

Helium- und Neonisotope in Eisenmeteoriten*

Von H. HINTENBERGER und H. WÄNKE

Max-Planck-Institut für Chemie (Otto-Hahn-Institut), Mainz

(Z. Naturforschg. **19 a**, 210—218 [1964]; eingegangen am 25. November 1963)

The helium and neon content of 22 iron meteorites as well as the isotopic compositions of the rare gases have been measured. Definite relations were found between the amounts of the cosmic ray produced isotopes ^3He , ^4He and ^{21}Ne and also for their ratios. A rough correlation between the mass of the meteorite and the "depth" of the sample has been found; a correlation for the $^3\text{He}/^4\text{He}$ and the $^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$ ratios also exists. The following relationship holds for 19 of the 21 meteorites:

$$^3\text{He}/^4\text{He} = 0.166 + 174 \left(\sum \text{Ne} / \sum \text{He} \right) \pm 0.018.$$

The only exceptions are the meteorites Braunau and Colomera. Because these exceptions only show up in diagrams in which the values for ^3He are included, we assume that both these meteorites, as well as perhaps also the meteorite Morradal, have lost part of their ^3He . This might be explained by a diffusive loss of tritium during times of higher temperatures of the meteoritic bodies, probably due to a closer approach of these meteorites to the sun.

Bereits in den Jahren 1947 und 1948 haben unabhängig voneinander BAUER¹ und HUNTLEY² die Produktion von Helium durch die kosmische Strahlung in Eisenmeteoriten vorausgesagt. Nachdem von PANETH und Mitarbeitern³ die Existenz von Spallationshelium und von REASBECK und MAYNE⁴ die von Spallationsneon in Eisenmeteoriten auch experimentell gesichert worden war, haben sich eine Reihe von Untersuchungen mit der Bestimmung der Konzentra-

tion der Edelgasisotope^{5–19} und anderer stabiler^{20–26} und radioaktiver^{27, 28} Spallationsprodukte näher beschäftigt. Es können daraus Aufschlüsse über die Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit den Meteoriten^{29, 30, 17, 26}, über die Bestrahlungsalter^{27, 28} und über den Materialverlust der Meteorite beim Durchgang durch die Atmosphäre^{31, 29, 10, 12, 13, 17} oder durch eine eventuelle Erosion durch auftreffende Partikel im Weltraum^{32–34} erhalten werden. Auch

* Über einen Teil dieser Ergebnisse wurde bereits anlässlich der Conference on Fission and Spallation Phenomena and their Application to Cosmic Rays 1961 in Genf berichtet.

¹ C. A. BAUER, Phys. Rev. **72**, 354 [1947]; **74**, 225 [1948].

² H. E. HUNTLEY, Nature **161**, 356 [1948].

³ F. A. PANETH, P. REASBECK u. K. I. MAYNE, Geochim. Cosmochim. Acta **2**, 300 [1952]; Nature **172**, 200 [1953].

⁴ P. REASBECK u. K. I. MAYNE, Nature **176**, 733 [1955].

⁵ A. P. VINOGRADOV, I. K. ZADAROKUYI u. K. P. FLORENSKII, Geokhimiya **6**, 443 [1957].

⁶ H. WÄNKE u. H. HINTENBERGER, Z. Naturforschg. **13 a**, 895 [1958].

⁷ E. K. GERLING u. L. K. LEVSKII, Dokl. Akad. Nauk SSSR **123**, 420 [1958].

⁸ J. H. HOFFMAN u. A. O. NIER, Phys. Rev. **112**, 2112 [1958].

⁹ E. L. FIREMAN, Nature **181**, 1725 [1958].

¹⁰ E. L. FIREMAN, Planetary Space Sci. **1**, 66 [1959].

¹¹ O. A. SCHAEFFER u. D. E. FISHER, Nature **183**, 660 [1959].

¹² J. H. HOFFMAN u. A. O. NIER, Geochim. Cosmochim. Acta **17**, 32 [1959].

¹³ J. H. HOFFMAN u. A. O. NIER, J. Geophys. Res. **65**, 1063 [1960].

¹⁴ D. E. FISHER u. O. A. SCHAEFFER, Geochim. Cosmochim. Acta **20**, 5 [1960].

¹⁵ O. A. SCHAEFFER u. D. E. FISHER, Nature **186**, 1040 [1960].

¹⁶ O. A. SCHAEFFER u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta **19**, 94 [1960].

¹⁷ P. SIGNER u. A. O. NIER, J. Geophys. Res. **65**, 2947 [1960].

¹⁸ T. HAYAKAWA, H. HINTENBERGER u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg. **16 a**, 844 [1961].

¹⁹ P. SIGNER u. A. O. NIER, Researches on Meteorites (Editor C. B. MOORE), John Wiley & Sons, New York 1962, p. 7.

²⁰ H. WÄNKE, Z. Naturforschg. **13 a**, 645 [1958]; **15 a**, 953 [1960].

²¹ H. VOSHAGE u. H. HINTENBERGER, Z. Naturforschg. **14 a**, 194 [1959]; **16 a**, 1042 [1961].

²² H. VOSHAGE u. H. HINTENBERGER, Proc. Symp. Radioactive Dating, Athen 1962, Int. Atomic Energy Agency, Wien 1963, p. 367.

²³ W. GENTNER u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta **11**, 60 [1957].

²⁴ H. STAUFFER u. M. HONDA, J. Geophys. Res. **66**, 3584 [1961].

²⁵ H. WÄNKE, Z. Naturforschg. **13 a**, 645 [1958].

²⁶ H. WÄNKE, Z. Naturforschg. **15 a**, 953 [1960].

²⁷ E. ANDERS, Rev. Mod. Phys. **34**, 287 [1962].

²⁸ O. A. SCHAEFFER, Ann. Rev. Phys. Chem. **13**, 151 [1962].

²⁹ A. R. MARTIN, Geochim. Cosmochim. Acta **3**, 288 [1953].

³⁰ K. H. EBERT u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg. **12 a**, 766 [1957].

