

Die kosmische Häufigkeit der chemischen Elemente

Von HANS E. SUESS¹, Hamburg

Die in der Natur vorkommenden Gesteine enthalten, entsprechend dem Satz von der «Allgegenwart» der chemischen Elemente, neben ihren Hauptbestandteilen praktisch alle Elemente als Verunreinigungen in größerer oder geringerer Konzentration. Das gilt natürlich auch für die aus dem Weltraum zu uns gelangenden Meteorite. Für die relativen Häufigkeiten, d. h. mittleren atomaren Konzentrationen sämtlicher Elemente, wie sie sich aus der durchschnittlichen Zusammensetzung der Meteorite ergeben, hat GOLDSCHMIDT² eine vollständige Tabelle angegeben, die wohl als die sorgfältigste Zusammenstellung dieser Art zu werten ist. Diese mittlere Zusammensetzung der Meteorite schien – und das ist auch der Grund, der GOLDSCHMIDT und vor ihm schon eine Reihe anderer Forscher³ zu dieser schwierigen Untersuchung veranlaßt hat – eine sehr allgemeine Bedeutung zu besitzen, nämlich die, den mittleren chemischen Bestand an zur Kondensation gelangender Materie eines weiten Bereiches des uns umgebenden Universums widerzuspiegeln. GOLDSCHMIDT selbst hat die bereits früher vermutete Übereinstimmung der mittleren chemischen Zusammensetzung der Meteorite mit der der Erde durch eine Reihe von Untersuchungen und Argumenten plausibel machen können.

Kürzlich hat nun UNSÖLD⁴ eine neue, sehr genaue Bestimmung der Konzentration einer größeren Anzahl von Elementen aus den Linienintensitäten im Spektrum der Sonne und einem etwas heißeren Fixstern, dem τ *Scorpii* ausgeführt. Die Genauigkeit dieser Bestimmungen dürfte etwa dieselbe sein wie die der GOLDSCHMIDTschen Angaben: der wahrscheinliche Fehler wird bei den häufigeren Elementen den Faktor 2 nicht erreichen, bei den selteneren Elementen mögen auch größere Abweichungen vorkommen. In der Tat stimmen die UNSÖLDSchen Angaben sowohl für die Sonne als auch für τ *Scorpii* innerhalb der genannten Fehlergrenzen bei den zur Kondensation gelangenden Elementen überraschend gut mit den GOLDSCHMIDTschen Werten überein. Die Übereinstimmung der che-

mischen Zusammensetzung von vier weiteren Fixsternen mit der der Sonne ist von GREENSTEIN¹ angegeben worden.

Diese überraschende Gleichförmigkeit der mittleren chemischen Zusammensetzung sowohl der untersuchten Fixsterne als auch der meteoritischen und terrestrischen Materie findet eine befriedigende Deutung in der Annahme, daß diese chemische Zusammensetzung im wesentlichen der Häufigkeitsverteilung der Elemente entspricht, mit der sich die Elemente bei einem Entstehungsprozeß, der die Materie eines weiten Bereiches des Universums oder auch der ganzen Welt umfaßt haben mag, gebildet haben.

Bei einem solchen Prozeß der Elemententstehung wird – wie immer wir uns auch seinen Mechanismus vorstellen mögen – die Menge der einzelnen Atomkernsorten, die durch ihn gebildet werden, in irgendeinem Zusammenhang mit den kernphysikalischen Bestimmungsstücken und Eigenschaften dieser Kernsorten stehen. Als solche kämen in Betracht: Massenzahl, Bindungsenergie, Neutron/Proton-Verhältnis, eventuell auch Spin und Wirkungsquerschnitte für Kernreaktionen. Gelingt es, einen solchen Zusammenhang aufzudecken, dann wird man ihn als einen Beweis für unsere oben gemachte Annahme betrachten können, daß die für die Fixsterne und die Meteoriten ermittelten Häufigkeitsdaten in guter Näherung der ursprünglichen Häufigkeitsverteilung der Elemente bei ihrer Entstehung entsprechen. Daß sich ein derartiger Zusammenhang in der Tat erkennen läßt, soll im folgenden gezeigt werden.

