

Die relativen Produktionsquerschnitte für ^3He und ^{21}Ne aus Mg, Si, S und Fe in Steinmeteoriten*

Von H. HINTENBERGER, H. KÖNIG, L. SCHULTZ, H. WÄNKE und F. WLOTZKA

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

(Z. Naturforsch. 19 a, 88–91 [1964]; eingegangen am 28. Oktober 1963)

Herrn Prof. Dr. W. GROTH zum 60. Geburtstag gewidmet

With various mineral separation methods, including our newly developed technique of specific solvents, we succeeded in separating very pure fractions of metallic iron, troilite, olivine and pyroxene from the Holbrook meteorite. Helium and neon were extracted from those minerals. The measurements allowed a determination of the relativ production rates of ^3He and the neon isotopes by cosmic rays in iron, sulphur, magnesium and silicon. The results enable us to calculate the relative production rates of these isotopes in all kinds of meteorites whatever their chemical composition. The ratio of the relative production rates of ^{21}Ne from Mg and Si is 1.8 ± 0.4 . Therefore, we can conclude that the variations of the $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ ratio in stone meteorites can not be explained by variations in their chemical composition, at least not for the normal chondrites.

Unter den Reaktionsprodukten der Höhenstrahlung in Meteoriten waren besonders die Isotope der Edelgase bereits seit längerer Zeit das Ziel ausgedehnter Untersuchungen in den verschiedensten Laboratorien^{1–10}. Bei den Eisenmeteoriten, die fast ausschließlich aus Eisen und Nickel bestehen, sind die Zusammenhänge relativ einfach und gut überschaubar, da es sich hier praktisch um ein einheitliches Targetmaterial handelt. Wesentlich schwieriger liegen die Verhältnisse bei den Steinmeteoriten. Auf Grund ihrer chemischen Zusammensetzung hat man es mit einer wesentlich größeren Zahl von Target-Elementen zu tun. Die wesentlichsten hiervon sind die Elemente Eisen, Nickel, Calcium, Schwefel, Silicium, Aluminium, Magnesium und Sauerstoff. Darüber hinaus ist die Zusammensetzung der Steinmeteorite keinesfalls konstant, sondern schwankt innerhalb beträchtlicher Bereiche, insbesondere, wenn man neben den Chondriten auch die Achondrite mit berücksichtigt.

1. Problemstellung

Im Laufe unserer Untersuchungen von Spallationsedelgasen, wie sie durch die Höhenstrahlung in den Meteoriten erzeugt werden, war uns aufgefallen, daß das Verhältnis $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ in den Steinmeteoriten in einem wesentlich stärkeren Maße schwankt, als man eigentlich erwarten sollte^{7, 9}.

Bei den Eisenmeteoriten besteht eine ziemlich starke Energieabhängigkeit der Produktionsquerschnitte für die Bildung der Edelgase Helium, Neon und Argon. So wird der Erzeugungsquerschnitt für Neon aus Eisen erst für relativ große Teilchenenergien von 1 GeV und darüber merklich¹¹. Hingegen werden im Eisen die Isotope des Argons und vor allem des Heliums bereits von Teilchen mit Energien von einigen hundert MeV mit beträchtlichen Querschnitten erzeugt^{12, 13}. Das Energiespektrum der diese Spallationsreaktionen auslösenden Teilchen ist nun keineswegs konstant; es scheint am härtesten

* Die wesentlichsten Ergebnisse dieser Arbeit wurden bereits auf der „International Conference on the Interactions of High Energy Particles with complex Nuclei“, Leysin, September 9–13, 1963 vorgetragen.

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

² K. H. EBERT u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **12 a**, 766 [1957].

³ W. GENTNER u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta **11**, 60 [1957].

⁴ J. H. HOFFMAN u. A. O. NIER, Phys. Rev. **112**, 2112 [1958].

⁵ O. A. SCHAEFFER u. D. E. FISHER, Nature, Lond. **183**, 660 [1959].

⁶ P. SIGNER u. A. O. NIER, Researches on Meteorites (Editor G. B. MOORE), John Wiley & Sons, New York 1962, p. 7.

