

Interner Bericht
DESY GD-80/01
Oktober 1980

DIE JÜNGSTE ENTWICKLUNG DES BILDES VON DER GRUNDSTRUKTUR DER MATERIE

von

H. Schopper

Eigentum der Property of	DESY	Bibliothek library
Zugang: Accessions:	20. OKT. 1980	
Leihfrist: Loan period:	7	Tage days

DESY behält sich alle Rechte für den Fall der Schutzrechtserteilung und für die wirtschaftliche Verwertung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen vor.

DESY reserves all rights for commercial use of information included in this report, especially in case of apply for or grant of patents.

"DIE VERANTWORTUNG FÜR DEN INHALT
DIESES INTERNEN BERICHTES LIEGT
AUSSCHLIESSLICH BEIM VERFASSER."

Die jüngste Entwicklung des Bildes von der Grundstruktur der Materie

Vortrag von Prof. Dr. H.Schopper; DESY, Hamburg,
auf der 111. Versammlung der Gesellschaft Deutscher
Naturforscher und Ärzte, Hamburg, am 22. Sept. 1980

Bevor ich den gegenwärtigen Entwicklungsstand der Elementarteilchenphysik darstelle, möchte ich wenigstens in einigen einleitenden Worten an den erkenntnistheoretischen Hintergrund unserer Wissenschaft erinnern, vor dem man die konkreten Ergebnisse, die ich später beschreiben werde, sehen muß. Unser Ziel ist es, den Ursprung und Aufbau der Materie zu verstehen, die den Träger der unbelebten und belebten Natur auf der Erde, aber auch im ganzen Kosmos, bildet. Wir kommen allerdings sofort in Schwierigkeiten, wenn wir fragen: 'was ist denn eigentlich Materie' und was heißt 'verstehen'? Lassen Sie mich C.F. von Weizsäcker¹⁾ zitieren: 'Die einzig sinnvolle Definition eines hinreichend generalisierten Materiebegriffs wäre wahrscheinlich, daß Materie das ist, was den Gesetzen der Physik gehorcht. Die Gesetze der Physik sind Gesetze für Vorhersagen entscheidbarer Alternativen. Wenn solche Vorhersagen über das Bewußtsein möglich sind, wird die Behauptung, daß das Bewußtsein Materie ist, fast auf eine Tautologie reduziert. Wenn wir in Obereinstimmung mit vielen modernen Elementarteilchenphysikern annehmen, daß es im Grunde nur eine Art von Materie gibt, würden wir weiter zu sagen versucht sein, daß jedwede Materie von derselben fundamentalen Natur wie das Bewußtsein ist.' Dieses Zitat zeigt sehr deutlich die ganze Breite der Problematik.

Ich kann den Zusammenhang zwischen Materie und Bewußtsein hier nicht weiter verfolgen, aber ich möchte noch eine Bemerkung darüber anschließen, was in der Physik unter 'Verstehen' gemeint ist. Im Empirismus, der herrschenden Selbstinterpretation der Wissenschaft, wird Erfahrung gesammelt, diese in mathematischen Theorien zusammengefaßt, und die Theorien ermöglichen Vorhersagen, die wieder experimentell überprüft wer-

den. 'Verstehen' ist also eng verknüpft mit der Möglichkeit von Vorhersagen. Hier stoßen wir auf das alte Problem, das wohl zuerst von Hume formuliert wurde: ein wissenschaftliches Gesetz kann bestenfalls Erfahrungen der Vergangenheit beschreiben, aber es läßt sich daraus nicht logisch ableiten, daß es auch für die Zukunft Gültigkeit hat. Dennoch ist es genau dieser Schluß, der ständig in der Wissenschaft gezogen wird und der letzten Endes auch die Voraussetzungen für ihre Anwendungen liefert. Mit diesem Problem, das daraufhin hinausläuft, wieso Naturgesetze und damit Wissenschaft als solche überhaupt möglich sind, haben sich Hume und Kant, und neuerdings Popper, Kuhn, von Weizsäcker und andere befaßt, ohne meiner Meinung nach eine befriedigende Antwort geben zu können. Es bleibt für mich ein Wunder, daß sich die verwirrende Vielfalt der Erscheinungen in einfachen mathematischen Gesetzen fassen läßt. Uns erscheint dies heute so selbstverständlich, daß wir das Staunen darüber verlernt haben. Ich möchte Sie aber daran erinnern, daß in anderen großen Kulturkreisen dies nicht als so selbstverständlich empfunden wurde. Als zum Beispiel die Jesuiten-Missionare zuerst nach China kamen und dort die Ansicht vertraten, daß die Verhaltensweise der Dinge Naturgesetzen unterliege, empfing man sie mit höflicher Skepsis. Wir wissen, sagten die Chinesen, daß ein menschlicher Gesetzgeber Gesetze machen und Strafen einführen kann, um ihre Befolgung durchzusetzen. Dies setze aber doch zweifellos das Verständnis der Regierten voraus, und es wäre schlecht einzusehen, daß Luft und Wasser, Holz und Steine ein solches Verständnis besäßen.

