

Über das Vorkommen
radioaktiver Substanzen
in Erde und Luft.

Von

Prof. Dr. H. Mache.

Vortrag, gehalten den 17. Februar 1909.

(Mit Demonstrationen.)

Mit 1 Abbildung im Texte.



Sehr geehrte Versammlung!

In dem kleinen, etwa 8000 Einwohner zählenden, im böhmischen Erzgebirge gelegenen St. Joachimstal wurde früher ein ergiebiger Silberbergbau betrieben. Die dort von den Grafen Schlick zu Beginn des 16. Jahrhunderts geprägten Silbermünzen, die Joachimstaler, brachten ja bekanntlich dieses Wort in der Abkürzung Taler als Münzbezeichnung in ganz Deutschland zur Geltung. Mit der Abnahme der Silbererze und dem Sinken der Silberpreise wurde der Abbau dieses Edelmetalles aufgegeben; statt dessen fördert das dem Staate gehörige Bergwerk das unscheinbare, früher achtlos auf die Halden geworfene, jetzt aber so kostbare Uranpecherz. In diesem Mineral entdeckte nun, wie Sie ja wissen und auch in diesem Vereine bereits wiederholt gehört haben, Frau Marie Curie, angeregt durch die Untersuchungen des vor kurzem verstorbenen Becquerel über das Uran, ein neues chemisches Element, das Radium, einen Grundstoff von sehr merkwürdigen, allen bisherigen Erfahrungen widersprechenden Eigenschaften.

Es wird Ihnen ja bekannt sein, daß dieses Radium gleich dem Röntgenlicht durch Holz, ja selbst durch Metalle hindurch Fluoreszenzerscheinungen auszulösen und photographische Platten zu schwärzen vermag. Sie werden wissen, daß Radium oder ein Radium enthaltendes Präparat unausgesetzt Wärme entwickelt und infolgedessen stets wärmer ist als seine Umgebung. Auch daß es Glas und Edelsteine zu färben oder zu verfärben imstande ist, sei hier kurz erwähnt.

Ausführlich wollen wir uns hingegen im folgenden mit einer anderen Eigenschaft des Radiums beschäftigen.

Bekanntlich ist die atmosphärische Luft, in der wir leben, ein Nichtleiter der Elektrizität, ein sogenannter Isolator. Denken wir uns etwa eine Metallkugel frei in der Luft an einem Seidenfaden aufgehängt und durch Berühren mit einem an einem Lederlappen geriebenen Glasstab mit sogenannter positiver Elektrizität versehen, so bleibt diese elektrische Ladung durch lange Zeit auf der Kugel. Das läßt sich in bequemerer Weise unter Verwendung eines Elektroskops zeigen. Ich werde mir erlauben, Ihnen diesen einfachen Apparat ins Gedächtnis zurückzurufen.

Das Elektroskop besteht im wesentlichen aus einem in gut isolierendem Material (Ebonit- oder Bernsteinpfropfen) befestigten Metallstab, an welchem auf beiden Seiten je ein Streifen Blattgold oder Aluminiumfolie befestigt ist und auf dessen oberes Ende sich je nach Bedarf eine Kugel oder Platte aufsetzen läßt. Wird dieses Elektroskop elektrisch geladen, so wird das ganze Metall

also auch die beiden leichtbeweglichen Streifen gleichnamig elektrisch; sie werden sich abstoßen oder, da sie ja oben am Stab befestigt sind, sich ausspreizen und diese Divergenz wird so lange unverändert bestehen, als die elektrische Ladung unverändert anhält. In der Tat zeigt sich nun, daß in Luft unter normalen Umständen die Divergenz durch lange Zeit unverändert bestehen bleibt.

Legen wir aber ein Präparat, das auch nur wenige Tausendstel Gramm Radium enthält, offen in die Nähe des Elektroskops, so werden wir bemerken, daß die Divergenz nicht mehr anhält, daß also das Elektroskop rasch seine Ladung verliert. Die Luft ist somit aus einem Nichtleiter zu einem Leiter der Elektrizität geworden. Der Effekt, d. h. die Geschwindigkeit, mit der die elektrische Ladung verschwindet, mit der die Blättchen des Elektroskops zusammenfallen, ist um so größer, je näher wir mit dem Radium an das Elektroskop herankommen. (Demonstration.)

Man erklärt diese Erscheinung durch die Annahme, daß das Radium fortwährend außerordentlich kleine Teilchen (Strahlen) mit sehr großer Geschwindigkeit ausschleudert, welche bei ihrem Anprallen auf die kleinsten Teilchen, aus denen wir uns die Luft zusammengesetzt denken, die sogenannten Moleküle, diese in zwei Teile zertrümmern, von denen der eine positiv, der andere negativ elektrisch geladen ist und die wir Ionen nennen. Da das positive Ion ebenso hoch positiv geladen ist wie das negative Ion negativ, so ist das aus je einem positiven und negativen Ion zusammengesetzte Molekül un-

elektrisch oder, richtiger gesagt, elektrisch-neutral. Hingegen werden sich die Ionen wie elektrisch geladene Körper verhalten. War z. B. das Elektroskop durch Berührung mit geriebenem Glas, also positiv geladen, so werden nach den Grundgesetzen der Elektrizitätslehre jetzt die freigewordenen negativ geladenen Teilchen (negativen Ionen) durch die elektrischen Kräfte auf das positiv geladene Elektroskop gezogen und neutralisieren, vernichten sehr bald dessen Ladung.