⁷ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **17 a**, 1092 [1962].

⁸ T. KIRSTEN, D. KRANKOWSKY u. J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta **27**, 13 [1963].

⁹ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG, L. SCHULTZ u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch., im Druck, erscheint 1964.

¹⁰ H. HINTENBERGER u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch., im Druck, erscheint 1964.

¹¹ H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **15 a**, 953 [1960].

¹² O. A. SCHAEFFER u. J. ZÄHRINGER, Phys. Rev. **113**, 674 [1959].

¹³ R. DAVIS, JR., R. W. STOENNER u. O. A. SCHAEFFER, Proceedings of the Symposium on Radioactive Dating, held in Athen, Nov. 1962, IAEA, Wien 1963, p. 355.



für relativ kleine Meteorite zu sein, da man es hier praktisch nur mit den Primärteilchen zu tun hat¹⁰. Mit zunehmender Größe des Meteoriten bzw. mit zunehmender Tiefe der Meteoritprobe innerhalb eines Meteoriten nimmt der Anteil der Sekundärteilchen im Gesamtfluß der die Spallationsreaktionen auslösenden Teilchen zu, und das Energiespektrum wird zu den niederen Energien hin verschoben. In Eisenmeteoriten hat man die stärkste Energieabhängigkeit bei dem Verhältnis ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ zu erwarten, und hier zeigt dieses Verhältnis tatsächlich die größten Schwankungen¹⁰. Die Extremwerte, die bisher in Eisenmeteoriten für ${}^4\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ gemessen wurden, sind 228 und 439 (Lit.Zit.¹⁰). Die maximalen Unterschiede betragen also etwa einen Faktor 2.

Für das Verhältnis ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ sind die Unterschiede in den Eisenmeteoriten weniger stark ausgeprägt und liegen zwischen den Extremwerten 75 und 106 (Lit.Zit.¹⁰).

In den Steinmeteoriten werden die Isotope des Neons aus den nahe benachbarten Targetkernen der Elemente Magnesium, Aluminium und Silicium gebildet. Die Neonisotope werden also in den Steinmeteoriten ebenso wie das ${}^3\text{He}$ schon durch Teilchen geringer Energie mit guten Wirkungsquerschnitten erzeugt.

Ein Vergleich mit Targetexperimenten ist immer schwierig. Wegen der Sekundärteilchen können ohnehin nur Experimente mit dicken Targets wirklich brauchbare Aussagen liefern. Darüber hinaus müßte man noch das wahre Energiespektrum der Primärteilchen der Höhenstrahlung berücksichtigen, und dieses ist vor allem im Bereich niederer Energien, also unter etwa 1 GeV, nur recht ungenau bekannt.

STAUFFER¹⁴ war es aufgefallen, daß alle von ihm untersuchten Achondrite ein besonders hohes ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis zeigten. Hierbei handelte es sich stets um calciumreiche Achondrite, die von den übrigen Steinmeteoriten hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung ziemlich stark abweichen. Sie enthalten nur höchstens halb so viel Magnesium wie die Chondrite, die den Großteil der Steinmeteorite ausmachen. STAUFFER schob nun alle Variationen im ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis auf die chemische Zusammensetzung und damit auf die Unterschiede in den Targetmaterialien in den einzelnen Meteoriten.

¹⁴ H. STAUFFER, J. Geophys. Res. **67**, 2023 [1962].

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

¹⁶ J. GEISS, H. OESCHGER u. P. SIGNER, Z. Naturforschg. **15a**, 1016 [1960].

Er errechnete für die Target-Elemente Magnesium, Aluminium und Silicium relative Erzeugungsquerschnitte für ${}^{21}\text{Ne}$, die sich wie 6,8 : 1,35 : 1 verhalten sollten. Wie schon in einer Arbeit von HINTENBERGER, KÖNIG und WÄNKE⁷ ausgeführt, erscheinen solch starke Unterschiede unwahrscheinlich. KIRSTEN, KRANKOWSKY und ZÄHRINGER⁸ nehmen in ihrer letzten Arbeit für die ${}^{21}\text{Ne}$ -Produktion aus Magnesium, Aluminium und Silicium ein Verhältnis von 1 : 1 : 1 an.

