

Tab. 1, but it is difficult to assign it entirely to ^{128}Te double β -decay, since a small, persistent background in the mass spectrometer disturbed exact measurements at ^{128}Xe . However, if all the excess ^{128}Xe should come from the double β -decay of ^{128}Te , a lower limit of the half-life is estimated to be 3×10^{22} years by comparing the excess ^{128}Xe with the excess ^{130}Xe , and using the half-life of the ^{130}Te double β -decay. It is shorter by about three orders of magnitude than the half-life predicted from the decay energy of 0.85 MeV¹.

The excesses in other isotopes of xenon are shown in Fig. 3 in terms of δ_m , the ratio of the excessive xenon to the contaminating atmospheric xenon, where δ_m is defined by the following expression;

$$\delta_m = 1000 \{ (^m\text{Xe}/^{132}\text{Xe}) / (^m\text{Xe}/^{132}\text{Xe})_{\text{atm}} - 1 \}.$$

It is to be noted that the values of δ_m for light isotopes seem to be slightly larger than for heavy ones,

²⁸ J. H. REYNOLDS, Phys. Rev. Letters 4, 8 [1960].

and that the values for ^{130}Xe are remarkably larger. The tendency is similar to that of the well-known general anomalies in meteoritic ^{28}Xe where the values of δ_m increase with decreasing mass number.

Further experiments are in preparation to confirm the results on the half-life of ^{130}Te and, if possible, on that of ^{128}Te also, and to ascertain such tendency of δ_m as shown in Fig. 3 and Fig. 4.

Acknowledgements

The authors wish to express their heartfelt thankfulness to Prof. Dr. H. HINTENBERGER for his kind suggestions on the construction of the mass spectrometer. We are greatly indebted to Prof. G. KAWANO and Dr. Y. UEDA of Tohoku University for supplying us with the tellurium ores and for their valuable guidance in the geological problems. We also wish to thank Prof. T. HAYAKAWA, Dr. S. YAMASHITA and Dr. M. UEDA of Osaka Prefecture University for the chemical analysis of the tellurium ores.

Zur Theorie der Entstehung der Atomkerne unseres Sonnensystems

HANS E. SUESS

University of California, San Diego, La Jolla, Calif. *

(Z. Naturforschg. 21 a, 90—92 [1966]; eingegangen am 30. September 1965)

Herrn Professor J. MATTAUCH zum 70. Geburtstag gewidmet

Im allgemeinen hält man die Schwierigkeiten, die den Theorien der Elemententstehung anhaften, durch die Annahme für überwunden, daß die Elemente unseres Sonnensystems Mischungen darstellen von Kernsorten, die auf verschiedene Weise, zu verschiedenen Zeiten und an verschiedenen Orten entstanden sind. Gegen diese Vorstellung läßt sich jedoch u. a. ein grundlegender Einwand erheben: Durch Wahl einer geeigneten Klassifizierung der Kernsorten läßt sich zeigen, daß in bestimmten Massengebieten die Kernhäufigkeiten mit dem Gang der Kernbindungsenergien nach MATTAUCH et al.¹, zum Beispiel mit den Bindungsenergien der letzten α -Teilchen, in einem, wenn auch derzeit nicht quantitativ deutbaren, augenfälligen Zusammenhang stehen.

Nachdem bereits vor langem gezeigt werden konnte², daß die naheliegende Deutung der Häufigkeitsverteilung der Atomkernsorten in der Natur, und zwar die Vorstellung eines eingefrorenen kernchemischen Gleichgewichts³, keine befriedigende Näherung ergibt, haben zahlreiche Autoren eine Antwort auf die Frage der Elemententstehung entweder in der Kinetik von Kernaufbaureaktionen⁴ oder in der von Abbaureaktionen massiver Kerne⁵ gesucht. Wenn auch manche dieser Versuche zu recht plau-

siblen Bildern führten, so gelang es doch nicht, die empirisch vorliegenden Häufigkeitsdaten quantitativ zu deuten. Die vergeblichen Bemühungen um ein einheitlich geschlossenes, kosmologisch und kernphysikalisch einwandfreies Bild einer Elementsynthese im Zuge eines bestimmten kosmologischen Ereignisses führten schließlich zu der Annahme, daß die uns umgebende Materie eine Mischung darstelle von Produkten, die auf verschiedene Weise in verschiedenen Quellen, und zwar im Innern von Sternen, ent-

* Die Arbeiten des Autors über „Häufigkeiten der Elemente“ werden von der National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. finanziell unterstützt.

