

# *Elementarteilchen und Kräfte, das Standardmodell, die großen offenen Fragen der Physik*

Michael Kobel

Institut für Kern- und Teilchenphysik, TU Dresden

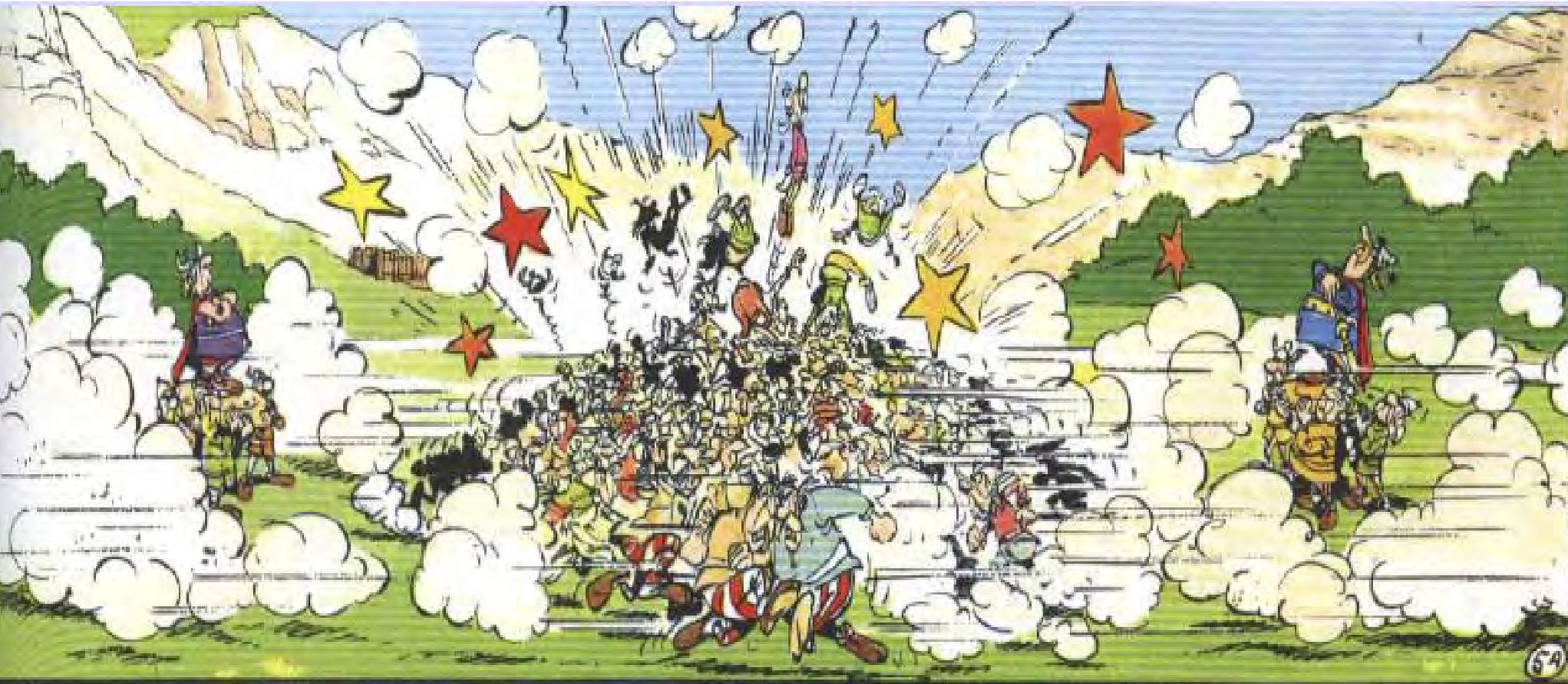
Lehrerfortbildung Berlin

15.11.2008

- 1) **Die kleinsten Bausteine**
- 2) **Die fundamentalen Kräfte**
- 3) **Fragen auf dem Weg zum Urknall**
  - Gab es eine Ursuppe?
  - **Was ist Masse?**
  - Was ist Dunkle Materie?
  - Wo ist die Antimaterie?
  - Wie viele Dimensionen hat der Raum?
- 4) **“Hands on“ Teilchenphysik**
  - Masterclasses
  - Netzwerk Teilchenwelt



*Die Liebe ist die Tochter der Erkenntnis:  
die Liebe ist umso glühender,  
je tiefer die Erkenntnis ist.  
(Leonardo da Vinci)*



# Warum?

- Die Fragestellungen der Teilchenphysik



Raum



Zeit



Materie

- **ENERGIE** ist der Schlüssel

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

Werner Heisenberg

kleine Strukturen - kleine Abstände

$$E = m \cdot c^2$$

Albert Einstein

neue und schwere Materie

$$\langle E \rangle \approx k_b \cdot T$$

Ludwig Boltzmann

hohe Temperaturen

Die Temperatur des Universums fällt mit der Zeit

## Größe

1 fm = 1 Femtometer („Fermi“) =  $10^{-15}$  m ( $\sim$  1 Proton)  
(100  $\mu$ m = 100.000.000.000 fm  $\sim$  1 Haar)

## Energie

1 ElektronVolt = 1eV



1 MegaElektronVolt = 1 MeV = 1.000.000 eV

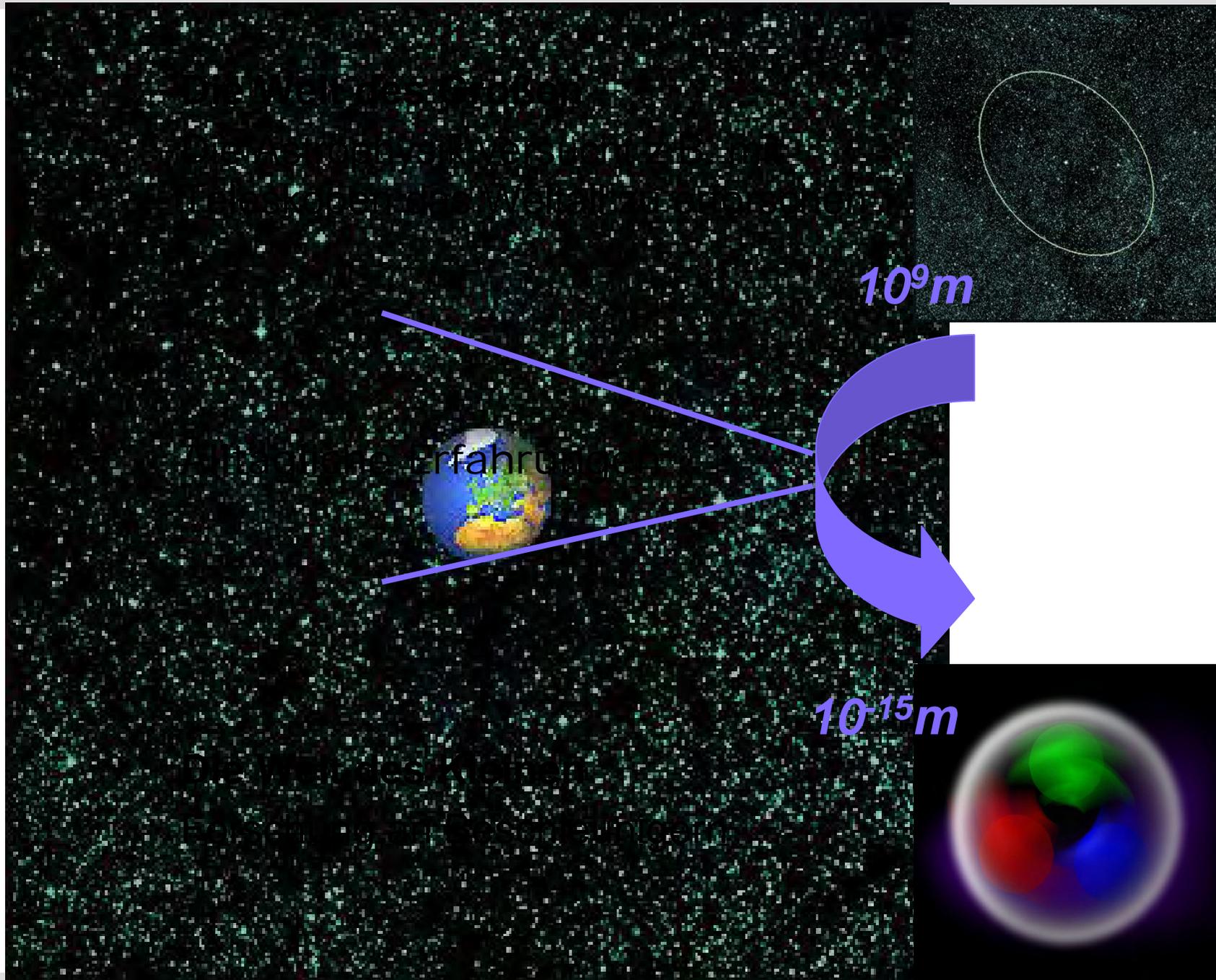
1 GigaElektronVolt = 1 GeV = 1.000.000.000 eV

1 TeraElektronVolt = 1 TeV = 1.000.000.000.000 eV

## 1 TeV

Viel für ein Teilchen, aber makroskopisch winzig: könnte Taschenlampe (1,6 Watt) für ganze 0,000.000.1 Sekunden zum Leuchten bringen

- **Der LHC verschafft uns erstmals Zugang zu**
  - Strukturen und Abständen von  $10^{-19}$  Metern
  - Massen auf der Teraskala ( $E = mc^2 = 1\text{TeV}$ )
  - Entwicklung des Universums von 0,000.000.000.001 s bis 0,000.01 s nach dem Urknall
- **Fortschritt von einer Größenordnung gegenüber bestehenden Beschleunigeranlagen**



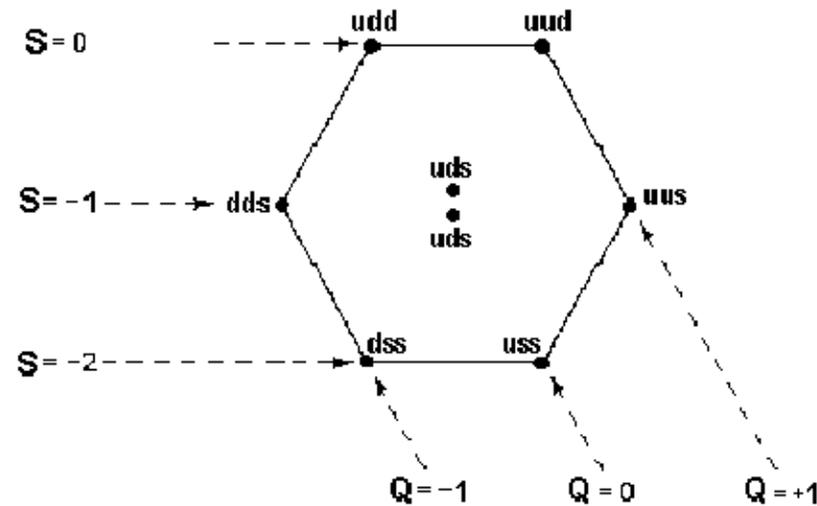
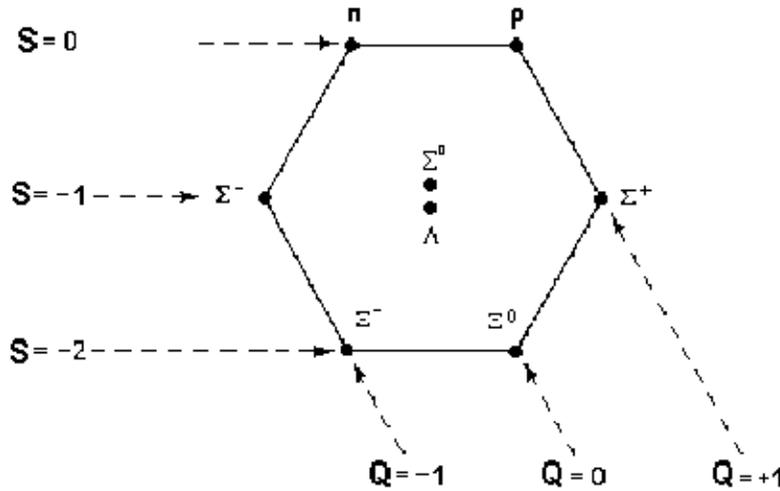
- Was heißt überhaupt „sehen“?
- Sehen = Abbilden



Wurfgeschoss (Projektil) → Zielobjekt → Nachweis (Detektor)

- Wichtig: „**Auflösungsvermögen**“  
Fähigkeit, Strukturen einer bestimmten Größe zu erkennen
- Dazu nötig:
  - Größe der Projektile  $\ll$  Größe der Strukturen
  - Treffgenauigkeit  $\ll$  Größe der Strukturen
- Verwende geladene Teilchenstrahlen:  
Rutherford:  $\alpha$ , Teilchenbeschleuniger:  $e^\pm$ ,  $p^\pm$ , ...

- Indirekte Hinweise: z.B. Ordnungsschema (60er Jahre)**



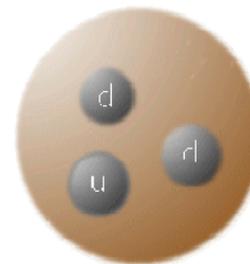
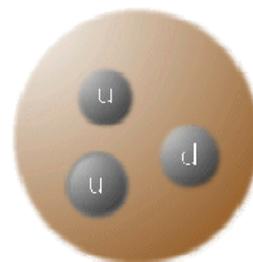
- Direkter Beweis: Beschuss mit Elektronen → Quarks**

1970: Stanford, Kalifornien; seit 1989: DESY, Hamburg

- Treffgenauigkeit  $\ll 1 \text{ fm} \rightarrow$  Energie  $\gg 0,2 \text{ GeV}$  ( $\hbar c = 0,2 \text{ GeV fm}$ )
- Resultat:

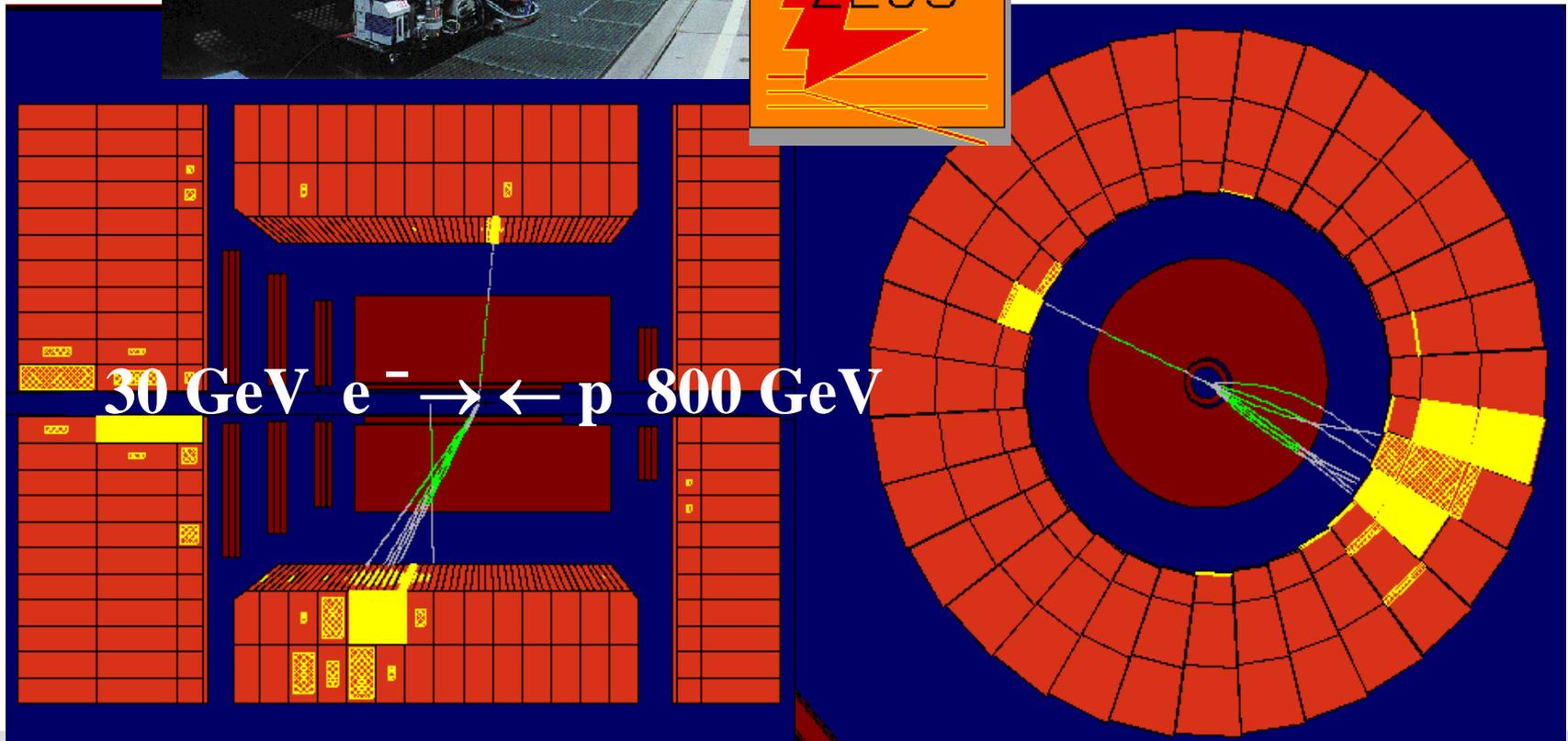
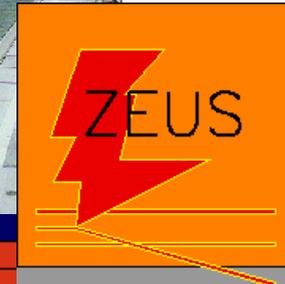
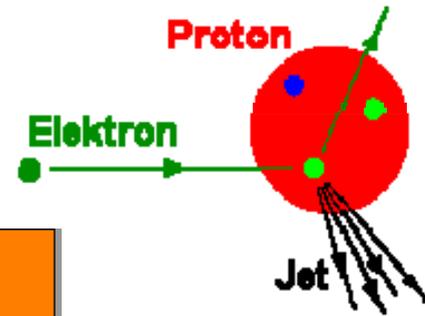
**Proton**