Es ist hier nicht der Ort, diese erkenntnistheoretischen Probleme weiter zu verfolgen. Ich möchte daher den pragmatischen Standpunkt einnehmen, bei dem man versucht, die Vielfalt der Naturerscheinungen auf einige wenige Bausteine und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte zurückzuführen. Das Hauptziel besteht dann darin, diese Bausteine zu identifizieren, ihre Eigenschaften zu bestimmen und sie in ein möglichst einfaches System einzuordnen. Im Laufe der letzten Jahrhunderte wurden dabei mehrere Stufen durchlaufen: von den Atomen, den Atomkernen und Elektronen, den Protonen und Neutronen sind wir heute bei den Quarks und Leptonen als letzten Bausteinen der Materie angelangt, wobei es bereits Spekulationen gibt, daß auch diese Teilchen aus noch kleineren Bausteinen zusammengesetzt sind. Wir stoßen hier auf folgende logische Schwierigkeit: entweder die Teil-

barkeit der Materie ist unendlich weiter fortsetzbar und es gibt keine letzten Bausteine. Oder wir finden letzte, unteilbare Teilchen, die keine innere Struktur besitzen, folglich keine räumliche Ausdehnung haben und mathematischen Punkten entsprechen. Wie soll es aber verständlich werden, daß mathematische Punkte eine Masse, elektrische Ladung, Spin usw. besitzen?

Für dieses scheinbare Paradoxon zeichnet sich eine Lösung ab, bei der es, wie bei allen großen Fortschritten in der Physik, darum geht, alte, liebgewordene Begriffe zugunsten neuer, meist abstrakterer, aufzugeben.

Die analytische Methode, die Naturbeschreibung auf wohldefinierte Bausteine, zwischen denen Kräfte wirken, zurückzuführen, funktioniert deshalb, weil diese Kräfte verhältnismäßig schwach sind, so daß durch ihre Wechselwirkung die Individualität der Bausteine nicht beeinträchtigt wird. Dies läßt sich quantitativ durch das Verhältnis R zwischen der Bindungsenergie und der Ruheenergie der Bausteine erfassen. Wie Tabelle 1 zeigt, ist dieses Verhältnis bei den Molekülen und auch noch bei den Atomkernen wesentlich kleiner als 1. Bei den Quarks, den Bestandteilen der Hadronen (z.B. Proton und Neutron) dagegen ist R von der Größenordnung 1, d.h. die Wechselwirkungsenergie wird vergleichbar mit der durch die Masse m der Teilchen bestimmten Ruheenergie mc^2 (c = Lichtgeschwindigkeit). Es gibt neuerdings einige Spekulationen, daß auch die Quarks aus noch kleineren Teilchen bestehen, und hierbei wird vermutet, daß R sehr viel größer als 1 ist. Die Wechselwirkung zwischen den Teilchen ist so stark geworden, daß sie gar nicht mehr als individuell getrennt feststellbare Bausteine angesehen werden können. Wenn man so will, ist eine prinzipielle Teilbarkeit zwar noch vorstellbar, praktisch aber kaum möglich. Es fragt sich, ob es dann noch Sinn hat, von den Teilchen und ihren Wechselwirkungen getrennt zu sprechen, oder ob nicht dafür ein neuer übergeordneter Begriff eingeführt werden muß.

Dafür scheint sich der Begriff des physikalischen Feldes anzubieten, der neuerdings eine immer größere Bedeutung gewinnt. Der Feldbegriff wurde im vergangenen Jahrhundert zur Beschreibung der elektromagnetischen Erscheinungen benutzt und ist uns in Form von Radio- oder Fernsehwellen

oder auch als Licht wohl vertraut. Merkwürdigerweise wird dabei verdrängt, daß es sich um ein sehr abstraktes Phänomen handelt. Seit wir wissen, daß es keinen Äther als Träger der elektromagnetischen Wellen gibt, müssen wir uns diese und die anderen noch zu beschreibenden Felder als besondere Eigenschaften des Raum-Zeit-Kontinuums vorstellen. Unser experimentelles und theoretisches Bemühen zielt also im wesentlichen darauf ab, die Struktur von Raum und Zeit zu erforschen.

Eines der wichtigsten theoretischen Hilfsmittel für eine Naturbeschreibung, das zunehmend an Bedeutung gewinnt, sind Symmetriebetrachtungen. Einige dieser Symmetrien sind sehr einfach. Es gibt positive und negative elektrische Ladungen. Welche der beiden unterschiedlichen Ladungen wir als positiv und welche als negativ bezeichnen, ist dabei gänzlich willkürlich und nur historisch bedingt. Wichtig ist es nur, daß sie sich beim Zusammentreffen neutralisieren. Da die Natur sozusagen nicht weiß, welche Nomenklatur wir gewählt haben, erwartet man, daß alle Naturgesetze gegen eine Vertauschung der Ladungsvorzeichen invariant sind, was auch in der Tat zutrifft. Man hat weiterhin festgestellt, daß es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen gibt, Materie - Antimaterie. Beim Zusammentreffen eines Teilchens mit seinem Antiteilchen vernichten sich die beiden, ihre Massen verschwinden und es bleibt nur Energie übrig. Auch hier ist es wieder uns überlassen, was wir als Teilchen (z.B. das Elektron) und was wir als Antiteilchen (das Positron) definieren, und es muß daher wieder erwartet werden, daß die Naturgesetze gegen eine Vertauschung aller Teilchen mit ihren Antiteilchen invariant sind. Es gibt aber sehr viel kompliziertere Symmetrie-Operationen, auf die ich aber hier nicht eingehen kann. Sie spielen eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung von Quantenfeldtheorien.