¹ L. A. KÖNIG, J. H. E. MATTAUCH u. A. H. WAPSTRA, NAS-NRC Publication, Nuclear Data Project, Washington D.C. 1961.

² J. H. D. JENSEN u. H. E. SUESS, Naturwiss. 34, 131 [1947] und dort angegebene Literatur.

³ C. F. v. WEIZSÄCKER, Phys. Z. 39, 633 [1938].

⁴ G. GAMOW, Phys. Rev. 70, 572 [1946].

⁵ M. G. MAYER u. E. TELLER, Phys. Rev. 76, 1226 [1949].



standen seien. Diese erstmalig von BURBIDGE, BURBIDGE, FOWLER und HOYLE⁶ vertretene Auffassung führte zu einem im allgemeinen befriedigend erscheinenden Bild, das sich auch quantitativ glaubwürdig darstellen ließ. Eine Kritik dieses Bildes, die der Verfasser vor kurzem veröffentlichte⁷, beruht auf einer etwas ungewöhnlichen Argumentation, die zwar in keiner Weise zu zwingenden Schlüssen führt, die aber doch die Berechtigung einer Auffassung eines Zustandekommens der Häufigkeitsverteilung der Kerne durch Mischung von Materie verschiedenen Ursprungs sehr ernstlich in Frage stellt. Abgesehen davon, daß die quantitative Übereinstimmung zwischen den errechneten Daten und den empirischen Befunden keineswegs so befriedigend ist, wie es gelegentlich den Anschein hatte⁸, so ist vor allem das Vorliegen von ausgeprägten Regelmäßigkeiten in der Häufigkeitsverteilung der Kerne bedenklich, und zwar von Regelmäßigkeiten, die im Falle einer Mischung von Materie verschiedenen Ursprungs nicht zu erwarten wäre.

Besonders auffallend ist in dieser Hinsicht die bereits 1949 vom Verfasser⁹ erkannte empirische Regel, nach der im mittleren Massengebiet zwischen $A=56$ (Fe) und der Gegend von $A=120$ (Sn) die Häufigkeiten der Kernsorten mit gleichem Neutronenüberschuß $I=N-Z$ eine glatte Funktion der Massenzahlen A bilden. Der glatte Häufigkeitsverlauf wird nur an Stellen unterbrochen, an denen Schalenabschlüsse im Kernbau¹⁰ auftreten. Nach der Neutronenaufbauhypothese, die den Vorstellungen von BURBIDGE, BURBIDGE, FOWLER und HOYLE zugrundeliegt, müssen innerhalb einer Sequenz von Kernen mit gleichem Neutronenüberschuß die Kerne in verschiedener Weise entstanden sein, und zwar Kerne auf der neutronenreichen Seite des Energietales durch schnellen Neutroneneinfang (durch sog. R-Prozesse), Kerne nahe der Energietalsole durch langsamen Neutroneneinfang (durch sog. S-Prozesse) und neutronenarme Kernsorten durch sog. P-Prozesse. Das Vorliegen einer Regelmäßigkeit, wie sie in Abb. 1 zu erkennen ist, müßte demnach als rein zufällig aufgefaßt werden. Will man das nicht annehmen, dann ist man gezwungen, einen genetischen

Zusammenhang zwischen den Kernen mit gleichem Neutronenüberschuß anzunehmen.

