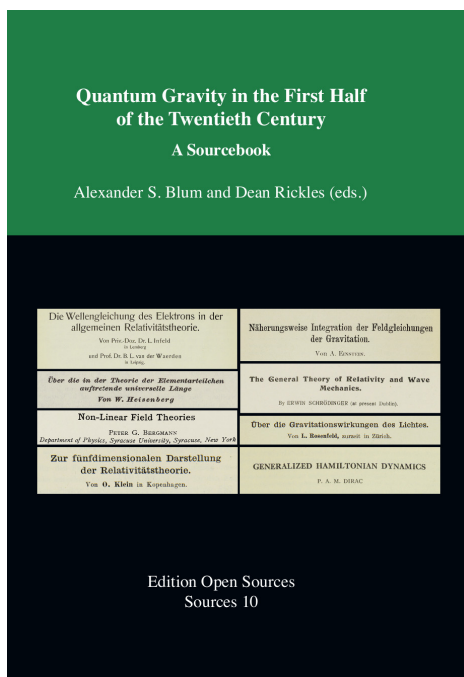


# Edition Open Sources

## Sources 10

*Alexander S. Blum and Dean Rickles:*

Werner Heisenberg (1938): Über die in der Theorie der Elementarteilchen auftretende universelle Länge  
DOI: 10.34663/9783945561317-28



In: Alexander S. Blum and Dean Rickles (eds.): *Quantum Gravity in the First Half of the Twentieth Century : A Sourcebook*

Online version at <https://edition-open-sources.org/sources/10/>

ISBN 978-3-945561-31-7, DOI 10.34663/9783945561317-00

First published 2018 by Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, Edition Open Sources under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Germany Licence. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>

## **Chapter 26**

### **Werner Heisenberg (1938): Über die in der Theorie der Elementarteilchen auftretende universelle Länge**

Werner Heisenberg (1938). Über die in der Theorie der Elementarteilchen auftretende universelle Länge. *Annalen der Physik*, 424: 20–33.

**Über die in der Theorie der Elementarteilchen  
auftretende universelle Länge**

**Von W. Heisenberg**

Dieses Heft feiert den Schöpfer der Quantentheorie, die mehr als irgendeine andere Entdeckung der neueren Physik zu einer allgemeinen Veränderung und Klärung des physikalischen Weltbildes geführt hat. Diese Gelegenheit mag als Entschuldigung gelten, wenn die folgenden Überlegungen sich mehr mit allgemeinen und zum großen Teil bekannten Zusammenhängen beschäftigen, als dies vielleicht sonst im Rahmen einer Einzeluntersuchung zulässig schiene.

Vor einiger Zeit hat der Verf. darauf aufmerksam gemacht<sup>1)</sup>, daß eine konsequente Anwendung der Fermischen Theorie des  $\beta$ -Zerfalls zu dem Schlusse nötigt, daß beim Zusammenstoß eines außerordentlich energiereichen Höhenstrahlungsteilchens mit einer anderen Partikel eventuell viele Teilchen explosionsartig auf einmal entstehen können. Dieser Vorgang sollte eintreten, wenn die Wellenlänge der stoßenden Teilchen im Schwerpunktsystem eine gewisse kritische Länge unterschreitet, die als eine universelle Länge von der Größenordnung des klassischen Elektronenradius

$$\frac{e^2}{m c^2} = r_0 = 2,81 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$$

in die Fermische Theorie des  $\beta$ -Zerfalls eingeht. Die Existenz solcher Explosionen schien damals durch die Experimente über die Schauer der Höhenstrahlung und die Hoffmannschen Stöße sehr wahrscheinlich. Inzwischen haben jedoch die Theorien von Carlson und Oppenheimer<sup>2)</sup> sowie Bhabha und Heitler<sup>3)</sup> gezeigt, daß ein großer Teil dieser Phänomene einfach auf Grund der Quantenelektrodynamik durch die sogenannte Kaskadenbildung gedeutet werden kann. Ferner sind von Yukawa<sup>4)</sup> und Wentzel<sup>5)</sup> andere Theorien des  $\beta$ -Zerfalls vorgeschlagen worden, die anscheinend die Experimente ebenso gut darstellen wie die Fermische Theorie, und die darüber hinaus eine Verknüpfung des  $\beta$ -Zerfalls mit der Existenz

1) W. Heisenberg, *Ztschr. f. Phys.* **101**. S. 533. 1936.

2) J. F. Carlson u. J. R. Oppenheimer, *Phys. Rev.* **51**. S. 220. 1937.

3) H. Bhabha u. W. Heitler, *Proc. Roy. Soc. A* **159**. S. 432. 1937.

4) H. Yukawa, *Proc. Phys. Math. Soc. Japan* **17**. S. 48. 1935.

5) G. Wentzel, *Ztschr. f. Phys.* **104**. S. 34. 1937; **105**. S. 738. 1937.

der von Neddermeyer und Anderson<sup>1)</sup> neu entdeckten Teilchen in Aussicht stellen<sup>2)</sup>. Daher steht die These, daß eine universelle Naturkonstante der Dimension einer Länge in dem Auftreten von Explosionen beim Zusammenstoß von Teilchen kleinerer Wellenlänge sichtbar werde, keineswegs auf sicherem Grund. Es sollen daher im folgenden die Argumente einzeln besprochen werden, welche die Vermutung nahelegen, es müsse in der Kernphysik und der Theorie der Ultrastrahlung auf eine universelle Länge der Ordnung  $r_0$  Rücksicht genommen werden, und welche mit der möglichen Existenz der Explosionen in Zusammenhang stehen.

