

# 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

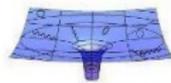


Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

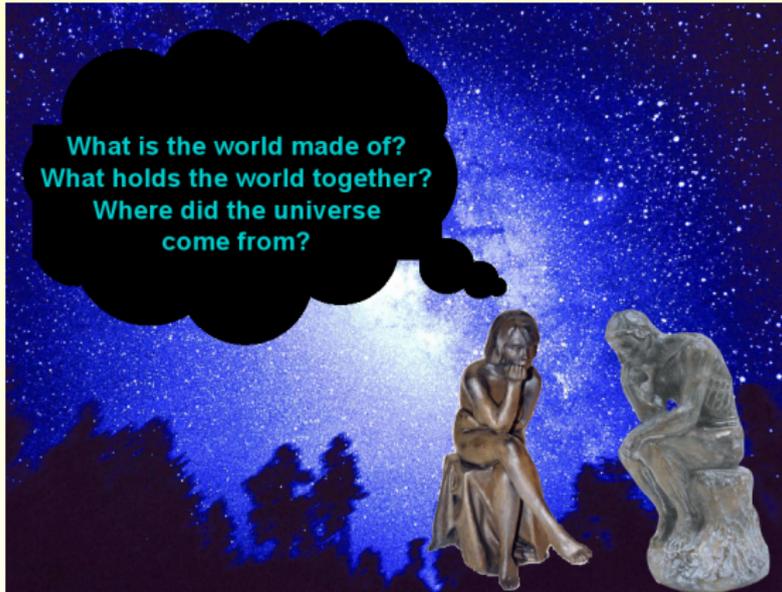
1 Mikrokosmos

2 Makrokosmos

3 Schnittpunkte



Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

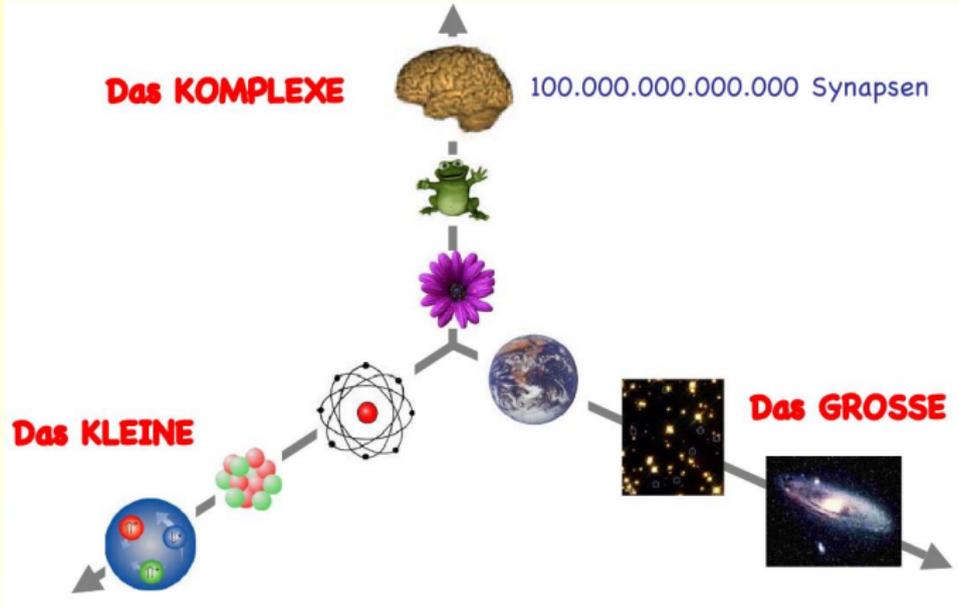


*Der Beginn aller Wissenschaften ist das Erstaunen,  
daß die Dinge sind, wie sie sind.*

(ARISTOTELES)

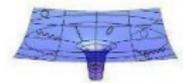


Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields



0.000 000 000 000 000 001 Meter

100 000 000 000 000 000 000 000 Sterne



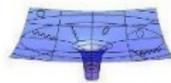
Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# Vom Kleinen

