

String Theorie - Die Suche nach der großen Vereinheitlichung

Ralph Blumenhagen

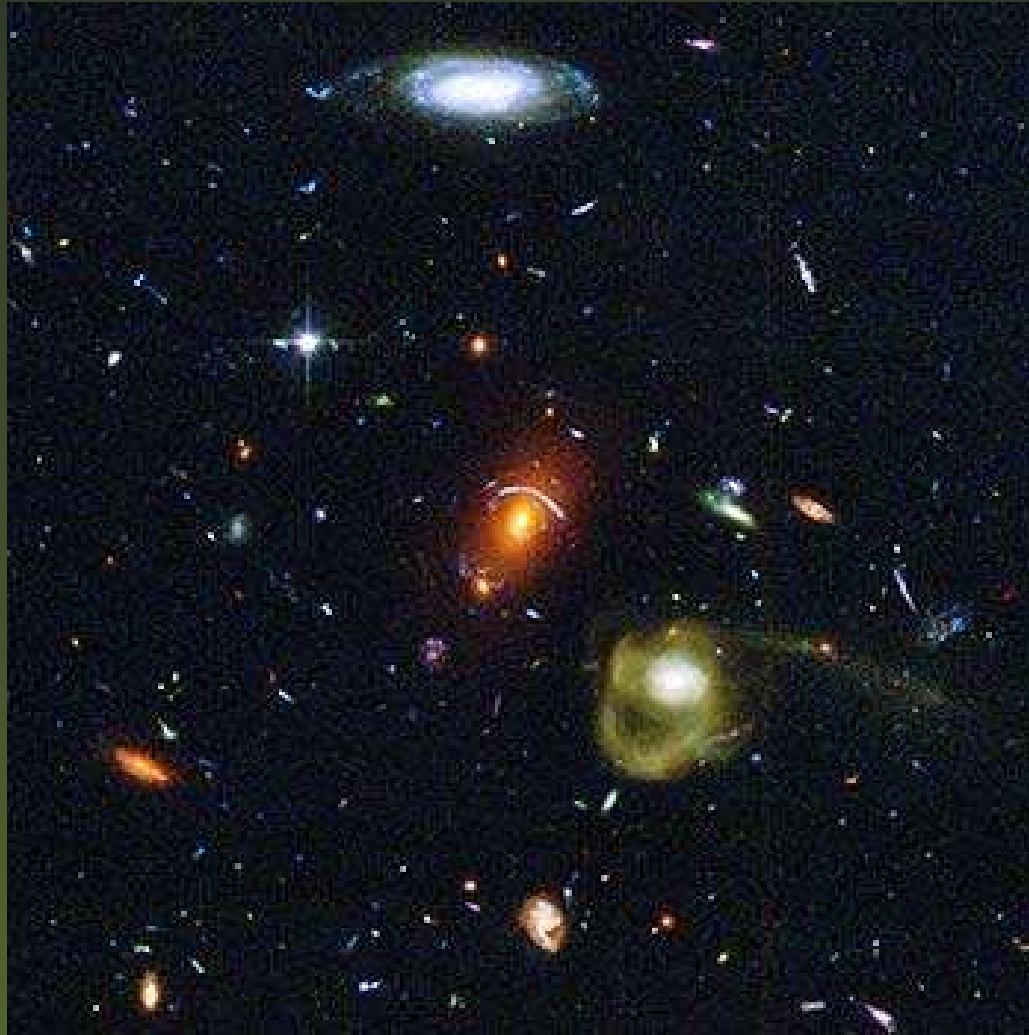
Max-Planck-Institut für Physik

Das Ziel der Theoretischen Physik

- Theoretische Physiker versuchen die Resultate von physikalischen Experimenten mit möglichst allgemeinen Theorien zu beschreiben
- Die Beschreibung erfolgt in der Sprache der Mathematik, d.h. es geht um quantitatives Verständnis der Vorgänge
- Jede Theorie bedarf einiger Input Parameter (Naturkonstanten), aus denen dann im Rahmen der jeweiligen Theorie andere Größen berechnet werden können
- Das große Ziel ist es, eine Theorie zu entwickeln, die möglichst allgemein ist und die Minimalzahl von Inputparametern hat ("Große Vereinheitlichung").

