

setz bis zu mindestens 150 MeV hinauf. Innerhalb der Genauigkeitsgrenzen dieser und unserer Messungen lassen sich die absoluten Teilchenzahlen pro cm Primärbahn aneinander anschließen, obwohl die Sekundärennergien um drei Zehnerpotenzen auseinander liegen.

Vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Berlin ausgeführt.

Meines hochverehrten, inzwischen verstorbenen Lehrers, Hrn. Prof. Dr. H. Geiger, gedenke ich in herzlicher Dankbarkeit. Er gab nicht nur die Anregung zu dieser Arbeit, sondern war auch an ihrem Fortgang sehr stark interessiert. Für zahlreiche helfende Ratschläge bin ich Hrn. Dozent Dr. O. Haxel zu Dank verpflichtet. Durch wertvolle Diskussionen mit Hrn. Dozent Dr. F. Bopp wurde die Arbeit weiter gefördert. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für ein Stipendium.

Können Protonen als primäre Komponente der kosmischen Strahlung angesehen werden?¹

Von KARL-HEINZ HÖCKER

Aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik, Hechingen

(Z. Naturforschg. 2a, 69–72 [1947]; eingegangen am 7. Januar 1947)

Es wird versucht, die bisherigen Erfahrungen über die Höhenstrahlung in der Atmosphäre vom Standpunkt einer primären Protonenkomponente zu verstehen. Dabei erwies sich das neutrale Meson als von entscheidender Bedeutung.

Seit jetzt mehr als zehn Jahren ist auf Grund von sich allmählich häufenden experimentellen Befunden die These aufgestellt worden, daß Elektronen nicht die primäre Komponente der kosmischen Strahlung sein können, wie man zunächst annahm. An deren Stelle können nach unserem heutigen Wissen lediglich Protonen gesetzt werden. Neutronen und Mesonen dürften ihres radioaktiven Zerfalls wegen dafür nicht in Frage kommen.

Die primären Protonen müssen in der oberen Atmosphäre unter Erzeugung von Mesonen und vielleicht einzelnen Elektronen absorbiert werden, da man Protonen mit beträchtlicher Energie in mäßigen Höhen bereits nicht mehr beobachtet. Man muß sich also vorstellen, daß energiereiche Protonen ($E > 10^9$ eV) durch Stoß- oder Streu-Prozesse an den Nukleonen (=Protonen+Neutronen) in der Stratosphäre Sekundärteilchen erzeugen. Diese müssen überwiegend Mesonen sein. Lichtquanten und Elektronen können es deshalb nicht (ausschließlich) sein, weil solche Teilchen,

wenn sie die Höhenstrahlung in der Atmosphäre zum Gefolge haben sollen, so energiereich sein müssen, daß sie sogleich Kaskaden bilden. Diese sind aber nicht gefunden^{2,3,4,5}. Also müssen zunächst Mesonen entstehen. Die weiche Komponente dürfte dann durch den Zerfall der Mesonen oder aus Anstoßelektronen entstehen. Damit das Maximum der Ionisation⁶ jedoch in nicht zu große Tiefe gerückt wird, darf die Energie der Mesonen nicht groß sein; vielmehr müssen viele Mesonen mit geringer Energie erzeugt werden. Diese muß so gering sein, daß die aus ihnen entstehenden Elektronen keine größeren Kaskaden mehr auslösen können. Denn das Maximum an Teilchen selbst bei kleinen Kaskaden ($E_K \approx 10^9$ eV) tritt erst nach Durchsetzung einer Luftsicht äquivalent zu einem Druck von etwa 11 cm Hg auf, während das Ionisationsmaximum bereits bei 8 cm Hg liegt. Mit einer mittleren Mesonenenergie um $9 \cdot 10^8$ eV (Elektronenenergie um $4,5 \cdot 10^8$ eV) kommt das Ionisationsmaximum in der Atmosphäre etwa an die richtige Stelle. Die Höhe des

¹ Auszug. Eine ausführliche Darstellung erfolgt demnächst an anderer Stelle.

