

## Die Höhenstrahlung und ihre Beziehung zu physikalischen und kosmischen Vorgängen.

Von Prof. Dr. LISE MEITNER, Berlin.

(Vortrag am 15. Februar 1929 im Verband technisch-wissenschaftlicher Vereine in Hannover.)

(Eingeg. 11. März 1929.)

Der gesicherte Nachweis der Höhenstrahlung erfolgte durch den österreichischen Physiker V. H $\ddot{e}$ ß bereits im Jahre 1911, aber die Schwierigkeiten der mit diesem Fragenkomplex verknüpften Versuche haben nur ein sehr schrittweises Vorwärtstommen gestattet, und auch heute sind unsere einschlägigen Kenntnisse eigentlich sehr dürftig. Wenn sich gleichwohl das allgemeine Interesse dieser Frage zugewendet hat, so findet dies seine Erklärung in mehreren Umständen. Erstens hat uns die moderne Atomforschung gezeigt, daß eine sehr enge und in vielen Fällen quantitativ angebbare Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie besteht; jede Änderung im Zustand der Atome oder Moleküle bedingt das Auftreten von Strahlung bestimmter Wellenlänge, und umgekehrt ruft auch zwangsläufig die Einwirkung von Strahlung ganz eindeutig gegebene Zustandsänderungen der Materie hervor. Wir können heute mit Recht Strahlung und Materie in gewisser Hinsicht als äquivalent ansehen, sie sind sozusagen nichts anderes als zwei spezielle Formen der alles Naturgeschehen beherrschenden Größe, nämlich der Energie. Ich werde von dieser Tatsache im Laufe des Vortrags mehrfach Gebrauch machen. Der zweite Grund, der der Höhenstrahlung ein besonderes Interesse zuführt, ist der Umstand, daß sie sehr wahrscheinlich durch außerterrestrische Vorgänge hervorgerufen wird, uns also Nachricht von Prozessen bringt, die irgendwo im Weltall verlaufen und die anders geartet sein müssen als alle uns bekannten irdischen Vorgänge.

Das läßt es gerechtfertigt erscheinen, auch die geringen Kenntnisse, die wir bisher über die Höhenstrahlung besitzen, und die mancherlei widerstreitenden Resultate hier näher zu besprechen.

Die Entdeckung der radioaktiven Stoffe und der Nachweis, daß alles Gestein solche radioaktiven Substanzen, wenn auch in sehr geringen Mengen, enthält, brachten eine Erklärung für die vor allem von Elster und Geitel festgestellte und näher untersuchte Erscheinung, daß die Luft stets eine, wenn auch geringe Volumionisation aufweist, so daß ein in freie Luft gebrachter elektrisch geladener Körper allmählich seine Ladung verliert. Diese Leitfähigkeit der Luft ist einerseits durch die aus der Erdkruste entweichenden gasförmigen Emanationen des Radiums und Thoriums bedingt, deren  $\alpha$ -Strahlen die Luft ionisieren, wobei aber der ionisierende Wirkungsbereich der  $\alpha$ -Strahlen immer nur wenige Zentimeter umfaßt. Da die Emanationen nur geringe Lebensdauer besitzen, muß natürlich ihre Menge und daher ihre ionisierende Wirkung mit der Entfernung von der Erde rasch abnehmen, obwohl sie durch Luftströmungen in gewisse Höhen getragen werden können. Außerdem aber senden die radioaktiven Substanzen der Erdkruste bekanntlich sehr durchdringende, sogenannte  $\gamma$ -Strahlen aus, die wesensgleich den Röntgenstrahlen sind, nur viel kürzere Wellenlängen und daher viel größeres Durchdringungsvermögen be-

sitzen. Die von ihnen erzeugte Luftionisation muß natürlich auch mit der Entfernung von der Erde absinken, allerdings erheblich langsamer als die durch die Emanation bedingte.

Die Untersuchungen über die Änderung der Luftionisation mit wechselnder Höhe über der Erde führten nun zu sehr merkwürdigen Resultaten. Die ersten Beobachter fanden bei Messungen in einigen 100 m über der Erde die erwartete Abnahme. Als aber die Versuche mittels Freiballons auf größere Höhen bis zu 2500 m ausgedehnt wurden, beobachteten z. B. K. Bergwitz und gleichzeitig mit ihm der Schweizer Physiker Gockel, daß die Abnahme mit steigender Höhe langsamer wurde und bei weiterer Erhebung Konstanz oder sogar eine langsame Zunahme eintrat. Die ersten Messungen, die in noch größeren Höhen von 1600 bis 5000 m durch Ballonfahrten mittels Freiballons von V. F. H $\ddot{e}$ ß in den Jahren 1911 und 1912 durchgeführt wurden, ergaben ein Ansteigen der Ionisation von 2500 bis rund 5000 m auf mehr als das Doppelte. H $\ddot{e}$ ß schloß hieraus, daß die Strahlung von außen her in unsere Atmosphäre eindringen müsse, und er erbrachte auch als erster den Nachweis, daß ihre Durchdringbarkeit erheblich größer ist als die der härtesten  $\gamma$ -Strahlen von Radium. Daß sich das stärkere Ansteigen dieser durchdringenden Strahlung erst in größeren Höhen merkbar macht, erklärte H $\ddot{e}$ ß folgerichtig aus dem Umstand, daß in geringeren Höhen die von der Erdkruste stammende gewöhnliche Ra- $\gamma$ -Strahlung durch ihre Abnahme die Zunahme der Höhenstrahlung überdeckt. Die Versuche wurden dann vor allem von Kohlhörster bis auf 9000 m Höhe ausgedehnt und nach verschiedenen Richtungen hin ergänzt. Jedenfalls ist heute die Existenz dieser als H $\ddot{e}$ ßsche Strahlung oder Ultra- $\gamma$ -Strahlung benannten durchdringenden Höhenstrahlung außer jeden Zweifel gestellt. Ihre nähere Erforschung hat sich nun im wesentlichen auf vier Fragen konzentriert.

1. Wie groß ist die absolute Intensität dieser Strahlung in verschiedenen Höhen? 2. Was für Wellenlängen gehören dieser Strahlung an, wobei diese Frage vorläufig nur durch Messungen der Absorbierbarkeit gelöst werden kann. 3. Aus welchem Teil des Weltalls kommt die Strahlung, und 4. was für Prozesse können für die Entstehung dieser Strahlung herangezogen werden? Die Beantwortung dieser letzten Frage gibt dann natürlich auch ein Bild dafür, welche Bedeutung der Höhenstrahlung bei physikalischen und vor allem bei kosmischen Vorgängen zukommen müßte.