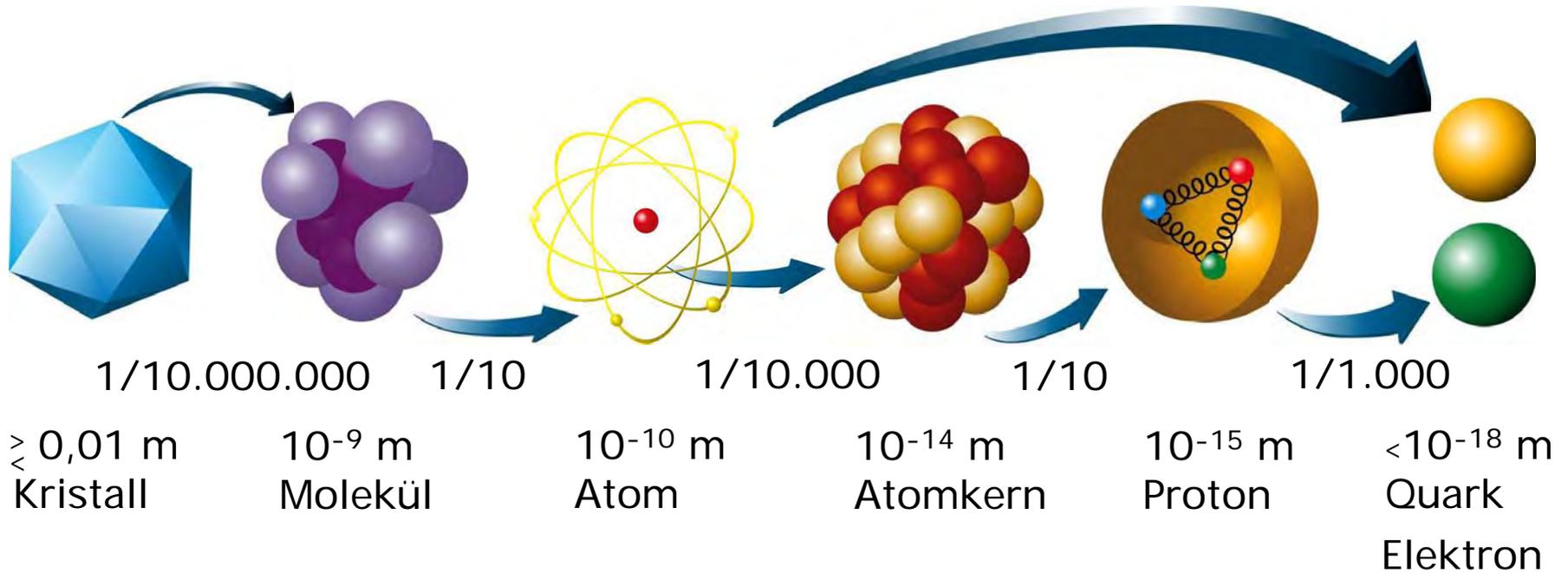
**Neutron**



1 fm

- Herausgeschlagenes Quark ergibt Teilchenbündel





## • Fundamentale Bausteine der Materie

- Elektron  $e$ , Up-Quark  $u$ , Down-Quark  $d$  zu Kernen oder Atomen gebunden
- Neutrino  $\nu$ , ungebunden
- Alle punktförmig ( $< 0,001 \text{ fm}$ )

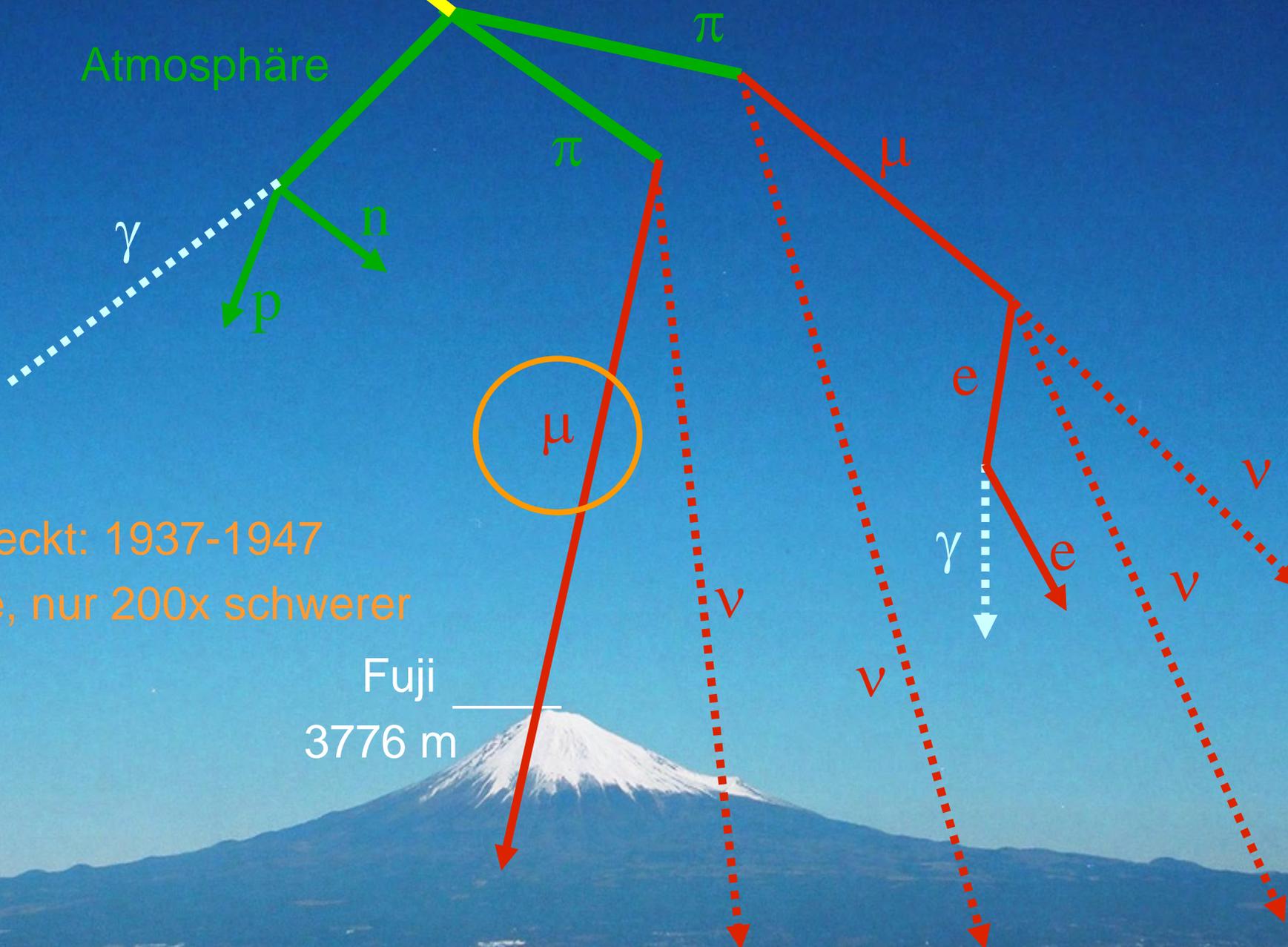
## • Sind dies alle Bausteine?

## • Welche Kräfte halten die Bausteine zusammen?

## • Wie funktionieren Kräfte und Wechselwirkungen ?

$p, He, \dots$

primäres Teilchen trifft auf  
Atmosphäre: 15 – 30 km Höhe



Atmosphäre

$\gamma$

$p$

$n$

$\pi$

$\pi$

$\mu$

$\mu$

$e$

$\gamma$

$e$

$\nu$

$\nu$

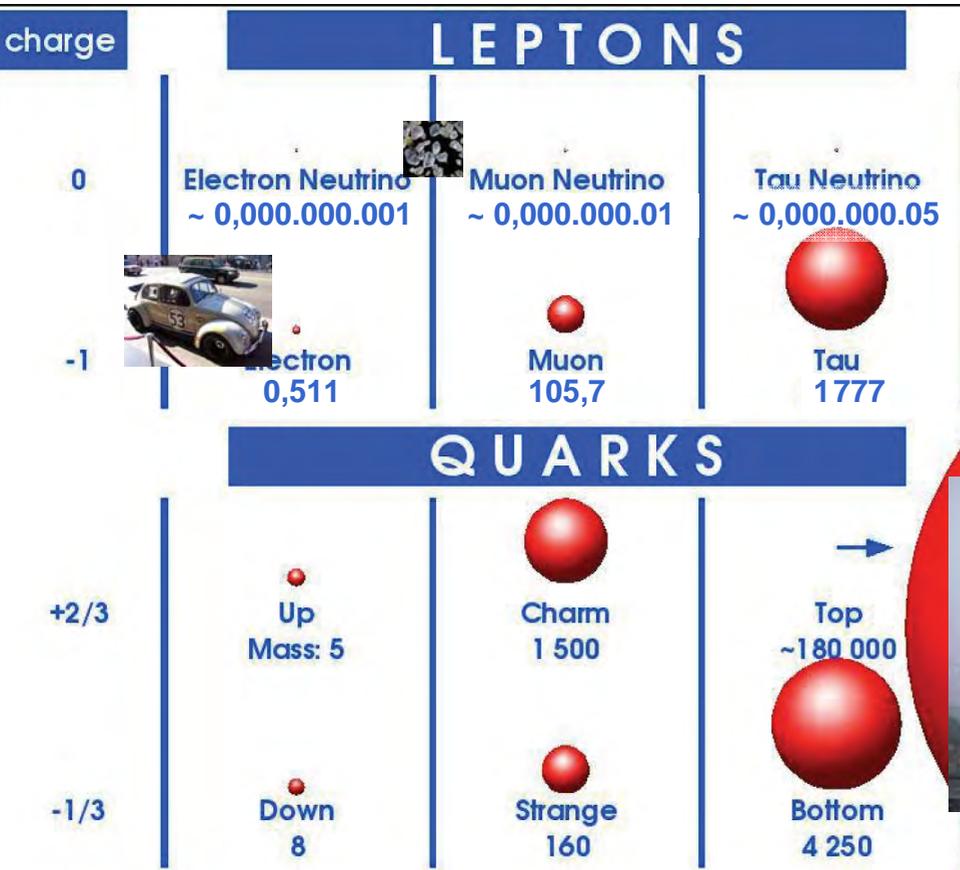
$\nu$

$\nu$

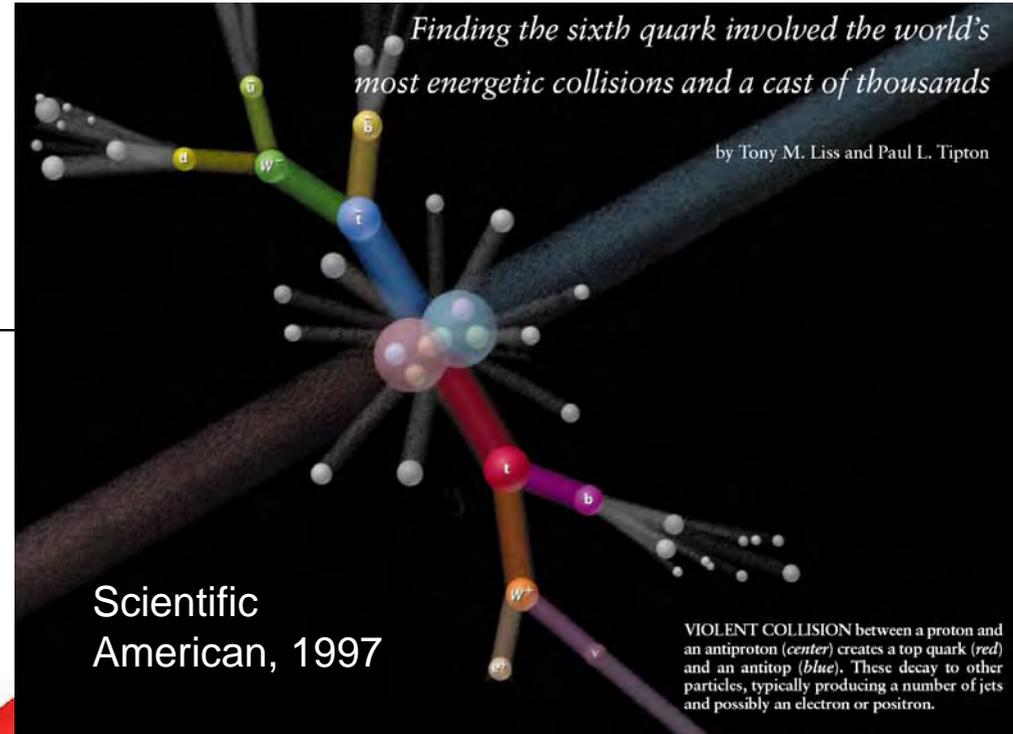
Fuji  
3776 m

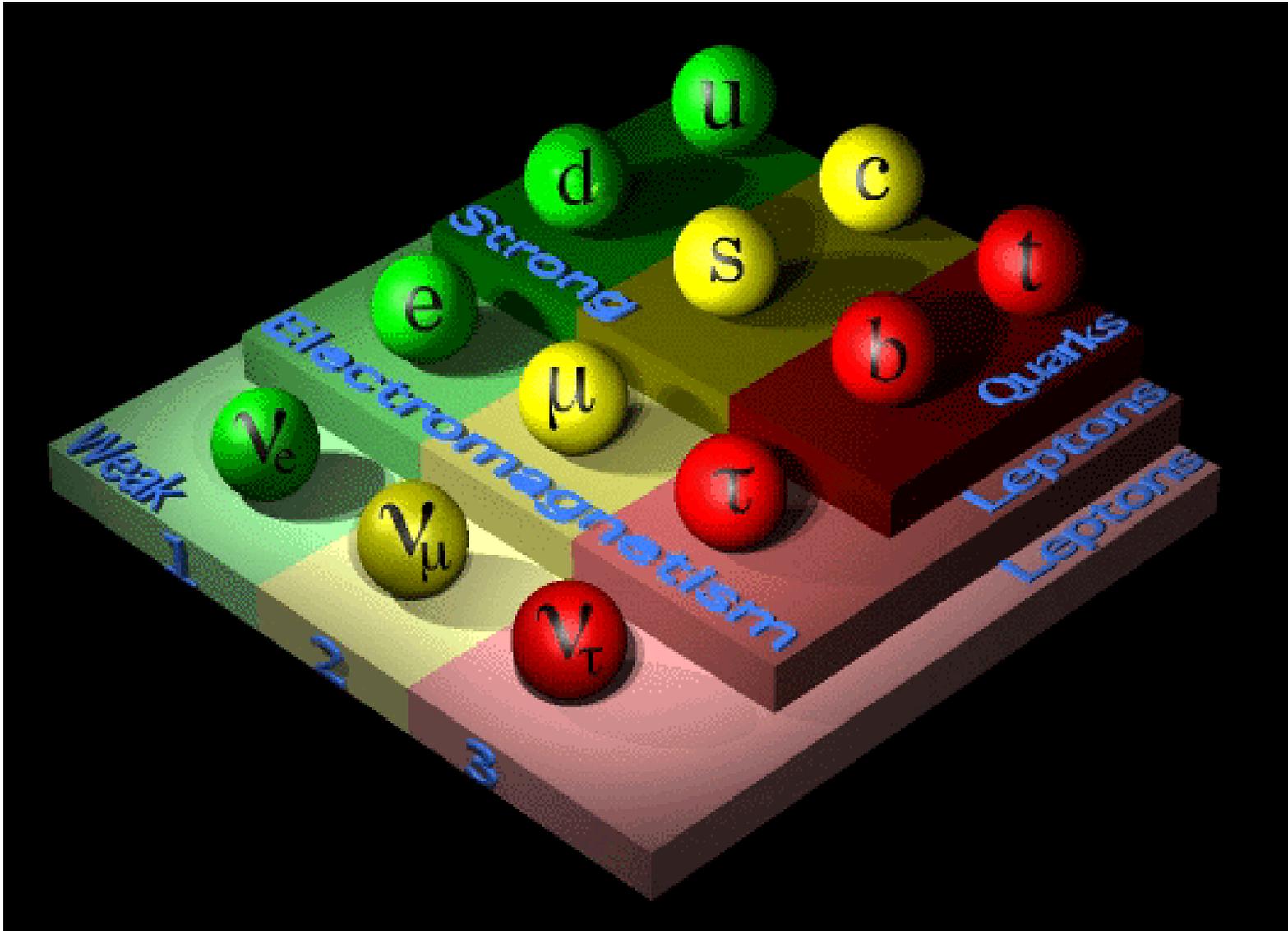
Entdeckt: 1937-1947  
wie e, nur 200x schwerer

## 1995: TeVatron, Chicago Entdeckung des Top Quarks



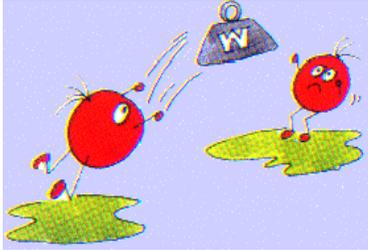
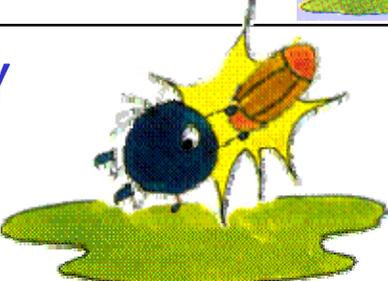
Masse in MeV bzw. in Tonnen





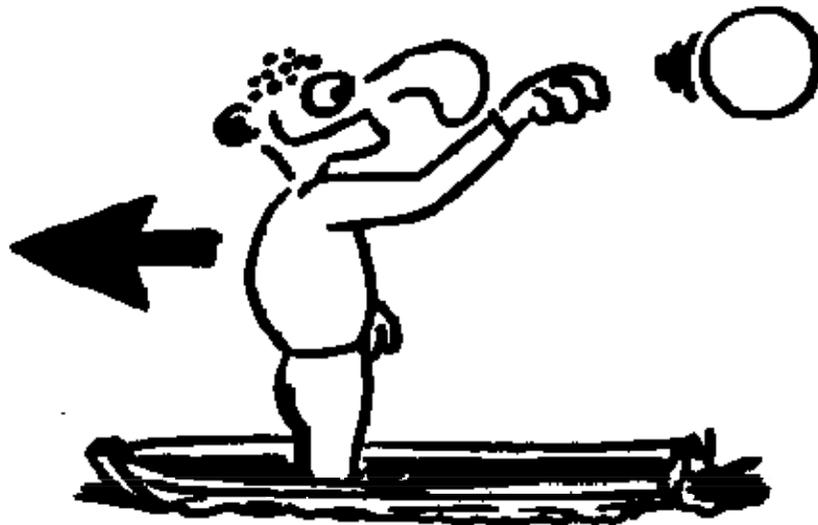
- Warum 3 Familien?
- Warum jeweils diese Wechselwirkungen („Kräfte“)?

