

Stringtheorie – Status und Perspektiven

Jan Louis
Universität Hamburg



Heidelberg, Juni 2003

Physik im 20. Jahrhundert:

Quantentheorie (QT) Planck, Bohr, Heisenberg, ...	Allg. Relativitätstheorie (ART) Einstein
Physik von kleinen Skalen (Mikrokosmos)	Physik von großen Skalen (Makrokosmos)

QT: stellt Frage nach Ursprung und Struktur von Materie

ART: stellt Frage nach der Struktur von Raum und Zeit
und nach der Geschichte unseres Universums

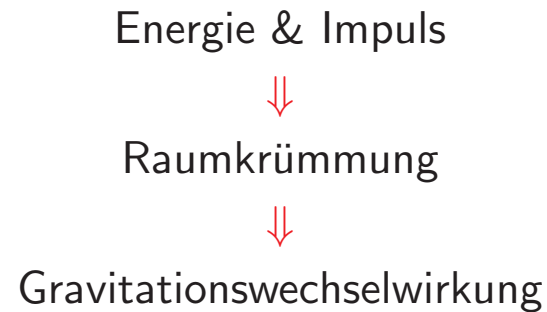
Aber: Bisher keine Theorie gültig an allen Skalen – keine Quantengravitation

Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART)

[Einstein]

⇒ ART ist Theorie der Gravitationswechselwirkung

Geometrisierung der Wechselwirkung:



Einstein Gleichungen:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

(Λ : Kosmologische Konstante, κ : Newtonsche Gravitationskonstante)

⇒ ART ist erfolgreich bestätigt z.B. durch:

- Korrektur zum Newton Potential (Periheldrehung des Merkur),
- Lichtablenkung im Gravitationsfeld,
- Existenz von schwarzen Löchern,
- expandierendes Universum ⇒ kosmologisches Standardmodell,

⇒ neue experimentelle Ergebnisse:

- Evidenz für dunkle Materie aus Rotationskurven von Spiralgalaxien [Sofue,Rubin,...]
- Evidenz für dunkle Energie $\Lambda > 0$
 - Beobachtung der Fluktuationen im Energiespektrum des CMB
[COBE,BOOMERANG,MAXIMA,WMAP]
 - Messung der Rotverschiebung-Abstands Relation für Typ Ia Super Nova
⇒ präzisere Bestimmung der Expansion [Riess et.al., Perlmutter et.al.]
- Beobachtung von Gravitationswellen erwartet (GEO 600, LISA, ...)

Quantentheorie

⇒ **historischer Ausgangspunkt:**

Physikalische Eigenschaften von Atomen können nicht mit klassischer Physik erklärt werden

⇒ **Entwicklung der Quantentheorie:**

punktförmige Teilchen → lokalisierte Energiequanten

genügen Heisenbergschen Unschärferelation $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$

⇒ relativistisch invariante Version: Quantenfeldtheorie

- Felder einer klassischen Feldtheorie werden zu quantenm. Operatoren
- Lokalität der Wechselwirkung wird erhalten/gefordert
- sagt Antiteilchen voraus, impliziert das Spin-Statistik Theorem

Quantenfeldtheorie ist theoretische Grundlage der Teilchenphysik

Mikrokosmos/Teilchenphysik

Beginn des 20. Jahrh.: Materie besteht aus Atomen [Demokrit]

Entwicklung: Untersuchung physikalischer Systeme
auf immer kleineren Längenskalen

Mikroskop \Rightarrow Teilchenbeschleuniger

heute: Atome haben komplizierte Substruktur
erfolgreiche Beschreibung durch das
Standardmodell (SM) der Teilchenphysik
basiert auf Quantenfeldtheorie

Standardmodell (SM) der Teilchenphysik

⇒ alle Materie ist aufgebaut aus 3 Familien von Quarks & Leptonen ($s = 1/2$)