Das Prinzip der Meßmethode beruht bei allen ausgeführten Beobachtungen auf der Messung der Ionisation, die durch die Höhenstrahlung in einem bekannten Luftvolumen erzeugt wird. Da durch die Ionisierung die Luft leitend wird, so ist die Geschwindigkeit, mit der ein elektrisch geladener Körper entladen oder ein isolierter Körper aufgeladen wird, ein quantitatives Maß für die Stärke der Ionisierung und damit für die Stärke der einwirkenden Strahlung. Alle für die Höhenstrahlung verwendeten Apparate bestehen daher aus einem

Ionisierungsgefäß in Verbindung mit einem Elektrometer, derart, daß eine in die Ionisierungskammer eingeführte Metallelektrode leitend mit dem Elektrometer verbunden ist und nun ihre Aufladung oder Entladung unter dem Einfluß der Höhenstrahlung beobachtet wird. Da es sich um relativ sehr kleine Effekte handelt, müssen Apparate sehr großer Empfindlichkeit verwendet werden; ferner muß der Apparat transportabel und luftdicht abgeschlossen sein und natürlich bei allen Messungen dafür gesorgt sein, daß die eingangs erwähnte Strahlung, die von den radioaktiven Substanzen des Erdgesteins und der sonstigen Umgebung herrührt, abgeschirmt wird, so daß man sicher ist, daß wirklich nur die Höhenstrahlung zur Messung gelangt. Eine von G. Hoffmann in Königsberg im Laufe mehrjähriger Versuche ausgearbeitete Apparatur, die wahrscheinlich die beste derzeit in Verwendung stehende ist, möchte ich Ihnen hier in zwei Abbildungen vorführen.

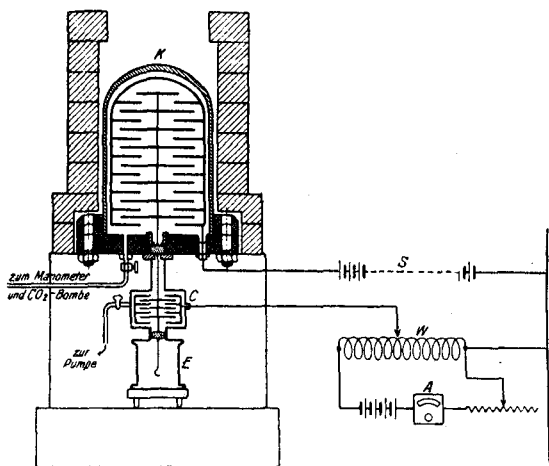


Abb. 1.

Abb. 1 zeigt die schematische Anordnung. Die Ionisierungskammer wird von einer Stahlkuppel von 9,5 mm Wandstärke und 30 cm innerem Durchmesser gebildet, die luftdicht auf eine Grundplatte aufgepaßt werden konnte und für einen Überdruck von 80 Atm. geprüft war. Um nämlich eine möglichst starke Wirkung und damit möglichst hohe Meßgenauigkeit zu erreichen, wurde das Ionisierungsgefäß durch ein entsprechendes Ansatzrohr mit Gas von 45 Atm. gefüllt, weil die Ionisation wenigstens annähernd proportional mit dem Druck wächst. Außerdem wurde als Füllgas Kohlensäure verwendet, da die Kohlensäure  $\gamma$ -Strahlen stärker absorbiert und somit bei gleichem Volumen durch die gleiche Strahlung auch stärker ionisiert wird als Luft. Auch die sehr großen Dimensionen der Ionenkammer, ihr wirksames Volumen beträgt rund 44,1, erhöhen natürlich die Gesamtwirkung der durchdringenden Strahlung. Ein tannenbaumähnliches Drahtgebilde stellt die mit dem Elektrometer verbundene Auffangelektrode dar. Diese Elektrode ist umgeben von einem Drahtnetz mit hineinragenden Drahtenden, das von außen her auf ein entsprechendes Potential, etwa negativ, aufgeladen werden kann, während die Stahlkuppel geerdet ist. Werden jetzt durch eine einwirkende Strahlung in der Stahlkammer positive und negative Ionen erzeugt, so werden die negativen, und zwar bei geeigneter Anordnung alle negativen, Ionen durch das Feld gegen die Auffangelektrode getrieben und laden diese und damit das Elektrometer auf. Die Größe dieser Aufladung innerhalb einer bestimmten Zeit wird photographisch registriert und gibt ein Maß für die Intensität der Strahlung.

Um die Umgebungstrahlung abzuschirmen, ist die ganze Apparatur ringsum von einem 10 cm dicken Bleimantel umschlossen und für die Messung der Höhenstrahlung nur ein Öffnungswinkel nach oben frei gelassen. Die Aufstellung der Apparatur wird dabei stets so vorgenommen, daß ringsum möglichst gebäudefreies Gelände ist, um Einstrahlen von oben durch das Gebäudematerial zu vermeiden. Es zeigt sich aber bei allen diesen Versuchen, daß, selbst wenn das Ionisierungsgefäß allseitig vor jeder äußeren Strahlung geschützt ist, trotzdem eine geringe Aufladung des Elektrometers auftritt, die wahrscheinlich von den Strahlen der radioaktiven Verunreinigungen im Wandmaterial herrührt und die als Restgang oder

Eigengang der Apparatur bezeichnet wird. Um diese Strahlen möglichst abzuschirmen, dient in der Hoffmannschen Apparatur das angegebene Drahtnetz, das den Ionisationsraum von den Gefäßwänden trennt. Trotzdem ist aber für genaue Messung die exakte Kenntnis dieses Restganges nötig. Wegen der sehr großen Durchdringbarkeit der Höhenstrahlung ist es natürlich sehr schwer, diese im allgemeinen so vollkommen abzuschirmen, daß man wirklich den Restgang der Apparatur bestimmen kann. Meistens ist man darauf angewiesen, die Abnahme der Höhenstrahlung mit zunehmender Dicke der Panzerung der Apparatur bis zu der höchst erreichbaren Dicke zu messen und dann zu extrapolieren, was dabei als Restgang übrigbleiben kann. In vereinzelten Fällen war es aber möglich, diesen Restgang direkt zu messen, allerdings unter Versuchsbedingungen, die schon den Stoff zu Abenteuerromanen bieten könnten. So hat z. B. ein Schüler von Hoffmann, Herr Steinke, eine mit der hier vorgezeigten identische, aber in kleineren Dimensionen gehaltene Hoffmannsche Apparatur in einem Eisenbahnwaggon aufgebaut und in den 6 km langen Albulatunnel gebracht, wo er den Eigengang unter 1000 m Gestein messen konnte. Hierbei war die Ionisierungskammer noch durch einen 12 cm dicken Eisenpanzer gegen die umgebende Gesteinsstrahlung geschützt. Durch die tausend Meter Gestein ist die durchdringende Höhenstrahlung praktisch vollkommen abgeschirmt, so daß man den wahren Restgang des Instrumentes erhält. Zu dem gleichen Zweck hat der amerikanische Physiker Millikan seine Apparatur in den High Andes in Bolivien in einen 4600 m hoch gelegenen Gletschersee versenkt, da man wohl mit Recht annehmen kann, daß das Gletscherwasser selbst keinerlei radioaktive Substanzen enthält. Hoffmann sowohl wie Steinke haben bei ihren Messungen jetzt eine Genauigkeit von 1–2% erreicht. Allerdings ist die verwendete Apparatur jetzt schon sehr kompliziert, die Hoffmannsche Apparatur hat ein Betriebsgewicht von etwa 270 kg; trotzdem war es möglich, mit derselben Apparatur Intensitätsmessungen einerseits im Meeresniveau in Königsberg und andererseits in 2500 m Höhe in Muottas Muragl im Oberengadin auszuführen.

