	Ne ²²	A ³⁶	A ³⁸	A ⁴⁰	A ³⁶ _{ur}	Kr ⁸⁴	Xe ¹³²	Xe ¹²⁹ /Xe ¹³²	K-A Alter in 10 ⁹ a		
<i>Enstatit-Chondrite</i>															
Abree	12	1320	10	2,5	3,3	37	6,9	6900	37	0,15	0,080	6,4		4,7	
St. Marks	1,0	600	1,1	0,3	0,4	36	6,4	3660	36	0,14	0,052	4,4		3,8	
Indarch	13	1270	7,7	3,6	4,5	6,3	1,6	5620	6	0,04	0,07	4,0		4,3	
<i>Gewöhnliche Chondrite</i>															
Hamlet	61	1850	12,4	12,4	13,6	10,1	2,7	5000	9,5	0,10	0,09	1,4		3,9	
Forest Vale	110	2370	24	27	29	7,7	4,4	6420	5,7	0,062	0,075	1,5		4,6	
Bjurböle	19	1600	4,1	4,4	4,8	3,0	1,2	5500	2,5	0,022	0,043	1,8		4,3	
Richardton	32	1730	9,4	9,5	10,3	3,0	1,4	5550	2,4	0,024	0,023	1,7		4,4	
Nadiabondi	97	2180	20	21	23	3,2	2,9	6075	1,5	0,022	0,027	1,45		4,6	
Miller	5,8	1645	1,6	1,1	1,3	1,5	0,46	6400	1,4	0,015	0,015	1,50		4,8	
Forksville	48	1150	9,2	9,7	10,3	1,7	1,2	5580	1,1	—	0,010	1,8		4,4	
St. Isabel	64	1790	11,9	11,9	12,8	1,8	1,7	5940	0,9	~ 0,015	0,008	2,0		4,5	
Bruderheim	47	500	9,1	10,1	11,2	1,5	1,5	1110	0,7	0,015	0,013	1,3		1,9	

Tab. 1. Edelgasgehalt in 10⁻⁸ cm³/g verschiedener uredelgashaltiger Meteoritenarten.

durch Korrektur des Spallationsneon mit

$$\text{Ne}^{20} : \text{Ne}^{21} : \text{Ne}^{22} = 0,9 : 0,95 : 1,0$$

berechnet.

Die hier untersuchten gewöhnlichen Chondrite enthalten neben Ur xenon einen deutlichen Xe¹²⁹-Überschuß. Der Zusammenhang zwischen den Uredelgasen A³⁶, Kr⁸⁴ und Xe¹²⁹ ist in Abb. 1 graphisch

dargestellt. Man sieht, daß mit steigendem Urargon auch die Kr- und Xe-Werte zunehmen.

In Tab. 1 sind auch die Resultate der beiden Achondrite Staroe Pesjanoe und Kapoeta mit den Kr- und Xe-Werten eingetragen. Diese Werte sind sehr klein und entsprechend mit einem größeren Fehler behaftet. Die Werte von Kapoeta stimmen

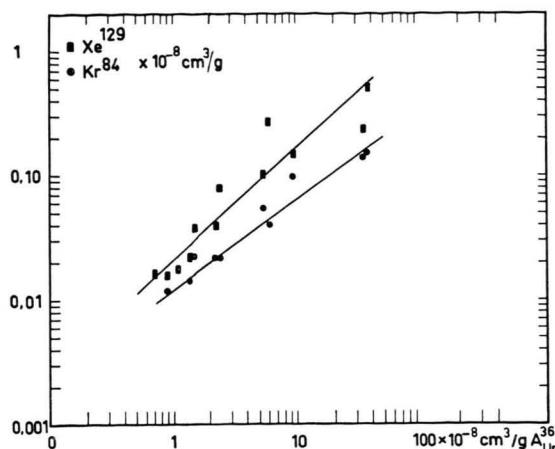


Abb. 1. Der Kr⁸⁴- und Xe¹²⁹-Gehalt von gewöhnlichen und Enstatitochondriten in Abhängigkeit von Urargon.

mit den früher mitgeteilten Werten recht gut überein. Bei diesen Messungen wurde durch Vorentgasen besser auf atmosphärische Verunreinigungen geachtet. Innerhalb der Fehlergrenzen von 10% konnte in beiden Proben kein Xe¹²⁹-Überschuß gefunden werden.

Größere Schwankungen wurden bei den kohligen Chondriten gefunden, vermutlich sind diese durch den hohen Wassergehalt bedingt. Bei Abee sind im He⁴-Gehalt bei unzerkleinerten Proben von ca. 50 mg sehr große Schwankungen von $800 - 2300 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$ aufgetreten, was auf inhomogene Verteilung von Urhelium hindeutet. Bei Argon waren die Schwankungen geringer. Alle angegebenen Messun-

gen wurden daraufhin an gepulverten homogenen Proben durchgeführt.

Entgasungsexperimente

Bei diesen Versuchen wurden pulverisierte Proben von ca. 60μ Korngröße in Stufen bei zunehmender Temperatur erhitzt und die Mengen und Isotopenzusammensetzungen der abgetrennten Edelgase bestimmt.

Hiermit sollten folgende Fragen untersucht werden:

1. Unterscheidet sich Xe¹²⁹ in der Art der Diffusion von den anderen Uredelgasen, und ist es chemisch vielleicht an anderen Plätzen im Kristallgefüge gebunden?

2. Falls sich aus dem J- und Xe¹²⁹-Gehalt eine reelle Zeitspanne ermitteln lässt, kann man sie in einfacher Weise zum K-A-Alter addieren, um das Ende der J¹²⁹-Erzeugung zu datieren?

3. Kann man verstehen, wie diese Chondrite zu der heutigen Uredelgaszusammensetzung gelangten, und kann man eventuell etwas über die thermische Vergangenheit erfahren?

