

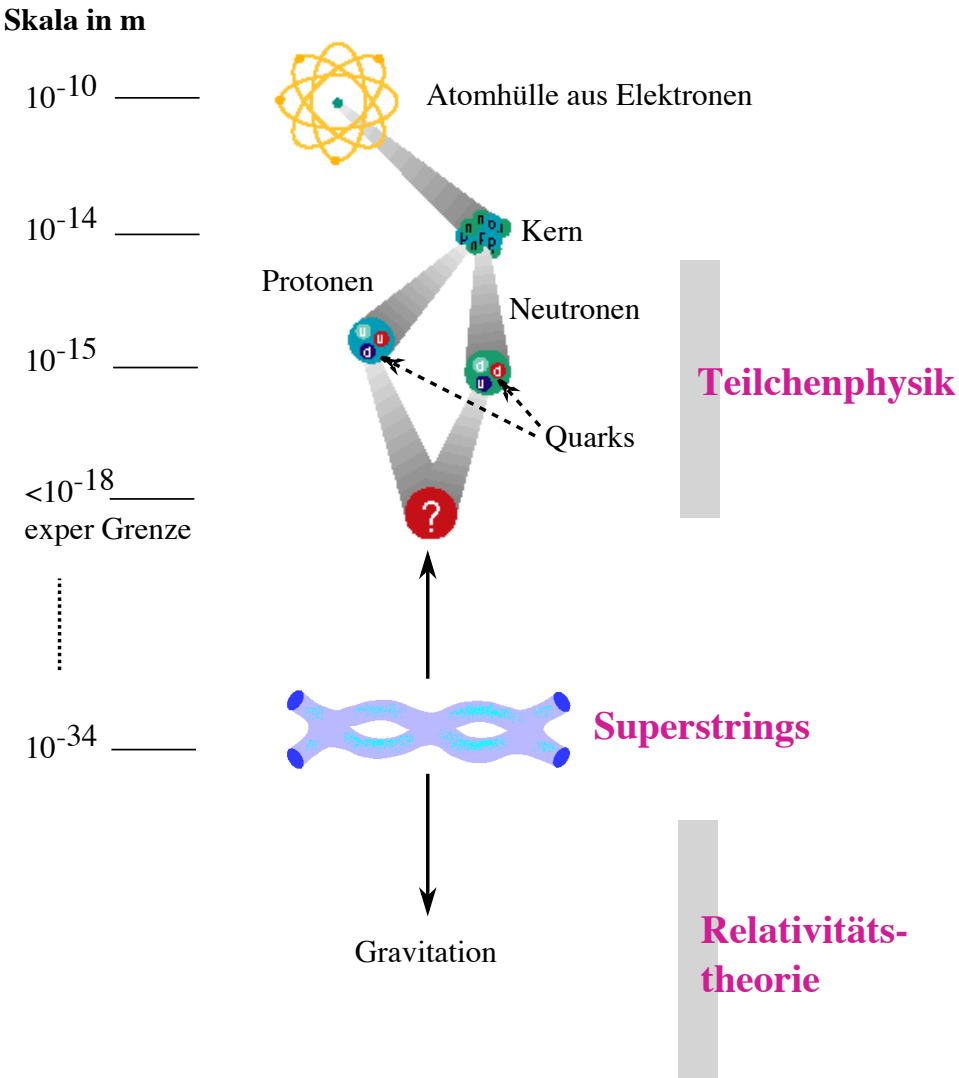
# Neuere Entwicklungen in der String-Theorie

