

ANGEWANDTE CHEMIE

HERAUSGEGEBEN VON DER GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER
71. Jahrgang · Nr. 14 · Seite 441–472 · 21. Juli 1959
FORTSETZUNG DER ZEITSCHRIFT »DIE CHEMIE«

Zur Entwicklung der Meteoritenforschung

F. A. Paneth zum Gedächtnis

In den wissenschaftlichen Arbeiten *Paneths* sind drei Forschungsrichtungen miteinander verknüpft: anorganische Chemie, Analytik und Radio-Chemie. Auf allen drei Gebieten hat *Paneth* Außergewöhnliches und Vortreffliches geleistet. Was ihn aber selbst über das dort Geschaffene hinaushebt, ist seine Entwicklung eines ganz neuen Forschungszweiges, der Kosmo-Chemie, wie er sie zu nennen liebte. Ihr galten auch seine letzten Veröffentlichungen.

In Wien als zweiter Sohn von Dr. Joseph *Paneth*, dem Entdecker der nach ihm benannten histologischen Zellen, geboren, studierte Friedrich A. *Paneth* an den Universitäten Wien, München und Glasgow, in den Laboratorien von Z. *Straup*, A. v. *Baeyer* und F. *Soddy*. 1910 erhielt er in Wien den Ph. D., wurde 1912 am dortigen Institut für Radiumforschung Assistent, 1915 bereits Privatdozent an der Universität. Eine glanzvolle Laufbahn führte ihn als Professor von der T. H. Prag (1918) an die Universitäten Hamburg (1918) und Berlin (1922), und 1929 wurde er Direktor des Chemischen Laboratoriums und Ordinarius in Königsberg.

So fruchtbar *Paneths* Tätigkeit im Königsberg auch war, es sel nur an seine Arbeiten über gasförmige Hydride erinnert, so war sein Bleiben auch hier nur von kurzer Dauer. Als 1933 die politischen Ereignisse ihre Schatten vorauswarfen, verließ *Paneth* als einer der ersten Wissenschaftler Deutschland und wirkte vorerst im Imperial College of Science and Technology in London sowie als Reader an der Universität London. 1939 wurde er zum Professor und Direktor des Chemischen Instituts der Universität Durham berufen. Nach nahezu 15-jähriger Tätigkeit in Durham, nur unterbrochen durch eine zweijährige Abwesenheit, während der er als Leiter der Abteilung Chemie der Britisch-Kanadischen Atomenergie-Gruppe in Montreal wirkte, kehrte *Paneth* im Sommer 1953 nach Deutschland zurück und übernahm als Direktor am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz die Leitung der Chemischen Abteilung.

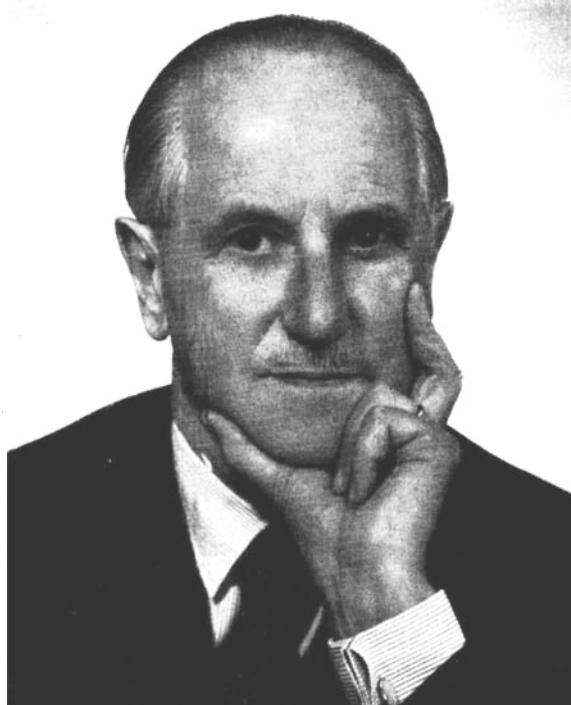


Photo: Tita Bins

Paneth hat mit seinen Mitarbeitern so viele Gebiete der anorganischen Chemie und der Analytik gefördert, daß es unmöglich wäre, auch nur die jeweils wichtigsten Arbeiten aufzuzählen.

