

Edelgasmessungen an Eisenmeteoriten *

L. SCHULTZ und H. HINTENBERGER

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

(Z. Naturforsch. 22 a, 773—779 [1967]; eingegangen am 3. März 1967)

The spallogenic isotopes of helium, neon, and argon have been measured in 36 iron meteorites using a statically operated double focusing mass spectrometer. The following relations were found between the concentration ratios of the cosmic ray produced isotopes ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^{21}\text{Ne}$, and ${}^{38}\text{Ar}$:

$${}^3\text{He}/{}^4\text{He} = (36.0 \pm 0.9) {}^{21}\text{Ne}/{}^4\text{He} + (0.148 \pm 0.015),$$

$${}^{38}\text{Ar}/{}^{21}\text{Ne} = (9.4 \pm 0.8) \times 10^{-3} {}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne} + (2.06 \pm 0.04).$$

From the ${}^{38}\text{Ar}/{}^{21}\text{Ne}$ ratio a parameter n was calculated for each sample which according to GEISS, OESCHGER und SCHWARZ is a number measuring the effective irradiation hardness. Relations between n , ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$, and ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ have been studied.

A slight variation of the ${}^{36}\text{Ar}/{}^{38}\text{Ar}$ has been found which is correlated to the effective irradiation hardness. The spallation yield of ${}^{36}\text{Ar}$ relative to the total isobaric yield does not depend on the effective irradiation hardness.

Ein Anliegen der Meteoritenforschung ist es, die Frage zu klären, wie die Meteorite entstanden sind und welche Entwicklungsgeschichte sie durchgemacht haben. Ein Beitrag hierzu kann durch die Bestimmung ihrer Bestrahlungsalter, d. h. der Zeit, der sie dem Beschuß von hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung ausgesetzt waren, erbracht werden. In unserem Laboratorium werden seit einigen Jahren Untersuchungen zur Bestimmung der Bestrahlungsalter der Eisenmeteorite durchgeführt¹⁻³, wobei die Erzeugung von radioaktiven (${}^{40}\text{K}$, ${}^{36}\text{Cl}$) und stabilen (${}^{21}\text{Ne}$, ${}^{38}\text{Ar}$, ${}^{41}\text{K}$) Spallationsprodukten durch die kosmische Strahlung im Meteoriten ausgenutzt wird.

Eine genaue Altersangabe kann bei diesen Methoden nur erfolgen, wenn die effektive Härte der erzeugenden Strahlung in den untersuchten Proben genau bekannt ist. Die heute auf der Erde untersuchten Proben von Eisenmeteoritenmaterie entstammen meist dem Inneren von Körpern, die im interplanetaren Raum der kosmischen Strahlung ausgesetzt waren. Durch Ablation beim Durchgang durch Erdatmosphäre oder durch Verwitterung auf der Erde können die äußeren Schichten dieser Körper verloren gehen. Die heute untersuchten Proben sind daher gegen die Höhenstrahlung mehr oder weniger abgeschirmt gewesen. Ein Teil der Kernreaktionen erfolgte so durch niederenergetische Sekundärteil-

chen, deren Spallationswirkungen von denen der primären Teilchen verschieden sind.

Die effektive Härte der erzeugenden Strahlung kann aus den Konzentrationsverhältnissen ihrer Spallationsprodukte errechnet werden. Es wurden deshalb Proben von 36 Eisenmeteoriten untersucht und die Konzentration und Isotopenzusammensetzung der Edelgase Helium, Neon und Argon gemessen. Einen Überblick der bisher veröffentlichten Literatur über stabile und radioaktive Spallationsprodukte in Meteoriten geben zwei in dieser Zeitschrift kürzlich veröffentlichte Arbeiten^{4, 5}.

I. Durchführung der Versuche

Die Meßapparatur bestand aus drei Teilen: dem Entgasungs- und Reinigungsteil, dem Massenspektrometer und der Anlage zur Spike-Zugabe.

Die Proben wurden aus einem Degussitiegel verdampft, der in einem induktiv geheizten Tantalofen auf 1900 °C gebracht werden konnte. Dieser Tantalofen war, auch an seiner Außenseite, durch ein getrenntes Vakuumsystem vor Oxydation geschützt. Die extrahierten Gase befanden sich in einem ganz aus Metall gebauten Verdampfungsraum, wodurch eventuelle Gasverluste durch Hochfrequenz induzierte Gasentladungen vermieden wurden. Die Reinigung der extrahierten Edelgase erfolgte mit heißem Titanschwamm bei 600 bis 800 °C, der nach einer 20-minütigen Einwirkzeit abgekühlt wurde, damit auch der vorhandene Wasserstoff adsorbiert wurde.

* In dieser Arbeit werden Ergebnisse der Dissertation von L. SCHULTZ verwendet (D 77).

¹ H. VOSHAGE u. H. HINTENBERGER, in „Radioactive Dating“, International Atomic Energy Agency, Wien 1963, S. 367.

² H. VOSHAGE u. D. C. HESS, Z. Naturforsch. 19 a, 341 [1964].

³ E. VILCZEK u. H. WÄNKE, in „Radioactive Dating“, International Atomic Energy Agency, Wien 1963, S. 381.

