

Eisenmeteorite als Raumsonden für die Untersuchung des Intensitätsverlaufes der kosmischen Strahlung während der letzten Milliarden Jahre

Von H. VOSHAGE

Aus dem Max-Planck-Institut für Chemie (Otto-Hahn-Institut), Mainz
(Z. Naturforschg. 17 a, 422—432 [1962]; eingegangen am 27. März 1962)

The use of iron meteorites for the establishment of possible long-time variations (10^8 — 10^9 years) of the cosmic ray intensity in interplanetary space is based upon the study of the production rates of nuclides which are formed by the interaction of cosmic ray particles with nuclei in meteorites. Mass spectrometric measurements of the isotopic composition of meteoritic potassium* are combined with data on cosmogenic rare gases and other elements to give K^{41} - K^{40} -exposure ages and rare gas production rates. The K^{41} - K^{40} -exposure ages are larger than the exposure ages obtained from the study of short-lived activities (e. g. Cl^{36} , A^{39}), by a factor 1.3 to 1.8. This result indicates that the cosmic ray intensity increased during the bombardment history of the meteorites. The data, for example, are consistent with the following assumptions: 1) The cosmic ray intensity was constant during most of the bombarding time and increased by a factor of about 1.5 only a few million years ago. 2) The intensity rose as $I(t) = I_0 e^{-\gamma t}$ with $-1.1 \cdot 10^{-9} \leq \gamma \leq -0.6 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$. The consequences of this result for the interpretation of meteorite data are discussed.

Es sind bereits verschiedene Versuche¹⁻⁴ erfolgreich gewesen, aus Daten über kosmogene Nuklide in Eisenmeteoriten Aussagen über den Fluß der kosmischen Strahlung während der letzten paar Millionen Jahre zu gewinnen: Die in frisch gefallenen Meteoriten gemessenen spezifischen Aktivitäten von kosmogenen Radionukliden mit Halbwertszeiten zwischen 16 Tagen (^{48}V) und einigen Millionen Jahren (^{10}Be , ^{53}Mn) sollten — da die Lebensdauer der Eisenmeteorite im interplanetaren Raum hinreichend größer ist als die Halbwertszeiten der betrachteten Nuklide — bei gleichbleibender Bestrahlungsintensität im Gleichgewicht stehen mit der Produktion dieser Nuklide im präatmosphärischen Meteoriten. In der Tat stimmen die Verhältnisse der gemessenen Aktivitäten verschiedener Radionuklide in Eisenmeteoriten überein mit den Verhältnissen der Gleichgewichtsaktivitäten, wie sie sich aus den Ergebnissen von Spallationsexperimenten mit hochenergetischen Protonen^{5,6} oder aus theoretischen Überlegungen⁴ berechnen lassen. Aus dem Grad dieser Übereinstimmung ergibt sich, daß der Fluß der kosmischen Strahlung — abgesehen von nicht

erfaßbaren relativ kurzfristigen Schwankungen, die möglicherweise aufgetreten sind — während der letzten 10^5 Jahre bis auf 10% (vgl. Anm.^{1,2}) und während der letzten paar Millionen Jahre bis auf einen Faktor 2 oder 3 (vgl. Anm.^{3,4}) konstant war.

Schon frühzeitig wurde darauf hingewiesen^{7,8}, daß sich die Untersuchung des Intensitätsverlaufes der kosmischen Strahlung auf den gesamten Zeitraum der nachweisbaren extraterrestrischen Existenz von Eisenmeteoriten, also auf einen Zeitraum der Größenordnung von 10^9 Jahren ausdehnen ließe, wenn es gelänge, das kosmogene ^{40}K relativ zu einem oder mehreren anderen kosmogenen Nukliden mit genügender Genauigkeit zu messen. Das Isotop ^{40}K erreicht wegen seiner langen Halbwertszeit von $1,28 \cdot 10^9$ Jahren in Meteoriten nicht die Gleichgewichtsaktivität und nimmt daher unter allen anderen kosmogenen Radionukliden und gegenüber den stabilen Nukliden eine Sonderstellung ein. Das Problem des langfristigen Intensitätsverlaufes kann jedoch erst einer Lösung nähergeführt werden, nachdem in jüngster Zeit die Isotopenhäufigkeiten von Kalium aus solchen Eisenmeteoriten relativ genau

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

¹ E. L. SPRENKEL, R. DAVIS u. E. O. WIG, Bull. Amer. Phys. Soc., Ser. II, 4, 223 [1959].

² D. HEYMANN u. O. A. SCHAEFFER, Abstract 42nd Ann. Meeting Amer. Geophys. Union, Washington, D.C., April 1961.

³ M. HONDA u. J. R. ARNOLD, Geochim. Cosmochim. Acta 23, 219 [1961].

⁴ J. R. ARNOLD, M. HONDA u. D. LAL, J. Geophys. Res. 66, 3519 [1961].

⁵ O. A. SCHAEFFER u. J. ZÄHRINGER, Z. Naturforschg. 13 a, 346 [1958]; Phys. Rev. 113, 674 [1959].

⁶ M. HONDA u. D. LAL, Phys. Rev. 118, 1618 [1960].

⁷ W. GENTNER u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta 11, 60 [1957].

⁸ J. GEISS, Chimia 11, 349 [1957].



bestimmt werden konnten⁹, welche auch im Hinblick auf ihren Gehalt an kosmogenen Edelgasisotopen und Radionukliden sorgfältig untersucht sind.

Auf Grund unserer Kaliumergebnisse⁹ haben wir schon früher darauf hingewiesen¹⁰, daß die Annahme einer langfristigen Konstanz der Strahlungsintensität nicht mit allen experimentellen Daten über die Produktion kosmogener Nuklide in Eisenmeteoriten verträglich ist und daß angenommen werden muß, daß die Intensität während der letzten Millionen Jahre höher war als die mittlere Intensität während der übrigen Bestrahlungszeit der Eisenmeteorite.

Dieser Befund wird in der vorliegenden Arbeit bestätigt und genauer diskutiert.

I. Die Bestimmung der ⁴¹K-⁴⁰K-Strahlungsalter

Wie in vorhergehenden Arbeiten⁹⁻¹¹ gezeigt wurde, lassen sich aus den Massenspektren von meteoritischem Kalium auch dann die ⁴¹K-⁴⁰K-Strahlungsalter der Eisenmeteorite bestimmen, wenn dem kosmogenen Kalium ein mäßiger Anteil von akzessorischem Kalium normaler Isotopenzusammensetzung beigemischt ist. Unter der Annahme, daß die Meteorite mit zeitlich konstanter Intensität bestrahlt wurden, gilt der Zusammenhang

$$F(T_S) = \frac{\lambda T_S}{1 - e^{-\lambda T_S}} = \left(\frac{{}^{41}\text{K}}{{}^{40}\text{K}} - a \frac{{}^{39}\text{K}}{{}^{40}\text{K}} \right) / \left(\frac{P_{41}}{P_{40}} - a \frac{P_{39}}{P_{40}} \right) = \frac{M}{N}. \quad (1)$$

Dabei sind T_S das Strahlungsalter, λ die Zerfallskonstante von ⁴⁰K, P die Produktionsraten der kosmogenen Kaliumisotope und a das Isotopenhäufigkeitsverhältnis ⁴¹K_n/³⁹K_n der Beimischung an normalem Kalium.

Während die „ M -Werte“

$$M = ({}^{41}\text{K}/{}^{40}\text{K}) - a ({}^{39}\text{K}/{}^{40}\text{K}) \quad (2)$$

für eine Anzahl von Meteoriten gemessen sind⁹, lassen sich die „ N -Werte“

$$N = (P_{41}/P_{40}) - a (P_{39}/P_{40}) \quad (3)$$

nicht messen. Bestrahlungsexperimente mit künstlich beschleunigten Teilchen und massenspektrometri-

chem Nachweis des Spallations-Kaliums geben keinen direkten Aufschluß über N : wegen der langen Halbwertszeit des dabei gebildeten ⁴¹Ca ($T_{1/2} = 1,1 \cdot 10^5$ Jahre) wird zu wenig ⁴¹K erhalten; auch die Energieverteilung der Strahlung im Meteoriten läßt sich im Labor nicht mit genügender Genauigkeit nachahmen.

