Archiv von Heisenbergs Briefen

von: Werner Heisenberg
an: Pauli
Datum: 14.12.1957
Stichworte: Korrektur der Vertauschungsregeln für den antilinearen Operator, Vorhersagen mit der neuen Lagrangefunktion: Klassifizierung der Elementarteilchen. Neutrinomasse
Ursprung: Pauli Archiv in Genf
Kennzeichen im Pauli Archiv in Genf: heisenberg_0017-1657r
Meyenn-Nummer: 2792

Göttingen 14. 12. 57.

Beantwortet nach Genf 18. XII

Lieber Pauli!

Durch Deinen letzten Brief scheint mir die Einigung zwischen uns hinsichtlich der Geisterpole- u. Dipole hergestellt zu sein. Ich habe grundsätzlich nichts mehr dagegen einzuwenden, dass es auch komplexe Geisterpole gibt, wenn es nur auch noch den Geisterdipol bei der Ruhmasse Null gibt.

Du hast völlig Recht damit, dass das Eigenwertspektrum aus der Theorie folgen muss und nicht einfach hineingesteckt werden darf. Fordern kann man wohl nur die Bedingung $\int \rho(\kappa)\, d\kappa = 1$, die eine Art von Normierung (ohne tieferen physikalischen Sinn) bedeutet. Ich glaube auch, dass schliesslich auch der Geisterdipol bei der Masse Null aus der Theorie folgen muss; aber es kann sein, dass man einiges von diesem Resultat vorher durch Symmetrieforderungen hineingesteckt hat.

Hinsichtlich der Tamm-Dancoffmethode bin ich nicht viel optimistischer als Du. Sie ist zum Berechnen des Eigenwertspektrums nur geeignet, wenn man es vorher schon qualitativ richtig erraten hat, und auch dann wird es nie besonders genau. (Wenn man mit Hilfe der Symmetriebetrachtungen schon qualitativ gut Bescheid weiss, mag es recht brauchbar sein). – Aber mir ist bisher nichts Besseres eingefallen. Mitter schrieb mir, dass er sich um Verbesserungen der T-D-Methode bemühe; aber irgendjemand müsste einmal eine ganz neue Methode erfinden.

Aber nun zur Gleichung

$$L = \psi^{+}\gamma_{\nu}\frac{\partial}{\partial x_{\nu}}\psi + l^{2}\left(\psi^{+}(1+\gamma_{5})\psi\right)\left(\psi^{+}(1-\gamma_{5})\psi\right). \quad (1)$$

Ich bin hier inzwischen auf so überraschende Ergebnisse gestossen, dass ich nicht mehr daran zweifeln kann, dass diese Gl. bereits die richtige Gleichung der Materie ist (die schwachen Wechselwirkungen sind weggelassen), aus der alle Elementarteilchen folgen! – Zunächst eine kleine Korrektur zu meinem letzten Brief. Die Bedingungen (5) für den Operator O waren etwas zu unsymmetrisch formuliert. Richtig müssen sie lauten:

$$\left.\begin{aligned} &[O\psi_{\beta}^{*}]\psi_{\alpha} + [O\psi_{\alpha}]\psi_{\beta}^{*} = O\,b\,V\gamma_{4}^{\alpha\beta}; \text{ entspr. d. herm. Konj.} \\ \text{ferner } &[O\psi_{+}^{*}]\psi_{+} = \psi_{+}[O\psi_{+}^{*}] = 0\;;\; [O\psi_{-}^{*}]\psi_{-} = \psi_{-}[O\psi_{-}^{*}] = 0 \end{aligned}\right\} (2)$$

mit der Definition $\psi_{+} = \frac{1+\gamma_{5}}{2}\psi$; $\psi_{-} = \frac{1-\gamma_{5}}{2}\psi$.

In dieser Form sind sie wohl erfüllbar und ausreichend.

