

natürlich die triviale Voraussetzung für die Richtigkeit einer Theorie. Aber man kann ja nie alles nachprüfen. Daher interessiert mich das, was Sie über die Einfachheit gesagt haben, noch mehr. Aber ich würde nie behaupten wollen, daß ich wirklich verstanden hätte, was es mit der Einfachheit der Naturgesetze auf sich hat.«

Nachdem das Gespräch über die Wahrheitskriterien in der Physik noch eine Zeitlang weitergeführt worden war, verabschiedete ich mich und traf Einstein dann erst anderthalb Jahre später auf der Solvay-Konferenz in Brüssel, auf der die erkenntnistheoretischen und philosophischen Grundlagen der Theorie noch einmal den Gegenstand äußerst erregender Diskussionen bildeten.

## 6. Aufbruch in das neue Land

(1926–1927)

Wenn man fragt, worin eigentlich die große Leistung des Christoph Kolumbus bestanden habe, als er Amerika entdeckte, so wird man antworten müssen, daß es nicht die Idee war, die Kugelgestalt der Erde auszunützen, um auf der Westroute nach Indien zu reisen; diese Idee war schon von anderen erwogen worden. Auch nicht die sorgfältige Vorbereitung seiner Expedition, die fachmännische Ausrüstung der Schiffe, die auch von anderen hätte geleistet werden können. Sondern das schwerste an dieser Entdeckungsfahrt war sicher der Entschluß, alles bis dahin bekannte Land zu verlassen und so weit nach Westen zu segeln, daß mit den vorhandenen Vorräten eine Umkehr nicht mehr möglich war.

In ähnlicher Weise kann wirkliches Neuland in einer Wissenschaft wohl nur gewonnen werden, wenn man an einer entscheidenden Stelle bereit ist, den Grund zu verlassen, auf dem die bisherige Wissenschaft ruht, und gewissermaßen ins Leere zu springen. Einstein hatte in seiner Relativitätstheorie jenen Begriff der Gleichzeitigkeit aufgegeben, der zu den festen Grundlagen der früheren Physik gehört hatte, und es war eben dieser Verzicht auf den früheren Begriff der Gleichzeitigkeit, der von vielen, selbst bedeutenden Physikern und Philosophen nicht vollzogen werden konnte, der sie zu erbitterten Gegnern der Relativitätstheorie machte. Man kann vielleicht sagen, daß der Fortschritt der Wissenschaft von den an ihr Mitwirkenden im allgemeinen nur fordert, neue Gedankeninhalte aufzunehmen und zu verarbeiten; dazu sind die in der Wissenschaft Tätigen fast immer bereit. Wenn wirkliches Neuland betreten wird, kann es aber vorkommen, daß nicht

nur neue Inhalte aufzunehmen sind, sondern daß sich die Struktur des Denkens ändern muß, wenn man das Neue verstehen will. Dazu sind offenbar viele nicht bereit oder nicht in der Lage. Wie schwer es sein kann, diesen entscheidenden Schritt zu tun, davon hatte ich auf der Naturforschertagung in Leipzig ja einen ersten starken Eindruck bekommen. So mußten wir darauf gefaßt sein, daß uns auch in der Quantentheorie der Atome die eigentliche Schwierigkeit noch bevorstünde.

In den ersten Monaten des Jahres 1926, etwa um die gleiche Zeit, als ich meinen Vortrag in Berlin zu halten hatte, wurde uns Göttingern eine Arbeit des Wiener Physikers Schrödinger bekannt, der die Probleme der Atomtheorie von einer ganz neuen Seite her anpackte. Schon ein Jahr vorher hatte Louis de Broglie in Frankreich darauf aufmerksam gemacht, daß der merkwürdige Dualismus zwischen Wellenvorstellung und Teilchenvorstellung, der eine rationale Erklärung der Lichterscheinungen einstweilen unmöglich machte, auch bei der Materie, zum Beispiel bei den Elektronen, eine Rolle spielen könnte. Schrödinger entwickelte diesen Gedanken weiter und formulierte in einer Wellengleichung das Gesetz, nach dem sich die Materiewellen unter Einfluß eines elektromagnetischen Kraftfeldes fortpflanzen sollten. Nach dieser Vorstellung könnten die stationären Zustände einer Atomhülle den stehenden Schwingungen eines Systems, zum Beispiel einer schwingenden Saite, verglichen werden; wobei allerdings die Größen, die man sonst als Energien der stationären Zustände betrachtet hatte, hier als Frequenzen der stehenden Schwingungen erschienen. Die Resultate, die Schrödinger auf diese Weise erhielt, paßten sehr gut zu den Ergebnissen der neuen Quantenmechanik, und es gelang Schrödinger auch sehr bald nachzuweisen, daß seine Wellenmechanik mathematisch der Quantenmechanik äquivalent war, daß es sich also um zwei verschiedene mathematische Formulierungen des gleichen Sachverhalts handelte. Insofern waren wir über diese neue Entwicklung sehr glücklich, denn unser Vertrauen in die Richtigkeit des neuen mathematischen Formalismus wurde dadurch erheblich gestärkt; außerdem konnte man nach dem Schrö-