In Abb. 2 sieht man wie bei dem Enstatitochondriten St. Marks das radiogene A⁴⁰ bei relativ niederen Temperaturen und die Uredelgase erst über 900°C entweichen. Das A⁴⁰/A³⁶-Verhältnis ändert sich von seinem maximalen Wert 850 auf 10. Das Xe¹²⁹/Xe¹³²-Verhältnis steigt ab 1000°C schnell an und bleibt bis 1300°C bei dem Wert 3,8 stehen. Anschließend wurde die Probe vollständig geschmolzen,

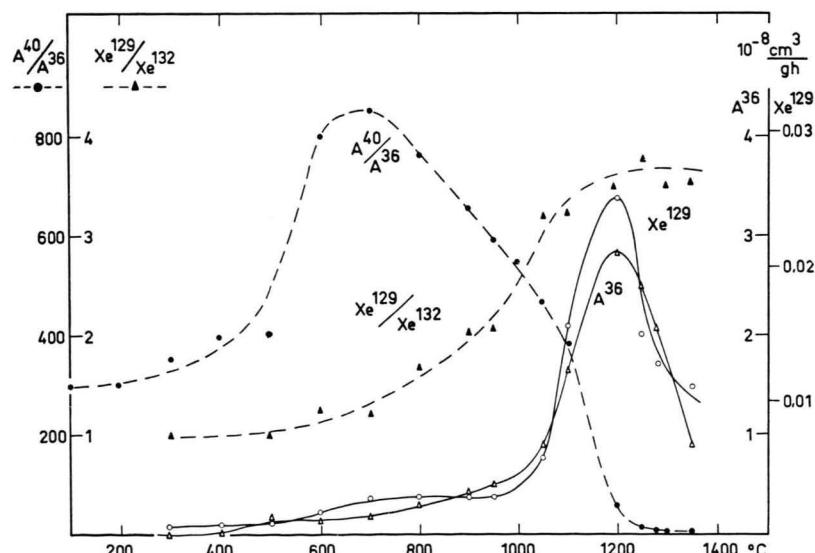


Abb. 2. Stufenweise Entgasung einer pulverisierten Probe des Enstatitochondriten St. Marks. Die bei verschiedenen Temperaturen abgegebenen Mengen an A³⁶ und Xe¹²⁹ sowie die A⁴⁰/A³⁶- und Xe¹²⁹/Xe¹³²-Verhältnisse. Die Entgasungsdauer war ca. 1 h.

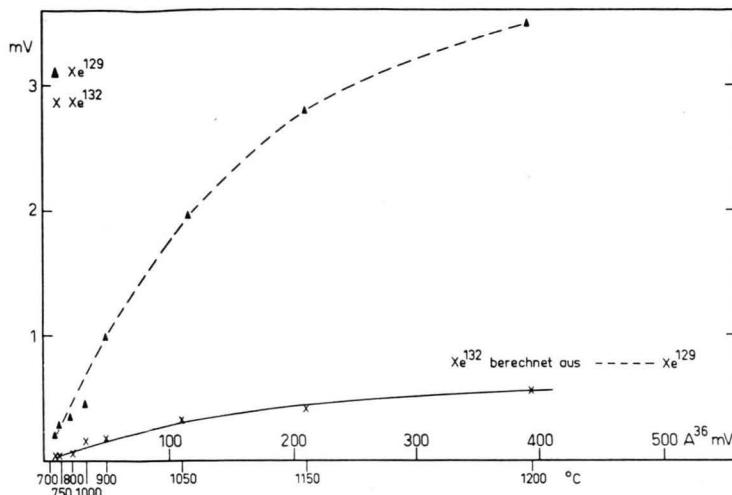


Abb. 3. Stufenweise Entgasung einer pulverisierten Probe des Enstatit-chondriten Abee. Die eingeziehenen Punkte sind die gemessenen Mengen Xe^{129} und Xe^{132} , die für verschiedene Temperaturen in Abhängigkeit vom $\text{A}_{\text{ur}}^{36}$ -Gehalt eingezeichnet sind. Die fest eingetragene Kurve wurde durch Division mit 6,4 aus der gestrichelten Kurve berechnet. Lediglich bei niederen Temperaturen zeigen sich mengenmäßig geringfügige Abweichungen.

und das $\text{Xe}^{129}/\text{Xe}^{132}$ -Verhältnis behielt den ursprünglichen Wert. Dieses Verhältnis ergab bei einer vor-entgasten Probe 4,4 (s. Tab. 1), während bei dem Entgasungsexperiment 3,8 als maximaler Wert erzielt werden konnte. Man sieht also, daß geringe atmosphärische Verunreinigungen den Unterschied bedingen. Insbesondere dürfte der langsame Anstieg zwischen 700 und 900 °C davon herrühren.

Ein ganz entsprechendes Resultat ergibt sich für den Enstatit-chondriten Abee. Dieser Versuch wurde mit 2 g Probengewicht und einer Korngröße von 60 μ mit größerer Empfindlichkeit wiederholt, weil JEFFERY und REYNOLDS¹² aus großen Änderungen im $\text{Xe}^{129}/\text{Xe}^{132}$ -Verhältnis einen radiogenen Ursprung des Xe^{129} abgeleitet hatten. Das $\text{A}^{40}/\text{A}^{36}$ -Verhältnis steigt hier sogar auf 6000 und fällt nach 1000 °C bis auf 5, wo wiederum die Uredelgase entweichen. Zum Unterschied von St. Marks entweichen jedoch ca. 15% schon bei 700–900 °C, wobei ein Schwefelniederschlag beobachtet wurde, der vermutlich von der Zersetzung von Sulfiden herührt. Die Frage, ob die 15% Edelgase in den Sulfiden eingeschlossen sind oder ob teilweise ein chemischer Aufschluß stattfindet, kann vorläufig nicht entschieden werden. Das $\text{Xe}^{129}/\text{Xe}^{132}$ -Verhältnis zeigte bei größerer Meßempfindlichkeit bzw. größerem Probengewicht zwischen 900 und 1000 °C ebenfalls ein Minimum. Vergleicht man die Abee-Resultate mit denen von St. Marks, so ist leicht zu verstehen, daß diese niederen Werte von Luftxenon herühren können. Der mittlere Wert in dem Experi-

ment von REYNOLDS betrug nämlich 5,3, während bei einem Gesamtaufschluß mit kleineren Verunreinigungen 6,4 erzielt wurden. Es sind also 17% Luftxenon dabei enthalten, und da die in diesem Temperaturintervall abgegebenen Xe-Mengen klein sind, ist die Erniedrigung der $\text{Xe}^{129}/\text{Xe}^{132}$ -Verhältnisse erklärt.

In Abb. 3 sind die gemessenen Xe^{129} - und Xe^{132} -Werte gegen den Urargongehalt aufgetragen. Durch die Xe^{129} -Punkte wurde eine Kurve gelegt und durch Division mit 6,4 die Kurve für Xe^{132} errechnet. Man sieht, daß lediglich zwischen 800 und 1000 °C Abweichungen bestehen, die mengenmäßig jedoch von untergeordneter Bedeutung sind und sehr wohl durch Luftbeimengungen verursacht sein können.

