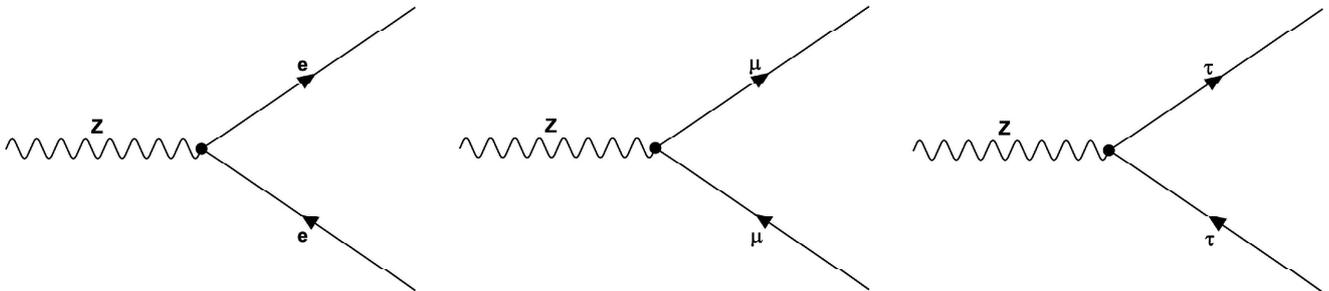


Ergebnisse der LEP-Forschung: Die Leptonenuniversalität

Bereits vor den Experimenten am Large Electron-Positron Collider (LEP) gab es deutliche Hinweise darauf, dass die elektrisch geladenen Leptonen die gleichen elektrischen, schwachen und starken Ladungen besitzen. Bei den LEP-Messungen hoffte man, diese Annahme bestätigen zu können.



Die Auswertung der experimentellen Daten hat ergeben, dass die Umwandlungskanäle $Z \rightarrow e^- + e^+$, $Z \rightarrow \mu^- + \mu^+$ und $Z \rightarrow \tau^- + \tau^+$ (siehe obige Feynman-Diagramme) mit gleicher Wahrscheinlichkeit realisiert werden. Jeder der drei Umwandlungskanäle wurde in etwa 3,4 Prozent der insgesamt beobachteten Z-Umwandlungen realisiert. Das Z-Teilchen koppelt sowohl an die elektrische als auch an die schwache Ladung. Die Wahrscheinlichkeit der Erzeugung bestimmter Anti-/Teilchen bei einer Umwandlung des Z-Teilchens ist also abhängig von deren elektrischer und schwacher Ladungszahl.

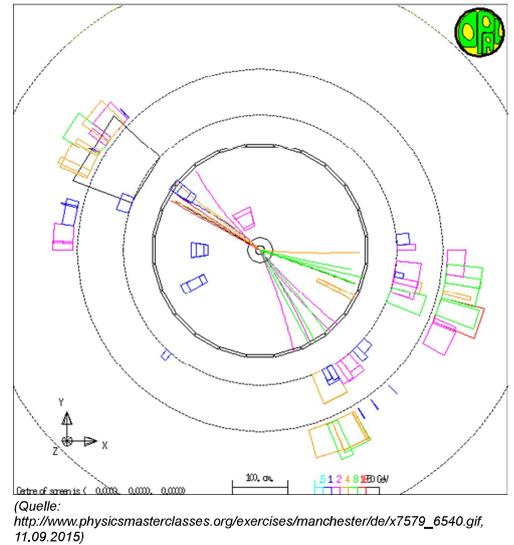
Bereits vor den LEP-Experimenten war bekannt, dass Elektronen, Myonen und Tauonen dieselbe elektrische Ladung besitzen und farbneutral bezüglich der starken Ladung sind (gleiches gilt für die entsprechenden Anti-Teilchen). Die Tatsache, dass die drei Umwandlungskanäle des Z-Teilchens in geladene Leptonen mit gleicher Häufigkeit beobachtet wurden, lässt den Schluss zu, dass Elektronen, Myonen und Tauonen ebenfalls dieselbe schwache Ladung besitzen. Gleiches gilt entsprechend auch für die zugehörigen Anti-Teilchen.

