

https://farid.ps/articles/physics_beyond_the_standard_model/de.html

Physik jenseits des Standardmodells

Bis 2012 war das Standardmodell (SM) mit der Bestätigung des Higgs-Bosons am Large Hadron Collider von CERN theoretisch vollständig. Jedes vorhergesagte Teilchen war gefunden worden. Seine Gleichungen hatten jeden experimentellen Test mit erstaunlicher Präzision bestanden.

Dennoch war das Gefühl in der Physik nicht eines von Abschluss, sondern von Unvollständigkeit. Wie Newtons Gesetze vor Einstein oder die klassische Physik vor der Quantenmechanik war das Standardmodell auf den von uns testbaren Skalen zu erfolgreich, aber unfähig, tiefere Fragen zu beantworten. Es war eine nahezu perfekte Karte – aber nur von einem kleinen Teil der Landschaft.

Gravitation: Die fehlende Kraft

Die auffälligste Auslassung ist die Gravitation.

- Das SM beschreibt drei der vier bekannten fundamentalen Kräfte: Elektromagnetismus, die schwache Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung.
- Gravitation, beschrieben durch Einsteins **allgemeine Relativitätstheorie (GR)**, fehlt völlig.

Das ist mehr als nur ein Versehen. Die allgemeine Relativitätstheorie behandelt Gravitation als die Krümmung der Raumzeit, ein glattes geometrisches Feld, während das SM Kräfte als Quantenfelder behandelt, die durch Teilchen vermittelt werden. Versuche, die Gravitation auf dieselbe Weise zu quantisieren, stoßen auf Infinites, die nicht renormiert werden können.

Das Standardmodell und GR sind wie zwei unterschiedliche Betriebssysteme – brillant in ihren eigenen Bereichen, aber grundsätzlich inkompatibel. Sie zu vereinen ist vielleicht die größte Herausforderung der heutigen Physik.

Neutrinomassen

Das SM sagt voraus, dass Neutrinos masselos sind. Doch Experimente, beginnend mit dem Super-Kamiokande-Detektor in Japan (1998) und weltweit bestätigt, zeigten, dass Neutrinos zwischen verschiedenen Flavors (Elektron, Myon, Tau) oszillieren. Oszillationen erfordern Masse.

Dies war der erste bestätigte Beweis für Physik jenseits des Standardmodells. Die Entdeckung brachte Kajita und McDonald 2015 den Nobelpreis ein.

Neutrinos sind extrem leicht, mindestens eine Million Mal leichter als das Elektron. Ihre Massen werden vom SM nicht erklärt – könnten aber auf neue Physik hinweisen, wie den

Wippenmechanismus, sterile Neutrinos oder Verbindungen zum frühen Universum. In einigen Szenarien ermöglichen schwere Wippen-Neutrinos **Leptogenese**, bei der eine Lepton-Asymmetrie im frühen Universum erzeugt und später in die beobachtete **Materie-Antimaterie-Asymmetrie** umgewandelt wird.

Dunkle Materie

Die vom SM beschriebene sichtbare Materie macht weniger als 5 % des Universums aus. Der Rest ist unsichtbar.

- **Dunkle Materie** (~27 % des Universums) zeigt sich nur durch Gravitation: Galaxien rotieren schneller, als sichtbare Materie erlaubt, Galaxienhaufen beugen Licht stärker, als sie sollten, und der kosmische Mikrowellenhintergrund erfordert zusätzliche unsichtbare Masse.
- Keines der SM-Teilchen kann sie erklären. Neutrinos sind zu leicht und zu schnell. Gewöhnliche Materie ist zu selten.

Theorien schlagen neue Teilchen vor: WIMPs (schwach wechselwirkende massive Teilchen), Axionen, sterile Neutrinos oder etwas Seltsameres. Doch trotz jahrzehntelanger Suche – unterirdische Detektoren, Collider-Experimente, astrophysikalische Erhebungen – bleibt dunkle Materie schwer fassbar.

Dunkle Energie

Noch geheimnisvoller ist die **dunkle Energie**, die Kraft, die die beschleunigte Expansion des Universums antreibt.

- 1998 durch Supernova-Beobachtungen entdeckt, macht dunkle Energie ~68 % des Universums aus.
- Prinzipiell könnte sie als die „Vakuumenergie“ von Quantenfeldern erklärt werden. Doch naive QFT-Berechnungen sagen eine Vakuumenergiedichte voraus, die 120 Größenordnungen zu groß ist – die schlechteste Vorhersage in der Physik.

Dieses **Problem der kosmologischen Konstante** ist wohl der schärfste Konflikt zwischen Quantenfeldtheorie und Gravitation. Das Standardmodell hat nichts über dunkle Energie zu sagen. Es ist ein klaffendes Loch in unserem Verständnis des Kosmos.

Das Hierarchieproblem

Ein weiteres tiefes Rätsel liegt im Higgs-Boson selbst.

Die Higgs-Masse wurde mit 125 GeV gemessen. Doch Quantenkorrekturen sollten sie nahe an die Planck-Skala (10^{19} GeV) treiben, es sei denn, es gibt wundersame Korrekturen. Warum ist sie so leicht im Vergleich zu den natürlichen Energieskalen der Gravitation?

Dies ist das **Hierarchieproblem**: Das Higgs erscheint unnatürlich feinabgestimmt. Physiker vermuten neue Physik, wie **Supersymmetrie (SUSY)**, die die Higgs-Masse stabilisieren könnte, indem sie Partnerteilchen einführt, die gefährliche Korrekturen aufheben. (Diskus-

sionen über **Natürlichkeit** umfassen Ideen von dynamischen Lösungen bis hin zu **anthropischem** Denken in einer möglichen „Landschaft“ von Vakua.)