### I. Die Konstanten $c$ und $\hbar$

Die Entwicklung der neueren Physik lehrt, daß die Wirksamkeit einer grundlegenden Naturkonstanten zunächst durch die Widersprüche bemerkt wird, die sich beim konsequenten Ausbau von scheinbar experimentell völlig gesicherten umfassenden Theorien, insbesondere beim Zusammenfügen von zwei solchen Theorien, ergeben. So galt um die Jahrhundertwende die Newtonsche Mechanik sowie die Maxwellsche Theorie als gesicherter Besitz der Physik. Beim Versuch, beide Theorien zu vereinigen und die Elektrodynamik bewegter Körper auszuarbeiten, stellten sich jedoch schwere Widersprüche heraus, die erst behoben werden konnten, als man in der Lichtgeschwindigkeit  $c$  eine universelle Naturkonstante von allgemeiner Bedeutung erkannte, auf die bei der Formulierung jedes physikalischen Gesetzes Rücksicht genommen werden muß. In ähnlicher Weise mußte die von Gibbs und Boltzmann ausgearbeitete statistische Theorie der Wärme als endgültig angesehen werden. Bei der Anwendung dieser Theorie auf die Strahlungsprobleme, also beim Zusammenfügen der Maxwellschen Theorie und der Theorie der Wärme stellten sich jedoch sehr grobe Widersprüche heraus: für die Strahlung im Wärmegleichgewicht erhielt man im Rayleigh-Jeansschen Gesetz divergente Resultate. Erst die Plancksche Entdeckung zeigte, daß man beim Zusammenfügen dieser Theorien auf eine universelle Naturkonstante von der Dimension einer Wirkung Rücksicht nehmen muß.

1) S. Neddermeyer u. C. P. Anderson, *Phys. Rev.* **51**. S. 884. 1937; vgl. auch J. C. Street u. E. C. Stevenson, *Bull. Amer. Phys. Soc.* **12**. S. 2, 13. 1937.

2) Vgl. insbes. J. R. Oppenheimer u. R. Serber, *Phys. Rev.* **51**. S. 1113. 1937; E. C. G. Stückelberg, *Phys. Rev.* **52**. S. 42. 1937; H. Yukawa u. S. Sakata, *Proc. Phys. Math. Soc. Japan* **19**. S. 1084. 1937; N. Kemmer, *Nature* **141**. S. 116. 1938; H. Bhabha, *Nature* **141**. S. 117. 1938.

Als die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten, die mit den Konstanten  $c$  und  $\hbar$  verbunden sind, klar verstanden waren, erkannte man, daß es sich nicht eigentlich um eine Korrektur der früher als gesichert betrachteten Theorien gehandelt hatte. Die früheren Theorien haben als die anschaulichen Grenzfälle, in denen die Lichtgeschwindigkeit als sehr groß und das Wirkungsquantum als sehr klein betrachtet werden kann, weiter Bestand. Die Konstanten  $c$  und  $\hbar$  bezeichnen vielmehr die Grenzen, in deren Nähe unsere anschaulichen Begriffe nicht mehr ohne Bedenken verwendet werden können. Man hat diesen Sachverhalt oft durch die Behauptung ausgedrückt, die früheren Theorien gingen aus Relativitätstheorie und Quantentheorie durch den Grenzübergang  $c \rightarrow \infty$ ,  $\hbar \rightarrow 0$  hervor. Diese Formulierung ist aber deswegen nicht ganz unbedenklich, weil sie nur dann richtig sein kann, wenn bestimmte Größen bei diesem Grenzübergang konstant gehalten werden (z. B. beim Übergang von der Quantenmechanik zur klassischen Mechanik die Massen und Ladungen der Elementarteilchen). In einer endgültigen Theorie aber würden diese Größen selbst aus den wenigen universellen Konstanten der Physik bestimmt sein, und eine Größenänderung der universellen Konstanten könnte an der Form der physikalischen Gesetze überhaupt nichts ändern. Der bei Konstanthaltung der genannten Größen vollzogene entgegengesetzte Grenzübergang  $\hbar \rightarrow \infty$  oder  $c \rightarrow 0$  führt übrigens zu sinnlosen Resultaten. Es erscheint also richtiger, bei der ersten Formulierung zu bleiben und  $\hbar$  und  $c$  einfach als die Grenzen zu bezeichnen, die der Verwendung anschaulicher Begriffe gesetzt sind<sup>1)</sup>.

Durch diese Eigenschaft unterscheiden sich übrigens die Konstanten  $\hbar$  und  $c$  von anderen, weniger fundamentalen universellen Konstanten. Z. B. hängt etwa die Boltzmannsche Konstante  $k$  mit der willkürlichen Festsetzung der Temperaturskala zusammen und könnte aus einer Theorie der Aggregatzustände des Wassers berechnet werden, oder bei Messung der Temperatur im Energiemaß ganz wegfallen. Auch eine universelle Konstante wie die Masse des Protons hat keineswegs eine so prinzipielle Bedeutung wie  $\hbar$  oder  $c$ ; denn der Massenbegriff hat zweifellos auch bei noch kleineren Massen einen einfach angebbaren Sinn; z. B. kann die Masse eines Lichtquants noch am Lichtdruck gemessen werden. Es scheint daher zweckmäßig, Konstanten von solch grundlegenden Eigenschaften wie  $\hbar$  und  $c$  etwa als „universelle Konstanten erster Art“ vor den anderen auszuzeichnen.

