

## Die Energie der Höhenstrahlen

Die hervorstechendste Eigenschaft der Höhenstrahlen, welche deshalb auch zu ihrer Entdeckung führte, ist die aussergewöhnliche Durchdringungsfähigkeit, eine Folge ihrer hohen Energie. Beide, Durchdringungsvermögen und Energie



Prof Dr. **Werner Kolhörster**

wurden lange Zeit nach der Auffindung der Strahlen noch sehr unterschätzt bis die Entdeckung ihrer korpuskularen Natur quantitative Energiebestimmungen ermöglichte. Die Ergebnisse solcher Messungen haben gezeigt, dass die Energie der Höhenstrahlen die der bekannten natürlich vorkommenden oder künstlich erzeugten Strahlen noch viel weitgehender als angenommen übertrifft. Wird, wofür auch die Nebelkammerversuche sprechen, nur hierdurch der Unterschied zwischen dem Verhalten der irdischen und der kosmischen

Strahlen bedinkt, so wäre in der Höhenstrahlung keine prinzipiell neue Art von Strahlen zu erwarten. Vielmehr würden die bekannten Strahlenarten wie Elektronen, Positronen und Protonen allein schon durch Zufuhr genügend hoher Energie zu Höhenstrahlen werden. Untersuchungen an besonders energiereichen Strahlen lassen daher wichtige Aufschlüsse für die weitere Erforschung der kosmischen Strahlen selbst und für unsere Kenntnis vom Atom und der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie erhoffen.

Die beiden Eigenschaften der Höhenstrahlen, ihre korpuskulare Natur und ihr Durchdringungsvermögen gestatten die Energie der Strahlen zu bestimmen, erstens durch Ablenkung im elektrischen oder magnetischen Feld und zweitens durch Absorptionsmessungen. Die erste Methode ist prinzipiell einfacher, da sie den verwickelten Mechanismus zwischen Materie und Strahlung nicht zu beachten braucht, aber experimentell nicht so leicht durchführbar als die zweite.

Die Beobachtung in künstlichen Feldern begegnet der Schwierigkeit, dass man über ungewöhnlich hohe Felder verfügen muss, um die so energiereichen Höhenstrahlen abzulenken. Nur mit der Nebelkammer hat man die Gewissheit, den einzelnen Strahl messend zu verfolgen und photogrammetrisch festzulegen. Ablenkungsversuche in Verbindung mit Zählrohren beziehen sich dagegen immer nur auf das Verhalten ausgedehnter Strahlenbündel. Die Deutung der dabei gewonnenen Ergebnisse ist wegen der ausserordentlich komplexen und im einzelnen noch nicht genügend bekannten Zusammensetzung der Bündel recht mühsam.

Die Ablenkung mit stärkeren elektrischen Feldern und koinzidierenden Zählrohren wurde bisher nur einmal versucht. Sie hat eben nicht viel mehr als die blossе Tatsache der Ablenkung durch elektrische Felder gebracht.

Ablenkungen durch magnetische Felder unter Benutzung koinzidierender Zählrohre sind vielfach ausgeführt worden; die Gewissheit ihrer Ergebnisse steht jedoch hinter der mit Nebelkammer erzielten zurück. Seitdem zuerst Skobelzyn dieses Verfahren angewendet hatte ist es gelungen, immer grössere Nebelkammern, nunmehr bis etwa  $\frac{1}{2}$  Meter Länge zu benutzen. Indessen lassen sich bei den heute verfügbaren Magnetfeldern bis zu etwa 20 000 Gauss Feldstärke über Flächen von Quadratdezimetern nur Energien bis zu etwa  $5 \cdot 10^9$ , neuerdings bis etwa  $1 \cdot 10^{10}$  eVolt messen, während daneben noch eine ganze Anzahl unabgelenkter Strahlen gefunden wird. Da man mit anderen Methoden auf viel höhere Energien schliessen muss, so ist anzunehmen, dass bei den häufig gemessenen, niedrigeren Energien ( $10^6$  bis  $10^8$  eVolt) überwiegend sekundäre Höhenstrahlen abgelenkt worden sind, jedenfalls nicht primäre. Dieser Schluss wird dadurch bekräftigt, dass die Höhenstrahlung an den Beobachtungsorten in Seehöhe bereits die ganze Atmosphäre durchsetzt hat, wozu allein schon  $4 \cdot 10^9$  eVolt erforderlich werden, und dass sie sich dabei schon stark mit Sekundärstrahlen angereichert hat.