W.Lerche, 1999

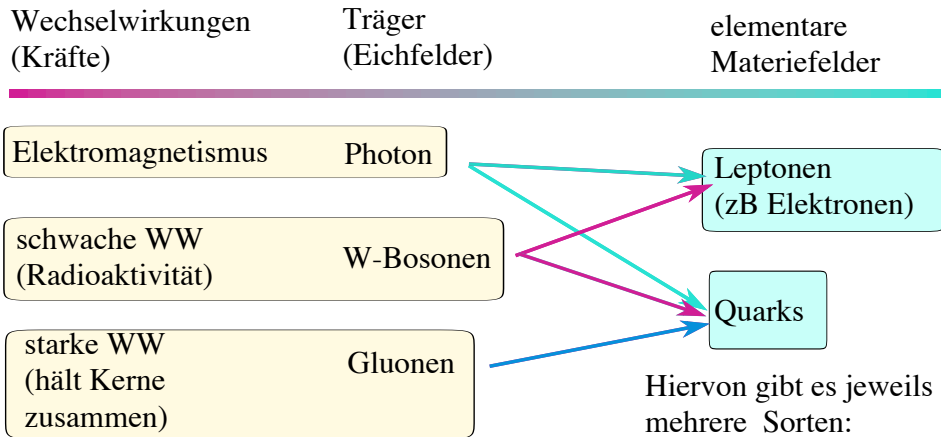


- Das **Standardmodell** der Teilchenphysik ("SM")
  - Theoretische Unzulänglichkeiten
- **String-Theorie:**
  - Vereinigung aller Naturkräfte, einschl. Gravitation
  - Konsistenz
  - 10 Dimensionen ? ... Kompaktifizierung
  - Problem der vielen Grundzustände
- **Dualität** und String-Geometrie
- **Ausblick**

# Fundamentale Struktur der Materie

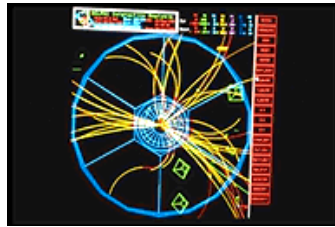
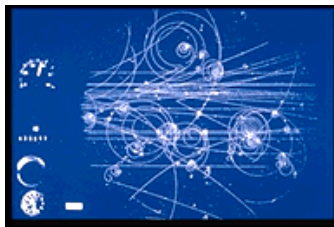


# Physik der Elementarteilchen



Leptons	u	c	t
	<small>up</small>	<small>charm</small>	<small>top</small>
	d	s	b
	<small>down</small>	<small>strange</small>	<small>bottom</small>
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	<small>e- neutrino</small>	<small><math>\mu</math>- neutrino</small>	<small><math>\tau</math>- neutrino</small>
	e	$\mu$	$\tau$
	<small>electron</small>	<small>muon</small>	<small>tau</small>
Three Generations of Matter			

Das "Standard-Model" der Teilchenphysik wurde experimentell sehr genau getestet .... und beschreibt die Phänomene mit teilweise fantastischer Genauigkeit !



# Theoret. Unzulänglichkeiten des Standardmodells

- Struktur ist ad-hoc: gibt es tieferliegende Prinzipien ? ("grand unification" aller Naturkräfte)

- ca 20 freie Parameter: wodurch bestimmt ?

$$\mathcal{L} = \left( \sum \bar{\psi} \gamma (\partial + g_k A) \psi \right) + \left( \sum m_i \bar{\psi} \psi + \varphi_j \bar{\psi} \psi \right) + \dots$$

↑ Eichfeld-Kopplungen    
 ↑ Massen    
 ↑ Higgsfelder

- Instabilität der Parameter durch Selbstwechselwirkungen

$$\text{wavy line} \circlearrowleft \text{wavy line} = \infty$$

(Renormierung: Problem der großen Skalen)

➔ Erweiterung: "Supersymmetrie"

= Symmetrie zwischen Bosonen und Fermionen (grob: Kraft- und Materiefelder)

- Verbessere Divergenzstruktur:

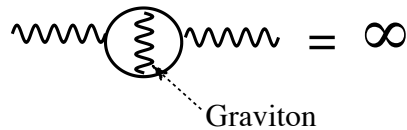
$$\text{wavy line} \circlearrowleft \text{wavy line} \text{ (F)} - \text{wavy line} \circlearrowleft \text{wavy line} \text{ (B)} = 0$$