Bemerkenswert ist, daß die Strahlen des Radiums, also diese ganz kleinen Teilchen, welche das Radium aussendet und welche die Fähigkeit haben, die umgebenden Luftteilchen in Ionen zu spalten, sie zu ionisieren und dadurch elektrisch leitend zu machen, imstande sind, alle Körper, wie Holz, Glas, Metalle, mehr oder weniger zu durchdringen. Schließe ich hier das Radium in eine Glasflasche, so wirkt es noch immer durch das Glas hindurch ionisierend auf die Luft, ja selbst in einer Hülle aus Eisen oder Blei wird es die Luft in der Umgebung des Behälters noch schwach leitend machen. Das zeigt, daß wenigstens ein Teil der ausgesandten Partikel ganz außerordentlich klein sein muß, so klein, daß selbst so dichte Körper wie Eisen und Blei noch porös genug sind, um ihnen den Durchgang zu gestatten.

Haben wir das Radium unter luftdichtem Verschuß gehalten oder nur durch kurze Zeit hier im Saale belassen, dann erhält die Luft sofort ihr früheres Isolationsvermögen zurück, wenn wir das Radium entfernen. Anders aber, wenn diese Zeit, während welcher das Radium

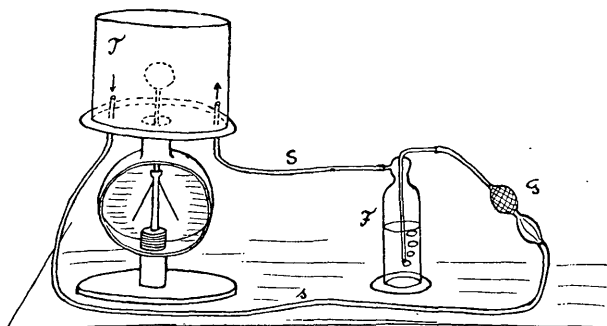
hier offen lag, länger war. In diesem Falle bemerken wir, daß auch nach dem Entfernen des Radiums die Luft ein zwar geringeres, aber dem Normalzustande gegenüber noch immer bedeutend gesteigertes Leitvermögen zurückbehält. Unser Elektroskop zerstreut noch immer seine Ladung relativ rasch in die umgebende Luft. Würde unser Saal nicht gelüftet, so könnten wir dieses gesteigerte Leitvermögen noch durch Tage, ja durch Wochen wahrnehmen. Doch nimmt es mit der Zeit auch in hermetisch geschlossenem Raume deutlich ab, und zwar so, daß es in vier Tagen auf die Hälfte, in weiteren vier Tagen auf ein Achtel usw. des Anfangswertes absinkt. Man kann dies leicht aus der Geschwindigkeit entnehmen, mit welcher die Blättchen des geladenen Elektroskops zusammenfallen. Ist zu Beginn die Zeit, während welcher die Divergenz der Elektroskopblättchen sich um einen bestimmten Betrag vermindert, etwa eine Minute, so wird nach vier Tagen die Zeit, welche zu der gleichen Divergenzverminderung nötig ist, zwei Minuten betragen, nach acht Tagen vier Minuten, nach zwölf Tagen acht Minuten usw.

Als Ursache dieser merkwürdigen Erscheinung hat man nun folgendes konstatieren können: Ähnlich wie ein riechender Körper, etwa Kampfer, in die umgebende Luft Dämpfe aussendet, die, so fein verteilt sie auch sind und obwohl sie kaum eine Gewichtsabnahme der riechenden Substanz veranlassen, sich doch unseren Geruchsnerven bemerklich machen, so gibt auch Radium fortwährend, wenn auch in außerordentlich geringen Mengen

ein Gas in die umgebende Luft ab. Dieses Gas ist aber nicht etwa mit Radiumdampf identisch, sondern weicht in seinem chemischen Verhalten vom Radium durchaus ab. Es entwickelt sich aus dem Radium nur in minimalen Quantitäten — pro Stunde aus dem Gramm Radium nur etwa vier Tausendstel Kubikmillimeter — und so wäre es uns gewiß überhaupt entgangen, wenn es sich nicht, selbst in ganz geringen Mengen, durch seine Einwirkung auf das elektrische Leitvermögen der Luft bemerkbar machen würde; denn dieses Gas, welches wir mit dem auf diesem Gebiete hochverdienten englischen Physiker Rutherford als Radiumemanation bezeichnen, ist selbst wieder radioaktiv, ganz ähnlich wie das Radium, aus dem es entsteht. Es schleudert also ebenfalls außerordentlich kleine Teilchen (Strahlen) aus, welche die umgebenden Luftmoleküle zertrümmern, ionisieren, und dadurch leitfähig machen, und zwar selbst dann schon in sehr merklichem Betrage, wenn nur minimale Mengen von Radiumemanation in der Luft enthalten sind.

Die Empfindlichkeit dieser elektrischen Methode zum Nachweise von Radiumemanation aus der gesteigerten Leitfähigkeit der Luft übertrifft selbst die der spektralen Reaktionen. Bunsen gibt an, daß durch das Auftreten der bekannten gelben Linie im Spektrum sich das Vorhandensein von dem zehntausendsten Teil eines Grammes Natrium nachweisen läßt. Radiumemanation läßt sich hingegen noch nachweisen, wenn ihr Gewicht nur den millionsten Teil jenes an sich schon unfafßbar kleinen Betrages ausmacht.