- Jede Kraft (Wechselwirkung) hat eigene Botenteilchen

Kraft	Botenteilchen
Starke Kernkraft	Gluonen $g$ 
Schwache Kraft	„Weakonen“ (W und Z) 
Elektromagnetismus	Photonen $\gamma$ 
Schwerkraft	Gravitonen ?

- Boten nur sendbar, wenn entsprechende Ladung vorhanden

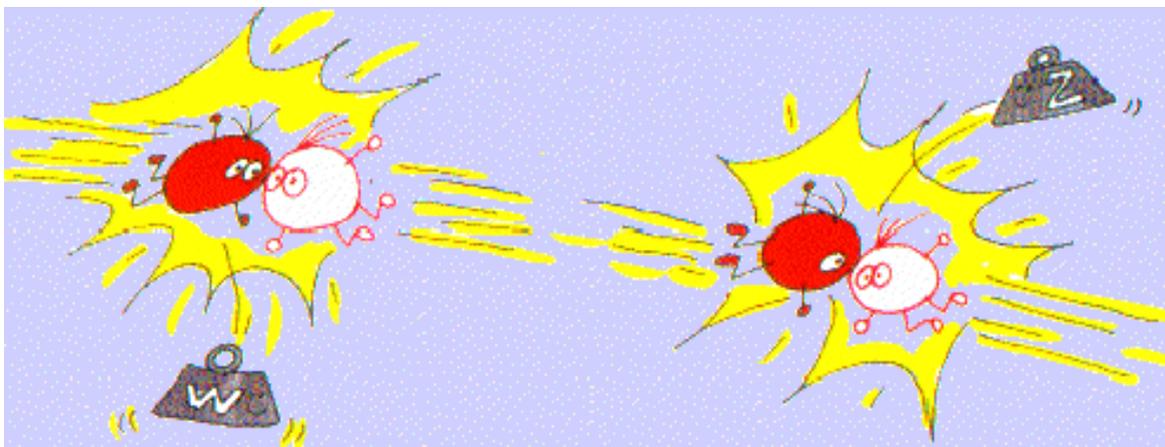
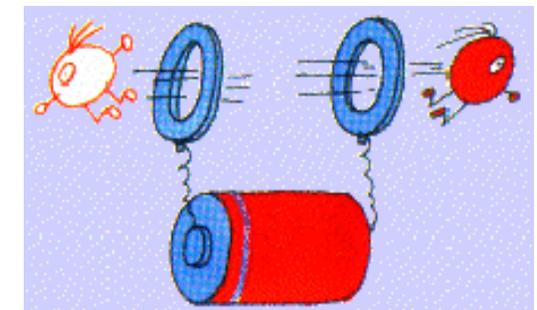
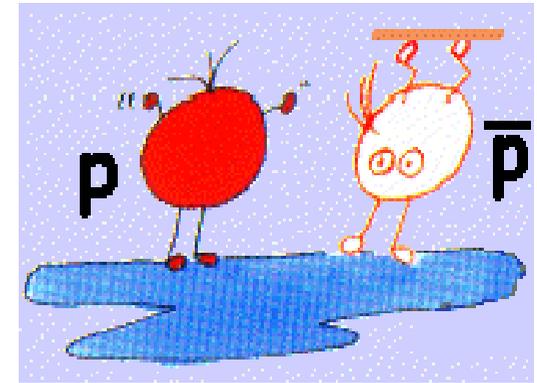
- Zu jeder **Wechselwirkung** gehört eine Ladung
- Nur Teilchen mit entsprechender Ladung spüren Wechselwirkung
- Wechselwirkung erfolgt über Austausch von **Botenteilchen**



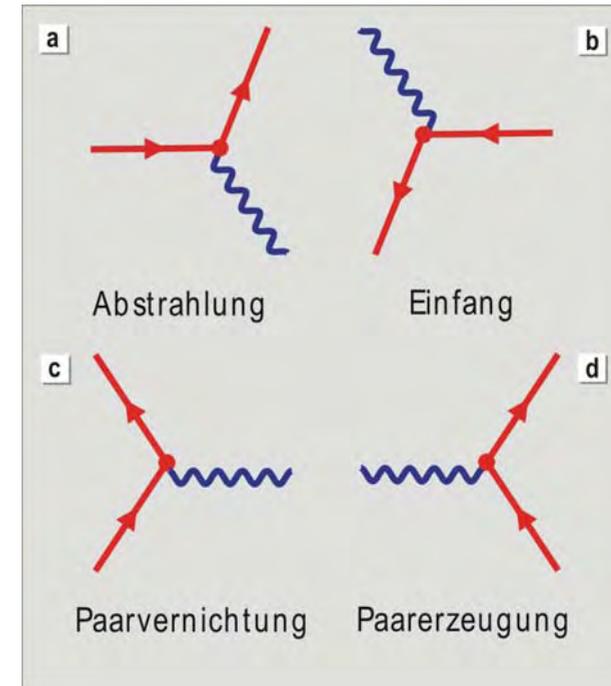
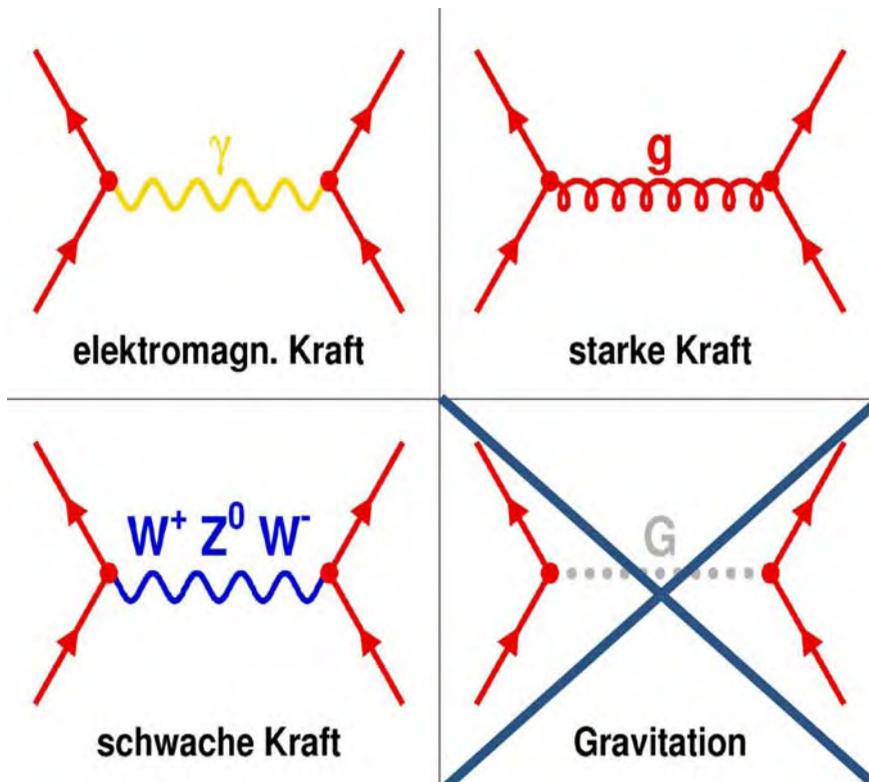
Abstoßend

Anziehend

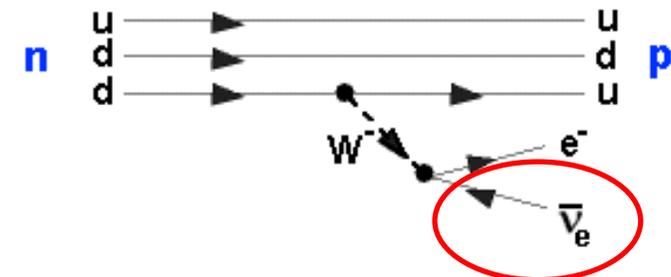
- Zu jedem Bausteinteilchen existiert ein Antiteilchen mit umgekehrten Ladungsvorzeichen
- Sonst sind alle Eigenschaften (Masse, Lebensdauer) gleich
- Aus Botenteilchen können paarweise Materie- und Antimaterieteilchen entstehen
- Umgekehrt können sich diese wieder zu Botenteilchen („Energie“) vernichten



- Ursache jeder Wechselwirkung: Erhaltung von Symmetrien
- Ergibt eindeutiges Set von fundamentalen "Vertices"
- Alle Prozesse sind Kombination solch fundamentaler Vertices



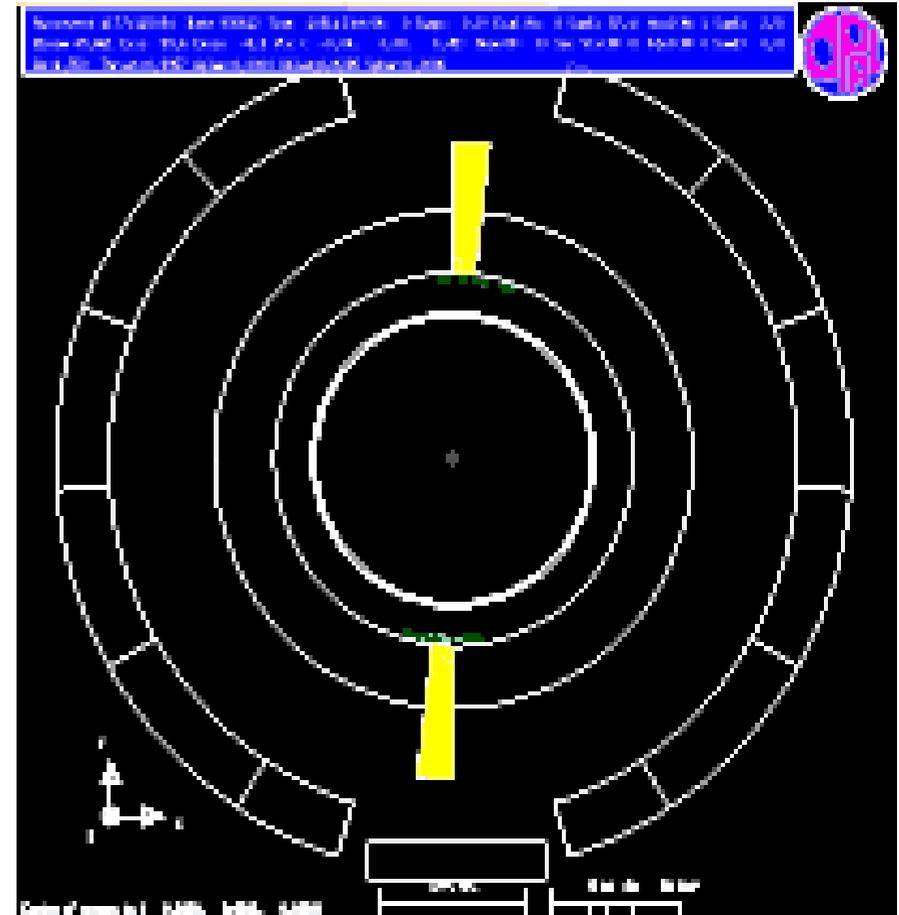
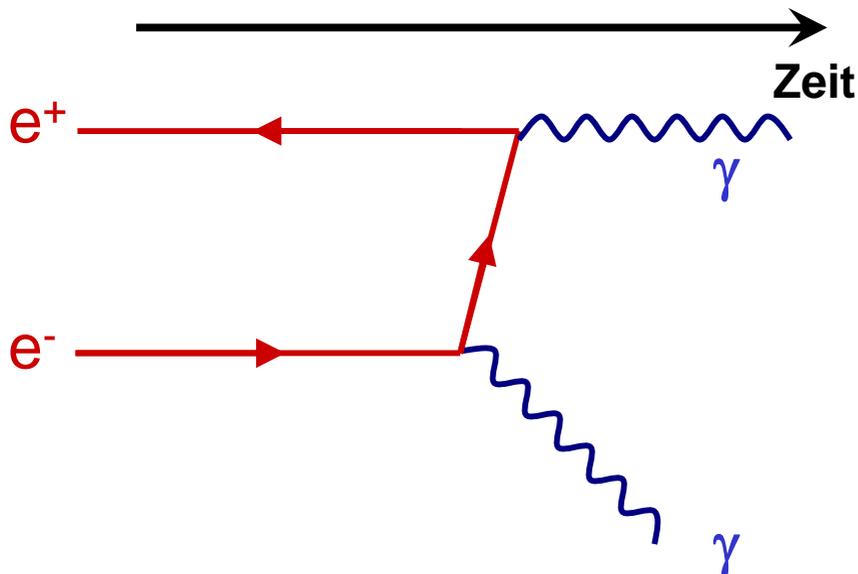
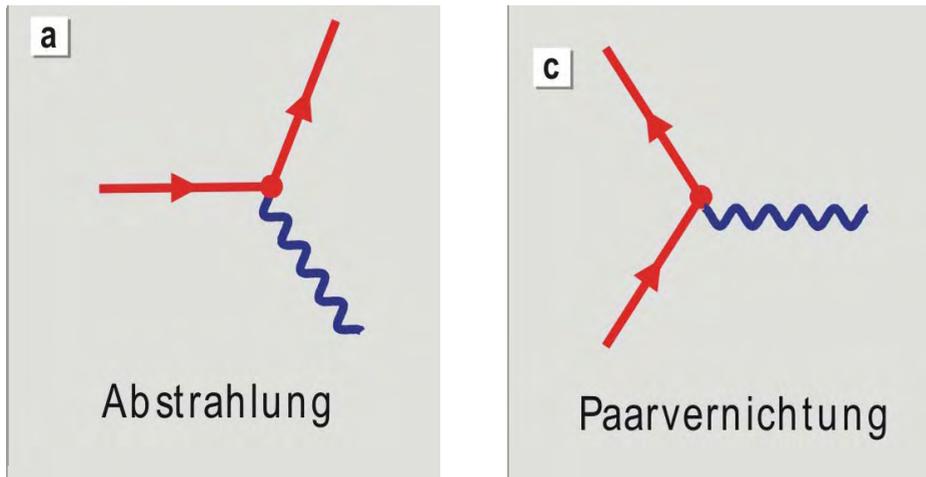
- z.B. Beta"zerfall" des Neutrons



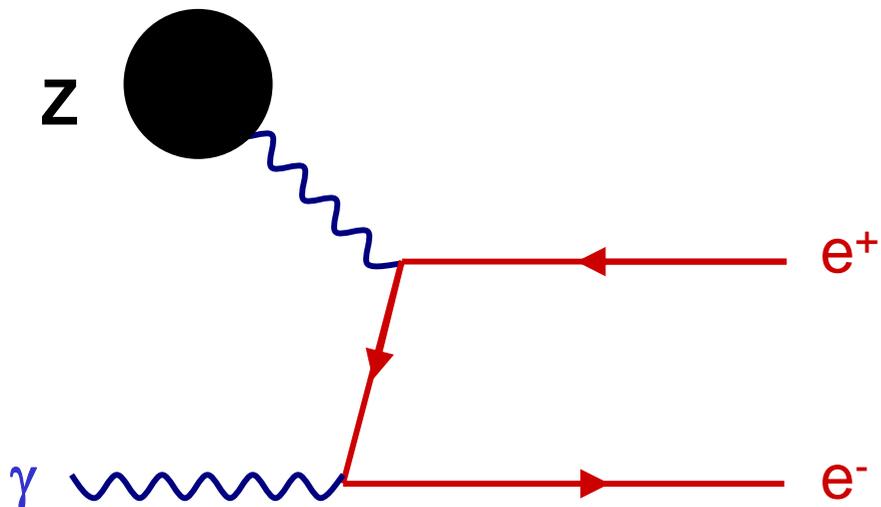
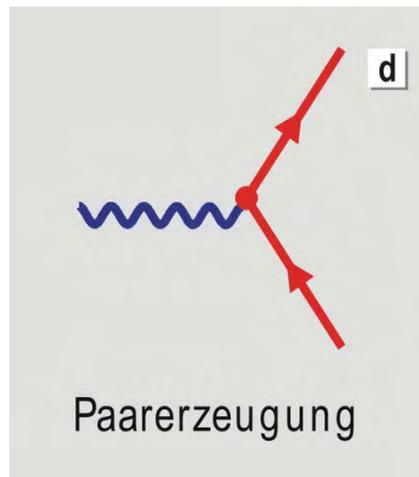
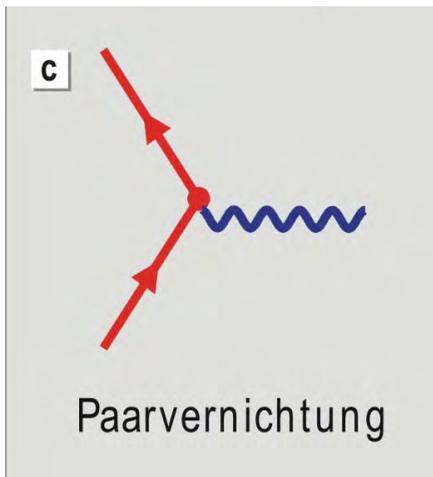
Anm: Pfeilrichtung  $\leftarrow$  symbolisiert Antiteilchen  
Es läuft trotzdem in der Zeit nach rechts

