Austauschkräfte zwischen Elementarteilchen und Fermi'sche Theorie des β-Zerfalls als Konsequenzen einer möglichen Feldtheorie der Materie

von E. C. G. Stueckelberg.

(11. V. 36.)

Inhalt: Elektron, Neutrino, Proton und Neutron werden als vier verschiedene Quantenzustände einer einzigen Elementpartikel angesehen. Quantensprünge zwischen diesen Zuständen erklären den β-Zerfall (gemäss der Theorie von Fermi) und geben zur Heisenberg-Majorana'schen Neutron-Proton-Austauschkraft Anlass. Die Festsetzung, dass negatives Elektron und positives Proton „Partikel"-Zustände (im Gegensatz zu „Antipartikel") sind, verbietet Zerstrahlungsprozesse der schweren Teilchen. Die umgekehrte Festsetzung (positives Elektron und positives Proton sind Partikel) führt zu Zerstrahlungsprozessen (siehe Zusammenfassung).

1. Vorbemerkung. Der Wunsch nach einer einheitlichen Feldtheorie wurde von verschiedenen Autoren[1]) ausgesprochen. Ihr Ziel war, das Gravitationsfeld und das elektromagnetische Feld als verschiedene Äusserungen eines einzigen Feldes zu erklären.

Die Quantentheorie Schrödinger's führt eine neue Feldgrösse ein, die ψ-Funktion. Diese erste Fassung genügte aber nicht der Forderung nach relativistischer Covarianz. Auf zwei Arten konnte Covarianz erreicht werden:

1. Durch die Schrödinger-Gordon'sche Wellengleichung. Sie hat, wie die Schrödinger'sche Theorie, eine skalare Feldstärke ψ als abhängige Variable. Wie Pauli und Weisskopf[2]) gezeigt haben, erklärt sie die Entstehung von Partikelpaaren (entgegengesetzter elektrischer Ladung, als „Partikel" und „Antipartikel" zu bezeichnen) durch Einwirkung des elektromagnetischen Feldes auf das Vakuum. Hingegen gibt sie keine Erklärung des Spins und des magnetischen Momentes der Partikel und erlaubt nur die Einstein-Bose-Statistik für die Teilchen.

2. Durch die Dirac'sche Wellengleichung. Dieselbe führt eine vierkomponentige Feldstärke ψ ein. Sie erklärt Spin und magnetisches Moment und erlaubt nur die Fermi-Dirac'sche Statistik für die Teilchen. Andererseits gibt sie zu den bekannten Niveaus negativer Energie Anlass, welche wir im Sinne von Dirac als „aufgefüllt" ansehen. Dirac und Heisenberg[3]) haben

*

gezeigt, dass man den Begriff „alle Niveaus negativer Energie sind besetzt bis auf eine endliche Zahl" mathematisch sinnvoll definieren kann. Die endliche Anzahl unbesetzter Niveaus verhalten sich dann wie Partikel entgegengesetzter Ladung, deren Energie und Impuls die Energieimpulsgrössen der betreffenden Niveaus sind mit umgekehrten Vorzeichen. Diese Löcher wollen wir als „Antipartikel" bezeichnen im Gegensatz zur „Partikel". Die Theorie ist symmetrisch in bezug auf Vertauschung des Begriffes Antipartikel und Partikel. Wir wollen daher im folgenden willkürlich das *positive Elektron als Partikel und das negative als Antipartikel* definieren. Das elektromagnetische Feld kann dann auch aus dem Vakuum (= alle negativen Niveaus aufgefüllt) ein Paar (Partikel und Antipartikel) erzeugen, indem eine Partikel aus einem ausgefüllten Niveau negativer Energie in ein solches positiver Energie springt. Die Analogie in bezug auf Partikelpaare zwischen der SCHRÖDINGER-GORDON'schen und der DIRAC-HEISENBERG'schen Theorie gilt auch in quantitativer Hinsicht, wie PAULI und WEISSKOPF gezeigt haben[2]).

Trotz der Unschönheit der Löchertheorie ist sie, wegen Spin und Statistik, der skalaren Theorie vorzuziehen.

Das Programm der einheitlichen Feldtheorie ist also dahin zu erweitern, dass Gravitationsfeld (g_{ik}-Feld), elektromagnetisches Feld ($\vec{E}\,\vec{B}$ resp. F_{ik}-Feld) und das materielle Feld (ψ_μ-Feld) als Äusserungen ein und derselben mehrkomponentigen Feldstärke zu erklären sind.

Nun transformieren sich (bei Vernachlässigung der Gravitationseffekte) die vier Komponenten des materiellen Feldes einer Partikelsorte ψ_μ bei Lorentztransformationen anders (unäquivalent) als die Komponenten c_i eines Weltvektors[4]). Trotzdem ist es möglich, aus den Spinoren ψ Vektoren c_i mit Hilfe gewisser Konstanten $\alpha_{i\,\mu\,\nu}$ zu bilden:

$$c_i = \psi_\mu^+\,\alpha_{i\,\mu\,\nu}\,\psi_\nu = \psi^+\,\alpha_i\,\psi\,. \tag{1}$$

Über doppelt vorkommende lateinische oder griechische Indizes (hier μ und ν) ist jeweils zu summieren. Transformiert sich dann ψ nach der Regel der Spinortransformation, ψ^+ nach derjenigen der adjungierten Spinoren, und bleiben die Zahlen $\alpha_{i\,\mu\,\nu}$ konstant, so transformiert sich c_i wie ein Vierervektor[4]).

Das Programm der einheitlichen Feldtheorie sei nunmehr reduziert auf den Versuch, materielles Feld ψ_μ und elektromagnetisches Feld (z. B. gegeben durch die Potentiale A_i (A_1, A_2, A_3 = Vektorpotential, $A_4 = i\Phi$ = skalares Potential) als Äusserung desselben Feldes zu verstehen. Wir vernachlässigen also alle Gravitationseffekte.

In dieser Richtung liegen zwei Versuche vor: ein erster stammt von DE BROGLIE[5]), welcher die A_i durch das spinorielle ψ-Feld zu erklären sucht. Unter dem Namen „Neutrinotheorie des Lichtes" hat sich diese Theorie zwar sehr weit entwickelt[6]), ist aber wegen verschiedener Schwierigkeiten noch nicht als endgültig zu betrachten.

Einen zweiten Weg schlägt BORN[7]) ein. Er erklärt die Existenz materieller Partikel als Äusserungen des vektoriellen A_i-Feldes. Trotz der grossen Erfolge der Born'schen Theorie scheint mir der de Broglie'sche Weg richtiger; da Formeln von ähnlichen Bau wie (1) gestatten, die Vektoren A_i durch die Spinoren ψ darzustellen, nicht aber ψ durch A_i.

