

GUTs & Branes

Jan Louis

Martin-Luther-Universität

Halle-Wittenberg

Halle, Dezember 2002

Physik im 20. Jahrhundert:

erschließt experimentell und theoretisch kleine & große Längenskalen

- ⇒ Vorstoß in den Mikro – und Makrokosmos
- ⇒ Entwicklung von Teilchenphysik und Kosmologie

Theoretische Beschreibung

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

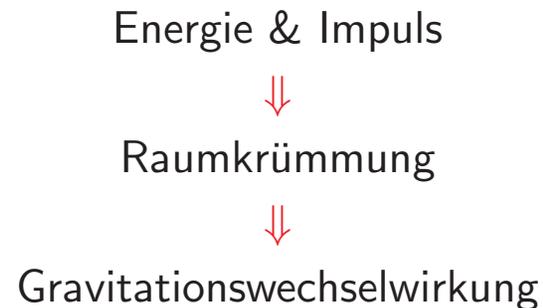
ART: stellt Frage nach der Struktur von Raum und Zeit
und nach der Geschichte unseres Universums

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,

⇒ Beobachtung von Gravitationswellen erwartet

(GEO 600, LISA, ...)

ART ist Grundlage der Kosmologie

Kosmologie

Beginn des 20. Jahrh.: Universum ist statisch

Entwicklung: Beobachtung von fernen Objekten verbessert sich

- Bau besserer Teleskope
- Beobachtung aus Satelliten und Ballons

heute: Universum expandiert – nach einem Urknall
Entwicklung des kosmologischen Standardmodells

Kosmologisches Standardmodell

⇒ Universum entstand aus **heißem** Urknall
seither: Ausdehnung gemäß **Einstein Gleichungen**

⇒ experimentelle Hinweise:

• Expansion beobachtet: Rotverschiebung von Galaxien [Hubble]

• erfolgreiche Beschreibung der Elementhäufigkeit [Gamov, ...]

$H_2 : 75\%$, $He : 25\%$

• Beobachtung der 3K Hintergrundstrahlung (CMB) [Penzias, Wilson]

Neue Beobachtungen

⇒ Evidenz für dunkle Materie aus Rotationskurven von Spiralgalaxien

[Sofue, Rubin, ...]

⇒ Beobachtung der Fluktuationen im Energiespektrum des CMB

[COBE, BOOMERANG, MAXIMA]

⇒ Messung der Rotverschiebung-Abstands Relation für Typ Ia Super Nova

⇒ präzisere Bestimmung der Expansion

[Riess et.al.]

[Perlmutter et.al.]

⇒ Ergebnisse:

• $\Lambda > 0$ ⇒ Λ ist neue Skala der Natur

• Energiedichte im Universum ist dunkel ('Kopernikanische Wende')

$$\Omega_{\Lambda} = 0.7, \quad \Omega_{DM} = 0.3, \quad \Omega_{BM} = 0.04$$

⇒ Ω_{Λ} ist dominanter Teil der Energiedichte

Quantentheorie

⇒ historischer Ausgangspunkt:

Physikalische Eigenschaften von Atomen können nicht mit klassischer Physik erklärt werden

⇒ Entwicklung der Quantentheorie:

punktförmige Teilchen → lokalisierte Energiequanten

genügen Heisenbergschen Unschärferelation

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

\hbar : Plancksche Naturkonstante

⇒ Lokalisierung (Δx klein) benötigt großen Impuls (Δp groß)

Quantentheorie 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

Standardmodell (SM) der Teilchenphysik

⇒ alle Materie ist aufgebaut aus 3 Familien von Quarks & Leptonen

	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

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

[CERN, DESY, FERMILAB, SLAC, 1990-2000]

⇨ theoretische Beschreibung von Quark- und Leptonmassen fordert Existenz von zusätzlichem Teilchen:

Higgs Boson

⇒ Vorhersage des SM

⇨ experimentelle Beobachtung steht noch aus

⇒ neue Experimente am LHC

⇨ ohne Nachweis des Higgs Boson ist Ursprung der Massen ungeklärt 

Neutrinomassen

erstmal (sanfte) Erweiterung des SM notwendig:

Beobachtung von Neutrinooszillation \Rightarrow Neutrinomassen

(Nobelpreis 2002 für R. Davis und M. Koshiba)

Neutrinos aus der Sonne:	$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$	[SNO]
Neutrinos aus der Erdatmosphäre:	$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$	[Superkamiokande]
Neutrinos aus Reaktoren:	$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$	[KamLAND]

Ergebnis:

$$m_{\nu_e} - m_{\nu_\mu} = \mathcal{O}(10^{-3} eV), \quad m_{\nu_\nu} - m_{\nu_\tau} = \mathcal{O}(10^{-6} eV)$$

\Rightarrow neue Skala der Natur

$$\frac{m_\nu}{m_e} \sim 10^{-9}$$

Theoretische Ansätze 'jenseits' des Standardmodells

⇒ Standardmodell ist nicht die endgültige Theorie

- warum 3 Familien von Quarks & Leptonen
- keine Vorhersage der Quark- & Leptonmassen
- Gravitationswechselwirkung lässt sich nicht berücksichtigen

⇒ ART ist nicht die endgültige Theorie

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

⇒ Ansätze:

- Supersymmetrie & Supergravitation
- Große vereinheitlichte Feldtheorien (GUTs)
- Superstringtheorie

Supersymmetrie/Supergravitation:

[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

⇒ experimentelle Überprüfung: LHC, (TESLA)

(super-) GUTs:

[Georgi, Glashow]

⇒ Verallgemeinerung des Symmetrieprinzips des SM:

Vereinigt alle Wechselwirkungen der Teilchenphysik

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

z.B.: $G_{\text{GUT}} = SU(5), SO(10), E_6$

notwendige Bedingung: Vereinigung der Kopplungskonstanten

⇒ supersymmetrische GUTs bei Skala $M_{\text{GUT}} \sim 3 \cdot 10^{16} \text{ GeV}$

⇒ Eigenschaften:

- sagt Zerfall des Protons voraus ⇒ Instabilität aller Materie
- legt leichte Neutrinos nahe

$$m_\nu \sim \frac{M_{Z^0}^2}{M_{\text{GUT}}} \sim \mathcal{O}(10^{-3} \text{ eV})$$

⇒ M_{GUT} ist die neue Skala.

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

Gibt es eine kleinste Länge/ Zeit — z.B. l_{PL}/ t_{PL} ?

Superstringtheorie

[Veneziano,...]

Grundidee:

punktförmige Teilchen \rightarrow ausgedehnte Objekte (Strings)



Stringtheorie = Quantentheorie von Strings

Teilchen = Schwingungsanregungen des Strings

Ausdehnung der Strings bisher nicht aufgelöst

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

Eigenschaften des Anregungsspektrums:

- notwendig immer Graviton im Spektrum
 - ⇒ Gravitation läßt sich nicht abschalten 
- Stringtheorie beinhaltet außerdem
 - Eichbosonen
 - Familien von Fermionen
 - Higgs Boson(en)
- supersymmetrische Teilchen (?)

Man zeigt außerdem:

⇨ bei 'niedrigen' Energien:

$$\text{Stringtheorie} \longrightarrow \text{QT} \oplus \text{ART}$$

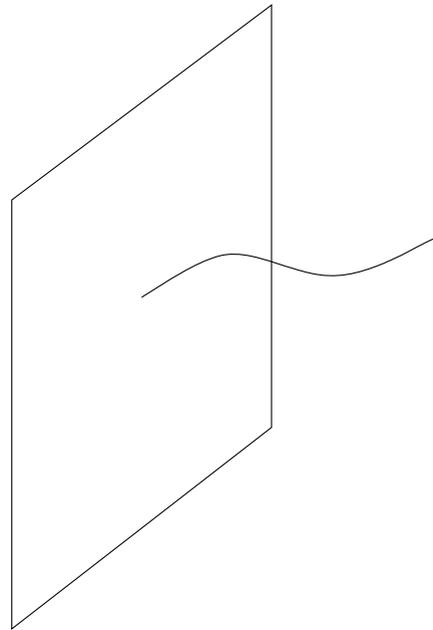
⇒ Quantenkorrekturen zur ART können sinnvoll berechnet werden