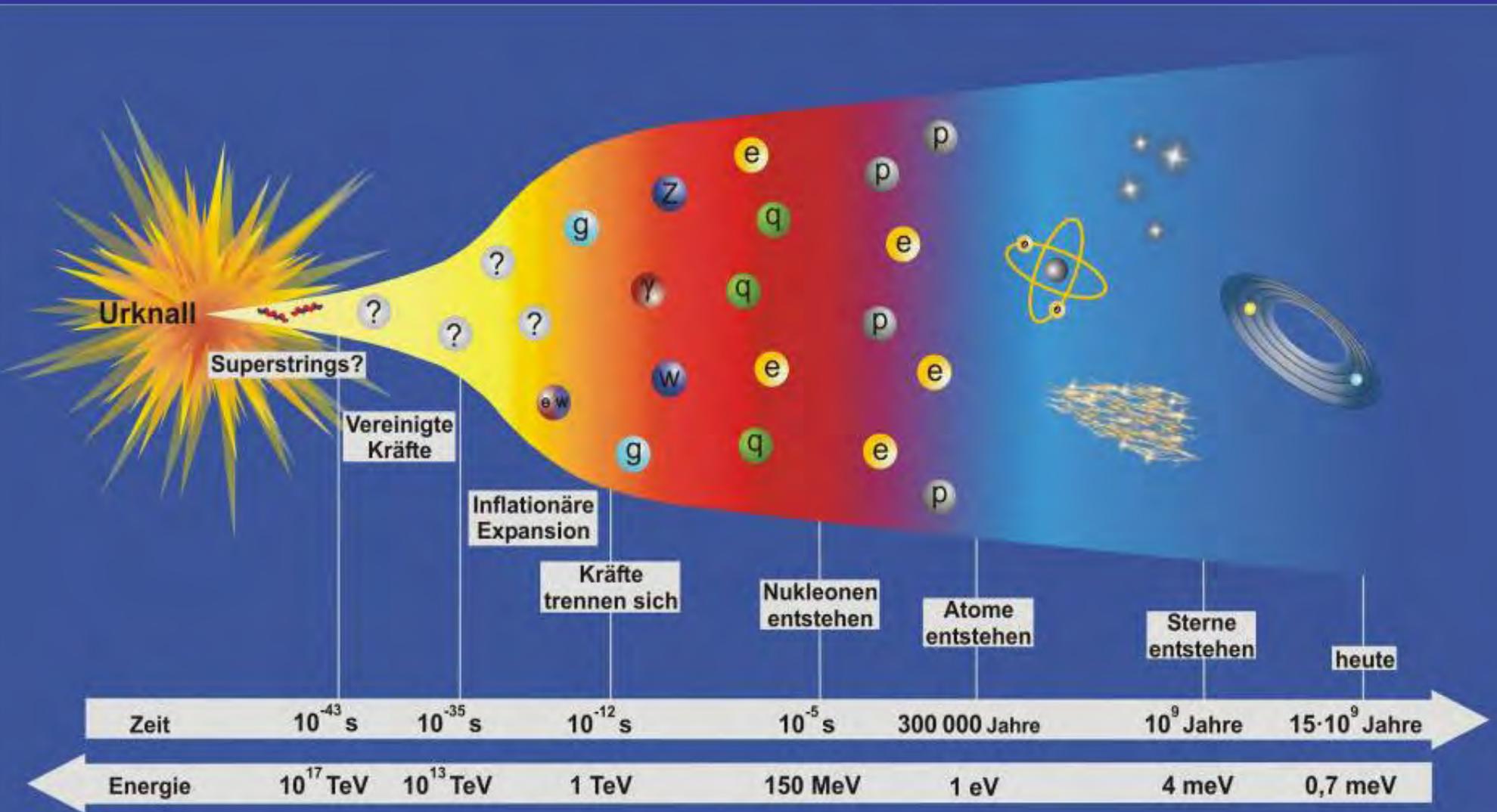
## Paarvernichtung $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$

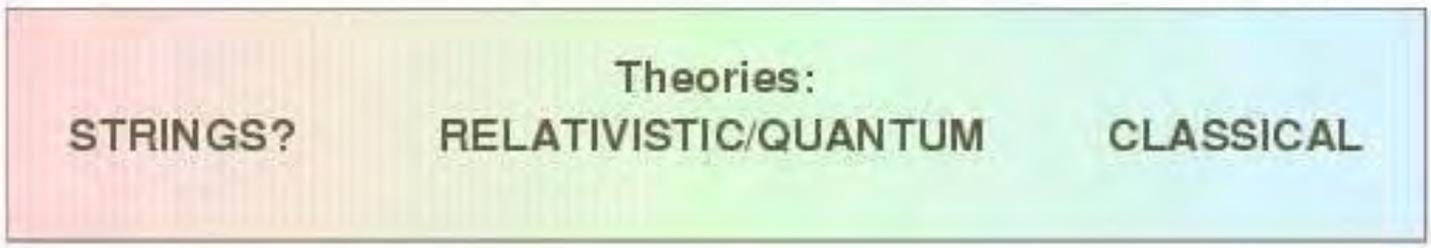
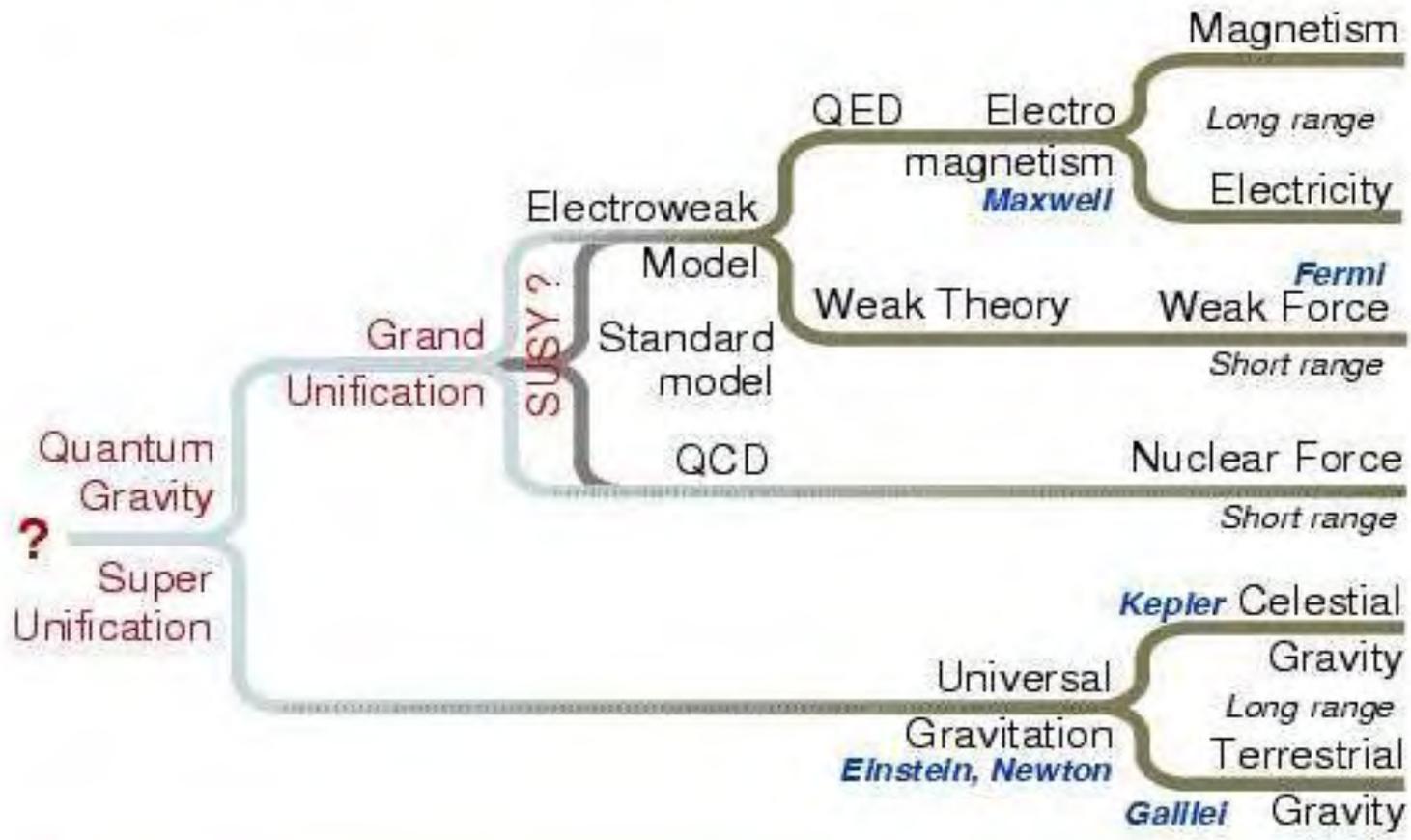
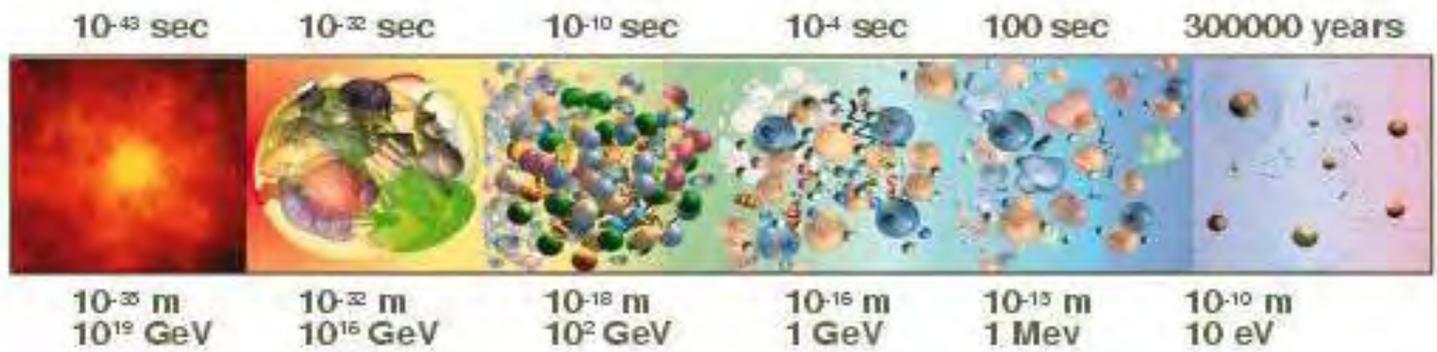
## Beispiel: OPAL bei LEP am CERN



# Paarerzeugung im Feld von Atomkernen

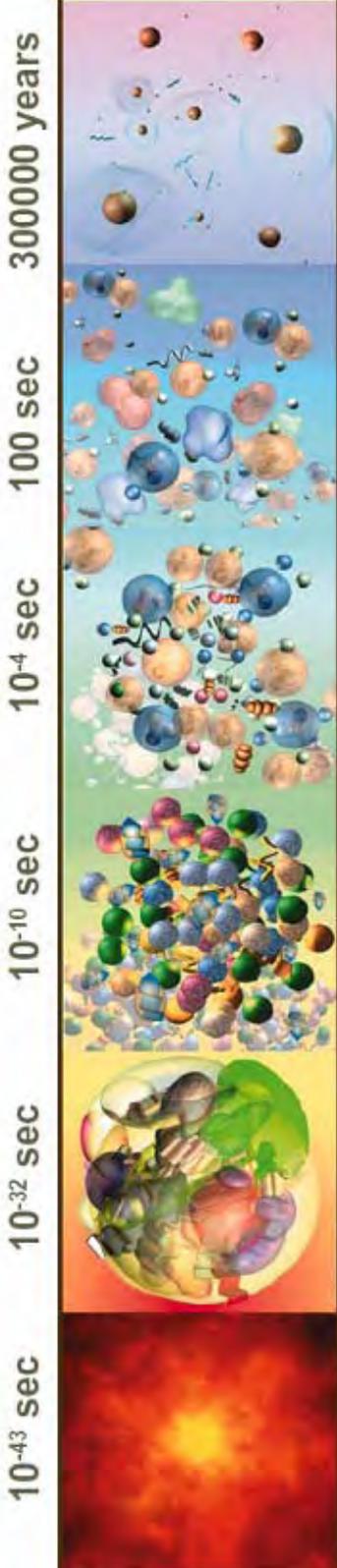






# Mit dem LHC zurück zum Urknall

- Heißes Universum  $\leftrightarrow$  typische Teilchenenergie  
 Sonne:  $T = 10^7 \text{ K} \leftrightarrow E = 10^{-6} \text{ GeV}$   
 LHC :  $T > 10^{16} \text{ K} \leftrightarrow E > 10^3 \text{ GeV}$  ( $>10^9$  mal höher!)
  - Die „Ursuppe“: Nachstellen im Teilchenensemble  
 ALICE: Pb+Pb  $\rightarrow$  Quark-Gluon „Plasma“?
  - Die „Petersilie“: Nachstellen in Einzelprozessen  
 ATLAS, CMS, LHCb: p+p  $\rightarrow$  b, t, W, Higgs? SUSY?



Alter	Temperatur	Energie	Größe
$10^{-43} \text{ s}$	$10^{32} \text{ K}$	$10^{19} \text{ GeV}$	Nadelspitze
$10^{-36} \text{ s}$	$10^{28} \text{ K}$	$10^{15} \text{ GeV}$	Tennisball
$10^{-24} \text{ s}$	$10^{22} \text{ K}$	$10^9 \text{ GeV}$	50 km
$10^{-14} \text{ s}$	$10^{17} \text{ K}$	10000 GeV	wie Sonne
$10^{-10} \text{ s}$	$10^{15} \text{ K}$	100 GeV	
$10^{-6} \text{ s}$	$10^{13} \text{ K}$	1 GeV	wie Sonnen-system
1s	$10^{10} \text{ K}$	0.001 GeV	1 Lichtjahr
1 min	$10^9 \text{ K}$	0.0001 GeV	50 Lichtjahre
1 Jahr	$10^6 \text{ K}$	0.0000001 GeV	wie Milch- straße
100.000 Jahre	10.000 K	1 eV	1 Million Lichtjahre
heute	3 K	$10^{-4} \text{ eV}$	10 Milliarden Lichtjahre

Theorien

LHC  
(p+p)

gemessene Einzelprozesse (2008)

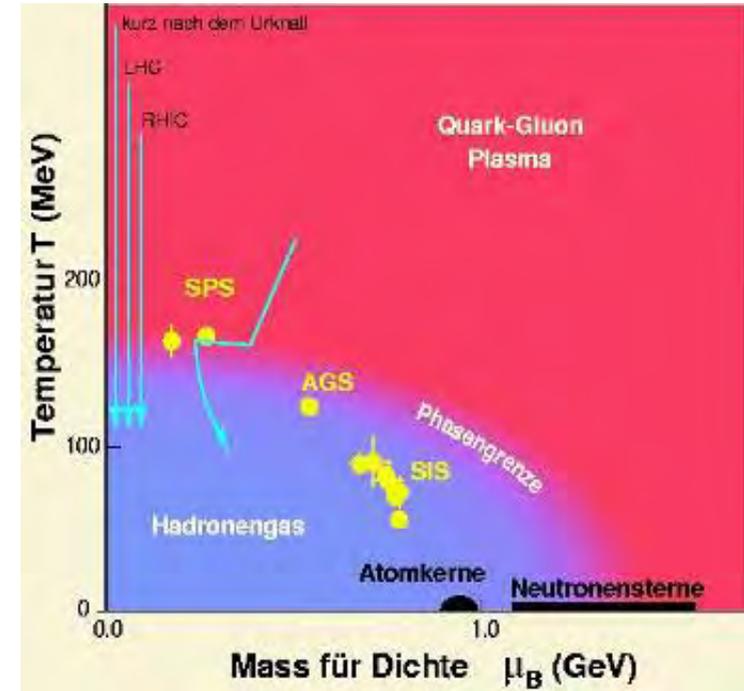
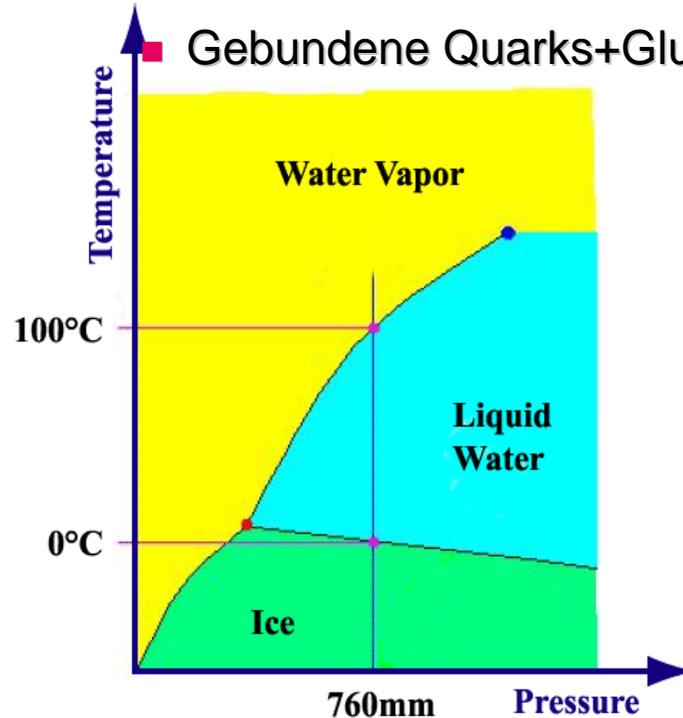
LHC Pb+Pb

# ALICE kocht die Ursuppe

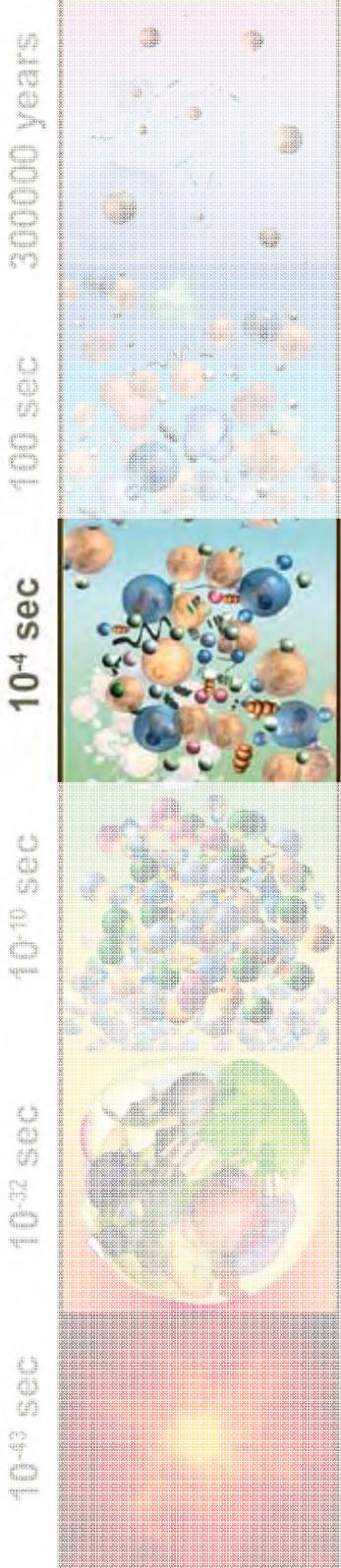
- Untersuchung des Quark-Gluon Plasmas
  - Neuer Zustand von Materie: „flüssige(?)“ Quarks und Gluonen

- Eis schmilzt bei  $0\text{ °C} \cong 270\text{ K}$

- Gebundene Quarks+Gluonen schmelzen bei  $170\text{ MeV} = 2 \times 10^{12}\text{ K}$



- Beschleunige und Kollidiere „Hadronen“-Eis, um „Quark-Gluon“-Wasser herzustellen (erreiche  $> 200.000$  fache Sonneninnentemperatur)
- ALICE wird Eigenschaften dieses neuen Materiezustand in Pb-Pb Kollisionen untersuchen (Zustandsgleichung, Brechungsindex, Suszeptibilität, Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Schallgeschwindigkeit,...)  $\rightarrow$  ideale Flüssigkeit?