## Problem der Quantengravitation

- SM: Keine vollständige Vereinheitlichung der Naturkräfte:

**Gravitation ist nicht enthalten !**

Übliche quantenfeldtheoretische Formulierung funktioniert nicht wegen "unheilbarer Divergenzen" (nicht "renormierbar")



- Ausdruck eines tieferliegenden Problems:

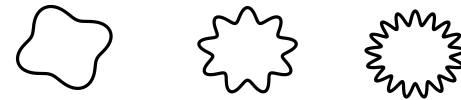
**Unvereinbarkeit von Quantenmechanik und allgem. Relativitätstheorie !**

zB Schwierigkeiten bei quantenfeldtheoretischer Beschreibung von schwarzen Löchern, etc.

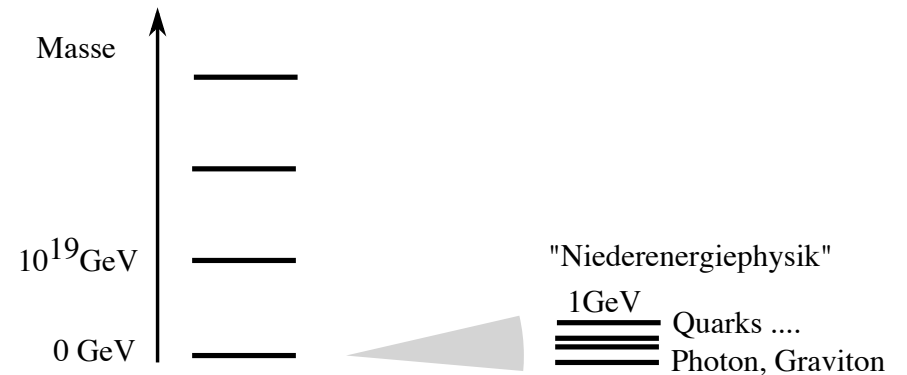
➡ **Neue Konzepte sind nötig !**

## String-Theorie

- kleine ( $10^{-34}$ m) ein-dimensionale Objekte  
endliche Ausdehnung: keine divergenten Selbstkorrekturen

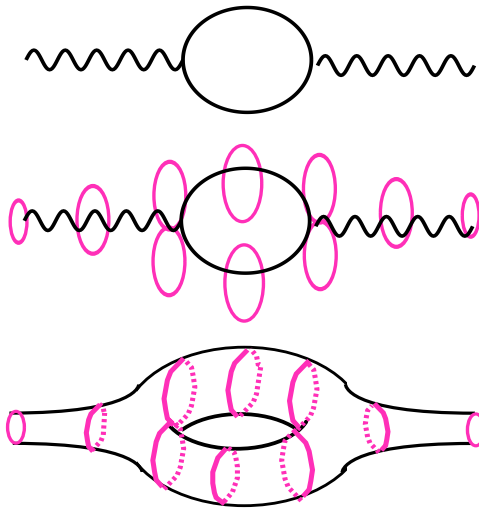
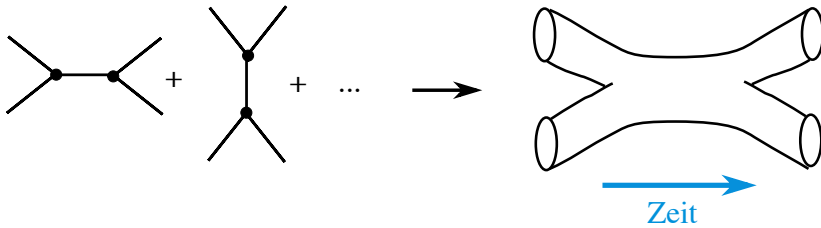


- Vibrations-Spektrum:



"elementare" Teilchen des Standardmodells = (nahezu) masselose Nullmoden

## Geometrische Wechselwirkungen



→ Feldtheorie auf zwei-dimensionalen Riemannschen Flächen ....