² M. Schein, W. P. Jesse u. E. O. Wollan, Physic. Rev. **59**, 615 [1941].

³ E. O. Wollan, M. Schein u. W. P. Jesse, Physic. Rev. **59**, 930 [1941].

⁶ G. Pforz, Z. Physik **102**, 23 [1936].

⁴ M. Schein u. M. Iona, Physic. Rev. **63**, 60 [1943].

⁵ M. Schein u. J. Tabin, Physic. Rev. **63**, 223 [1943].



Maximums, der Abfall der Gesamtintensität unterhalb vom Maximum⁶ sowie der Verlauf der harten Komponente^{2,7} können gut beschrieben werden durch geeignete Wahl des von der Energie unabhängigen Wirkungsquerschnitts für den Protonenstoß. Nimmt man an, daß beim Stoß eine beträchtliche Energieübertragung auf das Rückstoßteilchen erfolgt (Ansatz I), so ergeben sich die nachfolgenden Zahlen als beste Werte: Für den Wirkungsquerschnitt $\sigma = 2,2 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2$, gerechnet pro Nukleon, für den Energieverlust $\epsilon^* E_p$ eines stoßenden Protons zugunsten der erzeugten Mesonen $\frac{1}{4} E_p$, während der Rest $(\frac{3}{4} E_p)$ aufgeteilt wird zwischen Primär- und Rückstoßteilchen. Ist dagegen die Energieübertragung auf das Rückstoßteilchen vernachlässigbar klein (Ansatz II), so sind durch die Intensität in der Atmosphäre die Zahlen nicht eindeutig festgelegt, sondern es hat lediglich das Produkt $\sigma \cdot \epsilon^*$ einen festen Wert. Man kann also den einen Faktor noch durch eine zusätzliche experimentelle Angabe festlegen. Bei $\sigma = 2,2 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2$ z. B. ergäbe sich ϵ^* zu 0,38.

Mit Hilfe der bisher erwähnten energiearmen Mesonen kann der Verlauf der Intensität in der oberen Atmosphäre gut beschrieben werden. Für die untere Atmosphäre wie für die Erzeugung der großen Luftschauder sind energiereichere Mesonen nötig. Diese müssen in geringer Zahl neben den „energiearmen“ (Energie E_{M_a}) vorkommen. Während die letzteren vermutlich in Mehrfachprozessen entstehen, bei denen die Anzahl eine Funktion der Protonenenergie ist gemäß

$$n = \epsilon^* \cdot E_p / E_{M_a}, \quad (1)$$

mögen die „energiereichen“ aus Einzelprozessen hervorgehen, bei denen die ganze abgegebene Protonenenergie auf ein Meson vereinigt wird, sodaß deren Energie

$$E_{M_s} = \epsilon^* E_p \quad (2)$$

wird. Die beiden Ansätze tragen zwei Gruppen von Erfahrungen Rechnung.

1. Durch Gl. (2) wird das Spektrum der Primärteilchen auf die energiereiche Mesonenkomponente, die für Meereshöhe und die Luftschauder

⁷ A. Eh m e r t, Z. Physik **115**, 326 [1940].

⁸ H. Euler u. W. Heisenberg, Ergebn. exakt. Naturwiss. **17**, 1 [1938].

⁹ H. Euler u. H. Wergeland, Astrophysica Norwegica **3**, 165 [1940].

maßgeblich ist, übertragen. Aus dem Spektrum der Mesonen auf Meereshöhe (vergl. z. B.⁸) folgt, daß sie mit einem $E^{-1,8}$ -Spektrum erzeugt sein müssen; d. h. daß die Zahl der mit einer Energie $\geq E$ entstehenden Mesonen proportional zum reziproken Wert der 1,8. Potenz dieser Energie ist. Und aus der Häufigkeitsverteilung der Größe der Luftschauder^{9,10} ergibt sich, daß deren Primäre gleichfalls im wesentlichen ein $E^{-1,8}$ -Spektrum aufweisen. Werden die großen Luftschauder nun durch Bremsstrahlung der Mesonen oder Auslösung energiereicher Anstoßelektronen erzeugt, wie wir im Rahmen unseres Mechanismus annehmen, sind also die schauerauslösenden Teilchen Mesonen, so wird dadurch sowohl der in der letzten Zeit vielfach beobachtete harte Kern der Schauer erklärt, wie für unsere Überlegung das $E^{-1,8}$ -Spektrum der Mesonen betont. Da es unplausibel ist, wie die Mesonen bei ihrer Erzeugung dieses Spektrum gewinnen sollten, ist die einfachste Annahme, daß die Protonen bereits dieses Spektrum besitzen und es gemäß Gl. (2) auf die Mesonen übertragen.

