

# Was ist Gravitation?

## Über die Einheit fundamentaler Wechselwirkungen

Hans Peter Nilles

Bethe-Zentrum für Theoretische Physik (bctp)

Physikalisches Institut

Universität Bonn

### Abstrakt:

Es ist eine der zentralen Aufgaben der Physik, die fundamentalen Kräfte der Natur zu identifizieren und zu untersuchen. Fortschritte im Verständnis dieser Kräfte sind daher oftmals Meilensteine in der Entwicklung unseres physikalischen Weltbildes, teilweise sogar verknüpft mit technologischen Anwendungen. Der Vortrag stellt unser physikalisches Wissen über fundamentale Wechselwirkungen vor: von den Anfängen bis hin zu Theorien der „großen“ Vereinheitlichung. Auf diesem Weg treffen wir u. a. Newton, Maxwell, Hertz und Einstein, die mit neuen Konzepten unser Weltbild prägten und revolutionierten. Wir lernen auch, dass die einfachste und bekannteste der fundamentalen Kräfte, die Gravitation, uns noch immer rätselhaft erscheint.

## 1. Wie gewiss ist unser Wissen?

In der Präambel zu dieser Reihe wurde diese Frage weniger im Hinblick auf die Existenz grundlegender Erkenntnisse als vielmehr auf eine „Modeerscheinung“ unserer Vorstellungen zum gegenwärtigen Zeitpunkt gestellt. Wir wollen unsere Diskussion hier dem „Wissen“ über Naturkräfte (oder fundamentale Wechselwirkungen) widmen und analysieren, welche Grundkenntnisse wir inzwischen gesammelt haben. Ist die Aussage: „Unser derzeitiges Wissen erscheint in den Paradigmen unserer heutigen Zeit, aber die Paradigmen von morgen werden das Erscheinungsbild unseres Wissens gründlich ändern“ voll zutreffend oder selbst als „Mode der Zeit“ zu verstehen. Ich beziehe mich hier natürlich auf solche Kräfte, die mit naturwissenschaftlichen Methoden untersucht werden. Wir wollen ausarbeiten, welche Fortschritte im Verständnis der Naturkräfte im Verlauf der Menschheitsgeschichte erzielt wurden und kritisch analysieren wie sicher wir unseres „Wissens“ sind. Der Leser muss dann selbst entscheiden wie er es mit der Eingangsfrage hält. Bevor wir uns mit Antworten beschäftigen, sollten wir allerdings versuchen, die Fragen möglichst präzise zu stellen.

## 2. Was ist Kraft?

Das Wort Kraft ist ein Bestandteil unserer Umgangssprache und wird vielfältig benutzt. Wir kennen Begriffe wie Muskelkraft, Himmelskraft, Wasserkraft, Lebenskraft, Reibungskraft und viele andere. Es versteht sich von selbst, dass einige dieser Kräfte in sich verschiedene Interpretationen beinhalten: „Himmelskraft“ etwa könnte im theologischen Sinne, aber auch im Zusammenhang mit der Bewegung der Himmelskörper gesehen werden. Ausdrücke wie „Lebenskraft“ haben ihren Inhalt im Lauf der Zeit verändert: für den Steinzeitmenschen waren damit sicher andere Eigenschaften relevant als für den Menschen im modernen Technologie-Zeitalter.

Grundlage für eine naturwissenschaftliche Diskussion der Kräfte ist daher eine präzise Definition. Was ist Kraft? Was bewirkt eine Kraft? Wann sollte man eine Kraft als fundamental bezeichnen? Wie viel Kräfte (oder Wechselwirkungen) gibt es?

Umgangssprachlich sagt man: „Kraft bewegt etwas“. Das ist richtig, aber auch ungenau. Wirkt eine Kraft auf den fahrenden Zug, der sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt?

### 3. Newton (1642 – 1726)

Isaac Newton legte die Grundlage zur modernen wissenschaftlichen Untersuchung der Kräfte. Dazu gehört die Definition der Wirkung einer Kraft:

Kraft = Masse  $\times$  Beschleunigung (genauer Veränderung des Impulses)

also eine Veränderung der Bewegung wie etwa das Abbremsen oder Beschleunigen des Zuges. Dies war eine große intellektuelle Leistung, da zu dieser Einschätzung ein gewisses Maß an Abstraktion notwendig war. Schon bevor wir Fragen nach Ursprung und Eigenschaften der Kräfte stellen, ist eine solche präzise Definition der Wirkung der Kräfte notwendig und diese „Definition“ wird wohl auch in Zukunft nicht in Frage gestellt werden.

