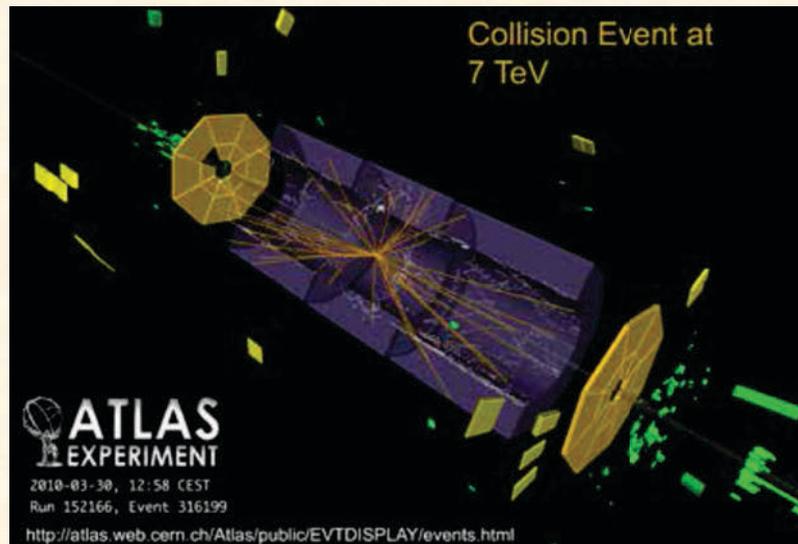


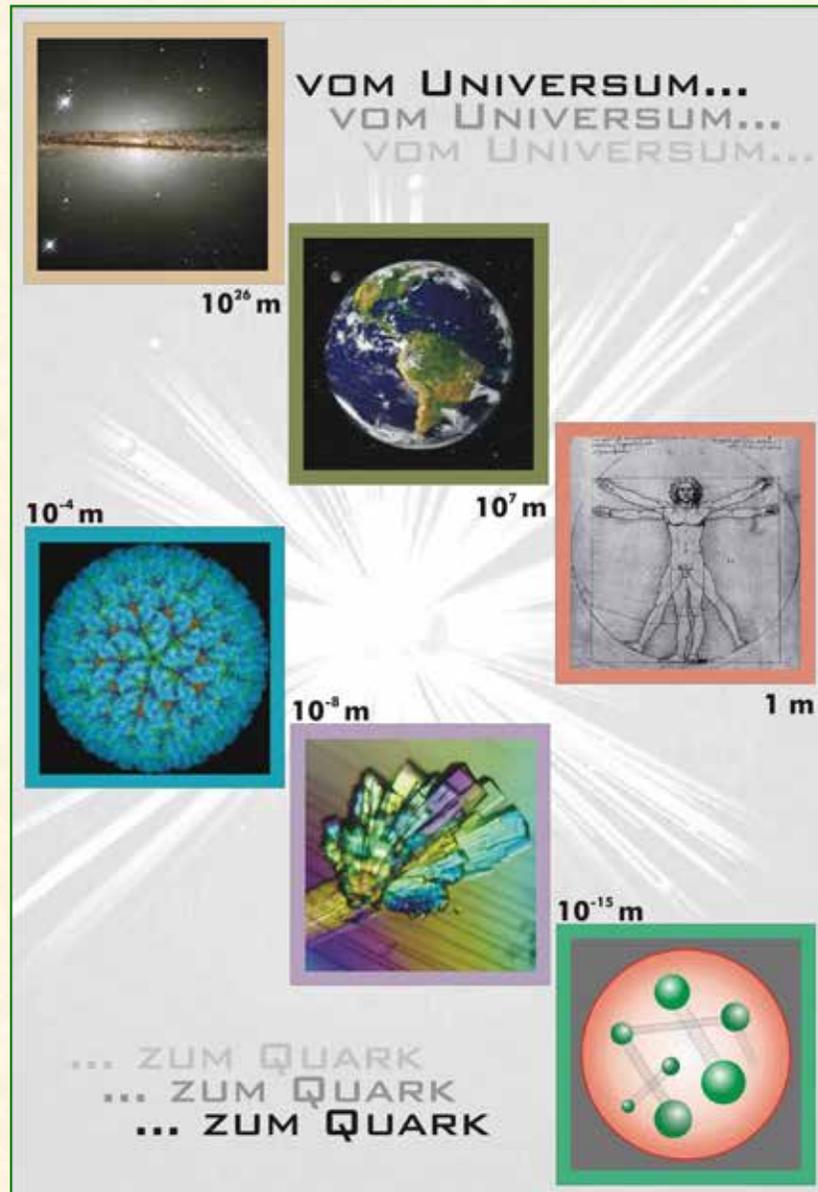
Neue Horizonte in der Teilchenphysik

- Vom Higgs-Teilchen zur Dunklen Materie im Universum -



Prof. Dr. Karl Jakobs
Physikalisches Institut
Universität Freiburg

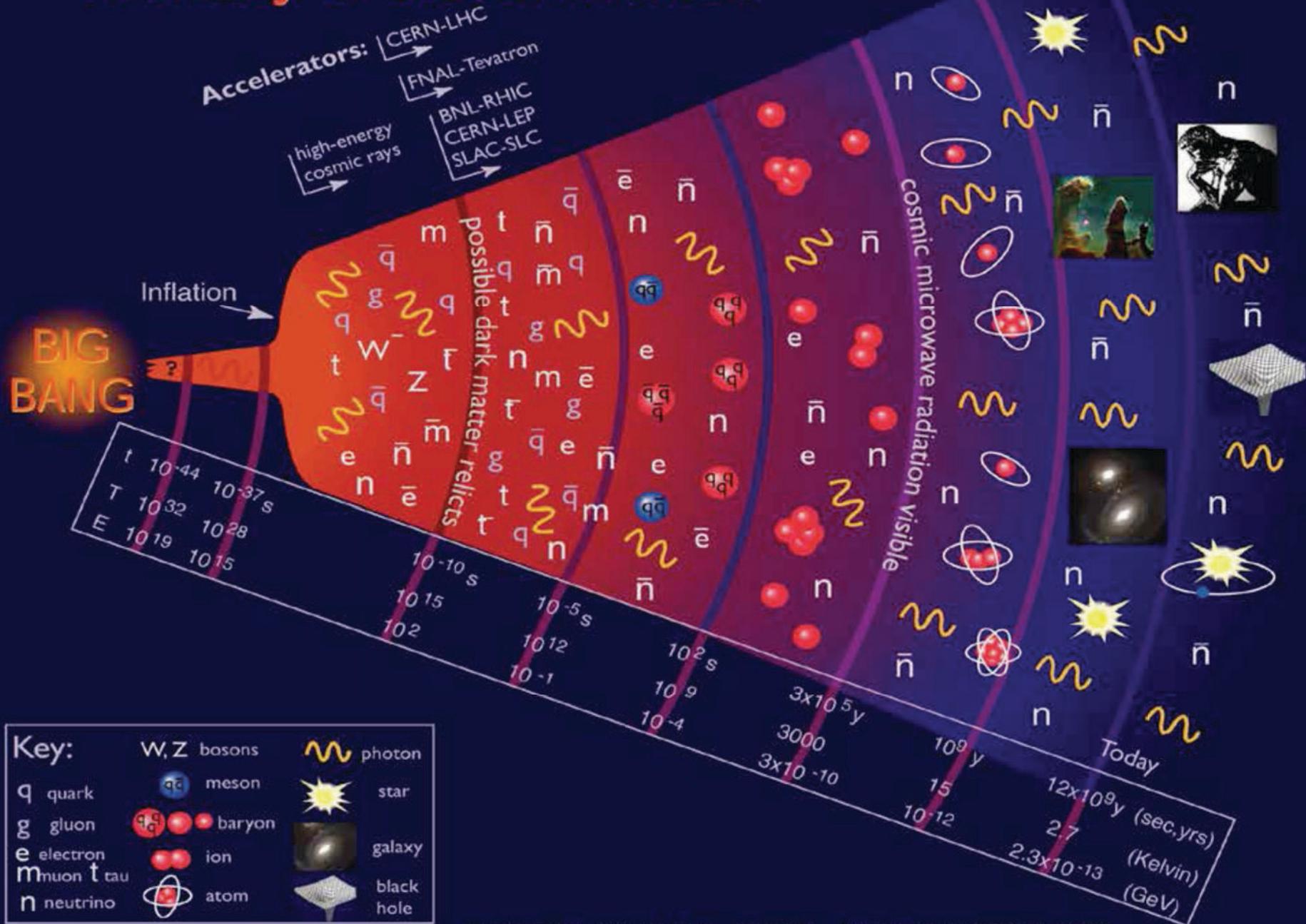
Zielsetzung der Physik



Einheitliche und umfassende
Beschreibung der Materie
und ihrer Wechselwirkungen

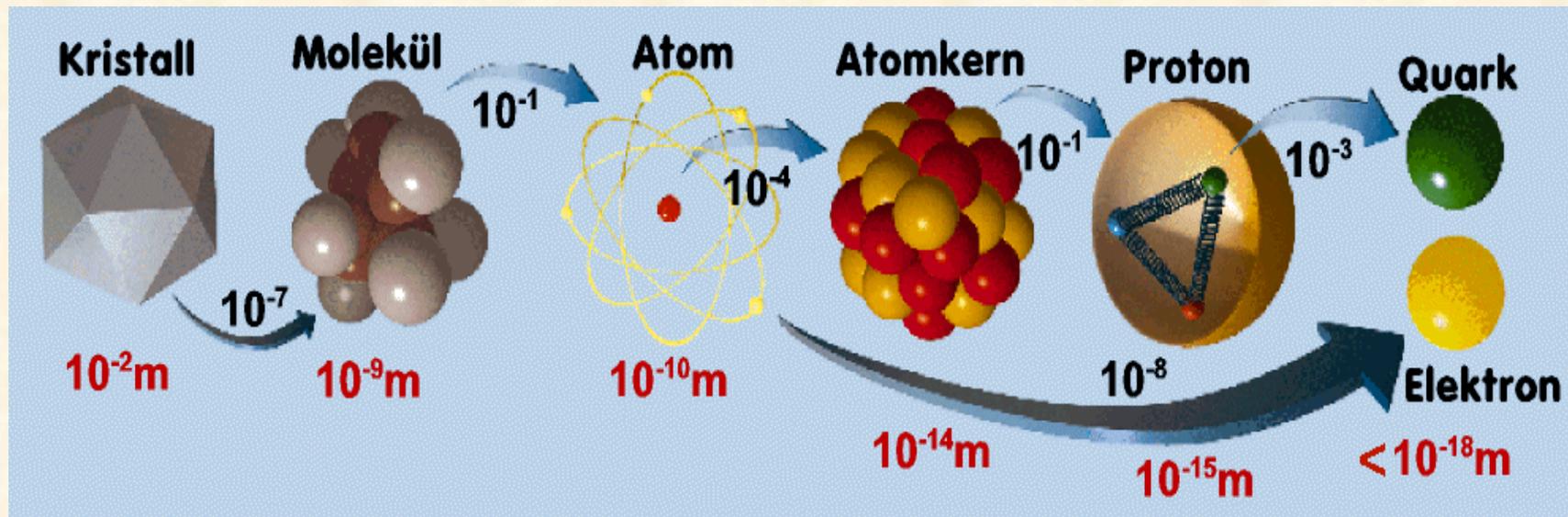
(von den kleinsten Abständen
bis zu
kosmischen Dimensionen)