Ich habe hier in der kleinen chemischen Waschflasche (*F*) einige Kubikzentimeter Wasser, in denen eine Spur Radiumemanation enthalten oder, wie der chemische Fachausdruck lautet, absorbiert ist. Ich blase jetzt mittels des Kautschukgebläses (*G*) Luft durch das Wasser. Die im Wasser emporperlende Luft führt dann die Radiumemanation mit sich, genau so, wie Luft, die durch kohlensäurehaltiges Wasser (Sodawasser) hindurchperlt,



die Kohlensäure dem Wasser entnimmt. Wird nun die emanationshaltige Luft durch den Schlauch (*S*) unter den Topf (*T*) geblasen, der bei diesem Versuche in der durch die Figur dargestellten Weise über den Kopf des Elektroskops gestülpt ist, so zeigt das rasche Zusammenklappen der Blättchen des geladenen Elektroskops an, wie sehr die Leitfähigkeit der unter dem Topfe befindlichen Luft durch das erfolgte Zumischen der Radiumemanation gestiegen ist. Dabei war die im Wasser enthaltene Emanation vom zehnbis hunderttausendsten

Teil eines Milligramms Radium entwickelt worden. (Demonstration.) Sie sehen hier also den experimentellen Nachweis für die oben behauptete große Empfindlichkeit der Methode. Zugleich haben Sie das Prinzip des Verfahrens kennen gelernt, nach welchem man überhaupt den Emanationsgehalt einer Flüssigkeit bestimmt. Es ist nur noch nötig, dafür zu sorgen, daß die Luft beim Hindurchquirlen wirklich der Flüssigkeit die ganze in ihr enthaltene Emanation entzieht und unter den Topf schafft. Hierzu ist längeres Quirlen nötig. Man erreicht dies in der einfachsten Weise, indem man einen zweiten Gummischlauch (*s*) vom Topf zum Ansaugeventil des Gebläses führt und nun die unter dem Topf befindliche Luft beim Betrieb des Gebläses durch den einen Schlauch ansaugt, im Blasenstrom durch die Flüssigkeit preßt und hierauf durch den zweiten Schlauch unter den Topf zurückführt. So wird nach längerer Zirkulation die ganze Emanation (bis auf einen kleinen, berechenbaren Teilbetrag) der Flüssigkeit entnommen und unter den Topf geschafft und die jetzt vom Elektroskope in bestimmter Zeit fortgeführte Elektrizitätsmenge (die sich aus der Geschwindigkeit des Blättchenrückganges und der sogenannten elektrischen Kapazität der Anordnung berechnen läßt) gibt ein in einem weiten Bereich von der Versuchsanordnung unabhängiges Maß dieser Emanationsmenge. Aber auch zur genauen quantitativen Bestimmung der in einem Präparat oder Mineral enthaltenen Radiummenge läßt sich das Verfahren benützen. Allerdings ist es hiezu nötig, die betreffende Probe auf chemi-

schem Wege in Lösung zu bringen. Hat man dann diese Lösung in die Waschflasche gebracht, so wird das in ihr enthaltene Radium in bestimmter Zeit eine nach der geschilderten Methode bestimmbare Emanationsmenge liefern, aus der man auf die in der Lösung und damit auch auf die in der Probe befindliche Radiummenge zurückschließen kann, woferne man nur einmal bestimmt hat, wie groß die elektrische Wirkung der von einem Gramm oder Milligramm reinen Radiums in bestimmter Zeit abgesonderten Emanation ist.¹⁾

Auf diese Weise gelingt es, den Radiumgehalt in Substanzen nachzuweisen, ja quantitativ zu messen, die in festem Zustande, nach der hier zuerst demonstrierten Weise geprüft, überhaupt gar keine Radioaktivität zeigen würden.

Wir haben bereits erwähnt, daß die mit Radiumemanation versehene Luft nach und nach ihr Leitvermögen wieder verliert. Das deutet darauf hin, daß die Radiumemanation mit der Zeit verschwindet. Auch direkt hat man dieses Verschwinden nachweisen können, indem man einige Zehntelkubikmillimeter der Emanation in einem geteilten Haarröhrchen über Quecksilber auf-

¹⁾ Natürlich wird aber die von einer bestimmten Radiummenge auch nach sehr langer Zeit entwickelte Emanationsmenge über einen gewissen Grenzwert nicht hinausgehen. Dieser Grenzwert wird dadurch bestimmt sein, daß nach seiner Erreichung in der Sekunde ebensoviel Emanation verschwindet, als sich aus dem Radium nachentwickelt.

ging und nun tatsächlich die merkwürdige Erscheinung beobachtete, daß das Gas langsam, scheinbar spurlos verschwand, und zwar so, daß nach vier Tagen nur noch die Hälfte, nach weiteren vier Tagen nur ein Viertel der Anfangsmenge vorhanden war. Da aber nach einem wohl unumstößlichen Gesetze der Natur Masse nicht verschwinden kann, ohne in anderer Form wieder aufzutreten, so müssen wir erwarten, daß mit diesem Verschwinden der Emanation die Ausbildung irgendeiner anderen Substanz vor sich geht.

Machen wir zunächst das folgende Experiment:

Ich habe hier vorhin unter den über das Elektroskop gestülpten Topf emanationshaltige Luft gebracht. Hebe ich nun den Topf ab und blase ich ihn kräftig aus, so sollte man nach Wiederaufsetzen des Topfes erwarten, daß jetzt nach Entfernen der Emanation auch die gesteigerte Leitfähigkeit der Luft unter dem Topfe vollständig verschwunden ist. In der Tat sehen Sie ja auch, daß der Effekt in der früheren Stärke nicht mehr auftritt. Sehen sie aber genauer zu, so werden Sie mühelos bemerken, daß dennoch auch jetzt noch eine gesteigerte Leitfähigkeit vorhanden ist, zwar in geringerem Grade wie früher, aber doch deutlich wahrnehmbar. Es ist also auch noch nach dem Ausblasen der Emanation unter dem Topfe eine radioaktive Substanz vorhanden, deren Strahlung die Luft in leitfähigem Zustande erhält. Es läßt sich leicht konstatieren, daß der Ort, von dem jetzt die Strahlung ausgeht, also der Sitz der neuen radioaktiven Substanz die Wände des Behälters sind, in dem

die Emanation eingeschlossen war. Abreiben der Innenwand des Topfes, der Platte, auf welcher er steht, und der Kugel des Elektroskops läßt die Erscheinung aufhören. Das Gleiche ließe sich durch Abwaschen der Wände mit irgendeiner Säure erzielen. Indem also das Emanationsgas des Radiums von selbst verschwindet, so zwar, daß nach vier Tagen nur mehr die Hälfte vorhanden ist, schlägt sich aus ihm gleichzeitig an den Wänden des Raumes eine neue radioaktive Substanz nieder, der man den Namen Radiuminduktion gegeben hat. Dieses Niederschlagen an den Wänden erfolgt unter dem Einflusse elektrischer Kräfte, da nämlich die Atome der Radiuminduktion positiv elektrisch geladen sind. Dies läßt sich leicht nachweisen, wenn man in die emanationshaltige Luft einen negativ geladenen Körper bringt. Es zeigt sich dann, daß sich auf ihm nahezu die ganze Radiuminduktion anhäuft, eine Bemerkung, auf die wir später noch zurückkommen müssen.

