

Bausteine *Building Blocks* der Welt *of the World*



Sind das alle Bausteine?

Gibt es weitere Quarks oder Leptonen?
Gibt es mehr als die vier bekannten Kräfte in der Natur?
Oder gibt es völlig neue Phänomene?

Woher kommt Masse?

Ist das postulierte, aber bisher nicht gefundene Higgs-Teilchen die Erklärung?

Das Standardmodell

In den vergangenen Jahrzehnten wurden viele neue Teilchen und Phänomene gefunden. Ihre Erklärung verlangt sechs Quarks und sechs Leptonen. In der alltäglichen Welt tauchen aber nur das u- und d-Quark, das Elektron und das Elektron-Neutrino auf. Experimente haben in den letzten Jahren dieses Schema mit großer Präzision bestätigt. Es wurden alle Bausteine gefunden – bis auf eine Ausnahme: das Higgs-Teilchen.

Trotzdem bleiben viele fundamentale Fragen offen:

Standard-Teilchen

Higgs



● Quarks ● Leptonen ● Kraftteilchen

Zu jedem Quark und Lepton gibt es ein Antiteilchen.

Lässt sich das Modell weiter vereinfachen?

Lässt sich das Schema auf noch weniger elementare Teilchen reduzieren?
Was steckt hinter dem Schema?

Wo ist die Antimaterie?

Im Kosmos sehen wir nur Materie, keine Antimaterie. Wir kennen aber zu jedem Teilchen ein Antiteilchen. Wo ist die Antimaterie geblieben?

TESLA wird helfen, auf diese Fragen Antworten zu finden.

The Higgs Particle Das Higgs-Teilchen ... verleiht der Welt Gewicht



Giving Weight to the World



Beim Verständnis des Higgs-Mechanismus hilft ein Vergleich: Auf einer Cocktailparty unterhalten sich die Gäste.



Plötzlich taucht ein Prominenter auf und zieht die Aufmerksamkeit auf sich.



Jeder seiner Schritte wird von Fans begleitet. Dadurch kommt er so behäbig vom Fleck, als hätte er an Gewicht gewonnen. In diesem Bild entsprechen die Partygäste dem Higgs-Feld, der Prominente dem Teilchen, das an Masse gewinnt.

Was macht Masse?

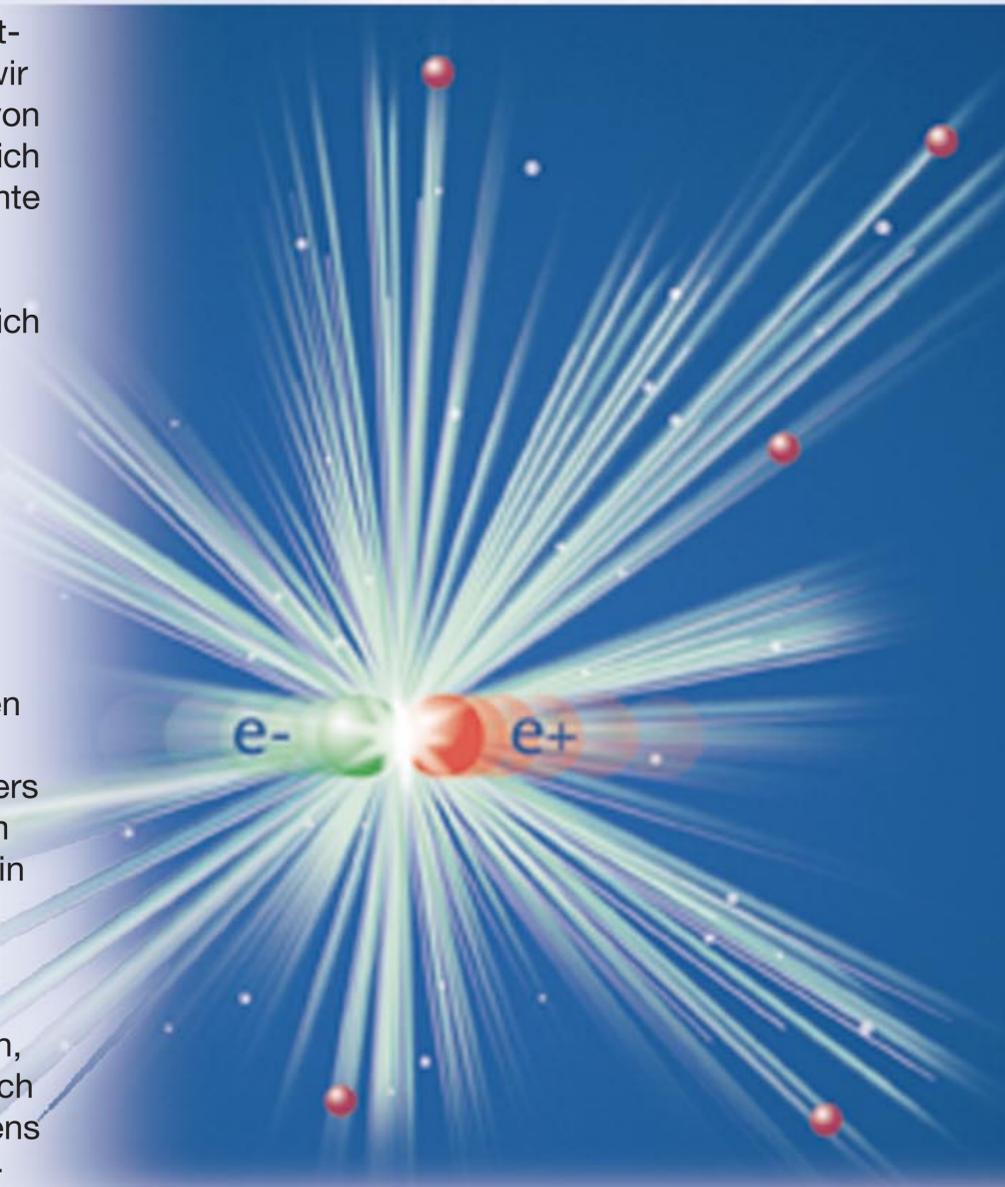
Es gibt einen gewichtigen Grund, nach den bislang unentdeckten Higgs-Teilchen zu fahnden: Ohne Higgs wären wir masselos. Nach unserer heutigen Vorstellung verleiht ein von dem Physiker Peter Higgs erdachtes Prinzip den ursprünglich masselosen Teilchen ihr Gewicht. Demnach ist das gesamte Universum von einem Higgs-Feld durchdrungen, und je stärker ein Teilchen mit diesem Feld wechselwirkt, desto größer ist seine Masse. Gibt es das Higgs-Feld, sollte es sich durch mit ihm verbundene Higgs-Teilchen verraten.