Elektronen, Myonen und Tauonen verhalten sich demnach bei Wechselwirkungen identisch. Gleiches gilt entsprechend für die zugehörigen Anti-Teilchen. Dieser Sachverhalt wird als *Leptonenuniversalität* bezeichnet. Der einzige Unterschied besteht in den Massen der Anti-/Teilchen. Da diese jedoch sehr klein gegenüber der Masse des Z-Teilchens sind, spielte dieser Aspekt bei den Experimenten am LEP keine Rolle. Die Bestätigung der Leptonenuniversalität ist eines der wichtigsten Ergebnisse der LEP-Forschung.

Ergebnisse der LEP-Forschung:

Bestimmung des starken Kopplungsparameters

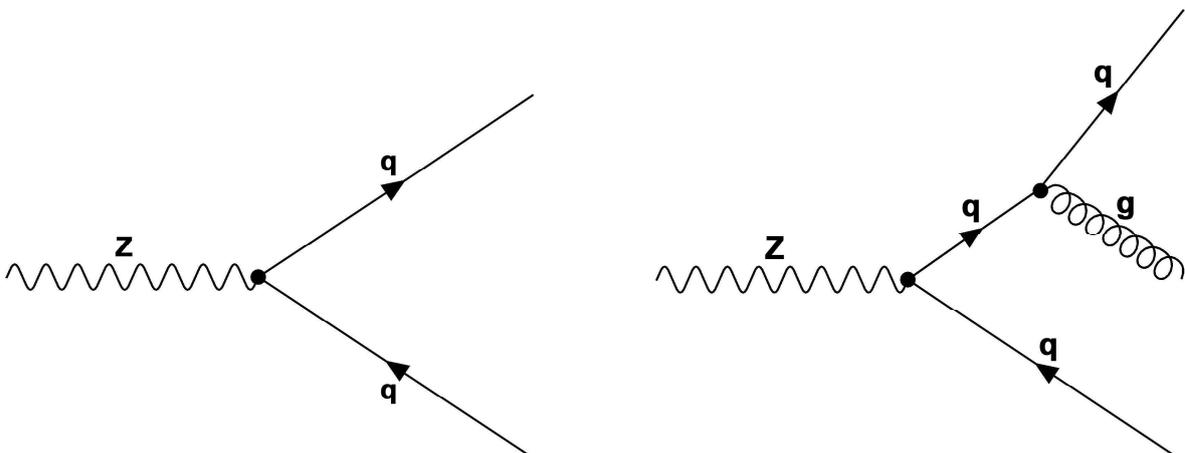
Eines der Forschungsziele am Large Electron-Positron Collider (LEP) war die Bestimmung des starken Kopplungsparameters α_s . Dieser Parameter ist unter anderem ein Maß dafür, mit welchen Wahrscheinlichkeiten Prozesse der starken Wechselwirkung stattfinden. α_s ist abhängig von der Energie der Anti-/Teilchen, die an der Wechselwirkung beteiligt sind. Das Standardmodell der Teilchenphysik sagt den funktionellen Zusammenhang zwischen dem Kopplungsparameter und der Energie voraus, nicht jedoch dessen tatsächlichen Wert bei bestimmten Energien. Kennt man den Wert von α_s bei einer bestimmten Energie, lassen sich die Werte für andere Energien aus den theoretischen Vorhersagen berechnen. Um zu überprüfen, ob diese Vorhersagen stimmen, muss man den Wert des Kopplungsparameters bei verschiedenen Energien experimentell bestimmen. Anschließend kann man diese Werte mit Hilfe der vorausgesagten Energieabhängigkeit auf eine Referenzenergie umrechnen und untereinander vergleichen. Als Referenzenergie wird üblicherweise die Energie des Z-Teilchens ($E_Z=91,2$ GeV) gewählt. Sofern die Vorhersagen des Standardmodells stimmen, sollten sich aus unterschiedlichen Experimenten bzw. durch unterschiedliche Auswertungsmethoden dieselben Werte für $\alpha_s(E_Z)$ ergeben.



