

3
Göttingen, 6. Nov. 1926.

Lieber Herr Schrödinger,

Ihren lieben, langen Brief sachgemäß und eingehend zu beantworten, fühle ich mich im Augenblick nicht im stande, da das Semester wieder mit einer übermäßigen Arbeitslast eingesetzt hat. Aber ich will auch nicht die Antwort lange verschieben und darum lieber Sie bitten, mit ein paar Worten vorlieb zu nehmen.

Zunächst muss ich Ihre Behauptung von meiner „mathematischen Stoffkraft“ durchaus ablehnen; darin sind Sie mir sicher über, ich hätte es niemals fertig gebracht, das H-Atom-Eigenwertproblem durchzurechnen, selbst wenn ich auf die wundervolle Grundidee der Differentialgleichung verfallen wäre. Überhaupt ist es mir nicht gelungen, irgend ein konkretes Quantenproblem auszurechnen; d.h. versucht habe ich manches, aber stets waren andere fixier. Dagegen möchte ich mir sehr gewissenhaft ein Bild des Senses der physikalischen Tatsachen zu machen und die verschiedenen Argumente gegeneinander abzuwägen. Ich gestehe Ihnen gern, dass ich beim Erscheinen Ihres ersten Werkes in begeistert war, dass ich mit fliegenden Fahnen ins Lager der Continuumsphysik übergehen oder besser zurückkehren wollte; denn nach meinem ganzen Überdengang fühlte ich mich dahin gezogen, woher ich ausgegangen war, nämlich zu den strengen, klaren Begriffsbildungen der klassischen Physik. Aber langsam musste ich dies wieder aufgeben: ich sehe nicht, wie auf dem Wege der Annäherung an klassische Begriffe irgend etwas verständlich wird. Doch bin ich weit davon entfernt, Sie von der

Verfolgung Ihrer Pläne fortsetzen zu wollen. Gewiss muss man alle Möglichkeiten zu Ende denken. Ich selber lasse mich aber lieber durch mein Gefühl leiten, und das sagt mir, dass wir vorläufig ohne die „Quantenbegriffe“ nicht durchkommen.

Ihre Einwände gegen meine Argumente im Einzelnen sind nicht leicht zu widerlegen. Doch will ich ein paar Worte darüber sagen. Mit dem Hinweis auf die Wilsonschen Nebelspuren meine ich dies: Als direkteste Evidenz der stationären Zustände haben wir die Elektronenstöße, und hier denke ich vor allem an die Stöße zweiter Art. Wir können wohl als Tatsache nehmen, dass ein Elektron beim Zusammenstoß mit einem Atom, das ^{in irgend} ~~in irgend~~ ^{einem} Zustande ^{ist}, ~~aber irgend einen anderen höheren Zustand~~ immer nur eine Energiezunahme bekommt. Wenn nun in einem Atom mehrere Eigenoscillationen gleichzeitig angeregt sein könnten, wie sollte man das verstehen? Das wirkt da Ihr Gegenargument, dass das Elektron selber eine „Wellengruppe“ sein könnte? Es handelt sich doch um die Atomwellen, die diskreten Stufen entsprechen. Natürlich ist es möglich zu sagen: das in mehreren Frequenzen schwingende Atom reagiert eben in besonderer Weise so, dass es nur die einer Frequenz entsprechende Energie auf das Elektron überträgt. Aber das ist doch nur eine Ausrede. Mir scheint, dass die Bohrsche Redeweise die natürliche Beschreibung und Zusammenfassung eines großen Tatsachenbereiches ist; darum ist es Aufgabe jeder feineren Theorie, diese Redeweise zu rechtfertigen. Weiter will ich gar nichts. Übrigens: für geklärt halte ich die Sache gar nicht (wie Sie aus meiner Arbeit zu entnehmen scheint)! Nur zeige ich dazu, die Auffassung, die mir vernünftig scheint, etwas zu propagieren. — Was nun Ihre Einwände gegen die Stoßtheorie betrifft, so haben wir die uns auch gemeldet; aber

Wenn auch da noch Schwierigkeiten bestehen, so glaube ich, daß diese bald beseitigt werden, besonders durch eine Arbeit von Pauli. Doch ist das zu verwickelt, um es hier auseinander zu setzen. Es scheint so zu liegen: die Größen, die beobachtbar sind, z.B. Bahnasymptoten, werden auch wirklich von der Theorie bestimmt; unbeobachtbare aber, wie „nächster Abstand der Bahn vom ablenkenden Atom“, bleiben auch unbestimmt und nur statistisch fassbar.