Die Fahndung läuft

Die Suche nach dem Higgs-Teilchen läuft – bislang ohne Erfolg. Seine Masse muss sehr groß sein, mehr als 100 Milliarden Elektronenvolt. Sonst wäre das Teilchen an bestehenden Beschleunigern bereits entdeckt worden. Andererseits zeigen heutige Ergebnisse und theoretische Überlegungen, dass die Higgs-Masse unter 300 Milliarden Elektronenvolt liegen muss. Damit ist das Higgs-Teilchen möglicherweise in Reichweite des Tevatron-Beschleunigers bei Fermilab nahe Chicago – sicherlich aber in der des im Bau befindlichen Large Hadron Colliders LHC bei CERN in Genf.

TESLA als „Higgs-Fabrik“

Die Entdeckung des Higgs-Teilchens wäre eine Sensation, doch um den Mechanismus, der die Masse macht, wirklich aufzuklären, müssen die Eigenschaften des Higgs-Teilchens genau untersucht werden. Das ist die Stärke des TESLA-Linearbeschleunigers. Dank seiner hohen „Trefferrate“, also der Anzahl miteinander kollidierender Teilchen, ist TESLA eine wahre „Higgs-Fabrik“ und erlaubt Präzisionsmessungen, die uns ermöglichen, die Rolle der Higgs-Teilchen in der Natur genau zu verstehen – oder eine alternative Erklärung für die Teilchenmassen zu finden.



Wenn im TESLA-Beschleuniger ein Elektron mit seinem Antiteilchen, dem Positron, zusammenprallt, zerstrahlen beide zu konzentrierter Energie, aus der neue Teilchen entstehen. Je höher die Kollisionsenergie ist, desto massereichere Teilchen können daraus hervorgehen – auch die gesuchten Higgs-Teilchen.

The Theory of Supersymmetry Die Theorie der Supersymmetrie ... Teilchen im Doppelpack



A Partner for Every Particle

Die große Verdopplerin

„Weniger ist mehr“, lautet die Devise der Teilchenphysiker, die bestrebt sind, die Welt mit möglichst wenig elementaren Bausteinen zu erklären. Doch für SUSY scheinen sie eine Ausnahme zu machen: Die Theorie der Supersymmetrie verdoppelt die Anzahl der Elementarteilchen, weil jedes „normale“

Teilchen einen supersymmetrischen Partner bekommt. Das Erstaunliche: Dadurch wird die Erklärung der Welt einfacher.

