

Moderne Physik: Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie

Ulrich Husemann
Humboldt-Universität zu Berlin
Sommersemester 2008

Klausur

- Zeit: Donnerstag, 24.07.08, 9:00–11:00 (s.t.)
- Ort: dieser Seminarraum (NEW15 2'201)
- Formalia (nur für offizielle Anmeldung):
 - Personalausweis und Studierendenausweis vorlegen
 - Empfang der Klausur mit Unterschrift bestätigen
- Bitte auf Klausurbögen schreiben, zusätzliche Blätter werden bei Bedarf gestellt
- Hilfsmittel: Stift, Taschenrechner

Teilchenphysik, Astroteilchenphysik und Kosmologie im 21. Jahrhundert

Physik des 20. Jahrhunderts

- Kleine Längenskalen: Quantenphysik (Planck, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, ...) → Struktur der Materie
 - Teilchenphysik: Quantenfeldtheorie → Untersuchung immer kürzerer Längenskalen (d.h. höherer Energien)
 - Bausteine der Natur: Atom → p/n/e → Quarks/Leptonen
- Große Längenskalen: Allgemeine Relativitätstheorie (Einstein) → Struktur der Raum-Zeit
- Bisher keine akzeptierte Theorie, die auf allen Längenskalen gültig ist („Theory of Everything“) → Quantentheorie der Gravitation

SM der Teilchenphysik

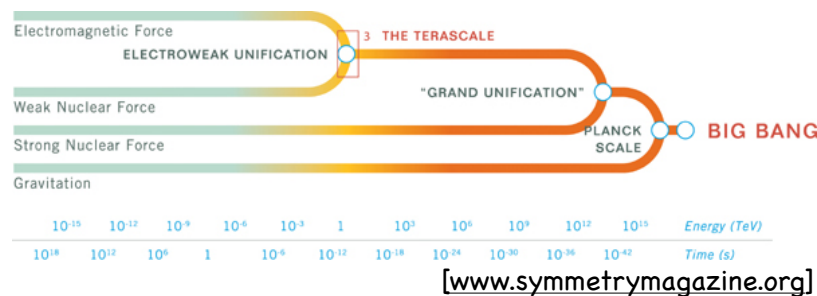
- Standardmodell der Teilchenphysik (SM)
 - Experimentell mit hoher Präzision bestätigt
 - Bisher noch nicht entdeckt: Higgs-Boson → Tevatron? LHC?
- Offene Fragen und Probleme
 - Teilchenspektrum: warum 12 Teilchen in 3 Generation?
 - Erklärung für Massen und Kopplungen der Teilchen?
 - Kein Kandidat für dunkle Materie
 - Keine Gravitation
- SM = „effektive Theorie“ für Energien unterhalb ca. 1 TeV (vgl. Newton'sche Mechanik für $v \ll c$)

SM der Kosmologie

- Allgemeine Relativitätstheorie (ART) mit hoher Präzision bestätigt: Lichtbeugung, schwarze Löcher, expandierendes Universum, ... → Grundpfeiler des SM der Kosmologie (Λ CDM)
- Probleme:
 - Warum ist Gravitationskraft so schwach?
 - Keine Erklärungen für kosmische Inflation und Wert der kosmologischen Konstante Λ
 - Keine Quantentheorie der Gravitation zur Behandlung von Singularitäten (Urknall, schwarze Löcher)
- ART = „effektive Theorie“ für große Längenskalen

Längen- und Energieskalen

- Skalen im Standardmodell der Teilchenphysik:
 - QCD: Confinement der Quarks $\rightarrow 10^{-15}$ m, 200 MeV
 - Elektroschwache WW: Masse der Eichbosonen $\rightarrow 10^{-18}$ m, 100 GeV
- Planck-Skala: 10^{-35} m, 10^{19} GeV $\rightarrow$ „Hierarchieproblem“: warum ist die elektroschwache Skala $\ll$ Planck-Skala?

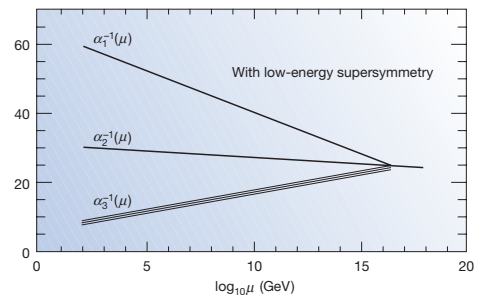
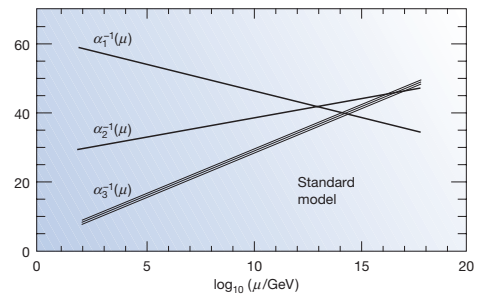