Sie fragen, ob die zum Wahrscheinlichkeitsfeld hinzugefügten Corpuskel wirklich etwas helfen zur Erklärung der Bothe-Geiger'schen Versuche? Ich glaube, das Wort erklären ist hier nicht recht am Platze. Ihre Wellenmechanik zeigt automatisch dafür, daß die Erhaltungssätze in der Quanten-Formulierung gelten: jedem $h\nu$ -Strahlung (bzw. $\frac{h\nu}{c}$ -Strahlung) entspricht irgendwo ein $h\nu$ - (bzw. $\frac{h\nu}{c}$ -) Verlust (man weiß nur nicht, wo?). Eine solche Koppelung anschaulich zu machen, scheinen wir aber kein anderes Mittel zu haben als die Vorstellung fliegender Corpuskel. Doch ist ja niemand gezwungen, sich etwas zu veranschaulichen; dann mag er sich mit Ihren schönen Formeln begnügen. Nur glaube ich, daß es keine andere Veranschaulichung gibt als die vom Wellenfeld (übrigens: im ~~3N~~ 3N-dimensionalen Konfigurationsraum) gelenkten Corpuskel.

Nun ein anderes Argument gegen die Möglichkeit der klassisch-kontinuierlichen Auffassung, das aus Paulis Gedankenkreis stammt. Ich mache es am besten an einem Beispiel klar, etwa dem starren, zweidimensionalen Rotator: $H(p, q) = \frac{1}{2I}(\mathbf{p}^2 + p_y^2)$, mit der Nebenbedingung $x^2 + y^2 = a^2$. Es gibt folgende zwei Behandlungsarten:

1) direkt nach Schrödinger; $p_x = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x}$, $p_y = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial y}$ als Operatoren.

$$[H - W, \psi] = 0 \quad \text{gibt} \quad -\frac{h^2}{8\pi^2 I} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) - W\psi = 0, \quad x^2 + y^2 = a^2.$$

Polarkoordinaten $\begin{cases} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \end{cases}$ geben $r^2 = a^2$, also $\frac{h^2}{8\pi^2 I a^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} - W\psi = 0$,

$$\text{und daraus } \psi = \sum_n \left(\sqrt{\frac{8\pi^2 I a^2}{h^2}} W_n \varphi \right), \quad \frac{8\pi^2 I a^2}{h^2} W_n = n^2, \quad W_n = \frac{h^2 n^2}{8\pi^2 I a^2}.$$

2) Neue Behandlung: $\begin{cases} p_x = \xi, & p_y = \eta \text{ als Variable} \\ x = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial \xi}, & y = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial \eta} \text{ als Operatoren:} \end{cases}$

$$[H - W, \psi] = 0 \text{ gibt: } \left(\frac{1}{4\pi} (\xi^2 + \eta^2) - W \right) \psi = 0$$

$$x^2 + y^2 = a^2 \text{ gibt: } -\frac{h^2}{4\pi^2} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} \right) = a^2 \psi$$

Polar Koordinaten $\begin{cases} \xi = p \cos \alpha \\ \eta = p \sin \alpha \end{cases}$; nach der ersten Gl. ist $p^2 = 2\pi W$ konstant,

also liefert die zweite
$$\frac{h^2}{4\pi^2 p^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \alpha^2} + a^2 \psi = 0,$$