Zwei seiner großen Entdeckungen seien kurz erwähnt: Die eine steht am Anfang seiner Laufbahn. Im Wiener Radium-Institut stellt ihm 1912 Stefan Meyer die Aufgabe,

Radium D von Blei zu trennen. Georg von Hevesy bearbeitet zur selben Zeit das gleiche Problem an der Universität Manchester auf Veranlassung von E. Rutherford. Wenig später treffen sich beide in Wien, beide davon überzeugt, daß eine Trennung des Radium-Bleis aus Pechblende von gewöhnlichem Blei nicht möglich ist. Sie diskutieren das Problem und erkennen, daß man diese chemische Ununterscheidbarkeit eines radioaktiven von einem inaktiven Element zu dessen Markierung benutzen kann. 1912, als also der Isotopie-Begriff noch unbekannt ist, wird hier die Grundlage für unsere gesamte heutige Isotopen-Markierungs- und Tracer-Technik gelegt. Gemeinsam veröffentlichen Fritz A. *Paneth* und G. v. *Hevesy* ihre Erkenntnisse in den Sitzungsberichten der Kaiserlichen

Akademie der Wissenschaften in Wien in den beiden Arbeiten „Über Versuche zur Trennung des Radium D von Blei“¹⁾ und „Über Radioelemente als Indikatoren in der analytischen Chemie“²⁾.

Die von *Paneth* entwickelte Methode der fraktionierten Desorption zur quantitativen Messung von Helium und Neon in Mengen bis herab zu 10^{-10} cm^3 gestattete es, ganz neue Forschungen zu beginnen. Im Gegensatz zu der früher herrschenden Ansicht, daß die Zusammensetzung der Luft sich mit der Höhe ändere, konnten *Paneth* und seine Mitarbeiter durch Bestimmung des Helium-Stickstoff-Verhältnisses zeigen, daß die Durchmischung der Luft auch in der Stratosphäre noch groß genug ist und es zu

¹⁾ S.-B. Akad. Wiss. Wien, Abt. IIa 722, 993 [1913].

²⁾ Ebenda 722, 1001 [1913].

keiner relativen Anreicherung von Helium gegenüber Stickstoff kommt. Nach dem letzten Kriege konnten diese Untersuchungen mit Hilfe von Raketen bis auf Höhen von 85 km ausgedehnt werden, wobei sich noch immer keine Änderung der Luftzusammensetzung ergab. Auf Grund der außerordentlichen Empfindlichkeit seiner Meßmethoden gelang Paneth 1935 auch die Verwirklichung des Wunschtraumes der Alchimisten – der erste chemische Beweis einer künstlichen Elementumwandlung, nämlich der spektroskopische Nachweis des durch Neutronenbestrahlung von Bor entstandenen Heliums. Die bisherigen Beobachtungen derartiger Elementumwandlungen waren stets auf die radioaktiven Eigenschaften unwägbarer Mengen beschränkt gewesen.

Meteoritenforschung

Schon in Königsberg wandte Paneth sich einem Arbeitsgebiet zu, dem er sich dann sein ganzes weiteres Leben mit besonderer Liebe widmete: der Meteoritenforschung. Zwar hatten Chemiker und Mineralogen schon früher Meteorite analysiert, jedoch meistens nur von sehr einseitigen Gesichtspunkten aus. Seit den ersten berühmten, die Natur der Meteorite beweisenden Arbeiten von E. Chladni, waren fast keine wesentlichen Fortschritte gemacht worden. Man unterschied drei Arten von Meteoriten: Steinmeteorite, Eisenmeteorite und Steineisen-Meteorite, wobei chemische Analysen bezüglich der Hauptelemente sehr einheitliche Zusammensetzungen bei den drei Meteoriten-Arten ergeben hatten. Man war der Meinung, daß die Meteorite damit vollständig erforscht seien, und hatte gar keine Hoffnung, auf irgendeine Weise mehr über sie zu erfahren. Paneth jedoch fand die Meteorite an sich so interessant, daß er sich ihrer weiteren Erforschung mit ganzer Kraft widmete.