Nun kommt die Frage der „strange particles". Wenn man einen Ausdruck der Form $\psi^* w|\Omega\rangle$ betrachtet, so sieht man, dass ~~kann~~ er sich bei Anwendung der Substitution $\psi \to e^{\pm i\alpha\gamma_5 O}\psi$ nur wie $e^{\pm i\alpha O}$ oder $e^{\pm i\alpha}$ transformieren kann (wenn er überhaupt eine derartig einfache exponentielle Abhängigkeit hat); aber er kann z. B. nicht invariant bleiben, da zwischen $w(\kappa)$ und $w(-\kappa)$ keine einfachen Beziehungen bestehen. Ein Spinorteilchen ~~das~~ vom Isospin Null oder Eins kann also <u>kein</u> Glied der Form $\psi^* w|\Omega\rangle$ enthalten. Das niedrigste Glied der Entwicklung muss ~~also~~ etwa $\psi_\alpha(x)\psi^*_\beta(y)\psi^*_\gamma(z)\, w_{\alpha\beta\gamma}(xyz)|\Omega\rangle$ lauten, oder abgekürzt geschrieben

$$\Lambda, \Sigma \to \psi\psi^*\psi^*|\Omega\rangle \qquad (3)$$

Ein solcher Ausdruck braucht nicht, wie man zunächst glauben sollte, den Isospin $\frac{1}{2}$ oder $\frac{3}{2}$ zu haben, sondern kann z. B. invariant sein (Isospin 0), da ja weder γ_5 noch O mit den Grössen ψ, w und V (d.h. κ) vertauschbar sind. An dieser Stelle wird es entscheidend, dass O ein Operator im Hilbertraum (u. nicht im Raum der Spinindices) ist.

Andererseits heisst die E.F. des π-Teilchens natürlich:

$$\pi \sim \psi\psi^*|\Omega\rangle. \qquad (4)$$

Danach sieht es so aus, als bestehe das Λ-Teilchen aus Nukleon u. π-Meson. Ein Gebilde aus Nukleon u. π-Meson mit der trivialen Symmetrie (Isospin $\frac{1}{2}$ oder $\frac{3}{2}$) wäre natürlich nicht stabil, sondern würde in 10^{-22} sec zerfallen. Mit der anderen Symmetrie aber, die ja jetzt möglich ist, wird es stabil, und ich will daher die Sprechweise einführen: 'das Λ-Teilchen besteht aus einem Nukleon und einem „symmetrieändernden" π-Teilchen"!' Das letztere will ich $\tilde{\pi}$ nennen. Dann lautet die Klassifizierung der Elementarteilchen:

$$\begin{array}{lll}
N, P & \psi^*|\Omega\rangle & \\
\pi & \psi\psi^*|\Omega\rangle & \\
\Lambda, \Sigma & \psi\psi^*\psi^*|\Omega\rangle & = N + \tilde{\pi} \\
\Xi & \psi\psi^*\psi\psi^*\psi^*|\Omega\rangle & = N + 2\tilde{\pi} \\
K & \psi\psi^*\psi\psi^*|\Omega\rangle & = \pi + \tilde{\pi}
\end{array} \qquad (5)$$

Diese Klassifizierung stimmt auch qualitativ sehr gut mit dem Massenspektrum überein. Da ich aus der

Arbeit von Mitter, Kortel u. mir weiss, dass das π-Meson etwa 5- bis 10-mal leichter ~~[illegible]~~ als das Nukleon heraus-kommt, besteht alle Aussicht, dass die Gl. (1) die Mesonen qualitativ richtig wiedergeben wird.

Aber auch die Leptonen scheinen aus der Theorie herauszukommen. Das ist zunächst wegen der ~~[illegible]~~ unquantisierten Gleichung

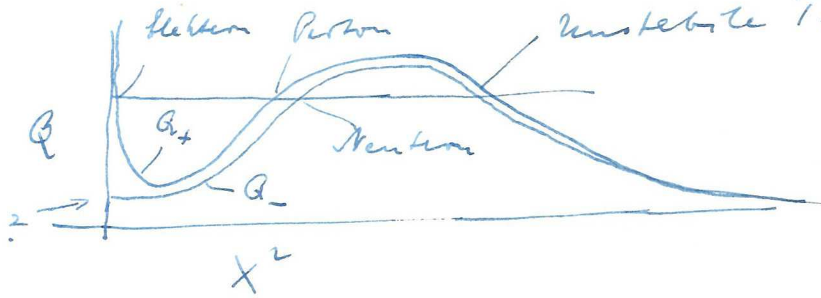
$$\gamma_\nu \frac{\partial}{\partial x_\nu}\psi + l^2\left[\psi(\psi^+\psi) - \gamma_5\psi(\psi^+\gamma_5\psi)\right] = 0 \qquad (6)$$

plausibel, da ja für Lösungen, für die $\psi = \gamma_5\psi$ gilt, der Mesonenterm wegfällt. In der quantisierten Theorie muss man die Eigenwertgleichung für Spinor-teilchen ableiten, so wie es in der Mitter-Kortel-Arbeit geschehen ist. Dort wird (auf S. 433) der Impulsvektor J_μ, $\underline{J} = -i\gamma_\nu J_\nu$, $X^2 = -\frac{J^2}{\kappa^2}$ gesetzt, und als Eigenwertgl. ergab sich (Gl 31):

$$\frac{1}{\kappa}\underline{J} = \left(\frac{l\kappa}{4\pi}\right)^4\left[\frac{1}{\kappa}\underline{J}\, Q(X^2) + R(X^2)\right] \qquad (7)$$

