CHIMIA

Volumen 7 Fasc. 8 1953 Pag. 169–188

DIRACS neue Äthertheorie

Bei den nachfolgenden Ausführungen stützen wir uns auf den von Prof. Dr. P. A. M. DIRAC, Cambridge, anläßlich der dritten, vom 29. Juni bis 3. Juli 1953 durchgeführten Tagung der Nobelpreisträger in Lindau gehaltenen Vortrag über «Quantenmechanik und der Äther».

Alte Äthertheorie

Der bei den Physikern des letzten Jahrhunderts allgemein verbreiteten Äthervorstellung stand die Theorie der Fernwirkung gegenüber, die eine die gegenseitige Entfernung überspringende, von den reagierenden Körpern aufeinander ausübende Kraft annahm. Über ihr Zustandekommen kümmerte man sich nicht, da die Formulierung der Kraftgesetze zur Beschreibung der damals bekannten Erscheinungen genügte. Die Vorstellung der Fernwirkung war aber niemals befriedigend, weil es unvernünftig erscheint, vorauszusetzen, daß ein Etwas an einem entfernten Ort eine unmittelbare Wirkung ausübe. Durch die Annahme der Existenz des Äthers als einer zusammenhängenden Form des Stoffes, der sich über den gesamten Raum erstreckt, kann man diese Schwierigkeit umgehen. Denn jedes Ätherteilchen würde nur benachbarte Teilchen beeinflussen, diese wieder ihre Nachbarn und so fort, bis eine ununterbrochene physikalische Wirkung entsteht. Diese Vorstellung wurde erhärtet durch die Feststellung, daß die von MAXWELL in allgemein gültige und exakte Form gebrachten Gesetze der Elektrizität und des Magnetismus nur Verbindungen zwischen elektrischen und magnetischen Kräften benachbarter Orte zulassen, so daß man sich elektrische und magnetische Kräfte sehr wohl als Spannungen im Äther vorstellen könnte.

Wenn der Äther wirklich existiert, so müßte er auch eine Geschwindigkeit besitzen, und die Physiker müßten diese Geschwindigkeit bestimmen oder – genauer gesagt – die Geschwindigkeit des Äthers im Verhältnis zur Erde oder umgekehrt die der Erde im Verhältnis zum Äther angeben können. Von den verschiedenen zu diesem Zwecke angestellten Experimenten war entscheidend der MICHELSON-MORLEY-Versuch. Doch eine Äthergeschwindigkeit ließ sich nicht feststellen. Die Experimente schienen zu zeigen, daß die Erde in ihrer Bewegung um die Sonne den Äther mit sich führt, aber dies war nicht in Übereinstimmung mit astronomischen Beobachtungen.

Zur Erklärung des Widerspruches nahmen LORENTZ und FITZGERALD an, daß jeder gegen den Äther bewegte Körper in der Richtung seiner Bewegung eine von der Größe der Geschwindigkeit abhängige Kontraktion erfahre, wodurch die Ergebnislosigkeit des MICHELSONschen Versuches verständlich wurde.

