

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Radioaktive Umwandlungen

Rutherford, Ernest

Braunschweig, 1907

Achtes Kapitel. Die Entstehung von Helium aus Radium und die
Umwandlung der Materie

Der Zusammenhang zwischen Uranium und Thorium läßt sich noch nicht gut übersehen. Manche Mineralien enthalten Uranium und sehr wenig Thorium, aber Strutt hat gezeigt, daß von allen untersuchten Thoriummineralien jedes etwas Uranium und Radium enthält. Strutt hat die Vermutung geäußert, daß Thorium die Muttersubstanz des Uraniums ist. Hierfür spricht die Zusammensetzung des Minerals Thorianit. Dieses Mineral, das aus sehr frühen geologischen Epochen stammt und in Ceylon gefunden wird, enthält ungefähr 70 Proz. Thorium und 12 Proz. Uranium. Das Uranium könnte durch den Zerfall des Thoriums entstanden sein. Gegen diese Annahme läßt sich jedoch ein sehr gewichtiger Einwand erheben; das Atomgewicht des Thoriums, 232,5, ist geringer als das gewöhnlich dem Uranium zugeschriebene Atomgewicht von 238,5. Wenn diese Atomgewichte richtig sind, so ist es unwahrscheinlich, daß Thorium die Muttersubstanz des Uraniums ist, wenn nicht die Bildung des Uraniums und Thoriums in ganz anderer Weise vor sich geht, als die anderen radioaktiven Umwandlungen.

Achtes Kapitel.

Die Entstehung von Helium aus Radium und die Umwandlung der Materie.

Die Geschichte der Entdeckung des Heliums weist einige sehr interessante Züge auf. Im Jahre 1868 beobachteten Janssen und Lockyer im Spektrum der Sonnenphotosphäre eine helle, gelbe Linie, welche in den Spektren der auf der Erde vorhandenen Stoffe nicht vorkommt. Lockyer nahm an, daß sie von einem neuen Element herrührte, dem er den Namen Helium gab. Weitere Untersuchungen ergaben, daß in dem Spektrum der Photosphäre gewisse andere Spektrallinien stets die gelbe Linie begleiten und für das Helium charakteristisch sind.

Das Helium wurde nicht nur in dem Spektrum der Sonne, sondern auch noch in dem vieler anderer Sterne aufgefunden; in dem Spektrum einiger Sterne, die jetzt als Heliumsterne bezeichnet werden, treten die Heliumlinien deutlicher als die Spektrallinien anderer Elemente hervor. Für das Vorkommen des Heliums auf der Erde fand sich kein Anzeichen bis zum Jahre 1895. Kurze Zeit, nachdem durch Lord Rayleigh und Sir William Ramsay das Argon in der Atmosphäre entdeckt worden war, wurde untersucht, ob Argon aus Mineralien gewonnen werden könnte. Im Jahre 1895 lenkte Miers in einem Briefe an die „Nature“ die Aufmerksamkeit auf einige Ergebnisse, die Hillebrande 1891 erhalten hatte. Hillebrande¹⁾ hatte bei der Ausführung eingehender Untersuchungen von uraniumhaltigen Mineralien gefunden, daß bei der Auflösung der Mineralien stets eine beträchtliche Gasmenge abgegeben wurde. Er hielt dieses Gas für Stickstoff, obwohl er bemerkte, daß seine Eigenschaften in gewissen Beziehungen von denen des Stickstoffes abwichen. Das Mineral Clevëit gab eine besonders große Menge Gas ab, wenn es erhitzt oder aufgelöst wurde. Ramsay verschaffte sich eine Probe dieses Minerals, um zu sehen, ob das in dem Clevëit enthaltene Gas mit dem Argon identisch wäre. Nach Einführung des von dem Mineral abgegebenen Gases in eine Vakuumröhre wurde sein Spektrum untersucht. Dieses war völlig von dem des Argons verschieden²⁾. Lockyer³⁾ untersuchte das Spektrum sehr sorgfältig und fand, daß es identisch war mit dem von ihm in der Sonne aufgefundenen Heliumspektrum. Erst nachdem 30 Jahre verflossen waren, seitdem das Helium in dem Sonnenspektrum entdeckt war, wurde sein Vorkommen auf der Erde nachgewiesen. Eine Untersuchung der Eigenschaften des Heliums folgte alsbald. Helium hat ein charakteristisches aus hellen Linien zusammengesetztes Spektrum, in dem eine helle, gelbe Linie D_3 , die nahe an den D -Linien des Natriums liegt, am meisten hervortritt. Helium ist ein leichtes Gas, seine Dichte ist ungefähr doppelt so groß wie die des Wasserstoffes; das Heliumatom ist daher, abgesehen vom Wasserstoff, leichter als das irgend eines anderen Elementes. Wie das Argon, geht es mit

¹⁾ Hillebrande, Bull. U. S. Geolog. Survey, Nr. 78, S. 43 (1891).

²⁾ Ramsay, Proc. Roy. Soc. 58, 65 (1895).