Die Welt im Großen

Schauen wir in das Weltall -



Die Welt im Großen

so sehen wir diverse kosmische Objekte wie

- Planeten, Kometen
- Sterne, Weiße Zwerge, Rote Riesen, Super Novae
- Sternhaufen
- Galaxien
- Cluster von Galaxien

deren Dynamik untereinander sich aus der Gravitationsanziehung gemäß Newton

(1)
$$F = G \frac{m M}{r^2}$$

verstehen lassen.

Allgemeine Relativitätstheorie

Die Gravitationskonstante G ist eine Naturkonstante.

Seit 1915 hat man eine akurateren Theorie der Gravitation, nämlich Einstein's Allgemeine Relativitätstheorie, die besagt, daß Materie (Energie) den umgebenden Raum krümmt:

$$(2) \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + g_{\mu\nu} \Lambda = 8 \pi G T_{\mu\nu}$$

- Diese Gleichung beschreibt nach unserem Kenntnisstand die Gravitation mit erstaunlicher Präzision (Lichtablenkung im Gravitationsfeld, Periheldrehung des Merkur, etc.)
- Kosmologische Lösungen → Urknall, Kosmische Expansion
- Kosmologische Konstante, Λ , ist gemäß aktueller Messungen nicht Null, aber viel, viel kleiner als es jede Theorie vorhersagt

Die Welt im Kleinen

- Wie auf sehr großen, so existieren auch auf sehr kleinen Skalen ganz neue Strukturen.
- Atome sind keineswegs unteilbar, sondern bestehen wiederum aus verschiedenen Konstituenten.



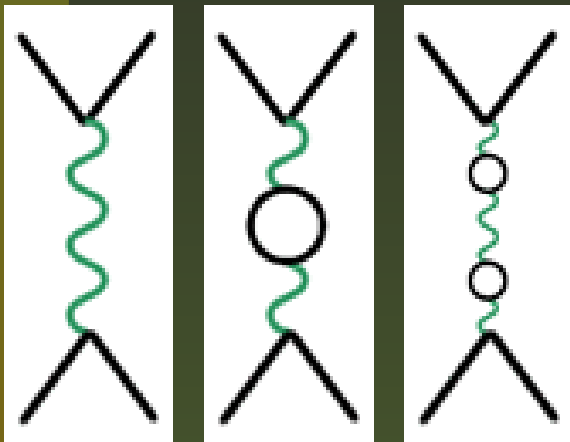
- Elektronen
- Protonen=(uud) Quarks
- Neutronen=(udd) Quarks

Teilchen und Felder

- Die nach heutiger Sicht elementaren Teilchen sind in 3 Familien angeordnet: (u, d, e, ν_e) , (c, s, μ, ν_μ) und (t, b, τ, ν_τ)
- Diese Materie-Teilchen mit Spin=1/2 wechselwirken untereinander durch drei verschiedene Kräfte
 - elektromagnetische WW: u, d, e
 - starke WW: u, d
 - schwache WW: u, d, e, ν_e
- Die Träger dieser Kräfte sind wiederum WW-Teilchen
 - elektromagnetische WW: γ - Photon, (Spin=0)
 - starke WW: G_{ab} - 8 Gluonen
 - schwache WW: Z^0, W^\pm - Bosonen

Das Standardmodell

- Mathematisch werden diese drei WW durch (lokale) Quantenfeldtheorien mit Eichwechselwirkungen beschrieben