Relativitätsprinzip

EINSTEIN ist es dann gelungen, den Widerspruch von einem allgemeineren Gesichtspunkt aus zu lösen. Auf Grund seiner bekannten Relativitätstheorie müssen wir die von NEWTON gegebenen Gesetze der Mechanik ändern und sie durch eine ganze Reihe von Gesetzen, nämlich durch die relativistische Mechanik, ersetzen. Der Unterschied ist klein und unbedeutend, solange man es mit Körpern in langsamer Bewegung zu tun hat, gewinnt aber mehr und mehr an Bedeutung, je höher die Geschwindigkeiten werden, und wenn diese sich der Lichtgeschwindigkeit nähern, so sind die neuen Gesetze ganz anders geartet als die der NEWTONschen Mechanik. Trotz der tiefgreifenden Wandlung, die die Relativität in den bisher festgefügten wissenschaftlichen Vorstellungen herbeiführte, wurde sie bald von den Physikern allgemein anerkannt. Dafür sind zwei Ursachen von Bedeutung: 1. die Übereinstimmung mit dem Experiment und 2. die schöne mathematische Theorie, die ihr zugrunde liegt und die ihr rein gefühlsmäßig eine starke Anziehungskraft verleiht. Über diese zweite Ursache wird nicht viel gesprochen, aber nach der Auffassung DIRACS ist sie die wichtigere. Denn bei allen Wandlungen, denen physikalische Theorien heutzutage unterworfen sind, gibt es nur einen Felsen, der jedem Sturm standhält, und an dem man immer festhalten kann, nämlich die Annahme, daß die grundlegenden Gesetze der Natur mit einer großartigen mathematischen Theorie übereinstimmen. Damit ist eine Theorie gemeint, die auf so einfachen, sich aufs schönste ergänzenden mathematischen Begriffen beruht, daß es eine wahre Freude ist, damit zu arbeiten. Wenn daher ein theoretischer Physiker eine solche Theorie gefunden hat, so wird ihr meist großes Vertrauen entgegengebracht. Sollte sich ein Unterschied herausstellen zwischen den Behauptungen einer solchen Theorie und einem Ergebnis beim Experiment, so würde man als erstes einen Irrtum in den Versuchen vermuten und nur nach erschöpfenden experimentellen Nachprüfungen sich zu der Annahme bequemen, daß die Theorie einer Einschränkung bedarf, d. h. daß man eine Theorie mit einer noch breiteren mathematischen Basis suchen muß.

Wenn man die der Relativitätstheorie zugrunde liegende mathematische Schönheit voll erkennen will, muß man die Welt als in einen vierdimensionalen Raum eingebettet betrachten, in dem die Zeit die vierte Dimension darstellt. Die Schönheit besteht in der großen Symmetrie zwischen allen vier Dimensionen. Es gibt bestimmte Richtungen im vierdimensionalen Raum-Zeit-Gebilde, die besondere Eigenschaften aufweisen, nämlich die von Lichtstrahlen gekennzeichneten Richtungen. Diese von einem Punkt ausgehenden Richtungen bilden einen Kegel, den sogenannten Lichtkegel[1]. Die Hauptforderung der Relativität kann man am besten formulieren durch die Aussage, daß alle Richtungen innerhalb des Lichtkegels einander gleichwertig sind. Jede dieser Richtungen kann ebenso für die Richtung der Zeitachse genommen werden. Die LORENTZ-Transformation verbindet die eine Richtung mit der anderen. Außer der anziehenden mathematischen Fundierung hat die Relativität alle Nachprüfungen durch das Experiment gut bestanden, und daher ist sie fest begründet.

Wenn es einen Äther gibt, so ist seine Geschwindigkeit wahrscheinlich geringer als die Lichtgeschwindigkeit und setzt somit eine Richtung im Raum-Zeit-Gebilde innerhalb des Lichtkegels fest. Nach der Relativitätstheorie kann eine solche Richtung, die physikalische Erscheinungen beeinflußt, nicht bestehen. Daher kann die Äthergeschwindigkeit nicht auf physikalische Experimente einwirken, also auch nicht beobachtet werden. Was nicht beobachtet werden kann, sieht der Physiker als nicht bestehend an. Da demnach die Äthergeschwindigkeit als nicht bestehend gilt, so kann es einen Äther nicht geben. Durch diese Beweisführung schafft die Relativitätstheorie den Äther ab.

Mit der Aufgabe des Äthers müssen wir nicht notgedrungen zur Fernwirkung zurückkehren. Es sind Theorien denkbar, in denen die physikalische Wirkung rein örtlich ist und physikalische Wirkungen von Nachbar zu Nachbar fortlaufend weitergeleitet werden. Die Äthergeschwindigkeit (und damit der Äther) wird ausgeschlossen, weil sie eine Linie im Raum-Zeit-Gebilde festsetzt, und diese kann unmöglich verschwinden[2]. Mit solchen örtlichen Theorien, die in Anerkennung der Relativität einen Äther ausschließen, arbeiteten die Physiker in diesem Jahrhundert hauptsächlich.

