

mögliche Korrekturen von etwa 1%¹⁹ identisch gleich 2. Im Verlauf der Halbwertszeiten der Spiegelkerne überlagern sich jedoch nach der oben angegebenen Beziehung die Einflüsse der jeweiligen Matrixelemente. Insbesondere ist die Abweichung⁵ des Ne¹⁹-Wertes auf dessen ungewöhnlich großes GAMOW–TELLER-Matrixelement zurückzuführen. Bei genauerer Kenntnis der theoretischen Matrixelemente würde die Darstellung $\log(M_{\text{theor}} \cdot T_{1/2})$ gegen $\log x$ eine unabhängige Information über den Verlauf der COULOMB-Energiedifferenzen auch für die Spiegelkerne liefern.

¹⁹ W. M. McDONALD, Phys. Rev. **110**, 1420 [1958].

Herrn Prof. Dr. B. STECH danke ich für die eingehende Diskussion der theoretischen Gesichtspunkte. Herrn Dr. U. SCHMIDT-ROHR danke ich für Unterstützung bei der Durchführung der Bestrahlungen am Zyklotron. Ihm und Herrn Dr. H. DANIEL danke ich für eine Reihe von Diskussionen experimenteller Probleme.

Herrn Prof. Dr. A. WALTHER, Institut für praktische Mathematik an der Technischen Hochschule Darmstadt, danke ich sehr dafür, daß er die Rechenmaschine IBM 650 für die Auswertung der Messungen zur Verfügung gestellt hat. Herrn Dipl.-Ing. H. G. LILL danke ich für die praktische Durchführung der Rechenoperationen.

Bei den Messungen wurden Geräte der Deutschen Forschungsgemeinschaft mitbenutzt.

Uredelgase in einigen Steinmeteoriten

Von J. ZÄHRINGER und W. GENTNER

Aus dem Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
(Z. Naturforsch. **15 a**, 600—602 [1960]; eingegangen am 16. Mai 1960)

In the two chondrites Kapoeta and Abee outstanding rare gas content have been found. From the amount and isotopic composition it is concluded that primordial rare gases have been included in these meteorites. Kapoeta contains all rare gases in excess, while Abee has mainly the heavier rare gases as primordial component. The Ne²⁰/Ne²²—and A³⁶/A³⁸—ratios show large deviations from atmospheric Neon and Argon. No such large deviations could be found for Krypton and Xenon.

Seit einiger Zeit bearbeiten wir zusammen mit einer Cern-Gruppe ein Programm, das die Bestimmung der radioaktiven Alter von Meteoriten und Tektiten und deren Bestrahlungszeiten durch die kosmische Strahlung umfaßt. Die Methode und einige Ergebnisse wurden bereits veröffentlicht^{1,2}.

Für die Analyse der Edelgase wurde ein empfindliches Massenspektrometer unter Anwendung der Ultrahochvakuum-Technik benutzt. Besondere Sorgfalt wurde auf geringe atmosphärische Verunreinigung verwendet, die ca. 10⁻⁸ cm³ in dem ungünstigsten Falle von A⁴⁰ beträgt. Die Analysen wurden mit 0,1 bis 1 g Meteoritenproben durchgeführt.

Im Verlaufe der Edelgas-Messungen an Meteoriten ergaben sich einige überraschende Ergebnisse, die eine ausführlichere Diskussion erfordern.

Bisher wurden die Edelgase in Meteoriten hauptsächlich als Zerfallsprodukt radioaktiver Kerne und als Spallationsprodukt der kosmischen Strahlen betrachtet. In einigen Steinmeteoriten fanden wir jedoch einen hohen Überschuß von Edelgasen, was sicher auf eine andere Weise erklärt werden muß.

Einer der charakteristischsten Meteoriten ist Kapoeta, bei dem der He⁴-Gehalt in einer Probe von 0,1 g um drei Größenordnungen höher ist als bei den meisten anderen Steinmeteoriten, die bis jetzt analysiert wurden. Tabelle 1 zeigt die Mengen und

