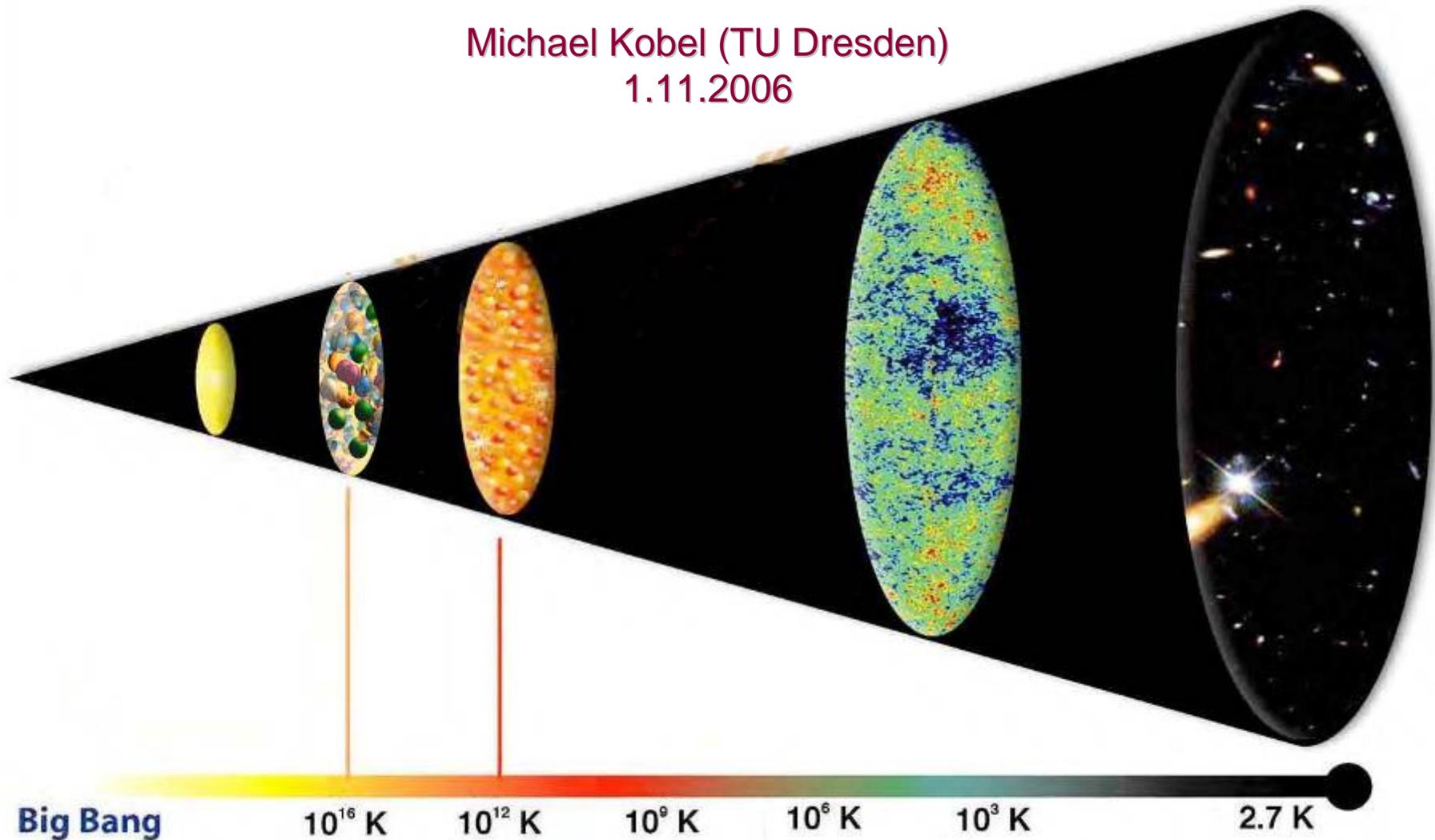


Der Large Hadron Collider – internationaler Vorstoß in unbekanntes Neuland des Mikro- und des Makrokosmos

Michael Kobel (TU Dresden)
1.11.2006



Die Teilchen des Standardmodells

- 12 Bausteine und ihre Antiteilchen



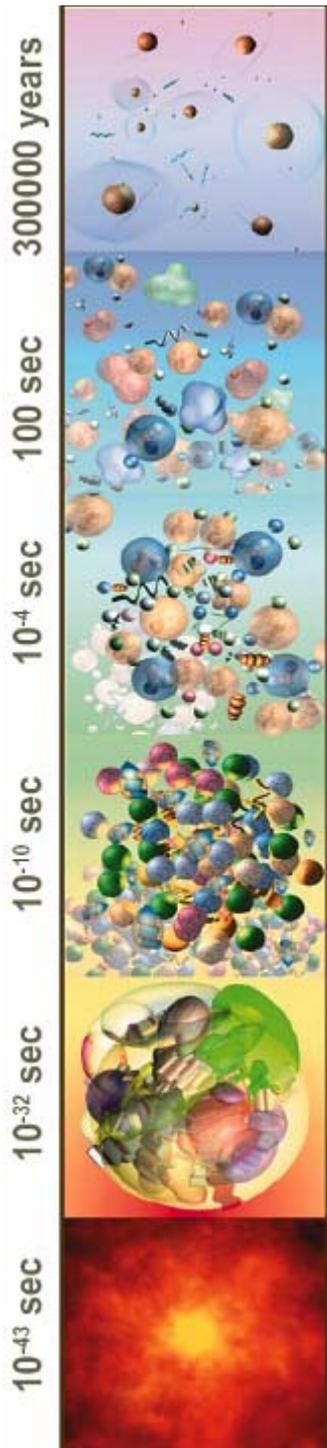
- 4 fundamentale Wechselwirkungen (WW)

Gravitation, Elektromagnetismus, schwache, starke WW

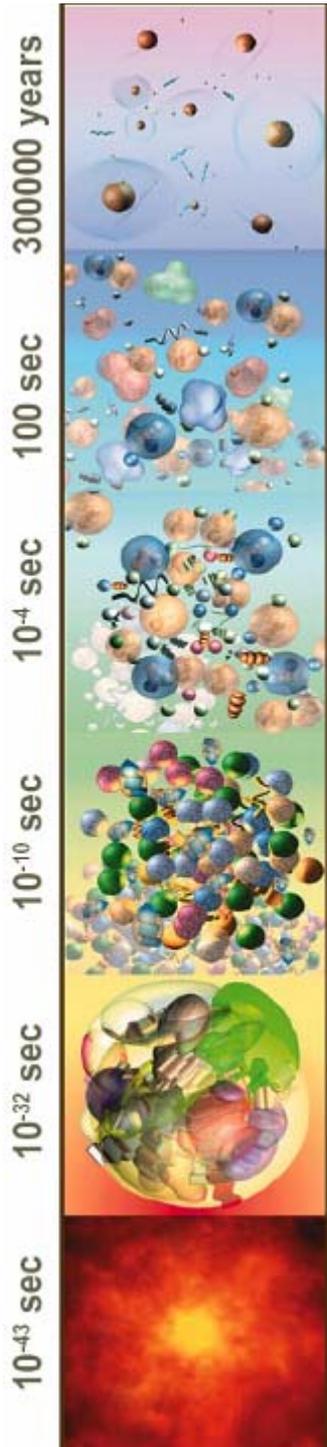


- Produzieren, binden und vernichten Teilchen mit Hilfe des Austauschs von Botenteilchen

- Graviton, Photon, W- und Z-Boson, Gluonen



Theoretische Grundlagen



■ 3 Familien von Elementarteilchen

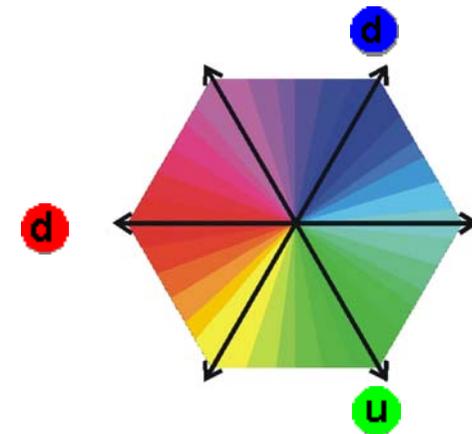
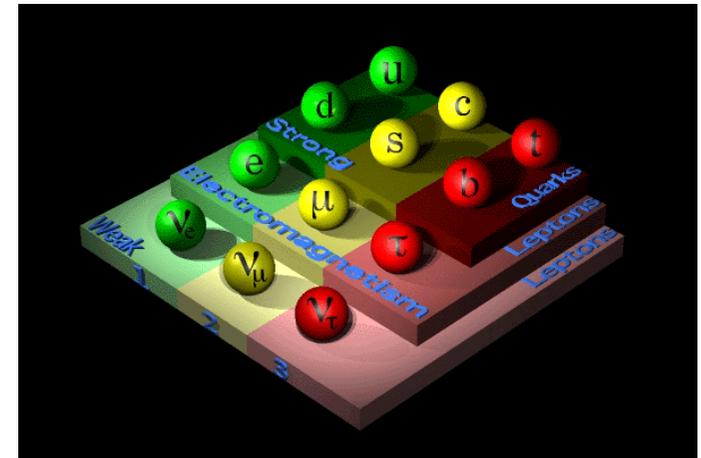
- Stabile Materie (p, n, e) nur aus erster Familie
- **Warum dann drei ?**

