

Vom Kleinsten zum Größten – von den Elementarteilchen zum Universum

Andreas Wipf

Theoretisch-Physikalisches Institut, Physikalisch-Astronomische Fakultät
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Graduiertenakademie, 27. Mai 2010



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

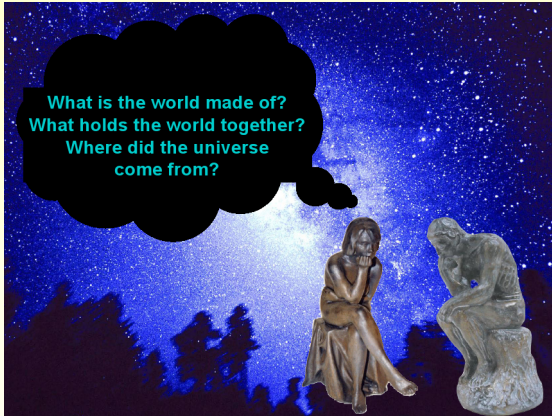
1 Mikrokosmos

2 Makrokosmos

3 Schnittpunkte

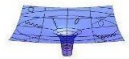


Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

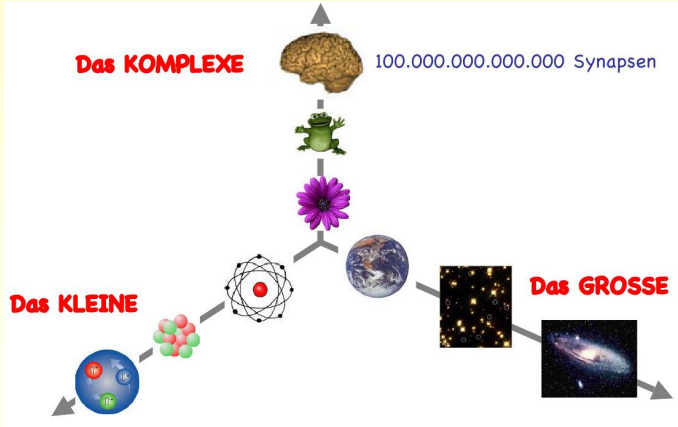


*Der Beginn aller Wissenschaften ist das Erstaunen,
daß die Dinge sind, wie sie sind.*

(ARISTOTELES)



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields



0.000 000 000 000 000 001 Meter

100 000 000 000 000 000 000 000 Sterne



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Vom Kleinen

Wenn die Menschen nur über das sprächen, was sie begreifen, dann würde es sehr still auf der Welt sein.

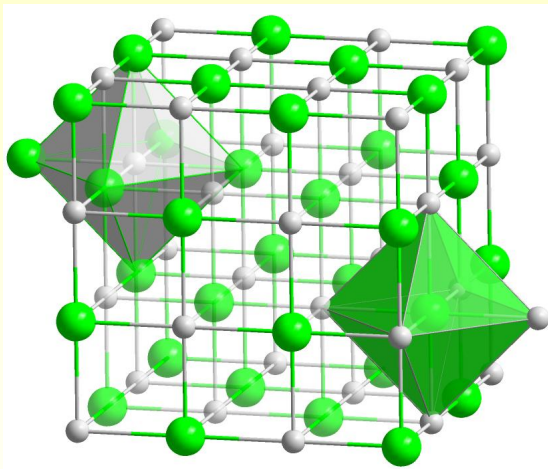
(ALBERT EINSTEIN)

10^{-3}	Tausendstel	Milli
10^{-6}	Millionstel	Mikro
10^{-9}	Milliardenstel	Nano
10^{-12}	Milliardenstel	Piko
10^{-15}	Billiardenstel	Femto
10^{-18}	Trilliardenstel	Atto



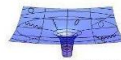
Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Kristalle