Die Materie-Antimaterie-Asymmetrie

Das SM enthält einige CP-Verletzungen, aber bei weitem nicht genug, um zu erklären, warum das Universum heute mit Materie gefüllt ist statt mit gleichen Mengen an Materie und Antimaterie. Wie oben erwähnt, bieten Mechanismen wie **Leptogenese** (oft mit dem Wippenursprung der Neutrinomassen verbunden) einen überzeugenden Weg, bei dem Physik jenseits des SM die Balance kippt.

Ein schönes, aber unvollständiges Bild

Das Standardmodell wird manchmal als „die erfolgreichste Theorie der Physik“ bezeichnet. Seine Vorhersagen stimmen mit Experimenten bis zu 10–12 Dezimalstellen überein. Es erklärt fast alles, was wir in Teilchenbeschleunigern und Labors sehen.

Aber es ist unvollständig:

- Es ignoriert die Gravitation.
- Es kann Neutrinomassen nicht erklären.
- Es kann dunkle Materie oder dunkle Energie nicht erklären.
- Es lässt tiefe Rätsel wie das Hierarchieproblem und die Materie-Antimaterie-Asymmetrie ungelöst.

Physiker stehen nun vor einem vertrauten Moment in der Geschichte. So wie die Newtonsche Mechanik der Relativitätstheorie Platz machte und die klassische Physik der Quantenmechanik, muss das SM letztendlich etwas Tieferem weichen.

Der Heilige Gral: Eine vereinheitlichte Theorie

Das ultimative Ziel ist eine **Große Vereinheitlichte Theorie (GUT)** oder sogar eine **Theorie von Allem (ToE)**: ein Rahmen, der alle vier Kräfte vereint, alle Teilchen erklärt und konsistent von den kleinsten Skalen (Quantengravitation) bis zu den größten (Kosmologie) funktioniert.

Dies ist der Heilige Gral der modernen Physik. Deshalb treiben Forscher Collider auf höhere Energien, bauen riesige Neutrino-Detektoren, kartieren den Kosmos mit Teleskopen und erfinden kühne neue Mathematik.

Die nächsten Kapitel werden die führenden Kandidaten erkunden:

- **Supersymmetrie (SUSY)** – eine Symmetrie zwischen Materie- und Kraftteilchen.
- **Stringtheorie und M-Theorie** – wo Teilchen vibrierende Saiten sind und der Graviton natürlich entsteht.
- **Extra-Dimensionen** – von Kaluza-Kleins früher Idee bis zu modernen Randall-Sundrum-Modellen.
- **Andere Ansätze** – wie Schleifenquantengravitation und asymptotische Sicherheit.

Jede dieser Ideen entstand nicht als Dogma, sondern als Wissenschaft in ihrer besten Form: Risse bemerken, neue Theorien entwickeln und sie an der Realität testen.

Supersymmetrie: Die nächste große Symmetrie?

Die Physik hat eine lange Geschichte der Vereinheitlichung durch Symmetrie. Maxwells Gleichungen vereinten Elektrizität und Magnetismus. Die spezielle Relativitätstheorie vereinte Raum und Zeit. Die elektroschwache Theorie vereinte zwei der vier fundamentalen Kräfte. Jeder Fortschritt kam durch die Entdeckung einer verborgenen Symmetrie in der Natur.

Supersymmetrie – oder SUSY, wie Physiker sie liebevoll nennen – ist der kühne Vorschlag, dass die nächste große Symmetrie zwei scheinbar unterschiedliche Kategorien von Teilchen verbindet: **Materie** und **Kräfte**.

Fermionen und Bosonen: Materie vs. Kraft

Im Standardmodell fallen Teilchen in zwei große Familien:

- **Fermionen (Spin 1/2):** Dazu gehören Quarks und Leptonen, die Bausteine der Materie. Ihr halbzahliges Spin bedeutet, dass sie dem Pauli-Ausschlussprinzip folgen: Zwei identische Fermionen können nicht denselben Zustand besetzen. Deshalb haben Atome strukturierte Schalen, und deshalb ist Materie stabil.
- **Bosonen (ganzzahliger Spin):** Dazu gehören Photonen, Gluonen, W- und Z-Bosonen und das Higgs. Bosonen vermitteln Kräfte. Im Gegensatz zu Fermionen können sie sich in denselben Zustand stapeln, weshalb Laser (Photonen) und Bose-Einstein-Kondensate existieren.

Kurz gesagt: Fermionen bilden Materie, Bosonen übertragen Kräfte.

Die Supersymmetrie-Hypothese

Supersymmetrie schlägt eine Symmetrie vor, die Fermionen und Bosonen verbindet. Für jedes bekannte Fermion gibt es einen bosonischen Partner. Für jedes bekannte Boson einen fermionischen Partner.

- Quarks → **Squarks**
- Leptonen → **Sleptonen**
- Gluonen → **Gluinos**
- Eich-/Higgs-Sektor → **Neutralinos** (Mischungen aus Bino, Wino, Higgsinos; neutral) und **Charginos** (Mischungen aus Wino, Higgsinos; geladen)

(„Photino“ und „Zino“ sind ältere Spitznamen für Eich-Eigenzustände; Experimente suchen tatsächlich nach den oben genannten **Massen-Eigenzuständen**.)

Warum ein so radikales Verdoppeln der Teilchenwelt vorschlagen? Weil SUSY elegante Lösungen für einige der tiefsten Probleme des Standardmodells verspricht.

Lösung des Hierarchieproblems

Einer der größten Reize von SUSY ist ihre Fähigkeit, das **Hierarchieproblem** zu lösen: Warum ist das Higgs-Boson so leicht im Vergleich zur Planck-Skala?