History of the Universe



Die Methoden der Teilchenphysik

- Strukturuntersuchungen



Auge,
Mikroskop

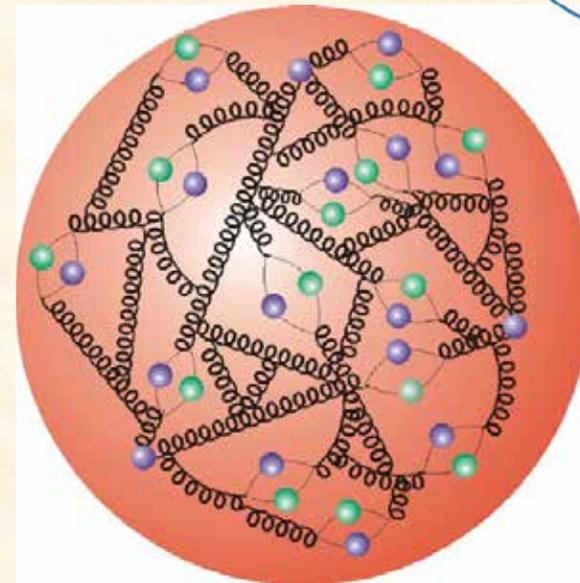
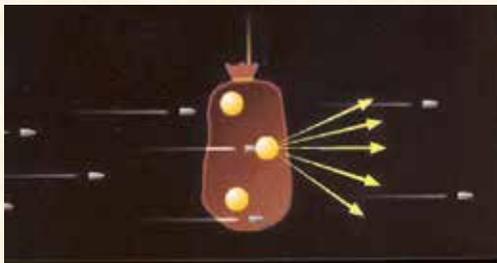
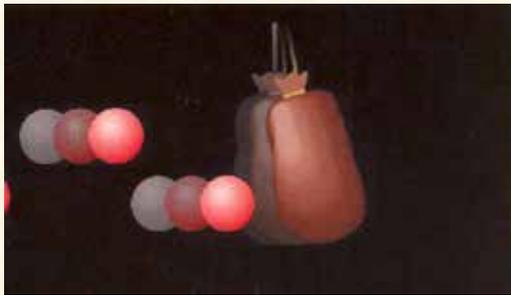
Elektronenmikroskop

Hochenergetische
Teilchenstrahlen

Hohe Teilchenimpulse (Energien) sind notwendig, um das Innere des Atomkerns und kleinere Strukturen untersuchen zu können

Die räumliche Auflösung wird bei hohen Impulsen besser

$$\Delta x = \frac{\hbar}{p}$$

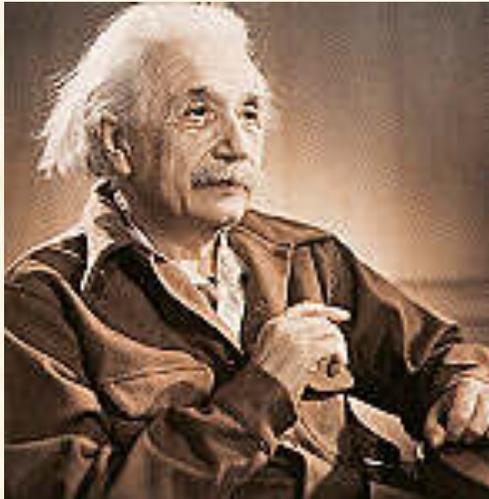


Die innere Struktur eines Protons

HERA-Beschleuniger

Die Methoden der Teilchenphysik

- Strukturuntersuchungen
- Suche nach „Neuen Teilchen“ (neuen Materiezuständen)



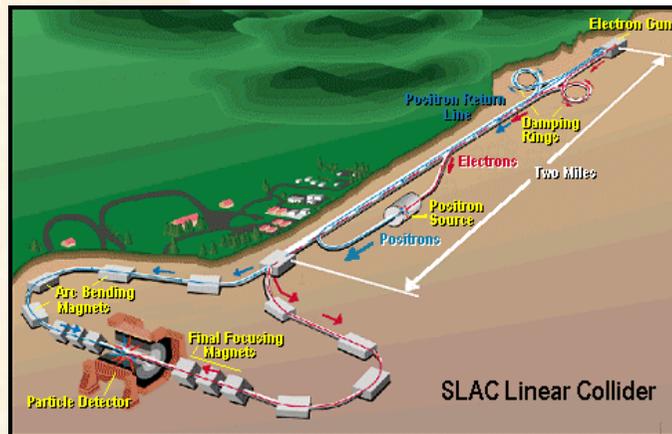
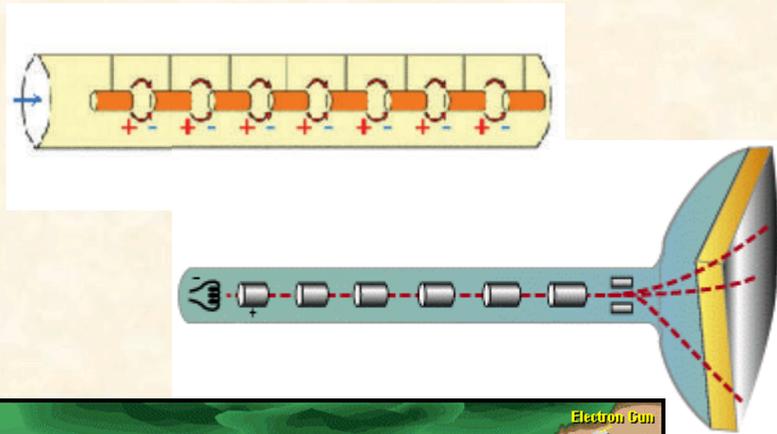
$$E = mc^2$$

Energie ↔ **Materie**

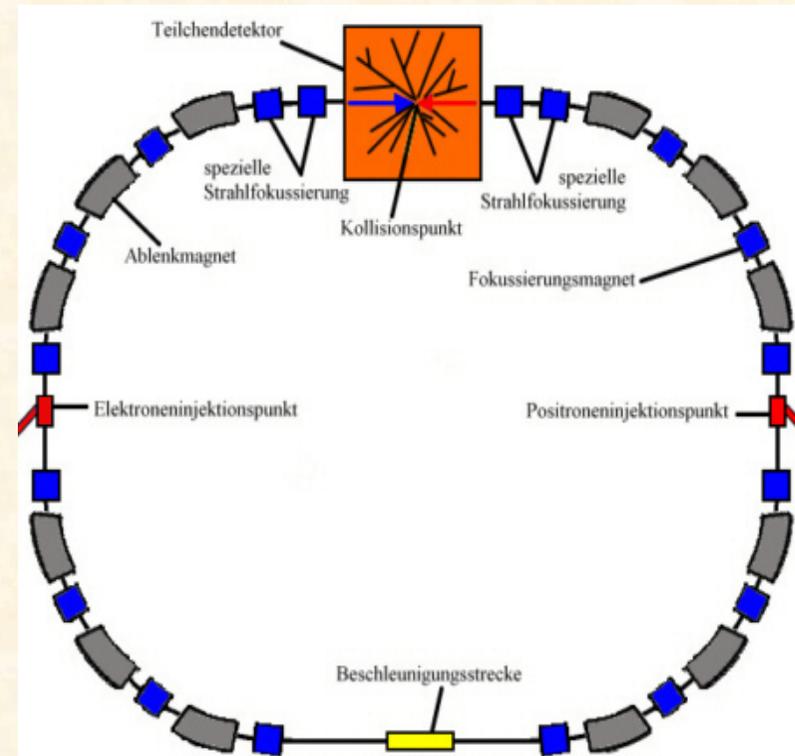
Hohe Energien sind notwendig, um neue, schwere Teilchen zu produzieren

Experimentelle Methoden: Teilchenbeschleuniger

Linearbeschleuniger



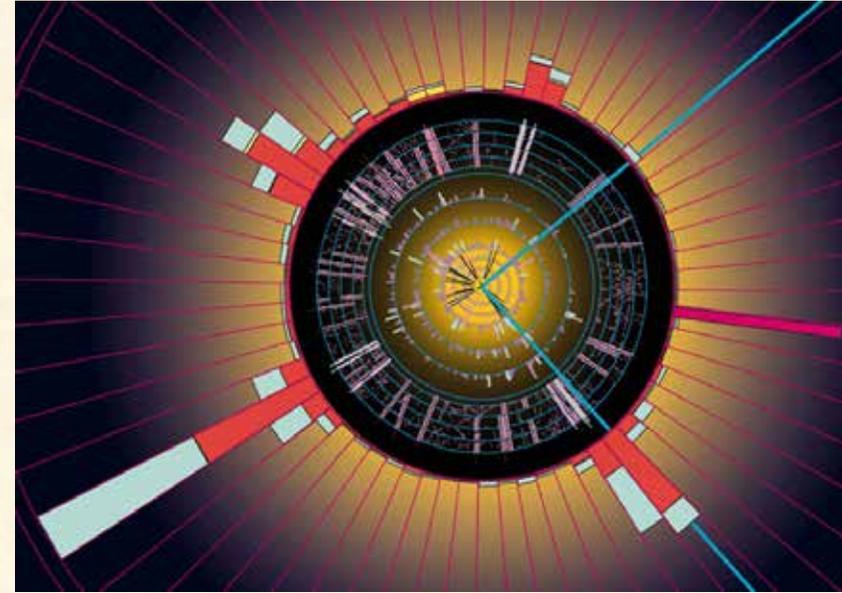
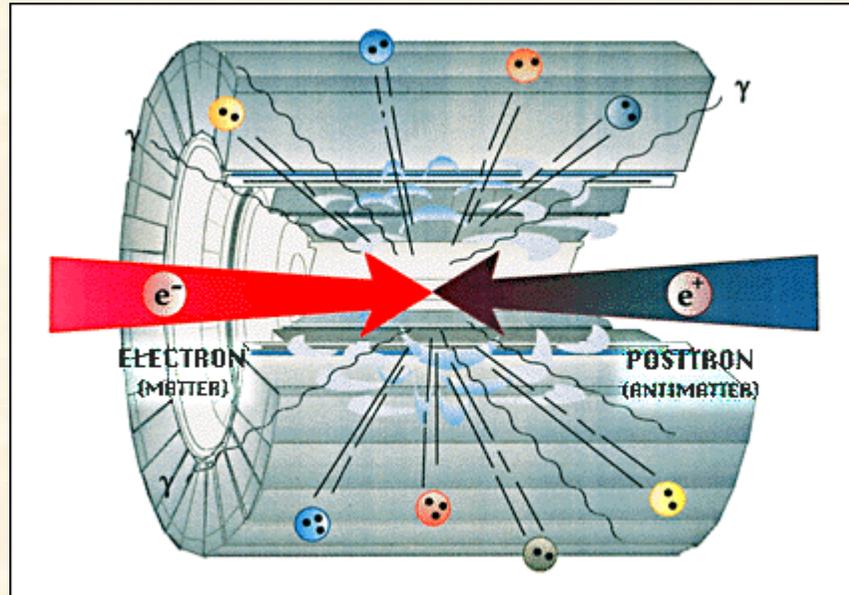
Speicherring



Energie:

- 1 eV = Kinetische Energie eines e^- nach Durchlaufen einer Beschleunigungsspannung von 1 Volt
- 1 MeV = 10^6 eV: 1 Million Volt
- 1 GeV = 10^9 eV: 1 Milliarde Volt
- 1 TeV = 10^{12} eV: 1 Billion Volt