Lassen Sie mich nun einige kurze Bemerkungen über die Werkzeuge machen, mit deren Hilfe die Experimentalphysiker immer tiefer in die Materie vordringen. Wie ich oben erwähnte, stellt man fest, daß die Bindungsenergien immer größer werden, um so kleiner die Bestandteile sind. Um Strukturen aufzubrechen, um aber auch neue, schwerere Teilchen aus Energie nach der Formel $E = mc^2$ zu erzeugen, benötigt man immer höhere und stärker konzentrierte Energien. Dies läßt den unersättlichen Hunger der Elementarteilchenphysiker nach immer größeren Beschleunigern und Speicherringen

verstehen, und deren Entwicklung ist mit den Fortschritten der Elementarteilchenphysik untrennbar verbunden. Am erfolgreichsten waren in den letzten Jahren die Elektron-Positron-Speicherringe, in denen entgegengesetzt umlaufende Elektronen- und Positronenströme aufeinandertreffen. In der Tat stammen die meisten Resultate, auf die ich gleich zu sprechen komme, von solchen Anlagen. Hier in Hamburg besitzen wir bei DESY zwei solcher Maschinen, den Doppel-Speicherring DORIS (maximale Energie 2×5 GeV), der 1973 in Betrieb genommen wurde, und den in der Welt zur Zeit größten e^+e^- Speicherring PETRA²) (maximale Energie 2×19 GeV, Umfang 2.3 km), der seit zwei Jahren Ergebnisse liefert. Ähnliche Anlagen gibt es in den USA und der Sowjetunion. Wegen der großen Erfolge, die mit diesen Anlagen erzielt wurden und zur Beantwortung fundamentaler Fragestellungen, die gleich noch besprochen werden, wird am Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf ein analoger Speicherring, LEP, mit 30 km Umfang geplant, der 1986 zunächst Energien von 2×50 GeV liefern soll. Durch einen späteren Ausbau können diese über 2×100 GeV gebracht werden.

Um die bei dem Zusammenstoß von Elektronen und Positronen auftretenden Prozesse im einzelnen untersuchen zu können, bedarf es sehr komplizierter Meßgeräte, die von den Physikern erst erfunden und konstruiert werden müssen. Sowohl beim Beschleuniger- als auch beim Detektorbau müssen meist neue technische Wege beschritten werden, die einen beträchtlichen Erfindungsreichtum, technisches Geschick und Vielseitigkeit erfordern. Es würde eine eigene Darstellung erfordern, um diese reizvolle Entwicklung und ihre Bedeutung für den allgemeinen technischen Fortschritt zu schildern.

Lassen Sie mich nun zunächst die Ergebnisse zusammenfassen, soweit sie sich auf die Grundbausteine der Materie beziehen, während ich auf die Kräfte später zu sprechen komme. Es wurden eindeutige und unbezweifelbare Resultate gewonnen, die zeigen, daß die Hadronen (zu denen das Proton und das Neutron gehören) aus Quarks bestehen. Dabei gibt es zwei Gruppen von Hadronen, solche die aus drei Quarks aufgebaut sind (Baryonen, z.B. Proton und Neutron) und solche, die aus einem Quark und einem Antiquark bestehen (Mesonen) (Fig. 1). Andere Verbindungen von Quarks wurden nicht gefunden. Insofern ist die Quark-'Chemie' sehr einfach.

Die Frage ist nun, wie viele verschiedene Quarks es gibt. Zunächst fand man Hinweise für die Existenz von drei Quarks u, d und s. Im Jahre 1974 wurde ein viertes, das c-Quark, und 1978 ein fünftes, das b-Quark, gefunden. Diese Quarks lassen sich in ein Schema einordnen, das sie jeweils zu Paaren zusammenfaßt (Fig. 2). Die oben stehenden Quarks besitzen die elektrische Ladung $+2/3$ (in Einheiten der Elementarladung), die unten liegenden $-1/3$. Die Drittelzahligkeit der Ladung ist eine der besonderen Eigenschaften der Quarks. Innerhalb dieses Schemas findet man viele Gesetzmäßigkeiten. In gewisser Analogie zum periodischen System der Elemente bilden übereinanderstehende Quarks Familien. Auf Grund dieses Schemas muß die Existenz eines sechsten Quarks gefordert werden. Da einige theoretische Voraussagen für die Masse dieses Quarks im Energiebereich von PETRA lagen, hoffte man, mit dieser Anlage das sechste Quark zu finden. Bis zu den höchsten erreichten Energien konnte jedoch die Existenz dieses Quarks ausgeschlossen werden. Vermutlich ist dieses Teilchen schwerer als erwartet, und vielleicht kann es erst mit Hilfe von LEP gefunden werden.