die isotopische Zusammensetzung der Edelgase von 3 Steinmeteoriten. Zum Vergleich sind auch die Werte des Steinmeteoriten Nadiabondi angegeben, dessen Edelgase als Spallations- und radioaktive Zerfallsprodukte anzusehen sind. Das He⁴ in Kapoeta kann unmöglich als radiogen angesehen werden. Eine U-Analyse ergab etwa 10⁻⁸ g/g. Auch der Neon-gehalt ist um den Faktor 100 größer als in den üblichen Meteoriten. A⁴⁰ hingegen rührt vermutlich vom K⁴⁰-Zerfall her. Besonders auffallend sind die relativen Häufigkeiten dieser anomalen Edelgase, die den relativen kosmischen Häufigkeiten nach SUESS und UREY³ sehr ähnlich sind (siehe Tab. 1). Nach den Werten anderer Steinmeteorite kann man aus dem Ne²¹ Gehalt vermuten, daß sogar das He³ nur zu einem geringen Teil durch die kosmische Strahlung entstanden ist. Wir sind deshalb überzeugt, daß es sich hierbei um Gase handelt, die bei der Bildung des Meteoriten miteingeschlossen wurden.

GERLING und LEVSKIJ⁴ fanden eine ähnliche Zusammensetzung der Edelgase im Meteorit Pesyanoye wie wir in Kapoeta. Dieser Fall wurde damals als große Ausnahme angesehen. Nach unseren Erfah-

¹ W. GENTNER u. J. ZÄHRINGER, Z. Naturforsch. **15 a**, 93 [1960]

² K. GOEBEL u. P. SCHMIDLIN, Z. Naturforsch. **15 a**, 79 [1960].



$10^8 \text{ cm}^3/\text{g}$	Nadiabondi	Kapoeta	Abee	Kosmische Häufigkeit $S_1 = 1000$	Atmosphärische Häufigkeit $\text{Vol.-%} \cdot 10^4$
He ³	107	43	11	?	$7 \cdot 10^{-6}$
He ⁴	1740	137 000	2360	3 000 000	(5,2)
Ne ²⁰	23	2400	8,58	7740	16,3
Ne ²¹	22	6,9	2,4	26	0,047
Ne ²²	24	173	3,28	836	1,6
A ³⁶	2,9	107	25,2	126	31
A ³⁸	2,6	20,8	4,85	24	5,8
A ⁴⁰	5900	1050	5140	—	(8900)
Kr ⁸⁴	—	0,05	0,45	0,029	0,57
Xe ¹²⁹	—	0,036	0,23	0,001	0,02

Tab. 1. Der Edelgasgehalt der Steinmeteorite Nadiabondi, Kapoeta und Abee und zum Vergleich die kosmischen und irdischen Häufigkeiten.

rungen scheinen diese Meteoriten jedoch nicht so selten vorzukommen.

Solche Uredelgase wurden z. B. auch in dem Chondriten Abee festgestellt, jedoch in einer anderen Zusammensetzung als in Kapoeta. Abee hat eine geringere Menge Helium und Neon, enthält aber Argon, Krypton und Xenon. Diese Edelgas-Zusammensetzung gleicht eher dem Edelgasgehalt unserer Atmosphäre. In Tab. 1 ist deshalb zum Vergleich der Edelgasgehalt der irdischen Atmosphäre mit aufgeführt.

Ein ähnlicher Fall wie Abee scheint auch bei dem Meteoriten Murray und in weniger ausgeprägtem Maße bei Richardton vorzuliegen. Diese Meteoriten wurden von J. H. REYNOLDS im Zusammenhang mit dem radiogenen Xe¹²⁹ diskutiert^{5, 6}.

Von besonderem Interesse sind die Isotopenverhältnisse dieser Uredelgase. Wie oben erwähnt, ist auch das He³ als Urhelium anzusehen, wenn man annimmt, daß Ne²¹ im Urneon ähnlich wie im irdischen Neon vorkommt. Das Verhältnis von He⁴/He³ des Urhelium in Kapoeta ist daher 3200 oder etwas größer. Diese Zahl dürfte für die Theorien der Elementenentstehung von großer Bedeutung sein.

Die Isotopenzusammensetzung von Neon und Argon zeigt in beiden Meteoriten beachtliche Abweichungen gegenüber der Atmosphäre. Die Unterschiede sind ohne Zweifel außerhalb des experimentellen Fehlers von ca. 2%. Das Ne²⁰/Ne²² ist bei Kapoeta etwa 40% größer, hingegen bei Abee ungefähr wie bei Luftneon. Auch REYNOLDS⁵ findet in dem Meteoriten Murray etwa die Isotopenverhältnisse wie bei Luftneon. Murray und Abee sind sich

hierin sehr ähnlich. Auch die schweren Edelgase kommen in diesen beiden Meteoriten in denselben Mengenverhältnissen vor.