Das Vorliegen der ausgeprägten Regelmäßigkeiten in der Häufigkeitsverteilung der Kerne, das sich bereits 1947 abgezeichnet hatte, wird noch augenfälliger, wenn man die neuen, aus Meteoritenanalysen¹¹ gewonnenen Kernhäufigkeitsdaten in Betracht zieht, die u. a. ein weiteres, besonderes Merkmal erkennen lassen: Das breite Maximum in der Gegend der Massenzahl 130 mit seinem charakteristischen Fehlen eines Unterschiedes der Häufigkeiten von Kernen gerader und ungerader Massenzahl besitzt eine Parallele in einem vermutlich identischen Maximum im Gebiet der Massenzahl 102. Die naheliegendste Deutung dieser beiden Maxima ist die, daß sie durch einen Beitrag von Spaltprodukten einer Kernsorte mit hoher Massenzahl bedingt sind. Beinahe alle Theorien der Elemententstehung ergeben eine Möglichkeit, daß in diesen Massengebieten Kernspaltprodukte zur Häufigkeitsverteilung der Kerne beigetragen haben. Wenn man auf Grund von empirischen Elementhäufigkeitsdaten den Beitrag dieser Kernspaltprodukte abschätzt und von den vorliegenden Kernhäufigkeitswerten abzieht, dann erkennt man auch in diesen Massengebieten die auffallenden Regelmäßigkeiten und für gewisse Kernsorten eine Parallele von Häufigkeiten und Bindungsenergien⁹, wie in Abb. 1 (S. 92) dargestellt.

Wie BURBIDGE, BURBIDGE, FOWLER und HOYLE⁶, und mehr ins einzelne gehend CLAYTON u. a.⁸ gezeigt haben, kann man in bestimmten Massengebieten in eindeutiger Weise erkennen, daß in der Tat S-Prozesse, d. h. durch Neutroneneinfang und nachfolgendem β -Zerfall schrittweise zum Kernaufbau führende Prozesse stattgefunden haben. Die Einheitlichkeit des Gesamtbildes der Kernhäufigkeiten zeigt jedoch, daß diese S-Prozesse nicht zu der Bildung einer eigenen, unabhängigen Komponente der Materie geführt haben können, die später einer anderen, auf völlig anderem Wege entstandenen Komponente beigemischt wurde. Die S-Prozesse sind vielmehr als Sekundärreaktionen aufzufassen, die eine bereits vorliegende, im wesentlichen durch die MATTAUCHSchen Kernbindungsenergien¹ bestimmte Häufigkeitsverteilung modifiziert haben.

⁶ E. M. BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, W. A. FOWLER u. F. HOYLE, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 547 [1957].

⁷ H. E. SUSS, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.* **52**, 387 [1964].

⁸ Siehe z. B.: D. D. CLAYTON, W. A. FOWLER, T. E. HULL u. B. A. ZIMMERMANN, *Ann. Phys. (N.Y.)* **12**, 331 [1961]. — A. G. W. CAMERON, *Astrophys. J.* **130**, 916 [1959] und das

Sammelreferat von G. R. BURBIDGE, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **12**, 507 [1962].

⁹ H. E. SUSS, *Z. Naturforsch.* **2a**, 311, 604 [1947]; *Experientia* **5**, 266 [1949].

¹⁰ M. G. MAYER u. H. J. D. JENSEN, *Nuclear Shell Structure*, New York—London 1955.

¹¹ H. C. UREY, *Geophys. Rev.* **2**, 1 [1964].