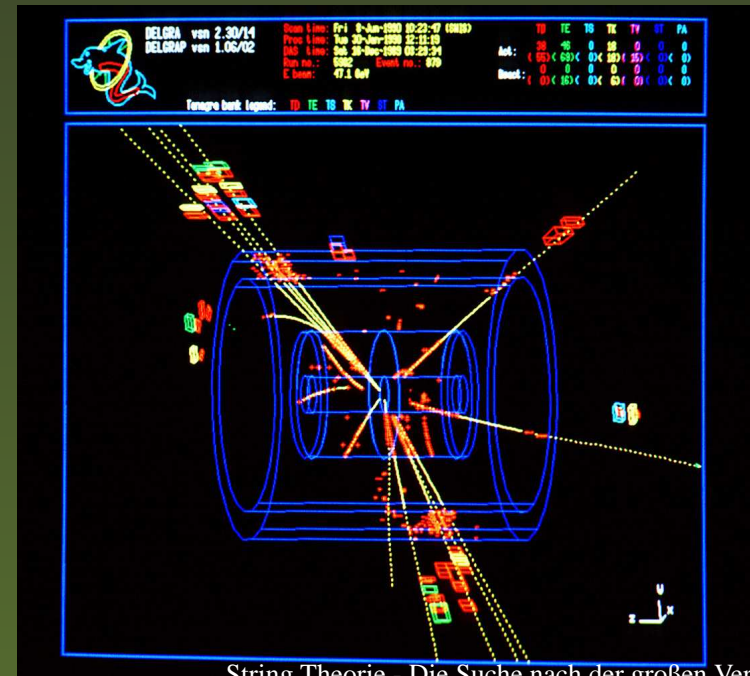


- Feynman Graphen für die Berechnung von Streuexperimenten an Teilchenbeschleunigern

- Dieses sogenannte "Standardmodell der Elementarteilchen" gehört zu der am besten getesteten physikalischen Theorie überhaupt und beschreibt alle Experimente für Distanzen $L > 10^{-17} \text{ m}$