Quantenmechanik und Unschärferelation

Eine weitere große Umwälzung in den grundlegenden physikalischen Anschauungen wurde durch die Quantentheorie hervorgerufen. Die gewöhnlichen Gesetze der Mechanik lassen sich nicht auf sehr kleine Körper anwenden, mit denen man es in der Welt der Atome zu tun hat und dies wurde zuerst durch PLANCK festgestellt. Auf PLANCKS Arbeit ist eine neue Mechanik aufgebaut worden, die im Jahre 1925 eine genaue Formulierung von HEISENBERG und SCHRÖDINGER erfuhr und Quantenmechanik genannt wird. Hier interessiert besonders HEISENBERGS Prinzip der elementaren Unschärfe. Nach diesem Prinzip kann ein Teilchen von sehr kleiner Masse nicht gleichzeitig einen bestimmten Ort und eine bestimmte Geschwindigkeit besitzen. Je exakter eine dieser Eigenschaften festgelegt wird, um so unbestimmter wird die andere, so daß das Produkt der beiden Unbestimmbarkeiten immer wenigstens gleich PLANCKS Konstanter, geteilt durch die Masse des Teilchens, ist. Es gibt keine Begrenzung für die Exaktheit, mit der eine Lage oder eine Geschwindigkeit gemessen werden kann, aber der Vorgang der Messung selbst bringt die notwendige Unbestimmbarkeit in die andere Eigenschaft, um dem Grundsatz Recht zu geben. Die Unschärferelation ist um so größer, je leichter das Teilchen ist. Bei schweren Körpern ist die Unbestimmbarkeit belanglos; deshalb bemerken wir sie nicht im täglichen Leben. Für die leichten Körper jedoch ist gemäß der Forderung der Quantenmechanik diese Unschärferelation wesentlich, so daß man nicht hoffen darf, sie durch Verfeinerung der experimentellen Methoden oder theoretische Entwicklungen zu beseitigen. Somit bekommt die Quantenmechanik nur eine statistische Auslegung, und das Ergebnis einer Berechnung ist dann nicht, daß ein bestimmtes Ereignis eintreten wird, sondern daß eine gewisse Wahrscheinlichkeit für sein Eintreten besteht. Für den Vergleich mit dem Experiment brauchen wir nichts als die statistischen Ergebnisse dieser Art. Es ist ein befriedigendes Merkmal der Theorie, daß sie nur solche Ergebnisse zeitigt, die sich mit dem Experiment vergleichen lassen.

Trotz dieser guten Eigenschaft ist die Unschärferelation eine ziemlich gekünstelte Begrenzung in der Anwendung der Begriffe von Ort und Geschwindigkeit. Es liegt ihr jedoch eine gute mathematische Theorie zugrunde. Die Schönheit der Theorie und die Übereinstimmung ihrer Ergebnisse mit dem Experiment bei einer großen Anzahl von Versuchen haben ihr die allgemeine Anerkennung der Physiker gesichert. Es tritt noch eine weitere Schwierigkeit auf, nämlich in der Frage, ob die Unschärferelation sich auf die physikalische Wirklichkeit selbst oder auf unsere Kenntnis von der physikalischen Wirklichkeit bezieht. EINSTEIN hat auf dieses Dilemma hingewiesen. Zurzeit kann man diese Frage nicht befriedigend beantworten, da es den Anschein hat, als müsse man bei der Beschreibung verschiedener physikalischer Vorgänge durch die Quantenmechanik bald die eine, bald die andere Ansicht vertreten, je nach Lage der Dinge. Aber diese Schwierigkeit macht dem Physiker nicht viel zu schaffen, weil sie keine Doppelsinnigkeit in die mit der Quantenmechanik ausgeführten Berechnungen oder in die Auslegung ihrer Ergebnisse hineinbringt. Alles, was der

[1] Wenn man sich dies vorstellen will, so läßt man am besten eine der Raumdimensionen aus.

[2] Die wirksamen Kräfte müssen für die Bedingung eines vollständig luftleeren Raumes verschwinden.

Physiker von dieser Theorie wirklich verlangt, ist eine bestimmte Reihe von Regeln, die ihm gestatten, mit dem Experiment vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, und das tut die Quantenmechanik auf alle Fälle.