Diese Radiuminduktion ist nun aber ebensowenig haltbar wie die Emanation selbst, vielmehr ist sie wie diese in fortwährender Umwandlung begriffen. Aus der ersten Radiuminduktion bildet sich sofort eine zweite und dritte, langsamer eine vierte, fünfte, sechste und siebente, ohne daß aller Wahrscheinlichkeit nach die Reihe hiemit beendet ist. Bemerkenswert ist, daß nur die Emanation gasförmiger Natur ist, die Induktionen sich hingegen alle wie feste Körper verhalten. Außerdem ist noch zu erwähnen, daß sich gleichzeitig mit

diesen Verwandlungen noch eine den Chemikern bereits lange vor der Entdeckung des Radiums bekannte Substanz einstellt, das Helium, ein seltenes, in den Ausbruchgasen der Vulkane und spurenweise auch in der atmosphärischen Luft nachgewiesenes Gas. Es ist wohl kaum mehr zu bezweifeln, daß wir in diesem bei allen radioaktiven Umwandlungen auftretenden Gas nichts anderes zu sehen haben als einen Teil, und zwar den größten Teil, der Strahlenträger, d. h. der abgeschleuderten Teilchen, deren Zusammenprall mit den Molekülen der Luft diese leitend macht. Die abgeschleuderten Teilchen sind also größtenteils nichts anderes als Heliumatome.

Ich kann es mir nicht versagen, ehe ich dieses Thema verlasse, auf die Umwälzung hinzuweisen, welche diese Forschungsergebnisse in den Grundanschauungen der Chemie hervorgebracht haben. Radium ist, wie schon erwähnt wurde, ein chemischer Grundstoff, ein sogenanntes Element. Es hat bestimmte chemische Eigenschaften, es hat ein bekanntes Atomgewicht und ein charakteristisches, bereits genau beobachtetes und ausgemessenes Spektrum. Ähnliches gilt für alle die Substanzen, die sich aus ihm bilden, vorzüglich für die Radiumemanation und das Helium. Wenn sich also vor unseren Augen Radium in Emanation und Helium verwandelt, so ist es prinzipiell dasselbe, als wenn sich Blei von selbst in Gold oder Silber von selbst in Kupfer verwandeln würde. Hier hat man also das erste Mal die Umwandlung chemischer Elemente ineinander beobachtet und hiedurch die prinzipielle Möglichkeit eröffnet, der-

einst das Ziel der Alchimisten, die Verwandlung unedler in edle Metalle, zu erreichen.

Freilich trennt uns von diesem Ziele vor allem noch der gewichtige Umstand, daß die bisher beobachteten Umwandlungen ohne unser Hinzutun und auch gegen unseren Willen vor sich gehen. Mit all unseren Behelfen, thermischen, chemischen, elektrischen und magnetischen Kräften sind wir, wenigstens gegenwärtig, nicht imstande, das Tempo dieser Umwandlungen zu beeinflussen oder sie gar rückgängig zu machen. Doch die prinzipielle Möglichkeit steht offen und daran ändert auch der Umstand nichts, daß wir gegenwärtig nur wenige Gramm Radium besitzen, noch dazu zerstreut in den Laboratorien der ganzen Welt und daß daher die Beobachtung der erwähnten Verwandlungen nur an minimalen Substanzmengen erfolgte.

Es ist klar, daß eine Substanz, die ein so merkwürdiges, alle bisherigen Erfahrungen durchbrechendes Verhalten zeigt wie Radium, neben ihrem hohen idealen wissenschaftlichen Wert bald auch einen bedeutenden Geldwert repräsentierte, besonders als mit ihr auch auf therapeutischem Gebiete Erfolge erzielt wurden. Wird doch gegenwärtig das Milligramm Radium mit etwa 600 K bezahlt, würde also das Gramm, wenn es überhaupt im Handel erhältlich wäre, einen Wert von 600.000 K repräsentieren.

Es ist daher begreiflich, daß man bald eifrig nach radiumhaltigen Gesteinen zu suchen begann. Eigentlich ohne nennenswerten praktischen Erfolg! Zwar stellte es

sich bald heraus, daß nicht nur das Uranpecherz, sondern auch alle anderen uranhaltigen Mineralien Radium führen, und zwar in einer Menge, die um so größer ist, je mehr Uran das Mineral enthält. Geht ja doch die gegenwärtige Ansicht dahin, daß das Radium selbst wieder aus dem Uran entsteht, so etwa wie die Radiuminduktion aus dem Radium. Damit war aber wenig gewonnen; denn diese anderen Uranmineralien sind noch weit seltener als das Uranpecherz.

Die Hauptfundstätte dieses Pecherzes ist aber noch immer das schon erwähnte Bergwerk zu St. Joachimstal geblieben, das bei einer jährlichen Förderung von ungefähr fünf Tonnen Erz es ermöglicht, im Jahre etwa zwei Gramm Radium zu gewinnen.