Im Standardmodell sollten Quantenkorrekturen von virtuellen Teilchen die Higgs-Masse auf extreme Werte treiben. Supersymmetrie führt Partnerteilchen ein, deren Beiträge diese Divergenzen aufheben. Das Ergebnis: Die Higgs-Masse wird natürlich stabilisiert, ohne Feinabstimmung (zumindest in „natürlichen“ SUSY-Spektren).

SUSY und große Vereinheitlichung

Ein weiteres Motiv für SUSY kommt von der Vereinheitlichung der Kräfte.

- Das Hochrechnen der Kopplungskonstanten der starken, schwachen und elektromagnetischen Kräfte auf höhere Energien zeigt, dass sie im Standardmodell fast, aber nicht ganz, an einem Punkt zusammenlaufen.
- In SUSY, mit den Beiträgen der Partnerteilchen, treffen sich die Kopplungen bei etwa 10^{16} GeV wunderschön.

Dies deutet darauf hin, dass bei extrem hohen Energien alle drei Kräfte in eine einzige **Große Vereinheitlichte Theorie (GUT)** verschmelzen könnten.

SUSY als Kandidat für dunkle Materie

Supersymmetrie bietet auch einen natürlichen Kandidaten für **dunkle Materie**.

Wenn SUSY korrekt ist, sollte eines der Partnerteilchen stabil und elektrisch neutral sein. Ein führender Kandidat ist das **leichteste Neutralino**, eine Mischung aus Bino, Wino und Higgsinos.

Neutralinos würden nur schwach interagieren und passen zum Profil von WIMPs (schwach wechselwirkende massive Teilchen). Wenn sie entdeckt werden, könnten sie die fehlenden 27 % der Materie des Universums erklären.

Experimentelle Suche nach SUSY

Seit Jahrzehnten hofften Physiker, dass supersymmetrische Teilchen knapp über den bereits untersuchten Energieskalen auftauchen würden.

- **LEP (CERN, 1990er)**: Keine SUSY-Teilchen bis ~100 GeV.
- **Tevatron (Fermilab, 1990er-2000er)**: Keine Partnerteilchen.
- **LHC (CERN, 2010er-2020er)**: Proton-Proton-Kollisionen bei bis zu **13,6 TeV** (Design: **14 TeV**). Trotz umfangreicher Suche keine Hinweise auf Squarks, Gluinos oder Neutralinos bis in den Multi-TeV-Bereich.

Das Ausbleiben von SUSY-Entdeckungen am LHC war enttäuschend. Viele der einfachsten SUSY-Versionen, wie das „minimale supersymmetrische Standardmodell“ (MSSM), sind

nun stark eingeschränkt. „Natürliche“ Spektren werden schwerer, was mehr Feinabstimmung impliziert, wenn SUSY nahe der TeV-Skala liegt.

Dennoch wurde SUSY nicht ausgeschlossen. Komplexere Modelle sagen schwerere oder subtilere Partikel voraus, möglicherweise außerhalb der Reichweite des LHC oder mit Wechselwirkungen, die zu schwach sind, um leicht nachgewiesen zu werden.

Die mathematische Eleganz von SUSY

Neben ihren phänomenologischen Motivationen hat SUSY eine tiefe mathematische Eleganz.

- Es ist die einzige mögliche Erweiterung von Raumzeitsymmetrien, die mit Relativität und Quantenmechanik vereinbar ist.
- Supersymmetrische Theorien sind oft berechenbarer: Sie bändigen Infinities und enthüllen verborgene Strukturen in der QFT.
- In der Stringtheorie ist SUSY für die Konsistenz unerlässlich: Ohne sie enthält die Theorie Tachyonen und andere Pathologien.

Selbst wenn die Natur SUSY bei zugänglichen Energien nicht realisiert, hat ihre Mathematik die Physik bereits bereichert.

Der Status der Supersymmetrie

Heute befindet sich SUSY in einer merkwürdigen Position.

- Sie bleibt eines der überzeugendsten Rahmenwerke für Physik jenseits des Standardmodells.
- Sie löst das Hierarchieproblem, unterstützt die Vereinheitlichung und bietet einen Kandidaten für dunkle Materie.
- Doch es gibt bisher keinen experimentellen Beweis.

Wenn der LHC und seine Nachfolger weiterhin nichts finden, könnte SUSY nur bei Energieskalen realisiert werden, die weit außerhalb unserer Reichweite liegen – oder vielleicht hat die Natur einen ganz anderen Weg eingeschlagen.

Eine Methode, kein Dogma

Supersymmetrie illustriert die wissenschaftliche Methode in Aktion.

Physiker identifizierten Probleme: das Hierarchieproblem, Vereinheitlichung, dunkle Materie. Sie schlugen eine kühne neue Symmetrie vor, die sie alle löst. Sie entwarfen Experimente, um sie zu testen. Bisher sind die Ergebnisse negativ – aber das bedeutet nicht, dass die Idee verschwendet war. SUSY hat unsere Werkzeuge geschärft, klargestellt, was wir suchen, und ganze Generationen von Forschung geleitet.

Wie der Äther oder Epizyklen zuvor könnte SUSY ein Sprungbrett zu einer tieferen Wahrheit sein, egal ob sie als letztes Wort überlebt oder nicht.

Stringtheorie und M-Theorie

Physik jenseits des Standardmodells wird oft durch Reparaturen motiviert: das Hierarchieproblem lösen, dunkle Materie erklären, Eichkopplungen vereinheitlichen. Die Stringtheorie ist anders. Sie beginnt nicht mit einem bestimmten Rätsel. Stattdessen beginnt sie mit Mathematik – und endet damit, unser gesamtes Verständnis von Raum, Zeit und Materie neu zu gestalten.

Ursprünge: Eine Theorie, geboren aus Misserfolg

Die Stringtheorie begann überraschenderweise nicht als Theorie von Allem, sondern als gescheiterter Versuch, die starke Kernkraft zu verstehen.