2. Dieser Schluß wird gestützt durch den zweiten Punkt, der den Breiteneffekt in großen Höhen betrifft. Die Gl. (1) hat sich zur Darstellung des Intensitätsverlaufs in großen Höhen bei einer Breite ($\sim 50^\circ$) zwangsläufig ergeben. Wenn wir mit ihr die Intensität bei anderen Breiten (3° und 38°) berechnen und mit den gemessenen Kurven von Bowen, Millikan und Neher¹¹ vergleichen, so finden wir gute Übereinstimmung, wenn wir für die Protonen das $E^{-1,8}$ -Spektrum annehmen. Dieses Ergebnis im Zusammenhang mit den unter 1. angeführten Schlüssen würde es sehr seltsam erscheinen lassen, wenn das Protonenspektrum nicht dem $E^{-1,8}$ -Gesetz folgen würde, ein Spektrum, das auch der früher angenommenen primären Elektronenkomponente zugrunde gelegt wurde.

Das bisher geschilderte Verfahren, das als nächstliegendes zur Beschreibung der Beobachtungen erscheint, hat verschiedene Mängel, von denen wir zwei herausheben wollen. Der erste betrifft den Ost-West-Effekt. Nach den Messungen von Johnson weist die harte Komponente einen beträchtlichen Ost-West-Effekt, die weiche da-

¹⁰ G. Molière, in „Vorträge über kosm. Strahlung“, herausgegeb. v. W. Heisenberg, Berlin [1943].

¹¹ J. S. Bowen, R. A. Millikan u. V. H. Neher, Physic. Rev. **52**, 80 [1937].

gegen gar keinen auf^{12, 13}. Das deutet darauf hin, daß die Primären der harten Komponente ausschließlich positiv geladen sind, die Primären der weichen dagegen zu gleichen Teilen positive wie negative Ladungen tragen sollten, *es sei denn, daß bei der etwaigen Erzeugung der weichen Komponente aus der harten die Strahlrichtung nicht erhalten bleibt*. Für den Winkel ϑ , unter dem beim Zerfall der energiearmen Mesonen das Elektron gegenüber der Bahn des Mesons weiterfliegt, gilt nun auf Grund von Energie- und Impulssatz im Mittel (μ_0 = Ruhmasse des Mesons)

$$1 + \cos \vartheta = 2 \frac{E_{M_a}^2 - \mu_0^2 c^4}{E_{M_a}^2}. \quad (3)$$

Daraus folgt bei unseren Annahmen $\vartheta \approx 0^\circ$, das Elektron fliegt also in der Richtung des Mesons weiter, d. h. die weiche Komponente sollte theoretisch denselben Ost-West-Effekt zeigen wie die harte. Um ein wesentlich von 0 verschiedenes ϑ zu erhalten, darf die Gesamtenergie der Mesonen die Ruhenergie nicht wesentlich überschreiten. Das ist eine Forderung, die mit der anderen, nämlich das Maximum der Ionisation in der Atmosphäre an der richtigen Stelle zu beschreiben, zunächst unvereinbar zu sein scheint.