Außer den Quarks, die der Kernkraft unterliegen, gibt es noch eine zweite Gruppe von Grundbausteinen der Materie, die Leptonen, die die Kernkraft nicht fühlen. Der bekannteste Vertreter ist das Elektron. Seit langer Zeit kennt man auch das Myon, das sich in allen Eigenschaften wie ein Elektron verhält, nur daß es etwa 200-mal schwerer ist. Beide Teilchen besitzen einen elektrisch neutralen Partner, die Neutrinos. Innerhalb der letzten Jahre wurde ein weiteres Lepton, ein superschweres Elektron sozusagen, das den Namen Tau bekam, gefunden und in seinen Eigenschaften untersucht. Auch dieses Teilchen benimmt sich wie ein Elektron, nur daß es etwa 1800-mal schwerer ist. Zu ihm gehört gleichfalls ein spezielles Neutrino. Die bisherigen Messungen sind damit verträglich, daß alle Neutrinos die Ruhemasse 0 besitzen. Es ist eine der gegenwärtig sehr interessanten Fragen, ob diese Teilchen eine kleine, aber doch endliche Masse besitzen. Abgesehen von den Neutrinos nimmt die Masse der Teilchen in dem gezeigten Schema von links nach rechts zu. Bisher ist es nicht gelungen, eine Gesetzmäßigkeit für die Massenfolgen zu finden. Daher ist eine einigermaßen verlässliche Vorhersage für die Masse der t-Quarks oder noch weiterer schwerer Teilchen nicht möglich.

Das Schema der Figur 2 zeigt die Teilchen, von denen wir vermuten, daß es sich um die Grundbausteine der Materie handelt. Dieses Schema tritt in gewissem Sinne an die Stelle des periodischen Systems der Elemente und hat den Vorteil, daß es viel einfacher ist. Die Strukturteilchen der Materie (Quarks und Leptonen) zeichnen sich durch folgende gemeinsame Eigenschaften aus: alle diese Teilchen sind Fermionen, d.h. sie besitzen den Spin $1/2$. Es gibt für ihre Anzahl Erhaltungssätze, d.h. bei Umwandlungsprozessen kann ihre Zahl nicht vermehrt (oder vermindert) werden, es sein denn durch Paarerzeugung (oder -vernichtung) von jeweils einem Teilchen und seinem Antiteilchen. Die einzige Ausnahme stellen Prozesse auf Grund der schwachen Wechselwirkung dar, bei denen aber nur übereinanderstehende Teilchenpaare ineinander umgewandelt werden können (Feinheiten, die darüber hinausgehen, können hier nicht betrachtet werden). Man findet viele weitere Gesetzmäßigkeiten und Symmetrien, wie z.B. daß die Summe der elektrischen Ladungen aller Strukturteilchen 0 ergibt.

Nun erhebt sich natürlich sofort eine Reihe von Fragen: Hat man alle Strukturteilchen erfaßt, oder gibt es noch weitere? Die bisherigen Untersuchungen bei PETRA haben allerdings keine Evidenz für noch schwerere Leptonen ergeben. Wenn es aber keine weiteren Leptonen oder Quarks (außer dem noch nicht gefundenen t-Quark) gibt, stellt sich die Frage, warum gerade je sechs Quarks und sechs Leptonen die Grundlage der Materie bilden. Warum nicht mehr, warum nicht weniger, warum aber auch so viele? Unverstanden bleibt auch das Problem, warum es diese zwei Gruppen von Teilchen, nämlich die Quarks und Leptonen gibt, die sich - soweit man bisher experimentell festgestellt hat - nicht ineinander umwandeln. Auf einige dieser Fragen werde ich weiter unten noch zu sprechen kommen.

Hier jedoch soll die naheliegende Vermutung diskutiert werden, daß die Quarks und Leptonen vielleicht doch nicht die letzten Bausteine sind, sondern daß es weitere, tiefere Schichten der Materie gibt. Prinzipiell müßte es möglich sein festzustellen, ob diese Teilchen eine innere Struktur besitzen, d.h. ob sie eine räumliche Ausdehnung aufweisen. Experimente an PETRA haben gezeigt, daß sich die Leptonen bis herab zu 10^{-16} cm wie mathematische Punkte verhalten, d.h. bis zu Abständen von einem Tausendstel des Protonenradius. Über die Quarks gibt es ähnliche Informationen noch nicht. Einer der wesentlichen Gründe für den Vorschlag

eines neuen Projektes bei DESY mit Namen HERA besteht gerade darin, mit Hilfe dieses neuen Speicherrings die Quarkstruktur zu untersuchen. Obwohl es noch keine experimentellen Hinweise dafür gibt, haben doch einige Theoretiker³⁾ versucht, die Quarks und Leptonen auf wenige gemeinsame Bausteine zurückzuführen. Ich möchte ein Beispiel einer solchen Spekulation hier kurz erwähnen, weil sie doch zeigt, wohin die weitere Entwicklung gehen könnte.

