

Der Mond als Mutterkörper der Bronzit-Chondrite

H. WÄNKE

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

(Z. Naturforsch. 21 a, 93–110 [1966]; eingegangen am 9. Juli 1965)

Herrn Professor J. MATTAUCH zum 70. Geburtstag gewidmet

Knowing the cosmic ray exposure ages of a sufficiently large number of meteorites and using the earth as analyser with special assumptions, criteria can be found to distinguish between a lunar or asteroidal origin of meteorites. Several of the following arguments are based on new and unpublished results of rare gas measurements by HINTENBERGER, SCHULTZ und WÄNKE ⁷⁰.

Bronzite-chondrites:

1. Arguments for an origin near the surface of the parent body. a) Porosity of the chondrites 0–20%. b) Many bronzite-chondrites contain light primordial rare gases, originating from the exposure of the single meteorite grains to the solar wind. c) Primordial rare gas content always connected with light-dark structure. d) In the distribution of the cosmic ray exposure ages certain groupings can be distinguished. The age distribution of bronzite-chondrites with light primordial rare gases is identical with the distribution of the cosmic ray exposure ages of all bronzite-chondrites. The bronzite-chondrites containing primordial gas therefore are probably coming from the very upper layers, and the other bronzite-chondrites from somewhat deeper layers of their parent body.

2. Arguments for an origin close to the earth's orbit. a) Bronzite-chondrites with high cosmic ray exposure ages show a slight tendency to fall in the afternoon (noon until midnight). b) For the bronzite-chondrites, which are morning falls (midnight until noon), diffusion losses of ³He and ⁴He are higher and more frequent compared to the afternoon falls. The reason for this can be found in a closer approach to the sun of the first ones. Hypersthene-chondrites do not show this effect. c) Bronzite-chondrites with light primordial rare gas content concentrate among the afternoon falls. d) The mean cosmic ray exposure age of the bronzite-chondrites is considerably lower than that of the hypersthene-chondrites.

3. Arguments concerning the size of the parent body. Light primordial rare gas and their connection with light-dark structure indicate a parent body of the size of the moon or a large asteroid.

None of these arguments are strictly conclusive. In some cases they are based on observations, which can only be obtained by using statistical methods. Most of these effects are close to the mean error. Adding, however, all observations together, a lunar origin of the bronzite-chondrites becomes nearly undoubtable. A lunar origin of stone meteorites was in recent times first proposed by UREY ³.

Hypersthene-chondrites:

Hypersthene-chondrites with low cosmic ray exposure ages are rare among the morning falls. Their parent body therefore probably has to be found outside the earth's orbit. Their distribution of the cosmic ray exposure ages may also lead to this conclusion. As proposed by ANDERS ⁴, the Mars asteroids could possibly be the parent bodies for the hypersthene-chondrites. Mars itself might however be considered also. A lunar origin of the hypersthene-chondrites seems to be completely out of question.

Bis vor wenigen Jahren war es die allgemein akzeptierte Ansicht, daß der Ursprung aller Meteorite in den Asteroiden, den kleinen Planeten, die in großer Zahl zwischen Mars und Jupiter ihre Bahnen ziehen, zu suchen ist. Als es, aufbauend auf den Pionierarbeiten PANETHS und seiner Mitarbeiter ^{1–2}, möglich wurde mit Hilfe der in den Meteoriten vorhandenen Reaktionsprodukte der Höhenstrahlung ihre Lebensdauer als kleine Körper exakt zu bestimmen, tauchten bald Zweifel an der Richtigkeit dieser Annahme auf.

Zeitliche und räumliche Konstanz der Höhenstrahlung und konstante Meteoritgröße vorausgesetzt, ist die Einwirkungsdauer der Höhenstrahlung auf die

Meteorite identisch mit ihrer Lebensdauer als kleine Körper. Diese Einwirkungsdauer nennt man Bestrahlungsalter und versteht darunter die Zeit zwischen dem Ausbrechen des Meteoriten aus einem größeren Mutterkörper, in dem die Meteoritmaterie gegen die Einwirkung der Höhenstrahlung abgeschirmt war, und seinem Auftreffen auf die Erde.

Während für die Eisenmeteorite ein Ursprung im Asteroidengürtel auch heute noch plausibel erscheint, wird dies für die Steinmeteorite von den meisten Forschern verneint. Ernstlich werden heute nur zwei Quellen für die Herkunft der Steinmeteorite diskutiert.

Zurückgehend auf eine im Jahre 1959 erschienene Arbeit von UREY ³ wird in letzter Zeit immer häufi-

¹ F. A. PANETH, P. REASBECK u. K. MAINE, *Geochim. Cosmochim. Acta* 2, 300 [1952].

² F. A. PANETH, P. REASBECK u. K. MAINE, *Nature, Lond.* 172, 200 [1953].



ger der Mond als Mutterkörper der Steinmeteorite erörtert. ANDERS⁴ hingegen schließt den Mond praktisch vollkommen aus und hat vielmehr die Mars-asteroide als Mutterkörper der Steinmeteorite vorgeschlagen.

UREY³ hatte in der eben erwähnten Arbeit zwei Argumente für einen Mondursprung der überwiegenden Mehrheit der Steinmeteorite vorgebracht:

1. Ausgehend von den Rechnungen ÖPIKS⁵ über die Lebensdauer kleiner Körper im Sonnensystem gegen den Einfang durch die Planeten sind die gemessenen Bestrahlungsalter der Eisenmeteorite, die bei etwa 0,5 bis 1 Milliarde Jahre liegen, gut mit der Vorstellung eines Ursprungs im Asteroidengürtel in Einklang zu bringen. Die Steinmeteorite hingegen besitzen Bestrahlungsalter, die im Mittel um beinahe zwei Größenordnungen tiefer liegen. Derartig niedrige Werte für die Lebensdauer von Meteoriten erhält man nur, wenn man einen Mutterkörper in Erdnähe annimmt. Der Mond wäre ein geeigneter Mutterkörper. Selbstverständlich kann Mondmaterial nur infolge von Einschlägen, entweder von Eisenmeteoriten oder wahrscheinlicher von Kometen, in den Weltraum gebracht werden. Im Falle der Asteroiden sind es Kollisionen untereinander, die Meteorite produzieren.

2. Der polymikte Charakter vieler Steinmeteorite aller Klassen spricht für eine Entstehung in einem größeren Körper von Mond- oder Planetengröße.

1. Hypothesen zur Deutung des Unterschieds der mittleren Bestrahlungsalter von Stein- und Eisenmeteoriten

Seit UREYS³ Mondhypothese sind viele weitere Bestrahlungsalter an Stein-⁶⁻¹⁷ und Eisenmeteoriten gemessen worden⁸⁻²², zum Teil auch nach modernen und zuverlässigeren Methoden²³⁻³². Der große Unterschied der Bestrahlungsalter zwischen Stein- und Eisenmeteoriten aber blieb bestehen.

Wir wollen zunächst alle Möglichkeiten, die zur Erklärung dieses Unterschieds in Frage kommen, betrachten:

a) Raumerosion

FIREMAN und DE FELICE⁸ sowie WHIPPLE und FIREMAN³³ versuchten diese Diskrepanz mit Hilfe einer „Raumerosion“ auf Grund der Einwirkung von kosmischem Staub und schnellen Ionen zu erklären. Die Steinmeteorite sollten wesentlich höhere Erosionsraten besitzen als die Eisenmeteorite und die Bestrahlungsalter allein von der Erosionsrate bestimmt sein. Dieses Modell wurde von vielen Autoren kritisiert^{12, 34}. Es wurde unhaltbar, seitdem sowohl für die Eisen- als auch für die Steinmeteorite Gruppierungen der Bestrahlungsalter um diskrete Werte erkannt wurden. Hiermit war bewiesen, daß die Bestrahlungsalter tatsächlich einzelnen katastrophischen Ereignissen entsprechen. Es wäre hingegen verfehlt, zu behaupten, daß die Raumerosion

³ H. C. UREY, J. Geophys. Res. **64**, 1721 [1959].

⁴ E. ANDERS, Space Sci. Rev. **3**, 583 [1964].

⁵ E. J. ÖPIK, Proc. Roy. Irish Acad. **54 A**, 165 [1951].

⁶ H. WÄNKE, Summer Course on Nuclear Geology, Varenna 1960, Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa 1960, p. 87.

⁷ J. ZÄHRINGER u. W. GENTNER, Z. Naturforsch. **15 a**, 600 [1960].

⁸ E. L. FIREMAN u. J. DE FELICE, Geochim. Cosmochim. Acta **18**, 183 [1960].

⁹ K. GOEBEL u. P. SCHMIDLIN, Z. Naturforsch. **15 a**, 79 [1960].

¹⁰ J. GEISS, H. OESCHGER u. P. SIGNER, Z. Naturforsch. **15 a**, 1016 [1960].

¹¹ A. E. BAINBRIDGE, H. E. SUSS u. H. WÄNKE, Geochim. Cosmochim. Acta **26**, 471 [1962].

¹² P. EBERHARDT u. D. C. HESS, Astrophys. J. **131**, 38 [1960].

¹³ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG, L. SCHULTZ u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **19 a**, 327 [1963].

¹⁴ H. STAUFFER, J. Geophys. Res. **67**, 2033 [1962].

¹⁵ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **17 a**, 1092 [1962].

¹⁶ J. ZÄHRINGER, Meteoritika 1965, im Druck.

¹⁷ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG, L. SCHULTZ u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **20 a**, 983 [1965].

¹⁸ O. A. SCHAEFFER u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta **19**, 94 [1960].

¹⁹ T. HAYAKAWA, H. HINTENBERGER u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **16 a**, 844 [1961].

²⁰ P. SIGNER u. A. O. NIER, Researches on Meteorites, herausgeg. von C. B. MOORE, John Wiley & Sons, New York 1962, p. 7.

²¹ H. HINTENBERGER u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **19 a**, 210 [1964].

²² C. A. BAUER, J. Geophys. Res. **68**, 6043 [1963].

²³ E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **15 a**, 1004 [1960].

²⁴ E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **16 a**, 379 [1961].

²⁵ H. VOSHAGE u. H. HINTENBERGER, Z. Naturforsch. **16 a**, 1042 [1961].

²⁶ M. HONDA, S. UMEMOTO u. J. R. ARNOLD, J. Geophys. Res. **66**, 3541 [1961].

²⁷ M. W. ROWE u. M. A. VAN DILLA, J. Geophys. Res. **66**, 3553 [1961].

²⁸ H. VOSHAGE u. H. HINTENBERGER, in Radioactive Dating, Int. Atomic Energy Agency, Wien 1963, S. 367.

²⁹ E. VILCSEK u. H. WÄNKE, in Radioactive Dating, Int. Atomic Energy Agency, Wien 1963, S. 381.

³⁰ H. VOSHAGE u. D. C. HESS, Z. Naturforsch. **19 a**, 341 [1964].

³¹ O. A. SCHAEFFER u. D. HEYMANN, J. Geophys. Res. **70**, 215 [1965].

³² M. E. LIPSCHUTZ, P. SIGNER u. E. ANDERS, J. Geophys. Res. **70**, 1473 [1965].

³³ F. L. WHIPPLE u. E. L. FIREMAN, Nature **183**, 1315 [1959].

³⁴ E. ANDERS, in The Solar System, herausgeg. von B. M. MIDDLEHURST u. G. P. KUIPER, The University of Chicago Press, Chicago 1963, Kap. IV, p. 402.

keinerlei Wirkung zeigen kann. In dem von den Meteoriten durchflogenen Raum existiert kosmischer Staub^{35, 36}, und ebenso haben wir im interplanetarischen Plasma eine sehr intensive Korpuskularstrahlung^{37, 38}. Staub und Plasma bewirken sicherlich eine Erosion der Meteorite. Diese Erosion kann aber für die gemessenen Bestrahlungsalter nicht bestimmend sein.

b) Leichtere Zerstörbarkeit der Steinmeteorite in Kollisionen

EBERHARDT und HESS¹² hatten vorgeschlagen, die geringeren Bestrahlungsalter der Steinmeteorite auf Grund ihrer gegenüber den Eisenmeteoriten leichteren Zerstörbarkeit in Kollisionen der Meteorite untereinander zu erklären.

Das Aufbrechen eines Eisenmeteoriten in einer solchen Kollision wurde zuerst durch VILČEK und WÄNKE²⁴ für den Meteorit Sikhote-Alin bewiesen. Inzwischen wurde ein solches sekundäres Aufbrechen noch für die Eisenmeteorite Odessa²⁹ und Canyon Diablo³⁹ gefunden. ZÄHRINGER¹⁶ berichtete kürzlich über Anzeichen eines ebensolchen Aufbrechens bei dem Hypersthen-Chondriten New Concord. Kollisionen, die bei den Eisenmeteoriten ein Abschlagen von Teilen des Meteoriten bewirken, können bei Steinmeteoriten zur vollständigen Zerstörung führen. Zerstörung der Steinmeteorite durch Kollisionen von Meteoriten untereinander könnte sicherlich die Ursache dafür sein, daß es kaum Steinmeteorite gibt, die den Eisenmeteoriten vergleichbare Bestrahlungsalter aufweisen.