In den späten 1960ern, bevor QCD vollständig entwickelt war, versuchten Physiker, die Vielzahl der Hadronen zu erklären. Sie bemerkten Muster in Streudaten, die darauf hindeuteten, dass Resonanzen durch vibrierende Saiten modelliert werden könnten.

Das „duale Resonanzmodell“, das 1968 von Veneziano eingeführt wurde, beschrieb starke Wechselwirkungen, als wären Hadronen Anregungen winziger Saiten. Es war elegant, wurde aber schnell aufgegeben, sobald QCD als wahre Theorie der starken Kraft aufkam.

Dennoch weigerte sich die Stringtheorie zu sterben. In ihren Gleichungen verbargen sich bemerkenswerte Eigenschaften, die weit über die Kernphysik hinauszuweisen schienen.

Die überraschende Entdeckung: Der Graviton

Als Theoretiker die Saitenvibrationen quantisierten, stellten sie fest, dass das Spektrum zwangsläufig ein **masseloses Spin-2-Teilchen** enthielt.

Das war schockierend. Die Quantenfeldtheorie hatte gezeigt, dass ein masseloses Spin-2-Teilchen einzigartig ist: Es muss das Quantum der Gravitation sein, der **Graviton**.

Wie John Schwarz später bemerkte: „*Aber eine überraschende Tatsache trat zutage: Die Mathematik der Stringtheorie enthielt zwangsläufig ein masseloses Spin-2-Teilchen – einen Graviton.*“

Was als Theorie der Hadronen begann, hatte versehentlich den Baustein der Quantengravitation hervorgebracht.

Die Kernidee: Saiten, keine Punkte

Im Kern ersetzt die Stringtheorie Punktteilchen durch winzige eindimensionale Objekte: Saiten.

- Saiten können **offen** (mit zwei Endpunkten) oder **geschlossen** (Schleifen) sein.
- Unterschiedliche Schwingungsmodi der Saite entsprechen verschiedenen Teilchen.
 - Eine bestimmte Schwingung erscheint als Photon.

- Eine andere als Gluon.
- Eine andere als Quark.
- Und ein Modus, zwangsläufig, als Graviton.

Dieser einfache Wandel – von Punkten zu Saiten – löst viele der Infinites, die die Quantengravitation plagen. Die endliche Größe der Saite verteilt Wechselwirkungen, die sonst bei null Abstand explodieren würden.

Supersymmetrie und Superstrings

Frühe Versionen der Stringtheorie hatten Probleme: Sie enthielten Tachyonen (Instabilitäten) und erforderten unrealistische Eigenschaften. Der Durchbruch kam mit der Einführung von **Supersymmetrie**, die in den 1970ern und 1980ern zur **Superstringtheorie** führte.

Superstrings beseitigten Tachyonen, integrierten Fermionen und brachten neue mathematische Konsistenz.

Aber es gab einen Haken: Die Stringtheorie funktioniert nur in höheren Dimensionen. Genauer gesagt, **10 Raumzeit-Dimensionen**.

- Die vier, die wir sehen (drei Raumdimensionen, eine Zeitdimension).
- Sechs weitere, kompaktifiziert oder auf winzigen Skalen zusammengerollt, unsichtbar für aktuelle Experimente.

Diese Idee, so radikal sie scheint, war nicht völlig neu. In den 1920ern hatte die **Kaluza-Klein-Theorie** bereits angedeutet, dass zusätzliche Dimensionen Gravitation und Elektromagnetismus vereinen könnten. Die Stringtheorie belebte und erweiterte diese Idee enorm.

Die fünf Stringtheorien

Mitte der 1980er fanden Physiker heraus, dass die Stringtheorie nicht einzigartig war, sondern in **fünf verschiedenen Versionen** kam:

1. **Typ I** – Offene und geschlossene Saiten, einschließlich orientierter und unorientierter Saiten.
2. **Typ IIA** – Geschlossene, orientierte Saiten, nicht-chiral.
3. **Typ IIB** – Geschlossene, orientierte Saiten, chiral.
4. **Heterotische SO(32)** – Geschlossene Saiten mit einer hybriden Konstruktion.
5. **Heterotische $E_8 \times E_8$** – Eine hochsymmetrische Version, später entscheidend für die Verbindung zur realistischen Teilchenphysik.

Jede schien mathematisch konsistent, aber warum sollte die Natur eine auswählen?

Die erste Superstring-Revolution

1984 zeigten Michael Green und John Schwarz, dass die Stringtheorie Quantenanomalien automatisch aufheben konnte – etwas, das Quantenfeldtheorien sorgfältig konstruieren

mussten. Diese Entdeckung löste die **erste Superstring-Revolution** aus, bei der Tausende von Physikern sich der Stringtheorie als Kandidaten für eine vereinheitlichte Theorie aller Kräfte zuwandten.

Es war der erste ernsthafte Rahmen, in dem Quantengravitation nicht nur konsistent, sondern unvermeidlich war.

Die zweite Superstring-Revolution: M-Theorie

Mitte der 1990er entfaltete sich eine zweite Revolution. Edward Witten und andere entdeckten, dass die fünf verschiedenen Stringtheorien keine Rivalen waren, sondern unterschiedliche Grenzen einer einzigen, tieferen Theorie: der **M-Theorie**.

Die M-Theorie soll in **11 Dimensionen** existieren und umfasst nicht nur Saiten, sondern auch höherdimensionale Objekte, sogenannte **Branen** (kurz für Membranen).

- 1-dimensionale Branen = Saiten.
- 2-dimensionale Branen = Membranen.
- Höherdimensionale Branen bis zu 9 räumlichen Dimensionen.

Diese Branen eröffneten reichhaltige neue Möglichkeiten: Ganze Universen könnten als 3-Branen existieren, die in höherdimensionalem Raum schweben, wobei die Gravitation in die Masse „leckt“, während andere Kräfte eingeschränkt bleiben. Dieses Bild inspirierte moderne extradimensionale Modelle wie **Randall-Sundrum**.