Eine weitere Diskrepanz unserer bisherigen Ergebnisse besteht zu den Messungen, die die Erzeugung von durchdringenden Teilchen (Mesonen) in verschiedenen Materialien untersuchen^{14, 15}. Dabei ergibt sich in Paraffin ein Wirkungsquerschnitt von $1,8 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$ pro Nukleon, also wesentlich größer, als wir bisher angesetzt hatten. Dabei bleibt aber der Abfall der Protoneintensität in der Atmosphäre etwa so, wie es dem bisher angenommenen Wirkungsquerschnitt entspricht; er ist also nicht steiler. Dieses Ergebnis ist mit dem Ansatz I überhaupt nicht darstellbar. Auch beim Ansatz II ist der große Wirkungsquerschnitt nicht ohne weiteres durch ein verkleinertes ϵ^* auszugleichen gemäß der oben angegebenen Beziehung $\sigma \propto \epsilon^* = \text{const.}$, denn dies kleine ϵ^* hätte nach Gl. (1) entweder ein verkleinertes n (das ist mit der Messung nicht in Einklang) oder eine entsprechend verringerte Mesonenenergie zur Folge, die etwa von der Größe wäre, wie sie für Erklä-

rung des fehlenden Ost-West-Effektes der weichen Strahlung gefordert wird, die aber für die Beschreibung des Ionisationsmaximums in der Atmosphäre die angegebenen Schwierigkeiten bringt.

Da der Wirkungsquerschnitt durch die Versuche eindeutig festgelegt zu sein scheint, ist zu überlegen, wie das Maximum der Ionisation an die rechte Stelle geschoben werden könnte. Die Mesonenenergie liegt jetzt bei etwa $1,7 \cdot 10^8 \text{ eV} (\pm 20\%)$; n ist gegen früher etwas kleiner angenommen. — Die Schwierigkeit in der Beschreibung der Lage des Maximums der Ionisation in der Atmosphäre wird beseitigt durch die Einführung von neutralen Mesonen (Neutrettos), die u. a. die beiden folgenden Eigenschaften haben: 1. Sie wandeln sich bei Streuung an einem Kernteilchen in geladene Mesonen um, und 2. sie zerfallen (wie die Ladung tragenden Mesonen) mit einer Halbwertszeit $\tau = 2 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$ in Neutrino-paare (nicht auch in Elektronenpaare, wie gelegentlich in theoretischen Arbeiten angenommen wird). Diese beiden Eigenschaften garantieren, daß die in dichter Materie erzeugten Sekundärteilchen zum größten Teil als Mesonen nachweisbar werden, während die Neutrettos in der dünnen Materie der oberen Atmosphäre zerfallen, bevor sie Gelegenheit haben, sich umzuwandeln. Der Wirkungsquerschnitt für die Umwandlung wird nun gerade so bestimmt, daß das Maximum der Ionisation in der Atmosphäre an die richtige Stelle kommt. Das ergibt einen Wirkungsquerschnitt von der Größe $\sim 5 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$. Der Zahlwert reicht aus, damit Neutrettos, die in Paraffin von nur 3 cm Dicke erzeugt werden, mit großer Wahrscheinlichkeit als geladene Mesonen herauskommen und somit der Messung zugänglich sind.

Wenn in den Versuchen Paraffin durch Blei ersetzt wird, hat man Ergebnisse gewonnen, aus denen man auf einen beträchtlich geringeren Wirkungsquerschnitt schließen kann (M. Schein). Uns erscheint dieser Schluß nicht zwingend, da bei den benutzten, recht beträchtlichen Bleidicken ein Teil der erzeugten Sekundären bereits in dem Bleiblock stecken bleibt, wodurch eine geringere Produktion vorgetäuscht wird. Unterschiede im Wirkungsquerschnitt bis zu etwa einem Faktor 2 zugunsten des Paraffins sind aber vielleicht nicht

¹² T. H. Johnson, Physic. Rev. **47**, 318 [1934]; **54**, 385 [1938]; **56**, 226 [1939].

¹³ T. H. Johnson u. I. G. Barry, Physic. Rev. **56**, 219 [1939].

¹⁴ M. Schein, M. Iona u. J. Tabin, Physic. Rev. **64**, 252 [1943].