dingerschen Verfahren viele Rechnungen durchführen, die in der Quantenmechanik außerordentlich kompliziert gewesen wären.

Die Schwierigkeiten begannen aber bei der physikalischen Interpretation des mathematischen Schemas. Schrödinger glaubte, daß er mit dieser Wendung von den Teilchen zu den Materiewellen schließlich die Paradoxien würde beseitigen können, die das Verständnis der Quantentheorie lange Zeit so hoffnungslos erschwert hatten. Die Materiewellen sollten also in ähnlichem Sinn anschauliche Vorgänge in Raum und Zeit sein, wie man es etwa von den elektromagnetischen Wellen oder den Schallwellen gewohnt war. Die so schwer verständlichen Unstetigkeiten wie »Quantensprünge« und dergleichen sollten aus der Theorie vollständig verschwinden. Ich konnte diese Deutung nicht glauben, da sie unseren Kopenhagener Vorstellungen total widersprach, und ich war beunruhigt zu sehen, daß viele Physiker gerade diese Deutung Schrödingers als Befreiung empfanden. In den vielen Gesprächen, die ich mit Niels Bohr, Wolfgang Pauli und vielen anderen im Lauf der Jahre geführt hatte, glaubten wir volle Klarheit darüber gewonnen zu haben, daß eine anschauliche raum-zeitliche Beschreibung der Vorgänge im Atom nicht möglich wäre. Denn das Element der Unstetigkeit, das Einstein in Berlin ja auch als einen besonders charakteristischen Zug der atomaren Erscheinungen bezeichnet hatte, konnte eine solche Beschreibung nicht zulassen. Freilich war das zunächst nur eine negative Feststellung, und von einer vollständigen physikalischen Deutung der Quantenmechanik waren wir noch weit entfernt. Aber wir glaubten doch, sicher zu sein, daß man von der Vorstellung objektiver, in Raum und Zeit ablaufender Vorgänge irgendwie loskommen müßte. Im Gegensatz dazu lief die Schrödingersche Deutung nun darauf hinaus – und das war die große Überraschung – daß man die Existenz dieser Unstetigkeiten einfach leugnete. Es sollte nicht mehr wahr sein, daß das Atom beim Übergang von einem stationären Zustand zu einem anderen seine Energie plötzlich ändert und die abgegebene Energie in Form eines Einsteinschen Lichtquants ausstrahlt. Vielmehr sollte die Ausstrahlung so

zustande kommen, daß bei einem solchen Vorgang zwei stehende Materieschwingungen gleichzeitig angeregt sind und die Interferenz dieser beiden Schwingungen zur Aussendung von elektromagnetischen Wellen, zum Beispiel Lichtwellen, Anlaß gibt. Diese Hypothese schien mir zu kühn, um wahr sein zu können, und ich sammelte alle Argumente, die bewiesen, daß die Unstetigkeiten doch ein echter Zug der Wirklichkeit seien. Das nächstliegende Argument war natürlich die Plancksche Strahlungsformel, an deren empirischer Richtigkeit man ja nicht mehr zweifeln konnte und die doch der Ausgangspunkt für Plancks These von den diskreten stationären Energiewerten gewesen war.

Gegen Ende des Sommersemesters 1926 wurde Schrödinger von Sommerfeld eingeladen, im Münchner Seminar über seine Theorie vorzutragen, und dabei ergab sich für mich die erste Gelegenheit zur Diskussion. Ich hatte in diesem Semester wieder in Kopenhagen gearbeitet und mir durch eine Untersuchung über das Heliumatom auch die Schrödingerschen Methoden angeeignet. In einem anschließenden Erholungsurlaub am Mjösasee in Norwegen hatte ich die Arbeit abgeschlossen und war dann, mit dem Manuskript im Rucksack, ganz allein vom Gudbrandsdal über mehrere Bergketten hinweg auf ungebauten Pfaden an den Sognefjord gewandert. Nach einem kurzen Zwischenaufenthalt in Kopenhagen war ich schließlich nach München gefahren, um einen Teil der Ferien bei meinen Eltern zu verbringen. So hatte ich Gelegenheit Schrödingers Vortrag zu hören. Zu dem Seminar war auch der Leiter des Instituts für Experimentalphysik an der Universität München, Wilhelm Wien, erschienen, der sonst gegen die Sommerfeldsche »Atomistik« äußerst skeptisch eingestellt war.