Die Untersuchungen haben bisher ergeben, dass etwa die eine Hälfte der beobachteten Strahlen mittlerer Energien bis  $2,5 \cdot 10^9$  eVolt aus Elektronen besteht die andere aus positiv geladenen Teilchen wie Protonen und Positronen, deren Existenz in der Höhenstrahlung zuerst von Anderson entdeckt wurde. Bei Strahlen mit höheren Energien, etwa  $10^{10}$  eVolt und darüber scheinen positiv geladene Teilchen vielleicht Protonen zu überwiegen.

Eine Eigentümlichkeit der Höhenstrahlung ist das Auftreten von Schauern bei der Wechselwirkung mit Materie. Die Schauerphänome sind sowohl mit koinzidierenden Zählrohren als auch besonders mit



koinzidenzgesteuerten Nebelkammern untersucht worden. Auch hierbei handelt es sich um hohe Energieumsätze und wahrscheinlich um neuartige Elementarprozesse, die durch den heutigen Stand der Theorie noch keineswegs zu erfassen sind und vielleicht zu ganz neuartigen Erkenntnissen über energiereiche Strahlen führen werden.

### *Energiebestimmungen im natürlichen erdmagnetischen Feld.*

Um die bei energiereichen Strahlen auftretenden Erscheinungen weiter zu erforschen wären also stärkere und ausgedehntere Magnetfelder als die bisher verfügbaren erwünscht. Glücklicherweise bietet sich hierzu ein natürlicher Magnet im erdmagnetischen Feld. Dieses ist zwar in seiner Ausdehnung den Höhenstrahlen angemessen, doch lässt seine Homogenität zu wünschen übrig und die Feldstärke von nicht mehr als 0,2 Gauss erscheint zunächst wenig geeignet. Da sich aber das Feld in der Grössenordnung von Erddurchmessern mit noch merklicher Intensität in den Weltenraum hinein erstreckt, so genügt es trotzdem selbst energiereichere Höhenstrahlen abzulenken. Dazu bietet es noch den besonderen Vorteil, dass die Ablenkung nur an den primären Höhenstrahlen erfolgt, da diese weit ausserhalb der Erdatmosphäre noch kaum Sekundärstrahlen enthalten können. Dank der grossen rechnerischen Vorarbeit, welche für das entsprechende Problem der Polarlichter bereits durchgeführt worden ist, gelingt es der speziellen Theorie der Ablenkung von Höhenstrahlen im erdmagnetischen Feld aus der beobachteten Breitenverteilung der Strahlungsintensität weitgehende Aufschlüsse über die Energie der primären Höhenstrahlen zu erhalten. So ergibt sich, dass elektrisch geladene Teilchen mit Energien über  $2 \cdot 10^{10}$  eVolt die Erde oberhalb der Atmosphäregrenze an jeder Stelle und aus jeder Richtung zu erreichen vermögen. Für Teilchen geringerer Energie treten dagegen die sogenannten verbotenen Richtungen auf. Beispielsweise werden positiv geladene Teilchen am geomagnetischen Äquator innerhalb eines Kegels mit horizontaler Achse und bestimmter Öffnung gegen Osten vom Erdfeld ausgeblendet. Mit zunehmenden magnetischen Breiten schliesst sich dieser Kegel allmählich bis er bei einer Breite verschwindet, die von der Energie der betrachteten Komponente abhängig ist. Eingehendere Untersuchungen, besonders an der Nord-Süd-Asymmetrie lassen daher eine genaue Analyse des Energiespektrums der Strahlen in weitem Bereich erwarten.

Die Minimalenergien  $E$ , die ein geladenes Teilchen besitzen muss um bei verschiedener geomagnetischer Breite die Grenze der Atmosphäre aus allen Richtungen trotz magnetischer Ablenkung zu erreichen, sind in folgender Tabelle nach Blackett angegeben:

$\lambda = 0^\circ$	$20^\circ$	$40^\circ$	$60^\circ$	$80^\circ$	$90^\circ$	geom. Breite
$E_2$	1,9	1,5	0,65	0,12	0,0017	$0,10^{10}$ eVolt