Hingegen gelang es den beiden deutschen Physikern Elster und Geitel auf Grund einer ganz anderen und eigenartigen Problemstellung, die nach aller Voraussicht gleichfalls zur Entdeckung des Radiums hätte führen müssen, den Nachweis zu liefern, daß Radium, allerdings nur spurenweise, in den meisten, ja vielleicht in allen Gesteins- und Erdarten enthalten ist. So wie Gold im Meerwasser oder Kochsalz überall im Erdboden nachgewiesen werden kann, lassen sich durch die oben geschilderte elektrische Methode auch überall Spuren von Radium nachweisen, ja quantitativ messen. Durch die Erhöhung der Leitfähigkeit der Luft, hervorgerufen durch die entwickelte Emanation, verraten sich Mengen von Radium, die selbst für die feinsten chemischen Wagen absolut unwägbar sind.

Die ausführlichsten Messungen hierüber haben neuerdings Strutt sowie Joly ausgeführt. Beide bedienten sich der Methode, deren Prinzip ich Ihnen früher demonstriert habe. Die Gesteinsprobe wurde aufgeschlossen, d. h. auf chemischem Wege zur Lösung gebracht, die in der Lösung in bestimmter Zeit entwickelte Emanationsmenge quantitativ gemessen und hieraus der Radiumgehalt berechnet. Bemerkenswert ist, daß nicht eine einzige natürliche Gesteins- oder Erdart gefunden wurde, deren Radiumgehalt so klein wäre, daß er sich nach der obigen Methode nicht hätte bestimmen lassen. Die folgende Tabelle gibt für je tausend Tonnen (eine Million Kilogramm) des betreffenden Materiales den Radiumgehalt in Tausendstel Gramm:

M a t e r i a l	Radiumgehalt pro 1000 t in Milligramm
1. Alte Eruptivgesteine (Granite, Syenite, Diorite)	2·9
2. Jüngere Eruptivgesteine (Basalte)	0·5
3. Sedimentärgesteine (Marmor, Kalke, Sandstein)	1·1

Im großen Durchschnitte läßt sich also sagen, daß je tausend Tonnen der gebirgsbildenden Gesteine ungefähr ein Milligramm Radium enthalten. Schätzen wir so-

mit die mittlere Dichtigkeit der Gesteine, welche die Erdoberfläche ausmachen, zu 2·5, d. h. machen wir die Annahme, daß sie $2\frac{1}{2}$ mal so schwer sind wie Wasser, so berechnet man, daß ein Gesteinswürfel von etwa 75 m Seitenlänge im Durchschnitt bereits ein ganzes Gramm Radium enthält. Das ist schließlich nicht gar so wenig! Doch ist natürlich an eine quantitative Ausbeute nicht zu denken, wie das ohneweiters aus der Bemerkung erhellt, daß die Konzentration des Radiums im Pecherz demgegenüber 400.000 mal so groß ist.

Aber nicht nur die festen Gesteine und deren Verwitterungsprodukte, die verschiedenen Erdarten und der Humus, enthalten Radium, auch im Meerwasser findet sich Radium in meßbarer Quantität. Freilich ist die Konzentration hier noch 50—100 mal geringer. Daß überhaupt Radium im Meerwasser deutlich nachweisbar ist, obwohl es in den dem Meere zufließenden Wassern nicht oder kaum nachgewiesen werden kann, ist nicht verwunderlich. Selbst bei ganz minutiösem Radiumgehalt des zufließenden Wassers, wie ihn dieses durch Auslaugen des Bodens im Quellgebiete erhält, muß ja doch infolge der beständigen Verdunstung des Wassers aus den Ozeanen sich das im Laufe der Jahrtausende zugeführte Radium dort nach und nach anhäufen und so zu weit größerer Konzentration kommen, als sie das zufließende Süßwasser aufweist.

Ganz ungeheuer groß sind die Zahlen, welche man für die in der Erde überhaupt vorhandene Radiummenge unter der unerwiesenen und, wie wir gleich hören werden,

unwahrscheinlichen Annahme erhält, daß das an der Erdoberfläche beobachtete Vorkommen des Radiums in gleicher Stärke für die tiefen und tiefsten Schichten der Erde besteht. Hienach wäre die Menge des in der Erde insgesamt vorhandenen Radiums nicht weniger als sechs Milliarden Tonnen. Da das Radium, wie ich hier bereits erwähnt habe, stets an seine Umgebung Wärme abgibt (indem nämlich die abgeschleuderten Teilchen die Körper, auf die sie treffen, so erhitzen wie Hammerschläge den Ambos), so würde das eine fortwährende, sehr beträchtliche Wärmeproduktion im Innern der Erde bedeuten. Denken wir uns z. B. diese sechs Milliarden Tonnen Radium in den Bodensee geworfen, so würden nach den sorgfältigen Messungen, die man über die Wärmeentwicklung des Radiums bereits ausgeführt hat, der ganze See von 42 Milliarden Kubikmeter Wasserinhalt innerhalb sechs Stunden ins Sieden kommen müssen.

Das hat die Frage nahegelegt, ob diese ungeheure Wärmeproduktion nicht ausreicht, um den beständigen Wärmeverlust der Erde in den Weltraum zu decken, ob nicht, mit anderen Worten, die Erdwärme vom Radium herrührt, statt von den Wärmeresten, die sich der Erdkörper nach der Kant-Laplaceschen Hypothese von einem früheren, feurigflüssigen Zustand her noch bewahrt haben soll.

Doch ist die Bejahung dieser Frage, wie sie bereits von mancher Seite erfolgt ist, mit Vorsicht aufzunehmen. Zwar unterliegt es keinem Zweifel, daß die berechnete Wärmeproduktion ausreichen würde, um den Wärme-

verlust der Erdoberfläche zu decken und die beobachtete Temperaturzunahme gegen das Innere der Erde zu erklären, auch mag man vielleicht gelten lassen, daß der ungeheure Druck, der im Innern der Erde herrscht, die Strahlung und damit die Wärmeproduktion des Radiums nicht verhindert — fraglich bleibt noch immer, ob der Radiumgehalt der oberen Erdkruste auch für die tiefen uns unzugänglichen Schichten vorausgesetzt werden darf. Es lassen sich gegen diese Voraussetzung eine ganze Reihe von Gründen vorbringen, von denen ich hier nur einen anführen will.