Die große Zahl der „jungen“ Steinmeteorite wird auch durch dieses Modell nicht verständlich. Die Annahme einer Verkleinerung der mittleren Lebensdauern auf Grund von Kollisionen führt den Rechnungen ARNOLDS⁴⁰ zufolge zu einer extrem hohen, nicht akzeptierbaren Materiedichte in dem von den Meteoriten durchflogenen Raum, falls man auf diese Weise Übereinstimmung der berechneten Lebensdauer mit den gemessenen Bestrahlungsaltern erreichen will.

Die beiden Hauptklassen der Steinmeteorite zeigen ferner eine sehr verschiedene Verteilung der Bestrahlungsalter (EBERHARDT und GEISS⁴¹ sowie HINTENBERGER, KÖNIG, SCHULTZ und WÄNKE¹³). Übrigens gibt es eine Klasse von Steinmeteoriten, die Aubrite, für die EBERHARDT, EUGSTER und GEISS⁴² Bestrahlungsalter gemessen haben, die wesentlich über denen der übrigen Steinmeteorite liegen. Für einen Vertreter dieser Gruppe, nämlich Norton County, fanden BEGEMANN, GEISS und HESS⁴³ schon vor längerer Zeit ein den Eisenmeteoriten nahe kommendes Alter von 220 Mill. Jahren. Dabei handelt es sich bei Norton County um einen besonders zerbrechlichen Meteorit, außerdem besitzt er die größte Masse aller bekannten Steinmeteorite. Die Kollisionshäufigkeit muß aber proportional $m^{2/3}$ sein.

c) Bremsung der Meteorite durch den Poynting-Robertson-Effekt sowie durch Staub und interplanetarisches Plasma

Steinmeteorite erleiden auf Grund ihrer gegenüber den Eisenmeteoriten geringeren Dichte ($3,5 \text{ g pro cm}^3$ gegenüber $7,8 \text{ g/cm}^3$) eine stärkere Bremsung durch den POYNTING-ROBERTSON-Effekt sowie durch das interplanetarische Plasma und den interplanetarischen Staub. Außerdem sind die Eisenmeteorite wegen ihrer wesentlich höheren durchschnittlichen Masse begünstigt. Im Gegensatz zu Eisenmeteoriten sind Steinmeteorite über 100 kg bereits selten.

Die Abnahme der großen Halbachse a auf Grund des POYNTING-ROBERTSON-Effektes für eine Kugel mit schwarzer Oberfläche, dem Radius r und der Dichte ρ ist gegeben durch (siehe⁵)

$$a \cdot \Delta a = \frac{0,7 \cdot 10^{-7}}{r \cdot \rho} \Delta t,$$

a in astronomischen Einheiten, r in cm, t in Jahren.

Für einen Steinmeteoriten mit $a=1$ und einer Masse von 10 kg ergibt sich in 10^7 Jahren nur ein Δa von 0,023 AE. Der POYNTING-ROBERTSON-Effekt ist also zu klein, um einen merklichen Einfluß auszuüben.

³⁵ H. C. VAN DE HULST, *Astrophys. J.* **105**, 471 [1947].

³⁶ C. W. ALLEN, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **106**, 137 [1947].

³⁷ L. BIERMANN, *Z. Astrophys.* **29**, 274 [1951].

³⁸ M. NEUGEBAUER u. C. W. SNYDER, *Science* **138**, 1095 [1962].

³⁹ D. HEYMANN, M. E. LIPSCHUTZ, B. NIELSEN u. E. ANDERS, Vorabdruck 1965, erscheint voraussichtlich *J. Geophys. Res.*

⁴⁰ J. R. ARNOLD, *The Origin of Meteorites as Small Bodies II*, Vorabdruck 1964, erscheint *Astrophysical J.*

⁴¹ P. EBERHARDT u. J. GEISS, in *Isotopic and Cosmic Chemistry*, North Holland Publish. Co., Amsterdam 1964.

⁴² P. EBERHARDT, O. EUGSTER u. J. GEISS, *Radiation Ages of Aubrites*. Vorabdruck 1965; erscheint voraussichtlich *J. Geophys. Res.*

⁴³ F. BEGEMANN, J. GEISS u. D. C. HESS, *Phys. Rev.* **107**, 540 [1957].

Die Bremsung durch interplanetarisches Plasma und interplanetarischen Staub könnte unter bestimmten Voraussetzungen stärker sein. Von allen Bremswirkungen müßten die kleineren Meteorite entsprechend stärker betroffen werden. Es gibt jedoch zahlreiche Steinmeteorite mit geringer Masse, die ein relativ hohes Bestrahlungsalter aufweisen.

Abgesehen von einer geringen Verschiebung der Meteoritenbahnen, ist auf diese Weise kein wesentlicher direkter Einfluß auf die Lebensdauer der Meteorite zu erwarten. Bereits eine kleine Verschiebung der Meteoritenbahn kann allerdings manchmal entscheidend sein. Eine zunächst die Erdbahn eben noch kreuzende Meteoritenbahn könnte dann vollständig innerhalb der Erdbahn verlaufen. Andererseits kann eine eben außerhalb der Erdbahn liegende Meteoritenbahn kreuzend werden.

d) Unterschiedliche Lebensdauer auf Grund verschiedener Verteilung der Bahnelemente

Mit einer oder mehrerer der in a, b und c behandelten Hypothesen kann man vermutlich die Seltenheit hoher Bestrahlungsalter unter den Steinmeteoriten erklären; kaum jedoch das starke Vorherrschen der sehr geringen Bestrahlungsalter, solange man an einem Ursprung im Asteroidengürtel festhält.

Unter der Voraussetzung von verschiedenen Bahnen für die Stein- und Eisenmeteorite können ohne Schwierigkeit stark unterschiedliche Werte der Lebensdauer erhalten werden. Wie eingangs erwähnt, schlug UREY³ solche unterschiedlichen Ausgangsbahnen vor, und zwar vom Mond ausgehende, relativ nahe der Erdbahn verlaufende Bahnen für die Steinmeteorite und im Asteroidengürtel verlaufende Bahnen für die Eisenmeteorite.

In der grundlegenden Arbeit von ÖPIK⁵ ergab sich die mittlere Lebensdauer eines Meteoriten gegenüber Planeteneinfang zu

$$T = a^{3/2} / P \quad (1)$$

a in astronomischen Einheiten, T in Jahren.

Hierbei ist P die Kollisionswahrscheinlichkeit des Meteoriten mit dem Planeten. Werden mehrere Planetenbahnen gekreuzt, so ist anstelle von P die Summe der Kollisionswahrscheinlichkeiten $\sum P_i$ aller in Frage kommenden Planeten einzusetzen.

$$P = r^2 U / (\pi \sin i |U_x|)$$

$$\text{mit } r = Q \sqrt{1 + 2m/MQ} U_2. \quad (2)$$

Für die Erde ist $Q = 4,26 \cdot 10^{-5}$ und $2m/(MQ) = 0,14$, m Planetenmasse, M Sonnenmasse. U ist die Relativgeschwindigkeit von Planet und Meteorit, im Fall der Erde also die geozentrische Geschwindigkeit. (U jedoch ohne Berücksichtigung der Wirkung des Gravitationsfeldes des Planeten.)

In Einheiten der Bahngeschwindigkeit (Erde = 30 km/s) des Planeten gilt

$$U = \sqrt{3 - 1/A - 2\sqrt{A(1-e^2)}} \cos i,$$

$$U_x = \sqrt{2 - 1/A - A(1-e^2)},$$

$$U_y = \sqrt{A(1-e^2)} \cos i - 1,$$

$$U_z = \sqrt{A(1-e^2)} \sin i.$$

Hierbei ist A die große Halbachse der Meteoritenbahn in Einheiten der Planetenhalbachse $A = a/a_0$; e die Exzentrizität und i die Neigung der Meteoritenbahn zur Bahnebene des Planeten. U_x , U_y und U_z sind die Komponenten der geozentrischen Geschwindigkeit in der Richtung Sonne, Erde, tangential zur Erdbahn und senkrecht zur Erdbahn. Für U_x und U_z kommen in jeder Meteoritenbahn beide Vorzeichen vor. $U_y > 0$ heißt, daß der Meteorit die Erde auf ihrer Bahn überholt; ein solcher Meteorit fällt, wie man leicht einsieht, bevorzugt am Nachmittag (12 bis 24 h Ortszeit des Falles). $U_y < 0$ heißt, der Meteorit wird von der Erde eingeholt, er fällt bevorzugt vormittags (0 bis 12 h). Bezüglich genauerer Details sei auf die Arbeit von ÖPIK⁵ verwiesen.

In Tab. 1 sind einige nach (1) berechnete Lebensdauern für verschiedene Bahnelemente angegeben. Die Werte passen gut zu den Bestrahlungsaltern, wenn man für die Eisenmeteorite die Asteroiden, für die Steinmeteorite aber den Mond als Mutterkörper ansieht.

Um einen Körper aus dem Asteroidengürtel bis zur Erdbahn zu bringen, ist jedoch eine minimale Geschwindigkeitsänderung von 5 km/s erforderlich. Dieser Wert ist zu hoch, als daß er durch Kollisionen erreicht werden könnte. Bei dem Zweistufenmodell von ARNOLD⁴⁴ ist nur eine geringere Geschwindigkeitsänderung notwendig. Nach diesem Modell sollen im Asteroidengürtel erzeugte Meteorite zunächst nur dahin gebracht werden, daß sie die Marsbahn erreichen. Durch nahe Vorbeigänge am Mars erleiden sie dann weitere Bahnänderungen, bis sie schließlich die Erdbahn kreuzen.

⁴⁴ J. R. ARNOLD, in *Isotopic and Cosmic Chemistry*, North Holland Publish. Co., Amsterdam 1964.

Startelemente					q_1	q'_1	$\frac{\%}{\text{Einfang}}$ durch Erde	T nach ARNOLD ⁴⁴ in 10^6 J.	T nach ÖPIK ⁵ in 10^6 J.
A_1	e_1	$\sin i_1$	U_1	$(U_x)_1$					
Bahnen, die Erd- und Marsbahn kreuzen									
2,4239	0,6762	0,1808	0,5717	0,5151	0,79	4,06	28	77	660
1,9243	0,5896	0,0200	0,4908	0,4743	0,79	3,06	30	42	51
1,9238	0,5896	0,1808	0,5268	0,4744	0,79	3,06	26	85	450
1,9244	0,5896	0,3500	0,6183	0,4743	0,79	3,06	27	130	820
1,9240	0,5896	0,8000	1,0665	0,4743	0,79	3,06	30	320	920
1,4241	0,4454	0,1808	0,4440	0,3953	0,79	2,06	36	64	250
Bahnen, die nur die Marsbahn kreuzen									
2,5792	0,5735	0,1808	0,5617	0,5228	1,10	4,06	14	1600	8500
2,0791	0,4709	0,0200	0,4574	0,4531	1,10	3,06	37	880	690
2,0592	0,4852	0,1808	0,5130	0,4763	1,06	3,06	27	750	6000
2,0789	0,4709	0,1808	0,4917	0,4531	1,10	3,06	24	1700	5900
2,1192	0,4432	0,1808	0,4519	0,4043	1,18	3,06	20	2700	5700
2,1892	0,3790	0,1808	0,3779	0,3062	1,32	3,06	8	3300	6200
2,0793	0,4709	0,3500	0,5825	0,4530	1,10	3,06	10	4000	10600
1,5791	0,3033	0,1808	0,3597	0,3067	1,10	2,06	36	760	3200
Bahnen, die vom Mond ausgehen (Geschwindigkeit U)									
			0,0333				50	12	0,3
			0,1000				45	16	5
			0,2000				47	34	20
			0,3000				39	60	100
			0,5000				19	33	300
1,0100	0,0200	0,0200	0,0411	0,0194			66	8	0,3

Tab. 1. Lebensdauer der Meteorite mit unterschiedlichen Startelementen nach ÖPIK und ARNOLD (entnommen ARNOLD⁴⁴).

Im Gegensatz zu ÖPIK⁵ hat ARNOLD^{40, 44, 45} nicht nur die tatsächlichen Kollisionen der präsumptiven Meteorite durch die Planeten, sondern auch die Störungen durch die Annäherung an letztere berücksichtigt. Mit Hilfe einer Monte-Carlo-Methode konnte er zeigen, daß die Lebensdauer von Asteroiden oder deren Bruchstücken, die die Marsbahn kreuzen, von einem Wert von ca. $7 \cdot 10^9$ Jahren (nach ÖPIK ohne Berücksichtigung von Störungen) auf ca. $1 \cdot 10^9$ Jahre erniedrigt wird (siehe Tab. 1).