Die Häufigkeitsregeln

Die Häufigkeit der einzelnen Kernsorten ergibt sich aus den Werten für die Elementhäufigkeiten und aus den massenspektroskopisch bestimmten isotopischen Zusammensetzungen der einzelnen Elemente, und zwar mit einer Genauigkeit, die den Werten für die Elementhäufigkeiten entspricht, da die Fehler der massenspektroskopischen Bestimmungen relativ klein sind und vernachlässigt werden können. Suchen wir nun nach Regelmäßigkeiten in der Abhängigkeit der Kernhäufigkeiten von ihren kernphysikalischen Bestimmungsstücken, so müssen wir die Fehler in den Angaben der Elementhäufigkeiten in Betracht ziehen; die isotopische Zusammensetzung der einzelnen Elemente, d. h. die Häufigkeitswerte isotoper Kernsorten relativ zueinander, müssen wir hingegen als genau vorgegeben betrachten. Denn wenn wir von der Annahme

¹ Institut für physikalische Chemie der Universität Hamburg, eingegangen im Oktober 1948.

² V. M. GOLDSCHMIDT, *Geochem. Verteilungsgesetze*, IX, (Videnskapsakademien, Oslo 1938).

³ Vgl. z. B.: I. und W. NODDACK, *Naturwiss.* 8, 757 (1920); A. E. FERSMAN, *Geochemie* (Leningrad 1934); sowie die Zusammensetzung von R. A. SONDER, *Schweizer min. und petrogr. Mittgl.* 28, 528 (1938).

⁴ A. UNSÖLD, *Z. Astrophys.* 21, 1, 22 (1944); 24, 306 (1946). Vgl. auch die grundlegenden Arbeiten von C. H. PAYNE, *Harvard Obs. Mon.* 1 (1925) und H. N. RUSSELL, *Astrophys. J.* 70, 11 (1929) sowie B. STRÖMGREN, *Festschrift* (Kopenhagen 1940).

¹ J. L. GREENSTEIN, *Astrophys. J.* 107, 151 (1948).

ausgehen, daß seit der Elemententstehung chemisch ähnliche Elemente nur geringfügige Entmischung erfahren haben, dann werden wir für die chemisch gleichartigen Isotope eines Elements Entmischungsvorgänge von vornherein ausschließen können¹.

Die Frage ist nun: Gibt es geeignete, der angegebenen Ungenauigkeit der Elementenhäufigkeitswerte entsprechende Korrekturfaktoren, die, angewandt auf die Werte nach GOLDSCHMIDT (bzw. UNSÖLD), Regelmäßigkeiten im Häufigkeitsverlauf der einzelnen Kernsorten erkennen lassen? Eine reelle physikalische Bedeutung werden die Faktorenwerte sicherlich dann besitzen, wenn durch sie bei einem jeden Element mehrere Regelmäßigkeiten gleichzeitig zutage treten, oder, mit anderen Worten, wenn sich alle oder zumindest die Mehrzahl der erhaltenen Häufigkeitswerte für die einzelnen Isotope eines jeden Elements in die Regelmäßigkeiten einordnen. Es lassen sich nun in der Tat – was keineswegs selbstverständlich ist – Faktorenwerte ermitteln, die diese Bedingungen erfüllen und überdies für die Mehrzahl der Elemente die Fehlergrenzen der GOLDSCHMIDTSchen Häufigkeitsangaben nicht überschreiten. Allein diese Tatsache liefert bereits den gesuchten Beweis dafür, daß die von GOLDSCHMIDT untersuchte mittlere chemische Zusammensetzung der Meteorite im wesentlichen kernphysikalisch bestimmt ist und somit der ursprünglichen Häufigkeitsverteilung der Elemente bei ihrer Entstehung nahekommt.

Die Korrekturfaktoren für die GOLDSCHMIDTSchen Werte, deren Ermittlung im folgenden noch näher erläutert werden soll, sind in Tab. II angegeben. Die Häufigkeitswerte der einzelnen Kernsorten, die man aus den dort gleichfalls angegebenen korrigierten Häufigkeitswerten und den Daten für die isotopische Zusammensetzung² der Elemente erhält, lassen eine Reihe von überraschend einfachen Regelmäßigkeiten erkennen³, wenn man die Kerne mit ungerader Massenzahl einerseits und die *doppelt geraden* Kerne, d. h. die Kerne mit gerader Protonen- und Neutronenzahl andererseits gesondert betrachtet. Die Häufigkeitsregeln lauten⁴:

1. Die Häufigkeitswerte der Kerne mit *ungerader* Massenzahl bilden eine glatte Funktion der Massenzahl.

¹ Ausgenommen sind die leichten Elemente bis etwa zum Sauerstoff, bei denen Kernumwandlungen im Innern von Sternen möglich sind. Im übrigen ergab ein Vergleich der isotopischen Zusammensetzung von Elementen aus irdischer und meteoritischer Materie in keinem Falle einen über die nur wenige Promille betragende Fehlergrenze hinaus gehenden Unterschied. (Vgl. z. B.: H. BROWN und M. G. INGRAM, Phys. Rev. 72, 347 [1947]).