³¹ F. L. WHIPPLE, Rev. Mod. Phys. **15**, 246 [1943].

³² F. L. WHIPPLE u. E. L. FIREMAN, Nature **183**, 1315 [1958].

³³ E. L. FIREMAN u. J. DE FELICE, Geochim. Cosmochim. Acta **18**, 183 [1960].

³⁴ P. S. GOEL u. T. P. KOHMAN, Proc. Symp. Radioactive Dating, Athen 1962, p. 413.



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitalized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Schlüsse über die räumliche und zeitliche Konstanz der kosmischen Strahlung lassen sich aus diesen Beobachtungen ableiten³⁵⁻³⁷.

Das aus den Eisenmeteoriten extrahierte Helium ist praktisch vollständig durch die kosmische Strahlung gebildet worden und besteht zu etwa 25% aus dem Heliumisotop der Masse 3. Die Werte für das Verhältnis von $^3\text{He}/^4\text{He}$ aus den einzelnen Meteoritproben wichen noch vor wenigen Jahren von Laboratorium zu Laboratorium ziemlich stark voneinander ab. Bereits vor längerer Zeit konnten wir genaue Werte für die Isotopenverhältnisse des Heliums und des Neons aus einigen Eisenmeteoriten festlegen^{6, 18} und dabei zeigen, daß auch die Isotopenzusammensetzung des Neons den theoretischen Vorstellungen über die hochenergetischen Kernreaktionen, durch die Neon gebildet wird, entspricht. Die Häufigkeiten der Neonisotope 20, 21 und 22 ergaben sich im Mittel zu 32,2%, 33,5% und 34,3%.

Wir haben in den letzten Jahren die Edelgasmessungen an Eisenmeteoriten routinemäßig fortgesetzt, da wir die Resultate dieser Messungen im Zusammenhang mit anderen in Mainz durchgeführten Untersuchungen zur Berechnung des Strahlungsalters der Meteorite benötigen^{22, 37}. Ein Teil unserer Ergebnisse ist auch für sich allein von Interesse. Wegen des Wertes aller dieser Zahlen, auch für andere auf diesem Gebiet tätigen Forscher, wollen wir die bis jetzt vorliegenden Meßergebnisse hier mitteilen. Ähnliche Untersuchungen werden von uns laufend weitergeführt, und wir werden von Zeit zu Zeit hierüber berichten.

1. Meßmethoden und Meßgenauigkeit

Die Mengenbestimmung und die Gewinnung der Edelgasproben erfolgte in einer Apparatur zur Mikroanalyse von Edelgasen, die dem Prinzip nach der von CHACKETT und Mitarbeitern³⁸ angegebenen ähnlich war. Das Verfahren wurde in den vorangegangenen Arbeiten mehrfach beschrieben^{6, 18, 30}, so daß es sich erübrigt, hier darauf näher einzugehen. Der Fehler der Messungen des Edelgasgehaltes beträgt ca. 3%; bei den sehr edelgasarmen Meteoriten ($\text{Ne} \leq 2 \cdot 10^{-8} \text{ g/g}$) steigt er jedoch für das Neon auf 5 bis 10% an. Die Isotopenhäufigkeiten wurden mit einem 60°-Ganzmetallmassenspektrometer im statischen Betrieb gemessen. Die Elektronenstoßionenquelle wurde ohne Hilfsmagnet verwen-

det, der Ionennachweis erfolgte mit einem Schwingkondensator-Meßverstärker, der die Ionenströme entweder an einen beweglichen Auffänger direkt oder über einen als Vorverstärker benutzten Kupfer-Beryllium-Multiplier anzeigte. Mit Hilfe von künstlich hergestellten $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischungen wurde das Instrument auf Massendiskrimination geeicht. Die Absolutgenauigkeiten der gemessenen Isotopenhäufigkeiten liegen zwischen 3 und 5%; bei Proben unter $2 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3$ bei 10%.

Die bei unseren Verfahren auftretenden Blindwerte liegen in der Größenordnung $3 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3$ für das Helium und $2 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3$ für das Neon. Bei Einwaage von ca. 5 g sind sie für das Helium so gut wie immer vernachlässigbar, und auch beim Neon übersteigt der Apparaturblindwert nur in seltenen Fällen einen Wert von einigen Prozent des meteoritischen Neons.

2. Meßergebnisse

Wir haben die Konzentrationen der Helium- und Neonisotope an Proben aus 22 verschiedenen Eisenmeteoriten untersucht. In Tab. 1 sind die untersuch-

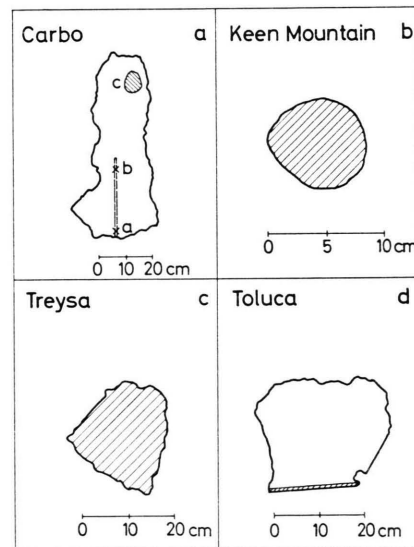


Abb. 1. Die Positionen der untersuchten Proben in den Meteoriten oder in den zur Verfügung stehenden Meteoritstücken sind durch Schraffierung gekennzeichnet. Bei Keen Mountain und Treysa wurden die Proben durch Abfräsen der uns zur Verfügung stehenden Platten gewonnen. Carbo a und b sind Späne aus einem Bohrloch (a aus ca. 2 cm und b aus ca. 26 cm Tiefe). Carbo c stammt aus einem Stück nahe der Oberfläche des Meteoriten. Die zur Verfügung stehenden Platten von Treysa und Toluca lagen in den entsprechenden Meteoriten zwischen 0 und 5 cm von der Oberfläche entfernt.

³⁵ R. DAVIS, R. W. STOENNER u. O. A. SCHAEFFER, Proc. Symp. Radioactive Dating, Athen 1962, p. 355.