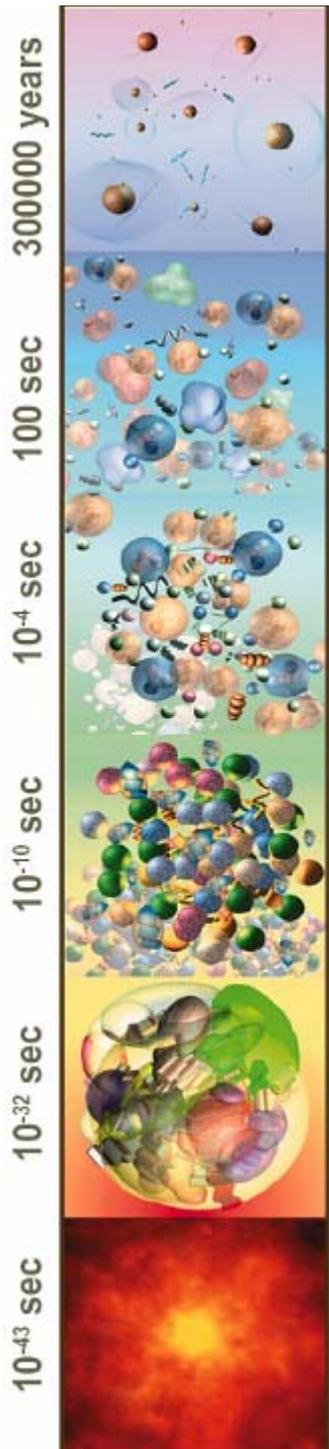
■ Alle Wechselwirkungen beruhen auf Ladungssymmetrien

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

■ Weitere Symmetrien ?

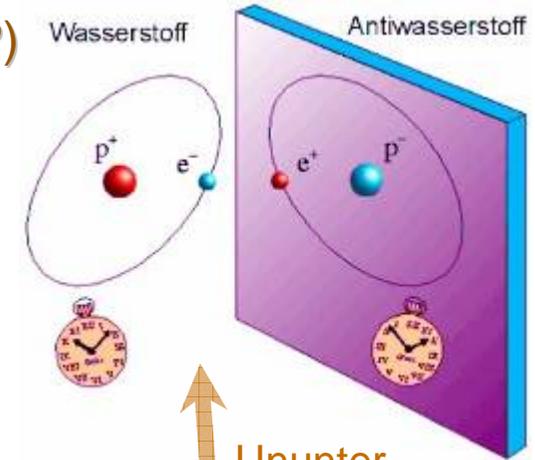
- z.B: **Supersymmetrie „SUSY“** zwischen Baustein- und Botenteilchen?



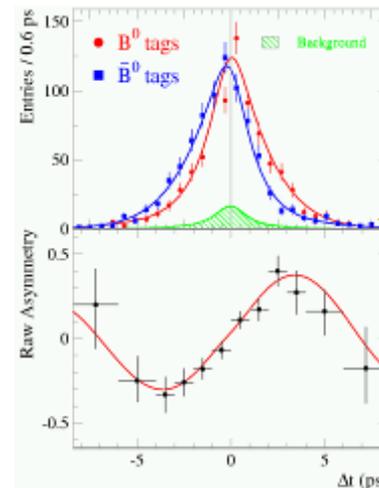
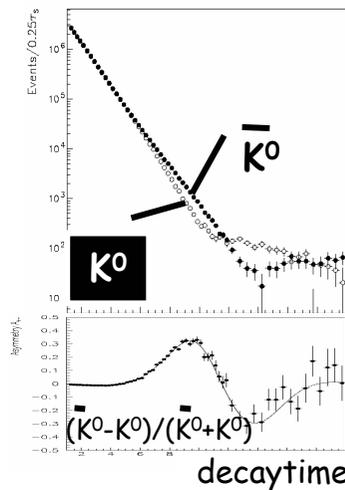


Materie-Antimaterie „CP“ Symmetrie

- 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

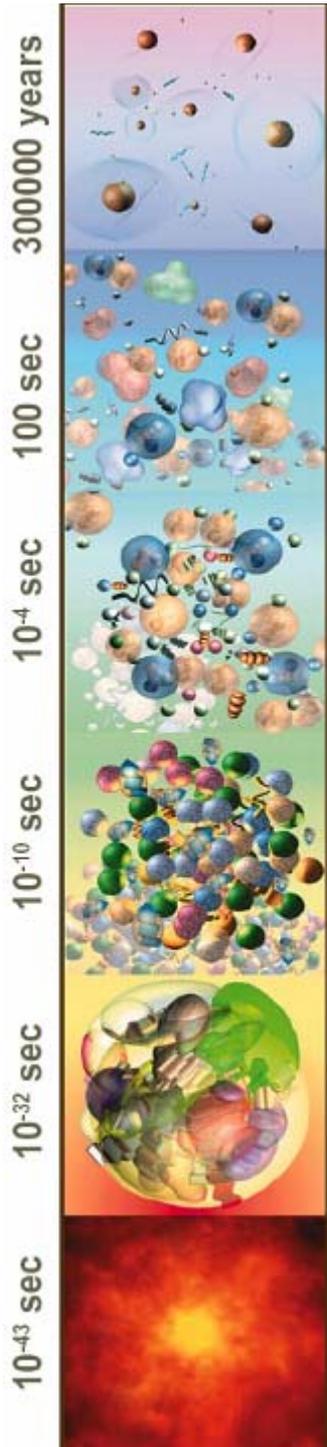
Materie und Antimaterie

Unterscheidbar!

- Bei Weitem nicht groß genug für Kosmologische CP Verletzung
- Neutrinos: noch unbekannt, 1-3 Naturkonstanten
 - Sind sie der Schlüssel zur Kosmologischen CP Asymmetrie?
- Immer nötig: Teilchenmassen und mind. 3 Familien(!)

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: $\text{Pb}+\text{Pb} \rightarrow$ Quark-Gluon „Plasma“?
 - Die „Petersilie“: Nachstellen in Einzelprozessen
 ATLAS, CMS, LHCb: $p+p \rightarrow b, t, W, \text{Higgs? SUSY?}$



LHC
Pb+Pb

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

Theorien

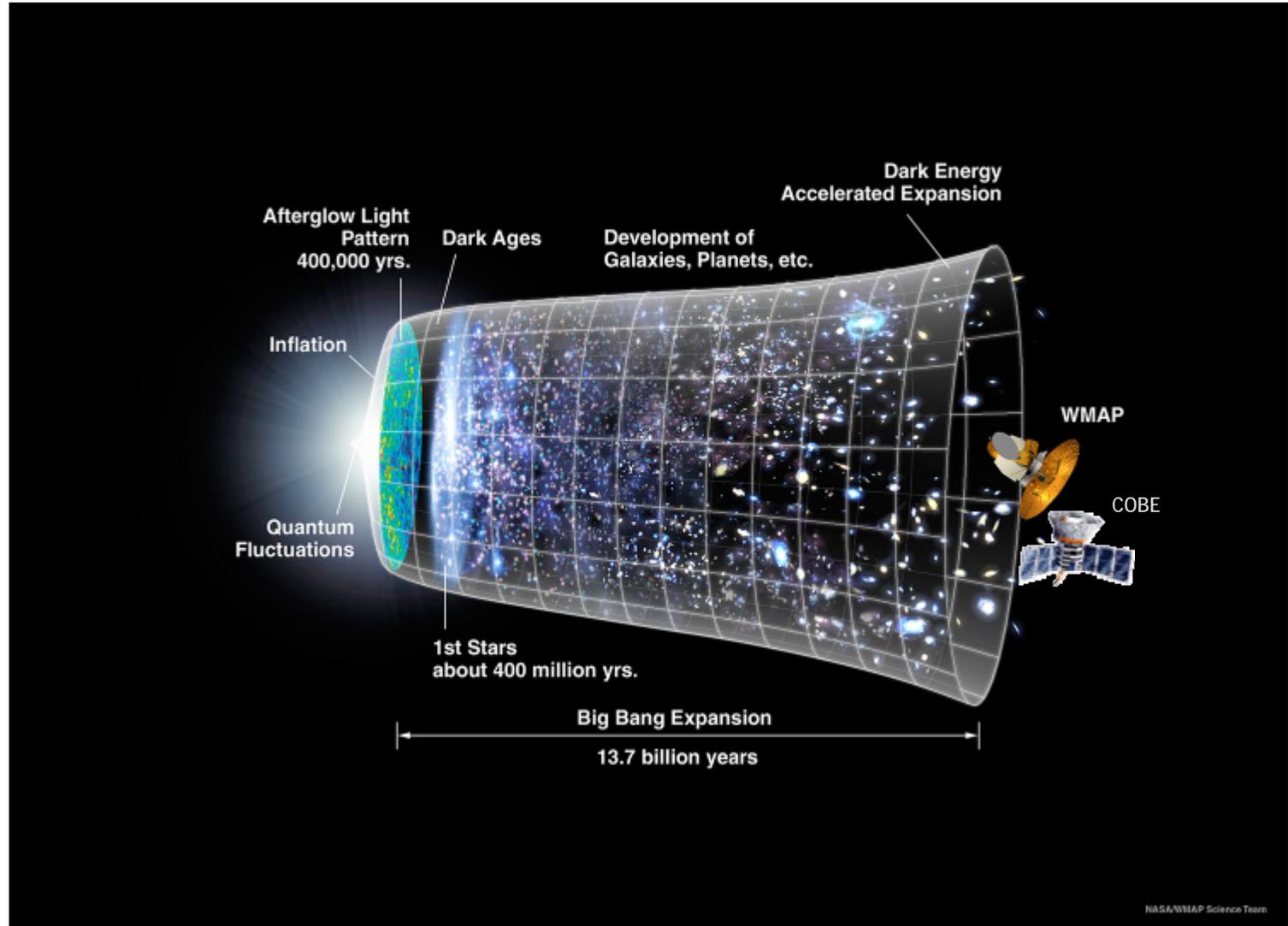
LHC
(p+p)

gemessene Einzelprozesse
(2006)

