

- Christa Meves, Bibelsprache als Gesundheitssprache. In: Medizin u. Theologie. Landeszentrale f. Gesundheitsbildung in Bayern. München 1978.
- K. M. Michel, Kasuistik – die Tugend der Sünde. Kursbuch 60. 1980.
- A. Plack, Die Gesellschaft und das Böse. München 1970.
- R. H. Rahe, Life change measurements as a predictor of illness. Proc. Roy. Soc. Med. 61. 1124 (1968).
- Karl Rahner/Herbert Vorgrimler, Kleines Konzilskompendium. Freiburg 1966.
- H. Rehder, Wunderheilungen ( Ein Experiment). Stuttgart 1955, S. 577.
- J. Rudin (Hrsg.), Neurose u. Religion. Olten/Freiburg 1964.
- Hans Schaefer, Gesichtspunkte der Naturforschung. In: H. J. Schultz, l. c.
- Hans Schaefer, Die Hierarchie der Risikofaktoren. Mensch, Medizin, Gesellschaft 1. 141 (1976).
- Hans Schaefer, Kind, Familie, Gesellschaft. In: Sitzungsber. Heidelberger Akad. Wiss. Math.-naturw. Kl. 1977, 1. Abh.
- Hans Schaefer, Plädoyer für eine neue Medizin. München 1979.
- Hans Schaefer/M. Blohmke, Herzkrank durch psychosozialen Streß. Heidelberg 1977.
- Max Scheler, Die Stellung des Menschen im Kosmos. München 1947.
- Heinrich Schipperges, Die Entwicklung der »Cura« im Verständnis der therapeutischen Dienste. In: Mayer-Scheu/R. Kautzky (Hrsg.) Vom Behandeln zum Heilen. Freiburg/Göttingen 1980.
- F. L. Schleyer, Die Heilungen von Lourdes. Bonn 1949.
- H. J. Schultz (Hrsg.), Wer ist das eigentlich – Gott? München 1969.
- W. v. Siebenthal, Krankheit als Folge der Sünde. Hannover 1950.
- D. Stollberg, Seelsorge in der Offensive. Wege zum Menschen. 27 (7) 268 (1975).
- K. D. Stumpfe, Der psychogene Tod. Stuttgart 1973.

## Wandlungen unserer physikalischen Weltansicht in den letzten drei Jahrzehnten

*Von Wolfgang Wild*

Das erste Drittel des 20. Jahrhunderts war in der Physik eine Zeit tiefgreifender Umbrüche. Insbesondere durch die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik wurden einige der fundamentalsten Begriffe der Naturbeschreibung, wie Raum, Zeit, Materie, Kausalität, einer radikalen Veränderung und Neuinterpretation unterworfen. Die Jahrzehnte nach dem Zweiten Weltkrieg bieten demgegenüber ein ganz anderes Bild. Sie haben uns Antworten – oder sagen wir lieber vorsichtiger Teilantworten – auf einige der ältesten Fragen des Menschen an die Natur gebracht, nämlich

1. Welches sind die Urbausteine der Materie?
2. Wie ist das Universum entstanden?
3. Wie konnte es zur Entstehung des Lebens kommen?

Antworten, die unvergleichlich detaillierter und besser begründet sind als die vagen

Hypothesen früherer Zeiten. Diese Antworten aber halten sich in dem Denkraumen, der durch Relativitätstheorie und Quantenmechanik gesetzt worden ist, sie ergeben sich – in Verbindung mit neuen Erfahrungsstatsachen – aus der konsequenten Weiterentwicklung der in jenen Theorien enthaltenen Grundeinsichten.

Wenn wir also die Erkenntnisfortschritte der letzten drei Jahrzehnte richtig verstehen und würdigen wollen, so müssen wir den viel tiefer greifenden Umbruch der vorangehenden Jahrzehnte mit in unsere Betrachtung einbeziehen. Wir wollen deshalb mit einem kurzen Rückblick auf die wichtigsten Ergebnisse von Relativitätstheorie und Quantenmechanik beginnen.

Im Jahre 1905 zog Albert Einstein aus dem Ergebnis des Michelson Morley-Versuches, wonach die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes parallel und senkrecht zur Bewegung der Erde um die Sonne genau dieselbe ist, die Konsequenz, daß die Zeit keine absolute Größe ist, sondern vom Bewegungszustand des Beobachters abhängt, der die Zeit mißt. Daraus ergeben sich nun eine Fülle von Folgerungen, die dem sogenannten gesunden Menschenverstand absurd erscheinen, wie z. B. das berühmte Zwillingsparadoxon, wonach ein Raumfahrer langsamer altert als sein auf der Reede zurückbleibender Zwillingsbruder. Die für die Physik folgenreichsten Konsequenzen waren einerseits die Äquivalenz von Energie und Masse – zum Ausdruck gebracht in der berühmten Formel  $E = mc^2$  –, andererseits die Ablösung der durch Jahrhunderte bewährten Newtonschen Mechanik durch die relativistische Mechanik Einsteins. In den Jahren 1915/16 erweiterte Albert Einstein seine Spezielle Relativitätstheorie zu einer Allgemeinen Relativitätstheorie. Ihr wichtigster Inhalt war die Zurückführung der Gravitation auf eine durch die Anwesenheit von Materie bedingte Krümmung des vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuums. Einstein konnte dadurch das alte Newtonsche Gravitationsgesetz tiefer begründen und zugleich kleinere Korrekturen herleiten, die z. B. die beobachtete Periheldrehung der Bahn des Planeten Merkur zwanglos erklärten.

Durch Einsteins Relativitätstheorie verloren Raum und Zeit ihren Charakter als absolute Anschauungskategorien unserer Vernunft und wurden zu Bestandteilen der Physik. Ob der Raum euklidisch ist (d. h. die Winkelsumme im Dreieck  $180^\circ$  beträgt) oder gekrümmt (mit einer Winkelsumme im Dreieck, die größer oder kleiner als  $180^\circ$  sein kann), wird durch die Massenverteilung im Universum bestimmt und ist nicht – wie bei Kant – eine Einsicht *a priori*, die aller Erfahrung vorangeht.