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

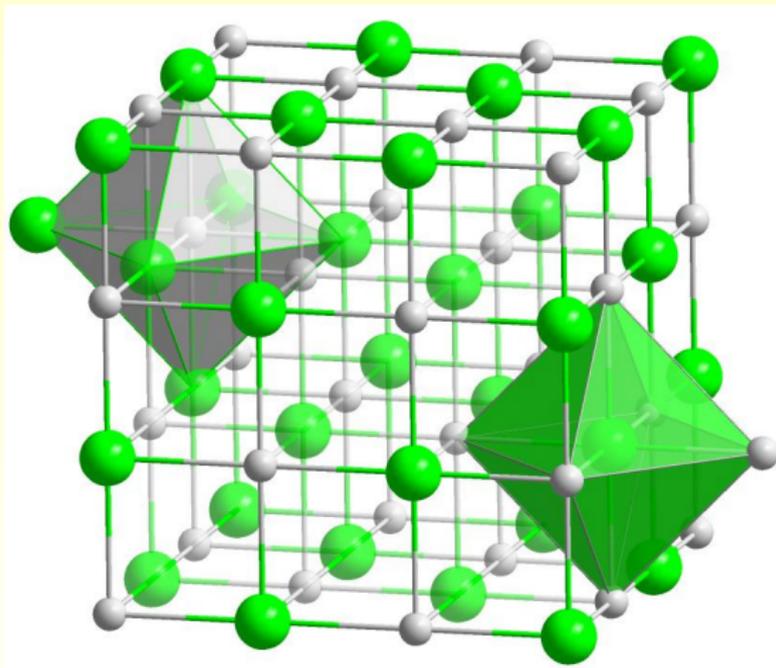
(ALBERT EINSTEIN)

$10^{-3}$	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



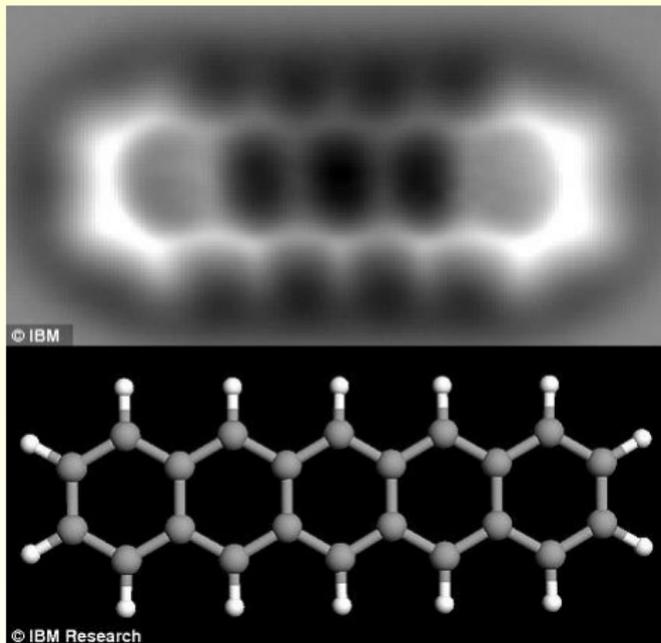
Kochsalz  
Natriumatome  
Chloratome

Abstand benachbarter Atome 0,56 nm



Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# Moleküle

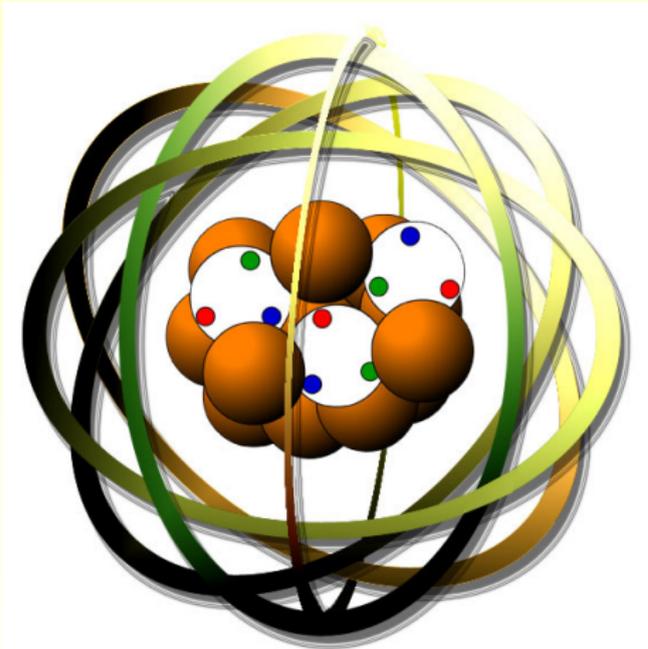


AFM-Bild eines Pentacene Moleküls aus 22 Kohlenstoff- und 14 Wasserstoffatomen



Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# Atome



Atom ( $10^{-10}\text{m}$ ) =  
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:

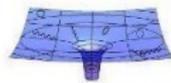
$$9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

kleiner als  $10^{-18} \text{ m}$

punktförmig, elementar (?)