Schrödinger setzte zunächst die mathematischen Prinzipien der Wellenmechanik am Wasserstoffatom auseinander, und wir alle waren begeistert darüber, daß man ein Problem, das Wolfgang Pauli mit den Methoden der Quantenmechanik nur in recht komplizierter Weise hatte lösen können, nun mit konventionellen mathematischen Methoden elegant und einfach erledigen konnte. Am Schluß aber sprach Schrödinger auch über seine Deutung der

Wellenmechanik, die ich nicht glauben konnte. In der darauf folgenden Diskussion brachte ich meine Einwände vor; insbesondere wies ich darauf hin, daß man mit Schrödingers Auffassung nicht einmal das Plancksche Strahlungsgesetz würde verstehen können. Mit dieser Kritik hatte ich aber gar kein Glück. Wilhelm Wien antwortete recht scharf, daß er zwar mein Bedauern darüber verstehe, daß es nun mit der Quantenmechanik zu Ende sei und daß man von all dem Unsinn wie Quantensprüngen und dergleichen nicht mehr zu reden brauche; aber die von mir erwähnten Schwierigkeiten würden zweifellos von Schrödinger in kürzester Frist gelöst werden. Schrödinger war nicht ganz so sicher in seiner Antwort, aber auch er blieb überzeugt, daß es nur eine Frage der Zeit sei, wann man die von mir aufgeworfenen Probleme in seinem Sinne bereinigen könnte. Mit meinen Argumenten konnte ich auf niemanden mehr Eindruck machen. Selbst Sommerfeld, der mir wohlwollte, konnte sich der Überzeugungskraft der Schrödingerschen Mathematik nicht entziehen.

So zog ich etwas betrübt nach Hause, und es mag sein, daß ich noch am selben Abend einen Brief an Niels Bohr geschrieben habe; um ihm über den unglücklichen Ausgang der Diskussion zu berichten. Vielleicht war es die Folge dieses Briefs, daß Bohr eine Einladung an Schrödinger schickte, im September für ein bis zwei Wochen nach Kopenhagen zu kommen, um die Deutung der Quanten- oder Wellenmechanik in allen Einzelheiten durchzusprechen. Schrödinger sagte zu, und natürlich fuhr auch ich nach Kopenhagen, um bei diesen wichtigen Auseinandersetzungen dabei zu sein.

Die Diskussionen zwischen Bohr und Schrödinger begannen schon auf dem Bahnhof in Kopenhagen und wurden jeden Tag vom frühen Morgen bis spät in die Nacht hinein fortgesetzt. Schrödinger wohnte bei Bohrs im Hause, so daß es schon aus äußeren Gründen kaum eine Unterbrechung der Gespräche geben konnte. Und obwohl Bohr sonst im Umgang mit Menschen besonders rücksichtsvoll und liebenswürdig war, kam er mir hier beinahe wie ein unerbittlicher Fanatiker vor, der nicht bereit war, seinem

Gesprächspartner auch nur einen Schritt entgegenzukommen oder auch nur die geringste Unklarheit zuzulassen. Es wird kaum möglich sein wiederzugeben, wie leidenschaftlich die Diskussionen von beiden Seiten geführt wurden, wie tief verwurzelt die Überzeugungen waren, die man gleichermaßen bei Bohr und Schrödinger hinter den ausgesprochenen Sätzen spüren konnte. So kann es sich im Folgenden nur um ein sehr blasses Abbild jener Gespräche handeln, in denen mit äußerster Kraft um die Deutung der neugewonnenen mathematischen Darstellung der Natur gerungen wurde.