1) Vgl. hierzu insbes. N. Bohr, *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Berlin, Springer 1931.

Diese universellen Konstanten erster Art sind, wenn man von den beiden bisher bekannten Beispielen  $\hbar$  und  $c$  verallgemeinern darf, jeweils mit einer sehr allgemeinen Eigenschaft der Naturgesetze von dem Typus einer Invarianzeigenschaft verknüpft; sie stellen allgemeine Forderungen an die Form irgendeines physikalischen Gesetzes. Die spezielle Relativitätstheorie fordert die Invarianz aller physikalischen Gesetze gegenüber der Lorentztransformation, die Quantenmechanik fordert die Vertauschungsrelationen zwischen kanonisch konjugierten Variablen, die Existenz von Wahrscheinlichkeitsamplituden und die Invarianz der Gesetze gegenüber Drehungen im Hilbertschen Raum.

Wenn man von den Gravitationserscheinungen absieht, die in der Atomphysik kaum eine Rolle zu spielen scheinen, so sind außer  $\hbar$  und  $c$  in der Mikrophysik einstweilen keine weiteren universellen Konstanten erster Art bekannt.

## II. Die universelle Länge

Nun ist es aber von vornherein klar, daß es in der Atomphysik noch eine weitere „universelle Konstante erster Art“ von der Dimension einer Länge oder einer Masse geben muß. Denn da sich aus den Konstanten  $\hbar$  und  $c$  dimensionsmäßig keine Länge oder Masse bilden läßt, so muß die Masse der Elementarteilchen und die Dimension der Atome und Atomkerne durch eine weitere universelle Konstante festgelegt sein. Obgleich nun aus einer universellen Länge  $r_0$  stets eine universelle Masse  $m$  und umgekehrt aus der Masse eine Länge durch die Relation  $m = \frac{\hbar}{c r_0}$  gebildet werden kann und es insofern unwesentlich scheint, ob man von einer universellen Länge oder Masse spricht, so kommt doch wohl die physikalische Bedeutung dieser Konstante klarer zum Ausdruck, wenn man sie als eine universelle Länge einführt. Denn dann bedeutet sie wieder eine Grenze für die Anwendung anschaulicher Begriffe: der Begriff einer Länge kann nur für Entfernungen, die groß sind gegen die universelle Länge, ohne Einschränkung angewendet werden. Eine ähnliche physikalische Deutung einer universellen Masse dagegen ist nicht in einfacher Weise möglich. Denn größere und kleinere Massen sind der Messung mit jeder Genauigkeit zugänglich. Wir wollen daher die neue Konstante als Länge einführen und ihr den Wert  $r_0 = \frac{e^2}{m c^2} = 2,81 \cdot 10^{-13}$  cm geben. Diese letztere Festsetzung ist ja offenbar innerhalb gewisser Grenzen willkürlich, ebenso wie man willkürlich als universelle Konstante der Wirkung  $h$  oder  $\hbar$  einführen kann. Erst die fertige Theorie lehrt, welches die zweck-

mäßigste Festsetzung ist, und es ist freilich nicht wahrscheinlich, daß sich gerade der Wert  $r_0$  als der zweckmäßigste erweisen wird; doch hat er, wie die weiteren Überlegungen zeigen werden, jedenfalls die richtige Größenordnung. Die Festsetzung über  $r_0$  soll auch *nicht* bedeuten, daß die universelle Länge mit der Frage nach der Elektronenladung in unmittelbarem Zusammenhange stünde.

Es soll nun im folgenden auseinandergesetzt werden, daß — wie wohl schon verschiedentlich ausgesprochen wurde — die Widersprüche, die bisher in der Quantenelektrodynamik, der Theorie des  $\beta$ -Zerfalls und der Kernkräfte allenthalben auftraten, verschwinden, wenn man auf die Einschränkungen achtet, die durch die universelle Länge  $r_0$  vorgeschrieben werden; daß ferner die Länge  $r_0$  in der Theorie der Elementarteilchen eine entscheidende Rolle spielen muß, und daß die Einschränkungen der Messungsmöglichkeiten, die durch  $r_0$  bedingt sind, vielleicht durch die Existenz der Explosionen einfach verständlich gemacht werden können.

### III. Die Divergenzen

Wendet man die Vorschriften der Quantentheorie auf eine relativistisch invariante Wellentheorie an, in der auch Wechselwirkungen der Wellen (d. h. nichtlineare Glieder in der Wellengleichung) vorkommen, so erhält man, wie vielfach bemerkt worden ist, divergente Resultate. Es liegt dies daran, daß die relativistische Invarianz eine „Nahewirkungstheorie“ fordert, in der die Wechselwirkung dadurch bedingt ist, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Welle an einem Punkte durch die Amplitude einer anderen Welle an diesem Punkt bestimmt wird. Wegen der unendlich vielen Freiheitsgrade des Kontinuums, d. h. wegen der Möglichkeit von Wellen beliebig kleiner Wellenlänge werden aber die Eigenwerte einer Wellenamplitude an einem bestimmten Punkte unendlich. Dieser Widerspruch — der ja viel Ähnlichkeit mit dem Widerspruch im Rayleigh-Jeansschen Gesetz hat — bedeutet nun offenbar nicht eigentlich, daß die relativistische Wellentheorie oder die Quantentheorie falsch und zu verbessern wären, sondern weist darauf hin, daß beim Zusammenfügen der Quantentheorie und der relativistischen Wellentheorie auf eine universelle Konstante von der Dimension einer Länge Rücksicht genommen werden muß. In der Tat haben sich viele Autoren damit geholfen, daß sie die divergenten Integrale bei einer Länge von der Größenordnung  $r_0$  (oder bei den entsprechenden Impulsen) künstlich konvergent machten oder abbrachen, womit sich vernünftige Ergebnisse erzielen ließen. Aber dieses Abbrechen kann im allgemeinen nicht in relativistisch invarianter Weise durchgeführt

