

Neuere Ergebnisse der radioaktiven Forschung.

Von

Prof. Dr. Stefan Meyer.

Vortrag, gehalten den 13. Februar 1918.

(Mit einer Abbildung und 4 Tabellen.)



Es ist jetzt über zwei Jahrzehnte her, seit die ersten radioaktiven Substanzen und ihre wunderbaren Eigenschaften entdeckt worden sind, und da wollen wir einmal überblicken, was aus den Forschungen über Radioaktivität bereits unter den wichtigsten prinzipiellen Erkenntnissen als gesichert gebucht werden darf, was wir an tieferen Einblicken in die Natur dadurch gewonnen haben und welche allgemeineren Ausblicke sich darbieten. Freilich können wir hier nur wenige Punkte herausgreifen.

Man hatte erkannt, daß einige chemische Grundstoffe wie Uran, Thor, Radium beständig und scheinbar in unverändertem Ausmaße Strahlen aussenden, das heißt positive und negative geladene Korpuskeln emittieren und auch eine Art Röntgenstrahlen veranlassen; es galt, diese kontinuierliche Abgabe von Energie und Masse zu erklären, und man kam zu der Auffassung, daß es sich hier um den allmählichen Verlust der in den Atomen der genannten Elemente von Ursprung her aufgespeicherten Energie und den Abbau der zerfallenden Atome handeln müsse. Damit war die Frage nach der Konstitution der Atome selbst

aufgeworfen, die Frage, wie solche kleinste Teilchen der Materie beschaffen sein mögen, damit wir uns ein Bild der Erscheinungen machen können.

Bis dahin hatte man unter einem „Atom“ das kleinste durch physikalische oder chemische Methoden erzielbare Bruchstück eines Grundstoffes gekennzeichnet. Allerdings als ganz starre unveränderliche Masse durfte man es nicht ansehen, denn in den komplizierten optischen, elektromagnetischen Eigenschaften, speziell beispielsweise in den vielerlei Schwingungsformen, die sich im Spektrum eines Elementes äußern, lag ja schon der Hinweis dafür, daß der innere Aufbau eines Atomes noch ein recht mannigfaltiger sein müßte. Aber doch ist die Unteilbarkeit des „Atoms“ als bloße Vorstellung einer „Grenzgröße“ für den Inbegriff aller bekannten spezifischen physikalischen und chemischen Eigenschaften des betreffenden Elementes erst eine Erkenntnis der letzten Zeit. Meines Wissens hat G. Jäger diese Definition als erster gebraucht. (Salzburger Hochschulkurse 1906.) Wie, wenn man die Bevölkerung eines Landes oder ein Heer, einen Wald, eine Bibliothek durch Unterteilung zerlegt und immer wieder beispielsweise Deutsche, oder Soldaten, Bäume, Bücher erhält, und erst, wenn man bei fortgesetzter Teilung bei einem Individuum angelangt ist und noch weiter teilen will, plötzlich alle gemeinsamen Kennzeichen verloren gehen und in einzelnen Knochen, Haaren usw., in Rinde und Blättern, in Papierfetzen und Fasern

usw. sich ganz Wesensungleiches findet, nur so gilt uns heute das Atom als kleinstes Individuum seiner Art, das unveränderlich bleibt solange eben jene Grenzgröße der Teilung nicht unterschritten wird.

Der Gedanke, daß die einzelnen chemischen Grundstoffe selbst wieder aus gemeinsamen Uratomen aufgebaut seien, ist ein recht alter. Besonders durch die Aufstellung des sogenannten „periodischen Systems der Elemente“ durch Mendelejeff und Lothar Meyer wurde ein Zusammenhang der Elemente untereinander wahrscheinlich gemacht, also ein Hinweis auf einen oder mehrere noch kleinere gemeinsame Bausteine gegeben und es hatten sogar schon zu Beginn des 19. Jahrhunderts W. Prout und J. L. G. Meinecke im Hinblick auf die nahezu erfüllte Ganzzahligkeit der meisten Atomgewichte für Wasserstoff als Basis eben den Wasserstoff als gemeinsamen Urstoff aufgefaßt. Aber trotz zahlreicher Spekulationen und Versuche, Zahlenbeziehungen aufzustellen, war man nicht recht weitergekommen. Das periodische System in der üblichen Schreibart sei als bekannt vorausgesetzt.