Das folgende Bild zeigt die Hoffmannsche Apparatur in Arbeitsstellung.

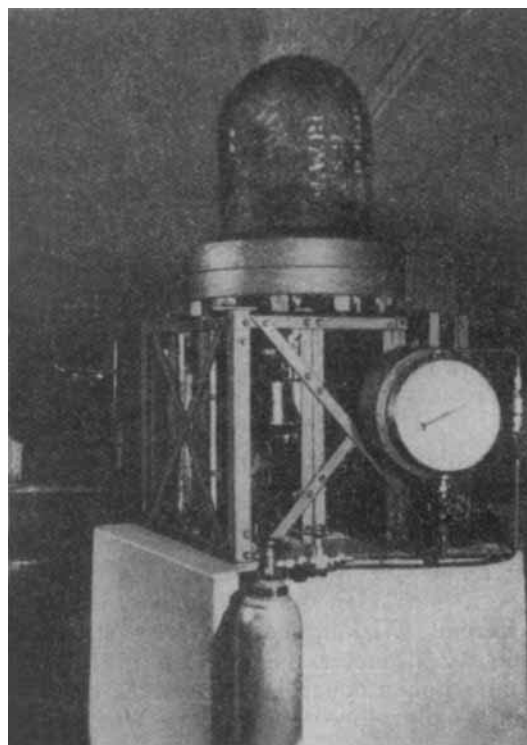


Abb. 2.

Für die Intensitätsangaben bei der Höhenstrahlung hat man sich auf ein gemeinsames Maß geeinigt in der Weise, daß die Intensität der Strahlung gemessen wird durch die Zahl der Ionen, die im Kubikzentimeter und

pro Sekunde in Luft von normalem Druck und normaler Temperatur durch die Strahlung erzeugt werden. Ich will hier nur die Resultate der neuesten Messungen angeben. Nach Hoffmann ist die allseitige Höhenstrahlung, durch 10 cm Blei gemessen, im Meeresniveau von der Intensität 1,10 J/ccm sec und unter gleichen Bedingungen in 2500 m Meeresniveau von der Intensität 1,57 J/ccm sec.

Um zu veranschaulichen, wie gering diese Wirkungen sind und wie schwierig daher ihr exakter Nachweis, sei erwähnt, daß ein einziges  $\alpha$ -Teilchen auf 1 cm Luftweg im Mittel etwa 20 000 Ionen erzeugt. Natürlich wird bei den obigen Messungen nur derjenige Teil der Höhenstrahlung erfaßt, der so durchdringend ist, daß er nicht in 10 cm Blei merklich absorbiert wird. Bei Mitberücksichtigung dieses weniger durchdringenden Anteils erhält Steinke für die allseitige Höhenstrahlung ohne künstliche Abschirmung

im Meeresniveau . .	1,85 J/ccm sec
in 1560 m Höhe . .	2,90 J/ccm sec
in 2500 m Höhe . .	4,12 J/ccm sec

Millikan gibt etwas niedrigere Werte an, wie aus der folgenden Kurve zu ersehen ist, in der statt der Höhen die Abstände von der Grenze der Atmosphäre in äquivalenten Wasserdicken angegeben sind. Dem

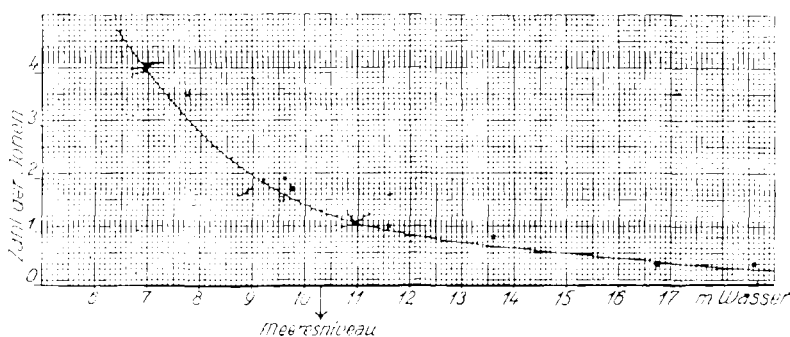


Abb. 3.

Meeresniveau entspricht also eine Wasserschicht von 10,33 m.

Die Kurve zeigt im Meeresniveau eine Intensität von nur 1,4 J/ccm sec. Die Intensitätsmessungen unter Meeresniveau sind durch Einsenken des Apparates in den schon erwähnten Gletscherwassersee erhalten worden. Die Intensität steigt mit wachsender Höhe an, erreicht aber 4 J/ccm sec erst in etwa 4000 m Höhe. Größenordnungsmäßig und im allgemeinen Gang mit der Höhe stimmen aber die Resultate der deutschen und amerikanischen Forscher miteinander überein. Man kann natürlich aus der Annahme der Höhenstrahlung mit wachsender Entfernung von der Grenze der Atmosphäre schon Schlüsse auf die Absorbierbarkeit und die Homogenität oder Nichthomogenität der Strahlung ziehen. Indes ist es aus gewissen Gründen sehr schwierig, aus der Abnahme in Luft auf die wahre Durchdringbarkeit der Strahlen zu schließen. Es sind aber genauere Absorptionsmessungen in der Weise ausgeführt worden, daß die Abnahme der Höhenstrahlung bei immer stärkerer Abschirmung des Ionisierungsgefäßes am selben Standort gemessen wurde. Hoffmann hat in Königsberg solche Absorptionsmessungen mit Blei und Eisenpanzerungen ausgeführt, und zwar in Blei bis zu Dicken von 32 cm. Auch Kohlhörster hat eine Reihe von Absorptionsversuchen durchgeführt. Millikan hat seine Absorptionsmessungen durch Versenken in verschiedene Schmelzwasserseen bis zu 18 m Wassertiefe ausgeführt. Es lassen sich wenigstens angenähert die

in verschiedenen absorbierenden Materialien erhaltenen Absorptionskurven aufeinander umrechnen. Ohne hier auf die Schwierigkeiten solcher Messungen und auf die zum Teil abweichenden Resultate, z. B. von Kohlhörster und Büttner, gegenüber den erwähnten neueren Messungen näher einzugehen, will ich hier nur diejenigen Ergebnisse anführen, die vermutlich die derzeitig erreichbare größte Genauigkeit besitzen. Nach allen Forschern ist die Höhenstrahlung nicht homogen, sondern besteht aus zwei oder mehreren Komponenten. Hoffmann und Steinke geben zwei Komponenten an, deren weniger durchdringende in 14 cm Blei zur Hälfte absorbiert wird, während die härtere 165 cm Blei zu durchlaufen vermag, bevor sie auf die Hälfte abgesunken ist. Zum Vergleich sei angeführt, daß die härteste  $\gamma$ -Strahlung, die wir bei radioaktiven Substanzen kennen, in 1,4 cm Blei auf die Hälfte ihrer ursprünglichen Intensität herabgedrückt wird. Man sieht also, daß die Höhenstrahlung mit ihrer durchdringendsten Komponente mehr als 100mal so große Schichtdicken zu durchlaufen vermag wie die kurzwelligsten  $\gamma$ -Strahlen.