³⁾ Lockyer, Proc. Roy. Soc. 58, 67 (1895).

keiner anderen Substanz Verbindungen ein und muß daher in die Gruppe der chemisch trägen Gase gerechnet werden, die Ramsay in der Atmosphäre entdeckt hat. Durch Messung der Schallgeschwindigkeit in einer mit Helium gefüllten Röhre wurde für das Verhältnis seiner spezifischen Wärmen der Wert 1,66 gefunden. Das gleiche Verhältnis beträgt bei zweiatomigen Gasen, wie Wasserstoff und Sauerstoff, 1,41. Hiernach ist Helium einatomig, d. h. das Heliummolekül besteht aus nur einem Atom. Da die Dichte des Heliums 1,98 mal größer ist, als die des Wasserstoffs bei gleicher Temperatur und gleichem Druck, und da das Wasserstoffmolekül zwei Atome enthält, so muß das Atomgewicht des Heliums gleich 3,96 sein. Es muß darauf aufmerksam gemacht werden, daß dieses Atomgewicht nur aus den Messungen der Dichte abgeleitet ist, da Helium chemische Verbindungen nicht eingeht; die Bestimmung seines Atomgewichtes kann daher nicht denselben Anspruch auf Zuverlässigkeit machen, wie die Atomgewichtsbestimmungen der anderen Elemente, die nach exakteren chemischen Methoden ausgeführt sind. Helium wurde in verschwindender Menge auch in der Atmosphäre nachgewiesen. In einer kürzlich erschienenen Abhandlung hat Ramsay angegeben, daß 1 Volumen Helium in 245 000 Volumina Luft enthalten ist.

Das Vorkommen von Helium in gewissen Mineralien war außerordentlich auffällig, denn es lag keine einleuchtende Erklärung dafür vor, warum ein chemisch träges Gas sich in der Begleitung von Mineralien finden sollte, die oft dem Wasser oder Gasen keinen Durchtritt gestatten.

Nach der Entdeckung der Radioaktivität trat diese Erscheinung in ein ganz neues Licht. Nach der Zerfallstheorie der Radioaktivität ist zu erwarten, daß die Endprodukte oder inaktiven Umwandlungsprodukte in radioaktiven Mineralien enthalten sind. Da viele radioaktiven Mineralien ein sehr hohes Alter besitzen, so ist anzunehmen, daß die inaktiven Umwandlungsprodukte radioaktiver Substanzen, wenn sie nicht entweichen können, sich in gewisser Menge als stete Begleiter der radioaktiven Stoffe vorfinden. Bei der Umschau nach möglichen Zerfallsprodukten fällt das Vorkommen des Heliums in allen radioaktiven Mineralien auf, denn Helium findet sich hauptsächlich in Mineralien, die Uranium oder Thorium enthalten.

Aus diesen und anderen Gründen sprachen Rutherford und Soddy¹⁾ die Vermutung aus, daß Helium ein Zerfallsprodukt der Radioelemente sein könnte. Diese Annahme erfuhr eine weitere Bestätigung durch die Entdeckung des Verfassers, daß die α -Partikel des Radiums eine scheinbare Masse von der doppelten Größe des Wasserstoffatoms besitzt und so sich als ein Heliumatom erweisen könnte.

Im Beginn des Jahres 1903 wurden kleine Mengen reinen Radiumbromids auf den Markt gebracht; der Dank hierfür gebührt Dr. Giesel aus Braunschweig. Ramsay und Soddy erhielten 30 mg des Bromids und versuchten die Anwesenheit von Helium in dem von dem Radium in Freiheit gesetzten Gase nachzuweisen. Bei dem ersten Versuche wurde das Radiumbromid in Wasser gelöst und die aufgesammelten Gase abgefangen. Es war bekannt, daß Radiumbromid Wasserstoff und Sauerstoff entwickelt, diese Gase wurden daher nach geeigneten Methoden entfernt. Eine kleine Gasblase blieb zurück, die nach Einführung in eine Vakuumröhre die charakteristische D_3 -Linie des Heliums zeigte²⁾. Bei Verwendung eines anderen, etwas älteren Radiumpräparates, das von dem Verfasser zur Verfügung gestellt war, gab das bei der Auflösung des Radiums gewonnene Gas das vollständige Spektrum des Heliums.

Aus diesem Versuche geht hervor, daß Helium aus Radium entsteht und in gewissem Grade in dem Radiumsalz zurückgehalten wird. Weitere Versuche führten zu einer noch interessanteren Beobachtung. Die Emanation von 60 mg Radiumbromid wurde in einer Glasröhre kondensiert und die anderen Gase abgepumpt. Die Emanation wurde dann wieder verflüchtigt und in eine kleine Vakuumröhre eingeführt. Das Spektrum zeigte zunächst keine Heliumlinien, nach drei Tagen trat jedoch die D_3 -Linie des Heliums auf und nach fünf Tagen war das gesamte Heliumspektrum sichtbar. Durch diesen Versuch ist bewiesen, daß Helium aus dem Radium entsteht, denn unmittelbar nachdem die Emanation in die Spektralröhre eingeführt worden war, ließ sich kein Helium nachweisen.

¹⁾ Rutherford und Soddy, Phil. Mag., S. 582 (1902); S. 453 und 579 (1903).

²⁾ Ramsay und Soddy, Nature, 16. Juli 1903, S. 246. Proc. Roy. Soc. 72, 204 (1903); 73, 346 (1904).

Die Entdeckung, daß Helium aus Radium entsteht, ist von großer Bedeutung, da sie den ungewöhnlichen Charakter der in dem Radium sich abspielenden Prozesse sehr anschaulich zutage treten läßt, und das erste sichere Anzeichen dafür ist, daß ein Element sich in ein anderes stabiles Element umwandeln kann. Die Versuche von Ramsay und Soddy waren nicht leicht auszuführen, da die Menge des vorhandenen Heliums verschwindend klein war; die Erfahrungen, die Ramsay bei seinen Versuchen mit den in der Atmosphäre enthaltenen Edelgasen gewonnen hatte, waren daher für die erfolgreiche Durchführung der Versuche von dem größten praktischen Werte.