⁴ H. HINTENBERGER u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. 19 a, 210 [1964].

⁵ F. BEGEMANN, Z. Naturforsch. 20 a, 950 [1965].



Das doppelfokussierende Massenspektrometer mit korrigierten Bildfehlern⁶ war mit einer Elektronenstoß-Ionenquelle ohne Hilfsmagnete und einem Cu-Be-Multipliplier ausgerüstet. Es konnte bis 450 °C ausgeheizt werden, der Druck bei statischem Betrieb war besser als $2 \cdot 10^{-9}$ Torr. Die Massendiskriminierung des Spektrometers wurde durch Eichung mit Hilfe von $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischungen und Edelgasen der Atmosphäre bestimmt.

Diese Eichmischungen, sowie quantitativ bekannte Gasmengen von ^3He , Luftneon und ein in ^{36}Ar angereichertes Argon wurden in Glasampullen (ca. 0,3 cm³ Inhalt) abgefüllt. Die Spikeampullen mit den Gasmen gen von ca. $1 \cdot 10^{-5}$ bis $1 \cdot 10^{-9}$ cm³ NTP konnten im Vakuum zertrümmert und in die gesamte Apparatur eingelassen werden.

Die zu untersuchenden Meteoritenproben (ca. 100 bis 600 mg) wurden mit HNO_3 geätzt und mit destilliertem Wasser und Äthanol gewaschen. Nach einer 15-stündigen Vorheizzeit bei ca. 120 °C im Vakuum zur Beseitigung oberflächlich adsorbiertener Gase, dem Verdampfen der Proben und der Reinigung der Edelgase, wurde Argon an Aktivkohle bei der Temperatur des siedenden Stickstoffs gebunden und die Isotopenzusammensetzung des Heliums und Neons im Massenspektrometer bestimmt. Die quantitative Bestimmung der Gasmengen erfolgte anschließend durch Isotopenverdünnung. Danach wurde Argon von der Kohlefalle desorbiert und genau wie Helium und Neon gemessen.

Ein Memory-Effekt wurde bei diesen Messungen nicht beobachtet. Die maximalen Mengen an Edelgasen im Spektrometer waren stets kleiner als $5 \cdot 10^{-5}$ cm³ NTP.

II. Meßergebnisse

In Tab. 1 sind die untersuchten Meteorite, ihre Klasse nach Hey⁷, das bekannte Gesamtgewicht sowie Nickelgehalt und Herkunft der Proben aufgeführt. Für den Nickelgehalt wurden stets die neuesten Ergebnisse von WASSON⁸ bevorzugt.

Herkunft der Proben:

- AMNH: American Museum of Natural History, New York, N.Y., Prof. B. MASON.
 AMS: Australian Museum, Sydney, Mr. R. O. CHALMERS.
 ASU: Arizona State University, Tempe, Ariz., Prof. C. B. MOORE.
 CHNM: Chicago Natural History Museum, Chicago, Ill., Dr. E. OLSEN.
 GMHU: Geol. Museum Harvard University, Cambridge, Mass., Prof. C. FRONDEL.
 GMS: Geol. Survey, Mines Dep., Melbourne, Mr. J. L. KNIGHT.
 MPIH: Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, Dr. J. ZÄHRINGER.
 MPIM: Max-Planck-Institut für Chemie (Otto-Hahn-Institut), Mainz.
 MSU: Michigan State University, East Lansing, Mich., Dr. VON DEL CHAMBERLAIN.
 TÜB: Mineralog. Institut Universität Tübingen, Prof. von ENGELHARDT, Dr. W. WEISKIRCHNER.
 USNM: U.S. National Museum, Washington D.C., Dr. R. S. CLARKE, Dr. E. P. HENDERSON.

Nr.	Meteorit	Klasse	Gewicht kg	Ni %	Bezeichnung der Probe	Herkunft
1	Ainsworth	Ogg	10,5	6,1	420.1	ASU
2	Babb's Mill	D	145	17,3		GMHU
3	Butler	Off	41	16,0	137.x	ASU
4	Cambria	Of	16	10,6 ⁷	9112006	TÜB
5	Campo del Cielo (El Taco)	H	sehr groß		AII	
6	Cape of Good Hope	D	136	16,5	262 a	ASU
7	Carlton	Of	81	13,0	3851	AMNH
8	Charlotte	Of	4,3	8,2		GMHU
9	Costilla Peak	Om	35	7,8	856	CNHM
10	Cowra	Off	5,3	13,7 ¹⁰	6444	AMS
11	Delegate	Om	27,7	10,0	7888	AMS
12	Glorieta	Om-P	145	12,2	2170	CNHM
	Mountain					
13	Gundarling	Om	110	8,2 ⁷	312	MPIH
14	Hill City	Off	11,7	9,3 ⁷	1446	USNM
15	Hoba	D	groß	16,2 ⁷	193	MPIH
16	Huizopa	Of	120	7,8	2232	AMNH
17	Iron River	Of	1,4	8,0	1006.4	MSU
18	Kalkaska	Om	9,4		1005.3	MSU
19	Merceditas	Om	43	7,3 ⁷	586	CNHM
20	Moonbi	Of	13	7,9 ⁷	1253	AMS
21	Mount Edith	Om	326	8,7	1959	CNHM
22	Mungindi	Off	51	10,7	2486	AMS
23	Nocoleche	Og	20	6,4 ¹⁰	164	AMNH
24	Osseo	Og	46,3	6,4	925	USNM
25	Ponca Creek	Ogg	45	5,9	421.1	ASU
26	Puente del Zacate	Om	30,7	8,2 ⁷	946	ASU
27	Putnam County	Of	32,5	7,9	246.2	ASU
28	Rodeo	Of	43	11,1	319	USNM
29	Sanderson	Om	6,8	10,0 ¹¹	441.3x	ASU
30	Santa Apo- lonia	Om	1317	7,8 ⁷	112.38	AML
31	South Byron	D	6	18,5	2555	CNHM
32	Trenton	Om	455	8,2	AII -10/+2	MPIM
33	Weaver Mountain	D	39	18,0	313.1	TÜB
34	Wedderburn	D	0,2	22,2	11893	GSM
35	Williams- town	Om	31	7,3 ⁷	801	AMNH
36	Yanhuitlan	Of	421	7,4	129a	ASU