Hier scheint sich jetzt folgendes zu ergeben (das ist ~~[illegible]~~ noch nicht ganz sicher, aber ich möchte es Dir als Vermutung schreiben):

Der Term $R(X^2)$ fällt weg. Die Funktion $Q(X^2)$ aber ~~[illegible]~~ wird wegen der Verdoppelung des Vakuums u. wegen der elektromagnetischen Kräfte zweideutig, wobei sich Q_+ und Q_- nur um elektromagnetische Terme unterscheiden. Der eine Term Q_+ wird für $X^2 \to 0$ logarithmisch unendlich wegen der elektromagnetischen Kräfte (das war auch bei Mitter-Kortel so), der andere Q_- scheint dort endlich zu bleiben aber unbestimmt zu werden (noch fraglich!). Es ergäbe sich also folgende Figur (vgl. die Tabelle für Q auf S. 433 unserer früheren Arbeit)



Die Gleichung selbst lautet:

$$\underline{J} = \left(\frac{l\kappa}{4\pi}\right)^4 \underline{J} \cdot Q_{\pm}(X^2) . \qquad (8)$$

Diese Gleichung hat jedenfalls die Lösung $\underline{J} = 0$, die das Neutrino bedeutet. Die übrigen Lösungen ergeben sich aus den Schnittpunkten mit der Geraden $Q = \left(\frac{4\pi}{l\kappa}\right)^4$. Der unterste Schnittpunkt ist das Elektron, die Kleinheit der Masse hängt mit dem logarithmischen Charakter der Singularität zusammen. Dann kommen Proton u. Neutron. Dass das Neutron etwas schwerer ist, als das Proton, kommt richtig heraus.

Dass das Neutrino überhaupt keine Wechselwirkung, das Elektron ~~Mass~~ nur elektromagnetische hat, kann ich zwar noch nicht direkt sehen, es ergibt sich aber zwangsläufig (wenn auch indirekt) aus der Masse. Wenn es z.B. für das Neutrino Wechselwirkungsgraphen irgendwelcher Art gäbe, etwa wie das Bild links,

so müsste es auch den zugehörigen Selbstenergiegraphen (Bild rechts) und damit eine Masse geben. Der gleiche Schluss beim Elektron zeigt, dass die Wechselwirkung nur elektromagnetisch ist. Aber die zugehörigen Symmetrieeigenschaften habe ich noch nicht richtig verstanden.

Schliesslich das μ-Meson wird sich zwanglos deuten lassen als

$$\mu\text{-Meson} \sim \substack{\text{Elektron} \\ \text{Neutrino}} + \tilde{\pi} .$$

Aber bei den Leptonen sind mir die genauen Formen der Eigenfunktionen noch nicht völlig klar.

Natürlich ist das, was ich dir hier geschrieben habe, bisher Programm und noch keine fertige

Theorie. Aber das Ganze hängt doch so gut zusammen, dass ich den Eindruck habe: es wird Tag in der Theorie der Elementarteilchen.

Wenn es wirklich wahr ist, dass Gl. (1) schon die richtige Theorie der Materie enthält, so gibt es einen hübschen „philosophischen" Punkt dabei. Ich hatte früher die Gleichung $\mathcal{L} = \psi^+ \gamma_\nu \frac{\partial}{\partial x_\nu} \psi + l^2 (\psi^+ \psi)(\psi^+ \psi)$ als Modell genommen, da ich glaubte, ~~das~~ sie sei das einfachste aller nichtlinearen Spinormodelle. Aber das war eben ein Irrtum. Gl. (1) ist einfacher, weil sie eine höhere Symmetrie besitzt. Unsere Welt ist sozusagen die einfachste aller möglichen Welten! Aber all das ist Zukunftsmusik und vorher muss noch viel Mathematik getrieben werden.

Also viele Grüsse!

Dein W. Heisenberg