Der israelische Theoretiker Harari spekuliert, daß es nur zwei Grundbausteine der Materie gibt, die er Rishonen (hebräisch: die Ersten, die Ursprünglichen, arabisch: die Chefs) nennt. Er geht davon aus, daß es nur zwei solcher Grundbausteine gibt und bezeichnet sie mit den Buchstaben T und V für Tohu und Vabohu, wodurch nach der Genesis das Chaos vor der Schöpfung beschrieben wird. Das T-Rishon soll die Ladung $+1/3$ besitzen, während das V-Rishon elektrisch neutral ist. Beide Teilchen sind Fermionen, d.h. sie besitzen den Spin $1/2$ wie alle anderen Grundbausteine der Materie. Zu jedem Rishon gibt es wieder ein Antiteilchen \bar{T} bzw. \bar{V} . Die Leptonen und die Quarks bestehen nun jeweils aus 3 Rishonen. Bildet man alle möglichen Kombinationen für 3 Rishonen, so erhält man 8 Möglichkeiten (Tabelle 2). Das Elektron und das Neutrino zeichnen sich dadurch aus, daß sie aus je 3 gleichen Rishonen bestehen, während die Quarks gemischt zusammengesetzt sind, wobei jedes Quark auf 3-fache Weise kombiniert werden kann. Auf Grund dieses Unterschiedes könnte man verstehen, warum z.B. die Quarks eine, wie später zu erläutern ist, 3-fache Farbladung tragen. Die Singulett-Leptonen-Zustände besitzen keinen Freiheitsgrad für eine solche Farbladung. Es ist zu vermuten, daß die 'Reinheit' der Leptonen-Zustände auch die Ursache für ihre geringe Masse ist. Die Frage, wie die Massen zustande kommen und welches ihre Gesetzmäßigkeiten sind, bleibt allerdings auch in diesem Modell vorerst ungelöst.

Wie die Tabelle 2 zeigt, sind die einfachsten Zustände, die sich aus Rishonen zusammensetzen lassen, die Paare (e, ν_e) und (u, \bar{d}) . Die übrigen Leptonen- und Quarkpaare der Tabelle 2 werden dann als angeregte Zustände dieser energetisch am tiefsten liegenden interpretiert. Bemerkenswert ist auch der Umstand, daß die Kombination TTV (und Permutationen) die Ladung $+2/3$ ergibt, so daß dieser Zustand mit dem u-Quark identifiziert werden kann. Die Kombination TVV ergibt die Ladung $+1/3$ und muß daher mit dem

Anti-d-Quark verbunden werden. Hieraus könnten sich neue Aspekte für unser Verständnis von Materie und Antimaterie ergeben und vielleicht auch eine Begründung des Überwiegens von Materie im Kosmos. Das Rishonen-Modell würde auch auf natürliche Weise das Rätsel lösen, warum Elektronen und Protonen genau entgegengesetzt gleiche Ladungen tragen. Sie sind ja aus den gleichen Rishonen bzw. Antirishonen aufgebaut.

So faszinierend die Idee auch erscheint, die gesamte Komplexität der Materie auf zwei Grundbausteine zurückzuführen und damit auch die beiden Familien der Quarks und Leptonen zu vereinigen, so muß doch auf die eingangs erwähnte Problematik hingewiesen werden. Wir dürfen uns die Rishonen oder ähnliche Teilchen nicht als kleine Materie-Klötzchen vorstellen. Vermutlich sind die Bindungsenergien zwischen den Rishonen sehr viel größer als ihre Ruhe-Energie (s. Tabelle 1), so daß sie keine Individualität besitzen, sondern als abstrakte Gebilde angesehen werden müssen.

All dies deutet darauf hin, daß es nicht sinnvoll ist, die Bausteine der Materie unabhängig von den zwischen ihnen wirkenden Kräften zu betrachten, und wir wollen uns nun diesen zuwenden. Mit Hilfe der von Newton eingeführten Schwerkraft gelang es, die Bewegung der Himmelskörper auf ein einheitliches Kraftgesetz zurückzuführen. Ober das Zustandekommen dieser Kraft konnte Newton allerdings nichts aussagen. Er behandelte die Schwerkraft, wie wir heute sagen, als 'Fernkraft', d.h. sie wirkt direkt zwischen den zwei sich anziehenden Massen, während über ihre Ausbreitung nichts gesagt wird. Eine wesentliche Änderung des Kraftbegriffs trat mit der Entdeckung der elektromagnetischen Phänomene im vergangenen Jahrhundert ein, als man feststellte, daß es elektromagnetische Felder gibt, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, und die für die Kraftwirkungen zwischen zwei Ladungen verantwortlich sind. Es dauerte allerdings einige Zeit, bis man sich von der Vorstellung löste, daß es sich bei diesen Feldern um Wellenbewegungen eines Lichtäthers handelt. Wir wissen heute, daß die elektromagnetischen Felder als besondere Zustände des Raum-Zeit-Kontinuums verstanden werden müssen. Außer der Schwerkraft und der elektromagnetischen Kraft kennen wir heute zwei weitere Kräfte: die Kernkraft, die die Atomkerne zusammenhält und die schwache Kraft, die Anlaß zum radioaktiven Beta-Zerfall der Atomkerne gibt.

