

Große Vereinheitlichung

Eine weitere Möglichkeit, das Standardmodell auf eine noch elegantere und noch umfassendere Theorie zurückzuführen, ist die große Vereinheitlichung. Das Ziel ist dabei, alle Wechselwirkungen der Elementarteilchen – also die elektromagnetische Kraft, die schwache und die starke Kernkraft – auf einen gemeinsamen Ursprung zurückzuführen.

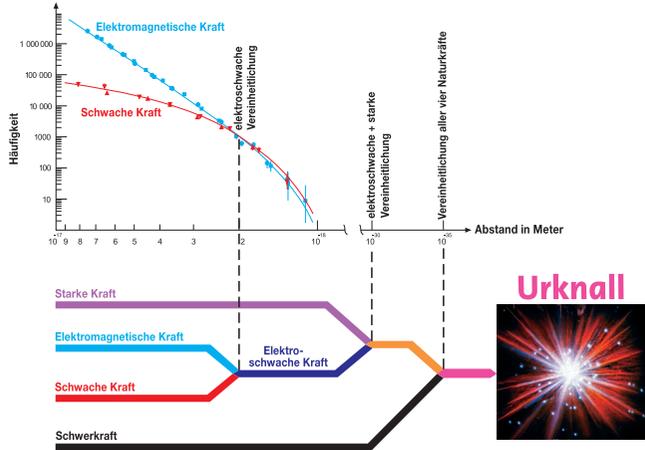


Illustration der großen Vereinheitlichung. Heutige Teilchendetektoren erreichen eine Auflösung von $\sim 10^{-18}$ m und dringen damit in den Bereich vor, in dem der gemeinsame Ursprung der elektromagnetischen und der schwachen Kraft zu Tage tritt. Höhere Energiebereiche sind hauptsächlich durch theoretische Überlegungen zugänglich. (DESY Pressearchiv)

Experimentelle Konsequenzen neuer Physik

Ein wichtiger Aspekt von theoretischen Entwicklungen ist die experimentelle Überprüfung. Dazu müssen für Szenarien jenseits des Standardmodells die experimentell beobachtbaren Konsequenzen wie Teilchentypen, deren Massen, Reaktionsarten und -raten, analysiert werden. Umgekehrt beziehen die theoretischen Teilchenphysiker am MPIK alle existierenden Ergebnisse von Messungen an Teilchenbeschleunigern, Experimenten zur Neutrinophysik und zur Dunklen Materie, aus der Astroteilchenphysik und Kosmologie in ihre Studien ein. Aus der engen Wechselwirkung zwischen Theorie und Experiment ergibt sich, wie gut spezifische Theorien mit den Daten verträglich sind, und umgekehrt ergeben sich daraus experimentelle Suchstrategien.

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Dr.h.c. Manfred Lindner
Tel: 06221 516800
E-Mail: manfred.lindner@mpi-hd.mpg.de