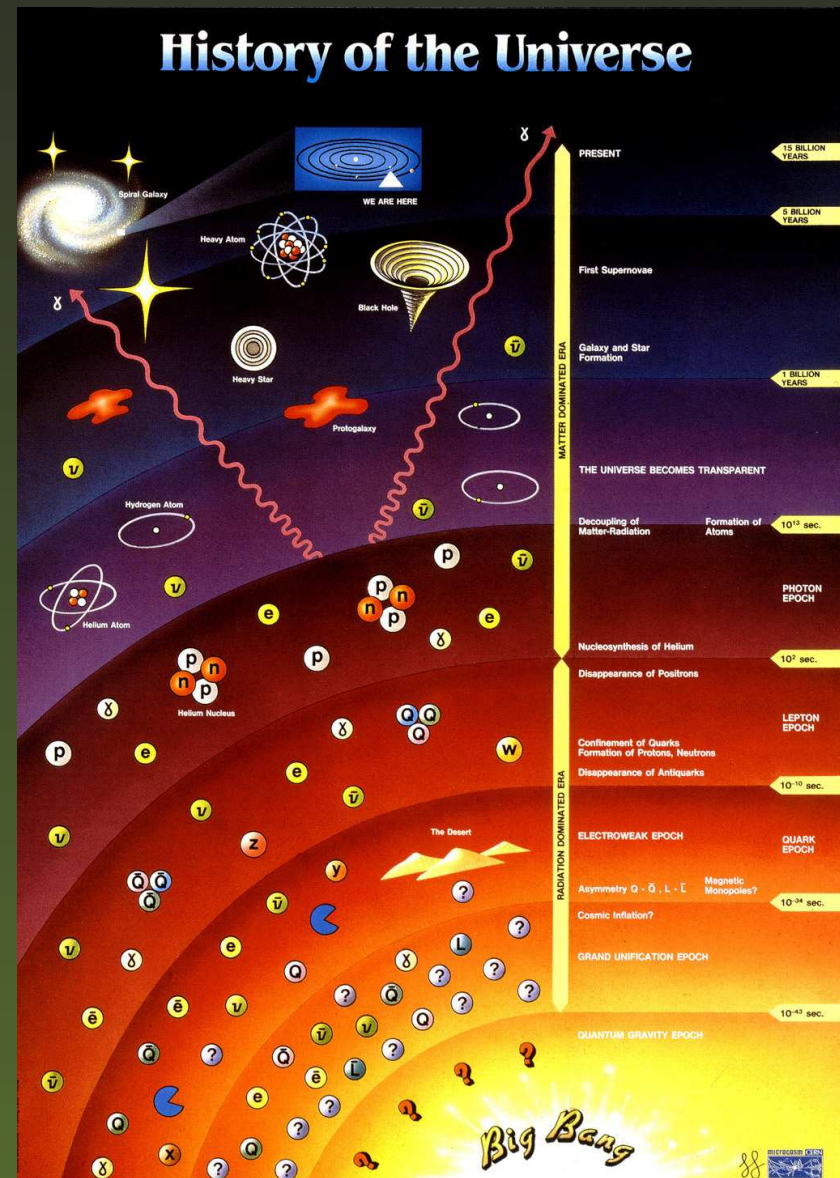
Die Suche nach dem Higgs

- Um den Teilchen im Standardmodell eine Masse zu geben, benötigt man ein weiteres Teilchen, das sogenannte Higgs Teilchen
- Am CERN wird bis 2007 der L(arge) H(adron) C(ollider) gebaut, der u.a. das Higgs Teilchen nachweisen soll



Kosmologie und Teilchenphysik

- Die Teilchenprozesse, die im SM beschrieben werden, haben kurz nach dem Urknall die Evolution des Universums bestimmt



Kritik am SM als TOE

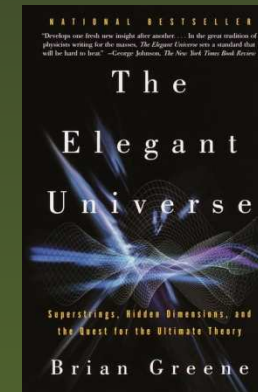
Trotz aller Erfolge des SM's und der ART gibt es einige Gründe, warum man nicht vollends zufrieden sein kann.

- Das SM enthält 19 Inputparameter (Massen, Kopplungskonstanten, Mischungswinkel), mehr als man von einer TOE erwarten würde
- Die Gravitation lässt sich nicht mit den Methoden der Quantenfeldtheorie behandeln. Die Physik ist nicht vollständig, es fehlt eine Quantentheorie der Gravitation


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8 \pi G T_{\mu\nu}$$

String Theorie

- Wenn SM und ART unvereinbar sind, dann muß mindestens eine der Grundannahmen der beiden Theorien bei kleinen Abständen, $L \sim 10^{-33}\text{cm}$ falsch sein.
- Die Stringtheorie gibt die Annahme auf, daß die fundamentalen Objekte Punktteilchen sind. Stattdessen geht sie (zunächst) davon aus, daß die kleinsten Teilchen eindimensional sind

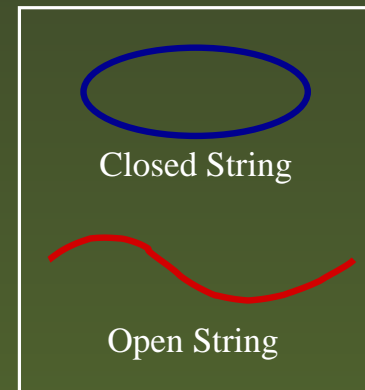
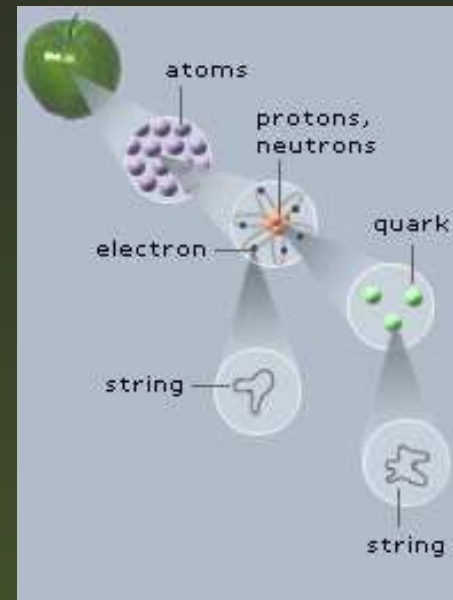