² J. MATTAUCh und S. FLÜGGE, *Kernphysikalische Tabellen* (Berlin 1942).

³ H. E. SUÈSS, Z. Naturforschg. 2a, 811, 604 (1947).

⁴ Bezeichnungsweise: Die Massenzahl $A = N + Z$ gibt die Anzahl der Nukleonen (Neutronen plus Protonen) im Kern an; sie entspricht dem abgerundeten Atomgewicht in Einheiten des Wasserstoffatoms. N ist die Neutronenzahl, Z die Protonenzahl eines Kerns. Z ist durch die Ordnungszahl des betreffenden Elementes im periodischen System gegeben. $N - Z$ ist der Neutronenüberschuß eines Kerns, H die kosmische Häufigkeit, bezogen auf die Gesamthäufigkeit von Si gleich 100.

Zusatz: Existieren für eine Massenzahl zwei Isobaren¹ dann gilt diese Regel für die Summe ihrer Häufigkeiten.

2. Die Häufigkeitswerte der *doppelt geraden* Kerne liegen in einem (dreidimensionalen) N - Z - $\log H$ -Diagramm auf einer glatten Fläche.

Zusatz: Das bedeutet u. a.: Die Häufigkeitswerte der Kerne mit gerader Massenzahl und gleichem Neutronenüberschuß bilden eine glatte Funktion der Massenzahl.

3. Für Massenzahlen größer als 88: Die Summen der Häufigkeiten der Isobaren aller, auch gerader Massenzahlen bilden eine glatte Funktion der Massenzahl.

Diese Stetigkeitsregeln besitzen an einer Reihe von Stellen Ausnahmen. Die Häufigkeitswerte ändern sich dort in Abhängigkeit von der Massenzahl sprunghaft. Diese Stellen treten jedoch nicht regellos auf und scheinen einer sprunghaften Änderung im Kernbau zu entsprechen. Die Sprünge treten vor allem an Stellen auf, an denen die Kerne eine bestimmte «ausgezeichnete» Anzahl von Protonen oder Neutronen enthalten, und zwar erscheint meist sowohl für die Protonen als auch für die Neutronen die gleiche Zahl ausgezeichnet (vgl. Abb. 1). Die Zahlen, die sich nach einem einfachen Bildungsgesetz ergeben², versprechen, einen tieferen Einblick in die Struktur der Atomkerne zu vermitteln.

Das hier geschilderte generelle Bild vom Häufigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Massenzahl gestattet es nun, die genannten Korrekturfaktoren für die GOLDSCHMIDTSchen Werte durch graphische Interpolation fast zwangsläufig festzulegen. Man trägt hierzu zweckmäßig die aus dem GOLDSCHMIDTSchen oder UNSÖLDSchen Häufigkeitswert und der isotopischen Zusammensetzung der Elemente berechneten Kernhäufigkeiten in ein $\log H$ - A -Diagramm ein und versucht, durch möglichst geringes Verschieben der jeweils zu einem Element gehörenden Punkte sowohl für die Werte bei den ungeraden Massenzahlen als auch für die zu Kernen mit gleichem Neutronenüberschuß gehörenden Punkte bei den geraden Massenzahlen einen stetigen Linienzug zu erreichen. Für die schwereren Elemente mit gerader Ordnungszahl bedeutet dies, daß für eine derartige Ausgleichung etwa 3 bis 6 Linienzüge zur Verfügung stehen, die unter der Nebenbedingung möglichst geringer Korrekturen zu einem fast zwangsläufigen Festlegen der Häufigkeitswerte führen. Als nachträgliche Bestätigung für die Richtigkeit des Verfahrens ergibt sich dann im Gebiet der schwereren Kerne der durch Regel 3 gekennzeichnete Sachverhalt, daß die Häufigkeitssummen der Isobaren ihrerseits wieder einen stetigen Verlauf mit der Massenzahl aufweisen (siehe Abb. 2).