³⁶ H. VOSHAGE, Z. Naturforsch. 17 a, 422 [1962].

³⁷ E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Proc. Symp. Radioactive Dating, Athen 1962, p. 381.

³⁸ K. F. CHACKETT, P. REASBECK u. E. WILSON, Geochim. Cosmochim. Acta 3, 261 [1953].

Nr.	Meteorit	Jahr des Falls oder Fundes	Klasse	Gesamt- gewicht in kg	Herkunft
1	Arispe (Pa 5/3)	Fund 1896	Ogg	185	American Meteorite Laboratory (9.61)
2	Aroos (90/1)	Fall 1959	Og	150	Dr. KRINOV, Moskau über Prof. SUSS
3	Bendego (Pa 12/1)	Fund 1784	Og	5360	Universidade do Brasil Bahia-Brasil
4	Bohumilitz (Pa 16/1)	Fund 1829	Og	63	Gregory, Bottley u. Co., London
5	Braunau	Fall 1847	H	39	Prof. v. ENGELHARD, Mineral. Institut d. Universität Tübingen
6	Bristol (9/1)	Fund 1937	Off	20	American Meteorite Laboratory (216.29)
7	Carbo a Bohrloch	Fund 1923	Om	454	Dr. FRONDEL, Harvard University U. S. A.
8	Charlotte	Fall 1835	Of	4.3	Prof. v. ENGELHARDT, Mineral. Institut d. Universität Tübingen
9	Clark County (17/1)	Fund vor 1937	Om	11.3	H. H. NININGER, Arizona
10	Colomera (Pa 33/1)	Fund 1912	P	134	Prof. J. DORRONSORO, Granada, Spanien
11	Dayton (Pa 37/1)	Fund 1892	Db	26.3	Dr. HENDERSON, U. S. National Museum, Washington
12	Keen Mountain (Pa 51/1)	Fund 1950	H	6.7	Dr. HENDERSON, U. S. National Museum, Washington
13	Morradal (90/1)	Fund 1892	Db	2,8	Dr. NEUMANN, Mineralogisk-Geologisk Museum, Oslo University
14	N'Goureyrna	Fall 1900	Obz	37,5	Prof. v. ENGELHARDT, Mineral. Institut d. Universität Tübingen
15	Odessa (Pa 78/2)	Fund vor 1922	Og	gross	Rheinisches Mineralien-Kontor Dr. F. KRANTZ, Bonn
16	Otumpa	Fund 1576	Ha	gross	aus Sammlung PANETH, Herkunft unbekannt
17	Sao Juliao de Moreira (Pa 88/1)	Fund vor 1883	Ogg	162	Gregory, Bottley and Co., London
18	Sikhote Alin (Pa 94/1)	Fall 1947	Ogg	gross	Dr. KRINOV, Moskau, über Prof. HERR
19	Smithville (Pa 96/1)	Fund 1840	Ogg	60	Gregory, Bottley and Co., London
20	Thunda (Pa 101)	Fund 1881	Om	62	Gregory, Bottley and Co., London
21	Toluca (Pa 103/13)	Fund vor 1776	Om	gross	Dr. HENDERSON, U. S. National Museum, Washington
22	Treysa (89/1)	Fall 1926	Om	63	Prof. WINKLER, Mineral. Institut der Universität Marburg

Tab. 1. Namen, Falldaten, Klassen und Massen der untersuchten Meteorite sowie Herkunft der Proben. Die in Klammern angeführten Zahlen entsprechen den Karteinummern in den Sammlungen von F. A. PANETH (Pa) und der Sammlung des Max-Planck-Instituts für Chemie, Mainz.

ten Meteorite zusammengestellt, mit Angaben über die Klasse und die Masse des Meteoriten, die Falldaten und die Herkunft der Proben. Soweit Daten über die Lage der untersuchten Probe im Meteoriten erhalten werden konnten, sind sie in Abb. 1 a – d dargestellt.

In den Tab. 2 und 3 sind die erhaltenen Meßergebnisse und die daraus abgeleiteten Werte für die Konzentrationen der Edelgase He und Ne und ihrer Isotope ^3He , ^4He und ^{21}Ne , sowie über die Häufigkeitsverhältnisse zusammengestellt.

3. Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren

Beim Vergleich unserer Meßergebnisse mit denen anderer Autoren sollte man berücksichtigen, daß unsere Proben durch ein chemisches Lösungsverfahren aufgeschlossen werden, bei dem die reine Metallphase der Meteorite quantitativ in Lösung geht, viele der in den Meteoriten vorhandenen Einschlüsse aber ungelöst bleiben. Gerade jetzt sind wir dabei, unser Verfahren noch weiter zu vervollkommen, so