werden und ist natürlich nur als sehr vorläufiger Notbehelf zu betrachten. Denn in einer endgültigen Theorie müßten statt dessen die qualitativ neuen physikalischen Phänomene, die bei Längen der Ordnung  $r_0$  auftreten (und die selbstverständlich der relativistischen Invarianzforderung genügen) richtig berücksichtigt werden, was von selbst zur Konvergenz der Integrale führen würde.

Eine Sonderstellung nimmt in dieser Betrachtung die Frage nach der Selbstenergie des Elektrons ein, die ja schon in der klassischen Theorie als Beweis für den endlichen Elektronenradius angesehen wurde. Diese bekannte klassische Begründung für den Radius  $r_0$  kann zweifellos nicht in die Quantentheorie übernommen werden. Denn da die Ladung des Elektrons kleiner ist als die dimensionsmäßig entsprechende Größe  $\sqrt{\hbar c}$ , entziehen die durch die Quantentheorie bedingten unanschaulichen Züge in der Beschreibung des Elektronenfeldes der genannten klassischen Überlegung den Boden<sup>1)</sup>. Man hätte also vielleicht hoffen können, daß eine Quantentheorie des Elektrons und seines umgebenden Feldes existiert, in der keinerlei Selbstenergie auftritt, das Elektron also keine Ruhmasse besitzt. Eine solche Theorie, die gewissermaßen durch den Grenzübergang  $r_0 \rightarrow \infty$  aus der richtigen Theorie hervorgeht, scheint aber ebenso sinnlos wie der früher besprochene Grenzübergang  $\hbar \rightarrow \infty$  in der Quantentheorie. Sobald aber eine endliche Ruhmasse des Elektrons sich aus einer Theorie ergeben soll, so muß diese Theorie außer  $\hbar$  und  $c$  noch eine universelle Länge  $r_0$ , also Elemente enthalten, die mit Elektrodynamik und Quantentheorie nichts zu tun haben. Es scheint aus diesem Grunde unwahrscheinlich, daß eine Theorie der Sommerfeldschen Feinstrukturkonstante  $e^2/\hbar c$  gefunden werden kann, bevor die durch  $r_0$  bedingten neuen Züge der Naturbeschreibung, die ja zunächst mit der Frage nach der Elektronenladung gar nicht zusammenhängen, klargestellt sind.

Bei dieser Gelegenheit kann vielleicht das Problem der Gravitationskräfte kurz gestreift werden, von denen sonst in dieser Abhandlung nicht die Rede ist. Man kann die gegenseitige Schwere zweier Lichtquanten vergleichen mit der oben besprochenen elektrischen Wechselwirkung zweier Elektronen und nach der Gravitationsselfenergie der Lichtquanten fragen<sup>2)</sup>. Die Tatsache, daß die Lichtquanten keine Ruhmasse besitzen, legt hier zunächst den Gedanken nahe, daß in diesem Problem vielleicht  $r_0$  keine Rolle spielen könnte. Es stellt sich jedoch heraus, daß — im Gegensatz

1) Vgl. N. Bohr u. L. Rosenfeld, Dansk Vid. Selsk. math. phys. Medd. 12. S. 8. 1933.

2) Vgl. L. Rosenfeld, Ztschr. f. Phys. 65. S. 589. 1930.



zum elektrischen Analogon — die Gravitationskonstante  $\gamma$  zusammen mit  $\hbar$  und  $c$  selbst eine Länge auszeichnet:  $l = \sqrt{\frac{\hbar \gamma}{c^3}} = 4 \cdot 10^{-33}$  cm. Der Umstand, daß diese Länge wesentlich kleiner ist als  $r_0$ , gibt uns das Recht, von den durch die Gravitation bedingten unanschaulichen Zügen der Naturbeschreibung zunächst abzusehen, da sie — wenigstens in der Atomphysik — völlig untergehen in den viel größeren unanschaulichen Zügen, die von der universellen Konstanten  $r_0$  herrühren. Es dürfte aus diesen Gründen wohl kaum möglich sein, die elektrischen und die Gravitationserscheinungen in die übrige Physik einzuordnen, bevor die mit der Länge  $r_0$  zusammenhängenden Probleme gelöst sind.

Die Diskussion der mit  $r_0$  verbundenen Fragen scheint also die vordringlichste Aufgabe. Man wird zu ihrer Behandlung in erster Linie die Erscheinungen der Kernphysik und der Höhenstrahlung zu studieren haben, bei denen von den elektrischen und den Gravitationswechselwirkungen in erster Näherung abgesehen werden kann.