Newton ist auch ein weiterer Meilenstein in der Erkenntnis der Naturkräfte zu verdanken: die Entdeckung des Gesetzes der Schwerkraft (oder Gravitation). Ein Körper einer Masse  $M_1$  wirkt auf einen Körper der Masse  $M_2$  eine Kraft aus, die proportional zum Produkt der Massen sowie umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes der Körper ist. Nun, dies ist nur eine Formel, mit der wir uns hier nicht weiter im Einzelnen beschäftigen wollen. Viel wichtiger ist die Erkenntnis der Universalität dieser Kraft. Sie ist in gleicher Weise gültig für alle massiven Körper! Damit wird evident, dass die Bewegung der Planeten und Sterne am Himmel gleichen Ursprungs ist wie die Erdanziehung, die etwa für das Fallen eines Apfels vom Baum verantwortlich ist. In diesem Sinne werden zwei Kräfte: „Himmelskraft“ und „Erdanziehung“ durch das Newtonsche Gravitationsgesetz in vereinheitlichter Form beschrieben. Dieses Thema der Vereinheitlichung der Kräfte (oder Wechselwirkungen) hat die Entwicklung der Forschung seitdem geprägt. Das ist die große Erkenntnis von Newton: Planetenbewegung und Erdanziehung haben den gleichen Ursprung und werden durch die gleichen Gesetze beschrieben! Egal was Gravitation nun wirklich ist, obige Aussage bleibt richtig und sinnvoll und ist keine „Mode der Zeit“.

### 4. Was sind fundamentale Kräfte?

Wie zu Newtons Zeit wird die Gravitation heute noch als eine fundamentale Naturkraft angesehen. Allerdings ist allein schon die Definition einer fundamentalen Kraft (Wechselwirkung) schwierig. Hier ist ein pragma-

tisches Vorgehen notwendig. Fundamentale Wechselwirkungen sollten nicht auf andere Kräfte zurückzuführen sein und sollten einfachen Gesetzen genügen. Eine Kraft gilt so lange als fundamental so lange nicht das Gegenteil bewiesen ist. Hier ergibt sich eine gewisse Analogie zum Begriff des Atoms: es wurde als unteilbar postuliert. Später allerdings wurde eine innere Struktur des Atoms entdeckt. Die Bestandteile des Atoms, Elektronen und Kern, werden danach als Elementarteilchen angesehen. Heute wissen wir, dass auch der Kern eine innere Struktur hat. Trotzdem war das Konzept des Atoms nützlich und wichtig. Das Bild hat sich allerdings im Lauf der Zeit verändert und vervollständigt.

Auch heute noch wird die Gravitation als fundamentale Wechselwirkung angesehen. Wir wissen allerdings nicht, ob dieses eine endgültige Aussage bleibt oder sich eventuell in Zukunft verändert. Trotzdem ist es wichtig, die Eigenschaften der Schwerkraft im Detail zu studieren.

In der Einleitung hatten wir eine Reihe anderer Kräfte erwähnt, wie etwa Muskelkraft, Wasserkraft und Reibungskraft. Gibt es neben der Gravitation weitere Kräfte, die den Anspruch erheben fundamental zu sein? Betrachten wir die historische Entwicklung, war die Elektrizität die erste Kandidatin (die man etwa eindrucksvoll durch Blitze bei Gewitter wahrnehmen konnte). Auch eine mysteriöse „magnetische“ Kraft wie sie einige Festkörper (Ferromagneten) ausstrahlten, schien einerseits einfachen Gesetzen zu genügen und war andererseits auch nicht auf die Schwerkraft zurückzuführen.

### 5. Maxwell (1831-1879) und der Elektromagnetismus

James Clark Maxwell vervollständigte das Wissen über elektrische und magnetische Wechselwirkungen in den berühmten vier Maxwellschen Gleichungen. Das war eine große Errungenschaft, stellte aber nur einen Teil der Revolution dar, die von seinen Erkenntnissen ausging. Er konnte damit zum Beispiel nachweisen, dass Magnetismus und Elektrizität nicht separat betrachtet werden können, sondern als verschiedene Aspekte einer einzigen fundamentalen Kraft anzusehen sind: der elektromagnetischen Wechselwirkung. Wie schon bei Newton ging mit der Entdeckung auch eine Vereinheitlichung der Wechselwirkungen einher!

Die wirkliche Revolution der Arbeiten Maxwells war das tiefe Verständnis des Begriffs des elektromagnetischen Feldes. Die vier Maxwellgleichungen