Selbstverständlich wird auch bei den Steinmeteoriten für das ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis eine gewisse Energieabhängigkeit zu vermuten sein. Umgekehrt zu den Eisenmeteoriten sollte bei den Steinmeteoriten das Verhältnis der Produktionsraten ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ mit zunehmender Härte der Strahlung zunehmen⁸, da der Produktionsquerschnitt für ${}^3\text{He}$ mit zunehmender Teilchenenergie zunimmt¹², die Produktion von ${}^{21}\text{Ne}$ aber konstant bleibt⁸. Da Steinmeteorite im allgemeinen gegenüber den Eisenmeteoriten eine nur relativ geringe Masse aufweisen, ist ein starker Tiefen- oder Größeneffekt allerdings von vornherein gar nicht zu erwarten. KIRSTEN, KRANKOWSKY und ZÄHRINGER haben auf Grund von Targetexperimenten den Schluß gezogen, daß die in den Steinmeteoriten gefundenen Variationen des Verhältnisses ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ praktisch nur durch Unterschiede in den Energien der die Spallationsreaktionen auslösenden Teilchen zu finden sein könnten.

Wir sind aber der Ansicht, daß die Massen der Steinmeteorite, so wie sie heute auf die Erde fallen, viel zu gering sind, als daß man auf Grund eines Tiefeneffektes derartig große Verschiebungen im Energiespektrum der Höhenstrahlungsteilchen erwarten könnte, um daraus die großen Variationen im ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis erklären zu können. Hierzu wären unserer Ansicht nach mindestens Körper mit Durchmessern von etwa einem Meter und darüber notwendig. Es wäre auch durchaus möglich, daß teilweise beträchtliche Mengen der heute in den Steinmeteoriten aufgefundenen spallogenen Edelgase bereits in einer wesentlich größeren Tiefe gebildet wurden als es dem Durchmesser der zur Erde gefallenen Meteorite entspricht. Die Tritiumzerfallsraten in frisch gefallenen Steinmeteoriten liegen bei etwa 600 dpm/kg Meteorit¹⁵⁻¹⁷. Für ${}^{22}\text{Na}$ wur-

¹⁷ A. E. BAINBRIDGE, H. E. SUESS u. H. WÄNKE, Geochim. Cosmochim. Acta **26**, 471 [1962].

den im Mittel Zerfallsraten von ca. 85 dpm/kg Meteorit gemessen¹⁸⁻²⁰. Unter der Annahme eines Produktionsverhältnisses von $T : {}^3\text{He} = 1$ und von ${}^{22}\text{Na} : {}^{22}\text{Ne} = 1$ sollte man mit

$$P({}^{21}\text{Ne})/P({}^{22}\text{Ne} + {}^{22}\text{Na}) = 0,92 \quad (\text{Lit.Zit. } 7)$$

in Steinmeteoriten ein ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis von 7 bis 8 erwarten. Die experimentell beobachteten Werte schwanken zwischen 0,7 und 10 mit einem Schwerpunkt zwischen 4 und 5 (Lit.Zit. ⁹). Eine Verschiebung nach unten wäre nun leicht durch Diffusionsverluste zu erklären, da hierbei das ${}^3\text{He}$ gegenüber dem ${}^{21}\text{Ne}$ sicher bevorzugt verlorengeht. HINTENBERGER, VILCSEK und WÄNKE²¹ konnten kürzlich nachweisen, daß tatsächlich in dem Steinmeteoriten Breitscheid etwa 40% des ${}^3\text{He}$ durch Diffusion verlorengegangen ist und das wahre Verhältnis ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ somit nicht 3,8, sondern etwa 5,7 sein müßte. Hingegen zeigte es sich bei 4 weiteren untersuchten Steinmeteoriten, die ebenfalls alle ein relativ niedriges ${}^3\text{He}/{}^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis hatten, daß bei diesen keine Verluste von ${}^3\text{He}$ durch Diffusion stattgefunden hatten²¹. Verschiebungen durch Diffusionsverluste von ${}^3\text{He}$ sind also sicher nur in einigen wenigen Fällen vorgekommen.