String Theorie

- Die mathematische Konsistenz der Stringtheorie hat einige verblüffende Implikationen
 - Die Theorie weist eine neue Symmetrie zwischen Bosonen und Fermionen auf (Supersymmetrie)
 - Die Raum-Zeit, in der sich die Strings bewegen, ist zehn-dimensional
 - Die Theorie auf der zweidimensionalen Weltfläche hat eine hohe Symmetrie (Konforme Symmetrie)
 - Es gibt in 10D genau 5 konsistente Stringtheorien, Type IIA/IIB, Type I, $\text{Het}_{E_8 \times E_8}$ und $\text{Het}_{SO(32)}$

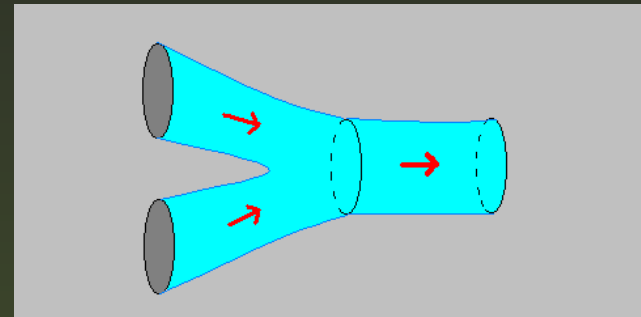
String Anregungen

- Die uns bekannten Teilchen sind nichts anderes als verschiedene Schwingungsmoden des Strings, $M \sim M_s$ Stringskala
- Geschlossene Strings: Graviton
- Offene Strings: WW-Feld



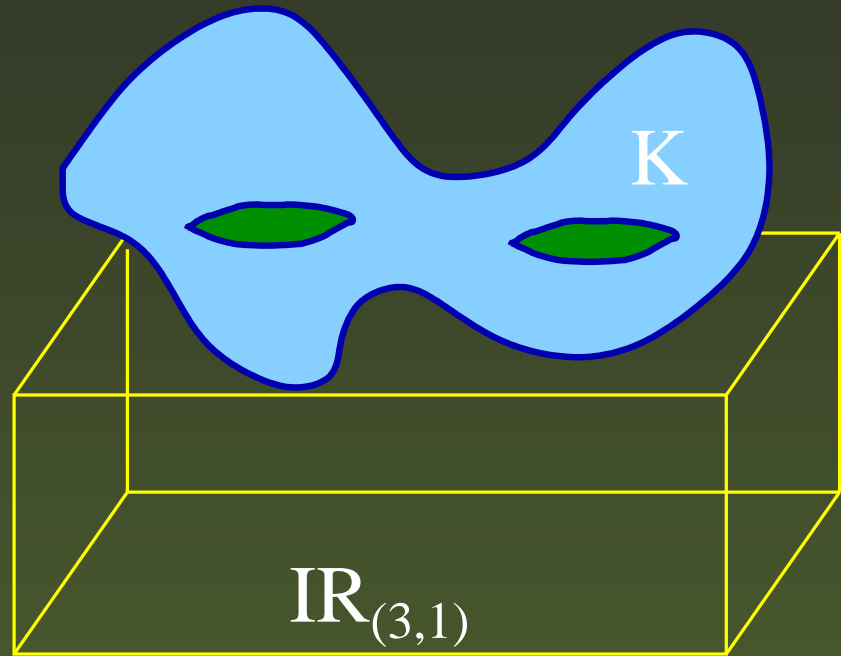
Wechselwirkung von Strings

- Stringwechselwirkung läßt sich durch verallgemeinerte Feynman-Graphen darstellen