Näherungsweise wurden Aussagen über die ⁴¹K-⁴⁰K-Strahlungsalter der Eisenmeteorite bisher mit folgenden Annahmen gemacht:

a) Die Verhältnisse der Produktionsraten der verschiedenen Kaliumisotope und damit die N -Werte ändern sich nicht wesentlich mit der Härte der Strahlung, d. h. sie ändern sich nicht mit der Tiefe, in welcher die untersuchte Probe während der Bestrahlung im Meteoriten eingebettet und durch die umgebende Materie abgeschirmt war. Unter dieser Voraussetzung kann man die Differenzen der Strahlungsalter verschiedener Meteorite ungefähr bestimmen, ohne die absolute Größe der N -Werte zu kennen¹¹.

b) Die N -Werte sind für alle Meteorite gleich und mit genügender Genauigkeit aus den Ergebnissen von Bestrahlungsexperimenten mit künstlich beschleunigten Teilchen ableitbar^{12, 13}.

c) Die N -Werte sind für alle Meteorite gleich. N wird nach Gl. (1) durch Messung des M -Wertes eines Meteoriten bestimmt, für welchen das Strahlungsalter T_S als bekannt angenommen wird (vgl. Anm. ⁹, „1. Näherung“).

d) Die N -Werte werden aus den relativen Produktionsraten für die Kaliumisotope berechnet, welche von ARNOLD, HONDA und LAL⁴ aus theoretischen Überlegungen gewonnen worden waren. Mit den Ergebnissen dieser Autoren ergibt sich eine Korrelation zwischen den N -Werten und den He/Ne-Verhältnissen, nach welcher der individuelle N -Wert einer Probe bestimmt werden kann, wenn ihr He/Ne-Verhältnis bekannt ist. Auf diese Weise werden die N -Werte abhängig von der Härte der Strahlung (vgl. Anm. ⁹, „2. Näherung“).

Da die berechneten ⁴¹K-⁴⁰K-Strahlungsalter recht empfindlich von der Wahl des N -Wertes abhängen, sind die N -Werte die eigentlich kritischen Größen bei der Untersuchung der Frage, ob die Intensität der kosmischen Strahlung konstant war. Die unter

⁹ H. VOSHAGE u. H. HINTENBERGER, Z. Naturforschg. **16 a**, 1042 [1961].

¹⁰ H. VOSHAGE u. H. HINTENBERGER, Conf. Fission and Spallation Phenomena and Their Application to Cosmic Rays, CERN, Sept. 1961.

¹¹ H. VOSHAGE u. H. HINTENBERGER, Z. Naturforschg. **14 a**, 828 [1959].

¹² R. R. MARSHALL, Nature, Lond. **184**, 117 [1959].

¹³ H. VOSHAGE u. H. HINTENBERGER, Nature, Lond. **185**, 88 [1960].

a) bis d) aufgeführten Näherungsmethoden für die Bestimmung von N sind noch unbefriedigend, weil die gemachten Annahmen zum Teil in Zweifel gezogen werden müssen und auch die von ARNOLD, HONDA und LAL berechneten relativen Produktionsraten von vornherein nicht als hinreichend genau anzusehen sind. Die Anwendung des Verfahrens c) setzt außerdem voraus, daß die Bestrahlungsintensität konstant war — was ja eigentlich untersucht werden soll.

Im folgenden wird das Problem der Bestimmung der N -Werte erneut behandelt, wobei experimentelle Ergebnisse benutzt werden können, die uns bei der Niederschrift früherer Arbeiten noch nicht zugänglich waren.

1. Einfluß der Strahlungshärte auf den N -Wert

STAUFFER und HONDA¹⁴ haben kürzlich gezeigt, daß man die Konzentrationen von stabilen kosmogenen Kernen, welche die Produktion ihrer gesamten Isobaren auf sich vereinigen, in der Form der Gleichung

$$C(A) = k_1 (\Delta A)^{-k_2} \quad (4)$$

als Funktion ihres Massenzahlabstandes ΔA vom wichtigsten Targetnuklid ^{56}Fe darstellen kann. Die Konzentrationen irgendwelcher stabilen Nuklide, welche stabile Isobare besitzen, lassen sich durch die Gleichung

$$C(A, Z) = g(A, Z) \cdot k_1 (\Delta A)^{-k_2} \quad (5)$$

beschreiben. $g(A, Z)$ stellt nach STAUFFER und HONDA den Anteil der Produktion des Nuklids (A, Z) an der totalen Produktion der Isobaren A dar.

Die Größen k_1 und k_2 wurden für eine Reihe von Meteoritenproben bestimmt. Aus Überlegungen von GEISS, OESCHGER und SCHWARZ¹⁵ geht hervor, daß die Größe k_2 die Härte der Strahlung in der untersuchten Probe charakterisiert. Dieser Zusammenhang wird auch durch Vergleich der Zeilen 3 bis 7 der Tab. 1 klar, wo für eine Reihe gut bekannter Eisenmeteorite neben k_2 eine größere Anzahl von Isotopenverhältnissen zusammengestellt sind, welche z. B. nach Untersuchungen von WÄNKE¹⁶ sowie SIGNER und NIER^{17, 18} stark härteempfindlich sind. Die Edelgasergebnisse wurden von HINTENBERGER und WÄNKE¹⁹ sowie SIGNER und NIER¹⁸ erhalten.

Zeile	Größe	Dimension	Meteorit						Literatur
			Charlotte	Treysa	Clark County	Aroos	Williamstown	Carbo außen	
1	terrestr. Alter	Jahre	127	46	$\sim 6 \cdot 10^5$	3	$\sim 6 \cdot 10^5$	$> 10^3$	20—23, 30
2	Masse	kg	4,4	63	[11,3]	150	[30]	[454]	20, 21
3	k_2		2,0 ^a	2,12	2,36	2,45	2,53	2,64	14
4	He/Ne		103	114	126	139	—	164	19
5	$^3\text{He}/^4\text{He}$		0,329	0,297	0,287	0,276	—	0,245	19
6	$^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$		—	72 ^b	72	80	88	99	18
7	$^{38}\text{Ar}/^{21}\text{Ne}$		—	4,1 ^b	4,6	5,3	5,5	5,8	18
8	M		1,597	1,743	2,144	1,928	1,803	1,97	9
9	He	$10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$	15,7	24,8	49,0	30,4	—	21,2	19
10	Ne	$10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$	15,2	21,8	39,0	21,8	—	12,9	19
11	^3He	$10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$	—	580 ^b	1095	655	460	410	18
12	^{21}Ne	$10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$	—	8,05 ^b	15,2	8,15	5,30	4,40	18
13	^{38}Ar	$10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$	—	33 ^b	69	43	28	25	18
14	^{36}Cl	Zerfälle/min kg	25,4 ^c	20,3 ^c	[4,75]	18,5 ^c	—	[8,1]	27
15	^{39}Ar	Zerfälle/min kg	22,8 ^c	20,3 ^c	0	17,2 ^c	—	0	27

^a geschätzt, ^b Meßergebnis von SIGNER u. NIER, mitgeteilt von STAUFFER u. HONDA¹⁴; der Wert 8,05 für ^{21}Ne wurde von WÄNKE mitgeteilt, ^c auf die Fallzeit zurück-extrapoliert.

Tab. 1. Die verwendeten experimentellen Daten.

¹⁴ H. STAUFFER u. M. HONDA, J. Geophys. Res. (im Druck).