Jenseits des Standard-Modells

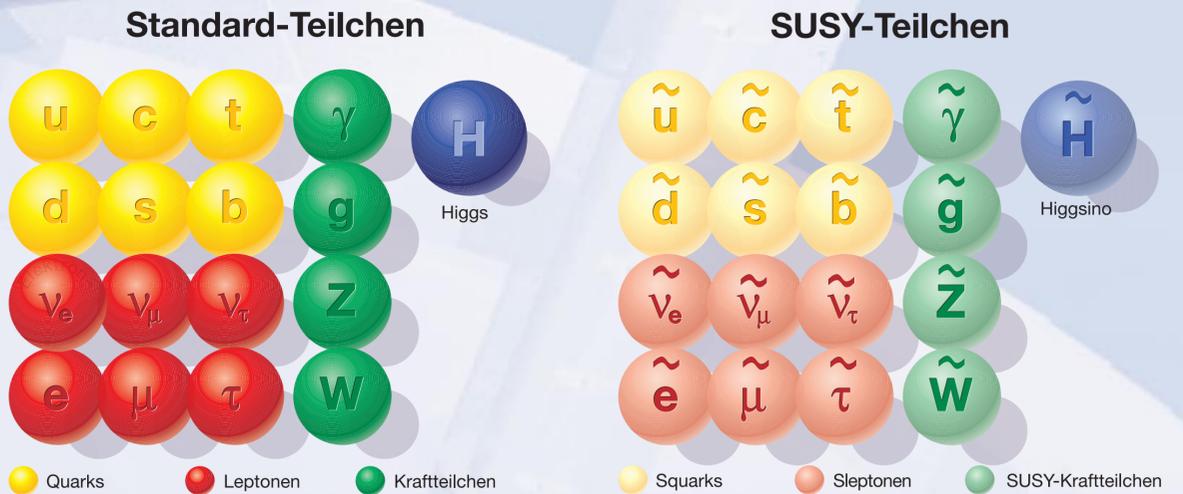
Nach der gängigen Theorie der Teilchenphysik besteht unsere Welt aus Materie- und Kraftteilchen, die sich sehr unterschiedlich verhalten. Aber warum diese Unterschiede? Der Supersymmetrie zufolge gibt es zu allen Materieteilchen Partner, die sich wie Kraftteilchen verhalten und umgekehrt. Die starre Unterscheidung zwischen Materie und physikalischen Kräften wäre damit beseitigt, die Beschreibung der Natur einfacher geworden.

Zurück zur Urkraft

Das große Ziel der Teilchenphysik ist es, eine einheitliche Beschreibung aller Kräfte zu finden. Mit der Supersymmetrie lassen sich drei der fundamentalen Naturkräfte zu einer einzigen vereinen: die elektromagnetische, die schwache und die starke Kraft. Nur wenn die Physiker SUSY-Teilchen in ihre Berechnungen einbeziehen, werden die drei Kräfte bei unvorstellbar hohen Energien genau gleich stark – Energien, die milliardenfach höher sind als die, die an heutigen Beschleunigern erreicht werden.

TESLA auf SUSY-Suche

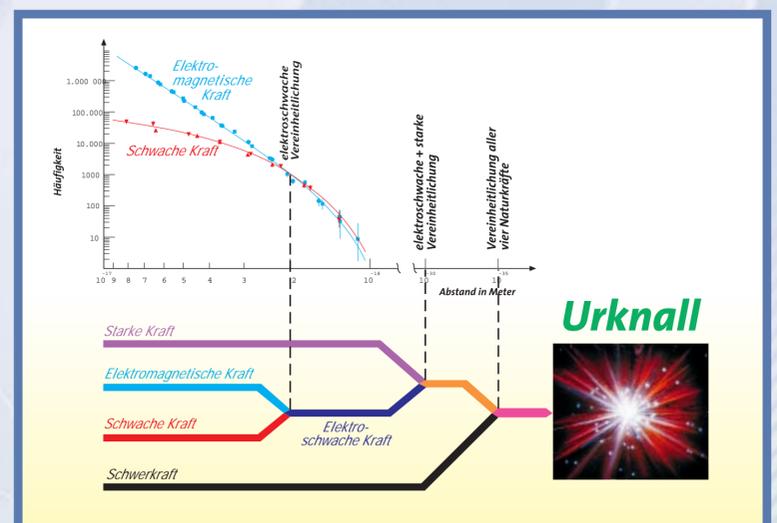
Bisher wurden keine supersymmetrischen Teilchen entdeckt. Vieles deutet aber darauf hin, dass sie existieren. Den leichtesten SUSY-Teilchen dürften künftige Beschleuniger wie der Large Hadron Collider LHC bei CERN in Genf und TESLA auf die Spur kommen. Das große Plus von TESLA: Der Linearbeschleuniger könnte solche Teilchen nicht nur aufspüren, sondern auch präzise vermessen – und nur so lässt sich die Struktur der Supersymmetrie auch verstehen.



Heute kennt man insgesamt zwölf Materieteilchen (sechs Quarks und sechs Leptonen) sowie Austauschteilchen der Naturkräfte.

