

Asymptotische Freiheit - Nobelpreis für Physik 2004

Gerhard Ecker

Der diesjährige Nobelpreis für Physik wurde zu gleichen Teilen den amerikanischen Teilchenphysikern David J. Gross, H. David Politzer und Frank Wilczek für ihre Entdeckung der asymptotischen Freiheit in der Theorie der starken Wechselwirkung [1,2] zuerkannt. In der Begründung der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften heißt es weiter, dass diese Entdeckung zu einer neuen Theorie der starken Wechselwirkung führte, der Quantenchromodynamik (QCD). Mit ihrer Entdeckung haben die Preisträger "die Physik einen Schritt weiter gebracht auf dem Weg zu einer vereinheitlichten Theorie aller fundamentalen Wechselwirkungen einschließlich der Gravitation."

Die asymptotische Freiheit gehört heute zum täglichen Brot des Teilchenphysikers. Um die Bedeutung der Entdeckung der drei Laureaten richtig würdigen zu können, ist es notwendig, in der Geschichte der Teilchenphysik zurückzublättern und das physikalische Umfeld der 60er und frühen 70er Jahre zu betrachten.

Die Quantenelektrodynamik (QED) machte zwar sehr präzise Voraussagen, aber die physikalische Bedeutung der dabei verwendeten Methode, der "Renormierung", war nicht allgemein akzeptiert. Einige Pioniere der Quantenfeldtheorie (QFT) wie Dirac und Wigner, aber auch andere Experten kritisierten, dass die Renormierung "die Unendlichkeiten nur unter den Teppich kehrt" und daher das ganze Konzept einer lokalen QFT fragwürdig war. Zur Beschreibung der schwachen Wechselwirkung, z.B. des β -Zerfalls, stand die Fermi-Theorie zur Verfügung, mit der viele experimentelle Ergebnisse befriedigend erklärt werden konnten. Allerdings war diese Theorie nur in der Born-Näherung sinnvoll. Korrekturen höherer Ordnung waren nicht berechenbar. Auch dieser Umstand war der Reputation der QFT nicht unbedingt zuträglich.

Die größte Verwirrung herrschte aber auf dem Gebiet der starken Wechselwirkung. Mit der rasch wachsenden Zahl der Hadronen (Mesonen und Baryonen) wurde immer klarer, dass diese Teilchen alles andere als elementar waren. Die in den frühen 60er Jahren sehr einflussreiche Bootstrap-Philosophie erklärte alle Hadronen für gleichberechtigt (nuclear democracy) und setzte alle Hoffnungen in eine reine S(treu)-Matrix-Theorie. Ein anderer Zugang zum Verständnis der Hadronen wurde vor allem von Murray Gell-Mann vertreten (Nobelpreis 1969). Seine Strategie bestand darin, aus quantenfeldtheoretischen Modellen gewisse algebraische Relationen zu abstrahieren, die zugrunde liegende QFT aber dann nicht weiter Ernst zu nehmen. Diese Methodik war zwar durchaus erfolgreich (Quark-Modell, Stromalgebra), tiefere Einsichten in die Dynamik der starken Wechselwirkung blieben ihr aber ebenso versagt wie der S-Matrix-Theorie.

In der 2. Hälfte der 60er Jahre kam der entscheidende Hinweis (Friedman, Kendall, Taylor, Nobelpreis 1990). In der so ge-

nannten tief inelastischen Streuung von Leptonen (Elektronen, Neutrinos, Myonen) an Nukleonen zeigten die Streuquerschnitte bei hohen Energien und großen Transversalimpulsen eine immer einfachere Struktur (Skalenverhalten). Unter diesen Bedingungen erscheinen die Nukleonen wie eine Ansammlung von freien Teilchen, die von Feynman als Partonen bezeichnet wurden. Offensichtliche Kandidaten für diese Partonen waren die Quarks von Gell-Mann und Zweig. Damit war aber das Dilemma für eine QFT der starken Wechselwirkung scheinbar unlösbar geworden: wieso konnten die Quarks auch mit den höchsten zur Verfügung stehenden Energien nicht isoliert werden, wo sie sich doch andererseits in der tief inelastischen Streuung wie quasifreie Teilchen verhalten? So wird verständlich, dass Gell-Mann noch 1973 darauf bestand, dass die Quarks rein mathematische Konstrukte seien, denen keine physikalische Realität zukomme.

Anfang der 1970er Jahre wurde mit den Renormierungsgruppengleichungen in der modernen Formulierung von Wilson (Nobelpreis 1982), Callan und Symanzik ein neues Instrument zur Untersuchung des Skalenverhaltens entwickelt. Die entscheidende Größe in diesem Zusammenhang ist die so genannte Beta-Funktion, die angibt, wie sich die Kopplungskonstante bei einer Änderung der Renormierungsskala verhält. Für die Untersuchung des Skalenverhaltens reicht es aus, das Vorzeichen der Beta-Funktion bei kleinen Werten der Kopplungskonstante zu kennen. Ist das Vorzeichen positiv, so wächst die effektive Kopplungsstärke logarithmisch mit der Energie, während bei einem negativen Vorzeichen die Kopplung entsprechend abfällt und asymptotisch verschwindet (ultraviolette Stabilität, später asymptotische Freiheit genannt).