⇒ Stringtheorie ist Kandidat für Quantengravitation
und vereinigt alle Wechselwirkungen

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.)

Zusätzliche Raumdimensionen

quantentheoretische Unitarität der Streuamplituden

⇒ Strings bewegen sich in $D = 9 + 1$ Raum-Zeit Dimensionen $R_{9,1}$

Kontakt mit Teilchenphysik:

(1) Kompaktifizierung $R_{9,1} = R_{3,1} \otimes K_6$

(2) SM auf 3-dimensionalen D-Brane eingebettet in $R_{9,1}$

Wie groß können die zusätzlichen Dimensionen sein?

$$V(r) \sim \frac{1}{r} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Coulomb} \quad \text{gültig bis } \sim 10^{-16} \text{ cm} \\ \text{Newton} \quad \text{gültig bis } \sim 10^{-2} \text{ cm} \end{array} \right.$$

$$(1) \Rightarrow V_{K_6}^{\frac{1}{6}} \leq \mathcal{O}(10^{-16} \text{ cm})$$

natürliche Annahme: $V_{K_6} \sim \mathcal{O}(l_{Pl}^6)$

\Rightarrow zusätzliche Dimensionen sind experimentell nicht zugänglich

(2) D-Brane

- lokalisiert Eichbosonen,
- nur Gravitationwechselwirkung 'spürt' die zusätzlichen Dimensionen.

\Rightarrow zusätzlichen Dimensionen können 'groß' sein (Submillimeterbereich)

experimentelles Signal:

- Beobachtung von Korrekturen zum Newtonschen Potential [Long et.al.]
- 'missing energy' am LHC

Kosmologie in der Stringtheorie

⇨ bisher wenig bekannt über zeitabhängige (kosmologische) Lösungen 

⇨ $\Lambda > 0$ (sehr) problematisch in Stringtheorie 

aber: zeitabhängiges Skalarfeld kann $\kappa T_{\mu\nu} = -\Lambda g_{\mu\nu}$ 'simulieren'
solche Skalarfelder treten 'häufig' in Stringtheorie auf

⇒ führt in der Regel zu $\alpha_{em}(t)$ 

neue Beobachtungen

[Murphy, Webb, Flambaum, Curran]

$$\frac{\alpha_z - \alpha_0}{\alpha_0} = (-0.57 \pm 0.10) \times 10^{-5}$$

⇨ Urknall = Kollision von 2 D-Branes

[Khoury, Ovrut, Steinhardt, Turok]

⇒ keine punktförmige Singularität

⇒ zyklisches Universum

Zusammenfassung

- ART und QT bilden Grundlage heutiger Physik
- ART/Kosmologie beschreibt erfolgreich das Universum (Makrokosmos)
- QT/Teilchenphysik beschreibt erfolgreich den Mikrokosmos
- um frühe Phase des Universums zu beschreiben, muß es eine umfassende Theorie geben
- supersymmetrische Theorien (supersymmetrische GUTs) haben bemerkenswerte Eigenschaften:
 - Konsistenz mit elektro-schwachen Präzisionsexperimenten
 - Vereinigung der Eichkopplungen
 - Kandidaten für dunkle Materie
 - leichte Neutrinos
- Stringtheorie vereint QT, Teilchenphysik, ART und Kosmologie und ist bislang bester Kandidat für eine Quantengravitation