Prominente Beispiele: Kaluza-Klein und Randall-Sundrum

- **Kaluza-Klein (1920er):** Schlug eine zusätzliche fünfte Dimension vor, um Gravitation und Elektromagnetismus zu vereinen. Die Idee wurde für Jahrzehnte beiseitegelegt, aber die Stringtheorie belebte sie in größerer Form wieder. Kompaktifizierte zusätzliche Dimensionen bleiben ein Kernmerkmal von Stringmodellen.
- **Randall-Sundrum (1999):** Schlug „verzerrte“ zusätzliche Dimensionen vor, in denen unser Universum eine 3-Brane ist, eingebettet in höhere Dimensionen. Gravitation verbreitet sich in die Masse, was erklärt, warum sie schwächer ist als andere Kräfte. Solche Modelle sagen mögliche Signale in Teilchen-Collidern oder Abweichungen vom Newtonschen Gesetz bei sehr kurzen Distanzen voraus.

Experimentelle Hinweise und Herausforderungen

Die Stringtheorie macht kühne Behauptungen, aber sie zu testen ist äußerst schwierig.

- **Zusätzliche Dimensionen:** Könnten sich durch fehlende Energiesignale oder **Kaluza-Klein-Anregungen** offenbaren – möglicherweise für **Gravitonen oder sogar Standardmodell-Felder**, abhängig von der Konfiguration. Collider-Beschränkungen erreichen typischerweise den **Multi-TeV-Bereich**.
- **Gravitonen:** Ein masseloses Spin-2-Teilchen wird vorhergesagt, aber das Nachweisen eines einzelnen Gravitons liegt jenseits der machbaren Technologie. Indirekte Ef-

fekte, wie Abweichungen in Gravitationswellen, sind möglich.

- **Supersymmetrie:** Die Stringtheorie erfordert SUSY auf irgendeiner Skala, aber der LHC hat bisher keine Partnerteilchen gefunden.
- **Kosmologie:** Das frühe Universum, die Inflation und der kosmische Mikrowellenhintergrund könnten Abdrücke der Stringphysik enthalten, obwohl die Ergebnisse bisher nicht schlüssig sind.

Trotz der Herausforderungen hat die Stringtheorie fruchtbaren Boden für die Mathematik geliefert und Fortschritte in Geometrie, Topologie und Dualitäten wie AdS/CFT inspiriert (die Gravitation in höheren Dimensionen mit Quantenfeldtheorie ohne Gravitation verbindet).

Schönheit und Kontroverse

Befürworter argumentieren, dass die Stringtheorie der vielversprechendste Weg zu einer vereinheitlichten Theorie ist: Sie umfasst Quantengravitation, vereint alle Kräfte und erklärt, warum ein Graviton existieren muss.

Kritiker argumentieren, dass die Stringtheorie ohne experimentelle Bestätigung Gefahr läuft, sich von der empirischen Wissenschaft zu lösen. Ihre riesige „Landschaft“ möglicher Lösungen (bis zu 10^{500}) erschwert es, einzigartige Vorhersagen zu extrahieren.

Beide Seiten stimmen in einem Punkt überein: Die Stringtheorie hat unsere Denkweise über Physik verändert und eine neue Sprache für die Vereinheitlichung bereitgestellt.

Auf dem Weg zu einer Theorie von Allem

Wenn Supersymmetrie der nächste Schritt jenseits des Standardmodells ist, ist die Stringtheorie der Schritt danach: ein Kandidat für die lang gesuchte **Theorie von Allem**.

Ihr kühnster Anspruch ist nicht nur, dass sie das Standardmodell und die Gravitation umfasst, sondern dass diese unvermeidliche Konsequenzen vibrierender Saiten in höheren Dimensionen sind. Der Graviton ist kein Zusatz – er ist eingebaut.

Ob die Natur diesen Weg gewählt hat, bleibt zu entdecken.

Erkundung der Grenzen: Experimente jenseits des Standardmodells

Theorien sind das Lebenselixier der Physik, aber Experimente sind ihr Herzschlag. Supersymmetrie, Stringtheorie und zusätzliche Dimensionen sind wunderschöne mathematische Konstruktionen, aber sie leben oder sterben durch Beweise. Wenn sie mehr als Spekulationen sein sollen, müssen sie Spuren in den Daten hinterlassen.

Physiker haben raffinierte Wege entwickelt, um nach diesen Spuren zu suchen – in Collidern, im Kosmos und in der Struktur der Raumzeit selbst.

Collider: Jagd nach Partnerteilchen und Gravitonen

Der Large Hadron Collider (LHC) bei CERN ist der leistungsstärkste Teilchenbeschleuniger der Welt, der Protonen bei Energien bis zu **13,6 TeV** (Design: **14 TeV**) kollidiert. Er war das wichtigste Werkzeug der Menschheit, um Physik jenseits des Standardmodells zu erforschen.

Supersymmetrie am LHC

- **Suche nach Partnerteilchen:** Experimente bei ATLAS und CMS haben die Daten nach Squarks, Gluinos und Neutralinos/Charginos durchforstet. Diese würden oft als „fehlende Energie“-Signaturen erscheinen, da SUSY-Teilchen der Detektion entgehen.
- **Ergebnisse:** Bis in den Multi-TeV-Bereich wurden keine bestätigten SUSY-Teilchen gefunden. Dies hat viele der einfachsten SUSY-Modelle ausgeschlossen und drängt „natürliche“ SUSY in schwerere, stärker abgestimmte Bereiche.