# Theoretische Fragen

## ■ 3 Familien von Elementarteilchen

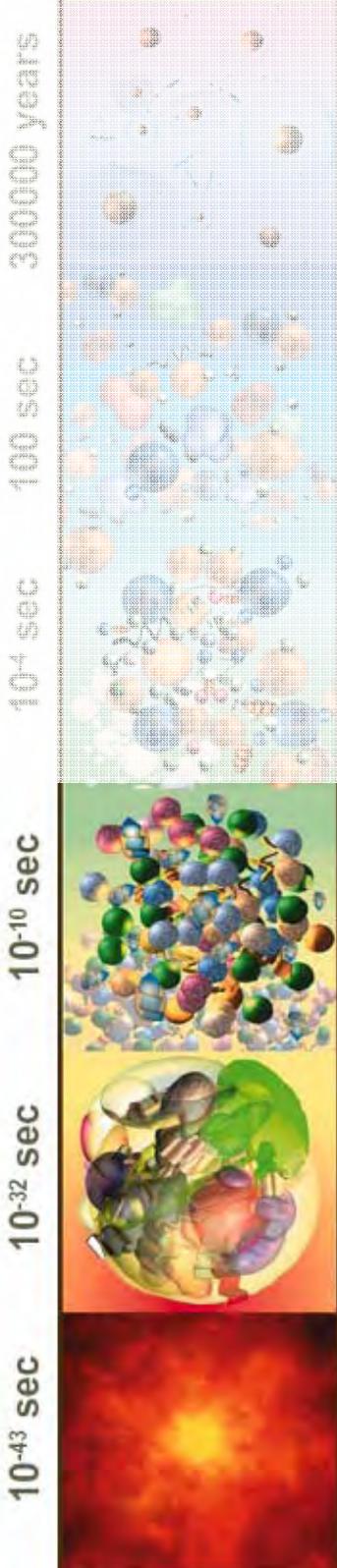
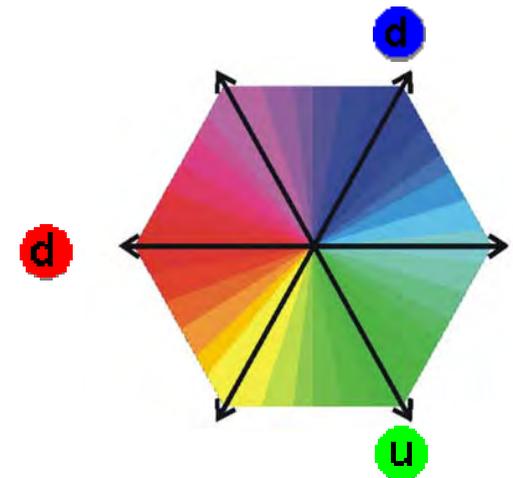
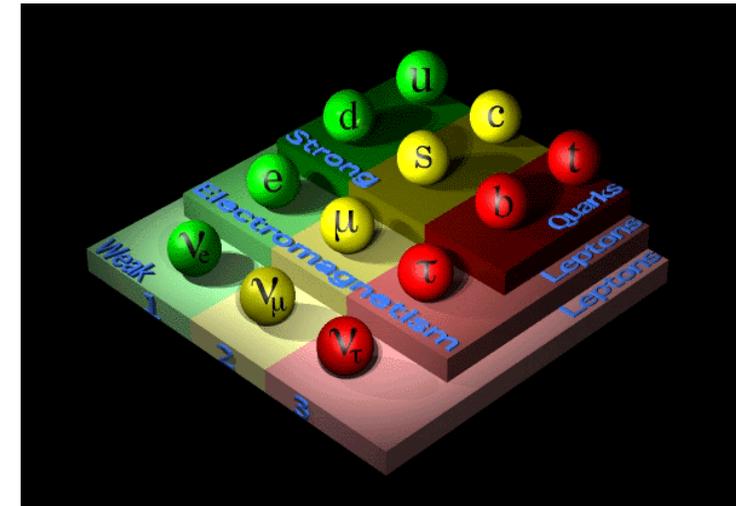
- Stabile Materie (p, n, e) nur aus erster Familie
- **Warum dann drei?**

## ■ Alle Wechselwirkungen beruhen auf Ladungssymmetrien

- Beispiel: Symmetrie der starken „Farb“ladung im Neutron
- Gluonen sorgen für Symmetrie und binden die Quarks
- **Warum diese Symmetrien?**

## ■ Weitere Symmetrien?

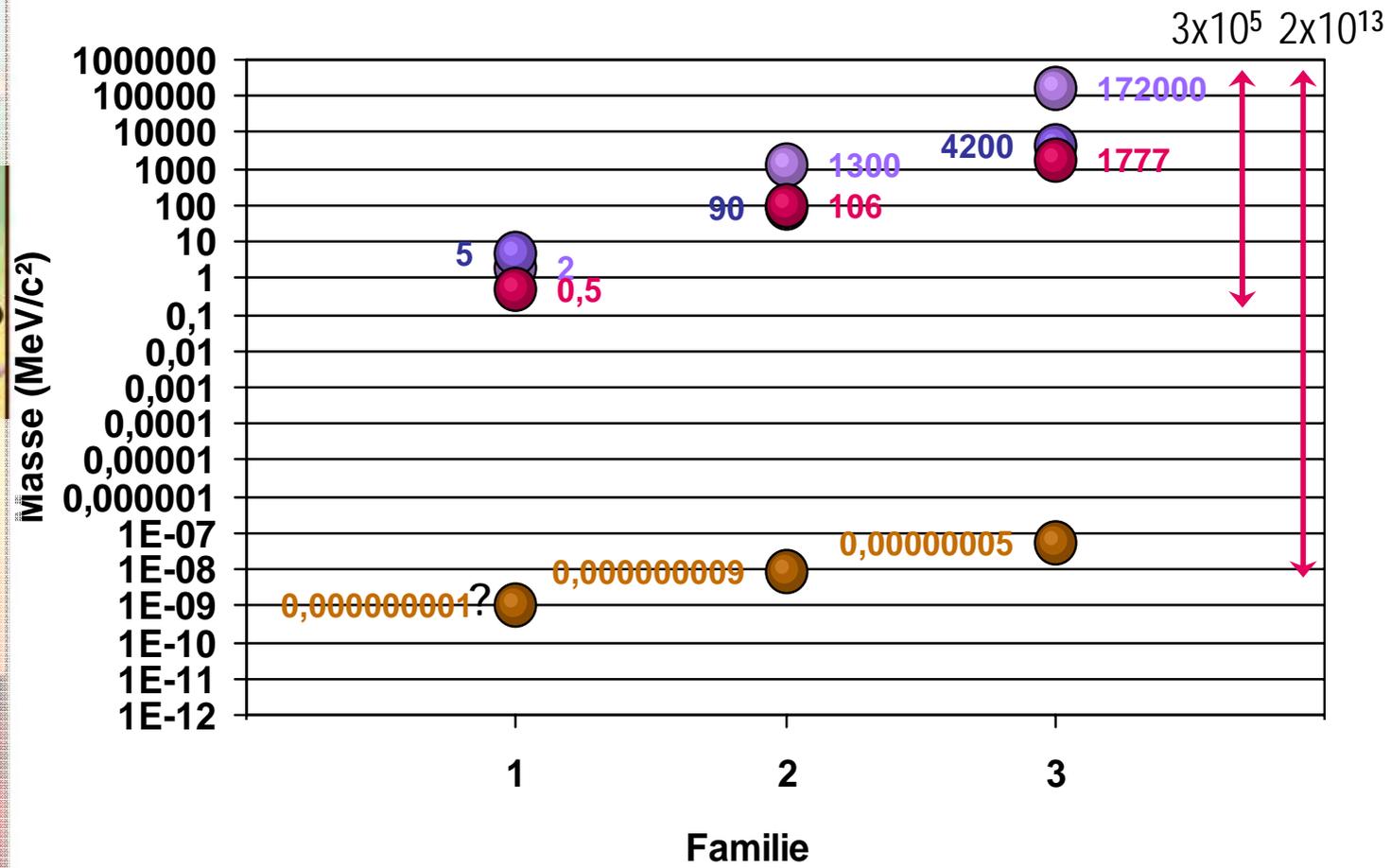
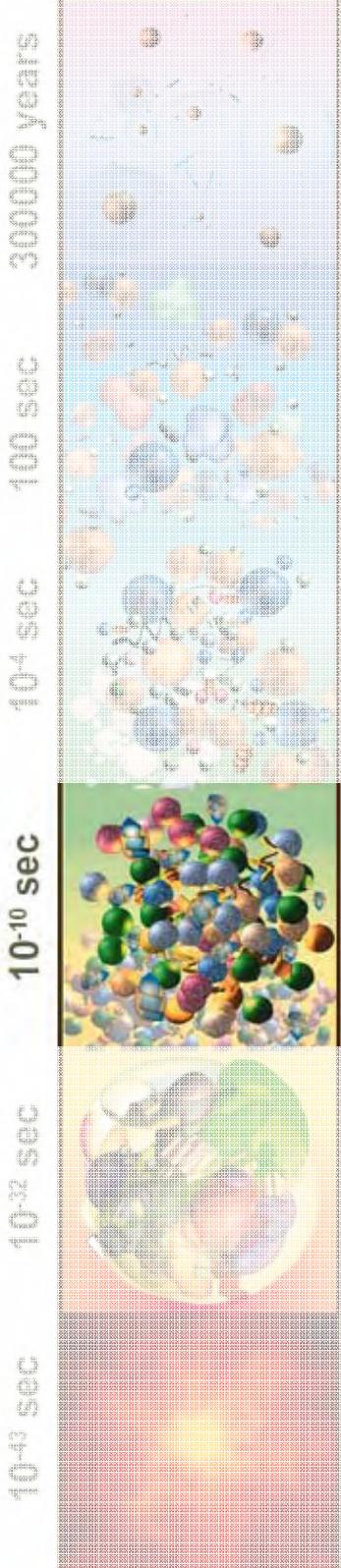
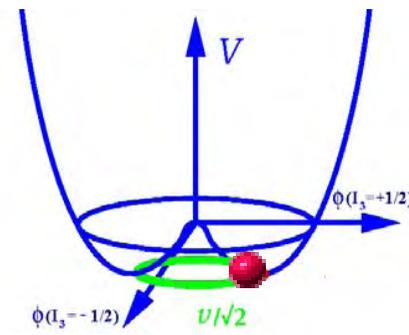
- z.B: **Supersymmetrie „SUSY“** zwischen Baustein- und Botenteilchen?



# Die Ruhemassen der Bausteine

## ■ Symmetrien erfordern masselose Teilchen

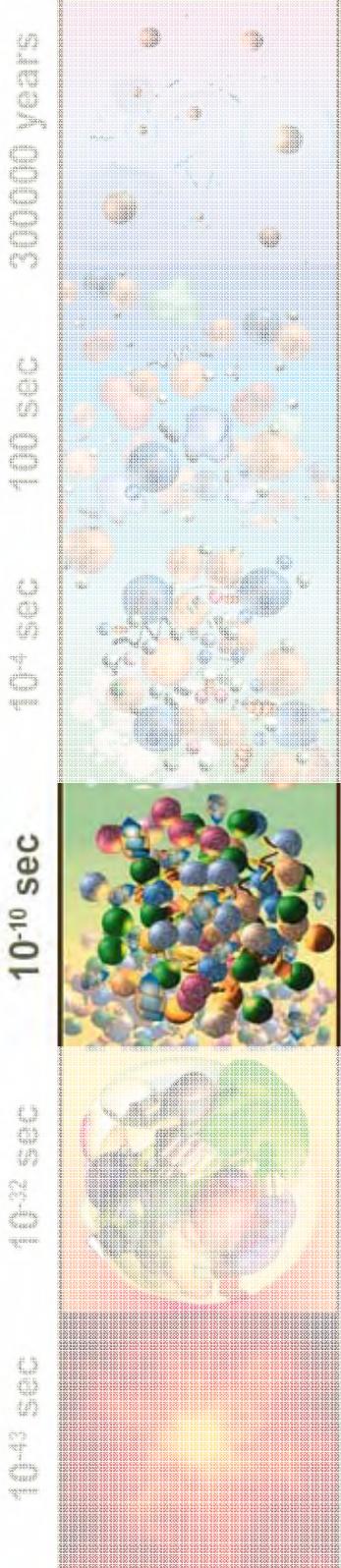
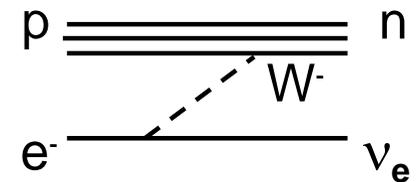
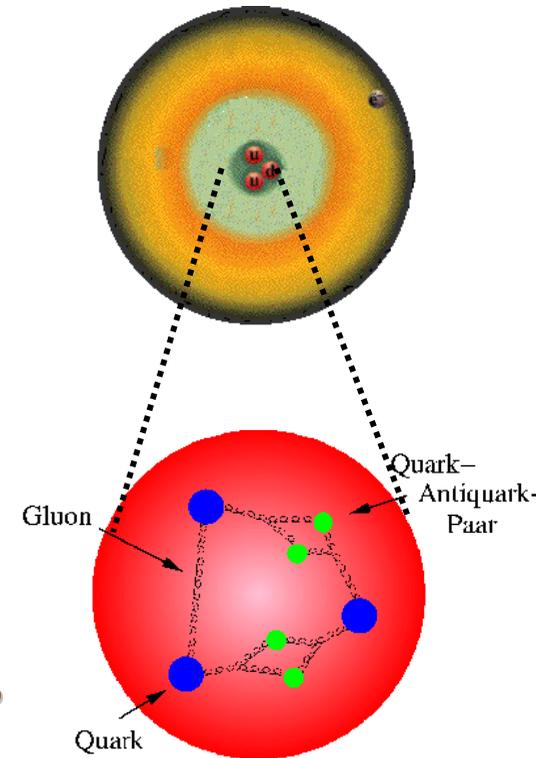
- Erhalten Masse erst  $\sim 10^{-10}$  sec nach Urknall durch „spontane“ Symmetriebrechung
- **Entsteht Masse durch Kopplung an ein „Higgs“ Hintergrundfeld?**
- **Was verursacht die riesigen Massenunterschiede? „Sandkorn .vs. Ozeandampfer“?**



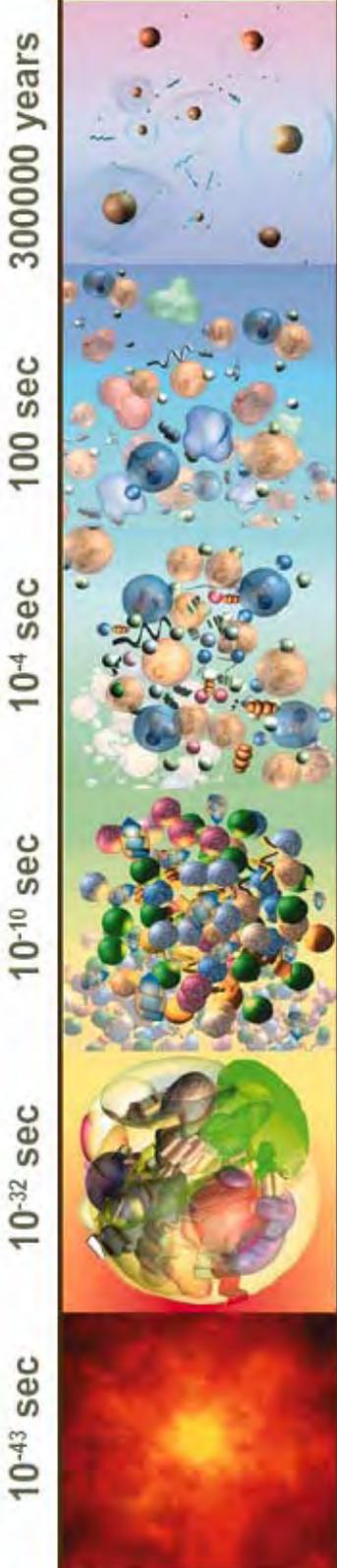
- Up Typ
- Down Typ
- Lepton +/-
- Neutrino

# Die Bedeutung der Teilchenmassen

- Die Masse der Atome kommt
  - nur ~1% aus Ruhemasse der Bausteine
  - 99% aus Energie der Quarkbindung
- Ändern von  $m_u$ ,  $m_d$  oder  $m_e$  hätte
  - kaum Effekt auf **Atommassen**
  - kaum Effekt auf **Materiedichte**
  - riesigen Effekt auf **Verhalten** der Materie
- Erniedrige  $m_e$  auf  $0.025 \text{ MeV}/c^2$ 
  - Leben: 30m große Riesenwesen auf Titan?
- Erniedrige  $m_d - m_e$  um  $1 \text{ MeV}/c^2$ 
  - ermöglicht Umwandlung des Wasserstoffs:
  - keine Wasserstoff-Atome, n stabil
- Erniedrige  $m_d - m_u$  um  $2 \text{ MeV}/c^2$ 
  - Proton- und Deuteriumzerfall
  - Keine Sterne
  - nur neutrale Teilchen ( $n, \gamma, \nu$ )