Die BORN'sche Vektor-Theorie gestattet, die Schwierigkeiten der unendlichen Selbstenergie geladener Partikel zu umgehen; aber sie kann aus dem angeführten Grunde den halbzahligen Spin der Partikel nicht erklären. Die Spinor-Theorie dagegen erklärt Spin und Statistik der Partikel und Lichtquanten. Sie gibt die Bewegungsgleichungen (*Dirac-Gleichungen* für ψ) und, so hofft man wenigstens, die MAXWELL-Gleichung für A_i. Sie enthält aber zurzeit die bekannten Selbstenergieschwierigkeiten sowie den Schönheitsfehler der Darstellung von Antipartikeln durch Löcher.

Die folgenden Ausführungen sollen zeigen, was aus einer solchen unitären Spinortheorie für Folgerungen zu ziehen sind, wenn man, entsprechend der Existenz von vier Elementarpartikeln (Elektron, Neutrino, Proton, Neutron), eine $4 \times 4 = 16$ komponentige Spinorfeldstärke ψ annimmt.

2. Bezeichnungen. Lateinische Indizes $i\,(=1, 2, 3, 4)$ bezeichnen Vektorkomponenten im MINKOWSKI'schen Raum. x bedeutet $x_1, x_2, x_3, x_4 = ict$. $\vec{x}$ bedeutet in einem bestimmten Raum-Zeit-System die Ortskoordinaten. $dx^4 = dx_1\, dx_2\, dx_3\, dx_4$; $d\vec{x}^3 = dx_1\, dx_2\, dx_3$. Griechische Indizes $\mu, \nu\,(= 1, 2 \ldots . 16)$ bedeuten Spinorkomponenten. An Stelle von $\psi_\mu^+\, \Gamma_{i\,\mu\,\nu}\, \psi_\nu$ ist jeweils $\psi^+ \Gamma_i \psi$ geschrieben. e ist die Elementarladung des positiven Elektrons m, μm, μ'm und μ''m sind die Massen von Elektron, Neutrino, Proton und Neutron. $2\pi h$ ist die PLANCK'sche Konstante und c die Lichtgeschwindigkeit. Für die ψ-Funktion wird oft von der gespaltenen Schreibweise

$$\psi = \begin{pmatrix} \varphi \\ \chi \\ u \\ v \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

Gebrauch gemacht, wo φ, χ, u und v vierkomponentige Spinoren sind und den Zuständen φ = Elektron, χ = Neutrino, u = Proton und v = Neutron entsprechen.

γ_i sind die vierreihigen relativistischen DIRAC-Matrizen. Wir führen die 16reihigen Matrizen ein

$$\left.\begin{array}{ll} \Gamma_i = \begin{pmatrix} \gamma_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_i \end{pmatrix} & \Delta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu'' \end{pmatrix} \\ \Lambda = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \Lambda' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon' \end{pmatrix} \\ \multicolumn{2}{c}{\Lambda_i = \Lambda\Gamma_i = \Gamma_i\Lambda;\ \Lambda_i' = \Lambda'\Gamma_i = \Gamma_i\Lambda'} \end{array}\right\} \tag{2.2}$$

mit den Vertauschungsrelationen:

$$\left.\begin{array}{r} \Gamma_i\Gamma_k + \Gamma_k\Gamma_i = \delta_{ik}; \\ \Lambda,\ \Lambda',\ \text{und } \Delta \text{ untereinander und mit } \Gamma_i \text{ vertauschbar.} \end{array}\right\} \tag{2.3}$$

Da εe die Protonladung bedeutet, so ist, je nachdem ob das positive Proton als Partikel oder als Antipartikel (= „Loch" in den negativen Energiezuständen des negativen Protons), $\varepsilon = +1$ oder $\varepsilon = -1$ zu wählen. Dem Neutrino sprechen wir mit JORDAN die Neutrinoladung oder *duale Ladung* e zu, dem Neutron entsprechend $\varepsilon' e$[8]). Dann überzeugt man sich leicht, dass

$$P_i = \psi^+ \Lambda_i \psi,\ \ P_i' = \psi^+ \Lambda_i' \psi \tag{2.4}$$

die Viererverktoren der (in Einheiten e cm^{-3} gemessen) Ladungsdichte der elektrischen und der dualen Ladung sind.

p_i ist der Operator $(h/i)\,\partial/\partial x_i$ $(i = 1, 2, 3, 4)$. Ein Pfeil $\overleftarrow{p}_i$ soll jeweils bedeuten, dass die Differentiation nach links wirkt:

$$f(x)\,\overleftarrow{p}_i\,g(x) = \frac{h}{i}\,\frac{\partial f}{\partial x_i}\,g(x).$$

3. Das Programm der Neutrinotheorie. Obwohl die folgenden Überlegungen sich nur mit den Kernkräften befassen, empfiehlt es sich ein versuchsweises Programm der in der Vorbemerkung skizzierten unitären Spinortheorie aufzustellen. Es folgen dann die zu behandelnden Kernkräfte (Punkt 4 des Programms) aus einer einfachen Verallgemeinerung der elektrischen Kräfte. Wir unterscheiden zwei Schritte: I. Die „*klassische*" *Theorie* betrachtet die Feldstärke-Komponenten ψ als gewöhnliche (Dirac'sche c-) Zahlen. II. Die *Quantentheorie des ψ-Wellenfeldes* sieht die Komponenten als Operatoren an.

I. Programm der klassischen Theorie.

1. Es existiert eine reelle und gegenüber Lorentztransformationen invariante Lagrangefunktionen $L(\psi^+, \psi)$. Die aus dem

Extremalprinzip $\delta \int L dx^4 = 0$ folgenden, Euler'schen Gleichungen, sollen folgende Form haben:

2. Wenn die FERMI'sche Konstante $g = 0$ ist, sollen Diracgleichungen für Elektron und Proton folgen, worin die Potentiale A_i in einer bestimmten Weise durch die dem Neutrino zugeordneten Komponenten dargestellt sind. Für das Neutrino soll eine Diracgleichung folgen, welche in einer bestimmten Form eine Wechselwirkung mit dem Viererverktor P_i der elektrischen Ladung enthält. Aus ihr sollen, durch Bildung der Feldvektoren nach einem verallgemeinerten Verfahren (1.1), die Maxwell'schen Gleichungen folgen. Für die Neutronen soll eine Diracgleichung folgen, deren Wechselwirkung mit dem A_i-Feld Null ist, die aber vielleicht eine (noch unbeobachtete) Wechselwirkung mit der elektrischen Ladungsdichte P_i haben darf.