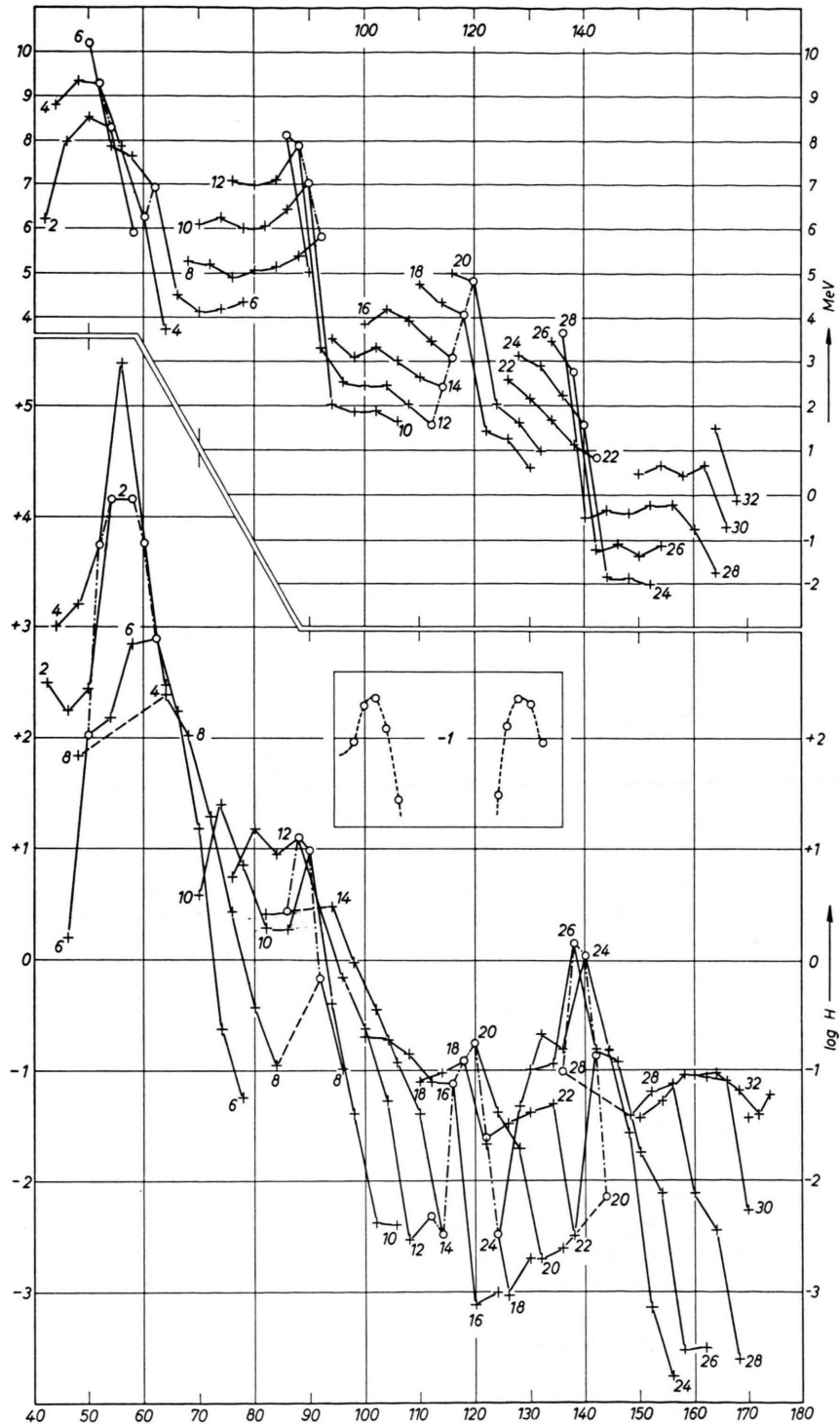


Abb. 1. Unterer Teil: \log_{10} der relativen Häufigkeiten H mittelschwerer Kerne gerader Massenzahl A (modifiziert nach SUSS und UREY) aufgetragen gegen A . Die eingetragenen Zahlen geben Neutronenüberschußwerte an. Die Punkte für Kernsorten mit gleichem Neutronenüberschuß sind verbunden. In den Gebieten $A \sim 100$ und $A \sim 130$ sind die Häufigkeitswerte jeweils vermindert um jene Beträge, die graphisch (um drei Zehnerpotenzen nach auswärts versetzt) in der Abbildung eingetragen und mit gestrichelten Kurvenstücken verbunden sind. Oberer Teil: Bindungsenergien E_α der letzten α -Teilchen (nach MATTAUCH et al. ¹⁾) in diesen Kernsorten wie unten gegen A aufgetragen. Ebenso wie dort sind Neutronenüberschußwerte angegeben und die Punkte für Kerne mit gleichem Neutronenüberschuß verbunden. In beiden Teilen der Abbildung sind die Werte für Kerne mit abgeschlossenen Neutronen- oder Protonenschalen (N oder $Z = 2, 8, 20, 28, 50$ oder 82) als Kreise, alle anderen als Kreuze angegeben.