sind nicht direkt Kraftgleichungen, sondern Gleichungen für elektrische und magnetische Felder. Die Verknüpfung dieser Felder zur Kraft erfolgt über die Lorentzkraft-Gleichung. Elektrische Ladungen erzeugen Felder, und diese Felder bewirken eine Kraft auf andere Ladungen. Dies an sich ist noch nicht so bedeutend, da man ja auch für die Schwerkraft ein Newtonsches Potential formuliert hatte, mit Hilfe dessen man ein Gravitationsfeld formulieren konnte. Viel wichtiger ist die Erkenntnis, dass nach den Maxwellschen Gleichungen die Wirkung des elektromagnetischen Feldes eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hatte. Dies steht im krassen Gegensatz zur Newtonschen Theorie, bei der die Wechselwirkung als instantan angesehen wurde. Damit ist die spätere Formulierung der speziellen Relativitätstheorie schon in der Maxwellschen Theorie versteckt. Die Formulierung des Begriffs des elektromagnetischen Feldes räumt auch mit veralteten Vorstellungen auf, nach denen ein Äther für die Wirkung der Wechselwirkungen notwendig ist. Die sogenannte „Äthertheorie“ hat sich als falsch erwiesen. Wechselwirkungen wirken über Felder im leeren Raum. Die wissenschaftliche Bedeutung des Werkes von Maxwell kann kaum überschätzt werden. Dass die elektromagnetischen Wechselwirkungen durch eine sogenannte „Eichtheorie“ beschrieben werden, wird in der Maxwellschen Theorie klar, obwohl deren Bedeutung erst 100 Jahre später voll erkannt wurde.

#### 6. Hertz (1857-1894) und die Realität des elektromagnetischen Feldes

Der Begriff des elektromagnetischen Feldes ist natürlich vorerst nur ein mathematisches Konstrukt, wie auch der des Gravitationsfeldes. Der Unterschied zwischen beiden ist die Tatsache, dass die Wirkung des elektromagnetischen Feldes nicht instantan ist, sondern mit endlicher Geschwindigkeit vonstatten geht. Diese Ausbreitungsgeschwindigkeit steckt in der Maxwellschen Theorie als eine Konstante, deren Wert noch zu bestimmen ist. Mit welcher Geschwindigkeit breitet sich das elektromagnetische Feld aus? Es war Heinrich Hertz vorbehalten, diese Frage zu klären. Hertz war zu dieser Zeit wohl die einzige Person in Deutschland, der die Maxwellsche Theorie ernstnahm und verstand. Er selbst hatte die Theorie in eine elegantere Form umformuliert. Sein größter Verdienst ist die Erzeugung und der Nachweis elektromagnetischer Wellen, ein technologischer Durchbruch. Können Sie sich unsere heutige Welt ohne Radio, Fernsehen, Mobiltelefon vorstellen? Aber nicht nur diese Anwendungen seiner Entdeckung sind bahnbrechend. Er weist damit indirekt nach, dass elektromagnetische Felder physikalische Bedeutung haben und nicht nur als mathematische Hilfsmittel aufzufassen

sind. Sie beschreiben die elektromagnetischen Wellen und das sind messbare Effekte, die Sie z. B. mit ihrem Radiogerät nachweisen können. Mit Erzeugung und Nachweis solcher Wellen konnte nun auch die mysteriöse Konstante bestimmt werden, die dort als Grenzgeschwindigkeit auftrat. Nach anfänglichen Unsicherheiten wurde schließlich gezeigt, dass es sich hier um die Lichtgeschwindigkeit handelte: eine überraschende Tatsache. War das ein Zufall? Wir werden auf diesen Punkt noch zurückkommen.

## 7. Die spezielle Relativitätstheorie

Das Konzept einer Ausbreitung des Lichts mit endlicher Grenzgeschwindigkeit war mit den Gesetzen der klassischen Physik von Galilei und Newton nicht vereinbar. Dort waren Symmetrien durch Galileitransformationen beschrieben, die eine instantane Ausbreitung der Kräfte erfordern. Die Verallgemeinerung dieser Transformationen sind als Lorentztransformationen bekannt. Sie sind mit einer endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit ausgestattet und gehen im Grenzwert großer Ausbreitungsgeschwindigkeit in die Galileitransformation über. Die Gesetze der klassischen Physik sind daher approximativ gültig, so lange wir uns mit Geschwindigkeiten beschäftigen, die klein im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit sind.

Eine konsistente Beschreibung der Lorentztransformationen (mit maximaler Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes) ist Gegenstand der speziellen Relativitätstheorie, wie sie von Einstein 1904 formuliert wurde. Interessant ist die Feststellung, dass die Maxwellsche Theorie die Gesetze der Lorentztransformationen befolgt, während die Newtonsche Gravitation damit unverträglich ist. Von den zwei bisher bekannten fundamentalen Wechselwirkungen scheint die jüngere (Elektromagnetismus) den modernen Anforderungen gewachsen: im Gegensatz zur Gravitation. Schon Hertz hatte sich in dieser Richtung Gedanken gemacht. Es sollte allerdings Einstein vorbehalten sein, dieses Paradoxon der Gravitation aufzulösen. Folgen wir der historischen Entwicklung.