Schrödinger: »Sie müssen doch verstehen, Bohr, daß die ganze Vorstellung der Quantensprünge notwendig zu Unsinn führt. Da wird behauptet, daß das Elektron im stationären Zustand eines Atoms zunächst in irgendeiner Bahn periodisch umläuft ohne zu strahlen. Es gibt keine Erklärung dafür, warum es nicht strahlen soll; nach der Maxwellschen Theorie müßte es doch strahlen. Dann soll das Elektron aus dieser Bahn in eine andere springen und dabei strahlen. Soll dieser Übergang allmählich erfolgen oder plötzlich? Wenn er allmählich erfolgt, so muß das Elektron doch allmählich seine Umlauffrequenz und seine Energie ändern. Es ist nicht zu verstehen, wie es dabei noch scharfe Frequenzen der Spektrallinien geben soll. Geschieht der Übergang aber plötzlich, sozusagen in einem Sprung, so kann man zwar unter Anwendung der Einsteinschen Vorstellungen von den Lichtquanten zur richtigen Schwingungszahl des Lichtes kommen, aber man muß dann fragen, wie sich das Elektron beim Sprung bewegt. Warum strahlt es dabei nicht ein kontinuierliches Spektrum aus, so wie die Theorie der elektromagnetischen Erscheinungen das fordern würde? Und durch welche Gesetze wird seine Bewegung beim Sprung bestimmt? Also die ganze Vorstellung von den Quantensprüngen muß einfach Unsinn sein.«

Bohr: »Ja, mit dem, was Sie sagen, haben Sie durchaus recht. Aber das beweist doch nicht, daß es keine Quantensprünge gibt. Es beweist nur, daß wir sie uns nicht vorstellen können, das heißt, daß die anschaulichen Begriffe, mit denen wir die Ereignisse des

täglichen Lebens und die Experimente der bisherigen Physik beschreiben, nicht ausreichen, um auch die Vorgänge beim Quantensprung darzustellen. Das ist doch gar nicht so merkwürdig, wenn man bedenkt, daß die Vorgänge, um die es sich hier handelt, nicht Gegenstand der unmittelbaren Erfahrung sein können, daß wir sie nicht direkt erleben, also auch unsere Begriffe nicht danach ausrichten.«

Schrödinger: »Ich möchte mich nicht mit Ihnen in eine philosophische Diskussion über Begriffsbildung einlassen, das soll hinterher Sache der Philosophen sein; sondern ich möchte einfach wissen, was im Atom geschieht. Dabei ist es mir völlig gleichgültig, in welcher Sprache man darüber redet. Wenn es Elektronen im Atom gibt, die Teilchen sind, so wie wir uns das bisher vorgestellt haben, so müssen sie sich auch irgendwie bewegen. Es kommt mir im Augenblick nicht darauf an, diese Bewegung genau zu beschreiben; aber schließlich muß es doch einmal möglich sein herauszubringen, wie sie sich im stationären Zustand oder auch beim Übergang von einem Zustand zum anderen verhalten. Aber man sieht doch dem mathematischen Formalismus der Wellen- oder Quantenmechanik schon an, daß es auf diese Fragen keine vernünftige Antwort gibt. In dem Moment jedoch, in dem wir bereit sind, das Bild zu wechseln, also zu sagen, daß es keine Elektronen als Teilchen, wohl aber Elektronenwellen oder Materiewellen gibt, so sieht alles anders aus. Wir wundern uns dann nicht mehr über die scharfen Frequenzen der Schwingungen. Die Ausstrahlung von Licht wird genauso einfach verständlich wie die Aussendung von Radiowellen durch die Antenne des Senders, und die vorher unlösbar scheinenden Widersprüche verschwinden.«

Bohr: »Nein, das ist leider nicht richtig. Die Widersprüche verschwinden nicht, sondern sie werden nur an eine andere Stelle geschoben. Sie sprechen zum Beispiel von der Aussendung von Strahlung durch das Atom, oder allgemeiner, von der Wechselwirkung des Atoms mit dem umgebenden Strahlungsfeld, und Sie meinen, daß durch die Annahme, es gäbe Materiewellen, aber keine Quantensprünge, die Schwierigkeiten beseitigt würden. Aber

denken Sie nur an das thermodynamische Gleichgewicht zwischen Atom und Strahlungsfeld, etwa an die Einsteinsche Ableitung des Planckschen Strahlungsgesetzes. Für die Ableitung dieses Gesetzes ist es entscheidend, daß die Energie des Atoms diskrete Werte annimmt und sich gelegentlich unstetig ändert; diskrete Werte der Frequenzen von Eigenschwingungen helfen gar nichts. Sie können doch nicht im Ernst die ganzen Grundlagen der Quantentheorie in Frage stellen wollen.«

Schrödinger: »Ich behaupte natürlich nicht, daß diese Zusammenhänge schon voll verstanden wären. Aber Sie haben ja auch noch keine befriedigende physikalische Deutung der Quantenmechanik. Ich sehe nicht ein, warum man nicht hoffen darf, daß die Anwendung der Wärmelehre auf die Theorie der Materiewellen schließlich auch zu einer guten Erklärung der Planckschen Formel führen wird – die allerdings dann etwas anders aussehen wird als die bisherigen Erklärungen.«