Noch radikaler als die Relativitätstheorie revolutionierte die Quantenmechanik das Weltbild der Physik. Sie wurde im Jahre 1925 unabhängig voneinander durch Werner Heisenberg in der Form der Matrizenmechanik und durch Erwin Schrödinger in Form der Wellenmechanik geschaffen. Es zeigte sich bald, daß beide Formen trotz ihrer unterschiedlichen mathematischen Formulierung physikalisch äquivalent sind. Den physikalischen Kern der Quantenmechanik, die wenig anschaulich ist und deren Gehalt sich eigentlich erst in der praktischen Handhabung voll erschließt, möchte ich folgendermaßen charakterisieren: Während in der klassischen Physik die Materie aus genau lokalisierbaren Teilchen besteht, die wohldefinierte Bahnen im Raum beschreiben, das Licht aber ein räumlich ausgedehntes Wellenfeld ist, haben nach der Quantenmechanik Licht und Materie sowohl Teilchen- als auch Wellenaspekte. Licht und Materie aktualisieren sich beim Nachweis, z. B. im Zählrohr oder im Szintillationszähler, als streng lokalisierte Objekte, d. h. als Teilchen. Die Ausbreitung von Licht und Materie

aber genügt den Gesetzmäßigkeiten von Wellenfeldern und zeigt die Erscheinungen der Beugung und Interferenz. Der Grund für diesen Welle-Teilchen-Dualismus liegt in der erstmals im Jahre 1927 von Heisenberg formulierten Unschärferelation: Jede Beobachtung und jede Präparation eines physikalischen Systems bedeutet einen Eingriff, der das System stört. Diese Störung kann nicht unter eine bestimmte Grenze heruntergedrückt werden, welche durch das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  bestimmt wird. Dieses Plancksche Wirkungsquantum  $h$  hat den Zahlenwert  $6.6 \times 10^{-34}$  Joulesec und ist damit sehr klein, aber endlich. Mikroskopisch kleine Systeme können wir deshalb nie so genau präparieren bzw. beobachten, daß wir über Einzelereignisse präzise Vorhersagen machen können. Die Gesetze im Bereich des mikroskopisch Kleinen müssen also notwendig Wahrscheinlichkeitsgesetze sein. Es wäre darum nicht sinnvoll, zu sagen, daß z. B. ein Elektron sowohl Welle (und somit ausgedehnt) als auch Teilchen (und damit punktförmig) »ist«; man sollte vielmehr die Schrödingersche Wellenfunktion  $\Psi$ , die man in der Quantenmechanik berechnet, nur interpretieren als Maß für die Wahrscheinlichkeit, daß sich ein Elektron an einem bestimmten Punkt zu einer bestimmten Zeit aktualisiert.

Die Quantenmechanik markiert einen radikalen Umbruch der Naturwissenschaft, denn die Natur ist ihr zufolge nicht mehr objektivierbar. Der Beobachtungsakt selbst wird unverzichtbarer Bestandteil der Naturbeschreibung, und wegen der unvermeidbaren Störung des beobachteten Systems durch die Beobachtung verbietet sich ein vollständiges Erfassen des Naturgeschehens; nur noch Wahrscheinlichkeitsaussagen sind möglich, das Einzelereignis bleibt auch bei bestmöglicher Kenntnis und Präparation des untersuchten Gegenstandes unvorhersehbar und indeterminiert. Um diesen Preis aber eröffnete die Quantenmechanik faszinierende Perspektiven: Nicht nur die physikalischen Eigenschaften materieller Körper wie Elastizitätseigenschaften, Leitfähigkeit, Magnetisierbarkeit usw. ließen sich atomar deuten, sondern auch die chemischen Eigenschaften, wie sie z. B. im periodischen System der Elemente ihren Niederschlag finden.

Nach einem Rückblick auf die Theorien, welche uns das Rüstzeug geliefert haben, mit dem wir heute in der Physik arbeiten, wollen wir nunmehr die wichtigsten Resultate besprechen, die in den Jahrzehnten seit dem Zweiten Weltkrieg erzielt worden sind. Wenn wir nicht die praktische Anwendbarkeit, sondern die Einsicht in die Grundgesetze des Naturgeschehens als Qualitätskriterium verwenden, so stammen die bedeutendsten Resultate aus den Bereichen der Elementarteilchen-, der Astro- und der Biophysik, und sie bestehen in den neuartigen Antworten auf die drei schon erwähnten Fragen nach den Urbausteinen der Materie, nach der Entstehung des Universums und nach der Entwicklung des Lebens aus unbelebter Materie.

Zunächst die Frage nach den Urbausteinen der Materie. Im Verlauf des 19. Jahrhunderts hatte die Physik und vor allem die Chemie auf diese Frage eine präzise und wohlfundierte Antwort gefunden: Urbausteine der Welt sind die Atome. Die Atome sind unteilbar und unveränderlich; es gibt von ihnen so viele unterschiedliche Sorten, wie es chemische Elemente gibt, also etwa hundert. Die stürmische Entwicklung der Atomphysik im ersten Drittel unseres Jahrhunderts führte zu einer gänzlich anderen und weit befriedigenderen Antwort. Danach sind die Urbausteine der Materie die drei Elementarteilchen Elektron, Proton und Neutron. Die Atome sind nicht unstrukturierte Materieklumpen, sondern bestehen aus einem Kern und einer Hülle.

Der Kern ist aufgebaut aus den positiv geladenen Protonen und den annähernd gleich schweren elektrisch neutralen Neutronen; er vereinigt fast die gesamte Masse des Atoms in sich, sein Durchmesser ist aber etwa tausendmal kleiner als der Atomdurchmesser. Die Atomhülle besteht aus den negativ geladenen Elektronen, die etwa zweitausendmal leichter sind als die Protonen oder Neutronen; die Hülle eines Atoms enthält ebenso viele Elektronen wie der Kern Protonen, so daß das Atom als Ganzes elektrisch neutral ist. Die Zahl  $Z$  der Elektronen in der Hülle (bzw. der Protonen im Kern) ist charakteristisch für ein bestimmtes chemisches Element, sie beträgt z. B. beim Wasserstoff  $Z = 1$ , beim Uran  $Z = 92$ .

Die Bindung der Elektronen an den Kern und die Wechselwirkung der Elektronen untereinander erfolgt durch elektromagnetische Kräfte. Eine bis heute bewährte Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkungen wurde schon um das Jahr 1864 von James Clark Maxwell aufgestellt: diese Theorie wurde im Jahre 1926 von Paul Dirac durch den Einbau von Quanteneffekten zur sogenannten Quantenelektrodynamik (abgekürzt QED) weiterentwickelt. Träger der elektromagnetischen Kraftwirkungen ist in dieser Theorie das Lichtquant oder Photon.