Das A³⁶/A³⁸-Verhältnis ist bei Kapoeta etwa 3% kleiner, hingegen bei Abee nach Korrektur des Spallation A³⁸ deutlich um 5% größer. Auch Murray scheint ein höheres A³⁶/A³⁸-Verhältnis zu haben.

Diese Ergebnisse berühren das alte ungelöste Problem bezüglich der Häufigkeit der Edelgase auf der Erde. SUESS⁷ verglich die irdischen Häufigkeiten der Edelgase mit den kosmischen und fand, daß sie alle mindestens um den Faktor 10⁷ kleiner sind. Für Neon und Argon beträgt dieser Faktor sogar 10¹¹ bzw. 10⁹. Dies veranlaßte SUESS zu der Vermutung, daß ursprünglich wegen der chemischen Inaktivität nur der 10⁷-te Teil aller Edelgase bei der Bildung unseres Planeten anwesend war und daß später die leichteren Edelgase bevorzugt abdiffundierten. Dieser Diffusionsvorgang läßt sich mathematisch erfassen. Man würde danach auch eine Isotopenverschiebung erwarten und in Tab. 2 sind die nach SUESS⁷ berechneten Ne²⁰/Ne²²- und A³⁶/A³⁸-Verhältnisse zum Vergleich mit meteoritischen Werten eingetragen.

Die Neon-Werte der Meteorite passen gut in dieses Bild, wenn man annimmt, daß das Neon in Kapoeta kosmische Zusammensetzung besitzt, während die Edelgase in Abee und Murray einem Separationsvorgang ähnlich dem irdischen unterworfen waren. Als Ursache hierfür kann man z. B. an verschieden starke Gravitationsfelder am Orte der Erstarrung der Meteorite denken. Auch massenabhängige Diffusionsmechanismen können im Laufe der Zeit eine Isotopentrennung bewirken.

Die A³⁶/A³⁸-Verhältnisse hingegen sind den SUESSschen Werten und den oben diskutierten Ne²⁰/Ne²²-Verhältnissen entgegengesetzt. Dies läßt vermuten, daß ein einziger Mechanismus die Häufigkeit dieser meteoritischen Edelgase nicht zu erklären vermag. Beim Argon spielt vielleicht die sekundäre Erzeugung von A³⁶ eine Rolle. In Anwesenheit von Cl³⁵ wäre n-Einfang im frühen Stadium nicht ganz auszuschließen. Um dies zu bestätigen bedarf es jedoch noch weiterer Untersuchungen. Altersbestimmungen an diesen Meteoriten sind z. Zt. in Arbeit.

Der Krypton- und Xenon-Gehalt und auch das Xe/Kr/A-Verhältnis sind in Abee wesentlich größer als in Kapoeta. In Abee sind offensichtlich die schweren Edelgase bevorzugt eingefangen worden. In

³ H. E. SUESS u. H. UREY, Rev. Mod. Phys. **28**, 53 [1956].

	Ne ²⁰ /Ne ²²	A ³⁶ /A ³⁸
Kosmische Zusammensetzung nach SUESS	14,5	6,1
Kapoeta	13,9	5,15
Atmosphärisch	9,8	5,32
Murray ⁵	9,4	5,4
Abee	9,3	5,6

Tab. 2. Die isotopischen Verhältnisse von Ne²⁰/Ne²² und A³⁶/A³⁸ der Meteoriten Kapoeta, Murray und Abee und das nach SUESS ⁷ berechnete kosmische und das atmosphärische Verhältnis.

beiden Fällen ist das Xe/Kr-Verhältnis größer als das von SUESS und UREY angegebene. Diese Uredelgase bieten vielleicht die Möglichkeit, genauere kosmische Häufigkeitsdaten auch für die Edelgase zu gewinnen.

Die Isotopenmessungen an Krypton und Xenon ergaben keine beträchtlichen Abweichungen gegenüber atmosphärischem Krypton und Xenon. Besondere Sorgfalt wurde für die Messung des Xe¹²⁹/Xe¹³²-Verhältnisses verwandt. Die ersten Messungen an dem Meteoriten Abee ergaben zwar ein Xe¹²⁹/Xe¹³²-Verhältnis von 2. Durch weiteres Reinigen mit Ca, Zr und Cu—Cu—O und Ausfrieren mit flüssiger Luft zeigte sich eindeutig, daß dies durch eine Störlinie auf Masse 129 zustande kam. Offenbar entstehen beim Aufschließen auch in diesem Massenbereich Verunreinigungen. Die weiteren Proben wurden mit besonderer Sorgfalt gereinigt und so zeigte keine der untersuchten Proben innerhalb eines Fehlers von 5% einen Xe¹²⁹ Überschuß. Bevor wir genaue Analysen der weniger häufigen Isotope vornehmen, wollen wir einige technische Verbesserungen anbringen.