Das ermittelte Gesamtbild der kosmischen Kernhäufigkeiten läßt nun eine Reihe von weiteren Zusammenhängen und Regelmäßigkeiten erkennen. So ergibt sich bei den schwereren Kernen ($A > 88$) eine

¹ Das ist der Fall bei den Massenzahlen 87, 113, 115, 123 und 186.

² O. HAXEL, J. H. D. JENSEN und H. E. SUÈSS, Naturwiss. 35, 376 (1948), sowie Phys. Rev., im Erscheinen.

Tabelle I. Dekadische Logarithmen der relativen Atomhäufigkeiten der leichten Elemente¹

Z	Element	Sonne UNSÖLD	Sonne STRÖMGREN	τ Scorpii UNSÖLD	Meteorite GOLDSCHMIDT
1	H	—	6,45	6,21	—
2	He	—	—	5,46	—
3	Li	—	—	—	-2
4	Be	—	—	—	-2,7
5	B	—	—	—	-2,62
6	C	2,74	—	2,45	-0,48
7	N	3,06	—	2,79	—
8	O	3,18	—	3,2	2,54
9	F	—	—	—	-0,82
10	Ne	—	—	3,26	—
11	Na	0,73	0,39	—	0,65
12	Mg	1,96	2,03	1,87	1,94
13	Al	0,78	—	0,77	0,94
14	Si	1,74	—	2,01	2
15	P	—	—	—	-0,23
16	S	1,37	—	—	1,06
17	Cl	—	—	—	-0,41
18	Ar	1,2 ²	—	—	—
19	K	-0,35	-0,25	—	-0,16
20	Ca	0,68	0,66	—	0,76

deutliche Häufigkeitsmäßige Bevorzugung der neutronenreicherer Kerne, wie sie in den folgenden beiden Sätzen zum Ausdruck kommt:

1. Für jede Massenzahl ist das Isobar mit dem geringsten Neutronenüberschuß das seltenste.

Zusatz: Diese Regel gilt für gerade und ungerade Massenzahlen $A > 70$ und besitzt nur vier Ausnahmen bei $A = 76, 110, 116$ und 142 .

2. Wächst der energetisch günstigste Neutronenüberschuß stark mit der Massenzahl ($dN/dZ \approx 2$ bis 3), dann steigt die Häufigkeitssumme der Isobaren mit zunehmender Massenzahl. Wächst der energetisch günstigste Neutronenüberschuß nur schwach ($dN/dZ \approx 1$ bis 2), dann sinkt die Häufigkeit mit zunehmender Massenzahl.

Zusatz: Ausnahmen bilden die Häufigkeitssprünge bei den «ausgezeichneten» Nukleonenzahlen mit ausgeprägten Häufigkeitsverminderungen in gewissen Zwischengebieten.

Die beiden Abbildungen lassen auch die Gültigkeit der bekannten HARKINSSCHEN Regel klar erkennen, der nunmehr die folgende, kernphysikalisch einfachste Fassung gegeben werden kann:

Die Summe der kosmischen Häufigkeiten der Isobaren einer geraden Massenzahl ist stets größer als der Mittelwert der Häufigkeiten der Kerne der beiden ihr benachbarten ungeraden Massenzahlen.

Zusatz: Der Unterschied wird mit zunehmender Massenzahl geringer und verschwindet stellenweise im Gebiet der schweren Kerne (Abb. 1).

¹ Die Angleichungsfaktoren der astronomischen Daten an die GOLDSCHMIDTSCHEN Werte (Normierung: $\log H$ (Si) = 2) stimmen mit den von UNSÖLD (Z. Astrophys. 24, 306 [1948]) angenommenen überein.

² Interpoliert.

³ Normierung wie in Tab. I. Für die GOLDSCHMIDTSCHEN Werte ist der Logarithmus der Gesamthäufigkeit des Si gleich 2 gesetzt; der Angleichungsfaktor für die Daten der Sonne ist der Arbeit von UNSÖLD, i.c., entnommen. Multiplikation der GOLDSCHMIDTSCHEN Werte mit den in der letzten Spalte angeführten Korrekturfaktoren ergibt die angegebenen «ausgeglichenen» Werte. Diese unterscheiden sich im allgemeinen nur unwesentlich von den in der Z. Naturforsch. 2a, 606 (1947) angegebenen vorläufigen Werten. Sie sind durch erneute Überarbeitung unter Berücksichtigung einiger weiterer Gesichtspunkte gewonnen worden.