	Quarks	Masse	Leptonen	Masse
1.Familie:	Up	5.6 MeV	Elektron	$\frac{1}{2}$ MeV
	Down	9.9 MeV	e -Neutrino	
2.Familie	Charm	1.35 GeV	Myon	105 MeV
	Strange	199 MeV	μ -Neutrino	
3.Familie:	Top	180 GeV	Tauon	1.7 GeV
	Bottom	5 GeV	τ -Neutrino	

⇒ Wechselwirkung zwischen Quarks und Leptonen durch Eichbosonen ($s = 1$)

Wechselwirkung	Teilchen	Masse
elektro-magnetisch schwach	Photon	0
	W^{\pm}	80 GeV
	Z^0	91 GeV
stark	Gluonen	0

$$1\text{MeV} \approx 5 \cdot 10^{-28}g$$

$$1\text{GeV} = 10^3\text{MeV} = 10^9\text{eV}$$

⇨ Wechselwirkungen im SM basieren auf Symmetrieprinzip: unitäre Eichsymmetrie

$$G_{\text{SM}} = SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$$

⇨ SM ist hervorragend experimentell bestätigt  [CERN, DESY, FERMILAB, SLAC, 1990-2000]

z.T. am Promille-level (elektro-schwachen Präzisionsexperimente)

(ist auch ein Erfolg der QFT!)

⇨ theoretische Beschreibung von Quark- und Leptonmassen fordert Existenz von zusätzlichem Teilchen ($s = 0$):

Higgs Boson

- Vorhersage des SM
- experimentelle Beobachtung steht noch aus
 - ⇒ neue Experimente am LHC, Fermilab, TESLA

⇨ Beobachtung von Neutrinomassen
(erste Modifikation des SM)

Theoretische Ansätze 'jenseits' der Standardmodelle

⇒ Standardmodell/QFT ist keine endgültige Theorie

- warum 3 Familien von Quarks & Leptonen?
- keine Vorhersage der Quark- & Leptonmassen, ...

⇒ ART ist keine endgültige Theorie

- beschreibt nur Gravitationswechselwirkung.
- Was bestimmt den Wert der kosmologischen Konstanten Λ ?
- Erklärung des Urknalls (physikalische Bedeutung von Singularitäten)
- Quantentheorie der Gravitation

Vermutung:

Standardmodelle sind 'effektive' Beschreibung (überhalb $\approx 10^{-19}m$)

Kleinere Entfernungen \rightarrow neue physikalische Phänomene \rightarrow neue Theorie notwendig

Ansätze:

- Supersymmetrie
- Superstringtheorie


Supersymmetrie

[Wess, Zumino]

⇒ Verallgemeinerung des Symmetrieprinzips des SM:

Supersymmetrie = Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen

$$\{Q, Q^\dagger\} = 2\gamma^\mu P_\mu$$

- ⇒ für jedes Teilchen des SM wird ein supersymmetrischer Partner gefordert
- ⇒ supersymmetrische Spiegelwelt von (schweren) Teilchen
- ⇒ bisher keine direkte experimentelle Beobachtung 

⇒ Eigenschaften:

- sagt 'leichtes' Higgs Boson voraus
- konsistent mit elektro-schwachen Präzisionsexperimenten
- bezieht (erstmal) Gravitationswechselwirkung ein
- hat vielversprechenden Kandidaten für dunkle Materie
- tritt heute in fast allen Verallgemeinerungen des SM auf

Quantengravitation

Im frühen und heißen Universum: Ausdehnung klein und Energie hoch

⇒ QT & ART relevant

⇒ Teilchenphysik & Kosmologie werden gleichzeitig zur Beschreibung des frühen Universums benötigt

Quantengravitation notwendig wenn charakteristische Skalen vergleichbar:

$$\lambda_{\text{Compton}} = \frac{\hbar}{Mc} \approx R_{\text{Schwarz}} = \frac{MG}{c^2},$$

Planck Masse: $M_{PL} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 10^{-5} g,$

Planck Energie: $E_{PL} = c^2 M_{PL} \approx 10^{19} GeV,$

Planck Länge: $l_{PL} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 10^{-35} m,$

Planck Zeit: $t_{PL} = l_{PL}/c \approx 5 \cdot 10^{-44} s.$

Vermutung:

Bei diesen Skalen ist neues Konzept zur Beschreibung der Natur notwendig

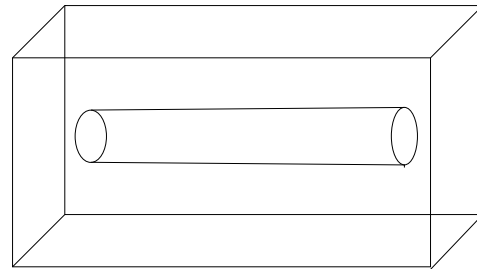
(Perturbative) Superstringtheorie

[Veneziano,...]