Diskussion

1. Uredelgase

Die Tatsache, daß eine große Anzahl von Meteoriten Uredelgase enthält, ist allgemein überraschend. Alle bisherigen Vorstellungen über die Entstehung der Meteorite haben gemeinsam, daß die Materie mehr oder weniger hohen Temperaturen ausgesetzt war. Infolge der chemischen Inaktivität der Edelgase hat man weitgehende Entgasung als sicher angenommen. Diese Vorstellung trifft jedoch nach den vorliegenden Messungen nicht mehr allgemein zu.

Bei einer systematischen Untersuchung einer größeren Zahl von Chondriten hat sich gezeigt, daß die Anwesenheit von Uredelgasen keine Ausnahme darstellt. Eine weitere Anzahl hier nicht aufgeföhrter Chondrite läßt deutlich erkennen, daß neben Spal-

¹² P. M. JEFFERY u. J. H. REYNOLDS, Z. Naturforschg. 16a, 431 [1961].

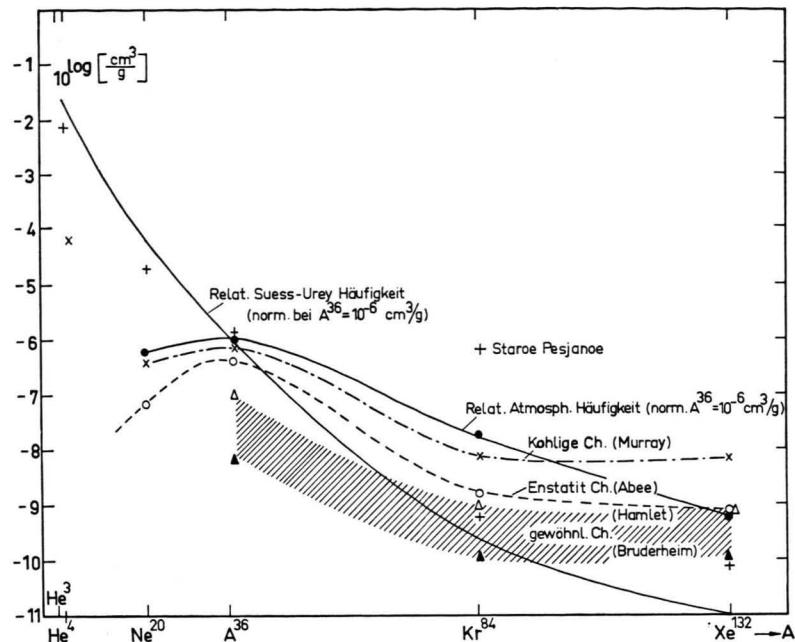


Abb. 4. Die Edelgaskonzentrationen in cm^3/g für verschiedene Meteoritenarten. Die fest eingetragenen Kurven sind die relativen kosmischen und atmosphärischen Häufigkeiten, die für $A^{36} = 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$ normiert wurden.

lationsargon auch Urargon vorhanden ist⁸. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam STAUFFER¹³. Bei diesen Chondriten sind stets nur A, Kr und Xe nachzuweisen, und nach den bisher vorliegenden Entgasungsexperimenten entweichen die Uredelgase erst bei Temperaturen oberhalb 800°C . Die in den Chondriten noch vorhandenen Edelgase befinden sich offenbar in thermisch resistenten Komponenten. Bei den heliumreichen Meteoriten wurde hingegen gefunden, daß He und Ne bei sehr niedrigen Temperaturen entweichen⁹. Die kohligen Chondrite nehmen eine Zwischenstellung ein, da einige sowohl die schweren Edelgase als auch deutlich He und Ne als Uredelgase enthalten.

In Abb. 4 sind die Uredelgaskonzentrationen in Abhängigkeit von der Masse graphisch zusammengestellt. Außerdem sind die SUESS-UREY-Häufigkeiten zum Vergleich miteingezeichnet, welche für $A^{36} = 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$ normiert wurden. Diese Häufigkeiten sind in letzter Zeit um den Faktor 2 verkleinert worden. Hier soll jedoch von diesen Diskrepanzen abgesehen werden. Außerdem sind die Häufigkeiten der irdischen Atmosphäre miteingetragen, die ebenfalls für $A^{36} = 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$ normiert wurden.

In Abb. 4 fällt zunächst auf, daß die Uredelgashäufigkeiten von Staroe Pesjanoe (und auch von

Kapoeta) mit den relativen kosmischen Häufigkeiten recht gut übereinstimmen. Dagegen weichen die Uredelgase der Chondrite sowohl bei den leichten als auch bei den schweren Edelgasen erheblich davon ab. Helium und Neon sind gegenüber Argon sehr stark erniedrigt und nur bei einigen kohligen Chondriten als Uredelgas überhaupt zu erkennen. Andererseits sind Kr und Xe in allen Chondriten gegenüber A sehr viel häufiger als nach dem kosmischen Verhältnis zu erwarten wäre. Das $A^{36} : Kr^{84} : Xe^{132}$ -Verhältnis beträgt bei den Chondriten etwa $100 : 1 : 1$ gegenüber $100 : 0,23 : 0,001$ der kosmischen Häufigkeiten.

Die Edelgase der irdischen Atmosphäre zeigen eine ganz ähnliche Zusammensetzung. He und Ne sind ebenfalls sehr selten, und das A : Kr : Xe-Verhältnis ist $100 : 1,8 : 0,06$. Gegenüber den Chondriten ist insbesondere Xe sehr viel seltener. Sieht man von dieser abweichenden Xe-Häufigkeit zunächst ab, so ist die Ähnlichkeit der Uredelgase der Chondrite und der atmosphärischen Edelgase doch recht auffallend.

Die absoluten Mengen liegen für die gewöhnlichen Chondrite dieser Arbeit innerhalb eines Faktors 10 und nehmen zu den Enstatit- und kohligen Chondriten hin zu. Bezieht man z. B. die Häufigkeit von A^{36} auf die Zahl der Si-Atome, so findet man für die Erde etwa den 10^9 -ten Teil des kosmischen A^{36}/Si

¹³ H. STAUFFER, J. Geophys. Res. **66**, 1513 [1961].

