

# Institut für Theoretische Teilchenphysik (TTP)

## Worum geht's?

Die Teilchenphysik untersucht die Fragen

*Was sind die elementaren Bausteine der Natur?*

und

*Welchen fundamentalen Wechselwirkungen unterliegen sie?*

Experimentell werden diese Fragen erforscht, indem man Teilchen (z.B. (Anti-)Protonen oder (Anti-)Elektronen) in Beschleunigern kollidiert und die in der Kollision erzeugten neuen Teilchen mit Hilfe großer Detektoren untersucht. Die theoretische Beschreibung der Teilchen und ihrer Wechselwirkungen verwendet den methodischen Rahmen der *Quantenfeldtheorie*, in dem Quantenmechanik und spezielle Relativitätstheorie konsistent verknüpft sind. Jedem Teilchen entspricht ein Quantenfeld, z.B. gehört zum Photon das in der Elektrodynamik als Vektorpotential bezeichnete Feld  $A^\mu(x)$ . Die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch den Austausch von Photonen vermittelt. Je schwerer ein Teilchen ist, desto kurzreichweitiger ist die zugehörige Wechselwirkung. Schwere Teilchen zerfallen typischerweise in leichtere Teilchen, sind also kurzlebig. Die Produktion solcher schwerer Teilchen in Kolliderexperimenten und das Studium ihrer Zerfallsketten sind die spannendste Aufgabe der Teilchenphysik. Art und Stärke der Wechselwirkungen werden durch die *Lagrangedichte* beschrieben. Welche Lagrangedichte beschreibt nun unsere Natur korrekt?

Die Elementarteilchenphysik verfügt über eine extrem erfolgreiche Theorie, das *Standardmodell der Elementarteilchen*, dessen Vorhersagen auf Energieskalen zwischen einigen Mikro-Elektronvolt ( $\mu\text{eV}$ ) und einigen Tera-Elektronvolt (TeV) experimentell bestätigt wurden. Das Standardmodell umfasst drei *Eichwechselwirkungen*; die erste heißt *Quantenchromodynamik* und beschreibt die starke Kernkraft, während die anderen beiden die *elektroschwache* Wechselwirkung bilden, in der die schwache Kernkraft und die Elektrodynamik verwoben sind. Mit jeder dieser Eichwechselwirkungen ist eine bestimmte Symmetrie verbunden. Ein zentrales Element des Standardmodells ist das *Higgs-Feld*, das zwei weitere Wechselwirkungen mit sich bringt: Seine Selbstwechselwirkung verursacht die spontane Brechung der elektroschwachen Symmetrie; diesem Phänomen verdanken die  $W^\pm$ - und  $Z$ -Bosonen, die die schwache Wechselwirkung vermitteln, ihre Masse. Die andere Wechselwirkung des Higgs-Felds, die *Yukawa-Wechselwirkung*, ist nun für die Massen der Fermionen (das sind Quarks und Leptonen, also Teilchen mit Spin-Quantenzahl  $1/2$ ) zuständig. Das Higgs-Teilchen des Standardmodells wurde 2012 am *Large Hadron Collider (LHC)* am CERN entdeckt, seitdem werden seine Eich- und Yukawawechselwirkungen direkt erforscht. Das analoge Studium der Higgs-Selbstwechselwirkung wird am LHC in der Zukunft stattfinden.

Jedoch wissen wir, dass das Standardmodell unvollständig ist: Es kann nicht erklären, warum die Entwicklung des Universums einen Überschuss der Materie über die Antimaterie produziert hat (*Baryogenese*problem). Zudem wissen wir, dass es im Universum *Dunkle*

*Materie* gibt, die nicht aus Teilchen des Standardmodells besteht. Schließlich gibt uns die Struktur des Standardmodells Rätsel auf: Warum replizieren sich die Fermionen in drei Generationen, die sich nur in der Masse unterscheiden? Vereinigen sich die drei Eichwechselwirkungen bei hohen Energien zu einer einzigen? Welche Symmetrie steckt hinter dem beobachteten Muster der Yukawa-Wechselwirkung? Ist das Higgs-Teilchen fundamental? Gibt es weitere Higgs-Teilchen? Warum ist die elektrische Ladung quantisiert?