Tabelle I bringt eine kleine Abänderung, indem die sogenannten großen Perioden in je einer Zeile ausgeschrieben sind; außerdem deutet die wechselnde Breite des Rahmens für jedes Element die periodische Veränderlichkeit des Atomvolumens und der zahlreichen damit verknüpften Eigenschaften an.

Tabelle II unterscheidet sich von Tabelle I dadurch, daß, während in letzterer die Minima der Atom-

Tabelle I.

Perioden-System der Elemente

1	1000										0																																																																																				
	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85																																																																																					
2	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
3	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Die Elementen sind von der 1. Periode (oben) nach unten geordnet.

2. Periode: 2 Elemente
3. Periode: 8 Elemente
4. Periode: 18 Elemente
5. Periode: 32 Elemente
6. Periode: 50 Elemente
7. Periode: 72 Elemente

Die Elemente sind von der 1. Periode (oben) nach unten geordnet.

Die Elemente sind von der 1. Periode (oben) nach unten geordnet.

volumina in die Mitte fallen, hier die Maxima in die Mitte verlegt sind. Die letzte Anordnung trägt besonders den Anschauungen Rechnung, die Kossel neuerdings vertreten hat.

In den Tabellen II und III sind die „Ordnungszahlen“, welche den positiven Kernladungen (in Elementarquanten gezählt) entsprechen, eingetragen.

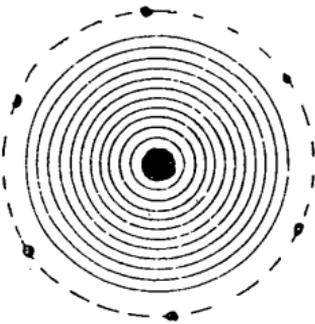
Die Auffindung der radioaktiven Elemente brachte nun neue Gesichtspunkte. In diesen wunderbaren Stoffen wird uns unmittelbar das Werden und Vergehen von Elementen offenbart, wir können es geradezu sehend verfolgen, wie bislang als unveränderlich gegoltene Urstoffe explosionsartig unter Ausschleuderung von Partikeln (von der Masse des Heliumatoms) sich zu einem neuen Element umbilden. Wir erkennen die enorme Lebhaftigkeit der intraatomistischen Bewegungen, die unter Umständen dermaßen groß werden kann, daß Umlagerungen im Atomgefüge selbst in stabilere Innenanordnungen seiner Teilchen vor sich gehen, ja, daß Bruchstücke des Atoms dessen Verband verlassen und zu Neugestaltungen Veranlassung geben.

Man wurde zu der Vorstellung gedrängt, daß die Atome aufgebaut zu denken seien aus elektrisch positiv geladenen Massenkernen, deren Durchmesser nur von der Größenordnung 10^{-13} cm ist, die in kreisenden Ringen von Durchmessern, die bis etwa 10^{-8} cm reichen, von kleinsten negativ geladenen Teilchen, sogenannten Elektronen umgeben sind. Mikrokosmos

und Makrokosmos berühren sich hier; wir kommen zu Bildern, die entschiedene Verwandtschaft zeigen mit der Art, wie wir beispielsweise unser Sonnensystem mit den den Zentralkörper umkreisenden Planeten sehen. Die in den Tabellen I und II angeführten „Ordnungszahlen“ geben die Größe der in den Atomkernen angesammelt gedachten positiven Elementarladungen an. Da für gewöhnlich ein Atom elektrisch neutral ist, müssen ebensoviele negative Elementarladungen als Elektronen vorhanden angenommen werden; wie und in wieviel Ringen die Verteilung der letzteren, insbesondere bei Atomen mit größeren Zahlen zu denken sei, darüber tappt man noch im Dunkel, aber immerhin darf angenommen werden, daß im äußersten Ring ebensoviel Elektronen sich vorfinden, als dies der chemischen Wertigkeit entspricht; also beispielsweise bei Uran 6, bei Thor 4, bei Radium 2 und so fort.

Denken wir uns nun z. B. ein Uranatom. Es habe einen positiven Kern mit 92 Elementarladungen und sei irgendwie von Elektronenringen umkreist, in deren äußerstem 6 Elektronen angeordnet gedacht werden. Wir wissen, es sendet positive — sogenannte α -Strahlen — aus. Jedes α -Teilchen ist ein mit zwei positiven Ladungen behaftetes, oder besser zweier negativer Ladungen beraubtes Heliumatom. Wir müssen annehmen, wenn ein Uranatom zerfällt, das heißt, die Vorgänge in seinem Inneren derart turbulent geworden sind, daß es explodiert, daß dann aus dem Kern eine