3. Es soll (auch wenn $g \neq 0$) der Erhaltungssatz der Ladung folgen. Wir werden wegen einer (später näher zu präzisierenden) Symmetrieforderung noch die Forderung nach der Erhaltung der „Neutrinoladung" diskutieren[8]).

4. Wenn $g \neq 0$ sollen die „Kernkräfte" (FERMI'sche Theorie des β-Zerfalles[9]) und HEISENBERG-MAJORANA'sche[10]) Austauschkraft) aus der Theorie folgen.

II. Programm der Quantentheorie des Wellenfeldes.

5. Man führt die zu $\psi_\mu(x)$ konjugierten verallgemeinerten Impulse $\pi_\mu(x) = \partial L / \partial (\partial \psi_\mu / \partial t)$ ein. Dann sollen die JORDAN-WIGNER'schen Vertauschungsrelationen[11]) (FERMI-DIRAC-Statistik) für $x_4 = x_4'$

$$\pi_\mu(x)\, \psi_{\mu'}(x') + \psi_{\mu'}(x')\, \pi_\mu(x) = h/i\, \delta_{\mu\mu'}\, \delta(\vec{x} - \vec{x}') \tag{3.1}$$

gelten. $\delta(\vec{r})$ ist die dreidimensionale Dirac'sche δ-Funktion.

6. Aus den Relationen (3.1) sollen, durch Anwendung des in Programmpunkt 2 gegebenen Verfahrens auf (3.1), die bekannten Vertauschungsrelationen für die elektrischen Feldstärken folgen[12]).

Es sollen keine unendlichen Selbstenergien auftreten. Die reinen Zahlen e^2/hc, Verhältnisse der Proton-, Neutron- und Neutrinomasse (μ, μ', μ'') zur Elektronenmasse*), sollen aus der Theorie folgen. Diesen Punkt wollen wir aber nicht zum Programm zählen, da er ausserhalb des Rahmens der folgenden Theorie fällt.

4. Skizzierung der Theorie ohne Kernkräfte. (Neutrinotheorie des Lichtes. Programmpunkte 1 bis 3.)

Die Lagrangefunktion (L-Funktion)

$$\begin{aligned} L(\psi^+(x), \psi(x)) &= \psi^+(x)\,(c\Gamma_i p_i - imc^2 \Delta)\,\psi(x) \\ &\quad - e^2 \int dy^4 K(x, y)\,(\psi^+ \Lambda_i' \psi)(y) \cdot (\psi^+ \Lambda_i \psi)(x) \end{aligned} \tag{4.1}$$

---

*) Sowie einige weitere reine Zahlen (die $\omega_{\chi\varphi}$ der Paragraphen 5 bis 7).

ist invariant und, weil die vorkommenden Matrizen hermiteisch sind (2.2), auch reell. Sie erfüllt Programmpunkt 1. Variation von ψ^+ liefert

$$(c\Gamma_i p_i - imc^2 \Delta - eA_i\Lambda_i - eA_i'\Lambda_i')\,\psi = 0 \tag{4.2}$$

und Variation von ψ

$$\psi^+(c\Gamma_i \bar{p}_i + imc^2\Delta + eA_i\Lambda_i + eA_i'\Lambda_i') = 0 \tag{4.2$^+$}$$

Hierin sind

$$A_i(x) = e\int dy^4 K(xy)\,P_i'(y) = e\int dy^4 K(xy)\,(\chi^+\gamma_i\chi + \varepsilon' v^+\gamma_i v) \tag{4.3}$$

und

$$A_i'(x) = e\int dy^4 K(xy)\,P_i(y) = e\int dy^4 K(xy)\,(\varphi^+\gamma_i\varphi + \varepsilon u^+\gamma_i u) \tag{4.4}$$

wo P_i und P_i' die in (2.4) definierten Dichten sind. $K(xy)$ ist eine invariante Funktion des Weltabstandes $\sqrt{\sum_i (x_i - y_i)^2}$ und daher symmetrisch. Sie hat die Dimension (Länge) $^{-2}$.

Benützt man jetzt die gespaltene Schreibweise (2.1) für ψ, so folgen die 4 Gleichungen

$$\begin{aligned}(c\gamma_i p_i - imc^2 - eA_i\gamma_i)\,\varphi &= 0\\ (c\gamma_i p_i - i\mu mc^2 - eA_i'\gamma_i)\,\chi &= 0\\ (c\gamma_i p_i - i\mu' mc^2 - eA_i\gamma_i)\,u &= 0\\ (c\gamma_i p_i - i\mu'' mc^2 - eA_i'\gamma_i)\,v &= 0\end{aligned} \tag{4.5}$$

Die erste und dritte Gleichung sind die Diracgleichungen von Elektron und Proton, wenn die A_i die Potentiale darstellen. Da gemäss der Neutrinotheorie des Lichtes dieselben lediglich durch die Neutrinowellenfunktionen dargestellt werden sollen, so ist dies nur der Fall, wenn ε' in (4.3) Null ist. Falls $\varepsilon' \neq 0$ ist, so erhalten unsere Gleichungen eine zwar bis jetzt unbeobachtete Neutron-Ladung Wechselwirkung die in (4.5) formal in der „elektrischen" Wechselwirkung enthalten ist. Aus Symmetriegründen liegt die Vermutung nahe, dass $\varepsilon' = \pm 1$ zu setzen ist. Aus der zweiten Gleichung (4.5) sollen, durch Bildung von Feldstärkegrössen $G_{ik}\,(=\vec{D}, \vec{H})$, die Maxwell'schen Gleichungen gefolgert werden. Aufgabe der Neutrinotheorie ist es, die Definition des A_i, G_{ik} und F_{ik}, d. h. die Funktion $K(x, y)$ zweckmässig zu wählen. Wir stellen uns im folgenden auf den (vorläufig noch ungerechtfertigten) Standpunkt, dass auch dieser Teil von Programmpunkt 2 erfüllt sei*). Dies soll uns zu einem heuristischen Prinzip verhelfen, welches uns den Weg zur Einbeziehung der „Kernkräfte" zeigt.

Programmpunkt 3 (Erhaltung der elektrischen Ladung) ist erfüllt. Durch Multiplikation von (4.2) mit $\psi^+\Lambda$ von links und

*) Im übrigen soll die Möglichkeit, dass Programmpunkte 1—3 und insbesondere 6 durch einen einfachen Ansatz der Art (4.1) *nicht* befriedigt werden können, durchaus offen gelassen werden.

von (4.2+) mit $\Lambda\psi$ von rechts und Addition folgt, wegen der Vertauschungsrelationen (2.3) und der Definitionen des elektrischen Ladungsstromes P_i

$$\frac{\partial}{\partial x_i} P_i = 0. \tag{4.6}$$

Multiplikation mit $\psi^+\Lambda'$ resp. $\Lambda'\psi$ von links resp. rechts liefert

$$\frac{\partial}{\partial x_i} P_i' = 0. \tag{4.6'}$$

Es empfiehlt sich aus Analogie A_i' als „duales elektrisches Potential" zu bezeichnen. Jedoch kommt dieser Bezeichnung nur wenig Bedeutung bei, da, wegen der nicht verschwindenden Masse des Elektrons keiner der beiden Anteile zu Maxwellgleichungen führen wird, während in A_i der erste, vom masselosen Neutrino herrührende, Teil Term $\chi^+\gamma_i\chi$ für das Auftreten der Maxwellgleichungen verantwortlich ist.