Die Brauchbarkeit der Quantenelektrodynamik war zunächst dadurch beeinträchtigt, daß sie unsinnige divergente Bestandteile enthält. — Um das Jahr 1948 gelang es aber, diese Divergenzen durch wohldefinierte Regeln, die sogenannten »Renormierungsvorschriften«, zu beseitigen. Seit diesem Erkenntnisdurchbruch, den wir insbesondere Richard Feynman und Julius Schwinger verdanken, befindet sich die Quantenelektrodynamik in perfekter Übereinstimmung mit dem Experiment. Die Vorgänge in der Atomhülle können daher heute als wohlverstanden gelten; da alle physikalischen Materialeigenschaften und auch alle chemischen Eigenschaften durch Vorgänge in der Atomhülle bestimmt werden, kennen wir also auch deren Gesetzmäßigkeiten sehr gut, obwohl es oft höchst kompliziert ist, die konkreten Befunde aus den Grundprinzipien abzuleiten.

Im Gegensatz zur Physik der Atomhülle befindet sich die Physik des Atomkerns noch in einem recht unbefriedigenden Zustand. Die Protonen und Neutronen werden im Kern durch Kräfte zusammengehalten, die einerseits sehr stark, andererseits sehr kurzreichweitig sind. Sie wirken nur über eine Distanz von etwa  $2 \times 10^{-12}$  m und machen sich daher in der makroskopischen Physik überhaupt nicht bemerkbar. Um ein Proton oder Neutron aus dem Kernverband zu lösen, benötigt man jedoch eine Energie, die rund eine Million mal größer ist als die Energie, die man zur Abtrennung eines Elektrons aus dem Verband der Atomhülle braucht, was die Stärke der Kernkräfte veranschaulicht. Trotz intensiver Bemühungen ist es lange Zeit nicht gelungen, für die zwischen Protonen und Neutronen wirksamen Kernkräfte eine befriedigende Theorie als Gegenstück zu der Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkungen zu entwickeln. Seit wenigen Jahren glauben wir, den Grund für diesen Mißerfolg zu kennen: Die zwischen Proton und Neutron wirksamen Kernkräfte sind gar keine fundamentale Wechselwirkung der Natur, sondern ein sehr kompliziertes Sekundärphänomen.

Wie konnte es zu dieser Einsicht kommen?

Im Verlauf der letzten zwei Jahrzehnte hat sich deutlicher und immer deutlicher herausgestellt, daß das Proton und das Neutron — im Gegensatz zum Elektron — nicht den Anspruch erheben können, als echte Elementarteilchen angesehen zu werden. Zu dieser Erkenntnis haben insbesondere Versuche beigetragen, bei denen extrem hoch-

energetische Elektronen an Protonen und Neutronen gestreut wurden. Zur Beschleunigung der Elektronen hat man riesige Anlagen gebaut, so insbesondere den fast 4 km langen Linearbeschleuniger SLAC in Stanford (Kalifornien). Solche Beschleuniger sind im Grunde nichts anderes als Mikroskope, deren Auflösungsvermögen so groß ist, daß man Strukturen mit einer räumlichen Ausdehnung von etwa  $10^{-17}$  m noch erkennen kann. Bei den erwähnten Streuversuchen hat sich bis heute das Elektron als ein punktförmiges Gebilde erwiesen; wenn es überhaupt eine Ausdehnung besitzt, so ist diese kleiner als  $10^{-17}$  m. Demgegenüber sind Proton und Neutron ausgedehnt und haben einen Radius von etwa  $0.8 \times 10^{-15}$  m.

Vor allem aber sind Proton und Neutron keineswegs homogen, sondern bestehen aus drei kleineren Untereinheiten. Diese erwiesen sich bei fortschreitender Verfeinerung der Messungen mehr und mehr als identisch mit den sog. Quarks, deren Existenz schon im Jahre 1964 von Murray Gell-Mann und George Zweig hypothetisch gefordert worden war. Das Proton besteht aus zwei sogenannten u-Quarks mit der elektrischen Ladung von jeweils  $+\frac{2}{3}e$  und einem d-Quark mit der Ladung  $-\frac{1}{3}e$ , das Neutron dagegen aus zwei d-Quarks und einem u-Quark.

So vielfältig und unzweideutig die Hinweise auf die Existenz der Quarks im Inneren von Proton und Neutron sind, es ist bisher niemals gelungen, Quarks aus dem Verband von Proton oder Neutron herauszuschlagen und als isolierte Teilchen nachzuweisen. Für diesen Umstand macht man heute eine superstarke Wechselwirkung verantwortlich, die zwischen den Quarks herrschen soll. Diese Wechselwirkung hat eine ähnliche Struktur wie die elektromagnetische Wechselwirkung. Die elektrischen Kräfte wirken zwischen Objekten, die elektrische Ladung tragen. Analog glaubt man, daß die superstarken Kräfte zwischen den Quarks herrschen, weil die Quarks eine neue Art von Ladung tragen, die man Farbladung nennt. Das Analogon zum Photon als Träger der elektromagnetischen Wechselwirkung ist bei der superstarken Wechselwirkung zwischen den Quarks ein sogenanntes »Leimteilchen«, das Gluon. Man nennt diese neue Theorie der superstarken Wechselwirkung, die große Ähnlichkeiten mit der Quantenelektrodynamik (QED) aufweist, »Quantenchromodynamik« (QCD). Obwohl sicherlich das letzte Wort noch nicht gesprochen ist, so berechtigen die bisherigen Erfolge zu der Hoffnung, daß die Quantenchromodynamik entweder bereits die richtige Theorie der Struktur von Proton und Neutron ist oder doch zumindest der korrekten Theorie relativ nahekommt.

Im Rahmen der Quantenchromodynamik versteht man aber nicht nur den Aufbau von Neutron und Proton aus Quarks, sondern auch die für den Zusammenhalt der Atomkerne verantwortlichen Kernkräfte. Diese erweisen sich als Folgeerscheinungen der eigentlichen zwischen den Quarks wirksamen chromodynamischen Kräfte, so wie die Van-der-Waalsschen Anziehungskräfte zwischen neutralen Molekülen eine Folgeerscheinung der zwischen den elektrisch geladenen Bestandteilen dieser Moleküle wirkenden elektrischen Kräfte sind.