Bald nach den ersten Arbeiten Paneths wurde es klar, daß, wollte man mehr über diese Stücke aus dem Weltall erfahren, die Zusammenarbeit einer größeren Gruppe erforderlich war, da nur auf breiterster Basis eine Lösung der verschiedensten Probleme möglich schien. Alles war Neuland, Untersuchungstechnik sowie die gefundenen Effekte; fast alle Methoden mußten neu entwickelt werden. Die ersten Versuche Paneths und seiner Mitarbeiter hatten das Ziel, Altersbestimmungen an Meteoriten vorzunehmen. Dabei erschien die Anwendung der Helium-Methode besonders bei den Eisenmeteoriten aussichtsreich. Die erste Arbeit von F. A. Paneth, H. Gehlen und P. L. Günther ergab für Eisenmeteoriten Helium-Gehalte zwischen $2 \cdot 10^{-5}$ und $2 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{He/g}$. Um aber Aussagen über das Alter machen zu können, war auch noch die Kenntnis der Uran- und Thorium-Gehalte notwendig. Die kleinen Konzentrationen dieser Elemente blieben jedoch jahrelang unterhalb der Grenze der Nachweisbarkeit. Als man schließlich die ersten, wie man glaubte, verlässlichen Uran-Bestimmungen in Meteoriten ausführen konnte, ergaben sich Werte, die zusammen mit den Helium-Gehalten auf recht verschiedene Alter schließen ließen. Da die höchsten Alterswerte sich aber auf ca. $8 \cdot 10^9$ Jahre beliefen, die Meteorite also älter zu sein schienen als unser Sonnensystem, ja älter als die Elemente und das gesamte Weltall, tauchte bald der Verdacht auf, daß Fehler vorliegen müßten. Tatsächlich liegt der Uran-Gehalt der Eisenmeteorite, wie in den letzten Jahren mit Hilfe der Neutronenaktivierungsanalyse festgestellt werden konnte, ganz wesentlich tiefer als ihn die ersten Bestimmungen ergeben hatten: ihre Ergebnisse waren zwei bis drei Größenordnungen zu hoch gewesen.

Kurz nach dem letzten Kriege stellte sich heraus, daß es neben dem radioaktiven Kern-Zerfall noch eine

zweite, ganz andere Quelle für den Helium-Gehalt in Meteoriten gibt. Die zuerst von C. A. Bauer ausgesprochene Vermutung, daß die Höhenstrahlung in den Meteoriten Helium erzeugt, konnte bald bewiesen werden. Zunächst war es naheliegend, größere Meteorite auf eine Tiefenabhängigkeit des Helium-Gehaltes zu untersuchen. Sie wurde 1953 von Paneth und seinen Mitarbeitern in Durham bestätigt. Als es um diese Zeit dann auch möglich wurde, die sehr geringen Helium-Mengen der Meteorite massenspektrometrisch zu analysieren, ergab sich ein zweiter Beweis für die Herkunft des meteoritischen Heliums. Während durch den Zerfall von Uran und Thorium immer nur Helium der Masse 4 entstehen kann, zeigte die massenspektrometrische Analyse, daß bis zu 25% des meteoritischen Heliums die Masse 3 hat. Ein Irrtum war bei der Größe dieses Effektes ganz ausgeschlossen; atmosphärisches Helium beispielsweise enthält nur etwa $10^{-4}\%$ Helium-3. Als sich dann auch herausstellte, daß alle bisherigen Uran-Bestimmungen an Eisenmeteoriten wesentlich zu hohe Werte ergeben hatten, wurde es klar, daß für den Helium-Gehalt der Meteorite ausschließlich die Höhenstrahlung verantwortlich ist. Altersbestimmungen mit Hilfe der Helium-Methode sind daher an Eisenmeteoriten nicht möglich.

Die bei der He-Bildung in den Meteoriten ablaufenden Prozesse sind folgender Art: trifft ein Teilchen der Höhenstrahlung – im wesentlichen handelt es sich dabei um Protonen mit Energien über 1 GeV – auf ein Proton oder Neutron eines Eisen-Atomkerns im Meteoriten, so muß es zumindest einen kleinen Teil seiner kinetischen Energie abgeben. Bei diesen Stoßprozessen entstehen π -Mesonen, die mit Energien von etwa 600 MeV den Atomkern verlassen und deren Winkelverteilung eine starke Bevorzugung der Vorwärtsrichtung aufweist. Das getroffene Nukleon kann nun weitere Nukleonen anstoßen, man spricht von der Ausbildung einer Nukleonen-Kaskade. Die Nukleonen der Kaskade zeigen ebenfalls eine starke Bevorzugung der Vorwärtsrichtung und haben Energien von 25 bis 500 MeV. So wird schließlich allen Nukleonen Energie zugeführt; der Kern erwärmt sich. Die Zeit bis zur Erreichung des thermischen Gleichgewichts beträgt etwa 10^{-22} sec. Jetzt beginnt die sog. Kernverdampfung; neben Protonen und Neutronen verlassen auch zusammengesetzte Teilchen wie D, T, ^3He , ^4He den Kern. Nach ihrem Abdampfen bleibt ein Restkern mit einer Massenzahl zurück, die je nach der Höhe der primären Anregung mehr oder weniger weit unterhalb der des Eisens liegt. Diese Restkerne können stabil oder auch radioaktiv sein. Die Energien der verdampfenden Teilchen sind mit 10 bis 20 MeV verhältnismäßig gering, so daß etwaige weitere Kernreaktionen durch diese Teilchen vernachlässigt werden können. Sekundärteilchen, die zu sekundären Verdampfungen Anlaß geben, sind die π -Mesonen und die schnellen Nukleonen der Kaskade. Diese Teilchen werden nahezu alle in Vorwärtsrichtung emittiert. Infolge dieser Sekundärteilchen ist auch die Abnahme des Helium-Gehalts mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche der Meteorite wesentlich geringer, als man ursprünglich auf Grund der Annahme einer reinen Absorption der Primärteilchen vermutete.