Verhältnisses¹⁴. Diese Abschätzung gilt natürlich nur unter der sehr unsicheren Annahme, daß das Erdinnere frei von Edelgasen ist. Die gewöhnlichen Chondrite haben ein mit der Erde vergleichbares A³⁶/Si-Verhältnis, während die kohlgigen Chondrite etwa den 10⁷-ten Teil des kosmischen Wertes besitzen⁶.

Eine weitere Beziehung besteht in der Isotopenzusammensetzung des Neon. Wie schon früher berichtet, zeigen die heliumreichen Meteorite gegenüber atmosphärischem Neon ein um 30% erhöhtes Ne²⁰/Ne²²-Verhältnis sowie eine etwa halb so große Erhöhung von Ne²¹. Für Meteorite mit kleinerem He- und Ne-Gehalt wie Pantar und für atmosphärisches Neon ist das Ne²⁰/Ne²²-Verhältnis geringer. Bei einigen kohlgigen Chondriten ist es sogar noch kleiner als im atmosphärischen Neon. Diese Korrelation ist in Abb. 5 dargestellt. Auf der Abszisse ist in logarithmischem Maßstab das Ne²⁰/A³⁶-Verhältnis für die Urneon enthaltenden Meteorite sowie für die Atmosphäre und auf der Ordinate das Ne²⁰/Ne²²-Verhältnis eingetragen.

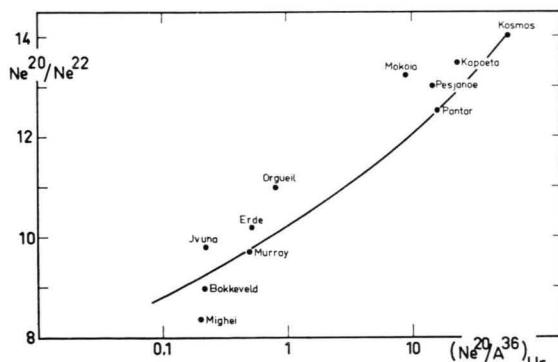


Abb. 5. Die Abhängigkeit des Ne²⁰/Ne²²-Verhältnisses von dem Ne²⁰/A³⁶-Verhältnis. Die Meßwerte von Mokoia und Ivuna wurden von STAUFFER⁶, von Pantar die Ne-Werte von KÖNIG et al.³ und die A-Werte von MERRIHUE et al.⁴ entnommen.

Einen ganz ähnlichen Isotopieeffekt besitzt auch das He der Meteorite Murray und Orgueil. Das He⁴/He³-Verhältnis ist nach Korrektur des Spallationshelium ca. 6000 und das schwere Isotop ist wiederum gegenüber den heliumreichen Meteoriten angereichert.

Zur Deutung dieser Uredelgase wird angenommen, daß alle Edelgase aus einem gemeinsamen Reservoir stammen und im Laufe der Meteoriten- und

Planetenentstehung die gefundenen Zusammensetzungen zustande kamen. Eine solche Annahme ist berechtigt, da mehrere Meteorite mit Uredelgasen nahezu kosmischer Zusammensetzung noch heute existieren. Deren Uredelgase stellen einen recht guten Durchschnitt der solaren Zusammensetzung dar, obwohl nur der 10⁷-te Teil der kosmischen Häufigkeiten vorhanden ist. Dies ist offenbar nur so zu verstehen, daß ein Teil der Materie zu einer Zeit die Edelgase aufnahm, als diese noch keiner Entmischung ausgesetzt waren. Wenn man den allgemeinen Vorstellungen folgt, daß aus einer protoplanetaren Wolke H und He zuerst entweichen, dann sollte die Edelgasaufnahme noch zuvor, also zu einem sehr frühen Zeitpunkt der Kondensation, stattgefunden haben. Nach HOYLE¹⁵, FOWLER et al.¹⁶ (1962) war die Oberflächentemperatur z. Zt. der Rotationsinstabilität der Wolke nicht viel größer als 500 °C. Materie mit hohem Schmelzpunkt (gewöhnliche Metalle, Silikate etc.) kann dabei bereits in fester Form, z. B. als kleine Staubteilchen, vorgelegen haben, als sich die planetarische Scheibe gebildet hat. Möglicherweise waren noch interstellare Teilchen erhalten geblieben, die als Kondensationskerne gewirkt haben. Die Schwierigkeit dieser Hypothese besteht darin, daß kleine Teilchen vom abströmenden Gas mitgerissen werden. Erst wenn sie eine gewisse Größe von ca. 1 m Durchmesser überschritten haben, können sie im Innern des Ringes verbleiben. Solche Körper sollen mit Hilfe von Eis als Bindemittel zustande gekommen sein.

Wie eine solche Ansammlung von Materie stattfindet, hängt sehr wesentlich von der Art der Verbindungen ab. Bei gesättigter Bindung sind die Zwischenkräfte geringer als bei Teilchen mit gleichartigen Elementen, wo gegenseitige Anziehung wahrscheinlicher ist. Um Edelgase in solchen Kondensationskernen zu halten, muß die Abkühlung sehr schnell vor sich gegangen sein. Der Einfangmechanismus muß für jedes Edelgas etwa proportional dem Partialdruck gewesen sein. Dies kann an der Oberfläche der protoplanetaren Wolke vor sich gegangen sein, wobei durch Konvektion immer neue Teilchen kondensieren und im Innern der Wolke wieder verdampfen. Nur ein Teil der Materie kann also kondensiert vorgelegen haben, und ein noch geringerer Teil der Edelgase war in festen Teilchen eingeschlossen. Die gefundene Edelgaszusammensetzung

¹⁴ H. SUESS, J. Geol. 57, 600 [1949].

¹⁵ F. HOYLE, Quart. J. Roy. Astron. Soc. 1, 128 [1960].

¹⁶ W. A. FOWLER, J. P. GREENSTEIN u. F. HOYLE, Geophys. J. 6, 148 [1962].

zung spricht jedenfalls für einen solchen schnellen Kondensationsprozeß.

Bei der weiteren Evolution dieser Gas-Staub-Wolke müssen sich irgendwann Kondensationskerne gebildet haben, die man als Urkörper der Meteorite oder Planeten ansehen muß. Man würde also erwarten, daß der Kern der allerersten Kondensationskörper aus solchen Produkten gebildet wurde.

Wenn die Edelgase während der folgenden Prozesse bei der Meteoritenentstehung nicht entweichen sollen, müssen sie infolge einer abdichtenden Schicht und genügender Löslichkeit von den heißen Körpern festgehalten worden sein. Man kann sich sonst schwer vorstellen, daß durch die mannigfachen chemischen Prozesse die relativen Häufigkeiten so gut erhalten blieben. Auf diese Weise könnte der Staroe Pesjanoe-Meteorit entstanden sein.