## Einfaches Baukastenprinzip

● Vielzahl von Feldoperatoren ↔ Simple Kombinatorik 2-dimensionaler Felder

Graviton  $g_{\mu\nu} = \bar{\psi}_\mu(\bar{z})\psi_\nu(z)$

Photon, Gluon,...  $A_\mu^a = \bar{\psi}_\mu(\bar{z})\psi^a u(z)$

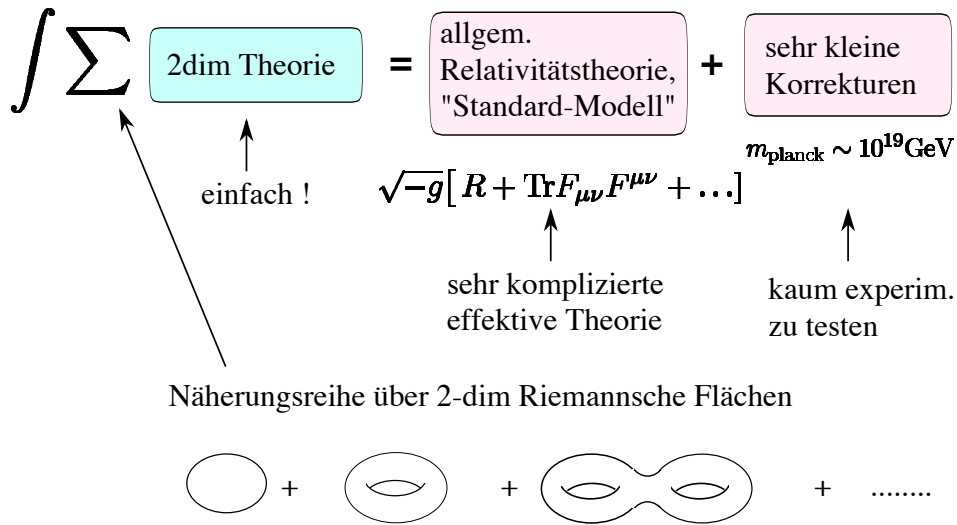
Higgsfelder  $\Phi_{ab} = \bar{\psi}_a(\bar{z})\psi_b(z)$

● Insbesondere ist die Gravitation **konsistent** eingebaut ...

→ **Intrinsische Vereinheitlichung aller Teilchen und ihrer Wechselwirkungen !**

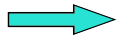
## String-Magie

- Man kann die effektive Theorie bei niederen Energien genau berechnen:



- Diskrete Symmetrie-Transformationen dieser Riemannschen Flächen bewirken wundersame Eigenschaften, welche für die Konsistenz (zB Graviton-Wechselwirkungen) wesentlich sind !

("Feynman-Regeln" sind substantiell verschieden im Vergleich zu konventioneller Quantenfeldtheorie)



String-Theorie ist mehr als eine bloße Überlagerung von unendlich vielen Teilchenfeldern.

## Warum leben wir bloß in 4 Dimensionen ?

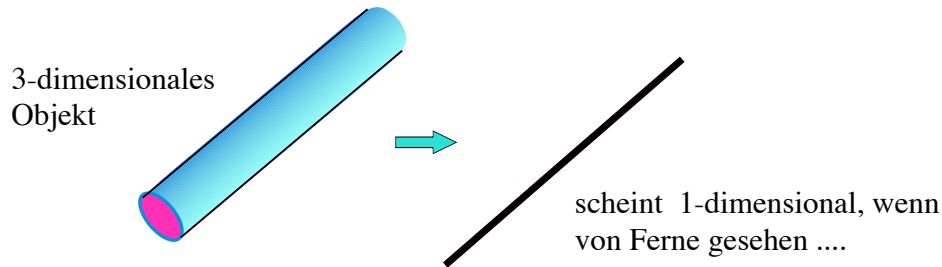
- Naiv gesehen, sind String-Theorien nur in 10 Dimensionen konsistent .... und davon gibt es sogar 5 Sorten:

Kombination	Name	Eichwechselwirkung
$S \otimes \bar{S}^\dagger$	Type IIA	$U(1)$
$S \otimes \bar{S}$	Type IIB	—
$S \otimes \bar{B}$	Heterotic	$E_8 \times E_8$
$S \otimes \bar{B}'$	Heterotic'	$SO(32)$
$(S \otimes \bar{S})/Z_2$	Type I (open)	$SO(32)$

- Diese haben scheinbar völlig verschiedene Teilchenspektren, und lange Zeit glaubte man, daß sie verschiedene Theorien seien...