Die Lösung der Probleme dieses Paragraphen ist Aufgabe der Neutrinotheorie des Lichtes[6]. Die Ladungsdichten P_i und P_i' müssen im Sinne der Dirac-Heisenberg'schen Löchertheorie[3]) abgeändert werden. Für Proton resp. Neutron folgt hier auch, im Gegensatz zum Experiment, das magnetische Moment zu 1 resp. 0 Bohr'sche Proton-Magnetonen. Auf diesen Punkt wird später zurückzukommen sein. Die Existenz von Antiprotonen (=negative Protonen) und Antineutronen scheint mir kein Widerspruch mit dem Experiment zu sein, da sie nur ungeheuer viel schwerer zu erzeugen sind als positive Elektronen, und daher noch nicht beobachtet wurden.

Da die Behandlung der Quantisierung des Wellenfeldes vorerst noch hinausgeschoben wird, soll ein wesentliches und für das Verständnis der folgenden Paragraphen notwendiges Ergebnis der Quantisierung hier vorweggenommen werden:

Es bedeuten ψ_0 und ψ_1*) zwei stationäre Zustände, welche Gleichung (4.2) mit $e = 0$ genügen. Es sind dies, wie man aus der gespaltenen Schreibweise (2.1) ersieht, Zustände, bei welchen eine Partikel jeder Sorte in den durch φ_0, χ_0, u_0 und v_0 resp. φ_1, χ_1, u_1 und v_1 gegebenen Zuständen vorhanden ist. Dann bewirkt die „Störung" (der Term mit e^2 in der L-Funktion) Übergänge von ψ_0 nach ψ_1, deren Wahrscheinlichkeit dem Quadrat des „Matrixelementes" des Störungtermes

$$V(\psi_1^+, \psi_0) = e^2 \int d\bar{x}^3 dy^4 K(xy)\, (\psi_1^+ \Lambda_i' \psi_0)(x) \cdot (\psi_1^+ \Lambda_i \psi_0)(y) \tag{4.7}$$

*) Da im folgenden keine Spinovindizes mehr gebraucht werden, so bedeuten untere Indizes der Funktionen ψ, φ, χ, u, v jetzt Quantenzahlen.

proportional sind. In gespaltener Schreibweise lautet der letzte Teil des Integranden

$$\{(\chi_1^+ \gamma_i \chi_0) + \varepsilon' (v_1^+ \gamma_i v_0)\} (x) \cdot \{(\varphi_1^+ \gamma_i \varphi_0) + \varepsilon (u_1^+ \gamma_i u_0)\} (y). \quad (4.8)$$

Der erste Faktor bedeutet Übergänge:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{A I:} & \text{Neutrino im Zustand } 0 \longrightarrow \text{Neutrino im Zustand } 1 \\ \text{A II:} & \text{Neutron ,, ,, } 0 \longrightarrow \text{Neutron ,, ,, } 1 \end{array}\right\} \quad \text{(A)}$$

und der zweite solche der Art:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{B I:} & \text{Elektron im Zustand } 0 \longrightarrow \text{Elektron im Zustand } 1 \\ \text{B II:} & \text{Proton ,, ,, } 0 \longrightarrow \text{Proton ,, ,, } 1 \end{array}\right\} \quad \text{(B)}$$

Es kann immer nur ein Übergang der Sorte (A) auftreten, wenn einer der Sorte (B) ihn begleitet.

So bedeutet z. B. A I, begleitet von B I, dass ein Neutrino (z. B. aus einem Zustand negativer Energie χ_0) in einen solchen positiver Energie (χ_1) springt (A I), während gleichzeitig ein Elektron seinen Bewegungszustand von φ_0 in φ_1 abändert (B I). Das entstehende Neutrinopaar (Neutrino im Zustand χ_1 plus Loch, resp. Antineutrino im Zustand χ_0) deutet die Neutrinotheorie als das vom Elektron emittierte Lichtquant.

Die 16komponentige Schreibweise ist daher „trivial", d. h. sie liefert keine neuen Gesichtspunkte, da diese Form der Theorie keine Quantensprünge erlaubt, bei welchem ein Teilchen einer Sorte (z. B. Neutrino) sich in ein solches anderer Sorte (z. B. Proton) verwandelt. Daher ist die Alternative, ob das positive Proton Partikel oder Antipartikel ist, unentscheidbar. Die folgenden Paragraphen, welche Übergänge zwischen den Quantenzuständen zulassen, werden einen Entscheid dieser Alternative ergeben.

5. Die Kernkräfte (Programm 4). Die Kernkräfte folgen aus einer einfachen Verallgemeinerung der elektromagnetischen Kräfte des vorangehenden Paragraphen:

Sieht man nämlich von der e^2 proportionalen Wechselwirkung in (4.1) ab, so ist die L-Funktion bilinear in ψ^+, ψ. Die Wechselwirkung tritt erst als biquadratischer Term auf. Dieser Term ist das Produkt zweier mit hermiteischen Operatoren gebildeten, reellen Faktoren und daher a fortiori reell. Ein biquadratischer Zusatzterm

$$L_g(\psi^+(x), \psi(x)) = -e^2 \int d y^4\, M(x, y)\, (\psi^+ \Omega_i^+ \psi)(y) \cdot (\psi^+ \Omega_i \psi)(x) \quad (5.1)$$

wo $M(xy)$ wieder eine Funktion des Weltabstandes $\sqrt{\Sigma (x_i - y_i)^2}$ ist und die Dimension (Länge) $^{-2}$ hat, und Ω_i nicht hermiteische

Matrizen sind, die jedoch bewirken, dass $\psi^+ \Omega_i \psi$ sich wie Vektoren transformieren, ist die einfachste Verallgemeinerung von (4.1). Dann erfüllt L nach wie vor Programmpunkt 1 (Realität und Invarianz). Die Ω_i dürften auch die Operatoren p_i enthalten, doch soll hiervon vorläufig abgesehen werden[13]). Im allgemeinen werden sogar mehrere solche Zusatzterme existieren mit verschiedenen Ω.