Gluonen	Photon	W- und Z-Boson	Graviton	
Träger der:	starken Kraft	elektromagnetischen Kraft	schwachen Kraft	Gravitationskraft
Wirken auf:	Quarks, Gluonen	Quarks, geladene Leptonen und W-Bosonen	Quarks und Leptonen	alle Teilchen
Verantwortlich für:	Zusammenhalt des Protons, des Neutrons und der Atomkerne	Chemie, Elektrizität und Magnetismus	Radioaktivität, Prozesse in der Sonne	Zusammenhalt der Erde, der Sonne, des Planetensystems

Die vier Naturkräfte werden durch jeweils spezifische Austauschteilchen übertragen.



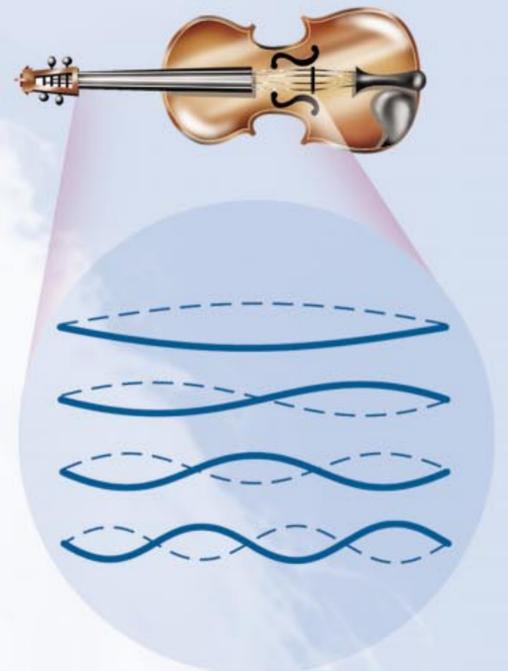
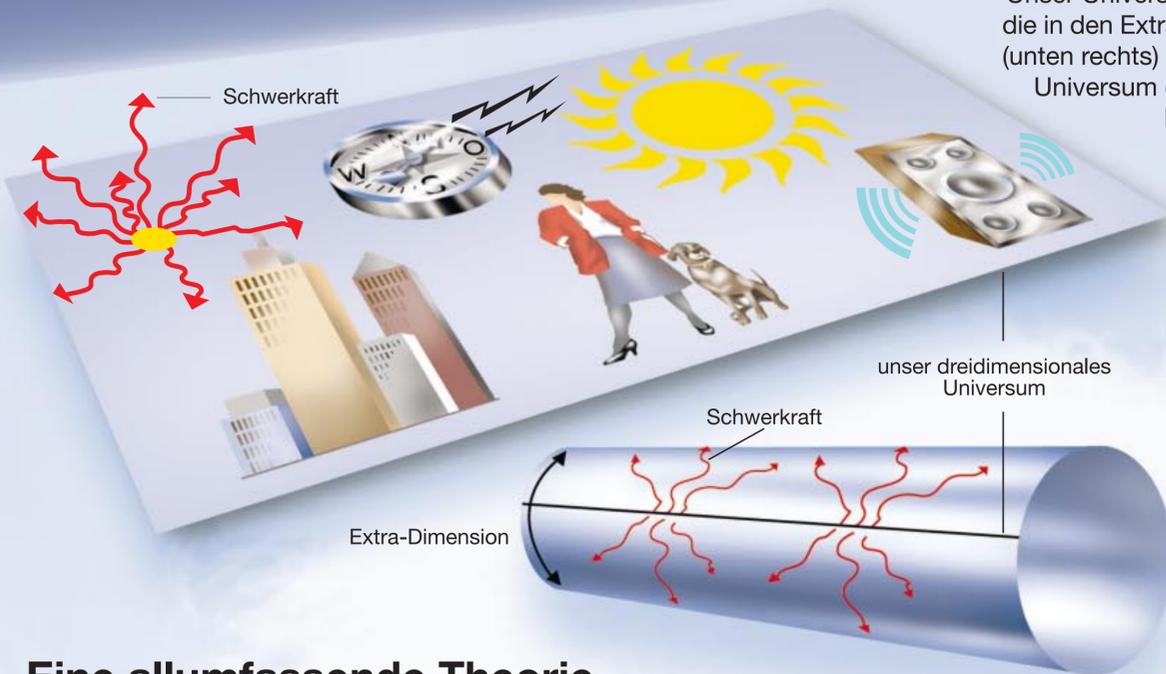
Den ersten Schritt zur großen Vereinigung der Naturkräfte haben die Physiker am HERA-Beschleuniger bei DESY experimentell nachgewiesen: die „elektroschwache Vereinheitlichung“.

Superstrings ... die Welt, ein Schwingen?

A Universe of Vibrations?



Unser Universum existiert vielleicht auf einer Wand oder Membran, die in den Extra-Dimensionen liegt. Die Linie auf dem Zylindermantel (unten rechts) und die flache Ebene stellen unser dreidimensionales Universum dar, das alle bekannten Teilchen und Kräfte gefangen hält – mit Ausnahme der Gravitation. Die Schwerkraft (rote Linien) breitet sich in allen Dimensionen aus.