¹⁵ J. GEISS, H. OESCHGER u. U. SCHWARZ, Lecture Presented at the Varenna Summer Course on Cosmic Rays, Solar Particles and Space Research, May 1961.

¹⁶ H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **15a**, 953 [1960].

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

¹⁸ P. SIGNER u. A. O. NIER, J. Geophys. Res. (im Druck).

¹⁹ H. HINTENBERGER u. H. WÄNKE, Conf. Fission and Spallation Phenomena and Their Application to Cosmic Rays, CERN, Sept. 1961. — Z. Naturforsch. (in Vorbereitung).

Die sechs Meteorite in Tab. 1 sind in der Reihenfolge abnehmender Strahlungshärte eingetragen. Es wurde eine möglichst große Anzahl von Messungen über härteempfindliche Isotopenverhältnisse berücksichtigt, um Zufälligkeiten auszuschließen, die durch die besondere Lage einer Probe innerhalb des Meteoriten bedingt sein könnten. Aus dem gleichmäßigen Gang aller dieser Daten längs jeder Tabellenzeile kann man schließen, daß die Größe des Meteoriten — solange man es nicht mit zu großen Meteoriten zu tun hat! — mehr Einfluß auf die Produktion kosmogener Nuklide hat als die Tiefe, aus der die Probe bei einem Meteoriten irgendeiner Größe stammt.

Auch die aufgefundenen Meteoritenmassen^{20, 21} stützen diese Vorstellungen. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Meteorite Williamstown und Clark County nach Untersuchungen von ARNOLD²² und Mitarbeitern bzw. von VILCEK und WÄNKE²³ ein sehr hohes terrestrisches Alter von etwa $6 \cdot 10^5$ Jahren haben. Es ist auffällig, daß gerade diese beiden Meteorite eine im Vergleich zu ihren härteempfindlichen Isotopendaten zu niedrige Masse haben. Es ist denkbar, daß der größte Teil ihrer Massen der Verwitterung zum Opfer gefallen ist, während von den anderen Meteoriten mit kleinerem terrestrischen Alter der größte Teil wirklich aufgefunden wurde.

Überträgt man die Beziehungen (4) und (5) für die Konzentrationen C auf die Produktionsraten P , so erhält man mit Gl. (3) für N die Beziehung

$$N = \frac{n(k_2)}{g(^{40}\text{K})} = \left[\left(\frac{15}{16} \right)^{-k_2} - a \left(\frac{17}{16} \right)^{-k_2} \right] / g(^{40}\text{K}). \quad (6)$$

Für den praktisch interessierenden Bereich $2,0 \leq k_2 \leq 2,7$ und für eine größere Anzahl von g -Werten sind die Funktionen $N(k_2)$ in Abb. 1 dargestellt. Es ergibt sich ein Anstieg der N -Werte mit abnehmender Härte der Strahlung wie er auch in der Beziehung $N = N(\text{He}/\text{Ne})$ der vorhergehenden Arbeit⁹ zum Ausdruck kommt.

Diese Übereinstimmung ist sogar quantitativ: In Abb. 1 sind als offene Kreise die N -Werte aus unserer früheren Arbeit⁹ für alle die Meteorite eingezeichnet, für welche k_2 bekannt ist; für Charlotte wurde k_2 geschätzt. Mit Ausnahme des Wertes für Williamstown liegen diese N -Werte auf der durch

den Parameter $g = 0,73$ gegebenen Kurve nach Gl. (6).

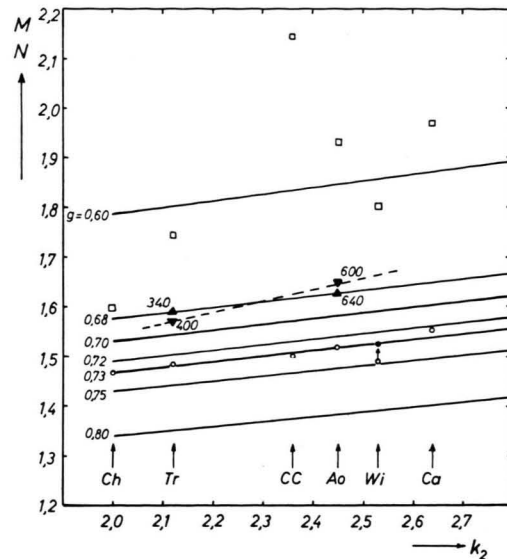


Abb. 1. Die Funktion $N(k_2)$ mit verschiedenen $g(^{40}\text{K})$ als Parameter nach Gl. (6). Offene Kreise: N -Werte aus der vorhergehenden Arbeit⁹. Voller Kreis: korrigierter N -Wert für Williamstown. Dreiecke: N -Werte, die nach Gl. (1) aus den M -Werten von Treysa und Aroos unter den Annahmen berechnet wurden, die ^{41}K - ^{40}K -Strahlungsalter seien 400 oder 340 bzw. 600 oder 640 Millionen Jahre und die Intensität der kosmischen Strahlung sei konstant. Offene Quadrate: experimentelle M -Werte. Abkürzungen: Ch=Charlotte, Tr=Treysa, CC=Clark County, Ao=Aroos, Wi=Williamstown, Ca=Carbo.

Der früher⁹ für Williamstown angegebene N -Wert von 1,489, zu dessen Bestimmung ein He/Ne-Verhältnis von 119 benutzt worden war, ist zweifellos falsch; sowohl die Edelgasdaten von SIGNER und NIER¹⁸ als auch der von STAUFFER und HONDA¹⁴ gemessene k_2 -Wert weisen darauf hin, daß die Härte der Bestrahlung geringer als bei Aroos und größer als bei Carbo war. Der durch $N(g = 0,73; k_2 = 2,53)$ gegebene N -Wert für Williamstown ist 1,525, das entsprechende Strahlungsalter $635 \cdot 10^6$ statt $725 \cdot 10^6$ Jahre, wie früher angegeben wurde.

2. Bestimmung von $g(^{40}\text{K})$

Mit STAUFFER und HONDA¹⁴ nehmen wir an, daß die Größe $g(^{40}\text{K})$ ihrerseits nicht auch härteempfindlich, d. h. selbst nicht auch von k_2 abhängig ist.

²⁰ G. T. PRIOR u. M. H. HEY, Catalogue of Meteorites, British Museum, London 1953.

²¹ K. KEIL, Fortschr. Miner. **38**, 202 [1960].

²² J. R. ARNOLD, Ann. Rev. Nucl. Sci. **11**, 349 [1961].

²³ E. VILCEK u. H. WÄNKE, private Mitteilung.

STAUFFER und HONDA¹⁴ haben aus ihren Daten und aus dem von HONDA und SIGNER²⁴ für Aroos erhaltenen ^{36}A - ^{36}Cl -Strahlungsalter von $690 \cdot 10^6$ Jahren die Zahl $g(^{40}\text{K})$ zu 0,6 bestimmt. Aus experimentellen Daten über Wirkungsquerschnitte von HONDA und LAL²⁵ berechneten sie $g(^{40}\text{K}) = 0,63$. RUDSTAM²⁶ erhält dagegen auf Grund seiner neueren Untersuchungen über die Wirkungsquerschnitte $g(^{40}\text{K}) = 0,73$.

Aus Abb. 1, wo auch die M -Werte als offene Quadrate eingetragen sind (vgl. Zeile 8 der Tab. 1), geht hervor, daß $g(^{40}\text{K}) = 0,6$ oder $0,63$ unmöglich die richtigen Werte sein können. Es gibt eine große Zahl von Meteoriten (Charlotte, Bristol, Lombard, Treysa, Tamarugal, Williamstown und Thunda), für welche die M -Werte entschieden niedriger liegen⁹ als die N -Werte, welche diesen kleinen Werten von $g(^{40}\text{K})$ entsprechen; mit $g = 0,6$ oder $0,63$ hätten diese Meteorite ein z. Tl. sehr stark negatives Strahlungsalter. Da die ^{41}K - ^{40}K -Strahlungsalter näherungsweise durch die Gleichung

$$T_S = (2/\lambda) \cdot (M - N)/M \quad (7)$$

gegeben sind, ist unmittelbar aus Abb. 1 abzulesen, daß $g(^{40}\text{K})$ größer sein muß als 0,67.