Hatten die bisherigen Arbeiten Paneths allein die Eisenmeteorite behandelt, so wandte sich sein Interesse in den letzten Jahren auch den Steinmeteoriten zu. Diese enthalten immerhin soviel Uran und Kalium, daß es möglich war, mit Hilfe neuer, besonders empfindlicher Methoden Altersbestimmungen nach der Uran-Helium- bzw. Kalium-Argon-Methode durchzuführen. Es ergaben sich Alterswerte zwischen $2 \cdot 10^9$ und über $4 \cdot 10^9$ Jahren.

Überall, insbesondere auch in den USA und in Rußland, begannen jetzt zahlreiche Wissenschaftler, sich für Meteorite zu interessieren. Bei den Eisenmeteoriten begann die Suche nach den erwähnten Restkernen. Obwohl die Konzentrationen um zwei bis drei Größenordnungen unter der des Heliums liegen, konnte von Paneth bzw. von seinen Mitarbeitern zunächst Neon als Reaktionsprodukt der Höhenstrahlung in Eisenmeteoriten nachgewiesen werden. Erster Vertreter eines festen Elementes war das Scandium, welches sich in Konzentrationen von einigen 10^{-9} g/g in den Meteoriten findet. Die massenspektrometrische Analyse des meteoritischen Neons ergab für alle drei Isotope eine fast gleiche Häufigkeit, in starkem Gegensatz zu atmosphärischem Neon. Inzwischen konnten W. Gentner und Mitarbeiter auch die Isotope des Argons in Eisenmeteoriten nachweisen.

Höhenstrahlung

Aus dem Verhältnis der Reaktionsprodukte zueinander und aus dem Vergleich dieser Verhältnisse bei verschiedenen Meteoriten war es möglich, Aussagen über den Massenverlust der Meteorite beim Durchgang durch die Atmosphäre zu machen. Die Erzeugungsquerschnitte der einzelnen Reaktionsprodukte hängen zum Teil sehr stark von der Energie der primären Teilchen ab und können aus Bestrahlungsexperimenten mit Hilfe der großen modernen Teilchenbeschleuniger gemessen werden. Ein Vergleich der Erzeugungsquerschnitte mit den in Meteoriten gefundenen Mengen der Reaktionsprodukte erlaubt wertvolle Aussagen über das Energiespektrum der Höhenstrahlung im freien Weltraum. Ein Teil dieser Untersuchungen ist noch im Gange, alles scheint in Fluß und eine ganze Reihe neuer Möglichkeiten taucht auf. Wie schon erwähnt, sind manche der durch die Kernverdampfungsprozesse gebildeten Kerne nicht stabil, sondern radioaktiv. Von diesen radioaktiven Produkten wurde zuerst Tritium von E. L. Fireman und Mitarb. in Meteoriten entdeckt. Tritium zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren in Helium-3. Ein anderes radioaktives Isotop, Natrium-22, zerfällt in Neon-22 mit einer Halbwertszeit von 2,6 Jahren. Messungen mit solchen Isotopen sind natürlich nur an jüngst gefallenen Meteoriten möglich. Andere Isotope haben wesentlich längere Halbwertszeiten, so z. B. Argon-39 (260 Jahre) oder Beryllium-10 (2,7- 10^6 Jahre). Aus den bekannten Erzeugungsquerschnitten dieser Isotope für Protonen mit Energien, die den Teilchen der Höhenstrahlung entsprechen, und der in den Meteoriten gemessenen Zerfallsrate eines solchen Isotops, z. B. des Tritium, läßt sich die absolute Intensität der Höhenstrahlung im freien Weltraum bestimmen. Geben die kurzebigeren Isotope nur ein Bild von der Intensität im gegenwärtigen Zeitpunkt, so sind mit Hilfe der langlebigen Isotope Aussagen über die Intensität der Höhenstrahlung in den vergangenen Jahrtausenden möglich. Aus der Radioaktivität eines Isotops und der Menge des in Meteoriten gebildeten stabilen Folgeprodukts läßt sich ein sog. Bestrahlungsalter ableiten. Dividiert man beispielsweise die Zahl der in einer Meteoritprobe gefundenen Helium-3-Atome durch die Zahl der Tritium-Zerfälle/sec,