Die Entstehung des Heliums aus Radium ist durch eine Anzahl von Forschern bestätigt worden. Curie und Dewar¹⁾ führten einen sehr interessanten Versuch aus, welcher einwandfrei zeigte, daß Helium von Radium gebildet wird, und daß sein Vorhandensein nicht dem Umstande zugeschrieben werden konnte, daß möglicherweise Helium in dem Radiumbromid eingeschlossen war. Eine große Menge Radiumchlorid wurde in ein Quarzrohr gebracht und bis zum Schmelzen erhitzt. Die Emanation und die anderen in dem Rohr enthaltenen Gase wurden ausgepumpt und das Rohr zugeschmolzen. Einen Monat später untersuchte Deslandres das Spektrum der in dem Rohr enthaltenen Gase, indem er die Enden des Rohres mit Metallfolie bedeckte. Es trat das vollständige Spektrum des Heliums auf, woraus hervorgeht, daß das Helium in der Zwischenzeit aus dem Radium gebildet war.

Kürzlich hat Debierne gefunden²⁾, daß Helium auch aus Aktiniumpräparaten entsteht. Dieses Ergebnis zeigt, daß Helium ein Produkt dieser beiden Substanzen ist, die nach ihrem radioaktiven und chemischen Verhalten zweifellos als chemische Elemente angesehen werden müssen.

Die Stellung des Heliums in der Reihe der Umwandlungsprodukte des Radiums.

Wir haben bereits gesehen, daß Radium eine große Zahl von Umwandlungsprodukten besitzt, von denen jedes seine besonderen

¹⁾ Curie u. Dewar, C. R. 138, 190 (1904).

²⁾ Debierne, C. R. 141, 383 (1905).

chemischen und physikalischen Eigenschaften und eine charakteristische Umwandlungsperiode besitzt. Diese Produkte unterscheiden sich von den gewöhnlichen chemischen Elementen nur dadurch, daß ihre Atome unbeständig sind. Sie müssen als Übergangselemente von beschränkter Lebensdauer aufgefaßt werden, die sich mit einer von uns nicht zu beeinflussenden Geschwindigkeit in neue Formen der Materie umwandeln.

Der Unterschied, der zwischen dem Helium, als einem Produkt des Radiums und der Familie der übrigen Umwandlungsprodukte besteht, ist wesentlich eine Verschiedenheit in der Stabilität der Atome. So weit wir wissen, ist Helium ein beständiges Element, welches nicht verschwindet; die Atome aller radioaktiven Substanzen, einschließlich der Muttersubstanzen Uranium und Thorium, sind jedoch zweifellos unbeständig.

Wir wollen jetzt die Stellung des Heliums in der Reihe der Umwandlungsprodukte des Radiums besprechen. Es ist die Vermutung geäußert worden, daß Helium das Endprodukt der Umwandlung des Radiumatoms ist; hierfür liegt jedoch kein experimenteller Beweis vor. Nach den ersten schnellen Umwandlungen, die der aktive Niederschlag der Radiumemanation erfährt, bildet sich Radium-D, ein Produkt von sehr langsamer Umwandlung. Wenn Helium das Endprodukt des Radiums wäre, so würde die von der Emanation im Verlauf einiger Tage gebildete Heliummenge unmeßbar klein sein. Es kann ferner nicht zweifelhaft sein, daß das letzte aktive Produkt des Radiums, nämlich Radium-F (Polonium), ein Element von hohem Atomgewicht ist.

Andererseits sprechen manche Gründe dafür, daß Helium aus den α -Partikeln gebildet wird, die ununterbrochen von dem Radium und seinen Produkten ausgesandt werden. Wir werden später sehen (Zehntes Kapitel), daß nach den experimentellen Untersuchungen die α -Partikeln, die von den verschiedenen α -Strahlenprodukten des Radiums ausgesandt werden, alle dieselbe Masse haben und sich bei den verschiedenen Produkten nur durch ihre Geschwindigkeiten unterscheiden.

Aus Messungen der Ablenkung, die die α -Strahlen in einem starken magnetischen und elektrischen Felde erfahren, ist die Geschwindigkeit der α -Partikeln und der Wert e/m — das Verhältnis der Ladung zur Masse — genau ermittelt worden. Der Wert von e/m beträgt sehr angenähert 5×10^3 . Für den elektro-

lytisch abgeschiedenen Wasserstoff beträgt das Verhältnis $e/m 10^4$. Wenn wir annehmen, daß die α -Partikel dieselbe Ladung besitzt wie das Wasserstoffatom, so ist die Masse der α -Partikel doppelt so groß wie die des Wasserstoffatoms. Wir stehen so vor der Wahl verschiedener Möglichkeiten, zwischen denen zu entscheiden zur Zeit schwierig ist.

Der Wert von e/m , der für die α -Partikel gefunden ist, läßt sich gleich gut durch die Annahmen erklären, daß die α -Partikel 1. ein Wasserstoffmolekül ist; 2. ein Heliumatom, das die doppelte Ladung des Wasserstoffatoms trägt, oder 3. die Hälfte eines Heliumatoms, das die gewöhnliche Ionenladung besitzt.