α -Partikel ausgeschleudert wird. Damit das neuentstehende Atom wieder neutral sei, müssen auch zwei negative Ladungen verloren gehen und da zeigt es sich, daß diese letzteren offenbar dem äußersten Elektronenring entnommen werden, denn das so aus dem Uranatom entstehende neue chemische Atom — wir nennen es UX_1 — ist nicht mehr sechswertig, sondern nur mehr vierwertig; es hat im periodischen System



Schematisches Modell des Uranatoms ohne Berücksichtigung der wirklichen Größenverhältnisse.

der Elemente sich um zwei Schritte nach links begeben. UX_1 ist ein sogenannter β -Strahler, das heißt, es sendet nicht wie Uran selbst positive Korpuskeln, sondern Elektronen, das sind mit einer negativen Einheitsladung behaftete Teilchen. Wiederum müssen wir annehmen, daß beim Instabilwerden des

Gefüges dieses UX_1 -Atomes die innersten Vorgänge maßgeblich sind und daher, daß das beim Zerfall herausfliegende Teilchen dem Kern entstamme. Damit nun das daraus entstehende neuartige Atom — wir nennen es UX_2 — wiederum neutral werde, muß es aus der Umgebung ein Elektron aufnehmen, und wir haben uns vorzustellen, daß dieses angesogene Elektron im äußersten Elektronenring Platz habe, wo sich dann also fünf Elektronen befinden; das neue Element ist demnach fünfwertig geworden, im periodischen

System hat es einen Ort einzunehmen, der einen Schritt rechts von dem des UX_1 steht.

Betrachten wir nun die ganzen radioaktiven Zerfallsreihen Tabelle III und ordnen wir die einzelnen Stoffe, je nachdem sie α - oder β -strahlend sind, nach dem angedeuteten Prinzip, so ergibt sich Tabelle IV, welche die sogenannten Verschiebungsregeln (Russell, Fajans, Soddy) der ganzen Verwandlungsfolgen enthält.

Wie man sieht, kommt es dabei öfters vor, daß Elemente in die gleiche (römisch bezeichnete) Gruppe zurückkehren, aus der ihre Vorfahren stammten; da sie also an derselben Stelle im periodischen System stehen, nennt man sie „isotop“. Wodurch unterscheiden sich nun solche isotope Stoffe? Betrachten wir U_I und U_{II} an der Hand der Figur. Bei der ersten Umwandlung (α) findet der Übergang vom sechswertigen in den vierwertigen Zustand statt; bei der nächsten (β) zurück in den fünfwertigen, bei der folgenden (β) zurück in den sechswertigen. Nun sind wieder alle Elektronen kongruent gleich angeordnet wie im ersten Zustand (U_I). Alle physikalischen und chemischen Eigenschaften, die nur von der Anordnung der Elektronen abhängig sind, also alle optischen, elektrischen, magnetischen, chemisch-analytischen werden daher für U_{II} und U_I durchaus die gleichen sein, man kann sie nach den üblichen Methoden, etwa durch Beobachtung des Spektrums oder analytisch-chemische Indikationen in keiner Weise unterscheiden. Einmal gemischt, vermag kein Chemiker, auch nicht mit dem Aufwand

Tabelle III.

Uran-Radium-Familie. - U. Staffeln	Actinium-Familie. A. Staffeln	Thorium-Familie Th. Staffeln
Uran I 5.10 ^a α	Uran? y	Thorium ca 10 ¹⁰ α
Uran X? β	Actinium	Thoriothor 1 5.5 ^a α β
Uran X (Thorium) 660 β γ	Radioactinium	Thoriothor 2 6.24 β γ
Uran II ca 2.10 ^a α	Actinium X	Thoriothor 2.0 ^a α β
Uran y ca 25.5 h β	Actinium emanation	Thorium X 3.64 d α
Thorium ca 10 ¹⁰ α	Actinium emanation	Actinium emanation 54.5 ^a α
Radium 1750 α α β	Actinium A	Actinium A 0.14 c α
Actinium emanation 385 d α	Actinium B	Actinium B 40.6 h β γ
Actinium A 3.05 m α	Actinium C	Actinium C 30.4 m α β
Actinium B 268 m β γ	Actinium C	Actinium C β: 65%
Actinium C 195 m α β γ	Actinium C	Actinium C α: 35%
Actinium C β: 0.05%	Actinium C	Actinium C α: 35%
Actinium C ca 10 ¹⁰ α	Actinium D	Actinium D 3.1 m β γ
Actinium C 1.58 m. β	Actinium D	Actinium D β: 50% α: 50%
Actinium D? ca 16 α β γ	Actinium D	Actinium D β: 50% α: 50%
Actinium E 4.85 d β γ	Actinium E	Actinium E β: 50% α: 50%
Actinium F (Thorium) 136 d α	Actinium E	Actinium E β: 50% α: 50%
Actinium G (Bismut) -	Actinium E	Actinium E β: 50% α: 50%

