

Addendum

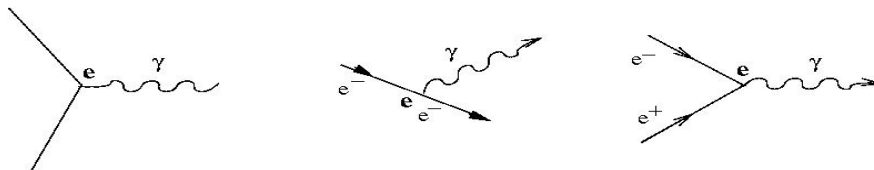
Lokale Wechselwirkung

Die Quantenfeldtheorien des Standardmodells sind relativistische Theorien, d.h. sie genügen den Bedingungen der Speziellen Relativitätstheorie: die Auswirkungen eines Ereignisses pflanzen sich mit einer Geschwindigkeit kleiner als die des Lichts fort. Es gibt daher in diesen Theorien keine instantane Fernwirkung, sondern nur eine Wirkung von Punkt zu Punkt, die sich mit weniger als Lichtgeschwindigkeit zwischen zwei Teilchen fortpflanzt. Man nennt das „lokale Wechselwirkung“ (weil sie nicht fern, sondern durch Fortpflanzung vom Punkt zum Nachbarpunkt Punkt stattfindet).

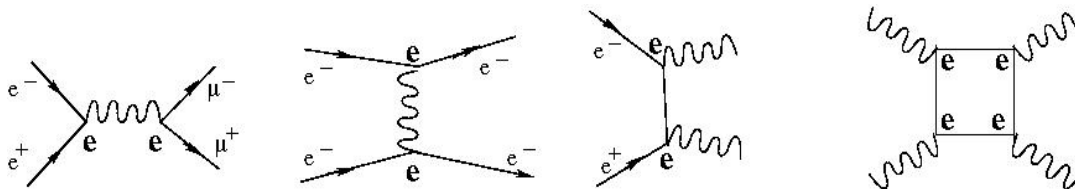
Die Fortpflanzung der Wechselwirkung zwischen 2 Materieteilchen (Quarks und Leptonen) muss von jemandem getragen werden: Die sog. Vermittlerteilchen, γ für die elektromagnetische, W^\pm und Z für die schwache und G für die starke Wechselwirkung. Die Vermittlerteilchen können auch mit einander Wechselwirken, direkt, oder wiederum mittels Materieteilchen.

Die Stärke der Quantenfeldtheorien des Standardmodells ist, dass sie alle mögliche Prozesse zwischen Teilchen mit wenige „Grundbausteine“ wiedergeben können. Diese Bausteine können graphisch dargestellt werden und haben präzise mathematische Korrespondenten.

So ist, z.B., der Grundbaustein für die elektromagnetische Wechselwirkung der sog. „Vertex“, ein Mercedes-Stern von dem ein Bein (die Wellenlinie) ein Photon und die andere 2 Beine (die durchgehende Linie) geladene Teilchen darstellen, z.B. ein durchlaufendes Elektron, das ein Photon ausstrahlt, oder ein annihilierendes Elektron-Positron Paar in einem virtuellen Photon (je nach de, ob die Pfeile durchlaufen oder sich treffen) aber auch Quarks oder W^\pm -Bosonen:



Hier ist e die elementare Ladung, die die elektromagnetische Wechselwirkung kennzeichnet. Sie wird *elektromagnetische „Kopplungskonstante“* genannt, weil sie die lokale Wechselwirkung, die Ankopplung des elektromagnetisches Feldes an einem geladenen Teilchen an einem Punkt (den Vertex), anzeigt. Die Linien stellen i.A. „virtuelle“ Teilchen dar, die verschwindend kurze Zeit leben und die Energie-Impuls-Relation *nicht* erfüllen. Das hängt von der Stellung der Linien im Graph eines Prozesses ab: So beschreiben die Linien zwischen zwei Vertizen (sog. „Propagatoren“) virtuelle, die äußere Linien dagegen reelle Teilchen, wie in folgenden reellen Prozessen:

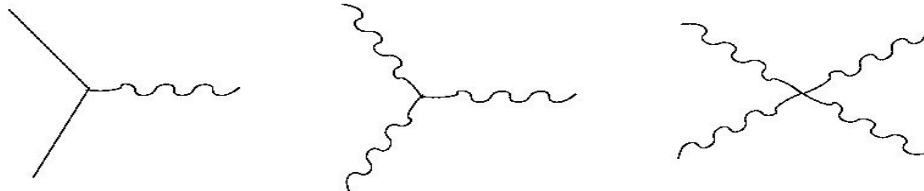


Diese Beispiele von Graphen beschreiben:

- Elektron-Positron Annihilation mit Erzeugung eines Muon-Antimuon Paares via eines virtuellen Photons;
- Einen Beitrag zum Elektron-Elektron Coulomb Abstoßung durch Vermittlung (Austausch) eines virtuellen Photons;
- Die Elektron-Positron-Annihilation in 2 Photonen mit Hilfe (Austausch) eines virtuellen Elektrons (diese ist die eigentlich korrekte Darstellung des Prozesses (d) auf Seite 29);
- Und die Photon-Photon-Streuung, die durch virtuelle Elektronen ermöglicht wird.