Wie machen wir Kontakt zur 4-dimensionalen Welt ?

## "Kompaktifizierung" von Dimensionen



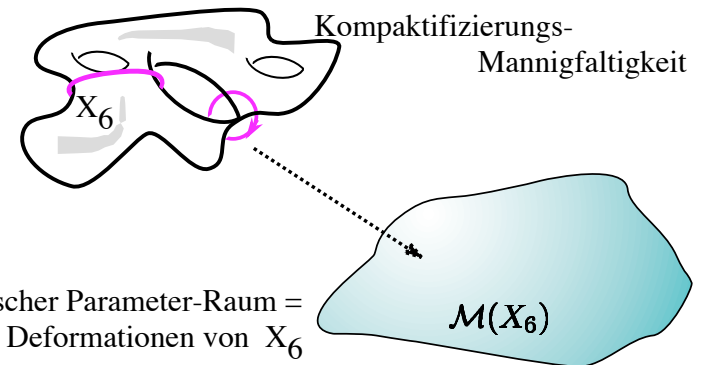
Durch "Aufrollen" der 6 ungewollten Dimensionen, zB auf einer sehr kleinen "**Calabi-Yau Mannigfaltigkeit  $X_6$** ", bekommt man eine String-Theorie, welche bei niederen Energien 4-dimensional aussieht.

- Solche effektiv 4-dimensionalen Theorien sind **qualitativ** genau von der Art, wie man sie in der Natur sieht, dh, man bekommt Gravitation, Eichsymmetrien, Higgsfelder und chirale Fermionen (auch Supersymmetrie), und das alles in einer "vereinheitlichten" Weise !
- Allerdings verkompliziert diese "Kompaktifizierung" die Sache ganz wesentlich: die Niederenergiephysik hängt von den Details von  $X_6$  ab .

## Extra Komplexität durch kompakte Geometrie

Durch die Kompaktifizierung auf 4d erhält die Theorie viele **freie Parameter** und zusätzliche **Teilchenmoden**, welche nicht durch die ursprünglich 10-dimensionale String-Theorie determiniert sind.

- Die **geometrischen** Parameter, welche die Form von  $X_6$  bestimmen, tauchen in der effektiven 4-dimensionalen Theorie als **physikalische** Parameter auf, zB als Teilchen-Massen oder Kopplungsstärken.



- Durch Aufwickeln von Strings (und höherdimensionalen Membranen) um "Löcher" von  $X_6$  bekommt man viele extra physikalische Zustände hinzu.

zB "Eulerzahl von  $X_6$  = Anzahl der Teilchen-Familien"

Hierzu gibt es reichhaltige Mathematik ... (algebraische Geometrie)