Es war das Ziel dieser Arbeit, durch die Bestimmung der Edelgaskonzentrationen in möglichst sauber getrennten Mineralfraktionen genauere Aufschlüsse über die Abhängigkeit der Produktionsraten von der chemischen Zusammensetzung der Steinmeteorite zu erhalten.

2. Durchführung der Experimente

Zur Klärung der Frage des Einflusses der chemischen Zusammensetzung hinsichtlich der Erzeugung von ${}^3\text{He}$ und ${}^{21}\text{Ne}$ haben wir uns der Tatsache bedient, daß Steinmeteorite ja nicht nur in chemischer Hinsicht, sondern auch mineralogisch gesehen recht vielfältig sind. Unter den Hauptmineralien sind vor allem zu nennen: metallisches Nickeleisen, Troilit, Olivin und Pyroxen, ferner Feldspäte, Quarz und zahlreiche andere Nebengemengteile.

Wir haben eine gepulverte Probe (Korngröße 30 bis 100 μ) des Meteoriten Holbrook in 4 Fraktio-

nen zerlegt. Der Meteorit Holbrook wurde deswegen ausgewählt, weil sein hohes Uran-Thorium-Helium-alter von $4,0 \cdot 10^9$ Jahren etwaige Diffusionsverluste ausscheidet. Um von Diffusionsverlusten möglichst unbeeinflußt zu bleiben, wurden außerdem für diese Untersuchungen nur Mineralproben mit mehr als 30μ Korngröße verwendet. Die Aufspaltung in 4 Fraktionen erfolgte mit Hilfe eines FRANTZ-Magnetscheiders und mit Schwereflüssigkeiten. Zunächst wurde mit einem Handmagneten das metallische Nickeleisen abgetrennt und von anhängenden Silikaten durch Ultraschallbehandlung und Mahlen in einer Achatkugelmühle möglichst weitgehend gereinigt. Die weitere Auftrennung im Magnetscheider ergab als erste Fraktionen Verwachsungen von Silikaten mit Nickeleisen, die verworfen wurden, dann eine Olivin- und danach eine Pyroxenfraktion. Der Troilit wurde dabei in der Pyroxenfraktion mit angereichert und mit Schwereflüssigkeiten abgetrennt. In der letzten Fraktion, die hauptsächlich aus Pyroxen bestand, müssen sich auch andere kieselsäurereiche Minerale, wie Feldspäte und Quarz (oder Tridymit) anreichern.

Die 4 getrennten Mineralfraktionen waren: Nickel-eisen (Fe, Ni), Troilit (FeS), Olivin ($[\text{Mg}, \text{Fe}]_2\text{SiO}_4$) und Pyroxen ($[\text{Mg}, \text{Fe}]\text{SiO}_3$). Da es aber mittels Magnetscheiders und Schwereflüssigkeiten kaum möglich ist, Mineralfraktionen genügender Reinheit zu erhalten, haben wir uns überdies noch der in unserem Laboratorium entwickelten Technik (VILCSEK, WÄNKE²²) der spezifischen Lösungsflüssigkeiten bedient. So wurde die Nickel-Eisen-Fraktion zur Extraktion der Edelgase im Vakuum mit einer Kupferchloridlösung gelöst. Für die Troilitfraktion haben wir Bromwasser als Lösungsmittel angewendet und für den Olivin 5-n. Salzsäure. Die jeweiligen Rückstände wurden gewogen und von den ursprünglichen Einwaagen abgezogen. Darüber hinaus wurden die Lösungen jeweils chemisch aufgearbeitet und die in Lösung gegangenen Elemente nach den üblichen chemischen Methoden quantitativ bestimmt.

Für die Nickeleisen-, Troilit- und Olivinfraktionen wurden die Edelgase aus den Lösungen, für die Pyroxenfraktion durch Erhitzen des Rückstandes extrahiert. Die Edelgase wurden dann in einer Ap-

¹⁸ E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg. **15a**, 1004 [1960].
¹⁹ M. HONDA, S. UMEMOTO u. J. R. ARNOLD, J. Geophys. Res. **66**, 3541 [1961].