## 8. Einstein (1879-1955) und die Substanz des Feldes

Im selben Jahre 1904 veröffentlichte Albert Einstein seine Ergebnisse zum sogenannten photo-elektrischen Effekt (für den ihm später der Nobelpreis verliehen wurde). Beim Streuen von Licht an Materie wurden Elektronen

aus dem Material katapultiert, deren Energiespektrum sorgfältig vermessen war. Diese Beobachtungen waren rätselhaft: erhöhte man die Intensität des Lichtes, blieb die Energie der einzelnen Elektronen konstant, nur ihre Anzahl wuchs an. Eine Erhöhung der Energie der individuellen Elektronen erforderte eine Erhöhung der Frequenz des Lichtes. Einstein interpretierte diesen Effekt als Folge des „Teilchencharakters“ des Lichtes. Licht besteht aus Lichtquanten, deren Energie durch die Frequenz des Lichtes gegeben ist. Trifft ein solches Lichtquant (Photon genannt) auf ein Elektron im bestrahlten Festkörper, wird genau diese Energie auf das Elektron übertragen. Eine höhere Energie kann nur mit Lichtquanten höherer Energie (nicht mit der Erhöhung der Anzahl der Lichtquanten) erzielt werden. Mit dieser Hypothese konnte der photo-elektrische Effekt erklärt werden. Allerdings ergab sich das Paradoxon, dass Licht einerseits Wellencharakter zeigte, andererseits aber Teilchencharakter, ein Phänomen, das letztlich eine Beschreibung im Rahmen der Quantentheorie erforderte, die 20 Jahre später formuliert wurde. Insofern kann Einstein (neben Planck) als einer der Großväter der Quantentheorie bezeichnet werden.

Kommen wir jetzt wieder zur Diskussion der fundamentalen Wechselwirkungen zurück. Einsteins Hypothese des „Lichtquants“ hat unser Verständnis fundamentaler Wechselwirkungen revolutioniert. Wenn wir Licht als eine elektromagnetische Welle auffassen, die den Maxwellgleichungen genügt, so wird dieses elektromagnetische Feld als eine Ansammlung von „Feldquanten“ beschrieben. Dies ist die „Substanz“ des elektromagnetischen Feldes. Die elektromagnetische Kraft (Wechselwirkung) wird durch Austausch von Teilchen beschrieben, die sich mit endlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit bewegen. Konzepte wie „Fernwirkung“ oder „Äther“ haben sich daher als unzutreffend erwiesen.

Das moderne Bild der Wechselwirkung beruht auf der Existenz eines Austauschteilchens. Wie erfolgreich dieses Konzept ist, würde die Entwicklung der nächsten 100 Jahre zeigen. Willst du eine Kraft besser verstehen, versuche ihre Feldquanten zu identifizieren und deren Eigenschaften zu analysieren. Das Quant des elektromagnetischen Feldes bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit, die nach der speziellen Relativitätstheorie eine Grenzgeschwindigkeit ist und nur von Quanten mit verschwindender Ruhemasse erreicht werden kann. Zudem besitzt es einen Eigendrehimpuls (Spin), dem in entsprechenden Einheiten (Plancksche Konstante) der Wert 1 zugeordnet wird (das Elektron hat vergleichsweise Spin  $\frac{1}{2}$ ). Das Photon ist also charakterisiert durch: Masse Null, Spin Eins.

Es hat damit Eigenschaften, die man heutzutage sogenannten „Eichteilchen“ zuspricht. Die elektromagnetische Wechselwirkung wäre danach eine „Eichtheorie mit Eichgruppe  $U(1)$ “. Dazu später mehr.

Fazit: Mit dieser Entdeckung eines Feldquants wurde unser Verständnis fundamentaler Wechselwirkungen revolutioniert, mit großem Einfluss auf die zukünftige Entwicklung.

## 9. Die allgemeine Relativitätstheorie

Wir sind nun in der paradoxen Situation, dass eine der bekannten fundamentalen Wechselwirkungen (der Elektromagnetismus) den modernen Vorgaben der (speziellen) Relativitätstheorie genügt, während die Newtonsche Gravitation noch mit den Gesetzen der klassischen Physik beschrieben wird, also insbesondere von einer instantanen Ausbreitung der Wechselwirkung (Fernwirkung) ausgeht. Sollte nicht auch die Gravitation in dieser moderneren Version formuliert werden?

Es gab allerdings auch andere Gründe, sich nochmals gründlich mit der Newtonschen Gravitation zu befassen. Die Beobachtung der Perihel-Bewegung des Merkur war in dieser Theorie nicht zu erklären, da sich dort die Ellipsenbahnen der Planeten zeitlich nicht verändern.

In einer beispiellosen Leistung gelang es Einstein 1915 die Gravitation modern relativistisch zu formulieren: die allgemeine Relativitätstheorie. Diese Theorie erlaubte eine korrekte Beschreibung der Perihel-Bewegung des Merkur und wurde bald auch durch Nachweis der Lichtablenkung im Gravitationsfeld gestützt. Bis heute lassen sich alle bekannten Phänomene der Schwerkraft im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie beschreiben.