Das Beispiel des Wasserstoffatoms

Zur Erläuterung der Folgen, die die Quantenmechanik bei der Behandlung leichter Körper mit sich bringt, betrachten wir nach DIRAC das Wasserstoffatom. Es besteht aus einem Proton und einem Elektron, die in Wechselwirkung zueinander stehen. Der Spin des Protons und des Elektrons wird, als für die folgenden Überlegungen DIRACS belanglos, nicht berücksichtigt. Das Proton ist ein verhältnismäßig schweres Teilchen, für welches die Unschärferelationen vernachlässigt werden dürfen. So möge denn die Annahme erlaubt sein, das Proton befände sich in Ruhe an einem bestimmten Punkt. Dann wird das Elektron um diesen Punkt herum in Bewegung sein. Das Elektron ist ein wesentlich leichteres Teilchen, und für dieses dürfen wir die Unschärferelationen nicht unbeachtet lassen. Das heißt, wir dürfen uns nicht vorstellen, das Elektron bewege sich in einer bestimmten Bahn, wie ein Planet um die Sonne, denn dann müßte es eine bestimmte Lage und eine bestimmte Geschwindigkeit zu einer bestimmten Zeit haben. Am besten können wir es uns als eine Art Wolke um das Proton herum vorstellen. So können wir sagen, daß wir das Elektron an irgendeinem gegebenen Ort nahe am Proton finden, wenn wir durch ein Experiment die Lage des Elektrons feststellen wollen. Diese Wahrscheinlichkeit könnten wir uns bildlich vorstellen als «Dichte» einer Wolke. Diese zu berechnen, wird durch die Theorie ermöglicht, wenn der physikalische Zustand des Wasserstoffatoms gegeben ist. Auf ähnliche Weise können wir von der Wahrscheinlichkeit sprechen, daß das Elektron eine bestimmte Geschwindigkeit oder einen gegebenen Wert für eine Komponente seines Winkelmoments oder irgendeine andere Bewegungsveränderliche hätte. Alle diese Wahrscheinlichkeiten lassen sich durch geeignete Experimente beobachten und können nach der Theorie berechnet werden. Nun kann es sein, daß die Wolke sphärisch ist mit dem Proton als Mittelpunkt, so daß man das Elektron mit gleicher Wahrscheinlichkeit in irgendeiner Richtung vom Proton aus beobachten kann. Dann ist das Wasserstoffatom in einem sphärisch symmetrischen Zustand, und man kann es sich rund wie eine Billardkugel vorstellen. Jedweder Versuch, den man mit ihm anstellen kann, ohne den Spin des Protons oder des Elektrons in Betracht zu ziehen, wird sphärisch symmetrische Wahrscheinlichkeiten als Ergebnis aufweisen.

Der stabilste Zustand des Wasserstoffatoms, zugleich auch sein normaler, ist gerade solch ein Zustand. Man kann das Atom in seiner Symmetrie stören, aber wenn man es wieder sich selbst überläßt, springt es bald in seinen normalen sphärischen Zustand zurück. Das Wasserstoffatom ist daher wie eine Billardkugel aus einem Material, das man leicht aus der Form bringen kann. Sobald man sie aber sich selbst überläßt, springt sie in ihre normale runde Form zurück. Die Schlußfolgerung ist überraschend. Vom Standpunkt der klassischen Mechanik würde ein Wasserstoffatom in sphärischer Form, bestehend aus einem Proton mit einem sich um dieses herum bewegenden Elektron, unvorstellbar sein. Aber nach der Quantenmechanik ist es sehr wohl möglich. Die Wandlung wird durch das Unbestimmbarkeitsgesetz in Verbindung mit der statistischen Auslegung der Theorie herbeigeführt. Es ist ein allgemeines Merkmal der Quantenmechanik, daß sie Symmetriemöglichkeiten zuläßt, die in der klassischen Mechanik unvorstellbar sind.