Bei Kapoeta wurden die Uredelgase in der Glasphase lokalisiert. Hierbei könnte es sich um solche aus der Gasphase erstarrten Kondensationsprodukte handeln. Diese müßten dann nachträglich auf kaltem Wege mit den übrigen Mineralien zusammengebakken worden sein. Man sollte eine vulkanische Entstehung allerdings auch nicht ganz ausschließen. Die Glasteilchen könnten aus dem Innern eines wie oben beschriebenen Protokörpers herausgeschleudert und an der Oberfläche schnell abgekühlt worden sein¹⁷.

Während die Uredelgase mit nahezu kosmischer Zusammensetzung ziemlich eindeutig zu verstehen sind, lassen sich für die Entstehung der Edelgase in Chondriten und der irdischen Edelgase mehrere Möglichkeiten ausdenken.

Zur Deutung der atmosphärischen Edelgase hat SUESS¹⁴ angenommen, daß anfangs von allen Edelgasen nur der 10^7 -te Teil der kosmischen Häufigkeit auf der Erde vorhanden war und daß anschließend die leichten Gase selektiv aus der Atmosphäre abdiffundierte. Dabei würden die Edelgase an den leichten Isotopen verarmen. Bei der Berechnung zeigten sich jedoch beträchtliche Schwierigkeiten. Das zu überwindende Potentialfeld unserer heutigen Erde ist viel zu groß, um größere Mengen Neon abdiffundieren zu lassen, und eine quantitative Übereinstimmung ließe sich nur herstellen, wenn die Erde früher sehr viel schneller rotiert hätte.

Das Auffinden der Neon-Anomalie in den Uredelgasen weist qualitativ auf eine solche selektive Ent-

mischung hin. Für Argon können jedoch keine deutlichen Unterschiede unter den einzelnen Meteoriten und der Atmosphäre gefunden werden. Auch die Resultate dieser Arbeit liegen bei allen Proben, wo die Korrekturen durch Spallations-Argon geringfügig sind, innerhalb von 5% beim atmosphärischen A^{36}/A^{38} -Wert von 5,3. Für Kr in Meteoriten fanden KRUMMENACHER et al.¹⁸ (1962) ebenfalls atmosphärische Isotopenzusammensetzung. Lediglich bei Xe existieren wiederum Anomalien⁵, die jedoch ganz anderer Natur sein können und bei KRUMMENACHER et al.¹⁸, FOWLER, GREENSTEIN und HOYLE¹⁶, CAMERON und auch unten ausführlich diskutiert werden. Es sieht danach so aus, als ob nur He und Ne eine stärkere Entmischung erfahren haben und für A und Kr die anfängliche kosmische Isotopenzusammensetzung in allen Meteoriten und auf der Erde erhalten blieb. Ein Entmischungsprozeß, der allein von der Masse der Edelgase abhängt, kann daher für die Isotopenverschiebung nicht verantwortlich sein. Man müßte stets auch eine solche für A^{36}/A^{38} finden, die genau halb so groß ist wie die von Ne^{20}/Ne^{22} . Aus demselben Grunde kann auch innerhalb der planetarischen Wolke vor der Edelgasaufnahme keine solche Entmischung stattgefunden haben.

Auf Grund der Häufigkeitsverhältnisse in Abb. 4, wo nur für He und Ne sehr große Abweichungen existieren, gelangt man zunächst ebenfalls zu dem Schluß, daß die schweren Edelgase weniger beeinflußt wurden.

Als möglicher Prozeß kommt für diese *sprunghafte* Fraktionierung die Diffusion im Festkörper in Betracht. Bei Volumendiffusion hängt die Diffusionskonstante in folgender Weise von der Temperatur ab:

$$D = D_0 e^{-Q/RT},$$

wobei die charakteristische Diffusionskonstante D_0 wie auch die Aktivierungsenergie Q nicht nur von der Masse, sondern auch sehr stark von dem diffundierenden Gas und von der Gitterkonstanten abhängen.

Entgasungsexperimente an den Meteoriten Kapoeta und Staroe Pesjanoe ergaben, daß die Diffusion von Ne stets größer als die von A ist⁹. Besonders extrem liegen die Verhältnisse bei Kapoeta, wo bei niederen Temperaturen D/a^2 für A um den Faktor ca. 10^4 kleiner als für Ne ist.

¹⁷ G. G. GOLES, R. A. FISH u. E. ANDERS, Geochim. Cosmochim. Acta **19**, 177 [1960].

¹⁸ D. KRUMMENACHER, G. M. MERRIHUE, R. O. PEPIN u. J. H. REYNOLDS, Geochim. Cosmochim. Acta, im Druck.

Für die kohligen Chondrite vermutet auch STAUFFER⁶, daß deren Ne- und A-Werte durch unterschiedliche Diffusion aus einer ursprünglich kosmischen Zusammensetzung hervorgingen. Die Messung der Diffusionskonstanten ergab bei 730 °C für Ne einen dreimal so großen Wert wie für A. Da die Aktivierungsenergien von A nach Ne und He hin sicherlich abnehmen, kann der Unterschied bei niederen Temperaturen sehr viel größer sein.

Man kann vermuten, daß durch eine solche selektive Diffusion auch die Isotopenverschiebungen bei Ne zustande kamen (Abb. 5). In einer neueren Arbeit von LAZARUS¹⁹ wurde bei der Diffusion von Fe⁵⁵ und Fe⁵⁹ in Silber ein Isotopen-Effekt experimentell festgestellt und ungefähre Übereinstimmung mit einer \sqrt{M} -Abhängigkeit gefunden. Einen solchen Isotopen-Effekt haben wir auch bei Edelgasen festgestellt, und zwar an dem durch Spallation erzeugten He in dem Achondriten Norton County, wo nach dem Austreiben von 99,7% He eine Erhöhung des He⁴/He³-Verhältnisses um den Faktor 3 beobachtet wurde.

Dieser Isotopen-Effekt wird sich um so mehr bemerkbar machen, je größer das Verhältnis der Anfangs- zur Endkonzentration ist. Dabei verarmen die im Kristall verbleibenden Gase an den leichten Isotopen. Zur numerischen Prüfung dieser Aussage wurde für die Massenabhängigkeit das \sqrt{M} -Gesetz angenommen. Dieses wird näherungsweise auch für den Fall gelten, daß keine vollkommene Volumendiffusion vorliegt.