Die aus diesem Modell resultierenden Werte für die Lebensdauer der einzelnen Meteorite stimmen sehr gut mit der Verteilung der Bestrahlungsalter der Eisenmeteorite überein. Allerdings besitzt der überwiegende Teil der Eisenmeteorite ein praktisch einheitliches Bestrahlungsalter. Auf diesen Umstand hat zunächst WÄNKE⁶ hingewiesen. VOSHAGE und HINTENBERGER²⁸ fanden später, daß es nicht eine, sondern zwei relativ nahe beieinander liegende Gruppen von Alterswerten gibt, in die die Mehrzahl aller Oktaedrite fallen. (Die Oktaedrite machen ca. 80% aller Eisenmeteorite aus.) Hexaedrite und Ataxite,

die beiden übrigen Typen von Eisenmeteoriten, zeigen sehr unterschiedliche Alter zwischen $4,5 \cdot 10^6$ (BRAUNAU²⁹) und $2,2 \cdot 10^9$ Jahren (DEEP SPRINGS²⁸). Man kann also nicht streng von einer Verteilung der Bestrahlungsalter der Eisenmeteorite sprechen. Dennoch bleibt die Ähnlichkeit der Werte für die berechneten mittleren Lebensdauern und die gemessenen Bestrahlungsalter ein gewichtiges Argument für die Richtigkeit des Modells.

ANDERS⁴ vertritt die Auffassung, daß die Mehrzahl aller Meteorite, vor allem der Steinmeteorite, aus den die Marsbahn kreuzenden sogenannten Marsasteroiden abstammt, von denen etwas über 30 bekannt sind. Dieses Modell ist in der Tat sehr attraktiv. Für die Bruchstücke dieser Asteroide sind keinerlei Geschwindigkeitsänderungen mehr erforderlich, um auf Bahnen zu kommen, die die Marsbahn kreuzen. Allen Bruchstücken aus irgendwelchen Kollisionen wird also der erste Schritt im Modell von ARNOLD^{40, 44} erspart. Sie haben somit gegenüber den Bruchstücken von Ringasteroiden die ganz erheblich günstigere Ausgangsposition zur Erreichung der Erde.

⁴⁵ J. R. ARNOLD, The Origin of Meteorites as Small Bodies III. Vorabdruck 1964; erscheint Astrophys. J.

Wie ANDERS⁴ ausführte, würden Steinmeteorite auch die kleinere Geschwindigkeitsänderung von ca. 1–3 km/s für den ersten Schritt in ARNOLDS Modell^{40, 44} nicht oder nur unter deutlichen Stoßmerkmalen überstehen. Die Ringasteroide scheiden als Mutterkörper zumindest für die Mehrheit der Steinmeteorite aus. Gegen die Marsasteroide spricht die Tatsache, daß die Lebensdauer ihrer etwaigen Bruchstücke noch immer um beinahe zwei Größenordnungen über dem gemessenen Bestrahlungsalter liegt. Die Mondhypothese erhielt einen starken Stoß, als die ersten exakt bestimmten Bahnelemente eines Meteoriten bekannt wurden. Für den Bronzit-Chondrit Pribram, dessen Fall mit Hilfe einer hierzu installierten Anordnung photographisch festgehalten wurde (CEPLECHA, RAJCHL und SEHNAL⁴⁶), ergab sich eine geozentrische Geschwindigkeit U von 17 km/s. Es erscheint unmöglich, in einer durch Einschläge verursachten Eruption derartige Geschwindigkeiten zu erreichen.

Nach ARNOLD⁴⁴ führt jedoch für Körper, die mit geringer Geschwindigkeit U_0 das Schwerfeld von Mond und Erde verlassen, die Berücksichtigung von Störungen durch die Erde zu einem Anwachsen von U . Gegenüber den Formeln von ÖPIK⁵ ergibt sich auch eine erhebliche Erhöhung der mittleren Lebensdauer (siehe Tab. 1). Es sollte jedoch eine sehr große Zahl von Meteoriten mit ganz jungen Bestrahlungsaltern geben. Die Abbildungen 1–4 zeigen die Verteilung der gemessenen Bestrahlungsalter von Bronzit- bzw. Hypersthen-Chondriten. Mehr als 90% dieser Meteorite haben Alter über 1 Mill. Jahre.

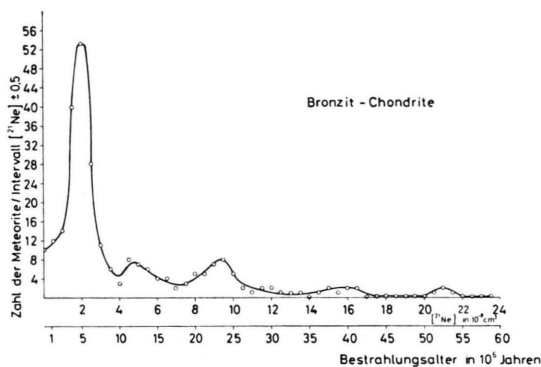


Abb. 1. Bestrahlungsalter aller bisher untersuchten 127 Bronzit-Chondrite (Fälle und Funde). Die Meßwerte wurden in Schritten von $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ }^{21}\text{Ne}$ mit einer Intervallbreite von $([^{21}\text{Ne}] \pm 0,5) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ }^{21}\text{Ne}$ abgefahren.

⁴⁶ Z. CEPLECHA, J. RAJCHL u. L. SEHNAL, Bull. Astron. Inst. Czechoslov. 10, 137 [1959].

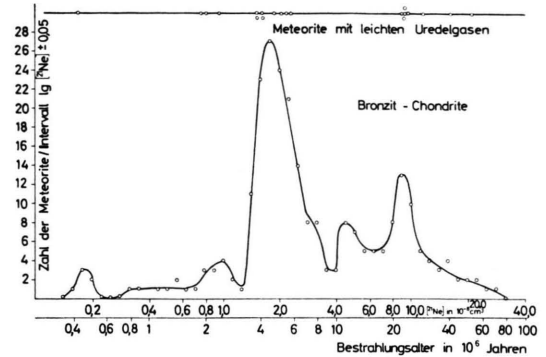


Abb. 2. Bestrahlungsalter aller bisher untersuchten 127 Bronzit-Chondrite (Fälle und Funde). Die Meßwerte wurden in Schritten von $10^{0,05} \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ }^{21}\text{Ne}$ mit einer Intervallbreite $(\lg [^{21}\text{Ne}] \pm 0,05) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ }^{21}\text{Ne}$ abgefahren. Außerdem sind die ^{21}Ne -Werte der Meteorite mit leichten Uredelgasen gesondert eingetragen.

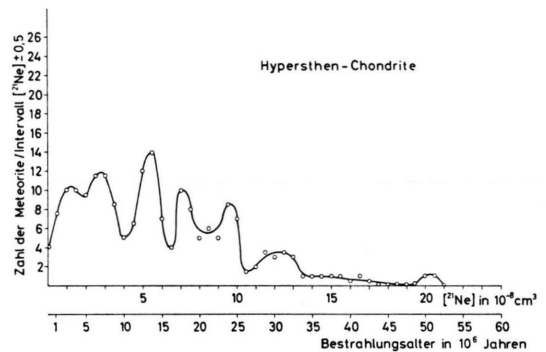


Abb. 3. Bestrahlungsalter aller bisher untersuchten 97 Hypersthen-Chondrite (Fälle und Funde). Die Meßwerte wurden in Schritten von $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ }^{21}\text{Ne}$ mit einer Intervallbreite von $([^{21}\text{Ne}] \pm 0,5) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ }^{21}\text{Ne}$ abgefahren.

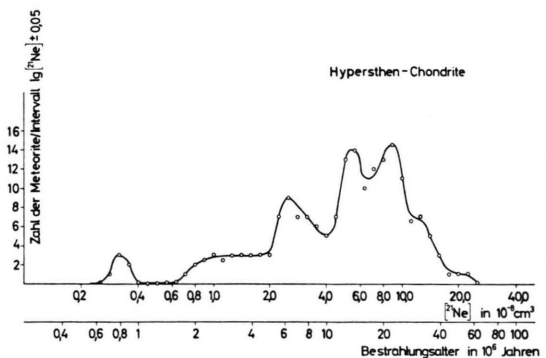


Abb. 4. Bestrahlungsalter aller bisher untersuchten 97 Hypersthen-Chondrite (Fälle und Funde). Die Meßwerte wurden in Schritten von $10^{0,05} \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ }^{21}\text{Ne}$ mit einer Intervallbreite von $(\lg [^{21}\text{Ne}] \pm 0,05) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ }^{21}\text{Ne}$ abgefahren.

Das letzte große meteoritenerzeugende Ereignis liegt also mehr als 1 Mill. Jahre zurück. Die große Zahl von Bruchstücken mit geringer Lebensdauer von

einigen 100 000 bis zu 1 Mill. Jahre braucht man daher nicht zu berücksichtigen. ARNOLD⁴⁰ hat diesem Umstand in einer späteren Arbeit Rechnung getragen (Abb. 5, Verteilung der Lebensdauer nach ARNOLD^{40, 44, 45}). Die Rechnungen ARNOLDS zeigen, daß die Annahme eines Mondursprungs der Steinmeteorite die beste Übereinstimmung zwischen den errechneten Lebensdauern und den gemessenen Bestrahlungsaltern liefert.

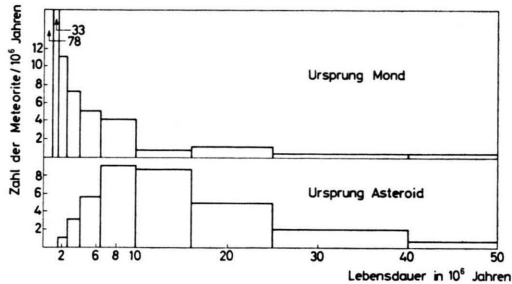


Abb. 5. Verteilung der Lebensdauer der Meteorite nach dem Modell von ARNOLD (entnommen aus ARNOLD⁴⁰).

ANDERS⁴ verneint unter Berufung auf eine theoretische Betrachtung ÖPIKS⁴⁷ und auf Grund von Versuchen von GAULT⁴⁸, welcher die Bildung von Einschlagkratern experimentell simulierte, die Möglichkeit, Mondmaterial auf die notwendige Entweichgeschwindigkeit aus dem Erd-Mond-System zu beschleunigen. Er läßt jedoch Kometeneinschläge für diesen Mechanismus unberücksichtigt.

UREY⁴⁹ favorisiert in einer kürzlich erschienenen Arbeit wiederum einen Mondursprung der Steinmeteorite, hauptsächlich wegen seiner schon eingangs angeführten Argumente. Er zitiert dabei eine noch unveröffentlichte Arbeit von LIN⁵⁰, in der gezeigt wird, daß Kometeneinschläge Mondmaterial beträchtlich über die erforderliche Entweichgeschwindigkeit beschleunigen können.

ZÄHRINGER¹⁶ hat sich in seiner letzten Arbeit auf Grund der Verteilung der Bestrahlungsalter der Steinmeteorite, von denen der Großteil von ihm und von uns bestimmt wurde, der Argumentation ARNOLDS^{40, 44, 45} angeschlossen und zieht einen Mondursprung sehr ernstlich in Betracht. Er diskutiert die Möglichkeit, daß die Hypersthen-Chondrite den oberen Schichten des Mondes entstammen, und die Bronzit-Chondrite aus größeren Tiefen kommen.

Erstere würden daher häufig in zahlreichen kleineren, letztere nur selten in einigen großen Einschlägen emittiert. Obwohl man die Verteilung der Bestrahlungsalter für die beiden Hauptklassen der Steinmeteorite so deuten könnte, fällt es schwer, daran zu glauben. Wir werden hierauf später nochmals zurückkommen.

2. Hinweise auf die Herkunft der Chondrite aus den Außenschichten ihrer Mutterkörper

Es gibt eine Reihe von Merkmalen, die darauf hindeuten, daß die Chondrite aus den Außenschichten von größeren Körpern stammen. Alle Meteorite zeigen eine mehr oder minder große Porosität (Porenvolumen 0–20%). Die meisten von ihnen können daher in ihrer heutigen Form keinem allzu hohen Druck ausgesetzt gewesen sein. Der polymiktische Charakter vieler Chondrite deutet ebenso auf einen oberflächennahen Ursprung hin. Mindestens 15% aller Bronzit-Chondrite (19 aus etwa 125 untersuchten, siehe Tab. 2) enthalten zumindest in einem

Urgashaltige Bronzit- Chondrite	Σ He in $10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$	Σ Ne in $10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$	He Ne	Uhr- zeit des Falles	Lit.
Bielo- krynitschie	~ 2000	26,2	~ 80	18.00	70
Breitscheid	17900	221	81	15.45	71
Cangas de Onis	44000	317	139	11.00	70
Fayetteville	2250000	6720	335	11.58	72
Gütersloh	95500	151	634	20.00	70
Hainaut	7000	45	150	20.30	70
Kilbourn	99700	245	407	17.00	70
Nulles	~ 2500	23	~ 110	17.30	70
Pantar	80200	190	420	20.45	13
Pultusk	6330	23,1	274	19.00	13
Tabor	6900	134	515	20.00	13
Timochin	< 1000	~ 1,5	—	15.00	70
Tysnes Island	96000	493	195	20.30	70
Weston	277000	686	404	6.30	70
Elm Creek	175000	526	334	Fund	17
Dimmit	< 1000	14,2	—	Fund	17
Cavour	< 500	~ 1,5	—	Fund	17
Coolidge	~ 8000	—	—	Fund	16
Culbertson	29000	42	—	Fund	16

Tab. 2. Alle bisher bekannten Bronzit-Chondrite, die leichte Uredelgase enthalten (19 auf 127 bisher untersuchten Meteorite). Mit Ausnahme von Fayetteville, Coolidge und Culbertson wurden sämtliche Meteorite in Mainz durch HINTENBERGER und Mitarbeiter als uredelgashaltig entdeckt.