Tab. 1. Name, Klasse, Gewicht und Herkunft der untersuchten Meteoritenproben. Für die angegebenen Nickelgehalte wurden die neuesten Ergebnisse von WASSON⁸ bevorzugt.

⁶ H. HINTENBERGER u. L. A. KÖNIG, Advances in Mass Spectrometry (Ed. J. D. WALDRON), Pergamon Press, London—New York 1959.

⁷ M. H. HEY, Catalogue of Meteorites, The British Museum, London 1966.

⁸ J. T. WASSON, Persönl. Mitteilung an Dr. VOSHAGE, zit. in ²¹.

⁹ F. R. PARK, T. E. BUNCH u. T. B. MASSALSKI, Geochim. Cosmochim. Acta **30**, 399 [1966].

¹⁰ J. F. LOVERING, W. NICHIPORUK, A. CHODOS u. H. BROWN, Geochim. Cosmochim. Acta **11**, 263 [1957].

¹¹ E. GOLDBERG, A. UCHIYAMA u. H. BROWN, Geochim. Cosmochim. Acta **2**, 1 [1951].

Nr.	Meteorit	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$	${}^{21}\text{Ne}$	${}^{38}\text{Ar}$	$\frac{{}^3\text{He}}{{}^4\text{He}}$	${}^3\text{He}$	${}^4\text{He}$	${}^{38}\text{Ar}$	${}^{22}\text{Ne}$	${}^{36}\text{Ar}$	n	Autor
						$\frac{{}^3\text{He}}{{}^4\text{He}}$	${}^{21}\text{Ne}$	${}^{21}\text{Ne}$	${}^{21}\text{Ne}$	${}^{21}\text{Ne}$	${}^{38}\text{Ar}$		
1	Ainsworth	530	2160	5,97	32,5	0,245	89,0	362	5,44	1,04	0,651	2,58	
2	Babb's Mill	13	49	0,175	0,83	0,266	74,4	280	4,75	1,08	0,599	2,39	
3	Butler	323	1271	3,55	19,5	0,254	91	359	5,50	1,05	0,638	2,59	
4	Cambria	240	975	2,46	14,25	0,246	97,5	396	5,80	1,05	0,624	2,64	
5	Campo del Cielo												
	El Taco	1,3	6,7	0,011	0,09	0,194	118	611	8,20	1,50	1,0	3,1	
6	Cape of Good Hope	275	1180	2,52	15,1	0,233	109	468	5,99	1,04	0,657	2,70	
7	Carlton	370	1378	4,46	21,5	0,269	83,9	308	4,80	1,06	0,644	2,37	
8	Charlotte	321	1015	4,46	18,5	0,316	72	227	4,15	1,05	0,665	2,14	
		386	1170	5,14		0,329	75	228		1,03			4
9	Costilla Peak	600	2055	7,68	34,0	0,292	78,1	267	4,42	1,05	0,678	2,40	
10	Cowra	578	2260	7,12	35,8	0,252	81,1	317	5,02	1,05	0,645	2,44	
11	Delegate	578	1946	7,78	36,9	0,297	73,4	258	4,75	1,05	0,660	2,35	
12	Glorietta Mountain	88	344	1,08	5,7	0,256	81,5	319	5,28	1,05	0,636	2,51	
13	Gundaring	572	2178	6,60	33,0	0,262	86,5	330	5,00	1,05	0,639	2,42	
					31,0								12
14	Hill City	260	923	3,70	16,3	0,282	70,4	250	4,40	1,05	0,657	2,23	
15	Hoba	53	224	0,48	3,1	0,236	110	466	6,45	1,06	0,608	2,84	
		35	157			0,222							13
					4,0								12
16	Huizopa	218	810	2,56	13,1	0,269	85	316	5,11	1,04	0,637	2,46	
17	Iron River	340	1085	4,67	19,0	0,313	72,7	232	4,06	1,04	0,672	2,11	
18	Kalkaska	387	1303	5,05	23,4	0,296	76,6	258	4,64	1,04	0,658	2,32	
19	Merceditas	545	2015	6,41	31,2	0,270	85	314	4,86	1,05	0,639	2,38	
		540	2040	6,55	34,0	0,265	82,5	310	5,19	1,05	0,645		14
		565	2036			0,278							13
		566	2160	7,00	34,2	0,263	81	309	4,89		0,637		15
20	Moonbi	381	1390	5,13	22,5	0,274	74,2	271	4,39	1,05	0,640	2,23	
21	Mount Edith	450	1740	6,05	27,0	0,259	74,5	289	4,47	1,05	0,675	2,26	
		500	1865	7,00	32,0	0,268	71,5	266	4,60	1,07	0,635	2,31	
22	Mungindi Nr. 2	378	1422	4,68	25,5	0,266	80,6	304	5,45	1,05	0,646	2,56	
23	Nocoleche	163	673	1,93	10,1	0,242	84,5	348	5,23	1,05	0,626	2,48	
24	Osseo	314	1060	4,60	19,2	0,296	68,4	230	4,18	1,04	0,663	2,14	