Unter der Annahme langzeitiger Konstanz der kosmischen Strahlung ergibt sich nun der richtige Wert für $g(^{40}\text{K})$ in folgender Weise:

Man berechnet für jedes (nicht von vornherein aus schon angeführten Gründen ausscheidende) $g(^{40}\text{K})$ die ^{41}K - ^{40}K -Strahlungsalter der in Tab. 1 aufgeführten Meteorite. Zusammen mit den in Tab. 1, Zeile 9 bis 13, aufgeführten Konzentrationen^{18, 19} von He, Ne, ^3He , ^{21}Ne und ^{38}A ergeben sich die entsprechenden Edelgas-Produktionsraten. Die Ergebnisse für He und ^{38}A werden als typische Beispiele in den Abb. 2 und 3 mitgeteilt. Die für verschiedene Meteorite, aber gleichen g -Wert berechneten Produktionsraten sind durch Linienzüge untereinander verbunden.

Die Auswahl des richtigen $g(^{40}\text{K})$ -Wertes erfolgt, indem man denjenigen Linienzug aufsucht, bei welchem die Produktionsraten mit wachsendem k_2 , d. h. mit wachsender Größe des präatmosphärischen Meteoriten monoton, mäßig, aber durchaus merklich abnehmen. Zumindest für kosmogene Nuklide, wel-

che bevorzugt durch den hochenergetischen Anteil der Strahlung produziert werden, ist diese Regel einleuchtend: infolge der Schwächung dieses Strahlungsanteiles durch die umgebende Materie ist die Produktion in jeder Probe eines größeren Meteoriten – sofern man von zu großen Meteoriten mit einer Masse von mehr als ungefähr 500 kg absieht – kleiner als in einem kleineren Meteoriten. Die von VILCSEK und WÄNKE²⁷ gemessenen Aktivitäten der radioaktiven Nuklide ^{36}Cl und ^{39}A in den Meteoritenfällen Charlotte, Treysa und Aroos (Tab. 1, Zeilen 14 und 15) zeigen, daß die Produktionsraten auch für diese Nuklide mit wachsendem k_2 merklich abnehmen. Die Neigung des durch diese Aktivitäten gegebenen Linienzuges muß in guter Übereinstimmung stehen mit der Neigung des „richtigen“ Linienzuges für ^{38}A ; die Neigung des entsprechenden Linienzuges für die Produktionsraten von Ne muß

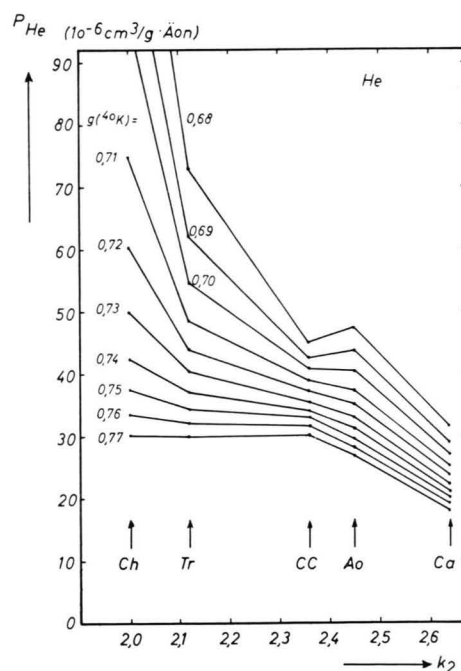


Abb. 2. Helium-Produktionsraten bei konstanter Strahlungsintensität für die Meteorite Charlotte, Treysa, Clark County, Aroos und Carbo in Abhängigkeit von $g(^{40}\text{K})$. Auf Grund eines Vergleiches mit den ^{36}Cl - und ^{39}A -Aktivitäten aus Tab. 1, Zeilen 14 und 15, wird eine k_2 -Abhängigkeit dieser Produktionsraten erwartet, welche einem der Linienzüge mit den Parameterwerten $g(^{40}\text{K}) = 0,73 \pm 0,01$ entspricht.

1 Äon = 10^9 Jahre.

²⁴ Nach einer Mitteilung von STAUFFER und HONDA¹⁴.

²⁵ M. HONDA u. D. LAL, in Vorbereitung.

²⁶ G. RUDSTAM, private Mitteilung.

²⁷ E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Conf. Fission and Spallation Phenomena and Their Application to Cosmic Rays, CERN, Sept. 1961. — Z. Naturforsch. (in Vorbereitung).

etwas steiler verlaufen, weil Ne besonders selektiv von der hochenergetischen Strahlungskomponente erzeugt wird.

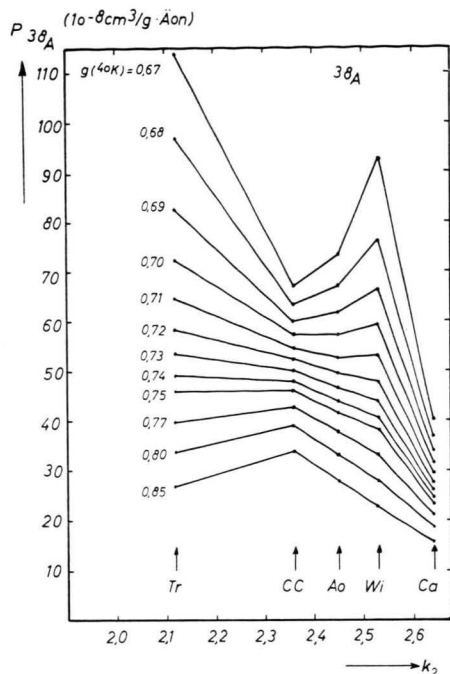


Abb. 3. Produktionsraten für ^{38}A bei konstanter Strahlungsintensität in Abhängigkeit von $g(^{40}\text{K})$. Die im Text und in der Unterschrift zu Abb. 2 erläuterten Gesichtspunkte führen auch hier auf $g(^{40}\text{K}) = 0,73 \pm 0,01$.

Diese Auswahlregeln führen bei He, Ne, ^{21}Ne und ^{38}A auf $g = 0,73 \pm 0,01$ und bei ^3He auf $g = 0,74 \pm 0,01$. Mit $g = 0,73 \pm 0,01$ als Ergebnis dieser Untersuchung erhält man eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit den früheren Annahmen⁹ über die N -Werte, welchen die von ARNOLD, HONDA und LAL⁴ berechneten Produktionsraten zugrunde liegen. Außerdem stimmt dieser Wert genau mit dem von RUDSTAM²⁶ angegebenen Ergebnis überein.

3. Die ^{41}K - ^{40}K -Strahlungsalter

Nach den Gln. (1) und (6), den in Tab. 1 angegebenen experimentellen Daten und $g(^{40}\text{K}) = 0,73 \pm 0,01$ erhält man die folgenden ^{41}K - ^{40}K -Strahlungsalter (in Millionen Jahren):

Charlotte	315	Aroos	920
Treysa	615	Williamstown	635
Clark County	1375	Carbo	950

Die Fehler betragen für die Meteorite übereinstimmend etwa ± 60 Millionen Jahre, da die Fehler in den M -Werten bei dem hier eingeschlagenen Eichverfahren zumindest nicht mehr voll angerechnet werden können. Die Abweichungen dieser Alter von den früher angegebenen Werten sind nur für Williamstown wesentlich (siehe I.1).

Auch bezüglich der früher⁹, aber hier nicht untersuchten Meteorite ist zunächst nichts Neues hinzuzufügen. Für diese Meteorite ist jedoch die Einordnung in die „Härteskala“ nicht sicher genug, da zahlreiche Daten noch nicht gemessen bzw. nachgeprüft wurden und k_2 nicht bekannt ist.