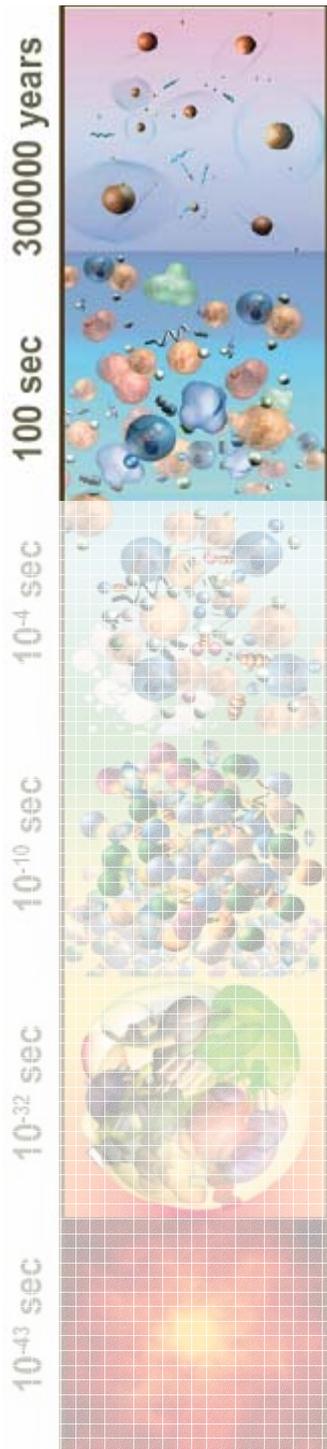


Nobelpreis 2006: Mather & Smoot (COBE)

- Schwankungen im Mikrowellenhintergrund $T=(2,73\pm 0,00002)K$
 - Entsprechen winzigen Dichteschwankungen → Strukturbildung



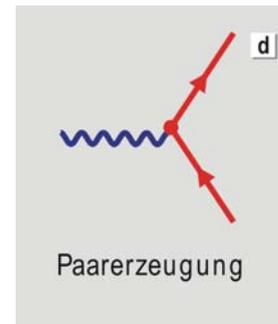
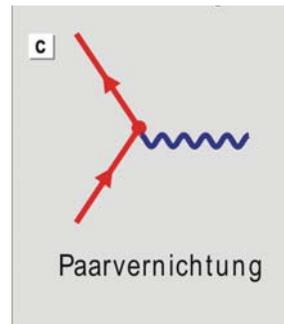
Ursprung des Mikrowellenhintergrunds



■ Materie-Antimaterie Vernichtung in Photonen

- Ungehinderte Ausbreitung erst nach 300,000 Jahren

- Vor der Vernichtung bei ~100 sec: 50,0000001% Materie, 49,9999999% Antimaterie



Zeit

■ Ein winziger (10^{-9}) Überschuss an Materie blieb übrig

- Woher kam diese „CP“ Asymmetrie und Wann?

Der Klang des Universums

■ „Obertöne“ charakterisieren Zusammensetzung

- atomare Materie (p,n,e) $\Omega_B = 0,05$
dämpft den ersten, verstärkt den zweiten Oberton

- Sterne, Planeten, Gaswolken, Schwarze Löcher,...

- nichtatomare „Dunkle“ Materie (ν, \dots) $\Omega_{DM} = 0,25$
verstärkt den zweiten Oberton

- Ungebundene Elementarteilchen, schwach wechselwirkend

- **Unbekannt (Neutrinos 10-100 Mal zu leicht!)**

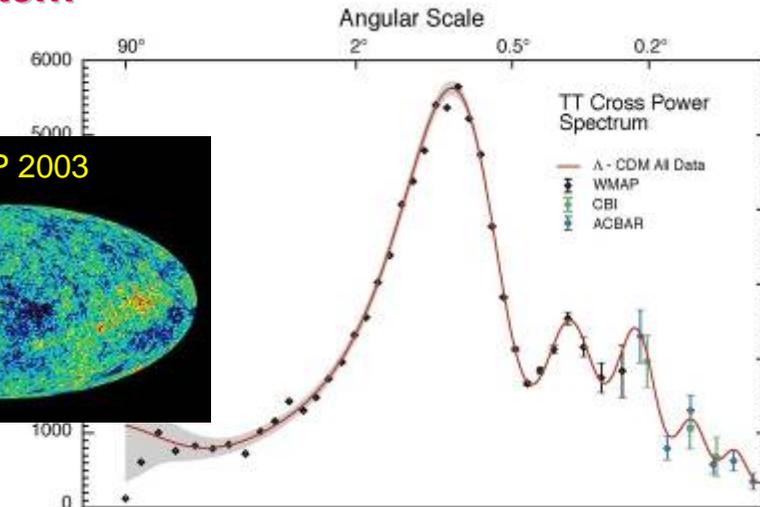
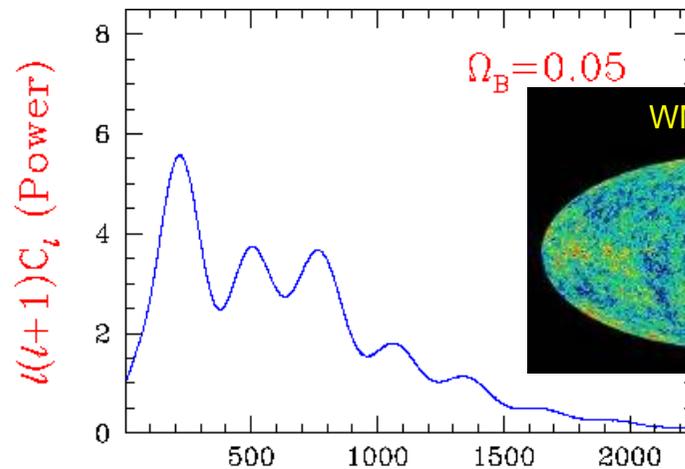
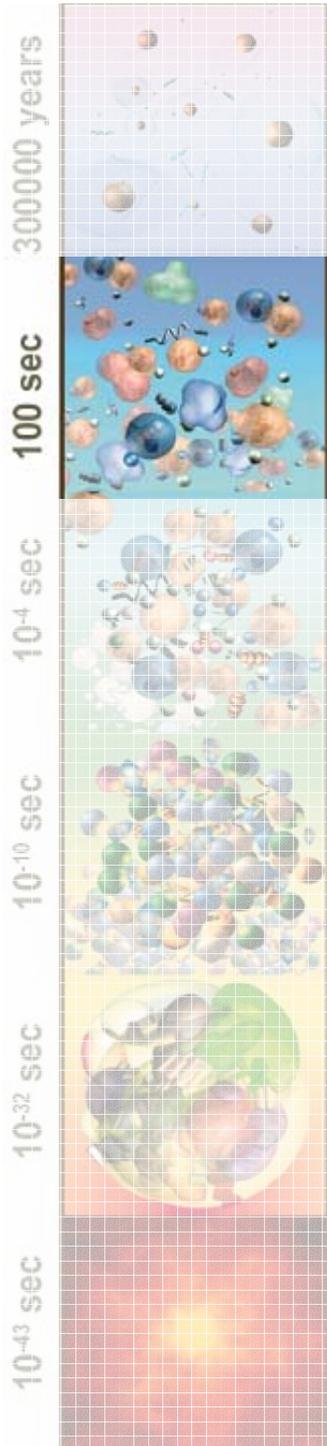
- unverdünnbare „Dunkle“ Energie
nur im Grundton

- **Unbekannt, „Vakuumentnergie“,
kosmologische Konstante...**

$$\Omega_{VAC} = 0,70$$

Flaches Universum:

$$\Omega = \Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_{VAC} = 1,00$$



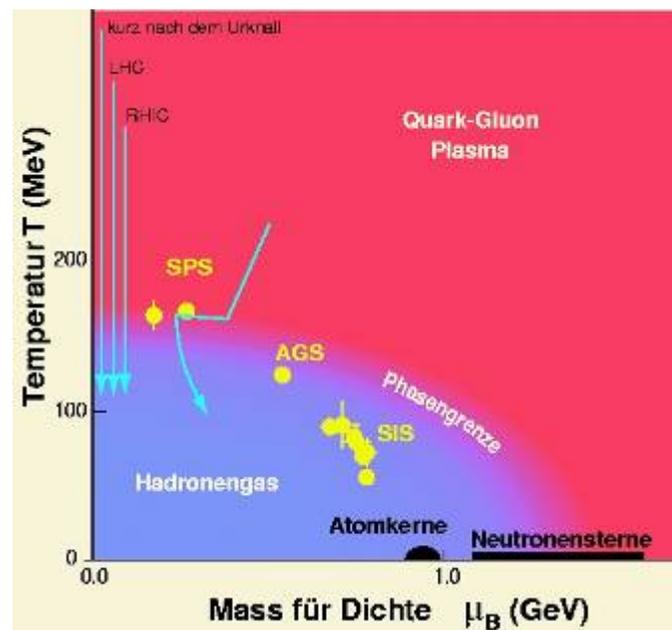
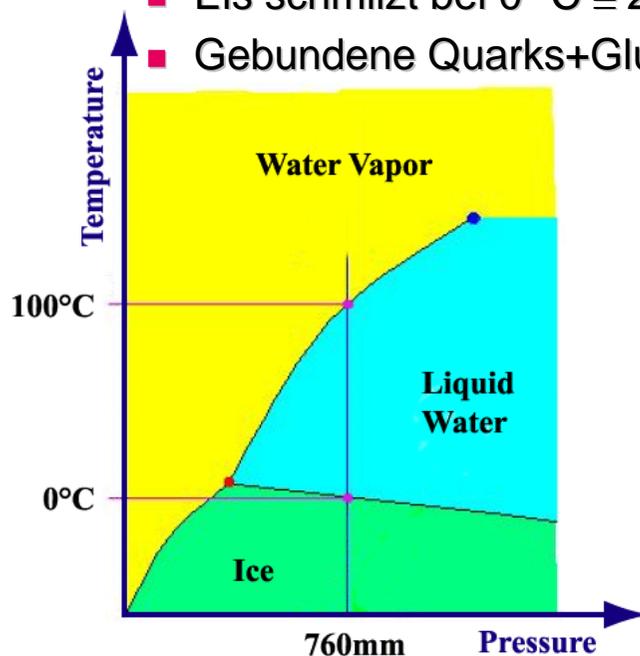
ALICE kocht die Ursuppe

■ Untersuchung des Quark-Gluon Plasmas

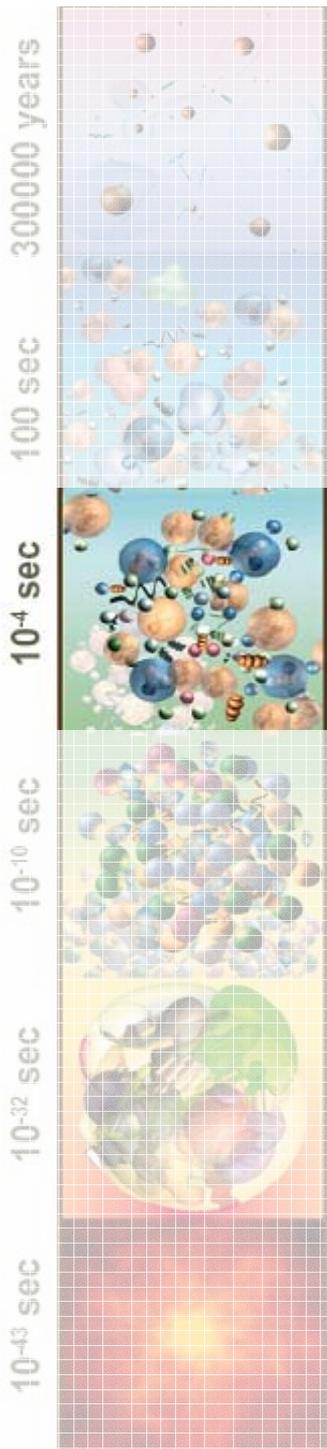
- Neuer Zustand von Materie: „flüssige(?)“ Quarks und Gluonen

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

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

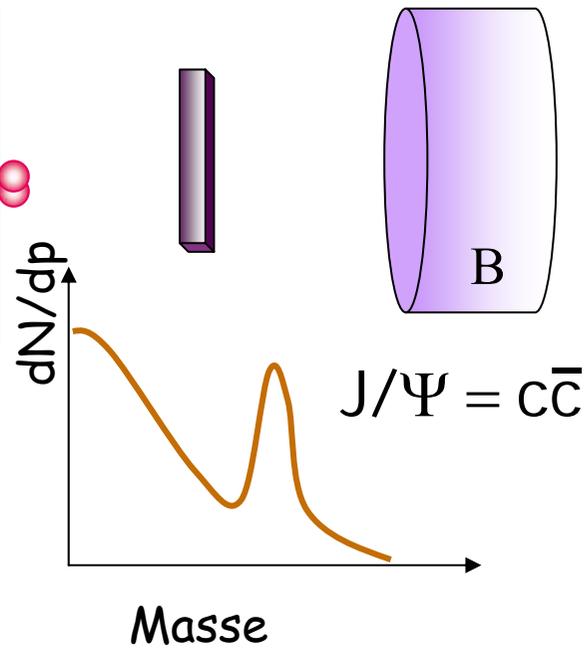
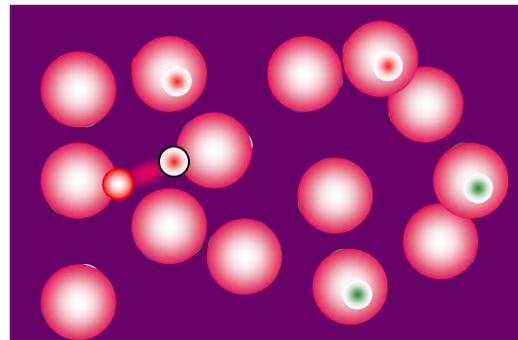
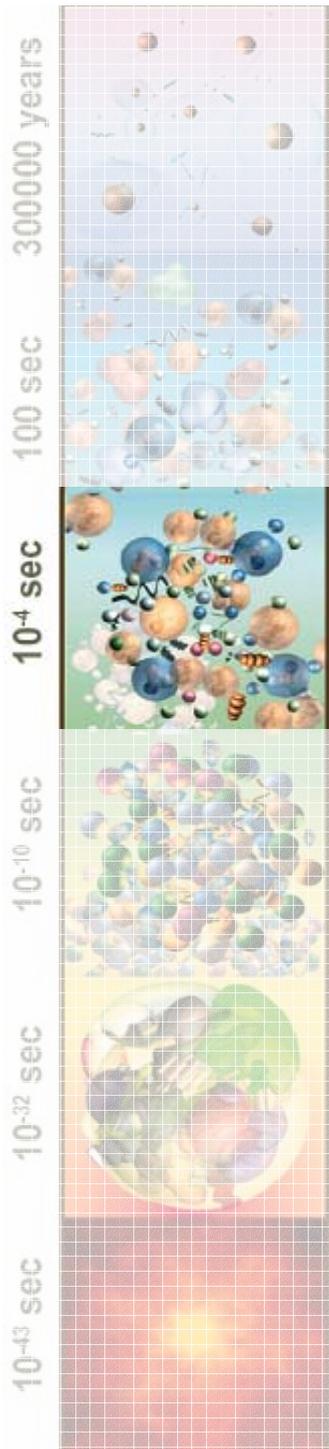


- Beschleunige und Kollidiere „Hadronen“-Eis, um „Quark-Gluon“-Wasser herzustellen (erreiche > 200.000 fache Sonneninnentemperatur)
- ALICE wird Eigenschaften dieses neuen Materiezustand untersuchen (Zustandsgleichung, Brechungsindex, Suszeptibilität, Viskosität, Wärmeleitfähigkeit, Schallgeschwindigkeit,...)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



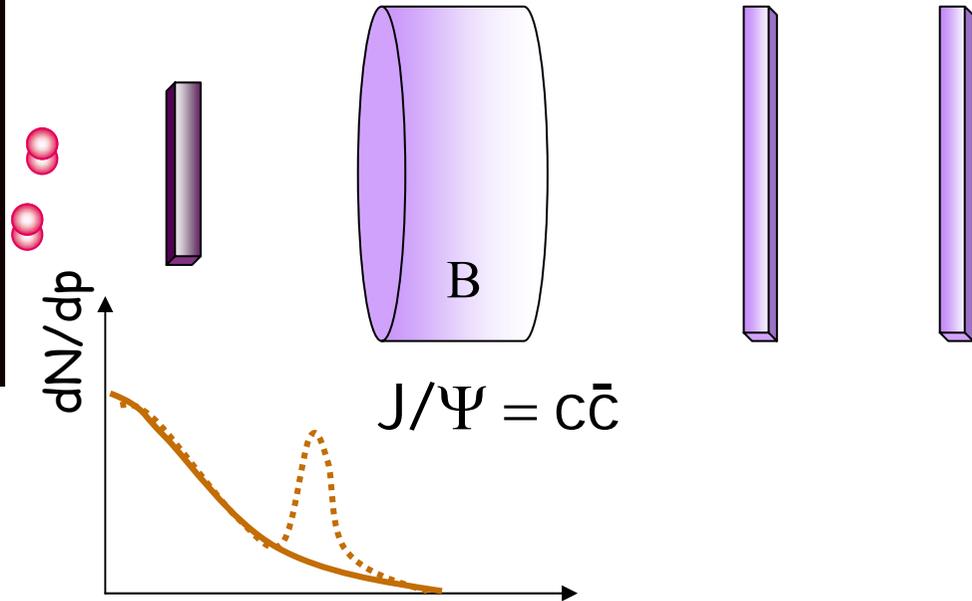
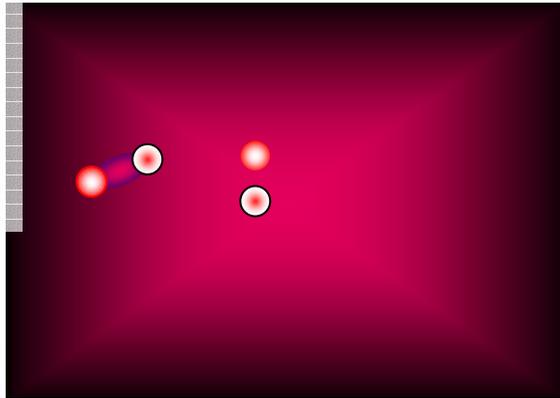
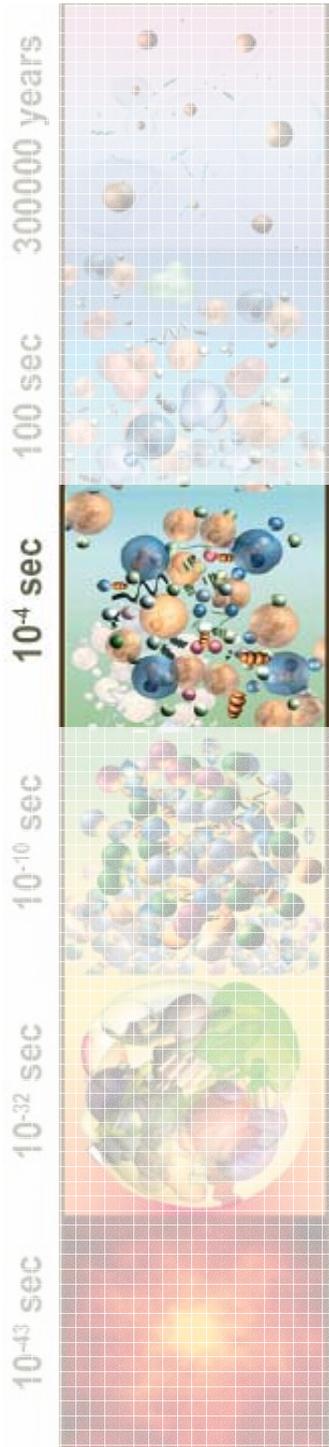
Experimentelle Umsetzung