		329	1137	4,65		0,289	70,8	245		1,02			18
25	Ponca Creek	517	2005	6,10	31,6	0,258	84,7	329	5,18	1,04	0,630	2,46	
26	Puente del Zacate	543	2040	6,72	32,0	0,266	80,7	303	4,78	1,04	0,642	2,35	
27	Putnam County	326	1112	4,01	20,3	0,293	80,1	277	5,05	1,03	0,654	2,44	
		361	1247			0,289							13
28	Rodeo	284	1050	3,70	18,4	0,271	76,6	284	4,97	1,05	0,667	2,42	
29	Sanderson	412	1595	5,41	25,3	0,258	76	294	4,67	1,07	0,641	2,32	
30	St. Apolonia	204	790	2,51	12,9	0,258	81,4	315	5,14	1,05	0,646	2,46	
		210	815	2,58	12,4	0,258	81,5	316	4,80		0,627		15
31	South Byron	187	693	2,62	10,8	0,270	71,5	264	4,13	1,05	0,661	2,12	
32	Trenton	370	1425	4,79	24,8	0,259	77,4	298	5,19	1,06	0,633	2,48	
					22,0								12
33	Weaver Montain	441	1713	4,60		0,258	95,7	372		1,02			18
		288	1104	3,42	17,4	0,261	84,2	323	5,09	1,05	0,631	2,48	
		287	1106			0,260							13
34	Wedderburn	92	316	1,30	5,6	0,291	71	242	4,31	1,05	0,654	2,23	
35	Williamstown	519	1791	7,22	33,3	0,289	71,9	248	4,61	1,07	0,635	2,30	
		480	1920	6,0	26,4	0,25	80	320	4,40	1,12	0,666		17
		463	1800	5,28	28,0	0,257	87,7	340	5,33	1,06	0,635		14
		585	2047	6,43		0,286	91	318		1,01			18
36	Yanhuitlan	174	663	1,95	10,6	0,263	89,4	340	5,44	1,04	0,617	2,54	

Tab. 2. Mittelwerte der Edelgasanalysen. Alle Konzentrationen sind in $10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ NTP/g}$ Meteorit angegeben. Es wurden außerdem die in der Literatur veröffentlichten Edelgasmengen von gleichen Meteoriten eingetragen. Aus dem gemessenen ${}^{38}\text{Ar}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis wurde unter Berücksichtigung des Nickelgehaltes der Härteindex n der effektiven, die spallogenen Edelgase erzeugenden Strahlung, berechnet.

¹² P. LÄMMERZAHN u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta **30**, 1659 [1966].

¹³ C. A. BAUER, J. Geophys. Res. **68**, 6043 [1963].

¹⁴ P. SIGNER u. A. O. NIER, in „Researches on Meteorites“ (Ed. C. B. MOORE), John Wiley & Sons, New York 1962, p. 7.

¹⁵ M. E. LIPSCHUTZ, P. SIGNER u. E. ANDERS, J. Geophys. Res. **70**, 1473 [1965].

¹⁶ O. A. SCHAEFFER u. D. HEYMANN, J. Geophys. Res. **70**, 215 [1965].

¹⁷ O. A. SCHAEFFER u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta **19**, 94 [1960].

¹⁸ H. HINTERBERGER, L. SCHULTZ, H. WÄNKE u. H. WEBER, Z. Naturforsch. **22 a**, 780 [1967].

Von allen Meteoriten wurden mehrere Edelgasmessungen, mindestens 2, durchgeführt, die Mittelwerte der Meßergebnisse sind in Tab. 2 aufgeführt. Die bei den Einzelmessungen eines Meteoriten beobachteten Edelgaskonzentrationen stimmen stets innerhalb von mindestens 10% miteinander überein.

Die Fehler in den absoluten Mengen sollten kleiner als 8% sein, die der Isotopenhäufigkeiten kleiner als 3%. Die Hauptfehlerquelle dürfte die Kalibrierung der Eichampullen darstellen, da hier der Fehler der Volumenmessung beim Auswiegen der Ampulle mit Quecksilber zu 3% angesetzt werden muß und der Fehler der Druckmessung beim Füllen der Ampullen auch je nach Probenmenge bis 3% betragen kann.