Grundidee: punktförmige Teilchen \rightarrow ausgedehnte Objekte (Strings)



Strings bewegen sich in D -dimensionalem Minkowski Hintergrund.



(perturbative) Stringtheorie = Quantentheorie von ausgedehnten Objekten (Strings)


Teilchen = Schwingungsanregungen des Strings

Ausdehnung der Strings bisher nicht aufgelöst

$$l \approx 10^{-35} m$$

Anregungsspektrum der Stringtheorie:

- endliche viele masselose Anregungen mit Spins:
 - $s = 2$ → Graviton (notwendig im Spektrum)
 - $s = 3/2$ → Gravitino
 - $s = 1$ → Eichbosonen
 - $s = 1/2$ → Fermionen (Quarks & Leptonen)
 - $s = 0$ → Higgs, ...

⇒ (i) Gravitation läßt sich nicht abschalten 

⇒ (ii) alle Wechselwirkungen treten auf 

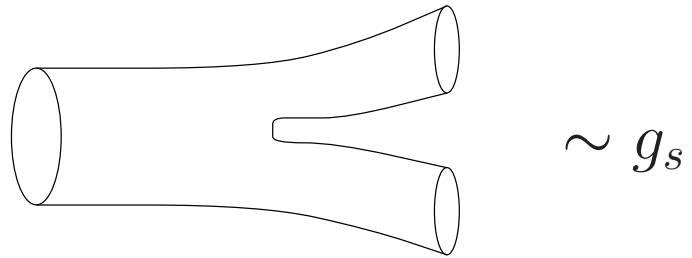
- unendliche viele massive Anregungen mit Massen

$$M \sim n \cdot M_{String}$$

(M_{String} = charakteristische Skala der Stringtheorie)

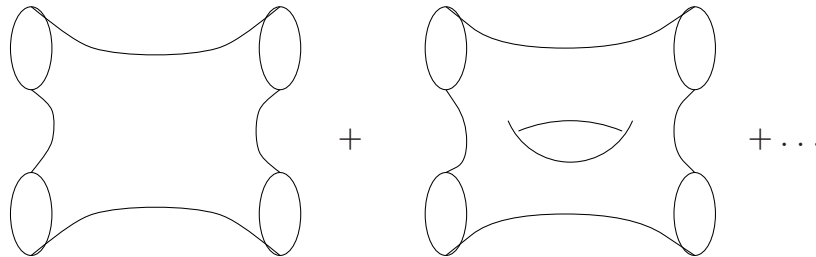
⇒ weiches UV-Verhalten

Wechselwirkung von Strings:



g_s ist Kopplungskonstante

Streuamplituden:



Quantisierung durch Summe über alle “Feynman-Diagramme”

hier: Summe über Topologien der Weltfläche

Streuamplitude: $A = \sum_{n=0}^{\infty} A^{(n)} g_s^{2+2n}$

- Stringtheorie gibt Regeln zur Berechnung der $A^{(n)}$
- g_s ist freier Parameter und es kann $g_s \ll 1$ gewählt werden
 \Rightarrow störungstheoretische Auswertung von A möglich

Ergebnisse:

⇨ Für Streuprozesse mit $p \ll M_{Pl}$:

Stringtheorie $\xrightarrow{p \ll M_{pl}}$ QFT & ART (mit $M_{String} \sim M_{Pl}$)

⇒ QFT & ART sind Niederenergielimes der Stringtheorie.