Bekanntlich sieht man in den Meteoriten, wie sie des öfteren auf die Erde fallen, die Bruchstücke zertrümmerter oder aufgelöster Weltkörper. Die Steinmeteore entsprechen der Schale, die Eisenmeteore dem Kern des Weltkörpers. Während nun der Radiumgehalt der Steinmeteore dem unserer Oberflächengesteine entspricht, ist für die Eisenmeteore ein Radiumgehalt überhaupt nicht nachweisbar.

So geht man denn vermutlich zu weit, wenn man die ganze Erdwärme auf das Radium als Ursache zurückführt. Doch kann man ebensowenig leugnen, daß in den oberen Schichten das Radium für den Wärmehaushalt der Erde von großer Bedeutung ist.

Wenn nun im Erdboden, soweit er uns zugänglich ist, überall minimale Spuren von Radium enthalten sind, so wird es nach dem früher Gesagten im voraus zu erwarten sein, daß sich dort auch alle diejenigen Substanzen vorfinden, in die das Radium sich selbsttätig

verwandelt, in erster Linie also seine Emanation. Da diese Emanation, wie auch schon erwähnt, die Eigenschaften eines Gases hat, so wird sie sich in der Luft vorfinden müssen, die überall im Erdboden in den kleinen Poren, Spalten und Hohlräumen, die den Grund durchsetzen, enthalten ist.

Schlägt man ein Rohr in den Boden ein und saugt durch dieses Rohr solche Bodenluft heraus, so zeigt sie ganz die Eigenschaften, welche Luft besitzt, die man mit Radiumemanation versetzt hat; sie hat also ein hohes elektrisches Leitvermögen, das sich mit der Zeit verliert, und zwar so, daß es in vier Tagen auf die Hälfte sinkt. Es ist übrigens leicht einzusehen, daß diese Eigenschaft nicht nur auf die in den Poren des Erdbodens enthaltene Luft beschränkt sein kann; es wird sich Radiumemanation vielmehr überall dort vorfinden, wo stagnierende Luft in inniger Berührung mit dem Erdboden steht, wie dies in den natürlichen Höhlen und in schlecht ventilierten Kellerräumen der Fall ist. War es ja doch sogar umgekehrt eben dieser Emanationsgehalt der Höhlen- und Kellerluft, durch den Elster und Geitel zuerst auf den Radiumgehalt des Erdbodens aufmerksam wurden. Auch ist es einleuchtend, daß der Emanationsgehalt dieser Luft in seiner Stärke vom Radiumgehalt des betreffenden Bodenmaterials abhängt und darum von Ort zu Ort andere Werte aufweist.

Aber nicht nur die im Erdboden enthaltene Luft, auch das in der Erde enthaltene und aus ihr strömende Wasser enthält Radiumemanation. Wir haben ja bereits

in unserem Experiment gesehen, daß Wasser Radiumemanation zu absorbieren, zu verschlucken vermag, so wie Wasser ja auch Luft oder Kohlensäure verschluckt. Auch dieser Emanationsgehalt wird im allgemeinen durch den Radiumgehalt des Bodens bedingt sein, aus dem das Wasser strömt. Doch ist hier dafür außerdem noch die Zeit maßgebend, während welcher das mit dem Regen in den Grund einsickernde Wasser in der Erde fließt, bis es in der Quelle zutage tritt. Die längste Laufzeit innerhalb des Erdbodens hat zweifellos das Wasser der Tiefquellen, der Thermen, und es kann darum nicht wundernehmen, wenn hier der Emanationsgehalt oft zu relativ bedeutenden Beträgen ansteigt. Freilich wird in den Thermen der Effekt der langen Laufzeit häufig durch die hohe Temperatur des Wassers mehr oder weniger kompensiert. So wie nämlich Wasser von niederer Temperatur z. B. mehr Kohlensäure zu verschlucken vermag wie solches von hoher, kann auch kaltes Wasser mehr Radiumemanation aufnehmen wie warmes und es ist darum nicht überraschend, daß innerhalb ein- und desselben Thermalgebietes die kalten Quellen in der Regel emanationsreicher sind als die warmen. So enthält z. B. der Karlsbader Sprudel nur minimale Mengen an Radiumemanation, während die am Rande des Quellenkomplexes gelegene kalte Eisenquelle am emanationsreichsten ist.

Hingegen scheinen diese heißen Quellen öfters die Fähigkeit zu besitzen, das in den Quellgängen spurenweise vorhandene Radium auszulaugen und dann in ihren Sedimenten abzulagern.

Hat man ja doch z. B. in Gastein, in allerdings sehr geringen Quantitäten, eine schlammige Ablagerung der Quelle gefunden, deren Radiumgehalt stellenweise den des Pecherzes übertrifft. Aus dieser Tatsache zu schließen, daß in den Tiefen, aus welchen die Quelle aufsteigt, abnorm radiumreiche Gesteine lagern oder gar, daß die tiefen Schichten der Erde radiumreicher sind als die hochgelegenen, wäre übereilt.

Wir sind genügend vorbereitet, um aus den bisherigen Tatsachen eine wichtige Konsequenz bezüglich der uns umgebenden Atmosphäre ableiten zu können. Wenn nämlich die Bodenluft Radiumemanation enthält, läßt es sich erwarten, daß auch die freie Atmosphäre, die ja mit der Bodenluft durch die Poren und Spalten der Erdoberfläche in Verbindung steht, Spuren von Emanation aufweist. Es wird hier, und zwar in erster Linie, schon der einfache Prozeß der Mischung, wie er stets zwischen zwei nebeneinander gelagerten Gasmassen eintritt und von den Chemikern als Diffusion bezeichnet wird, bewirken, daß Emanation heraus in die freie Luft gelangt.