In diesem Gebiet der Physik ist es vor allem die Theorie des  $\beta$ -Zerfalls, in der sich die genannte Divergenzschwierigkeit bei der Quantelung der Wellenfelder äußert. Legt man insbesondere die Fermische Theorie des  $\beta$ -Zerfalls zugrunde, so führt die konsequente Anwendung der Quantentheorie zu Divergenzen von so hohem Grad, daß die Resultate nicht nur quantitativ sondern auch qualitativ von der Art abhängen, wie die divergenten Integrale künstlich in konvergente umgewandelt werden. So haben z. B. die Berechnungen von v. Weizsäcker<sup>1)</sup>, Fierz<sup>2)</sup> und anderen gezeigt, daß die Kräfte zwischen den Elementarteilchen, die sich aus der Theorie des  $\beta$ -Zerfalls ergeben, ganz von der Art des „Abschneidens“ bei kleinen Wellenlängen abhängen. Dieser Umstand hat verschiedene Forscher veranlaßt, die qualitativen Konsequenzen der Fermischen Theorie, die in der Möglichkeit der Explosionen sich äußern, anzuzweifeln, da ja durch ein geeignetes Abschneiden bei hinreichend langen Wellen erreicht werden kann, daß die genannten Konsequenzen nicht eintreten<sup>3)</sup>. Eine solche Schlußweise scheint mir jedoch auf einem Mißverständnis zu beruhen. Denn die Berechtigung zum Abschneiden kann doch umgekehrt nur aus den qualitativ neuen Erscheinungen entnommen werden, die bei den kritischen Wellen-

1) C. F. v. Weizsäcker, *Ztschr. f. Phys.* **102**. S. 572. 1936.

2) M. Fierz, *Ztschr. f. Phys.* **104**. S. 553. 1937.

3) G. Nordheim, L. W. Nordheim, J. R. Oppenheimer u. R. Serber, *Phys. Rev.* **51**. S. 1037. 1937.

längen eintreten. Wenn diese qualitativ neuen Erscheinungen gestrichen werden, verliert auch die Abschneidenvorschrift jeden physikalischen Sinn.

Ersetzt man die Fermische Theorie des  $\beta$ -Zerfalls durch eine andere, in welcher der beim  $\beta$ -Zerfall sich abspielende Prozeß aus zwei elementaren Übergängen zusammengesetzt wird, wie dies Yukawa u. Wentzel (a. a. O.) versucht haben, so treten Divergenzen von geringerem Grad als bei Fermi auf. Die Theorie des  $\beta$ -Zerfalls erhält dann Ähnlichkeit mit der gewöhnlichen Strahlungstheorie, wobei an die Stelle des Lichtquants ein geladenes Teilchen mit Bosestatistik und einer Masse der Größenordnung  $\hbar/cr_0$  tritt. Dieses Teilchen kann dann vielleicht mit den von Neddermeyer und Anderson (a. a. O.) vermuteten instabilen Teilchen identifiziert werden. Die Frage, ob in dieser Theorie bei den in der Höhenstrahlung vorkommenden Energien Explosionen zu erwarten sind, hängt davon ab, ob die der Sommerfeldschen Feinstrukturkonstante entsprechende Größe<sup>1)</sup>  $g^2/\hbar c$  bei der Berechnung der Wirkungsquerschnitte als klein gegen Eins betrachtet werden kann. Ihr Wert liegt nun je nach der Masse der Yukawaschen Teilchen etwa zwischen  $1/10$  und 1. Die Konsequenzen dieser Theorie für die Frage der Mehrfachprozesse sind daher einstweilen nicht zu übersehen. Im Grenzfall  $\frac{g^2}{\hbar c} \ll 1$  werden die Mehrfachprozesse unwahrscheinlich; dies hat zur Folge, daß die Theorie zwar weitgehende Ähnlichkeit mit der Strahlungstheorie erhält, dafür aber die Berechtigung zu der auch in ihr notwendigen „Abschneidenvorschrift“ aus anderen in der Theorie nicht enthaltenen und unbekanntem Phänomenen holen muß. Für Werte  $\frac{g^2}{\hbar c} \sim 1$  dagegen führt auch diese Theorie zur Möglichkeit der Explosionen. Sie verliert jedoch dabei wohl die Ähnlichkeit zur Strahlungstheorie, da dann eine Entwicklung nach  $g^2/\hbar c$  sinnlos werden dürfte<sup>2)</sup>. Auf jeden Fall handelt es sich also hier — ebenso wie in der Fermischen Theorie — wohl nur um ein korrespondenzmäßiges Analogon zu einer endgültigen Theorie, in der die Länge  $r_0$  an wesentlicher

1) H. Yukawa u. S. Sakata, a. a. O., S. 1090.

2) Wenn man die Ergebnisse von B. Kockel, Ztschr. f. Phys. 107. S. 153. 1937 auf die Yukawa-Wentzelsche Theorie übertragen und verallgemeinern darf, so wären schon bei einem Wert  $\frac{g^2}{\hbar c} = \frac{1}{10}$  die Mehrfachprozesse von etwa  $10^8$  eV ab die Regel. Schon für  $\frac{g^2}{\hbar c} = \frac{1}{10}$  ist daher die Konvergenz einer Entwicklung nach Potenzen von  $g^2/\hbar c$  sehr fraglich.

Stelle vorkommen muß. Wie fruchtbar andererseits solch ein korrespondenzmäßiges Analogon sein kann — selbst in einem Gebiet, in dem die unanschaulichen Züge bereits eine wesentliche Rolle spielen —, zeigt in der Vergangenheit etwa das Beispiel der Uhlenbeck-Goudsmitschen Theorie des Spins aufs deutlichste.