Wie bei der Neutrinotheorie des Lichtes, deren Erfolg oder Misserfolg davon abhängt, ob eine Funktion $K(xy)$ existiert, welche Programmpunkt 2 (Maxwellgleichungen) und namentlich auch Punkt 6 (Bosestatistik der Lichtquanten) erfüllt, so sollte auch hier zuerst eine Diskussion von M folgen.

Da wir aber über die Kernkräfte wenig wissen, so wollen wir die Annahme machen

$$M(x,y) = \lambda^2 \cdot \delta(x-y) \tag{5.2}$$

$\delta(x)$ bedeutet die vierdimensionale DIRAC'sche δ-Funktion, λ ist eine Länge. Wir setzen $g = e^2\lambda^2$. Es wird sich später zeigen, dass g die FERMI'sche[9]) Konstante ist. Ihre Grössenordnung ist 10^{-50}. Als Vergleich sei bemerkt, dass dann λ der Comptonwellenlänge einer Partikel vom Atomgewicht 1000 oder aber dem klassischen Radius einer mit e geladenen Partikel vom Atomgewicht 1/10 entspricht (d. h. grössenordnungsweise entspricht λ dem klassischen Protonradius). Unter Verwendung von (5.2) und (5.3) wird

$$L_g = -g\,(\psi^+ \Omega_i^+ \psi)\,(\psi^+ \Omega_i \psi)\,. \tag{5.3}$$

An Stelle der Gleichung (4.2) und (4.2⁺) folgen jetzt (wir lassen die „elektrischen“ Terme von (4.1) mit den Ladungsmatrizen Λ_i weg)

$$(c\Gamma_i p_i - imc^2 \Delta - g\,(\psi^+ \Omega_i^+ \psi)\,\Omega_i - g\,(\psi^+ \Omega_i \psi)\,\Omega_i^+)\,\psi = 0 \tag{5.4}$$

und

$$\psi^+\,(c\Gamma_i \vec{p}_i + imc^2 \Delta + g\,(\psi^+ \Omega_i^+ \psi)\,\Omega_i + g\,(\psi^+ \Omega_i \psi)\,\Omega_i^+) = 0 \tag{5.4$^+$}$$

Vollführen wir die gleiche Operation, welche uns im vorhergehenden Paragraphen die Gleichungen (4.6) und (4.6′) lieferte, so erhalten wir:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_i}{\partial x_i} = -\frac{ig}{hc}\,\{&(\psi^+ \Omega_i^+ \psi)\,(\psi^+ (\Omega_i \Lambda - \Lambda\,\Omega_i)\,\psi) \\ &+ (\psi^+ (\Omega_i^+ \Lambda - \Lambda\,\Omega_i^+)\,\psi)\,(\psi^+ \Omega_i \psi)\}\end{aligned} \tag{5.5}$$

und eine entsprechende Gleichung mit P_i' und Λ' an Stelle von P_i und Λ.

Die Forderung von Programmpunkt 3 (Erhaltung der Ladung) lässt nur die Möglichkeiten zu:

$$\Omega_i \Lambda - \Lambda \Omega_i = \begin{cases} 0 \\ \pm \Omega_i \end{cases} \tag{5.6}$$

Verlangt man auch die Erhaltung der dualen Ladung, so folgt eine analoge Bedingung mit Λ'.

Der Forderung nach relativistischer Invarianz ist Genüge getan mit:

$$\Omega_i = \Gamma_i \Omega = \Omega \Gamma_i \tag{5.7}$$

Hier ist Ω eine Matrix der Form

$$\Omega = \begin{pmatrix} \omega_{\varphi\varphi} & \omega_{\varphi\chi} & \omega_{\varphi u} & \omega_{\varphi v} \\ \omega_{\chi\varphi} & \omega_{\chi\chi} & \omega_{\chi u} & \omega_{\chi v} \\ \omega_{u\varphi} & \omega_{u\chi} & \omega_{uu} & \omega_{uv} \\ \omega_{v\varphi} & \omega_{v\chi} & \omega_{vu} & \omega_{vv} \end{pmatrix} \tag{5.8}$$

Die $\omega_{\varphi\chi}\ldots$ sind reine (mit der vierzeiligen Einheitsmatrix multipliziert zu denkende) Zahlen. Bedingung (5.6) lautet dann (wegen der Vertauschbarkeit von Γ_i, Λ und Ω):

$$\Omega \Lambda - \Lambda \Omega = \begin{cases} 0 \\ \pm \Omega \end{cases} \tag{5.9}$$

Im Matrixelement des neuen Störungsterms

$$V(\psi_1^+ \psi_0) = g \int d\vec{x}^3 (\psi_1^+ \Omega_i^+ \psi_0)(\psi_i^+ \Omega_i \psi_0) \tag{5.10}$$

nimmt der Integrand die Form an:

$$\Big\{\sum_{\varphi, \chi, u, v} \omega_{u\varphi}^* (\varphi_1^+ \gamma_i u_0)\Big\} \cdot \Big\{\sum_{\varphi, \chi, u, v} \omega_{u\varphi} (u_1^+ \gamma_i \varphi_0)\Big\} \tag{5.11}$$

wo Σ die Summationen über alle Kombinationen $(\varphi_1^+ \gamma_i \varphi_0)$, $(\varphi_1^+ \gamma_i \chi_0)$, $(\varphi_1^+ \gamma_i u_0)$ usw. darstellt. Jedes vorhandene Element von Ω^+ bedeutet, dass ein entsprechender Übergang (z. B. im Fall $\omega_{u\varphi}^* \neq 0$, ein Übergang Proton $(u_0) \longrightarrow$ Elektron (ψ_1^+)) vorkommen kann. Da der zweite Faktor die adjungierte Matrix enthält, so tritt jeder solche Übergang nur auf begleitet von einem, in der gleichen Matrix enthaltenen, Übergang eines anderen Teilchens, aber in umgekehrter Richtung (z. B. im betrachteten Falle der Term $\omega_{u\varphi}$, welcher der Verwandlung eines anderen Teilchens von Elektron $(\varphi_0) \longrightarrow$ Proton (u_1^+) entspricht; oder der Term $\omega_{v\chi}$, welcher einen Übergang Neutrino $\longrightarrow$ Neutron darstellt). Da jeder Übergang, zum Unterschied von Paragraph 4, jetzt immer auch mit seinem inversen verkoppelt ist, so liefert die Theorie jetzt Austauschkräfte.

Tatsächlich können (wegen 5.9) jeweils nur wenige Elemente von Ω nicht verschwinden. Das Bild gestaltet sich naturgemäss vollständig anders, je nachdem man (wir haben das positive Elektron willkürlich als „Partikel" festgesetzt) das positive Proton als „Partikel" ($\varepsilon = +1$) oder als „Antipartikel" ansieht ($\varepsilon = -1$). Das negative Proton ist dann „Partikel". Der erste Fall wird Zerstrahlungsprozesse der schweren Teilchen erlauben, während der zweite diese verbietet, da sich nur „Partikel" in „Partikel" verwandeln kann, und da die Ladung erhalten bleibt.