Die QED ist ultraviolett instabil, die effektive Ladung wächst mit der Energie oder, etwas anschaulicher, sie nimmt mit wachsendem Abstand zu einer anderen Ladung ab. Dieses Verhalten war seit langem bekannt: im Vakuum der QED gibt es durch Quantenfluktuationen virtuelle Elektron-Positron-Paare, die die realen Ladungen abschirmen. Je weiter zwei Ladungen voneinander entfernt sind, desto mehr werden sie gegenseitig abgeschirmt und die effektiven Ladungen nehmen daher mit wachsendem Abstand ab.

Dieses Phänomen ist nicht auf die QED beschränkt. In einer Arbeit, die im März 1973, kaum zwei Monate vor den Nobelpreisarbeiten [1,2], bei Physical Review eingereicht wurde [3], konnte A. Zee zeigen, dass die Ladungsabschirmung in einer großen Klasse von QFT auftritt. Im Abstract dieser Arbeit heißt es: "On the basis of this result we conjecture that there are no asymptotically free quantum field theories in four dimensions." Zur gleichen Zeit arbeiteten Gross und S. Coleman an demselben Problem, mit der deklarierten Absicht [4] zu zeigen, dass eine renormierbare QFT nicht asymptotisch frei sein kann. Zu dieser Zeit war die Klasse der renormierbaren QFT gerade um die nichtabelschen Eichtheorien (Yang-Mills-Theorien) erweitert worden ('t Hooft, Veltman, Nobelpreis 1999). Auch die experimentellen Hinweise mehrten sich, dass die elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkungen

Univ.Prof. Dr. Gerhard Ecker, Institut für theoretische Physik, Universität Wien (eMail: gerhard.ecker@univie.ac.at), forscht auf dem Gebiet Quantenfeldtheorie.

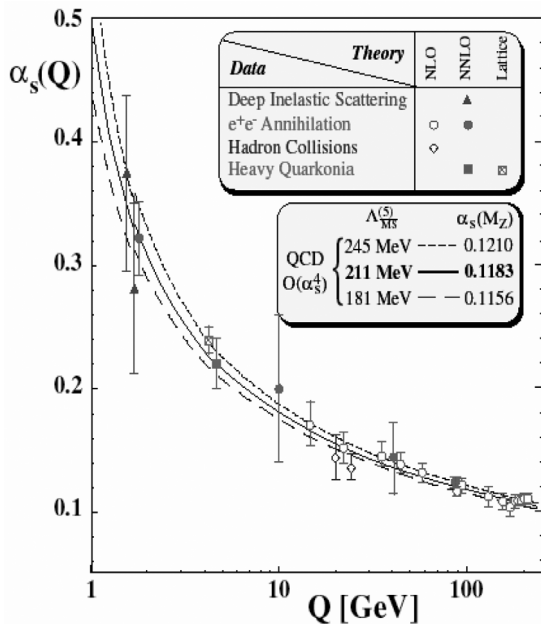


Abb. 1: Energieabhängigkeit der starken Feinstrukturkonstante α_s .

durch eine vereinheitlichte Yang-Mills-Theorie beschrieben werden können. Obwohl Yang und Mills ihre Theorie ursprünglich auf die starke Wechselwirkung anwenden wollten, war diese Möglichkeit aus verschiedenen guten Gründen sehr bald wieder aufgegeben worden. Um dieses "Schlupfloch" in der Argumentation zur vermeintlichen Unverträglichkeit von renormierbarer QFT und asymptotischer Freiheit zu schließen, wurden die Doktoranden Politzer (Univ. Harvard, Betreuer Coleman) und Wilczek (Univ. Princeton, Betreuer Gross) beauftragt, die Beta-Funktion für nichtabelsche Eichtheorien zu berechnen. Der Rest ist Physikgeschichte.

Warum ist die Beta-Funktion einer Yang-Mills-Theorie negativ? Mit den heutigen Hilfsmitteln lässt sich diese Frage in einer guten Stunde in allen Details beantworten. Es genügt, die Divergenzstruktur einiger Ein-Schleifen-Diagramme zu untersuchen, um das Ergebnis herzuleiten. In gewisser Weise lag die asymptotische Freiheit schon immer unter dem Teppich versteckt, unter den die Divergenzen angeblich gekehrt worden waren. Ein physikalisches Verständnis des Phänomens erhält man, wenn man das Vakuum einer QFT als polarisierbares Medium interpretiert [5].

