

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Radioaktive Umwandlungen

Rutherford, Ernest

Braunschweig, 1907

Neuntes Kapitel. Die Radioaktivität der Erde und der Atmosphäre

Neuntes Kapitel.

Die Radioaktivität der Erde und der Atmosphäre.

In diesem Kapitel wird in kurzen Umrissen der gegenwärtige Stand unseres Wissens von dem radioaktiven Zustande der Erde und der Atmosphäre und der Zusammenhang besprochen werden, in dem möglicherweise die bisher beobachteten Tatsachen zu dem elektrischen Zustande der Atmosphäre und der Wärme des Erdinnern stehen.

Die Radioaktivität der Atmosphäre.

Unsere Kenntnisse von dem radioaktiven und elektrischen Zustande der Atmosphäre haben sich während der letzten Jahre sehr schnell vermehrt, und obwohl an der Erforschung dieses Gebietes erst wenige Jahre gearbeitet ist, so haben wir doch manche neue und wichtige Einsicht gewonnen.

Fast ein Jahrhundert ist verstrichen, seitdem Coulomb und andere Forscher darauf aufmerksam machten, daß ein geladener Leiter, der sich im Innern eines verschlossenen Gefäßes befindet, seine Ladung schneller verliert, als aus dem Elektrizitätsverlust längs der Isolation zu erklären ist. Coulomb dachte, daß der Ladungsverlust daher rühre, daß die Luftmoleküle beim Anstoß an den geladenen Körper eine Ladung erhielten und dann von ihm abgestoßen würden. Schon im Jahre 1850 beobachtete Matteucci, daß die Entladungsgeschwindigkeit von dem Potential des geladenen Körpers unabhängig ist. Bei Versuchen mit Isolatoren aus Quarzstäben von verschiedener Länge und verschiedenem Querschnitt kam Boys im Jahre 1889 zu dem Schluß, daß der Ladungsverlust nicht durch mangelhafte Isolation zu erklären sei.

Kurze Zeit, nachdem wir mit der Ionisation von Gasen durch X-Strahlen und Uraniumstrahlen bekannt geworden waren, wurde

die Frage des Ladungsverlustes geladener Leiter von Geitel¹⁾ und C. T. R. Wilson²⁾ unabhängig untersucht; beide verwandten Elektroskope besonderer Konstruktion, um die Entladungsgeschwindigkeit zu messen, die ein geladener Körper innerhalb eines geschlossenen Gefäßes erfährt. Übereinstimmend kamen sie zu dem Schluß, daß der allmähliche Ladungsverlust wesentlich von der Ionisation der Luft innerhalb des Gefäßes herrührt. Oberhalb einer gewissen Spannung war die Entladungsgeschwindigkeit unabhängig von dem elektrischen Felde; dieses Resultat war zu erwarten, wenn die Ionisation sehr gering war. Anfangs wurde angenommen, daß die Ionisation des Gases spontan und eine Eigenschaft des Gases selbst sei, spätere Untersuchungen haben jedoch diesen Schluß modifiziert. Es steht jetzt fest, daß ein großer Teil der Ionisation, die in einem reinen geschlossenen Metallgefäße zu beobachten ist, daher rührt, daß die Gefäßwände ionisierende Strahlen aussenden. Ein anderer Teil wird durch eine sehr durchdringende γ -Strahlenart hervorgerufen, die sich überall auf der Oberfläche der Erde findet. Die Größe der Ionisation innerhalb eines Gefäßes hängt von der Natur und dem Druck des Gases und von dem Material des Gefäßes ab. In den meisten Fällen nimmt die Ionisation nahezu proportional dem Druck ab und ist der Dichte des Gases angenähert proportional, wie zu erwarten ist, wenn die Ionisation von Strahlungen der Wände oder von einer durchdringenden Strahlenart herrührt, die von außen in das Gefäß eintritt.

Es ist zu bemerken, daß die natürliche Ionisation, die in geschlossenen Gefäßen beobachtet wird, außerordentlich klein ist, und daß für die Ausführung von Messungen besondere Vorsichtsmaßregeln erforderlich sind. Unter der Voraussetzung, daß die Ionisation in einem kleinen versilberten Glasgefäße gleichmäßig stark war, fand C. T. R. Wilson, daß nicht mehr als 30 Ionen per Kubikzentimeter in der Sekunde gebildet wurden. In einem Gefäße von einem Liter Inhalt würden also 30000 Ionen in der Sekunde gebildet werden, oder weniger als ein Drittel der Zahl, die eine einzelne α -Partikel des Radiums auf ihrem Wege erzeugt.

¹⁾ Geitel, Physik. Zeitschr. 2, 116 (1900).

²⁾ Wilson, Proc. Camb. Phil. Soc. 11, 32 (1900); Proc. Roy. Soc. 68, 151 (1901).

Wenn also in der Sekunde eine einzige α -Partikel von den Wänden des Gefäßes ausgesandt würde, so würde sich hierdurch die gesamte Ionisation erklären lassen.

Nachdem die Zerstreuung der Elektrizität in geschlossenen Gefäßen untersucht war, wandten Elster und Geitel ihre Aufmerksamkeit der freien Luft zu. Sie fanden, daß ein geladener Körper seine Ladung schneller verlor, wenn er sich in freier Luft, als wenn er sich in einem geschlossenen Gefäße befand. Sowohl positive wie negative Ladungen werden zerstreut, aber in der Regel mit verschiedenen Geschwindigkeiten; ein positiv geladener Körper verliert seine Ladung etwas langsamer als ein negativ geladener. Die Ionisation der freien Luft wurde mit einem transportierbaren Elektroskop gemessen. Ein isoliertes Drahtnetz wurde mit dem geladenen Elektroskop verbunden, und die Entladungsgeschwindigkeit wurde als ein relatives Maß für die Zahl der in der Luft vorhandenen Ionen angesehen.

Bei der Untersuchung der Ionisation in geschlossenen Gefäßen bemerkten Elster und Geitel, daß die Entladungsgeschwindigkeit nach der Einführung frischer Luft mehrere Stunden lang zunahm. Es war bekannt, daß eine derartige Zunahme eintritt, wenn die Emanation des Radiums oder Thoriums mit der Luft gemischt ist. Dieses veranlaßte Elster und Geitel zu dem kühnen Versuche, eine radioaktive Substanz aus der Atmosphäre zu gewinnen. Der Verfasser hatte gezeigt, daß ein negativ geladener Draht, der der Thoriumemanation exponiert war, stark aktiv wurde. Hierdurch wurden sie auf die Methode geführt, nach der sie die Frage angriffen¹⁾. Ein langer Draht wurde an isolierten Stützen außerhalb des Laboratoriums aufgehängt und mit Hilfe einer Elektrysiermaschine auf ein hohes Potential geladen. Nach einigen Stunden wurde der Draht abgenommen und um die Spitze eines Elektroskops gewunden. Es war eine deutliche Zunahme der Entladungsgeschwindigkeit zu beobachten, woraus hervorging, daß der Draht die Eigenschaft gewonnen hatte, die Luft zu ionisieren. Der Effekt verschwand nach einiger Zeit und war schon nach einigen Stunden sehr klein.

Weitere Versuche brachten die Bestätigung, daß der Draht durch die Exposition zeitweise aktiv geworden war. Die Größe

¹⁾ Elster und Geitel, Physik. Zeitschr. 3, 76 (1901).

der Aktivität hing nicht von dem Material des Drahtes ab; die Aktivität verhielt sich in dieser Beziehung ganz ähnlich wie die induzierte Aktivität, welche Gegenstände in der Nachbarschaft von Thorium- oder Radiumpräparaten annehmen.