Einsteins Ansatz betrachtete die Gravitation als eine geometrische Eigenschaft einer 4-dimensionalen Raum-Zeit. Die (lokale) Geometrie der Raum-Zeit wird durch eine Metrik beschrieben, aus der Eigenschaften, wie etwa die Krümmung des Raumes, mathematisch berechnet werden können. Im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie wird die Schwerkraft nun durch ein Gravitationsfeld beschrieben, das (wie das elektromagnetische Feld) eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wirkung vorhersagt, und diese Ausbreitungsgeschwindigkeit ist wieder durch die Lichtgeschwindigkeit gegeben! Die Theorie sagt damit auch die Existenz



erforderten, deren spezifische Eigenschaften (wie die Namen schon sagen) noch relativ unbekannt waren: starke und schwache Wechselwirkung. Die starke Wechselwirkung sollte für den Zusammenhalt der Atom-Kerne verantwortlich sein. Kerne bestehen aus Protonen (positiv geladen) sowie Neutronen (elektrisch neutral). Wäre nur die elektrische Kraft am Werke, könnten Atomkerne wegen der Abstoßung der Protonen nicht stabil sein. Eine bisher unbekannte Kraft, die starke Wechselwirkung, muss die Nukleonen zu einem stabilen Kern binden. Wir wissen zudem, dass Kerne mit vielen Protonen (von der Größenordnung 100) instabil sind. Man folgert daraus, dass die starke Wechselwirkung etwa hundertmal stärker als die elektromagnetische Wechselwirkung sein muss. Ihre Wirkung ist auf den subatomaren Bereich beschränkt: deshalb können wir sie im makroskopischen Bereich nicht wahrnehmen. Sie erscheint uns als abgeschirmt.

Die schwache Wechselwirkung wurde als Ursprung des sogenannten Beta-Zerfalls postuliert. Innerhalb von Minuten kann ein Neutron unter anderem in ein Proton und ein Elektron zerfallen, ein Prozess, der nicht auf andere Wechselwirkungen zurückzuführen ist. Die schwache Wechselwirkung ist etwa tausendmal schwächer als die elektromagnetische Wechselwirkung. Auch sie ist auf den subatomaren Bereich beschränkt.

Damit waren die vier fundamentalen Wechselwirkungen identifiziert, die auch noch aus heutiger Sicht für alle Kraftphänomene in der Natur verantwortlich sind, hier aufgelistet entsprechend der (mikroskopischen) Stärke:

- Starke Wechselwirkung  
Stärke 1, Reichweite  $10^{-13}$  cm
- Elektromagnetismus  
Stärke  $10^{-2}$ , Reichweite makroskopisch
- Schwache Wechselwirkung  
Stärke  $10^{-5}$ , Reichweite  $10^{-15}$  cm
- Gravitation  
Stärke  $10^{-38}$ , Reichweite makroskopisch.

Wie oben erläutert, kann man dem Elektromagnetismus zudem das Photon als masseloses Austauschteilchen mit Eigendrehimpuls (Spin) Eins zuordnen. Bei der Gravitation spekuliert man über die Existenz des

Gravitons (Masse Null, Spin Zwei) als Feldquant. Detaillierte Eigenschaften der starken und schwachen Wechselwirkung waren damals noch nicht bekannt und das sollte auch noch einige Jahrzehnte so bleiben.

## 11. Theoretische Entwicklungen

Fortschritte im Verständnis der starken und schwachen Wechselwirkung verlangten nach neuen Konzepten und Werkzeugen. Ihre mikroskopische Natur erforderte eine Einbeziehung der Quantentheorie. Aber selbst im Falle des Elektromagnetismus und der Gravitation war eine quantentheoretische Einbettung problematisch. Für die Gravitation gilt das auch heute noch, und wir werden später darauf zurückkommen. Zur Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen musste das Konzept der Quantenfeldtheorie formuliert werden. In der naiven Bearbeitung traten konzeptionelle und mathematische Probleme zutage, deren (partielle) Lösung in der sogenannten Regularisierung und Renormierung zu finden war. Der renormierbaren Quantenfeldtheorie kam daher eine besondere Bedeutung zu, nur sie konnte eine mathematische konsistente Beschreibung gewährleisten. In den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts gelang es unter anderem Richard Feynman, Julian Schwinger und Shinichiro Tomonaga die Quantenelektrodynamik (QED) als renormierbare Theorie zu formulieren. Sie gilt bisher (mit einigen Einschränkungen) als die quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen. Quantenkorrekturen konnten verlässlich berechnet und experimentell getestet werden. Diese Ergebnisse waren bahnbrechend für die weitere Entwicklung der Elementarteilchenphysik. Mehr und mehr trat die mathematische Konsistenz einer Theorie als ein Erfolgskriterium in den Vordergrund. Waren bisher in der Physik nur empirische Entdeckungen für Fortschritte der physikalischen Erkenntnis maßgebend, so traten jetzt auch rein theoretische Konzepte in den Vordergrund (und sind es bis heute geblieben). Die Entwicklung von Theorien für die schwache und starke Wechselwirkung sind leuchtende Beispiele für den Erfolg dieses theoretischen Konzeptes. Es begann mit der Erkenntnis, dass die QED Eigenschaften hatte, die sie als sogenannte „Eichtheorie“ charakterisieren (mit zugehöriger Eichgruppe  $U(1)$ ). Die Eigenschaften der Eichgruppe können wir hier nicht im Einzelnen diskutieren: betrachten Sie bitte  $U(1)$  einfach als einen Namen für die QED. Heute glauben wir, dass Teilchen mit Spin 1 konsistent nur im Rahmen von Eichtheorien beschrieben werden können. Eine Verallgemeinerung der QED wurde in den fünfziger Jahren konstruiert, die sogenannten nichtabelschen Eichtheorien (oder Yang-Mills-