Actinium-Familie: α: 1.58 m. β: 1.58 m. γ: 1.58 m. δ: 1.58 m. ε: 1.58 m. ζ: 1.58 m. η: 1.58 m. θ: 1.58 m. ι: 1.58 m. κ: 1.58 m. λ: 1.58 m. μ: 1.58 m. ν: 1.58 m. ξ: 1.58 m. ο: 1.58 m. π: 1.58 m. ρ: 1.58 m. σ: 1.58 m. τ: 1.58 m. υ: 1.58 m. φ: 1.58 m. χ: 1.58 m. ψ: 1.58 m. ω: 1.58 m. Ω: 1.58 m.

größter Sorgfalt derartige isotope Stoffe jemals wieder zu trennen. Ihre einzigen Unterschiede bestehen in ihrer Stabilität (Radioaktivität) und im Atomgewicht und Eigenschaften, die unmittelbar mit diesem zusammenhängen; denn U_I hat ja eine α -Partikel abgegeben — die β -Partikel kommen für Massenfragen nicht in Betracht —, das heißt ein Heliumatom mit der Atomgewichtsmasse 4; das entstehende Atom hat also nicht mehr die relative Masse 238, sondern nur mehr 234.

Während man bishin das Verbindungsgewicht und das daraus erschlossene Atomgewicht eines Grundstoffes für sein bestes und sicherstes Kennzeichen gehalten hatte, mußte diese Zahl als Charakteristik viel an Bedeutung verlieren und wird ersetzt durch die Kernladung oder „Ordnungszahl“. U_I und U_{II} beispielsweise haben die gleiche Kernladungszahl 92, aber verschiedene Atomgewichte (238 und 234); Bleiarten kennen wir sogar sechs mit den Atomgewichten 214, 212, 210, 208, 207, 206, die aber alle dieselbe Kernladungszahl 82 besitzen; ohne Atomgewichtsbestimmung oder Beobachtung des Zerfalles ist niemand imstande, aus sonstigen Eigenschaften sie zu unterscheiden, und wenn die Natur oder ein Bösewicht absichtlich von den verschiedenen Arten, beispielsweise solche vom Atomgewicht 208 und 206, zu gleichen Teilen zusammenmischen wollte, so könnte auch niemand diese Mischung von einer einheitlichen Bleiart (der gewöhnlich vorkommenden) vom wahren

Atomgewicht jedes Einzelatomes 207 unterscheiden. Dies verlangt aber offenbar eine Revision der bisherigen Definition eines Elementes, denn der Satz von der Unerschaffbarkeit und Unzerstörbarkeit der Elemente müßte aufgegeben werden und die Zahl der chemischen Grundstoffe würde unbegrenzt groß, wenn alle möglichen Mischungen isotoper Stoffe in verschiedenem Perzentsatz vorgenommen würden und niemand sie mehr trennen könnte, das heißt ein Element nur als ein Stoff gekennzeichnet bliebe, der durch kein chemisches Verfahren in einfachere zerlegt werden kann. Wir müssen also ergänzen, daß Stoffe, die dieser Definition genügen, auch dann als ein und dasselbe Element anzusehen sind, wenn sie, einmal miteinander gemischt, durch kein chemisches Verfahren wieder getrennt werden können. Die verschiedenen Isotope werden dann zweckmäßig als verschiedene Arten desselben Elementes betrachtet (F. Paneth). Wir hätten dann etwa die Gattungen Uran, Thor, Blei ähnlich zu beurteilen wie beispielsweise Mensch, Pferd, Hund und die Isotope oder Arten dieser Elemente ließen sich vergleichen mit Weißen, Negern, Mongolen etc., beziehungsweise den verschiedenen Pferdearten und Hunderassen.