Die Isotopenverschiebungen kann man auf folgendem Wege berechnen:

Bei starker Entgasung (>85%) ist die im Kristall verbleibende Menge

$$F = (6/\pi^2) \exp \left\{ -\frac{\pi^2 D(M)}{a^2} t \right\},$$

wobei $D(M)$ die massenabhängige Diffusionskonstante, a der Kornradius und t die Zeit darstellen. Hieraus ergeben sich bei \sqrt{M} -Abhängigkeit der Diffusionskonstanten die im Kristall verbleibenden Mengen aus folgenden Beziehungen:

$$F_3 = 1,08 \quad F_4^{1.155} \quad (\text{Helium}),$$

$$F_{20} = 1,025 \quad F_{22}^{1.05} \quad (\text{Neon}),$$

$$F_{36} = 1,0135 \quad F_{38}^{1.027} \quad (\text{Argon}).$$

In Tab. 2 sind für verschiedene Entgasungsgrade die Isotopenzusammensetzungen für ein Gemisch mit ursprünglich gleicher Isotopenhäufigkeit berechnet.

Menge in % (He ⁴ , Ne ²² , A ³⁸)	He ³ /He ⁴	Ne ²⁰ /Ne ²²	A ³⁶ /A ³⁸
100	1	1	1
10	0,76	0,91	0,95
1	0,53	0,81	0,90
0,1	0,37	0,72	0,84
0,01	0,22	0,63	—

Tab. 2. Die zu erwartenden Isotopenverhältnisse der nach der Entgasung noch vorhandenen Mengen bei ursprünglich gleicher Isotopenhäufigkeit. Den Berechnungen liegt die \sqrt{M} -Abhängigkeit der Diffusionskonstanten zugrunde.

Hieraus kann man ersehen, daß auf Grund der kleinen A³⁶/A³⁸-Schwankungen noch mindestens 1/10 des ursprünglichen A-Gehaltes vorhanden sein sollte. Um andererseits eine Veränderung des Ne²⁰/Ne²²-Verhältnisses um 30% zu erhalten, darf die Endkonzentration höchstens 1% der Anfangskonzentration betragen. Damit eine so unterschiedliche Entgasung zustande kommt, muß die Diffusionskonstante von Ne nur viermal so groß wie die von A sein. Nach den obigen Bemerkungen über Diffusionsexperimente ist dieser Unterschied durchaus zu erwarten.

Erhöht man in Abb. 4 für die kohligen Chondrite und für die Atmosphäre die A³⁶-Werte um den Faktor 10 und die Ne²⁰-Werte um den Faktor 1000, so passen die relativen Häufigkeiten besser zu den kosmischen Häufigkeiten. Dies kann man für die einzelnen Chondrite und für die Erde etwas genauer ausrechnen, indem man für verschiedene Ne²⁰/A³⁶-Verhältnisse die entsprechenden Isotopenverschiebungen nach Tab. 2 berechnet. In Abb. 5 gibt die ausgezogene Kurve diese Werte wieder. Dabei wurde angenommen, daß in allen Fällen der gefundene A-Gehalt 1/10 des ursprünglichen Wertes beträgt. Diese Annahme scheint berechtigt zu sein, da die gefundenen A³⁶/Kr⁸⁴-Verhältnisse der hier diskutierten Meteorite gegenüber dem kosmischen Verhältnis etwa um diesen Faktor kleiner sind. Bei den kohligen Chondriten ist Kr in einigen Fällen etwas häufiger. Hierfür wird noch eine weitere Ursache vermutet, die unten diskutiert wird.

Mit dieser einfachen Deutung lassen sich jedenfalls die relativen Häufigkeiten der leichteren Edelgase wie auch die Isotopenverschiebungen des Ne

¹⁹ D. LAZARUS, Conf. on the Use of Radio Isotopes in the Physical Sciences and Industry RICC/188 [1960].

der Meteorite wie auch der irdischen Edelgase zunächst erklären.

Die gemachten Voraussetzungen bedürfen noch der Überprüfung. So wurde angenommen, daß die Masse mit V/M eingeht. Hierfür ist auch eine M^2 -Abhängigkeit vorgeschlagen worden, die bis jetzt noch nicht bestätigt werden konnte¹⁹. Es bleibt ebenfalls zu untersuchen, ob dieselbe Massenabhängigkeit für alle Elemente die gleiche ist. Außerdem war vorausgesetzt, daß die Korngrößen keine sehr großen Unterschiede aufweisen. Das ist bei Meteoriten sicher nicht der Fall. Dieser Punkt scheint zunächst erhebliche Schwierigkeiten zu machen, da die Korngröße quadratisch eingeht. Bei extremem Entgasen werden die kleinen Körner jedoch völlig entleert und nur wenige große Körner enthalten noch die gefundenen Edelgase. Bei unterschiedlichen Diffusionskonstanten von einem Faktor 3,5 fanden wir oben einen Unterschied der restlichen Gaskonzentration um den Faktor 100. Nur die großen Körner enthalten somit noch das gefundene Gas, während in Körnern der halben Korngröße entsprechend $D/(a/2)^2 = 4 D/a^2$ wiederum nur der 100-ste Teil der noch vorhandenen Gaskonzentration enthalten ist. Bei so extremen Entgasungen werden die kleineren Korngrößen automatisch ausgeschaltet und nur die größeren Körner tragen zu dem Isotopie-Effekt bei. Dies bedeutet jedoch nur, daß alle ursprünglich vorhandenen Gasmengen noch um ein Mehrfaches größer waren.

Man ist verleitet, den Gedanken der massenabhängigen Diffusion auch auf das Xe auszudehnen. Es fällt nämlich auf, daß das irdische Xe gegenüber den Chondriten ebenfalls weniger häufig und auch an den leichten Isotopen verarmt ist. So haben schon KRUMMENACHER et al.¹⁸ auf einen massenabhängigen Fraktionierungsprozeß hingewiesen. Außerdem sollen die Xe^{134} - und Xe^{136} -Isotope in Meteoriten durch Spaltprodukte erhöht worden sein. Der Sprung zwischen den Kr- und Xe-Häufigkeiten könnte auch mit einer Isotopenverschiebung verknüpft sein.

