

die Positrontheorie übertragen. Die Wechselwirkung mit den unendlich vielen Vakuumelektronen negativer Energie verändert bereits die elektrostatische Selbstenergie des Elektrons in solcher Weise, daß sie ebenso wie die transversale Selbstenergie in der Positrontheorie logarithmisch divergiert und ebenfalls wie diese nur in störungstheoretischen Näherungen berechnet werden kann. Versucht man nun eine exakte Behandlung der Selbstenergie in der Positrontheorie durchzuführen, so trifft man auf die fundamentale Schwierigkeit, daß das exakte Problem gar nicht vollkommen definiert ist. Schon in höheren störungstheoretischen Näherungen treten bekanntlich die Mängel an Eindeutigkeit hervor¹⁹. Um also diesem Fragenkreis des Verhaltens der exakten Selbstenergie näherzutreten, müßte man vorher erst eine

¹⁹ Erst in der letzten Zeit hat F. J. Dyson, Physic. Rev. (2) 75, 1736 [1949], im Zusammenhang mit der Tomonaga-Schwingerschen Masse-Ladungsrenormierung genaue Vorschriften für die Behandlung der höheren störungstheoretischen Näherungen gegeben.

definiertere Positrontheorie schaffen. Mit der bisherigen Formulierung kann man ganz verschiedenartige „exakte“ Ergebnisse erhalten²⁰. Wir mußten uns deshalb bezüglich der exakten Behandlung auf eine genauere Diskussion der Quantenelektrodynamik ohne Löchertheorie beschränken.

Die heutigen Schwierigkeiten in der Quantenelektrodynamik sind also nicht durch eine unpassende mathematische Methode verursacht, sondern in den Grundlagen der Theorie enthalten. Sie sind teilweise klassischen und teilweise quantentheoretischen Ursprungs. Die klassischen haben ihren Grund in der unzutreffenden Formulierung der Eigenkräfte (genauer der Trägheitskräfte) von punktförmigen Teilchen, die quantentheoretischen in den Schwankungen der quantisierten Felder.

Auf die weiteren sich daraus ergebenden Fragen soll in II eingegangen werden.

²⁰ Zusatz b. d. Korr.: Dies gilt auch bei Benutzung der kovarianten Formulierung von Tomonaga.

Der Tritiumgehalt der Atmosphäre

Von V. FALTINGS und P. HARTECK

Aus dem Physikal.-chem. Institut der Universität Hamburg
(Z. Naturforschg. 5a, 438—439 [1950]; eingegangen am 2. August 1950)

Tritium konnte im freien Wasserstoff der Atmosphäre, welcher zu Wasser verbrannt worden war und elektrolytisch eingeengt wurde, an seiner β -Aktivität nachgewiesen werden. In 10 cm³ Luft ist etwa 1 Tritium-Atom vorhanden, in der ganzen Atmosphäre 1 Mol.

Der Entdeckung des Tritiums in der Atmosphäre gehen eine Reihe von Arbeiten voraus, die hier zunächst kurz geschildert werden mögen. H. Jensen und der eine von uns hatten gezeigt¹, daß in den höchsten Schichten der Atmosphäre der Wasserdampf durch das Ultraviolett der Sonne zerspalten wird, die H-Atome das Schwerkraftfeld der Erde verlassen und der Sauerstoff zurückbleibt, wodurch die dauernden Sauerstoffverluste durch Oxydation der Gesteine über die geologischen Epochen ausbalanciert werden. In einer Zuschrift an die „Naturwissenschaften“² haben H. Suess und der eine von uns über Experimente berichtet, in denen gezeigt wurde, daß der elementare Wasserstoff, welcher in einer Konzentration von $5 \cdot 10^{-7}$ mol/l in der normalen Luft enthalten ist, in seiner isotopischen Zusammensetzung vom Normalen abweicht, da das Verhältnis D:H = 1:4500

gefunden wurde gegenüber der normalen Zusammensetzung von 1:6000. Wasserstoff, der aus Fäulnisprozessen usw. an der Erdoberfläche entsteht, kann nur einen geringeren D-Gehalt als normaler Wasserstoff besitzen, da im chemischen Gleichgewicht bei Zimmertemperatur mehr als 3-mal soviel D im Wasser als im Wasserstoff enthalten ist. Trotzdem ist der D-Gehalt des aus dem Wasserstoff der Luft gewonnenen Wassers höher als der des normalen Wassers. Dies kann offenbar nur so verstanden werden, daß der Effekt des bevorzugten Wegdiffundierens von H-Atomen aus dem Schwerkraftfeld der Erde und die dadurch hervorgerufene D-Konzentrationserhöhung das soeben erwähnte Moment überkompenziert. Dieses Ergebnis zeigt aber auch, daß der in den höchsten Schichten der Atmosphäre zu HD rekombinierte Wasserstoff nur teilweise in

¹ H. Jensen, Z. Naturforschg. 3a, 591 [1948].

² H. Suess, Naturwiss. 36, 218 [1949].



der Ozonschicht oxydiert worden sein kann. Dieses Resultat gab uns Mut zu den im folgenden beschriebenen Versuchen.