In Tab. 2 sind auch die in der Literatur aufgeführten Edelgasmessungen anderer Autoren von gleichen Meteoriten angegeben. Die Übereinstimmung der Messungen an den meisten der gemeinsam gemessenen Meteorite wie z.B. Charlotte, Gundarling, Hoba, Merceditas, Osseo, Putnam County, Santa Apolonia und Trenton sind gut; die geringe Zahl der Abweichungen kann durch die unterschiedliche Probenlage erklärt werden, wie bei Mt. Edith und Williams-town.

Bei den Messungen brauchte nur für Argon eine Untergrundkorrektur durchgeführt werden. Hierbei wurde angenommen, daß alles ^{40}Ar aus Luftverunreinigungen stammt. ^{36}Ar und ^{38}Ar sind entsprechend korrigiert.

Wegen der Massendiskriminierung beim Nachweis mit dem Multiplier wurde das Verhältnis $^3\text{He}/^4\text{He}$ korrigiert. Der Korrekturfaktor wurde laufend kontrolliert, er änderte sich im Laufe der Messungen um höchstens 0,5%. Die gleichen Korrekturen, wenn auch in wesentlich kleinerem Maße (jeweils 2%), wurden für die Verhältnisse $^{22}\text{Ne}/^{21}\text{Ne}$ und $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ angebracht. Massendiskriminierungen beeinflussen die quantitative Bestimmung der Konzentrationen von ^3He , ^{21}Ne und ^{38}Ar nicht, da sie bei der Isotopenverdünnungsmethode eliminiert werden.

III. Diskussion

a) Beziehungen der Konzentrationsverhältnisse untereinander

Das Verhältnis der spallogenen Konzentrationen der Isotope ^3He und ^{38}Ar aus Eisenmeteoriten ist im Gegensatz zu anderen Konzentrationsverhältnis-

sen keinen großen Schwankungen ausgesetzt. In Abb. 1 ist das $^{38}\text{Ar}/^{21}\text{Ne}$ - über dem $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis aufgetragen. Die durchgezogene Gerade entspricht einem Wert für das $^3\text{He}/^{38}\text{Ar}$ -Verhältnis von 16,4, der gleichzeitig der Mittelwert aller Messungen

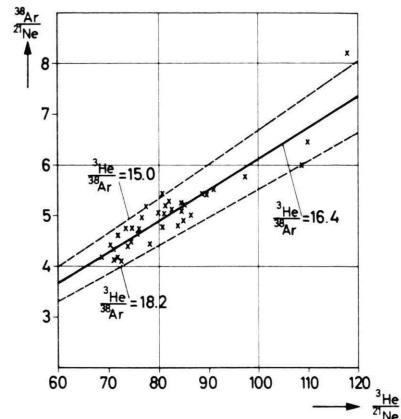


Abb. 1. $^{38}\text{Ar}/^{21}\text{Ne}$ als Funktion von $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$. Die eingezeichnete Gerade, in deren Umgebung die Meßpunkte für alle Meteorite liegen, die nur reine Spallationsedelgase enthalten, genügt der Gleichung $^{38}\text{Ar}/^{21}\text{Ne} = (0,061 \pm 0,006) \cdot ^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$. Das aus dem Diagramm ableitbare Verhältnis $^3\text{He}/^{38}\text{Ar}$ zeigt nur geringe Abweichungen vom Mittelwert $^3\text{He}/^{38}\text{Ar} = 16,4$.

ist. Dieser Wert stimmt mit dem Mittelwert anderer Autoren gut überein (15,8 bis 16,7)^{5,12,14,15}. Würde dieses Verhältnis von der Probenlage im Meteoriten abhängen, dann müßten sich die Meßpunkte bei wachsendem $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ zur gestrichelt eingezeichneten oberen ($^3\text{He}/^{38}\text{Ar} = 15$) oder unteren ($^3\text{He}/^{38}\text{Ar} = 18,2$) Geraden verschieben, da das $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis von der Härte der effektiven Strahlung abhängig ist (siehe nächsten Abschnitt).

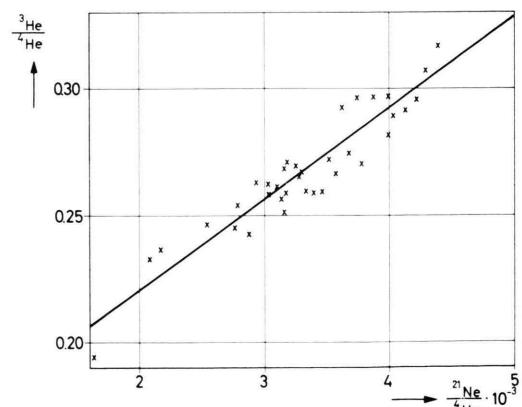


Abb. 2. $^3\text{He}/^4\text{He}$ als Funktion von $^{21}\text{Ne}/^4\text{He}$. Die eingezeichnete Gerade genügt der Gleichung

$$^3\text{He}/^4\text{He} = (36,0 \pm 0,9) \cdot ^{21}\text{Ne}/^4\text{He} + (0,148 \pm 0,015).$$