Die Saiten einer Geige können in charakteristischen Mustern schwingen, bei denen jeweils eine ganze Zahl von Wellenbergen und -tälern genau zwischen die beiden Enden passt.

Eine allumfassende Theorie

Exotische Begriffe wie Superstrings und Extra-Dimensionen entspringen dem Versuch der Teilchenphysiker, die vertrauteste aller Naturkräfte zu verstehen: die Schwerkraft. Sie lässt sich zwar dank Albert Einstein im kosmischen Maßstab hervorragend beschreiben, verträgt sich jedoch gar nicht mit den gängigen Theorien des Mikrokosmos. Abhilfe schafft die Superstring-Theorie: Sie vereinheitlicht die Beschreibung aller Teilchen und aller Naturkräfte, einschließlich der Schwerkraft. Sie sagt ein Teilchen voraus, das genau die Eigenschaften des Gravitons besitzt – dem noch unentdeckten Austauschteilchen der Schwerkraft.

Schwingende Saiten

Für die Superstring-Theorie räumen die im herkömmlichen Weltbild der Teilchenphysik als punktförmig angenommenen Elementarteilchen ihren Platz als Grundbausteine der Materie. Es gibt nur noch einen elementaren Baustein – den Superstring. Wie Töne durch eine schwingende Saite ergeben sich die verschiedenen Teilchen – Elektronen, Quarks, Photonen, Gluonen und Co. – durch verschiedene Schwingungszustände eines elementaren Superstrings.

Extra-Dimensionen

Superstrings können nicht in unseren vier Dimensionen – den drei Raumrichtungen und der Zeit – existieren. Sie brauchen zehn oder sogar elf Dimensionen. Aber wie können diese Extra-Dimensionen allen heute verfügbaren Messapparaturen verborgen bleiben? Die einzige Erklärung: Sie müssen winzig klein zusammengerollt sein.

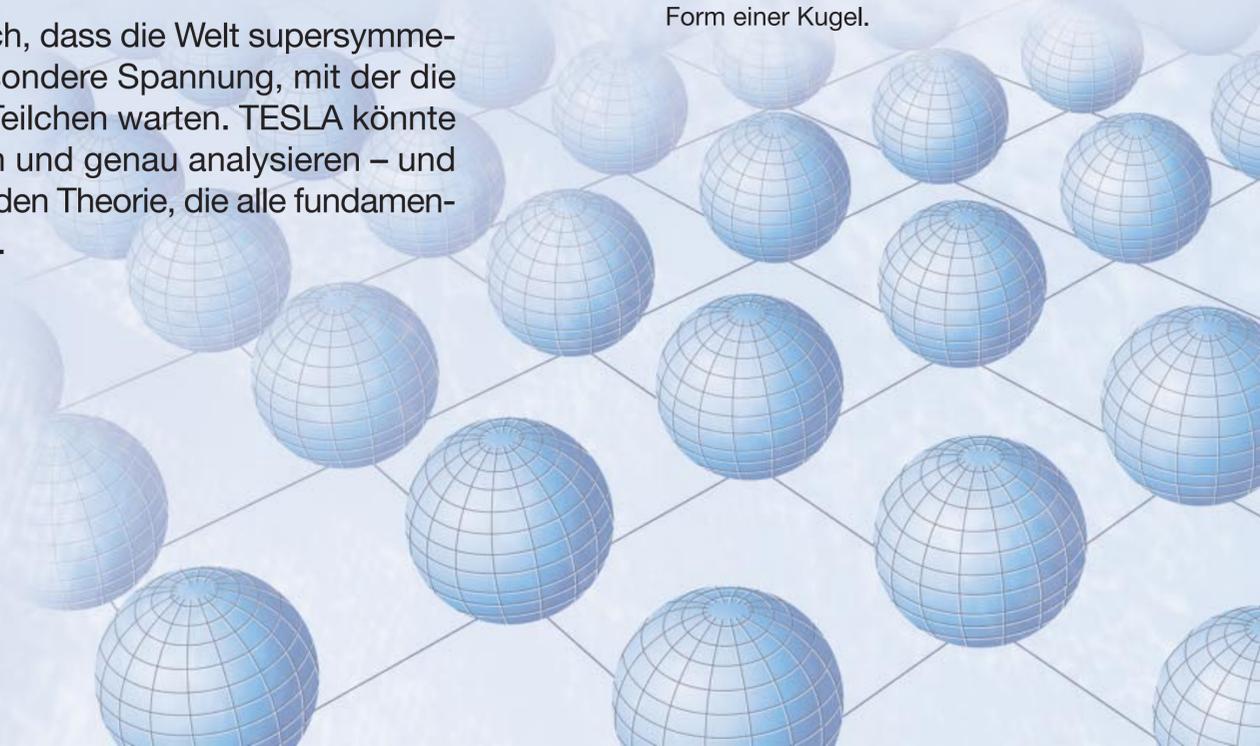
Nicht ohne SUSY

Die Superstring-Theorie ergibt automatisch, dass die Welt supersymmetrisch ist – ein weiterer Anlass für die besondere Spannung, mit der die Physiker auf die Entdeckung von SUSY-Teilchen warten. TESLA könnte supersymmetrische Teilchen produzieren und genau analysieren – und damit den Weg weisen zu der allumfassenden Theorie, die alle fundamentalen Kräfte und Teilchen zusammenfügt.