Die aktive Substanz konnte von dem Draht entfernt werden, wenn er mit einem in Ammoniak getauchten Leder abgerieben wurde. Auf diese Weise wurde eine aktive Substanz erhalten, die imstande war, auf eine photographische Platte durch eine Aluminiumschicht von 0,1 mm Dicke hindurch einzuwirken und auf einem Schirm von Platincyanoür eine schwache Phosphoreszenz hervorzurufen.

Rutherford und Allan¹⁾ wiesen nach, daß eine ähnliche Aktivität in Montreal erhalten werden konnte. Die Strahlung bestand aus α - und β -Strahlen, von denen die ersteren den größten Teil der Ionisation hervorriefen, die zu beobachten war, wenn der Draht unbedeckt war. Die Aktivität, die ein Draht durch Exposition in freier Luft gewonnen hatte, fiel ungefähr mit derselben Geschwindigkeit ab, wie die eines Drahtes, der dadurch aktiv gemacht wurde, daß er der Radiumemanation exponiert worden war.

Bumstead und Wheeler²⁾ untersuchten das radioaktive Verhalten der Luft in New-Haven; sie verglichen die Abfallsgeschwindigkeit des in der Luft aktiv gemachten Drahtes mit der eines Drahtes, der durch Radiumemanation aktiviert worden war, und wiesen einwandfrei nach, daß die Aktivität, die in der Luft in New-Haven enthalten ist, hauptsächlich von Radiumemanation herrührt. Ein Draht, der im Freien aktiv gemacht war, zeigte den anfänglichen schnellen Abfall, der von Radium-A herrührt, und die Abfallskurve war in ihrem weiteren Verlaufe identisch mit der Zerfallskurve des aktiven Niederschlages des Radiums. Aus dem Grundwasser und dem Tageswasser von New-Haven wurde eine Emanation erhalten, die mit derselben Geschwindigkeit zerfiel wie die Radiumemanation.

An Drähten, die mehrere Tage lang im Freien exponiert worden waren, beobachtete Bumstead³⁾ ferner, daß, nachdem

¹⁾ Rutherford und Allan, Phil. Mag., Dez. 1902.

²⁾ Bumstead und Wheeler, Amer. Journ. Sci.; Feb. 1904.

³⁾ Bumstead, Amer. Journ. Sci., Juli 1904.

die Aktivität verschwunden war, die von der Radiumemanation stammte, ein Teil zurückblieb, der viel langsamer abfiel. Diese Restaktivität fiel mit der gleichen Geschwindigkeit wie die induzierte Aktivität des Thoriums ab, woraus hervorgeht, daß sowohl Thorium- wie Radiumemanation in der Luft vorhanden war. Dadourian¹⁾ fand, daß in dem Boden von New-Haven Thoriumemanation enthalten ist. In den Erdboden wurde ein Loch gegraben und dieses nach Einführung eines negativ geladenen Drahtes oben geschlossen. Nach der Herausnahme besaß der Draht eine Aktivität, die mit der für die induzierte Aktivität des Thoriums charakteristischen Geschwindigkeit abfiel.

Nach diesen Versuchen enthält der Erdboden in New-Haven beträchtliche Mengen von Thorium und Radium. Da die Thoriumemanation eine sehr kurze Lebensdauer besitzt, so kann sie nur aus einer geringen Bodentiefe in die Atmosphäre diffundieren, während die langlebigere Radiumemanation aus einer viel größeren Tiefe aufsteigen kann.

Inzwischen hatte C. T. R. Wilson²⁾ gefunden, daß der Regen radioaktiv ist. Bei einem Regenschauer wurde Regenwasser gesammelt und schnell in einer Platinschale eingedampft. Die Schale war aktiv geworden und verlor ihre Aktivität in ungefähr 30 Minuten zur Hälfte.

Wilson beobachtete in England, S. J. Allan und McLennan in Kanada, daß frisch gefallener Schnee die gleiche Eigenschaft besitzt. Die Aktivität des Schnees fällt wie die des Regens in 30 Minuten auf den halben Wert. Diese Abfallsgeschwindigkeit ist angenähert gleich der, welche die induzierte Aktivität des Radiums einige Stunden nach Beendigung der Exposition besitzt. Es ist also anzunehmen, daß die Träger von Radium-B und Radium-C wahrscheinlich durch Diffusion zu den Schneeflocken oder Wassertropfen gelangen und sich an sie anheften. Beim Eindampfen bleibt die aktive Substanz zurück. Ein heftiger Regen oder Schneefall muß also zeitweise einen Teil von dem in der Luft vorhandenen Radium-B und Radium-C entfernen.

Elster und Geitel fanden die Luft in abgeschlossenen Räumen, wie Kellern und Höhlen, abnorm stark radioaktiv. Um

¹⁾ Dadourian, Amer. Journ. Sci., Jan. 1905.

²⁾ Wilson, Proc. Camb. Phil. Soc. **11**, 428 (1902); **12**, 17 (1903).

nachzuweisen, daß diese Wirkung nicht nur von dem Stagnieren der Luft herrührte, schlossen Elster und Geitel einen mit Luft gefüllten alten Dampfkessel ab, konnten aber keine Zunahme der Aktivität beobachten. Aus anderen Versuchen ging hervor, daß die größere Aktivität, welche die Luft in geschlossenen Räumen besitzt, die mit dem Erdboden in Berührung stehen, von Radiumemanation herrührt, die durch den Erdboden diffundiert. Um diese Frage zu klären, gruben Elster und Geitel¹⁾ ein Rohr mehrere Fuß tief in den Boden ein, und sogen mit Hilfe einer Pumpe die in den Kapillaren des Bodens enthaltene Luft an. Die Luft war stark aktiv, ihre Aktivität nahm ungefähr in derselben Weise ab wie die von Luft, die mit Radiumemanation gemischt ist.

Ähnliche Beobachtungen machten Ebert und Ewers²⁾ in München. Es geht aus diesen Versuchen hervor, daß kleine Radiummengen überall in der Erdoberfläche verteilt sind. J. J. Thomson, Adams und andere Forscher untersuchten das Wasser tiefer Brunnen und Quellen in England und fanden, daß in einigen Fällen das Wasser beträchtliche Mengen von Radiumemanation und zuweilen auch eine Spur von Radium selbst enthielt. In den letzten Jahren sind viele Untersuchungen des Wassers und der Ablagerungen von Mineralquellen ausgeführt. H. S. Allan und Lord Blythswood beobachteten, daß die heißen Quellen von Bath und Buxton erhebliche Mengen einer radioaktiven Emanation enthielten, und Strutt fand, daß die Radiumemanation nicht nur in dem Wasser vorhanden war, sondern daß auch der Schlamm der Quellen Spuren von Radium enthielt. Es ist von Interesse, daß in den Gasen, die von diesen Quellen abgegeben werden, Helium aufgefunden ist; es könnte möglich sein, daß das Quellwasser beim Durchsickern durch die Erde eine Lage von radioaktiven Mineralien passiert hat.

Himstedt fand Radiumemanation in den Thermalquellen von Baden-Baden, während Elster und Geitel geringe Spuren von Radium auch in dem Schlamm der Badener Quellen nachwiesen. Viele Quellen sind in England, Deutschland, Frankreich, Italien und den Vereinigten Staaten untersucht worden,

¹⁾ Elster und Geitel, Physik. Zeitschr. 3, 574 (1902).

