

## Zwischenfazit zum Standard-Modell

Das Standard-Modell mit der Eichgruppenstruktur

- $U(1)_Y \otimes SU(2)_L \otimes SU(3)_C$   
kann viele der experimentellen Befunde ausgezeichnet beschreiben, was aber nicht verwundern darf, da die Theorie a posteriori so konstruiert wurde, dies zu erfüllen. Insofern müssen alle Eigenschaften – solche, die experimentell bestätigt wurden, und auch solche, die als (a priori) Vorhersage aus der Theorie folgen – auf dem Prüfstand. Insbesondere gilt dies auch für alle Annahmen und Hypothesen, die zur Formulierung gemacht wurden. Für diese ist zu prüfen, inwieweit sie willkürlichen Charakter besitzen.

Dies soll im Folgenden in kurzer Weise geschehen, um zu zeigen, dass das Standardmodell trotz aller Erfolge viele Defizite besitzt, zu deren Vermeidung eine bessere Theorie/Modell wünschenswert ist.

## Problem der starken CP-Verletzung

... ist letztlich in der Struktur (genauer: Topologie) des QCD-Vakuums begründet. Es betrifft Eigenschaften von Feldern, etc. "in Großen", welche den Differentialgleichungen / Lagrangedichten nicht direkt anzusehen sind. Beispiele von Feldern, die durch "Topologie" festgelegt sind:

- Solitonen (z.B. schon ~1850 als "stabile" Wasserwellen beobachtet, z.B. Rauchringe, ...)
- Instantonen (Bezeichnung für Solitonenlösungen in der Feldtheorie)

Schon das Vakuum als energetisch tiefster Zustand eines Quantenfeldes braucht nicht einfach zu sein, wie das Higgs-Feld beweist.

Eine detaillierte Diskussion würde an dieser Stelle zu weit in die Quantenfeldtheorie führen. Daher werden im Folgenden nur für die QCD exemplarisch einige Probleme angesprochen und mögliche Lösungen zusammen mit experimentellen Befunden vorgestellt.

# Problem der starken CP-Verletzung

Zur Erinnerung: Noether-Theorem: Symmetrien  $\leftrightarrow$  Erhaltungssätze  
Eichprinzip: (lokale) Eichinvarianz  $\leftrightarrow$  externe Felder  
( $\hat{=}$  Eichsymmetrie) ( $\hat{=}$  Teilchen)

Die Lagrangedichte der QCD,  $\mathcal{L}_{QCD}$ , besitzt neben der  $SU(3)$ -Eichinvarianz noch weitere Symmetrien:

- **Chiralitätssymmetrie** ( $\mathcal{L}_{QCD}$  ist unabhängig von Quarkhändigkeit  $\hat{=}$  globale  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R$ -Sym.)  
... wird jedoch durch Quarkmassen  $\neq 0$  gebrochen  
 $\rightarrow$  Pionen  $\pi^\pm, \pi^0$  sind zugehörige ( $\approx$  masselose) Goldstone-Bosonen
- **$U(1)_V$ -Invarianz**, d.h. unter Transformationen der Quarkfelder:  $q \mapsto \exp(i\alpha) \cdot q$   
 $\leadsto$  erhaltener Strom:  $j_\mu^B = \bar{u} \gamma_\mu u + \bar{d} \gamma_\mu d$   
 $\leadsto$  erhaltene Ladung: **Baryonenzahl**
- **$U(1)_A$ -Invarianz**, d.h. unter Transformationen der Quarkfelder:  $q \mapsto \exp(i\beta \gamma^5) \cdot q$   
 $\leadsto$  erhaltener Strom:  $j_\mu^S = \bar{u} \gamma_\mu \gamma^5 u + \bar{d} \gamma_\mu \gamma^5 d$   
 $\leadsto$  erhaltene Ladung: **unbekannt**  
oder zugehörige Goldstone-Bosonen: **keine passenden Pseudoskalare Mesonen**
- $\leadsto$  Lösung: QCD-Instantonen und nicht-triviale QCD-Vakuumstruktur/Topologie

## Problem der starken CP-Verletzung

- Wird das Instanton-Feld für die  $U(1)_A$ -Invarianz eingeführt, ergibt sich eine erhaltene <sup>axiale</sup> Ladung  $\Delta Q_A$  (topologische Ladung / Windungszahl), die durch

$$\Delta Q_A = \frac{d_5^2}{16\pi} \int \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G_{\mu\nu} G_{\rho\sigma}$$

gegeben ist. Eine solche Ladung ist äquivalent zu einem zusätzlichen Term in der Lagrangedichte  $\mathcal{L}_{\Theta}$ :

$$\mathcal{L}_{\Theta} = \Theta_{\text{eff}} \cdot \frac{d_5^2}{16\pi} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G_{\mu\nu} G_{\rho\sigma} \equiv \Theta_{\text{eff}} \cdot \frac{d_5^2}{8\pi} \tilde{G}_{\mu\nu} G^{\mu\nu}$$