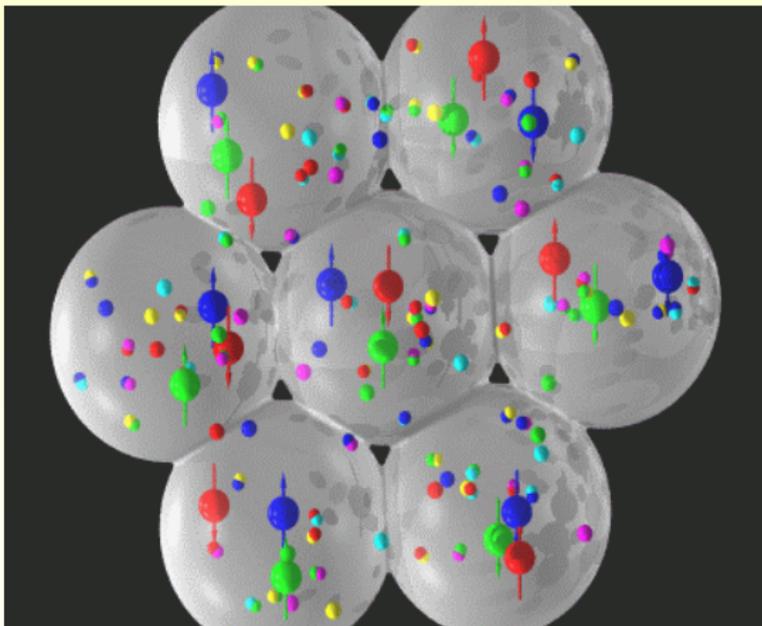
Chemie, Elektronik, ...

Arbeitspferd der Moderne



Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

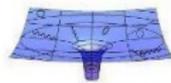
# Quarks



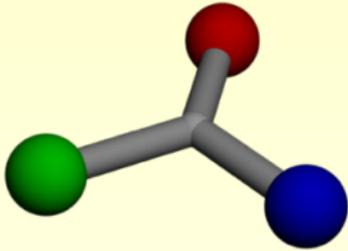
**Proton** =  
drei Quarks ( $uud$ )

**Neutron** =  
drei Quarks ( $udd$ )

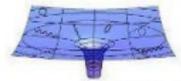
**Quarks:**  
punktförmig (?)  
elementar (?)



Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

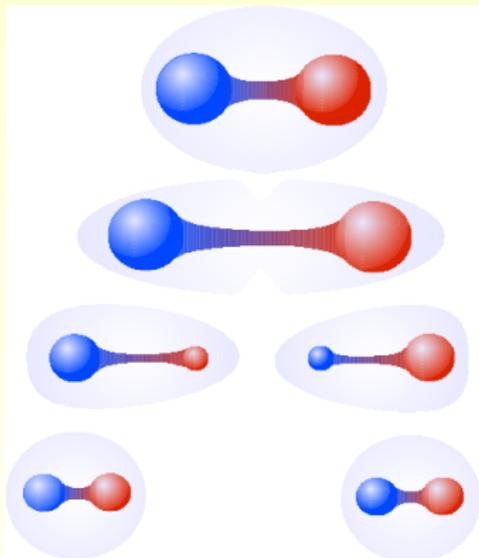


- konstante starke Kraft
- Flußschlauch
- Quarks verklebt
- immer im Verband
- → **Confinement**



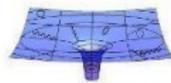
Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# Schlauchbruch



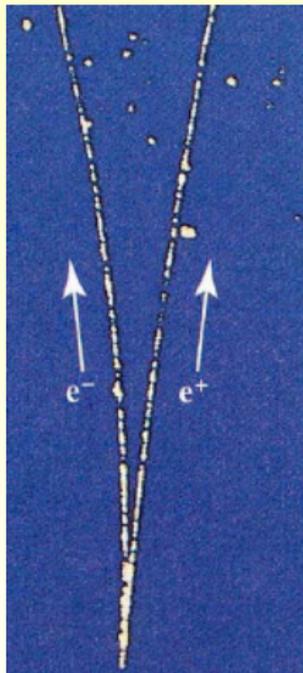
- **Pion** = zwei Quarks ( $ud$ )
- Energiezufuhr  $\rightarrow$  entstehen 2 Pionen
- keine einzelne Quarks, Teilchen (?)
- Trotzdem: **Quarks existieren**
- Experimente, Simulationen, Vorhersagen