Nr.	Meteorit	He 10 ⁻⁸ cm ³ /g	Ne 10 ⁻⁸ cm ³ /g	³ He ⁴ He	Meßwerte %			Luftneon zur Korrektur in %	korrigierte Werte in %			³ He 10 ⁻⁸ cm ³ /g	⁴ He 10 ⁻⁸ cm ³ /g	²¹ Ne 10 ⁻⁸ cm ³ /g
					20	21	22		20	21	22			
1	Arispe	947	5,97	0,261	32,2	32,5	34,3	2,6	31,6	33,4	35,0	196	751	1,99
2a	Aroos	3040	22,6	0,276	32,7	32,8	34,5	1,2	31,0	33,2	34,8		2380	7,51
2b	Aroos	3090	21,2	0,275	31,9	33,3	34,8	0,4	31,6	33,4	35,0	668	2420	7,09
	Mittelwert	3065	21,9	0,276								663	2400	7,30
3	Bendego	733	4,47	0,250	34,2	31,7	34,1	3,7	32,0	32,9	35,1	147	585	1,47
4	Bohumilitz	754	6,72	0,288	31,7	32,9	35,4	2,0	30,5	33,7	35,8	165	589	2,24
5a	Braunau	34	0,45	0,103	59,0	17,8	23,2	42	35,9	30,5	33,6	3,20	30,8	0,137
5b	Braunau	38	0,40	0,103	52,5	21,5	26,0	34	32,8	32,6	34,6	3,45	34,5	0,131
	Mittelwert	36	0,43									3,33	32,7	0,134
6a	Bristol	1600	13,6	0,297	32,8	32,8	34,4	1,9	31,7	33,4	34,9	367	1230	4,54
6b	Bristol	1650	15,0	0,299	32,2	33,3	34,6	1,4	31,3	33,7	35,0	382	1270	5,05
	Mittelwert	1625	14,3	0,298								375	1250	4,80
7a	Carbo (außen)	2120	12,9	0,245	32,7	33,1	34,2	0,7	32,3	33,3	34,4	417	1700	4,30
7b	Carbo (innen)	1690	9,60	0,228	—	—	—	—	—	—	—	314	1380	3,20
7c	Carbo	2070	12,3	0,256	31,9	33,3	34,8	1,1	31,2	33,7	35,1	422	1650	4,10
8	Charlotte	1560	15,1	0,329	32,3	33,2	34,5	2,3	31,0	34,0	35,0	386	1170	5,14
9	Clark County	4920	39,3	0,293	31,6	33,3	35,1	0,8	31,1	33,6	35,3	1110	3810	13,2
10	Colomera	495	3,79	0,214	33,3	32,2	34,5	4,6	30,6	33,8	35,6	87,2	408	1,28
11	Dayton	620	4,75	0,275	32,7	32,7	34,6	3,0	30,9	33,7	35,4	134	487	1,60
12	Keen Mountain	964	7,40	0,294	32,5	33,0	34,5	2,0	31,3	33,7	35,0	219	745	2,49
13	Morradal	794	6,67	0,280	33,3	32,6	34,1	4,1	30,9	34,0	35,1	174	620	2,30
14	N'Goureyima	1310	12,2	0,297	33,4	32,5	34,1	1,7	32,1	33,0	34,9	298	1010	4,03
15a	Odessa	157	1,29	0,289	37,2	30,4	32,4	9,6	31,5	33,6	34,9	35,3	122	0,43
15b	Odessa	153	1,40	0,287	38,5	29,8	31,7	9,1	33,2	32,8	34,0	34,1	119	0,46
	Mittelwert	155	1,35	0,288								34,7	121	0,45
16	Otumpa	0,14	—	0,20 *	—	—	—	—	—	—	—	0,024	0,12	—
17	Sao Juliao de Moreira	110	0,60	0,242	35	30	35	15,5	25	35	40	21,5	88,5	0,21
18a	Sikhote Alin	193	1,31	0,253	37,5	30,1	32,4	7,8	33,0	32,6	34,4	39,0	154	0,427
18b	Sikhote Alin	199	1,30	0,253	35,0	31,4	33,6	6,3	31,3	33,5	35,2	40,2	159	0,435
	Mittelwert	196	1,31	0,253								39,6	157	0,431
19	Smithville	189	1,04	0,242	36,9	30,2	32,9	9,4	31,3	33,3	35,4	36,8	152	0,346
20	Thunda	2710	18,7	0,268	32,6	33,2	35,2	2,0	31,5	33,9	34,6	574	2140	6,33
21	Toluca	1960	13,0	0,277	31,9	33,3	34,8	1,6	31,0	33,8	35,2	423	1530	4,40
22a	Treysa	2480	22,4	0,307	32,4	33,4	34,2	1,4	31,5	33,9	34,6	584	1900	7,60
22b	Treysa	2510	21,8	0,296	32,6	33,2	34,2	1,2	31,9	33,6	34,5	574	1940	7,34
	Mittelwert	2500	22,1	0,302								579	1920	7,47

Tab. 2. Meßwerte, Blindwerte und korrigierte Werte der Mengen und der Isotopenhäufigkeitsverhältnisse. * Wegen des geringen Edelgasgehaltes des Meteoriten Otumpa mußte in diesem Fall der Heliumblindwert im Verhältnis ³He/⁴He berücksichtigt werden. Der ursprüngliche Meßwert betrug ³He/⁴He = 0,09.

Nr.	Meteorit	Klasse	Masse in kg	ΣHe 10^{-8} cm^3/g	ΣNe 10^{-8} cm^3/g	$\frac{\Sigma \text{Ne}}{\Sigma \text{He}}$ $\times 10^3$	^3He 10^{-8} cm^3/g	^4He 10^{-8} cm^3/g	^{21}Ne 10^{-8} cm^3/g	^3He ^4He	^4He ^{21}Ne
1	Arispe	Ogg	185	947	5,97	6,30	196	751	1,99	0,261	377
2	Aroos	Og	150	3065	21,9	7,14	663	2400	7,30	0,276	329
3	Bendego	Og	5360	733	4,47	6,10	147	585	1,47	0,250	398
4	Bohumilitz	Og	63	754	6,72	8,91	165	589	2,24	0,288	262
5	Braunau	H	39	36	0,43	11,9	3,33	32,7	0,134	0,103	244
6	Bristol	Off	93	1625	14,3	8,81	375	1250	4,80	0,298	260
7a	Carbo (außen)	Om	454	2120	12,9	6,08	417	1700	4,30	0,245	395
7b	Carbo (innen)			1690	9,6	5,68	314	1380	3,20	0,228	432
7c	Carbo			2070	12,3	5,94	422	1650	4,10	0,256	402
8	Charlotte	Of	4,3	1560	15,1	9,68	386	1170	5,14	0,329	228
9	Clark County	Om	11,3	4920	39,3	7,99	1110	3810	13,2	0,293	289
10	Colomera	P	134	495	3,79	7,66	87,2	408	1,28	0,214	319
11	Dayton	Db	26,3	620	4,75	7,66	134	487	1,60	0,275	304
12	Keen Mountain	H	6,7	964	7,40	7,68	219	745	2,49	0,294	299
13	Morradal	Db	2,8	794	6,67	8,40	174	620	2,30	0,280	270
14	N'Goureyma	Obz	37,5	1310	12,2	9,32	298	1010	4,03	0,297	250
15	Odessa	Og	groß	155	1,35	8,72	34,7	121	0,45	0,288	269
16	Otumpa	Ha	groß	0,14	—	—	0,024	0,12	—	0,20	—
17	Sao Juliao de Moreira	Ogg	162	110	0,60	5,45	21,5	88,5	0,21	0,242	420
18	Sikhote Alin	Ogg	groß	196	1,31	6,69	39,6	157	0,431	0,253	364
19	Smithville	Og	60	189	1,04	5,51	36,8	152	0,346	0,242	439
20	Thunda	Om	62	2710	18,7	6,90	574	2140	6,33	0,268	339
21	Toluca	Om	groß	1960	13,0	6,64	423	1530	4,40	0,277	348
22	Treysa	Om	63	2500	22,1	8,84	579	1920	7,47	0,302	257