Supersymmetrie

- Symmetrieprinzip = Paradigma der Theoriebildung: Postuliere Symmetrie $\rightarrow$ leite Theorie ab
- Supersymmetrie (SUSY) = Symmetrie zwischen Bosonen und Fermionen $\rightarrow$ zu jedem SM-Teilchen gibt es ein Partnerteilchen
 - Bisher verträglich mit allen Beobachtungen
 - Enthält DM-Kandidat
 - Vereinigung der Kräfte
- SUSY-Energieskala: 1–10 TeV(?) $\rightarrow$ „Teraskala“
- Bisher keine Beobachtung von SUSY-Teilchen $\rightarrow$ LHC?

Vereinigung der Kräfte

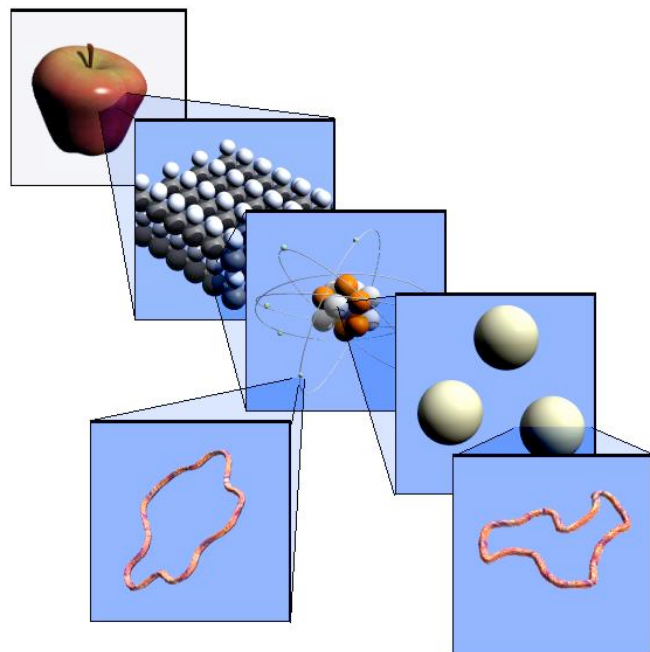
- Ziel: Vereinigung der elektroschwachen und starken Kraft → Grand Unified Theories (GUT)
- Idee: SM ist in umfassendere Theorie „eingebettet“
- Vorhersagen: leichte Neutrinos, Protonzerfall (experimentell: $>10^{30}$ Jahre)
- Mit Supersymmetrie: Vereinigung der Kräfte an der GUT-Skala: ca. 10^{16} GeV



[Nature]

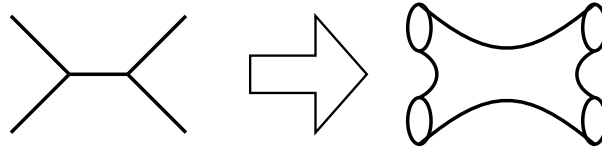
Stringtheorie

- Idee: punktförmige Teilchen → Strings
- String = Saite (offen oder geschlossen), d.h. eindimensionales Objekt mit Eigenschwingungen
- Typische Länge von Strings: Planck-Länge (10^{-35} m)
- Stringtheorie = Quantentheorie von Strings



Stringtheorie

- String-Wechselwirkungen:

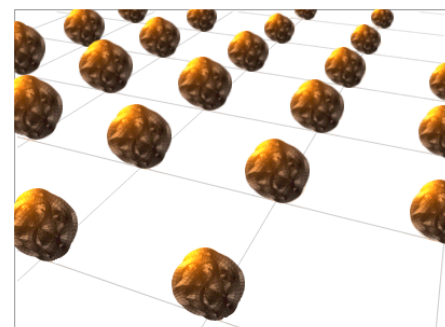
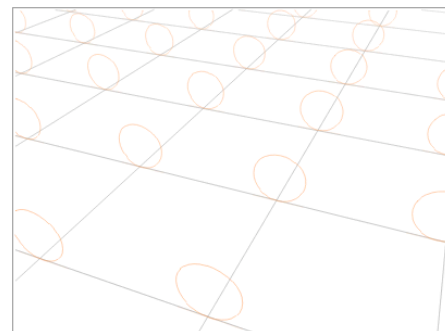


- „Realistische“ Stringtheorien beinhalten:

- Supersymmetrie: „Superstrings“
- Extra-Dimensionen (typisch: $10D = 4D\text{-Raumzeit} + 6D$)
- Anregungszustände der Strings = Elementarteilchen
 - SUSY-Teilchenspektrum qualitativ vorhergesagt
 - Anregungen mit Spin 0 (Higgs) bis Spin 2 (Graviton) → Stringtheorie beschreibt Gravitation