Dr. Werner Rodejohann
Tel: 06221 516824
E-Mail: werner.rodejohann@mpi-hd.mpg.de

Dr. Florian Goertz
Tel: 06221 516822
E-Mail: florian.goertz@mpi-hd.mpg.de



Theoretische Elementarteilchen-Physik jenseits des Standardmodells

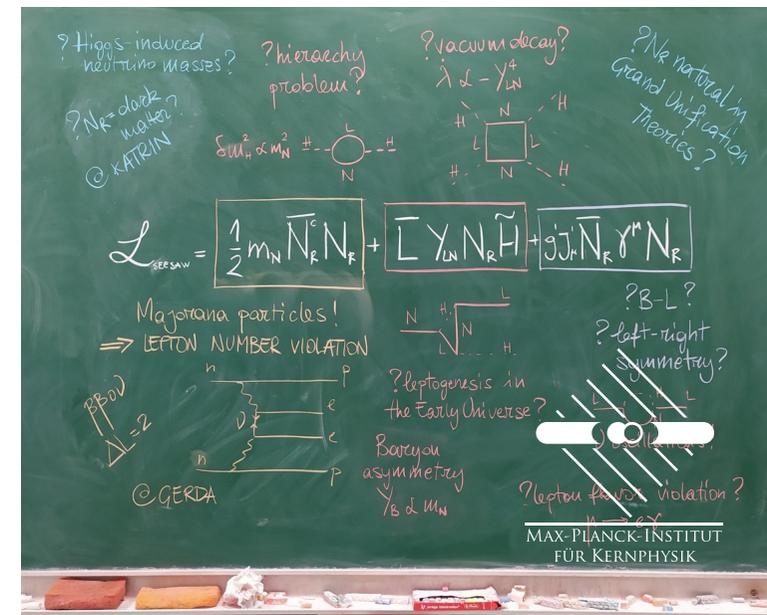


Saupfercheckweg 1
69117 Heidelberg

www.mpi-hd.mpg.de



Das Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) ist eines von 86 Instituten und Forschungseinrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft. Das MPIK betreibt experimentelle und theoretische Grundlagenforschung auf den Gebieten der Astroteilchenphysik und der Quantendynamik.



Theoretische Elementarteilchen-Physik jenseits des Standardmodells

Den Geheimnissen der Materie auf der Spur

Das „Standardmodell“ – die etablierte Theorie zur Beschreibung des Verhaltens der Elementarteilchen – stößt zunehmend an seine Grenzen. Neue Theorien sollen in der Lage sein, die fundamentalen Naturkräfte auf einen gemeinsamen Ursprung zurückzuführen, die außergewöhnlichen Eigenschaften der Neutrinos und des Higgs-Bosons zu erklären und die Existenz Dunkler Materie im Universum zu erklären, sodass wir letztendlich verstehen, was die Welt im Innersten zusammenhält.

Das Standardmodell

Das in den 1970er Jahren entwickelte Standardmodell der Elementarteilchenphysik beschreibt mit beeindruckender Genauigkeit das Verhalten aller bekannten Elementarteilchen und führt es im Formalismus der Quantenfeldtheorie auf relativ einfache mathematische Gesetzmäßigkeiten zurück.

Eine besonders große Rolle spielen dabei Symmetriegruppen. Eine Symmetriegruppe ist eine bestimmte Klasse mathematischer Transformationen, welche die resultierenden beobachtbaren Phänomene unverändert lassen.

Neben den Materieteilchen, die aus drei Generationen von Quarks und Leptonen gebildet werden, beinhaltet das Standardmodell noch die Eichbosonen (Photon, Gluonen, W- und Z-Boson), welche die Wechselwirkungen zwischen den Quarks und Leptonen übertragen. Eine elektromagnetische Wechselwirkung zweier Teilchen z.B. lässt sich als Austausch eines Photons auffassen. Das wohl mysteriöseste Teilchen im Standardmodell ist jedoch das Higgs-Boson, das ein Kondensat bildet, welches das gesamte Universum erfüllt – ähnlich wie die Cooper-Paare in einem Supraleiter. Die Bewegung aller anderen Teilchen wird durch dieses Kondensat beeinflusst; dadurch erhalten die Teilchen ihre Masse. Diesen Vorgang bezeichnet man als spontane Symmetriebrechung.

Trotz seiner Erfolge lässt das Standardmodell einige Fragen offen, z. B.:

- Lässt sich die mathematische Struktur des Standardmodells noch weiter vereinfachen?
- Wie kann man die Gravitation einbeziehen?

- Warum haben Modellparameter (z. B. Teilchenmassen) bestimmte Muster? Lassen sich ihre Werte vorhersagen?
- Wie werden Neutrino-Massen erzeugt?
- Woraus besteht die Dunkle Materie im Universum?
- Warum gibt es im Universum nicht genauso viel Antimaterie wie Materie?

Das Higgs-Boson und das Hierarchie-Problem

Die Entdeckung des Higgs-Bosons am Large Hadron Collider am CERN im Jahr 2012 komplettiert das Standardmodell. Dennoch bleiben viele Fragen bezüglich seiner Eigenschaften offen. Eine davon ist das sogenannte Hierarchie-Problem, also die Frage, warum seine Masse viele Größenordnungen kleiner ist als die der neuen Physik. Lösungen des Hierarchieproblems bieten z.B. Modelle mit Supersymmetrie, in denen zu jedem Teilchen ein Superpartner existiert, mit konformer Symmetrie, in denen keine fundamentale Massenskala existiert, oder Szenarien, in denen das Higgs ein durch eine neue starke Wechselwirkung gebundenes zusammengesetztes Teilchen ist. Solche Ideen werden am MPIK untersucht und weiterentwickelt.