Tab. 3. Konzentrationen und Häufigkeitsverhältnisse der Edelgase und ihrer Isotope in den verschiedenen Meteoriten.

daß dann wirklich so gut wie alle Einschlüsse unangegriffen bleiben. In allen anderen mit ähnlichen Messungen beschäftigten Laboratorien erfolgt die Extraktion der Edelgase durch Schmelzen bzw. Verdampfen der Proben. Bei diesen Verfahren werden natürlich auch die in eventuellen Einschlüssen sitzenden Edelgase mit ausgetrieben. Diese Einschlüsse besitzen eine ganz andere chemische Zusammensetzung, d. h. sie stellen ein vollständig anderes Targetmaterial dar, so daß Verschiebungen in den Edelgasgehalten nicht auszuschließen sind. Es kam uns jedoch gerade darauf an, durch möglichst exakte Messungen an genau definiertem Material, wie es das reine Nickeleisen der Eisenmeteorite darstellt, die Konzentrationen der einzelnen Edelgasisotope festzustellen, um aus den Variationen der Verhältnisse dieser Isotope weitere Schlüsse ziehen zu können.

Ein Vergleich unserer Messungen mit denen anderer Autoren ist auch deshalb nicht ohne weiteres möglich, weil, wie bereits PANETH, REASBECK und MAYNE³ zeigten, die durch die Höhenstrahlung erzeugten Edelgase eine starke Tiefenabhängigkeit aufweisen. Die Konzentration dieser Edelgase nimmt, wie man es natürlich zu erwarten hat, mit zunehmendem

dem Abstand von der Oberfläche des Meteoriten ab. Seit einigen Jahren werden vor allem auch im Institut von Professor NIER in Minneapolis, USA, ebensolche präzise Edelgasmessungen an Eisenmeteoriten durchgeführt^{17, 19}.

Für die 10 in Tab. 4 zusammengestellten Meteorite liegen bereits Messungen von anderen Autoren vor. Für kleine Meteorite und in den Fällen, in welchen unsere Proben und die anderer Autoren aus den gleichen Stücken stammen, ist die Übereinstimmung der Meßergebnisse, besonders für ^3He und ^4He , sehr gut. Auch die Übereinstimmung der ^{21}Ne -Werte muß noch als sehr gut angesehen werden, wenn man berücksichtigt, daß die Tiefenabhängigkeit bei Neon besonders groß und der Neongehalt besonders empfindlich auf Silikateinschlüsse ist. Außerdem ist die Meßgenauigkeit wegen der geringen Größe der Proben für Neon geringer als für Helium. Bei den großen Meteoriten treten zwischen unseren Meßergebnissen und denen der anderen Autoren starke Abweichungen auf, wenn nicht benachbarte Proben gemessen wurden. Für Sikhote Alin und Treysa hatten SIGNER und NIER die gleichen Proben wie wir. Besonders bei Toluca treten zwischen unseren Ergebnissen und den Resultaten von SIGNER und NIER sehr

Nr. in Tab. 2+3		Meteorit	Masse in kg	$\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}}$	$\frac{^{21}\text{Ne}}{^{20}\text{Ne}}$	$\frac{^{22}\text{Ne}}{^{21}\text{Ne}}$	^3He	^4He	^{21}Ne	Autor
a	12	Keen Mountain	6,7	0,294	1,077	1,040	219	745	2,49	1
				0,277	0,980	1,082	210	760	2,95	2
b	9	Clark County	11,3	0,289	1,080	1,052	1110	3810	13,2	1
				0,286	0,948	1,043	1095	3820	15,2	2
				0,328			1080	3295	13,5	5
c	22	Treysa	63	0,302	1,065	1,025	579	1940	7,34	1
							580		6,5	4
				0,321			526	1680		5
d	2	Aroos	150	0,276	1,023	1,049	663	2400	7,30	1
				0,258	0,960	1,043	655	2540	8,15	2
				0,296			665	2250	8,4	5
e	1	Arispe	185	0,261	1,057	1,047	196	751	1,99	1
				0,29			270			3
f ₁	7a	Carbo (Zentrum)	454	0,228			314	1380	3,20	1
				0,232	0,855	1,05	280	1220	2,8	2
f ₂	7b	Carbo (Oberfläche)		0,245	1,029	1,035	417	1700	4,30	1
				0,241	0,920	1,045	407	1685	4,42	2
g	15	Odessa	groß	0,288	1,036	1,040	34,7	121	0,45	1
				0,249	0,636	1,093	103	415	1,16	2
				0,31	0,9	1,1	220	710	2,3	3
h	16	Otumpa	groß	0,20			0,024	0,12		1
							< 1	≤ 4	≤ 0,01	2
i	18	Sikhote Alin	groß	0,253	1,030	1,058	39,6	157	0,43	1
				0,231	0,695	1,085	38	165	0,40	2
				0,27			130	481	1,5	3
k	21	Toluca	groß	0,277	1,09	1,041	423	1530	4,40	1
				0,227	0,251	1,30	28,5	119	0,25	2
				0,34			100	295	0,8	3

Tab. 4. Vergleich der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit den Ergebnissen anderer Autoren. 1=vorliegende Arbeit; 2=SIGNER und NIER¹⁹; 3=SCHAEFFER, ZÄHRINGER^{16, 39}; 4=SIGNER, mündliche Mitteilung an STAUFFER und HONDA⁴⁰; 5=mündliche Mitteilung von SCHAEFFER.

starke Unterschiede zutage, die offensichtlich durch die Tatsache verursacht wurden, daß unsere Probe aus der Nähe der Oberfläche und die Probe von SIGNER und NIER aus dem Inneren des Meteoriten stammt.