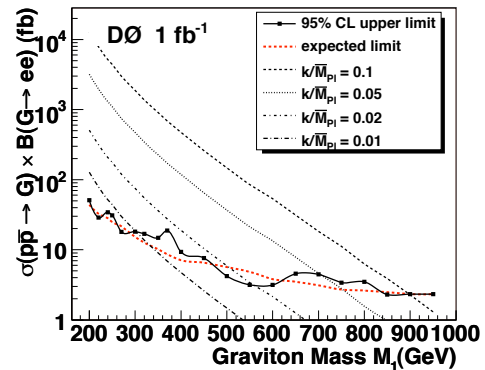
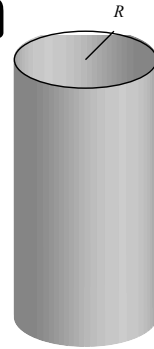
Extra-Dimensionen

- A. Einstein (1905): 3D-Raum + Zeit = 4D-Raumzeit
- Kaluza und Klein (1919): 5D-Raumzeit → an jedem Punkt im 3D-Raum gibt es eine „kompaktifizierte“ (aufgerollte) Raumdimension
- Stringtheorie: An jedem Punkt im 3D-Raum gibt es eine kompaktifizierte 6D-Mannigfaltigkeit



Kaluza-Klein-Gravitonen

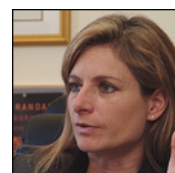
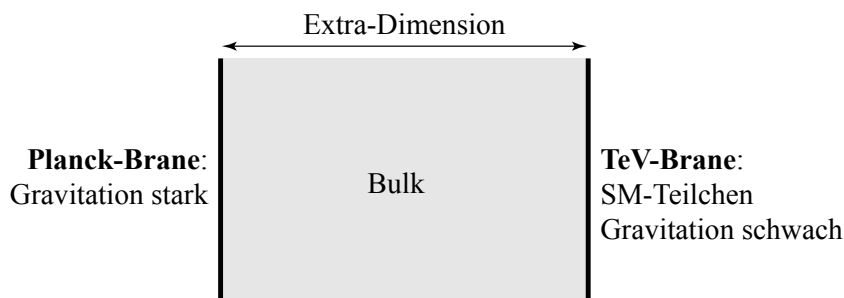
- Vorhersage vieler Modelle mit Extra-Dimensionen (ED)
- Energieskala der ED um 1 TeV
→ für 6D: Radius der ED ca. 10 MeV, d.h. $R = 20 \text{ fm}$
- Modell: 5D-Teilchen in aufgerollter ED = stehenden Wellen mit Wellenlängen $n \cdot 2\pi R \rightarrow$ beobachtbar in 4D: Kaluza-Klein-Gravitonen
- Test der Vorhersagen:
Suche nach KK-Gravitonen



[Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 091802]

Randall-Sundrum-Modell

- "Brane World"-Idee (brane = Membran)



L. Randall

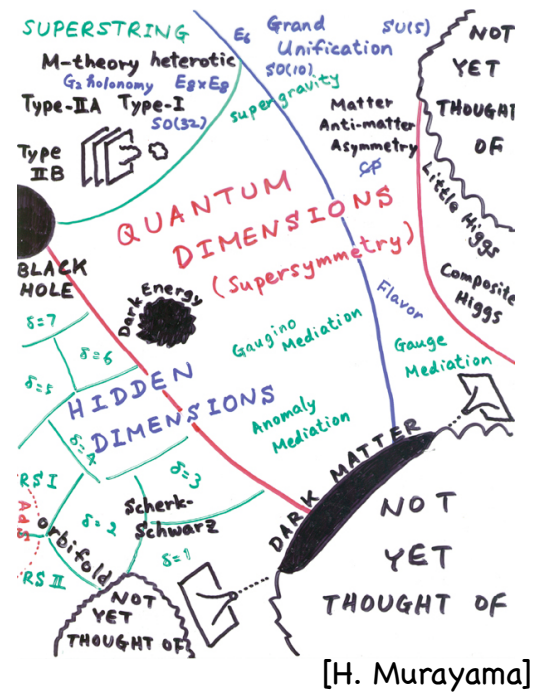


R. Sundrum

- Gravitation schwach, weil sie auf Planck-Brane „lebt“ und nur durch ED zu uns gelangt
- Experimenteller Nachweis: KK-Gravitonen, z.B.
Suche am Tevatron nach $G \rightarrow ee$

Ausblick

- Teilchenphysik, Astroteilchenphysik und Kosmologie: gut getestete Modelle:
 - Standardmodell der Teilchenphysik
 - Λ CDM-Kosmologie
- Viele offene Fragen am Anfang des 21. Jahrhunderts: Revolution im Weltbild?



[H. Murayama]