

Der Sonnenwind als Quelle der Uredelgase in Steinmeteoriten

H. WÄNKE

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

(Z. Naturforsch. **20 a**, 946—949 [1965]; eingegangen am 30. April 1965)

As already suggested by the author, the solar wind proves to be the main, if not the only source for the large amounts of the so-called primordial gases, which are found in various meteorites especially in the bronziite-chondrites.

The presence of the primordial gases in all main mineral components of the meteorites, including the metal phase, and their high concentration in the surface layers of the individual meteoritic grains, indicate a source in form of corpuscular radiation. The measured element ratios of the true original meteoritic primordial gases—especially the He/Ne ratio of 750—prove their correlation to the sun; the solar wind therefore remains the only possible source. The rather high concentration of ^3He in the primordial gases— $^4\text{He}/^3\text{He} = 2200$ —and therefore also in the solar wind, seems of principal importance for the conditions in the solar atmosphere.

Über den Ursprung der Uredelgase, insbesondere über den Ursprung der leichten Uredelgase, die sich in überraschend großen Mengen in einer Reihe von Meteoriten fanden, sind bereits verschiedene Hypothesen aufgestellt worden^{1—4}. Es ist in dieser Arbeit nun nicht beabsichtigt, diese Hypothesen kritisch zu beleuchten (dies ist teilweise in der Arbeit von SUESS, WÄNKE und WLOTZKA⁵ geschehen), sondern ich möchte hier meine weitgehend konträren Vorstellungen zu diesem Problem entwickeln⁶.

Ich habe diese Vorstellungen bereits in einer Reihe von Vorträgen^{7, 8} erwähnt und auch in einigen früheren Publikationen gestreift^{5, 9, 10}. Die folgenden Überlegungen gründen sich im wesentlichen auf die in der Arbeit von HINTENBERGER, VILCSEK und WÄNKE¹¹ angeführten experimentellen Untersuchungen. Hier soll nun der Versuch gemacht werden, diese experimentellen Ergebnisse zu deuten. Der Zeitpunkt für eine solche Deutung ist allerdings noch relativ früh, da wir noch eine Reihe weiterer Experimente laufen haben. Wegen der kurzen Hinweise auf diese Deutung in verschiedenen eigenen Publikationen besteht jedoch die Gefahr einer Fehlinterpretation.

Wir haben in der Arbeit von HINTENBERGER, VILCSEK und WÄNKE¹¹ wie wir glauben mit großer Deutlichkeit gezeigt, daß die leichten Uredelgase

1. in allen Hauptbestandteilen der jeweiligen Meteorite enthalten sind;
2. in den äußersten Oberflächenschichten der Meteoritenminerale hoch angereichert sind.

Vor allem der eindeutige Fund, daß auch das metallische Nickeleisen Uredelgase enthält, stärkte meine Überzeugung, daß sich die bisherigen Deutungsversuche, die auf der Löslichkeit der Edelgase in den Meteoritenmineralien bestehen, nicht aufrecht erhalten lassen.

Die starke und vielleicht hundertprozentige Anreicherung der Edelgase in den äußersten Schichten der einzelnen Meteoritenkristalle deutet darauf hin, daß die Gase in Form einer Korpuskularstrahlung in diese hineingeschossen wurden.

In unserem Sonnensystem haben wir im Sonnenwind^{12, 13} (interplanetarisches Plasma) eine äußerst intensive Korpuskularstrahlung, die sehr wohl als Quelle für die Uredelgase geeignet ist. Überdies ist der Sonnenwind die einzige plausible Quelle, die

¹ E. K. GERLING u. L. K. LEVSKII, Dokl. Akad. Nauk, SSSR **111**, 750 [1956].

² J. ZÄHRINGER, Geochim. Cosmochim. Acta **26**, 665 [1962].

³ E. R. DUFRESNE u. E. ANDERS, Geochim. Cosmochim. Acta **27**, 717 [1963].

⁴ K. FREDERIKSSON u. K. KEIL, Geochim. Cosmochim. Acta **27**, 717 [1963].

⁵ H. E. SUESS, H. WÄNKE u. F. WLOTZKA, Geochim. Cosmochim. Acta **28**, 595 [1964].

⁶ Anlässlich eines Meteoriten-Symposium in La Jolla, Kalifornien, im Sommer 1963, konnte ich zu meiner Freude feststellen, daß Dr. P. SIGNER unabhängig auf ganz ähnliche Gedanken gekommen war.