Zum Verständnis der Physik der Atomkerne benötigt man aber nicht nur die für den Zusammenhalt der Kerne verantwortlichen Kräfte, die wir heute – wie wir gesehen haben – auf die superstarke Wechselwirkung zwischen den Quarks zurückführen, sondern man muß auch ein Phänomen wie den radioaktiven  $\beta$ -Zerfall deuten können. Dieser beruht auf der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron

sowie ein weiteres elektrisch neutrales Teilchen der Masse Null, das man heute als elektronisches Antineutrino bezeichnet:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ .

Für diesen Zerfall hat man eine weitere fundamentale Wechselwirkung der Natur, die sogenannte »schwache Wechselwirkung«, verantwortlich gemacht. Sie ist sehr kurzreichweitig und außerdem viel schwächer als die elektromagnetische Wechselwirkung. Eine recht brauchbare Theorie der schwachen Wechselwirkung wurde schon 1934 von Enrico Fermi aufgestellt; zu einer wesentlichen Verbesserung kam es in den Jahren 1956/57, insbesondere durch Arbeiten von T. D. Lee und C. N. Yang. Einen entscheidenden Fortschritt brachte dann das Jahr 1967, in dem Steven Weinberg, Abdus Salam und Sheldon Lee Glashow eine einheitliche Theorie der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkungen schufen. Diese einheitliche Theorie hat zu einer Reihe von Vorhersagen geführt, die experimentell nachprüfbar sind, so insbesondere zu Vorhersagen über die elastische Streuung von Neutrinos. Da die einschlägigen Experimente extrem schwierig sind, waren die ersten experimentellen Befunde nicht ganz eindeutig; in jüngster Zeit hat sich aber immer deutlicher gezeigt, daß die theoretischen Vorhersagen durch die Erfahrung quantitativ bestätigt wurden. Für die neue einheitliche Theorie der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkungen beginnt sich der Name Quantenflavordynamik (QFD) einzubürgern. Mit flavor (= Geschmack) bezeichnet man die verschiedenen Erscheinungsformen des Quarks; wir haben ja gesehen, daß das Quark im Proton und Neutron in der Form des u-Quarks mit der elektrischen Ladung  $+\frac{2}{3}e$  und in der Form des d-Quarks mit der elektrischen Ladung  $-\frac{1}{3}e$  vorkommt. Während die Quantenchromodynamik nur die Quarks durch eine superstarke Wechselwirkung verknüpft, stiftet die Quantenflavordynamik auch eine – allerdings viel schwächere – Wechselwirkung zwischen den Quarks und dem Elektron sowie dem Neutrino; außerdem ist sie in der Lage, die Erscheinungsform – den »flavor« – eines Quarks zu ändern. Der  $\beta$ -Zerfall beruht nach ihr letztlich auf der Quark-Umwandlung  $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ .

Versuchen wir die Vorstellungen der modernen Physik von den Urbausteinen der Materie und den sie regierenden fundamentalen Naturgesetzen zusammenzufassen, so zeichnet sich etwa folgendes Bild ab:

Es gibt zwei Sorten von Urbausteinen, nämlich einerseits Teilchen wie das Elektron und das Neutrino, die man unter dem Namen Leptonen zusammenfaßt, zum anderen Quarks, die in verschiedenen flavors vorkommen, also z. B. als u- und d-Quarks. Außerdem gibt es zwei fundamentale Wechselwirkungen, eine, die nur zwischen den Quarks wirksam ist, und eine zweite, an der sowohl Leptonen als auch Quarks teilhaben. Die erste wird durch die Quantenchromodynamik (QCD) beschrieben und bewirkt den Zusammenhalt des Protons und Neutrons, aber auch – als Folgeerscheinung – den Zusammenhalt der Atomkerne. Die zweite findet ihren Ausdruck in der Quantenflavordynamik (QFD) und ist verantwortlich für alle Erscheinungen in der Atomhülle, aber auch für gewisse radioaktive Umwandlungsprozesse, wie den  $\beta$ -Zerfall.

Wir haben guten Grund für die Hoffnung, daß sich in diesem Bild nicht nur die uns vertraute Materie erfassen läßt, sondern auch die Welt jener kurzlebigen Elementarteilchen, wie  $\pi$ - und K-Mesonen,  $\Lambda$ - und  $\Sigma$ -Hyperonen usw., die wir in unseren Beschleunigern erzeugen. Allerdings sind die Unsicherheiten dort sehr viel größer, und wir wissen auch nicht, wie viele Arten von Leptonen und wie viele flavors des Quarks

wir für eine vollständige Beschreibung brauchen. Die Frage nach einer »Weltformel«, auf die letztlich alles Naturgeschehen zurückgeführt werden kann, findet heute sicherlich noch keine befriedigende Antwort. Die eindrucksvollen Teilerfolge, die insbesondere in den allerletzten Jahren erzielt worden sind, lassen aber zumindest vermuten, daß wir uns auf dem richtigen Weg befinden und daß die verwirrende Fülle der Erscheinungen zu einem geschlossenen, in sich widerspruchsfreien und im letzten Grunde einfachen Bild zusammengefügt werden kann.

Wir verlassen nun den Bereich der Elementarteilchenphysik und wenden uns der Astrophysik zu und in ihr speziell der Frage nach dem Ursprung und der Entwicklungsgeschichte des Universums. Der russische Physiker Alexander Friedmann konnte schon 1922 zeigen, daß die Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins ohne künstliche Zusatzannahmen nur ein Universum zuläßt, welches kein statisches Gebilde ist, sondern sich aus einem Urknall dynamisch entwickelt. Eine erste empirische Stütze erhielt diese Urknallhypothese durch die beobachtete Rotverschiebung des von entfernten Galaxien ausgesandten Lichtes. Die Materie ist nämlich im Kosmos nicht gleichförmig verteilt, sondern ballt sich in Weltinseln, den sogenannten Galaxien, zusammen. Unsere Sonne gehört mit etwa 200 Milliarden anderen Sternen der Milchstraße an; die nächstgelegene große Galaxie ist der Andromedanebel in einer Entfernung von etwas mehr als zwei Millionen Lichtjahren. Typische Galaxien haben die Form einer Diskusscheibe mit einem Durchmesser von etwa 100 000 Lichtjahren und enthalten etwa  $10^{11}$  Sterne. Die Spektrallinien des von entfernten Galaxien ausgesandten Lichtes sind nun nach dem roten Ende des Spektrums hin verschoben; deutet man diese Rotverschiebung mit Hilfe des Dopplereffektes, so zeigt sie an, daß sich die emittierenden Galaxien von uns entfernen. Wie Edwin Hubble erstmals im Jahre 1929 feststellte, ist die Rotverschiebung direkt proportional zur Entfernung, d. h., je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, desto größer ist ihre Fluchtgeschwindigkeit. Die einfachste Deutung dieses Phänomens ist natürlich die Hypothese eines »Urknalls«: Vor einer bestimmten endlichen Zeit, die sich aus der Hubbleschen Proportionalitätskonstante zwischen Rotverschiebung und Entfernung erschließen läßt und – nach den heutigen Werten – etwa 18 Milliarden Jahre beträgt, waren alle Galaxien unendlich dicht beisammen. Ihre Fluchtbewegung ist die Folge einer kosmischen Urexplosion.