Hiezu addiert sich die Wirkung aller Vorgänge, welche ein Ausströmen der emanationshaltigen Bodenluft in die Atmosphäre veranlassen. Wenn z. B. bei sinkendem Luftdruck, also bei fallendem Barometer, der auf der Bodenluft lastende Druck abnimmt, oder wenn das Erdreich durch die Sonnenstrahlen erwärmt wird, dann wird die Bodenluft sich ausdehnen und es atmen die Poren der Erdoberfläche emanationshaltige Luft in die Atmosphäre. Steigt dann der Luftdruck oder kühlt sich

während der Nacht das Erdreich wieder ab, dann dringt wohl emanationsarme Außenluft in den Boden ein; aber diese Luft wird sich aus dem im Bodenmaterial enthaltenen Radium wieder mit Emanation bereichern und die nächste Expansion, z. B. die Erwärmung des Bodens in den Mittagsstunden des nächsten Tages, trifft im Boden schon wieder emanationsreiche Luft.

So wirken Diffusion, Luftdruckschwankungen und die Erwärmung des Bodens durch die Sonne im gleichen Sinne: sie schaffen Emanation aus dem Erdboden heraus in die freie Atmosphäre. Wie der Rauch über einer Stadt oder wie der Staub an einem Sommertag, so sammelt sich, aus dem Boden aufsteigend, Emanation in den untersten Schichten der Atmosphäre, bleibt entweder bei Windstille an Ort und Stelle oder wird in dem weitaus häufigeren Falle, daß die Luft von Winden bewegt ist, durch die Luftströmungen rasch in horizontaler und an den Orten tiefen Luftdruckes auch in vertikaler Richtung verteilt. Vier Tage, nach deren Ablauf noch die Hälfte der Emanation vorhanden ist, sind Zeit genug, um sie in weitem Bezirke zu verteilen oder sie mehrere Kilometer hoch in die Lüfte zu tragen. Freilich verschwindet die in die Atmosphäre gelangte Emanation schließlich ganz, doch wird sie auch immer vom Erdboden aus nachgeliefert und so stellt sich ein Gleichgewichtszustand her, bei dem im großen Durchschnitt ebensoviel Emanation durch die geschilderten Prozesse aus dem Erdboden in die Atmosphäre tritt als in ihr verschwindet.

Das Vorhandensein von Emanation in der Atmosphäre wurde bereits auf verschiedenem, teils direktem, teils indirektem Wege nachgewiesen.

Der direkte Nachweis dieser natürlich sehr kleinen Emanationsmengen gelingt, indem man die atmosphärische Luft langsam durch ein in flüssiger Luft befindliches und dadurch auf -190°C gekühltes Metallrohr saugt. Da die Emanation schon bei -150°C kondensiert, so setzt sie sich hierbei als allerdings unsichtbarer Beschlag an der Innenwand des Metallrohres ab, ganz so, wie sich etwa Wasserdampf beim Behauchen einer kalten Glasplatte auf dieser in flüssiger Form niederschlägt. Nimmt man dann das Rohr aus der flüssigen Luft und bringt es auf Zimmertemperatur, so verdampft die Emanation wieder und es ist jetzt in dem kleinen im Rohr befindlichen Luftraume die ganze Emanationsmenge vorhanden, die vordem in dem großen Luftquantum enthalten war, das im ganzen durch das Rohr gesaugt wurde. Bläst man nun diese im Rohr enthaltene Luft unter den Topf unserer Versuchsanordnung, so läßt sich dank der erreichten Konzentration die Emanation genau so messen, wie wir früher die im Wasser angehäuften Emanation zu messen imstande waren.

Derartige Versuche haben ergeben, daß ein Kubikkilometer Luft, also ein Würfel Luft von einem Kilometer Seitenlänge im Durchschnitt ein Zehntel-Kubikmillimeter Emanation enthält, d. h. würden wir die im Kubikkilometer atmosphärischer Luft enthaltene Emanation sammeln, so erhielten wir ein Gasbläschen, kleiner

als den Kopf einer Stecknadel. Sie sehen daran wieder die Empfindlichkeit unserer elektrischen Methode.

Schon vor dieser direkten Nachweise hatten die früher genannten Forscher Elster und Geitel das Vorhandensein von Radiumemanation in der freien Luft auf indirektem Wege festgestellt, indem sie zeigten, daß sich in ihr die radioaktiven Stoffe vorfinden, in welche die Emanation sich verwandelt, also die Substanzen, welche man als Radiuminduktion bezeichnet. Sie werden sich vielleicht noch erinnern, daß ich früher erwähnte, daß die Atome dieser Radiuminduktion positiv elektrisch geladen sind. Dann ist es aber ein leichtes, sie aus der Luft zu sammeln. Es wird genügen, irgendeinen Körper frei in der Luft aufzustellen und ihn stark negativ zu laden, um zu bewirken, daß die positiv geladene Induktion durch die elektrischen Anziehungskräfte aus der den Körper umgebenden und mit dem Winde an ihm vorbeistreifenden Luft auf die Oberfläche des Körpers getrieben wird und sich dort absetzt. Elster und Geitel spannen also isoliert einen mehrere Meter langen Kupferdraht frei in der Luft aus und laden ihn durch Verbindung mit einer Elektrysiermaschine etwa eine Stunde lang stark negativ. Reibt man dann den Draht kräftig ab oder überwischt man ihn mit einem mit irgendeiner Säure befeuchteten Lappen, so ist jetzt auf dem Lappen die ganze aus der Atmosphäre gesammelte Induktion konzentriert und er hat durch einige Zeit alle Eigenschaften eines radioaktiven Körpers. Der Lappen vermag also z. B. die Luft in seiner Umgebung elektrisch leitend zu

machen, er vermag phosphoreszenzfähige Körper ins Leuchten zu bringen und er vermag die photographische Platte zu schwärzen. Natürlich verlieren sich aber diese Eigenschaften wieder in dem Maße, in dem die Radiuminduktion von selbst verschwindet. Schon in einer halben Stunde sinkt der Effekt ungefähr auf die Hälfte.