²⁾ Ebert und Ewers, Physik. Zeitschr. 4, 162 (1902).

fast überall hat sich in dem Wasser Radiumemanation und oft in leicht meßbarem Betrage gefunden. Elster und Geitel fanden den Schlamm oder „Fango“, der sich aus den heißen Quellen in Battaglia in Italien ablagert, außerordentlich stark aktiv, und eine eingehende Untersuchung zeigte, daß die Aktivität von Radium herrührt. Es wurde berechnet, daß der Radiumgehalt des Fangos ungefähr $\frac{1}{1000}$ von dem der Joachimstaler Pechblende beträgt.

Während die Aktivität heißer Quellen meistens von der Gegenwart von Radium oder seiner Emanation herrührt, hat Blanc ¹⁾ eine bemerkenswerte Ausnahme beobachtet. Blanc fand Ablagerungen der Quellen von Salins-Moutiers ungewöhnlich stark aktiv und beobachtete, daß sie beträchtliche Mengen von Thoriumemanation abgaben. Das Vorhandensein von Thorium ließ sich jedoch nicht analytisch nachweisen, obwohl nach der Menge der abgegebenen Thoriumemanation zu urteilen eine große Menge von Thorium hätte zugegen sein müssen. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß die beobachtete Aktivität nicht von Thorium selbst herrührt, sondern von dem Radiothorium, das von Hahn entdeckt worden ist (vgl. S. 70). Dieses bildet Thorium-X und die Thoriumemanation, würde aber nur in so kleiner Menge vorhanden sein, daß es nicht chemisch nachgewiesen werden könnte.

Elster und Geitel beobachteten, daß natürliche Kohlensäure, die aus großen Tiefen alten vulkanischen Bodens erhalten worden war, Radiumemanation enthielt, während McLennan und Burton erhebliche Mengen von Radiumemanation in dem Petroleum einer tiefen Ölquelle der Provinz Ontario in Kanada fanden.

In den meisten Fällen kommt Quellwasser aus großen Tiefen, und radioaktive Substanzen finden sich besonders in heißem Quellwasser in viel größerer Menge vor, als in dem Erdboden selbst. Wasser, und besonders heißes Wasser, wird in den Schichten, die es passiert, radioaktive Substanzen auflösen und auch die Emanation aufnehmen. In besonderen Fällen mag es vorkommen, daß das Wasser eine Schicht radioaktiven Minerals passiert hat und dann eine sehr große Aktivität besitzt.

¹⁾ Blanc, Phil. Mag., Jan. 1905.

Elster und Geitel haben viele Bodenproben auf ihre Radioaktivität untersucht und haben fast in allen Fällen Spuren radioaktiver Substanzen gefunden. Die Aktivität ist am größten in Tonböden und rührt offenbar in vielen Fällen von der Gegenwart von Radium her. Die Untersuchungen zeigen im allgemeinen, daß radioaktive Materie in außerordentlich weitgehender Verteilung vorkommt; es ist schwer, eine Substanz zu finden, die nicht eine Spur von Radium enthält. Es ist nicht wahrscheinlich, daß Uranium und Radium sich in dieser Beziehung von den inaktiven Elementen unterscheiden.

Das Vorhandensein von Radium kann durch die elektrische Untersuchung noch nachgewiesen werden, wenn durch chemische Analyse das Vorhandensein seltener inaktiver Elemente nicht mehr entdeckt werden könnte, selbst wenn diese in noch beträchtlich größerer Menge vorhanden wären als das Radium. Aus allgemeinen Gründen ist es nicht überraschend, daß radioaktive Substanzen so weitgehend in der Erde verteilt sind, denn der Erdboden sollte überall eine Beimischung von fast allen Elementen enthalten, die auf der Erde vorkommen, und die selteneren Elemente sollten nur in geringerer Menge vorhanden sein.

Zweifellos bestehen die aktiven Stoffe, die in der Atmosphäre enthalten sind, wesentlich aus der Radiumemanation und ihren Produkten und an einigen Orten wahrscheinlich aus Spuren der Thorium- und Aktiniumemanation. Die Nachlieferung der radioaktiven Substanzen an die Atmosphäre geschieht hauptsächlich dadurch, daß die Emanationen aus dem Erdboden in die Luft diffundieren, während ein anderer Teil aus Quellen und Gasen stammt, die im Boden eingeschlossen gewesen waren.

Wegen der verhältnismäßig geringen Umwandlungsgeschwindigkeit der Radiumemanation wird diese in der Atmosphäre in größerer Menge vorhanden sein als die anderen Emanationen, denn die Emanationen des Thoriums und Aktiniums können wegen ihrer kurzen Lebensdauer nur aus einer geringen Bodentiefe an die Oberfläche gelangen. Wahrscheinlich ändert sich die Emanationsmenge, die von dem Boden an die Atmosphäre abgegeben wird, von Ort zu Ort; durch den Einfluß des Windes und durch Luftströmungen wird jedoch im allgemeinen eine gleichmäßige Verteilung der Emanation zustande kommen.

Die Menge der induzierten Aktivität, die unter bestimmten Bedingungen aus der Atmosphäre erhalten werden kann, ist, wie oft beobachtet wurde, sehr wechselnd und ändert sich oft im Verlauf eines einzigen Tages erheblich. Elster und Geitel haben den Einfluß wechselnder meteorologischer Verhältnisse auf die Menge der in der Atmosphäre enthaltenen aktiven Stoffe eingehend untersucht. Die Versuche wurden in Wolfenbüttel ausgeführt und umfaßten einen Zeitraum von 12 Monaten. Im Durchschnitt nahm die Menge der aktiven Stoffe bei einer Abnahme der Temperatur zu. Unterhalb 0° war der Durchschnitt 1,44mal größer als über 0° . Eine Abnahme des Luftdruckes erhöht die Größe der induzierten Aktivität. Die Abhängigkeit von dem Luftdruck ist leicht verständlich, da eine Erniedrigung des Druckes ein beschleunigtes Aufsteigen der Emanation aus den Poren der Erdoberfläche bewirken muß.

Wenn der Emanationsgehalt der Atmosphäre ausschließlich aus der Erde stammt, so sollte er auf hoher See viel kleiner sein wie am Lande, denn das Wasser wird verhindern, daß die Emanation von dem Meeresboden in die Atmosphäre gelangt. Die bisher gemachten Beobachtungen deuten auch an, daß der Emanationsgehalt der Luft in der Nähe der Küste geringer ist. Zum Beispiel haben Elster und Geitel gefunden, daß der Emanationsgehalt der Luft an der Ostseeküste nur ein Drittel so groß war wie im Binnenlande; eine systematische Untersuchung und Bestimmung der Emanationsmengen, die in der Atmosphäre in großen Entfernungen vom Lande enthalten sind, ist jedoch bisher noch nicht ausgeführt*).

Der Emanationsgehalt der Atmosphäre.

Die meisten Bestimmungen des Emanationsgehaltes der Atmosphäre tragen einen qualitativen Charakter, es ist aber offenbar wichtig, eine Vorstellung von der Menge der in der Luft enthaltenen Radiumemanation zu gewinnen. Da der Emanations-

*) Nach einigen Versuchen von Eve (Phil. Mag., Febr. 1907) ist die Luft über dem Atlantischen Ozean ungefähr ebenso stark ionisiert wie über dem Festlande, während der Radiumgehalt des Seewassers nur etwa $\frac{1}{1000}$ des Wertes beträgt, den Strutt für eine Anzahl von Felsproben gefunden hat.

gehalt in der Atmosphäre durch eine gleichmäßige Nachlieferung der Emanation aus dem Erdboden konstant erhalten wird, so ist es zweckmäßig, seinen Betrag auf die Menge von Radiumbromid zu beziehen, die eine gleiche Menge von Emanation abgibt.