Der zweite empirische Hinweis auf die Richtigkeit der Urknallhypothese wurde im Jahre 1964 entdeckt. Arno Penzias und Robert Wilson fanden – zu ihrer eigenen Überraschung –, daß es im Weltraum eine elektromagnetische Strahlung im Zentimeterwellenbereich gibt, die völlig diffus ist und anscheinend das ganze Universum ohne Auszeichnung eines Punktes oder einer Richtung gleichmäßig erfüllt. Es zeigte sich, daß diese kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung eine Spektralverteilung besitzt, die genau dem Planckschen Strahlungsgesetz bei einer Temperatur von  $2.7^\circ$  Kelvin entspricht. Die überwältigende Mehrzahl der Physiker deutet diese Hintergrundstrahlung als »Fossil« aus der Frühzeit des Universums, in der sich Materie und Strahlung im thermischen Gleichgewicht befunden haben. Die Existenz der Hintergrundstrahlung hätte damit den Charakter eines Beweises für einen vergangenen Zustand des Kosmos von extrem hoher Dichte und Temperatur, also für die Realität des Urknalls. Aus dem heutigen Temperaturwert der Hintergrundstrahlung von  $2.7^\circ\text{K}$  kann man überdies die Temperatur früherer Zeiten berechnen und mit Hilfe der Thermodynamik den Zustand der »Ursuppe« recht präzise beschreiben, welche das Universum in den ersten 700 000

Jahren seines Bestehens dargestellt haben muß. In dem faszinierenden Buch von Steven Weinberg »Die ersten drei Minuten« ist die Frühgeschichte des Kosmos und damit die Vorstellung der modernen Physik von der Wertschöpfung detailliert und eindringlich dargestellt. Leider können wir hier nicht auf irgendwelche Details eingehen. Nur soviel sei gesagt: Die Urknallhypothese von der Entstehung des Kosmos hat heute nicht mehr den Charakter einer vagen und kontroversen Spekulation, sondern es handelt sich um eine präzise quantitative Theorie, in der experimentelle Befunde, die Postulate der Allgemeinen Relativitätstheorie und die Erkenntnisse der modernen Elementarteilchenphysik widerspruchlos verbunden sind und sich wechselseitig stützen.

Weniger sicher als über die Vergangenheit ist man sich über die Zukunft des Universums. Die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie lassen nämlich zwei Typen von Weltmodellen zu:

a) Weltmodelle mit positiver Raumkrümmung, d. h. einer Winkelsumme im Dreieck, die größer ist als  $180^\circ$ . Bei diesem Typ von Weltmodellen ist das Weltvolumen endlich und ändert sich periodisch mit der Zeit. Auf eine Expansionsphase, in der das Volumen zu und die Dichte abnimmt, folgt eine Kontraktionsphase, für die das Umgekehrte gilt. Man kann sich dieses Modell in Analogie zur Oberfläche eines Luftballons vorstellen, der in der Expansionsphase aufgeblasen wird, während man in der Kontraktionsphase die Luft entweichen läßt.

b) Weltmodelle mit negativer Raumkrümmung, bei denen die Winkelsumme im Dreieck kleiner ist als  $180^\circ$ . Bei diesen Weltmodellen ist das Weltvolumen unendlich, die Dichte der Weltmaterie nimmt von extrem großen Werten beim Urknall kontinuierlich ab. Im Gegensatz zu den Modellen vom Typ a) kommt die Expansion – korrekter die Verdünnung der Materiedichte – nie zum Stillstand, der Urknall ist ein einmaliges Ereignis.

Modelle vom Typ a) sind realisiert, wenn die Materiedichte oberhalb eines gewissen kritischen Wertes liegt, Modelle vom Typ b), wenn die Dichte geringer ist als dieser kritische Wert. Im ersten Fall ist die Bremsung der Expansionsbewegung durch die anziehende Wirkung der Gravitation so stark, daß es zum Stillstand und anschließend zur Umkehrung der Bewegung kommt, so wie ein in die Luft geschleudertes Stein langsamer und langsamer wird, um schließlich zur Erde zurückzufallen. Im zweiten Fall ist dagegen die Gravitationsbremsung zu schwach, um der Expansion Einhalt zu gebieten; ein Analogon wäre eine Rakete, die beim Start eine Anfangsgeschwindigkeit von mehr als 11 km/sec erhält und damit in der Lage ist, den Anziehungsbereich der Erde zu verlassen.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um empirisch zu entscheiden, ob das reale Universum, in dem wir leben, vom Typ a) oder vom Typ b) ist. Die direkteste Möglichkeit wäre eine Bestimmung der Materiedichte des heutigen Universums. Ist diese höher als ein kritischer Wert, der nach den besten heute verfügbaren Daten bei etwa  $4,5 \times 10^{-30}$  g/cm<sup>3</sup> liegt, so wird der Typ a) realisiert sein; ist sie niedriger, der Typ b). Eine andere Möglichkeit besteht darin, Abweichungen vom Hubbleschen Gesetz der direkten Proportionalität zwischen Rotverschiebung und Entfernung festzustellen. Nur bei einer völlig ungebremsten Bewegung würde die Hubblesche Proportionalität streng gelten. Die Gravitationsbremsung führt notwendig zu einer Verzögerung der Expansionsbewegung und damit zu einer Abweichung von der Linearität in der Beziehung zwischen Rotverschiebung und Entfernung. Ist die Verzögerung größer als ein

bestimmter kritischer Wert, so ist der Typ a) realisiert; ist sie kleiner, der Typ b). Außerdem gibt es noch weitere indirekte Methoden, um zu entscheiden, welcher Modelltyp realisiert ist, wie z. B. die Bestimmung des Deuterium-/Heliumverhältnisses in der interstellaren Materie.