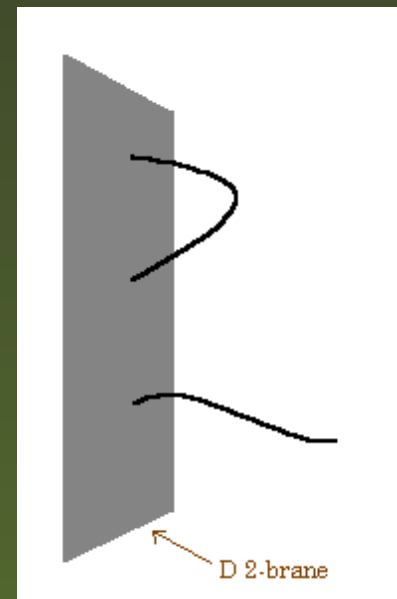
Vier-dimensionale Strings

- Wir leben aber in vier Raum-Zeit Dimensionen!
- Man kompaktifiziert die Stringtheorie auf einen kompakten sechs dimensionalen Raum und läßt vier Dimensionen makroskopisch
- Die Geometrie des kompakten Raumes, K , bestimmt die Physik in 4D, wie z.B. die Anzahl der Familien
- Man verliert die Eindeutigkeit der 10D Stringtheorien



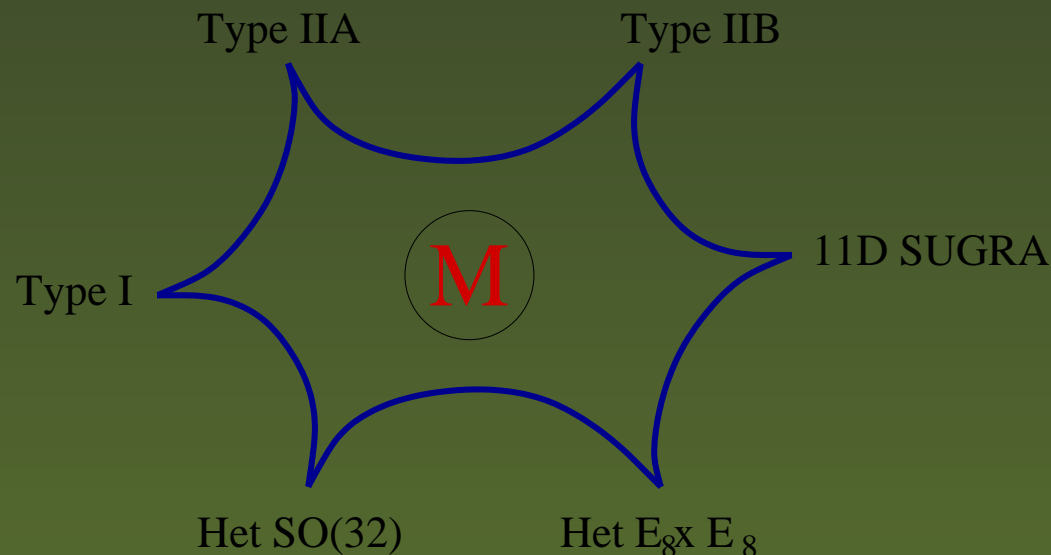
D-Branen

- In den Jahren 1995-1997 haben die Physiker viel Neues über die Stringtheorie herausgefunden
- String Theorie ist nicht nur eine Theorie von Strings, sondern enthält automatisch auch noch höher dimensionale Objekte, sogenannte D-branen
- Die Dynamik von D-branen wird durch offene Strings beschrieben, die auf der Brane enden