- Aufgrund des total antisym.  $\epsilon$ -Tensors verletzt  $\mathcal{L}_{\Theta}$  sowohl Parität  $P$  als auch Zeitumkehrinvarianz  $T$  und ist damit CP-verletzend mit der Stärke  $\Theta$ , wobei für  $\Theta_{\text{eff}}$  ein Wert von der Größenordnung 1 zu erwarten wäre, da dies typisch für QCD ist.

↑  
dualer Feld =  
Stärke tensor  
 $\tilde{G}_{\mu\nu} := \frac{1}{2} \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} G^{\rho\sigma}$

- Experimentell findet man (aus dem elektrische Dipolmoment des Neutrons  $d_n^e \approx 4 \cdot 10^{-16} \cdot \Theta_{\text{eff}} \text{ e}\cdot\text{cm} < 0.6 \cdot 10^{-25} \text{ e}\cdot\text{cm}$ ) jedoch

$$\Theta_{\text{eff}} < 10^{-9}$$

Dieser kleine Wert von  $\Theta_{\text{eff}}$  stellt das Problem der starken CP-Verletzung dar, da ein Wert  $\Theta_{\text{eff}} = \mathcal{O}(1)$  natürlicher für QCD wäre

# Problem der starken CP-Verletzung

- mögliche Lösung:

Neue Symmetrie  $U(1)_{PQ}$  (Peccei, Quinn, 1977), die spontan gebrochen\* ist und ein neues Teilchen hervorbringt (ein Pseudo-Goldstone Boson):

**Axion  $a$**  mit dem Feld  $\Phi_a$

und den CP-verletzenden Term\* modifiziert:

$$\left( \Theta_{\text{eff}} - \frac{\Phi_a}{f_a} \right) \cdot \frac{\alpha_s}{8\pi} \cdot \tilde{G}_{\mu\nu} G^{\mu\nu}$$

mit experimentell zu bestimmender Axion-Zerfallskonstante  $f_a$ , die die Masse des Axion festlegt:

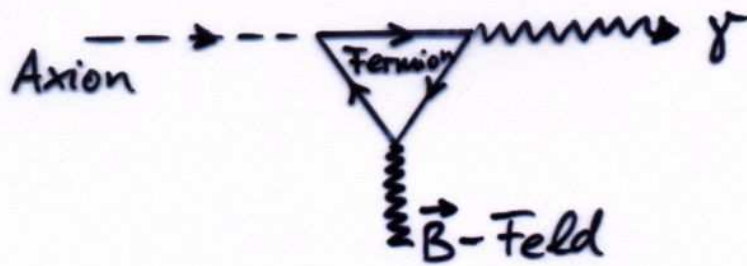
$$m_a = 0.62 \text{ eV}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{10^7 \text{ GeV}}{f_a}$$

- Leider ist die einfachste Variante eines Axions bereits experimentell ausgeschlossen, sodass nach Varianten von Axionen (sogen. "unsichtbare" Axionen) gesucht wird, die entweder nur an Photonen, Elektronen koppeln (DFSZ) oder nur an Nukleonen koppeln (KSVZ-Axionen).

\* nach spontaner Brechung der  $U(1)_{PQ}$ -Symmetrie wird  $\left( \Theta_{\text{eff}} - \frac{\Phi_a}{f_a} \right) = 0$ .