- Normale Materie: schwere Quark-Antiquark Zustände

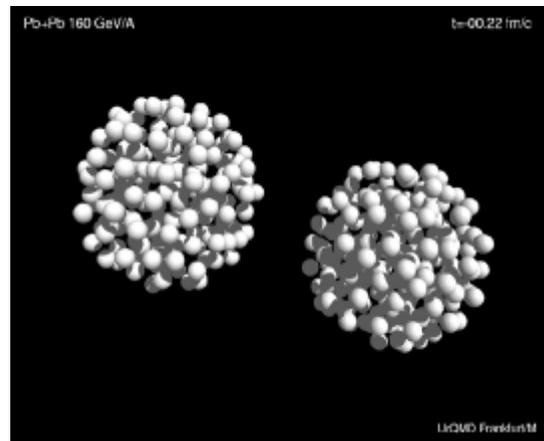


Experimentelle Umsetzung

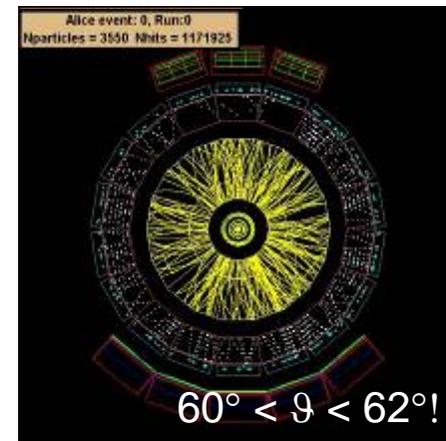
- Unterdrückung von schweren Quark-Antiquark Zuständen...
...durch Schmelzen innerhalb des Plasmas



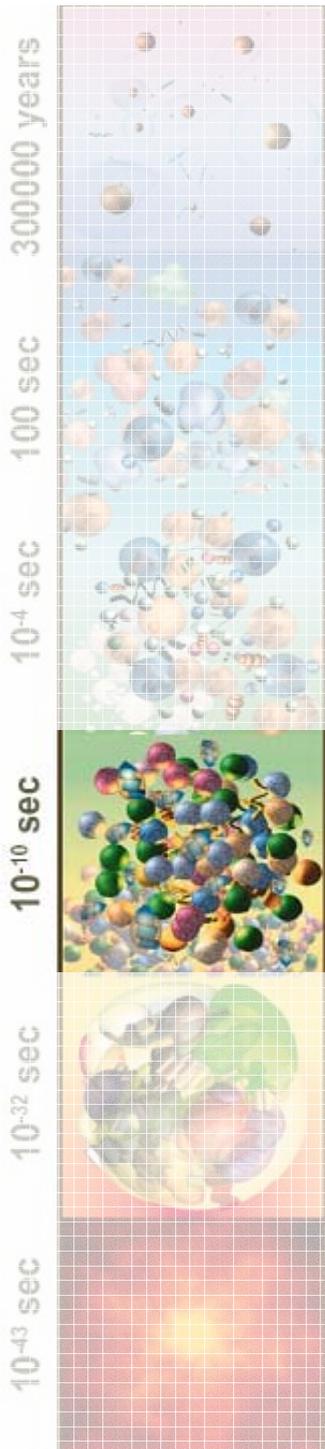
- Pb-Pb Kollision:



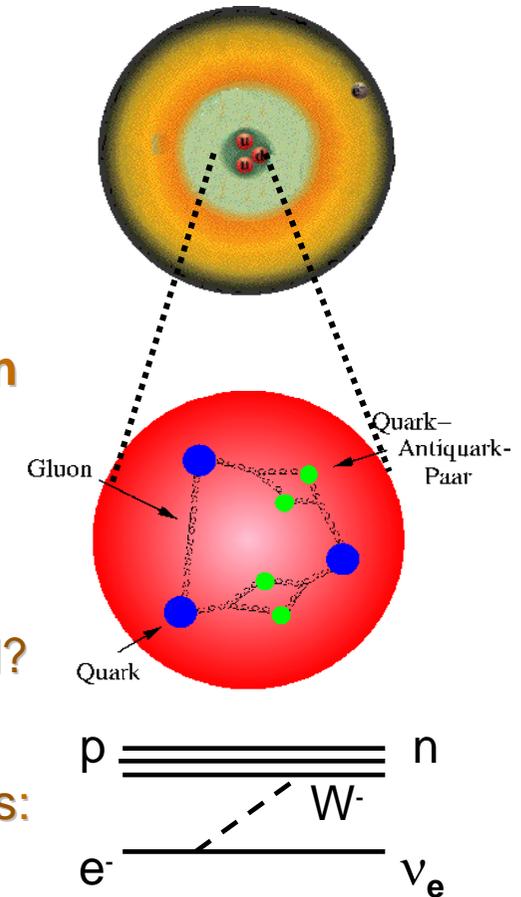
Masse



Die Bedeutung der Teilchenmassen

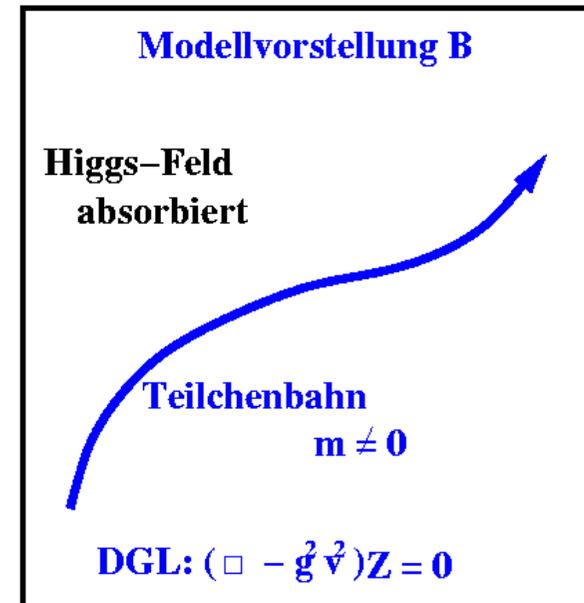
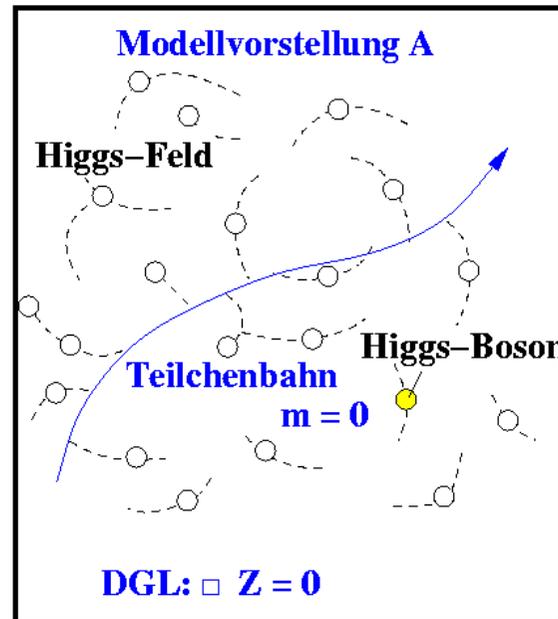
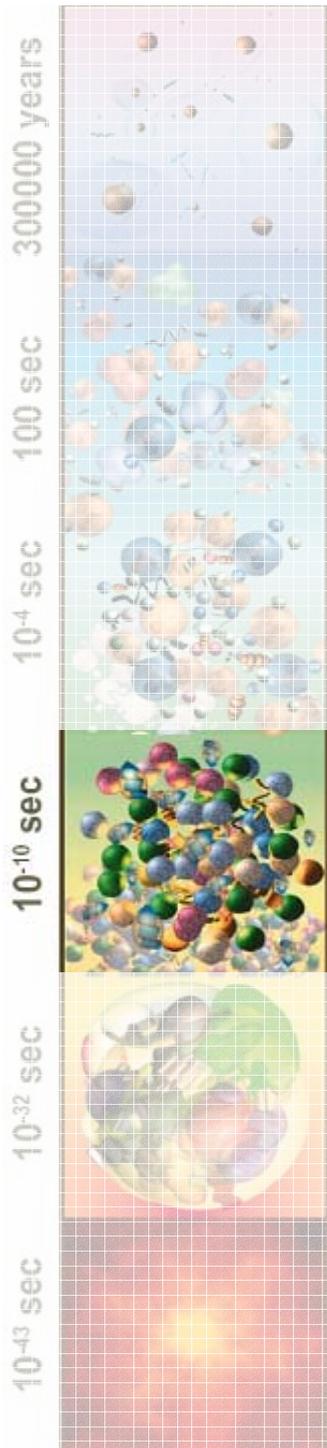