#### IV. Die Theorie der Elementarteilchen

Daß die bisherigen Theorien des  $\beta$ -Zerfalls nur den Charakter eines korrespondenzmäßigen Analogons haben können, scheint insbesondere daraus hervorzugehen, daß in ihnen die Massen der Elementarteilchen als eigene universelle Konstanten vorkommen. In der endgültigen Theorie müßten diese vielen verschiedenen Ruhmassen von Neutron, Proton, Elektron, Neutrino und den neuen labilen Teilchen sich in ähnlicher Weise aus der Konstante  $r_0$  ergeben, wie etwa die Terme des Wasserstoffatoms aus der Rydbergkonstante. Nun wird es freilich große Bereiche der Physik geben, in denen die Massen der Elementarteilchen einfach als feste Parameter betrachtet werden können und in denen die Theorie dieser Massen auf später aufgeschoben werden kann; und zwar wird dies überall dort der Fall sein, wo es sich um Energieumsetzungen handelt, die im Schwerpunktsystem klein gegen die kritische Energie  $hc/r_0$  sind. In dieses Gebiet gehört nicht nur die ganze Physik der Atomhülle, sondern auch die gewöhnliche Kernphysik und die Theorie des  $\beta$ -Zerfalls. Erst wenn man die Theorie des  $\beta$ -Zerfalls zu verknüpfen sucht mit der Theorie der Kernkräfte, oder wenn man sie anwenden will auf Probleme der Höhenstrahlung, braucht man Aussagen über Prozesse mit großer Energieumsetzung. Bei solchen Aussagen wird man ein Eingehen auf die Theorie der Elementarteilchen nicht mehr vermeiden können. Man muß also schließen, daß alle Versuche, die  $\beta$ -Zerfallstheorie mit den Kernkräften, mit dem magnetischen Moment der Elementarteilchen und mit Prozessen der Höhenstrahlung zu verknüpfen, nur sehr vorläufigen Charakter haben können, solange in ihnen die Massen der Elementarteilchen als unabhängige Konstanten erscheinen. Denn wenn Prozesse diskutiert werden, bei denen Teilchen einer Ruhmasse der Ordnung  $hc/r_0$  entstehen, wird notwendig auf die bei der Länge  $r_0$  eintretenden qualitativ neuen Erscheinungen geachtet werden müssen. Diese Erscheinungen müssen einerseits die Elementarmassen festlegen und andererseits den Grund für die Beseitigung der in Kap. III besprochenen Divergenzen abgeben.

#### V. Die durch die universelle Länge $r_0$ bedingten neuen Erscheinungen

Welches sind nun die bei Entfernungen oder Wellenlängen der Größenordnung  $r_0$  auftretenden neuen Erscheinungen? Solange es sich nur um die Bewegung einer einzigen Korpuskel handelt, kann wegen der relativistischen Invarianzforderungen die Konstante  $r_0$  sich nur äußern im Auftreten einer Ruhmasse. Ob dieses einzige Teilchen eine Energie groß oder klein gegen die kritische Energie  $hc/r_0$  hat, ist natürlich völlig gleichgültig, da die Energie vom Bezugssystem des Beobachters abhängt.

Wenn jedoch zwei Teilchen in Wechselwirkung treten, so wird es für das weitere physikalische Geschehen wesentlich sein, ob die kinetische Energie der Teilchen im Schwerpunktsystem bei ihrem Zusammentreffen groß oder klein gegen  $hc/r_0$  ist. Im Falle *kleiner* Energien kann, das zeigen die Erfahrungen der Kernphysik, das Verhalten der Teilchen so aufgefaßt werden, als wirke zwischen ihnen eine Kraft, die nur auf Abständen der Ordnung  $r_0$  (im Schwerpunktsystem) merkliche Werte annimmt. Diese Wechselwirkungsenergien der Größenordnung  $hc/r_0$  und der Reichweite  $r_0$  sind sozusagen das erste charakteristische Merkmal der Konstanten  $r_0$ . Es erscheint daher auch fraglich, inwieweit es zweckmäßig ist, diese Kräfte als abgeleitet aus den  $\beta$ -Zerfallskräften zu betrachten. In Wirklichkeit bilden wohl die Kernkräfte und die  $\beta$ -Zerfallskräfte eine Einheit, und man wird kaum von primären und abgeleiteten Wirkungen sprechen können. Aus ähnlichen Gründen wird man wohl auch annehmen dürfen, daß Kräfte der ungefähren Reichweite  $r_0$  zwischen *allen* Arten von Elementarteilchen wirksam sind; eine Ausnahme bilden höchstens die Partikeln, deren Ruhmasse sehr viel kleiner als  $hc/r_0$  ist (Elektronen, Neutrinos, Lichtquanten); bei denen werden vielleicht auch die „Kernkräfte“ besonders schwach sein.

Sehr viel weniger als über die Wechselwirkung der Teilchen kleiner kinetischer Energie ist bekannt über die Wechselwirkung zweier Teilchen, die beim Zusammenstoß im Schwerpunktsystem eine kinetische Energie besitzen, die groß gegen  $hc/r_0$  ist. Offenbar müssen die Prozesse, die sich hier abspielen, eng mit den unanschaulichen Zügen zusammenhängen, die durch die Konstante  $r_0$  in die Physik hereingebracht werden; ähnlich, wie etwa das Verhalten eines Elektrons z. B. im Normalzustand des Wasserstoffatoms die charakteristischen unanschaulichen Züge der Quantentheorie besonders deutlich zeigt.