# Axion - Teilchen

## • Nachweis:



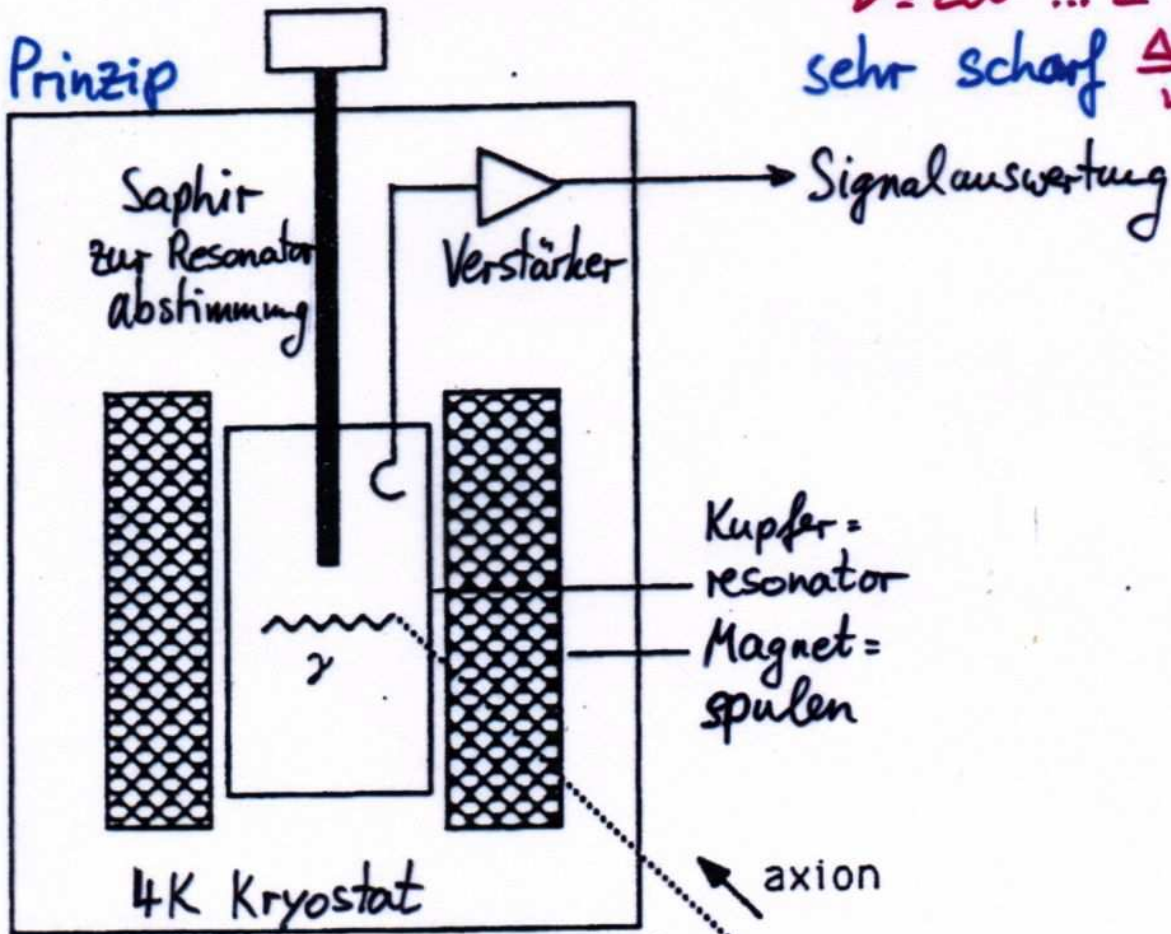
$$m_a = 10^{-3} \dots 10^{-5} \frac{eV}{c^2}$$

Frequenz des Photons  $\gamma$

$$\nu = 200 \dots 2 \text{ GHz}$$

sehr scharf  $\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-6}$

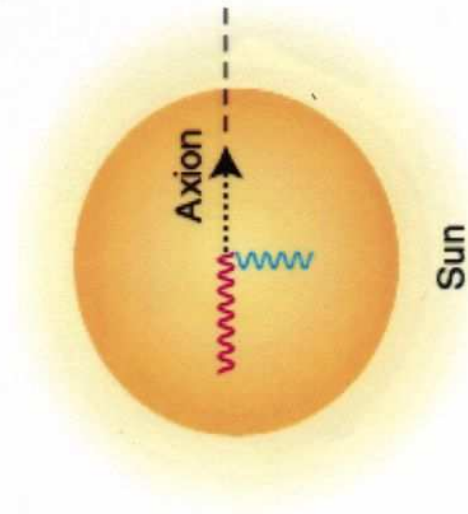
Prinzip



$\Rightarrow$  kein Signal für  $m_a \approx 10^{-5} \dots 10^{-6} \frac{eV}{c^2}$