Da nur Anti-/Quarks und Gluonen eine starke Ladung besitzen, kann der Wert von α_s nur durch die Untersuchung von Prozessen bestimmt werden, bei denen diese Anti-/Teilchen beteiligt sind

Bei den Umwandlungen der am LEP erzeugten Z-Teilchen entstanden häufig Quark-Anti-Quark-Paare. Gelegentlich kam es vor, dass eines der entstandenen Anti-/Quarks ein Gluon abstrahlte. Dieser Prozess wird auch als *Gluon-Bremsstrahlung* bezeichnet. Das emittierte Gluon bildete genau wie das Quark und das Anti-/Quark einen Jet. Bei Ereignissen mit Gluon-Bremsstrahlung waren im Eventdisplay also drei anstatt zwei Jets zu erkennen. Ein solches Ereignis ist in der obigen Abbildung des OPAL-Eventdisplays zu sehen.

Im Feynman-Diagramm unten links ist die Umwandlung eines Z-Teilchens in ein Quark-Anti-Quark-Paar dargestellt. Das rechte Feynman-Diagramm zeigt den selben Prozess nur mit der anschließenden Emission eines Gluons durch eines der Anti-/Quarks.



Das rechte Feynman-Diagramm unterscheidet sich vom linken Diagramm durch den zusätzlichen Vertex, an dem das Gluon abgestrahlt wird. Jeder zusätzliche Vertex in einem Feynman-Diagramm beeinflusst die Wahrscheinlichkeit für die Realisierung des Prozesses. Pro Vertex tritt bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit ein zusätzlicher Faktor auf, der direkt proportional zum Kopplungsparameter der am Vertex stattfindenden Wechselwirkung ist. In dem hier betrachteten Fall ist dieser Faktor also proportional zum starken Kopplungsparameter α_s .

Zwischen den Wahrscheinlichkeiten (P) für 2-Jet- und 3-Jet-Ereignisse besteht also folgender Zusammenhang:

$$P(3\text{-Jet}) = k \cdot \alpha_s(E_Z) \cdot P(2\text{-Jet})$$

Daraus folgt:

$$\alpha_s(E_Z) = \frac{P(3\text{-Jet})}{P(2\text{-Jet}) \cdot k}$$

In die Konstante k gehen zum Beispiel die gemessenen Energien des abstrahlenden Anti-/Quarks und des Gluons ein. Diese Energien lassen sich aus der Summe der Energien der in den entstandenen Jets enthaltenen Anti-/Teilchen bestimmen. Weiterhin gehen eine Vielzahl komplizierter Korrekturen ein, die sich aus dem Standardmodell ergeben.

Bei den Experimenten am LEP wurden Millionen von Z-Umwandlungen in Anti-/Quarks beobachtet. Aufgrund dieser großen Zahl kann aus den beobachteten relativen Häufigkeiten von 2-Jet- und 3-Jet-Ereignissen sehr genau auf die zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeiten geschlossen werden. Die Bestimmung des Verhältnisses der Anzahl der 3-Jet-Ereignisse zu der Anzahl der 2-Jet-Ereignisse ermöglichte also eine sehr präzise Berechnung des starken Kopplungsparameters.

Durch Vergleich mit den Werten des starken Kopplungsparameters, die bei vorangegangenen Experimenten bzw. am LEP durch andere Untersuchungsmethoden gewonnen wurden, konnte die vom Standardmodell vorhergesagte Energieabhängigkeit bestätigt werden.