## Ein hoher Preis für 4 Dimensionen

### Das Problem der (zu)vielen möglichen $X_6$

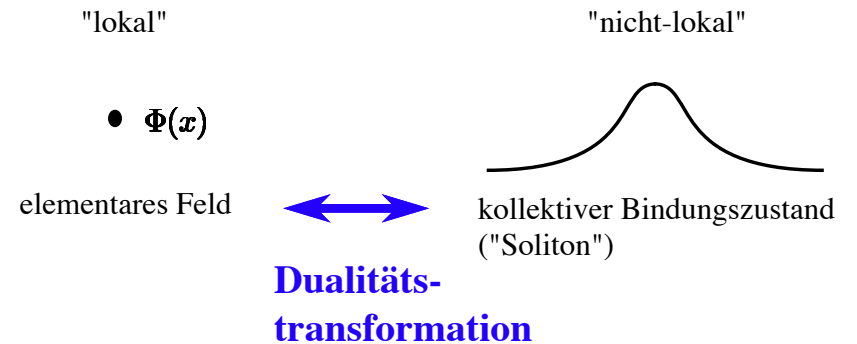
- Es gibt viele solcher "Calabi-Yau Mannigfaltigkeiten  $X_6$ " (ca. 10000), und es ist nicht klar, warum eine bestimmte ausgezeichnet sein sollte. Jede solcher  $X_6$  hat ein verschiedenes Teilchenspektrum in 4 Dimensionen ....
- Die Zahl der Parameter einer jeden solchen  $X_6$  ist typischerweise  $\sim 100$ .
- Darüberhinaus gab es ja 5 Theorien in 10 Dimensionen, von denen jede viele 4-dimensionale Kompaktifizierungen haben kann.  
Wenn eine die "fundamentale Theorie" sein soll, was ist dann die Bedeutung der anderen ?

Diese Probleme stellen eine große Herausforderung an die Glaubwürdigkeit der String-Theorie dar !

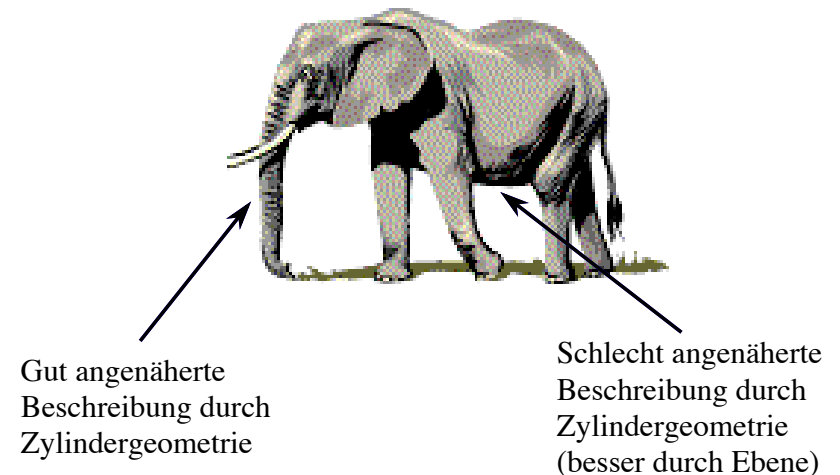
In jüngerer Zeit hat man hier zumindest konzeptionelle Fortschritte gemacht ....

### Dualität: Äquivalenzen zw. Quantensystemen

- Physikalische Freiheitsgrade:



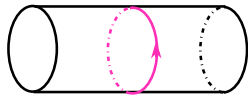
Beide Zustände sind einfach zwei Art und Weisen, ein und dieselbe physikalische Sache darstellen. Welche "Variablenwahl" man konkret verwendet, hängt von der spezifischen Situation ab.



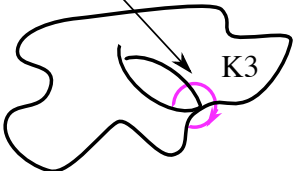
# String-Geometrie

String-Theorie A kompaktifiziert auf  $X_A$  kann dual, dh. quanten-äquivalent zu String-Theorie B kompaktifiziert auf  $X_B$  sein, wobei  $X_A$  und  $X_B$  völlig verschiedene Mannigfaltigkeiten sind !