Im Gegensatz zu einem üblichen Medium ist das Produkt aus Dielektrizitätskonstante ϵ und Permeabilität μ in einer relativistischen Theorie immer gleich eins. Eine "normale" QFT wie die QED hat wegen der Ladungsabschirmung $\epsilon > 1$ und das Vakuum kann daher auch als Diamagnet ($\mu < 1$) angesehen werden. In einer nichtabelschen Theorie wie der QCD tragen aber nicht nur die Materieteilchen (Quarks in diesem Fall) eine Ladung (die so genannte Farbladung, die natürlich nichts mit der optischen Farbe zu tun hat), sondern auch die Träger der Wechselwirkung, im Fall der QCD die "farbigen" Gluonen. Dagegen sind die Photonen bekanntlich ungeladen. Die Gluonen, die wie die Photonen Spin 1 haben, wirken wie permanente magnetische Farbdipole und machen das Vakuum zu einem Paramagneten ($\mu > 1$). Tatsächlich wirken die Farbladungsabschirmung der Quarks und der Paramagnetismus der Gluonen in entgegengesetzter Richtung. Entscheidend für das Vorzeichen der Beta-Funktion und damit für die Existenz der asymptotischen Freiheit in einer Eichtheorie mit Eichgruppe

SU(N_C) ist das Vorzeichen des Ausdrucks $2 N_F - 11 N_C$: für drei Farben ($N_C = 3$) ist die Theorie asymptotisch frei, wenn es nicht mehr als 16 Quarksorten gibt ($N_F = 16$). Da die Natur offenbar mit 6 Quarksorten auskommt, ist die QCD asymptotisch frei.

Damit war die QFT zur Beschreibung aller mikroskopischen Wechselwirkungen wie der Phönix aus der Asche wiedergeboren. Seit nunmehr 30 Jahren hat das Standardmodell der starken und elektroschwachen Wechselwirkungen praktisch alle experimentellen Tests mit Bravour bestanden. In Abbildung 1 ist der von der asymptotischen Freiheit vorhergesagte Abfall der starken Feinstrukturkonstante α_s mit der Energie wiedergegeben. Der vom Nobelpreiskomitee gewürdigte Schritt zu einer großen Vereinheitlichung lässt sich an Abbildung 2 ablesen. Das linke Bild zeigt, dass mit den derzeit bekannten Teilchen eine Vereinheitlichung unwahrscheinlich ist. Die Supersymmetrie ist eine theoretisch attraktive Variante, die "große Wüste" mit Leben zu erfüllen, um eine Vereinheitlichung bei etwa 10^{16} GeV zu ermöglichen, wie aus dem rechten Bild ersichtlich wird.

Die Kehrseite der asymptotischen Freiheit wird in der blumigen Sprache der Teilchenphysiker oft als "infrarote Sklaverei" bezeichnet. Bei kleinen Energien oder großen Distanzen steigt die effektive Kopplung an, wie aus Abbildung 1 hervorgeht. Viele theoretische Argumente und vor allem der experimentelle Befund sprechen dafür, dass Quarks und Gluonen permanent in den Hadronen eingesperrt sind (Confinement). Im Gegensatz zur asymptotischen Freiheit ist das Confinement bisher noch nicht aus den Grundgleichungen der QCD abgeleitet worden. Die universelle Verwendungsfähigkeit der QFT zeigt sich aber auch darin, dass wir heute selbst für offensichtlich gebundene Systeme wie Pionen und Nukleonen so genannte effektive Quantenfeldtheorien mit großem Erfolg bei niedrigen Energien verwenden. Aber das ist eine andere Geschichte.

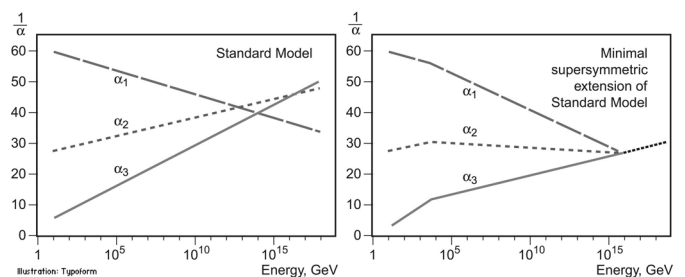


Abb. 2: Inverse Quadrate der fundamentalen Kopplungskonstanten in Abhängigkeit von der Energie: α_1, α_2 charakterisieren die elektroschwache Wechselwirkung und $\alpha_3 = \alpha_s$ die starke Quark-Gluon-Wechselwirkung.

Literatur

- [1] D.J. Gross and F. Wilczek, Ultraviolet behavior of non-Abelian gauge theories, *Phys. Rev. Letters* 30 (1973) 1343
- [2] H.D. Politzer, Reliable perturbative results for strong interactions?, *Phys. Rev. Letters* 30 (1973) 1346
- [3] A. Zee, Study of the renormalization group for small coupling constants, *Phys. Rev. D* 7 (1973) 3630
- [4] D.J. Gross, 25 years of asymptotic freedom, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 74 (1999) 426
- [5] N.K. Nielsen, Asymptotic freedom as a spin effect, *Am. J. Phys.* 49 (1981) 1171