Experimentelle Methoden: Detektoren



Die Detektoren messen: Die Energie und Flugrichtung (Impuls) und die Identität der Teilchen

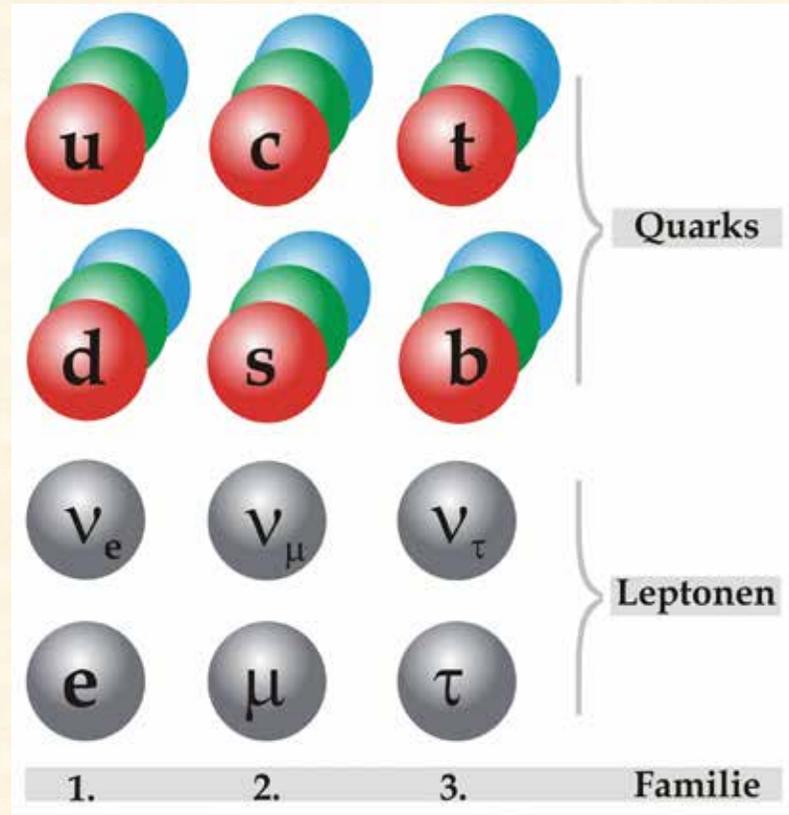
Aus diesen Messwerten können die stattgefundenen Ereignisse rekonstruiert werden

→ Antworten auf physikalische Fragestellungen

Wo stehen wir heute ?



Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen



LEPTONS		
ν_e Electron Neutrino	ν_μ Muon Neutrino	ν_τ Tau Neutrino
e Electron	μ Muon	τ Tau
QUARKS		
u Up	c Charm	t Top
d Down	s Strange	b Bottom

→ t quark

Fundamental particles do not have any size. Here the different sizes are just a graphical way to show how different the masses are.

$$m(e) = 0,000511 \text{ GeV}/c^2$$

$$m(\tau) = 1,8 \text{ GeV}/c^2$$

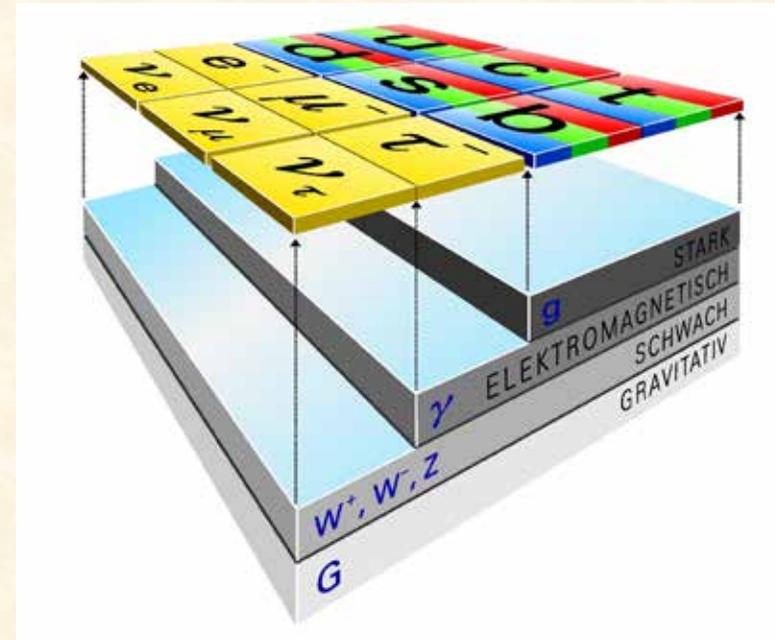
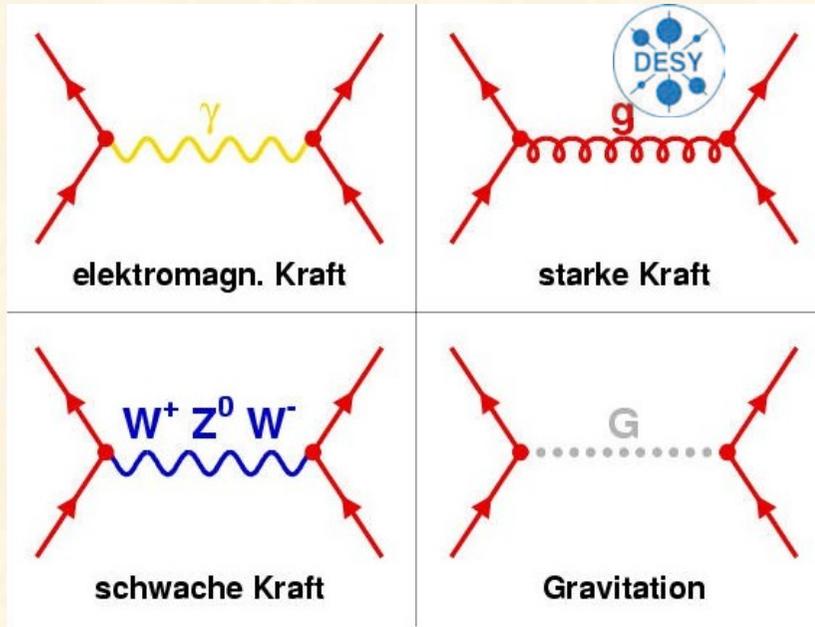
$$m(u) = 0,005 \text{ GeV}/c^2$$

$$m(t) = 175 \text{ GeV}/c^2$$

Zum Vergleich: $m(p) = 0,938 \text{ GeV}/c^2$

Man beachte: die Teilchen der 1. Familie sind ausreichend, um die Materie aufzubauen, die uns umgibt: $p = (u,u,d)$, $n = (u,d,d)$, $e = e$

Kräfte und Austauschteilchen



Massen:

$$m_\gamma = 0 \quad (\text{Photon})$$

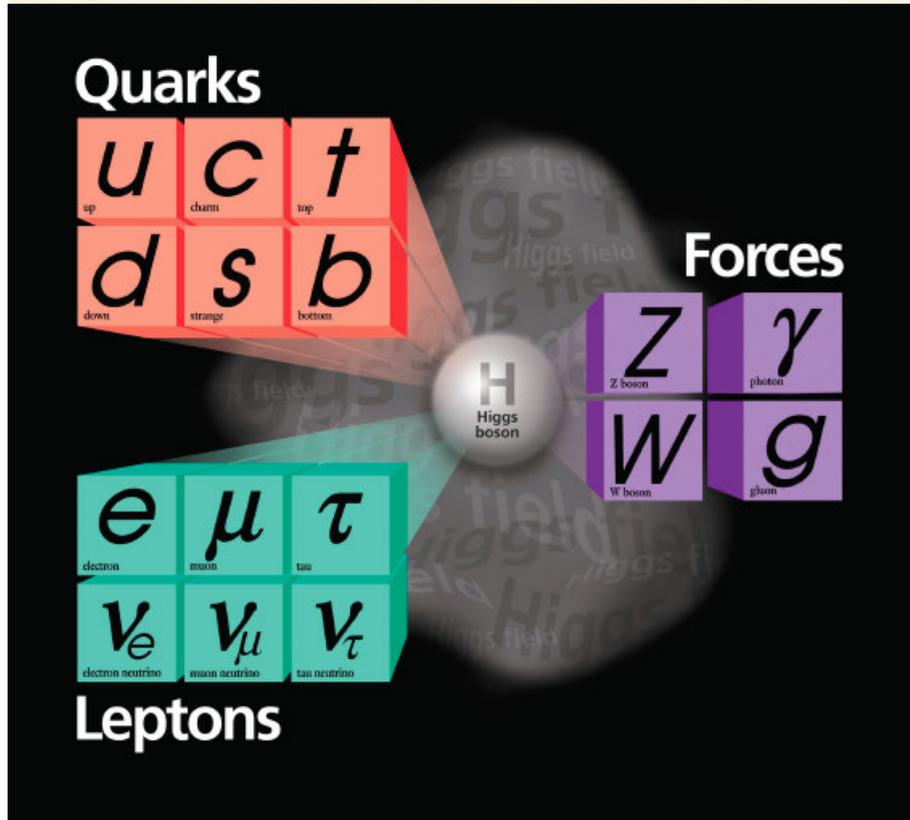
$$m_g = 0 \quad (\text{Gluon})$$

$$M_W = 80.398 \pm 0.025 \quad \text{GeV} / c^2$$

$$M_Z = 91.1875 \pm 0.0021 \quad \text{GeV} / c^2$$

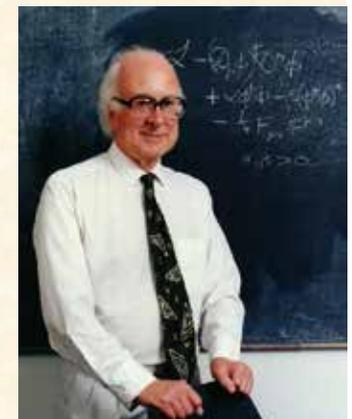
1979,
PETRA-Speicherring

Das Problem der Masse



- Theoretische Beschreibung (Quantenfeldtheorien)
→ masselose Teilchen
- Ein neues Teilchenfeld (Higgs-Feld) wird postuliert, durchdringt Vakuum
- Masse wird erzeugt durch Wechselwirkung der Teilchen mit diesem Feld
- Vorhersage: Neues Teilchen, das sog. **Higgs-Teilchen**

vorgeschlagen von P. Higgs (schott. Physiker)
[Theorie: 1964, P. Higgs, R. Brout und F. Englert]



Der Higgs Mechanismus, eine Analogie:

Prof. D. Miller
UC London



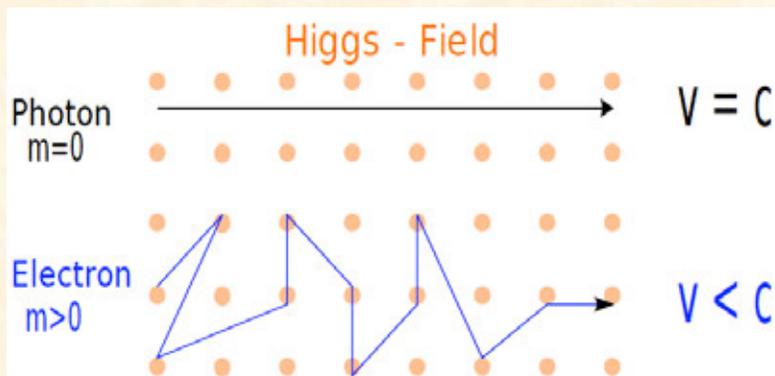
Higgs-Hintergrundfeld
erfüllt den Raum



Ein **Teilchen**
im Higgs-Feld...