Gravitonen und zusätzliche Dimensionen

- **Kaluza-Klein-Modi:** Wenn zusätzliche Dimensionen existieren, könnten **Gravitonen oder sogar SM-Felder** als massive KK-Anregungen erscheinen, nachweisbar als Resonanzen in Dilepton-, Diphotonen- oder Dijet-Kanälen.
- **Randall-Sundrum-Signale:** Verzerrte zusätzliche Dimensionen könnten Graviton-Resonanzen mit charakteristischen Spin-2-Winkelmustern erzeugen.
- **Ergebnisse:** LHC-Suchen haben bisher keine Beweise gefunden, haben aber die Grenzen in den **Multi-TeV-Bereich** verschoben und die Größe, Verzerrung und Geometrie zusätzlicher Dimensionen eingeschränkt.

Mikro-Schwarze Löcher

Einige Theorien legen nahe, dass, wenn die Gravitation bei der TeV-Skala stark wird, winzige Schwarze Löcher in LHC-Kollisionen entstehen könnten, die in Teilchenexplosionen verdampfen. Solche Ereignisse wurden nicht beobachtet.

Präzisionsexperimente: Testen der Gravitation auf kleinen Skalen

Wenn zusätzliche Dimensionen existieren, könnte Newtons Gravitationsgesetz auf kurzen Distanzen zusammenbrechen.

- **Torsionswaage-Experimente („Eöt-Wash“):** Testen das Inverse-Quadrat-Gesetz bis in den **Sub-Millimeter-Bereich** – derzeit **Dutzende Mikrometer ($\sim 50 \mu\text{m}$)**.
- **Ergebnisse:** Es wurden keine Abweichungen gefunden. Diese Experimente **schließen** eine breite Klasse von extradimensionalen Szenarien mit charakteristischen Längen **größer als $\sim 10^{-4} \text{ m}$** aus (modellabhängig).

Diese Tisch-Experimente sind bemerkenswert sensitiv und erforschen Skalen, die für Collier unzugänglich sind.

Gravitationswellen: Ein neues Fenster zur Quantengravitation

Die Entdeckung von Gravitationswellen durch LIGO im Jahr 2015 eröffnete eine neue Grenze.

- **Zusätzliche Polarisationen / modifizierte Ausbreitung:** Einige Quantengravitations- oder extradimensionale Modelle sagen Abweichungen von GR voraus (zusätzliche Polarisationen, Dispersion oder modifizierte Ringdowns).
- **Ringdown-Spektroskopie:** Das „Klingen“ von Schwarzen Löchern nach einer Verschmelzung könnte subtile Abweichungen von GR offenbaren.
- **Primordiale Gravitationswellen:** Wellen aus dem Urknall könnten Abdrücke stringy Physik tragen, nachweisbar durch zukünftige Observatorien wie LISA oder das Einstein-Teleskop.

Bisher stimmen die Beobachtungen mit GR innerhalb der aktuellen Unsicherheiten überein, aber höhere Präzision könnte Überraschungen bringen.

Kosmologie: Das Universum als Labor

Das Universum selbst ist der ultimative Teilchenbeschleuniger.

- **Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung (CMB):** Winzige Fluktuationen kartieren das frühe Universum. Einige Stringmodelle sagen spezifische Signaturen vorraus, wie Nicht-Gaußsche Verteilungen oder oszillierende Merkmale.
- **Inflation:** Die schnelle Expansion des Universums könnte durch Felder angetrieben worden sein, die mit der Stringtheorie verbunden sind. Der Nachweis primordialer B-Modi im CMB wäre ein starker Hinweis.
- **Dunkle-Materie-Suchen:** Neutralinos aus SUSY sind Hauptkandidaten für dunkle Materie. Experimente wie XENONnT, LUX-ZEPLIN und PandaX suchen nach WIMPs durch nukleare Rückstöße.
- **Axionen:** Die Stringtheorie sagt auch axionartige Teilchen voraus, die durch Resonanzkavitäten oder astrophysikalische Beobachtungen nachgewiesen werden könnten.

Bisher schweigt der Himmel. Dunkle Materie bleibt unentdeckt, und kosmologische Daten passen zum Λ CDM-Modell ohne klare stringy Fingerabdrücke.

Der aktuelle Status: Einschränkungen, keine Bestätigungen

Jahrzehntelange Suche hat weder SUSY, zusätzliche Dimensionen noch stringy Signale bestätigt. Aber das Fehlen von Beweisen ist kein Beweis für Abwesenheit:

- SUSY könnte bei Skalen außerhalb der Reichweite des LHC existieren oder in weniger auffälligen Spektren; die bisherigen Nullresultate **begünstigen stärker abgestimmte („weniger natürliche“) Versionen**, wenn SUSY nahe der TeV-Skala liegt.
- Zusätzliche Dimensionen könnten kleiner, stärker verzerrt oder anderweitig vor aktuellen Sonden verborgen sein.
- Die Stringtheorie könnte nur im sehr frühen Universum nachweisbare Abdrücke hinterlassen, die nur durch Kosmologie zugänglich sind.

Einige **Präzisionsanomalien** (z. B. die Myon-(g-2)-Messung und einige **Spannungen in der Flavor-Physik**) bleiben **faszinierend, aber ungelöst**; sie motivieren weitere Untersuchungen, ohne das SM bisher umzustoßen.

Was Experimente getan haben, ist **den Parameterraum einzugrenzen**. Sie haben uns gesagt, wo SUSY nicht ist, wie klein zusätzliche Dimensionen sein müssen und wie stark oder schwach dunkle Materie interagieren kann oder nicht.