Die Hypothese, daß die α -Partikel ein Wasserstoffatom sei, ist aus manchen Gründen unwahrscheinlich. Wenn Wasserstoff ein Baustein in den Atomen radioaktiver Substanzen wäre, so wäre zu erwarten, daß er im atomistischen und nicht im molekularen Zustande fortgeschleudert würde. In allen bisher untersuchten Fällen beträgt der Wert von $e/m 10^4$, wenn Wasserstoff eine elektrische Ladung besitzt. Dieser Wert ist für das Wasserstoffatom zu erwarten. Wien fand z. B., daß der Maximalwert von e/m für Kanalstrahlen oder positive Ionen, die in einer evakuierten Röhre erzeugt werden, 10^4 beträgt. Es ist ferner unwahrscheinlich, daß Wasserstoff, selbst wenn er anfangs im molekularen Zustande fortgeschleudert würde, beim Durchgang durch Materie der Zerlegung in seine Atome entgehen würde.

Da eine α -Partikel mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 20 000 km in der Sekunde fortgeschleudert wird und mit jedem Molekül zusammenstößt, das sich auf ihrem Wege befindet, so muß die Störung, die innerhalb des Moleküls durch die Zusammenstöße zustande kommt, sehr stark sein und einen Bruch der Verbindungen veranlassen, die die Atome des Moleküls zusammenhalten. Es ist in der Tat sehr unwahrscheinlich, daß das Wasserstoffmolekül unter solchen Umständen keinen Zerfall erfahren sollte. Wenn die α -Partikel ein Wasserstoffmolekül wäre, so sollte eine beträchtliche Menge freien Wasserstoffes in allen radioaktiven Mineralien vorhanden sein, die dicht genug sind, um ein Entweichen von Gasen zu verhindern. Dieses scheint nicht der Fall zu sein, obwohl einige Mineralien eine beträchtliche Menge Wasser enthalten. Andererseits bestätigt der relativ große Heliumgehalt die Annahme, daß zwischen Helium und der α -Par-

tikel ein Zusammenhang besteht. Diese Hypothese wird durch die Beobachtung gestützt, daß Helium nicht nur vom Radium, sondern auch vom Aktinium gebildet wird. Die Aussendung von α -Partikeln ist die einzige Eigenschaft, worin sich diese beiden Stoffe ähnlich sind. Die Bildung des Heliums aus beiden ist daher sofort verständlich, wenn Helium aus den α -Partikeln entsteht; sie ist jedoch auf Grund einer anderen Hypothese schwer zu erklären. Wir müssen also annehmen, daß die α -Partikel entweder ein Heliumatom ist, welches die doppelte Ionenladung besitzt, oder daß sie aus einem halben Heliumatom besteht, das nur eine Ionenladung trägt.

Der letzten Annahme liegt die Vorstellung zugrunde, daß Helium, obwohl es sich unter gewöhnlichen Umständen wie ein chemisches Atom verhält, in noch elementarerem Zustande als ein Bestandteil der radioaktiven Stoffe bestehen kann, und daß die α -Partikeln nach dem Verlust ihrer Ladungen sich vereinigen, um Heliumatome zu bilden. Diese Annahme darf wegen ihrer geringen Wahrscheinlichkeit nicht gänzlich unberücksichtigt bleiben, es findet sich jedoch nichts, was direkt zu ihren Gunsten spräche. Die zweite Hypothese hat hingegen den Vorzug größerer Einfachheit und Wahrscheinlichkeit.

Danach ist die α -Partikel in Wirklichkeit ein Heliumatom, welches entweder mit zwei Ionenladungen fortgeschleudert wird, oder diese Ladungen bei dem Durchdringen von Materie aufnimmt. Selbst wenn die α -Partikel anfangs ohne Ladung fortgeschleudert würde, so würde sie sicherlich nach den ersten Zusammenstößen mit den Gasmolekülen eine Ladung aufnehmen. Wir wissen, daß die α -Partikel ein sehr wirksames Ionisierungsmittel ist, und alle Gründe sprechen dafür, daß sie durch den Zusammenstoß mit einem Molekül selbst ionisiert werden wird, d. h. daß sie ein Elektron verlieren und selbst eine positive Ladung behalten wird.

Wenn die α -Partikel auch nach dem Verlust von zwei Elektronen stabil ist, so werden diese Elektronen infolge der heftigen Störungen, die bei dem Zusammenstoß der α -Partikel mit den Molekülen auftreten, sicher fortgerissen werden. Die Ladung der α -Partikel wird dann doppelt so groß sein wie die gewöhnliche Ionenladung, und der experimentell ermittelte Wert von e/m würde dann mit der Annahme übereinstimmen, daß die α -Partikel ein Heliumatom ist.

Wenn dieses der Fall wäre, so würde die Anzahl der vom Radium ausgesandten α -Partikeln nur halb so groß sein wie die Zahl, die sich unter der Voraussetzung ergibt, daß die α -Partikel nur eine einzige Ladung besitzt. Hieraus würde sich für die Zerfallsgeschwindigkeit des Radiums nur die Hälfte des im sechsten Kapitel berechneten Wertes ergeben und die Lebensdauer des Radiums würde doppelt so groß sein.

In ähnlicher Weise würde sich der Wert, der für das Volumen der von 1 g Radium abgegebenen Emanation berechnet wurde, von 0,8 auf 0,4 cmm reduzieren. Dieser Wert ist kleiner als der von Ramsay und Soddy experimentell bestimmte, — ungefähr 1 cmm — aber von der richtigen Größenordnung.