bezogen auf den Zeitpunkt des Falles, so erhält man die Zeit, während der der Meteorit der Höhenstrahlung ausgesetzt war. Man hat nun nur noch zu berücksichtigen, daß ein Teil des Helium-3 nicht durch den Zerfall von Tritium entsteht, sondern direkt gebildet wird. Außerdem steckt in dieser Überlegung eine angenommene Konstanz der Höhenstrahlung über den gesamten Bestrahlungszeitraum, eine Voraussetzung, die erst geprüft werden muß. Kennt man die Intensität der Höhenstrahlung bzw. ihren etwaigen zeitlichen Verlauf, so läßt sich ein solches Bestrahlungsalter auch aus der Menge irgendeines stabilen Reaktionsproduktes angeben. Dadurch werden die Messungen wesentlich einfacher, und es ergibt sich die Möglichkeit, ein solches Bestrahlungsalter für eine viel größere Zahl von Meteoriten zu bestimmen. Nach den wenigen bisher vorliegenden Ergebnissen haben Eisenmeteorite ein Bestrahlungsalter von etwa einer Milliarde Jahren, für Steinmeteorite hingegen erhält man die wesentlich niedrigeren Werte von etwa 10 Millionen bis 300 Millionen Jahren.

Messungen der kosmischen Strahlung im freien Weltraum lassen sich heute zum Teil auch mit Satelliten bzw. Weltluftsonden durchführen, doch haben Meteorite den Vorteil, daß sie sich bereits seit sehr langer Zeit im Weltall befinden, wodurch auch Aussagen über die Verhältnisse in vergangenen Jahrtausenden möglich sind. Weiter besteht die Hoffnung, durch diese Forschungen die Entstehungs- und Lebensgeschichte der Meteorite zu rekonstruieren und dadurch Aufschluß zu erhalten über die Bildung unseres Planetensystems, eine Frage, die die Menschheit wohl seit den Anfängen ihres Denkens bewegt. Wenn gleich die zuletzt geschilderten Erkenntnisse das Ergebnis von Untersuchungen zahlreicher Forscher in aller Welt sind, so bleibt es doch das Verdienst Paneths, diese mühevollen und zunächst so gar nicht erfolgversprechenden Arbeiten begonnen und lange Zeit als einziger verfolgt zu haben.

Aber nicht nur der strengen experimentellen Forschung galten Liebe und Interesse Paneths. An die 50 Veröffentlichungen von ihm behandeln Fragen der Geschichte der Naturwissenschaften, und wie alles, was er veröffentlichte, sind auch diese Mitteilungen glänzend geschrieben. Gewiß kam ihm hier sein Schatz an klassischer Bildung zustatten. Ob es sich um Beiträge über Paracelsus, Thomas Wright und Immanuel Kant, über eine Schrift Alberts des Großen, das Tagebuch Faradays oder chinesische Alchemie handelte, der Gegenstand seiner Darstellung gewann Leben und Interesse. Seine Vorträge im In- und Ausland waren Beweise seiner großartigen Rednergabe; wer erinnert sich nicht an seine Darstellung der Geschichte des Falles des Breitscheid-Meteoriten, die er auf der Hauptversammlung der Gesellschaft Deutscher Chemiker 1957 in Berlin gab³⁾?

Völlig unerwartet hat ihn eine heimtückische und unheilbare Krankheit im 72. Lebensjahr am 17. September 1958 dahingerafft.

H. Wänke

³⁾ Diese Ztschr. 69, 714 [1957].