Millikan gibt in seinen neuesten Arbeiten an, daß die Höhenstrahlung drei verschiedene Strahlenkomponenten umfaßt, denen in Blei Halbwertsdicken von rund 25 cm, 100 cm und 200 cm entsprechen sollen.

Die angeführten Zahlen zeigen, daß die verschiedenen Beobachtungen bisher nicht zu sehr übereinstimmenden Resultaten geführt haben. Immerhin scheint aber klagelöst zu sein, daß die Höhenstrahlung sich aus mehreren, zwei- oder drei-monochromatischen Gruppen zusammensetzt, deren durchdringendste mehr als 100mal durchdringender ist als die härteste bekannte  $\gamma$ -Strahlung.

Das Wichtigste an diesen Absorptionsmessungen ist der Umstand, daß sie eine Möglichkeit bieten, die Wellenlängen der Höhenstrahlung wenigstens schätzungsweise anzugeben. Bekanntlich besteht zwischen der Wellenlänge einer Strahlung und ihrer Absorbierbarkeit eine quantitativ angebbare Beziehung. Dabei ist zu berücksichtigen, daß im allgemeinen der Absorptionsprozeß einer Wellenstrahlung durch Materie auf zwei verschiedenen Vorgängen beruht. Einerseits kann ein Wellenstrahl, wenn er auf die Atome oder Moleküle der durchlaufenden Substanz trifft, die Moleküle ionisieren, d. h. er wird aus den Atomen oder Molekülen ein äußeres Elektron herauswerfen, diesem seine ganze Energie übertragen und dabei selbst als Strahl verschwinden. Einen solchen Vorgang bei Röntgenstrahlen in der Wilsonschen Nebelaufnahme zeigt Abb. 4.

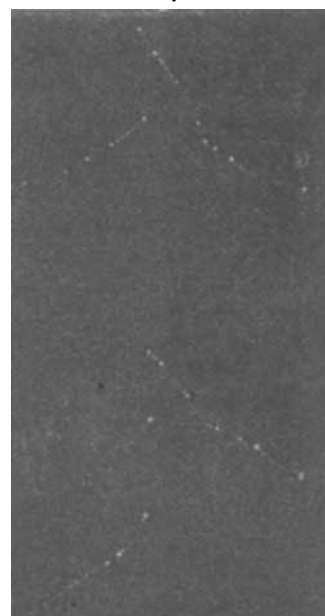


Abb. 4.

Der Pfeil zeigt die Richtung an, in der die Röntgenstrahlung in die Nebelkammer tritt. Durch die Absorption eines Strahls in dem Gas der Kammer wird der Strahl als solcher vollständig vernichtet, und an seiner Stelle tritt ein schnellbewegtes Elektron auf, dessen Bahn die Nebelmethode sichtbar macht. Das Bild ent-

spricht also der Absorption von vier Röntgenstrahlen. Man bezeichnet diesen Vorgang als *wahre* Absorption. Außerdem aber kann ein Wellenstrahl beim Auftreffen auf die Elektronen eines Atoms oder Moleküls bloß eine Richtungsänderung erfahren, der Strahl wird aus dem für die Messung ausgeblendeten Strahlenbündel herausgestreut, und dadurch wird die Intensität der zu messenden Strahlung erniedrigt. Man bezeichnet diesen Vorgang als Streuung und die hierdurch bedingte Intensitätsabnahme als Absorption infolge Streuung. Wir wissen, daß die Absorption sehr durchdringender Strahlung im wesentlichen nur auf Streuung beruht. Mit dieser Streuung ist eine Änderung der Durchdringbarkeit der Strahlen verknüpft, die bedingt, daß ein ursprünglich homogenes Strahlenbündel allmählich beim Durchlaufen dicker Schichten besonders von leichten Substanzen, wie Luft oder Wasser, Strahlen recht verschiedener Durchdringbarkeit enthält. Hierauf sei nicht näher eingegangen; es genügt, folgendes anzuführen. Bei so durchdringenden Strahlen, wie sie die Heßsche Höhenstrahlung darstellt, handelt es sich bei der Absorption nur um Streuungsprozesse. Nun gibt die Theorie dieser Streuungsprozesse eine relativ einfache Beziehung zwischen der Wellenlänge  $\lambda$  einer Strahlung und ihrer Absorbierbarkeit in einer bestimmten Substanz, d. h. man kann aus den oben besprochenen Absorptionsmessungen die wirksamen Wellenlängen berechnen.

Steinke erhält aus seinen und Hoffmanns Messungen für die härteste Komponente die Wellenlänge

$$\lambda = 1,1 \cdot 10^{-12} \text{ cm bzw. } 0,7 \cdot 10^{-12} \text{ cm,}$$

je nachdem, ob er für die Berechnung die ältere Comptonsche Formel oder die neuere von Dirac entwickelte Berechnung zugrunde legt. Würde man die von Klein und Nishina aus der Wellenmechanik hergeleitete Beziehung zwischen Streuung und Wellenlänge zugrunde legen, so würde sich für  $\lambda$  sogar nur der Wert von rund  $0,2 \cdot 10^{-12}$  cm ergeben.

Welche Theorie der Wirklichkeit am besten entspricht, und welche Wellenlängen daher der Höhenstrahlung zuzuschreiben sind, kann erst entschieden werden, wenn mehr experimentelles Material über die Streuung z. B. der kurzwelligsten  $\gamma$ -Strahlung vorliegen wird.

Zum Vergleich sei hier die kürzeste bei  $\gamma$ -Strahlen gefundene Wellenlänge  $\lambda_\gamma = 40 \cdot 10^{-12}$  cm angeführt. Millikan errechnet aus seinen neuesten Versuchen als kürzeste Wellenlänge der Höhenstrahlung einen noch kleineren Wert als die angegebenen Steinke'schen.

Das Interessante an diesem Resultat ist neben der außerordentlichen Kleinheit der Wellenlänge vor allem die Tatsache, daß die Höhenstrahlung überhaupt definierte Wellenlängen besitzt, also aus zwei oder mehreren monochromatischen Strahlungen bestehen muß, denn das weist darauf hin, daß die Entstehung dieser Strahlung irgendwie mit elementaren Atomprozessen verknüpft sein muß, und zwar mit ebensoviel verschiedenartigen Prozessen, als Gruppen monochromatischer Strahlung vorhanden sind.