[Click here](#)



Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# Antimaterie



Vereinigung von  
Quantentheorie und Relativitätstheorie →

**Antimaterie:**

jedes Teilchen besitzt Antiteilchen

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

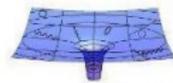
Paarvernichtung, Paarerzeugung

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

Theorie: Quantenfeldtheorien

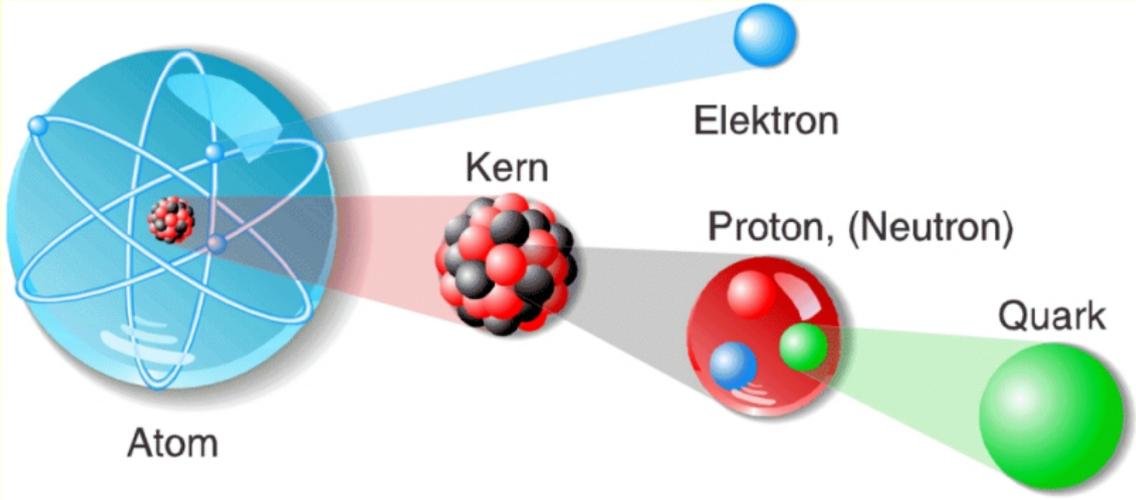
Experimente: Teilchenbeschleuniger

Illuminati: mehrere Milliarden Jahre



Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# Bausteine des Universums



$10^{-10} \text{ m}$

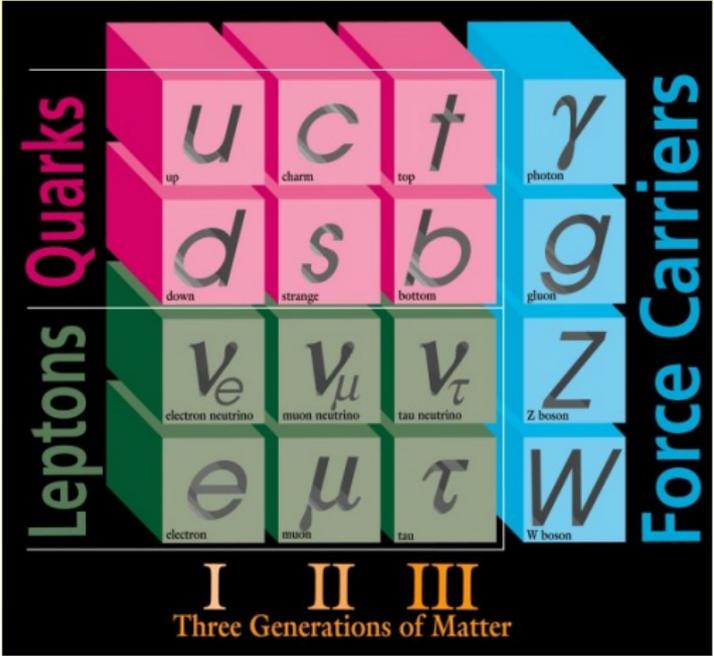
$10^{-15} \text{ m}$

$10^{-18} \text{ m}$



Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# Bausteine des Universums



Materie  $u, d, e, \dots$   
Antiteilchen  
Austauschteilchen

$\gamma, \dots$   
hohe Symmetrie

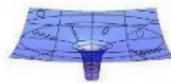
[Click here](#)