In Abb. 2 ist das ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ -Verhältnis über ${}^{21}\text{Ne}/{}^{21}\text{Ne}$ aufgetragen. Die wahrscheinlichste Gerade durch die Meßpunkte genügt der Gleichung

$${}^3\text{He}/{}^4\text{He} = (36,0 \pm 0,9) \cdot {}^{21}\text{Ne}/{}^{21}\text{Ne} + (0,148 \pm 0,015). \quad (1)$$

Hieraus ergibt sich der spallogene Neon gehalt einer Probe eines Eisenmeteoriten in Abhängigkeit ihrer Heliumisotopen-Konzentration:

$${}^{21}\text{Ne} = \frac{1}{(36,0 \pm 0,9)} \cdot [{}^3\text{He} - (0,148 \pm 0,015) {}^4\text{He}]. \quad (2)$$

Der Grenzwert für das kleinste mögliche ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ -Verhältnis durch Spallation von meteoritischem Nickel-Eisen berechnet sich daraus zu $({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_{\min} = (0,148 \pm 0,015)$.

In Abb. 3 ist das ${}^{38}\text{Ar}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis als Funktion des ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ aufgetragen. Die Abhängigkeit lässt sich für den untersuchten Bereich auch hier noch näherungsweise durch eine Gerade beschreiben, die die Form hat

$${}^{38}\text{Ar}/{}^{21}\text{Ne} = (9,4 \pm 0,8) \cdot 10^{-3} \cdot {}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne} + (2,06 \pm 0,04). \quad (3)$$

Die angegebenen mittleren quadratischen Fehler sind in Abb. 3 als gestrichelte Linien eingezeichnet.

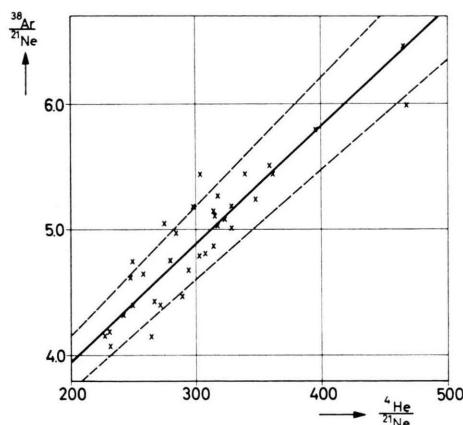


Abb. 3. ${}^{38}\text{Ar}/{}^{21}\text{Ne}$ als Funktion von ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$. Die eingezeichnete Gerade entspricht der Gleichung

$${}^{38}\text{Ar}/{}^{21}\text{Ne} = (9,4 \pm 0,8) \cdot 10^{-3} \cdot {}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne} + (2,06 \pm 0,04).$$

b) Die Härte der erzeugenden Strahlung

Für das differentielle Energiespektrum der die Edelgase erzeugenden Strahlung kann folgender Ansatz gemacht werden:

$$f(E) dE = f_0 E^{-\alpha} dE, \quad (4)$$

wobei f_0 eine Konstante und α eine die Härte der Strahlung charakterisierende Größe ist.

GEISS, OESCHGER und SCHWARZ¹⁹ berechneten die durch eine solche Strahlung produzierte totale Spallationsausbeute einer Isobaren:

$$N(\Delta A, A_0) = \frac{3 \sigma_0 A_0^{2/3} f_0 \Gamma(n) (\Delta A)^{-n}}{2 c^{n-1}}. \quad (5)$$

Hierbei ist A_0 die Nukleonenzahl des Targetkerns, ΔA die Differenz zu der des Spallationsproduktes,

$$n = \frac{3 \alpha - 1}{2}, \quad c = \frac{c_1}{1 + c_2 A_0}, \quad \Gamma(n) = \int_0^\infty x^{n-1} e^{-x} dx.$$

Die Konstanten σ_0 , c_1 und c_2 sind empirisch bestimmt.

Die Größe n bezeichnet man als Härteindex der effektiven Strahlung, kleines n bedeutet einen hohen Anteil hochenergetischer Teilchen, die besonders bei kleinen Meteoriten oder an der Oberfläche großer Meteorite als primäre kosmische Strahlung wirksam werden. Im Inneren großer Meteorite – hier wird ein Teil der Spallationsprodukte durch niedrigerenergetische Sekundärteilchen gebildet – ist der Härteindex n entsprechend größer. Betrachtet man die Bestrahlung von Eisen, dann gilt die Beziehung (5) für Spallationsprodukte des Massenbereichs von etwa $A = 20$ bis $A = 50$. Es kann also das theoretische Produktionsverhältnis $P({}^{38}\text{Ar}/{}^{21}\text{Ne})$ – beide Isotope enthalten eine vollständige Isobarenausbeute – als Funktion von n berechnet werden:

$$\frac{P(38, A_0)}{P(21, A_0)} = \left(\frac{A_0 - 21}{A_0 - 38} \right)^n. \quad (6)$$

Mit Hilfe des gemessenen ${}^{38}\text{Ar}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisses der Proben und unter Berücksichtigung ihres Nickelgehaltes [$A_0(\text{Fe}) = 55,8$, $A_0(\text{Ni}) = 58,7$] wurde so der Härteindex n gewonnen, der für alle Meteoritenproben in Tab. 2 aufgeführt ist.