²⁰ M. W. ROWE, M. A. VAN DILLA u. E. C. ANDERSON, Geochim. Cosmochim. Acta **27**, 983 [1963].

²¹ H. HINTENBERGER, E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg., im Druck, erscheint 1964.

²² E. VILCSEK u. H. WÄNKE, in Vorbereitung, erscheint voraussichtlich in Z. Naturforschg., 1964.

Mineralfraktion	Einwaage	SiO ₂ %	FeO%	MgO%	Al ₂ O ₃ %	CaO%	Fe*%	Ni%	S%	Σ %
Nickel-eisen (CuCl ₂)	1,942	0,34	—	—	—	—	69,7	6,83	—	76,8
Troilit (Br ₂)	0,555	0,27	—	—	—	—	47,5	—	26,4	74,3
Olivin (HCl)	0,561	35,1	24,3	32,9	0,36	0,18	—	—	—	92,9
Pyroxen (Erhitzt)	1,064	76,2	5,52	8,77	5,64	3,30	—	—	—	99,45

Tab. 1. Chemische Zusammensetzung der in Lösung gegangenen Anteile der einzelnen Mineralfraktionen in Gewichtsprozent. Der Unterschied der in der letzten Spalte angegebenen Summe in Prozent zum Wert von 100% entspricht in den ersten drei Zeilen dem nicht in Lösung gegangenen Rückstand. In der Spalte Fe* ist nur der metallische und sulfidische Anteil, nicht aber der oxydatische Anteil des Eisens angegeben.

paratur zur Mikroanalyse von Edelgasen volumetrisch gemessen, in Ampullen abgefüllt und massenspektrometrisch untersucht. Die Meßmethodik wurde bereits mehrmals ausführlich beschrieben^{2, 7}.

3. Ergebnisse

Mit dem metallischen Nickeleisen und dem Troilit hatten wir für die Target-Mineralien Eisen und Schwefel recht klare Situationen geschaffen.

Der meteoritische Olivin besitzt nun ein etwa doppelt so hohes Mg/Si-Verhältnis wie der meteoritische Pyroxen. Wir hatten überdies die Mineraltrennung so durchgeführt, daß unsere Pyroxenfraktion auch noch möglichst viel Quarz (oder Tridymit) enthalten mußte. Tatsächlich zeigte die chemische Analyse (siehe Tab. 1), daß unsere Pyroxenfraktion einen wesentlich höheren Siliciumgehalt aufwies als es echtem Pyroxen entsprechen würde. Tab. 2 zeigt die aus den einzelnen Mineralfraktionen extrahierten Edelgasmengen sowie deren Isotopenverhältnisse.

Beim Neon sind die Prozentzahlen für ²⁰Ne bei der Nickeleisen- und bei der Troilitfraktion wegen

des nicht sehr genau abschätzbaren Blindwertes etwas unsicher. Der hohe ²⁰Ne-Überschuß beim Nickeleisen ist jedoch kaum dadurch zu erklären. Hierzu müßte der Blindwert etwa dreimal höher gewesen sein als zur Berechnung der korrigierten Isotopenverhältnisse angenommen wurde. Der Blindwert sollte jedoch auf ca. 40% seines Wertes genau sein.

Es überrascht, daß beim reinen Olivin die Häufigkeitsverhältnisse der drei Neonisotope wiederum so nahe bei 1 : 1 : 1 liegen, obwohl im Olivin fast alles Neon aus dem nur 2 bis 4 Masseneinheiten entfernten ²⁴Mg entsteht.