Nun wird man freilich nicht erwarten, daß man alle Möglichkeiten für die Äußerung der von  $r_0$  stammenden unanschaulichen Züge beim Zusammenstoß energiereicher Teilchen zu überschauen vermag.

Aber die eine Möglichkeit, die durch die Fermische Theorie nahegelegt wird, soll noch ausführlich besprochen werden.

Es kann angenommen werden, daß beim Zusammenstoß zweier Teilchen, deren Energie im Schwerpunktsystem groß gegen  $\hbar c/r_0$  ist, diese Energie im allgemeinen in einem Akt in viele Elementarteilchen aufgeteilt wird. Diese Annahme der Explosionen ergibt sich als Folgerung aus der Fermischen Theorie des  $\beta$ -Zerfalls. Aber ganz unabhängig von dieser Theorie ist sie eine logische Möglichkeit, die allen aus Relativitätstheorie und Quantentheorie stammenden Invarianzforderungen genügt.

Die Entstehung von neuen Elementarteilchen beim Zusammenstoß zweier energiereicher Partikel wird ja schon durch die Analogie zur Elektrodynamik nahegelegt: Die Wechselwirkung energiarmer Elektronen wird durch die Coulombsche Kraft bestimmt, wie dies in den Theorien der Bremsung und Ionisation ausführlich dargestellt wird. Bei der Ablenkung sehr energiereicher Elektronen dagegen spielt nach Bethe und Heitler die Strahlung die Hauptrolle. Man kann dies so auffassen: Bei der Ablenkung des nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegten Elektrons kann sein elektrisches Feld wegen der Retardierung nicht ohne weiteres folgen, ein Teil dieses Feldes verläßt als Lichtquant den Ort, wo die Ablenkung stattgefunden hat. Dabei kann, wie die Theorie von Bethe und Heitler zeigt, das Lichtquant häufig einen erheblichen Teil der Energie des abgelenkten Teilchens mitnehmen. In ähnlicher Weise kann angenommen werden, daß beim Zusammenstoß zweier Elementarteilchen, die sich mit sehr großer Energie auf Abstände der Ordnung  $r_0$  nähern, eine Mitführung des Kernfeldes bei der Ablenkung nicht ohne weiteres möglich ist, daß also ein Teil des Feldes in Form von Elementarteilchen, die dann wieder einen großen Teil der Gesamtenergie mitnehmen können, den Ort des Zusammenstoßes verläßt.

Diese Analogie lehrt auch, daß — wenn die Explosionen überhaupt stattfinden — erwartet werden muß, daß Teilchen *aller* Art in den Explosionen entstehen können. Diese Annahme wird zwar durch die Fermische Theorie nicht nahegelegt, da in ihr z. B. die neuentdeckten labilen Teilchen nicht vorkommen; sie scheint mir jedoch eine natürliche Konsequenz aus den physikalischen Grundlagen der Hypothese der Explosionen. Insbesondere werden also bei einer Explosion häufig Neddermeyer-Andersonsche Teilchen und Protonen und Neutronen entstehen.

Fragt man nach der experimentellen Prüfung dieser Hypothese der Explosionen, so muß man nach Merkmalen suchen, die gestatten, die Explosionen sicher von den Kaskaden zu unterscheiden. Ein

wichtiges Merkmal besteht zunächst darin, daß die Explosion sehr häufig mit einer Kernverdampfung gekoppelt sein wird<sup>1)</sup>. Denn beim Zusammenstoß eines sehr energiereichen Teilchens mit einem ruhenden Elektron wird die im Schwerpunktsystem verfügbare Energie stets viel kleiner, als wenn das gleiche Teilchen mit einer ruhenden schweren Partikel zusammenstößt. Beim Zusammenstoß des energiereichen Teilchens mit einem Elektron wird daher die Energie im Schwerpunktsystem im allgemeinen nicht zur Bildung einer größeren Explosion ausreichen, wohl aber beim Zusammenstoß mit einem schweren Teilchen. Da diese meist in Kernen gebunden sind, wird nach der Explosion wahrscheinlich eine Verdampfung des durch die Explosion erwärmten Kerns stattfinden. Als weiteres Merkmal einer Explosion kann gelten, daß viele dabei entstehende Teilchen (wegen ihrer größeren Ruhmasse) keine Kaskaden mehr bilden können. Schließlich bleibt das wichtigste Merkmal der Explosion ihr Auftreten in einer sehr dünnen Schicht. Einige Wilsonaufnahmen von Fussell<sup>2)</sup> stellen mit großer Wahrscheinlichkeit kleinere Explosionen dar. Auch zeigt eine eingehende Analyse der Experimente über Hoffmannsche Stöße durch Euler<sup>3)</sup>, daß in diesen Stößen wahrscheinlich Explosionen eine erhebliche Rolle spielen. Doch müssen hier weitere Experimente abgewartet werden.

Wenn die Explosionen tatsächlich existieren und die für die Konstante  $r_0$  eigentlich charakteristischen Prozesse darstellen, so vermitteln sie vielleicht ein erstes, noch unklares Verständnis der unanschaulichen Züge, die mit der Konstanten  $r_0$  verbunden sind<sup>4)</sup>. Diese sollten sich ja wohl zunächst darin äußern, daß die Messung einer Länge mit einer den Wert  $r_0$  unterschreitenden Genauigkeit zu Schwierigkeiten führt. In der Quantentheorie war es die Existenz der Materiewellen oder richtiger das Nebeneinander von Wellen- und korpuskularen Eigenschaften, das dafür sorgte, daß die durch die Unbestimmtheitsrelationen gesetzten Grenzen nicht überschritten werden. In ähnlicher Weise würden die Explosionen dafür sorgen können, daß Ortsmessungen mit einer  $r_0$  unterschreitenden Genauigkeit unmöglich sind. Denkt man z. B. an die Ortsmessung durch ein  $\gamma$ -Strahlmikroskop, so müßten zur Erreichung der gewünschten

1) Vgl. hierzu auch W. Heisenberg, Ber. d. Sächs. Ak. d. Wiss. 89. S. 369. 1938. Insbesondere § 6.