Wir haben davon gesprochen, daß wir uns die radioaktiven Wirkungen dadurch zustande gekommen denken, daß von den betreffenden Elementen einzelne Atome instabil werden und explodieren; Bruchstücke, Heliumatome und Elektronen, verlassen das ursprüng-

liche Gefüge und was übrig bleibt, ist ein neues Element. Ist die Neuordnung selbst auch nicht ganz stabil, so wird das Spiel sich wiederholen und eine Weiterverwandlung stattfinden und derart entstehen ganze Verwandlungsreihen, wie sie in Tabelle III angegeben sind. Natürlich zerfallen dabei aber nicht etwa alle Atome einer Art, z. B. von U_I , gleichzeitig, sondern immer nur im Verhältnis zur Gesamtzahl einige wenige und da wir es bei den Atomzahlen immer mit ganz enorm großen Werten zu tun haben, gelten dafür die Wahrscheinlichkeitsgesetze, welche für große Zahlen erkannt sind. Das Maß für die Zerfallswahrscheinlichkeit ist gegeben durch die Zahl der in der Zeiteinheit zerfallenden Atome im Verhältnis zur Zahl der vorhandenen Atome. Beispielsweise zerfallen von 1 Gramm Uran I pro Jahr $3,62 \cdot 10^{11}$ Atome, während im ganzen 1 Gramm Uran I $2,55 \cdot 10^{21}$ Atome enthält. Diese Zerfallswahrscheinlichkeit oder „Zerfallskonstante“ ist für jede radioaktive Substanz verschieden und ein für den betreffenden Stoff charakteristisches Merkmal. Statt ihrer kann man ein leicht daraus berechenbares anderes anschauliches Charakteristikum angeben, nämlich die Zeit, die verfließen muß, damit jeweils gerade die Hälfte der zu einem bestimmten Anfangspunkt vorhanden gewesenen Atome zerfällt, die andere Hälfte noch unverändert vorhanden ist; man nennt diese Zahl die „Halbierungskonstante“ oder „Halbwertszeit“ T . Sie ist in der Tabelle III in der zweiten Kolumne angegeben und

man sieht, daß sie Werte zwischen $1,8 \cdot 10^{10}$ Jahre = $5,7 \cdot 10^{17}$ Sekunden bei Thor bis herunter zu 10^{-11} Sekunden bei ThC' enthält, daß also die Stabilität der verschiedenen radioaktiven Substanzen innerhalb des unvorstellbar großen Intervalles von mehr als 10^{28} Sekunden variiert. Diese Konstante ist durch keinerlei physikalische oder chemische Beeinflussung veränderbar, das heißt der Zerfall der radioaktiven Substanzen kann durch äußere Mittel nicht beeinflußt werden. Daraus aber können wir nun umgekehrt ein neuartiges Zeitmaß ableiten, zum Beispiel für Epochen von der Größenordnung der Zerfallszeit des Uran, das heißt vieler Millionen Jahre, und insbesondere auch für geologische Entwicklungszeiten und die Frage nach dem Alter unserer Erde. Man erhält so gleichermaßen eine „geologische Uhr“.

Bis dahin hatte man das Alter der Erde hauptsächlich aus dem Wärmehaushalt zu berechnen getrachtet. Wenn eine bestimmte Menge Wärme von der Sonne eingestrahlt, eine andere von der Erde beständig an den Weltraum abgeführt wird, so ließ sich aus der allmählichen Abkühlung umgekehrt zurückrechnen, wann unser Erdball in feuerflüssigem Zustand gewesen sein müßte, um jetzt auf dem dormaligen angelangt zu sein. Leider hat gerade die radioaktive Forschung diesen Berechnungen die Grundlagen entzogen. Bei jedem radioaktiven Zerfall, bei jeder Explosion, wird nämlich Wärme erzeugt und die Mengen radioaktiver Stoffe, die man in der Erd-

kruste anzunehmen hat, reichen aus, nicht nur den Wärmeausfall durch die Ausstrahlung der Erde gegenüber der Einstrahlung wettzumachen, sondern es könnte sogar ohne weiteres ein langsames Erwärmen der Erde in geologischen Zeiträumen verständlich werden. Während aber so die Radioaktivität ein altes Lehrgebäude zum Einsturz brachte, war sie gerade imstande, an eben dieser Stelle Ersatz zu liefern, der auf besser gesicherten Fundamenten steht.

Ehe ich aber darauf eingehe, möchte ich einige dazu verwendbare Wirkungen der radioaktiven Substanzen vorführen, nämlich charakteristische Erscheinungen der Verfärbung und der damit zusammenhängenden der Lumineszenz.