- Die Masse der Atome kommt
 - nur ~1% aus Ruhemasse der Bausteine
 - 99% aus Energie der Quarkbindung
- Ändern von m_u , m_d oder m_e hätte
 - kaum Effekt auf makroskopische **Massen**
 - kaum Effekt auf Ω_B im Universum
 - riesigen Effekt auf **Verhalten** der Materie
- Erniedrige m_e auf $0.025 \text{ MeV}/c^2$
 - Leben: 30m große Kaltblütler in Grönland?
- 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, γ, ν)



Die Frage nach dem Massenmechanismus

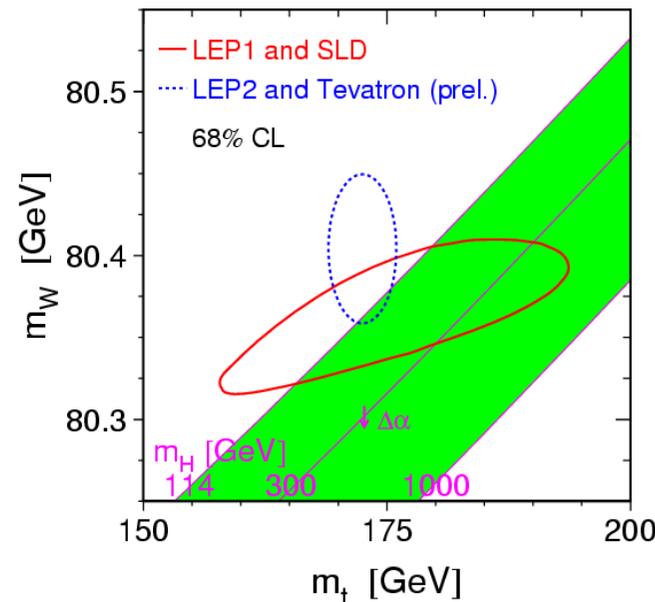
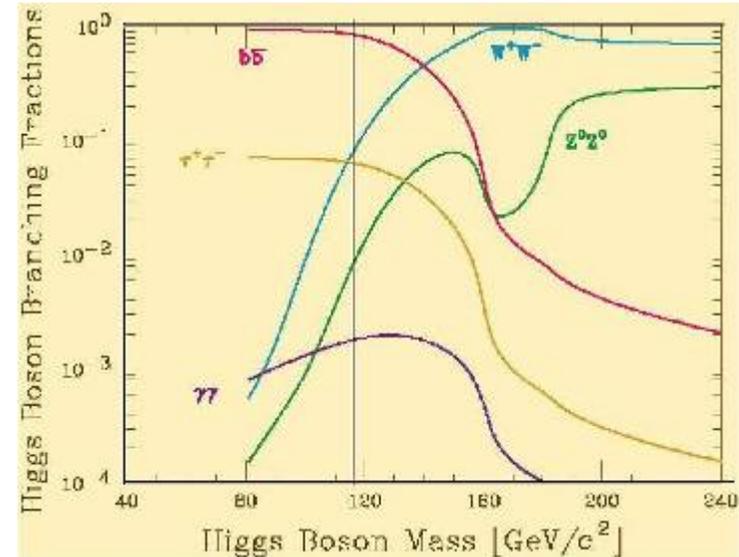
- Entstanden Teilchenmassen wirklich erst nach 10^{-10} sec?
- Entsteht Masse wirklich durch Kopplung an Hintergrundfeld?



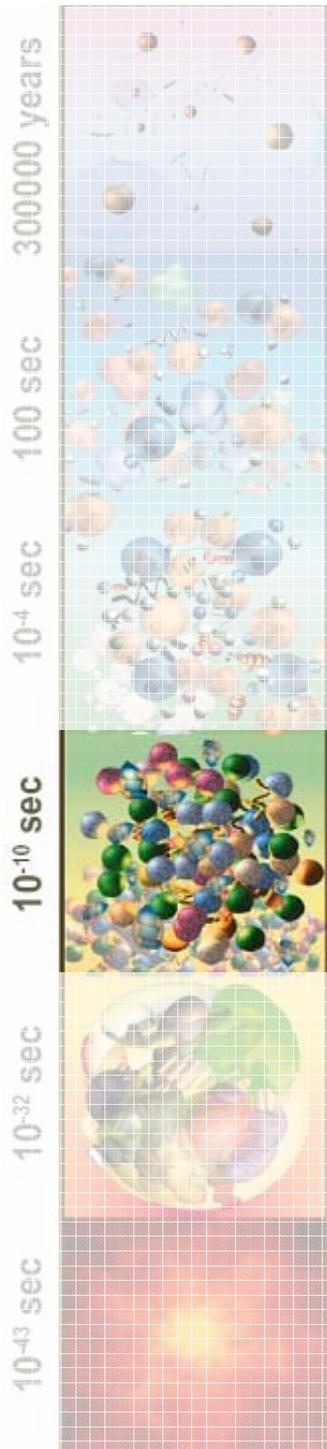
- Dann müssen Teilchen auch Hintergrundfeld anregen
Anregung = Higgs Boson (=Beweis des Hintergrundfelds)
 - Higgs Boson Erzeugung am besten durch Z, W, t, oder b
Je massiver (und hochenergetischer), umso besser
- Bei mehreren (z.B. zwei) Higgsfeldern
auch mehrere (z.B. fünf) Higgs Bosonen

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!**
 - Außer M_W / M_Z Verhältnis

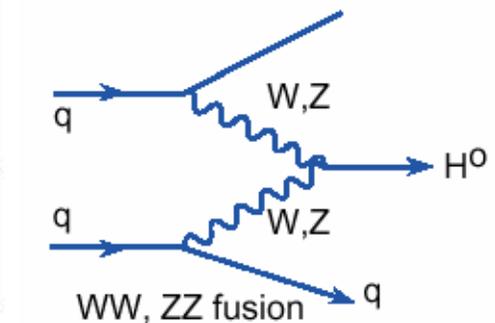
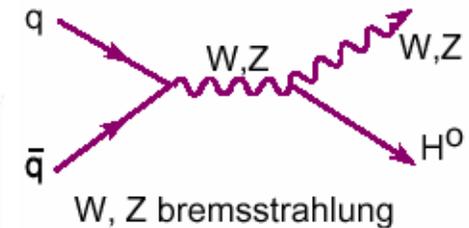
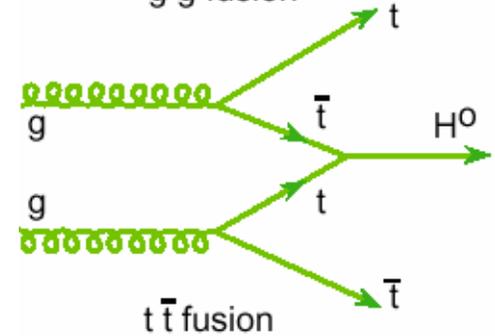
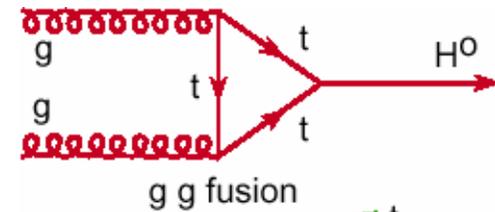
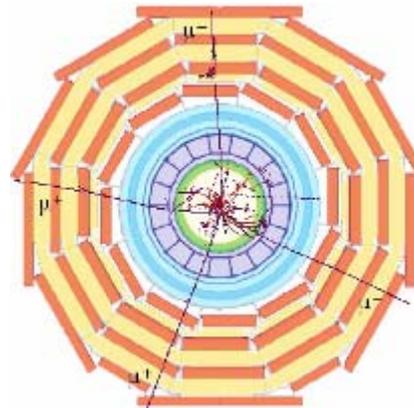
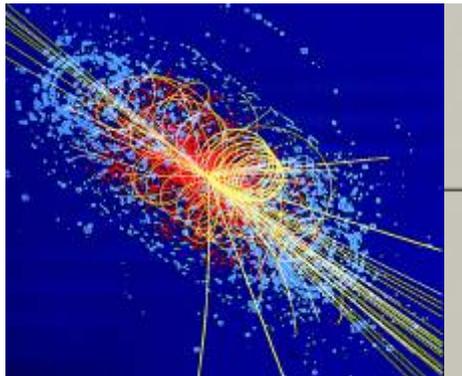