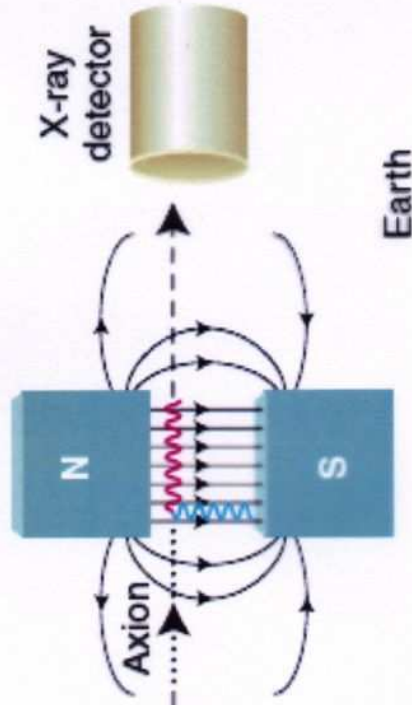
# Prinzipieller Aufbau von CAST

**Axion - Quelle**

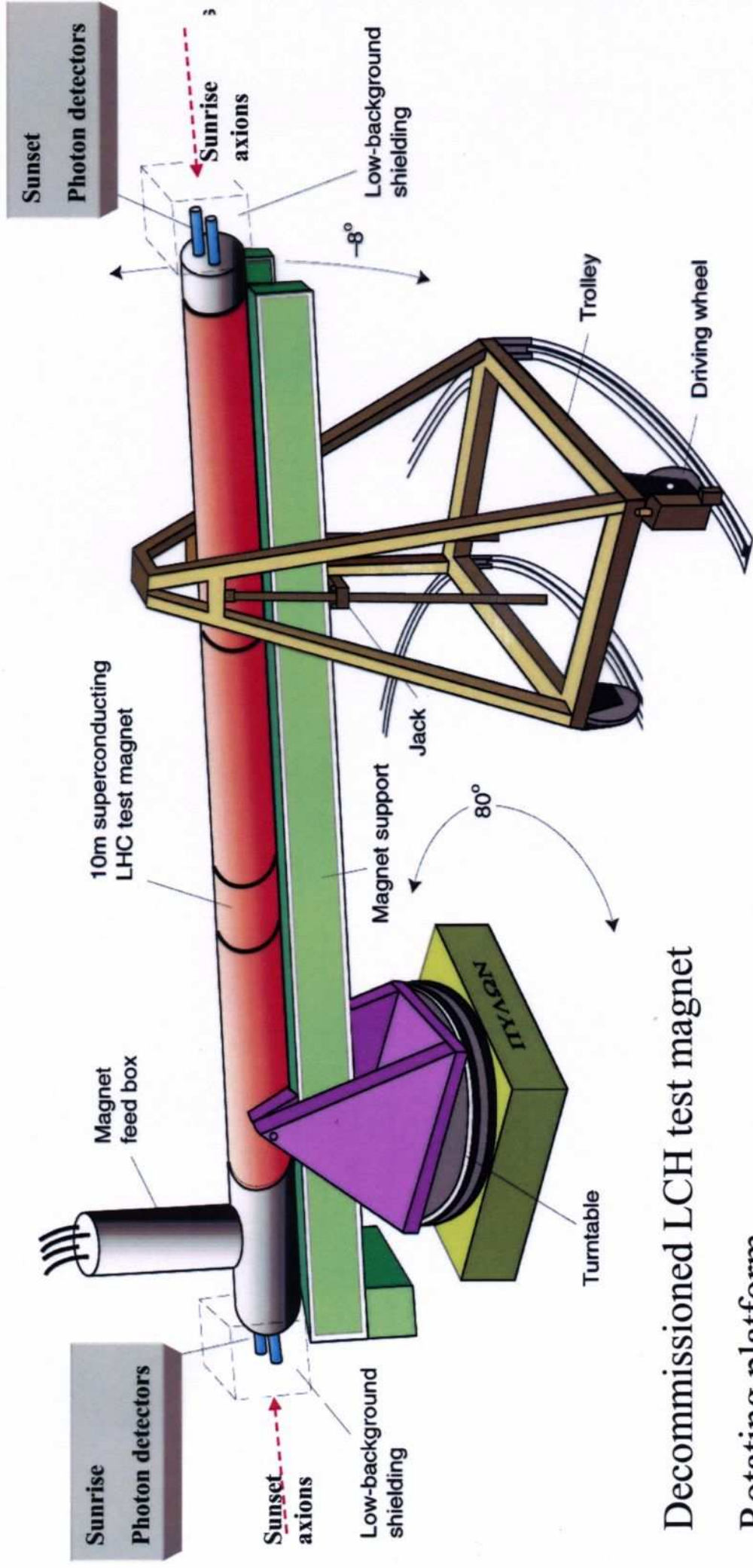


500 seconds  
Flight time

**Axion - Nachweis**



# Cern Axion Solar Telescope



Decommissioned LCH test magnet