Messungen, aus denen der Unterschied der Diffusionskonstanten zwischen Kr und Xe hervorgeinge, sind noch nicht bekannt. Nach KALBITZER²⁰ erfolgt in Alkalihalogeniden die Diffusion der Edelgase über Zwischengitterplätze und wird daher sehr we-

sentlich vom Gitterabstand bestimmt. Ein großer Unterschied in den Diffusionskonstanten wäre daher nicht unwahrscheinlich.

Die irdischen Edelgashäufigkeiten lassen sich dann allerdings nicht mehr durch eine einmalige Entgasung verstehen. Die Edelgase stammen dann entweder aus sehr unterschiedlichen Mineralien, oder die Entgasungen haben mehrfach bei verschiedenen Temperaturen stattgefunden. Nach dem Kondensationsprozeß von HOYLE soll kondensierte Materie vom Rande der Wolke ins Innere zurückfallen. Es ist denkbar, daß näher bei der Sonne die Entgasungen häufiger waren und daß in irdische Materie zusätzlich noch Materie mit stark entmischttem Xe von den ersten Entgasungen miteingebaut wurde. Ein anderer Teil, der später oder anderswo kondensierte, besaß die Edelgase in kosmischer Zusammensetzung und hat nur einen geringen Anteil zum gesamten Xe beigetragen.

Die chondritische Materie ist von mehrfachen stärkeren Entgasungen verschont geblieben. Das Xe hat darum noch die unveränderte Isotopenzusammensetzung und die leichten Isotope mit größerer Häufigkeit. Die von KRUMMENACHER et al. vermutete Massenfraktionierung könnte mit diesem Modell auch für Xe eine einfache Erklärung finden.

Im Zusammenhang mit den größeren Xe-Häufigkeiten in Chondriten muß noch ein weiteres Problem aufgeworfen werden. Die Xe-Häufigkeiten der verschiedenen Chondritenarten weisen zu anderen schweren Spurenelementen, wie Pb, Ta und Bi (REED, KIGOSHI und TURKEVICH²¹) und J und Te (GOLES und ANDERS²²) eine Beziehung auf. Diese Häufigkeiten nehmen alle von den gewöhnlichen Chondriten zu den Enstatit- und kohligen Chondriten hin zu. Aus diesem ähnlichen Verhalten möchte man vermuten, daß diese Unterschiede schon bei der Kondensation existierten. Da die Häufigkeiten bei den kohligen Chondriten am größten sind, sieht es so aus, als ob Adsorptionseffekte eine zusätzliche Rolle spielten. Es ist denkbar, daß bei tiefen Temperaturen das Adsorptionsvermögen von sauberer Oberflächen für die schweren Spurenelemente sehr viel größer ist. Dieser Effekt wird von der Temperatur und somit auch vom Ort der Kondensation abhängen. Bei Pesjanoe und Kapoeta war dieser Adsorptionseffekt sicher geringer.

²⁰ S. KALBITZER, Dissertation, Heidelberg 1961.

²¹ G. W. REED, K. KIGOSHI u. A. TURKEVICH, Geochim. Cosmochim. Acta **20**, 122 [1960].

²² G. G. GOLES u. E. ANDERS, Geochim. Cosmochim. Acta, im Druck.

Man muß sich aber auch die Frage stellen, ob nicht etwa die „interstellaren“ Teilchen noch Xe und andere Spurenelemente enthalten. Die Zahl der noch erhalten gebliebenen Teilchen wird mit zunehmendem Abstand von der Sonne anwachsen und könnte ebenfalls für die relativ große Xe-Häufigkeit verantwortlich sein.

Für die Hypothesen über die Entstehung der Chondrite zieht die oben vertretene Deutung einige Konsequenzen nach sich. Man muß also annehmen, daß sowohl die irdische wie auch chondritische Materie die leichten Uredelgase in viel größerer Konzentration und in nahezu kosmischem Verhältnis enthielt. Durch nachträgliches Erhitzen sind die leichteren Edelgase He und Ne bevorzugt abdiffundiert. Diese letzte Erwärmung hat jedoch nicht ausgereicht, um größere Mengen A zu verlieren. Nach der Edelgasaufnahme kann so die Temperatur 800 °C nicht überschritten haben. Wenn die Bildung der Minerale in den sogenannten Protokörpern²³ erfolgte, die bei den meisten Hypothesen angenommen werden, dann müßten die Uredelgase sekundär in die Materie eingeslossen worden sein. Es müßte sich deshalb bei den Protokörpern stets um abgeschlossene Systeme gehandelt haben, damit die Konzentration der schweren Edelgase innerhalb der engen Grenzen erhalten blieb. Ob solche Systeme allgemein existieren, wird allerdings bezweifelt, und man möchte eher einige Ausnahmen damit erklären.

In diesem Zusammenhang ist die schon früher und neuerdings von Wood²⁴ vertretene Hypothese von Interesse, wonach die Kondensation von Chondren und Mineralien direkt aus der Gasphase erfolgte. Die Anwesenheit von Uredelgasen wäre dabei nicht so rätselhaft und für einen solchen Kondensationsprozeß noch eher charakteristisch. Auch das Xe¹²⁹-Problem läßt sich mit diesem Modell leichter verstehen, was im folgenden Abschnitt behandelt wird.

2. Das Xe¹²⁹-Problem

Alle in dieser Arbeit untersuchten Chondrite besitzen neben Urargon auch die Uredelgase Kr und Xe. Außerdem haben sie alle einen Xe¹²⁹-Überschuß, der bis zu einem Faktor 6,4 das atmosphärische Xe¹²⁹/Xe¹³²-Verhältnis von 0,98 übertrifft. Je häufiger der Uredelgasgehalt ist, desto größer ist auch der Xe¹²⁹-Gehalt. Diese Tatsache führt zu dem Verdacht, daß das Xe¹²⁹ der heutigen Meteoritenprobe mit den anderen Uredelgasen gekoppelt ist.

Zu demselben Resultat führen die Entgasungsexperimente, wo die Schwankungen von Xe¹²⁹/Xe¹³² nur geringfügig sind und sehr wohl durch atmosphärische Verunreinigungen zu verstehen sind.

Andererseits ergab ein entsprechendes Entgasungs-experiment von JEFFERY und REYNOLDS²⁵, wo in dem Meteoriten Abee Xe¹²⁸ durch Neutronenbestrahlung aus J¹²⁷ erzeugt wurde, daß J und Xe¹²⁹ in diesem Meteoriten an ähnlichen Gitterplätzen eingebaut sind. Ob man daraus auch schließen kann, daß das J¹²⁹ „in situ“ zerfallen ist? Wie oben diskutiert wurde, zeigen die Häufigkeiten benachbarter Elemente ähnliche Beziehungen und vielleicht gilt dies auch für den Einbaumechanismus.