Einige interessante Versuche sind in dieser Richtung kürzlich von A. S. Eve¹⁾ in Montreal ausgeführt. Das radioaktive Verhalten der Atmosphäre scheint in Montreal normal zu sein, die Zahl der Ionen, die in 1 ccm Luft enthalten sind, ist ungefähr ebenso groß wie die, welche an verschiedenen Orten in Europa gefunden ist.

Zunächst wurden einige Versuche in einem großen Eisenkessel in dem Engineering-Building der Mc Gill-Universität ausgeführt. Dieser Kessel war 8,08 m hoch und besaß eine quadratische Grundfläche von 1,52 m Seitenlänge, so daß sein Inhalt 18,7 cbm betrug. Um die Größe der induzierten Aktivität zu bestimmen, die in diesem Kessel erhalten werden konnte, wurde ein langer Draht isoliert längs der Achse des Kessels aufgehängt und drei Stunden lang auf einem Potential von — 10 000 Volt erhalten. Der Draht wurde dann schnell herausgenommen und auf einen Rahmen gewunden, der mit einem Elektroskop verbunden war. Die Abfallsgeschwindigkeit des Goldblattes diente als ein Maß für die Menge des aktiven Stoffes, der sich auf dem Draht angesammelt hatte.

Ein ähnlicher Versuch wurde dann in einem kleinen Zinkzylinder von 76 Liter Inhalt ausgeführt. Die Emanation von 2×10^{-4} mg Radiumbromid wurde, mit Luft gemischt, in den Zylinder eingeführt. Die induzierte Aktivität wurde in derselben Weise wie bei dem früheren Versuche gesammelt und gemessen. Aus der Entladungsgeschwindigkeit, die der aktive Niederschlag einer bekannten Radiummenge hervorruft, läßt sich direkt die Emanationsmenge berechnen, die in dem Eisenkessel vorhanden war. Es ergab sich, daß in einem Kubikkilometer Luft, die denselben Emanationsgehalt besitzt, wie die Luft in dem Eisenkessel, so viel Emanation vorhanden sein würde, als von 0,49 g reinen Radiumbromids geliefert wird.

Der Kessel war bei diesen Versuchen nicht von der Luft der Umgebung abgeschlossen, und es fand sich, daß die Größe der

¹⁾ A. S. Eve, Phil. Mag., Juli 1905.

induzierten Aktivität sich nicht änderte, wenn die Luft aus dem umgebenden Raum durch den Kessel geblasen wurde. Man kann also annehmen, daß der Emanationsgehalt der Luft innerhalb und außerhalb des Kessels der gleiche war. Radioaktive Substanzen waren niemals in dem Gebäude benutzt worden, in dem der Kessel stand, und wie wir später sehen werden, war die Zahl der in dem Kessel per Sekunde im Kubikzentimeter gebildeten Ionen kleiner, als jemals vorher beobachtet war.

Um jedoch hierüber Klarheit zu gewinnen, wurden Versuche mit einem anderen großen Zinkzylinder, der beiderseits offen war, auf dem College-Campus gemacht. Der aktive Niederschlag wurde wie bei den früheren Versuchen gesammelt und gemessen. Der durchschnittliche Betrag war jedoch nur ein Drittel bis ein Viertel des in einem gleichen Volumen des großen Kessels beobachteten. Für diese Unstimmigkeit der Resultate läßt sich eine zufriedenstellende Erklärung nur in der Annahme finden, daß der geladene Draht aus irgend einem Grunde nicht imstande war, den aktiven Niederschlag vollständig zu sammeln, wenn die Luft frei durch den Zylinder zirkulierte.

Unter gewissen Annahmen kann man die Menge der in der Atmosphäre enthaltenen Radiumemanation angenähert schätzen. Es werde vorausgesetzt, daß die Emanation in einer die Erde umschließenden Kugelschale von 10 km Höhe gleichmäßig verteilt, und daß der Emanationsgehalt der Luft gleich dem in Montreal beobachteten sei. Die Oberfläche der Erde beträgt ungefähr 5×10^8 qkm und das Volumen der Kugelschale beträgt 5×10^9 cbkm. Setzt man für die im Kubikkilometer enthaltene Emanationsmenge den aus dem Versuch mit dem Eisenkessel erhaltenen Wert ein, so findet man, daß die in der Atmosphäre enthaltene Emanationsmenge $2,5 \times 10^9$ g oder 2460 Tonnen Radiumbromid entspricht.

Dieser Wert reduziert sich auf ein Viertel, oder 610 Tonnen, wenn die Emanation nur vom Lande aufsteigt, da drei Viertel der Erdoberfläche mit Wasser bedeckt sind. Rechnet man mit dem Werte, der aus dem Versuche mit dem im Freien aufgestellten Zylinder erhalten ist, so findet man ungefähr 170 Tonnen.

Verschiedene Forscher haben gefunden, daß die Menge des in der Luft enthaltenen aktiven Niederschlages auf hohen Bergen

ebensogroß, wenn nicht größer ist, als in der Ebene. Die Annahme, daß die Emanation im Durchschnitt bis zu einer Höhe von 10 km in der Luft vorhanden ist, kommt daher wohl der Wirklichkeit ziemlich nahe. Ehe nicht eine vollständige Durchforschung der Radioaktivität der Atmosphäre stattgefunden hat, sind derartige Berechnungen notwendigerweise etwas unsicher, sie erlauben aber jedenfalls, die Größenordnung der in Betracht kommenden Werte zu schätzen.

Da die Radiumemanation in ungefähr vier Tagen zur Hälfte zerfällt, so kann sie nicht aus großen Tiefen an die Erdoberfläche diffundieren, die Hauptmenge der Emanation muß daher aus einer Oberflächenschicht stammen, die nur wenige Meter dick ist. Ein Teil stammt wahrscheinlich aus Quellen, welche die Emanation aus großen Tiefen ans Tageslicht bringen, aber dieser Teil ist vermutlich klein neben dem, der direkt durch die Poren des Erdbodens entweicht.

Wir kommen also zu dem wichtigen Schluß, daß eine sehr beträchtliche Radiummenge, die nach Hunderten von Tonnen zählt, in einer Oberflächenschicht von wenigen Metern Dicke in der Erde enthalten ist. Zum größten Teil ist diese Menge jedoch so sehr verstreut, daß ihr Vorhandensein sich nur mit Hilfe der elektrischen Methode nachweisen läßt.

Eve (loc. cit.) fand, daß ein Draht von 1 mm Durchmesser, der auf — 10 000 Volt geladen und ungefähr 7 m über dem Erdboden aufgehängt war, nicht imstande war, den aktiven Niederschlag aus einer größeren Entfernung als 40 bis 80 cm an sich heranzuziehen. Dieser Abstand ist viel kleiner, als mit Rücksicht auf die hohe Spannung zu erwarten wäre, denn der Verfasser hat nachgewiesen, daß die positiv geladenen Träger des aktiven Niederschlages des Radiums und des Thoriums im elektrischen Felde ungefähr mit derselben Geschwindigkeit wandern, wie ein Ion, d. h. sie bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 1,4 cm per Sekunde bei einem Potentialgefälle von einem Volt per Zentimeter. Wahrscheinlich heften sich die Träger des aktiven Niederschlages, die eine geraume Zeit in der Atmosphäre schweben, an die verhältnismäßig großen Staubeilchen an und bewegen sich deshalb im elektrischen Felde sehr langsam, so daß sie nur aus der unmittelbaren Nachbarschaft des geladenen Drahtes herangezogen werden.

Die durchdringende Strahlung der Erdoberfläche.