Es erhebt sich nun die Frage, warum es gerade diese vier Kräfte in der Natur gibt und wodurch sie sich unterscheiden, bzw. welches ihre Gemeinsamkeiten sind. Man glaubt heute, daß alle diese Wechselwirkungen letzten Endes durch abstrakte Felder beschrieben werden müssen. Im Bereich des Mikrokosmos spielen dabei Quanteneffekte eine maßgebende Rolle, und daher müssen diese Kräfte durch Quantentheorien beschrieben werden. In einem quantisierten Feld gibt es Feldquanten, das sind Teilchen, die zwischen zwei wechselwirkenden Strukturteilchen ausgetauscht werden können. Dadurch kommt die Kraftwirkung zustande, und ich möchte diese Art von Teilchen daher 'Bindeteilchen' nennen. Im Gegensatz zu den Strukturteilchen, bei denen es sich um Fermionen handelt, besitzen die Feldquanten ganzzahligen Spin, d.h. es sind Bosonen.

Am bekanntesten ist das Feldquant der elektromagnetischen Wechselwirkung, das Photon, das keine Masse besitzt und den Spin 1 trägt. Ein Unterschied der verschiedenen Wechselwirkungen besteht darin, daß sie verschiedene Feldquanten besitzen. Diejenigen für die starke Wechselwirkung tragen den Namen 'Gluon'. Der Nachweis für die Existenz dieser Gluonen ist das bisher wichtigste experimentelle Ergebnis, das bei PETRA erzielt wurde²⁾. Der Spin der Gluonen könnte zu 1 bestimmt werden, und sie ähneln den Photonen auch darin, daß sie keine Ruhemasse besitzen.

Für die schwache Wechselwirkung gab es bis vor kurzem nur eine phänomenologische Theorie, die auf Fermi zurückgeht. Durch eine neue Theorie, über die gleich noch zu sprechen sein wird, wird vorhergesagt, daß es drei Feldquanten mit dem Spin 1 und drei elektrische Ladungen gibt, W^+ , W^- , Z^0 . Sie unterscheiden sich von den anderen Feldquanten dadurch, daß sie sehr schwer sind. Die Vorhersagen für ihre Massen liegen bei etwa 80-90 Protonenmassen. Die bisher verfügbaren Beschleunigerenergien reichen nicht aus, um solche Teilchen zu erzeugen, und ihre Erzeugung und die Untersuchung ihrer Eigenschaften ist eines der Hauptziele, die mit dem neuen europäischen Beschleuniger LEP gelöst werden sollen. Bei der Gravitation ist es bisher nicht gelungen, Quanteneffekte nachzuweisen, da diese Wechselwirkung so schwach ist, daß sie sich im Labor nicht geeignet untersuchen läßt. Wenn es ein Feldquant, das

Graviton, gibt, dann sollte es den Spin 2 haben.

Die zweite Größe, die neben den Feldquanten eine bestimmte Wechselwirkung charakterisiert, ist die Stärke der Kopplung zwischen einem Strukturteilchen und dem Feld. Das Maß für die Stärke der elektromagnetischen Kraft ist die elektrische Elementarladung e bzw. die daraus abgeleitete dimensionslose Größe, die Feinstrukturkonstante $\alpha = e^2/\hbar c$.

In den letzten Jahren haben viele Experimente Hinweise dafür erbracht, daß die starke Wechselwirkung durch eine Theorie beschrieben wird, die in Analogie zur Quantenelektrodynamik QED entwickelt wurde, und die als Quantenchromodynamik QCD bezeichnet wird. Der Name hat folgenden Ursprung: Im Gegensatz zur elektrischen Ladung soll es bei der starken Kraft drei verschiedene Ladungssorten und zu jeder davon eine 'negative', d.h. eine Antiladung geben. Eine Neutralisierung kann nun, wie im elektrischen Falle, durch Ladung und zugehörige Antiladung, erfolgen. Neu kommt hier jedoch die Möglichkeit hinzu, daß die drei Ladungen zusammen (ohne Beteiligung einer Antiladung) auch einen neutralen Zustand ergeben können (Fig. 3). Dies entspricht dem bekannten Ergebnis bei der Mischung der Farben, wo je drei Grundfarben zusammen weiß ergeben können. Man unterscheidet daher die drei Ladungen der starken Kraft durch Farbbezeichnungen, z.B. rot, grün und blau, mit Antiladungen antirot usw. Träger dieser Farb Ladungen und damit Quellen der starken Kraft sind die Quarks, während die Leptonen keine Farbladung besitzen. Eine Erklärung dafür konnte im Rahmen des oben erwähnten Rishon-Modells angedeutet werden.