Tabelle II. Dekadische Logarithmen der relativen Atomhäufigkeiten der Elemente³

Z	Element	Sonne UNSÖLD	Meteorite GOLDSCHMIDT	Ausgegli- chene Werte	Korrektur faktor
21	Sc	-2,22	-2,82	—	—
22	Ti	-0,59	-0,33	—	—
23	V	-1,5	-1,89	—	—
24	Cr	0,03	0,05	—	—
25	Mn	-0,09	-0,18	—	—
26	Fe	2,17	1,95	—	—
27	Co	-0,52	-0,46	—	—
28	Ni	0,4	0,66	—	—
29	Cu	-1,32	-1,34	-1,64	0,5
30	Zn	-0,77	-1,44	-0,82	4,2
31	Ga	—	-3,08	-2,21	7,4
32	Ge	—	-1,73	-1,73	1
33	As	—	-2,47	-2,47	1
34	Se	—	-2,83	-1,59	17,4
35	Br	—	-2,37	-2,37	1
36	Kr	—	—	-1,82	—
37	Rb	—	-3,17	-2,77	2,5
38	Sr	-2,20	-2,40	-2,34	1,15
39	Y	-2,34	-3,01	-3,01	1
40	Zr	-3,18	-1,86	-2,20	0,46
41	Nb	—	-3,16	-3,25	0,81
42	Mo	-3,77	-3,02	-2,58	2,8
43	Tc	—	—	—	—
44	Ru	—	-3,44	-3,29	1,4
45	Rh	—	-3,86	-3,86	1
46	Pd	—	-3,6	-3,25	2,2
47	Ag	—	-3,49	-3,63	0,72
48	Cd	—	-3,59	-3,06	3,4
49	In	—	-4,64	-3,89	5,6
50	Sn	—	-2,54	-2,80	0,55
51	Sb	—	-4,14	-4,14	1
52	Te	—	-4,7	-2,86	69
53	J	—	-3,87	-3,87	1
54	X	—	—	-3,20	—
55	Cs	—	-5	-4,45	3,5
56	Ba	-2,6	-3,08	-3,08	1
57	La	—	-3,68	-3,68	1
58	Ce	—	-3,28	-3,28	1
59	Pr	—	-4,02	-4,02	1
60	Nd	—	-3,48	-3,48	1
61	Pm	—	—	—	—
62	Sm	—	-3,94	-3,94	1
63	Eu	—	-4,55	-4,55	1
64	Gd	—	-3,78	-3,78	1
65	Tb	—	-4,28	-4,43	0,7
66	Dy	—	-3,69	-3,69	1
67	Ho	—	-4,24	-4,30	0,9
68	Er	—	-3,79	-3,79	1
69	Tm	—	-4,54	-4,54	1
70	Yb	—	-3,82	-3,75	1,2
71	Cp	—	-4,31	-4,31	1
72	Hf	—	-3,82	-3,62	1,6
73	Ta	—	-4,4	-4,4	1
74	W	—	-2,84	-3	0,7
75	Re	—	-6,74	-4,65	130
76	Os	—	-3,76	-3,76	1
77	Ir	—	-4,24	-4,00	1,8
78	Pt	—	-3,54	-3,54	1
79	Au	—	-4,24	-4,24	1
80	Hg	—	-4,52	-4,12	2,5
81	Tl	—	-4,77	-4,17	4
82	Pb	-3	-3,04	—	—
83	Bi	—	-4,95	—	—
90	Th	—	-4,2	—	—
92	U	—	-4,6	—	—

Die Elementhäufigkeitswerte

In Tab. I sind die dekadischen Logarithmen der kosmischen Häufigkeiten der leichten Elemente bis zum Kalzium nach verschiedenen Autoren, bezogen auf die Gesamthäufigkeit von Silizium gleich 2, angegeben. Wie man sieht, stimmen die verschiedenen Angaben außerordentlich gut überein. Die Werte sind für diese leichten, häufigen Elemente besonders genau bestimmt und können durch Ausgleichungen kaum weiter verbessert werden. Nur für Argon, für das kein anderer Wert zur Verfügung steht, wurde der angegebene Wert durch Interpolation gewonnen. Hierbei ist natürlich die abnorme Häufigkeit des Ar^{40} , die lediglich terrestrische Bedeutung besitzt, nicht berücksichtigt.