Bekanntlich ist der ^3He -Gehalt des atmosphärischen Heliums höher als in den Heliumquellen und in Helium enthaltenden Gesteinen, und es ist schon von verschiedenen Seiten darauf hingewiesen worden, daß dieses ^3He bei der Spaltung von Sauerstoff-, Stickstoff- usw.-Kernen durch die Höhenstrahlung entsteht. Nun ist es naheliegend, anzunehmen, daß durch die Höhenstrahlung primär ^3He und Tritium gleich häufig entstehen. Man könnte sogar geneigt sein, anzunehmen, daß das Tritium infolge seiner geringeren Ladung primär häufiger entsteht als ^3He , da es leichter durch den Gamow-Berg gehen kann. Ferner ist bekannt, daß die Höhenstrahlung in den höchsten Schichten der Atmosphäre viel intensiver ist als an der Erdoberfläche. Ab 80 km Höhe ist der Wasserdampf photochemisch praktisch vollkommen in seine Atome zerschlagen, auch der Wasserstoff besteht größtenteils nur noch aus Atomen, und durch Höhenstrahlung primär gebildete Tritiumatome haben in diesen Höhen nicht die Möglichkeit, sich in Wassermoleküle einzubauen, sondern werden mit den anderen H-Atomen rekombinieren und durch Konvektion und Diffusion bis auf die Erdoberfläche heruntergelangen.

Wasser aus dem Wasserstoff der Atmosphäre wurde von P. Harteck und H. Suess so gewonnen, daß aus der Helium-Neon-Fraktion, die bei der Luftverflüssigung der Firma Linde AG., Werk Hamburg-Harburg, abgeschieden wird, der elementare Wasserstoff an Kupferoxyd zu H_2O oxydiert wurde. Es waren für 80 g H_2O einige 100 000 m³ Luft aufgearbeitet worden. Aus diesem Wasser bzw. Wasserstoff wurde Aethan durch Hydrieren von Acetylen hergestellt. Dieses Aethan wurde auf seine β -Aktivität untersucht, da Tritium ein β -Strahler von 12 Jahren Halbwertszeit ist. Es waren dauernd 2 Zählrohre in Betrieb, die abwechselnd mit normalem und „atmosphärischem“ Aethan gefüllt wurden. Die Zählrohre hatten ein Volumen von 200 cm³, der Druck des Aethans betrug 40 mm. Die Zählversuche ergaben, daß knapp innerhalb der Fehlergrenze bei dem „atmosphärischen“ Aethan die gezählte Teilchenzahl von 160 Teilchen im Leerlauf auf 160,5 pro Minute erhöht worden war.

Zur Anreicherung des Tritiums elektrolysierten wir 40 cm³ des Wassers unter Anwendung aller Vorsichtsmaßnahmen (die mit dem Knallgas abziehende Feuchtigkeit wurde mit flüssiger Luft ausgefroren

und in die Elektrolysierzelle zurückgebracht), auf 1,1 cm³ ein und erwarteten bei einem Separationsfaktor von 12—15 für das Tritium eine Anreicherung des Tritiums auf über das 20-fache. Nun wurde wieder Aethan hergestellt und die gezählten Teilchenzahlen stiegen von $160 \pm 0,5$ Leerlauf auf $173 \pm 0,5$. Da die entsprechenden Leerversuche negativ verliefen, kann der gefundene Effekt von $13 \pm 0,7$ Teilchen pro Minute nur durch die Radioaktivität des Tritiums hervorgerufen worden sein. Da unser Wasser $1\frac{1}{2}$ Jahre alt ist und ferner beim Präparieren des Aethans kleine Verluste an T entstanden sein können, so sind die 13 Teilchen pro Minute auf 17 ± 2 zu erhöhen. Bei einer Halbwertszeit von 12 Jahren für den β -Zerfall des Tritiums und dem bekannten Gehalt an freiem Wasserstoff in der Atmosphäre ergibt sich, daß in etwa 10 cm³ Luft 1 Tritium-Atom vorhanden ist, oder in der ganzen Atmosphäre rund 1 Mol Tritium-Atome. Der Tritium-Gehalt ist also so gering, daß er, falls Tritium künstlich in größerem Maße hergestellt würde, leicht überdeckt werden könnte.

Zunächst haben wir nun das primär gebildete, zu HT rekombinierte Tritium betrachtet, das, nur dem H_2 beigemischt, relativ konzentriert bleibt, und nicht das HTO, das in den H_2O -Kreislauf eingetreten ist und dabei außerordentlich verdünnt wird. Eine Überschlagsrechnung zeigt, daß selbst im Deuterium, welches aus Regenwasser gewonnen ist, normalerweise das Tritium nicht nachgewiesen werden kann, auch wenn 10-mal soviel Tritium primär in den Wasserkreislauf gehen sollte, als im elementaren Wasserstoff als HT verbleibt. Durch vorsichtiges Einelektrolyseren von 1 m³ D_2O , welches aus Regenwasser oder Wasser gewonnen ist, welches sich noch nicht mit den Wasservorräten der Erde durchmischt hat, auf 1 cm³, würde bei einem Separationsfaktor von 2 für D : T der Tritiumgehalt auf das 1000-fache ansteigen und dann allerdings schätzungsweise im Gebiete der Nachweisbarkeit liegen. Durch beide Tritium-Messungen wäre dann die gesamte Bilanz des Tritiums gegeben, woraus neue Momente für eine quantitative Bestimmung der Tritiumbildung durch die Höhenstrahlung, für den ^3He -Verlust der Atmosphäre, für den chemischen Austausch von Wasserstoff mit dem Wasserdampf der Atmosphäre oder auch die Durchmischung des Wassers auf der Erde und für viele andere Fragen gewonnen wären.

Der Firma Linde AG., München-Höllriegelskreuth, sei auch an dieser Stelle vielmals für ihr großzügiges Entgegenkommen gedankt.