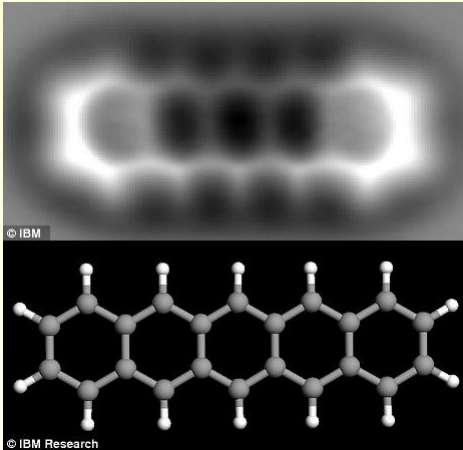
Kochsalz
Natriumatome
Chloratome

Abstand benachbarter Atome 0,56 nm



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Moleküle

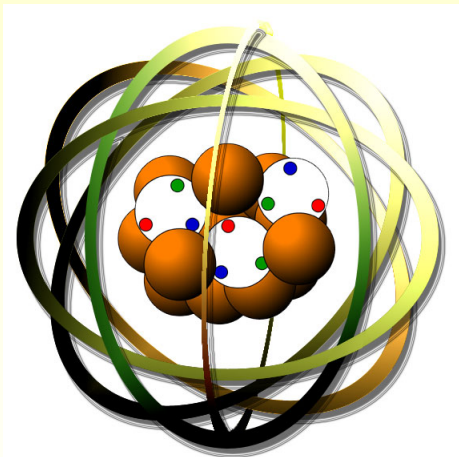


AFM-Bild eines Pentacene Moleküls aus 22 Kohlenstoff- und 14 Wasserstoffatomen



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

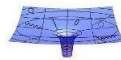
Atome



Atom (10^{-10}m) =
Atomkern ($\sim 10^{-15}\text{m}$)
+ Elektronen ($< 10^{-18}\text{m}$)

Atomkern =
Protonen + Neutronen

Kerndichte $3 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Elektronen



Elektron

Masse:

$$9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

kleiner als 10^{-18} m

punktförmig, elementar (?)

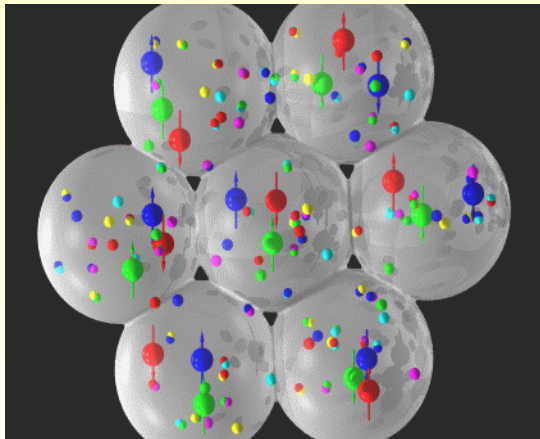
Chemie, Elektronik, ...

Arbeitspferd der Moderne



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Quarks



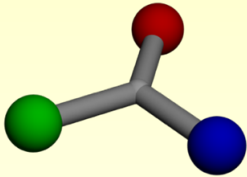
Proton =
drei Quarks (uud)

Neutron =
drei Quarks (udd)

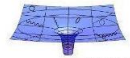
Quarks:
punktförmig (?)
elementar (?)



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

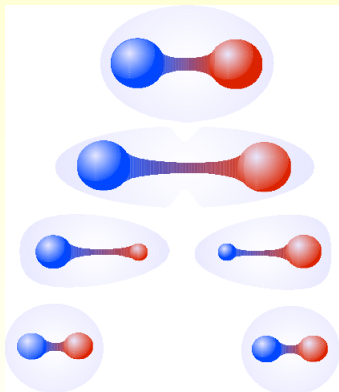


- konstante starke Kraft
- Flußschlauch
- Quarks verklebt
- immer im Verband
- → **Confinement**