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

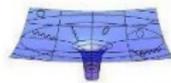
# Theorie

- 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)

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

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

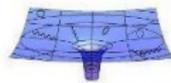
$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}\text{tr}(F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}) + \bar{\psi}(\cancel{D} - m)\psi \\ & + \phi(D^2 - m^2)\phi + \bar{\psi}\phi\psi + V(\phi)\end{aligned}$$



Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

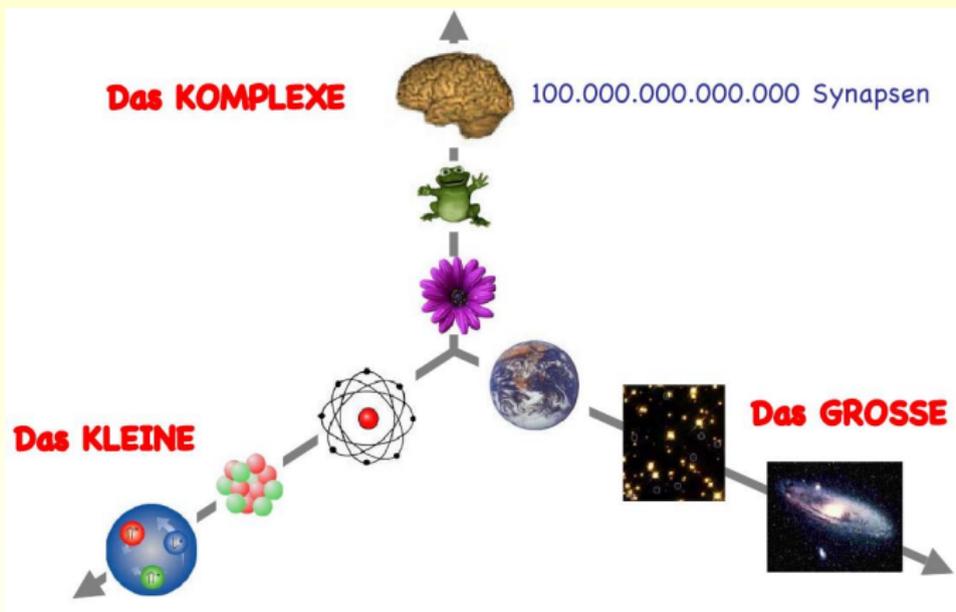
# Wichtige offene Fragen

- 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

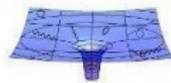


Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# 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