Bevor auf dieses Problem näher eingegangen wird, sei die allgemeine Frage nach dem Ursprung der Höhenstrahlung in seiner allgemeineren Form besprochen. Die Tatsache, daß die Höhenstrahlung mit der Entfernung von der Erde zunimmt, hat es von Anfang an wahrscheinlich gemacht, daß sie außerterrestrischen Ursprungs sein muß. Versuche, ob etwa der Wechsel von Tag und Nacht oder eine Sonnenfinsternis die Intensität der Strahlung merkbar beeinflussen, was für die

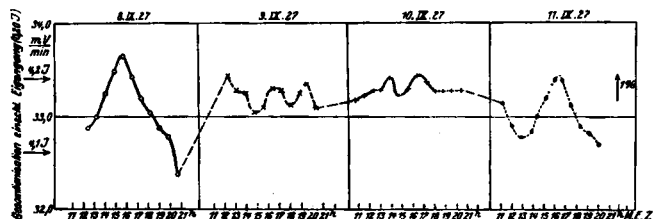
Sonne als Ursprungsort sprechen würde, ergaben durchweg negative Resultate. Die Möglichkeit, daß die Strahlung aus unserem Milchstraßensystem stammt, ist von Nernst auf Grund gewisser theoretischer Überlegungen zur Diskussion gestellt worden. Diese Hypothese ist in den letzten Jahren von verschiedenen Seiten experimentell geprüft worden. Es gibt im Prinzip zwei Wege, um diese Frage zu untersuchen. Wenn die Strahlung nämlich nicht allseitig gleichmäßig aus dem Kosmos kommt, sondern von einer bestimmten Stelle des Himmelsgewölbes, so muß die Intensität der Strahlung eine Richtungsabhängigkeit von dem Einfallswinkel zeigen, unter dem man die Strahlen in die Apparatur eintreten läßt. Diese Messungen sind sehr schwierig und erfordern viele Korrekturen, weil streifend eintretende Strahlen ja viel größere Luftwege zurückgelegt haben als senkrecht eintretende. Die in dieser Richtung ausgeführten Versuche der russischen Forscher Tuwim und Myssowsky sowie ähnliche Versuche neueren Datums von Steinke haben keinerlei eindeutige Richtungsabhängigkeit erkennen lassen.

Weit genauer konnten die Versuche nach dem Einfluß unseres Milchstraßensystems auf dem zweiten möglichen Weg in Angriff genommen werden. Wenn die Strahlung in der Milchstraße ihren Ursprung hat, so muß sie zu Zeiten, da das betreffende Gebiet der Milchstraße kulminiert, ihre maximale Intensität haben, weil sie dann auf dem kürzesten Luftweg zur Erde gelangt, während sie zu Zeiten, da die Milchstraße am tiefsten steht, ihr Minimum erreichen muß. Mit anderen Worten, die Strahlungsintensität muß zeitliche Schwankungen in der Weise aufweisen, daß innerhalb eines Sterntages je ein Maximum und ein Minimum auftreten und sich im regelmäßigen Gang mit der Sternzeit wiederholen. Der Sterntag, d. h. die Zeit zwischen zwei Kulminationen eines Fixsterns, ist um rund vier Minuten kürzer als der mittlere Sonnentag; zur Zeit der Frühlingstag- und nachgleiche fallen mittlere Sonnenzeit und Sternzeit zusammen, und die Sternzeit eilt dann täglich um vier Minuten voraus, so daß im Laufe eines Monats der Sterntag schon um zwei Stunden gegenüber der mittleren Sonnenzeit verschoben ist. Wenn daher die Höhenstrahlung aus unserem Milchstraßensystem stammt, so muß ihre Intensität periodische Schwankungen parallel der Sternzeit zeigen, also in unserem üblichen Stundenmaß eine mit der Jahreszeit veränderliche Tagesperiode besitzen.

Die ersten Versuche über derartige Schwankungen, die, um größere Absolutintensitäten und damit größere Meßgenauigkeit zu erzielen, auf dem Jungfrauoch 3500 m, auf dem Mönchgipfel 4100 m hoch von Kohlhörster und Kohlhörster und v. Salis in den Jahren 1923–1925 ausgeführt wurden, ergaben positive Resultate. Es wurde eine sternzeitliche Schwankung von 10–15% beobachtet, deren Maximum mit der Kulmination bestimmter Sternbilder (Andromedanebel, Mirasterne) zusammenfallen sollte. Zu denselben Resultaten gelangte Büttner durch Messungen auf der Zugspitze und dem Guslarferner. Dieses Ergebnis war, wenn seine Richtigkeit sich bestätigte, von außerordentlicher Tragweite, denn da die Höhenstrahlung sehr viel durchdringender und daher sehr viel kurzwelliger als die kurzwelligste bei radioaktiven Prozessen auftretende Strahlung ist, so muß sie von Prozessen herühren, wie sie ähnlich auf der Erde nicht existieren. Und wenn die Höhenstrahlung wirklich aus bestimmten Gegenden der Milchstraße stammt, so müssen auf den betreffenden Sternen, und nur auf diesen, solche neuartigen Prozesse vor sich gehen, was natürlich für die

Einsicht in die Entwicklung der Sterne von grundlegender Bedeutung wäre. Die Untersuchungen der letzten Jahre, die besonders von Hoffmann und Steinke mit sehr verbesserten Apparaturen, außerdem auch von Heß und von Millikan und seinen Mitarbeitern durchgeführt wurden, lassen aber dieses Resultat als unsicher erscheinen. Abb. 5 und 6 zeigen die Meßergebnisse von Hoffmann und Steinke auf Muottas Muraigl (2500 m) und diejenigen von Heß an verschiedenen Versuchsorten.

Das erste Bild zeigt die Intensität der Strahlung zu verschiedenen Tagesstunden für vier aufeinanderfolgende Tage. Da innerhalb vier Tagen die Sternzeit sich nur etwa um eine Viertelstunde gegenüber der

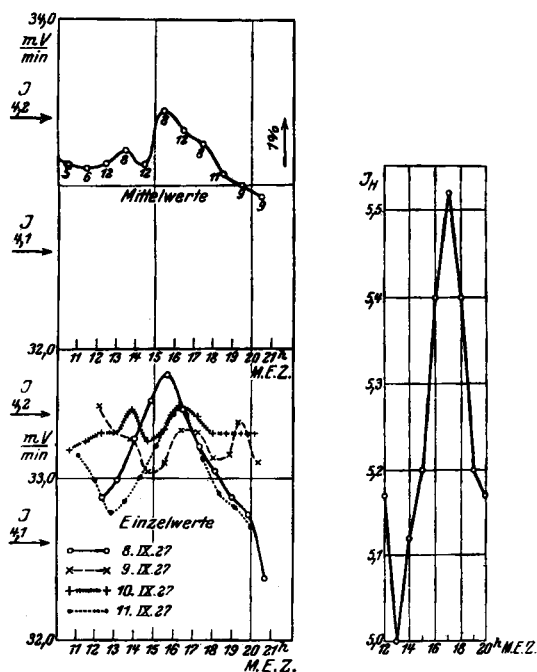


Muottas Muraigl 2500 m,  $\pm 63^\circ$  kein Panzer, sonst 12 cm Fe. Änderung der Gesamtionisation mit der Zeit.