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Schlauchbruch



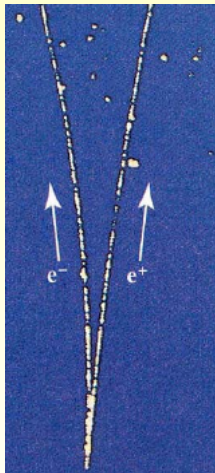
- **Pion** = zwei Quarks (ud)
- Energiezufuhr \rightarrow entstehen 2 Pionen
- keine einzelne Quarks, Teilchen (?)
- Trotzdem: **Quarks existieren**
- Experimente, Simulationen, Vorhersagen

[Click here](#)



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Antimaterie



Vereinigung von
Quantentheorie und Relativitätstheorie →

Antimaterie:

jedes Teilchen besitzt Antiteilchen

$$p \leftrightarrow \bar{p}, \quad e^{-} \leftrightarrow e^{+}, \quad \gamma \leftrightarrow \gamma, \dots$$

Paarvernichtung, Paarerzeugung

$$e^{-} + e^{+} \longrightarrow \gamma + \gamma$$

Theorie: Quantenfeldtheorien

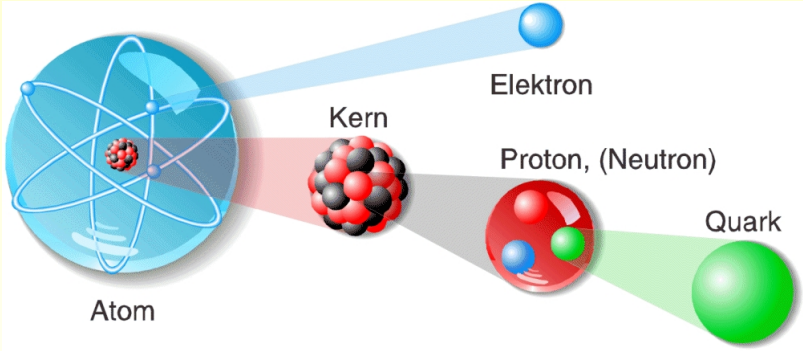
Experimente: Teilchenbeschleuniger

Illuminati: mehrere Milliarden Jahre



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Bausteine des Universums



10^{-10} m

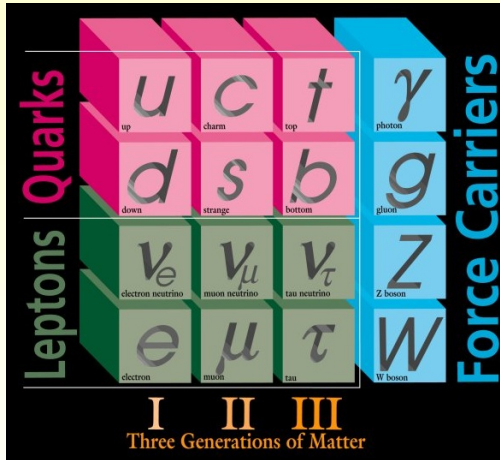
10^{-15} m

10^{-18} m



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Bausteine des Universums



Materie u, d, e, \dots
Antiteilchen
Austauschteilchen

γ, \dots
hohe Symmetrie

[Click here](#)



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Theorie

- **Quantentheorie** (erfolgreich, seltsam)
Welle-Teilchen Dualismus, Unschärferelationen
Wahrscheinlichkeiten
- **Spezielle Relativitätstheorie**
Übergang zwischen Inertialsystemen
Grenzgeschwindigkeit c , $E = mc^2$
- **Quantentheorie + Spezielle Relativitätstheorie** \Rightarrow
'konsistente' relativistische Quantenfeldtheorien
Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen
Erzeugung und Vernichtung von (Anti)Teilchen
Streuquerschnitte, Lebensdauern, Massen, . . .