# Animation: Was wäre wenn...



- Erst nachdem der LHC geklärt hat, wie Teilchenmassen überhaupt entstanden sind, wird man erforschen können, wie ihre Werte zustande kamen.
- [http://prola.aps.org/abstract/RMP/v68/i3/p951\\_1](http://prola.aps.org/abstract/RMP/v68/i3/p951_1)  
R.N. Cahn,  
„The 18 arbitrary parameters of the standard model in your everyday life“(1996)
- <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9707380>  
V.Agrawal, S.M.Barr, J.F.Donoghue, D.Seckel,  
„The anthropic principle and the mass scale of the Standard Model“ (1997)
- <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9909295v2>  
C. Hogan, „Why the Universe is Just So“ (1999)
- <http://arxiv.org/abs/0712.2968v1>  
Th Damour und J.F.Donoghue,  
„Constraints on the variability of quark masses from nuclear binding“ (2007)

# Was ist Masse?

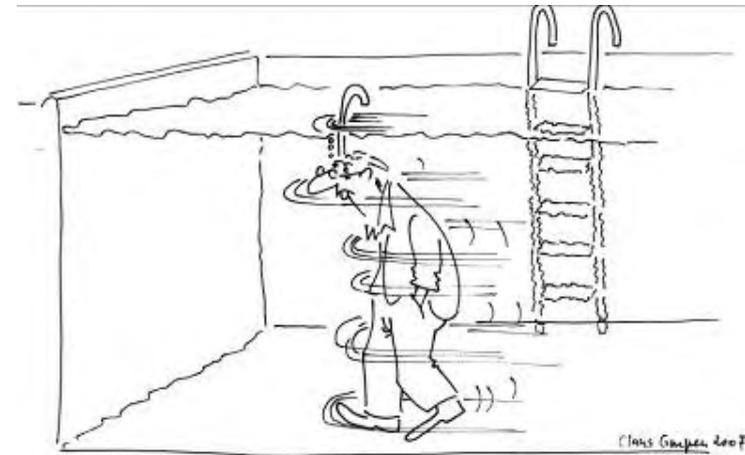
## ■ Leeres Vakuum

- Alle Teilchen sind masselos
- bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit



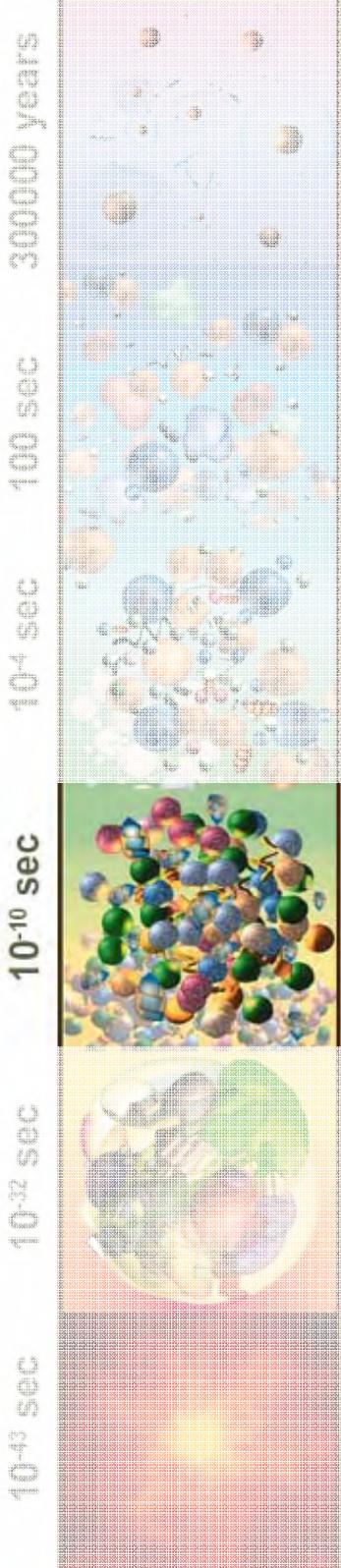
## ■ Higgshintergrundfeld

- Teilchen werden durch WW mit dem Higgs-Hintergrund-Feld verlangsamt
- Teilchen erhalten effektiv eine Masse
- Wert hängt von der Stärke der WW mit dem Hintergrundfeld ab

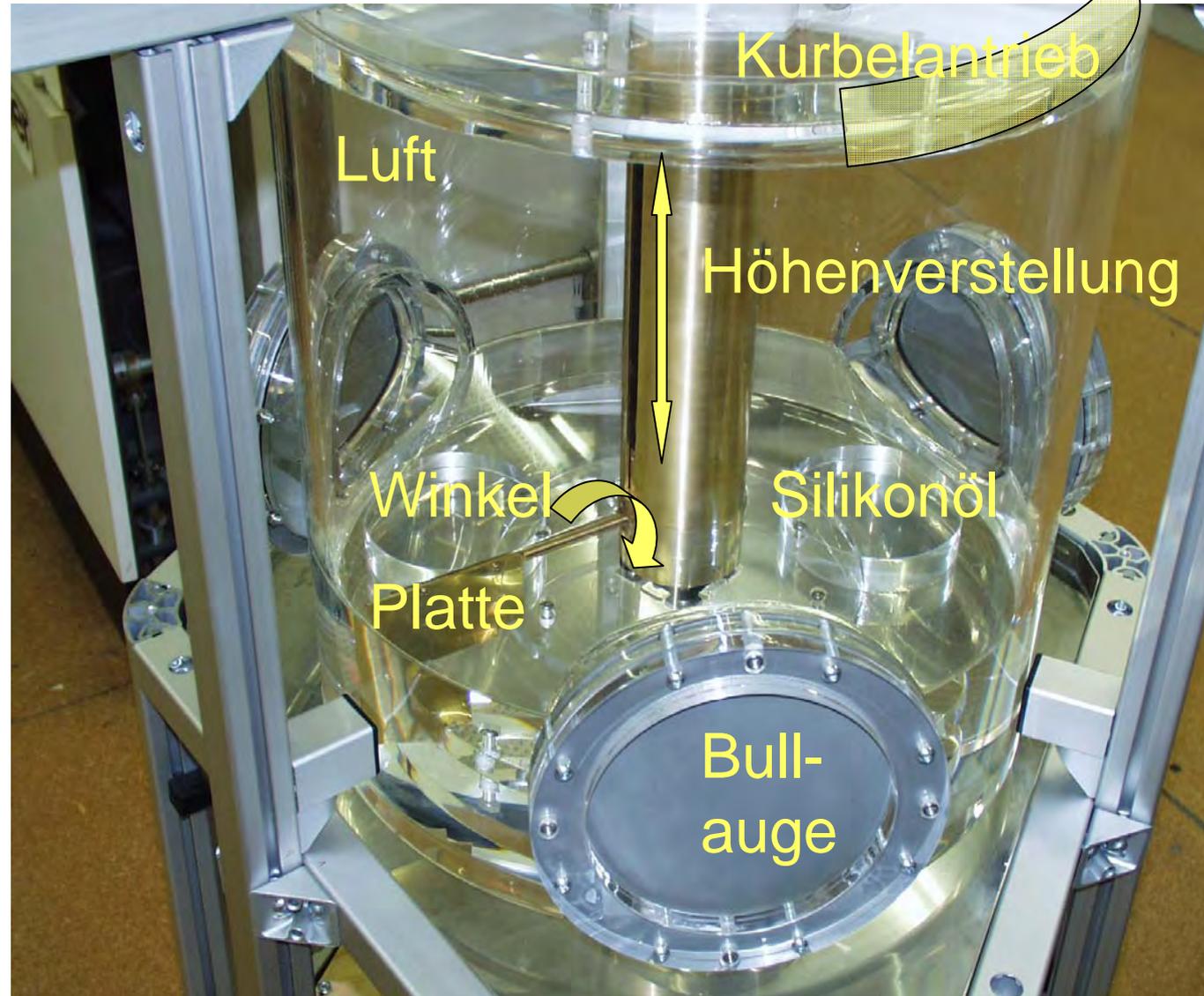
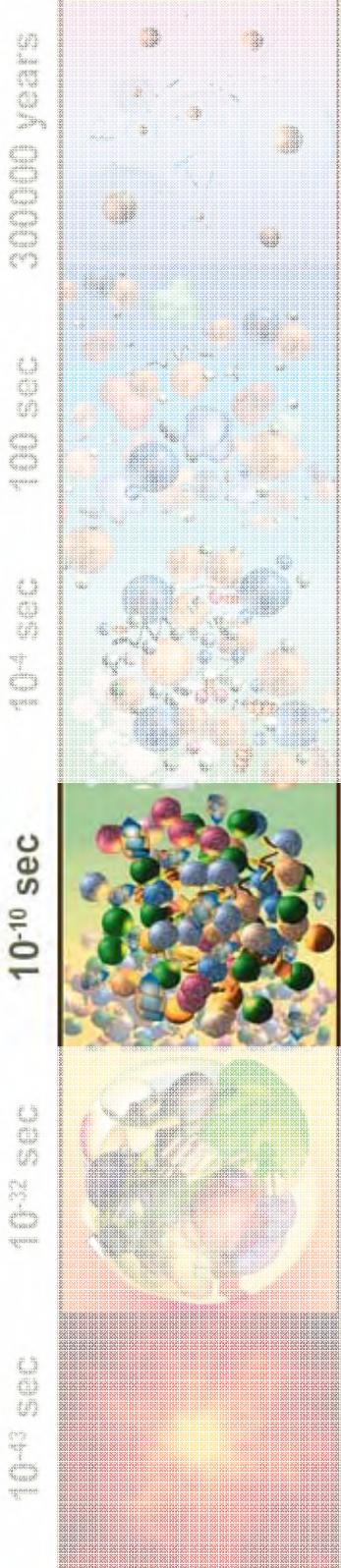


## ■ Higgs-Teilchen

- quantenmechanische Anregung des Higgsfeldes
- **notwendige Konsequenz des Konzepts!**



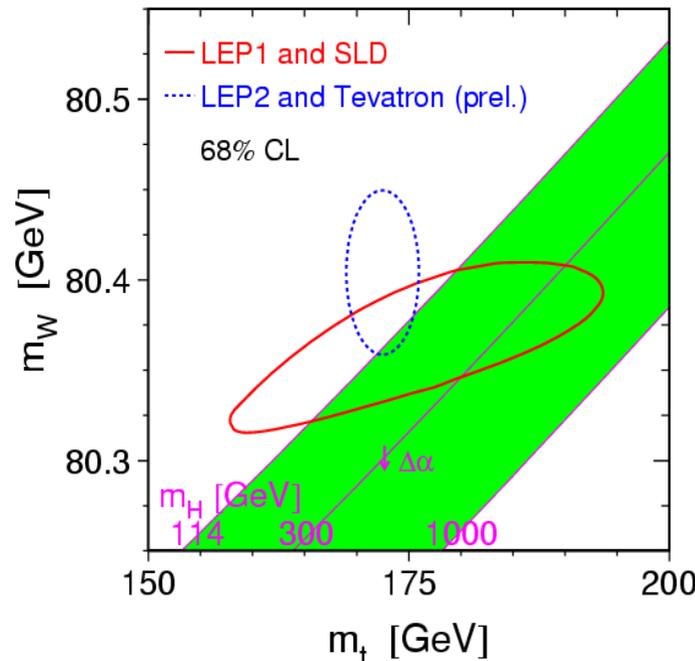
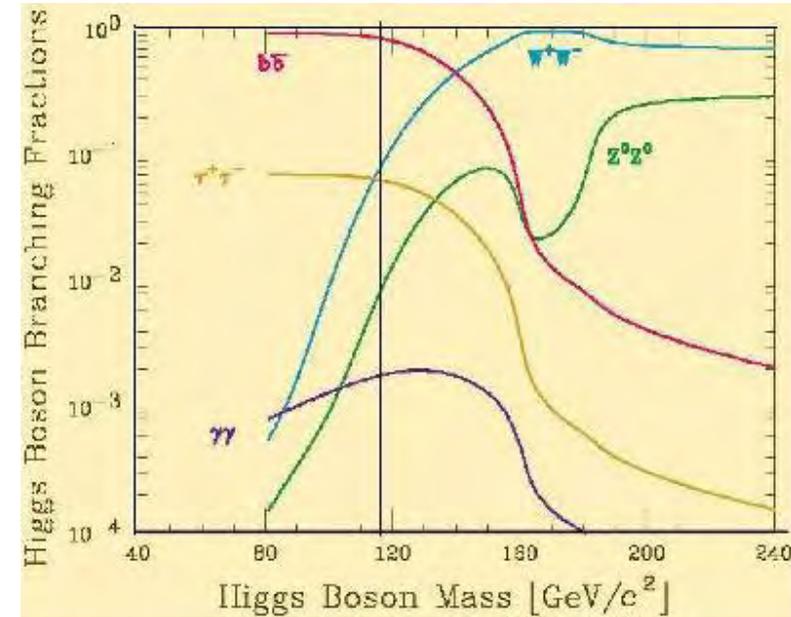
# Higgs-Exponat (TU Dresden, Uni Würzburg)



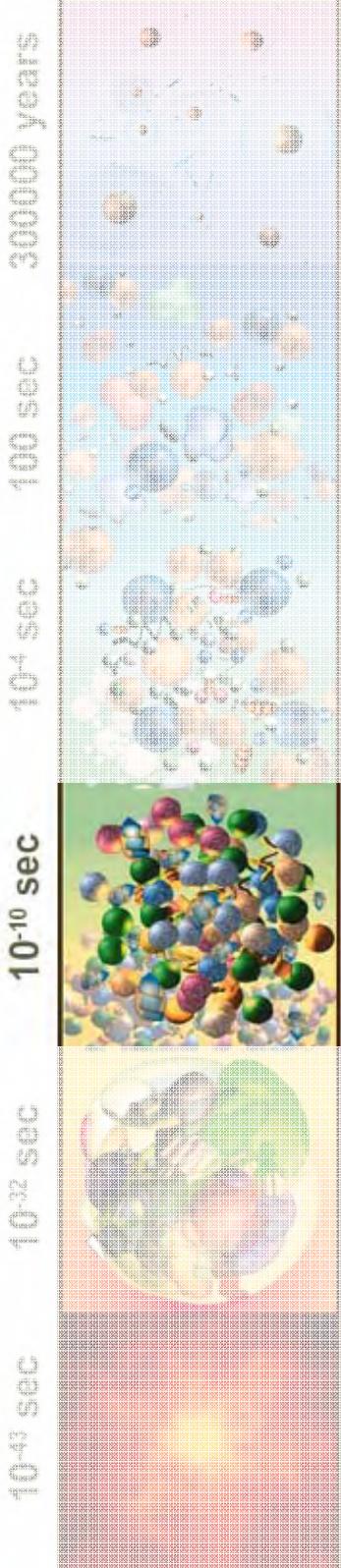
- Analogie macht Higgs-Mechanismus erfühlbar

# Vorhersagekraft des Higgs-Mechanismus

- Ist die Higgs Hypothese überprüfbar? **Ja!**
  - Entdecke Higgs Boson(en) *und* Messe ihre Zerfälle
- Lernen wir was Masse ist? **Ja!**
  - Die Stärke der Kopplung ans Higgsfeld
- Sagt der Higgs Mechanismus die Massenwerte vorher? **Nein!**
  - Aber:  $M_W / M_Z$  Verhältnis stimmt auf besser als 1‰

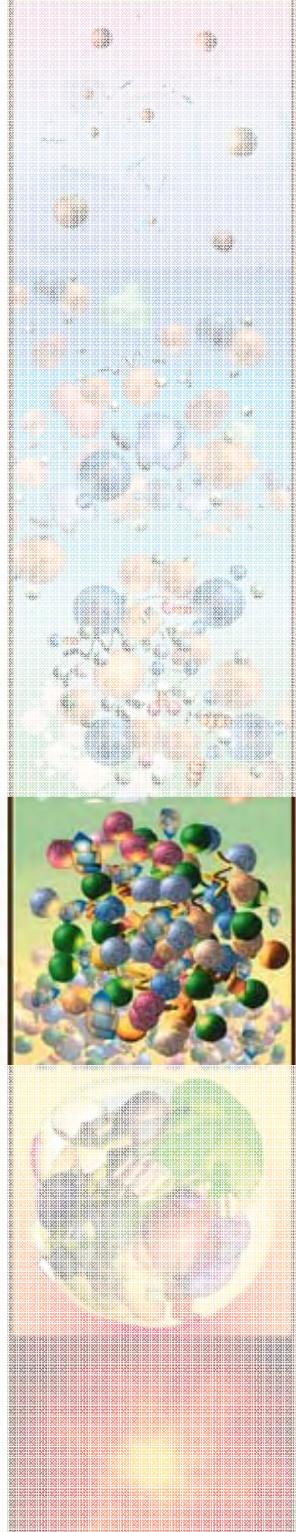


- Standardmodell Vorhersage:  
 $M_W = (80.36 \pm 0.02) \text{ GeV}$
- Direkte Messung:  
 $M_W = (80.40 \pm 0.03) \text{ GeV}$
- Differenz:  
 $\Delta = (0.04 \pm 0.04) \text{ GeV}$
- Fit der SM Higgs Masse:  
 $M_H = (100^{+40}_{-30}) \text{ GeV}$