Da die Radiumemanation überall in der Erdoberfläche und in der Atmosphäre vorhanden ist, so müssen die γ -Strahlen, die vom Radium-C ausgesandt werden, überall auf der Erde und in der Atmosphäre vorhanden sein. Das Vorhandensein einer solchen durchdringenden Strahlung bemerkten Mc Lennan¹⁾ und H. L. Cooke²⁾ unabhängig voneinander. Mc Lennan arbeitete mit einem großen Gefäß und fand, daß die Ionisation der Luft innerhalb des Gefäßes um ungefähr 37 Proz. abnahm, wenn das Gefäß mit einer Wasserschicht von 25 cm Dicke umgeben wurde. Cooke arbeitete mit einem kleinen Messingelektroskop von ungefähr 1 Liter Inhalt. Die Entladungsgeschwindigkeit sank um ungefähr 30 Proz., wenn das Elektroskop völlig mit einem Bleischirm von 5 cm Dicke umgeben wurde. Eine weitere Verringerung trat nicht ein, selbst wenn eine Tonne Blei um das Instrument verteilt wurde. Diese Strahlen besitzen ungefähr dasselbe Durchdringungsvermögen, wie die γ -Strahlen des Radiums und lassen sich sowohl in Gebäuden wie im Freien nachweisen. Indem das Elektroskop von verschiedenen Seiten durch Bleiblöcke geschützt wurde, ließ sich zeigen, daß die Strahlung ungefähr gleich stark aus allen Richtungen kam und bei Nacht ebenso intensiv war, wie am Tage. Dies ist zu erwarten, wenn die Strahlen von radioaktiven Stoffen stammen, die gleichförmig in der Erde und in der Atmosphäre verteilt sind. Die Ionisierung, die von den durchdringenden Strahlen hervorgerufen wird, ist jedoch viel größer, als daß sie allein durch die γ -Strahlen verursacht sein könnte, die von der in der Atmosphäre enthaltenen Emanation herrühren. Vielleicht werden diese durchdringenden Strahlen sowohl von radioaktiven Substanzen wie von der gewöhnlichen Materie ausgesandt.

Der elektrische Zustand der Atmosphäre.

Aus Messungen des Potentialgefälles in der Atmosphäre ist schon lange bekannt, daß die oberen Schichten der Atmosphäre

¹⁾ Mc Lennan, Phys. Rev. Nr. 4, 1903.

²⁾ Cooke, Phil. Mag., Okt. 1903.

im Verhältnis zu der Erde positiv geladen sind. Es besteht also dauernd ein elektrisches Feld zwischen der Erdoberfläche und den höheren Luftschichten. Da in den unteren Schichten der Atmosphäre eine Ionisierung besteht, so muß eine dauernde Verschiebung von negativen Ionen nach oben und von positiven nach unten stattfinden. Die Träger des aktiven Niederschlages des Radiums besitzen eine positive Ladung, sie müssen also nach der Erdoberfläche hin wandern. Jeder Grashalm und jedes Blatt muß daher mit einem unsichtbaren Überzuge von radioaktiver Substanz bekleidet sein.

Auf der Spitze eines Hügels oder eines Berges ist die Intensität des elektrischen Feldes der Erde besonders groß, es sollte daher auf Bergspitzen die Menge der abgelagerten radioaktiven Substanzen größer sein, als in der Ebene. Dieses steht in Übereinstimmung mit der oben erwähnten Beobachtung von Elster und Geitel, daß die Ionisation der Luft auf Bergspitzen größer ist, als in der Ebene.

Eine große Zahl von Untersuchungen sind darüber angestellt worden, wie sich die relative Ionenzahl der Luft an verschiedenen Orten mit den meteorologischen Verhältnissen ändert. Hierzu ist der „Zerstreuungsapparat“ von Elster und Geitel viel benutzt worden. Dieser besteht aus einem ungeschützten Drahtnetz, das mit einem Elektroskop verbunden ist. Die Entladungsgeschwindigkeit des Elektroskops wird für positive und negative Ladung getrennt bestimmt. Während dieses Instrument für die ersten Untersuchungen der Ionisation in der Atmosphäre von Wert gewesen ist, sind die Resultate, die es liefert, nur zu Vergleichszwecken zu gebrauchen und erlauben keine quantitativen Berechnungen. Der Einfluß des Windes auf die Angaben des Apparates ist sehr stark; die Entladungsgeschwindigkeit ist bei windigem Wetter stets größer, als bei Windstille.

Ein sehr zweckmäßiges transportables Instrument zur Bestimmung der in 1 ccm Luft enthaltenen Zahl von positiven und negativen Ionen ist von Ebert¹⁾ angegeben. Mit Hilfe eines durch ein Uhrwerk getriebenen Ventilators wird ein stetiger Luftstrom zwischen zwei konzentrischen Zylindern hindurchgesogen.

¹⁾ Ebert, Phys. Zeit. 2, 662 (1901); Zeitschr. f. Luftschiffahrt 4. Okt. (1902).

Der innere Zylinder ist isoliert und mit einem Elektroskop verbunden. Die Länge des Zylinders ist so gewählt, daß alle in der Luft vorhandenen Ionen bei ihrer Wanderung durch den Zylinder an die Elektroden gelangen. Aus der Kapazität des Instrumentes, der Geschwindigkeit des Luftstromes und den Konstanten des Elektroskops läßt sich die Zahl der in 1 ccm Luft enthaltenen Ionen leicht berechnen. Wenn der innere Zylinder positiv geladen ist, so ist die Entladungsgeschwindigkeit des Elektroskops ein Maß für die Zahl der in der Luft enthaltenen negativen Ionen und umgekehrt.

Messungen, die von Ebert und anderen Forschern ausgeführt sind, zeigen, daß die Zahl der in 1 ccm Luft enthaltenen Ionen beträchtlichen Veränderungen unterliegt. Die Zahl schwankt gewöhnlich zwischen fünfhundert und mehreren tausenden und die Zahl der positiven Ionen ist fast immer größer, als die der negativen.

Schuster¹⁾ fand, daß in Manchester die Ionenzahl zwischen 2300 und 3700 schwankte. Diese Werte geben die Zahl der im Gleichgewichtszustande vorhandenen Ionen an, d. h. wenn die Geschwindigkeit, mit der neue Ionen entstehen, gleich der ist, mit der sie sich wieder vereinigen. Wenn n_1 und n_2 die Zahl der in 1 ccm Luft enthaltenen positiven und negativen Ionen und q die Zahl der in der Sekunde per Kubikzentimeter neu gebildeten Ionen ist, so ist $q = a n_1 n_2$, wenn a der Koeffizient der Wiedervereinigung der Ionen ist. Durch eine kleine Abänderung an dem Ebertschen Apparat konnte Schuster den Wert von a für Luft unter gewöhnlichen Versuchsbedingungen bestimmen und fand, daß der Wert von q in Manchester zwischen 12 und 39 schwankte.

Der Apparat von Ebert dient dazu, die Zahl der Luftionen zu bestimmen, die dieselbe Beweglichkeit haben, wie die von X-Strahlen oder von Strahlen aktiver Stoffe gebildeten Ionen. Die Geschwindigkeit der in der Luft vorhandenen Ionen ist durch Maché und von Schweidler direkt gemessen. In einem elektrischen Felde von einem Volt per Zentimeter legt das positive Ion 1,02 cm in der Sekunde zurück, das negative 1,25 cm per Sekunde. Diese Werte sind ein wenig kleiner, als diejenigen, die

¹⁾ Schuster, Proc. Manchester Phil. Soc., p. 488, Nr. 12, 1904.

für die Geschwindigkeit von Ionen bestimmt sind, die von X-Strahlen oder den Strahlen der radioaktiven Stoffe in staubfreier Luft hervorgebracht werden.