Bohr: »Nein, das darf man nicht hoffen. Denn man weiß ja schon seit 25 Jahren, was die Plancksche Formel bedeutet. Und außerdem sehen wir doch die Unstetigkeiten, das Sprunghafte in den atomaren Erscheinungen ganz unmittelbar, etwa auf dem Szintillationsschirm oder in einer Nebelkammer. Wir sehen, daß plötzlich ein Lichtblitz auf dem Schirm erscheint oder daß plötzlich ein Elektron durch die Nebelkammer läuft. Sie können diese sprunghaften Ereignisse doch nicht einfach wegschieben und so tun, als ob es sie nicht gäbe.«

Schrödinger: »Wenn es doch bei dieser verdammten Quantenspringerei bleiben soll, so bedaure ich, mich überhaupt jemals mit der Quantentheorie abgegeben zu haben.«

Bohr: »Aber wir anderen sind Ihnen so dankbar dafür, daß Sie es getan haben, denn Ihre Wellenmechanik stellt doch in ihrer mathematischen Klarheit und Einfachheit einen riesigen Fortschritt gegenüber der bisherigen Form der Quantenmechanik dar.«

So ging die Diskussion über viele Stunden des Tages und der Nacht, ohne daß es zu einer Einigung gekommen wäre. Nach eini-

gen Tagen wurde Schrödinger krank, vielleicht als Folge der enormen Anstrengung; er mußte mit einer fiebrigen Erkältung das Bett hüten. Frau Bohr pflegte ihn und brachte Tee und Kuchen, aber Niels Bohr saß auf der Bettkante und sprach auf Schrödinger ein: »Aber Sie müssen doch einsehen, daß . . .« Zu einer echten Verständigung konnte es damals nicht kommen, weil ja keine der beiden Seiten eine vollständige, in sich geschlossene Deutung der Quantenmechanik anzubieten hatte. Aber wir Kopenhagener fühlten uns gegen Ende des Besuchs doch sehr sicher, daß wir auf dem richtigen Weg wären. Wir erkannten allerdings gleichzeitig, wie schwierig es sein würde, auch die besten Physiker davon zu überzeugen, daß man hier auf eine raum-zeitliche Beschreibung der Atomvorgänge wirklich verzichten müsse.

In den folgenden Monaten bildete die physikalische Deutung der Quantenmechanik das zentrale Thema der Gespräche zwischen Bohr und mir. Ich wohnte damals im obersten Stockwerk des Institutsgebäudes in einer hübsch eingerichteten kleinen Dachwohnung mit schrägen Wänden, von der man auf die Bäume am Eingang des Fäyledparks hinabschauen konnte. Bohr kam oft noch spät abends in mein Zimmer, und wir erörterten alle möglichen sogenannten Gedankenexperimente, um zu sehen, ob wir die Theorie wirklich schon vollständig verstanden hätten. Dabei stellte sich bald heraus, daß Bohr und ich die Lösung der Schwierigkeiten in etwas verschiedener Richtung suchten. Bohrs Bestrebungen gingen dahin, die beiden anschaulichen Vorstellungen, Teilchenbild und Wellenbild, gleichberechtigt nebeneinander stehen zu lassen, wobei er zu formulieren suchte, daß diese Vorstellungen sich zwar gegenseitig ausschlossen, daß aber doch beide erst zusammen eine vollständige Beschreibung des atomaren Geschehens ermöglichten. Mir war diese Art zu denken nicht angenehm. Ich wollte davon ausgehen, daß die Quantenmechanik in ihrer damals bekannten Form ja schon eine eindeutige physikalische Interpretation für einige in ihr vorkommende Größen vorschrieb – zum Beispiel für die Zeitmittelwerte von Energie, elektrischem Moment, Impuls, für Schwankungsmittelwerte usw. –