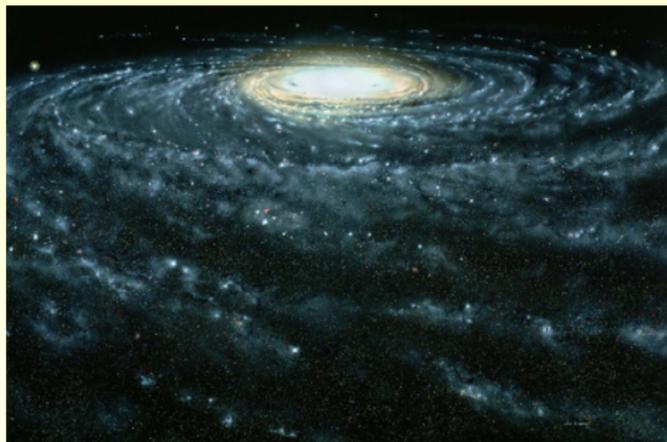
# Sterne und Galaxien



Sternenhimmel

Proxima Centauri: 4,2 Lj

Blick in die Vergangenheit



Milchstraße,  $\varnothing$  100 000 Lj

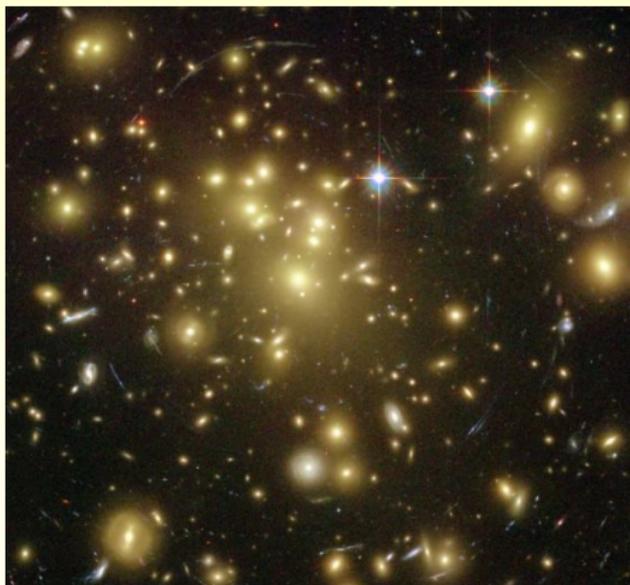
etwa 100 Milliarden Sterne

sichtbare Masse < gravitative Masse



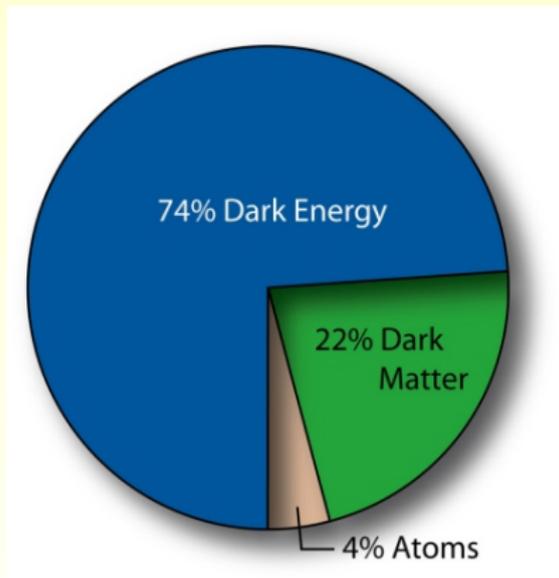
Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# Galaxienhaufen

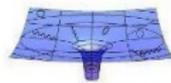


Abell-Cluster 1689, Hubble, 2.2 Milliarden Lj entfernt  
Gravitationslinse,  $M_{\text{sichtbar}} = 0.01 \cdot M_{\text{total}}$

# Dunkle Materie, dunkle Energie

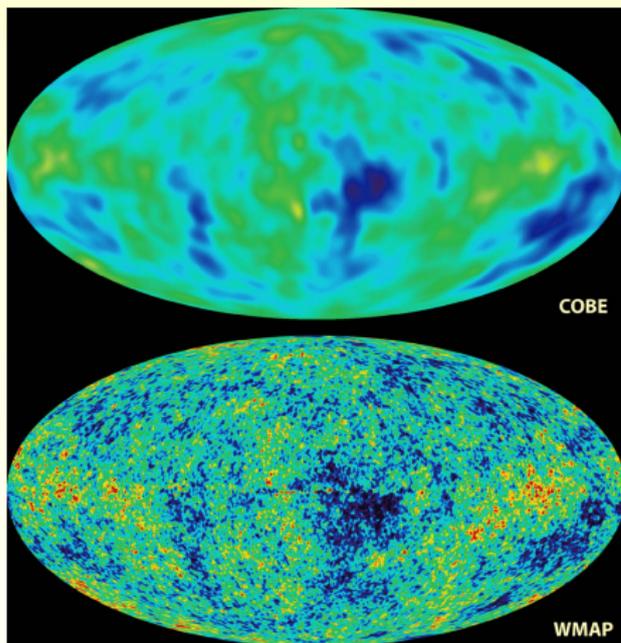


- sichtbare Materie = Sterne, Staub, Gas, kompakte Objekte
- **dunkle Materie = ?**  
es gibt Kandidaten
- **dunkle Energie = ???**
- beschleunigtes Universum
- ☹☹☹ ↔ ☺☺☺



Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# Kosmische Hintergrundstrahlung