⇨ Alle (?) Amplituden $A^{(n)}$ sind **UV-endlich**
(es treten keine singulären Feynman-Diagramme auf).

⇨ Quantenkorrekturen zur ART können sinnvoll berechnet werden 

⇒ Stringtheorie ist Kandidat für perturbative Quantengravitation
und vereinigt alle Wechselwirkungen

Eigenschaften:

⇨ Anregungsspektrum ist supersymmetrisch ⇒ notwendig für Konsistenz ?

⇨ Unitarität der Streuamplituden ⇒ $D \leq 10$

- $D = 10$: 5 verschiedene Stringtheorien
(I, IIA, IIB, Het. $SO(32)$, Het. $E_8 \times E_8$)

- $D < 10$: Familien von Stringtheorien

Kompaktifizierung:

$$\mathcal{M}^{(10)} = \mathcal{M}^{(4)} \otimes K$$

Konsistenz verlangt $K = \text{Calabi-Yau Mannigfaltigkeit}$

⇒ Was wählt K , was wählt D ?

Schwierigkeiten der Stringtheorie:

- mehr masselose Zustände als notwendig für Standardmodell.
- leichte Zustände sind exakt masselos ! (wie Standardmodell ohne Higgs Boson)
 - ⇒ was generiert kleine Massen?
 - ⇒ was bewirkt die Hierarchie

$$\frac{M_{top}}{M_{Pl}} \approx 10^{-17}$$

- was bricht Supersymmetrie?
- was wählt den Grundzustand, also D und K?

aber: Stringtheorie bisher nur als Störungsreihe bekannt

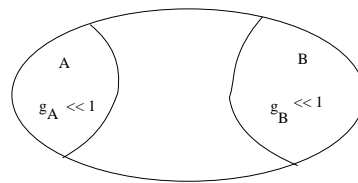
$$A = \sum_{n=0}^{\infty} A^{(n)} g^{2+2n}, \quad g \ll 1$$

Hoffnung: Nicht-störungstheoretische Effekte beheben Schwierigkeiten.

⇒ Nicht-störungstheoretische Formulierung der Stringtheorie ?

Nicht-Störungstheoretische Aspekte der Stringtheorie

Vermutung: verschiedene Stringtheorien sind zueinander duale Beschreibung einer gemeinsamen Quantentheorie



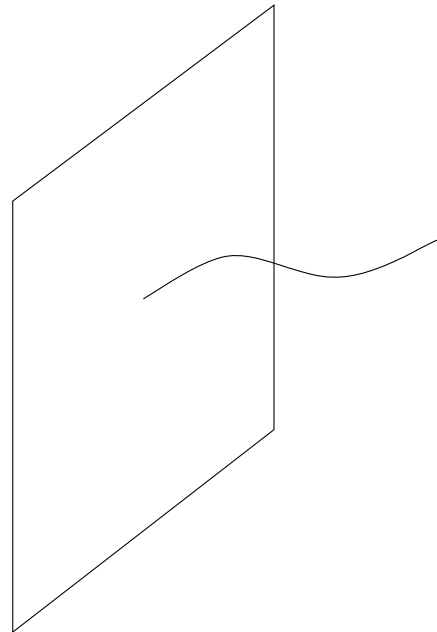
perturbatives Spektrum von A \iff nicht-perturbatives Spektrum von B
 perturbatives Spektrum von B \iff nicht-perturbatives Spektrum von A

- schwer zu beweisen, da nicht-störungstheoretische Formulierung der Stringtheorie notwendig.
- kann aber an Kopplungen ohne Quantenkorrekturen erfolgreich überprüft werden. Solche Kopplungen existieren in supersymmetrischen Theorien.
- Nicht-störungstheoretische Zustände der Stringtheorie: D-Branes

D-Branes

offene Strings mit Dirichlet Randbedingungen:

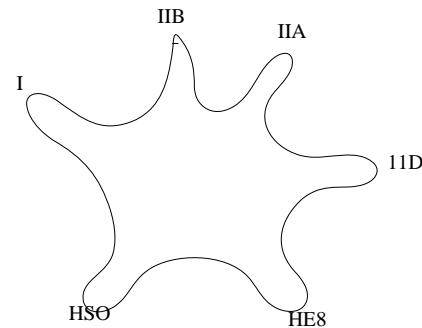
[Polchinski]



- ⇒ D-Branes sind dynamische Zustände der Stringtheorie
- ⇒ Stringtheorie beinhaltet nicht nur Strings sondern auch höher-dimensionale Objekte (Membranen, etc.)

weitere Vermutung:

M-Theorie



alle 5 Stringtheorien sind kontinuierlich miteinander verbunden

Was ist M-Theorie ?

