

Physik von Materie, Raum und Zeit

Jan Louis

Martin-Luther-Universität

Halle-Wittenberg



Symposium: Teilchenphysik in Deutschland

Bonn, 22.11.2002

Physik im 20. Jahrhundert:

erschließt experimentell und theoretisch kleine & große Längenskalen

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

Mikrokosmos/Teilchenphysik

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

Entwicklung: Untersuchung physikalischer Systeme auf immer kleineren Längenskalen

Mikroskop \Rightarrow Teilchenbeschleuniger

Ergebnis: Atome haben komplizierte Substruktur

bestehen aus Quarks & Leptonen

Wechselwirkung durch 4 Kräfte:
elektromagnetische Kraft, schwache Kraft,
starke Kraft, (Gravitationskraft)

Makrokosmos/Kosmologie

Beginn des 20. Jahrh.: Universum ist statisch

Entwicklung: Beobachtung von fernen Objekten verbessert sich

- Bau besserer Teleskope
- Beobachtung aus Satelliten und Ballons

Ergebnis:

[Hubble, 1929]

Universum expandiert – nach einem Urknall

[Penzias, Wilson, 1964]

Beobachtung der kosmischen 3K - Hintergrundstrahlung

[COBE, 1989-93]

Beobachtung der Anisotropie der Hintergrundstrahlung

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

- ⇨ beide Theorien sind experimentell bestätigt
- ⇨ beide Theorien haben mit den Vorstellungen und Gesetzen der klassischen Physik (19. Jahrhundert) grundlegend gebrochen
- ⇨ beide Theorien haben die Welt verändert
 - QT: weltanschaulich und praktisch – Mikroelektronik, IT, ...
 - ART: eher weltanschaulich – GPS

aber:

Bisher keine umfassende Theorie gültig an allen Längenskalen

⇒ keine Quantengravitation (keine Weltformel)

Superstringtheorie ist vielversprechender Kandidat für Quantengravitation

Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART)

[Einstein]

⇒ ART ist Theorie der Gravitationswechselwirkung

Geometrisierung der Wechselwirkung:

Energie & Impuls



Raumkrümmung



Gravitationswechselwirkung

Einstein Gleichungen:

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

(Λ : Kosmologische Konstante)

⇒ ART ist erfolgreich bestätigt z.B. durch:

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

⇒ Beobachtung von Gravitationswellen erwartet

⇒ Messung von Λ durch

- Fluktuationen der 3K Hintergrundstrahlung
- Präzisionsmessung der Expansionsrate des Universums

Ergebnis:

- $\Lambda > 0$
- dominanter Anteil der Energiedichte im Universum ist dunkel 
(‘Kopernikanische Wende’)

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

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 erklärt:

- Emissionsspektren von Atomen
- chemische Eigenschaften der verschiedenen Elemente
- radioaktive Zerfälle
- Kernphysik
- Halbleiter
- ...

⇒ moderne Informationstechnologie beruht auf Quantentheorie

⇒ Quantentheorie steht schon in unseren Wohnzimmern

Quantentheorie ist theoretische Grundlage der Teilchenphysik

Teilchenphysik

⇒ 20. Jahrhundert:

Untersuchung physikalischer Systeme auf immer kleineren Längenskalen

⇒ Situation heute:

erfolgreiche Beschreibung aller teilchenphysikalischen Phänomene durch das

Standardmodell (SM) der Teilchenphysik

- alle Materie ist aufgebaut aus 3 Familien von Quarks & Leptonen
- Wechselwirkung zwischen Quarks und Leptonen:
Quantenchromodynamik (QCD) & elektro-schwache Wechselwirkung
- mathematische Beschreibung durch unitäre Eichsymmetrie

$$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$$

- ⇒ 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 
- ⇒ erstmals Erweiterung des SM notwendig:
Beobachtung von Neutrinomassen [Kamiokande, SNO]

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)

⇒ Erwartung:

kleinere Entfernungen → neue physikalische Phänomene → neue Theorie

Theoretische Ansätze 'jenseits' des Standardmodells

⇨ Im frühen und heißen Universum:

Ausdehnung klein und Energie hoch ⇒ QT & ART relevant

⇨ Teilchenphysik & Astrophysik/Kosmologie werden gleichzeitig zur Beschreibung des Universums benötigt

⇒ Astro-Teilchenphysik

⇨ wir brauchen mehr:

⇒ Vereinigung von QT & ART 

⇨ Ansätze:

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

Supersymmetrie/Supergravitation:

[Wess, Zumino]

⇒ Verallgemeinerung des Symmetrieprinzips des SM:

Supersymmetrie = Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen

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

⇒ Eigenschaften:

- bezieht Gravitationswechselwirkung ein
- sagt viele neue Teilchen voraus (Sleptonen, Squarks, Photinos, ...)
bisher keine direkte experimentelle Beobachtung
- konsistent mit elektro-schwachen Präzisionsexperimenten
- sagt 'leichtes' Higgs Boson voraus
- hat vielversprechenden Kandidaten für dunkle Materie
- tritt heute in fast allen Verallgemeinerungen des SM auf
⇒ 'sollte ein Teil der Wahrheit sein'

⇒ experimentelle Überprüfung: LHC, TESLA

(super-) GUTs:

[Georgi, Glashow]

⇒ Verallgemeinerung des Symmetrieprinzips des SM:

Vereinigt QCD und elektro-schwache Wechselwirkung

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

notwendige Bedingung: Vereinigung der Kopplungskonstanten

⇒ Eigenschaften:

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

⇒ experimentelle Überprüfung: Beobachtung des Protonzerfalls

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:

- Quarks & Leptonen
- vereint Quantenchromodynamik, elektro-schwache Wechselwirkung und Gravitationskraft
- 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 

⇨ mehr als 3 Raumdimensionen 

zusätzliche Raumdimensionen sind kompakt und 'klein'

⇒ wie klein 

⇒ LHC/TESLA setzen neue Schranke

⇨ 'Vorhersagen':

- supersymmetrische Teilchen
- zusätzliche Raumdimensionen

Stringtheorie und Mathematik

punktförmiges Teilchen

≡

Sonde einer kontinuierlichen Raum-Zeit Geometrie

⇒ Zusammenhang mit Riemannscher Geometrie

[Einstein, Hilbert]



String als Sonde: sieht andere, gröbere 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
- Berechnung einer Quantenkohomologie

Auf Grundlage des heutigen Wissensstands in der Teilchenphysik ergeben sich folgende offene Fragen:

- ⇒ Wie erhalten die Teilchen ihre Masse ?
- ⇒ Gibt es eine Vereinigung aller Wechselwirkungen ?
- ⇒ Gibt es supersymmetrische Teilchen ?
- ⇒ Was ist die dunkle Materie ?
- ⇒ Was ist die dunkle Energie ?
- ⇒ Gibt es zusätzliche Raumdimensionen ?

Antworten:

LHC & TESLA !