Außer diesen schnell wandernden Ionen sind jedoch, wie Langevin¹⁾ gezeigt hat, noch Ionen von geringer Beweglichkeit in der Luft vorhanden, die in einem elektrischen Felde zu langsam wandern, als daß sie durch den Apparat von Ebert aufgefangen werden könnten. Diese Ionen bewegen sich ungefähr so schnell, wie die Ionen, die in der Nähe von Flammen zu beobachten sind. Durch Verwendung sehr starker elektrischer Felder hat Langevin die Zahl dieser in der Luft vorhandenen schweren Ionen bestimmt und gefunden, daß von ihnen ungefähr vierzigmal so viele vorhanden sind, als von den leichtbeweglichen Ionen. Möglicherweise entstehen diese Ionen von geringer Geschwindigkeit dadurch, daß sich Wasserdampf auf dem Ion kondensiert, oder indem sich das Ion an Staubteilchen anheftet.

Da zweifellos eine ununterbrochene Bildung von Ionen in der Nähe der Erdoberfläche stattfindet, so ist es von großer Wichtigkeit, die Gründe dieser Ionisierung kennen zu lernen. Eine naheliegende Ursache wäre die Anwesenheit der radioaktiven Stoffe in der Atmosphäre. Reicht aber die vorhandene Menge aus, um die beobachtete Ionisation zu bewirken? Um hierüber Klarheit zu gewinnen, führte Eve (l. c.) den folgenden Versuch aus. In dem auf Seite 203 beschriebenen großen Eisenkessel wurde eine lange zylindrische Elektrode axial aufgehängt und mit einem Elektroskop verbunden. Die Elektrode wurde auf ein Potential geladen, das zur Herstellung des Sättigungsstromes ausreichte und der Sättigungsstrom, der ein Maß für die Gesamtzahl der vorhandenen Ionen ist, bestimmt. Dann wurde ein auf — 10 000 Volt geladener Draht an ihre Stelle gebracht und eine bestimmte Zeit lang der aktive Niederschlag auf ihm gesammelt. Die Aktivität, die der Draht gewonnen hatte, wurde unmittelbar nach Beendigung der Exposition mit einem Elektroskop gemessen.

Diese Versuche wurden darauf in genau der gleichen Weise in einem viel kleineren Zinkzylinder ausgeführt, in den eine bekannte Menge von Radiumemanation eingeblasen war. Wenn die

¹⁾ Langevin, Compt. rend. **111**, 232 (1905).

Rutherford, Radioaktive Umwandlungen.

Ionisation in dem großen Kessel ausschließlich von der in ihm enthaltenen Radiumemanation herrührte, so sollte das Verhältnis der Sättigungsströme in den beiden Gefäßen gleich dem Verhältnis der Aktivitäten sein, die die Sammeldrähte unter den gleichen Bedingungen angenommen haben; denn der Sättigungsstrom bildet ein Maß sowohl für die Menge der vorhandenen Emanation, wie für die der induzierten Aktivität.

Das Verhältnis der induzierten Aktivität in dem Eisenkessel, zu der in dem Emanationsgefäße, war ungefähr 14 Proz. kleiner, als das entsprechende Verhältnis der Sättigungsströme. Mit Rücksicht auf die Schwierigkeit solcher Versuche ist die Übereinstimmung so gut, wie erwartet werden kann, und es geht aus diesen Versuchen hervor, daß der größere Teil, wenn nicht die ganze Ionisation, die in dem Eisenkessel vorhanden war, von der Gegenwart der Radiumemanation herrührte.

Da alles dafür sprach, daß die Luft in dem Eisenkessel ebensoviel Emanation enthielt, als die Luft im Freien, so kann geschlossen werden, daß die Bildung der Ionen in der Atmosphäre von der in ihr enthaltenen Emanation herrührt. Ehe dieser Schluß jedoch als sichergestellt angesehen werden kann, müssen ähnliche Versuche an verschiedenen Orten angestellt werden. Wir sind jedenfalls zu der Annahme berechtigt, daß die in der Luft vorhandenen aktiven Stoffe eine hervorragende Rolle bei der Bildung von Ionen in den unteren Schichten der Atmosphäre spielen.

Eve fand für die Zahl der in dem Eisenkessel in der Sekunde pro Kubikzentimeter gebildeten Ionen 9,8. Dieses ist der kleinste Wert, der bisher in einem geschlossenen Gefäß für die Bildungsgeschwindigkeit von Ionen gefunden wurde. Cooke erhielt in einem gut gereinigten Messingelektroskop von ungefähr 1 Liter Inhalt einen Wert von mindestens 20.

Wenn die in der Luft enthaltenen radioaktiven Stoffe die Ursache der Luftionisierung sind, so sollte ein konstantes Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit der Ionenbildung in der Luft und der Größe der induzierten Aktivität bestehen. Die bisher von verschiedenen Seiten gemachten Beobachtungen scheinen gegen das Bestehen eines solchen Zusammenhanges zu sprechen. Es ist jedoch zweifelhaft, ob die ausgeführten Messungen wirklich die gewünschten Angaben geliefert haben.

Die Konstante der Wiedervereinigung der Ionen hängt zweifellos in hohem Maße von meteorologischen Bedingungen und von der Anwesenheit von Kondensationskernen ab. Die Änderung dieser Konstante hat Einfluß auf die Bestimmung der Ionenzahl mit Hilfe des Ebertschen Apparates. In ähnlicher Weise wird wahrscheinlich die induzierte Aktivität, die ein geladener Draht in freier Luft annimmt, von atmosphärischen Verhältnissen abhängen, wenn sich auch die Menge der vorhandenen Emanation nicht geändert hat. Um einen sicheren Schluß zu ziehen, müssen alle diese Faktoren berücksichtigt werden. Mit Hilfe des Apparates von Elster und Geitel sind in Deutschland viele Messungen über den Einfluß meteorologischer Bedingungen auf die Zerstreuungsgeschwindigkeit ausgeführt worden.

Wir haben bereits den Einfluß steigenden und fallenden Luftdruckes auf die Menge der in der Luft vorhandenen aktiven Stoffe erwähnt. Die Beziehung zwischen Potentialgefälle und Zerstreuung ist von Gockel und Zölss untersucht worden. Der letztere fand, daß das Potentialgefälle sich deutlich mit der Zerstreuung ändert. Bei hohem Potentialgefälle ist die Zerstreuung gering, und umgekehrt. Eine ähnliche Beziehung zwischen dem Potentialgefälle und der mit Hilfe des Ebertschen Apparates ermittelten Ionisation ist von Simpson¹⁾ in Norwegen beobachtet worden. Elster und Geitel und Zölss haben gezeigt, daß die Zerstreuung mit der Temperatur zunimmt. Simpson fand, daß in Karasjoh in Norwegen der Durchschnitt bei Temperaturen von 10°C und 15°C ungefähr sechsmal so groß war, als bei Temperaturen zwischen — 40°C und — 20°C.

Die Resultate, die Simpson in Karasjoh erhalten hat, sind von besonderem Interesse; Karasjoh liegt auf dem 69. Breitengrade, zwischen dem 26. November und dem 18. Januar erschien die Sonne nicht über dem Horizont, und ging zwischen dem 20. Mai und dem 22. Juli nicht unter. Im Durchschnitt nahm das Potentialgefälle von Oktober bis Februar stetig zu und die Ionisation nahm während derselben Zeit stetig ab. Es geht hieraus hervor, daß der Einfluß der Sonnenstrahlen auf die Ionisierung der Luft nur gering ist.