Nach dem heutigen Stand unserer Kenntnis weisen alle Bestimmungsmethoden auf ein dauernd expandierendes, negativ gekrümmtes, räumlich unendliches Universum hin, in dem der Urknall ein einmaliger Vorgang gewesen ist. Die Unsicherheiten in den empirischen Werten sind allerdings so groß, daß ein periodisches, positiv gekrümmtes, räumlich endliches Universum nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

Wenn wir uns nun abschließend der Biophysik und dabei der Frage nach der Entwicklung des Lebens aus unbelebter Materie zuwenden, so sprechen wir damit einen Problemkomplex an, der viel undurchsichtiger geblieben ist als die bisher besprochenen. Dementsprechend sind die Teilantworten, die man auf die Frage nach der Entstehung des Lebens heute gibt, viel weniger detailliert als diejenigen, die man auf die Frage nach der Entstehung des Universums vorlegt, und diese Teilantworten sind auch keineswegs unbestritten. Nichtsdestoweniger stellen sie einen faszinierenden Versuch dar, eines der großen Geheimnisse der Natur, das Leben, rein aus physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu verstehen.

Auf der Erde gibt es heute eine ungeheure Vielfalt von Lebensformen, vom primitivsten Einzeller bis hin zum Menschen. Die Tier- und Pflanzenwelt der Erde war aber nicht immer so beschaffen wie heute. Durch die Arbeit vieler Generationen von Paläontologen wissen wir vielmehr, daß sich die Flora und Fauna unseres Planeten im Laufe der Erdgeschichte, welche einen Zeitraum von etwa 4,5 Milliarden Jahren umfaßt, fortwährend geändert hat. So sind Menschen – oder besser gesagt menschenähnliche Wesen – erst vor wenigen Millionen Jahren erstmals aufgetreten. Säugetiere gibt es auf der Erde seit dem Beginn des Tertiär, also seit etwa 70 Millionen Jahren. Die ersten Vögel vom Typ des berühmten Urvogels *Archaeopteryx* haben vor ca. 180 Millionen Jahren gelebt. Die ersten Wirbeltiere lassen sich in geologischen Schichten nachweisen, die vor rund 500 Millionen Jahren entstanden sind, und die ältesten uns bekannten Lebewesen, gewisse primitive Bakterien, sind in Schichten gefunden worden, deren Entstehung mehr als 3 Milliarden Jahre zurückliegt.

Bekanntlich hat Charles Darwin in seinem 1859 erschienenen Hauptwerk „Über die Entstehung der Arten durch natürliche Auslese“ die These aufgestellt, daß die vielfältigen Lebensformen, die unsere Erde bevölkert haben und zum Teil noch heute bevölkern, nicht völlig unabhängig voneinander entstanden sind, sondern daß sich höhere Lebensformen aus primitiveren entwickelt haben. Motor dieser Höherentwicklung sei der „Kampf ums Dasein“, der dafür Sorge, daß nur die tüchtigsten Individuen überleben und zur Fortpflanzung gelangen. Nur die Träger der besten Erbanlagen überstehen den Kampf ums Dasein und so verbessert sich das Erbgut von Generation zu Generation mit dem Resultat einer stetigen Höherentwicklung der Lebensformen.

Gegen die Darwinsche Theorie lassen sich nun aber gewichtige Einwände erheben. Durch die gezielte Ausnutzung der Variabilität der Erbanlagen läßt sich zwar, wie die Erfahrung zeigt, die Milchleistung von Kühen im Laufe der Generationen steigern, aber noch keinem Viehzüchter ist es gelungen, aus Kühen Pferde zu züchten. Die natürliche Variabilität der Erbanlagen in Verbindung mit dem Darwinschen Ausleseprinzip, wonach nur die Träger der besten Erbanlagen zur Vermehrung kommen, kann also

dafür sorgen, daß innerhalb einer Art die Lebewesen von Generation zu Generation allmählich immer lebensfähiger werden, sie erlaubt aber nicht die Entstehung neuer Arten. Die Entstehung neuer Arten wird nun allerdings durch einen Umstand ermöglicht, der Darwin selbst noch nicht bekannt war, nämlich das Auftreten von Erbsprüngen oder Mutationen. Die moderne experimentelle Genetik, die vor allem mit Bakterien arbeitet, da bei diesen die Zahl der Versuchsobjekte sehr groß und die Generationenfolge sehr kurz ist, hat zweifelsfrei nachgewiesen, daß in Bakterienkulturen in der Tat ein Evolutionsprozeß stattfindet, bei dem neue Arten entstehen. Die meisten dieser neu entstandenen Arten sterben alsbald wieder aus; gelegentlich aber wächst eine solche neu entstandene Art hoch und verdrängt den ursprünglichen Bakterienstamm. Dieser Verdrängungsprozeß wird sehr gefördert, wenn man die Umweltbedingungen, etwa durch Anwendung von Antibiotika, verändert. Diese experimentellen Fakten sind natürlich eine sehr starke Stütze für die Darwinsche Theorie. Sie beweisen aber noch nicht, daß der Evolutionsprozeß zu einer echten Höherentwicklung führt, denn das Resultat der beobachteten Mutationen von Bakterien sind andere Bakterien, nicht aber höher organisierte Lebewesen.