Diese Prozesse bekommt man durch „Zusammenkleben“ von Grundbausteine (unter Berücksichtigung der Erhaltungssätze und anderer Regel aus der Theorie – z.B., dass die durchgehende Linie nicht unterbrochen werden darf – Ladungserhaltung): Die erste 3 Graphen enthalten 2 Vertizen und beschreiben Effekte proportional mit e^2 (sie heißen deshalb: „2. Ordnung“), der letzte hat 4 Vertizen (ist 4. Ordnung). Die Kopplungskonstante ist klein, deshalb sind die Effekte höherer Ordnung kleiner, als die niedriger Ordnung.

Die Schwache und die Starke Wechselwirkung beruhen auch auf lokaler Wechselwirkung, die allerdings nicht nur zwischen der Materieteilchen und der Vermittlerteilchen sondern auch direkt zwischen den Vermittlerteilchen selber stattfindet:



Für die schwache Wechselwirkung sind die durchgezogene Linie Quarks oder Leptonen, und die Wellenlinien W^\pm und Z , für die starke sind diese Quarks, bzw. Gluonen. Die Kopplungskonstanten entsprechen Ladungen (z.B., die sog. *Farbe-Ladung* für die Quarks), die allerdings komplizierter sind, als die elektrische.

Die Stärke der Wechselwirkungen ist sehr verschieden und sie hängt nicht nur von der Größe der Kopplungskonstante, sondern auch vom Abstand ab:

- Die *starke Wechselwirkung* ist von Größenordnung 1 innerhalb der Hadronen, wenn aber die Quarks sich weiter als die Abmessung eines Hadrons entfernen bricht die Verbindung zwischen ihnen ab, um ein Quark-Antiquark Paar zu erzeugen. Dieser Prozess wird „*Hadronisierung*“ genannt, und ist der Gegenstück zum *Confinement*: Die Quarks können nicht aus der Teilchen „befreit“ werden, die Kräfte zwischen ihnen sind so stark, dass, wenn man die Hadronen auseinander brechen will, es einfacher für die Quarks ist, ein Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen und damit ein neues Hadron zu bilden, als aus einander zu gehen.

Die *Hadronen* sind

Baryonen: 3-Quark (oder 3-Antiquark)-Systeme, und

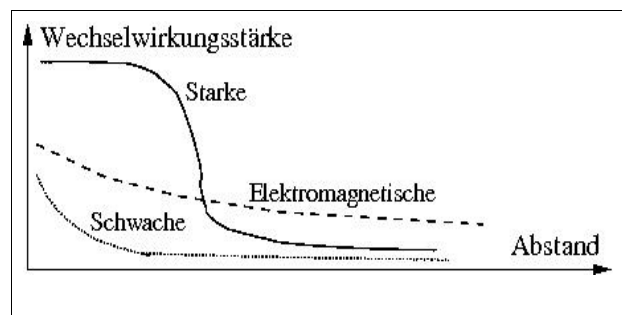
Mesonen: Quark-Antiquark-Systeme.

In beiden Typen von Quark-Systemen kompensiert sich die *Farbladung* (so wie die elektrische in Atomen), so dass die Hadronen *farbneutral* sind. Wenn Hadronen *sehr nah* zu einander kommen, spüren sie aber noch eine schwächere Rest-farbwechselwirkung, welche reicht um Kerne zusammenzuhalten, trotz der Coulomb Abstoßung. Die starke Wechselwirkung beherrscht daher die nukleare und subnukleare Abstände.

- Die elektromagnetische Wechselwirkung ist bei der typischen Abständen im Kern etwa 10-100 mal schwächer als die starke, sie reicht aber viel weiter als die letztere. Sie beherrscht deshalb die atomare Abstände, und, als Restwechselwirkung, die molekulare Abstände.