Theorien) vom Typ  $SU(N)$  (wobei  $N$  eine ganze Zahl größer als 1 ist).  $SU(2)$  bzw.  $SU(3)$  sollten später als relevant für schwache und starke Wechselwirkung erkannt werden. Diese Theorien erwiesen sich als renormierbar, solange die beschriebenen Spin 1 Austauschteilchen masselos waren (und wie das ja auch in der QED mit masselosem Photon der Fall ist). Für die schwache Wechselwirkung kam die Eichtheorie  $SU(2)$  mit drei Austauschteilchen in Frage (jeweils  $N^2-1$  für  $SU(N)$ ): zwei geladene  $W^+$  und  $W^-$ , sowie ein neutrales Teilchen ( $W^0$ ). Allerdings konnte man ausschließen, dass solche masselosen Teilchen in der Natur existieren. Zudem erfordert die endliche mikroskopische Reichweite der schwachen Wechselwirkung massive Austauschteilchen. Ein Massenterm zerstört allerdings die mathematische Konsistenz (die Renormierbarkeit) der Theorie. Waren wir damit in einer Sackgasse? Mitte der sechziger Jahre wurde ein neuer Mechanismus der Massenerzeugung entdeckt, der unter dem Namen Higgs-Mechanismus bekannt wurde. Mit dem Postulat eines neuen Teilchens (des Higgs-Bosons) konnte dieser Mechanismus in die Theorie implementiert werden. 1973 zeigten Gerard 't Hooft und Martinus Veltman (Nobelpreis 1999), dass solche Theorien (trotz massiver Eichteilchen) renormierbar sind.

## 12. Das Standardmodell der Teilchenphysik

Ende der sechziger Jahre wurde ein Modell der schwachen Wechselwirkung entwickelt, das heute noch zentraler Bestandteil des sogenannten Standardmodells der Elementarteilchenphysik ist. Es beruhte auf der Eichgruppe  $SU(2) \times U(1)$  und beschrieb sowohl die schwache als auch die elektromagnetische Wechselwirkung als Austausch von vier verschiedenen Feldquanten:  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  und Photon ( $\gamma$ ). Das Modell beinhaltet eine Vereinheitlichung von schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung! Die Austauschteilchen  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  waren massiv aufgrund des oben erwähnten Higgs-Mechanismus. Aus Kenntnis der damaligen experimentellen Daten konnten mit diesem Modell die Massen vorhergesagt werden. Sie sollten etwa hundertmal schwerer als das Proton sein. Zehn Jahre später (1983) wurden diese Teilchen am europäischen Zentrum (CERN) in Genf direkt nachgewiesen: ein Triumph des Modells und der zugrundeliegenden theoretischen Entwicklung. Elektromagnetische und schwache Wechselwirkung konnten in einer vereinheitlichten Theorie beschrieben werden. Eine weitere Vorhersage des Modells betrifft das sogenannte Higgs-Boson, das zum Mechanismus der Massenerzeugung für  $W^\pm$ ,  $Z$  vonnöten ist. Nach diesem Teilchen wird auch heute noch intensiv gesucht. Es gibt bisher indirekte Hinweise auf die Existenz dieses Teilchens,

der direkte Nachweis steht allerdings noch aus. Eventuell können Experimente am CERN diesen Nachweis in den nächsten beiden Jahren führen. Dies wäre die Krönung für die theoretischen Ideen und Konzepte (Eichprinzip und Renormierbarkeit), die zur Konstruktion des Modells führten.

### 13. Die große Vereinheitlichung (Grand Unification)

Zwischenzeitlich (Anfang der siebziger Jahre) wurde auch eine Theorie der starken Wechselwirkung entwickelt: die sogenannte Quantenchromodynamik (QCD). Experimente hatten gezeigt, dass Protonen und Neutronen (die Bestandteile der Atomkerne) selbst eine innere Struktur besaßen; sie waren aus sogenannten Quarks zusammengesetzt. Die QCD beschreibt die Wechselwirkungen dieser Quarks mit Hilfe von Austauscheteilchen (Gluonen) im Rahmen der Eichtheorie  $SU(3)$ . Die Gluonen sind masselos und haben wie alle Eichteilchen Spin 1. Quarks und Gluonen können nicht isoliert in der Natur auftreten, sondern nur in gebundenen Zuständen. Dies erklärt das sogenannte Confinement, eine besondere Eigenschaft der QCD, die wir hier nicht weiter diskutieren können.