Weil viele der offenen Fragen des Standardmodells mit dem Higgs-Sektor zusammenhängen, öffnet die Möglichkeit, seine Eigenschaften nun direkt in Collider-Experimenten zu überprüfen, ein einzigartiges Fenster zu einer fundamentalen Theorie. Unter den wichtigsten, bisher noch nicht experimentell getesteten Eigenschaften in diesem Zusammenhang sind die Wechselwirkungen zwischen den Higgs-Bosonen untereinander, welche z. B. bedeutend für das Verständnis der Materie-Antimaterie-Asymmetrie des Universums oder der tieferen Dynamik hinter dem Higgs-Sektor selbst sind.

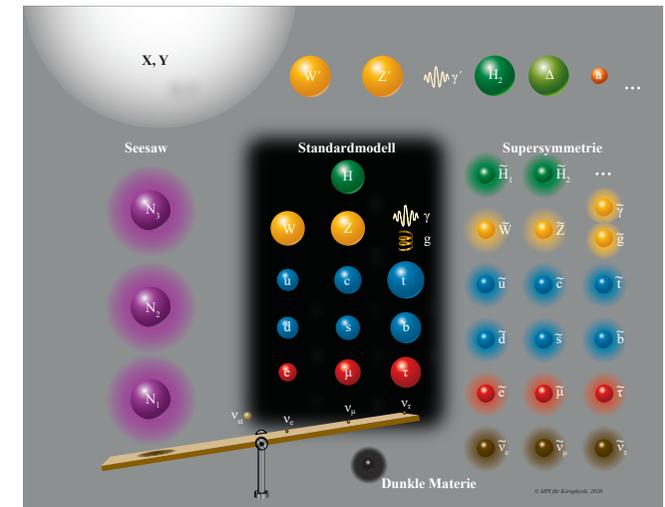
Neutrinos und neue Physik

Im Gegensatz zur Voraussage des Standardmodells besitzen Neutrinos eine von Null verschiedene Masse. Dies hat die Beobachtung von Neutrino-Oszillationen, also der Umwandlung einer Sorte Neutrinos in eine andere, zweifelsfrei gezeigt. Dieser Beweis für Physik jenseits des Standardmodells impliziert vielerlei Fragestellungen. Die Umwandlung der Neutrinos wird durch überraschend große „Mischungswinkel“ ermöglicht; die entsprechenden Winkel im Quarksektor sind dagegen sehr klein. Präzisionsmessungen der Neutrinoparameter ermöglichen, den Ursprung dieser Diskrepanz besser zu verstehen.

Die Erzeugung der winzigen Neutrinomassen kann durch eine Vielzahl von Mechanismen geschehen, z. B. durch den so-

genannten „Seesaw-Mechanismus“, bei dem sehr schwere zusätzliche Neutrinos (s. Teilchenzoo-Bild) eine zentrale Rolle spielen. Diese können an andere Teilchen koppeln, wie etwa das Higgs-Boson, oder die Entwicklung im frühen Universum beeinflussen. Ebenso implizieren sie, dass die Neutrinos sogenannte Majorana-Teilchen sind, welche zu Leptonzahl-verletzenden Prozessen führen. Diese interessanten Querverbindungen sind der Schlüssel, um den Mechanismus der Neutrinomassen-Erzeugung zu verstehen.

Viele Theorien sagen darüber hinaus neue Wechselwirkungen der Neutrinos voraus. Deren Nachweis kann z. B. durch die Erzeugung neuer Teilchen am LHC oder durch Messungen von Neutrino-Wechselwirkungen an Beschleunigern gelingen.



Teilchen-Flavour und -Zahl

Das Standardmodell liefert keine Erklärung für die Existenz von genau drei Generationen von Materieteilchen, und warum deren Massen und Mischungen bestimmten Mustern folgen. Sogenannte Flavoursymmetrien könnten hier eine Erklärung liefern. Ebenso hat das Standardmodell eine Reihe von Erhaltungsgrößen. So ist etwa die Zahl der Leptonen oder Baryonen (aus drei Quarks bestehende schwere Teilchen wie z. B. das Proton oder das Neutron) in Teilchenreaktionen erhalten, oder gewisse Zerfallsreaktionen von Leptonen sind verboten. Erweiterungen des Standardmodells führen in der Regel zu beobachtbaren Verletzungen dieser Gesetzmäßigkeiten.