Lösung $\psi = \cos \left(\frac{4\pi p a}{h} \alpha \right)$; Endentlichkeitsforderung im $\xi\eta$ -Raum liefert $\frac{4\pi p a}{h} = n$, $p = \frac{h n}{4\pi a}$,

$$\text{also } W = \frac{p^2}{2\pi} = \frac{h^2 n^2}{8\pi^2 a^2}.$$

Sanz ähnlich scheint man immer vom q -Raum zum p -Raum oder, wenn man will zu einem gemischten $3N$ -dimensionalen pq -Raum übergehen zu können (durch kanonische Transformation im Sinne der Operatoren-Rechnung). Darf man also glauben, daß Ihre Ansetzung des q -Raumes physikalisch wesentlich ist? Daß sie irgend etwas mit dem Anschauungsraum zu tun hat?

Überhaupt scheint mir, daß etwas, was im Konfigurationsraum oder einem anderen $3N$ -dimensionalen Ausschnitt des $6N$ -dimensionalen Phasenraums vor sich geht, nur im Sinne der statistischen Mechanik gedeutet werden kann.

Aber, wie gesagt, schön wär's schon, wenn Sie recht hätten! So schönes passiert leider in der Welt selten. Vermutlich habe ich auch nicht recht, sondern es kommt noch anders. Doch glaube ich, ich habe ein bißchen mehr recht wie Sie.

Nun noch eine andere Sache. Heute früh kam ein Annalenheft mit einer Arbeit von Alexandrow über das H_2^+ -Ion. Da einer meiner Herren auch dran arbeitet, haben wir uns gleich auf die Arbeit gestürzt, und zunächst habe ich mit Franck das Physikalische

distribuiert. Wir bemerkten sofort, dass die Übereinstimmung mit dem
 Sauerbrey'schen Werte nur auf der Annahme des Dissoziationsarbeit des
 H_2 -Moleküls von 2,9 Volt beruht; diese ist aber unmöglich. 3,5 Volt
 hätte man vor kurzem noch konzedieren können. Jetzt aber, nach den
 neuen Arbeiten aus Harvard und Berkeley (den Autor der ersten
 habe ich vergessen, die zweite ist von Dicke, wir haben Korrekturen) ist
 es sicher, dass der Wert spektroskopisch genau 4,2 Volt beträgt.
 Die Übereinstimmung ist also rheinbar. Daraufhin begann ich
 einen Fehler zu suchen und fand einen (recht primitiven). Herr
 Alexandrow identifiziert die Elektronenenergien E_n (als fest gedachten)
 Kerne mit der Gesamtenergie und vergisst die Kernabstoßung $\frac{e^2}{r}$!
 Daraus folgt, dass sein tiefster Term ($n_3=2$), bei dem E vom
 Kernabstand r unabhängig ist, überhaupt kein Kerngleichgewicht
 liefert; denn $W = E + \frac{e^2}{r}$ hat bei $E = \text{konst.}$ kein Minimum.
 Aber ich vermute noch weitere Fehler; denn nun müsste der tiefste
 Term mindestens $n_3=3$ haben! Dann wäre aber eine adiabatische
 Erzeugung des H_2^+ aus H^+ und H unmöglich, was ich nicht
 glaube. Hund hat eine „Zoologie“ der Moleküle gemacht, die
 auf der adiabatischen Erzeugung beruht und zu vernünftige Resultate
 gibt, dass sie wohl richtig sein wird.

Ich schreibe das Ihnen, weil die Alexandrow'sche Arbeit „Zürich“
 gekennzeichnet ist; sie kennen wohl den Autor und werden ihm
 meine Einwände mitteilen können.

Nun ist mein Brief fast so lang geworden wie der Ihre. Ich wünschte,
 mündlich mit Ihnen alles besprechen zu können. Aber vorläufig
 sitze ich hier in schwerem Semesterbetrieb und muss halbes halten.

Grüßen Sie Ihre Frau recht herzlich; die meine ist gerade in Berlin
und hat es gut, da sie viel bei Einstein ist.

Ihr

M. Born.