II. Das zeitliche Anwachsen der kosmogenen Isotopenproduktion in Eisenmeteoriten

1. Vergleich verschiedener Strahlungsalter

Bei der Bestimmung von Strahlungsaltern aus den Gleichgewichtsaktivitäten kosmogener Radionuklide in Meteoriten mit hinreichend kleinem terrestrischen Alter und aus den Konzentrationen stabiler Kerne kommt es — anders als bei der in Abschnitt I beschriebenen Schlußweise — darauf an, daß die Verhältnisse aus den Gleichgewichtsaktivitäten und Konzentrationen für jeden Meteoriten auch absolut genau bekannt sind²⁸⁻³². Das Strahlungsalter ergibt sich dann aus der Gleichung³⁰

$$T_s(C_i, A_k) = \left(\frac{P_k}{P_i} \right) \cdot \frac{C_i}{A_k}, \quad (8)$$

wo A_k die spezifische Aktivität des Meteoriten an dem Radionuklid k zur Fallzeit, C_i die Konzentration eines stabilen kosmogenen Nuklides i und P_k/P_i das Verhältnis der Produktionsraten beider Nuklide ist. Für das Paar ($k = ^{36}\text{Cl}$, $i = ^{36}\text{A}$) ist das Verhältnis $P_k/P_i = 0,8$ besonders sicher bekannt³³. Eine Übereinstimmung der ^{36}A - ^{36}Cl - mit den ^{41}K - ^{40}K -Strahlungsaltern wäre daher ein Hinweis, daß die Intensität der kosmischen Strahlung während der gesamten Bestrahlungszeit der Meteorite konstant war.

²⁸ E. L. FIREMAN u. D. SCHWARZER, Geochim. Cosmochim. Acta **11**, 252 [1957].

²⁹ F. BEGEMANN, J. GEISS u. D. HESS, Phys. Rev. **107**, 540 [1957].

³⁰ H. WÄNKE u. E. VILCSEK, Z. Naturforschg. **14 a**, 929 [1959].

³¹ E. L. FIREMAN u. J. DE FELICE, Geochim. Cosmochim. Acta **18**, 379 [1961].

³² E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg. **16 a**, 379 [1961].

³³ O. A. SCHAEFFER u. J. ZÄHRINGER, Phys. Rev. **113**, 674 [1959].

Für die Meteorite Treysa und Aroos sind die folgenden ^{36}A - ^{36}Cl - bzw. ^{38}A - ^{39}A -Strahlungsalter gemessen worden (in Millionen Jahren):

Treysa	Aroos	Autoren
350	585	HEYMANN u. SCHAEFFER ^{34,35}
450		FIREMAN u. DE FELICE ³¹
	690	HONDA u. SIGNER ²⁴
450	540	VILCSEK u. WÄNKE ³⁶

Die ^{41}K - ^{40}K -Strahlungsalter liegen um einen Faktor 1,3 bis 1,8 höher als die Strahlungsalter, die durch Aktivitätsbestimmungen, also durch Bestimmungen der Isotopenproduktionsraten für die allerletzte Bestrahlungsperiode der Meteorite erhalten wurden.

Unter der Annahme, daß die kosmogene Isotopenproduktion zeitlich konstant war und daß die Strahlungsalter z. B. für Treysa $400 \cdot 10^6$ oder $340 \cdot 10^6$ Jahre und für Aroos $600 \cdot 10^6$ oder $640 \cdot 10^6$ Jahre betragen sollten, wurden mit unseren M -Werten nach Gl. (1) die N -Werte berechnet. Sie sind in Abb. 1 als Dreiecke eingezeichnet. Es geht unmittelbar aus der Abbildung und den in Abschnitt I gemachten Ausführungen hervor, daß durch diese Punkte keine mit anderen Informationen über die Einwirkung der kosmischen Strahlung auf die Meteorite verträgliche Funktion $N = N(k_2)$ festgelegt werden kann. Eine „Eichung“ der ^{41}K - ^{40}K -Methode z. B. mit der ^{36}A - ^{36}Cl -Methode führt zu völlig unvernünftigen Ergebnissen.

2. Erhöhte Produktionsraten während der letzten Millionen Jahre

Die Diskrepanz in den Strahlungsaltern kann man mit folgenden Annahmen beseitigen¹⁰:

Da die experimentellen Daten über kosmogenes Kalium und kosmogene Edelgase unter der Annahme langzeitiger Konstanz der Produktionsraten sehr gut miteinander verträglich sind (I.2), liegt die Vermutung nahe, daß lediglich während der letzten Bestrahlungsperiode der uns bekannten Eisenmeteorite eine anomal erhöhte Isotopenproduktion eingetreten ist, während diese in der übrigen Zeit konstant war. Der Beitrag von nur relativ kurzzeitig und nicht allzu stark erhöhten Produktionsraten zur Produktion der stabilen Isotope sowie zur Produk-

tion von ^{40}K ist vernachlässigbar. Für die Aktivitäten z. B. von ^{36}Cl und ^{39}A sind dagegen allein die Produktionsraten in den letzten 10^6 Jahren entscheidend. Nach den Ergebnissen von Abschnitt II.1 waren sie offensichtlich größer als in der übrigen Bestrahlungszeit.

Möglicherweise ist die Intensität der kosmischen Strahlung vor einigen (ca. 1 bis 40) Millionen Jahren mehr oder weniger plötzlich um einen Faktor 1,3 bis 1,8 von ihrem langzeitigen Mittelwert auf ihren derzeitigen Wert angestiegen. Diese Annahme steht nicht im Widerspruch zu dem in der Einleitung erwähnten Resultat, daß die Intensität während der letzten 10^5 Jahre bis auf 10%, während der letzten Millionen Jahre bis auf einen Faktor 2 oder 3 konstant gewesen ist.

Andere Erklärungsversuche für die Erhöhung der Produktionsraten erscheinen zumindest nicht weniger spekulativ.

3. Untersuchung einer exponentiellen Zeitabhängigkeit für die Intensität der kosmischen Strahlung

Der in Abschnitt II. 2 mitgeteilte Schluß ist jedoch nicht zwingend, da die in Abschnitt I. 2 erläuterte Bestimmung von $g(^{40}\text{K})$ gerade unter der Voraussetzung erfolgte, daß die Produktionsraten zeitlich konstant gewesen seien. Die Unterschiede in den verschiedenen Strahlungsaltern zeigen, daß diese Voraussetzung bei der Bestimmung von $g(^{40}\text{K})$ nicht gemacht werden darf, falls nicht gerade die in Abschnitt II. 2 diskutierte Situation vorliegt. Es ist also nicht ausgeschlossen, daß das Anwachsen der Produktionsraten und der Strahlungsintensität zeitlich anders erfolgte, als in Abschnitt II. 2 beschrieben.

Es muß die Frage untersucht werden: Läßt sich auch für irgendein anderes — z. B. durch eine Exponentialfunktion gegebenes — zeitliches Anwachsen der Bestrahlungsintensität ein mit den Daten über die kosmogenen Edelgaskonzentrationen verträgliches $g(^{40}\text{K}) < 0,73$ finden, so daß die ^{36}A - ^{36}Cl -Bestrahlungszeiten mit den ^{41}K - ^{40}K -Bestrahlungszeiten übereinstimmen?

Zur Untersuchung dieser Frage wird ein exponentieller Ansatz für die Zeitabhängigkeit der Strah-

³⁴ D. HEYMANN u. O. A. SCHAEFFER, J. Geophys. Res. **66**, 2535 [1961].

³⁵ O. A. SCHAEFFER u. D. HEYMANN, Conf. Fission and Spalla-

tion Phenomena and Their Application to Cosmic Rays, CERN, Sept. 1961.