6. Diskussion der möglichen Kernkräfte im Falle $\varepsilon = 1$. (Proton ist Partikel). Wir bilden

$$\Omega \Lambda - \Lambda \Omega = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_{\varphi\chi} & (\varepsilon-1)\,\omega_{\varphi u} & -\omega_{\varphi v} \\ \omega_{\chi\varphi} & 0 & \varepsilon\,\omega_{\chi u} & 0 \\ -(\varepsilon-1)\,\omega_{u\varphi} & -\varepsilon\,\omega_{u\chi} & 0 & -\varepsilon\,\omega_{uv} \\ \omega_{v\varphi} & 0 & \varepsilon\,\omega_{vu} & 0 \end{pmatrix} \tag{6.1}$$

$$\Omega \Lambda' - \Lambda' \Omega = -\begin{pmatrix} 0 & -\omega_{\varphi\chi} & 0 & -\varepsilon'\,\omega_{\varphi v} \\ \omega_{\chi\varphi} & 0 & \omega_{\chi u} & -(\varepsilon'-1)\omega_{\chi v} \\ 0 & -\omega_{u\chi} & 0 & -\varepsilon'\,\omega_{uv} \\ \varepsilon'\,\omega_{v\varphi} & (\varepsilon'-1)\,\omega_{v\chi} & \varepsilon'\,\omega_{vu} & 0 \end{pmatrix} \tag{6.2}$$

und diskutieren zuerst die Matrix, welche

$$\left.\begin{aligned} \Omega \Lambda - \Lambda \Omega &= \Omega \\ \Omega \Lambda' - \Lambda' \Omega &= -\Omega \end{aligned}\right\} \tag{6.3}$$

erfüllt. Sie enthält (mit $\varepsilon - 1 = 0$) nur an den Stellen von Null verschiedene Elemente, wo in (6.1) das entsprechende Element ω_{ab} von Ω mit 1 multipliziert steht, d. h. sie erlaubt nur die ihnen zugeordneten Prozesse. Die Erhaltung der dualen Ladung ist automatisch erfüllt, wenn dem Neutron die Ladung $\varepsilon' = +1$ zugesprochen wird. Es sind dies die Umwandlungen:

$$\left.\begin{array}{lll} \text{C I} & \omega_{\chi\varphi}: & \text{Neutrino} \rightleftharpoons \text{pos. Elektron} \\ \text{C II} & \omega_{\chi u}: & \text{Neutrino} \rightleftharpoons \text{pos. Proton} \\ \text{C III} & \omega_{v\varphi}: & \text{Neutron} \rightleftharpoons \text{pos. Elektron} \\ \text{C IV} & \omega_{vu}: & \text{Neutron} \rightleftharpoons \text{pos. Proton} \end{array}\right\} \tag{C}$$

Jeder Prozess an einem Teilchen ist, nach oben Gesagtem, mit einem inversen, an einem anderen Teilchen gekoppelt. So stellt C IV mit sich selbst gekoppelt, die Majorana'sche Wechselwirkungskraft dar. Man überzeugt sich leicht, dass das zugeordnete Matrixelement, wenn die sicher zu primitive Annahme (5.2) durch eine Kraft

$$M(x-y) \begin{cases} = \lambda^{-2} e^{+s^2/\lambda^2} & \text{für } s^2 = \Sigma (x_i - y_i)^2 = \Sigma z_i^2 < 0 \\ = 0 & \quad ,, \quad s^2 > 0 \end{cases} \tag{6.4}$$

ersetzt wird, tatsächlich formal den Majorana'schen Ansatz ergibt (Vernachlässigung der γ_i $(i = 1,2,3,)$-Glieder gegen das γ_4-Glied, $u^+ \gamma_4 = i u^*$ usw.):

$$\int d\vec{x}^3 d\vec{y}^3 u_1^* (x)\, v_0 (x)\, J (\vec{x} - \vec{y})\, v_1^* (y)\, u_0 (y) \tag{6.5}$$

mit

$$J (\vec{z}) = \frac{e^2}{\lambda^2}\, \omega_{u\,v}^2 \left\{ \int_{-i}^{-i|z|} + \int_{i|z|}^{\infty\, i} \right\} d z_4\, e^{s^2/\lambda^2 - z_4 (E_{u_0} - E_{v_1})/hc} \tag{6.6}$$

Es stellt eine Austauschkraft zwischen Proton und Neutron dar. Die Wechselwirkungsenergie hängt zum Unterschied gegen Majorana noch von der Energiedifferenz $E_{u_0} - E_{v_1}$ der beiden Zustände u_0 und v_1 ab.

Kombination von C I mit C IV gibt zu dem Fermi'schen Matrixelement Anlass:

$$g^2 \omega_{v\,u} \omega_{\chi\,\varphi}^* \int d\vec{x}^3 \,(v_1^+ \gamma_i u_0)\, (\varphi_1^+ \gamma_i \chi_0)\,.\,^{*)} \tag{6.7}$$

Es verwandelt sich ein Proton (im Atomkern) aus dem Zustand u_0 in ein Neutron im Zustand v_1 (C IV), während gleichzeitig eine andere Partikel aus dem Neutrinozustande (z. B. negative Energie) χ_0 nach dem (z. B. positiven Energie-) Zustande φ_1 springt, d. h. es entsteht ein Antineutrino und ein positives Elektron (C I). Dies ist aber gerade die Erscheinung der β^+-Radioaktivität.

Die Übergänge C I und C III geben noch zu weiteren Austauschenergien Anlass. Sie erlauben aber auch Prozesse, in welchen ein $\left\{\begin{matrix}\text{Neutron}\\ \text{Proton}\end{matrix}\right\}$ zu einem $\left\{\begin{matrix}\text{pos. Elektron}\\ \text{Neutrino}\end{matrix}\right\}$ wird, und gleichzeitig ein „Paar", $\left\{\begin{matrix}\text{Neutrino}\\ \text{Antineutrino}\end{matrix}\right\}$ und $\left\{\begin{matrix}\text{neg. Elektron}\\ \text{pos. Elektron}\end{matrix}\right\}$ entsteht. („*Zerstrahlung*" *zweiter Art der schweren Teilchen.*) Der Prozess pos. Proton wird Neutrino und ein Neutron (neg. Energie) wird pos. Elektron bedingt eine alternative Erklärung der β^+-Radioaktivität, da jetzt aus dem Kern Proton ein Antineutron, Neutrino und pos. Elektron entstanden ist (*Radioaktivität zweiter Art*). Sie hätte aber die Existenz von zweierlei Neutronsorten (Neutron und Antineutron) im Atomkern zur Folge, die unter „Zerstrahlung" rekombinieren könnten.