Damit sind wir bei einem zweiten Einwand gegen die Darwinsche Evolutionstheorie angelangt, dem sogenannten Problem des »missing link«. Unter den fossilen Funden sind Exemplare, die Übergangsformen zwischen einer höheren und einer niedrigeren Gattung darstellen, höchst selten. (Der Urvogel *Archaeopteryx*, der vogel- und reptilähnliche Züge hat, ist eines der wenigen Beispiele für eine derartige Übergangsform.) Daraus muß man – nach Darwin – doch schließen, daß Übergangsformen zwischen einer niedrigen und einer höheren Gattung weniger lebensfähig sind als die Lebewesen der niedrigeren Gattung, welche man – in denselben geologischen Schichten – ungleich häufiger findet. Der Übergang von einer niedrigeren Gattung zu einer höheren führt also offensichtlich über Zwischenformen, die durch das Darwinsche Ausleseprinzip nicht bevorzugt, sondern benachteiligt werden. Der Kampf ums Dasein ist damit nicht Motor, sondern Hemmschuh der Höherentwicklung, da er Mutanten, die zwar momentan benachteiligt sind, aber große Zukunftsmöglichkeiten in sich tragen, unterdrückt. Dieser Einwand gilt natürlich nicht für sogenannte Großmutanten, die mit einem Schlag von einer voll lebensfähigen niedrigeren zu einer voll lebensfähigen höheren Gattung führen. Solche Großmutanten aber sind extrem selten, und es ist höchst fraglich, ob die 500 Millionen Jahre, die seit dem Auftreten der ersten Wirbeltiere vergangen sind, ausreichen, um die Entwicklung bis zum Menschen verständlich zu machen, wenn das Darwinsche Ausleseprinzip in voller Härte gültig ist und damit allein die Großmutanten Träger der Höherentwicklung sein können.

Die schärfste Kritik an der Darwinschen Theorie aber setzt an dem Begriff »Lebensfähigkeit« selbst an. Trotz aller Bemühungen ist es nämlich den Bakteriengenetikern meines Wissens niemals gelungen vorherzusagen, ob eine neu entstandene Art ausstirbt oder hochwächst. Und so hat sich die Meinung weit verbreiten können, das Darwinsche Prinzip vom Überleben des Tüchtigsten (»survival of the fittest«) sei eine bloße Tautologie, die nichts anderes besagt als das Überleben der Überlebenden (»survival of the survivor«). Denn wenn man schon keine anderen Kriterien für die Lebensfähigkeit finden könne, so sei zweifellos diejenige Art am lebensfähigsten, die überlebt.

Die Probleme um die Evolution des Lebens, von denen ich nur einige habe schildern können, haben durch die Entwicklung der sogenannten »mathematischen Evolutions-

theorie« eine gewisse Klärung erfahren. Das Resultat dieser modernen Untersuchungen läßt sich etwa folgendermaßen zusammenfassen:

Auslese (»Selektion«) und Höherentwicklung (»Evolution«) können durch sehr verschiedenartige Mechanismen bewirkt werden, von denen einer der Darwinsche ist. Im Lauf der Entwicklung des Lebens auf der Erde müssen – teils nacheinander, teils nebeneinander – mehrere dieser Mechanismen wirksam gewesen sein.

Der Anschaulichkeit halber soll ein Beispiel eines Selektionsspiels vorgeführt werden.

Wir benutzen dazu ein Spielbrett von 6 x 6 Feldern. Die horizontalen Reihen charakterisieren wir durch schwarze Zahlen von 1 bis 6, die vertikalen Reihen durch entsprechende rote Zahlen. Jedes Feld wird also eindeutig durch eine rote und eine schwarze Zahl im Wertebereich 1 bis 6 charakterisiert.

Durch einen Wurf mit zwei Würfeln – einem roten und einem schwarzen – können wir also ein bestimmtes Feld des Spielbretts erwürfeln. Für unser Spiel benötigen wir nun noch je 36 Spielsteine in den Farben Rot, Grün, Blau und Gelb.

Zu Beginn des Spiels verteilen wir je 9 Steine in den vier Farben völlig regellos auf die 36 Felder des Spielbretts. Nunmehr wird gewürfelt, wobei – strikt abwechselnd – die beiden folgenden Regeln angewandt werden:

1. Von dem erwürfelten Feld wird der Stein entfernt und kommt ins Reservoir.
2. Der erwürfelte Stein wird verdoppelt, indem aus dem Reservoir ein Stein gleicher Farbe entnommen und auf den soeben frei gewordenen Platz gesetzt wird.

Das Spiel ist nicht besonders kurzweilig, führt aber nach etwa 1000 Würfelrunden (eine Würfelrunde besteht aus einem Abbau- und einem Aufbauwurf) zu einem überraschenden Resultat: Auf dem Spielbrett befinden sich nur noch Steine einer einzigen Farbe. Welche Farbe das ist, läßt sich nicht vorhersagen; alle Farben haben die gleiche Chance zu gewinnen.

Man sieht also, daß die angewandte Spielregel bei völliger Zufälligkeit jeden Würfelereignisses zwangsläufig zur Selektion einer einzigen Farbe führt und das, obwohl keine Farbe irgendeinen Selektionsvorteil hat. Das Spiel lehrt außerdem, daß durch eine Kette von Zufallsereignissen aus einer völlig ungeordneten Anfangsverteilung nach verhältnismäßig kurzer Zeit ein hochgeordneter Zustand entstehen kann, dessen *a-priori*-Wahrscheinlichkeit extrem klein ist (nämlich  $1 : 4^{36} = 2 \times 10^{-22}$ , da es  $4^{36}$  denkbare Besetzungen des Spielfeldes gibt).

Es ist sehr leicht möglich, unser Selektionsspiel zu verfeinern und Selektionsvorteile, Mutationen, ökologische Nischen, funktionelle Beziehungen zwischen Kontrahenten – wie z. B. Symbiose oder Jäger-Beute-Abhängigkeiten – und manches andere in das Spiel einzubauen. Dadurch können die unterschiedlichsten Spielresultate zustande kommen: Bei manchen Spielvarianten kommt es zur Koexistenz der Konkurrenten, in anderen wird der Selektionsprozeß, dem wir in unserem Beispiel begegnet sind, sehr beschleunigt; in einigen Spielversionen haben Mutanten, die einen Selektionsvorteil besitzen, die Chance hochzuwachsen und die vorherrschende Population zu verdrängen, in anderen siegt eine einmal etablierte Population allein durch ihre größere Zahl auch über höher qualifizierte Mutanten.