³⁶ E. VILCSEK u. H. WÄNKE, private Mitteilung. — Z. Naturforsch. (in Vorbereitung).

lungsintensität gewählt¹⁵:

$$I(t) = I^0 e^{-\gamma t}. \quad (9)$$

Dabei soll t mit fortschreitender Zeit positiver werden, so daß $\gamma > 0$ einen Intensitätsabfall, $\gamma < 0$ einen Intensitätsanstieg darstellt. I^0 entspricht dem heutigen Fluß; die Untersuchung erstreckt sich also auf negative Werte von t . Es wird nach den Werten von γ gefragt, welche mit allen experimentellen Daten über kosmogene Nuklide in Eisenmeteoriten verträglich sind.

Für das Anwachsen dC_i der Konzentration eines kosmogenen Nuklids i erhält man mit (9) die Differentialgleichung

$$(dC_i/dt) + \lambda_i C_i - P_i^0 e^{-\gamma t} = 0, \quad (10)$$

wo λ_i die Zerfallskonstante und P_i^0 die „End-Produktionsrate“ des betrachteten Nuklides ist. Die Integration erstreckt sich vom Beginn der Bestrahlungszeit $t = -T_B$ bis $t = 0$. Das terrestrische Alter des Meteoriten ist i. allg. gegenüber der Bestrahlungszeit klein und kann unberücksichtigt bleiben, bei „kurzlebigen“ Radionukliden (d. h. $T_{1/2} < 3 \cdot 10^{-6} a \ll T_B$) muß dann jedoch für P^0 die auf die Fallzeit zurückextrapolierte Aktivität eingesetzt werden.

Damit kennzeichnet T_B zugleich den Zeitpunkt des Bestrahlungsbeginns als auch die „Bestrahlungszeit“ (engl. „break-up time“, vgl. Anm. ¹⁵). Nur für $\gamma = 0$ kann die Bestrahlungszeit T_B dem Strahlungsalter T_S gleich sein.

Die Integration von (10) ergibt für die Konzentration C_i^0 eines Nuklides zur Zeit $t = 0$ bzw. zur Fallzeit

$$C_i^0 = \frac{P_i^0}{\gamma - \lambda_i} [\exp\{(\gamma - \lambda_i) T_B\} - 1]. \quad (11)$$

Für die Bestimmung der ^{41}K - ^{40}K -Bestrahlungszeiten erhält man daraus die Beziehung

$$M = \frac{\gamma - \lambda_{40}}{\gamma} \cdot \frac{\exp\{\gamma T_B\} - 1}{\exp\{(\gamma - \lambda_{40}) T_B\} - 1} N. \quad (12)$$

Aus diesen Bestrahlungszeiten und den gemessenen Konzentrationen C_i^0 lassen sich die End-Produktionsraten

$$P_s^0 = \gamma C_s^0 / (\exp\{\gamma T_B\} - 1) \quad (13)$$

für stabile Nuklide berechnen (Index s = stabil).

Die numerischen Rechnungen wurden mit den in Tab. 1 angegebenen Konzentrationen von He, Ne, ^3He , ^{21}Ne und ^{38}A sowie für eine Anzahl positiver und negativer Werte von γ durchgeführt, wobei für N der Ausdruck (6):

$$N = n(k_2) / g(^{40}\text{K})$$

in Gl. (12) eingesetzt und – ähnlich wie in I. 2 – die Größe $g(^{40}\text{K})$ variiert wird. Für ^{38}A , $\gamma = -0,5 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ und $\gamma = +1,0 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ werden die in Abb. 4 bzw. 5 dargestellten Linienzüge für die Endproduktionsraten $P_{^{38}\text{A}}^0$ in Abhängigkeit von $g(^{40}\text{K})$ erhalten.

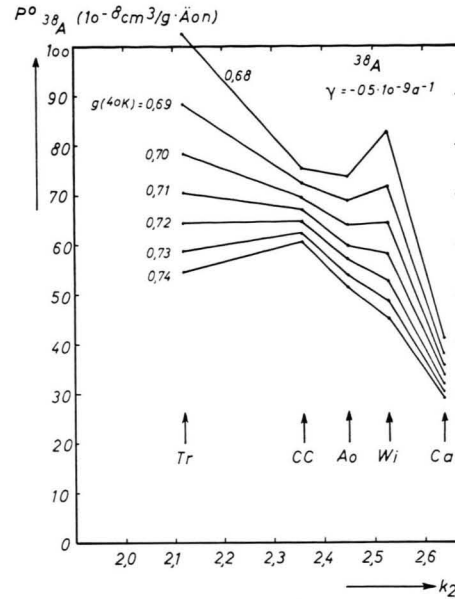


Abb. 4. End-Produktionsraten für ^{38}A bei exponentiellem Anstieg der Strahlungsintensität nach der Funktion

$$I(t) = I_0 \exp(0,5 \cdot 10^{-9} t);$$

t in Jahren. Der zu $g(^{40}\text{K}) = 0,71$ gehörende Linienzug entspricht den Erwartungen am besten.

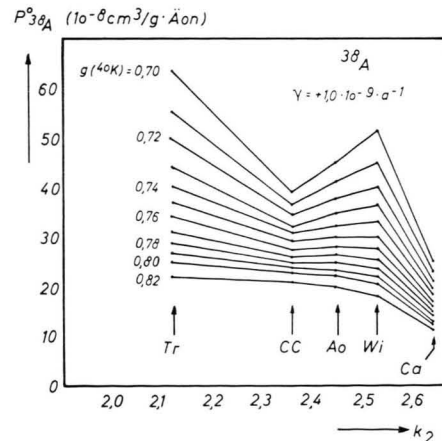


Abb. 5. End-Produktionsraten für ^{38}A bei exponentiellem Abfall der Strahlungsintensität nach der Funktion

$$I(t) = I_0 \exp(-1,0 \cdot 10^{-9} t);$$

t in Jahren. Die zu $g(^{40}\text{K}) = 0,80 \pm 0,02$ gehörenden Linienzüge entsprechen den Erwartungen am besten, aber nicht gut (sie verlaufen zu flach).

Nuklid	$g(^{40}\text{K})$						
	$\gamma = -1,5$	$\gamma = -1,0$	$\gamma = -0,5$	$\gamma = 0$	$\gamma = 0,545$	$\gamma = 1,0$	$\gamma = 1,5$
He	**	$0,71 \pm 0,005^*$	$0,72 \pm 0,005$	$0,73 \pm 0,01$	$0,75 \pm 0,02$ $-0,01$	$0,79 \pm 0,02$	**
Ne	**	$0,715 \pm 0,005^*$	$0,72 \pm 0,01$	$0,73 \pm 0,01$	$0,75 \pm 0,02$ $-0,01$	$0,78 \pm 0,04$	$0,79 \pm 0,02$
^3He	**	$0,71 \pm 0,005^*$	$0,725 \pm 0,01$	$0,74 \pm 0,01$	$0,77 \pm 0,02$ $-0,01$	$0,81 \pm 0,02$	**
^{21}Ne	**	$0,70 \pm 0,005$	$0,72 \pm 0,01$	$0,73 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,03$ $-0,02$	$0,78 \pm 0,03$	$0,79 \pm 0,04$
^{38}A	**	$0,695 \pm 0,005$	$0,71 \pm 0,005$	$0,73 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,02$	$0,80 \pm 0,02^*$	$0,81 \pm 0,03^*$
Mittel	—	$0,705 \pm 0,01$	$0,72 \pm 0,01$	$0,73 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,02$	$0,79 \pm 0,02$	—

Tab. 2. Die Werte von $g(^{40}\text{K})$, für welche die Edelgas- und Kaliumdaten miteinander verträglich sind, in Abhängigkeit vom angenommenen Exponenten γ (γ in 10^{-9} a^{-1}). In den mit * bezeichneten Fällen sind die Daten nur schlecht, in den mit ** bezeichneten Fällen gar nicht miteinander verträglich. Mit den in der letzten Zeile eingetragenen Werten wurden die in Abb. 6 eingezeichneten Bestrahlungszeiten in Abhängigkeit von γ berechnet.