Unter der Voraussetzung, dass die Höhenstrahlenteilchen ein ausgedehntes und monoton verlaufendes Energiespektrum besitzen, würde also die Intensität vom Pol zum Äquator fortschreitend mit abnehmender Breite des Beobachtungsortes infolge Ausfalls immer härterer Strahlen kontinuierlich abnehmen, wenn man für den Augenblick einmal von der bremsenden Wirkung der Atmosphäre absieht. Kommt diese hinzu, so werden Teilchen mit kleinerer Energie als sie zum Durchsetzen der Atmosphäre erforderlich ist, bereits durch diese schon überall ausgesondert. Infolgedessen beginnt die magnetische Ablenkung nunmehr erst in der Breite hervorzutreten, in welcher das erdmagnetische Feld auch Strahlen höherer Energie beeinflusst d. h. es tritt erst von einer bestimmten geomagnetischen Breite an eine kontinuierliche Abnahme auf. Sie setzt am Erdboden mit etwa  $50^\circ$  magnetischer Breite nach dem Äquator zu ein, in grösseren Höhen natürlich schon früher. Durch Vergleich der theoretisch geforderten Breitenverteilung mit der experimentell beobachteten lässt sich danach die Bremsung durch die Atmosphäre zu etwa  $4.10^9$  eVolt schätzen.

#### *Energieschätzungen aus Absorption.*

Aus den quantitativen Messungen des Energieverlustes von Höhenstrahlen bei Durchdringen bestimmter Bleidicken mit der Nebelkammer hat man gefunden, dass die hierzu erforderliche Energie ungefähr übereinstimmt mit derjenigen, welche der magnetische Breiteneffekt für die Bremsung durch die Atmosphäre ergibt d. h.  $4.10^9$  eVolt bei 10 m Wasseräquivalent. Wenn man daher noch Strahlen unter 700 m Wasser beobachtet, so muss ihnen eine Minimalenergie von  $70.4.10^9$ , also  $280.10^9$  oder rund  $3.10^{11}$  eVolt zukommen. Ähnlich kann man über die spezifische Ionisation, die Ionisationsarbeit und die mittlere Reichweite zu unteren Energiegrenzen der Strahlen gelangen, die ebenfalls bis an  $10^{12}$  eVolt heranreichen.

Zusammenfassend wäre also zu sagen, dass in der Höhenstrahlung Energien von etwa  $10^{12}$  eVolt herab nachgewiesen worden sind, wobei es den Anschein hat, als wären positiv geladene Teilchen die energiereicheren.

#### *Bedeutung der Energiebestimmungen.*

Die Wechselwirkung von Teilchen sehr hoher Energie mit Materie sind für die neuere Elektronentheorie von ganz besonderem Interesse. So versagt z. B. die heute vollständigste Theorie des



Elektrons von Dirac vermutlich schon bei Energien über  $137 m.c^2$  oder etwa  $10^8$  eVolt, weil über diese Energien hinaus die de Broglie-Welle des Elektrons kleiner als der klassische Elektronenradius d. h. etwa  $10^{-13}$  cm wird und das Elektron vermutlich dann nicht mehr als Punktladung wirkt, sodass ganz neue Effekte auftreten.

Diese, besonders für theoretische Betrachtungen so wichtigen Untersuchungen könnte man selbstverständlich viel einfacher ausführen, wenn man nicht auf solche Energiebeträge angewiesen wäre, die zur Zeit nur in den Höhenstrahlen zur Verfügung stehen. Denn im Laboratorium ist man heute erst in der Lage, Spannungen von einigen Millionen eVolt zur Strahlenerzeugung zu verwenden, weil darüber hinaus unsere derzeitigen Isolierstoffe den Dienst versagen, Ja, es hat sogar den Anschein, dass gegenüber Energien von der Größenordnung der primären Höhenstrahlen sogar die Bausteine unserer Welt, die Atome, nicht mehr standhalten werden. So bleibt vorerst die Aufgabe, Strahlen der dazwischenliegenden Energiestufen künstlich herzustellen, also von den Energien, zu denen der Tesla-Transformator der erste grundlegende Schritt war. Über das, was Tesla vor mehr als 40 Jahren hiermit erreichte, ist man auch heute noch nicht wesentlich hinausgekommen und schätzt man die Ergebnisse von Arbeiten daran, wie weit sie über das eigentliche Ziel auf andere Gebiete hinübergreifen, so wird man auch insofern das Genie Teslas bewundern.

Prof. Dr. *Werner Kolkhörster*,  
Ordentlicher Professor an der Universität Berlin;  
Direktor des Instituts für Höhenstrahlenforschung  
der Universität Berlin, Berlin-Dahlem.

---