Was aber haben all diese Spielereien mit unserem Thema, der Entstehung des Lebens zu tun? Die Antwort ist: höchstwahrscheinlich außerordentlich viel. Im Oktober 1971 veröffentlichte der deutsche Nobelpreisträger Manfred Eigen einen Artikel mit der Überschrift »Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromole-

cules“, zu deutsch »Die Selbstorganisation der Materie und die Evolution von Riesemolekülen«. In diesem Artikel konnte Eigen zeigen, daß Evolutionsmechanismen ähnlich denjenigen, die wir in unserem Evolutionsspiel kennengelernt haben, nicht nur für die Evolution der Lebensformen von Bedeutung sind, sondern auch für das Zusammenspiel gewisser Moleküle. Unter genau angebbaren physikalischen Randbedingungen – für Fachleute: in einem offenen stationären System weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht – befolgt nämlich nach Eigen ein chaotischer Haufen spezieller chemischer Moleküle – für Fachleute: Nukleotide und Aminosäuren – allein aufgrund physikalischer Naturgesetze die Regeln eines bestimmten Evolutionsspiels. Dieses Evolutionsspiel führt dazu, daß eine Kette von Zufallsereignissen zur Herausbildung wohlorganisierter Molekülverbände führt, die in der Lage sind, sich selbst zu reproduzieren und damit zu vermehren. Gelegentliche Fehler bei der Selbstreproduktion führen überdies zum Auftreten von »Mutanten« und bewirken die allmähliche Verbesserung und Vervollkommnung von Populationen dieser Molekülverbände.

Auf den ersten Blick scheint die Eigensche Behauptung über die Fähigkeit der Materie zur Selbstorganisation höchst unglaublich. Denn sie beinhaltet, daß durch eine Kette von Zufallsereignissen aus Unordnung Ordnung entsteht. Das aber widerspricht doch allen Grundsätzen, die man uns im Physik-Unterricht beigebracht hat, wonach Zufallsereignisse – wie Molekülstöße – in aller Regel die Tendenz haben, einen Gleichgewichtszustand größtmöglicher Unordnung herbeizuführen. Das bekannteste Beispiel dafür ist der Temperatenausgleich zwischen einem kalten und einem heißen Körper, die in Wärmekontakt gebracht werden. Bei näherem Zusehen zeigt sich nun allerdings, daß die unzähligen Beispiele der Thermodynamik, bei denen die Unordnung zunimmt, die Eigensche Behauptung keineswegs zu widerlegen vermögen. Die geläufigen Beispiele beziehen sich nämlich auf eine ganz andere physikalische Situation – für Fachleute: auf abgeschlossene physikalische Systeme in der Nähe des thermodynamischen Gleichgewichts. Da aber gelten andere Spielregeln; Spielregeln, die man übrigens sehr leicht in einem Brettspiel mit Würfeln und Steinen simulieren kann. Und unter diesen Spielregeln führt eine Kette von Zufallsereignissen in der Tat von der Ordnung zur Unordnung. Daß es aber auch Spielregeln gibt, in denen durch eine Kette von Zufällen aus Unordnung Ordnung entstehen kann, das hat das Selektionsspiel, das wir vorhin miteinander gespielt haben, wohl hinreichend bewiesen.

Welche physikalischen und chemischen Eigenschaften es sind, die gerade Nukleotide und Aminosäuren befähigen, ein Evolutionsspiel zu spielen, das zur Selbstorganisation der Materie führt, damit wollen wir uns hier nicht beschäftigen. Auch darüber, wie ein wohlorganisierter Verband von Nukleotiden und Aminosäuren es bewerkstelligt, sich selbst zu reproduzieren, wollen wir nicht sprechen, obwohl man gerade das heute recht gut weiß. (Hier spielen Begriffe wie DNS und genetischer Code herein.) All diese Dinge sind extrem interessant, aufregend und auch praktisch bedeutsam, da sie aufs engste mit der Manipulation von Erbanlagen zusammenhängen, welche letztere vielleicht schon bald machbar ist, aber sie sind auch recht kompliziert.

Fassen wir die Resultate der Eigenschen Untersuchungen zusammen, so läßt sich folgendes feststellen:

1. Wir verstehen heute das allgemeine Prinzip der Selektion und Evolution auf molekularer Ebene. Diesem Prinzip zufolge kommt, wenn bestimmte genau angebbare

physikalische und chemische Vorbedingungen erfüllt sind, unvermeidlich ein Evolutionsprozeß in Gang.

2. Wir können heute sehr einfache molekulare Modelle konstruieren, die mögliche Vorläufer lebender Zellen sein könnten. Eines dieser Modelle, in dem sich selbst reproduzierende sogenannte »Hyperzyklen« eine entscheidende Rolle spielen, erfüllt nach Eigen die Bedingungen, die notwendig sind, um eine Evolution bis zu den heute bekannten Lebensformen zumindest im Prinzip zu ermöglichen.

3. Wir verstehen den genauen historischen Weg der Evolution auf der Erde nicht, und wir werden voraussichtlich auch niemals eine Theorie aufstellen können, die eine Erklärung für den speziellen Gang liefert, den die Evolution auf der Erde genommen hat. Denn diese historische Route ist durch viele Zufallsereignisse bestimmt worden, die grundsätzlich unvorhersehbar waren.

Manfred Eigen beschließt seinen zitierten Artikel mit den Worten: »Schließlich zeigt es sich, daß die Entstehung des Lebens an eine Reihe von Eigenschaften geknüpft ist, die sich sämtlich physikalisch eindeutig begründen lassen. Die Vorbedingungen zur Ausbildung dieser Eigenschaften sind vermutlich schrittweise erfüllt worden, so daß der ›Ursprung des Lebens‹ sich ebensowenig wie die Evolution der Arten als einmalig vollzogener Schöpfungsakt darstellen läßt.«

Hat Eigen recht? Seine Theorie ist umstritten und sein Modell der Hyperzyklen begegnet großer Skepsis. Man wird ihm aber konzedieren müssen, daß er wohl erstmals einen mit den physikalischen Gesetzmäßigkeiten verträglichen Weg aufgezeigt hat, auf dem eine Selbstorganisation der Materie bis hin zu Lebensformen prinzipiell möglich ist.

Wir wollen damit unsere flüchtige Erörterung der wichtigsten Ergebnisse der Physik in den letzten drei Jahrzehnten abschließen. Der Rückblick auf die jüngste Vergangenheit zeigt, daß die Physik auch heute noch auf uralte Menschheitsfragen neuartige und faszinierende Antworten zu entwickeln vermag. Andererseits unterstreichen gerade diese neuen Erkenntnisse auch deutlich die Richtigkeit der Aussage Ludwig Wittgensteins: »Wir fühlen, daß selbst wenn alle möglichen wissenschaftlichen Fragen beantwortet sind, unsere Lebensprobleme noch gar nicht berührt sind« (Tractatus logico-philosophicus 6.52).