Die in Abschnitt I. 2 beschriebenen Regeln sind auch hier anzuwenden und führen zu einer Auswahl von $g(^{40}\text{K})$; für ^{38}A , $\gamma = -0,5 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ erhält man nach Abb. 4 $g(^{40}\text{K}) = 0,71 \pm 0,005$, für $\gamma = +1,0 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ erhält man nach Abb. 5 als besten Wert $g(^{40}\text{K}) = 0,80 \pm 0,02$. Die Ergebnisse dieser umfangreichen Rechnungen und der jeweiligen Auswahl von $g(^{40}\text{K})$ sind in Tab. 2 zusammengestellt, wobei der Fall $\gamma = 0$ eingeschlossen wurde.

Für $\gamma \neq 0$ ist zwar oft eine eindeutige Entscheidung für ein bestimmtes $g(^{40}\text{K})$ möglich, der Verlauf dieses „besten“ Linienzuges entspricht aber häufig nicht dem, was man auf Grund der k_2 -Abhängigkeit der ^{36}Cl - und ^{39}A -Aktivitäten für Charlotte, Treysa und Aroos (vgl. Tab. 1) erwartet. Zum Beispiel verläuft in Abb. 5 der Linienzug für $g = 0,80$ insgesamt zu flach, für größere Werte von g noch flacher; für kleinere Werte verläuft er zumindest zwischen Clark County und Williamstown zu flach bzw. sogar ansteigend. Wenn für den „besten“ Linienzug eine so auffällige Abweichung vom erwarteten Verlauf eintritt wie im Fall der Abb. 5, dann ist das erhaltene Ergebnis für g in Tab. 2 mit einem * gekennzeichnet. Wenn (z. B. für He, $\gamma = -1,5 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$) überhaupt kein vernünftiger Linienzug ausgewählt werden kann, dann ist dieser Fall in Tab. 2 mit ** gekennzeichnet.

Die Ergebnisse scheinen dafür zu sprechen, daß die experimentellen Daten für die Edelgas- und Kaliumisotope am besten für $\gamma = 0$ miteinander verträglich sind und das in Abschnitt II. 2 gegebene Modell für das Anwachsen der Intensität der Wahrheit näher kommt als die exponentielle Zeitabhängigkeit.

Jedoch kann auf Grund der bisher zur Verfügung stehenden Daten nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, daß die Edelgas- und Kaliumdaten auch bei exponentiell sich ändernder Bestrahlungsintensität, und zwar für Werte von γ zwischen etwa $-1 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ und $+1 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ miteinander verträglich sind. Nur Werte von γ außerhalb dieses Bereiches sind es nicht.

Für die Meteorite Treysa und Aroos wurden mit den in der letzten Zeile der Tab. 2 angegebenen Werten von $g(^{40}\text{K})$ nach den Gln. (6) und (12) die ^{41}K - ^{40}K -Bestrahlungszeiten als Funktion von γ berechnet; es ergeben sich die in Abb. 6 eingezeichneten schräg nach rechts oben verlaufenden Bänder, welche unter der Voraussetzung einer exponentiellen

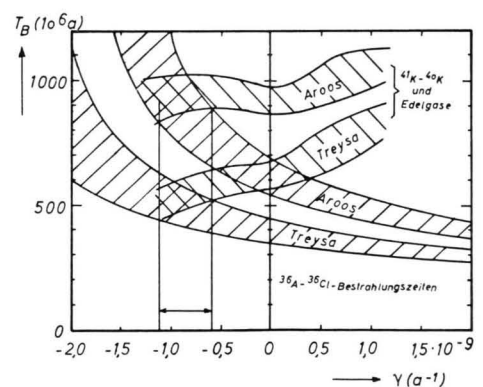


Abb. 6. „Erlaubte“ ^{41}K - ^{40}K -Bestrahlungszeiten (schräg nach rechts oben verlaufende Bänder) und ^{36}A - ^{36}Cl -Bestrahlungszeiten (schräg nach links oben verlaufende Bänder) für die Meteorite Treysa und Aroos in Abhängigkeit vom Exponenten γ . Die Bänder überlappen sich im Gebiet $-1,1 \cdot 10^{-9} \leq \gamma \leq -0,6 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ (Doppelpfeil). Für exponentiellen Anstieg der Strahlungsintensität $I(t) = I_0 e^{-\gamma t}$ ist hierdurch der Exponent bestimmt.

Zeitabhängigkeit der kosmischen Strahlung den Bereich von γ und T_B der Meteorite Treysa und Aroos charakterisieren, für welchen die Edelgas- und Kaliumergebnisse miteinander verträglich sind.

Die Beziehung zwischen den $^{36}\text{A}\text{-}^{36}\text{Cl}$ - sowie anderen Aktivitäts-Strahlungsaltern T_S und den entsprechenden Bestrahlungszeiten T_B ist durch die Gleichung

$$T_B(C_i, A_k) = \frac{1}{\gamma} \ln[\gamma T_S(C_i, A_k) + 1] \quad (14)$$

gegeben. Die in Abschnitt II. 1 mitgeteilten Strahlungsalter liegen für Treysa zwischen 350 und 450 Millionen Jahren, für Aroos zwischen 540 und 690 Millionen Jahren. Mit diesen Grenzen und Gl. (14) ergeben sich die in Abb. 6 schräg nach oben links verlaufenden Bänder für die Bestrahlungszeiten in Abhängigkeit von γ . Die einander entsprechenden Bänder überlappen sich – übereinstimmend für Treysa und Aroos – im Bereich

$$-1,1 \leq \gamma \leq -0,6 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}.$$

Mit allen experimentellen Daten über kosmogene Kerne in den bisher betrachteten Eisenmeteoriten ist demnach unter der Voraussetzung, daß das zeitliche Anwachsen der Produktionsraten bzw. der Bestrahlungsintensität nach einem Exponentialgesetz

$$P = P^0 e^{-\gamma t} \quad \text{bzw.} \quad I = I^0 e^{-\gamma t}$$

erfolgt, nur der Bereich $-1,1 \cdot 10^{-9} \leq \gamma \leq -0,6 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ für den Exponenten verträglich.

4. Die $^{41}\text{K}\text{-}^{40}\text{K}$ -Bestrahlungszeiten

Mit $\gamma = -1 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ und $g(^{40}\text{K}) = 0,705 \pm 0,01$ (vgl. Tab. 2) werden die folgenden Bestrahlungszeiten erhalten (in Millionen Jahren)

Charlotte	190 ± 50	Aroos	940 ± 50
Treysa	530 ± 70	Williamstown	550 ± 70
Clark County	1800 ± 150	Carbo	1000 ± 80

Für junge Meteorite sind die Bestrahlungszeiten kleiner, für alte sind sie größer als die $^{41}\text{K}\text{-}^{40}\text{K}$ -Strahlungsalter (vgl. I. 3).

Da jedoch eine Entscheidung zwischen den diskutierten Fällen II. 2 und II. 3 für den Intensitätsanstieg der kosmischen Strahlung mit den bis jetzt verfügbaren Daten nicht möglich ist und der tatsächliche Verlauf dazwischen liegen kann, kommt für die Bestrahlungszeiten der erwähnten Meteorite vorläufig noch der gesamte Bereich zwischen den in I. 3 und den hier genannten Zahlen in Betracht.

Eine Entscheidung könnte herbeigeführt werden, wenn man z. B. zeigen könnte, daß die von ARNOLD, HONDA und LAL⁴ berechneten Produktionsraten und die sich daraus ergebenden Korrelationen⁹ zwischen den N -Werten und Konzentrationsverhältnissen, welche als Indikator für die Strahlungshärte dienen können, zu absolut richtigen N -Werten führen. Jede weitere unabhängige und hinreichend genaue Information über die N -Werte und schließlich auch die genaue Bestimmung der M -Werte sowie der Konzentrationen und Aktivitäten möglichst vieler kosmogener Nuklide in einer noch größeren Anzahl von Meteoriten könnten schließlich ebenfalls zu einer genaueren Kenntnis des Intensitätsverlaufes der kosmischen Strahlung in den letzten Milliarden Jahren führen.