Die kleinsten Meteorite, die untersucht wurden (Wedderburn, Iron River, Charlotte und South Byron), weisen die kleinsten Härteindices (2,11 bis 2,23) auf; hier sind die untersuchten Proben nur wenig abgeschirmt gewesen. Die größten Meteorite (El Taco und Hobba) hingegen, haben mit $n = 3,1$ bzw. 2,88 große Härteindices. Diese Proben waren gegen die primäre kosmische Strahlung zum Teil abgeschirmt, sie entstammen dem Inneren der Körper, die als Meteoroiden der kosmischen Strahlung ausgesetzt waren.

¹⁹ J. GEISS, H. OESCHGER u. U. SCHWARZ, Space Sci. Rev. I, 197 [1962].

Diese so gewonnenen Härteindices können nun mit den Konzentrationsverhältnissen der Edelgasotope verglichen werden, was in tabellarischer Form schon bei VOSHAGE und HINTENBERGER¹ für einige Meteorite erfolgte.

Abb. 4 bis 6 zeigen die Verhältnisse ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$, ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ und ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ in Abhängigkeit vom Härteindex n . Die stärkste Abhängigkeit zeigen die Verhältnisse, die ${}^{21}\text{Ne}$ enthalten, da Neon durch Spallation aus Eisen fast ausschließlich durch die primäre Strahlung erzeugt wird²⁰. So vergrößert sich das ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis bei einem Anwachsen von $n=2$ auf $n=3$ um einen Faktor drei.

Die Bestimmung von n für eine Meteoritenprobe kann über das ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ -Verhältnis ohne eine quantitative Edelgasanalyse erfolgen.

Bei SIGNER und NIER¹⁴ wird ein Verfahren angegeben, wie allein aus Edelgasdaten einer Probe eines Eisenmeteoriten sein Bestrahlungsalter berechnet werden kann. Diese Alter sind allerdings mit einem großen Fehler behaftet, da der präatmosphärische Radius des Meteoriten abgeschätzt werden muß. So beträgt bei einem Alter von 600 Millionen Jahren der Fehler etwa 20%, er kann bei weich bestrahlten oder jüngeren Proben diesen Wert noch überschreiten. Um Gruppierungen im Bestrahlungsalterdiagramm der Eisenmeteorite erkennen und deuten zu können, ist aber eine genauere Bestimmung dieses Alters nötig. Deshalb wurde in dieser Arbeit auf die Berechnung von Bestrahlungsaltern verzichtet, sie erfolgte bei VOSHAGE²¹ aus der Häufigkeit

der spallogenen Kaliumisotope mit wesentlich höherer Genauigkeit. Dabei wurden die in dieser Arbeit bestimmten Härteindices zur genauen Berechnung der Bestrahlungsalter benutzt.

c) ${}^{36}\text{Ar}/{}^{38}\text{Ar}$ -Verhältnisse

Die gemessenen ${}^{36}\text{Ar}/{}^{38}\text{Ar}$ -Verhältnisse zeigen nur kleine Schwankungen, mit zunehmendem n sollte dieses Verhältnis kleiner werden, da der Spallationskern ${}^{36}\text{Ar}$ weiter als ${}^{38}\text{Ar}$ vom Targetkern entfernt liegt. In Abb. 7 a ist dieser Gang deutlich zu erkennen.

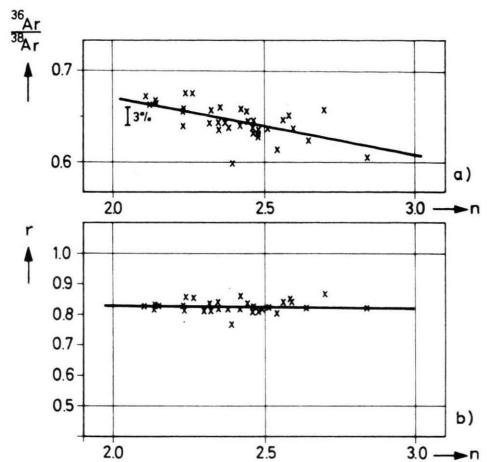


Abb. 7 a. ${}^{36}\text{Ar}/{}^{38}\text{Ar}$ in Abhängigkeit vom Härteindex n der effektiven Strahlung.

Abb. 7 b. Der Anteil r des Kerns ${}^{36}\text{Ar}$ an der Gesamtspallationsausbeute der Isobaren $A=36$ in Abhängigkeit von der Härte der effektiven Strahlung.

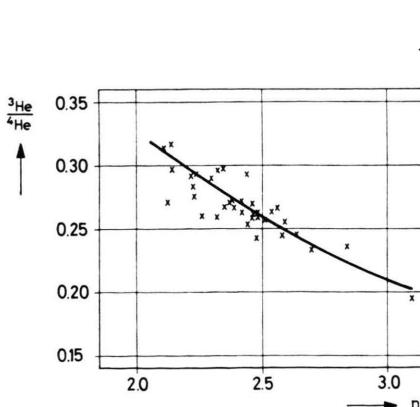


Abb. 4. ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ in Abhängigkeit von dem Härteindex n der effektiven Strahlung, die die Edelgase erzeugt.