- Standardmodell Vorhersage:
 $M_W = (80.36 \pm 0.02) \text{ GeV}$
- Direkte Messung:
 $M_W = (80.40 \pm 0.03) \text{ GeV}$
- Differenz:
 $\Delta = (0.04 \pm 0.04) \text{ GeV}$
- Fit der SM Higgs Masse:
 $M_H = (100^{+40}_{-30}) \text{ GeV}$

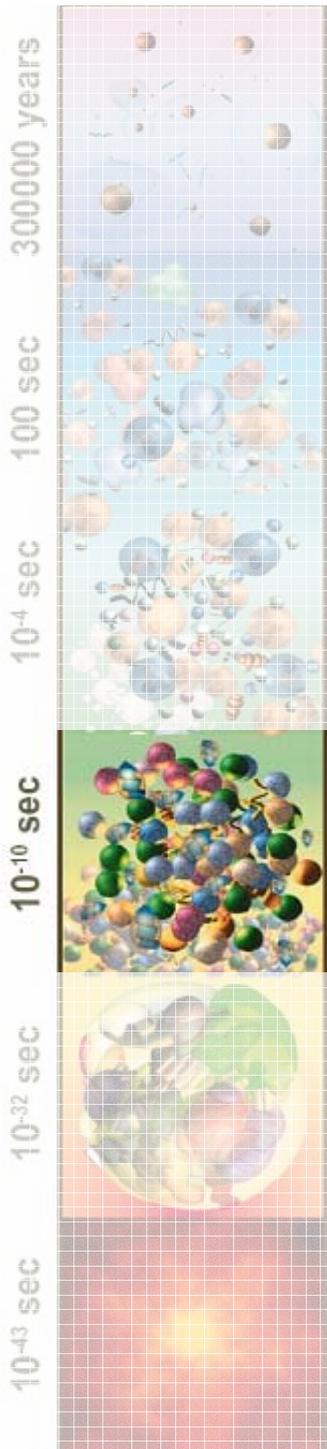
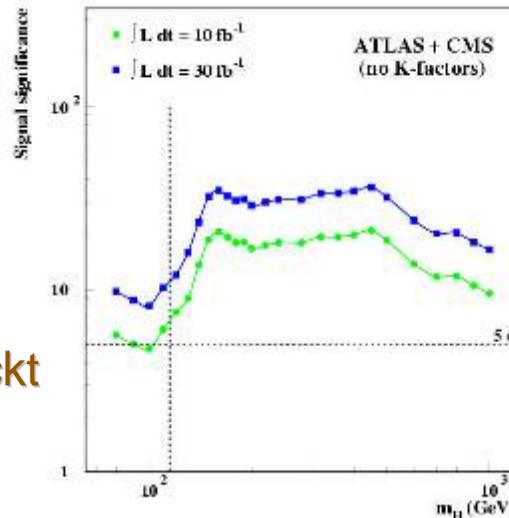


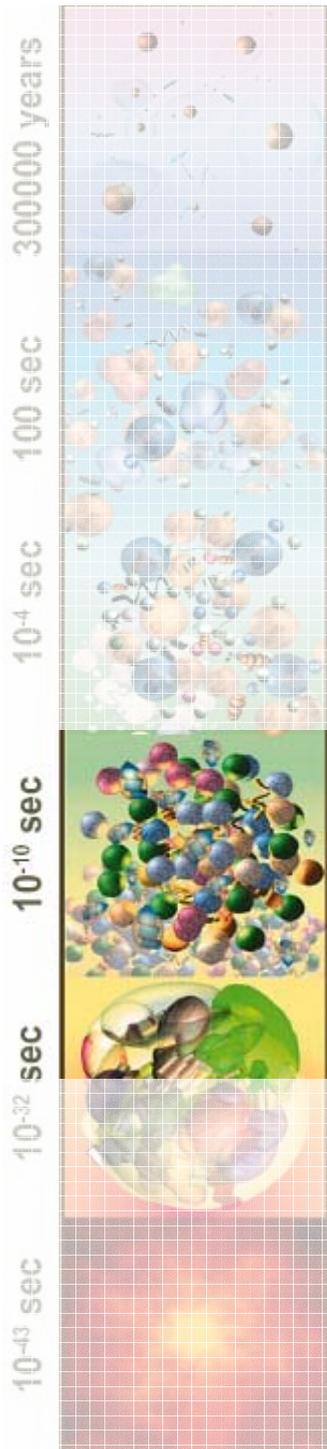
Higgs Suche bei ATLAS und CMS

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



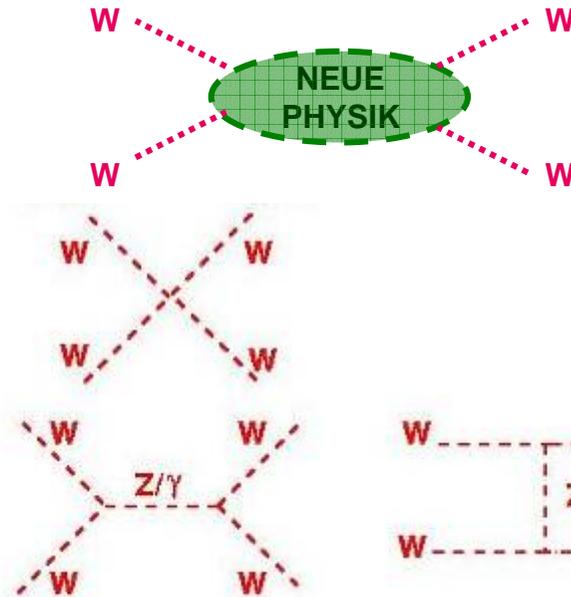
- Nach 1-3 Jahren gut verstandener Daten:
 - Higgs Boson kann bei allen Massen entdeckt werden





Massenmechanismus ohne Higgs?

- Standardmodell ohne Higgs verletzt „Wahrscheinlichkeit < 1“



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

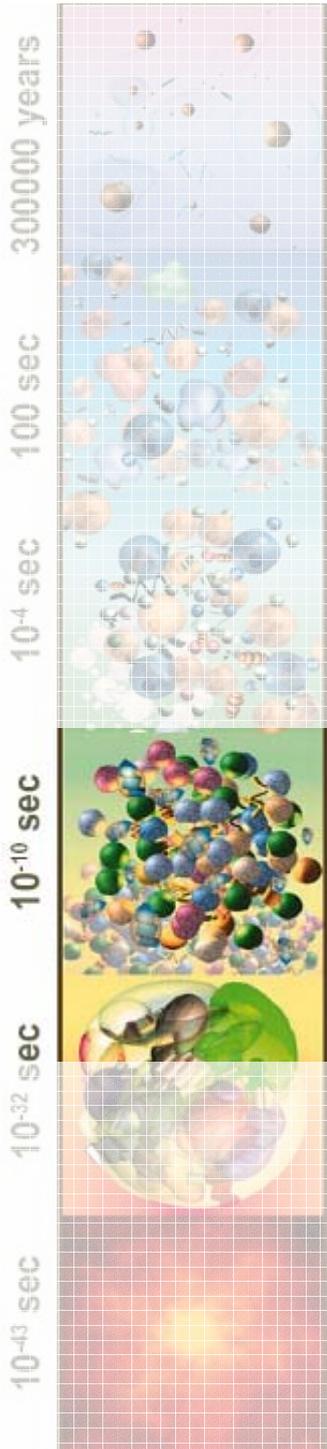
für

$$m_H \rightarrow \infty$$

Unitarität:

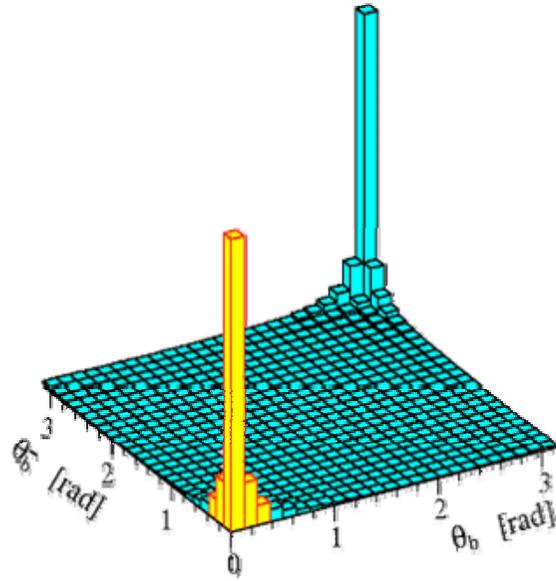
$$m_H^2 \leq \frac{2\pi\sqrt{2}}{G_F} \approx (850\text{GeV})^2$$

- 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 Fermionmassen



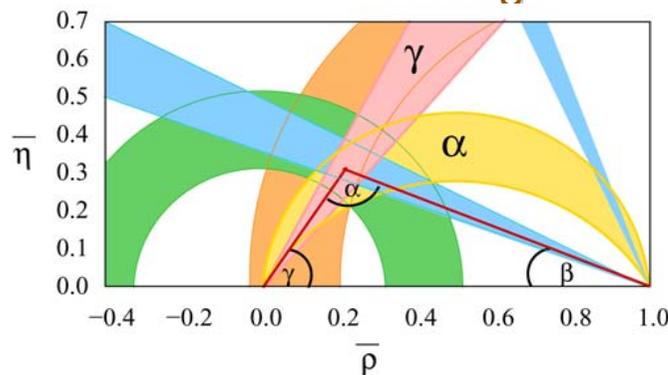
Neue Quark-Antiquark Asymmetrie?