⁴⁷ E. J. ÖPIK, Proc. Geophysical Laboratory, 1961, Report No. VCRL-6438.

⁴⁸ D. M. GAULT, unveröffentlicht, 1964 (zitiert bei ANDERS⁴).

⁴⁹ H. C. UREY, Science **147**, 1262 [1965].

⁵⁰ S. C. LIN, unveröffentlicht (zitiert bei UREY⁴⁹).

Stück größere Mengen von sogenannten Uredelgasen, vor allem Helium und Neon mit solaren Element- und Isotopenverhältnissen. Aus diesen Uredelgasgehalten läßt sich für die Bronzit-Chondrite ein weiterer Hinweis auf eine Herkunft aus den Oberflächenschichten ihres Mutterkörpers ableiten.

Abb. 1 und 2 zeigen die Verteilung der Bestrahlungsalter der Bronzit-Chondrite. Es sind mindestens drei Gruppierungen deutlich zu erkennen, und zwar bei etwa 2, 3, 4, 5 und 22 Mill. Jahren (Abb. 2). Diese Gruppierungen der Bestrahlungsalter entsprechen sicherlich Einzelereignissen, wobei ein Ereignis vor etwa 4,5 Mill. Jahren etwa 50% aller heutigen Meteorite liefert. Die relativ großen Halbwertsbreiten sind durchaus verständlich, da auch die Bestrahlungsintensitäten in den Meteoritproben bis zu einem Faktor 2 variieren, wie vor allem die Tritiummessungen⁸⁻¹¹, aber auch Messungen anderer radioaktiver Isotope^{23, 26, 27, 51-56} zeigen, welche durch Einwirkung der Höhenstrahlung auf die Meteorite gebildet werden.

In Abb. 2 sind die Bestrahlungsalter der 19 bekannten Bronzit-Chondrite eingetragen, die Uredelgase enthalten. Wie ersichtlich, enthält jede isolierbare Altersgruppe auch Meteorite mit Uredelgasgehalt, und zwar mit etwa vergleichbaren relativen Häufigkeiten.

Ausgehend von der Tatsache, daß die leichten Uredelgase in den Bronzit-Chondriten jeweils nur in den äußersten Schichten der Meteoritkörner sitzen, und zwar in allen Hauptbestandteilen (HINTENBERGER, VILCSEK und WÄNKE⁵⁷), sowie auf Grund der solaren Zusammensetzung der Uredelgase, kam ich zur Überzeugung, daß die Quelle der Uredelgase im Sonnenwind zu suchen ist (WÄNKE⁵⁸). Die Gasbeladung der einzelnen Meteoritkörner durch den Sonnenwind kann entweder im Weltraum oder auf der Oberfläche eines atmosphärelosen Körpers stattgefunden haben. Im letzteren Fall ist natürlich eine ständige Umwälzung der noch losen Körner erforder-

lich. Ich hatte hierbei die Vermutung ausgesprochen, daß in beiden Fällen ein Körper von etwa der Masse eines größeren Asteroiden erforderlich ist, um entweder die im Raum beladenen Körner aufzusammeln, oder um die losen Körner an der Oberfläche nicht durch Einschläge zu verlieren. Dabei hatte ich auch darauf hingewiesen, daß aus diesem Grunde der Mond ein sehr geeigneter Körper wäre, hingegen die Marsasteroide wegen ihrer Kleinheit hierfür kaum in Frage kämen*.

Es muß zweifelsohne möglich sein, aus einer Staubwolke zunächst kleine Körper zu schaffen, die durch weiteres Aufsammeln von Material schließlich Planetengröße erreichen. Das Vorhandensein unseres Planetensystems demonstriert diese Möglichkeit; die dabei ablaufenden Mechanismen sind jedoch noch weitgehend ungeklärt. Wenn der Staub zu dieser Zeit schon mit den Uredelgasen beladen war, so ist es auch möglich, einen Körper aufzubauen, der aus uredelgashaltigem Material besteht, unabhängig davon, welche Größe der Körper schließlich erreicht.

Der Uredelgasgehalt ist jedoch stets mit einer sogenannten Hell-Dunkel-Struktur verbunden⁵⁹, wobei nur die dunklen Anteile Uredelgas enthalten, sowie auch merkliche Mengen von elementarem Kohlenstoff (Pantar 0,4%)⁶⁰, welcher die Hauptursache für die Dunkelfärbung ist. Das uredelgashaltige Material liegt nur in sehr engen Zonen vor. Es ist mineralogisch und auch chemisch mit dem angrenzenden uredelgasfreien Material fast völlig identisch. Hierbei liegen entweder in dunklen Gebieten inselartige helle Agglomerate oder aber helle und dunkle Zonen wechseln einander ab (siehe Bilder der Meteoriten Pantar bei SUESS, WÄNKE und WLOTZKA⁶⁰ und Breitscheid bei HENTSCHEL⁶¹). Häufig sind andere Stücke desselben Meteoriten uredelgasfrei.

Hierbei wurden wohl helle uredelgasfreie Agglomerate in loses, dunkles uredelgashaltiges Material eingebettet, bzw. es sind Zonen von hellem und dunklem Material an den Grenzflächen sanft durch-

⁵¹ M. HONDA, S. UMEMOTO u. J. R. ARNOLD, *J. Geophys. Res.* **66**, 3541 [1961].

⁵² H. E. SUESS u. H. WÄNKE, *Geochim. Cosmochim. Acta* **26**, 475 [1962].

⁵³ P. S. GOEL u. T. P. KOHMAN, *Science* **136**, 875 [1962].

⁵⁴ R. W. STOENNER, O. A. SCHAEFFER u. R. DAVIS, *J. Geophys. Res.* **65**, 3025 [1960].

⁵⁵ E. L. FIREMAN u. J. DEFELICE, *J. Geophys. Res.* **66**, 3547 [1961].

⁵⁶ R. DAVIS, R. W. STOENNER u. O. A. SCHAEFFER, in *Radioactive Dating*, Int. Atomic Energy Agency, Wien 1963, S. 381.

⁵⁷ H. HINTENBERGER, E. VILCSEK u. H. WÄNKE, *Z. Naturforschg.* **20 a**, 939 [1965].

⁵⁸ H. WÄNKE, *Z. Naturforschg.* **20 a**, 946 [1965].

* ANDERS hat mich freundlicherweise darauf aufmerksam gemacht, daß der in meiner letzten Arbeit⁵⁸ angegebene Durchmesser des größten Marsasteroiden, der einer Tabelle von ÖPIK⁵ entnommen war, um etwa einen Faktor 2 zu hoch ist. Der richtige Durchmesser von Aethra beträgt nur 45 km, die minimale Entweichgeschwindigkeit ist somit nur ca. 30 m/s (und nicht wie angegeben 60 m/s).

⁵⁹ H. KÖNIG, K. KEIL, H. HINTENBERGER, F. WLOTZKA u. F. BEGEMANN, *Z. Naturforschg.* **16 a**, 1124 [1961].

⁶⁰ H. E. SUESS, H. WÄNKE u. F. WLOTZKA, *Geochim. Cosmochim. Acta* **28**, 595 [1964].

⁶¹ H. HENTSCHEL, *Geochim. Cosmochim. Acta* **17**, 323 [1959].

einander geraten. Die hellen inselartigen Einschlüsse lagen wahrscheinlich schon zum Zeitpunkt der Edelgasbeladung als kompakte Agglomerate vor und blieben deshalb frei von Uredelgas. Es gibt auch Stücke, die praktisch nur dunkles Material enthalten.

Es ist schwierig, sich die Genese eines Körpers vorzustellen, der im Inneren mehrere Gebiete mit dieser Hell-Dunkel-Struktur enthält, deren dunkle Anteile uredelgashaltig sind, der aber andererseits dazwischenliegende weite Gebiete nur aus hellem uredelgasfreiem Material besitzt.

Ein solcher Körper wäre jedoch notwendig, um die durch die Edelgasmessungen gefundenen Tatsachen zu erklären, da, wie vorhin erwähnt, bei allen Ereignissen, die Bronzit-Chondrite lieferten, stets solche mit Uredelgasgehalt produziert wurden.

Diese Parallelität wird jedoch sofort verständlich, wenn man annimmt, daß die Bronzit-Chondrite von den Oberflächenschichten eines Körpers stammen, und die Edelgasbeladung erst erfolgte, nachdem die Bildung dieses Körpers abgeschlossen, bzw. nahezu abgeschlossen war. Der Uredelgasgehalt ist dann auf das Material der obersten Schichten beschränkt, während die etwas tieferen Schichten uredelgasfrei bleiben. Durch Einschläge werden diese beiden Schichten bis zu einer gewissen Maximaltiefe miteinander vermengt. Bei jedem großen Einschlag, der zu einer Eruption führt, muß neben tiefer gelegenem uredelgasfreiem Material auf jeden Fall auch Material der oberen Schichten enthalten sein.

Auf Grund der mit dem Uredelgasgehalt mancher Bronzit-Chondrite verbundenen Erscheinungen sowie aus der Parallelität der Gruppierungen der Bestrahlungsalter von Meteoriten mit und ohne Uredelgasgehalt ist man nahezu gezwungen, eine Herkunft dieser Meteorite aus den äußeren Zonen eines größeren Körpers anzunehmen.

Bei der von ZÄHRINGER¹⁶ entwickelten Vorstellung mußte über den Schichten, deren Material der Zusammensetzung der Bronzit-Chondrite entspricht, eine andere Schicht liegen, aus der die Hypersthen-Chondrite stammen. Dies wäre aber nur schwer verständlich.

Ich habe vor einiger Zeit genau das umgekehrte Modell vorgeschlagen¹³. Beide Vorstellungen scheinen nicht haltbar zu sein. Bronzit- und Hypersthen-Chondrite sind einander zwar in ihrem Aufbau sehr ähnlich, in ihrem Gehalt an Eisen (22 bzw. 28%)

und einigen anderen Elementen aber verschieden. Da man überdies keine Übergänge zwischen den beiden Typen kennt, hat man wohl zwei verschiedene Mutterkörper für sie anzunehmen. Dies wurde unter anderem von ANDERS⁴ herausgestellt. ANDERS⁶² hat mich auch darauf hingewiesen, daß die Mars-asteroide Bruchstücke größerer Körper sind, auf denen eine Edelgasbeladung nach dem von mir vorgeschlagenen Modell doch möglich sein sollte. Eine solche Edelgasbeladung könnte somit prinzipiell auch auf den Protokörpern der Marsasteroide stattgefunden haben. Für die Bronzit-Chondrite ist der Uredelgasgehalt samt den damit verbundenen Merkmalen nach dem oben gesagten dennoch kaum erklärbar. Beim Zerschlagen eines Körpers wird neue Oberfläche geschaffen, die dann keine Schichten mit uredelgasartigem Material besitzt. Es wäre unverständlich, warum jede Kollision, die Meteorite erzeugt, stets auch Bruchstücke aus den der ursprünglichen Oberfläche nahe liegenden Zonen liefern sollte.

3. Weitere Ansätze zur Ermittlung des Ursprungs der Steinmeteorite

a) Beziehungen zwischen Fallzeit und wahrscheinlicher Bahn

Sowohl unter den Bronzit- als auch unter den Hypersthen-Chondriten gibt es viele Fälle mit einem Bestrahlungsalter von unter 5 Mill. Jahren, ja sogar einige unter 1 Million Jahren. Für diese relativ jungen Meteorite sollten, falls sie tatsächlich ihren Ursprung außerhalb der Erdbahn haben (Mars- oder Ringasteroide), die Veränderungen ihrer Bahnen auf Grund von Störungen durch die Erde am geringsten sein.

Die Bahnen dieser Meteorite müßten somit ein Perihel $q = A(1 - e) < 1$ und ein Aphel $q' = A(1 + e) > a_{\text{Mars}} = 1,52$ zeigen. Während q meistens nur wenig unterhalb 1 liegen wird (die Wahrscheinlichkeit für den Einfang des Meteoriten durch die Erde wächst, je mehr q gegen 1 geht; schleifender Schnitt), sind für q' Werte zwischen 2 und 4 am häufigsten zu erwarten.

Leider sind bis heute nur für einen einzigen Meteoriten die genauen Werte seiner Bahnelemente bekannt. Außer für den Meteoriten P r i b r a m¹⁶ gibt es noch für einige weitere Meteorite allerdings recht unsichere Werte ihrer Bahnelemente, die aus visuellen Beobachtungen stammen⁶³.