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik war damit komplett. Die Wechselwirkungen folgen den Gesetzen der Eichgruppe  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ , beruhen auf dem Eichprinzip mit Austauscheteilchen von Spin 1. Drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen waren daher in mathematisch konsistenter Form im Rahmen der Quantenfeldtheorie beschrieben.

Könnte es sein, dass alle diese Wechselwirkungen gleichen Ursprungs sind? Dies ist Gegenstand der großen Vereinheitlichung (grand unified theory, GUT), über die erstmals Mitte der siebziger Jahre spekuliert wurde. In ihrer einfachsten Form basiert sie auf der Eichgruppe  $SU(5)$ , die  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  voll umfasst und starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung auf eine einzige fundamentale Kraft zurückführt. Wie schon bei Newton und Maxwell eine Reduktion der Zahl der Wechselwirkungen. Grand Unification ist heute eines der zentralen Forschungsgebiete der Elementarteilchenphysik. Vielfach wird vermutet, dass in dieser Synthese auch eine andere (mysteriöse) Symmetrie, die Supersymmetrie, eine Rolle spielt. Es bleibt zukünftigen Experimenten überlassen, diese Konzepte zu bestätigen oder zu widerlegen.

## 14. Gravitation heute

Wo ist denn nun die Gravitation geblieben? Während die anderen drei fundamentalen Wechselwirkungen konsistent im Rahmen von Quantenfeldtheorien beschrieben wurden, hat sich bei der Schwerkraft seit der Formulierung der allgemeinen Relativitätstheorie 1915 nicht allzu viel getan. Nun, die Gravitation ist anders. Würden wir ihr ein Austauschteilchen (Graviton) zuordnen, hätte das Spin 2. Im Rahmen einer Quantenfeldtheorie ist die Beschreibung höherer Spins (wie 2) unendlich viel schwieriger. Wir erinnern nur daran, dass selbst bei Spin 1 zusätzliche Symmetrien (Stichwort Eichprinzip) notwendig waren. Masselose Teilchen von Spin höher als zwei scheinen mit den Gesetzen der Quantenfeldtheorie unvereinbar. Spin 2 ist der Grenzfall: es erscheint möglich, allerdings nur für den Fall, dass alle Symmetrien der allgemeinen Relativitätstheorie (und wohl noch weitere) verfügbar sind. Bis zum heutigen Tag ist es noch nicht gelungen, eine konsistente Quantentheorie der Gravitation zu formulieren. In den bisherigen Versuchen ergaben sich immer nichtrenormierbare Theorien. Es ist dies das große Rätsel der theoretischen Physik, das über das 20. Jahrhundert hinaus bestehen blieb.

Das soll nicht bedeuten, dass die klassische Gravitationstheorie erfolglos ist. Da es keine Abschirmung gibt und die Schwerkraft immer anziehend wirkt, dominiert sie bei großen Abständen. Die vollständige Entwicklung des Universums kann damit erfolgreich beschrieben werden. Neue Phänomene, wie schwarze Löcher, wurden entdeckt und in das System der Astrophysik eingebaut. Brauchen wir eine Quantentheorie der Gravitation? Es gibt bisher keine empirischen Hinweise für die Notwendigkeit, Korrekturen an der allgemeinen Relativitätstheorie anzubringen. Die theoretischen Überlegungen sind daher komplett auf sich allein gestellt. Trotzdem ist es wichtig, über solche Phänomene nachzudenken. Da die Gravitation (im Vergleich zu den anderen Wechselwirkungen) so extrem schwach ist, werden Quanteneffekte nur bei extrem starken Feldern oder extrem kleinen Abständen relevant. Große Anstrengungen sind notwendig, um weitere Aspekte der Gravitation, wie etwa die Existenz von Gravitationswellen, zu testen.

In den letzten Jahrzehnten wurden allerdings einige neue Phänomene entdeckt, die nicht im Standardmodell enthalten sind und sich durch gravitationelle Effekte bemerkbar machen und die unter den Namen Dunkle Materie und Dunkle Energie bekannt wurden. Eventuell könnte ein besseres Verständnis dieser Effekte zum Fortschritt für eine Theorie der Gravitation führen.

## 15. Gravitation morgen?

Trotz aller Erfolge der klassischen Gravitation ist die fehlende Einbettung in die Quantentheorie ein Anlass zur Sorge. Ist das bisherige Bild der Schwerkraft korrekt oder müssen wir radikal umdenken? Wie korreliert die Gravitation mit den anderen drei fundamentalen Wechselwirkungen? Gibt es Ansätze, alle vier fundamentalen Wechselwirkungen in vereinheitlichter Form (in einer Art „Weltformel“) zu beschreiben? Ist das Bild von der Existenz eines fundamentalen Austauschteilchens (des Gravitons) korrekt? Wir wissen es nicht. Leider haben wir auch keine experimentellen Hinweise wie Quantenphysik und Gravitation vereinbart werden könnten. Die Fragestellung ist rein theoretisch. Viele glauben, dass Fortschritte im Verständnis der Schwerkraft über das Studium der Strahlung schwarzer Löcher möglich sind. Viel Fleiß und Schweiß wurde in diese Untersuchungen gesteckt, Fortschritte wurden erzielt, allerdings sind wir noch weit von einer Lösung entfernt.