Vorschlag: Theorie von D-Teilchen

[Banks, Fischler, Shenker, Susskind].

Eigenschaften:

- Raum-Zeit Koordinaten werden nicht-kommutierende Matrizen
 \Rightarrow Zusammenhang mit Nicht-kommutativer Geometrie.
- Beinhaltet auch höher-dimensionale Objekte
 (Strings, Membranen).

Perspektiven – wie geht es weiter?

⇒ Stringtheorie als fundamentale Theorie

- konzeptionell
- Teilchenphysik
- ART/Kosmologie

⇒ Stringtheorie als Werkzeug

- QFT
- Mathematik

Stringtheorie als fundamentale Theorie

- konzeptionell
 - Definition von M-Theorie **oder**
 - Verständnis von nicht-störungstheoretischer Stringtheorie
- Teilchenphysik
 - Analyse von Kompaktifizierungen und ihrer nicht-störungstheoretischer Eigenschaften
 - leben wir auf einer D-brane? \Rightarrow 'Brane-World scenarios'
- ART/Kosmologie
 - Untersuchung von zeit-abhängigen (kosmologischen) String-Hintergründen
 - Entwicklung von stringtheoretisches Szenarien für Big Bang
 - de-Sitter Hintergründe in Stringtheorie
 - Untersuchung quantentheoretischer Eigenschaften von Schwarzen Löchern

Stringtheorie als Werkzeug

⇒ QFT

- benutze Stringtheorie um Feynman Störungsreihe zu organisieren
[Bern, Dixon, Kosower, Schmidt, ...]
- benutze Stringtheorie als Regulator ⇒ Erkenntnisse für supersymm. QFT
- Untersuchung von stark gekoppelten (supersymmetrischen) QFTs ⇒ (s)QCD
 - AdS/CFT Korrespondenz ($N = 4$)
 - Seiberg/Witten ($N = 2$)
 - Dijkgraaf/Vafa ($N = 1$)

Entwicklung neuer Methoden

⇨ Stringtheorie and Mathematik

- Punktteilchen \equiv Sonde einer kontinuierlichen Raum-Zeit Geometrie
 - ⇒ Zusammenhang mit Riemannscher Geometrie [Einstein, Hilbert]
- String als Sonde: sieht andere, grobere Struktur
 - ⇒ Entwicklung von Quantengeometrie [Kontsevich, Manin, ...]

Stringtheorie gibt Weg vor, bereits überraschende Ergebnisse erzielt:

- Spiegelsymmetrie von Calabi-Yau Mannigfaltigkeiten
- Berechnung von holomorphen Kurven auf C-Y Mannigfaltigkeiten
- Entwicklung von Quantenkohomologie

Zusammenfassung

- ART und QT bilden Grundlage heutiger Physik
- ART/Kosmologie beschreibt erfolgreich das Universum (Makrokosmos)
- QFT/Teilchenphysik beschreibt erfolgreich den Mikrokosmos
- Stringtheorie vereint QT, Teilchenphysik, ART und Kosmologie und ist bislang bester Kandidat für eine Quantengravitation
- qualitative Übereinstimmung mit Verallgemeinerungen des SM – aber noch keine quantitative Übereinstimmung
- größtes Problem:
 - hierarchische Brechung der Supersymmetrie,
 - Bestimmung des Grundzustands,
 - kosmologische Konstante.
- nicht-störungstheoretische Eigenschaften teilweise unter Kontrolle.
- kosmologische Eigenschaften werden untersucht.