M-Theorie

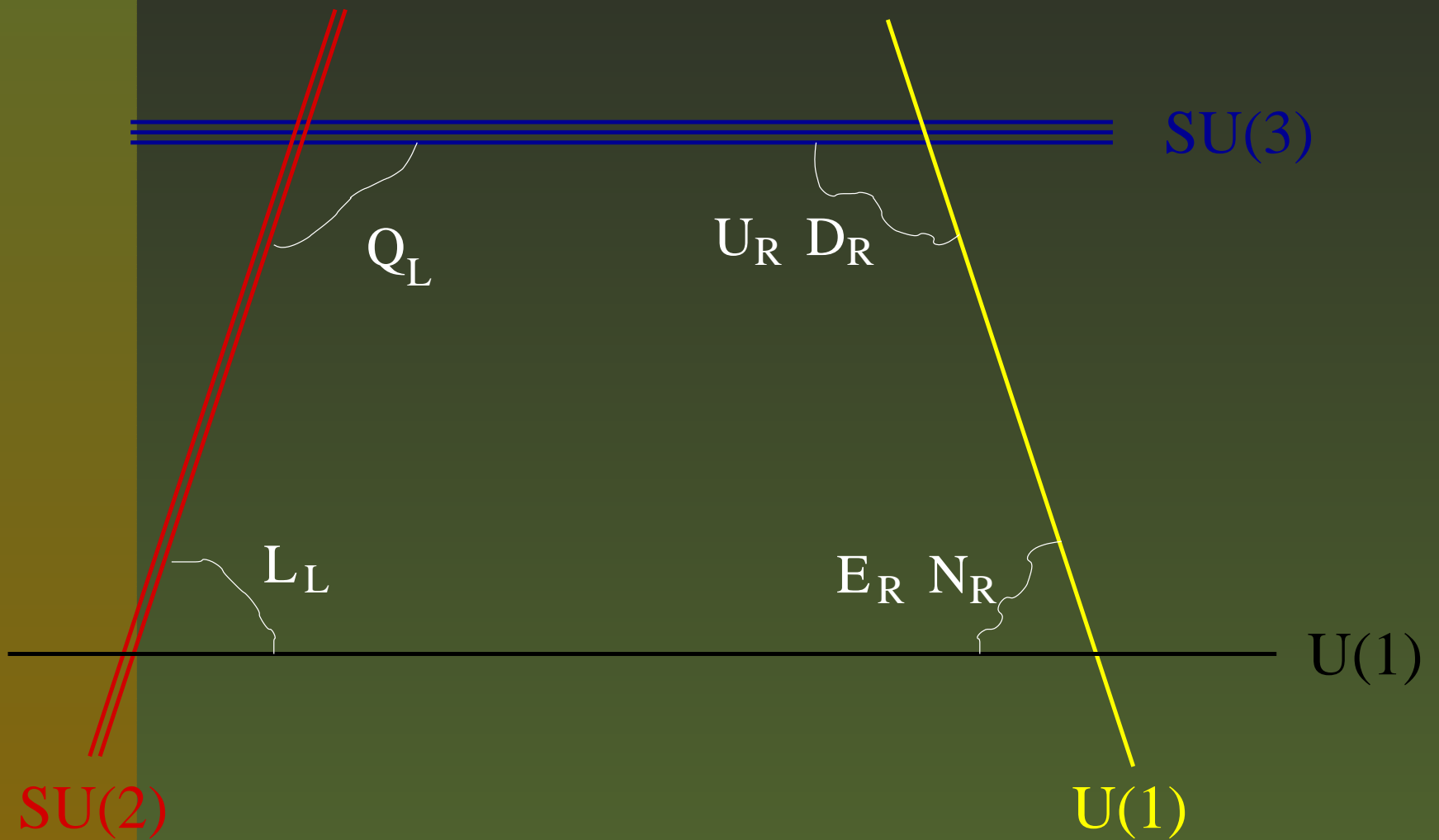
- Diese D-Branen spielen eine entscheidende Rolle in den Argumenten, die zeigen, daß alle 5 Stringtheorien durch diverse Dualitäten miteinander verbunden sind
- Dieses Netz von Dualitäten ist erst vollständig, wenn man noch eine zusätzliche fundamentale Theorie in 11D voraussetzt, die sogenannte M-Theorie



Brane Worlds

- Die D-branen spielen eine große Rolle in neueren Versuchen realistische 4D Stringmodelle zu konstruieren
- Da die Branen durch offene String beschrieben werden, hat man auf den D-branen ein WW-Feld
- Das Ziel ist es, die WW-Felder des Standard Modells auf den D-branen zu realisieren und die Materiefelder an den Schnittpunkten von D-branen
- Die Anzahl der Familien ist gegeben durch die Anzahl der Schnittpunkte der Branen

Brane Worlds



Die große Vereinheitlichung

- Die Frage nach der TOE zweigt sich im Rahmen der Stringtheorie in zwei Fragen auf:
 - Was ist M-Theorie, diese konsistente Quantengravitation in 11D?
 - Welche Kompaktifizierung liefert unsere vier-dimensionale Physik?