Nach den obigen Annahmen läßt sich das Volumen der Heliummenge, die in einem Jahre von 1 g Radium gebildet wird, leicht berechnen. Wenn jede α -Partikel zwei Ionenladungen trägt, so berechnet sich aus den Versuchen, daß $1,25 \cdot 10^{11}$ α -Partikeln in der Sekunde von 1 g im Gleichgewicht befindlichen Radiums ausgesandt werden. In einem Jahre werden also $4,0 \cdot 10^{18}$ α -Partikeln ausgesandt. Da 1 ccm eines Gases bei 760 mm und 0° $3,6 \cdot 10^{19}$ Moleküle enthält, so wird in einem Jahre von 1 g Radium 0,11 ccm Helium gebildet.

Ramsay und Soddy führten eine Schätzung der Geschwindigkeit aus, mit der Helium aus Radium gebildet wird, und zwar in der folgenden Weise. Das Helium, das von 50 mg Radiumbromid in 60 Tagen gebildet war, wurde in eine Vakuumröhre eingeführt. Eine ähnliche Röhre wurde neben ihr aufgestellt und mit so viel Helium gefüllt, daß bei der Entladung der hintereinander geschalteten Röhren die Heliumlinien mit ungefähr der gleichen Intensität auftraten. Auf diese Weise erhielten Ramsay und Soddy für das Volumen des Heliums ungefähr 0,1 cmm. Dieses entspricht der Bildung von 20 cmm Helium per Jahr für 1 g Radium. Der oben besprochene Wert ist ungefähr fünfmal so groß. Ramsay und Soddy halten den nach ihrem Verfahren ermittelten Wert nicht für sehr genau, da sie annehmen, daß die Anwesenheit einer Spur von Argon die Genauigkeit des nach der spektroskopischen Methode geschätzten Wertes erheblich beeinflußt haben könnte. Eine genaue Messung der Geschwindigkeit, mit der Helium aus Radium entsteht, würde augenblicklich von dem größten Werte für die Bestimmung des Zusammenhanges zwischen der α -Partikel und dem Helium sein.

Wenn die α -Partikel ein Heliumatom ist, so wird der größere Teil der α -Partikeln, die eine in einer kleinen Röhre eingeschlossene Emanationsmenge abgibt, in die Glaswand hineingeschleudert werden. Die schnellsten Partikeln, nämlich die von Radium-C, würden wahrscheinlich in das Glas bis zu einer Tiefe von $1/20$ mm eindringen.

Es ist bereits darauf hingewiesen, daß es sich auf diese Weise vielleicht erklären läßt, warum das Volumen der Emanation bei dem ersten Versuche von Ramsay und Soddy fast auf Null sank. Das Helium wurde in diesem Falle von dem Glase zurückgehalten. Bei dem zweiten Versuche mag das Helium wieder aus dem Glase in das Gas zurückdiffundiert sein. Ramsay und Soddy versuchten, diese Frage zu entscheiden, indem sie untersuchten, ob Helium in Freiheit gesetzt wurde, wenn eine Glasröhre erhitzt wurde, in der die Emanation mehrere Tage eingeschlossen gewesen und dann entfernt worden war. Das Spektroskop zeigte für einen Augenblick einige der Heliumlinien, diese wurden jedoch bald durch die Linien von anderen Gasen verdeckt, die durch die Erhitzung der Röhre in Freiheit gesetzt waren.

Das Alter radioaktiver Mineralien.

Das Helium, das in radioaktiven Mineralien gefunden wird, rührt sicherlich von dem Radium und anderen in dem Mineral enthaltenen radioaktiven Substanzen her. Wenn erst die Geschwindigkeit experimentell bestimmt wäre, mit der Helium von den verschiedenen Radioelementen gebildet wird, dann sollte man auch die Zeit ermitteln können, die für die Bildung der aufgefundenen Heliummenge erforderlich war, oder mit anderen Worten das Alter des Minerals. Hierbei ist angenommen, daß einige der dichten und kompakten Mineralien imstande sind, eine große Menge des Heliums, das in ihnen eingeschlossen ist, unbegrenzt aufzuspeichern. In vielen Fällen sind die Mineralien nicht kompakt, sondern porös, aus diesen wird daher der größte Teil des Heliums entweichen. Selbst wenn wir annehmen, daß ein Teil des Heliums in den dichteren Mineralien verloren gegangen ist, so müßte sich doch mit einiger Sicherheit ein Minimalwert für das Alter des Minerals berechnen lassen. Aus diesen Gründen sind die Ableitungen notwendigerweise etwas unsicher;

sie lassen sich jedoch dazu verwenden, eine Größenordnung für das Alter der radioaktiven Mineralien anzugeben.

Daß alle von dem Radium ausgesandten α -Partikeln dieselbe Masse haben, ist schon bemerkt worden. Ferner besitzen auch, wie experimentell nachgewiesen ist, die α -Partikeln von Thorium-B und -C und Aktinium-B dieselbe Masse, wie die des Radiums. Hiernach ist zu vermuten, daß auch die α -Partikeln aller anderen radioaktiven Substanzen dieselbe Masse besitzen und so aus der gleichen Art der Materie bestehen. Wenn die α -Partikel ein Heliumatom ist, so läßt sich die Heliummenge leicht berechnen, die von einer gegebenen Gewichtsmenge eines radioaktiven Minerals im Jahre gebildet wird.