Quantenmechanik und Relativität

Im Anfang wurde die Quantenmechanik in erster Linie als eine nicht relativistische Theorie aufgebaut, die sich in ihren grundlegenden Gleichungen auf eine absolute Zeit bezog. Sie hatte einen wunderbaren Erfolg, soweit sie sich mit gewöhnlichen physikalischen und chemischen Erscheinungen beschäftigte. Sobald man sie jedoch auf sich sehr schnell bewegende Teilchen, deren Geschwindigkeit sich der Lichtgeschwindigkeit nähert, anwenden wollte, traten Schwierigkeiten auf. Es wurde nötig, die Quantenmechanik mit der relativistischen Mechanik zu verbinden. Aber es stellte sich heraus, daß die beiden Arten der Mechanik, die jede für ihr besonderes Gebiet aufgestellt worden waren, sich nicht auf so natürliche Weise verbinden ließen, daß man eine für die Überschneidung der beiden Gebiete anwendbare Mechanik erhalten hätte. Die Ursache dieser Schwierigkeit ist prinzipiell. Zur mathematischen Darstellung der Quantenmechanik wird eine absolute Zeitveränderliche benötigt, und diese absolute Zeit wird gerade von der Relativität abgelehnt. Zur Überwindung dieser Schwierigkeit erweiterte man die Quantenmechanik zur sogenannten Quantenfeldtheorie, die in der Tat eine außerordentlich große Zahl von Zeitvariablen aufweist, die so gewählt werden können, daß sie sich der Relativität anpassen. Dieser Fortschritt wurde nur auf Kosten der mathematischen Übersichtlichkeit erzielt und führte bald zu weiteren Schwierigkeiten. Denn in dieser Theorie erscheinen Teilchen als singuläre Punkte im Feld und ziehen Singularitäten nach sich, durch welche in den Berechnungsergebnissen oft unendliche Zahlen auftreten. Deshalb geben die Berechnungen überhaupt keine vernünftigen Antworten. Erst in den letzten Jahren wurden Fortschritte erzielt (z. B. LAMBsche Wasserstoffspektrallinienverschiebung und magnetisches Moment des Elektrons), die jedoch nur beschränkte Gültigkeit haben, und die Anwendung auf Mesonen blieb ohne jeden Erfolg. Deshalb wird die Richtigkeit des ganzen Aufbaus der Quantenfeldtheorie mit ihrer Technik zur Beseitigung der unendlichen Zahlen angezweifelt.

Vor der Entdeckung der Quantenmechanik hatte BOHR für die Bahnen der Elektronen in Atomen eine Theorie aufgestellt, die sich in einfachen Fällen sehr gut anwenden ließ, aber in komplizierteren versagte. Sie stellte eine wertvolle Vorstufe zur Quantenmechanik dar, durch die sie schließlich verdrängt wurde. DIRAC betrachtet die jetzige Quantenfeldtheorie als Analogon zu BOHRS Theorie; auch erstere ist nur eine Vorstufe zu irgendeiner zukünftigen Theorie, die die Quantenfeldtheorie verdrängen dürfte. Diese Annahme wird gestützt durch die Erwägung, daß die gegenwärtige Theorie kompliziert und unschön ist. Sie hat durchaus nicht die Eigenschaften einer guten physikalischen Theorie. Diese Eigenschaften enthält in bemerkenswertem Ausmaß die relativistische Mechanik allein, oder die Quantenmechanik allein, aber Schönheit und Einfachheit verschwinden durch unsere derzeitigen Methoden, die beiden Theorien zu verbinden.

Neue Vorstellung vom Äther

Mit diesen Feststellungen kehren wir zum Äther zurück. Als die Relativitätstheorie aufkam, mußten wir den Äther verwerfen wegen einer von den Rücksichten auf Symmetrie abhängenden Schlußfolgerung. Aber da die Quantenmechanik die Symmetriemöglichkeiten ändert, muß die Frage nun überprüft werden. Falls der Äther existiert, muß er eine sehr leichte und zarte Form von Materie sein, sonst würde er auf zu deutliche Weise sichtbar werden. Da er sehr leicht ist, muß der Äther stark dem Unbestimmbarkeitsgesetz unterliegen. Wir dürfen uns nicht vorstellen, daß ein Ätherteilchen einen bestimmten Ort und eine bestimmte Geschwindigkeit hätte, wie wir es vom Proton im Wasserstoffatom annahmen, sondern müssen ihn als ein nebelhaftes Gebilde betrachten, wie das Elektron. Die Geschwindigkeit des Äthers wird keinen irgendwie bestimmten Wert, sondern nach dem Wahrscheinlichkeitsgesetz den einen oder anderen von mehreren möglichen Werten haben. Der frühere Einwand gegen den Äther, daß eine bestimmte Äthergeschwindigkeit mit der Relativität unvereinbar und nicht in Übereinstimmung mit der Beobachtung sei, verliert damit seine Gültigkeit. Zurzeit wissen wir nicht genug über den Äther, um die ihn beherrschenden Unbestimmtheitsrelationen in präziser mathematischer Form auszudrücken. Dies ist nötig, wenn wir das Wahrscheinlichkeitsgesetz für Äthergeschwindigkeit mit dem Wahrscheinlichkeitsgesetz für andere physikalische Mengen verbinden wollen. Jede Diskussion muß daher auf Allgemeinheiten beschränkt bleiben. Jedenfalls scheint sicher zu sein, daß die Äthergeschwindigkeit immer geringer als (oder möglicherweise in einem extremen Fall gleich wie) die Lichtgeschwindigkeit ist, da die Relativitätstheorie nicht zulassen würde, daß irgendeine Form von Materie sich schneller bewegt als das Licht.