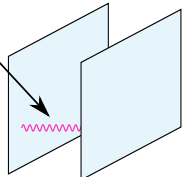
- Beispiel in D=6: Heterotic( $T_4$ ) = Typ IIA(K3) = Typ I (D)  
In diesen Kompaktifizierungen hat ein und dasselbe W-Eichfeld folgende verschiedene Darstellungen:
- Im heterotischen String-Modell: als heterotischer String, welcher sich um einen Zylinder mit Radius 1 wickelt:



- Im Typ IIA String-Modell: als ein Membran-Soliton, welches sich um einen "2-Zykel" windet:



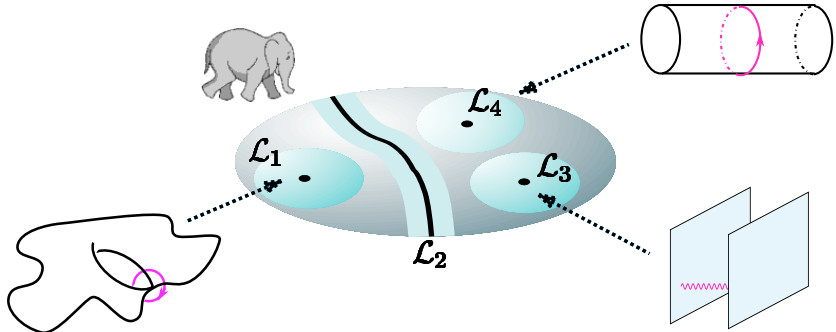
- Im Typ I String-Modell: als ein offener String, welcher zwischen zwei "D-branes" aufgespannt ist:



➡ Diese verschiedenen "mathematischen" Geometrien stellen ein und dasselbe physikalische Modell das !

# Dualität im String-Parameterraum

- Übliche Beschreibung gilt jeweils nur in kleinen Bereichen, die aber insgesamt den vollen Parameterraum überdecken:



- Diese stellen verschiedene lokale Näherungen dar, durch jeweils verschiedene, schwach gekoppelte physikalische Freiheitsgrade
- Die übliche lokale Quantentheorie kann in den einzelnen Bereichen völlig verschieden ausschauen
- Im allgemeinen gibt es keine globale Beschreibung, die über dem gesamten Parameterraum gültig wäre; keine partikuläre Beschreibung ist "fundamentaler" als eine andere.

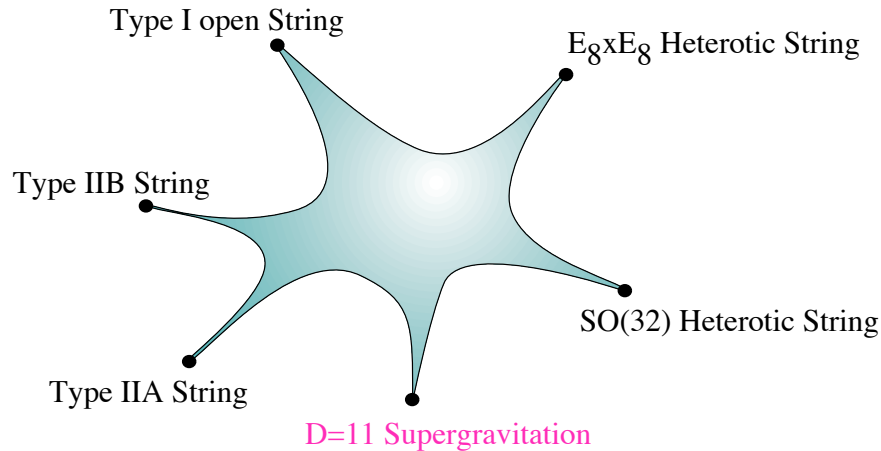
➡ Konzept von "fundamentalen" Freiheitsgraden fragwürdig...



## The Grand Picture

in 10D

Alle 5 Stringtheorien in 10 Dimensionen sind einfach verschiedene Approximationen einer einzigen Theorie !



Sie stellen einfach verschiedene Parametrisierungen dar, wobei jede verschiedene physikalische Freiheitsgrade als "fundamental" und schwach gekoppelt bevorzugt

- Große Überraschung: Im Limit starker Kopplung erzeugen bestimmte Zustände eine elfte Dimension !

D=11 Supergravitation ist aber nicht mit einer Stringtheorie assoziiert, sondern eher mit supersymmetrischen Membranen...