Nun hat man etwas sehr Merkwürdiges festgestellt: es ist bisher nicht gelungen, einzelne Farb Ladungen zu isolieren. Alle Teilchen, die bisher als freie Teilchen erzeugt werden konnten, entsprechen im Rahmen der QCD 'weißen', d.h. neutralen Farb Ladungszuständen. Einzelne Quarks und Gluonen, die Farb Ladungen tragen, konnten nicht isoliert werden. Man bezeichnet dieses Phänomen als 'Einschließung' (confinement). Wir wissen bis heute nicht, ob es sich dabei um ein strenges Naturgesetz handelt, oder ob die verfügbaren Energien noch nicht ausreichen, um freie Farb Ladungen zu erzeugen.

Zum Schluß bleibt noch die Frage zu behandeln, warum es gerade vier Wechselwirkungen in der Natur gibt, und ob die Hoffnung besteht, sie zu einer einzigen Urkraft zu vereinigen. Die Zusammenfassung der elektrischen und magnetischen Erscheinungen, die zunächst nichts miteinander zu tun hatten in der Maxwell'schen Theorie war einer der großen Erfolge der Physik des 19. Jahrhunderts. Sind weitere solche Schritte der Zusammenfügung von Kräften möglich? Glashow, Salam und Weinberg konnten eine Theorie entwickeln, für die sie 1979 den Nobelpreis erhielten, in der eine weitgehende Vereinigung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung erzielt wurde. In dieser Theorie wurde die Existenz eines neutralen schweren Feldquants Z^0 (sozusagen ein schweres Photon, 'schweres Licht') vorausgesagt, dessen Existenz 1973 bei CERN erstmalig, wenn auch nur indirekt, nachgewiesen werden konnte. Die Erzeugung dieses Teilchens und der beiden geladenen Feldquanten W^+ , W^- (s. Tab. 3) und die Bestimmung ihrer Massen wird vermutlich erstmalig mit LEP möglich sein. Bis dahin muß eine endgültige Bestätigung dieser Theorie und die Klärung ihrer detaillierten Struktur wohl warten.

Trotzdem kann man jetzt schon fragen, ob es nicht möglich erscheint, auch die starke Kraft und später vielleicht sogar die Gravitation in eine einheitliche Feldtheorie mit einzubeziehen.

Um dies näher zu erläutern, ist in Fig. 4 die bisherige und eine mögliche künftige Entwicklung schematisch dargestellt. Elektrizität, Magnetismus und Optik wurden in der Maxwell'schen Theorie zusammengefaßt auf Grund von Experimenten, die sich bei klassischen Abständen (Größenordnung cm oder m) abspielten. Die zweite klassische Feldtheorie, die am Beginn dieses Jahrhunderts bekannt war, wurde von Einstein für die Gravitation entwickelt. Er versuchte vergebens, die zwei bekannten Kräfte zu vereinigen. Beim Vordringen in atomare Dimensionen ($\sim 10^{-8}$ cm) mußte die Maxwell-Theorie in Form der QED quantisiert werden und man muß erwarten, daß auch die anderen beiden inzwischen entdeckten Kräfte (die starke und die schwache, s. Tab. 3) durch Quantenfeldtheorien beschrieben werden müssen. Für die starke Kraft könnte dies die oben skizzierte QCD sein.

Die ursprünglich von Fermi entwickelte Theorie für die schwache Wechselwirkung konnte durch Glashow-Salam-Weinberg zur Quanten-Flavour-Dynamik QFD vereinigt werden. Eine wesentliche Voraussetzung für diese Vereinigung ist die durch Experimente gestützte Vermutung, daß sich die Kopplungsstärken dieser beiden Kräfte bei Abständen von etwa 10^{-17} cm angleichen.

Solche Abstände werden durch LEP der Beobachtung zugänglich werden. Man vermutet weiterhin, daß sich die Kopplungsstärke der starken Kraft bei Abständen von der Größenordnung 10^{-29} cm an die Kopplungsstärke der QFD angleicht, so daß man in der sogenannten 'grand unification' drei der Kräfte zusammenfassen könnte.

Als letzter Schritt bleibt die Einbeziehung der Gravitation. Ihre Stärke ist so gering, daß eine Angleichung der Kopplungsstärken erst bei etwa 10^{-34} cm erfolgen dürfte. Gegenwärtig ist nicht abzusehen, wie man experimentell zu solchen Dimensionen vordringen könnte. Formal ist es jedoch bemerkenswert, daß es sich bei der QCD, der QFD und der Quantengeodynamik, der quantisierten Gravitation, um sogenannte nicht-abelsche Eichfeldtheorien handelt, d.h. in ihren Symmetrieeigenschaften weisen diese Theorien starke Verwandtschaften aus. Vielleicht ist es daher doch eines Tages möglich, alle vier Kräfte in einer Urkraft zu vereinigen, ein Versuch, den Heisenberg in seiner Weltformel vor 25 Jahren zu früh gewagt hatte.