daß man also aller Wahrscheinlichkeit nach keinerlei Freiheit hinsichtlich der physikalischen Interpretation mehr hatte. Vielmehr müßte man die richtige allgemeine Interpretation durch sauberes logisches Schließen aus der schon vorliegenden spezielleren Interpretation ermitteln können. Daher war ich auch – sicher zu Unrecht – etwas unglücklich über eine an sich ausgezeichnete Arbeit Borns in Göttingen, in der er Stoßprozesse nach den Schrödingerschen Methoden behandelt und dabei die Hypothese aufgestellt hatte, daß das Quadrat der Schrödingerschen Wellenfunktion ein Maß für die Wahrscheinlichkeit sei, ein Elektron an der betreffenden Stelle zu finden. Ich hielt die Bornsche These zwar durchaus für richtig, aber es mißfiel mir, daß es so aussah, als habe hier noch eine gewisse Freiheit der Deutung bestanden. Ich war überzeugt, daß die Bornsche These bereits zwangsläufig aus der schon festgelegten Interpretation spezieller Größen in der Quantenmechanik folgte. Diese Überzeugung wurde noch bestärkt durch zwei sehr aufschlußreiche mathematische Untersuchungen von Dirac und Jordan.

Zum Glück kamen Bohr und ich bei unseren abendlichen Gesprächen doch meist für ein gegebenes physikalisches Experiment zu den gleichen Schlußfolgerungen, so daß wir hoffen konnten, daß unsere so verschiedenartigen Bestrebungen schließlich zum gleichen Ergebnis führen würden. Freilich konnten wir beide nicht verstehen, wie ein so einfaches Phänomen, wie etwa die Bahn eines Elektrons in der Nebelkammer, mit dem mathematischen Formalismus der Quanten- oder Wellenmechanik in Einklang gebracht werden könnte. In der Quantenmechanik kam der Bahnbegriff gar nicht vor, und in der Wellenmechanik konnte es zwar einen engen gerichteten Materiestrahl geben; der aber mußte sich allmählich über Raumgebiete ausbreiten, die sehr viel größer waren, als der Durchmesser eines Elektrons. Die experimentelle Situation sah sicherlich anders aus. Da unsere Gespräche oft bis spät nach Mitternacht ausgedehnt wurden und trotz der über Monate fortgesetzten Anstrengungen nicht zu einem befriedigenden Ergebnis führten, gerieten wir in einen Zustand der Erschöp-

fung, der in Anbetracht der verschiedenen Denkrichtungen auch manchmal Spannungen hervorrief. Daher entschloß sich Bohr im Februar 1927, zu einem Skiurlaub nach Norwegen zu reisen, und ich war auch ganz froh darüber, nun in Kopenhagen einmal allein über diese hoffnungslos schwierigen Probleme nachdenken zu können. Ich konzentrierte meine Anstrengungen jetzt ganz auf die Frage, wie in der Quantenmechanik die Bahn eines Elektrons in der Nebelkammer mathematisch darzustellen sei. Als ich schon an einem der ersten Abende dabei auf ganz unüberwindliche Schwierigkeiten stieß, dämmerte es mir, daß wir vielleicht die Frage falsch gestellt hatten. Aber was konnte hier falsch sein? Die Bahn des Elektrons in der Nebelkammer gab es, man konnte sie beobachten. Das mathematische Schema der Quantenmechanik gab es auch, und es war viel zu überzeugend um noch Änderungen zuzulassen. Also mußte man die Verbindung – entgegen allem äußeren Anschein – herstellen können. Es mag an jenem Abend gegen Mitternacht gewesen sein, als ich mich plötzlich auf mein Gespräch mit Einstein besann und mich an seine Äußerung erinnerte: »Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann.« Es war mir sofort klar, daß der Schlüssel zu der so lange verschlossenen Pforte an dieser Stelle gesucht werden müsse. Daher unternahm ich noch einen nächtlichen Spaziergang durch den Fälldpark, um mir die Konsequenzen der Einsteinschen Äußerung zu überlegen. Wir hatten ja immer leichthin gesagt: die Bahn des Elektrons in der Nebelkammer kann man beobachten. Aber vielleicht war das, was man wirklich beobachtet, weniger. Vielleicht konnte man nur eine diskrete Folge von ungenau bestimmten Orten des Elektrons wahrnehmen. Tatsächlich sieht man ja nur einzelne Wassertröpfchen in der Kammer, die sicher sehr viel ausgedehnter sind als ein Elektron. Die richtige Frage mußte also lauten: Kann man in der Quantenmechanik eine Situation darstellen, in der sich ein Elektron ungefähr – das heißt mit einer gewissen Ungenauigkeit – an einem gegebenen Ort befindet und dabei ungefähr – das heißt wieder mit einer gewissen Ungenauigkeit – eine vorgegebene Geschwindigkeit besitzt, und kann