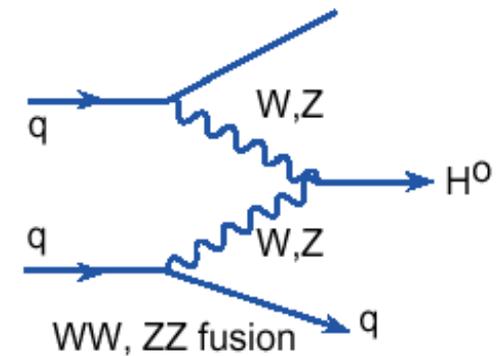
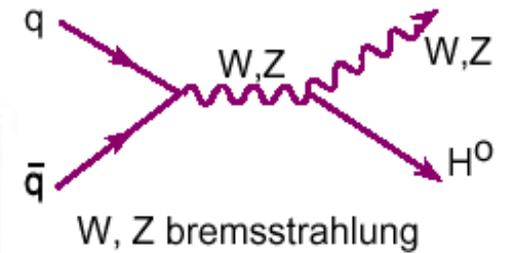
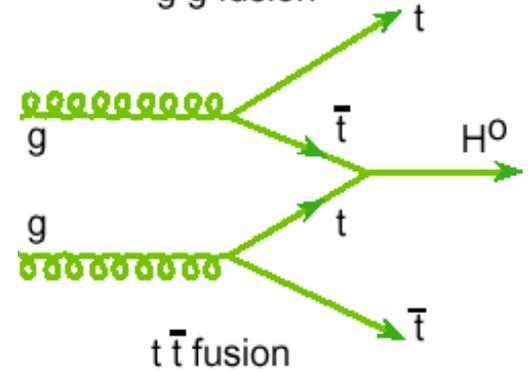
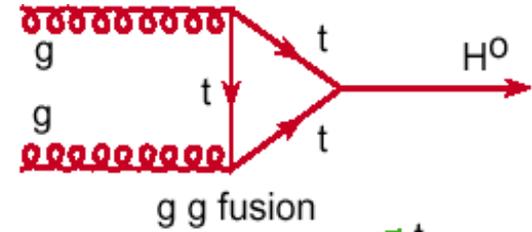
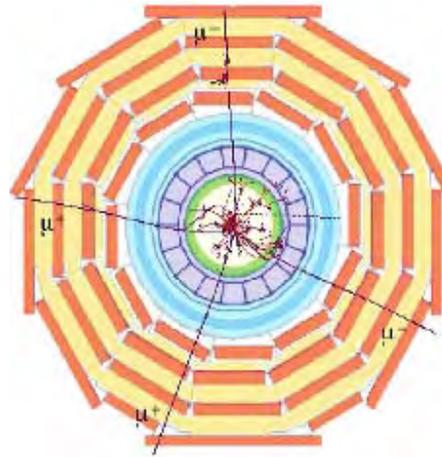
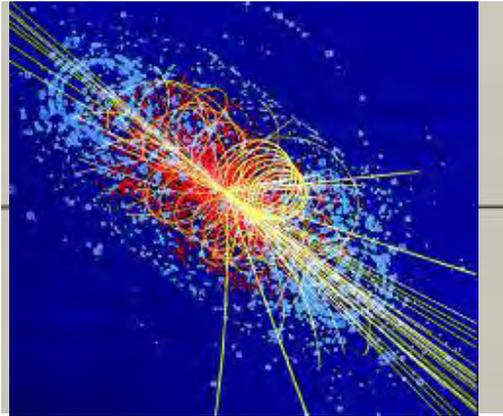
# Higgssuche bei LEP

30000 years  
100 sec  
10<sup>4</sup> sec  
10<sup>-10</sup> sec  
10<sup>-22</sup> sec  
10<sup>-43</sup> sec

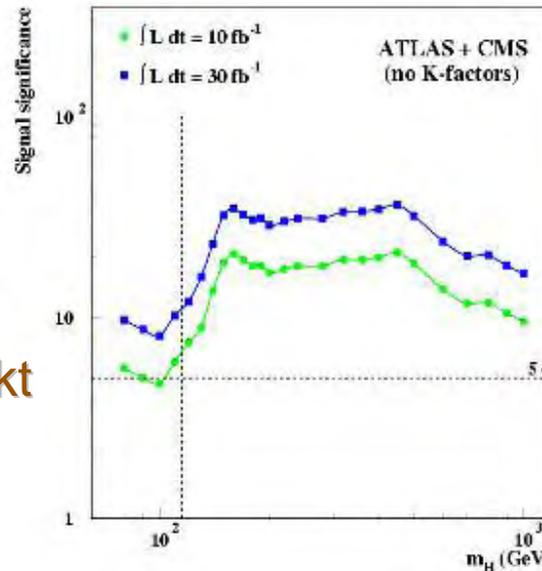


# Higgs Suche bei ATLAS und CMS

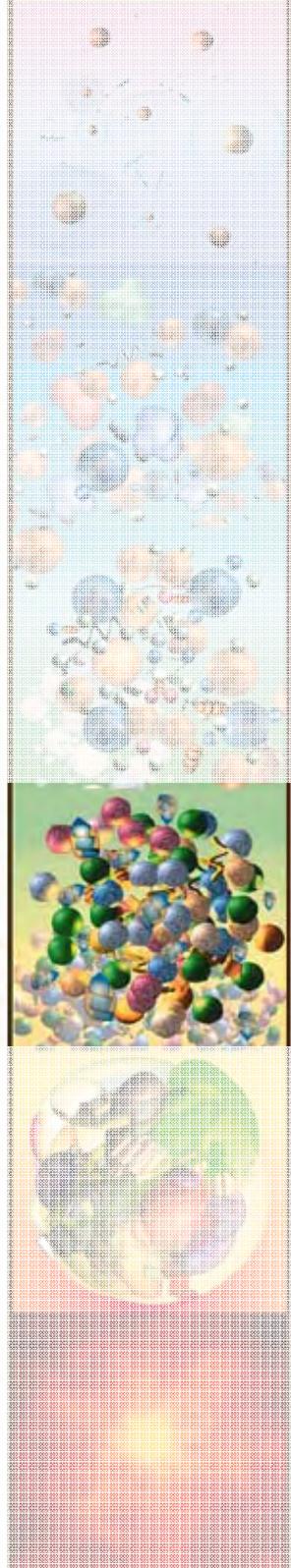
- Higgs Masse unbekannt:
  - Viele Produktionsmechanismen
  - Viele mögliche Zerfälle



- Nach 1-3 Jahren gut verstandener Daten:
  - Higgs Boson kann bei allen Massen entdeckt werden



30000 years  
 100 sec  
 10<sup>4</sup> sec  
 10<sup>-10</sup> sec  
 10<sup>-22</sup> sec  
 10<sup>-43</sup> sec



# Massenmechanismus ohne Higgs?

- Standardmodell ohne Higgs verletzt „Wahrscheinlichkeit < 1“

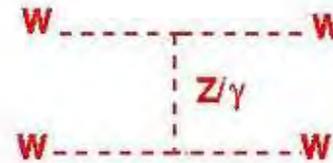
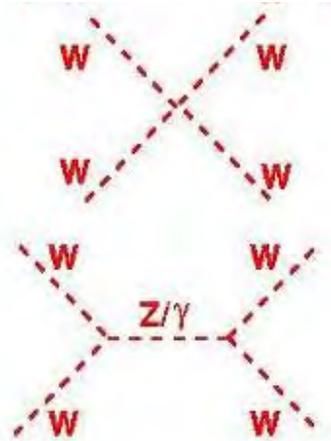


$$\sigma_{WW} \rightarrow \infty$$

für

$$m_H \rightarrow \infty$$

Unitarität:

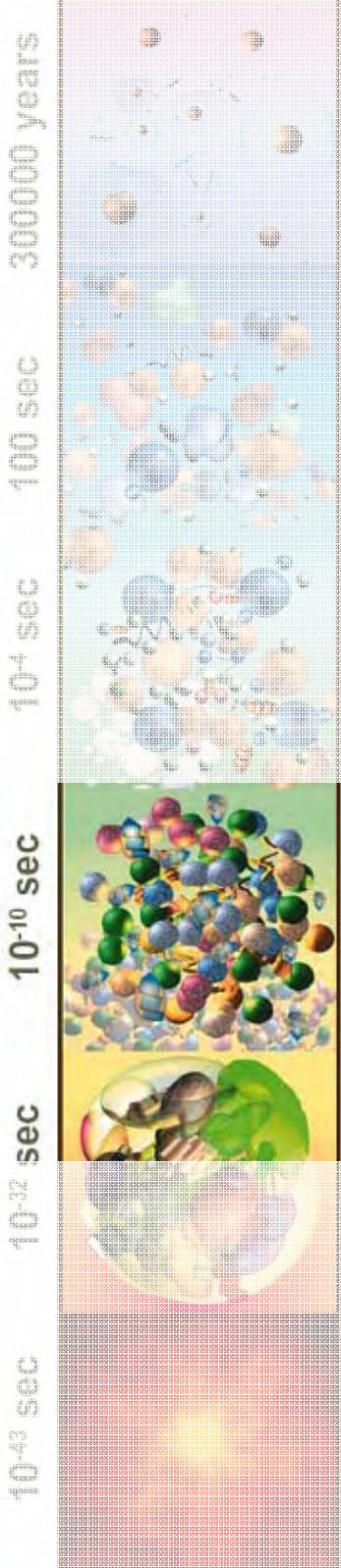


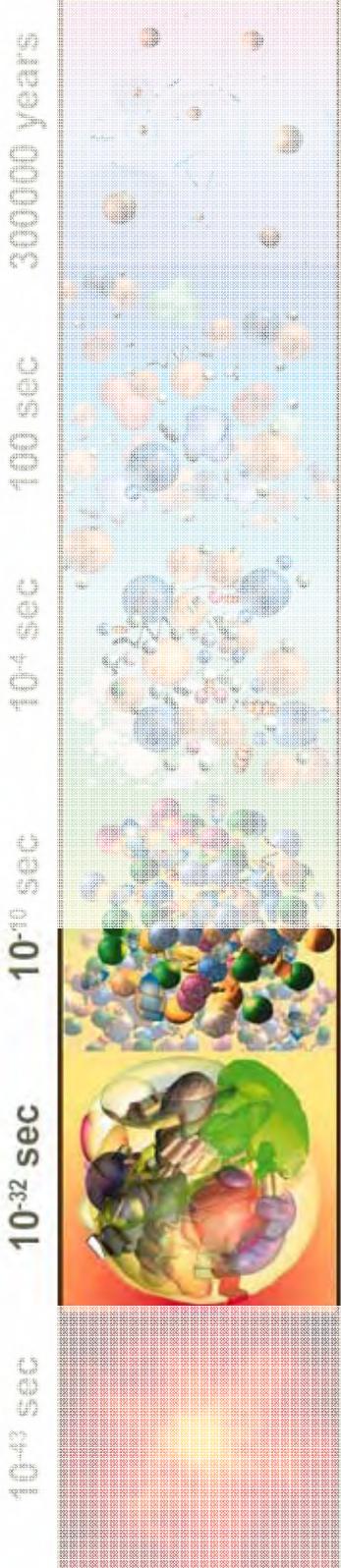
$$m_H^2 \leq \frac{2\pi\sqrt{2}}{G_F} \approx (850\text{GeV})^2$$

- Higgs wird bei LHC gefunden, wenn es existiert!
- Wenn nicht, muß der LHC etwas anderes finden! („win-win“)

- **Die Suche nach dem Ursprung der Masse wird in wenigen Jahren enden**

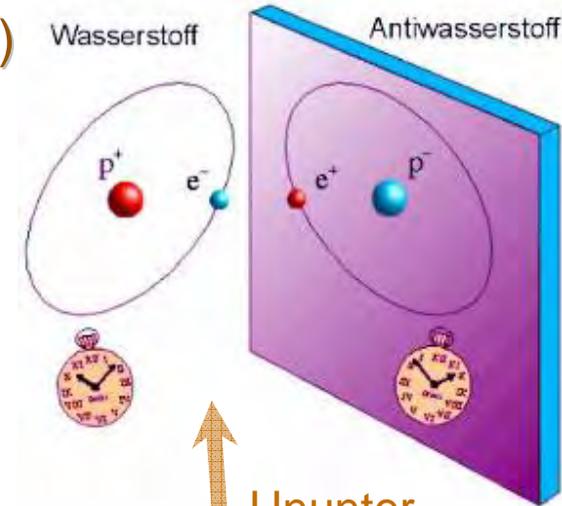
- **Präzise Vermessung** beginnt jedoch **erst danach (LHC+ILC)**
- **Dann erst** haben wir die **richtigen Fragen** nach den **Werten** der Teilchenmassen



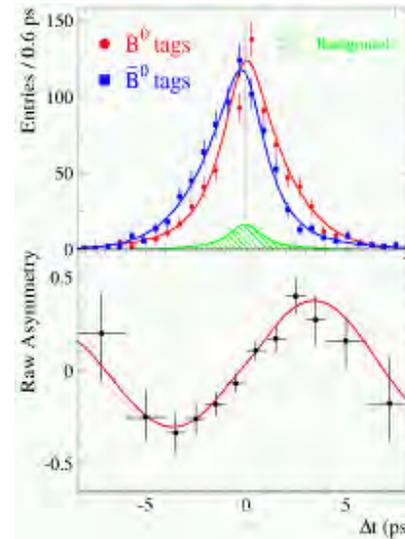
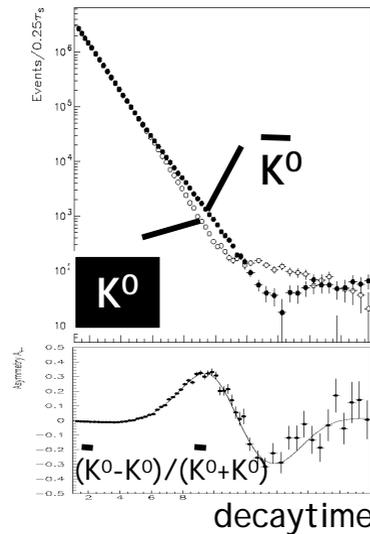


# LHCb: Materie-Antimaterie „CP“ Symmetrie

- Antimaterie = Materie mit umgekehrten Ladungen (C)
  - Genau genommen: auch gespiegelt (P)
- Teilchenphysik Experimente:
  - „CP“ Symmetrie fast immer perfekt
- CP-Verletzung im Standardmodell
  - Quarks: klein, 1 Naturkonstante



■ 1964: s-Quarks 1999: b-Quarks



Ununterscheidbar

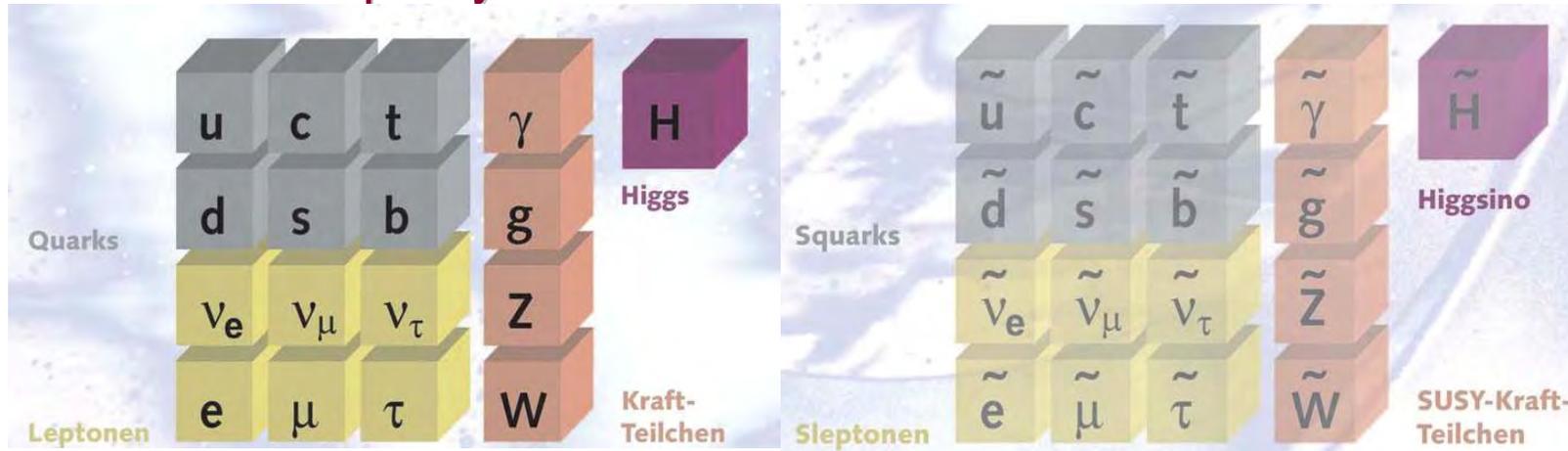
Materie und Antimaterie

Unterscheidbar!

- Bei Weitem nicht groß genug für Kosmologische CP Verletzung (Antimaterie hat „nur“ ca. 99,9999999% der Materie vernichtet)
- Neutrinos: noch unbekannt, 1-3 Naturkonstanten
  - Sind sie der Schlüssel zur Kosmologischen CP Asymmetrie?
- Immer nötig: Teilchenmassen und mind. 3 Familien(!)