Unsere Meßwerte und erst recht die korrigierten Werte liegen für ^{22}Ne stets höher als für ^{21}Ne und für ^{21}Ne wiederum höher als für ^{20}Ne . Bei den anderen Autoren wird in allen Fällen ^{20}Ne mit größerer Häufigkeit angegeben als ^{21}Ne . Das wird sicherlich durch Verunreinigungen mit geringen Mengen Luftneons verursacht, die in unseren Messungen weitgehend vermieden wurden.

4. Diskussion der Meßergebnisse

Die größte Edelgasmenge hat unter den von uns untersuchten Meteoriten Clark County mit $49 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ He}$ und $39 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ Ne}$ pro Gramm Eisen. Das höchste $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis weist der Meteorit Charlotte mit 0,329 auf. Die niedrigsten $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Ver-

hältnisse zeigen die Meteorite Braunau, Colomera und Otumpa mit 0,103, 0,214 und 0,2. Davon wird in einem späteren Teil der Arbeit noch ausführlich die Rede sein.

Das Verhältnis der Häufigkeiten der Neonisotope ist innerhalb der Fehlergrenzen für alle Meteorite gleich und beträgt $^{20}\text{Ne} : ^{21}\text{Ne} : ^{22}\text{Ne} = 1 : 1,07 : 1,11$. Läßt man Proben, bei welchen die Korrektur an Luftneon mehr als 3% beträgt, unberücksichtigt, so liegen die relativen Häufigkeiten der Neonisotope für alle untersuchten Proben innerhalb der Intervalle $(31,4 \pm 0,9)\%$ für ^{20}Ne , $(33,6 \pm 0,6)\%$ für ^{21}Ne und $(35,0 \pm 0,8)\%$ für ^{22}Ne .

Wie schon vor längerer Zeit von EBERT und WÄNKE³⁰ ausgeführt, entsteht das Neon in Eisenmeteoriten fast ausschließlich durch die hochenergetischen Primärteilchen, während beim Helium auch die niederenergetischen Sekundärteilchen einen Beitrag liefern. Daher zeigt das $(\Sigma \text{Ne}/\Sigma \text{He})$ -Verhältnis eine starke Tiefenabhängigkeit. Das $(^3\text{He}/^4\text{He})$ -Verhältnis ist ebenso energieabhängig und für Teil-

³⁹ O. A. SCHAEFFER, Physics Today **13**, 18 [1960].

⁴⁰ H. STAUFFER u. M. HONDA, J. Geophys. Res. **67**, 3503 [1962].

chen großer Energie höher als für Teilchen geringerer Energie. Ein hohes ($\Sigma \text{Ne}/\Sigma \text{He}$)-Verhältnis entspricht also auch einem hohen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis; das kommt besonders deutlich in Abb. 2, in welcher $^3\text{He}/^4\text{He}$ als Funktion von $\Sigma \text{Ne}/\Sigma \text{He}$ aufgetragen ist, zum Vorschein. Die Daten von 19 der 21 gemessenen Meteorite, für die He und Ne gemessen wurde, genügen der folgenden Beziehung:

$$\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}} = 0,166 + 174 \frac{\Sigma \text{Ne}}{\Sigma \text{He}} \pm 0,018.$$

In den Gegenden unseres Planetensystems, in welchen sich die Meteorite den größten Teil ihres Lebens aufhalten, liegt offenkundig der Schwerpunkt der Energieverteilung der Primärkomponente im Durchschnitt bei größeren Energien als der Schwerpunkt der Primär- und Sekundärkomponente im Innern eines Meteoriten (wegen der stärkeren Absorptionsverluste des weichen Teils der Primärstrahlung ist das nicht selbstverständlich). Dies folgt aus der Tatsache, daß besonders kleine Meteorite, wie z. B. Charlotte, ein sehr hohes ($\Sigma \text{Ne}/\Sigma \text{He}$)-Verhältnis und damit auch ein sehr hohes $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis zeigen. Das ($\Sigma \text{Ne}/\Sigma \text{He}$)-Verhältnis nimmt mit der Masse der Meteoriten ab. Ebenso zeigt eine Probe eines Meteoriten aus größerer Tiefe ein niedrigeres ($\Sigma \text{Ne}/\Sigma \text{He}$)-Verhältnis, als eine Probe, die näher zur Oberfläche liegt. Das gleiche gilt auch für das ($^3\text{He}/^4\text{He}$)-Verhältnis. Die stärkste Tiefen- bzw. Größenabhängigkeit zeigt das Verhältnis ($^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$) (siehe Abb. 3).

Aus dieser Abhängigkeit versuchten schon verschiedene Forscher Abschätzungen über die Produktionsrate dieser Edelgase zu machen, um so das Strahlungsalter der untersuchten Meteorite zu berechnen^{15, 17}. Messungen von Strahlungsaltern werden aber in unserem Laboratorium nach anderen, direkteren Methoden ausgeführt, so daß wir hier auf die Möglichkeit von Abschätzungen aus den Edelgasdaten verzichten^{22, 37}.

Für die Häufigkeitsverhältnisse der Neonisotope konnten wir innerhalb der erreichten Meßgenauigkeit keinen Tiefen- bzw. Größeneffekt feststellen.