[Es wurde demonstriert:

- I. Violett und braun verfärbte Gläser; schlierenförmig braun verfärbter Quarz (Rauchquarz und Amethyst); aus hellgrün dunkelblau verfärbter Flußspat (natürlicher hellgrüner Flußspat mit violetten Spitzen, erklärt durch lange Einwirkung von im Innern der Druse befindlichen Spuren radioaktiver Substanz); aus rosa in grün verfärbter Kunzit und seine Rückfärbung im Bogenlampenlicht; aus blau in topasgelb verfärbter Saphir; bernsteingelb verfärbtes Steinsalz; u. dgl.
- II. Lumineszenz von Diamant (blaues Licht); Willemit (grün); Kunzit (rosa); Salipyrin (violettblau); Röntgenschild (gelbgrün); Sidotblendenschild

(weißlich) und sein Nachleuchten (Phosphoreszieren); Nachleuchten von Doppelspat u. dgl.

III. Thermolumineszenz von verfärbtem Glas (grün); Quarz (blauviolett); Flußspat (blau); Kunzit (rosa) etc.]

Derartige Verfärbungen werden sowohl durch α -, wie durch β -Strahlungen hervorgebracht und bei den Lumineszenzwirkungen müssen wir uns vorstellen, daß durch Licht oder Wärme die infolge der vorhergehenden Bestrahlung irgendwie eingelagerten Elektronen wieder freigemacht werden und beim Verlassen ihrer Lagen und Einnahme neuer Lichtphänomene auftreten.

Die Wirkung der durchdringlicheren Strahlen (β - und aus γ - entstehende β -Strahlen) geht dabei bis ins Innere der ganzen Masse; die α -Strahlen hingegen haben nur eine sehr kleine Wirkungstiefe. Die α -Partikeln fliegen zwar mit enormer Geschwindigkeit (etwa $\frac{1}{10}$ der Lichtgeschwindigkeit, also rund 10000 km/sec) aus den zerfallenden Atomen heraus, und zwar mit um so größerer, je weniger stabil, das heißt also je kürzerlebig die betreffende α -strahlende Substanz ist, aber ihre Geschwindigkeit wird beim Durchheilen der zu passierenden Materie rasch abgebremst und wenn sie auf ein bestimmtes Maß ($6,3 \cdot 10^8$ cm/sec) herabgesetzt ist, dann hören plötzlich die radioaktiven und damit zusammenhängenden Wirkungen auf. Man nennt diese kurze Strecke, welche die α -Teilchen durchfliegen, ihre Reichweite; sie ist von α -Strahler

zu α -Strahler verschieden und für die jeweilige Substanz eine charakteristische Größe. In Luft beträgt sie einige Zentimeter; in festen Stoffen wie Glimmer und dergleichen ist diese Reichweite für Uran I etwa 0.013 mm, für RaC 0.033 mm, für ThC' 0.04 mm. Nun findet man zuweilen in der Natur, speziell in Glimmerarten, Biotit und verwandten Mineralien bei mikroskopischer Betrachtung von Dünnschliffen Gebilde konzentrischer Ringe, die sogenannten „pleochroitischen Höfe“, von denen sich jetzt nachweisen läßt, daß sie tatsächlich dadurch entstanden sind, daß ein winziges Körnchen radioaktiver Substanz im Zentrum vorhanden war. Im Laufe sehr langer Zeiten haben die α -Teilchen verschiedener Reichweite, die von diesem Zentrum ausgeschleudert worden sind, die Verfärbung hervorgebracht. Kennt man daher aus Messungen die Menge radioaktiver Substanz, die notwendig ist, um in einer bestimmten Zeit eine deutliche Verfärbung zu erzielen, und läßt sich bestimmen, wieviel Radium im Zentrum der pleochroitischen Höfe wirklich vorhanden ist, so läßt sich daraus schließen, wieviel Zeit mindestens vergangen sein muß, damit das vorgefundene Gebilde entstehen konnte. So wurde für Biotitproben des „unteren Devon“ ein Alter von etwa 400 Millionen Jahren errechnet.

Wenn wir das Tempo des Zerfalls einer Stammsubstanz gut kennen und stabile Produkte, die daraus entstehen, quantitativ gesammelt werden, so liefert dies aber noch genauere Altersbestimmungen. Solche

stabile Produkte, die beim Zerfall der Atome entstehen, sind nun einerseits das Helium, das sich bei der Neutralisation der α -Teilchen ergibt, andererseits sind es in allen drei Zerfallsfamilien bleiartige Endprodukte, das RaG für die Uran-Radiumfamilie, mit dem Atomgewicht 206; das AcD für die Actiniumfamilie und das ThD für die Thoriumreihe. RaG, AcD und ThD sind, wie schon besprochen, isotope Bleiarten; bei der Analyse eines Erzes werden sie vom Chemiker als „Blei“ gefunden.