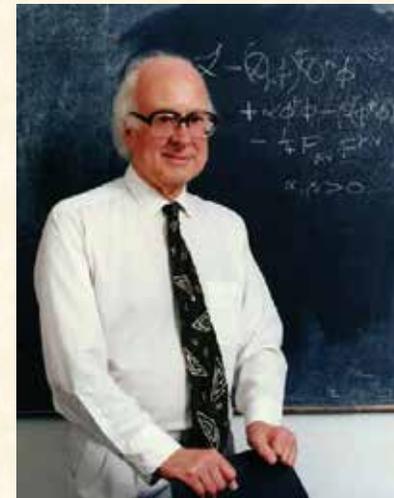
... Widerstand gegen
Bewegung ...
Trägheit \leftrightarrow **Masse**



„Die Physiker wissen alles über das Higgs-Teilchen, das Einzige was sie nicht wissen ist, ob es existiert“

- Vorlieben: **Masse**
- Eigene Masse: unbekannt
Schranken: $114 < m_H < 1000 \text{ GeV}/c^2$
- Kopplungen an Feldquanten W,Z
- Kopplungen an Quarks und Leptonen
- Selbstwechselwirkung
- Elektrische Ladung = 0
- Starke Ladung = 0

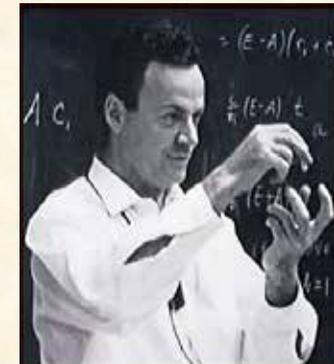
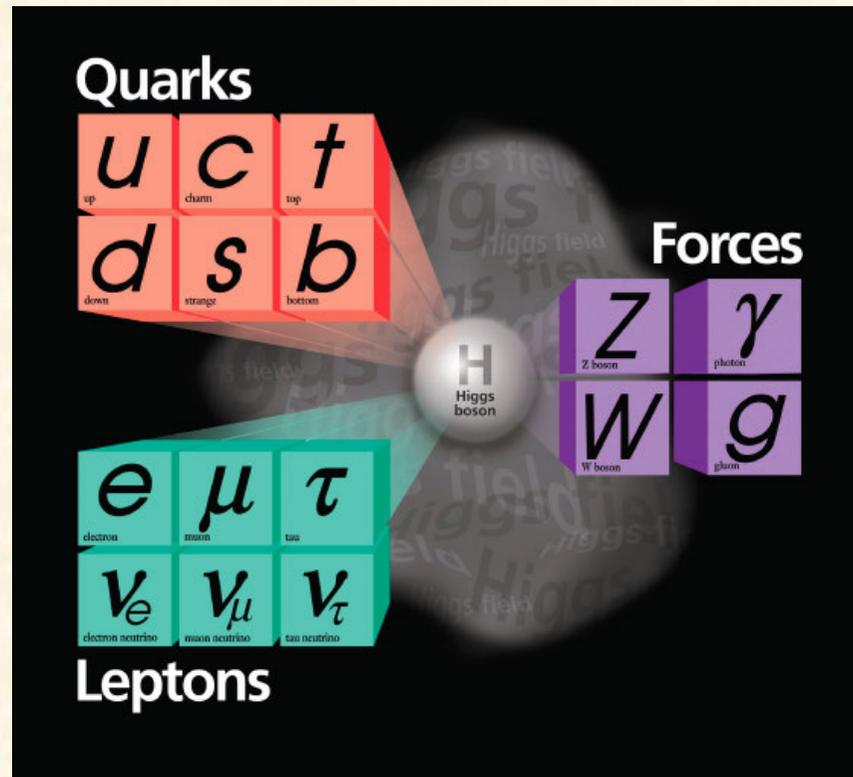
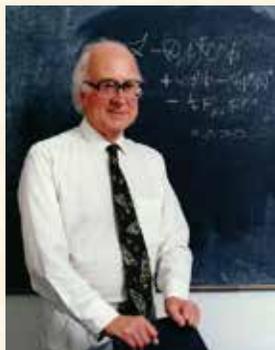
1 TeV



Das einzige bislang beobachtete Exemplar der Spezies „Higgs“

Das Standardmodell der Teilchenphysik

- Beschreibt (fast) die gesamte bekannte Physik mit hoher Präzision
- Enthält Quantentheorie und spezielle Relativitätstheorie
- Große „Kulturleistung“ des 20. Jahrhunderts



Die Offenen Fragen



Die offenen Fragen

1. **Masse**

Was ist der Ursprung der Masse?

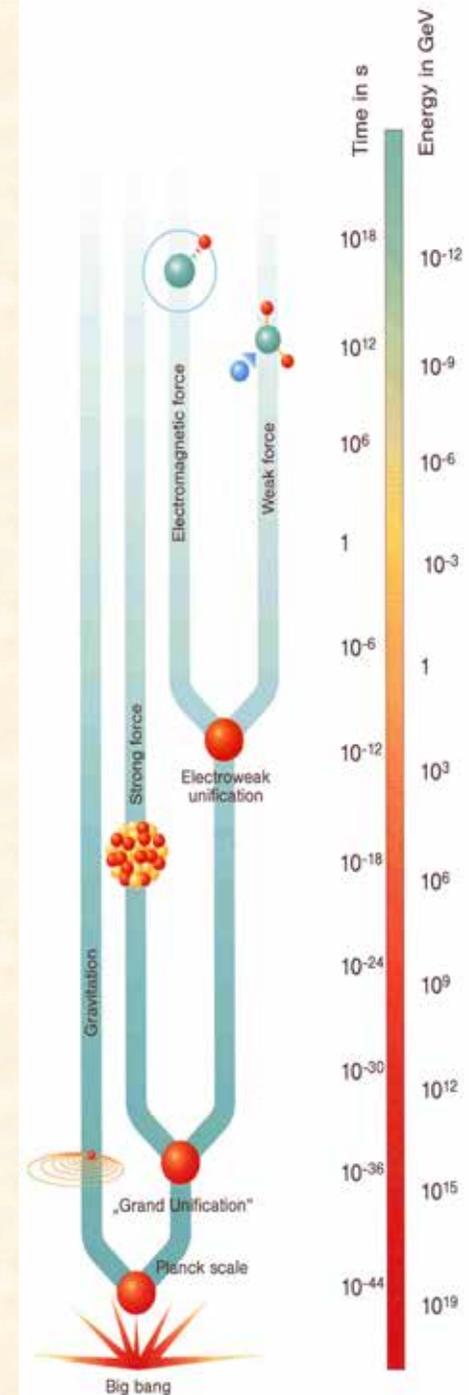
Die offenen Fragen

1. Masse

Was ist der Ursprung der Masse?

2. Vereinigung:

- Was ist die zugrundeliegende fundamentale Theorie?
- Gibt es neue Formen von Materie ?



Die offenen Fragen

1. Masse

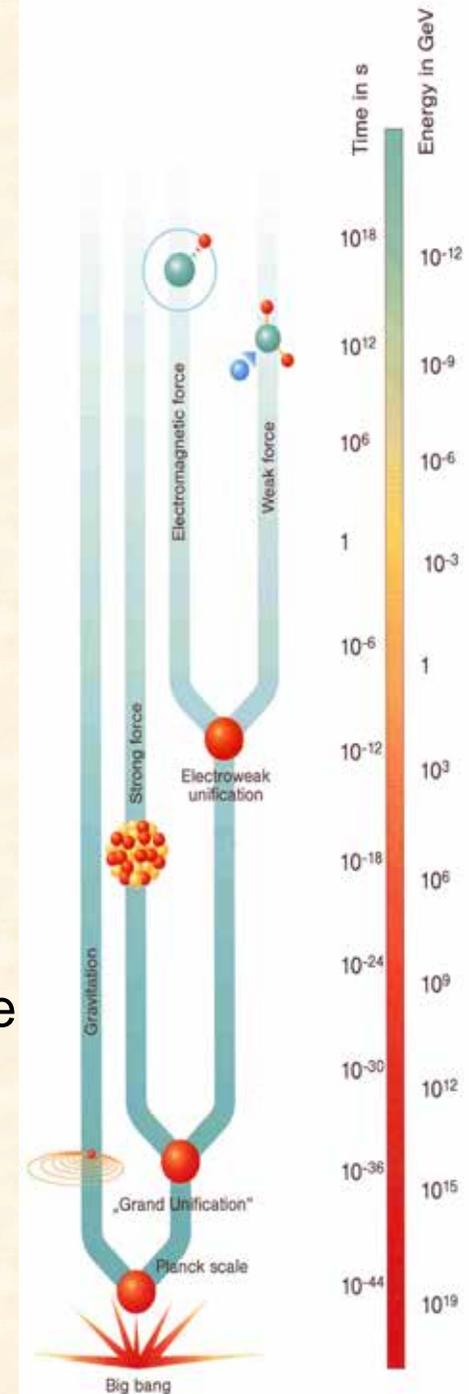
Was ist der Ursprung der Masse?

2. Vereinigung:

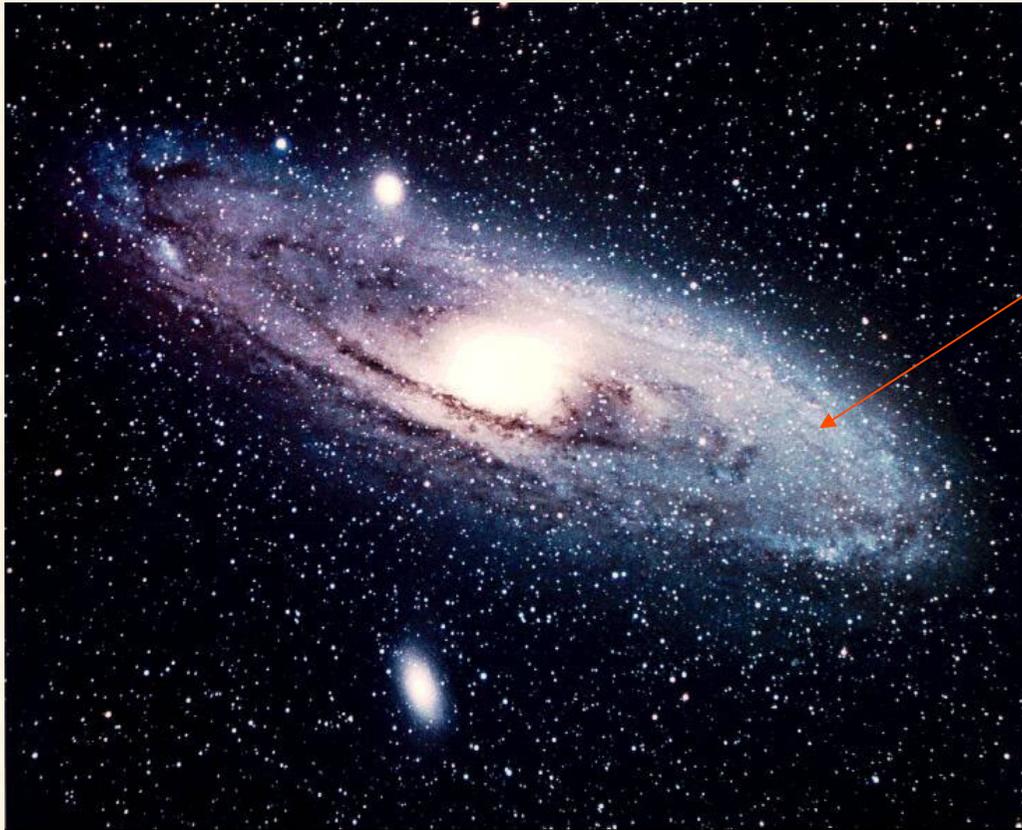
- Was ist die zugrundeliegende fundamentale Theorie?
- Gibt es neue Formen von Materie?