Die einzige Matrix, welche $\Omega \Lambda - \Lambda \Omega = 0$ für Λ und Λ' erfüllt, ist eine solche, bei welcher erstens alle Diagonalglieder vorhanden sein könnten, und die daher einfach eine Verallgemeinerung der Wechselwirkungen A I, A II, B I, B II des Paragraphen 4 bedeutet. Dies gibt zu neuen Wechselwirkungs-

*) In der von Konopinski und Uhlenbeck[13]) benützten Form.

energien zwischen gleichen Teilchen Anlass. Des weiteren dürfen in diesem Falle aber noch die folgenden Umwandlungen auftreten.

$$\left.\begin{array}{lll} \text{D I} & \omega_{\varphi u},\ \omega_{u\varphi} & \text{pos. Elektron} \rightleftarrows \text{pos. Proton} \\ \text{D II} & \omega_{\chi v},\ \omega_{v\chi} & \text{Neutron} \rightleftarrows \text{Neutrino}. \end{array}\right\} \quad \text{(D)}$$

Sie treten mit sich selbst oder den „Diagonal"-Reaktionen A I, A II, A III und A IV gekoppelt auf und erlauben daher beispielsweise Prozesse, in welchen ein $\left\{\begin{array}{c}\text{Neutron}\\ \text{Proton}\end{array}\right\}$ ein $\left\{\begin{array}{c}\text{Neutrino}\\ \text{Elektron}\end{array}\right\}$ wird, und gleichzeitig ein Neutrinopaar (A I) auftritt, welches unter Umständen als Lichtquant in Erscheinung tritt *(Zerstrahlung erster Art der schweren Teilchen)*.

Da die Lebensdauer der schweren Materie gegenüber den verschiedenen Zerstrahlungsprozessen durch g bestimmt ist und daher*) nur die Grössenordnung der radioaktiven Halbwertszeiten erreicht, so scheint mir der hier diskutierte Fall „Proton ist Partikel" mit der Erfahrung in Widerspruch zu stehen. Ebenso wiederspricht die mögliche „Radioaktivität zweiter Art" der Erfahrung.

7. Diskussion der möglichen Kernkräfte im Fall $\varepsilon = -1$. (Proton ist Antipartikel). Wir diskutieren hier zuerst den Fall $\Omega\Lambda - \Lambda\Omega = 0$ und wollen, um auch Zerstrahlungen der Neutronen auszuschliessen, gleich auch $\varepsilon' = -1$ setzen. Dann können in dieser ersten Matrix Ω nur die Diagonalelemente von Null verschieden sein. Es treten also auch jetzt die zum Paragraph 4 zusätzlichen Kräfte zwischen gleichen Teilen auf. Hingegen fehlen die Zerstrahlungsprozesse erster Art.

Beide Gl. (6.3) sind erfüllbar durch eine Ω-Matrix, welche nur $\omega_{\chi\varphi}$ und ω_{uv} enthält. D. h. sie erlaubt nur Prozesse

$$\left.\begin{array}{l} \text{E I: Neutrino} \rightleftarrows \text{pos. Elektron} \\ \text{E II: neg. Proton} \rightleftarrows \text{Neutron} \\ \text{E II kann auch im Sinne der Antipartikel als} \\ \text{E II: Antineutron} \rightleftarrows \text{pos. Proton} \end{array}\right\} \quad \text{(E)}$$

geschrieben werden. Diese Prozesse entsprechen daher vollkommen C I und C IV des vorhergehenden Paragraphen. Es folgen daher insbesondere wieder die Majoranakraft (6.5) und das Fermi'sche Matrixelement des β^+-Zerfalls (6.7). (Letzteres mit Vertauschung der Buchstaben u und v, da sich jetzt ein Neutron aus den negativen Energiezuständen in ein negatives Proton

*) Falls die von Null verschiedenen reinen Zahlen ω_{ab} (bis auf wenige Zehnerpotenzen z. B. 137 oder 1847) von der Grössenordnung eins sind.

verwandelt, und somit das ursprünglich vorhandene „neg. Protonloch“ (= pos. Proton) zum Verschwinden bringt, und dafür ein Antineutron, Antineutrino und pos. Elektron entsteht.)

Das Fehlen der Prozesse C II und C III verunmöglicht auch die Zerstrahlungsprozesse zweiter Art.

Eine zweite Matrix, in welcher nur $\omega_{u\chi}$ und $\omega_{v\varphi}$ von Null verschieden sind, erfüllt nach (6.1) und (6.2) ebenfalls $\Omega\Lambda - \Lambda\Omega = \Omega$ und $\Omega\Lambda' - \Lambda'\Omega = \Omega$. (Die Vorzeichenumkehr in der Λ'-Gleichung ändert nichts an dem Erhaltungssatz der dualen Ladung.) Sie gibt Anlass zu Prozessen.

$$
\left.\begin{array}{l}
\quad\text{F I: neg. Proton} \rightleftarrows \text{Neutrino}\\
\quad\text{F II: Neutron} \rightleftarrows \text{pos. Elektron}\\
\text{Den ersten schreiben wir wieder für Antipartikel:}\\
\quad\text{F I: Antineutrino} \rightleftarrows \text{pos. Proton}
\end{array}\right\} \qquad (F)
$$

Sie entsprechen vollständig den Prozessen C II und C III. Auch sie geben wieder zu den neuen Austauschkräften zwischen leichten und schweren Teilchen Anlass. Auch erscheint wieder die „Radioaktivität zweiter Art“: pos. Proton wird Antineutrino und ein Neutron (neg. Energie) wird pos. Elektron, d. h. es entsteht aus pos. Proton ein Antineutron, ein Antineutrino und ein pos. Elektron. Nur ist ihr Resultat, zum Unterschied gegenüber dem vorhergehenden Paragraphen, identisch mit demjenigen der (Fermi'schen) Radioaktivität erster Art.

Da aber die E-Vorgänge und die F-Vorgänge nur je unter sich gekoppelt werden dürfen, so treten die Zerstrahlungsprozesse zweiter Art ebenfalls nicht auf.