# Supersymmetrie

## ■ Existieren Supersymmetrische Teilchen?

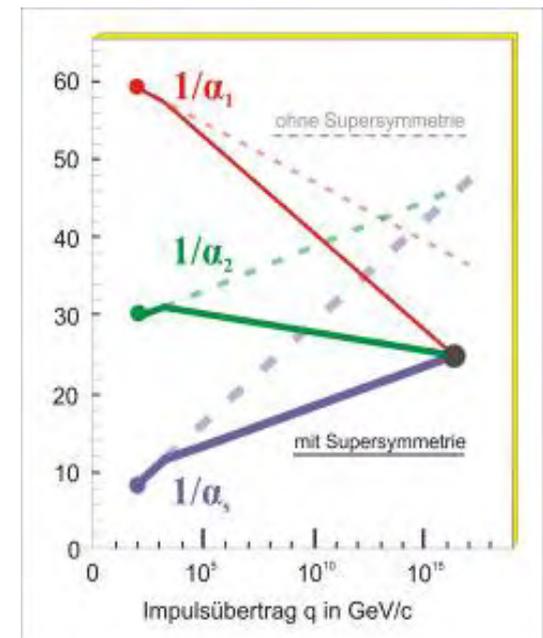


## ■ Würden helfen, mehrere Theoretische Fragen zu lösen

- “Relativ“ niedrige Higgs Masse
- Einbindung der Gravitation
- Vereinigung aller Kopplungen

## ■ Leichtestes SUSY Teilchen stabil = Dunkle Materie (ca 3000 /m<sup>3</sup>)?

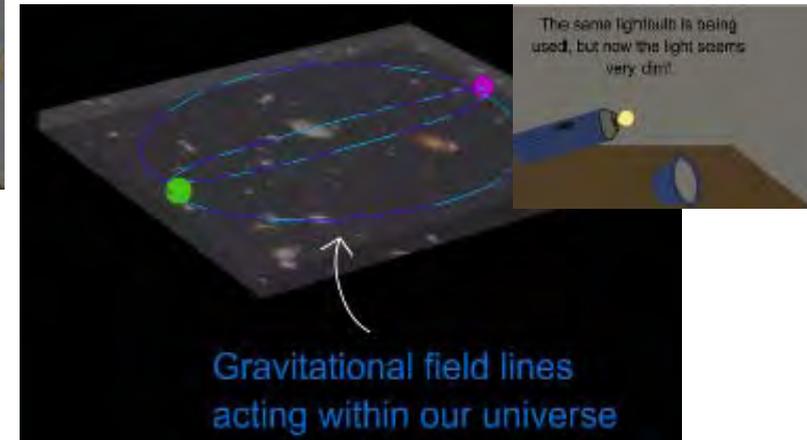
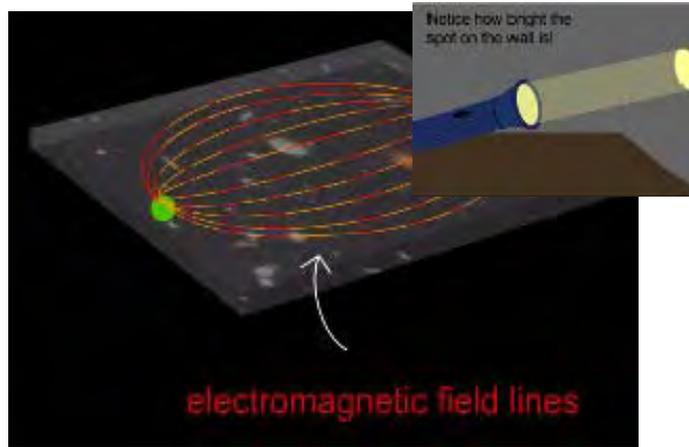
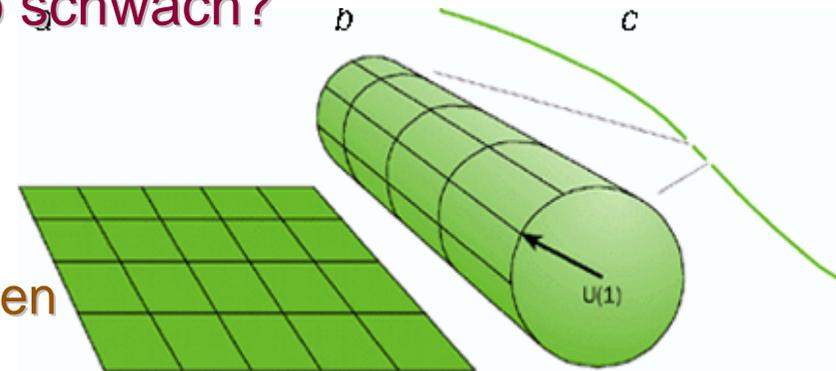
- Direkte Entdeckung möglich bei: ATLAS & CMS
- Indirekter Nachweis über b-Zerfälle: LHCb



# Zusätzliche Dimensionen

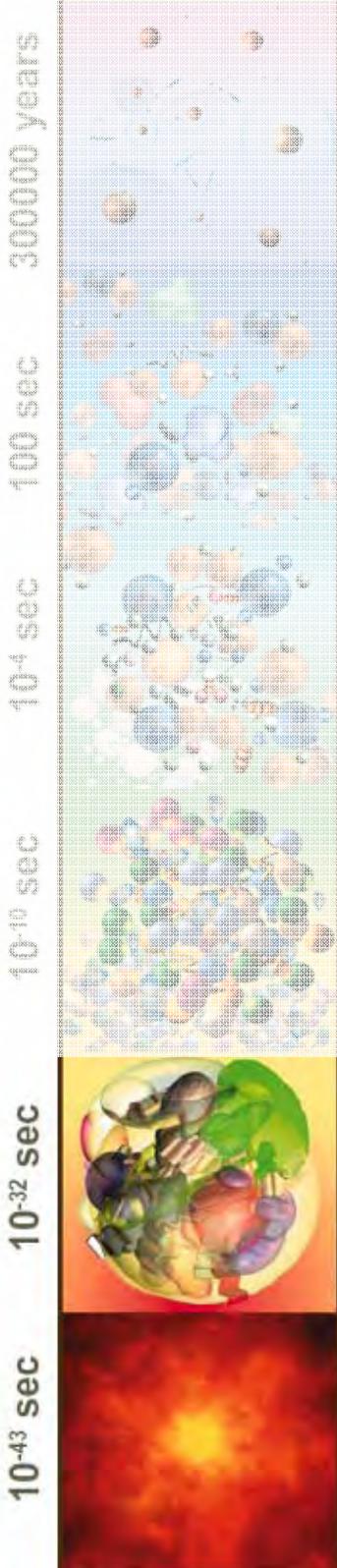
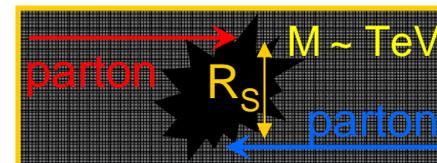
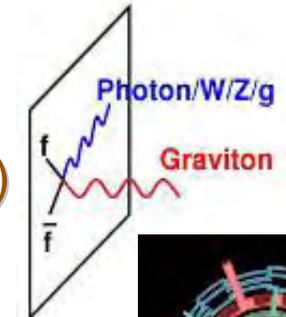
## Warum ist die Gravitation so schwach?

- Idee: zusätzliche kleine Raumdimensionen
- Nur Gravitation spürt sie
- „leckt“ in andere Dimensionen



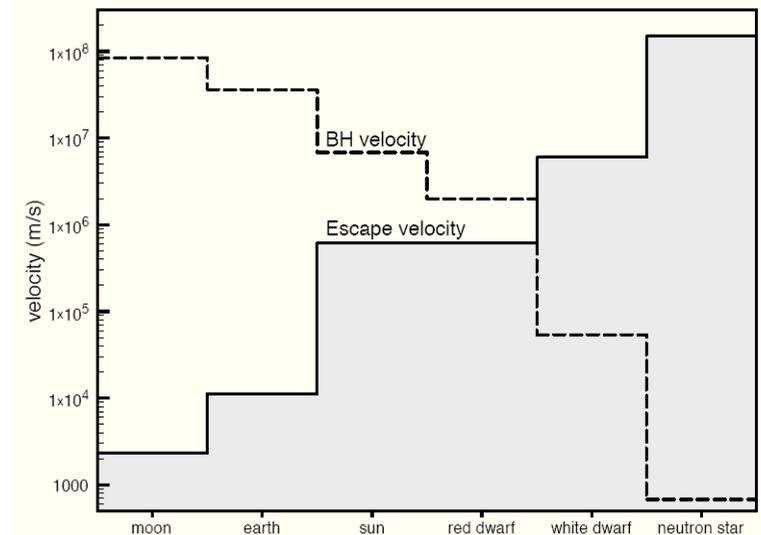
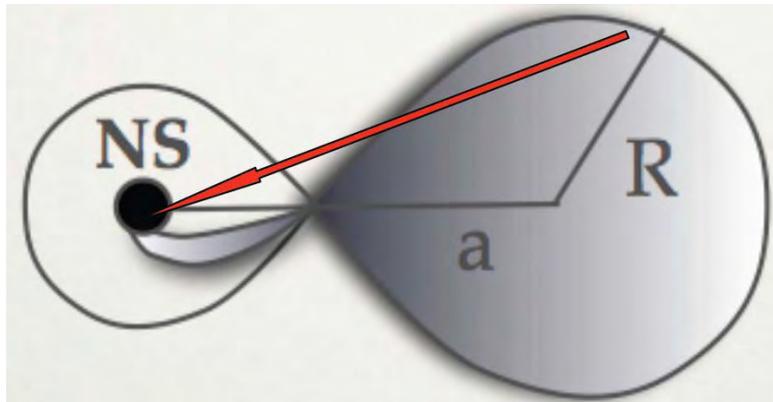
## Beobachtungsmöglichkeiten am LHC:

- Verschwinden von Gravitonen (ATLAS, CMS)
- Kleine Schwarze Löcher (ALICE, ATLAS, CMS)
  - Lebensdauer ca  $10^{-26}$  sec (Hawking Strahlung)
  - Nachweis über Abstrahlung vieler Teilchen



# Sicherheitsaspekt

- Ausführliche Untersuchungen durch LHC Safety Assessment Group (LSAG)  
<http://environmental-impact.web.cern.ch/environmental-impact/Objects/LHCSafety/LSAGSummaryReport2008-de.pdf>
- Wesentliche Argumente:
  - Existenz mikroskopischer schwarzer Löcher hochspekulativ
  - Wenn existent, dann schon von Natur aus, aber sicher instabil
  - Selbst wenn stabil (würde fundamentale Gesetze verletzen)
    - Völlig vernachlässigbare "Saugwirkung" bei mehreren Extra Dimensionen
    - Selbst wenn nur eine Extra-Dimension
      - Elektrisch geladen -> Einfang in Erde (ausgeschlossen: Erde existiert noch)
      - Selbst wenn nur elektrisch neutral (nicht erklärbar)
        - **Einfang in Weißen Zwergen und Neutronensternen (experimentell aus deren Lebensdauer > Millionen Jahre ausgeschlossen)**





„... erforschen, was die Welt im Innersten zusammenhält“

## Wissenschaftskommunikation: Internationale Teilchenphysik Masterclasses

### Internationales Programm für Schüler (16-18)

Einführung in Teilchenphysik

Arbeiten und Messen an echten Daten als „Forscher für einen Tag“

### Zentral koordiniert in Dresden

für über 5000 Schüler

80 Institute

22 Länder (incl. USA, Brasilien, Südafrika)

### Internationale Videokonferenz in English

Kombination, Diskussion, Fragen

<http://www.physicsmasterclasses.org>



### AKTUELL

#### Forscher für einen Tag

Mehr als 4000 Schülerinnen und Schüler weltweit gingen im Rahmen der „Hands on Particle Physics Masterclasses“ den Geheimnissen der Teilchenphysik auf den Grund.

Später werde ich einmal Physiker – das ist von Jugendlichen eher selten auf die Frage nach dem Berufswunsch zu hören, und doch trifft es genau das, was die Teilnehmerinnen und Teilnehmer der „Hands on Particle Physics Masterclasses“<sup>(1)</sup> die Ende März zum dritten Mal weltweit stattgefunden haben, oftmals geäußert haben. Dieser Tag, an dem die Schüler in den Forscheralltag hineinschnuppern und mit echten Messdaten arbeiten durften, wird ihnen wohl noch lange im Gedächtnis bleiben, da ist sich Michael Kobel von der TU Dresden, der die Masterclasses koordiniert hat, sicher.



In Dresden nahmen 130 Schülerinnen und Schüler an den Masterclasses teil und werteten mit viel Engagement und Begeisterung Ergebnisse vom LEP-Collider aus.

## Rolle der Wissenschaftler

→ Einführungsvorträge

→ Betreuung der Messungen



„... erforschen, was die Welt im Innersten zusammenhält“

## Planung für ein neues Netzwerk “Teilchenwelt”

**Nationales Network von Schüler/inne/n, Lehrkräften, und Wissenschaftlern für Teilchenphysik im physikalischen und fachübergreifenden Kontext mit Beratung und Beteiligung von Wissenschaftlern**

### 4 Zweige (bundesweit)

Nationale „Masterclasses“ mit LEP Z-Zerfällen

Experimente zur Kosmischen Strahlung

Besuche am CERN (incl. Projektwochen, vertiefte Lehrerfortbildung)

Entwicklung von Lehrmaterial

### Programm für Lehrkräfte und Schüler mit 4 Vertiefungsstufen

Grundprogramm

Vertiefungsprogramm

Aktive „Teilchenwelt“ Mitarbeit

Kosmische Strahlung

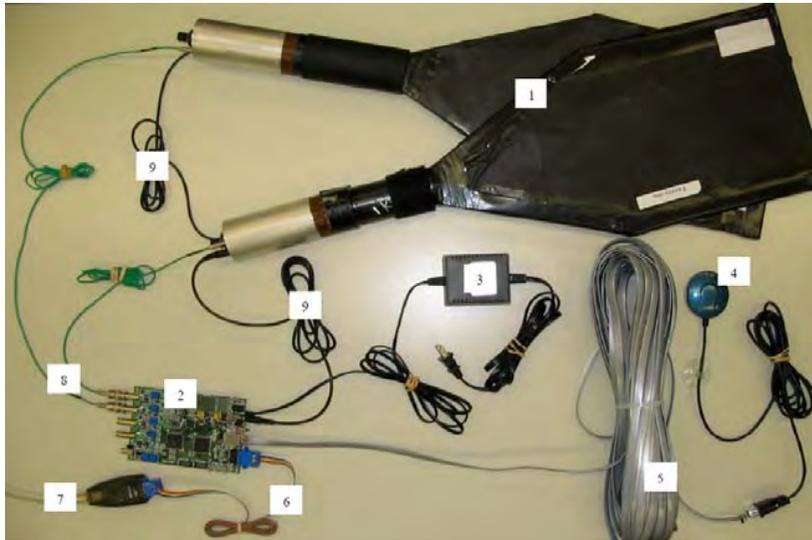
Unterrichtsmaterialien

Projektwochen und Workshops

Forschungsmitarbeit (Abordnungen, Besondere Lernleistungen)



„... erforschen, was die Welt im Innersten zusammenhält“



### Fermilab Cosmic-Trigger-Experiment

- Ratenmessung
- Lebensdauermessung
- Strahlungsmessung

### Kamiokande-Experiment

Raten- und Lebensdauermessungen von Myonen



### Cosmic-Trigger-Hodoskop

- Ratenmessung kosmischer Strahlung in Abhängigkeit von Wetter und Sonne
- Datenauswertung über Internet

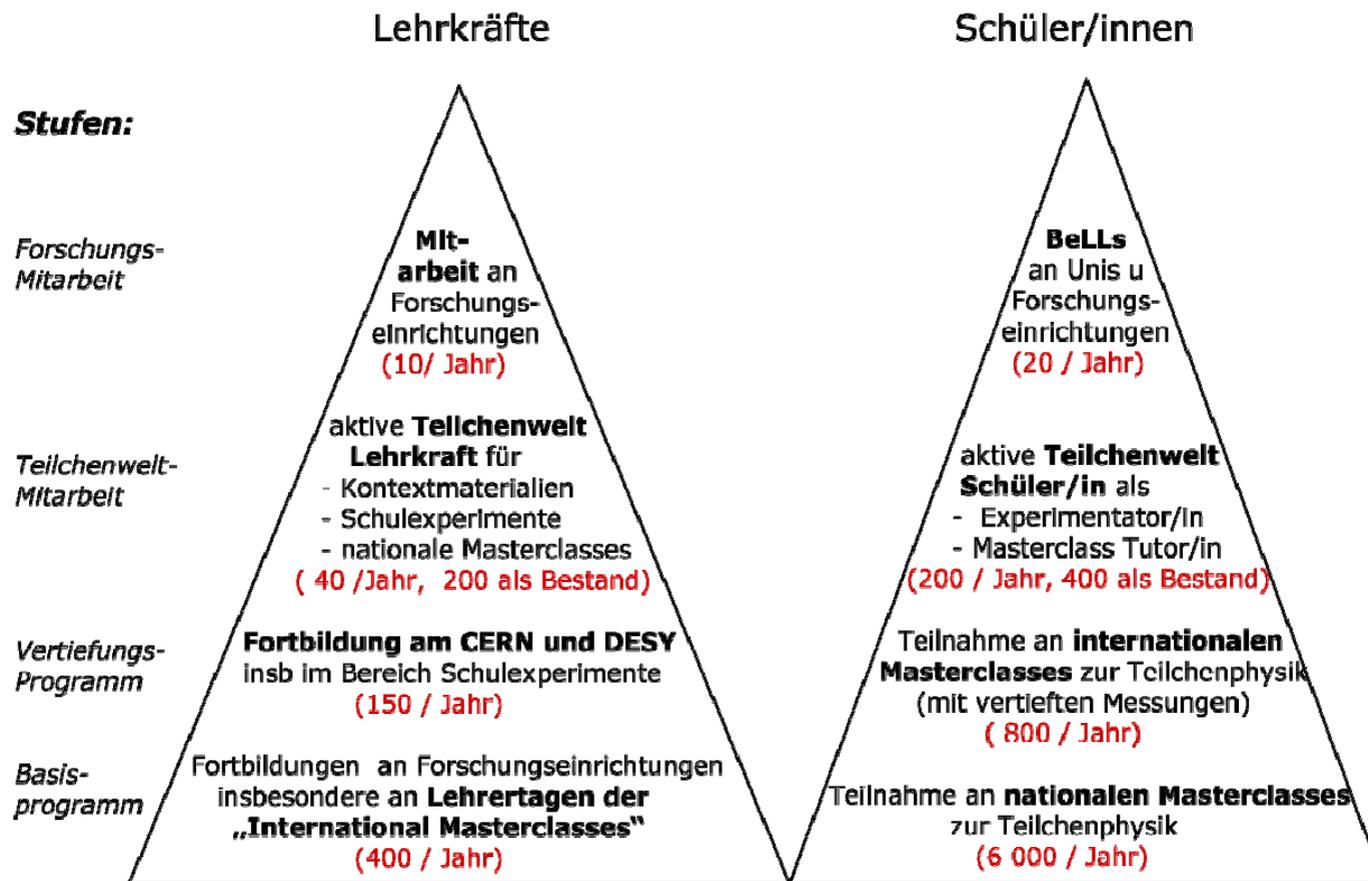
Quelle: DESY, Adelheid Sommer, Mike Walter



„... erforschen, was die Welt im Innersten zusammenhält“

## Netzwerk Teilchenphysik

Deutschlandweite Bildungs-Initiative ab ~2009, angekündigt von Frau Ministerin Schavan bei Eröffnung der Ausstellung „Weltmaschine“



(BeLL: Besondere Lernleistung als außerschulische Prüfungskomponente)