3. Generationenproblem:

- Warum gibt es drei Materiefamilien?
- Warum beobachten wir einen Überschuss an Materie im Vergleich zur Antimaterie?



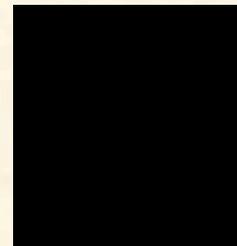
Probleme auf einer größeren Skala:



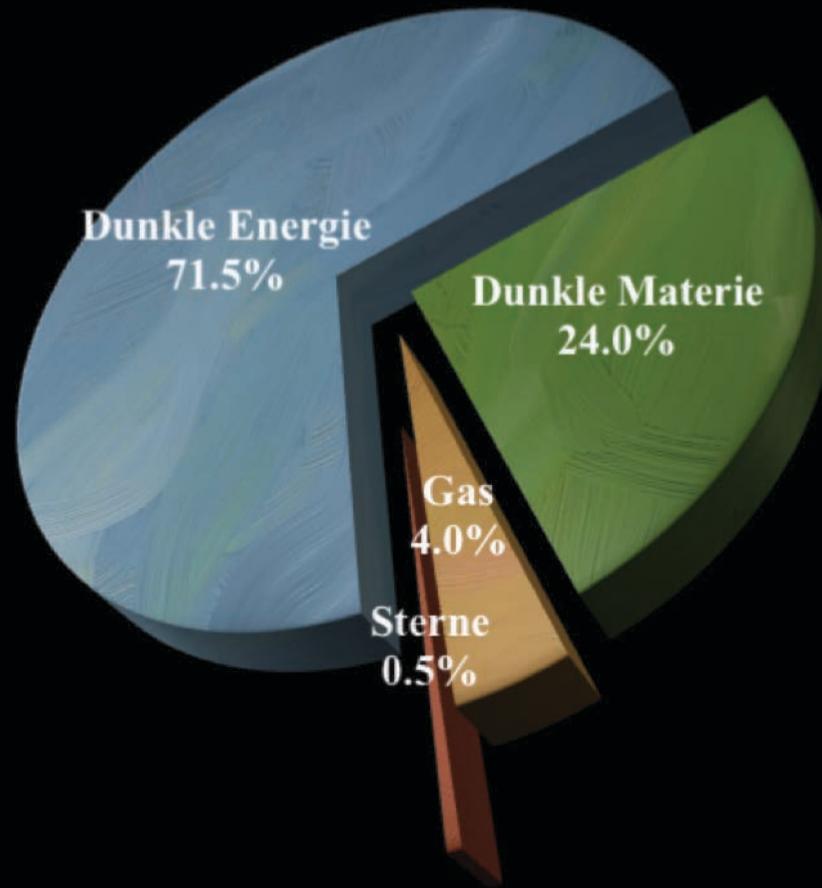
Wir sind hier

umgeben von

- Masse
(Planeten, Sterne, ...,
Wasserstoff-Gas)
- **Dunkler Materie**
- **Dunkler Energie**



Energie im Universum

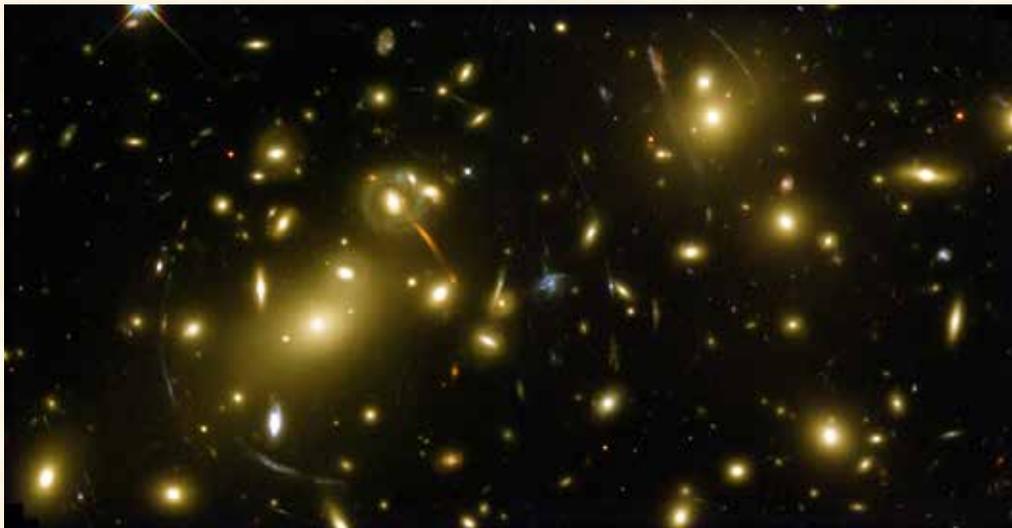


Woher wissen wir das?

Dunkle Materie?

Vielfältige Evidenz für Dunkle Materie: (Nachweis über Gravitation)

- **Rotationsgeschwindigkeiten äußerer Sterne in Galaxien**
- **Strukturbildung im Universum, Galaxienhaufen**
- **Gravitationslinseneffekte**



F. Zwicky 1898-1974

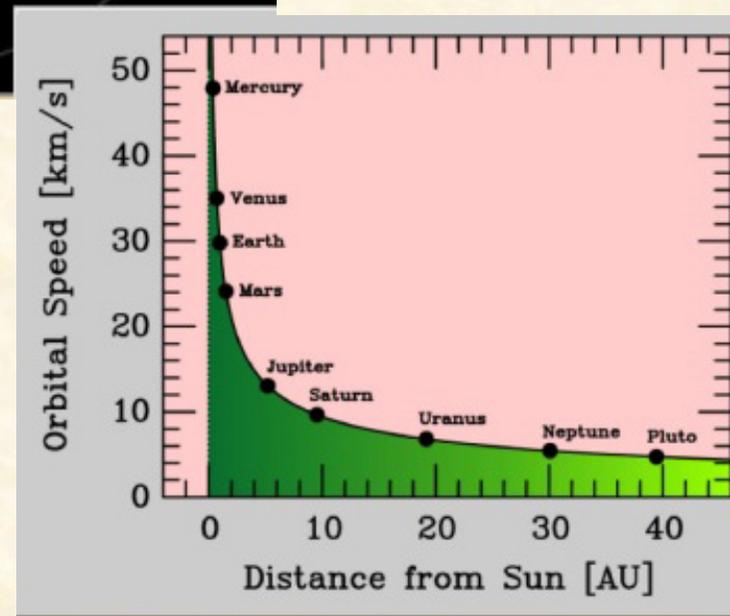
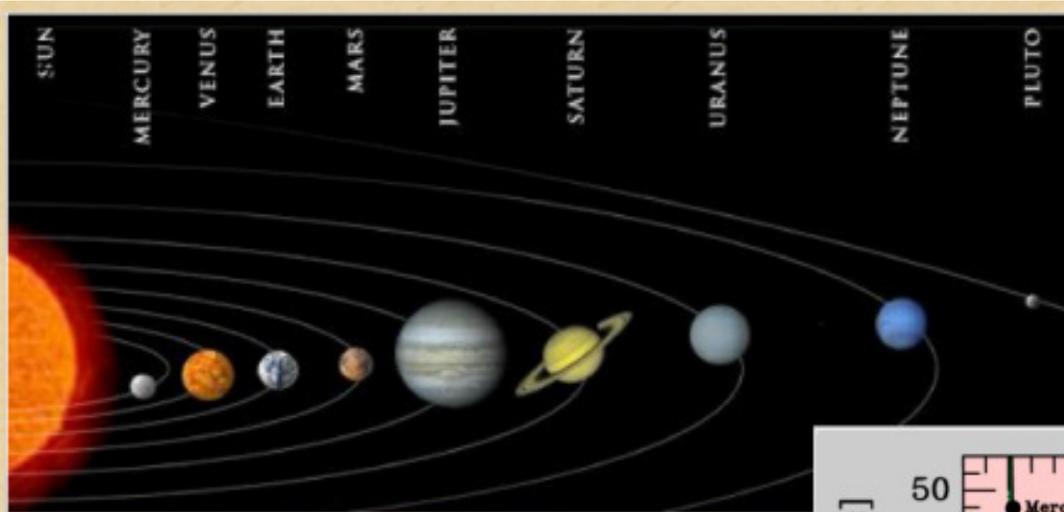
Beispiel: Rotationskurven

Zentripetalkraft = Gravitationskraft

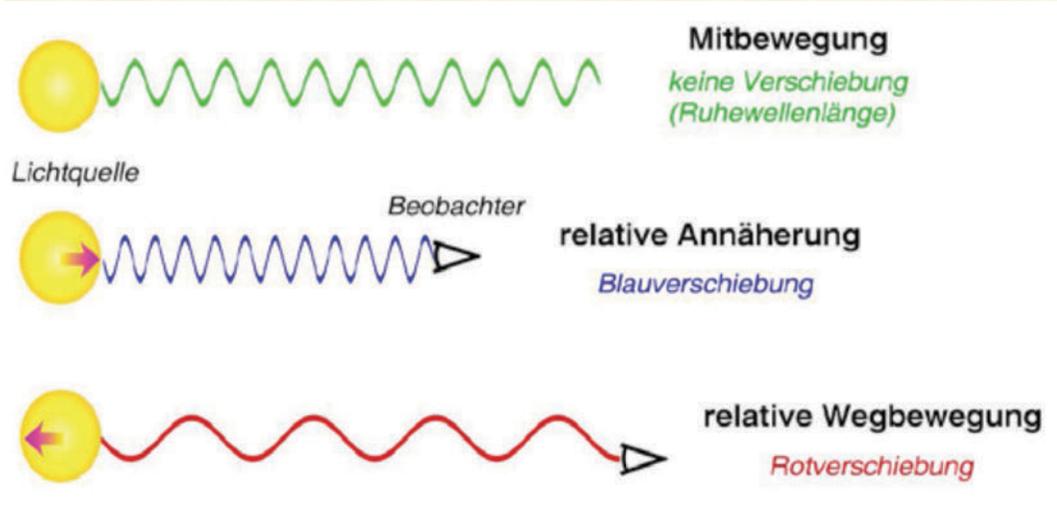
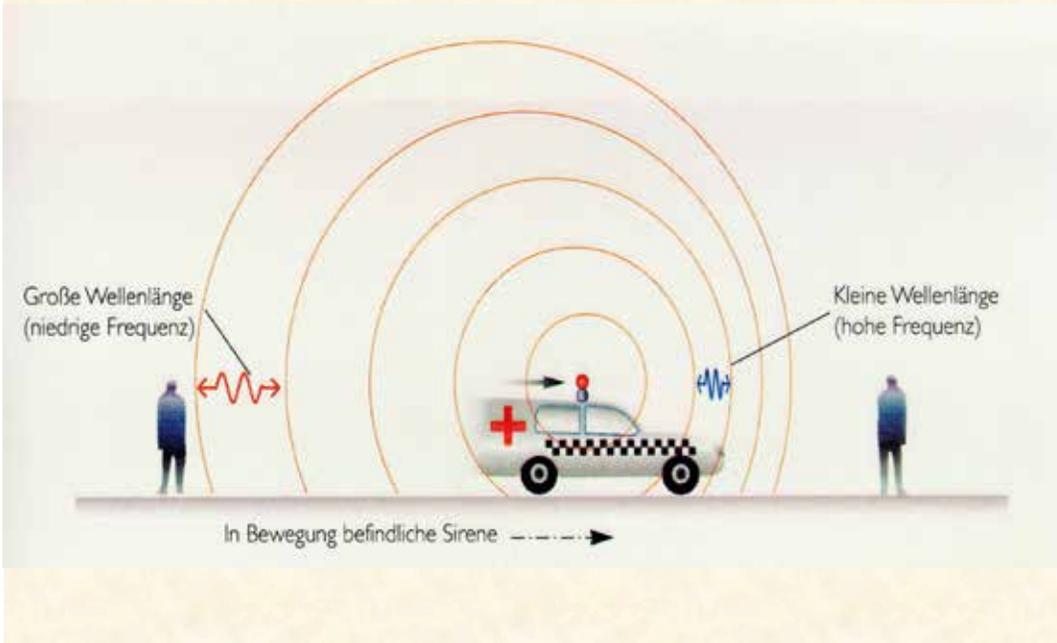
$$\frac{v^2}{R} = G_N \cdot \frac{M(R)}{R^2}$$