¹⁾ Simpson, Trans. Roy. Soc. Lond. A. 1905, p. 61.

Die zahlreichen Spekulationen, die angestellt sind, um das Vorhandensein der großen positiven Ladung in den oberen Schichten der Atmosphäre zu erklären, können hier nicht besprochen werden. Die positive Ladung muß ununterbrochen aus irgend einer Quelle nachgeliefert werden, denn sonst würde sie infolge der Ionenströme zwischen den oberen und unteren Schichten der Atmosphäre schnell verschwinden. Unsere Kenntnis von dem elektrischen Zustande der oberen Atmosphäre ist augenblicklich noch zu gering, als daß wir bestimmen könnten, wodurch diese Ladungsverteilung zustande kommt.

Die Wärme des Erdinnern.

Die Wärme des Erdinnern ist länger als ein Jahrhundert ein Gegenstand der Erörterung gewesen. Die einleuchtendste und allgemein angenommene Ansicht ist die, daß die Erde ursprünglich ein sehr heißer Körper war, und sich im Verlauf von Millionen von Jahren auf ihre gegenwärtige Temperatur abgekühlt hat. Man nimmt an, daß dieser Abkühlungsprozeß noch jetzt vor sich geht, und daß die Erde schließlich durch Strahlung in den leeren Raum ihre innere Wärme verlieren wird.

Auf diese Theorie baut Lord Kelvin seine bekannte Berechnung des Alters der Erde auf. Aus Temperaturmessungen in Bohrlöchern und Minen ist gefunden, daß die Temperatur der Erde nach dem Innern hin stetig zunimmt. Im Durchschnitt beträgt dieses Temperaturgefälle ungefähr $0,00037^{\circ}$ per Zentimeter. Um eine Schätzung des Maximalalters der Erde zu gewinnen, nahm Lord Kelvin an, daß die Erde ursprünglich flüssig war. Aus der Fourierschen Gleichung läßt sich das Temperaturgefälle an der Oberfläche der Erde zu irgend einer Zeit, nachdem die Abkühlung begann, berechnen, wenn die Anfangstemperatur und die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit der Erde bekannt ist. Bei Verwendung der wahrscheinlichsten Werte dieser Größen fand Lord Kelvin in seinen ersten Berechnungen, daß die Zeit, die die Erde gebraucht hat, um sich aus dem feurigflüssigen Zustande auf ihre jetzige Temperatur abzukühlen, ungefähr 100 Millionen Jahre betragen habe. Spätere Berechnungen, bei denen bessere Daten verwandt wurden, haben diese Schätzung auf ungefähr 40 Millionen Jahre erniedrigt.

Nach dieser Theorie kann die Erde nicht seit länger als 40 Millionen Jahren bewohnbar gewesen sein. Viele Geologen und Biologen halten diese Periode für viel zu klein, als daß sich in ihr die Prozesse der anorganischen und organischen Entwicklung und die geologischen Umwandlungen hätten abspielen können, die in dem Leben der Erde stattgefunden haben müssen. Es kann kaum ein Zweifel darüber bestehen, daß die Schätzung Lord Kelvins wahrscheinlich dem Werte entspricht, den das Alter der Erde nach der von ihm entwickelten Theorie besitzen würde. In der Theorie von Lord Kelvin wird jedoch angenommen, daß die Erde ein einfach sich abkühlender Körper ist, und daß keine Wärmebildung im Innern stattgefunden hat, denn Lord Kelvin wies nach, daß die Wärmemenge, die möglicherweise bei der Zusammenziehung der Erde oder durch gewöhnliche chemische Prozesse entstehen könnte, zu klein ist, um den Schluß im allgemeinen beeinflussen zu können.

Die Entdeckung der radioaktiven Substanzen, die während ihrer Umwandlung eine Wärmemenge entwickeln, die wenigstens eine Million mal größer ist, als die gewöhnlicher chemischer Reaktionen, setzt diese Frage in ein ganz anderes Licht. Wir haben gesehen, daß radioaktive Substanzen sich überall in der Oberfläche der Erde und in der Atmosphäre vorfinden, und daß die Radiummenge, die sich nahe an der Oberfläche befindet, mehrere hundert Tonnen beträgt.

Es ist interessant, auszurechnen, wie viel Radium gleichförmig in der Erde verteilt sein muß, um die Wärmemenge zu kompensieren, die die Erde in ihrem jetzigen Zustande durch Leitung an die Oberfläche verliert. Der Wärmeverlust, ausgedrückt in Grammkalorien per Sekunde, den die Erde durch Leitung an die Oberfläche erfährt, ist gegeben durch

$$Q = 4\pi R^2 K T,$$

wenn R der Radius der Erde, K die Wärmeleitfähigkeit der Erde in C-G-S-Einheiten, und T das Temperaturgefälle ist. Es sei X die Wärmemenge, die durchschnittlich in einem Kubikzentimeter Erde per Sekunde durch radioaktive Substanzen entwickelt wird. Wenn die in der Sekunde entwickelte Wärmemenge gleich der durch Leitung verschwindenden ist, so ist

$$X \frac{4}{3} \pi R^3 = 4\pi R^2 K T, \text{ oder } X = 3 \frac{K T}{R}.$$

Setzt man $K = 0,004$, dem von Lord Kelvin benutzten Wert und $T = 0,000\,37$, so ist

$$\begin{aligned} X &= 7 \times 10^{-15} \text{ Grammkalorien in der Sekunde,} \\ &= 2,2 \times 10^{-7} \text{ Grammkalorien im Jahre.} \end{aligned}$$

Ein Gramm Radium entwickelt im radioaktiven Gleichgewicht 876 000 Grammkalorien im Jahre. Es würde also die Anwesenheit von $2,6 \times 10^{-13}$ Gramm Radium per Kubikzentimeter oder $4,6 \times 10^{-14}$ g per Masseneinheit genügen, um die durch Leitung verloren gehende Wärmemenge zu ersetzen.

Bei dieser Berechnung ist die Menge der vorhandenen radioaktiven Stoffe auf Radium bezogen, die Wärmeentwicklung, die von Thorium, Uranium und Aktinium stammt, ist in der Berechnung für das Radium enthalten. Es ist hiernach die gesamte Wärmeentwicklung der in der Erde enthaltenen radioaktiven Substanzen der von 270 Millionen Tonnen Radium äquivalent¹⁾.

Diese Schätzung scheint nicht übertrieben, da zweifellos mehrere hundert Tonnen Radium in einer dünnen Schicht der Erdoberfläche vorhanden sind. Verwendet man die Schätzung von Eve, nach der ungefähr 600 Tonnen Radium erforderlich sind, um den Emanationsgehalt der Atmosphäre aufrecht zu erhalten, so läßt sich berechnen, daß diese Menge in einer Schicht von 18 m Dicke enthalten ist, wenn angenommen wird, daß Radium in der vorher berechneten Menge gleichmäßig in der Erde verteilt ist. Auch nach allgemeinen Überlegungen ist zu erwarten, daß die Schicht eine derartige Dicke besitzt.

Nach den Versuchen von Elster und Geitel enthalten Gesteine und Bodenproben ungefähr so viel radioaktive Stoffe, wie

¹⁾ Strutt [Proc. Roy. Soc. A. 77 (1906)] hat eine systematische Untersuchung des Radiumgehaltes von Gesteinen ausgeführt. Die Gesteine stammten aus verschiedenen Fundorten, und waren sowohl vulkanischen wie sedimentären Charakters. Obwohl der Radiumgehalt dieser Gesteine großen Schwankungen unterliegt, so findet Strutt doch, daß im Durchschnitt der Radiumgehalt der Erdoberfläche ungefähr 100 mal größer ist, als die obige Theorie ergibt. Zur Erklärung dieser Abweichung nimmt Strutt an, daß das Radium nur in einer dünnen Oberflächenschale der Erdrinde enthalten ist.