Abb. 5.

mittleren Sonnenzeit verschiebt, so müßten sternzeitliche Schwankungen praktisch zu denselben Tagesstunden auftreten. Die Kurven zeigen, daß dies anscheinend nicht der Fall ist.

Noch deutlicher ist dies aus dem zweiten Bild zu ersehen, wo die vier Kurven mit gemeinsamen Ab-



Änderung der Gesamtionisation mit der Zeit. Muottas Muraigl 2500 m,  $\pm 63^\circ$  kein Panzer, sonst 12 cm Fe.

Büttner: Guslarferner 2800 m Mittelwerte, 14.—27. August 1926.

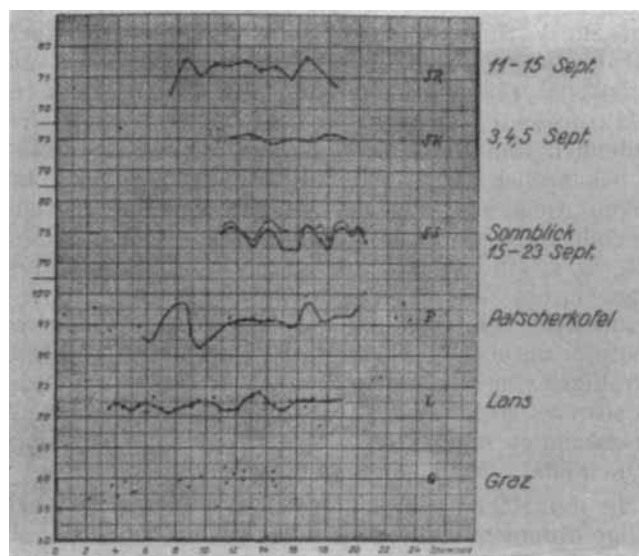
Abb. 6.

szissen eingezeichnet sind. Die obere Kurve ist das Mittel aus den vier Kurven. Sie zeigt ein schwaches Maximum zwischen 13 und 14<sup>h</sup>, während die Einzelkurven vom 8. und 11. um diese Zeit Minima aufweisen. Bedeutsam ist hierbei noch, daß die gesamte Schwankung nur  $\pm 1\%$  beträgt, während die zum Vergleich daneben gesetzte Kurve von Büttner über 10% Schwankungen aufweist.

Ganz ähnlich steht es mit den Meßergebnissen von Heß, die in dem nächsten Bild dargestellt sind. Hier sind als Abszissen direkt die Sternzeiten eingetragen. Maxima und Minima müßten also hier bei der gleichen Abszisse auftreten, obwohl die Messungen an ganz verschiedenen Orten und in sehr verschiedenen Zeiten und Höhen durchgeführt wurden. Die Kurven lassen keine Andeutung für solche sternzeitliche Schwankungen erkennen.

Man muß danach schließen, daß die Höhenstrahlung vermutlich gleichmäßig, zumindest aber zu 98%, aus allen Richtungen des Weltraumes eingestrahlt wird, da ja die von Steinke gefundene Gesamtschwankung nur 2% der mittleren Intensität ausmacht, d. h. also, daß die Prozesse, denen sie ihren Ursprung dankt, an den verschiedensten Stellen des Weltraumes vor sich gehen.

Welches sind nun aber diese Prozesse? Damit kommen wir zu demjenigen Fragenkomplex, der zwar an sich am interessantesten ist, der aber heute noch ein Gebiet für sehr wenig gesicherte Hypothesen darstellt. Es sei daher nur die Richtung angegeben, in die man durch



Tageskurven der Ultravioletstrahlung in Graz, Lans, Patscherkofel und Sonnblick.

Abb. 7.

die Erklärungsversuche für die Höhenstrahlung gewiesen wird.

Wir wissen aus der Quantentheorie, daß jede Strahlung sozusagen ein Energiereservoir vorstellt. Die Größe der in der Strahlung vorhandenen Energie hängt nur von der Frequenz bzw. von der Wellenlänge der Strahlung ab und ist durch die Gleichung bestimmt  $E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$ , wenn  $h$  die Plancksche Konstante,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $\lambda$  und  $\nu$  Wellenlänge bzw. Frequenz der Strahlung bedeuten. Je kleiner die Wellenlänge, um so größer die mitgeführte Energie. Wie schon eingangs erwähnt, besteht eine sehr enge Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie. Wird Strahlung durch Materie absorbiert, so entspricht der aus der Strahlung verschwundenen Energie eine äquivalente Arbeitsleistung in der Materie, durch die eine entsprechende Änderung im Zustande der Materie hervorgerufen wird. So wissen wir, daß z. B. die Absorption von gewöhnlicher optischer Strahlung die Ionisation der absorbierenden Atome oder Moleküle zur Folge hat. Die durch die Absorption verschwundene Strahlungsenergie ist auf Ionisierungsarbeit aufgewendet



worden. Umgekehrt, wenn ein vorher ionisiertes Atom sich wieder durch Einfangen eines Elektrons in ein gewöhnliches neutrales Atom verwandelt, so wird dabei eine Strahlung von solcher Wellenlänge emittiert, daß seine Energie  $\frac{hc}{\lambda}$  gerade der hierbei gewonnenen Ionisierungsarbeit entspricht. Ganz allgemein kann man sagen, daß ein exotherm verlaufender Atomprozeß von Strahlungsemission begleitet ist, und daß Strahlungsabsorption endotherm verlaufende Atomprozesse hervorruft. Jede emittierte Strahlung ist also an Atomprozesse gebunden, und die Wellenlänge der Strahlung ist um so kürzer, je größer die den Atomprozeß begleitende Energieabgabe ist. Daher besitzen die bei radioaktiven Zerfallsprozessen auftretenden  $\gamma$ -Strahlen sehr kurze Wellenlängen, besitzen also sehr hohe Energien; denn die radioaktiven Prozesse sind Vorgänge innerhalb der Atomkerne, und diese Vorgänge sind mit außerordentlich hohen Energieänderungen verknüpft. Darum haben wir im allgemeinen keine Möglichkeit, Atomkerne willkürlich zu beeinflussen, wir können — von sehr seltenen Fällen abgesehen — keine Atomumwandlung willkürlich erzeugen, weil wir die hierzu nötigen großen Energien nicht zur Verfügung haben. Wie groß die zu Kernzertrümmerungen nötigen Energien sind, zeigen uns wenigstens größenordnungsmäßig die bei radioaktiven Zerfallsprozessen in Form von  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen frei werdenden Energien. So z. B. besitzen die  $\alpha$ -Strahlen, die bekanntlich nichts anderes sind als aus dem radioaktiven Atomkern mit großer Geschwindigkeit herausfliegende Heliumkerne, eine Energie von 4–8 Millionen Volt. D. h. ein Elektron müßte, um die gleiche Energie zu haben, ein Spannungsfälle von 4–8 Millionen Volt durchlaufen, also Spannungen, die wir vorläufig im Laboratorium nicht herstellen können. Die kurzwelligste  $\gamma$ -Strahlung von  $40 \cdot 10^{-12}$  cm Wellenlänge hat eine Energie von etwa 3,4 Millionen Volt. Wir sehen hieraus, daß die uns bekannten radioaktiven Prozesse unter Freiwerdung von maximal 8 Millionen Volt Energie verlaufen.