Es fehlt eine umfassende Theorie. Da theoretische Konzepte (wie Eichtheorien) in den letzten Jahrzehnten sehr erfolgreich waren, wird dieser theoretische Zugang in Fachkreisen mit gewissem Optimismus angesehen. Dort gibt es nun einige Ansätze. Der vielversprechendste (und auch konventionellste) basiert auf der (Super)-String-Theorie, bei der die fundamentalen Felder als kleine ausgedehnte Objekte (Strings, Fäden) anzusehen sind (und nicht als punktförmige Teilchen). Die herkömmlichen Teilchen sind als Anregungszustände dieser „Strings“ zu sehen, wie die musikalischen Töne beim Anregen einer Saite auf einer Geige. Solche Theorien enthalten automatisch die Gravitation und Eichwechselwirkungen und könnten daher Grundlage für eine vereinheitlichte Theorie aller Kräfte und Naturerscheinungen sein.

Der Versuch der Konstruktion solcher Theorien führte allerdings zu einigen Überraschungen. Die mathematische Konsistenz der Theorie verlangt eine neue Symmetrie (bekannt unter dem Namen Supersymmetrie), sowie die Existenz zusätzlicher Raumdimensionen. Nur in  $d=10$  Raum-Zeit-Dimensionen (im Gegensatz zu unserer vertrauten  $d=4$  Raum-Zeit) können solche Theorien widerspruchsfrei formuliert werden! Mit rein theoretischen Folgerungen kann man die Dimensionalität der Raum-Zeit vorhersagen. Natürlich können die sechs zusätzlichen Raumdimensionen nicht makroskopisch groß sein wie die drei, die wir kennen. Vielmehr stellt man sich vor, dass sie mikroskopisch klein „aufgewickelt“ sind und sich damit

des direkten experimentellen Zugangs erwehren, eine Tatsache, die als Kompaktifizierung des Raums bezeichnet wird. Zusätzliche Raumdimensionen, Sie erinnern sich, waren schon von Kaluza und Klein in den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts untersucht worden. Hier kommt dieser Ansatz auf Umwegen zu uns zurück. Alle bekannten Wechselwirkungen können auf eine Kraft, die höherdimensionale Gravitation, zurückgeführt werden, die ultimative Vereinheitlichung aller Kräfte. Damit löst sich auch der formale Unterschied zwischen Eichwechselwirkungen und Gravitation auf. Beides sind verschiedene Seiten einer Medaille. Diese „Dualität“ zwischen Eichtheorie und Gravitation erfordert zusätzliche Dimensionen. Gravitation im Raum ist dual zu einer Eichtheorie auf dem Rande dieses Raumes, eine Situation, die mit dem Begriff Holographie charakterisiert werden kann. Dieses Bild ist auch ein geeigneter Ansatz zum Verständnis der Eigenschaften schwarzer Löcher. Wie dem auch sei, es bleibt noch ein weiter Weg bis zum Test dieser Ideen.

## 16. Ausblick

Alle bekannten Wechselwirkungen in der Natur können auf vier fundamentale Kräfte zurückgeführt werden. Drei dieser Wechselwirkungen, starke, schwache und elektromagnetische, werden konsistent im Rahmen von Quantenfeldtheorien beschrieben. Alle drei beruhen auf dem Eichprinzip mit den zugehörigen Austauscheteilchen. Quantenkorrekturen können verlässlich berechnet werden. Die strukturelle Ähnlichkeit der Theorien deutet auf einen gemeinsamen Ursprung hin, wie sie in Theorien der „Grand Unification“ untersucht werden.

Die am längsten bekannte fundamentale Kraft, die Gravitation, sperrt sich auch heute noch einer Einbettung in die Quantentheorie. Wichtige Aspekte sind nur unvollständig verstanden. Weitergehende Symmetrien, wie etwa Supersymmetrien, könnten wesentlich zu einer konsistenten Quantisierung beitragen. Ein vielversprechender Ansatz ist die Superstringtheorie, in der sowohl Gravitation als auch Eichwechselwirkungen eine einheitliche Beschreibung finden. Diese Diskussionen sind Gegenstand aktueller Forschung. Die weitere Entwicklung wird zeigen, ob dieser Ansatz von Erfolg gekrönt sein wird. Es besteht die Hoffnung, dass damit vielleicht auch die Rätsel über Dunkle Materie und Dunkle Energie gelöst werden können.