In diesem Zusammenhang muß aber auch auf die beschränkte Aussagemöglichkeit dieser Entgasungs-experimente hingewiesen werden. Eine starke Änderung des Xe¹²⁹/Xe¹³²-Verhältnisses bei verschiedenen Temperaturen würde zwar eine unterschiedliche Bindung dieser beiden Isotope beweisen. Der umgekehrte Schluß ist jedoch nicht möglich. Es könnte zum Beispiel sein, daß Meteorite längere Zeit erhöhte Temperaturen ausgesetzt waren und daß dabei durch Diffusion der Unterschied zwischen radioaktivem und Urhexenon verwischt wurde. Auch J und Xe könnten ähnliche Gitterplätze aufgesucht haben. Die mineralogische Zusammensetzung und insbesondere die Gitterabstände werden dabei eine große Rolle gespielt haben. Ein eindeutiger Beweis, daß das J¹²⁹ in der heutigen Meteoritenprobe zerfallen ist, liegt daher bis jetzt noch nicht vor. Man wird durch Mineraltrennung Proben unterschiedlichen J-Gehaltes herstellen müssen. Der Xe¹²⁹-Überschuß sollte dann dem J proportional sein. Arbeiten in dieser Richtung sind in Vorbereitung.

Die Entgasungsexperimente zeigen deutlich, daß das radiogene A⁴⁰ sehr viel leichter abdiffundiert als die Uredelgase und Xe¹²⁹, und aus diesem Grunde kann man sicher nicht die J-Xe-Zeitspanne in einfacher Weise zum K-A-Alter addieren. Diese Bedenken entstehen auch auf Grund von Tab. 1, wo mehrere Meteorite mit niedrigem K-A-Alter existieren, die alle auch Xe¹²⁹-Überschuß aufweisen.

²³ H. C. UREY, J. Geophys. Res. **64**, 1721 [1959].

²⁴ J. A. WOOD, Smithsonian Inst. Astrophys. Observ. Tech. Rep. Nr. 10 [1958].

²⁵ P. M. JEFFERY u. J. H. REYNOLDS, J. Geophys. Res. **66**, 3582 [1961].

Nach den Messungen von GOLES und ANDERS²² sind die J-Gehalte von gewöhnlichen Chondriten im Mittel ca. 40 ppb, von Enstatitochondriten ca. 150 und von kohligen Chondriten ca. 350 ppb. Außerdem fanden diese Autoren, daß sich in Chondriten das J bis zu 50% in wasserlöslichen Verbindungen befindet. Nach den Entgasungsexperimenten sollte sich das Xe¹²⁹ eher in Silikaten befinden. Es kann natürlich sein, daß das Xe¹²⁹ aus den wasserlöslichen Verbindungen bereits entwichen ist.

Wenn nun die Zeit des letzten Entgasens für alle Meteorite dieselbe gewesen wäre, könnte man verstehen, daß die Enstatitochondrite einen größeren Xe¹²⁹-Überschuß besitzen als die gewöhnlichen Chondrite. Die kohligen Chondrite sollten dann allerdings auch einen größeren Xe¹²⁹-Überschuß aufweisen. Ebenfalls merkwürdig ist zunächst, daß auch die beiden Achondrite keinen Xe¹²⁹-Überschuß haben. Falls der J-Gehalt nicht extrem niedrig ist, sollte der Xe¹²⁹-Gehalt ganz beträchtlich sein, da es sich hier um recht frühe Kondensationsprodukte handeln sollte.

Es scheint kein Zufall zu sein, daß die kohligen Chondrite, die beiden Achondrite und die Erde alle ein sehr ähnliches Xe¹²⁹/Xe¹³²-Verhältnis von ca. 1 besitzen. Bei einem sehr kleinen zeitlichen Unterschied in der Erstarrung dieser Materie würden sehr große Variationen dieses Verhältnisses zu erwarten sein. Man wird für all diese Materie daher annehmen müssen, daß deren Kondensation zu einem Zeitpunkt stattfand, wo kein radiogenes J¹²⁹ existierte. Diese Vermutung ist mit den Altersbestimmungen verträglich. Aus Tab. I sieht man, daß die K-A-Alter all

dieser Materie $<4,5 \cdot 10^9$ a sind. Obwohl diese Alter im allgemeinen nur Minimalwerte darstellen, muß man zumindest die K-A-Alter der heliumreichen Meteorite als zuverlässig ansehen⁹. Diese Meteorite besitzen ebenfalls niedrige Werte.

Andererseits besitzen mehrere Chondrite K-A-Alter bis zu $4,8 \cdot 10^9$ a, und es ist sicher nicht zufällig, daß diese Meteorite alle auch Xe¹²⁹ im Überschuß enthalten. Nach der Kondensation dieser Materie wird wohl noch radiogenes J vorhanden gewesen sein, das diese Xe¹²⁹-Erhöhung bewirkte. Der Kondensation folgten eine Reihe komplizierter Prozesse, die verständlich machen, daß der Unterschied zwischen radiogenem und Urxenon verwischt wurde.

Die Frage, wo das J¹²⁹ erzeugt wurde und wo es kondensierte, sei noch völlig offengelassen. Für die Herkunft wurde vorgeschlagen, daß es entweder noch von der allgemeinen Kernsynthese stammt oder aber, daß es in einem Zwischenstadium unseres Planetensystems durch energiereiche solare Protonen nachträglich erzeugt wurde¹⁶.

Herrn Prof. W. GENTNER möchte ich für sein stetes Interesse an dieser Arbeit herzlich danken. Herrn Dr. O. A. SCHAEFFER und Herrn Dr. S. KALBITZER schulde ich Dank für manche anregenden Diskussionen. Den Herren Prof. W. v. ENGELHARDT, Tübingen, Prof. C. FRONDEL, Cambridge, Mass., Dr. K. GOEBEL, CERN, Prof. F. HEIDE, Jena, Prof. W. J. HENDERSON, Washington, Prof. T. B. KOHMAN, Pittsburgh, Prof. E. L. KRINOV, Moskau, Prof. B. MASON, New York, Prof. ORCELL, Paris, und Dr. O. A. SCHAEFFER, Brookhaven, danke ich dafür, daß sie mir eine beträchtliche Anzahl Meteoritenproben zur Verfügung stellten.