Die Schleifen in der Stringtheorie können in charakteristischen Mustern schwingen – ganz ähnlich wie Violinsaiten. Die verschiedenen Schwingungszustände entsprechen den verschiedenen Teilchen.

Zwei Extra-Dimensionen, aufgewickelt in Form einer Kugel.



Particles in the Cosmos
**Die kosmischen Teilchen
 ... Urknall und Dunkle Materie**



Big Bang and Dark Matter

Die Welt am Anfang der Welt

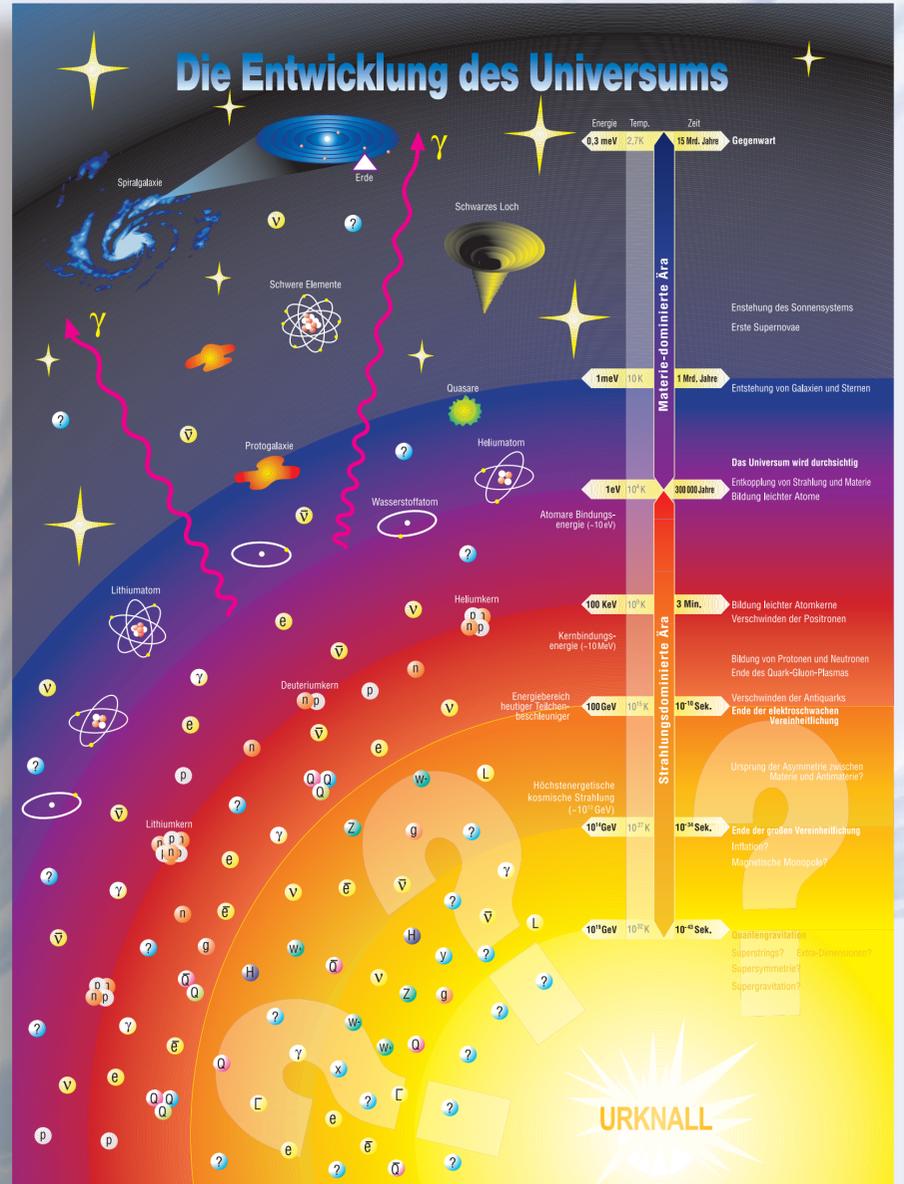
Vor 15 Milliarden Jahren entstand das Universum mit einem gewaltigen Knall – dem Urknall. Ein winziger Raumzeitbereich, gigantisch heiß und energiegeladen, explodierte in weniger als einer Billionstel Sekunde. Aus der geballten Energie entstanden Materie und Antimaterie, Atome, Moleküle, Mäuse und Menschen.