Rotating platform

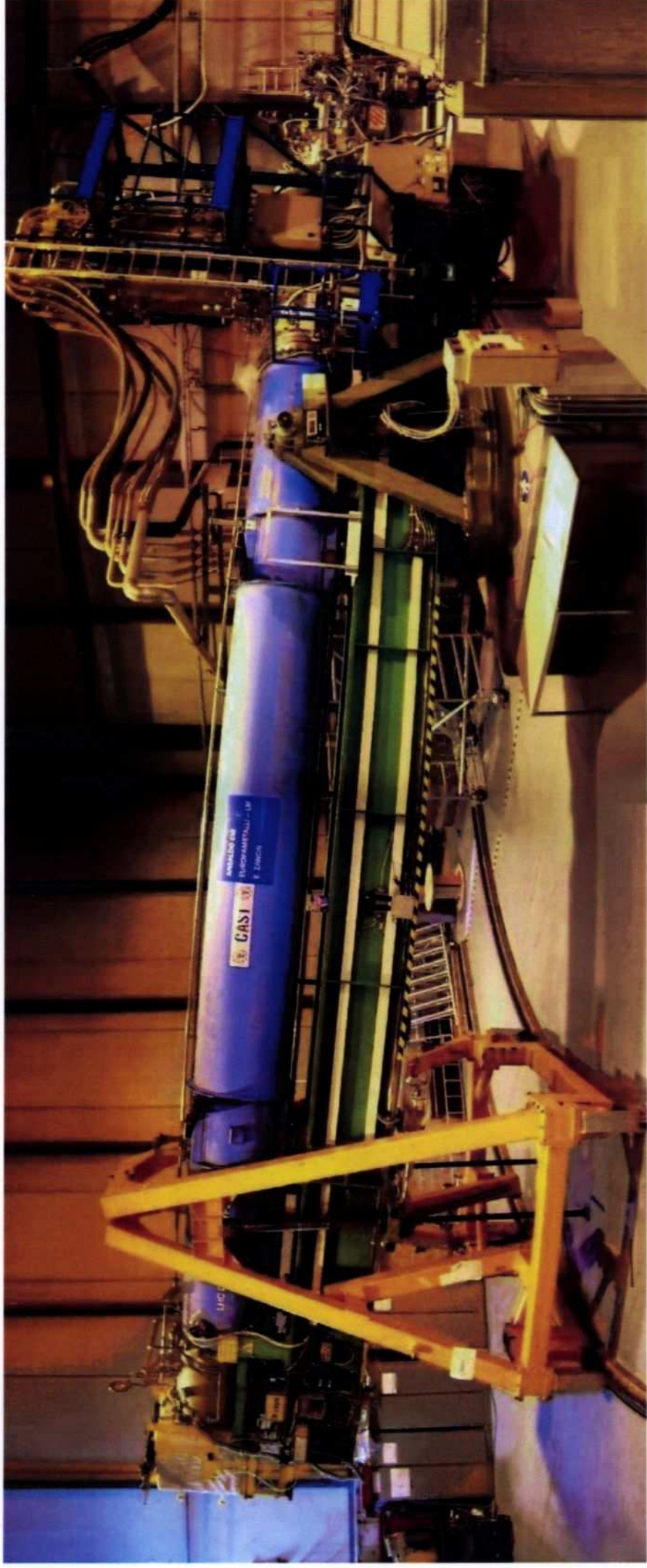
3 X-ray detectors

X-ray Focusing Device

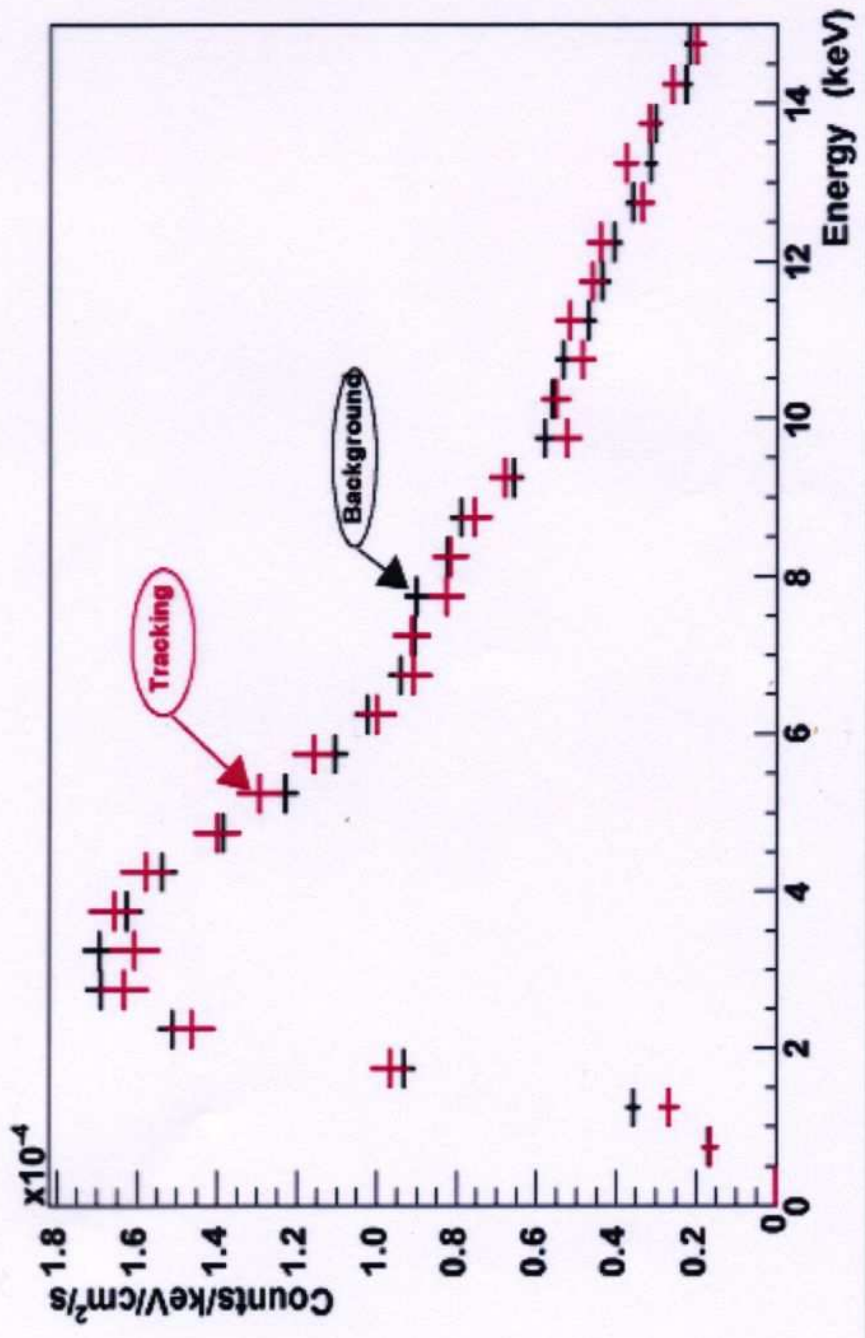




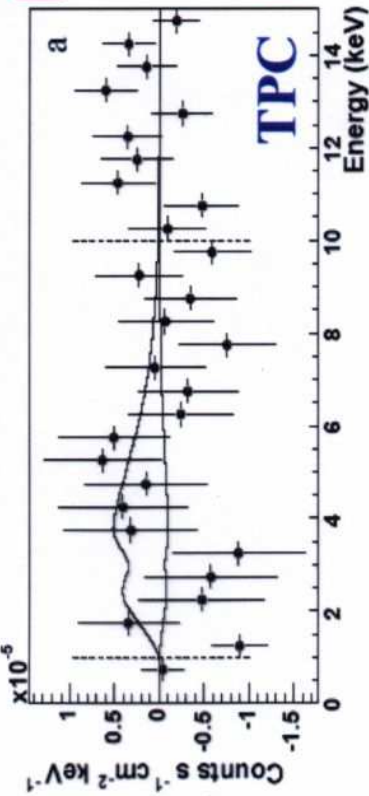
# CAST



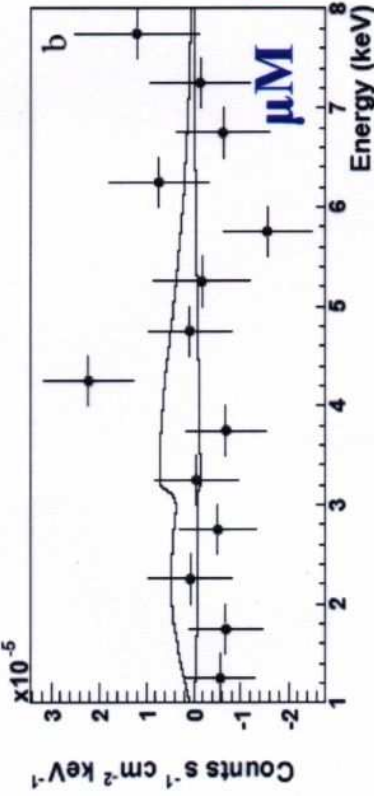
➔ *recycling!*



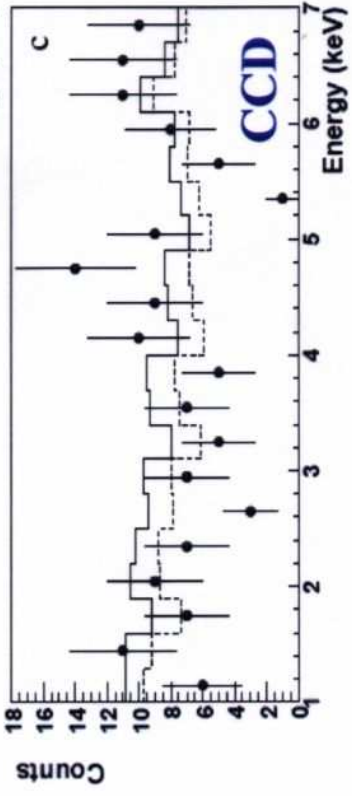
Energy spectra with **TPC**. Data corresponding to sun tracking (**red**) and background (**black**) obtained during part of the **2003** operation period.