man diese Ungenauigkeiten so gering machen, daß man nicht in Schwierigkeiten mit dem Experiment gerät? Eine kurze Rechnung nach der Rückkehr ins Institut bestätigte, daß man solche Situationen mathematisch darstellen kann und daß für die Ungenauigkeiten jene Beziehungen gelten, die später als Unbestimmtheitsrelationen der Quantenmechanik bezeichnet worden sind. Das Produkt der Unbestimmtheiten für Ort und Bewegungsgröße (unter Bewegungsgröße versteht man das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit) kann nicht kleiner als das Plancksche Wirkungsquantum sein. Damit war, so schien mir, die Verbindung zwischen den Beobachtungen in der Nebelkammer und der Mathematik der Quantenmechanik endlich hergestellt. Allerdings mußte man nun nachweisen, daß aus jedem beliebigen Experiment nur Situationen entstehen können, die jenen Unbestimmtheitsrelationen genügen. Aber das schien mir von vornherein plausibel, da ja die Vorgänge beim Experiment, bei der Beobachtung, selbst den Gesetzen der Quantenmechanik genügen müssen. Wenn man sie also hier voraussetzt, können aus dem Experiment kaum Situationen entstehen, die nicht in die Quantenmechanik passen. »Denn erst die Theorie entscheidet, was man beobachten kann.« Ich nahm mir vor, dies in den nächsten Tagen an einfachen Experimenten im einzelnen durchzurechnen.

Auch hier kam mir die Erinnerung an ein Gespräch zu Hilfe, das ich einmal mit einem Studienfreund in Göttingen, Burkhard Drude, geführt hatte. Bei der Erörterung der Schwierigkeiten, die mit der Vorstellung von Elektronenbahnen im Atom verknüpft sind, hatte Burkhard Drude die prinzipielle Möglichkeit erwogen, ein Mikroskop von außerordentlich hohem Auflösungsvermögen zu konstruieren, in dem man die Bahn des Elektrons direkt sehen könnte. Ein solches Mikroskop könnte dann allerdings nicht mit sichtbarem Licht, aber vielleicht mit harter Gamma-Strahlung arbeiten. Im Prinzip hätte man die Bahn des Elektrons im Atom damit vielleicht photographisch aufnehmen können. Ich mußte also versuchen nachzuweisen, daß auch ein solches Mikroskop nicht gestattet würde, die durch die Unbestimmtheitsrelation gegebenen

Grenzen zu überschreiten. Dieser Nachweis gelang und stärkte mein Vertrauen in die Geschlossenheit der neuen Interpretation. Nach einigen weiteren Rechnungen dieser Art faßte ich meine Ergebnisse in einem langen Brief an Wolfgang Pauli zusammen und erhielt von ihm aus Hamburg eine zustimmende Antwort, die mich sehr ermutigte.

Es gab dann noch einmal schwierige Diskussionen, als Niels Bohr von seinem Skiurlaub aus Norwegen zurückkam. Denn auch Bohr hatte seine eigenen Gedanken weiter verfolgt und wie in unseren Gesprächen versucht, den Dualismus zwischen Wellenbild und Teilchenbild zur Grundlage der Deutung zu machen. Im Mittelpunkt seiner Überlegungen stand der von ihm nun neu geprägte Begriff der Komplementarität, der eine Situation beschreiben sollte, in der wir ein und dasselbe Geschehen mit zwei verschiedenen Betrachtungsweisen erfassen können. Diese beiden Betrachtungsweisen schließen sich zwar gegenseitig aus, aber sie ergänzen sich auch, und erst durch das Nebeneinander der beiden widersprechenden Betrachtungsweisen wird der anschauliche Gehalt des Phänomens voll ausgeschöpft. Bohr hatte am Anfang einige Vorbehalte gegen die Unbestimmtheitsrelationen, die er wohl als einen zu speziellen Sonderfall der allgemeinen Situation der Komplementarität empfand. Aber wir erkannten doch bald – hilfreich unterstützt durch den schwedischen Physiker Oskar Klein, der damals auch in Kopenhagen arbeitete – daß es keinen ernsthaften Unterschied zwischen den beiden Deutungen mehr gäbe, daß es also nur noch darauf ankäme, den voll verstandenen Sachverhalt so darzustellen, daß er trotz seiner Neuartigkeit auch der physikalischen Öffentlichkeit verständlich würde.