¹⁵ W. G. Stroud u. M. Schein, Physic. Rev. **67**, 62 [1945].

unmöglich, da beim Auftreffen eines Protons auf einen Bleikern möglicherweise nur ein Nukleon der Oberfläche für die Mesonenerzeugung wirksam wird, während die übrigen infolge Auflösung des Kernverbandes davonfliegen¹⁶. Versuche in der Stratosphäre mit Bleischichten von $1/2$ bis 1 cm Dicke, die diese Frage klären könnten, sind unseres Wissens bisher nicht angestellt worden.

Damit sind die beiden oben angegebenen Diskrepanzen, die der Protonenhypothese in der einfachsten Form anhaften, beseitigt. Das Bild, das wir uns jetzt von der kosmischen Strahlung machen, ist folgendes: Die harte Komponente, die mehr als 4 cm Pb zu durchdringen vermag, besteht in der höchsten Atmosphäre fast nur aus Protonen. Erst allmählich werden energiereiche Neutrettos in Mesonen umgewandelt. Der Wirkungsquerschnitt für die Umwandlung dieser energiereichen Teilchen ist übrigens um Größenordnungen kleiner als für die energiearmen. Die „weiche“ Komponente in der bisher angegebenen Intensität besteht in der oberen Atmosphäre aus den energiearmen Mesonen und den aus ihnen folgenden Elektronen, in der unteren lediglich aus den Anstoß- und Zerfalls-Elektronen der energiereichereren Mesonen. Neben Mesonen und Elektronen hat die Neutretto-Strahlung in der ganzen Atmosphäre und in großen Tiefen unter

dem Meeresspiegel eine große Bedeutung. Ihre Existenz ist nachgewiesen durch eine Vielzahl von Autoren, die eine „Erzeugung durchdringender geladener Teilchen (Mesonen) durch neutrale Strahlung“ beobachtet haben^{17, 18, 19, 20, 21, 22, 23}. Sie haben z. Tl. versucht, diese Strahlung als Photonen zu deuten (insbesondere in²³), können aber dann nicht recht verstehen, warum diese Photonen keine Kaskaden auslösen. Daher ist gelegentlich schon die Notwendigkeit der Annahme eines neuen neutralen Teilchens (Neutretto oder Neutron) diskutiert worden²⁴. Für uns ist es sehr naheliegend, die neutralen Teilchen mit den Neutrettos zu identifizieren, die wir zur Lösung der besprochenen prinzipiellen Schwierigkeiten annehmen müssten. Neutronen in genügender Zahl und Energie können auf Grund gewisser Versuchsergebnisse kaum vorhanden sein. Die Neutrettozahl wird nach Durchsetzung genügend dicker Materieschichten mit der Mesonenzahl in ein Gleichgewicht kommen, da wahrscheinlich Mesonen auch wieder in Neutrettos übergehen können. Die experimentellen Unterlagen zur Entscheidung dieser Frage sind aber vorläufig sehr ungenau. Im ganzen kann man sagen, daß durch eine primäre Protonenkomponente mit Hilfe von neutralen Mesonen unsere heutigen Erfahrungen gut beschrieben werden können.

¹⁶ Diese Möglichkeit wurde anlässlich einer Diskussion von Hrn. Baggé angedeutet.

¹⁷ H. Maäß, Ann. Physik (V) **27**, 507 [1936].

¹⁸ M. Schein u. V. C. Wilson, Physic. Rev. **54**, 304 [1938].

¹⁹ Shonka, Physic. Rev. **55**, 24 [1939].

²⁰ M. Schein, W. P. Jesse u. E. O. Wollan, Physic. Rev. **56**, 613 [1939]; **57**, 847 [1940].

²¹ B. Rossi u. V. Regener, Physic. Rev. **58**, 837 [1940].

²² V. Regener, Physic. Rev. **64**, 252 [1943].

²³ J. Tabin, Physic. Rev. **66**, 86 [1944].

²⁴ Vergl. besonders die Diskussion bei Nordheim u. Hebb, Physic. Rev. **56**, 494 [1939]; sowie bei Schein, Wollan u. Groetzingen, Physic. Rev. **58**, 1027 [1940].