Diese Untersuchungen schienen uns von besonderer Bedeutung, da REYNOLDS in dem Meteoriten Richardton ein Xe¹²⁹/Xe¹³²-Verhältnis von 1,5 entdeckte. Zur Deutung dieses Effektes nimmt REYNOLDS an, daß zur Zeit der Erstarrung dieses Meteoriten radioaktives I¹²⁹ vorhanden war, das mit einer Halbwertszeit von $1,72 \cdot 10^7$ a in Xe¹²⁹ zerfiel. Aus dem Xe¹²⁹-Überschuß und aus dem Jodgehalt errechnet er die Zeit, die zwischen der Bildung der Elemente und des Meteoriten verstrichen ist, und fand $0,35 \cdot 10^9$ a.

Wegen der weitreichenden Schlüsse, die aus dem Richardton Ergebnis gezogen wurden, schien es uns sehr wichtig, diesen Meteoriten in unser Meßprogramm aufzunehmen. Wir konnten zwar die von REYNOLDS berichteten Edelgasmengen innerhalb

15% (der zu erwartenden Übereinstimmung) bestätigen. Das Isotopenverhältnis Xe¹²⁹/Xe¹³² betrug nach unserer Analyse jedoch $1,0 \pm 0,05$ und zeigt nicht die von REYNOLDS angegebene Erhöhung. Auf Grund der oben erwähnten Beobachtung wurde das Xenon ca. 5 Stdn. über heißem Ca und Zr gereinigt und wir haben uns z. B. durch teilweises Ausfrieren vergewissert, daß keinerlei Störlinien vorhanden waren. Dieses Experiment wurde an drei Proben von je 1 g durchgeführt. Unser Ergebnis stand somit im Widerspruch mit dem Xe¹²⁹/Xe¹³²-Verhältnis von REYNOLDS.

Inzwischen hat uns Dr. REYNOLDS freundlicherweise eine Probe seines Richardton-Meteoriten gesandt, die er zu seiner Untersuchung benutzt hat. Diese Proben haben wir in der gleichen Weise wie früher aufgeschlossen und das enthaltene Xenon analysiert.

In diesen neuen Proben konnte im Gegensatz zu den früheren Messungen ein deutlicher Xe¹²⁹-Überschuß festgestellt werden. An einer Probe von 0,726 g wurde ein Xe¹²⁹/Xe¹³²-Verhältnis von 1,25 gemessen. Wir sind davon überzeugt, daß die von REYNOLDS gemachten Messungen richtig sind. Den Widerspruch in unseren eigenen Messungen können wir nur in der Verschiedenheit der Proben vermuten, die sicher von verschiedenen Stellen des 90 kg schweren Meteoriten stammen. Da wir außerdem relativ kleine Mengen von 1 g und weniger messen, tragen diese die Gefahr der Inhomogenität in sich. Wir sind ganz sicher, daß ein Memory-Effekt oder erhöhter Untergrund nicht dafür verantwortlich sein können.

Wir möchten ferner darauf hinweisen, daß die Uredelgase in Kapoeta nicht homogen verteilt sind. Grobe Untersuchungen lassen vermuten, daß nur gewisse Komponenten diese Uredelgase enthalten. Weitere Analysen von einzelnen Mineralien scheinen uns sehr wichtig zu sein. Es ist denkbar, daß zusammen mit Altersbestimmungen wertvolle Informationen über die Entstehung der Chondrite zu erhalten sind.

Wir möchten Herrn Dr. K. GOEBEL (CERN) und Herrn Dr. R. STOENNER (Brookhaven Nat. Lab.) für die Meteoritenproben danken und Herrn Dr. H. FECHTIG und Herrn KALBITZER für die Durchführung der Uran-Analyse.

⁴ E. K. GERLING u. L. K. LEVSKIJ, Dokl. Akad. Nauk. **110**, 750 [1956].

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

⁶ J. H. REYNOLDS, Phys. Rev. Letters **4**, 351 [1960].

⁷ H. E. SUESS, J. Geol. **57**, 600 [1949].