Aus den Analysendaten in Tab. 1 und 2 (Genauigkeit der Edelgasanalysen besser als 10%) wurden die in Tab. 3 aufgeföhrten relativen Produktionsraten für ²¹Ne aus Eisen, Schwefel, Silicium und Magnesium errechnet. Das Verhältnis der ²¹Ne-Produktionsraten aus Mg und Si, P₂₁(Mg)/P₂₁(Si), errechnet sich aus der Beziehung:

$$\frac{[\text{Si}]_{\text{Ol}} \cdot P_{21}(\text{Si}) + [\text{Al}]_{\text{Ol}} \cdot P_{21}(\text{Al}) + [\text{Mg}]_{\text{Ol}} \cdot P_{21}(\text{Mg})}{[\text{Si}]_{\text{Py}} \cdot P_{21}(\text{Si}) + [\text{Al}]_{\text{Py}} \cdot P_{21}(\text{Al}) + [\text{Mg}]_{\text{Py}} \cdot P_{21}(\text{Mg})} = \frac{[\text{Ne}]_{\text{Ol}}}{[\text{Ne}]_{\text{Py}}} = \frac{7,68}{6,57}$$

Mineralfraktion	Einwaage	Einwaage (korrig.)	Fe	Ni	Ca in Gewichtsprozent	S	Si	Al	Mg	³ He	⁴ He	²¹ Ne in 10 ⁻⁸ cm ³ pro Gramm Einwaage	⁴ He _{rad.}	³ He	Blind- wert %	20	Neon ²¹ in %	²²
Nickeleisen (CuCl ₂)	1,942	1,492	90,7	8,89			0,21			19,5	181	0,33 (0,23)	103	59 (85)	14	50,0	23,8	26,2
Troilit (Br ₂)	0,555	0,412	63,8		35,5	0,18				27,8	464	1,67 (1,58)	352,8	16,6 (17,6)	17	35,4	31,3	33,3
Olivin (HCl)	0,561	0,521	20,4		0,14	17,6	0,20	21,3	31,3	1144	7,68	1020	4,08	1,2	34,3	32,4	33,3	
Pyroxen (Erhitzt)	1,064	1,064	4,30		2,36	35,6	2,98	5,26	27,6	2510	6,57	2400	4,20	7,9	30,4	33,8	35,8	

Tab. 2. Chemische Zusammensetzung und Edelgasgehalte der Mineralfraktionen. Die chemische Zusammensetzung ist in Gewichtsprozent, die Isotopenhäufigkeit in Atomprozent angegeben. Die korrigierte Einwaage errechnet sich aus der Summe der tatsächlich in Lösung gegangenen Komponenten, die in der letzten Spalte der Tab. 1 angeführt ist. Die in Klammern angegebenen Zahlen für ²¹Ne und ³He/²¹Ne beziehen sich auf das reine Nickeleisen und den reinen Troilit. Sie wurden aus den Meßdaten durch Subtraktion der Edelgasanteile erhalten, die dem in diesen Fraktionen in Lösung gegangenen Silikatanteil entsprechen. Die Neon-Isotopenhäufigkeiten wurden entsprechend den angegebenen Blindwerten korrigiert.

Element Z	Fe	S	Si	Mg
P ₂₁ (Z)/g	1	17,1	59	107
P ₂₁ (Z)/Atom	1	9,8	30	46

Tab. 3. Relative Produktionsraten von ^{21}Ne aus den Elementen Fe, S, Si und Mg im Meteoriten Holbrook.

Hierbei bedienten wir uns der Meßergebnisse der Fraktionen von Olivin und Pyroxen und gingen von der Annahme aus, daß die ^{21}Ne -Produktionsrate aus Aluminium und Silicium gleich groß wären. Auch eine etwas größere ^{21}Ne -Produktionsrate für Aluminium würde das Endergebnis nur wenig beeinflussen. Es zeigt sich, daß für ^{21}Ne die Produktionsrate aus Magnesium nur $(1,8 \pm 0,4)$ -mal größer ist als aus dem Silicium und nicht, wie STAUFFER¹⁴ gefunden hat, ein Unterschied von einem Faktor 6,8 besteht.