8. Zusammenfassung. Aus der Annahme, dass Elektron, Proton, Neutron und Neutrino verschiedene Quantenzustände eines einzigen Teilchens bedeuten, verbunden mit der Forderung nach Erhaltung der elektrischen Ladung und der dualen (Neutrino-) Ladung folgt die Möglichkeit folgender Prozessgruppen:

$$
\begin{array}{l}
\qquad\text{Teilchen} \rightleftarrows \text{gleiches Teilchen} \qquad (A)\\
(C)\left\{\begin{array}{l}
\left.\begin{array}{l}\text{Neutrino} \rightleftarrows \text{pos. Elektron}\\ \text{(Anti-) Neutron} \rightleftarrows \text{pos. Proton}\end{array}\right\} \quad (E)\\
\left.\begin{array}{l}\text{(Anti-) Neutrino} \rightleftarrows \text{pos. Proton}\\ \text{Neutron} \rightleftarrows \text{pos. Elektron}\end{array}\right\} \quad (F)
\end{array}\right.\\
\qquad\left.\begin{array}{l}\text{pos. Proton} \rightleftarrows \text{pos. Elektron}\\ \text{Neutron} \rightleftarrows \text{Neutrino}\end{array}\right\} \quad (D)
\end{array}
$$

Ein Prozess an einem Teilchen verläuft nur dann, wenn gleichzeitig ein anderes Teilchen einen Prozess derselben Gruppe in umgekehrter Richtung durchläuft.

(A) enthält nach der Vorstellung der Neutrinotheorie des Lichts die Licht-Materiewechselwirkung sowie zusätzliche Kräfte zwischen gleichen und zwischen verschiedenen Teilchen, (E) und (F) die Austauschkräfte zwischen verschiedenen Teilchen und die Fermi'sche Erklärung der β-Radioaktivität. (D) sind Zerstrahlungsprozesse der schweren Teilchen.

Wird das positive Elektron als Partikel definiert (im Gegensatz zur Antipartikel), so kann das positive Proton entweder als Partikel ($\varepsilon = 1$) oder Antipartikel ($\varepsilon = -1$) betrachtet werden. Die erste Betrachtungsweise erlaubt die Zerstrahlungsprozesse (D) sowie weitere „Zerstrahlungsprozesse zweiter Art" durch Kombinationen von (E) mit (F), da in diesem Falle (E) und (F) zusammen nur eine einzige Gruppe (C) bilden. (Das eingeklammerte (Anti-) in (E) und (F) fällt weg.)

Die zweite Betrachtungsweise verbietet sowohl die Zerstrahlungsprozesse (D) und auch Kombinationen unter den jetzt verschiedenen Gruppen (E) und (F), somit also auch „Zerstrahlungsprozesse zweiter Art". Die in Atomkernen vorkommenden schweren Teilchen sind dann gegenüber dem positiven Elektron als Antipartikel anzusprechen. Wir ziehen daher diese zweite Festsetzung vor.

Sieht man von den relativ wenigen positiven Elektronen ab, so besteht unsere Welt im wesentlichen nur aus Antipartikeln oder nur aus Partikeln*) (negative Elektronen, Protonen, Neutronen) mit von Null verschiedener Ruhemasse. Eine Zerstrahlung der Welt ist ausgeschlossen. Trotzdem ermöglicht die vorgeschlagene einheitliche Auffassung der Materie Austauschkräfte zwischen allen vorhandenen Partikeln.

Quantitative Folgerungen erlaubt die Theorie erst, wenn die Kräfte experimentell und theoretisch exakter behandelt werden können. Es ist dies aufs Engste verknüpft mit der Entwicklung der Neutrinotheorie des Lichtes. Trotzdem können die vorstehenden Ergebnisse unabhängig von der letztgenannten Theorie angesehen werden. Die Einführung der Neutrinotheorie des Lichtes wurde lediglich als heuristisches Prinzip benützt. Die jetzt $4 \times 4 = 16$ komponentige ψ-Funktion bedeutet eine unitäre Feldtheorie der Materie. Der Einschluss der Neutrinotheorie des Lichtes führt dann zur unitären Feldtheorie im Sinne Born's, welche elektromagnetisches und materielles Feld vereinigt.

---

*) Da die Theorie ja in Bezug auf Partikel und Antipartikel symmetrisch ist.

Die, wahrscheinlich im Vergleich zu denen von Elektron und Neutrino, grossen Wechselwirkungskräfte von Proton und Neutron mit den virtuellen schweren Partikeln und Antipartikeln (Wechselwirkung mit aufgefüllten Zuständen negativer Energie) lassen vielleicht eine Erklärung der beobachteten Abweichung des magnetischen Momentes vom, aus der störungsfreien Dirac-Gleichung folgenden, Betrag zu.[14])

Den Herren Prof. W. Pauli und G. Wentzel (Zürich), und J. Weigle (Genf) bin ich für manche wertvolle Ratschläge verpflichtet. Insbesondere danke ich Herrn Weigle für viele interessante Diskussionen und Herrn Wentzel für den Hinweis auf die duale Ladung.

Institut de Physique, Université de Genève.

Literatur.

[1]) G. Mie, Ann. d. Phys. **37**, 512, **39**, 1 und **40**, 1 (1912—1913); H. Weyl, Raum – Zeit – Materie 1920. A. Einstein und W. Mayer, Sitz. Ber. der Preuss. Akad. d. Wiss. 1931.

[2]) W. Pauli und V. Weisskopf, Helv. Physica Acta **7**, 709 (1934).

[3]) W. Heisenberg, Zs. f. Phys. **90**, 209 (1934).

[4]) B. L. van der Warden, Gruppentheoret. Methode i. d. Quantenmechanik, Berlin 1932.

[5]) L. de Broglie, Une nouvelle conception de la lumière, Act. Scint. Hermann, Paris 1934.

[6]) G. Wentzel, Zs. f. Phys. **92**, 337 (1934); P. Jordan, Zs. f. Phys. **93**, 464 (1935), **98**, 709 und 759 (1936), **99**, 109 (1936); R. de L. Kronig, Physica **2**, 491, 854, 968 (1935); O. Scherzer, Zs. f. Phys. **97**, 725 (1935).

[7]) M. Born und L. Infeld, Proc. Roy. Soc. A **144**, 423 (1934) und folgende Arbeiten.

[8]) P. Jordan, loc. cit., Zs. f. Phys. **98**, 761 u. ff. (1936).

[9]) E. Fermi, Zs. f. Phys. **88**, 161 (1934).

[10]) E. Majorana, Zs. f. Phys. **82**, 137 (1933).

[11]) P. Jordan und E. Wigner, Zs. f. Phys. **47**, 631 (1928), cf. auch W. Heisenberg, Physikalische Prinzipien der Quantenmechanik, Leipzig 1930.

[12]) Siehe z. B. Heisenberg, loc. cit. [11]), Seite 109 und 113.

[13]) E. J. Konopinski und G. E. Uhlenbeck, Phys. Rev. **48**, 7 und 107 (1935).

[14]) Vergl. dazu W. Heisenberg, Zeemanfestschrift, Haag 1935.