Die Richtung im Raum-Zeit-Gebilde, die der Äthergeschwindigkeit entspricht, muß mit gleicher Wahrscheinlichkeit irgendwo im Lichtkegel sich befinden. Solch ein Zustand des Äthers gibt irgendeiner Richtung im Raum-Zeit-Gebilde innerhalb des Lichtkegels keinen besonderen Vorzug. Er führt eine Symmetrie ein, ähnlich der sphärischen des Wasserstoffatoms, die ohne Quantenmechanik undenkbar ist. Dieser Zustand des Äthers, der zugleich die völlige Abwesenheit von gewöhnlicher Materie darstellt, kann sehr wohl die Bedingungen erfüllen, die die Physiker ein vollkommenes Vakuum nennen. Und so kann das Bestehen eines Äthers in völlige Harmonie mit der Relativitätstheorie gebracht werden.

Ein Punkt bedarf noch der weiteren Erörterung. Wenn man beim gewöhnlichen Raum davon spricht, daß alle Richtungen gleich wahrscheinlich sind, so ist man sich ganz klar, was damit gemeint ist. Aber im vierdimensionalen Raum-Zeit-Gebilde der Relativitätstheorie ist es erst dann klar, wenn man einen Maßstab festgelegt hat für die Ausdehnung einer Nachbarschaft von Richtungen gegenüber einer besonderen Richtung, entsprechend dem wirklichen Winkel im gewöhnlichen Raum. Die der Relativitätstheorie zugrunde liegende Mathematik liefert uns einen solchen Maßstab, aber sie weist den Richtungsnachbarschaften in der Nähe des Lichtkegels eine sehr große Ausdehnung zu, derart, daß die Gesamtausdehnung aller sich nicht überschneidenden Richtungsnachbarschaften innerhalb des Lichtkegels unendlich ist. Wenn also alle Richtungen innerhalb des Lichtkegels gleich wahrscheinlich sind, so folgt daraus, daß die Wahrscheinlichkeit, daß eine Richtung in einer besonderen Nachbarschaft liegt, außerordentlich klein ist. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung, nach welcher eine Richtung mit gleicher Wahrscheinlichkeit irgendwo innerhalb des Lichtkegels sein kann, besteht somit nicht. Wir können uns jedoch einer solchen Verteilung nähern und können ihr unbegrenzt allmählich immer näher kommen. Nach der neuen Theorie vom Äther dürfte der Zustand des völligen Vakuums nicht existieren, aber wir können uns dem völligen Vakuum nähern und ihm unbegrenzt immer etwas näher kommen.

Die Unerreichbarkeit des vollständigen Vakuums ist alles, was von dem alten Konflikt zwischen dem Äther und der Relativität übrigbleibt. Aus Gründen des Experimentes scheint es keinen Einwand dagegen zu geben. Es wird einer beträchtlichen Änderung in der heute angewandten mathematischen Methode bedürfen, da die Quantenfeldtheoretiker immer den Vakuumzustand als Ausgangspunkt nehmen und dann erst die Abweichung davon studieren.