Wie der Tab. II zu entnehmen ist, die die Häufigkeitswerte der weiteren Elemente enthält, kommt man bei der Mehrzahl der Elemente in der Tat mit Korrek-

turfaktoren aus, die durchaus der Ungenauigkeit der GOLDSCHMIDTSchen Abschätzungen und Mittelwertbildung aus stark streuenden Analysenergebnissen entsprechen. Für eine ganze Reihe von Elementen passen die GOLDSCHMIDTSchen Angaben unmittelbar ohne weitere Korrektur in das Gesamtbild, und zwar die für die seltenen Erden, für die Halogene, für As und Sb sowie für eine Reihe von Edelmetallen. Für einige andere Elemente hingegen erscheinen die GOLDSCHMIDTSchen Werte um rund eine Größenordnung zu niedrig, so daß angenommen werden muß, daß die relativen Konzentrationen dieser Elemente in den Meteoriten bedeutend geringer sind als die, mit der sie entstanden sind. Das gilt für Se, Te, Zn, Cd, Hg, Ga, In, Tl, für Re und vermutlich auch für Mo. Bei diesen «defizienten» Elementen handelt es sich im wesentlichen um chemisch homologe Gruppen, die alle zu der

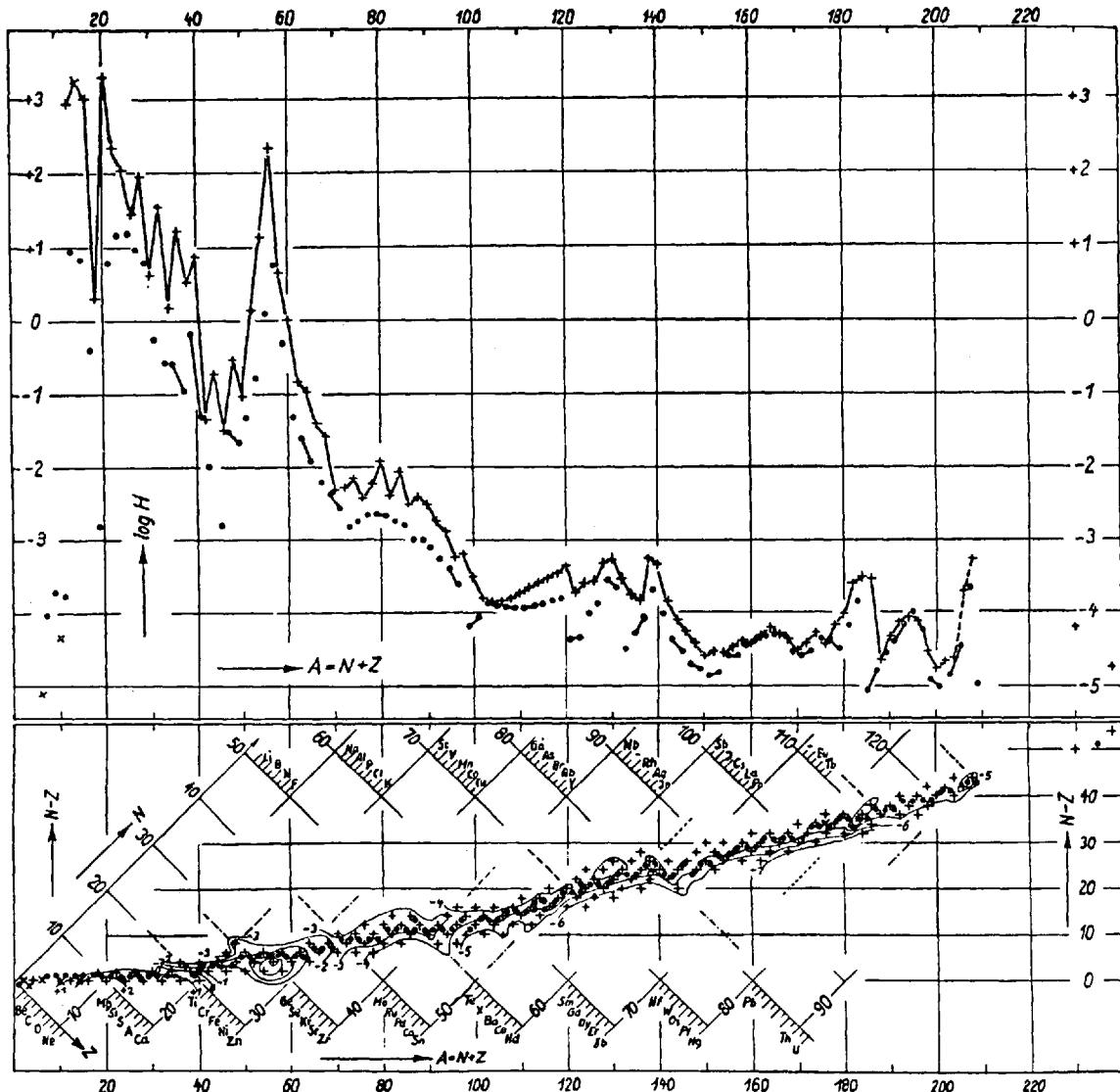


Abb. 1. Oberer Teil: Logarithmus der Summe der Häufigkeiten von Isobaren in Abhängigkeit von der Massenzahl A . Die Werte für die geraden Massenzahlen (Kreuze) sind verbunden. Bei den ungeraden Massenzahlen sind nur die zum gleichen Element gehörenden Punkte verbunden. Die Werte für die leichten Elemente nach UNSÖLD (Sonne) nach Tab. I, wo diese fehlen, nach GOLDSCHMIDT: für die Werte der schwereren Kerne sind die in Tab. II angegebenen ausgeschlagenen Werte verwendet worden.