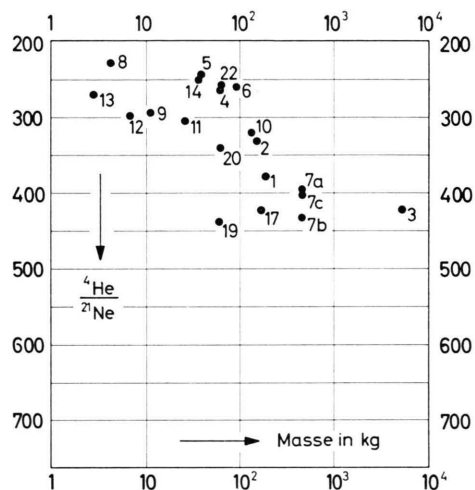


Abb. 3. $^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$ als Funktion der Masse der Meteorite. Große Meteorite mit einer vermutlichen Masse von mehr als 10^4 kg wurden nicht mehr in das Diagramm aufgenommen.

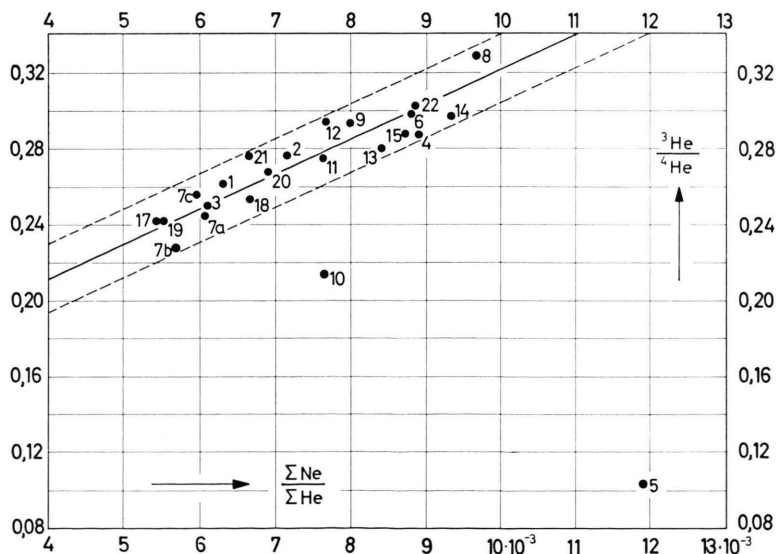


Abb. 2.

$^3\text{He}/^4\text{He}$ als Funktion von $\Sigma \text{Ne}/\Sigma \text{He}$. 19 oder 21 Meteorite, für welche sowohl Helium als auch Neon gemessen werden konnte, genügen der durch die Gerade angedeuteten Beziehung:

$$\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}} = 0,166 + 174 \left(\frac{\Sigma \text{Ne}}{\Sigma \text{He}} \right) \pm 0,018.$$

(Im Meteoriten Otumpa konnte kein Neon nachgewiesen werden.)

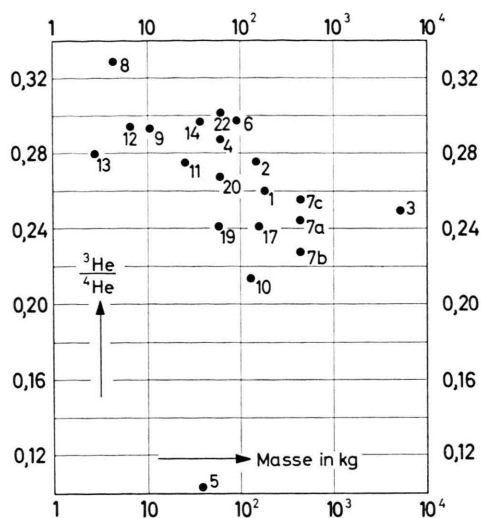


Abb. 4. $^3\text{He}/^4\text{He}$ als Funktion der Masse der Meteorite. Große Meteorite mit einer vermutlichen Masse von mehr als 10^4 kg wurden nicht mehr in das Diagramm aufgenommen.

Wie aus Abb. 3 und 4 ersichtlich, besteht eine, wenn auch nur sehr grobe Beziehung zwischen dem $^3\text{He}/^4\text{He}$ - bzw. dem $^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis und der Gesamtmasse des Meteoriten. Bei Meteoriten mit einer Masse größer als 100 kg sind die Verhältnisse der Edelgasisotope natürlich je nach der Lage der Probe (Abstand von der Oberfläche) verschieden. Dies geht auch deutlich aus der Verschiedenheit der Meßwerte für Carbo „außen“ und Carbo „innen“ hervor (Punkte 7a und 7b in Abb. 3 und 4). Die Streuungen der Punkte in Abb. 3 sind zum Teil einfach dadurch erklärbar, daß die aufgefundene Masse nur einen kleinen Teil der Gesamtmasse des Meteoriten darstellt. Dies gilt ganz sicher für die Punkte 17 und 19 in den Abb. 3 und 4. Die zugehörigen Meteorite Sao Juliao de Moreira und Smithville hatten sicherlich wesentlich größere Gesamtmassen als es dem aufgefundenen Material entspricht. Die ^{36}Cl -Zerfallsraten³⁷ von 1,84 dpm/kg für Sao Juliao de Moreira und 2,85 dpm/kg für Smithville scheinen zu beweisen, daß es sich tatsächlich jeweils um Proben aus dem Innern sehr großer Meteorite handelt (ca. 10^4 kg).

Von besonderem Interesse erscheint der Hexaedrit Braunau. Hexaedrite zeigen im allgemeinen

ein geringeres Strahlungsalter als Oktaedrite und ähneln hinsichtlich des Strahlungsalters in ihrer Gesamtheit beinahe mehr den Steinmeteoriten als den übrigen Eisenmeteoriten. Die Oktaedrite, die die häufigste Gruppe der Eisenmeteorite darstellen, zeigen gegenüber den Steinmeteoriten nicht nur ein um mehr als eine Größenordnung höheres Strahlungsalter, sondern es scheint auch, daß ein großer Teil der Eisenmeteorite ein einheitliches Strahlungsalter besitzt.