Die Zahlen der α -Strahlenprodukte des Radiums, Thoriums und Aktiniums sind jetzt gut bekannt. Einschließlich von Radium-F hat Radium fünf α -Strahlenprodukte, Thorium fünf und Aktinium vier. Bei dem Uranium kennt man die Zahl nicht so sicher, denn bisher ist nur Uranium-X von dem Uranium getrennt worden und dieses sendet nur β -Strahlen aus. Die α -Strahlen scheinen von dem Uranium selbst ausgesandt zu werden; zugleich sprechen einige Anzeichen indirekt dafür, daß Uranium drei α -Strahlenprodukte enthält. Für die Berechnung wollen wir jedoch annehmen, daß, wenn Uranium und Radium sich im Gleichgewicht befinden, das Uranium je eine α -Partikel für je fünf des Radiums aussendet.

In einem alten Uraniummineral, welches 1 g Uranium enthält und aus dem keines seiner Zerfallsprodukte hat entweichen können, befinden sich Uranium und Radium im Gleichgewicht, und sind $3,8 \times 10^{-7}$ g Radium enthalten. Es ist gezeigt worden, daß Radium mit seinen vier α -Strahlenprodukten im Jahre per Gramm wahrscheinlich 0,11 ccm Helium bildet. Von dem in dem Mineral enthaltenen Uranium und Radium wird also im Jahre $\frac{5}{4} \times 0,11 \times 3,8 \times 10^{-7} = 5,2 \times 10^{-8}$ ccm Helium per Gramm Uranium gebildet werden.

Als ein Beispiel für das Berechnungsverfahren wollen wir das Mineral Fergusonit behandeln. Der Fergusonit enthält ungefähr 7 Proz. Uranium und gibt, wie Ramsay und Travers gefunden haben, 1,81 ccm Helium per Gramm ab. In dem Mineral kommen also auf 1 g Uranium 26 ccm Helium.

Da in einem Jahre von 1 g Uranium und seinen Radiumprodukten $5,2 \times 10^{-8}$ ccm Helium gebildet werden, so muß das

Alter des Minerals mindestens $26/5,2 \times 10^{-8}$ oder 500 Millionen Jahre betragen. Dieser Betrag stellt einen Minimalwert dar, denn ein Teil des Heliums wird wahrscheinlich im Laufe der Zeit entwichen sein.

Wir haben bei dieser Berechnung angenommen, daß in dem Mineral die Menge von Uranium und Radium sich mit der Zeit nicht merklich ändert. Dieses ist angenähert der Fall, denn Uranium gebraucht wahrscheinlich ungefähr 1000 Mill. Jahre, um zur Hälfte zu zerfallen.

Als ein anderes Beispiel möge ein Uraniummineral aus Glastonbury, Connecticut, dienen, dessen Analyse von Hillebrande ausgeführt ist. Dieses Mineral ist sehr kompakt und besitzt das hohe spezifische Gewicht von 9,62. Es enthält 76 Proz. Uranium und nach Hillebrande 2,41 Proz. Stickstoff. Es kann mit Sicherheit angenommen werden, daß das entwickelte Gas aus Helium bestand; um auf Helium umzurechnen, hat man durch sieben zu dividieren und erhält so für den Prozentsatz des Heliums 0,344. Danach kommen 19 ccm Helium auf 1 g des Minerals oder 25 ccm auf 1 g Uranium. Das Alter des Minerals kann also nicht geringer sein, als 500 Mill. Jahre. Einige Uranium- und Thoriumminerale enthalten nicht viel Helium. Einige sind, wie bereits bemerkt wurde, porös, so daß das Helium leicht aus ihnen entweichen kann. In den kompakten, primären, radioaktiven Mineralien, die auch nach geologischen Daten zweifellos ein hohes Alter besitzen, findet sich jedoch fast stets eine beträchtliche Menge Helium.

Hillebrande hat sehr umfassende Analysen vieler Mineralien ausgeführt, die aus Norwegen, Nordkarolina und Connecticut stammten und größtenteils aus kompakten, primären Mineralien bestanden; er bemerkte, daß zwischen ihrem Gehalt an Uranium und Stickstoff (Helium) eine auffallende Beziehung herrscht, auf die er mit folgenden Worten aufmerksam macht:

„Die auffallendste Erscheinung, die bei der Analyse aller Mineralien, die Stickstoff (Helium) enthalten, zu bemerken ist, ist der Zusammenhang, der offenbar zwischen dem Stickstoff und dem UO_2 besteht. Dieser tritt besonders in der Tabelle der norwegischen Uraninite hervor, aus der beinahe die Regel abgeleitet werden kann, daß, wenn der Gehalt an Stickstoff bekannt ist, die Menge von UO_2 durch einfache Rechnung gefunden

werden kann und umgekehrt. Bei den Proben aus Connecticut findet sich nicht das gleiche Verhältnis; doch wenn man die Bestimmung des Stickstoffes in dem Mineral aus Branchville in Betracht zieht, so gilt die Regel noch in der Form, daß, je höher der Gehalt an UO_2 ist, um so größer auch die Menge des vorhandenen Stickstoffes ist. Die Mineralien aus Colorado und Nordkarolina sind Ausnahmen; es ist aber daran zu erinnern, daß das erstere amorph ist wie die böhmische Pechblende und kein Thorium enthält, dessen Stelle jedoch Zirkon einnehmen könnte; das Mineral aus Nordkarolina hat sich mit der Zeit so verändert, daß wir über seine ursprüngliche Beschaffenheit nichts wissen.“

In den sekundären, radioaktiven Mineralien, die aus einer Zersetzung der primären Mineralien entstanden sind, findet sich sehr wenig Helium. Diese Mineralien stammen, wie Boltwood ausgeführt hat, zweifellos aus einer viel späteren Formationsperiode als die primären Mineralien, es ist daher nicht zu erwarten, daß sie die gleiche Menge Helium enthalten wie die primären Mineralien. Eine der interessantesten Ablagerungen eines sekundären Uraninits findet sich in Joachimstal in Böhmen, aus dem der größte Teil unseres Radiums gewonnen ist. Dieses Mineral enthält viel Uranium, aber sehr wenig Helium.