TPC 1.55



μM 1.51



23

FIG. 1: Panels (a) and (b) show respectively the experimental subtracted spectrum of the TPC data set and MM data set A, together with the expectation for the best fit  $g_{a\gamma}$  (lower curve) and for the 95% CL limit on  $g_{a\gamma}$ . For (a) the vertical dashed lines indicate the fitting window. Panel (c) shows both the tracking (dots) and background (dashed line) spectra of the CCD data set, together with the expectation (background plus signal) for  $g_{a\gamma}$  at its 95% CL limit, in units of total counts in the restricted CCD area (54.3 mm<sup>2</sup>) in the tracking exposure time (121.3 h).

[x 10<sup>-10</sup> GeV<sup>-1</sup>]

2003

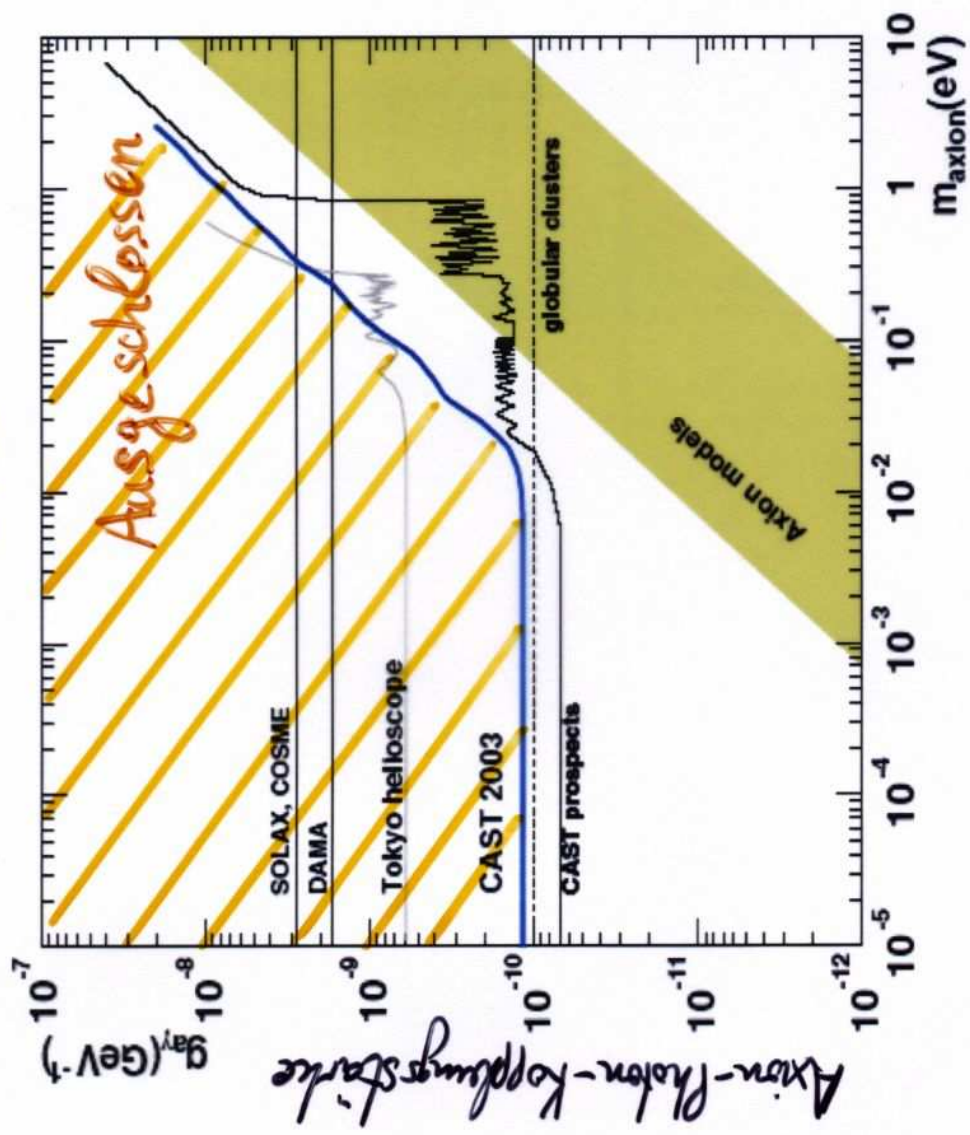


FIG. 2: Exclusion limit (95% CL) from the CAST 2003 data compared with other constraints discussed in the introduction. The shaded band represents typical theoretical models. Also shown is the future CAST sensitivity as foreseen in the experiment proposal.