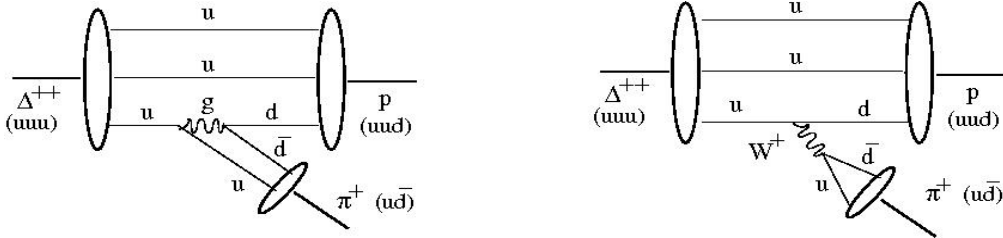
- Die schwache Wechselwirkung ist kurzreichweitig aber bei *sehr kleinen* Abstände mit der elektromagnetischen vergleichbar. Sie bewirkt Quarkumwandlungen und ist damit am Kernprozessen und Teilchen-Zerfällen beteiligt.

Hier ist eine *sehr* skizzenhafte Darstellung der Verhältnisse – nicht *zu* ernst zu nehmen!



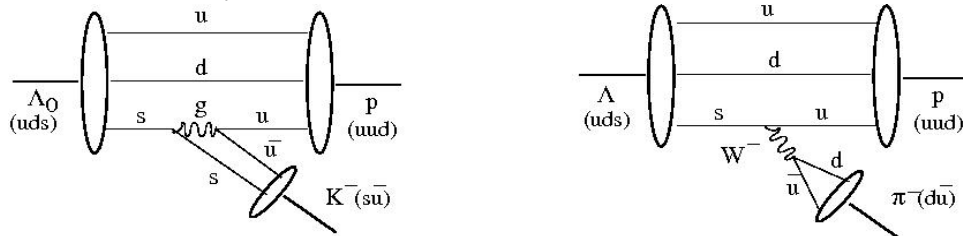
Prozesse mit Hadronen werden auf Quark-Prozessen reduziert. Die Bindung der Quarks in der Hadronen ist sehr stark und wird durch Gluonen erzielt. Sie kann nicht als einfaches Prozess beschrieben werden und wird deshalb vor allem empirisch bestimmt.

Beispiel 1, der Zerfall eines Δ^{++} Baryons in einem p und einem π^+ -Meson:



Das erste Diagramm beschreibt einen starken Prozess (von einem Gluon vermittelt), der sehr schnell verläuft (10^{-23} sec). Im Prinzip könnte der Prozess auch nach dem zweiten Diagramm laufen (Quarkumwandlung durch W^+ Boson), dieser ist aber ein schwacher, unvergleichbar langsamer Prozess, der nicht mehr zum Tragen kommt (typische Zeitspanne $10^{-8} - 10^{-12} \text{ sec}$, besonderes Fall: Neutron Zerfall, Lebensdauer 10^3 sec , wegen der kleinen $n - p$ Massendifferenz).

Beispiel 2, das Zerfall eines Λ_0 Baryons in einem p und einem Meson:



Hier kann der starke Prozess (linkes Diagramm) wegen Energie-Impuls-Erhaltung nicht stattfinden, weil das leichteste Meson mit einem „strange“ Quark, das K Meson ($493,7 \text{ MeV}/c^2$) zu schwer ist (die Masse des Λ_0 Baryons, $1115,6 \text{ MeV}/c^2$, ist kleiner als die Summe der Massen von p und K). Jetzt kommt der schwache Prozess (rechtes Diagramm) zum tragen (10^{-10} sec).

Übung 17: Beschreibe das β -Zerfall des Neutrons mit Hilfe von Quark-Diagrammen wie oben.

Übung 18: Überlege, wie die Streuung $e^- + p \rightarrow e^- + p$ (das Analogon zum Prozess f) auf Seite 29) verlaufen könnte auf der Basis von Photon-Austausch zwischen Elektron und den Quarks in p .

Zum Schluss noch ein Wort zur „Grand Unified Theory“. Die Wechselwirkungsstärke hängt von der Energie der Prozesse ab. Man verdeutlicht dies in dem man *energieabhängige Kopplungsstärken* einführt. Das Verhalten, das diese Kopplungsstärken bei jetzt erreichbaren Energien ($1 - 10 \text{ TeV}$) zeigen, suggeriert, dass sie bei den Urknall-Energien gleich sein könnten. Das bedeutet, dass bei diesen Energien alle drei Wechselwirkungen vereinigt sein könnten und durch einer vereinheitlichen Theorie beschrieben (GUT).

Baryonen und Mesonen-Tabellen, Listen von Quarkumwandlungsprozessen, Zerfallprozessen, etc findet man in Internet, z.B. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/HBASE/particles/hadron.html#c6>. Eine gute, schöne, interactive Beschreibung ist im <http://www.particleadventure.org/> zu finden.