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Theorie

- Experimente, Unerklärtes \rightarrow Modelle \rightarrow Theorien
- math. Untersuchungen: Konsistenz, Struktur, Symmetrien
- (aufwendige) Analysen, Rechnungen, Simulationen \rightarrow Vorhersagen, Überprüfung im Experiment
- **Mathematik ist die Sprache der Physik** (\rightarrow Ausbildung)

$$i\frac{\partial\psi}{\partial t} = H\psi \leftrightarrow i\cancel{D}\psi - m\psi = 0$$

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = j^\mu$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}\text{tr}(F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}) + \bar{\psi}(\cancel{D} - m)\psi \\ & + \phi(D^2 - m^2)\phi + \bar{\psi}\phi\psi + V(\phi)\end{aligned}$$



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

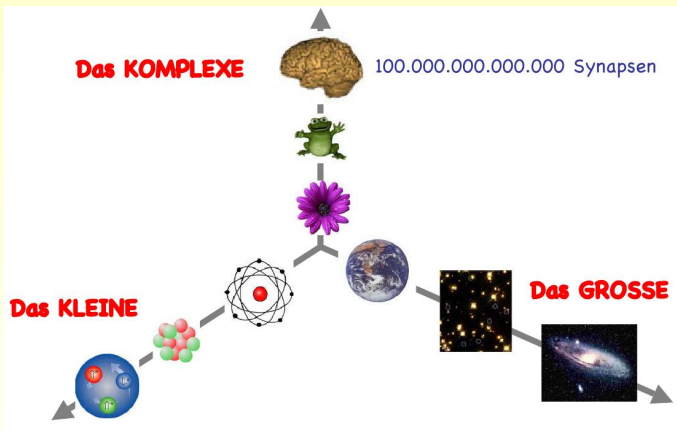
Wichtige offene Fragen

- Erkläre **Confinement** aus ersten Prinzipien (1 Mio \$ question)
- Phasen bei hohen Temperaturen/Dichten (→ Kosmologie)
- Woher kommt **Masse** der Elementarteilchen (Higgs)?
- **Vereinigung** der nicht-gravitativen Kräfte (Elektromagnetismus)
- Gibt es **extra Dimensionen** (Stringtheorien)?
- Gibt es **Supersymmetrie** (susy Partner)?



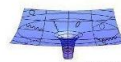
Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Zum Großen



0.000 000 000 000 000 001 Meter

100 000 000 000 000 000 000 Sterne



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Entfernungen

10^3	Tausend	Kilo
10^6	Million	Mega
10^9	Milliarde	Giga
10^{12}	Billion	Tera
10^{15}	Billiarde	Peta
10^{18}	Trillion	Exa

- 1 Lichtsekunde = 100 Millionen m
- 1 Lichtminute = 18 Milliarden m
- 1 Lichtjahr = 9,5 Billiarden m
- Erde – Mond: 1,3 Ls
- Erde – Sonne: 8,3 Lm



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Sterne und Galaxien



Sternenhimmel

Proxima Centauri: 4,2 Lj

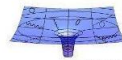
Blick in die Vergangenheit



Milchstraße, \varnothing 100 000 Lj

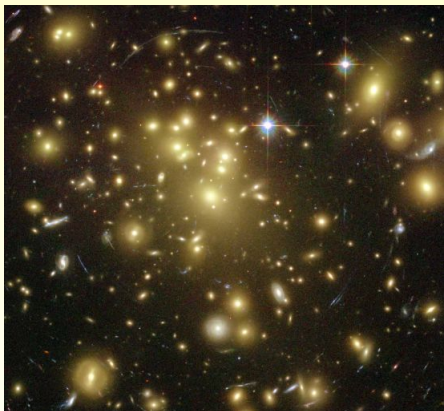
etwa 100 Milliarden Sterne

sichtbare Masse < gravitative Masse



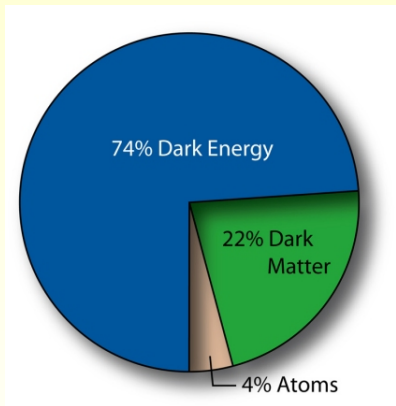
Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Galaxienhaufen