## Was forschen wir?

Physik jenseits des Standardmodells kann mit zwei Zugängen erforscht werden: Neue Teilchen können direkt produziert werden. Für sehr schwere Teilchen benötigt man Kollider mit größeren Schwerpunktsenergien. Es könnte aber auch neue leichte Teilchen geben, die extrem schwach an bekannte Teilchen koppeln; für ihre Entdeckung sind Kollider mit hoher Ereignisrate (also einer hohen *Luminosität*) gefragt. Alternativ kann man Streuprozesse und Teilchenzerfälle mit größerer Genauigkeit vermessen und dabei auch zuvor unbeobachtete, sehr seltene Prozesse vermessen. Auch hierfür kommt es auf eine hohe Luminosität an. Dieser zweite Zugang, die Präzisionsphysik, nutzt dabei eine zentrale Eigenschaft der Quantenfeldtheorie aus: Alle Teilchen der Theorie beeinflussen als *virtuelle* Teilchen über Quanteneffekte auch solche Wirkungsquerschnitte und Zerfallsraten, die bei Energien weit unterhalb der Paarproduktionsschwelle dieser Teilchen gemessen werden.

Das TTP ist auf Präzisionsphysik spezialisiert. Wir berechnen einerseits komplexe Quantenkorrekturen zu hohen Ordnungen im Standardmodell, um die theoretischen Vorhersagen mindestens so präzise wie die experimentellen Daten zu machen. Diese Forschungsrichtung ermöglicht es, kleine Abweichungen zwischen Standardmodell-Vorhersage und Experiment genau zu quantifizieren und dadurch Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells zu finden. Andererseits betrachten wir auch konkrete Theorien solcher "neuen Physik". Eine wichtige Erweiterung des Standardmodells ergibt sich durch seine Ergänzung um das (maßgeblich in Karlsruhe entwickelte) Prinzip der Supersymmetrie. Solche und andere Modelle neuer Physik, die wir betrachten, beinhalten zusätzliche Higgs-Felder.

**Arbeitsgruppe Melnikov:** Um die LHC-Experimente interpretieren zu können, ist es sehr wichtig, die Theorie der Proton-Proton Kollisionen weiterzuentwickeln. Diese Theorie basiert auf perturbativer Quantenchromodynamik (QCD) – einer Theorie, die die starke Wechselwirkung beschreibt. In diesem Zusammenhang berechnen wir die Wirkungsquerschnitte von Quark- und Gluon-iniziierten Prozessen in QCD-Störungstheorie. Wir interessieren uns hauptsächlich für die der Higgs-Erzeugung durch Gluon-Fusion und durch Fusion von zweier elektroschwacher Eichbosonen, für die wir höhere Präzision als bisher erreichen wollen, um die Higgskopplungen auf Abweichungen vom Standardmodell zu untersuchen. Um diese Rechnungen durchzuführen, sind neue theoretische Methoden erforderlich. Die Entwicklung neuer Methoden, die störungstheoretische Rechnungen ermöglichen, ist eines der wichtigsten Forschungsgebiete der Arbeitsgruppe Melnikov. Dabei verbinden

wir spannende physikalische Fragestellungen mit interessanten Anwendungen aus der Mathematik und Computeralgebra.