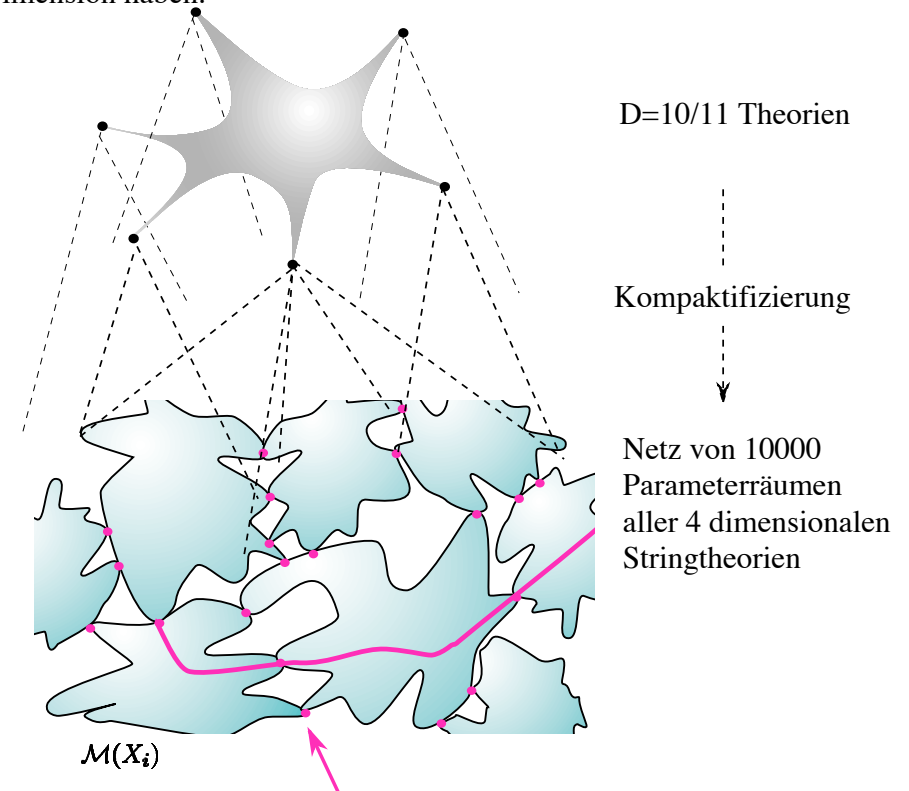
**Dualitäten führen uns über Stringtheorie hinaus ...**

**"M-Theorie"**

17

## Vielfalt in 4 Dimensionen

Alle ~10000 Grundzustände hängen zusammen, und bilden ein kompliziertes Gewebe, dessen Komponenten ia. verschiedene Dimension haben.



An Übergangspunkten findet man neuartige physikalische Phänomene

Das ganze Objekt stellt den Parameterraum einer einzigen Theorie dar...  
wahrscheinlich der einzig möglich konsistenten Theorie

18

## Ausblick

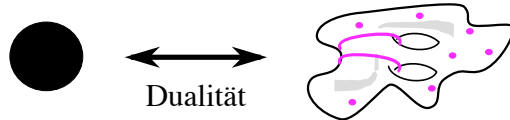
- Warum glauben wir, daß diese Ideen korrekt sind und Sinn machen ?

Obwohl Stringtheorie unendlich viele Vorhersagen macht (und dabei nur von endlich vielen Parametern abhängt), ist sie momentan experimentell kaum zu verifizieren....

- "**Theoretische Experimente**":

Zahlreiche quantitative, und hochgradig nichttriviale Konsistenztests wurden erfolgreich durchgeführt.

zB Berechnung der Entropie von Schwarzen Löchern:



Kein einziger Test der Dualitätsbeziehungen hat jemals versagt !

- Die genauere Analyse aller 4-dimensionalen Grundzustände ist ein Problem von enormer Komplexität.

Können wir hoffen, jemals experimentell testbare Vorhersagen zu machen ?

Trotz allem:

Es scheint, daß es gerade nur **eine** konsistente Quantentheorie (einschl Gravitation) gibt, mit vielen, vielen Facetten ...