In der Höhenstrahlung haben wir aber eine kurzwellige Komponente von weniger als  $1 \cdot 10^{-12}$  cm, die entsprechende Energie ist also sicher mehr als 40mal größer als bei der kurzwelligsten  $\gamma$ -Strahlung, sie beträgt mindestens 130 Millionen Volt und nach der Theorie von Klein und Nishina sogar etwa 900 Millionen Volt. Eine solche Energie wird bei keinem der uns bekannten radioaktiven Prozesse in Freiheit gesetzt, also muß die Höhenstrahlung von Atomprozessen herühren, wie wir sie auf der Erde vorläufig nicht kennen. Es ist naturgemäß, daß man nun nach Prozessen Ausschau hält, die mit einer derartig hohen Energieabgabe verknüpft sein können. Nernst hat die Hypothese aufgestellt, daß im Weltenraum schwerere Atome als Uran vorhanden sein könnten, die unter größerer Energieabgabe zerfallen als die uns bekannten radioaktiven Zerfallsprozesse und dabei die durchdringenden kosmischen Strahlen emittieren. Gleichzeitig sollen von Zeit zu Zeit im Weltall auf Kosten der überall vorhandenen sogenannten Nullpunktsenergie solche schweren Atome sich wiederaufbauen, so daß eine Art Kreislauf zwischen Abbau der Atome in strahlende Energie und Wiederaufbau aus Nullpunktsenergie vorhanden wäre. Bei der ungeheuren Größe des Weltenraumes würde es nach Nernst genügen, wenn in jedem Kubikdezimeter dieses Raumes einmal in etwa 1000 Millionen Jahren ein solches neues Atom entstehen würde. Dadurch will Nernst erklären, woher die heißen Sterne über viele Milliarden Jahre ihre durch Ausstrahlung verlorengegangene Energie decken und so

den Wärmetod des Weltalls vermeiden. Wenn nämlich ständig nur ein Abbau der Atome unter Strahlung, die ja schließlich in Wärme verwandelt wird, stattfände, so müßte sich das ganze Weltsystem allmählich einem Zustand überall gleicher Energie und gleicher Temperatur nähern, weil ja bekanntlich nach dem zweiten Hauptsatz die dissipierte Wärme nicht wieder in andere Energieformen übergehen kann. Man könnte allerdings nach der Nernstschen Hypothese erwarten, daß auf den jüngsten Sternen noch solche Elemente jenseits Uran vorhanden sind, die sich bei spektroskopischen Untersuchungen der Sterne bemerkbar machen sollten. Irgendwelche Anzeichen hierfür liegen nicht vor, aber das müßte nicht gegen die Nernstsche Auffassung sprechen, weil uns nur die äußere Hülle der Sterne für spektroskopische Untersuchungen zugänglich ist, und es zu erwarten ist, daß so schwere Atome, wie sie die Atome jenseits von Uran sein müßten, wenn überhaupt, wesentlich im Innern der Gestirne vorkommen.

Von anderer Seite ist auf eine andere Art von Prozessen für die Deutung der Höhenstrahlung hingewiesen worden. Strahlung und Materie sind nichts anderes als verschiedene Formen der Energie. Denn Einstein hat gezeigt, daß jede Energieabgabe eines Systems eine Verringerung seiner Masse, jede Energiezufuhr ein Wachsen der Masse bedingt. Masse ist Energie, und zwar ist die Beziehung zwischen Masse und Energie sehr einfach, sie lautet  $m = \frac{E}{c^2}$ , wenn  $c$  wieder die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Da  $c$  eine sehr große Zahl ist, so bedingen die von uns auf der Erde hervorrufbaren Energieänderungen niemals eine nachweisbare Änderung der wägbaren Masse. Daß aber z. B. ein Elektron von so hoher Geschwindigkeit, wie sie die  $\beta$ -Strahlen der radioaktiven Substanzen aufweisen, eine größere träge Masse besitzt als ein langsam laufendes, ist ja bekanntlich schon vor vielen Jahren durch die berühmten Versuche von Kaufmann, Bucherer u. a. nachgewiesen worden. Nun kennen wir heute tatsächlich Prozesse, die unter nachweisbarem Masseverlust vor sich zu gehen scheinen, wenn wir sie auch nicht selbständig nachmachen können. Es ist heute kaum ein Zweifel, daß alle Atome im letzten Grunde aus positiven Wasserstoffkernen und negativen Elektronen aufgebaut sind. Betrachten wir beispielsweise das Helium mit seiner Masse 4, so muß sein Atomkern aus vier Wasserstoffkernen gebildet sein (von den im Kern vorhandenen Elektronen sehe ich dabei ab). Das Atomgewicht des Heliums ist aber, wie bekannt, nicht viermal so groß wie das Atomgewicht des  $H^+$ . Das Atomgewicht des Heliums mit 4,002 ist gegenüber dem Gewicht von  $4 H^+$  mit 4,031 um 0,029 Atomgewichtseinheiten verkleinert. Das bedeutet im Sinne der Einsteinschen Äquivalenz von Masse und Energie, daß bei der Bildung des Heliumkerns aus  $4 H^+$  eine Energie abgegeben wird, die 0,029 Atomgewichtseinheiten äquivalent ist, das ist eine Energie von 27 Millionen Volt. Diese Energie stellt sozusagen die positive Wärmetönung des Aufbauprozesses eines Heliumatomkerns aus  $4 H^+$  vor. Sie ist natürlich, an gewöhnlichen chemischen Prozessen gemessen, außerordentlich hoch und stellt also eine sehr ergiebige Energiequelle dar. Der englische Astronom Eddington hat auch schon vor mehreren Jahren die Ansicht ausgesprochen, daß die durch die ständige Ausstrahlung verminderte Sonnenenergie durch solche Aufbauprozesse des Heliums aus Wasserstoff eine dauernde Zufuhr erhalten könnte, denn die Sonne kann die in Form kurzwelliger Strahlung emittierte Energie absorbieren und in Wärme verwandeln.