Mit TESLA zum Ursprung des Universums

Mit dem TESLA-Linearbeschleuniger können Teilchenphysiker verfolgen, was Sekundenbruchteile nach dem Urknall geschah. Denn stoßen Elektron und Positron frontal zusammen, so können sie sich als Teilchen und Antiteilchen gegenseitig zu reiner Energie vernichten. Die Energiekonzentration ist so hoch wie in der ersten Billionstel Sekunde nach dem Beginn des Universums. Wie im Urknall entstehen aus dieser Energie spontan verschiedene Elementarteilchen. So können Physiker die Anfänge des Kosmos simulieren und in allen Einzelheiten im Experiment untersuchen.

Irgendwie dunkel

Wir sehen nur einen Bruchteil der Masse, die im Universum tatsächlich existiert. Der Rest ist so genannte Dunkle Materie. Sie ist unsichtbar und ganz anders beschaffen als die Materie, aus der Sterne, Planeten und Menschen gemacht sind. Es muss sie geben, sonst lassen sich viele Beobachtungen an Galaxien und Sternbewegungen nicht erklären. Auch das Schicksal unseres Universums ist mit der Dunklen Materie verknüpft: Dehnt es sich weiter bis in alle Ewigkeit aus? Oder wird es irgendwann durch die Gravitation zum Stillstand kommen und in sich zusammenstürzen? Die Stärke der Gravitationskräfte hängt von der Gesamtmasse im Universum ab – und die liegt noch im Dunkeln ... Niemand weiß, woraus Dunkle Materie besteht, supersymmetrische Teilchen könnten eine Erklärung dafür bieten. Mit TESLA ließen sich solche Teilchen finden und verstehen.



Der Urknall ist nach unseren heutigen Vorstellungen der Anfang des Universums, der Beginn von Raum und Zeit. Vorher gab es nichts, was sich in den Kategorien der Physik beschreiben ließe. Das Universum und seine gesamte Energie waren in einem Punkt konzentriert. Das war vor etwa 15 Milliarden Jahren. Dann begann das Universum explosionsartig zu expandieren. Seither dehnt es sich unaufhaltsam aus und kühlt dabei immer mehr ab. Es entstanden Atome, Sterne, Planeten und schließlich das Leben.