^3He wird in Steinmeteoriten zum beträchtlichen Teil auch aus dem Sauerstoff erzeugt, und somit ist für dieses Isotop eine genaue Aufspaltung der relativen Produktionsraten für die einzelnen Elemente nicht möglich **. Die Olivinfaktion zeigt einen etwas höheren Gehalt an ^3He als die Pyroxenfraktion, was vermutlich durch den höheren Prozentsatz von schweren Elementen wie Eisen im Olivin zu erklären ist. Für ^3He erhielten wir folgende relative Produktionsraten: Metall : Troilit : Pyroxen : Olivin wie $1 : 1,4 : 1,4 : 1,6$. Allerdings sind diese Produktionsraten für das ^3He etwas verfälscht, da die Energie der ^3He - und Tritiumteilchen im Augenblick ihrer Entstehung groß genug ist, um ihnen eine Reichweite zu geben, die gegenüber den Mineralkordimensionen nicht vernachlässigbar klein ist.

Die Konzentration von $^4\text{He}_{\text{radio}}\text{gen}$ in der Tab. 2 wurde durch Subtraktion der vierfachen ^3He -Menge von dem gemessenen ^4He erhalten. Ähnlich wie beim ^3He ist auch hier die Reichweite der α -Teilchen vergleichbar mit den Korngrößen. Der Durchschnittsgehalt von $^4\text{He}_{\text{rad.}}$ im Meteoriten Holbrook⁷ beträgt $1660 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$. Die gegenüber diesem Wert höhere Konzentration in Pyroxen läßt darauf schlie-

** Da sich der Sauerstoffgehalt der Pyroxen- und Olivinfaktion nur sehr wenig unterscheidet, werden die Gleichungen, die man zur Bestimmung der ^3He -Produktionsraten unter Gleichsetzung der Produktionsraten in Mg, Al und Si aufstellen kann, für die praktische Rechnung nicht mehr bestimmd.

ßen, daß Uran und Thorium in dieser Fraktion angereichert sind.

Wie aus Tab. 2 u. Tab. 3 ersichtlich ist, kann also die chemische Zusammensetzung eines Meteoriten, zumindest bei den Chondriten, für das $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ -Verhältnis nur eine geringe Rolle spielen. Nachdem, wie oben erwähnt, auch eine Verschiebung dieses Verhältnisses durch Diffusion für die Mehrzahl der Meteorite ausgeschlossen werden muß, bleibt eine unterschiedliche Härte der die Spallationsreaktionen auslösenden Strahlung als einzige Erklärungsmöglichkeit für diese Variationen übrig. Solche Unterschiede in der Härte der Strahlung sind entweder auf Grund des Tiefeneffektes oder aber auf Grund einer sehr starken räumlichen Verschiedenheit des Energiespektrums der primären Höhenstrahlung innerhalb unseres Sonnensystems erklärbar. Der Tiefeneffekt kann nur dann wirklich eine Rolle spielen, falls jeweils ein beträchtlicher Teil der heute in den Steinmeteoriten aufgefundenen Mengen von spallogenen Edelgasen in wesentlich größerer Tiefe, also zu einer Zeit gebildet wurden, als die Meteoritmaterie, wie sie sich uns heute darbietet, noch in Körpern wesentlich größerer Dimensionen eingebaut war.

Es gibt nun eine ganze Reihe von allerdings ziemlich vagen Hinweisen, daß die Steinmeteorite tatsächlich aus relativ eng begrenzten Oberflächenschichten von Körpern von Mond- oder Asteroidengröße herrühren^{21, 23, 24}.

Es wäre dann auch denkbar, daß für die Meteorite in ihrer heutigen Größe tatsächlich ein Produktionsverhältnis für $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$ von 7 bis 8 gilt, wie man es, wie oben erwähnt, aus den Zerfallsraten von Tritium und ^{22}Na erwarten sollte.

Für ihre Mitarbeit bei der Durchführung der experimentellen Arbeiten danken wir Frl. H. BADDENHAUSEN, Frl. H. HARASIN, Frl. M. MONERJAN und Herrn B. SPETTEL. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sind wir für die leihweise Überlassung von Geräten zu großem Dank verpflichtet.

²³ H. WÄNKE, in Vorbereitung, erscheint voraussichtlich in Z. Naturforschg., 1964.

²⁴ H. E. SUESS, H. WÄNKE u. F. WLOTZKA, Geochim. Cosmochim. Acta, im Druck, erscheint 1964.