- SM beschreibt CP Verletzung bei Quarks mit 1 Parameter: Sind alle Messungen damit verträglich?
 - Spezialisiertes Experiment für b-Quarks nahe Strahl:

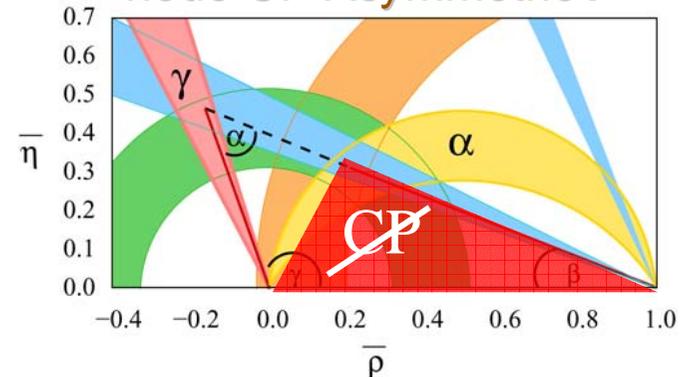


	BaBar & Belle	D0/CDF II	LHCb LHCp
	PEPII / KEKB	Tevatron	LHC
Strahlen	e^+e^-	$\bar{p}p$	pp
Ab Jahr	1999	2002	2008
\sqrt{s} (GeV)	10,4	2.000	14.000
$\sigma_{bb} / \sigma_{qq}$	1 / 4	1 / 1000	1 / 130
N_{qq} / s (Hz)	40	20.000	13.000.000
N_{bb} / s (Hz)	10	20	100.000
<Flugstrecke>	260 μm	450 μm	10.000 μm

- Nach 1 Jahr „verständener“ Daten: weiterhin verträglich

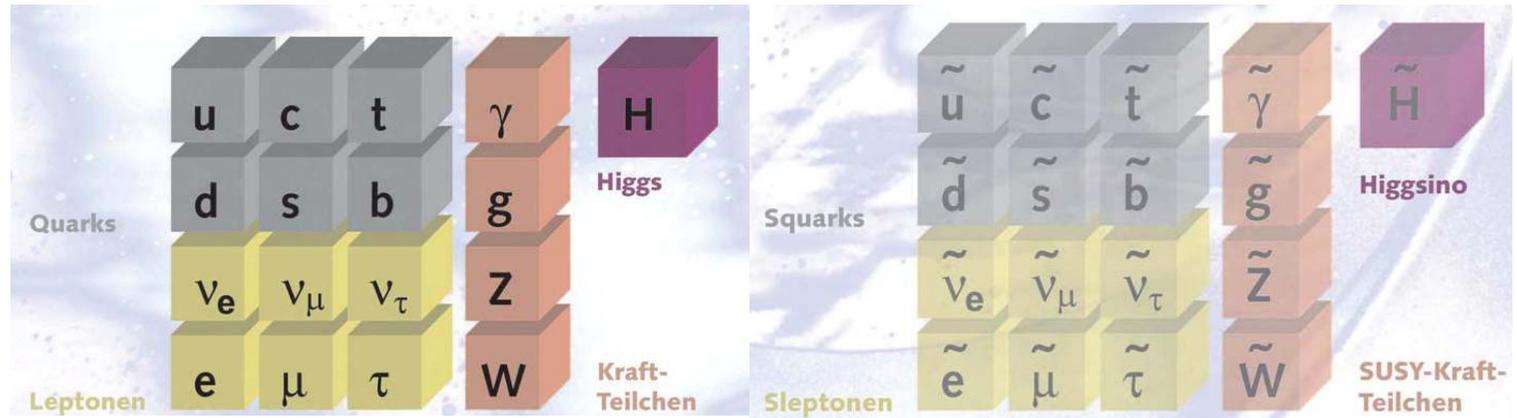


oder neue CP Asymmetrie?



Supersymmetrie

■ Existieren Supersymmetrische Teilchen?

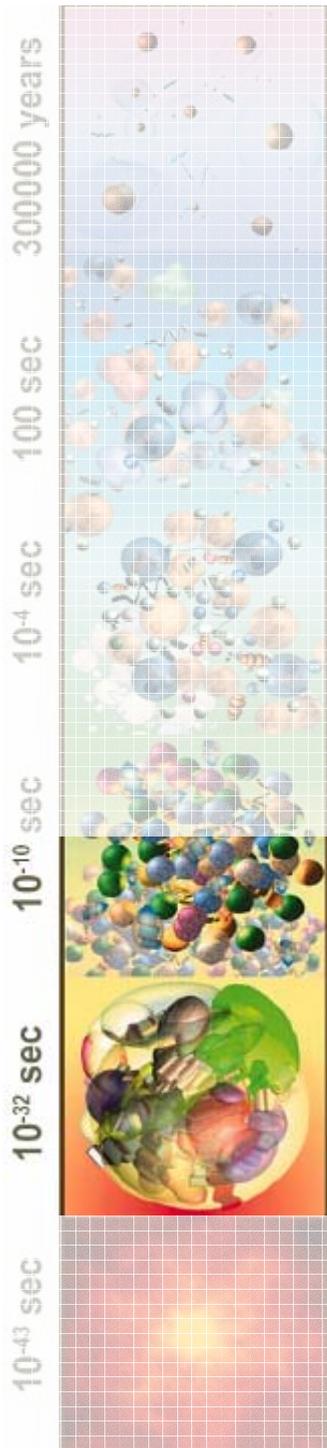
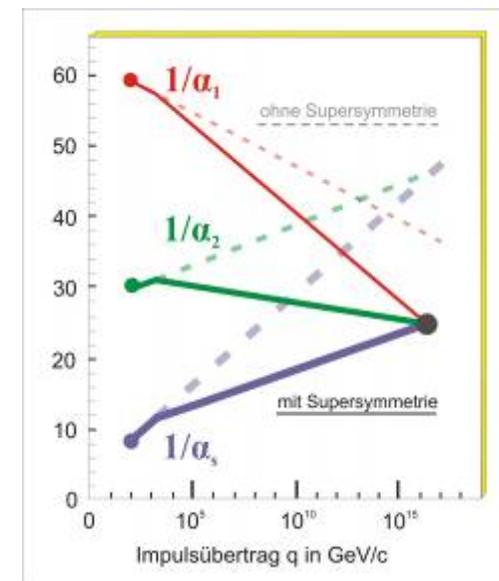


■ Würden helfen, mehrere Theoretische Fragen zu lösen

- Vereinigung aller Kräfte
- Relativ niedrige Higgs Masse

■ Leichtestes SUSY Teilchen stabil = Dunkle Materie (ca 3000 /m³)?

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

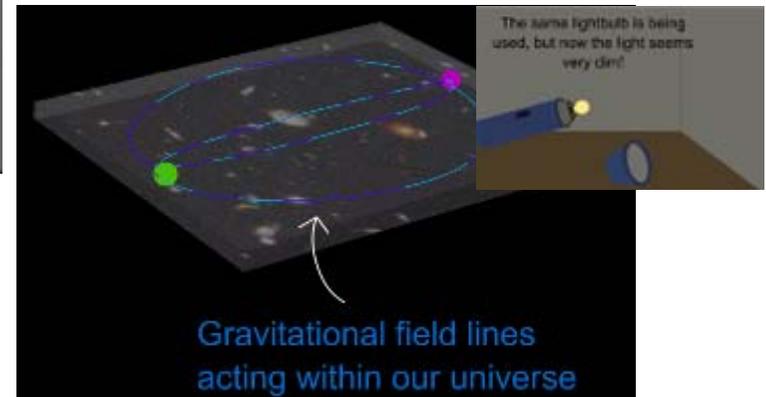
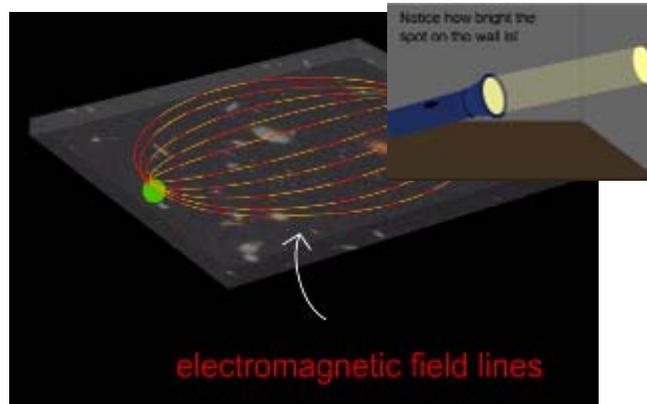
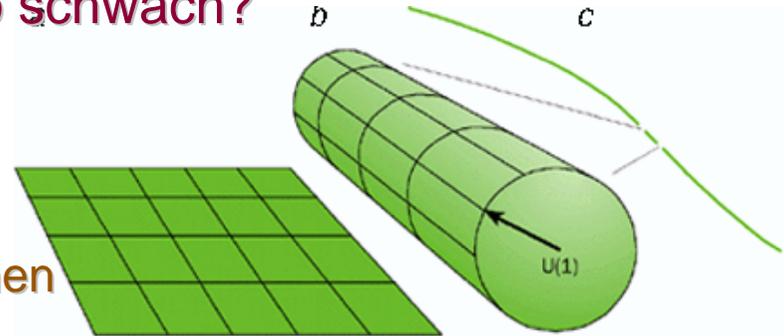




Zusätzliche Dimensionen

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