Die Steinmeteorite variieren hinsichtlich des Strahlungsalters ebenso stark wie die Hexaedrite. Wie aus anderen Messungen von VILČEK und WÄNKE³⁷ über den ^{39}Ar - bzw. ^{36}Cl -Gehalt des Meteoriten Braunau hervorgeht, ist das Strahlungsalter dieses Meteoriten außerordentlich klein und liegt mit etwa 8 Millionen Jahren noch unterhalb des Strahlungsalters vieler Steinmeteorite^{41, 42}.

Bei den Edelgasuntersuchungen am Braunau fiel zunächst dessen niedriges $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis von nur 0,10 auf. Naturgemäß würde man ein solch niedriges Verhältnis zunächst auf Grund eines Anteils an radiogenem ^4He deuten, und es wäre durchaus denkbar, daß im Falle so extrem kleiner Heliumkonzentrationen, wie wir sie im Meteoriten Braunau fanden, ein radiogener Heliumanteil in Erscheinung tritt. Eine genaue Messung des Neongehaltes dieses Meteoriten zeigte jedoch, daß das Verhältnis $^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$ von etwa 276 genau dem entspricht, welches wir für dieses in Meteoriten ähnlicher Größe fanden (siehe Abb. 3 bzw. Tab. 3). Das weist darauf hin, daß man es nicht mit einem Überschuß an ^4He zu tun hat, sondern daß hier offenkundig das ^3He einen zu geringen Wert zeigt.

Als naheliegendste Erklärung hierfür erscheint uns die folgende: Das in den Meteoriten aufgefundene ^3He entsteht nur etwa zur Hälfte direkt. Der Rest wird durch den Zerfall von Tritium gebildet. Tritiummessungen⁴³ an Eisenmeteoriten lieferten im Gegensatz zu den Steinmeteoriten offenkundig teilweise viel zu geringe Werte, so daß man annehmen muß, daß das Tritium aus den Eisenmeteoriten nach ihrem Fall bei normaler irdischer Temperatur in kurzer Zeit herausdiffundiert. Wir möchten nun annehmen, daß die Bahn des Meteoriten Braunau im

⁴¹ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg. 17 a, 1092 [1962].

⁴² T. KIRSTEIN, D. KRANKOWSKY u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta 27, 13 [1963].

⁴³ E. L. FIREMAN, (1960) Proc. Conf. Highland Park, Ill. USA, June 1960; Nat. Acad. Sci.—Nat. Res. Council, Publ. 845,

Problems Related to Interplanetary Matter, Committee on Nuclear Science, Nucl. Sci. Ser., Rep. No. 33. — K. GOEBEL, private Mitteilung 1961. — A. E. BAINBRIDGE, H. E. SUESS u. H. WÄNKE, Geochim. Cosmochim. Acta 26, 471 [1962].

Gegensatz zu denen anderer Meteorite näher an die Sonne heranführte, so daß dieser Meteorit bereits sein Tritium laufend im Weltraum verlor. In diesem Zusammenhang möchten wir noch auf einige andere Besonderheiten hinsichtlich der Hexaedrite hinweisen^{37, 44}, die alle darauf hindeuten, daß die Bahnen der Hexaedrite geringere Halbmesser besitzen als die der Oktaedrite.

Auffallenderweise sind die Streuungen in Abb. 4 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) größer als die in Abb. 3 ($^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$). Daraus folgt, daß neben dem sehr deutlichen Fall des Meteoriten Braunau auch noch bei anderen Meteoriten gewisse Verschiebungen des $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisses, vermutlich auf Grund von Tritiumverlusten, eingetreten sind. Diese Tritiumverluste müßten wegen der kurzen Halbwertszeit des Tritiums natürlich während des Zeitraums der Einwirkung der Höhenstrahlung, also bereits im Weltraum, aufgetreten sein. Abgesehen vom Meteoriten Braunau (Nr. 5) scheinen solche Tritiumverluste bei den Meteoriten Morradal (Nr. 13) und Colomera (Nr. 10) vorzuliegen. Braunau ist ein Hexaedrit; Colomera war ursprünglich auch als Hexaedrit klassifiziert. Geringe Mengen von Olivin, die in diesem Meteoriten gefunden wurden, schieben ihn in die Klasse der Pallasite. Bei Morradal handelt es

sich um einen nickelreichen Ataxiten. Die Punkte der Meteorite Braunau und Colomera zeigen auch bereits in Abb. 2 die größten Abweichungen.

Bis jetzt hat es den Anschein, als würden solche Tritiumverluste nur bei den selteneren Klassen von Eisenmeteoriten vorkommen und nicht innerhalb der häufigsten Klasse, der Oktaedrite.

Für die Überlassung der teilweise sehr wertvollen Meteoritproben möchten wir den Herren Prof. J. DORRONSORO, Granada, Dr. FRONDEL, Cambridge, USA, Prof. VON ENGELHARDT, Tübingen, Dr. HENDERSON, Washington, Dr. KRINOV, Moskau, Dr. NEUMANN, Oslo, Prof. WINKLER, Marburg, herzlich danken. Ferner danken wir den Herren Professoren W. HERR, Köln, und H. SUESS, La Jolla, für die Vermittlung von Meteoritproben.

Außerdem möchten wir Fräulein H. HARASIN und Fräulein M. MONERJAN und Herrn B. SPETTEL für ihre Mithilfe bei den Messungen danken.

Nach Abschluß dieser Arbeit erhielten wir Kenntnis von einer Veröffentlichung von BAUER⁴⁵, in der ebenfalls über Spallationshelium in Eisenmeteoriten berichtet wird und in der als Ursache für die niedrigen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Werte mancher Hexaedrite ein ^4He -Überschuß angenommen wird. Auf Grund unserer Meßdaten über das Spallationsneon bzw. über das $^4\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis halten wir jedoch die von uns vorgeschlagene Deutung eines ^3He -Verlustes für wesentlich wahrscheinlicher.

⁴⁴ H. WÄNKE, Summer Course on Nuclear Geology, Varenna 1960, Cosm. Nat. L'Energia Nucl. Lab. Geologia Nucleare, Pisa.

⁴⁵ C. A. BAUER, J. Geophys. Res. **68**, 6043 [1963].