Der Weg nach vorn

Zukünftige Experimente versprechen, tiefer zu forschen:

- **Hochleistungs-LHC (HL-LHC)**: Wird $\sim 10\times$ mehr Daten sammeln, SUSY bis zu höheren Massen und seltenen Prozessen untersuchen.
- **Zukünftiger Kreis-Collider (FCC-hh)**: Vorgeschlagener 100-TeV-Collider, leistungsfähig genug, um Energieskalen zu erforschen, wo GUT-Physik auftreten könnte.
- **LISA (2030er)**: Weltraumbasiertes Gravitationswellen-Observatorium, empfindlich für primordiale Signale aus dem frühen Universum.
- **Nächste Generation Dunkle-Materie-Detektoren**: Mit Sensitivität für schwache Signale könnten sie endlich ein WIMP oder Axion einfangen.

Wissenschaft als Reise

Die experimentelle Geschichte der BSM-Physik ist keine Geschichte des Scheiterns, sondern des Prozesses.

- Nullresultate schließen einfache Modelle aus und schärfen unsere Theorien.
- Jede Einschränkung führt uns zu verfeinerten, vorhersagekräftigeren Rahmenwerken.
- Das Fehlen von SUSY oder zusätzlichen Dimensionen bei der TeV-Skala tötet die Ideen nicht – es treibt sie in neues Terrain.

So wie Rutherford's Goldfolien-Experiment das Pflaumenpudding-Modell zerschlug oder LIGO Zweifel an Gravitationswellen beseitigte, könnte die nächste große Entdeckung plötzlich kommen – und alles verändern.

Auf dem Weg zu einer Theorie von Allem

Seit Jahrhunderten schreitet die Physik durch Vereinheitlichung voran. Newton vereinte Himmel und Erde unter einem Gravitationsgesetz. Maxwell vereinte Elektrizität und Magnetismus. Einstein vereinte Raum und Zeit. Die elektroschwache Theorie zeigte, dass zwei sehr unterschiedliche Kräfte Aspekte einer einzigen sind.

Der nächste natürliche Schritt ist der kühnste bisher: **alle vier fundamentalen Wechselwirkungen** – stark, schwach, elektromagnetisch und gravitativ – in einem einzigen, selbst-konsistenten Rahmen zu vereinen. Dies ist der Heilige Gral der Physik: die **Theorie von Allem (ToE)**.

Warum eine ToE wichtig ist

Eine vollständige Vereinheitlichung ist nicht nur philosophische Eleganz; sie adressiert tiefe praktische und konzeptionelle Probleme:

- **Quantengravitation:** Die allgemeine Relativitätstheorie bricht bei der Planck-Skala (10^{19} GeV) zusammen. Nur eine Quantentheorie der Gravitation kann Schwarze Löcher und die Urknall-Singularität erklären.
- **Natürlichkeit und Feinabstimmung:** Das Hierarchieproblem und das Problem der kosmologischen Konstante schreien nach einer tieferen Erklärung.
- **Parameter des Standardmodells:** Warum haben Teilchen die Massen und Ladungen, die sie haben? Warum drei Generationen von Quarks und Leptonen? Eine ToE könnte diese Geheimnisse erklären.
- **Kosmologie:** Dunkle Materie, dunkle Energie und Inflation könnten alle mit Physik bei der Vereinheitlichungsskala verbunden sein.

Eine ToE würde nicht nur Kräfte vereinen – sie würde Skalen vereinen, von den winzigsten Saiten der Quantentheorie bis zu den größten kosmischen Strukturen.

Supersymmetrie und große Vereinheitlichung

Supersymmetrie (SUSY), wenn sie in der Natur realisiert ist, bietet einen Sprungstein zu einer ToE.

- **Hierarchieproblem gelöst:** Partnerteilchen heben divergierende Korrekturen an der Higgs-Masse auf.
- **Eichkopplungen vereinheitlicht:** Mit SUSY konvergieren die Stärken der drei Kräfte bei 10^{16} GeV wunderschön und deuten auf eine **Große Vereinheitlichte Theorie (GUT)** hin.
- **Kandidat für dunkle Materie:** Das Neutralino bietet eine natürliche Erklärung für kosmische dunkle Materie.

SUSY-inspirierte GUTs (wie SU(5), SO(10) oder E_6) stellen sich vor, dass bei ultrahohen Energien Quarks und Leptonen in größere Multiplets vereint werden und Kräfte in eine einzige Eichgruppe verschmelzen.

Aber SUSY ist in Experimenten bisher nicht aufgetaucht. Wenn sie nur bei Skalen außerhalb unserer Reichweite existiert, bleibt ihre vereinheitlichende Kraft verlockend, aber verborgen.

Stringtheorie: Quantengravitation und der Graviton

Die Stringtheorie geht weiter. Anstatt das Standardmodell zu flicken, schreibt sie das Fundament neu:

- **Saiten, keine Punkte:** Alle Teilchen sind Vibrationen winziger Saiten.
- **Graviton entsteht natürlich:** Die masselose Spin-2-Anregung ist unvermeidlich, was bedeutet, dass Quantengravitation eingebaut ist.

- **Vereinheitlichung:** Verschiedene Vibrationsmodi ergeben alle bekannten Teilchen – Quarks, Leptonen, Eichbosonen, Higgs – innerhalb eines Rahmens.
- **Zusätzliche Dimensionen:** Die Stringtheorie erfordert 10 Raumzeit-Dimensionen; die M-Theorie erfordert 11, mit verborgenen Dimensionen, die kompaktifiziert oder verzerrt sind.

In dieser Vision ist Vereinheitlichung kein Zufall – sie ist Geometrie. Kräfte unterscheiden sich, weil Saiten auf verschiedene Weise vibrieren, geformt durch die Topologie zusätzlicher Dimensionen.

M-Theorie und Branenwelten

Die Entdeckung, dass die fünf Stringtheorien durch Dualitäten verbunden sind, führte zur M-Theorie, einem noch größeren Rahmen:

- Umfasst Saiten, Membranen und höherdimensionale Branen.
- Legt nahe, dass unser Universum eine 3-Brane sein könnte, eingebettet in einem höherdimensionalen Raum.
- Bietet natürliche Erklärungen, warum Gravitation schwächer ist (sie breitet sich in zusätzliche Dimensionen aus) und wie mehrere Universen in einem „Multiversum“ existieren könnten.