Die absolute Zeit

Nachdem man so weit gegangen ist und entgegen der allgemeinen Forderung der Relativität einen Äther annimmt, darf man noch einen Schritt weitergehen. Ehe

die Quantelung auf den Äther angewendet wird, kann man die Äthergeschwindigkeit benützen, um eine Definition der örtlichen Gleichzeitigkeit zu geben. Zwei im Raum-Zeit-Gebilde nahe beieinander liegende Punkte werden im absoluten Sinne als zusammenfallend definiert, wenn sie für einen Beobachter zusammenfallen, dessen Geschwindigkeit mit der Äthergeschwindigkeit in jener Nachbarschaft übereinstimmt. Nun kann es sein, daß das so bezeichnete örtliche Zusammenfallen vervollständigt werden und eine wohldefinierte Bedeutung für das Zusammenfallen von zwei Punkten geben kann, wenn sie nicht nahe beinander liegen. Dies wird der Fall sein, sobald die Äthergeschwindigkeiten an verschiedenen Punkten gewisse Bedingungen erfüllen. Wir können dann eine absolute Zeit einführen, die denselben Wert hat für beliebige zwei Punkte, die in der oben beschriebenen Art und Weise zusammenfallen. Die Begriffe von der absoluten Gleichzeitigkeit und von der absoluten Zeit sind von der Relativität verworfen worden, genau so wie die Vorstellung von einem Äther, aber wieder rettet die Quantenmechanik die Situation. Bei der Anwendung der Quantenmechanik wird das Unbestimmbarkeitsgesetz uns davor bewahren, daß wir einen bestimmten Punkt im Raum-Zeit-Gebilde als zusammenfallend mit einem anderen annehmen, sondern wir werden nur die Wahrscheinlichkeit des Zusammenfallens mit einem anderen gelten lassen. Wir können auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung so vornehmen, daß das vollständige Vakuum ein Zustand ist, der alle Richtungen innerhalb des Lichtkegels auf derselben Basis behandelt, und wir finden wieder, daß das völlige Vakuum unerreichbar ist, aber daß wir uns ihm beliebig nähern können.

Die Unschärferelationen löschen die Vorstellung von einer absoluten Zeit in der Besprechung eines gegebenen physikalischen Zustandes aus. Aber die absolute Zeit bleibt eine präzise mathematische Veränderliche, die wir in der Formulierung der Bewegungsgleichungen anwenden können. Dann bringt sie große Vorteile mit sich. Sie gibt der relativistischen Quantenmechanik die ihr eigene Einfachheit zurück, die ein solch befriedigender Zug der nicht relativistischen Quantenmechanik ist, und wir können damit die große Kompliziertheit der Quantenfeldtheorie vermeiden. Das macht die Vorstellung von einer absoluten Zeit sehr anziehend.

Abschließend betonte DIRAC, daß die vorliegende Darlegung weder das Bestehen eines Äthers noch das einer absoluten Zeit beweist. Sie beweist nur, daß diese Begriffe nicht unvereinbar mit der Relativität sind, wenn man sie in einer Fassung der Quantenmechanik anwendet, und daß es keine unbedingte Ursache für ihre Ablehnung gibt. Ob sie in der Natur tatsächlich existieren oder nicht, ist eine andere Frage. DIRAC glaubt nicht, daß sie durch irgendeine allgemeine philosophische Beweisführung beantwortet werden kann. Man kann sie nur durch eingehende mathematische Forschung entscheiden und dann sehen, ob man eine bessere Naturbeschreibung mit oder ohne einen Äther erhält.

Lange Zeit hindurch ist die einen Äther ausschließende physikalische Theorie entwickelt worden und hatte großen Erfolg. Man wird eine ebenso verständliche Theorie für das Bestehen des Äthers entwickeln und einen noch größeren Erfolg erringen müssen, damit diese Existenz als erwiesen angesehen werden kann. Der Äther steht und fällt mit einer solchen wissenschaftlichen Untersuchung. DIRAC ist nicht unbedingt für den Äther eingenommen und würde gerne jede Vorstellung von einem Äther aufgeben, wenn eine befriedigende Theorie für sein Nichtbestehen gefunden werden könnte. Da jedoch die Physiker in aller Welt, trotz vieler Jahre intensiver Forschung, eine solche Theorie noch nicht zu finden vermochten, sieht sich DIRAC zu der Annahme veranlaßt, daß die ätherlose Basis der physikalischen Theorie das Ende ihrer Gültigkeit erreicht haben könnte und in der Anerkennung der Existenz des Äthers neue Möglichkeiten entstehen.

H. MOHLER