Eve (Phil. Mag., Sept. 1906) ist auf Grund einer Berechnung aus der durchdringenden Strahlung der Erdoberfläche zu einem ähnlichen Schluß hinsichtlich des Radiumgehaltes der Erdoberfläche gekommen.

nach dem obigen zu erwarten wäre. Die Wärmeentwicklung der radioaktiven Substanzen muß zweifellos bei Berechnungen, in denen das Temperaturgefälle an der Oberfläche der Erde benutzt wird, in Betracht gezogen werden. Wenn die berechnete Radiummenge gleichförmig in der Erde verteilt wäre, würde das Temperaturgefälle so lange konstant bleiben, wie der Vorrat von radioaktiven Substanzen sich nicht ändert. Wenn in der Nähe der Erdoberfläche radioaktive Substanzen in größerer Menge vorhanden wären, als dem berechneten Mittelwerte entspricht, so würde das Temperaturgefälle entsprechend größer sein, als der beobachtete Wert.

Obwohl die Daten, die diesen Berechnungen zugrunde liegen, notwendigerweise etwas unsicher sind, so ist doch aus den bisher erhaltenen Resultaten ersichtlich, daß die Berechnungen des Alters der Erde, die auf der Annahme beruhen, daß die Erde lediglich ein sich abkühlender Körper ist, mit großer Vorsicht aufzunehmen sind. Das Temperaturgefälle, das wir heute beobachten, kann sich Millionen von Jahren infolge einer stetigen Wärmeentwicklung im Innern der Erde konstant erhalten haben.

Das Alter der Erde läßt sich auf Grund der Theorie, daß die Temperatur der Erde sich nicht ändert, kaum mit Sicherheit angeben. Das in der Erde vorhandene Radium stammt von der Muttersubstanz Uranium ab, und Uranium müßte daher in der Erde in dem Verhältnis 1:10 Millionen vorhanden sein. Dieser Betrag scheint nach den bisherigen Erfahrungen nicht übertrieben. Die Periode des Uraniums beträgt ungefähr 1000 Millionen Jahre, so daß, wenn die innere Wärme der Erde ausschließlich vom Uranium und Radium herrührte, das Temperaturgefälle vor ungefähr 1000 Millionen Jahren nur doppelt so groß als heutzutage gewesen sein müßte.

Einige Uranmineralien sind, wie früher gezeigt wurde, zweifellos mehrere hundert Millionen Jahre alt, und es ist anzunehmen, daß einige von ihnen ein noch höheres Alter besitzen. Lediglich aus radioaktiven Daten geht schon hervor, daß nach der niedrigsten Schätzung die Erde mehrere hundert Millionen Jahre alt ist.

Die radioaktiven Daten allein erlauben uns nicht, zu entscheiden, ob die Erde ursprünglich sehr heiß war oder nicht. Die Theorie, daß die Erde ursprünglich feurigflüssig gewesen

sei, scheint zum Teil deshalb aufgestellt zu sein, um die innere Wärme der Erde zu erklären. Einige Geologen, vor allem Professor Chamberlin in Chicago, haben seit langem die Ansicht vertreten, daß die geologischen Forschungen keineswegs zu diesem Schlusse zwingen. Diese interessante Möglichkeit kann jedoch hier nur erwähnt werden.

Die Radioaktivität der gewöhnlichen Materie.

Es ist eine Erfahrungstatsache, daß jede physikalische Eigenschaft, die ein Element besitzt, von anderen in gewissem Grade geteilt wird. Zum Beispiel tritt zwar die Magnetisierbarkeit am deutlichsten beim Eisen, Nickel und Kobalt hervor, aber jede bisher untersuchte Substanz hat sich als entweder paramagnetisch oder diamagnetisch erwiesen. Es wäre daher aus allgemeinen Gründen zu erwarten, daß die Eigenschaft der Radioaktivität, die bei einem Element, wie dem Radium, so deutlich hervortritt, auch bei anderen Substanzen auftritt.

Eine vorläufige Untersuchung bewies sofort, daß die gewöhnliche Materie nur in ganz geringem Grade, wenn überhaupt, radioaktiv ist; spätere Untersuchungen von McLennan, Strutt, Campbell, Wood und anderen haben gezeigt, daß die gewöhnliche Materie in geringem Maße die Eigenschaft besitzt, ein Gas zu ionisieren. Campbell¹⁾ hat diese Frage besonders eingehend untersucht, nach den von ihm erhaltenen Resultaten ist es sehr wahrscheinlich, daß die gewöhnliche Materie die Fähigkeit besitzt, ionisierende Strahlen auszusenden, und daß die Natur und die Intensität der Strahlen sich von Element zu Element ändern.

Versuche auf diesem Gebiete sind mit sehr großen experimentellen Schwierigkeiten verknüpft, da die Ionisationsströme, die man erhält, außerordentlich klein sind. Die Erscheinungen sind sehr kompliziert, da jede Substanz α -Strahlen und durchdringende Strahlen aussendet, und die letzteren in einigen Fällen eine deutlich merkbare sekundäre Strahlung veranlassen.

Campbell schließt aus seinen Versuchen, daß die α -Strahlen, die von Blei ausgesandt werden, in Luft einen Ionisierungsbereich von ungefähr 12,5 cm haben, während der der α -Strahlen

¹⁾ Campbell, Phil. Mag., April 1905, Februar 1906.

des Aluminiums nur 6,5 cm beträgt. Im Durchschnitt haben die von gewöhnlicher Materie ausgesandten α -Strahlen einen beträchtlich größeren Ionisierungsbereich, als die des Radiums. Campbell löste einen Teil des zu seinen Versuchen benutzten Bleies in Salpetersäure auf, und prüfte die Lösung mit Hilfe der Emanationsmethode auf Radium; es ließ sich jedoch nicht die kleinste Spur Radium nachweisen.

Es ist nicht notwendig, daß die α -Partikeln der gewöhnlichen Materie dieselbe Masse besitzen, wie die des Radiums. Sie könnten Wasserstoffatome sein; wenn die α -Partikeln gewöhnlicher Substanzen Heliumatome wären, so sollten wir erwarten, Helium im Blei aufzufinden.

Wenn die Aussendung von α -Partikeln als ein Beweis für einen Atomzerfall angenommen wird, so läßt sich leicht berechnen, daß die Lebensdauer gewöhnlicher Materie wenigstens eine Million mal größer ist, als die des Uraniums, d. h. nicht geringer als 10^{15} Jahre.

Zehntes Kapitel.

Die Eigenschaften der α -Strahlen.

Die α -Strahlen spielen, wie in dem vorausgehenden Kapitel gezeigt wurde, bei radioaktiven Prozessen eine viel hervorragendere Rolle als die β - und γ -Strahlen. Sie verursachen nicht nur den größten Teil der Ionisation, die in der Umgebung radioaktiver Substanzen herrscht, sondern auch die gewaltige Wärmeentwicklung radioaktiver Stoffe; ferner begleiten sie im allgemeinen die radioaktiven Umwandlungen, während β - und γ -Strahlen nur in wenigen Fällen ausgesandt werden. Schließlich sprechen, wie wir gesehen haben, viele Gründe dafür, daß die α -Partikel mit dem Heliumatom identisch ist.

In diesem Kapitel werden wir eingehender die wichtigeren Eigenschaften der α -Strahlen besprechen, und besonders die der