Unterer Teil: Hier ist die Lage der stabilen und fast stabilen Kerne in einem $A/N-Z$ -Diagramm (gleichbedeutend einem um 45° gedrehten N/Z -Diagramm) eingezeichnet. Linien gleicher Häufigkeit für jede volle Zehnerpotenz sollen qualitativ zeigen, wie sich die im oberen Teil aufgetragene Gesamthäufigkeit bei jeder Massenzahl auf die einzelnen Isobaren verteilt. Die Darstellung läßt die «ausgezeichneten» Neutronen- und Protonenzahlen deutlich hervortreten.

gleichen geochemischen Klasse, nämlich der der «chalkophilen» Elemente gehören.

Zur Frage der Genauigkeit, mit der die angegebenen ausgeglichenen Häufigkeitswerte die wahren relativen Elementhäufigkeiten im Kosmos wiedergeben, ist zu sagen, daß im allgemeinen die Werte benachbarter Elemente relativ zueinander innerhalb weniger Prozente als feststehend betrachtet werden können; nur an Stellen mit starken Häufigkeitsänderungen, wie etwa zwischen Sn und Te oder im Gebiet des Zr oder des W,

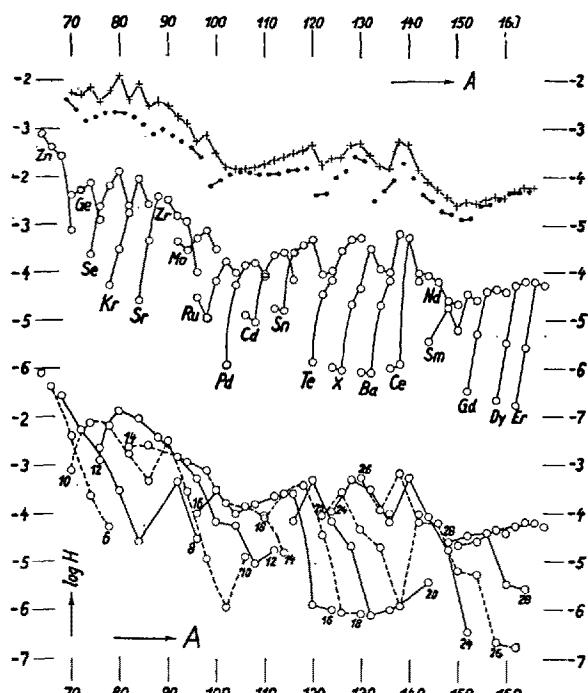


Abb. 2. Im obersten Teil sind wie in Abb. 1 (oben) die Summen der Häufigkeiten von Isobaren in Abhängigkeit von der Massenzahl aufgetragen. Im mittleren Teil sind die einzelnen Isobarenhäufigkeiten der Kerne gerader Massenzahl gesondert aufgetragen und die zu den gleichen Elementen gehörenden Punkte verbunden. Ebenso im untersten Teil, jedoch sind hier die Werte für die Kerne mit gleichem Neutronenüberschuß $N-Z$ verbunden. Für die einzelnen Linienzüge sind die Neutronenüberschußwerte angegeben. Zugrunde gelegt sind die ausgeglichenen Elementhäufigkeiten nach Tab. II.