Abell-Cluster 1689, Hubble, 2.2 Milliarden Lj entfernt
Gravitationslinse, $M_{\text{sichtbar}} = 0.01 \cdot M_{\text{total}}$

Dunkle Materie, dunkle Energie

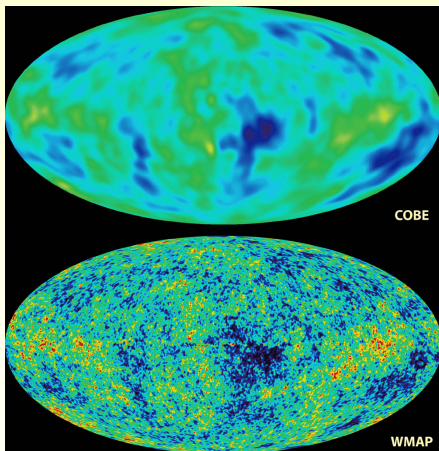


- sichtbare Materie = Sterne, Staub, Gas, kompakte Objekte
- **dunkle Materie = ?**
es gibt Kandidaten
- **dunkle Energie = ???**
- beschleunigtes Universum
- ☹☹☹ ↔ ☺☺☺



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Kosmische Hintergrundstrahlung

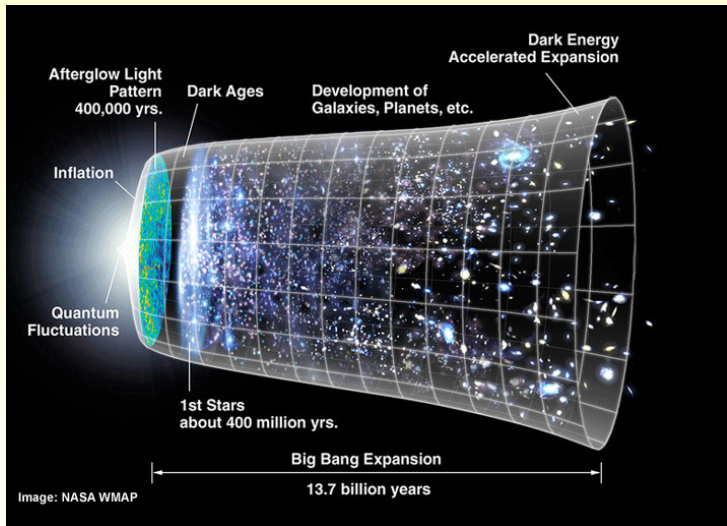


- Temperatur $\approx 2,7^\circ \text{K}$
- Beleg für **Urknalltheorie**
- 13,7 Milliarden Jahre alt
- 380 000 Jahre nach Urknall
- Dipolterm: Milchstraße bewegt sich mit 4,5 Mio km/h durchs Universum

(NEW YORK TIMES, 14.11.1977)

- Fluktuationen
1 : 100 000 \Rightarrow
Strukturen im Universum
- woher ?

Frühes Universum: woher kommen **Strukturen**



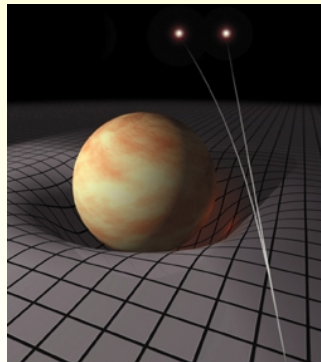
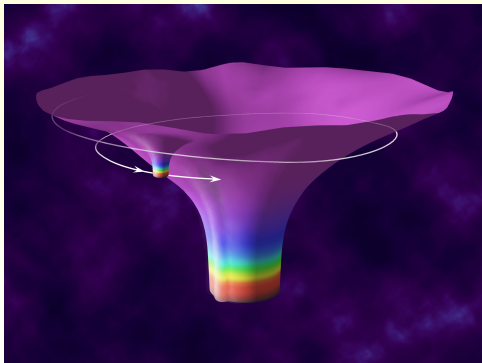
Im Großen dominiert universelle Gravitationskraft