⁷ H. WÄNKE, Gordon Res. Conf., Chemistry and Physics of Space, 1962 und 1963. — H. WÄNKE, Symp. on Meteoritics, La Jolla, California, Sommer 1963.

⁸ H. WÄNKE, Intern. Conf. on Cosmic Rays, Jaipur, Indien 1963.

⁹ H. HINTENBERGER, E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **19 a**, 219 [1964].

¹⁰ H. HINTENBERGER, H. KÖNIG, L. SCHULTZ u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **19 a**, 327 [1964].

¹¹ H. HINTENBERGER, E. VILCSEK u. H. WÄNKE, Z. Naturforsch. **20 a**, 939 [1965].

¹² L. BIERMANN, Z. Astrophys. **29**, 274 [1951].

¹³ E. N. PARKER, Astrophys. J. **128**, 664 [1958].



die Edelgase einschließlich des Heliums in einer solaren Häufigkeitsverteilung zu liefern imstande ist.

Wie wir in der Arbeit von HINTENBERGER, VILCSEK und WÄNKE¹¹ zeigen konnten, ist das gesamte im metallischen Nickeleisen befindliche Uredelgas bereits in den äußeren fünf Volumenprozent der Körner enthalten. Diese fünf Prozent sind überdies ein oberer Grenzwert, und vermutlich liegt der wahre Wert noch tiefer. Bei einer Korngröße von 10μ Durchmesser (diese Größe scheint etwa den Hauptteil der Uredelgase zu enthalten) gelangt man zu einer maximalen Eindringtiefe von $0,1 \mu$ bzw. $0,1 \text{ mg/cm}^2$, für Heliumionen entspricht dies einer Energie von etwas über 10 keV ¹⁴; also recht nahe der Energie des interplanetarischen Plasmas¹⁵.

	He	Ne	Ar	$\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}}$	$\frac{^{20}\text{Ne}}{^{21}\text{Ne}}$	$\frac{^{20}\text{Ne}}{^{22}\text{Ne}}$	$\frac{^{36}\text{Ar}}{^{38}\text{Ar}}$	Lit.
1	420	1	—	3800	330	12,3	—	¹⁰
2	318	1	0,071	3200	330	12,5	5,95	¹⁶
3	750	1	—	2200	360	14,0	—	¹¹

Tab. 1. Relative Uredelgaskonzentrationen im Meteoriten Pantar. Neon=1: Zeile 1 und 2 Messungen an Gesamtproben von Pantar (dunkel). Zeile 3 Metallphase von Pantar (dunkel). Diese Fraktion kommt sicher den ursprünglichen Verhältnissen am nächsten.

In Tab. 1 sind die relativen Häufigkeiten der Uredelgase des Meteoriten Pantar sowie ihre Isotopenzusammensetzung angegeben. Da man es bei den schweren Uredelgasen möglicherweise mit einer Summe aus zwei verschiedenen Komponenten zu tun hat, wollen wir uns auf die leichten Edelgase beschränken.

In der Eisenphase von Pantar haben wir ein Verhältnis He/Ne = 750 gefunden. Die niedrigeren Werte für dieses Verhältnis für den gesamten Meteoriten sind aller Wahrscheinlichkeit nach durch Diffusionsverluste aus der Silikatphase, die vor allem das Helium betreffen, zu erklären. Dieses Verhältnis ist nicht nur in Übereinstimmung mit dem der vermutlichen kosmischen Häufigkeiten dieser beiden Elemente^{17, 18}, sondern kommt auch dem Wert, den BISWAS¹⁹ für solare Teilchen für einen wesentlich höheren Energiebereich gefunden hatte, sehr nahe (Tab. 2). Aus den Messungen von BISWAS folgt auch, daß das He/Ne-Verhältnis selbst für hö-

here Energien durch Kernreaktionen in der solaren Atmosphäre bzw. während des Beschleunigungsmechanismus nicht merklich verschoben wird.

	He	Ne	${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$	Lit.
Pantar (Metallphase)	750	1	2200	¹¹
Suess-Urey	480	1	—	¹⁷
Aller (Sterne)	180	1	—	¹⁸
Aller (Nebel)	1300	1	—	¹⁸
Solar Flare	820	1	—	¹⁹

Tab. 2. Relative Häufigkeiten. Ne=1.