**Arbeitsgruppe Nierste:** Die elektroschwache Wechselwirkung führt zu Übergängen zwischen Quarks verschiedener Generationen, so kann z.B. ein Bottom-Quark in ein Strange-Quark, Elektron und Positron zerfallen. Und ein neutrales B-Meson, das ein Bindungszustand aus Bottom-Antiquark und Down-Quark ist, oszilliert in sein Antiteilchen mit Bottom-Quark und Down-Antiquark. Diese *flavour-ändernden neutralen Stromprozesse* sind extrem sensitiv auf neuen Physik und testen die Effekte virtueller Teilchen mit Massen bis 100 Tera-Elektronvolt und mehr! In der Arbeitsgruppe berechnen wir Quantenkorrekturen höherer Ordnung zu den Standardmodellbeiträgen und studieren die Beiträge aus Theorien jenseits des Standardmodells. Solche Theorien sind i.A. durch Symmetrieüberlegungen motiviert: *Vereinheitlichter Eichtheorien* haben den Anspruch, die drei Eichwechselwirkungen des Standardmodells zusammenzuführen und idealerweise auf eine einzige Symmetriegruppe zurückzuführen. *Supersymmetrische Theorien* führen Fermionen und Bosonen in Symmetriemultipletts zusammen. Viele Theorien neuer Physik haben mehr als ein Higgs-Feld, und wir untersuchen die Einflüsse zusätzlicher geladener oder neutraler Higgs-Bosonen auf die Prozesse der Flavourphysik. Ein junges Teilgebiet der Flavourphysik ist das Studium der *Dunklen Materie* mit Zerfällen von Quarks oder Leptonen in unsichtbare leichte Teilchen, die ihrerseits an die Teilchen der Dunklen Materie koppeln und *Mediatoren des Dunklen Sektors* heißen. In der Arbeitsgruppe berechnen wir solche Zerfälle, z.B. den Zerfall eines Bottom-Quarks in ein Strange-Quark und so ein unsichtbares Mediatorteilchen.

**Arbeitsgruppe Steinhauser:** Im Zentrum der Aktivitäten stehen Berechnungen von Quantenkorrekturen höherer Ordnung, sowohl im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik als auch dessen Erweiterungen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Berechnung des Wirkungsquerschnitts zur Produktion von Higgsbosonen am LHC. Beispielsweise ist es notwendig präzise Vorhersagen für die simultane Produktion von zwei Higgsbosonen zu machen, um Informationen über die Higgs-Selbstwechselwirkung erhalten zu können. Des weiteren interessieren wir uns für den Zerfall eines *B*-Mesons in ein Strange-Quark und ein Photon, ein Prozess, der im Belle-II-Experiment in Japan präzise vermessen wird und indirekte Information über Physik jenseits vom Standardmodell liefern kann. In der Arbeitsgruppe Steinhauser werden außerdem Berechnungen zur Higgsbosonmasse in supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells durchgeführt. Ein wichtiges Element ist die Automatisierung der Berechnung von Feynman-Diagrammen, unter Zuhilfenahme von verschiedenen Programmiersprachen und Computeralgebraprogrammen.

## Unser Arbeitsumfeld

Die Dozenten des TTP sind Mitglieder im Graduiertenkolleg (GRK) „Elementarteilchenphysik bei höchster Energie und höchster Präzision“, sowie im KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik (KCETA) und dessen Graduiertenschule: Karlsruher Schule für

Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik (KSETA) (<https://www.kceta.kit.edu/>, <http://www.kseta.kit.edu>). Teile der Ausbildungsprogramme von GRK und KSETA stehen auch den Masterandinnen und Masteranden des TTP offen.

Allen Mitgliedern stehen Arbeitsplatzrechner zur Verfügung, über die man auch auf die wesentlich leistungsfähigeren Parallelrechner des TTP zugreifen kann. Diese Rechner sind speziell für computer-algebraischen Berechnungen komplizierter Quantenkorrekturen optimiert.

## Unsere Partner

Die Teilchenphysik ist ein stark international vernetztes Forschungsgebiet, und unsere Masterandinnen und Masteranden knüpfen schnell Kontakte mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus anderen Staaten. Innerhalb Deutschlands haben wir eine besonders enge Kooperation mit der RWTH Aachen, der Universität Siegen und der Universität Heidelberg durch den gemeinsamen Sonderforschungsbereich *Particle Physics Phenomenology after the Higgs Discovery*.