mag die Unsicherheit in der Zuordnung der Häufigkeitswerte 50% oder mehr betragen. Jedoch entspricht natürlich der angegebene Gesamtgang im Häufigkeitsverlauf über weitere Gebiete von Ordnungszahlen, ebenso wie das Mengenverhältnis der leichten Kerne zu den schweren, der Genauigkeit der GOLDSCHMIDTSchen Angaben. Verbesserungen in den empirischen Häufigkeitsdaten¹ werden daher vielleicht noch Ver-

¹ Erwünscht wäre vor allem eine bessere Kenntnis des Häufigkeitsverhältnisses von chemisch homologen Elementen in den Meteoriten, wie von Sc: Y: seltenen Erden, von Zr:Hf und von den Edelmetallen. Ferner gilt das Verhältnis der Mengen der drei meteoritischen Phasen (Metall: Sulfid: Stein) noch als unsicher. In einer Tabelle von HARRISON BROWN (Chicago) vom Januar 1948 wird das Verhältnis Metall zu Stein um einen Faktor 2,5 höher angenommen. Dann wären, wie eine nähere Untersuchung zeigt, die hier angegebenen ausgeglichenen Werte im Mittel um etwa einen Faktor 1,6 (der \log um 0,2) zu erhöhen. Herrn Dr. Brown danke ich für die Zusendung seiner Tabelle im Manuscript.

änderungen bis zu etwa einem Faktor 2 in den Werten für Gruppen benachbarter Elemente mit sich bringen. Im Gesamtbild der kosmischen Kernhäufigkeiten, wie es Abb. 1 vermittelt, werden hierdurch kaum wesentliche Änderungen eintreten.

Abschließend noch einige Worte zur Frage der Entstehung der Elemente: Es ist klar, daß die genaue Kenntnis der Systematik der Häufigkeitsverteilung der Kerne auch im Hinblick auf diese Frage wertvolle Hinweise vermitteln wird. Freilich fehlen heute noch zu einem vollkommenen Verständnis der Genesis der vorliegenden Häufigkeitsverteilung einige grundlegende Daten über Kerneigenschaften. Das Bild, das uns die Kernhäufigkeiten bietet, läßt jedoch unmittelbar erkennen, daß die Temperatur während des Entstehungsprozesses so hoch gewesen sein muß, daß sich der überwiegende Teil der Kerne in angeregten Zuständen befand; denn sonst müßten sich die individuellen Eigenschaften der Grundzustände der Kerne, wie Spin und Wirkungsquerschnitt für Kernreaktionen, in ihrer Häufigkeit widerspiegeln und der glatte Verlauf der Häufigkeitswerte mit der Massenzahl wäre kaum zu verstehen. Ferner deutet die starke Abhängigkeit der Kernhäufigkeit vom energetisch günstigsten Neutronenüberschuß darauf hin, daß während der Entstehung der schwereren Kerne freie Neutronen eine Rolle gespielt haben müssen¹.

Eine weitere Frage, zu deren Beantwortung die Kenntnis der Kernhäufigkeiten neue Gesichtspunkte eröffnet, ist die nach dem Zeitpunkt der Elemententstehung. Sie soll in einer gleichzeitig in dieser Zeitschrift erscheinenden kurzen Mitteilung gesondert behandelt werden.

Summary

By multiplying by certain factors of correction GOLDSCHMIDT's or UNSÖLD's values for the relative abundance of the elements, a general and coherent picture of the abundance of nuclei can be derived showing that simple rules hold for the abundance of the different types of nuclei. From the fact, that these factors of correction are small and within the limits of error for the majority of the elements, it is to be concluded that the values given by these authors are not far from representing the relative amounts in which the elements originally have been formed. For a small number of elements a comparatively large correction of GOLDSCHMIDT's values is needed, but these elements do nearly all belong to the same geochemical group, viz. that of the „calcophile“ elements. Revised abundance values are tabulated, including those for the rare gases. Two plots illustrate the general picture of nuclear abundance. Reference is made to the significance of this picture as a lead towards better theoretical understanding of the structure of the nuclei, and of the formation of the elements.

¹ Näheres hierüber bei J. H. D. JENSEN und H. E. SUESS, Naturwiss. 34, 131 (1947). Dort auch weitere Literaturangaben. Vgl. auch die kürzlich erschienene Arbeit von R. A. ALPHER, H. BETHE und G. GAMOW, Phys. Rev. 73, 803 (1948). R. A. ALPNER, Phys. Rev. 74, 1577 (1948).