$$\Rightarrow v \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$$

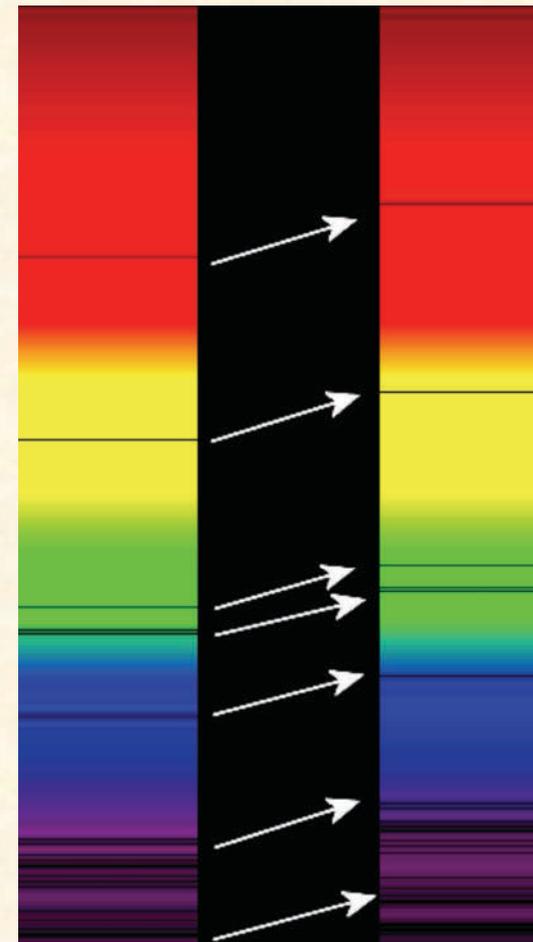
$v(r)$ ist ein Maß für die eingeschlossene Masse



Geschwindigkeitsmessung über Frequenzverschiebung



Absorptionsspektrum
Sonne ferner Stern



Rotverschiebung

Galaxien Rotation

v (km/s)

100

50

observed

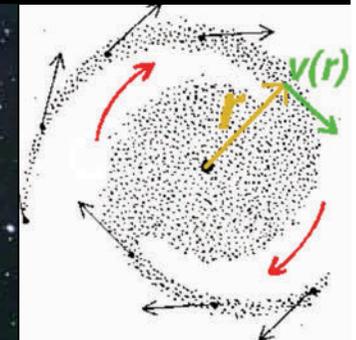
expected
from
luminous disk

5

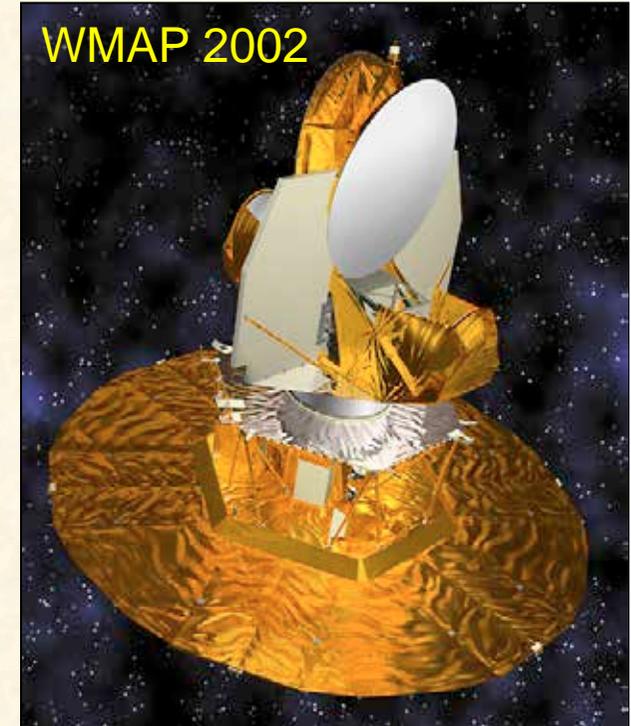
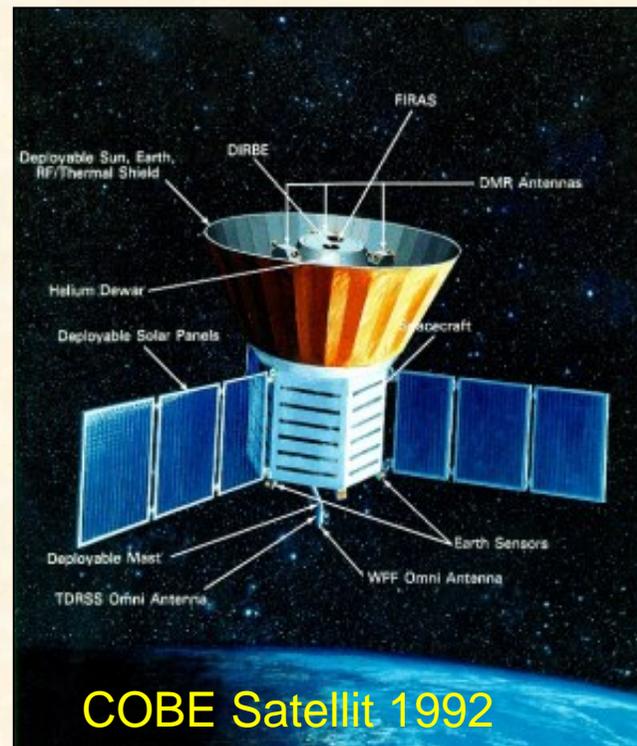
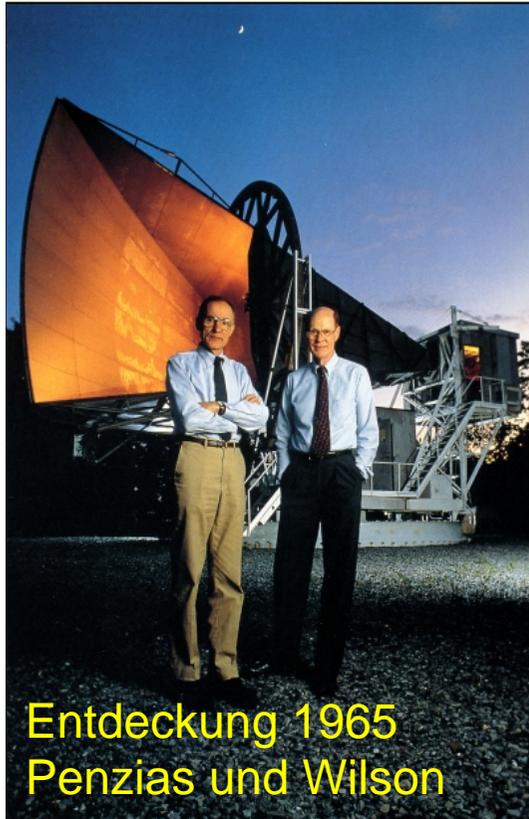
10

R (kpc)

Offensichtlich große
Masse jenseits der
optischen Grenze

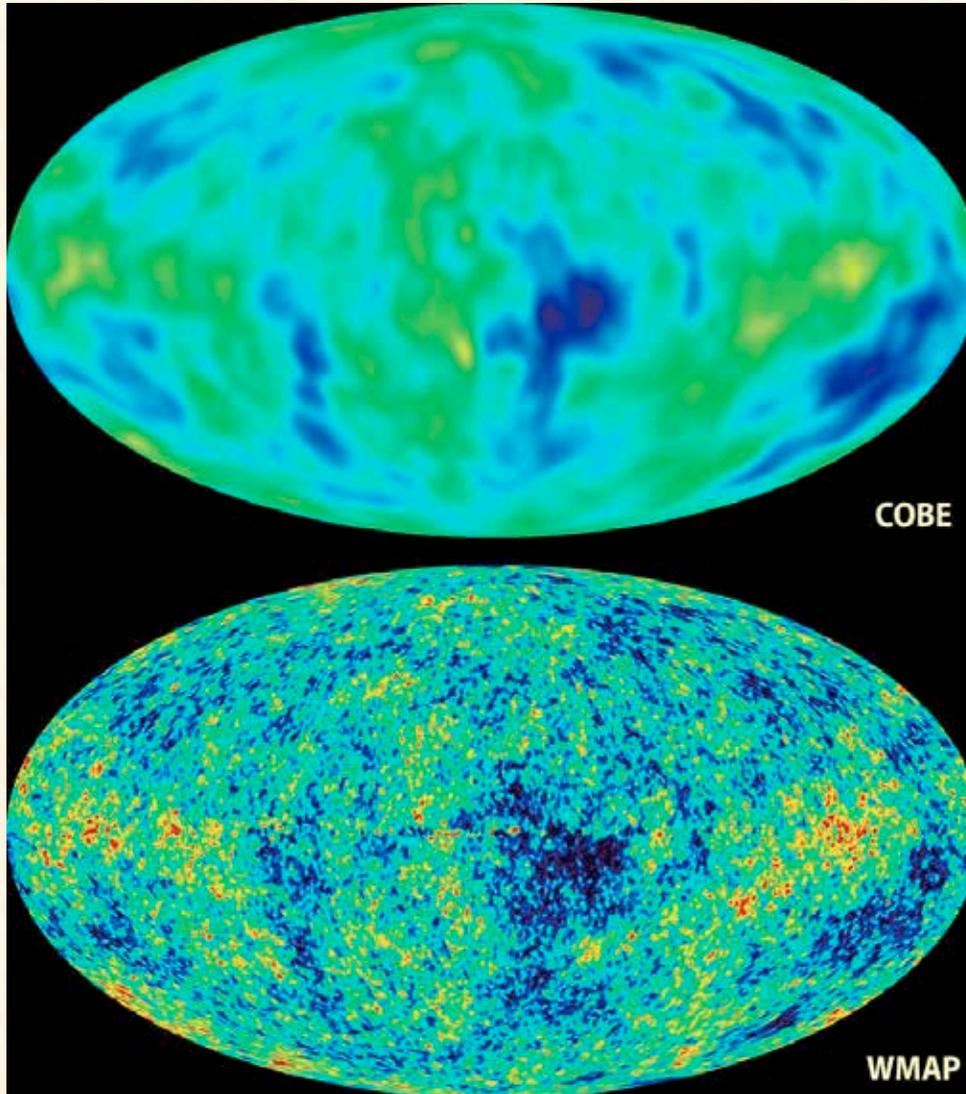


Nachweis der kosmischen Hintergrundstrahlung



- Etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall ist das Universum soweit abgekühlt, das sich Atome bilden können;
- Elektromagnetische Strahlung wird „freigesetzt“;
- Diese ist als Mikrowellenstrahlung nachweisbar, $T = 2,725 \text{ K}$