Die Frage, ob alle Kraftwirkungen auf eine gemeinsame Urkraft zurückgeführt werden können, ist dabei mehr als ein romantischer Traum. Jedes abstrakte Feld ist verknüpft mit einer speziellen Struktur des Raum-Zeit-Kontinuums. Es scheint nur schwer verständlich, daß mehrere solcher Strukturen gleichzeitig nebeneinander bestehen. Es ist begrifflich sicher einfacher, wenn alle Wechselwirkungen aus einer einzigen solchen Struktur abgeleitet werden können. Wenn man sich die Natur ansieht, so stellt man ferner fest, daß die Existenz der Materie so wie wir sie kennen, sehr empfindlich von den Eigenschaften aller Wechselwirkungen abhängt. Änderungen in der Stärke einer Kraft oder das vollständige Abschalten einer Wechselwirkung würde die Materie zum Kollaps bringen. Es ist schwer einzusehen, daß dieses exakte Zusammenspiel der Kräfte ein Zufall sein und nicht auf einem tieferen Zusammenhang beruhen sollte. Schließlich könnte eine einheitliche Feldtheorie vielleicht dazu führen, das eingangs erwähnte Hume'sche Grundproblem, warum Naturgesetze überhaupt möglich sind, einer Lösung näher zu bringen.

Tabelle 1

Verbindung	Bausteine	$R = \frac{\text{Bindungsenergie}/c^2}{\text{Ruhemasse der Bausteine}}$
Molekül	Atome	10^{-10}
Atomkerne	Hadronen (p,n, Λ)	10^{-2}
Hadronen	Quarks	~ 1
Quarks	Rishonen ?	$\gg 1$

Tabelle 2 Bausteine der Quarks und Leptonen

Rishonen		T(Q = 1/3)	V(Q = 0)
Leptonen		Quarks	
e^+	TTT	u	TTV, TVT, VTT
ν_e	VVV	\bar{d}	TVV, VTV, VVT
keine Farbladung		3 Farbladungen	
kleine Masse		große Masse	

Zitate:

1. C.F. v. Weizsäcker, Nova Acta Leopoldina, Band 37/2, No. 207
2. H. Schopper, Naturwissenschaften 67, 161 (1980)
3. H. Harari, Phys. Lett. 86B,83 (1979); SLAC-PUB-2310 (1979)
 H. Lipkin, Physics Reports 8C, 173 (1973)
 J.C. Pati and A. Salam, Phys. Rev. D10,275 (1974)
 S.L. Glashow, Harvard Preprint HUTP-77/A005
 Y. Ne'eman, Phys. Lett. 82B,69 (1979)
 M.A. Shupe, Phys. Lett. 86B,87 (1979)
 M. Veltmann, Intern. Symposium on Lepton and Photon Interactions, FNAL, August 1979
 C.K. Jørgensen, Naturwiss. 67,35 (1980)

Tabelle 3

<u>Kraft</u>	<u>Feldquanten</u>				<u>Kopplung</u>	
	Name	Ladung	Masse	Spin	Stärke	Bemerkung
starke	Gluon	'Farbe'	0	1	$\alpha_s \sim 1$	abhängig von Energie, 'confinement'
elektr.-magn.	Photon	-	0	1	$\alpha = 1/137$	
schwache	W^+, W^-, Z^0	Leptonlad.	$\sim 80 m_p$?	1 ?	$\sim 10^{-5}$	} vergleichbar bei ~ 300 GeV
Gravitation	Graviton ?	Masse	0	2	$\sim 10^{-38}$	

Bildunterschriften:

Fig. 1 Quark-'Chemie'.
Nur zwei Arten von Quark-Verbindungen wurden in der Natur gefunden. Mesonen (Quark-Antiquark) und Baryonen (3 Quarks). Teilchen, die aus mehr Quarks bestehen, wurden nicht entdeckt.

Fig. 2 Die Strukturteilchen der Materie.
Die Teilchen beider Familien sind Fermionen (Spin 1/2) und es gelten Erhaltungssätze für ihre Anzahl. Teilchen der oberen und unteren Zeile unterscheiden sich um eine Einheit der elektrischen Ladung.
Dieses Schema tritt an die Stelle des periodischen Systems der Elemente.

Fig. 3 Vergleich der Ladungen für die elektromagnetische und die starke Kraft.
Für erstere gibt es nur eine Ladung (mit der dazugehörigen Antiladung), im letzteren Fall existieren 3 Ladungen (mit ihren Antiladungen). Entsprechend gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten neutralé, 'weiße' Zustände herzustellen.

Fig. 4 Die Vereinigung der Kräfte zu einer Urkraft.
Das Zusammenfügen von je zwei Kräften erscheint bei Abständen möglich (in den Halbkreisen angegeben), bei denen die Kopplungsstärken vergleichbar werden.

QUARK-MODELL

Mesonen

q \bar{q}



Baryonen

q q q



Fig. 1