Wie eine einfache Rechnung zeigt, ist ein Sonnenwind von 10^8 Protonen/ $\text{cm}^2 \text{s}$ – ungefähr $10^7 \alpha$ -Teilchen/ $\text{cm}^2 \text{s}$ – in der Lage, in Körner mit einem Korn-durchmesser von 10μ eine Heliummenge von ca. $10^{-2} \text{ cm}^3/\text{Jahr g}$ einzuschießen. Selbstverständlich ist es hierzu notwendig, daß die einzelnen Meteoritkristalle in ihrer Gesamtheit dem Sonnenwind ausgesetzt sind. Dies ist auf zwei Arten möglich:

1. Einwirkung des Sonnenwindes auf die einzelnen Körner im Weltraum (kosmischer Staub).
2. Einwirkung des Sonnenwindes auf eine Schicht loser Körner, die durch bestimmte Vorgänge ständig durchmischt werden, so daß alle Körner für eine gewisse Zeit an der Oberfläche zu liegen kommen (Sanddünen-Modell).

Letzteres ist natürlich nur in der Oberfläche eines atmosphärelösen Körpers möglich, z. B. auf einen Asteroiden. Aller Voraussicht nach ist der Erdmond ein hierfür besonders geeigneter Körper; evtl. kommen auch Kometen hierfür in Frage. Auf diese Weise kann in 10^8 Jahren eine 30 m dicke Schicht mit einer Heliumkonzentration von $10^{-1} \text{ cm}^3/\text{g}$ beladen werden. Dies ist die hundertfache Heliumkonzentration wie wir sie im Pantar gemessen haben, und dürfte der ursprünglichen Heliumkonzentration – unter Berücksichtigung der Diffusionsverluste – etwa entsprechen. Als für die Umwälzung der Oberflächenschicht verantwortliche Ursachen kommen Meteoriteinschläge oder tektonische Veränderungen und Vulkanismus in Frage.

Eine Aufsammlung von kosmischem Staub zu kompakten Schichten ist kaum ohne größere Er-

¹⁴ O. HEINZ, E. M. GYORGY u. R. S. OHL, Rev. Sci. Instr. **27**, 43 [1956].

¹⁵ M. NEUGEBAUER u. C. W. SNYDER, Science **138**, 1095 [1962].

¹⁶ P. SIGNER u. H. E. SUESS, Earth Sciences and Meteoritics, Ed. J. GEISS u. E. D. GOLDBERG, North Holland Publishing Co., Amsterdam 1963, p. 241.

¹⁷ H. E. SUESS u. H. C. UREY, in S. FLÜGGE, Handbuch der Physik, Bd. 51, Verlag Springer, Berlin 1958, p. 296.

¹⁸ L. H. ALLER, in S. FLÜGGE, Handbuch der Physik, Bd. 51, Verlag Springer, Berlin 1958, p. 324.

¹⁹ S. BISWAS, Intern. Conf. on Cosmic Rays, Jaipur, Indien 1964.

wärmung der Staubteilchen im Moment des Aufschlages auf den aufsammelnden Körper möglich. Der heutige Uredelgasgehalt im Meteoriten *Pantar* entspricht zumindest im Bereich der leichten Uredelgase wohl kaum mehr als einigen Prozent der ursprünglich vorhandenen Menge. Ein so geringer Rest könnte sehr wohl trotz der Erwärmung beim Aufschlagen übrigbleiben.

Es ist auch durchaus möglich, daß beide besprochenen Arten der Aufladung der festen Materie durch den Sonnenwind vorkommen, da ja auf jede freie Fläche stets eine bestimmte Menge von kosmischem Staub niederfällt. Im dunklen Anteil von *Pantar* fand WLOTZKA⁵ einen etwa fünfmal so hohen Kohlenstoffgehalt wie im hellen Anteil. Dieser Kohlenstoffüberschuß kann sicherlich aus zu dem ursprünglichen Oberflächenmaterial zugemischtem kosmischem Staub zwanglos erklärt werden. Wie aus der Arbeit von KÖNIG²⁰ hervorgeht, ist in den Hauptbestandteilen kein Unterschied der chemischen Zusammensetzung von *Pantar* hell und *Pantar* dunkel nachweisbar. Hingegen berichtete REED²¹ von einer fünfmal höheren Konzentration von Wismut in *Pantar* dunkel gegenüber *Pantar* hell. Dem vorgeschlagenen Modell nach sind auch kaum Unterschiede in der Konzentration der Hauptelemente zu erwarten, da es sich bei dem evtl. in einer Menge von wenigen Prozenten zugemischten Material ja sicherlich um Material einer den Chondriten sehr ähnlichen Zusammensetzung handelt.