Die Auseinandersetzung mit der physikalischen Öffentlichkeit kam dann im Herbst 1927 auf zwei Veranstaltungen, einer allgemeinen Physikertagung in Como, auf der Bohr einen zusammenfassenden Vortrag über die neue Situation hielt, und dem sogenannten Solvay-Kongreß in Brüssel, zu dem nach den Gepflogenheiten der Solvay-Stiftung nur eine kleine Gruppe von Spezialisten eingeladen wurde, die über die Probleme der Quantentheorie

eingehend diskutieren sollten. Wir wohnten alle im gleichen Hotel, und die schärfsten Diskussionen wurden nicht im Konferenzraum, sondern während der Mahlzeiten im Hotel geführt. Bohr und Einstein trugen die Hauptlast dieses Kampfes um die neue Deutung der Quantentheorie. Einstein war nicht bereit, den grundsätzlich statistischen Charakter der neuen Quantentheorie zu akzeptieren. Er hatte natürlich nichts dagegen, Wahrscheinlichkeitsaussagen dort zu machen, wo man das betreffende System nicht in allen Bestimmungsstücken genau kennt. Auf solchen Aussagen beruhte ja die frühere statistische Mechanik und die Wärmelehre. Einstein wollte aber nicht zulassen, daß es grundsätzlich unmöglich sein sollte, alle für eine vollständige Determinierung der Vorgänge notwendigen Bestimmungsstücke zu kennen. »Der liebe Gott würfelt nicht«, das war eine Wendung, die man in diesen Diskussionen oft von ihm hören konnte. Daher konnte Einstein sich nicht mit den Unbestimmtheitsrelationen abfinden, und er versuchte sich Experimente auszudenken, in denen diese Relationen nicht mehr gelten. Die Auseinandersetzungen begannen meist schon am frühen Morgen damit, daß Einstein uns zum Frühstück ein neues Gedankenexperiment erklärte, das nach seiner Ansicht die Unbestimmtheitsrelationen widerlegte. Wir begannen natürlich sofort mit der Analyse, und auf dem Weg zum Konferenzraum, auf dem ich Bohr und Einstein meist begleitete, wurde eine erste Klärung der Fragestellung und der Behauptung erreicht. Es wurden dann im Laufe des Tages viele Gespräche darüber geführt, und in der Regel war es am Abend so weit, daß Niels Bohr bei der gemeinsamen Mahlzeit Einstein beweisen konnte, daß auch das von ihm vorgeschlagene Experiment nicht zu einer Umgehung der Unbestimmtheitsrelationen führen könnte. Einstein war dann etwas beunruhigt, aber schon am nächsten Morgen hatte er beim Frühstück ein neues Gedankenexperiment bereit, komplizierter als das Vorhergehende, das nun die Ungültigkeit der Unbestimmtheitsrelationen wirklich demonstrieren sollte. Diesem Versuch ging es freilich am Abend nicht besser als dem ersten, und nachdem dieses Spiel einige Tage fortgesetzt worden war, sagte

Einsteins Freund Paul Ehrenfest, Physiker aus Leyden in Holland: »Einstein, ich schäme mich für dich; denn du argumentierst gegen die neue Quantentheorie jetzt genauso, wie deine Gegner gegen die Relativitätstheorie.« Aber auch diese freundschaftliche Mahnung konnte Einstein nicht überzeugen.

Wieder wurde mir klar, wie unendlich schwer es ist, die Vorstellungen aufzugeben, die bisher für uns die Grundlage des Denkens und der wissenschaftlichen Arbeit gebildet haben. Einstein hatte seine Lebensarbeit daran gesetzt, jene objektive Welt der physikalischen Vorgänge zu erforschen, die dort draußen in Raum und Zeit, unabhängig von uns, nach festen Gesetzen abläuft. Die mathematischen Symbole der theoretischen Physik sollten diese objektive Welt abbilden und damit Voraussagen über ihr zukünftiges Verhalten ermöglichen. Nun wurde behauptet, daß es, wenn man bis zu den Atomen hinabsteigt, eine solche objektive Welt in Raum und Zeit gar nicht gibt und daß die mathematischen Symbole der theoretischen Physik nur das Mögliche, nicht das Faktische, abbilden. Einstein war nicht bereit, sich – wie er es empfand – den Boden unter den Füßen wegziehen zu lassen. Auch später im Leben, als die Quantentheorie längst zu einem festen Bestandteil der Physik geworden war, hat Einstein seinen Standpunkt nicht ändern können. Er wollte die Quantentheorie zwar als eine vorübergehende, aber nicht als endgültige Klärung der atomaren Erscheinungen gelten lassen. »Gott würfelt nicht«, das war ein Grundsatz, der für Einstein unerschütterlich feststand, an dem er nicht rütteln lassen wollte. Bohr konnte darauf nur antworten: »Aber es kann doch nicht unsere Aufgabe sein, Gott vorzuschreiben, wie Er die Welt regieren soll.«