TESLA und LHC ... zwei Seiten einer Medaille

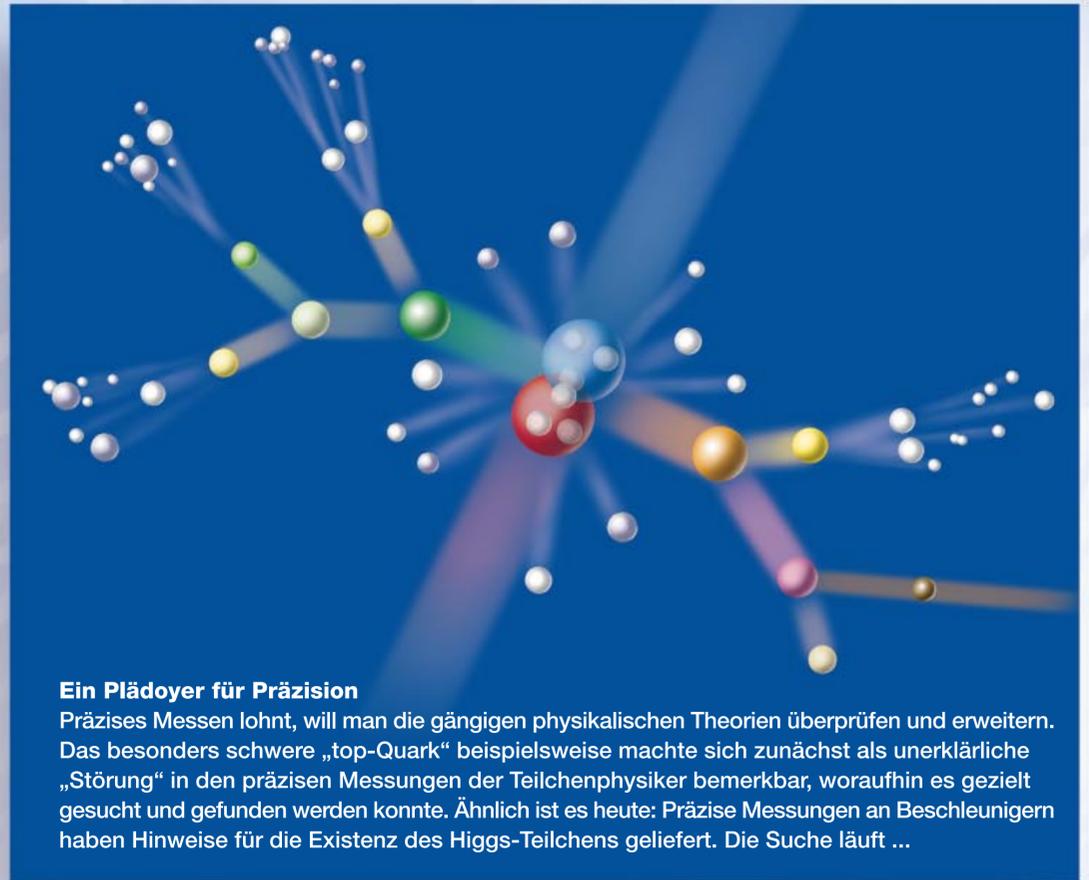
TESLA and LHC



Two Sides of the Same Coin

LHC – die Entdeckungsmaschine

Derzeit wird beim Forschungszentrum CERN in Genf ein großer Ringbeschleuniger für Protonen gebaut: der Large Hadron Collider (LHC), der im Jahr 2006 fertig sein soll. Der LHC und TESLA ergänzen sich in ihren Eigenschaften ideal. Der LHC beschleunigt Protonen, denen wegen ihrer großen Masse eine sehr hohe Energie mitgegeben werden kann. Bei den Zusammenstößen können aus dieser Energie sehr massereiche neue Teilchen entstehen – der LHC ist also eine echte Entdeckungsmaschine. Der Nachteil: Da die schweren Protonen aus mehreren Quarks bestehen, platzt beim Zusammenstoß eine Vielzahl von Bruchstücken nach allen Seiten weg. Daher ist es schwer, die Eigenschaften der neu erzeugten Teilchen präzise zu messen.

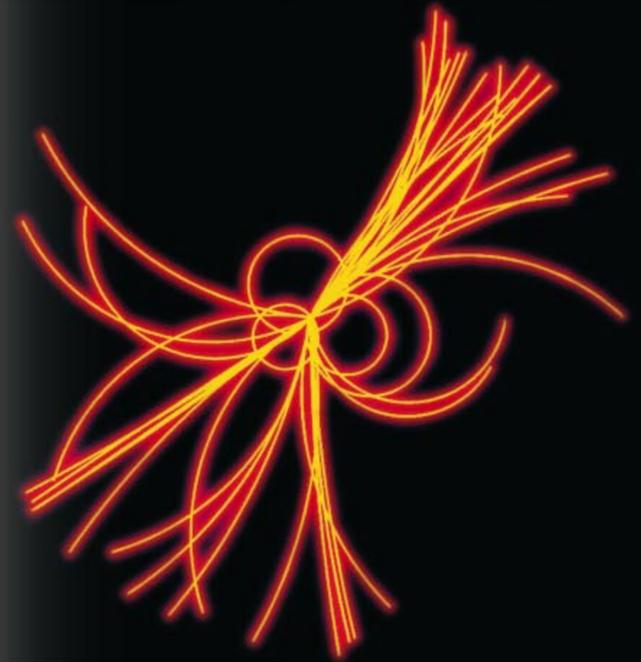


Ein Plädoyer für Präzision

Präzises Messen lohnt, will man die gängigen physikalischen Theorien überprüfen und erweitern. Das besonders schwere „top-Quark“ beispielsweise machte sich zunächst als unerklärliche „Störung“ in den präzisen Messungen der Teilchenphysiker bemerkbar, woraufhin es gezielt gesucht und gefunden werden konnte. Ähnlich ist es heute: Präzise Messungen an Beschleunigern haben Hinweise für die Existenz des Higgs-Teilchens geliefert. Die Suche läuft ...

TESLA – die Präzisionsmaschine

Im TESLA-Linearbeschleuniger stoßen punktförmige Elektronen auf ihre ebenfalls punktförmigen Antiteilchen, die Positronen. Beide Teilchen vernichten sich gegenseitig, verwandeln sich vollständig in Energie, aus der neue Teilchen entstehen können. Da man so die Anfangsbedingungen bei der Teilchenerzeugung sehr genau kennt, ist das Ergebnis viel einfacher zu interpretieren als bei Protonenstößen. TESLA ist also eine Präzisionsmaschine, mit der man extrem genau die Eigenschaften von neuen Teilchen messen kann – beispielsweise Masse, Lebensdauer, Spin und Quantenzahlen. Dank seiner hohen „Trefferrate“, also der Anzahl miteinander kollidierender Teilchen, kann TESLA neue Teilchen „am laufenden Band“ produzieren – und je mehr Messdaten verfügbar sind, desto genauer werden die Ergebnisse.



Computersimulation des Zerfalls eines Higgs-Teilchens im TESLA-Detektor.

Zwei starke Partner

Der LHC und TESLA ergänzen sich in idealer Weise. Sie haben verschiedene Stärken, sie untersuchen verschiedene Aspekte der gleichen Probleme. Die Zukunft der Teilchenphysik braucht beide Maschinen.

Computersimulation des Zerfalls eines Higgs-Teilchens im ATLAS-Detektor am LHC-Beschleuniger.