Neben den Bronzit-Chondriten zeigen auch einige Achondrite sowohl einen sehr hohen Gehalt an Uredelgasen als auch eine analoge Hell-Dunkel-Struktur. Achondrite bestehen im Gegensatz zu den Chondriten sehr häufig aus einem mineralogisch wesentlich einheitlicheren Material. Es wäre also zu erwarten, daß, falls das oben beschriebene Modell auch für die Achondriten richtig ist, sich bei den uredelgashaltigen Achondriten wesentlich größere Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung zwischen den hellen und dunklen Anteilen zeigen. Einer privaten Mitteilung von Dr. O. MÜLLER (Heidelberg) zufolge wurden von ihm solche größeren Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der beiden Anteile von *Pesyanoe* und *Kapoeta* tatsächlich gefunden.

Die hellen Anteile lagen zum Zeitpunkt der Einwirkung des Sonnenwindes vermutlich bereits als

komakte Brocken vor, so daß sie im Inneren frei von Uredelgasen und zugemischem kosmischem Staub blieben.

Daß der Vorgang der Edelgasbildung auf relativ enge Zonen beschränkt ist, geht schon aus der Tat sache hervor, daß auch der Uredelgasgehalt in manchen Meteoriten lokal sehr eng beschränkt ist. Sowohl von *Tabor* als auch von *Pantar* und *Pultusk* existieren Stücke ohne Uredelgasgehalt. Diese Stücke zeigen teilweise trotzdem eine Hell-Dunkel-Struktur, – so z. B. *Pantar* II – wenn sie auch wesentlich schwächer ausgeprägt ist als in den uredelgashaltigen Stücken. Es wäre denkbar, daß aus diesen uredelgasfreien Stücken diese auf Grund einer Erwärmung verlorengegangen sind. Wahrscheinlicher jedoch handelt es sich hierbei um Schichten, die zu einer Zeit an der Oberfläche lagen, in der der Sonnenwind noch nicht wirken konnte, weil evtl. noch eine wenn auch sehr dünne Atmosphäre vorhanden war.

Auch eine Reihe von Hypersthen-Chondriten zeigen eine etwa *Pantar* II ähnliche Hell-Dunkel-Struktur. Leichte Uredelgase finden sich in diesen Meteoriten jedoch höchstens nur in um mehrere Größenordnungen geringeren Mengen.

Über den Zeitpunkt der Edelgasbeladung der Meteoritkörper durch den Sonnenwind können keine präzise Angaben gemacht werden. Da nur ein Teil der Bronzit-Chondrite Uredelgase enthält, scheint ein sehr früher Zeitpunkt – Stadium vor der Zusammenballung der planetarischen Materie zu größeren Körpern – unwahrscheinlich. Die enge Nachbarschaft von uredelgashaltigen und uredelgasfreien Zonen und das inselartige Vorhandensein heller, uredelgasfreier Einschlüsse im dunklen, uredelgashaltigen Material läßt vermuten, daß diese Einschlüsse schon als kompakte Agglomerate vorhanden waren, als die Edelgasbeladung erfolgte. Der Einbau kann praktisch bis zum Ausbrechen des Meteoriten aus seinem Mutterkörper angedauert haben. Die Zahl der Einschläge anderer Körper, z. B. auf dem Erdmond, war sicher vor etwa vier Milliarden Jahren häufiger als heute, ebenso war die Dichte des kosmischen Staues und damit die Einfallsrate höher. Vermutlich fand der Einbau der Uredelgase über einen Zeitraum von mindestens einigen Millionen Jahren statt und kam erst im Augenblick der letzten Verfestigung (Agglomeration) des Meteorit materials zum Stillstand.

²⁰ H. KÖNIG, Geochim. Cosmochim. Acta **28**, 1397 [1964].

²¹ G. W. REED, J. Geophys. Res. **68**, 3531 [1963].