Eine Energie von 27 Millionen Volt genügt aber nicht für die Erzeugung der kosmischen Strahlung. Es ist daher von Millikan der Aufbau prozess zu höheren Elementen in Betracht gezogen worden. Aus den bekannten Messungen von Aston kennen wir die Größe der Abweichung des Atomgewichtes der verschiedenen Elemente von demjenigen Gewicht, das es ohne Massenverlust beim Aufbau aus Wasserstoffkernen haben müßte. Dieser Massenverlust oder Massendefekt, wie er häufig genannt wird, gibt ein Maß für die gesamte Energieabgabe an, wenn man die Entstehung eines schwereren Kerns aus den vielen Wasserstoffkernen in einem einzigen Aufbauakt für möglich betrachten will. Millikan hat berechnet, daß, wenn 16 Wasserstoffkerne in einem Elementarakt mit den noch nötigen 8 Kernelektronen zu einem Sauerstoffkern zusammen-treten, die abgegebene Energie schon sehr nahe der mittleren von ihm in der Höhenstrahlung gefundenen Wellenlänge entsprechen würde. Um die kurzwelligste Höhenstrahlung zu erzeugen, wäre eine Energie nötig, wie sie etwa bei der plötzlichen Bildung des Siliciumatomkerns aus  $28\text{ H}^+$  nach den Aston'schen Messungen zu erwarten wäre. Millikan meint daher, daß im interstellaren Raum solche Aufbauprozesse höherer Atome vor sich gehen und dabei die kosmische Strahlung erzeugen. Es ist aber kaum vorstellbar, daß ein so kompliziertes System, wie es ein Sauerstoffkern und besonders ein Siliciumatomkern mit seinen  $28\text{ H}^+$  und 14 Elektronen darstellt, in einem einzigen Elementarakt und nicht stufenweise aufgebaut werden soll. Aber Millikan sieht eine besondere Stütze für seine Annahme in der Tatsache, daß in letzter Zeit durch den Astrophysiker Bowen gezeigt worden ist, daß die so lange rätselhafte, sogenannte Nebuliumlinie in den weit ausgedehnten interstellaren Nebeln nichts anderes als eine Sauerstofflinie ist, was sonach beweist, daß Sauerstoff auch im Weltall in außerordentlich großen Mengen verbreitet sein muß. Denn die in diesen diffusen Nebeln vorhandene Gasmenge ist trotz ihrer ungeheuren Verdünnung so groß, daß, wenn jedes vorhandene Sauerstoffatom nur einmal in einem Jahrhundert das

früher als Nebuliumlicht bezeichnete Licht ausstrahlte, die gesamte ausgestrahlte Helligkeit 100mal so groß wäre wie die Sonnenhelligkeit. Auch daß in diesen interstellaren Nebeln extrem kleine Drucke, Dichten und Temperaturen herrschen, führt Millikan zugunsten seiner Hypothese an. Denn, wenn solche Aufbauprozesse unter den auf den meisten Sternen herrschenden Bedingungen stattfinden würden, müßte unsere Sonne wegen ihrer großen Nähe einen großen Anteil zu der kosmischen Strahlung liefern. Der Nachweis, daß die Intensität der Höhenstrahlung zu Mittag und zu Mitternacht die gleiche ist, spricht nach Millikan dafür, daß weder auf der Sonne noch auf den meisten ihr ähnlichen Sternen solche die Höhenstrahlung erzeugenden Aufbauprozesse vor sich gehen, und daß als Ursprungsort nur die interstellaren Nebel in Frage kommen können. Schließlich sei noch erwähnt, daß als fragliche Energiequelle noch die Verwandlung der Masse eines Wasserstoffkerns + Elektrons in Strahlung in Betracht käme, also eine Vernichtung der Materie zugunsten entstehender Strahlung, worauf zuerst Jeans hingewiesen hat. Diese Umwandlung würde nach der Einsteinschen Formel eine Energiemenge von rund 900 Millionen Volt liefern.

Ob die Höhenstrahlung durch die von Nernst angenommenen Transurane oder irgendwelche Aufbauprozesse oder etwa durch die Ausstrahlung der Masse eines Wasserstoffkerns + Elektron zustande kommt, ist heute ein ganz ungelöstes Problem. Sicher ist aber, daß wir in den angeführten Atomkernprozessen, möge es Massenausstrahlung, Kernabbau oder Kernaufbau sein, Energiequellen von der Größenordnung haben, wie sie jedenfalls bei der Entstehung der kosmischen Strahlung wirksam sein müssen. Und wenn die Erforschung der radioaktiven Substanzen dazu geführt hat, daß jetzt von verschiedenen Seiten versucht wird, elektrische Energien herzustellen, die es ermöglichen sollen, künstliche  $\alpha$ -Strahlen zu erzeugen, so zeigt uns die Natur durch die kosmische Strahlung, daß wir auch mit künstlichen  $\alpha$ -Strahlen noch immer sehr weit hinter den Leistungen der Naturprozesse zurückstehen. [A. 41.]

## Die Einwirkung wasserlöslicher Mono- und Diphosphate auf Permutit, ein Beitrag zur Festlegung der Phosphorsäure durch Bodenbestandteile.

Von Prof. Dr. E. BERL und Dr. PH. SCHMITTNER.

Chemisch-technisches und elektrochemisches Institut der Technischen Hochschule Darmstadt.

(Eingeg. 12. Februar 1929.)

Zur Erzielung guter Ernteerträge müssen den Kulturböden in erster Linie die Pflanzennährstoffe Stickstoff, Kali, Phosphor durch künstliche Düngemittel zugeführt werden. Phosphor wird sowohl in Form wasserlöslicher als auch wasserunlöslicher Phosphate ausgestreut. Die löslichen Phosphate zeigen dabei eine raschere Wirkung auf das Pflanzenwachstum, da die Pflanzenwurzeln imstande sind, sie direkt aufzunehmen. Soweit sie jedoch nicht bald nach der Zugabe von den Pflanzen verwertet werden, sind sie der Gefahr des Auswaschens in tieferen Erdschichten nicht so unterworfen wie andere lösliche Düngesalze, da sie durch Bodenbestandteile in unlösliche Phosphorsäureverbindungen übergeführt werden. Dieser Vorteil der Speicherung der Phosphorsäure löslicher Phosphate im Boden ist aber nur dann von praktischer Bedeutung, wenn die Pflanzen auch befähigt sind, ihren Phosphorbedarf aus diesen Umsetzungsprodukten ebenso zu entnehmen, wie es der Fall ist bei der Düngung mit unlöslichen Phosphaten, beispielsweise Thomasmehl oder Rhenaniaphos-

phat. Daraus ergibt sich die Bedeutung der Feststellung solcher Speicherungsprodukte des Bodens und deren Untersuchung auf die Ausnutzbarkeit ihres Phosphorsäuregehaltes durch die Pflanzen. Um auf diese Umsetzungsprodukte einzugehen, seien die beiden wirksamen Faktoren, die wasserlöslichen Phosphorsäuredünger und die Bodenbestandteile, kurz erörtert.

Von den Düngemitteln, die lösliche Phosphate enthalten, stand bis vor kurzer Zeit das Superphosphat an erster und alleiniger Stelle. In den letzten Jahren kommen die von der I. G. Farbenindustrie in steigendem Maße in den Handel gebrachten Misch- und Voll-dünger Leunaphos und Nitrophoska hinzu. Das Superphosphat, durch Aufschluß des Tricalciumphosphates der Rohphosphate dargestellt, enthält als Hauptbestandteil lösliches Monocalciumphosphat. Leunaphos besteht aus einer Mischung von Diammonphosphat und Ammonsulfat. Nitrophoska dagegen wird erhalten durch Zugabe von Diammonphosphat und Kaliumchlorid zu Ammonnitrat unter Bedingungen, die zu einer chemischen