⁶² E. ANDERS, private Mitteilung.

⁶³ E. L. KRINOV, Principles of Meteoritics, englische Übersetzung, Pergamon Press, London 1960.

Meteorit	Klasse	Fallzeit	a	e	$\sin i$	q	q'	U	U_x	U_y	U_z	x
Pribram	B	20,30	2,42	0,68	0,18	0,79	4,06	0,57	0,51	0,14	0,21	0,61
Pultusk	B	19,00	1,78	0,45	0,01	0,98	2,58	0,24	0,14	0,19	0,02	0,88
Archie	B	16,30	1,52	0,47	0,13	0,81	2,24	0,41	0,37	0,09	0,14	0,62
Kunashak	H	8,14	1,83	0,45	0,19	1,00	2,84	0,30	0	0,19	0,23	0,86
Nikolskoje	H	18,22	3,8	0,77	0,07	0,88	6,70	0,49	0,42	0,25	0,18	0,75

Tab. 3. Meteorite, von denen Angaben über ihre Bahnelemente vorliegen. x ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß der Meteorit nachmittags in Gebieten mit einer geographischen Breite von unter 60° fällt. $(1-x)$ ist demnach die Wahrscheinlichkeit dafür, daß der Meteorit vormittags in Gebieten mit einer geographischen Breite von unter 60° fällt. Gebiete mit einer geographischen Breite von mehr als 60° blieben unberücksichtigt.

In Tab. 3 sind die Bahnelemente dieser Meteorite sowie deren geozentrische Geschwindigkeitskomponenten aufgeführt. Aus den Werten für U_x , U_y und U_z wurde die Wahrscheinlichkeit x dafür berechnet, daß die Ortszeit des Meteoritenfalls zwischen 12 und 24 h liegt. Hierbei wurde von der Tatsache ausgegangen, daß fast alle beobachteten Meteoritenfälle in Gebieten mit einer geographischen Breite von unter 60° liegen. Der Einfluß des Schwerfelds der Erde blieb unberücksichtigt. Wegen der ziemlich hohen Werte von U bleiben die durch diese Vernachlässigung bedingten Verfälschungen klein. Alle aufgeführten Meteorite zeigen eine starke Bevorzugung des Nachmittags.

Den kleinsten x -Wert hat der Meteorit Pribram. Auf Grund der Formeln von ÖPIK⁵ ergibt sich für die Bahn dieses Meteoriten eine Lebensdauer von 660 Mill. Jahren. Bei Berücksichtigung von Störungen durch die Planeten erniedrigt sie sich, wie ARNOLD⁴⁴ gezeigt hat, auf einen Wert von 77 Mill. Jahre. Das Bestrahlungsalter von Pribram fanden wir zu ca $14 \cdot 10^6$ Jahre. Dieser Meteorit wurde somit zu einem Zeitpunkt von der Erde eingefangen, als er auf einer für einen Einfang sehr ungünstigen Bahn war. Er stellt somit vermutlich einen relativ seltenen Fall dar.

Wir können also annehmen, daß alle jungen Meteorite, für die die Wahrscheinlichkeit einer drastischen Änderung ihrer Bahn durch die Erde noch gering ist, zu etwa 70% zwischen 12 und 24 h fallen werden, falls der Ausgangspunkt ihrer Bahn weit außerhalb der Erdbahn liegt. Mit zunehmender Lebensdauer werden Bahnänderungen durch die Erde mehr und mehr wirksam, und die Bevorzugung des Nachmittags verschwindet. Unter den Vormittagsfällen müßten somit Meteorite mit geringen Bestrahlungsaltern im Vergleich zu den Nachmittagsfällen seltener sein.

Kommen die Meteorite jedoch vom Mond, so liegen die Verhältnisse anders. Meteorite mit geringen Bestrahlungsaltern müßten vor- und nachmittags gleich verteilt sein. Es ist unschwer zu verstehen, daß hier, wenn man von jungen zu immer älteren Meteoriten übergeht, eine leichte Bevorzugung des Nachmittags auftreten sollte.

Wir betrachten hierzu zwei vom Mond stammende Meteorite. Die Geschwindigkeitskomponenten des Meteoriten 1 seien

$$U_x = U_y = U_z = 0,1 \quad (= 3 \text{ km/s});$$

die von Meteorit 2

$$U_x = U_z = 0,1 \quad \text{und} \quad U_y = -0,1.$$

Daraus errechnen sich die Bahnelemente $a_1 = 1,30$, $a_2 = 0,85$, $e_1 = 0,26$, $e_2 = 0,22$, $\sin i_1 = 0,09$, $\sin i_2 = 0,11$, $q_1 = 0,96$, $q_2 = 0,66$, $q'_1 = 1,64$, $q'_2 = 1,04$ und wir erhalten

$$T_1 : T_2 = a_1^{3/2} : a_2^{3/2} = 1,9.$$

Der Meteorit mit positivem U_y hat also fast eine doppelt so hohe Lebensdauer wie der Meteorit 2. Dabei haben wir jedoch die Tatsache unberücksichtigt gelassen, daß 2 bereits die Venusbahn kreuzt, 1 hingegen die Marsbahn. Venus hat im Vergleich zu Mars die wesentlich größere Masse. Kollisionen mit Venus sind daher viel häufiger als mit Mars. Somit erhalten wir $T_1 : T_2 = 3,1$. Die Absolutwerte für T_1 und T_2 sind $28 \cdot 10^6$ und $9 \cdot 10^6$ Jahre. Diese Lebensdauern werden nach ARNOLD^{40, 44} durch nahe Vorbeigänge an den Planeten stark verändert. Ein kleiner Unterschied sollte jedoch erhalten bleiben, d. h. die Meteorite mit positivem U_y , deren Mehrheit zwischen 12 und 24 h fallen wird, sollten eine etwas größere Zahl von Fällen mit hohen Bestrahlungsaltern aufweisen als diejenigen mit negativem U_y , welche bevorzugt vormittags fallen. Eine genaue Berechnung dieses Effektes ist nur auf der Basis des

von ARNOLD verwendeten Verfahrens möglich. Da die beiden möglichen Ursprungsorte also gerade eine gegenteilige Abhängigkeit der Bestrahlungsalter von der Fallzeit bedingen, sollte hiermit eine Entscheidung über die Herkunft der Steinmeteorite möglich sein.

a) Vergleich mit den gemessenen Bestrahlungsaltern

Die Anzahl der gemessenen Bestrahlungsalter sowohl von Bronzit- als auch von Hypersthen-Chondriten war zunächst viel zu gering, um daraus irgendwelche Aussagen der vorhin erwähnten Art ableiten

zu können. Bei dem Großteil der Meteorite, für die Edelgasmessungen vorliegen, handelt es sich nicht um beobachtete Fälle, sondern um Funde. Weniger als ein Drittel aller Fälle von Steinmeteoriten liegt in der Zeit zwischen 0 und 12 h. Bei den gegenüber den Hypersthen-Chondriten etwas selteneren Bronzit-Chondriten waren die Meßdaten besonders spärlich.

Zunächst mußten wir uns also bemühen, eine größere Zahl geeigneter Meteorite aus Museen und sonstigen Sammlungen zu erhalten. Erfreulicherweise war die Antwort der meisten Kuratoren der Sammlungen, die ich um Meteoritproben gebeten

Nr.	Uhrzeit des Falles	Name des Meteoriten	Nr.	Uhrzeit des Falles	Name des Meteoriten	Nr.	Uhrzeit des Falles	Name des Meteoriten	Nr.	Uhrzeit des Falles	Name des Meteoriten
1	0.00	Sena	39+		Udipi	78		Monroe	115		Gopalpur
2	0.15	Ohaba	40+	10.30	Guareña	79+		Timochin	116+		Salles
3	1.00	Ambapur Nagla	41+		Kerilis	80		Tromy	117	18.20	Gumoschnik
		Borodino	42		Slavetic	81+	15.30	Beaver Creek	118	18.22	Fênghsien-ku
4		Beddgelert	43+	11.00	Cangas de Onis	82+		Grüneberg	119+	18.30	Blansko
5+	1.47	Zhovtnevyi	44		Cosina	83+		Killeter	120+		Tirupati
6+	2.00	Quenggouk	45		Motta di Conti	84		Mißhof	121	18.49	Vengerova
7+	2.30	Malotas	46		Ogi	85		St. Germain-du-Pinel	122+	19.00	Dokachi
8+	3.00	Nikolaevka	47+		Sitathali	86+		Wessely	123		Dundrum
9		Djati	48+	11.15	Merua	87		Zsadány	124+		Pultusk
10+	4.30	Pengilon	49	11.30	Gross-Divina	88+	15.45	Breitscheid	125		Utzenstorf
11+	5.00	Cross-Roads	50	11.45	Alessandria	89		Seldebourak	126+	19.30	Miller
12+		Kesen	51		Lumpkin	90	16.00	Alexandrovsky	127+		Nadiabondi
13+		Macáu	52+	11.58	Fayetteville	91+		Bath	128	19.34	Ichkala
14+	5.30	Takenouchi	53	12.00	Agen	92		Cronstad	129	19.45	Hedeskoga
15+	6.30	Weston	54		Butsura	93+		Erleben	130+	20.00	Florence
16+	6.45	Favars	55		Feid Chair	94		Lillaverke	131+		Gütersloh
17+	7.00	Assisi	56		Jamkheir	95+		Plantersville	132+		Laborel
18		Epinal	57		Nanjemoy	96+		Trenzano	133		Leighton
19		Hungen	58		Supuhee	97+		Yonozu	134+		Queens Mercy
20+		Muddoor	59+	12.15	Eichstädt	98+	16.30	Archie	135+	20.00	Tabor
21+	7.12	Ekeby	60	12.30	Hessle	99		Chail	136+		Toulouse
22	7.30	Bethlehem	61		Menow	100		Phum Sambo	137+	20.30	Hainaut
23+		Cereseto	62		Torrington	101+		Tomatlan	138+		Lançon
24		Isthilart	63	12.45	Glasatovo	102+	16.30	Yatoor	139		Pokhra
25+	8.00	Akbarpur	64	13.00	Luponnas	103+	16.45	Ehole	140+		Pribram
26+		Allegan	65+		Ochansk	104		Klein-Wenden	141+		Tysnes Island
27+		Bur-Gheluai	66+	13.30	Canellas	105		Nassirah	142+	20.45	Pantar
28+		Charwallas	67		Charsonville	106+	17.00	Doroninsk	143+		Rochester
29+		Zebra	68		Collescipoli	107+		Kilbourn	144+	20.56	Dresden
30+	8.15	Searsmont	69	14.00	De Cewsville	108+		Moti-ka-nagla	145	21.00	Tjabé
31+	8.30	Ranchapur	70+		Forsbach	109+		Naoki	146+	22.00	Kernouvé
32	9.00	Benld	71+	14.30	Castalia	110	17.05	Valdavur	147+		Richardton
33		Khetri	72		Mjellheim	111+	17.15	Forest City	148	23.00	Sindhri
34+		Limerick	73		Pirhalla	112+	17.30	Lixna	149+		Rose City
35	9.00	Vernon County	74	15.00	Bishunpur	113+		Nulles	150+	23.30	Beardsley
36+	9.15	Simmern	75+		Cape Girardeau	114+	18.00	Bielokry-nitschie	151		La Colina
37	9.40	WitklipFarm	76		Donga				152		Ställdalen
38+	10.00	Uberaba	77+		Kohrod Forest Vale						

Tab. 4. Bronzit-Chondrite, deren Fall beobachtet wurde. Klassifizierung im wesentlichen nach MASON⁶⁴, Fallzeit nach PRIOR und HEY⁶⁵. Meteorite, von denen Angaben über das Bestrahlungsalter vorliegen, sind mit + bezeichnet.