Materie bestimmt Raumzeitgeometrie:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Geometrie bestimmt Bahnen:

$$\ddot{x}^{\mu} = \Gamma^{\mu}_{\alpha\beta} \dot{x}^{\alpha} \dot{x}^{\beta}$$



Starke Gravitationsfelder

- bizarre Objekte: weiße Zwerge, Neutronensterne
- Gravitationswellen [Click here](#)
- Schwarze Löcher: Horizonte, "seltsame Physik"
- sind schwarze Löcher schwarz (Hawkingstrahlung)
- Entwicklung des (frühen) Universums

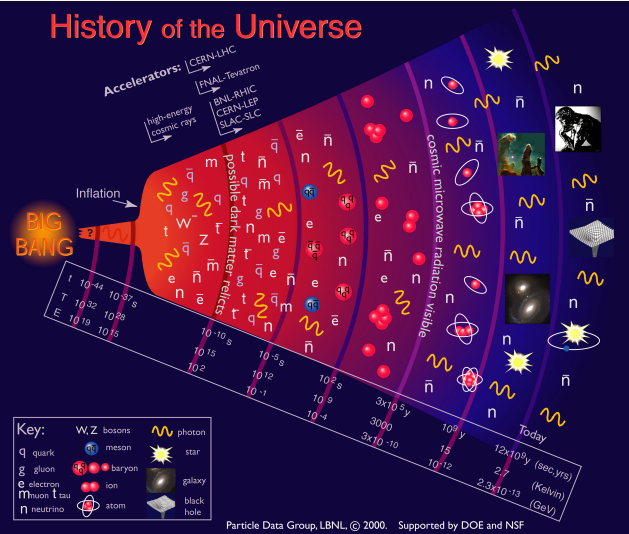
hier treffen sich:

- Quantentheorie
- Teilchenphysik
- Gravitationsphysik



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

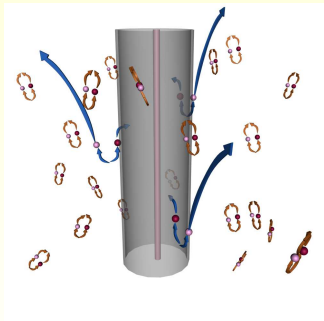
Entwicklung des Universums



Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

Quanten/Teilchentheorie ↔ Gravitationstheorie

- Energieerzeugung in Sternen (Fusion)
- Stabilität von weißen Zwergen/Neutronensternen (Pauli)
- **Hawkingstrahlung**

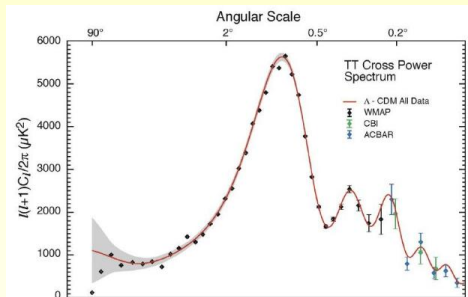


- ein schwarzes Loch strahlt!
- Spektrum eines schwarzen Körpers
→ Massenverlust
- Lebensdauer $\propto M^3$
- Vakuumfluktuationen → Strukturen
- mikro → makro



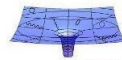
Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields

Sehr frühes Universum



- Strukturentstehung
- Quantenfluktuationen → Strukturen
- WMAP → Alter, Geometrie
- WMAP → Inflation

- dunkle Materie = exotische Teilchen ☺
- dunkle Energie ☹
- Singularität: gelten bekannte Gesetze der Physik noch?



Research Training Group
Quantum and Gravitational Fields