Wenn die Daten, die diesen Rechnungen zugrunde zu legen sind, besser bekannt sein werden, so wird das Vorkommen des Heliums in radioaktiven Mineralien in besonderen Fällen ein sehr wertvolles Hilfsmittel zur Berechnung ihres Alters an die Hand geben, und indirekt das Alter der geologischen Schicht zu bestimmen erlauben, in der die Mineralien gefunden werden. Es ist in der Tat wahrscheinlich, daß dieses eine der zuverlässigsten Methoden für die Altersbestimmung geologischer Formationen sein wird.

Das Vorkommen des Bleies in radioaktiven Mineralien.

Wenn die α -Partikel ein Heliumatom ist, so muß sich das Atomgewicht eines α -Strahlenproduktes von dem des folgenden um vier Einheiten unterscheiden. Wenn das Uranium drei α -Strahlenprodukte enthält, so müßte das Endprodukt der Umwandlung des Uraniums $238,5 - 12 = 226,5$ betragen, da das

Atomgewicht des Uraniums 238,5 beträgt. Jener Wert kommt dem Atomgewicht 225 des Radiums sehr nahe, welches, wie wir gesehen haben, aus Uranium entsteht. Radium selbst besitzt im ganzen fünf α -Strahlenprodukte und das Atomgewicht des Endproduktes der Radiumumwandlung sollte daher $238,5 - 32 = 206,5$ betragen. Dieser Wert ist nahezu gleich dem Atomgewicht des Bleies 206,9. Diese Rechnung weckt die Vermutung, daß Blei das Endprodukt der Umwandlung des Radiums ist, und diese Annahme stimmt mit der Tatsache überein, daß in allen radioaktiven Mineralien Blei gefunden wird, besonders in denjenigen primären Mineralien, die reich an Uranium sind.

Auf die Bedeutung, die das Vorkommen des Bleies in radioaktiven Mineralien möglicherweise haben könnte, wurde zuerst von Boltwood¹⁾ aufmerksam gemacht, der eine große Menge von Daten zur Klärung dieser Frage gesammelt hat.

Die folgende Tabelle enthält die Resultate, die Hillebrande bei der Analyse verschiedener primärer Mineralien erhalten hat.

Vorkommen	Gehalt an Uranium	Gehalt an Blei	Gehalt an Stickstoff
Glastonbury, Connecticut . .	70—72	3,07—3,26	2,41
Branchville, Connecticut . .	74—75	4,35	2,63
Nordkarolina	77	4,20—4,53	—
Norwegen	56—66	7,62—13,87	1,03—1,28
Kanada	65	10,49	0,86

Von den Mineralien aus Glastonbury wurden fünf Proben untersucht, aus Branchville drei, aus Nordkarolina zwei, aus Norwegen sieben und aus Kanada eine. Bei Mineralien, die aus dem gleichen Fundorte stammen, findet sich eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung ihres Bleigehaltes. Wenn sowohl Helium wie Blei Zerfallsprodukte der Uranium-Radium-Mineralien sind, so sollte das Verhältnis zwischen dem Blei- und dem Heliumgehalt konstant sein. Der Prozentgehalt von Helium kann aus der

¹⁾ Boltwood, Phil. Mag., April 1905; Amer. Journ. Science, Okt. 1905; Febr. 1907.

obigen Tabelle erhalten werden, wenn man den Gehalt an Stickstoff durch sieben dividiert. Da wahrscheinlich bei dem Zerfall des Uraniums und Radiums acht α -Partikeln für die Bildung je eines Atomes Blei ausgesandt werden, so sollte das Gewicht der gebildeten Heliummenge $\frac{8 \times 4}{206,9} = 0,155$ von dem Gewichte des Bleies betragen. Hierbei ist angenommen, daß alles Helium in den Mineralien eingeschlossen bleibt. Das wirklich gefundene Verhältnis beträgt ungefähr 0,11 für die Glastonbury Mineralien, 0,09 für die Branchville Mineralien und ungefähr 0,016 für die Mineralien aus Norwegen. In allen Fällen ist also das Verhältnis von Helium zu Blei kleiner als der theoretische Wert; hieraus kann geschlossen werden, daß in einigen Fällen ein großer Teil des Heliums aus den Mineralien entwichen ist. Bei den Mineralien aus Glastonbury besteht zwischen Versuch und Theorie gute Übereinstimmung.

Wenn die Bildung des Bleies aus Radium sichergestellt ist, so sollte sich das Alter eines Minerals genauer aus seinem Bleigehalt bestimmen lassen als aus seinem Heliumgehalt, denn das Blei, das in einem kompakten Mineral gebildet wird, hat keine Möglichkeit, zu entweichen.

Während die eben angestellten Überlegungen notwendigerweise bei dem jetzigen Stande unseres Wissens auf etwas unsicherem Boden ruhen, so besitzen sie doch einen gewissen Wert, weil sie die Methoden angeben, nach denen die Frage nach den Endprodukten der Umwandlung radioaktiver Mineralien anzugreifen ist. Boltwood hat auf Grund der Analysen radioaktiver Mineralien die Vermutung ausgesprochen, daß Argon, Wasserstoff, Wismut und einige der seltenen Erden möglicherweise von radioaktiven Substanzen abstammen.