Beide genannten Wege, die Bestimmung des Heliumgehaltes alter Erze radioaktiver Stoffe sowie die quantitative Betrachtung des Bleigehaltes, wurden mit Erfolg besritten. An Helium entsteht soviel, als α -Partikeln ausgesendet werden; haben wir Uran im Gleichgewicht mit allen seinen Folgeprodukten, so sind es im ganzen acht α -Strahler, und da man die Zerfallskonstante des Uran, das heißt die Zahl der in der Sekunde zerfallenden Atome kennt, die gleich ist der Zahl der ausgesandten α -Partikeln, so läßt sich berechnen, wieviel Helium in der Sekunde oder im Jahre entstehen müßte. Man findet, daß zur Aufsammung von 1 cm³ aus 1 Gramm Uran (samt seinen Folgeprodukten) rund 10 Millionen Jahre erforderlich sind. Nimmt man an, daß alles entstandene Helium im Erz okkludiert bleibt, so würde also, wenn sich in einem Erz zu 1 g Uran 1 cm³ Helium fände, auf ein Alter von 10⁷ Jahren zu schließen sein, bei 10 cm³ auf 10⁸ Jahre usw. Tatsächlich kann aber

nicht erwartet werden, daß das gesamte in so langen Zeitläufen entstandene Heliumgas wirklich im Erz quantitativ eingeschlossen bleibe; es ist vielmehr anzunehmen, daß es teilweise entweichen kann; man wird also im allgemeinen weniger Gas vorfinden, als aus dem radioaktiven Zerfall im ganzen entstanden war; dann aber wird man aus den noch gefundenen Mengen auf zu kleines Alter des Mineralen schließen; das heißt, die Altersbestimmungen der Mineralien nach dieser Heliummethode müssen durchwegs als Minimalwerte angesehen werden. Beispielsweise fand man in Zirkonen aus der geologischen Epoche des Devon pro Gramm des Mineralen etwa 5 bis 12 cm³ Helium, was nach dem Gesagten einem Mindestalter von rund 50 bis 120 Millionen Jahren entspricht.

Die verlässlichsten Werte für das Alter von Mineralien liefert aber die „Bleimethode“, das ist die Bestimmung des Bleigehaltes in Uran- oder Thoriumerzen, wobei unter „Blei“ nach dem Gesagten natürlich die bleiartigen Endprodukte RaG, beziehungsweise ThD zu verstehen sind. Hier hat man es mit stabilen Endprodukten zu tun, von denen im allgemeinen kein Grund anzunehmen ist, warum sie spontan aus dem Erz, in welchem sie durch den allmählichen Zerfall ihrer Stammprodukte entstehen, sich entfernen könnten. Dies könnte nur bei sogenannten sekundären Mineralien der Fall sein, die durch Einfluß chemischer Einwirkungen, Auslaugungen oder Zerstörung und Wiederausscheidung gebildet werden; für die primären un-

veränderten Gesteine braucht dies nicht befürchtet zu werden. Solche primäre Mineralien eignen sich also besonders für die hier in Betracht kommenden Untersuchungen und hierbei bleibt hauptsächlich die Vorfrage zu entscheiden, ob außer dem durch radioaktiven Zerfall entstandenen Blei nicht etwa von vornherein schon gewöhnliches Blei im Gestein vorhanden war. Darüber vermögen nun Atomgewichtsbestimmungen Auskunft zu geben: Wir wissen ja, daß die Bleiart RaG, die aus Uran entsteht, nicht das Atomgewicht des gewöhnlichen Blei 207,2, sondern 206,0 hat. Finden wir also in einem Uranerz Blei vom Atomgewicht 206, so können wir sicher sein, nur RaG darin zu haben; finden wir in thoriumfreien Uranerzen Verbindungsgewichte zwischen 206 und 207,2, so können wir aus dem Mischungsverhältnisse schließen, wieviel RaG und wieviel gemeines Blei beteiligt sind. Ähnliche Schlüsse lassen sich für Thormineralien ziehen, dessen Endprodukt die Bleiart ThD mit dem Atomgewicht 208 ist, wenn auch dadurch kompliziert, daß die meisten Thormineralien auch Uran enthalten.