2) L. Fussell, Phys. Rev. 51. S. 1005. 1937. Für die Übersendung einiger solcher Aufnahmen bin ich Herrn Fussell zu großem Dank verpflichtet.

3) H. Euler, im Erscheinen.

4) Über diesen Zusammenhang verdanke ich Herrn N. Bohr viele lehrreiche Diskussionen.

Genauigkeit  $\gamma$ -Strahlen einer Wellenlänge kleiner als  $r_0$ , also Lichtquanten einer Energie größer als  $\hbar c/r_0$  verwendet werden. Diese Lichtquanten würden aber an dem zu beobachtenden Gegenstand, auch wenn er eine hinreichend große Masse besitzt — er kann sich dabei in Ruhe oder in Bewegung befinden — im allgemeinen nicht gestreut werden, sondern Explosionen bilden, bei denen die einzelnen entstehenden Teilchen eine Wellenlänge der Größenordnung  $r_0$  besitzen. Eine Abbildung des Gegenstandes mit einer  $r_0$  unterschreitenden Genauigkeit kann dann nicht zustande kommen.

In den letzten Jahren sind zwei verschiedene Versuche unternommen worden, eine universelle Länge  $r_0$  in die Grundlagen des Formalismus der Atomphysik so einzubauen, daß die Divergenzschwierigkeiten der bisherigen Theorien vermieden werden. In mehreren Arbeiten haben Born und Infeld<sup>1)</sup> versucht, die Maxwell'sche Theorie im Gebiet kleiner Wellenlängen so abzuändern, daß die Selbstenergie des Elektrons einen endlichen Wert annimmt. Diese Untersuchungen stellen zwar in gewissem Sinne die genaue Erfüllung des Programms der Lorentz'schen Elektronentheorie dar, da sie die endliche Ruhmasse des Elektrons in einer relativistisch invarianten und konsequenten Weise berücksichtigen. Sie haben sich jedoch bisher nicht zu einer Quantentheorie des elektromagnetischen Feldes erweitern lassen. Auch nehmen sie wohl zu wenig Rücksicht auf den Umstand, daß die bei der Länge  $r_0$  auftretenden neuen Erscheinungen nicht in der Elektrodynamik, sondern in der Kernphysik ihre Wurzel zu haben scheinen. Ein ganz anderer Versuch zur Beseitigung der Divergenzen ist von March<sup>2)</sup> unternommen worden, der eine Abänderung der Geometrie bei kleinen Längen vorschlägt. Nun entspricht zwar eine solche Abänderung der Geometrie der Vermutung, daß unsere anschaulichen Begriffe nur bis zu Längen der Ordnung  $r_0$  anwendbar sind. Aber es ist die Frage, ob nicht in einem Formalismus, wie dem March'schen, immer noch zu viele Begriffe der bisherigen Physik unbedenklich verwendet werden; auch ist der Anschluß der March'schen Vorstellungen an die Erfahrungen der Kernphysik und der Höhenstrahlung bisher nicht erreicht worden.

Wenn man an die umfassenden Änderungen denkt, welche die formale Darstellung der Naturgesetze beim Verständnis der Konstanten  $c$  und  $\hbar$  erfahren hat, so wird man damit rechnen, daß auch

1) M. Born, Proc. Roy. Soc. (A) **143**. S. 410. 1933; M. Born u. L. Infeld, ebenda **144**. S. 425. 1934; **147**. S. 522. 1934; **150**. S. 141. 1935.

2) A. March, Ztschr. f. Phys. **104**. S. 93 u. 161. 1936; **105**. S. 620. 1937; **106**. S. 49. 1937; **108**. S. 128. 1937.

die Länge  $r_0$  zu völlig neuen Begriffsbildungen zwingt, die weder in der Quantentheorie noch in der Relativitätstheorie ein Analogon besitzen. Insbesondere ist es denkbar, daß es auch hier eine mit Hilfe der Konstanten  $r_0$  formulierbare Invarianzforderung gibt, der alle Naturgesetze zu genügen haben. Vielleicht wird man sich bei dem Versuch, diesen neuen Begriffsbildungen nachzuspüren, zunächst wieder mit Vorteil der Tatsache erinnern, daß es sich in der theoretischen Physik stets nur um die mathematische Verknüpfung beobachtbarer Größen handeln kann; daß uns also einstweilen nur die Aufgabe gestellt ist, Rechenregeln zu finden, durch die wir die Wirkungsquerschnitte der Höhenstrahlungsprozesse teils untereinander, teils mit anderen einfachen Beobachtungsdaten verknüpfen können. Aber zur erfolgreichen Durchführung eines solchen Programms wäre wohl auch eine erhebliche Erweiterung des bisherigen Beobachtungsmaterials die notwendige Voraussetzung.

Leipzig O 27, Bozener Weg 14.

(Eingegangen 13. Januar 1938)

---