Nr.	Uhrzeit des Falles	Name des Meteoriten	Nr.	Uhrzeit des Falles	Name des Meteoriten	Nr.	Uhrzeit des Falles	Name des Meteoriten	Nr.	Uhrzeit des Falles	Name des Meteoriten
501+	0.06	Bruderheim	547		Honolulu	590	14.28	Tané	635		Danville
502	0.30	Deal	548		Lalitpur	591	14.30	Lavren-tievka	636+		Knyahinya
503+	2.00	Chantonay	549	11.00	Kuleschovk				637		Les Ormes
504	2.30	Sauguis	550		Sultanpur	592		Mern	638		Stavropol
505	4.00	Castine	551	11.30	Aumale	593		Sinai	639	17.30	Kuznetzovo
506+	4.10	Monze	552		Jackalsfontein	594+	14.45	Marion	640	17.35	Atarra
507	4.45	Nerft			Mirzapur	595		St. Caprais-de-Quinsac	641+	17.45	Forks ville
508+	4.48	Paragould	553		Tourinnes-la-Grosse				642		Oviedo
509	5.00	Kusiali	554		Bachmut	596+	15.00	Alfianello	643	18.00	Banswal
510	5.15	Orvinio			Chanda-kapur	597		Borkut	644		Bhagur
511+	5.24	Khmelevka	555	12.00	Durala	598		Jhung	645		Futteh pur
512	5.44	Gifu	556+		La Bécasse	599		Kharkov	646+		Pervomaisky
513	6.00	Trysil			Mooresfort	600+	15.00	Kyushu	647+	18.20	Colby (Wisconsin)
514	6.15	Black Moshannan Park	557		Nan Yang Pao	601		Le Pressoir			
			558		Parnallee	602		Mhow			
515+		Cabezo de Mayo	559+		Segowlie	603		Milena	648	18.30	Krähenberg
			560		Shytal	604		Oterøy	649+		Ramsdorf
516+	6.30	Großliebenthal	561+		Tennasilm	605		Pnompehn	650		Moorleah
			562		Cranganore	606		Rakovka	651	18.45	Bath Furnace
517+	7.00	Dolgovoli	563		New Concord	607		Renca			
518		Git-Git	564		Ashdon	608+		Saratov	652+	19.00	Leedey
519		Kagarlyk	565	12.45	Farmington	609		Tuan Tuc	653+	19.15	Holbrook
520+		Kutti ppu-ram	566+		Fukutomi	610	15.30	Demina	654+		Narellan
					Kamsagar	611		Forsyth	655	19.25	Kendleton
520a+		Warrenton	567	13.00	Karkh	612+		Lissa	656+		St. Michel
521	7.30	Andover	568+		Khohar	613		Little Piney	657	19.30	Girgenti
522+		Ausson	569		L'Aigle	614		Oesel	658		Launton
523+		Buschhof	570		Mascombes	615		Wold	659	19.45	Meuselbach
524		Lesves	571		Tilden		15.35	Cottage	660	20.00	Berlan-guillas
525	7.45	Zomba	572+		Strathmore	616		Middlesbrough			
526	8.00	Bherai	573+		Châteaurenard				661		Linum
527		Kakowa	574		Ryechki	617	15.45	Beyrout	662+		Shelburne
528		Mulleti wu	575		Pavlodar	618	16.00	Bori	663		Utrecht
529+		Pohlitz	576	13.15	Kiel	619		Cynthiana	664	20.15	Angers
530		Reliegos	577+	13.30	Chervettaz	620		Drake Creek	665	20.30	Lundsgard
531+		Wittekrantz			Hallingeberg	621		Fisher	666	20.30	Rio Negro
532+	8.30	Richmond	578		Krasnoi-Ugol	622		Harrison County	667	20.45	Kaptal-Aryk
533+	9.00	Baxter	579	13.40	Kukschin	623		Lua	668+	20.56	Mezel
534	9.00	Karewar	580+	13.45	Leeuwfontein	624+		Mauerkirchen	669	21.00	Aumières
535	9.15	Monte Milone	581	14.00	Ploschkovitz				670		Barbotan
			582		Rich Mountain	625+		Mocs	671		Leonovka
536	9.30	Madrid	583		Schönenberg	626		Schellin	672+	21.30	Modoc
537+		Mount Browne			Dhurmsala	627	16.30	Diep River	673		Tomakovka
			584			628		Lucé	674+	21.33	Zemait-kiemis
538		Ojuelos Altos	585			629+		Mezö-Madaras	675+	22.15	Homestead
539+		Santa Isabel	586					Zabrodje	676+	22.30	Bjurböle
540	10.00	Vishnupur				630		St. Denis	677		Blanket
541		Baroti	587			631	16.45	Westrem	678+		Harleton
542		Rangala				632	17.00	Aztec	679		Tadjera
543		Valdinizza	588			633	17.00	Bremervörde	680		Tjerebon
544	10.30	Apt	589+	14.15		634		Dandapur	681	23.00	Perpeti
545		Zavid							682		Vouillé
546		Crumlin							683+	23.45	Sevrukovo

Tab. 5. Hypersthen-Chondrite, deren Fall beobachtet wurde. Klassifizierung nach MASON⁶⁴, Fallzeit nach PRIOR und HEY⁶⁵. Meteorite, von denen Angaben über das Bestrahlungsalter vorliegen, sind mit + bezeichnet.

hatte, sehr positiv. Ohne das Verständnis und die Unterstützung dieser Herren wäre diese Arbeit unmöglich gewesen. Wegen der häufigen Fehlklassi-

fizierungen waren wir nur an solchen Meteoriten interessiert, die von MASON⁶⁴ in seiner überaus

⁶⁴ B. MASON, Geochim. Cosmochim. Acta 27, 1011 [1963].

wichtigen Arbeit untersucht worden waren. Auch in den Tabellen 4 und 5 haben wir im wesentlichen nur solche Meteorite aufgeführt, und zwar geordnet nach der Fallzeit. Insgesamt konnten wir 152 Bronzit-Chondrite und 183 Hypersthen-Chondrite aufnehmen. Zunächst haben wir uns in unseren Bemühungen auf die Bronzit-Chondrite konzentriert. Es gelang, Proben von über 75 Bronzit-Chondriten zu bekommen, von denen bisher noch keine Messungen des Bestrahlungsalters bekannt wurden. Somit liegen nun die Daten von etwa 60% aller Fälle der Bronzit-Chondrite vor, so daß eine wesentliche Verbesserung der Statistik nicht mehr zu erwarten ist. Neben Bronzit-Chondriten haben wir vor allem zwischen 0 und 12 h gefallene Hypersthen-Chondrite untersucht; —

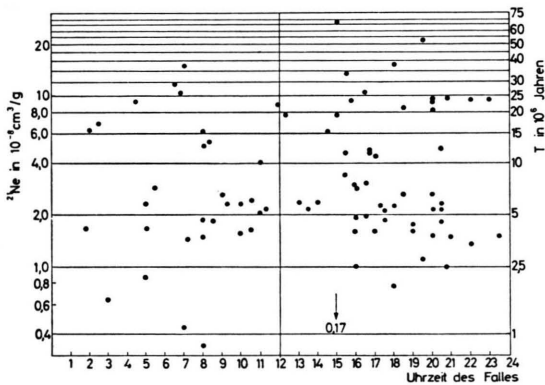


Abb. 6. ^{21}Ne -Bestrahlungsalter aller bisher untersuchten Bronzit-Chondrite und deren lokale Fallzeit. Die überwiegende Mehrheit aller eingetragenen Meteorite wurde in Mainz durch HINTENBERGER et al. gemessen. Ein großer Teil der Angaben entstammt einer noch unveröffentlichten Arbeit von HINTENBERGER, SCHULTZ und WÄNKE ⁷⁰.

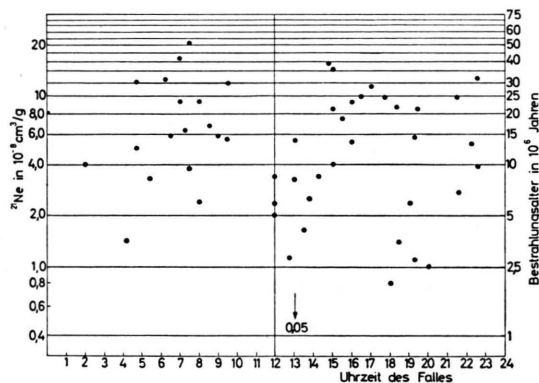


Abb. 7. ^{21}Ne -Bestrahlungsalter aller bisher untersuchten Hypersthen-Chondrite und deren lokale Fallzeit. Die Mehrheit aller eingetragenen Meteorite wurde in Mainz durch HINTENBERGER et al. gemessen. Ein Teil der Angaben entstammt einer noch unveröffentlichten Arbeit von HINTENBERGER, SCHULTZ und WÄNKE ⁷⁰.

hier könnte allerdings durch weitere Messungen das Gewicht unserer Aussage noch verbessert werden.

Die für das diskutierte Problem interessierenden Ergebnisse sind zusammen mit allen anderen in der Literatur vorliegenden Meßdaten in Abb. 1–4 sowie 6–7 zusammengestellt. Die ausführlichen Daten der Edelgasmessungen werden in einer Arbeit von HINTENBERGER, SCHULTZ und WÄNKE ⁷⁰ in Kürze mitgeteilt werden.

Es sind stets nur ^{21}Ne -Bestrahlungsalter angeführt, da vor allem bei den Bronzit-Chondriten das ^3He in mehreren Fällen Diffusionsverluste zeigt, und außerdem ^3He bei den meisten uredelgas-haltigen Meteoriten nicht angebar ist.

Als Produktionsrate für ^{21}Ne wurde ein Wert von $0,4 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3$ in 10^6 Jahren gewählt. Damit ist ein direkter Vergleich mit den meistens allein angegebenen ^3He -Altern möglich. Die früher von uns verwendete ^{21}Ne -Produktionsrate von 0,324, die aus Messungen von ^{22}Na abgeleitet wurde, liefert entsprechend höhere Bestrahlungsalter ^{13, 15, 17}.

Auf Grund der neuen Messungen der Bestrahlungsalter von Hypersthen-Chondriten, die vormittags gefallen waren, zeigte sich bald ein auffallender Unterschied gegenüber den Bestrahlungsaltern der nachmittags gefallenen Meteorite. Während bei den letzteren etwa ebensoviele Meteorite Bestrahlungsalter unter 10^7 Jahren besitzen als darüber, (15 und 17), lauten die entsprechenden Zahlen für die „Vormittagsfälle“ 4 und 15.

Unterschiede in der zeitlichen Verteilung der Bestrahlungsalter der Bronzit-Chondrite zeigten sich nur in geringem Maße. Aus diesem Grund waren wir bemüht, eine große Anzahl von Meteoriten dieser Klasse zu analysieren.

4. Diskussion

Der Unterschied in der fallzeitlichen Verteilung der Alterswerte zwischen Bronzit- und Hypersthen-Chondriten ist frappierend. Junge Hypersthen-Chondrite sind unter den Vormittagsfällen selten. Eine sehr gute Illustration hierzu liefern die Abb. 7 und 9 sowie Tab. 6.

Was die Hypersthen-Chondrite anbelangt, können wir auf Grund der Ergebnisse der Messungen der Bestrahlungsalter im Zusammenhang mit den im Abschnitt 3 a angeführten Überlegungen schließen, daß ein Mondursprung beinahe mit Sicherheit auszuschließen ist.

	Fallzeit	$T < 10^7$ J.	$10^7 \text{ J.} \leq T < 2 \cdot 10^7 \text{ J.}$	$T > 2 \cdot 10^7 \text{ J.}$	Meteorite mit leichten Uredelgasen	$\frac{^3\text{He}}{^{21}\text{Ne}}$	Mittelwerte $\frac{^4\text{He}_{\text{rad.}}}{\text{in } 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}}$	$\frac{^{21}\text{Ne}}{\text{Alter in } 10^6 \text{ J.}}$
Bronzit-Chondrite	0–24	53	14	18	14	5,01	1195	11,4
	0–12	20	6	5	3	4,79	1010	9,8
	12–24	32	8	13	11	5,15	1290	12,4
Funde u. Fälle o. Z.		29	4	8	5	4,60	948	10,8
Hypersthen-Chondrite	0–24	20	13	19		5,34	657	15,7
	0–12	4	7	8		5,31	680	18,1
	12–24	16	6	11		5,35	642	14,3
Funde u. Fälle o. Z.		17	20	9		5,01	453	13,4

Tab. 6. Verteilung der Bestrahlungsalter von Bronzit- und Hypersthen-Chondriten getrennt nach Vormittags- und Nachmittagsfällen. Bei den Hypersthen-Chondriten sind Meteorite mit kleinen Bestrahlungsaltern unter den Vormittagsfällen selten; hingegen ist bei den Bronzit-Chondriten mit hohen Bestrahlungsaltern eine leichte Bevorzugung des Nachmittags erkennbar. Diese Tendenz ist auch aus den Mittelwerten der ^{21}Ne -Bestrahlungsalter erkennbar. Die Vormittagsfälle der Bronzit-Chondrite zeigen einen deutlich niedrigeren Mittelwert des $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnisses sowie des Gehalts an $^4\text{He}_{\text{rad.}}$. Letzteres deutet auf Diffusionsverluste, die durch eine größere Annäherung an die Sonne bedingt sind, hin. Alle Funde zeigen deutliche Verluste von radiogenem und spallogem Helium.

Durch die auffallende Seltenheit von jungen Vormittagsfällen, wie wir sie unter der Voraussetzung eines außerhalb der Erdbahn liegenden Mutterkörpers postuliert hatten, scheint auch die Richtigkeit der angestellten Überlegungen bestätigt.