Aber nicht nur künstlich negativ geladene Körper beladen sich in der Atmosphäre mit Radiuminduktion. In geringem Maße tut dies auch die ganze Oberfläche der Erde. Die Untersuchungen über die atmosphärische Elektrizität haben nämlich schon seit langem gezeigt, daß bei normalem Wetter die Erdoberfläche gegen die Luft stets negativ elektrisch geladen ist. Nach den Grundgesetzen der Elektrizitätslehre ist diese Ladung auf allen hervorragenden Stellen wie Kanten, Spitzen u. dgl. am stärksten. Dort wird dann vorzüglich aus der Atmosphäre Radiuminduktion niedergeschlagen und stets immer wieder erneuert. So weisen denn die Bergspitzen, die Dächer unserer Häuser, die Baumwipfel, ja die Spitze jedes Grashalmes einen Belag von Radiuminduktion auf, der zwar weder gewogen, noch auch mit dem feinsten Mikroskope gesehen werden kann, der sich uns aber doch durch seine Einwirkung auf das Elektroskop verrät.

Und noch einen Faktor gibt es, der, allerdings nur zeitweise, die in der Luft schwebende, aus der Emanation sich bildende Radiuminduktion zur Erde schafft. Es sind dies die wässerigen Niederschläge, also der Regen und der Schnee. Beim Falle der Regentropfen durch die Luft reißen diese nicht nur allen Staub mit, den sie

auf ihrem Wege treffen, sondern ebenso auch alle Induktionsteilchen. So sind denn frischgefallener Regen und Schnee infolge ihres Gehaltes an Radiuminduktion ebenfalls vorübergehend radioaktiv.

Fragen wir nun schließlich noch nach der Bedeutung aller dieser Tatsachen für den elektrischen Zustand der Atmosphäre.

Sie werden sich an meine Bemerkung erinnern, daß das geladene Elektroskop, falls ich ihm alle radioaktiven Substanzen fernhalte, seine Ladung durch lange Zeit behält. Hiemit habe ich bereits zugegeben, daß diese Ladung schließlich doch, wenn auch langsam, verschwindet; die ausgespreizten Blättchen des Elektroskops fallen auch ohne Hinzubringen von Radium oder eines seiner Produkte langsam wieder zusammen. Es hat also die Luft, in der wir leben, von Natur aus eine gewisse, wenn auch sehr geringe elektrische Leitfähigkeit und das Vorhandensein dieser sogenannten natürlichen Leitfähigkeit der Luft und deren Gesetze waren ein Rätsel, an dessen Lösung sich die Physiker seit Coulombs Zeiten vergebens mühten. Wohl glaubte man eine Zeitlang, daß es der in der Luft vorhandene Wasserdampf sei, welcher die Ladung entführe; später schrieb man dann diese Rolle dem Staub zu, doch wurden alle diese Hypothesen durch den Nachweis hinfällig, daß trockene und staubfreie Luft ebenso gut, ja besser leitet wie feuchte oder staubige.

Des Rätsels Lösung ist die Allgegenwart der radioaktiven Substanzen! Aus den obersten Schichten der Erde, aus den Wänden, vor allen den Ziegelmauern un-

serer Häuser durchdringen die Strahlen des dort spurenweise vorhandenen Radiums die Luft. Vom First unserer Dächer, von den Wipfeln der Bäume sendet die dort abgelagerte Induktion ihre Strahlen. Vor allem aber sind es die Strahlen der der Luft selbst zugemischten Radiumemanation und der in ihr schwebenden Induktionen, welche beständig die Luft ionisieren und dadurch in schwach leitendem Zustande erhalten. Hat man doch sogar zeigen können, daß die Intensität dieser Strahlungen und die beobachtete natürliche Leitfähigkeit quantitativ miteinander völlig im Einklang stehen.

So ist denn der elektrische Zustand unserer Atmosphäre ursächlich und in enger Weise mit dem Vorkommen des Radiums und seiner Produkte in der Erde und in der Luft verknüpft. Die Schwankungen dieses Zustandes mit der Wetterlage erklären sich in erster Linie durch die Änderungen, welche hiebei der Gehalt der Atmosphäre an radioaktiven Substanzen, also an Emanation und Induktion erfährt, und auch die gewaltigen Erscheinungen des Blitzes und des Nordlichtes, die mächtigsten Äußerungen der atmosphärischen Elektrizität, erblicken wir hiedurch in völlig neuem Lichte.

Der Vollständigkeit halber zum Schlusse noch eine Bemerkung:

Die Radiumreihe enthält keineswegs alle überhaupt bekannten radioaktiven Substanzen. Außer der des Radiums kennen wir noch zwei andere Reihen radioaktiver

Substanzen, in denen sich ebenfalls jedes Glied aus dem vorhergehenden entwickelt, nämlich die Thorium- und die Aktiniumreihe. Beide Reihen enthalten ebenfalls je ein gasförmiges Produkt, eine Emanation. Während aber die Radiumemanation vier Tage braucht, um bis zur Hälfte zu verschwinden, tritt dies bei Thoriumemanation bereits nach einer Minute, bei Aktiniumemanation gar schon nach vier Sekunden ein.

Obwohl nun nachgewiesen wurde, daß das Thorium spurenweise ebenso allgemein verbreitet ist wie Radium und das gleiche vermutlich auch für das Aktinium gelten dürfte, kommen doch diese Substanzen wegen der Kurzlebigkeit ihrer Emanationen wenigstens was die Leitfähigkeit der Atmosphäre anlangt, erst in zweiter Linie in Betracht.