Das Universum 380.000 Jahre nach dem Urknall



- Analyse dieser Strahlung enthält Informationen über die Materiedichte im frühen Universum

- Sehr homogen:

rot: $T = 2,725 \text{ K} + 0,00002 \text{ K}$

blau: $T = 2,725 \text{ K} - 0,00002 \text{ K}$

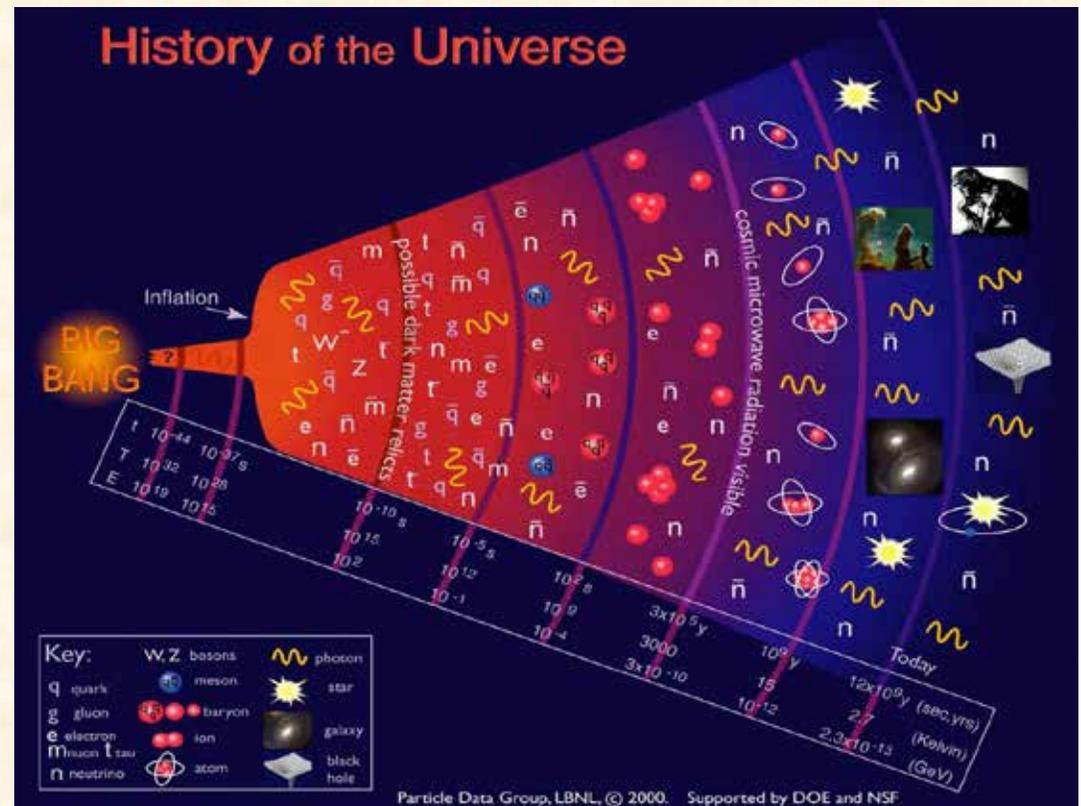
- Geringe Dichtefluktuationen

→ Galaxienbildung

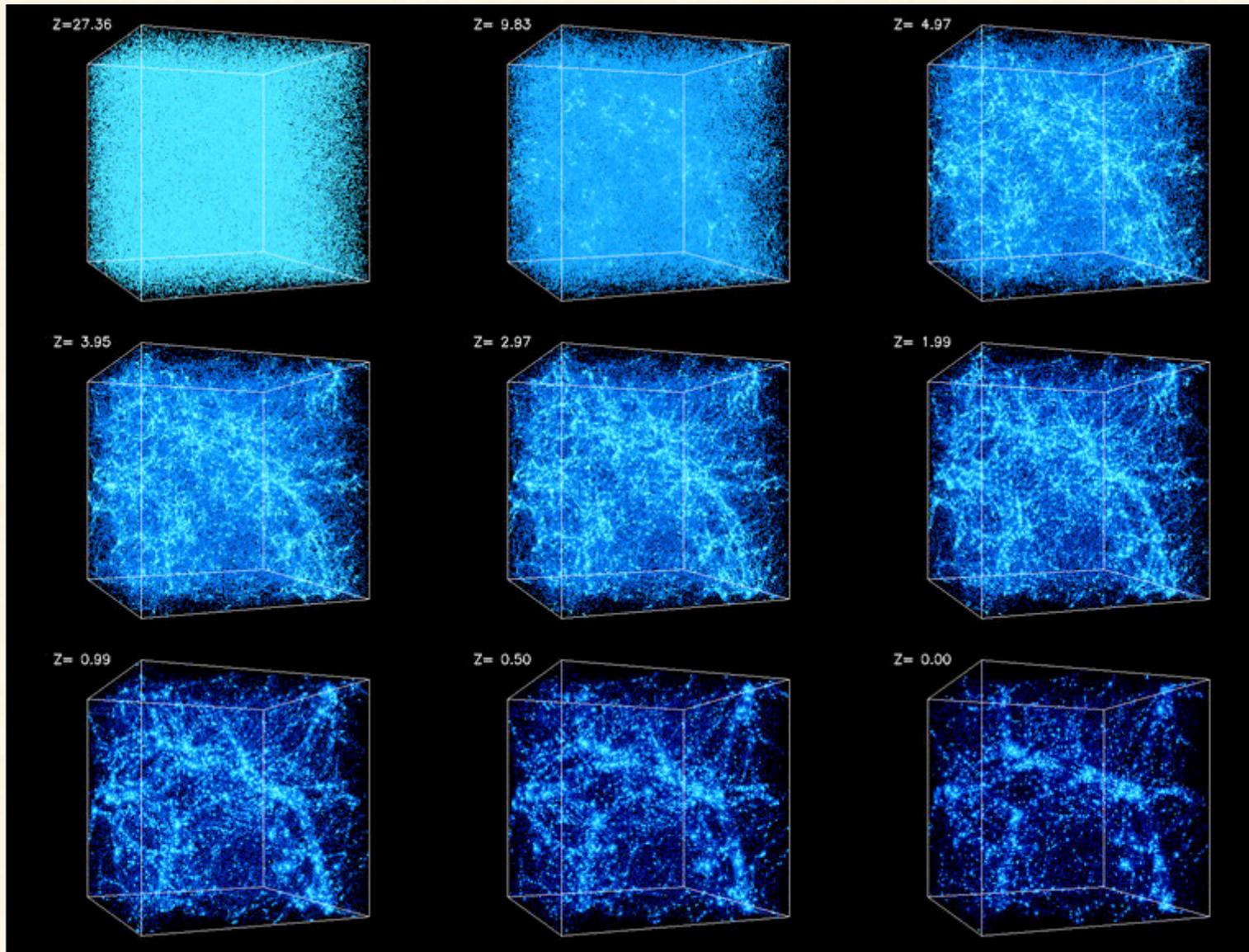
→ Informationen über die Zusammensetzung der Materie (Normale + Dunkle Materie)

Wichtige Schlüsselexperimente der Astrophysik

1. Vermessung des “Echos des Urknalls”
(Kosmische Hintergrundstrahlung)
2. Strukturbildung im Universum
(Galaxienhaufen)



Strukturbildung im Universum



Rotverschiebung $z = \frac{f_1 - f_2}{f_2} = \frac{R_2}{R_1} - 1$

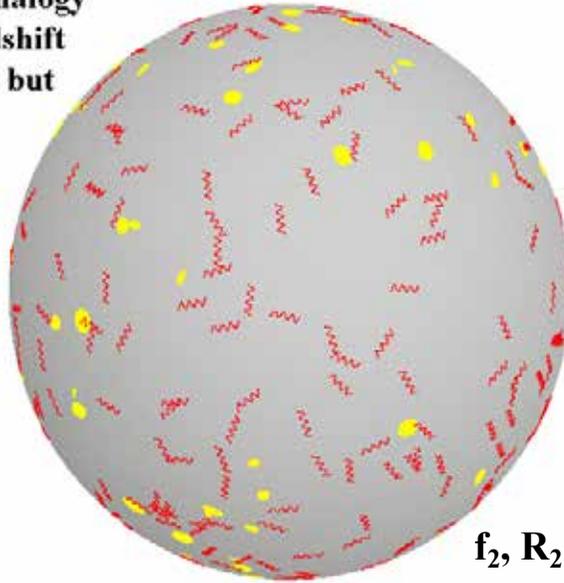
R_1, R_2 = Größe des Universums

Messung: Ausdehnung des Universum

Expanding Balloon Analogy
Photons move and redshift
Galaxies spread apart but
stay the same size



f_1, R_1



f_2, R_2

Ausdehnung des Universums:
Galaxien entfernen sich von einander.

Aber innerhalb einer Galaxie ändern
sich die Abstände nicht.