Unter den Vormittagsfällen der untersuchten Bronzit-Chondrite fand sich eine etwas kleinere Zahl

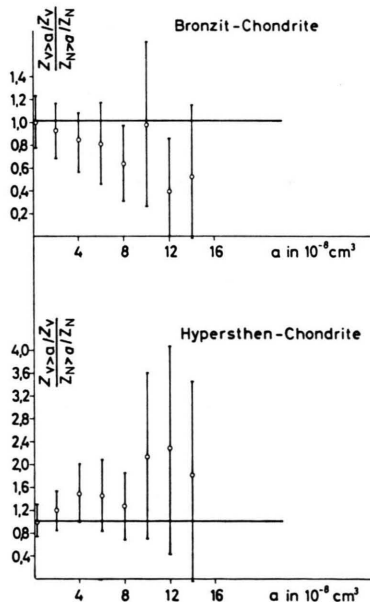


Abb. 8. Verhältnis der Vormittags- und Nachmittagsfälle mit einem ^{21}Ne -Gehalt $> a$. $Z_{V>a}$ Zahl der Vormittagsfälle mit einem ^{21}Ne -Gehalt größer a . Z_V Gesamtzahl aller Vormittagsfälle sowie $Z_{N>a}$ und Z_N analog für die Nachmittagsfälle. Man erkennt deutlich, daß unter den Nachmittagsfällen der Bronzit-Chondrite Meteorite mit hohen Bestrahlungsaltern überwiegen.

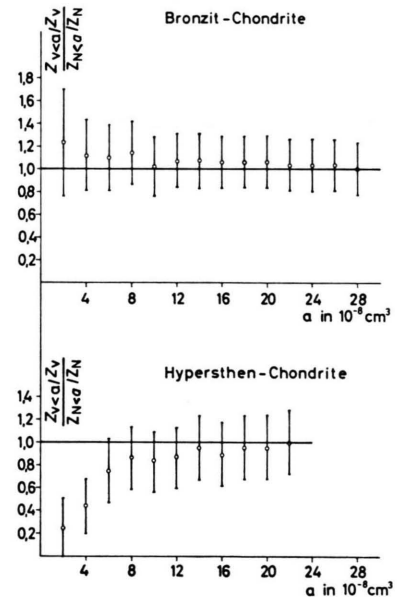


Abb. 9. Verhältnis der Vormittags- und Nachmittagsfälle mit einem ^{21}Ne -Gehalt $< a$. $Z_{V<a}$ Zahl der Vormittagsfälle mit einem ^{21}Ne -Gehalt kleiner a . Z_V Gesamtzahl aller Vormittagsfälle sowie $Z_{N<a}$ und Z_N analog für die Nachmittagsfälle. Man erkennt deutlich, daß unter den Vormittagsfällen der Hypersthen-Chondrite Meteorite mit kleinen Bestrahlungsaltern seltener sind.

von Meteoriten (5 von 32 oder 16%) mit ^{21}Ne -Bestrahlungsaltern von über 20 Mill. Jahren als unter den Nachmittagsfällen (13 von 53 oder 25%).

Überhaupt erwiesen sich die Vormittagsfälle im Mittel etwas jünger als die Nachmittagsfälle ($9,8 \cdot 10^6$ bzw. $12,2 \cdot 10^6$ J.; siehe auch Abb. 6 und 8 sowie

Tab. 6). Der tatsächliche Unterschied ist vielleicht noch etwas größer. Von den 5 Vormittagsfällen mit einem ^{21}Ne -Alter über 20 Mill. Jahren fiel einer um 11.58 h (Fayetteville), bei zwei weiteren (Weston und Djati Pengilon) ist eine nähere Betrachtung von Interesse. Weston⁶⁵ fiel am 14. 12. 1807 um 6.30 h. Augenzeugen berichten von einem weiten Flug des Meteoriten als Feuerkugel von Norden nach Süden; die geographische Breite des Fundortes ist 41°N . Hier hat vermutlich ein Meteorit mit positivem U_y die Erde überholt und ist über den Nordpol kommend auf der Vorderseite der Erde gelandet.

Djati Pengilon⁶⁶ fiel am 19. 3. 1884 um 4.30 h auf 8°S . Eine auffällige Feuerkugel mit Flugbahn West-Ost wird von Augenzeugen angegeben. Auch hier könnte ein Meteorit mit positivem U_y auf der Vorderseite der Erde "um die kurze Ecke herum" gelangt sein.

Man kann nun einwenden, daß eben alle Bronzit-Chondrite, die Vormittagsfälle sind, die Erde überholen. Hierzu lassen sich aus der Gesamtzahl der beobachteten Fälle Aussagen ableiten. Tab. 6 zeigt, daß 36% aller Bronzit-Chondrite zwischen 0 und 12 h beobachtet wurden, bei den Hypersthen-Chondriten sind es mit 32% merklich weniger. Dabei ist zu beachten, daß die Beobachtungsbedingungen für Vormittagsfälle zwischen 0 und 6 h wesentlich ungünstiger sind als für die Zeit von 18–24 h. Beschränkt man sich auf die Zeit von 6–18 h, um einigermaßen ähnliche Beobachtungsbedingungen zu schaffen, (die Vormittagsfälle sind dabei noch immer benachteiligt), so ergibt sich, daß 41% aller Bronzit-Chondrite am Vormittag gefallen sind. Die Zahl von Vormittagsfällen und Nachmittagsfällen wird also ähnlicher.

Es wäre denkbar, daß eine Überzahl an Nachmittagsfällen nur durch die Meteorite mit großer Lebensdauer hervorgerufen wird. Wie Tab. 6 zeigt, weisen die Vormittagsfälle der Bronzit-Chondrite ein etwas tieferes mittleres $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis auf als die Nachmittagsfälle. Auch der mittlere radiogene ^4He -Gehalt ist bei den Vormittagsfällen niedriger.

Wie wir an anderer Stelle zeigen konnten^{67, 68}, erfolgte bei der überwiegenden Mehrheit der Bronzit-

Chondrite der fallweise aufgetretene Verlust von ^4He gleichzeitig mit dem Verlust von ^3He , also während der Einwirkung der Höhenstrahlung.

Wir können somit schließen, daß die Bronzit-Chondrite, die vormittags fallen, im Mittel näher an die Sonne herankommen und dabei teilweise merklich erwärmt werden. Allerdings würden auch im Falle, daß alle Meteoritbahnen ein positives U_y hätten, diejenigen mit kleinem Perihel bevorzugt am Vormittag fallen.

Es erscheint noch erwähnenswert, daß bei den Vergleichen der Verteilungen der Bestrahlungsalter für Vor- und Nachmittagsfälle die Werte der Funde stets in der Mitte liegen. Letztere setzen sich ja natürlicherweise aus Vor- und Nachmittagsfällen zusammen.

Wenn auch bei den Bronzit-Chondriten unter Nachmittagsfällen nur wenig mehr Meteorite mit hohen Bestrahlungsaltern auftreten, ein Überwiegen der Meteorite mit niedrigen Bestrahlungsaltern am Nachmittag kann man mit sehr großer Wahrscheinlichkeit ausschließen. Der Mutterkörper der Bronzit-Chondrite muß daher in der unmittelbaren Nähe der Erdbahn liegen. Der Mond ist aber der einzige Körper von der in Abschnitt 2 verlangten Größe, der diese Bedingung erfüllt.

Ein weiteres, sehr auffälliges Merkmal betrifft die uredelgashaltigen Bronzit-Chondrite. Von 14 beobachteten Fällen dieser Meteorite fielen 11 (oder 79%) in der Zeit von 15 bis 21 h), während von allen Bronzit-Chondriten in diesem Zeitintervall nur 45% fielen. Die übrigen uredelgashaltigen Meteorite, Weston, Cargas de Onis und Fayetteville, fielen um 6.30 h, 11 h und 11.58 h (Weston siehe oben). Eine starke Bevorzugung des Nachmittags ist also ersichtlich. Dies könnte man dadurch erklären, daß das uredelgashaltige Material, das nahe der Mondoberfläche liegt, durch einen Kometeneinschlag auf eine höhere Geschwindigkeit beschleunigt wird als das tiefer liegende uredelgasfreie Material. Die uredelgashaltigen Bruchstücke dieser Eruption werden also entweder eine besonders große oder aber eine besonders kleine Bahnhälfte a haben. Es ist dabei gleichgültig, ob sie diese hohe Relativgeschwindigkeit direkt bei der Eruption

⁶⁵ G. T. PRIOR u. M. H. HEY, Catalogue of Meteorites, British Museum, London 1953.

⁶⁶ R. D. M. VERBEEK, De Meteorit van Djati-Pengilon (Java), Joh. G. Stenler Czn. Amsterdam 1886.

⁶⁷ H. HINTENBERGER, E. VILČEK u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg. 19 a, 219 [1964].

⁶⁸ H. HINTENBERGER, L. SCHULTZ u. H. WÄNKE, Messung der Diffusionsverluste von radiogenen und spallogenen Edelgasen in Steinmeteoriten, Vorabdruck 1965; erscheint in Z. Naturforschg.

erhalten haben, oder in dem von ARNOLD⁴⁴ hervorgerufenen Beschleunigungsmechanismus auf Grund ihrer günstigeren Startbedingungen bevorzugt waren. Meteorite mit $a < 1$ werden sehr bald an die Venus verlorengehen. Die verbleibenden Meteorite mit großem a fallen dann eben bevorzugt am Nachmittag. Da der Großteil aller Kometen gegenläufige Bahnen besitzt, werden ohnehin die meisten Einschläge Material mit positivem U_y emittieren. Die gegenläufigen Kometen sind auf Grund ihrer hohen geozentrischen Geschwindigkeit außerdem sicherlich am produktivsten bei der Emission von Mondmaterial.

In Abb. 2 und 4 sind die Verteilungen der Bestrahlungsalter aller bisher untersuchten Bronzit- und Hypersthen-Chondrite aufgetragen und zwar einschließlich der Messungen an Funden.

Die Bestrahlungsalter der Bronzit-Chondrite zeigen drei deutliche Maxima, bei $2,3 \cdot 10^6$, $4,5 \cdot 10^6$ und $22 \cdot 10^6$ Jahren. GEISS, OESCHGER und SIGNER¹⁰ haben als erste eine Häufung der Werte der Bestrahlungsalter bei $22 \cdot 10^6$ Jahren angegeben. Unter den 5 Meteoriten, die damals diese Gruppierung zeigten, befand sich nur ein Bronzit-Chondrit. Jedoch zeigt sich auch bei den Hypersthen-Chondriten in diesem Altersbereich ein wenn auch sehr breites Maximum. Die Kollision vor $2,3 \cdot 10^6$ Jahren produzierte offensichtlich nur einige wenige Meteorite.

Nimmt man an, daß die beiden Kollisionen von $4,5 \cdot 10^6$ und $22 \cdot 10^6$ Jahren gleiche Mengen von Meteoriten erzeugten, so läßt sich aus der Höhe der beiden Maxima eine mittlere Lebensdauer von $18 \cdot 10^6$ Jahren herleiten.

Auch die Bestrahlungsalter der Hypersthen-Chondrite zeigen Maxima, doch sind diese nicht so ausgeprägt. Der Verlauf der Verteilungskurve legt den Schluß nahe, daß hier nach der Meteoritentstehung erst ein weiterer Mechanismus wirksam werden mußte, der die Meteorite die Erdbahn erreichen ließ. Auch dies spricht für einen Ursprung der Hypersthen-Chondrite in der Gegend oder außerhalb der Marsbahn.

Wie mehrfach ausgeführt, enthalten mindestens 15% (19 von 125) der untersuchten Bronzit-Chondrite leichte Uredelgase. Bei den Hypersthen-Chondriten wurde jedoch unter 93 Meteoriten kein einziger mit leichten Uredelgasen entdeckt, was zweifelsohne einen sehr wichtigen Unterschied darstellt.

Bei den Amphoteriten, die sicherlich eine eigene, von den normalen Hypersthen-Chondriten verschie-

dene Gruppe bilden, wurde dagegen unter 18 Meteoriten einer mit leichten Uredelgasen gefunden¹⁶.

Alle die angeführten Merkmale der Hypersthen-Chondrite in Betracht ziehend, insbesondere auch die beiden zuletzt angeführten, ist man fast geneigt, zu schließen, daß vielleicht nicht ein Marsasteroid, wie von ANDERS⁴ vorgeschlagen, sondern der Mars selbst der Mutterkörper der Hypersthen-Chondrite ist. Mars besitzt eine dünne Atmosphäre, so daß eine Uredelgasbeladung durch den Sonnenwind unmöglich ist. Die Lebensdauer von Bruchstücken, die aus Einschlägen auf dem Mars herstammen, wäre sehr viel geringer als die der Bruchstücke von Marsasteroiden. Die Diskrepanz zu den gemessenen Bestrahlungsaltern würde damit fast völlig verschwinden. Die notwendige Entweichgeschwindigkeit ist mit 6,4 km/s sehr hoch, hierzu kommt noch die bremsende Wirkung der Atmosphäre. Dennoch könnte man vermuten, daß Einschläge von gegenläufigen Kometen vielleicht auch diese Geschwindigkeit zu liefern vermögen. Da der Mond als Mutterkörper der Bronzit-Chondrite bestätigt erscheint, ist damit auch die Existenz eines Mechanismus der Beschleunigung von Bruchstücken auf Geschwindigkeiten bis über 3 km/s gut gesichert. Nach dem Modell von ARNOLD^{40,44} fällt bei den Bronzit-Chondriten, die den Mond zum Mutterkörper haben, innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeit ein großer Teil auf die Erde. Wegen der gegenüber der Erde wesentlich geringeren Masse des Mars würde dieser nur einen weit geringeren Teil seiner Meteorite auf sammeln.