Insgesamt enthielten von 64 bisher untersuchten Bronzit-Chondriten – wir haben hier nur solche Meteorite aufgeführt, deren Fälle beobachtet sind – 11 Chondrite größere Mengen von leichten Uredelgasen. Mit Ausnahme des Meteoriten Fayetteville wurden diese Chondrite in Mainz als uredelgashaltig entdeckt. Diese 11 Meteorite und die in ihnen gemessenen Uredelgaskonzentrationen sind in Tab. 3

Urgashaltige Bronzit- Chondrite	He in $10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$	Ne in $10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g}$	He Ne	Lit.
Breitscheid	17900	221	81	22
Cangas de Onis	44000	317	139	23
Fayetteville	2250000	6720	335	24
Hainaut	7000	45	150	25
Kilburn	99700	245	407	25
Nulles	2500	23	110	25
Pantar	80200	190	420	10
Pultusk	6330	23,1	274	10
Tabor	6900	134	515	10
Tysnes Island	96000	493	195	25
Weston	277000	686	404	25

Tab. 3. Bronzit-Chondrite mit leichten Uredelgasen. Es wurden nur beobachtete Fälle aufgeführt. Mit Ausnahme von Fayetteville wurden alle Meteorite in Mainz als uredelgashaltig entdeckt und gemessen. Alle Werte wurden bezüglich radiogener bzw. spallogener Anteile korrigiert.

aufgeführt. Da sehr häufig jeweils nur eine meist kleinere Zone der einzelnen Meteorite uredelgashaltig ist, werden sicher noch weitere Meteorite solche Zonen aufweisen, an denen sie bisher nicht bemerkt wurden. Man kann somit annehmen, daß etwa ein Drittel aller Bronzit-Chondrite uredelgashaltige Zonen besitzt. Der Mechanismus des Ausbrechens dieser Meteorite aus ihrem Mutterkörper muß daher die Oberflächenschichten stark bevorzugen.

²² H. HINTENBERGER, H. KÖNIG u. H. WÄNKE, Z. Naturforschg. 17a, 306 [1962].

²³ H. HINTENBERGER, L. SCHULTZ u. H. WÄNKE, in Vorbereitung.

Wie schon erwähnt, wäre der Erdmond sicher ein günstiger Körper für den Einbau der Uredelgase nach dem vorgeschlagenen Mechanismus; ebenso vermutlich jeder große Asteroid. Kaum geeignet erscheinen jedoch die Mars-Asteroiden, die ANDERS²⁵ als Mutterkörper der Steinmeteorite vorgeschlagen hat. Der größte dieser die Marsbahn kreuzenden Asteroid, *A c t h r a*, hat nur einen Durchmesser von 89 km. Die parabolische Entweichgeschwindigkeit für diesen Körper beträgt daher nur etwa 60 m pro Sekunde. Loses Material an seiner Oberfläche wird durch Einschläge anderer Körper nicht umgesetzt, sondern geht in den Weltraum verloren. Ebenso ist eine Aufsammlung von kosmischem Staub vermutlich nicht möglich.

Der bewiesene Zusammenhang zwischen den Uredelgasen in den Bronzit-Chondriten und dem Sonnenwind erlaubt es umgekehrt, aus den Edelgasmessungen an diesen Meteoriten präzise Angaben über die chemische Zusammensetzung des Sonnenwindes zu machen. Diese Zusammensetzung muß zumindest zum Zeitpunkt des Einbaus den relativen Häufigkeiten der meteoritischen Uredelgase entsprechen.

Es muß noch betont werden, daß bei den schweren Uredelgasen, insbesondere bei Krypton und Xenon, im Gegensatz zu Helium und Neon neben dem Sonnenwind teilweise noch andere Einbaumechanismen eine Rolle spielen können.

Die hohe ${}^3\text{He}$ -Konzentration (${}^4\text{He}/{}^3\text{He} = 2200$) überrascht; dieser Wert hat sicher einige Bedeutung im Zusammenhang mit den Vorgängen auf der Sonnenoberfläche. Der Unterschied in den Neonisotopenverhältnissen zwischen Uredelgas und dem atmosphärischen Neon ist für die Frage der Herkunft der atmosphärischen Edelgase von Bedeutung.

²⁴ P. SIGNER, private Mitteilung.

²⁵ E. ANDERS, Origin, Age, and Composition of Meteorites, Preprint 1964.