Zusammenfassung

Unter Berücksichtigung einer großen Zahl verschiedener experimenteller Daten über kosmogene Nuklide in Eisenmeteoriten wird die zeitliche Entwicklung der Produktion dieser Nuklide studiert. Die Anzahl der Voraussetzungen und theoretischen Ansätze wird dabei möglichst klein gehalten.

Es wird gezeigt, daß die $^{41}\text{K}\text{-}^{40}\text{K}$ -Methode für die Bestimmung von Strahlungsaltern am zuverlässigsten durch das Studium der Edelgas-Produktionsraten geeicht werden kann (I. 1 u. 2). Die erhaltenen $^{41}\text{K}\text{-}^{40}\text{K}$ -Strahlungsalter stimmen sehr gut mit Näherungswerten aus der vorhergehenden Arbeit⁹ überein (I, 3).

Die $^{41}\text{K}\text{-}^{40}\text{K}$ -Strahlungsalter der Eisenmeteorite liegen um einen Faktor 1,3 bis 1,8 höher als die $^{36}\text{A}\text{-}^{36}\text{Cl}$ -Strahlungsalter. Eine Eichung von ^{40}K -Methoden^{9, 14} oder einer auf dem Studium stabiler Reaktionsprodukte basierenden Altersskala¹⁸ nach der $^{36}\text{A}\text{-}^{36}\text{Cl}$ -Methode ist also nicht erlaubt (II. 1).

Die scheinbar zwischen den $^{41}\text{K}\text{-}^{40}\text{K}$ -Strahlungsaltern und den $^{36}\text{A}\text{-}^{36}\text{Cl}$ - (und ähnlichen) Strahlungsaltern bestehende Diskrepanz wird beseitigt, indem aus diesem Unterschied auf ein mäßig starkes zeitliches Anwachsen der Produktionsraten der kosmogener Nuklide geschlossen wird. Mit allen experimentellen Daten sind z. B. die beiden folgenden, verschiedenen Annahmen über dieses Anwachsen verträglich: 1. Die Produktionsraten waren während der längsten Zeit der interplanetaren Existenz der Eisenmeteorite recht gut konstant und sind erst etwa vor 1 bis 40 Millionen Jahren um einen Faktor von ungefähr 1,5 angestiegen (II. 2). 2. Die

Produktionsraten sind nach dem Exponentialgesetz $P(t) = P^0 \exp(-\gamma t)$ mit $-1,1 \cdot 10^{-9} \leq \gamma \leq -0,6 \cdot 10^{-9} \text{ a}^{-1}$ zeitlich angewachsen (II. 3). Zwischen diesen beiden Fällen liegende Möglichkeiten sind denkbar.

Es werden Angaben über die sich ergebenden Bestrahlungszeiten gemacht (II. 4). Weder bei den Strahlungsaltern noch bei den Bestrahlungszeiten zeigt sich eine ausgeprägte Gruppierung um einen oder einige wenige Werte; es gibt also kein durch die Meßergebnisse an Kalium begründetes Anzeichen dafür, daß die Eisenmeteorite infolge eines einzigen oder einiger weniger katastrophenähnlichen

Zusammenstöße zwischen den größeren Meteoriten-Mutterkörpern entstanden sind.

Für das zeitliche Anwachsen der Produktionsraten ist sehr wahrscheinlich ein allgemeines Anwachsen des hochenergetischen Teilchenflusses im interplanetaren Raum verantwortlich.

Für die Erlaubnis, Meßergebnisse vor ihrer Veröffentlichung für diese Untersuchung benutzen zu dürfen, sowie für wertvolle Hinweise danke ich Herrn Prof. H. HINTENBERGER, Frau Dr. E. VILCSEK und Herrn Dr. H. WÄNKE. Auch den Herren Dr. M. HONDA, Prof. A. O. NIER, Dr. P. SIGNER und Dr. H. STAUFFER möchte ich dafür danken, daß sie mir ihre Ergebnisse vor dem Erscheinen der Arbeiten zugänglich gemacht haben.

Strahlen aus kondensiertem Wasserstoff, kondensiertem Helium und kondensiertem Stickstoff im Hochvakuum

Von E. W. BECKER, R. KLINGELHÖFER und P. LOHSE

Aus dem Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kernverfahrenstechnik der Technischen Hochschule

(Z. Naturforsch. 17 a, 432—438 [1962]; eingegangen am 20. März 1962)

Es wird eine Anordnung zur Erzeugung kondensierter Molekularstrahlen beschrieben, die eine Abkühlung der zur Strahlerzeugung benutzten Düse bis zur Temperatur des flüssigen Heliums ermöglicht. Mit flüssigem Wasserstoff, flüssigem Helium und flüssigem Stickstoff als Kältebäder werden Strahlen aus kondensiertem Wasserstoff, kondensiertem Helium und kondensiertem Stickstoff im Hochvakuum erzeugt. Die Geschwindigkeitsverteilungen dieser Strahlen werden nach einer Laufzeitmethode bestimmt. Durch Streuung am Untergrundgas wird die auf der großen Masse der Agglomerate beruhende große Persistenz der kondensierten Strahlen demonstriert. Es wird gezeigt, daß sich die Intensität der kondensierten Wasserstoffstrahlen durch Zusatz von Helium, die der kondensierten Stickstoffstrahlen durch Zusatz von Wasserstoff beträchtlich steigern läßt. Die nicht kondensierenden Zusätze werden dabei durch den Trenndüsen effekt weitgehend aus dem kondensierten Strahl entfernt. Bei Verwendung von Gemischen aus Wasserstoff und Deuterium wird das schwere Isotop in dem kondensierten Strahl etwa um einen Faktor 3 angereichert.

In einer früheren Arbeit wurde gezeigt, daß sich bei der Molekularstrahlerzeugung mit Düsen eine teilweise Zusammenlagerung der Strahlteilchen durch VAN DER WAALS-Kräfte erreichen läßt¹. Die gegenseitige Verkettung der Strahlteilchen setzt die Zahl der Zusammenstöße auf einem bestimmten Laufweg stark herab und ermöglicht so die Erzeugung sehr intensiver, räumlich scharf begrenzter Materiestrahlen im Hochvakuum. „Kondensierte Molekularstrahlen“ aus den Isotopen des Wasserstoffs haben in der letzten Zeit wegen ihrer hohen Intensität und scharfen räumlichen Begrenzung Interesse für Kernfusionsexperimente gewonnen².

Bei den früheren Experimenten wurde ein schräg

nach oben gerichteten Strahlerzeugungssystem verwendet, bei dem die Düse durch einen aufsteigenden Flüssigkeitsstrom gekühlt werden konnte³. Diese, durch die Vorgeschichte der Experimente bedingte Konstruktion hatte den Nachteil, daß die Kühlleistung an der Düse Schwankungen unterworfen war, die bei der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs erhebliche Schwankungen der Strahlintensität zur Folge hatten. Außerdem war mit den damals zur Verfügung stehenden Pumpen der Einlaßdruck bei der Erzeugung kondensierter Wasserstoffstrahlen auf etwa 100 Torr beschränkt. In der vorliegenden Arbeit wird ein Strahlerzeugungssystem beschrieben, bei dem die erwähnten Mängel beseitigt

¹ E. W. BECKER, K. BIER u. W. HENKES, Z. Phys. 146, 333 [1956].

² E. W. BECKER, R. KLINGELHÖFER u. P. LOHSE, Z. Naturforsch. 15 a, 644 [1960].

³ E. W. BECKER u. W. HENKES, Z. Phys. 146, 320 [1956].