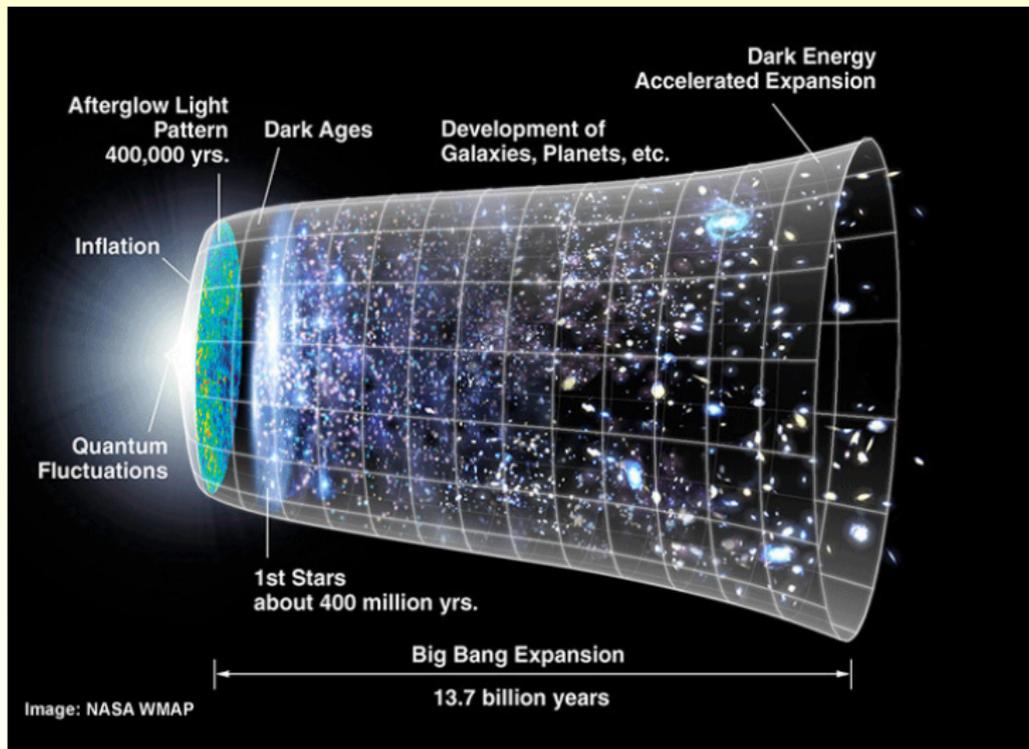


- Temperatur  $\approx 2,7^\circ\text{K}$
- Beleg für **Urknalltheorie**
- 13,7 Milliarden Jahre alt
- 380 000 Jahre nach Urknall
- Dipolterm: Milchstraße bewegt sich mit 4,5 Mio km/h durchs Universum

(NEW YORK TIMES, 14.11.1977)

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

# Frühes Universum: woher kommen **Strukturen**



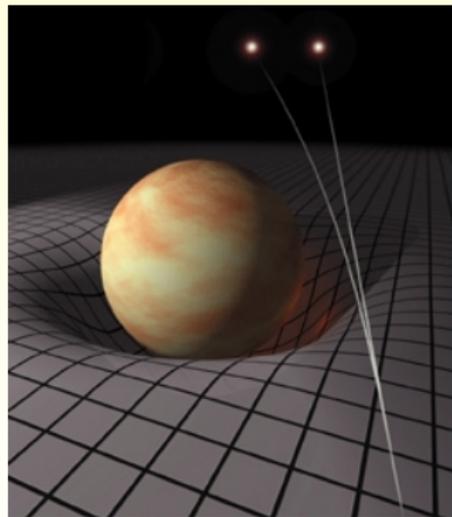
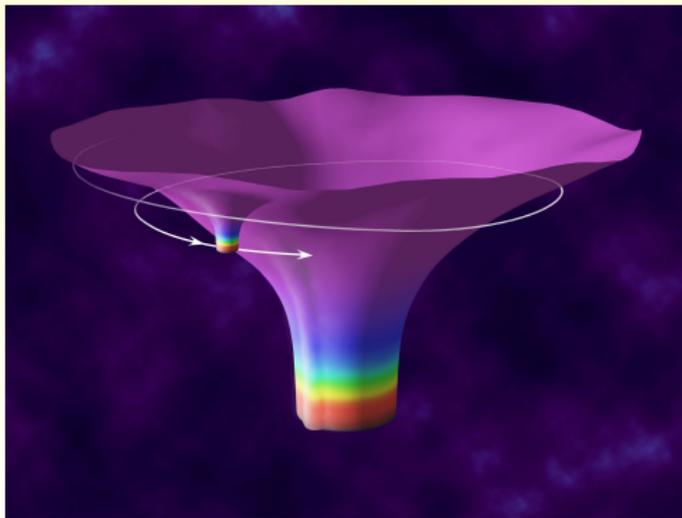
# Im Großen dominiert universelle Gravitationskraft

Materie bestimmt Raumzeitgeometrie:

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

Geometrie bestimmt Bahnen:

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

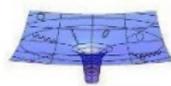


# Starke Gravitationsfelder

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

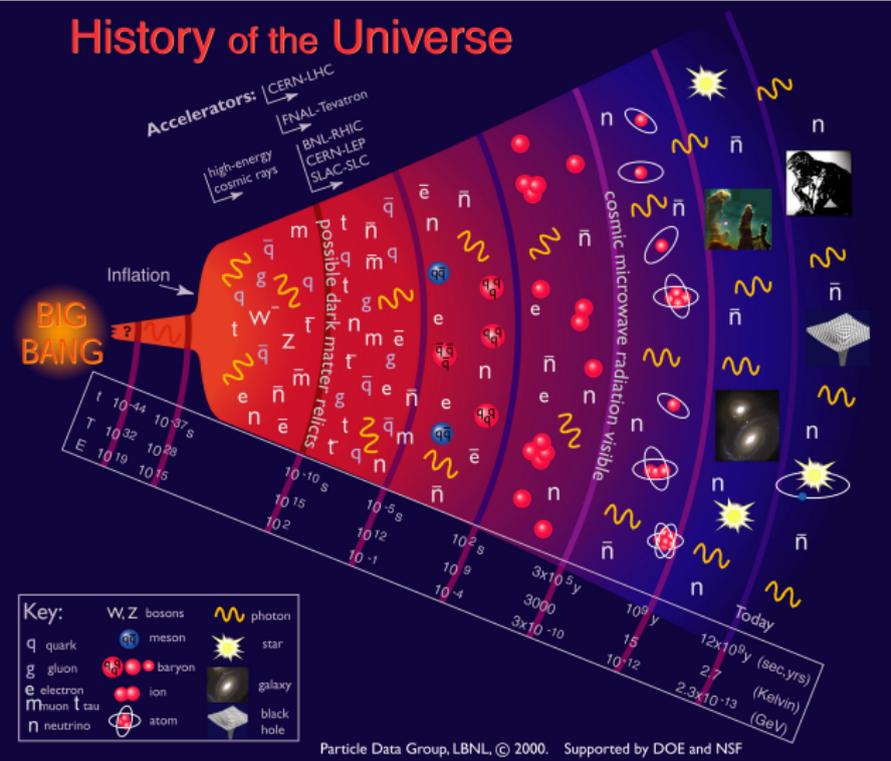
hier treffen sich:

- Quantentheorie
- Teilchenphysik
- Gravitationsphysik



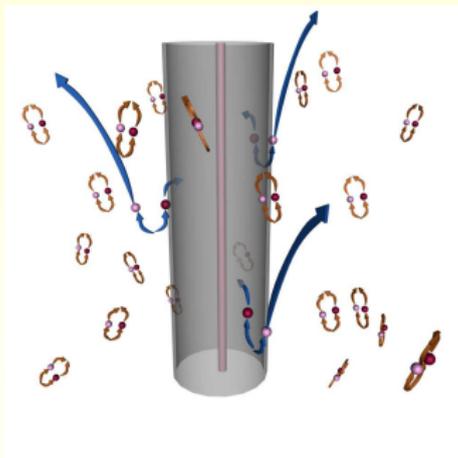
Research Training Group  
Quantum and Gravitational Fields

# Entwicklung des Universums

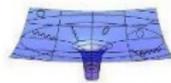


# Quanten/Teilchentheorie ↔ Gravitationstheorie

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

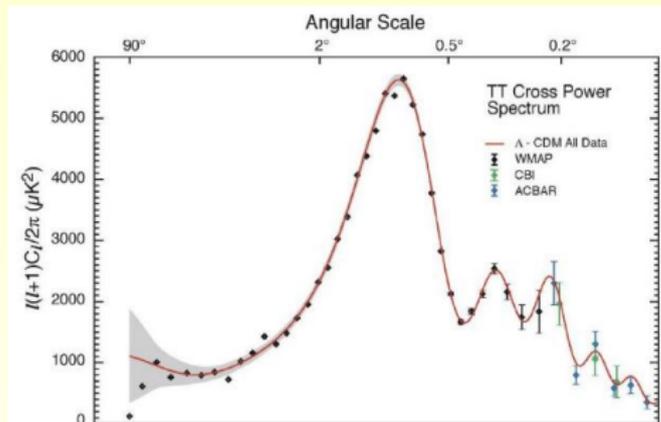


- ein schwarzes Loch strahlt!
- Spektrum eines schwarzen Körpers  
→ Massenverlust
- Lebensdauer  $\propto M^3$
- Vakuumfluktuationen → Strukturen
- mikro → makro



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