Letzteres ist natürlich ziemlich Spekulation. Die Gegenargumente sind zweifelsohne gewichtig und zahlreich. Sollte der Mars tatsächlich als Mutterkörper der einen Meteoritenart in Frage kommen, so müßte es ähnlich wie beim Mond größere Einschlagkrater am Mars geben. Vielleicht kann hierüber bereits in Kürze die amerikanische Raumsonde Mariner IV Auskunft erteilen*.

An einigermaßen gesicherten Ergebnissen können wir festhalten, daß die Bronzit-Chondrite vom Mond kommen, die Hypersthen-Chondrite jedoch nicht. Der Mutterkörper letzterer muß beträchtlich außerhalb der Erdbahn liegen. Dieses vielleicht etwas überraschende Ergebnis könnte übrigens als Be-

* An m. b. d. K o r r.: Wie aus Berichten der Tagespresse zu entnehmen ist, zeigten die Marsbilder vom Mariner IV tatsächlich zahlreiche Krater. Die Ähnlichkeit der Oberflächenstruktur von Mond und Mars ist unverkennbar.

stätigung einer Vorstellung UREYS⁶⁹ über die Entwicklung des Planetensystems gelten. Danach haben die sonnennäheren Planeten mehr Eisen erhalten als die sonnenfernen, da die gegenüber den Metallkörnern spezifisch leichteren Silikatkörner durch die aus dem Sonnensystem entweichenden Gase bevorzugt nach außen getrieben wurden. Hierdurch entstand eine Anreicherung von metallischem Eisen in Sonnennähe, welche für die zunehmende Dichte der Planeten in Reihe Mars, Erde, Venus, Merkur verantwortlich ist. Die Bronzit-Chondrite enthalten gegenüber den Hypersthen-Chondriten nicht nur etwa doppelt soviel Nickeleisen (ca. 8% gegenüber 16–18%), sondern sie enthalten auch mehr Gesamteisen (28% gegenüber 22%).

Zusammenfassung

1. Hinweise auf die Herkunft aus den Oberflächenschichten des Mutterkörpers

a) Alle Chondrite zeigen eine mehr oder minder große Porosität. Da, wie in Punkt 3 a angeführt, kleine Körper auszuschließen sind, kommen nur Oberflächenschichten eines größeren Körpers in Frage.

b) Uredelgasgehalt durch Beladung der einzelnen Meteoritkörner durch den Sonnenwind.

c) Uredelgasgehalt stets verbunden mit Hell-Dunkel-Struktur.

d) Die Verteilung der Bestrahlungsalter zeigt eine deutliche Gruppierung um folgende Alterswerte: $2,3 \cdot 10^6$, $4,5 \cdot 10^6$ und $22 \cdot 10^6$ Jahren. Jede Gruppe enthält auch Meteorite mit leichten Uredelgasen. Demnach stammen die uredelgashaltigen Meteorite vermutlich aus den obersten, uredelgasfreie Meteorite hingegen aus tieferen Schichten.

2. Hinweise auf einen Mutterkörper in der Nähe der Erdbahn

a) Unter den Vormittagsfällen sind Meteorite mit hohen Werten des Bestrahlungsalters seltener als unter den Nachmittagsfällen. Junge Meteorite sind vor- und nachmittags gleich häufig. Ein Asteroidenursprung sollte weniger junge Meteorite am Vormittag liefern.

b) Vormittagsfälle zeigen teilweise Diffusionsverluste von ^3He und ^4He . Der Grund hierfür ist in

einer im Mittel größeren Annäherung an die Sonne und einer damit verbundenen stärkeren Erwärmung zu suchen. Bei den Hypersthen-Chondriten sind solche gleichzeitigen Verluste von radiogenen und spallogenen Uredelgasen seltener bzw. geringer.

c) Meteorite mit leichten Uredelgasen zeigen eine starke Bevorzugung des Nachmittags in ihrer Fallzeit.

d) Ihr Mutterkörper sollte näher der Erdbahn liegen als der Mutterkörper der Hypersthen-Chondrite, da das Bestrahlungsalter im Mittel tiefer ist.

3. Hinweise auf die Größe des Mutterkörpers

a) Die Uredelgasbeladung durch den Sonnenwind und die damit verbundene Hell-Dunkel-Struktur deuten auf einen atmosphärenlosen Körper größerer Masse (Mond oder großer Asteroid).

b) Die in den Punkten 2 a und b angeführten Merkmale beruhen auf Aussagen, die der statistischen Gesetzmäßigkeit unterliegen. Die Unterschiede liegen meistens nur etwa im Bereich des einfachen mittleren Fehlers. Auch keines der übrigen Argumente ist so eindeutig, um daraus eine absolut sichere Aussage ableiten zu können. In ihrer Gesamtheit sprechen sie jedoch nahezu unzweifelhaft für den Mond als Mutterkörper der Bronzit-Chondrite.

Hypersthen-Chondrite

Aus der Seltenheit von Meteoriten mit niedrigem Bestrahlungsalter unter den Vormittagsfällen folgt, daß der Mutterkörper außerhalb der Erdbahn liegen muß. Darauf deutet auch die Verteilung der Bestrahlungsalter hin, die einen Übergangseffekt zeigen (Vergleich mit ARNOLD⁴⁰). Der Mutterkörper ist daher vermutlich unter den Marsasteroiden zu suchen. Jedoch könnte vielleicht der Mars selbst in Betracht gezogen werden und scheint einer näheren Untersuchung wert. Die Atmosphäre des Mars würde das Fehlen von uredelgashaltigen Hypersthen-Chondriten zwanglos erklären. Gleichzeitig würde die zu erwähnende mittlere Lebensdauer wesentlich besser mit den gemessenen Bestrahlungsaltern übereinstimmen, als dies unter der Annahme eines Marsasteroiden als Mutterkörper der Fall ist.

Eine genaue Zusammenstellung der Herkunft aller Meteoritproben, die zu neuen Messungen verwendet wurden, erfolgt in einer späteren Arbeit von HINTENBERGER, SCHULTZ und WÄNKE⁷⁰. Doch möchte ich an dieser Stelle folgenden Herren und Institutionen herzlich danken für das mir erwiesene große Entgegenkommen und Verständnis:

⁶⁹ H. C. UREY, *The Planets*, Yale University Press, New Haven 1952.

Dr. T. H. BARRY, South African Museum, Kapstadt, Prof. G. P. BROPHY, Amherst College, Amherst, Dr. W. S. CURVELLO, National Museum, Rio de Janeiro, Prof. Dr. W. VON ENGELHARDT und Dr. W. WEISKIRCHNER, Universität Tübingen, Dr. E. P. HENDERSON, U.S. National Museum, Washington, Dr. M. H. HEY, British Museum, London, Prof. Dr. W. KLEBER, Humboldt-Universität, Berlin, Prof. Dr. S. KORITNIG und Dr. E. ALTHAUS, Universität Göttingen, Dr. B. H. MASON, U.S. National Museum, Washington, Dr. C. B. MOORE, Arizona State University, Tempe, Prof. Dr. A. NEUHAUS und Dr. W. SCHILLY, Universität Bonn, Prof. Dr. H. NEUMANN, Mi-

neralogisk-Geologisk Museum, Oslo, Prof. Dr. J. ORCEL, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, Prof. Dr. F. H. PACHECO, Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid, Prof. Dr. G. RIGAU, Universität Turin, Dr. E. W. SALPETER, Specola Vaticana, Laboratorio Astrofisico, Castel Gandolfo, Prof. Dr. K. K. TUREKIAN, Yale University, New Haven, Dr. F. TWISSELMANN, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Brüssel.

Herrn Dr. F. BEGEMANN und Herrn Dipl.-Phys. L. SCHULTZ danke ich für zahlreiche Diskussionen. Ferner danke ich Herrn B. SPETTEL für seine Mithilfe an dieser Arbeit.

⁷⁰ H. HINTENBERGER, L. SCHULTZ u. H. WÄNKE, in Vorbereitung, erscheint in Z. Naturforschg. 1965.

⁷¹ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg. 17 a, 306 [1962].

⁷² P. SIGNER, private Mitteilung.

Die Produktionsraten von ^{36}Cl und ^{39}Ar in Metall- und Steinphase des Chondriten Leedey

F. BEGEMANN, E. VILCSEK und H. WÄNKE

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

(Z. Naturforschg. 21 a, 110—115 [1966]; eingegangen am 2. Juli 1965)

Herrn Professor J. MATTAUCH zum 70. Geburtstag gewidmet

The production rates of ^{36}Cl and ^{39}Ar by the cosmic radiation on Fe and Ca+K have been determined in the chondrite Leedey. The values of

$19.4 \text{ atoms/min} \cdot \text{kg} \leq P_{\text{Fe}}(^{36}\text{Cl}) \leq 26.6 \text{ atoms/min} \cdot \text{kg}$ and $P_{\text{Fe}}(^{39}\text{Ar}) = (23.6 \pm 1.8) \text{ atoms/min} \cdot \text{kg}$ are in good agreement with those found in iron meteorites of comparable size. A large contribution of Ca+K to the production of both isotopes is indicated by the ratios

$$9.2 \leq P_{\text{Ca+K}}(^{36}\text{Cl})/P_{\text{Fe}}(^{36}\text{Cl}) \leq 13.6 \text{ and } P_{\text{Ca+K}}(^{39}\text{Ar})/P_{\text{Fe}}(^{39}\text{Ar}) = 12.1 \pm 1.6.$$

The bearing of these results on the interpretation of ^{39}Ar -data obtained on other chondrites is being discussed.

In Eisen- sowohl als auch Steinmeteoriten wurde bereits von verschiedenen Autoren das durch die kosmische Strahlung erzeugte ^{36}Cl und ^{39}Ar gemessen¹⁻¹⁸. Dabei hat sich ergeben, daß in Eisenmeteoriten beide Isotope etwa gleich häufig erzeugt werden [$P(^{39}\text{Ar})/P(^{36}\text{Cl}) \cong 0,9$] und daß die maximale ^{36}Cl -Zerfallsrate bei kleinen Meteoriten etwa 25 Zerfälle/min·kg beträgt¹³. In Steinmeteoriten da-

gegen wurden ^{36}Cl -Aktivitäten von etwa 8 Zerfällen/min·kg gefunden¹⁶, während die des ^{39}Ar zwischen 5 und 12 Zerfällen pro min·kg liegen^{4, 5, 10, 14-16}. Diese in Chondriten gemessenen Werte sind mit einer Ausnahme beträchtlich höher als man allein aus dem Eisen- und Nickelgehalt erwarten sollte und deuten entweder darauf hin, daß die Produktion an leichteren Elementen – besonders K und Ca – nicht

¹ E. L. FIREMAN, Nature, Lond. 181, 1613 [1958].

² H. WÄNKE u. E. VILCSEK, Z. Naturforschg. 14 a, 929 [1959].

³ E. L. FIREMAN u. J. DEFELICE, Geochim. Cosmochim. Acta 18, 183 [1960].

⁴ R. W. STOENNER, O. A. SCHAEFFER u. R. DAVIS, J. Geophys. Res. 65, 3025 [1960].

⁵ E. L. FIREMAN u. J. DEFELICE, J. Geophys. Res. 65, 3035 [1960].

⁶ E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg. 16 a, 379 [1961].

⁷ M. HONDA, J. P. SHEDLOVSKY u. J. R. ARNOLD, Geochim. Cosmochim. Acta 22, 133 [1961].

⁸ D. HEYMANN u. O. A. SCHAEFFER, J. Geophys. Res. 66, 2535 [1961].

⁹ M. HONDA, S. UMEMOTO u. J. R. ARNOLD, J. Geophys. Res. 66, 3541 [1961].

¹⁰ E. L. FIREMAN u. J. DEFELICE, J. Geophys. Res. 66, 3547 [1961].

¹¹ D. HEYMANN u. O. A. SCHAEFFER, Physica 28, 1318 [1962].

¹² P. S. GOEL u. T. P. KOHMAN, Proc. IAEA Symp. Radioactive Dating Athen 1962; IAEA, Wien 1963.

¹³ E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Proc. IAEA Symp. Radioactive Dating Athen 1962; IAEA, Wien 1963.

¹⁴ R. DAVIS, R. W. STOENNER u. O. A. SCHAEFFER, Proc. IAEA Symp. Radioactive Dating Athen 1962; IAEA, Wien 1963.

¹⁵ E. L. FIREMAN, J. DEFELICE u. D. TILLES, Proc. IAEA Symp. Radioactive Dating Athen 1962; IAEA, Wien 1963.

¹⁶ M. HONDA u. J. R. ARNOLD, Science 143, 203 [1964].

¹⁷ O. A. SCHAEFFER u. D. HEYMANN, J. Geophys. Res. 70, 215 [1965].

¹⁸ F. BEGEMANN u. E. VILCSEK, Z. Naturforschg. 20 a, 533 [1965].