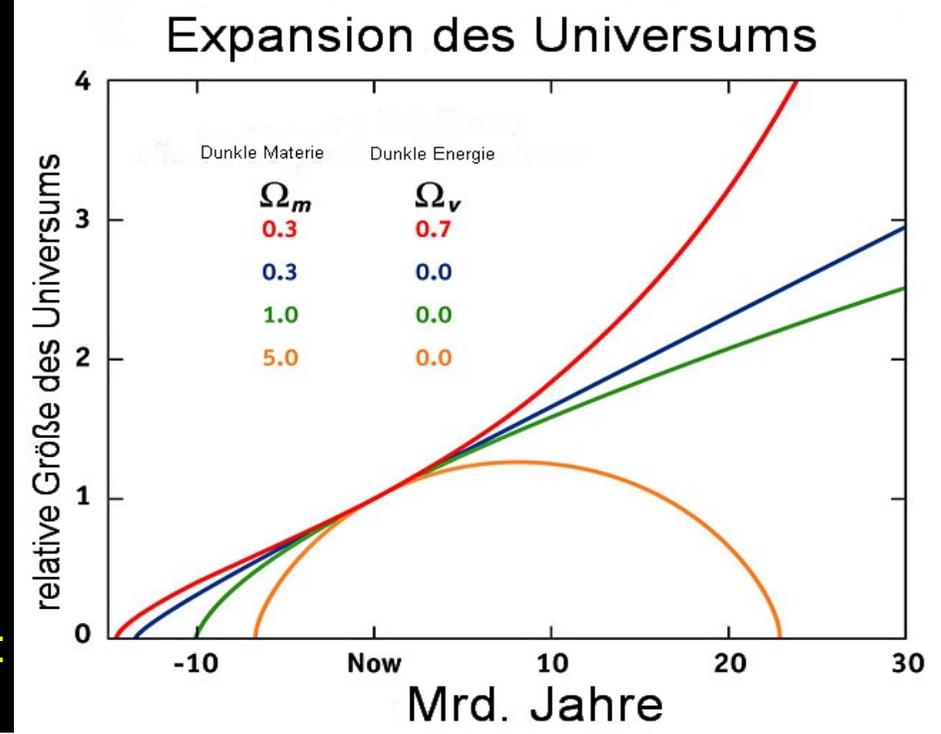
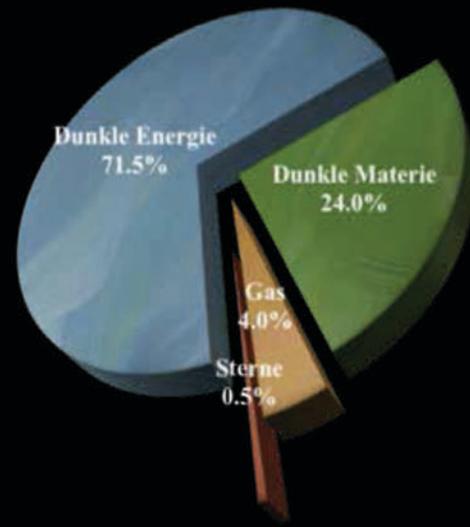
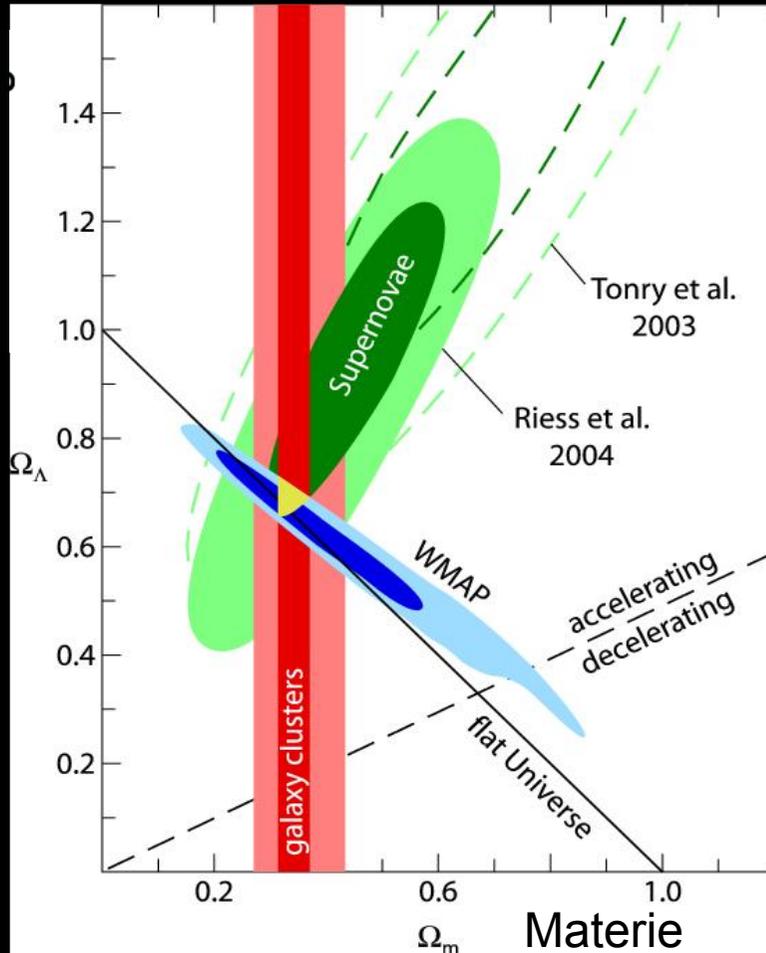
Photonen (Licht) bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit c .
Während ihrer Ausbreitung dehnt sich das Universum aus.
Dabei vergrößert sich die Wellenlänge (Frequenz wird kleiner): Rotverschiebung



Rotverschiebung: $z = \frac{f_1 - f_2}{f_2} = \frac{R_2}{R_1} - 1$

f_1, f_2 : Frequenz des Lichtes
 R_1, R_2 : Größe des Universums

Zusammenfassung aller Messungen



Alter des Universums:
 13.7 ± 0.3 Mrd. Jahre

Was verbirgt sich hinter der Dunklen Materie?

1. Astrophysikalische Kandidaten?

- Nichteuchtende Materie ?

(Braune Zwerge, Weiße Zwerge, Neutronensterne, Schwarze Löcher)

Beiträge sind zu gering !

2. Elementarteilchen?

- Neutrinos?

(zu geringe Masse, Strukturbildung kann nicht erklärt werden)

- **WIMPs?**

(Weakly interacting massive particles)

-

- 
- Elektrische Ladung = 0
 - Starke Ladung = 0
 - Wechselwirkung über die schwache Wechselwirkung und Gravitation, **Masse**

• Eigene Masse: unbekannt

• Anhäufung auf Längenskalen von ~ 1000 Lichtjahren

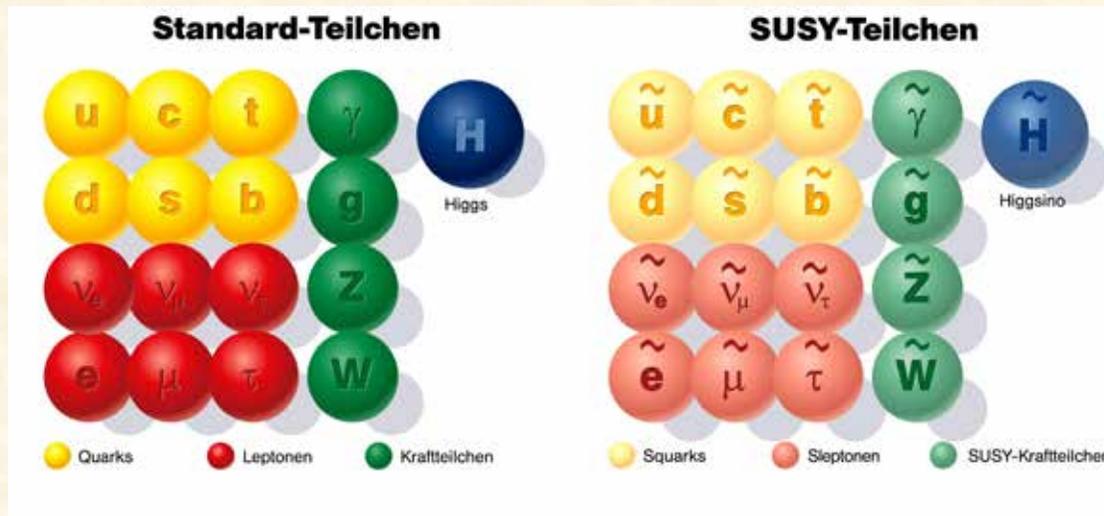
Neue Form von Materie

Theoretische Modelle
zur Erweiterung des
Standardmodells



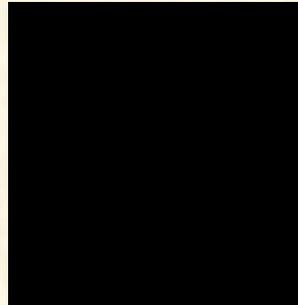
Eine viel diskutierte Erweiterung: Supersymmetrie (SUSY)

- Jedem Teilchen wird ein supersymmetrisches Partnerteilchen zugeordnet
(**Symmetrie:** Materieteilchen \leftrightarrow Austauscheteilchen)



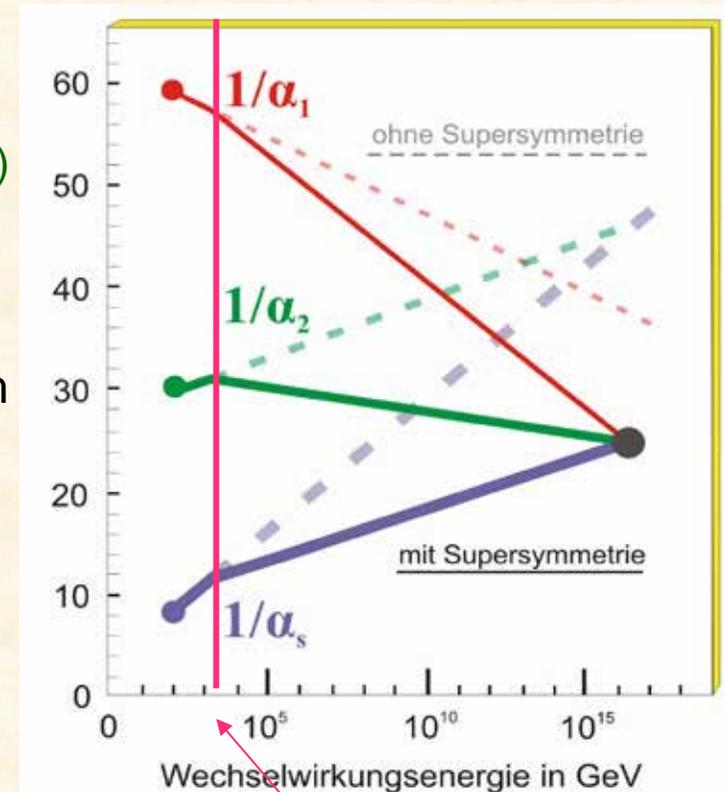
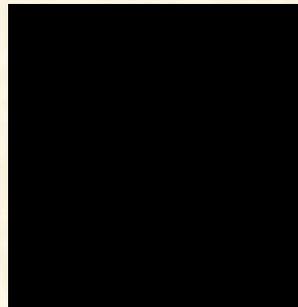
Eine viel diskutierte Erweiterung: Supersymmetrie (SUSY)

- Jedem Teilchen wird ein supersymmetrisches Partnerteilchen zugeordnet
(**Symmetrie:** Materieteilchen ↔ Austauscheteilchen)
- Supersymmetrische Teilchen zerfallen in das Leichteste SUSY Teilchen (LSP);
Dieses ist stabil und wechselwirkt nur schwach
→ Kandidat für die “Dunkle Materie”



Eine viel diskutierte Erweiterung: Supersymmetrie (SUSY)

- Jedem Teilchen wird ein supersymmetrisches Partnerteilchen zugeordnet
(**Symmetrie:** Materieteilchen ↔ Austauscheteilchen)
- Supersymmetrische Teilchen zerfallen in das Leichteste SUSY Teilchen (LSP);
Dieses ist stabil und wechselwirkt nur schwach
→ Kandidat für die “Dunkle Materie”



- Vereinheitlichung der Kräfte scheint in einer supersymmetrischen Theorie möglich zu sein

Beginn einer neuen Ära physikalischer Grundlagenforschung

..... Vorstoß in die TeV-Energieskala
..... richtungsweisende Experimente