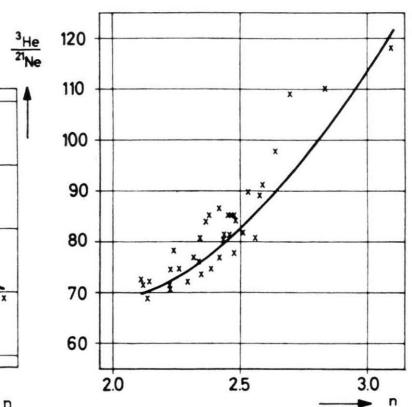


Abb. 5. ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ als Funktion des Härteindex n der effektiven Strahlung.

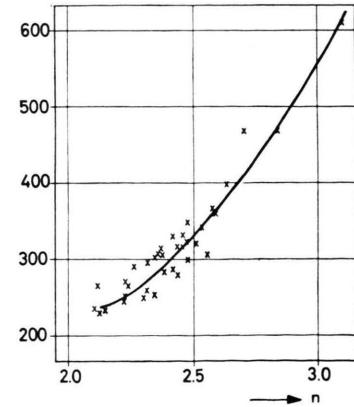


Abb. 6. ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ in Abhängigkeit der erzeugenden effektiven Strahlungshärte n .

²⁰ P. SIGNER u. A. O. NIER, J. Geophys. Res. **65**, 2947 [1960].

²¹ H. VOSHAGE, Z. Naturforsch. **22 a**, 477 [1967].

²² D. HEYMANN, M. E. LIPSCHUTZ, B. NIELSEN u. E. ANDERS, J. Geophys. Res. **71**, 619 [1966].

nen. Der Mittelwert von allen $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ -Verhältnissen (außer El Taco) liegt mit 0,646 um etwa 1,5% über dem Mittelwert der in der Literatur veröffentlichten Werte^{5, 12, 14–16, 22}. Das ist darauf zurückzuführen, daß in dieser Arbeit besonders wenig Meteorite mit hohem n -Wert und damit niedrigerem $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ -Verhältnis gemessen wurden.

^{36}Ar stellt im Gegensatz zu ^{38}Ar keine vollständige Isobarenausbeute dar, da mit ^{36}S ein weiterer stabiler Kern auf der Isobaren $A = 36$ liegt. Es wäre nun möglich, daß die Verteilung der Spallationsausbeuten auf dieser Isobaren auch von der Härte der erzeugenden Strahlung abhängt⁵. Der Anteil der Spallationsausbeute r von ^{36}Ar der gesamten Isobaren 36 kann berechnet werden zu

$$r = \frac{N(^{36}\text{Ar})}{\sum N(^{36}\text{X})} = \frac{N(^{38}\text{Ar})}{\sum N(^{36}\text{X})} \cdot \frac{^{36}\text{Ar}}{^{38}\text{Ar}}, \quad (7)$$

wobei der erste Quotient nach (5) berechnet werden kann. Dieser Wert, mit dem gemessenen $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ -Verhältnis multipliziert, ergibt die in Abb. 7 b dargestellten r -Werte für die einzelnen Meteoritenproben. Hier läßt sich keine Verschiebung der Spallationsausbeutekurve längs einer Isobaren mit der

Härte beobachten, die Meßwerte gruppieren sich um einen mittleren r -Wert von $\bar{r} = (0,829 \pm 0,003)$.

Ein Vergleich mit den aus der RUDSTAM-Formel (s. Anm.^{23, 24}) zu erwartenden Härteabhängigkeit der Ausbeute ist noch nicht möglich, da der Fehler der mit dieser Formel vorausgesagten Spallationsquerschnitte viel größer als der hier zu erwartende Effekt ist.

Herrn Dr. H. VOSHAGE danken wir für die Vermittlung der Meteoritenproben und für zahlreiche Hinweise und Diskussionen, Herrn H. WEBER für die Hilfe bei der Herstellung der Eichampullen. Ferner möchten wir den Herren G. BERNSEE und U. PAULI für ihre Mitarbeit bei der Durchführung der Experimente danken.

Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und durch das Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung unterstützt. Wir sind für diese Hilfen zu Dank verpflichtet.

Für die Überlassung der Meteoritenproben möchten wir den Herren CHALMERS, Sydney, Dr. VON DEL CHAMBERLAIN, East Lansing, Mich., Dr. CLARKE und Dr. HENDERSON, Washington, D.C., Prof. VON ENGELHARDT und Dr. WEISKIRCHNER, Tübingen, Prof. FRONDEL, Cambridge, Mass., J. L. KNIGHT, Melbourne, Prof. MASON, New York, N.Y., Prof. MOORE, Tempe, Ariz., Dr. OLSEN, Chicago, Ill., und Dr. ZÄHRINGER, Heidelberg, sehr herzlich danken.

²³ G. RUDSTAM, Phil. Mag. **46**, 344 [1955].

²⁴ G. RUDSTAM, Z. Naturforschg. **21 a**, 1027 [1966].