Nennen wir das Verhältnis RaG/U für reine Uranmineralien gleich a , so ergibt sich die folgende Zusammenstellung aus der Zerfallskonstante des Uran berechnet:

a	Alter in Jahren
0,001	$8,25 \cdot 10^6$
0,01	$8,15 \cdot 10^7$
0,05	$4,02 \cdot 10^8$

a	Alter in Jahren
0,10	$7,84 \cdot 10^8$
0,15	$1,15 \cdot 10^9$
0,20	$1,50 \cdot 10^9$

Größere Blei-(RaG-) Gehalte sind nicht gefunden worden, daß heißt, damit ist die Grenze der uns bekannten ältesten Gesteine gegeben, wobei natürlich das Alter so aufzufassen ist, daß sich die betreffenden Gesteine eben seither unverändert in der Gestalt befinden, in welcher wir sie jetzt antreffen.

Eine große Anzahl von Mineralien ist bereits in dieser Hinsicht untersucht und damit sind wohldefinierte Zeitmarken für die geologischen Epochen, denen jene Gesteine ihre Entstehung verdanken, aufgefunden worden. Ich möchte als solche Altersmarken nur herausgreifen:

Älteste Gneise und Granite der Zentralalpen	1500 Millionen Jahre
Uraninite, Bröggerit u. dgl. aus Norwegen	1000 " "
Morogoroerz, eine kristallisierte Pechblende aus Ostafrika	700 " "
Uranpechblende aus St. Joachimsthal in Böhmen	340 " "

Freilich für die Zeiten, ehe selbst die ältesten Gesteine unserer Erdkruste sich abschieden, können wir keine Daten auf diesem Wege finden. Aber eine

ganz einfache Überschlagsrechnung lehrt andererseits, wie alt denn unsere Erde überhaupt sein kann.

Wir nehmen heute an, daß Uran und Thor die Stammväter aller radioaktiven Stoffe seien. Betrachten wir bloß das Uran und sehen für seinen Zerfall die Größe seiner Halbwertszeit mit $5 \cdot 10^9$ Jahren als gesichert an, so heißt das, daß, wenn jetzt noch 1 Kilogramm vorhanden ist, vor 5000 Millionen Jahren 2 Kilogramm, vor der doppelt so langen Zeit 4 kg, vor der dreifachen 8 kg usw. dagewesen sein müssen. Rechnet man in diesem Sinne weiter zurück, so folgt, daß, wenn heute überhaupt nur mehr 1 kg Uran zu finden wäre, vor $4 \cdot 10^{11}$ Jahren bereits der ganze Erdball ($0,6 \cdot 10^{25}$ kg Masse) aus Uran bestanden haben müßte; und wenn wir zurzeit als die wahrscheinlichste Menge an Uran in der Erde den Betrag von 10^{17} kg einstellen, so wäre schon vor $1,3 \cdot 10^{11}$ Jahren die ganze Erdmasse als Uran zu denken. Das ist gewiß keine plausible Annahme und damit folgt sofort, daß das Alter der Erde im Maximum mit der Größenordnung hunderttausendmillionen Jahre angenommen werden könnte. Wir sind daher gezwungen festzustellen, daß in dem Zeitraum zwischen der Entstehung der ältesten Gesteine, also der Größenordnung 10^9 Jahre und der ebenerwähnten obersten Grenze 10^{11} Jahre, also sagen wir rund vor 10^{10} Jahren durch außerterrestrische Weltenvorgänge jene enormen Energieaufspeicherungen und Konzentrationen auf unserem Himmelskörper hervorgebracht wurden, die das

Werden unseres jetzigen irdischen Zustandes bedingten; wir kommen somit zwar nicht zu einem bestimmten Datum für den „Schöpfungstag“, aber doch zu einer nicht mehr ganz so vagen Anschauung über die Zeit der „Schöpfung der Erde“.

Ich habe unter den Ergebnissen der radioaktiven Forschung hier nur einige kleine Beispiele anführen können und dabei versucht zu zeigen, wie sie einerseits in die kleinsten Gebilde, die Atome, in ihr Gefüge und ihre Innenvorgänge Einblick zu schaffen versprechen, und habe auf der anderen Seite vorgebracht, wie diese Erscheinungen Aufschlüsse geben über die in gewaltigsten Zeiträumen sich abspielenden Vorgänge der geologischen Epochen. So weist sich immerhin schon im kleinen Rahmen das weitumfassende Gebiet, das unserer jungen radioaktiven Wissenschaft, die im Gesamtgebiet der Physik doch nur einen ganz kleinen Ausschnitt darstellt, zukommt.