Die M-Theorie ist noch unvollständig, aber sie stellt den ehrgeizigsten Schritt hin zu einer ToE dar, der je versucht wurde.

Andere Wege zur Quantengravitation

Stringtheorie und M-Theorie sind nicht die einzigen Wege. Physiker erforschen mehrere Rahmenwerke, jedes mit unterschiedlichen Stärken:

- **Schleifenquantengravitation (LQG):** Versucht, die Raumzeit direkt zu quantisieren, und sagt voraus, dass der Raum bei der Planck-Skala diskret ist.
- **Asymptotische Sicherheit:** Legt nahe, dass die Gravitation bei hohen Energien gutartig sein könnte aufgrund eines nicht-trivialen Fixpunkts.
- **Kausale dynamische Triangulationen (CDT):** Baut die Raumzeit aus einfachen geometrischen Bausteinen auf.
- **Twistor-Theorie und Amplituhedra:** Neuartige mathematische Rahmenwerke, die Raumzeit und Streuamplituden neu denken.

Obwohl keines bisher den vereinheitlichenden Umfang der Stringtheorie erreicht, veranschaulichen sie den Reichtum der Suche.

Die Rolle des Experiments

Eine ToE muss letztendlich testbar sein. Obwohl die Planck-Skala weit jenseits aktueller Experimente liegt, suchen Physiker nach indirekten Beweisen:

- **Collider:** SUSY-Teilchen, zusätzliche Dimensionen oder Mikro-Schwarze Löcher.

- **Präzisionstests:** Abweichungen vom Newtonschen Gesetz auf kurzen Skalen.
- **Gravitationswellen:** Exotische Polarisationen oder Echos höherer Dimensionen.
- **Kosmologie:** Abdrücke von Inflation, Kandidaten für dunkle Materie oder Axionen, die von der Stringtheorie vorhergesagt werden.

Bisher bleibt die ToE außer Reichweite, aber jedes Nullresultat beschneidet die Möglichkeiten.

Schönheit und Herausforderung

Eine wahre ToE würde nicht nur die Physik vereinen – sie würde **menschliches Wissen** vereinen. Sie würde Quantenmechanik und Relativitätstheorie, Mikro- und Makrokosmos, Teilchen und Kosmos verbinden.

Doch sie steht vor einem Paradoxon: Die Skala, auf der die Vereinheitlichung stattfindet, könnte für immer außerhalb der experimentellen Reichweite liegen. Ein 100-TeV-Collider erforscht nur einen Bruchteil des Weges zur Planck-Skala. Wir könnten auf Kosmologie, mathematische Konsistenz oder indirekte Signaturen angewiesen sein.

Der Traum bleibt lebendig wegen der tiefen Eleganz der Rahmenwerke. Wie Witten bemerkte, ist die Stringtheorie nicht nur „ein Satz von Gleichungen“, sondern „ein neuer Rahmen für die Physik“.

Wissenschaft als Methode, nicht als Dogma

Die Suche nach einer ToE geht nicht darum, die Stringtheorie, SUSY oder irgendeine einzelne Idee als „wahr“ zu erklären. Es geht um die **wissenschaftliche Methode**:

- Risse in bestehenden Theorien identifizieren.
- Kühne neue Rahmenwerke vorschlagen.
- Sie an der Realität testen, verwerfen oder verfeinern, wie nötig.

Die Geschichte ist noch lange nicht zu Ende. Aber genau diese Offenheit – die Weigerung, irgendeine Theorie als heilig zu behandeln – macht die Physik zu einer lebendigen Wissenschaft, nicht zu einem Dogma.

Der Horizont voraus

Das nächste Jahrhundert der Physik könnte Folgendes offenbaren:

- Beweise für Supersymmetrie oder ihre Alternativen.
- Kosmologische Daten, die stringy Vorhersagen bestätigen oder widerlegen.
- Eine tiefere Neuformulierung der Raumzeit selbst.

Oder vielleicht ist die wahre ToE etwas, das noch niemand vorgestellt hat.

Aber die Suche selbst – der Drang zu vereinen, zu erklären, die Natur als Ganzes zu sehen – ist genauso sehr ein Teil der Menschheit wie die Gleichungen selbst.

Referenzen & weiterführende Literatur

Supersymmetrie und große Vereinheitlichung

- Wess, J., & Bagger, J. (1992). *Supersymmetry and Supergravity*. Princeton University Press.
- Baer, H., & Tata, X. (2006). *Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events*. Cambridge University Press.
- Georgi, H., & Glashow, S. L. (1974). „Unity of All Elementary-Particle Forces.“ *Physical Review Letters*, 32(8), 438.

Stringtheorie und M-Theorie

- Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. (1987). *Superstring Theory* (Vols. 1 & 2). Cambridge University Press.
- Polchinski, J. (1998). *String Theory* (Vols. 1 & 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). „String Theory Dynamics in Various Dimensions.“ *Nuclear Physics B*, 443(1), 85–126.
- Becker, K., Becker, M., & Schwarz, J. H. (2006). *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge University Press.

Schleifenquantengravitation und Alternativen

- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- Thiemann, T. (2007). *Modern Canonical Quantum General Relativity*. Cambridge University Press.
- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. (2005). „Reconstructing the Universe.“ *Physical Review D*, 72(6), 064014.

Experimentelle Grenzen

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). „Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson.“ *Physics Letters B*, 716(1), 1–29.
- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). „Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV.“ *Physics Letters B*, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2016). „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.“ *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.

Zugängliche populäre Darstellungen

- Greene, B. (1999). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). *Seven Brief Lessons on Physics*. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*. Basic Books.