Wir werden wahrscheinlich erst in vielen Jahren imstande sein, zu beweisen, ob Blei das Endprodukt der Umwandlungen des Radiums ist oder nicht. In erster Linie ist es schwierig, genug Radium für Versuchszwecke zu erhalten, und zweitens muß wegen des langsam sich umwandelnden Zwischenproduktes, Radium-D, ein langer Zeitraum verstreichen, ehe Blei in merkbarer Menge im Radium auftreten kann. Zur Entscheidung der Frage würden Radium-F (Radiotellurium) oder Radium-D (Radioblei) bessere Dienste leisten als Radium.

Die Konstitution der Radioelemente.

Wenn man annimmt, daß die α -Partikel ein Heliumatom ist, so kommt man zu der Auffassung, daß die Atome von Uranium und Radium sich teilweise aus Heliumatomen aufbauen. Wäre Blei das Endprodukt des Radiums, so könnte das Radiumatom durch die Formel $Ra = Pb + He_5$ und das Uraniumatom durch $Ur = Pb + He_3$ ausgedrückt werden. Es darf jedoch nicht vergessen werden, daß diese Heliumverbindungen von gewöhnlichen Verbindungen völlig verschieden wären. Sowohl Radium wie Uranium sind Elementarsubstanzen, die durch unsere physikalischen und chemischen Hilfsmittel nicht zerlegt werden können. Sie zerfallen spontan mit einer Geschwindigkeit, die wir bisher nicht beeinflussen können, und bei dem Zerfall wird ein Heliumatom mit außerordentlicher Geschwindigkeit fortgeschleudert. Die Energie, die in der kinetischen Energie des Heliumatoms in Freiheit gesetzt wird, ist von einer viel höheren Größenordnung als die molekularer Reaktionen, da sie mindestens eine Million mal größer ist, als die Energie, welche bei den heftigsten chemischen Reaktionen frei wird. Wahrscheinlich befinden sich die Heliumatome innerhalb der Atome von Uranium und Radium in sehr schneller Bewegung und verlassen aus irgend einem Grunde das Atom mit der Geschwindigkeit, die sie in ihrer Bahn im Innern des Atoms besaßen. Die Kräfte, die das Heliumatom in dem Atom der Radioelemente festhalten, sind so groß, daß unsere Hilfsmittel nicht ausreichen, um eine Abtrennung des Heliumatoms zu bewirken.

Die α -Partikeln des Thoriums und Aktiniums sind wahrscheinlich gleichfalls Heliumatome, so daß auch diese Elemente als Verbindungen noch unbekannter Elemente mit Helium aufzufassen sind. Fünf α -Strahlenprodukte des Thoriums sind bekannt, das Atomgewicht des Endproduktes würde also $232,5 - 5 \cdot 4 = 212,5$ betragen. Von den Atomgewichten der bekannten Elemente kommt das des Wismuts, 208, diesem Werte am nächsten, und wenn Thorium statt fünf sechs α -Partikeln verlieren sollte, so würde das Atomgewicht des Restatoms dem des Wismuts sehr nahe kommen. Wismut erfüllt auch die Bedingungen, die ein Umwandlungsprodukt des Thoriums erfüllen muß, denn es kommt in radioaktiven Mineralien vor, und der Wismutgehalt alter Uran-

mineralien, die wenig Thorium enthalten, ist klein gegenüber dem Bleigehalte.

Helium spielt, wie wir sehen, eine sehr wichtige Rolle in dem Bau der Radioelemente, vielleicht wird es sich zeigen, daß sowohl Helium wie Wasserstoff zu den elementaren Einheiten gehören, aus denen die schwereren Atome sich aufbauen. Es mag vielleicht auch mehr als ein Zufall sein, daß die Differenzen der Atomgewichte mancher Elemente vier Einheiten oder ein mehrfaches von vier Einheiten betragen.

Von den primären, radioaktiven Mineralien sind zweifellos manche vor 100 bis 1000 Mill. Jahren auf der Oberfläche der Erde abgelagert worden und haben seit jener Zeit eine langsame Umwandlung erfahren. Wir haben bisher kein Anzeichen dafür, daß dieser Zerfall der Materie unter gewöhnlichen Umständen an der Oberfläche der Erde reversibel ist. Es ist jedoch denkbar, daß unter gewissen Bedingungen, die vielleicht in frühen Perioden der Erdgeschichte geherrscht haben, der umgekehrte Prozeß stattgefunden hat, daß nämlich die schweren Atome aus den leichteren und elementareren Substanzen aufgebaut worden sind.

Es mag sein, daß die Bedingungen für die Bildung schwerer Atome bei den hohen Drucken und Temperaturen, die im Innern der Erde herrschen, vorhanden sind. Dr. Barrel von der Yale-Universität hat mir gegenüber die Vermutung ausgesprochen, daß möglicherweise der stufenförmige Aufbau der schwereren und komplexeren Atome langsam im Innern der Erde stattfindet, und daß man hierin vielleicht eine Erklärung für die zweifellos große Dichte des Erdinnern und für das allmähliche Zusammenschrumpfen des Erdkörpers finden könnte.

Solche Vermutungen sind augenblicklich zwar in hohem Maße spekulativ, es ist jedoch nicht undenkbar, daß die Bildung radioaktiver Materie noch tief in der Erde vor sich geht, und daß die radioaktiven Ablagerungen, die sich jetzt an der Oberfläche befinden, in vergangenen Zeiten aus dem tiefen Innern emporgedrängt sind.