$$g_{a\gamma} (95\% \text{ CL}) < 1.16 \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1} \quad (m_a < .02 \text{ eV})$$

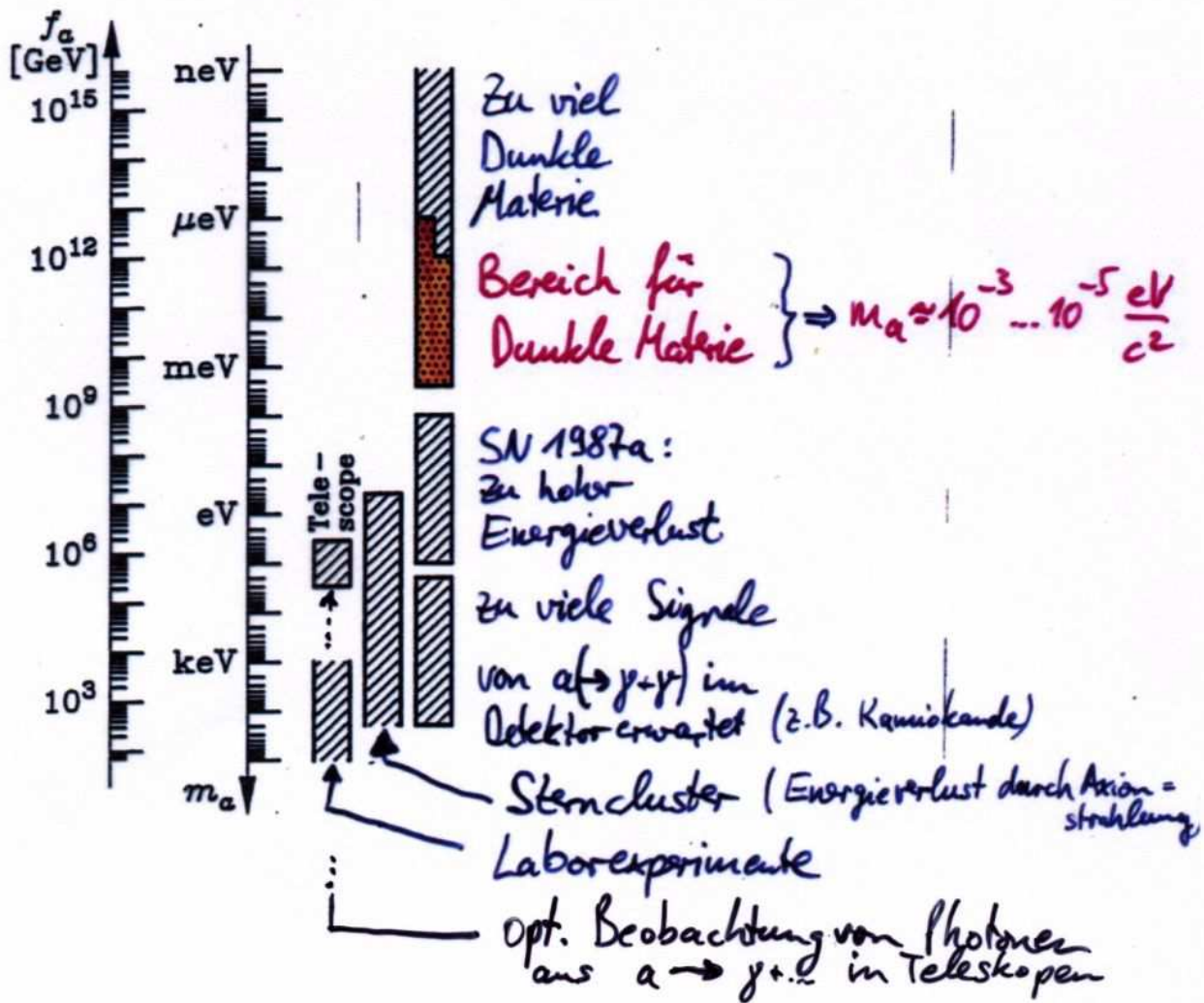
# Kosmologische Einschränkungen des Axions

• Axion-Masse:

$$m_a \approx 0.62 \frac{\text{eV}}{c^2} * \left[ \frac{10^7 \text{ GeV}}{f_a} \right]$$

$f_a$ : Axion zerfallskonstante

$$f_a = 10^3 \dots 10^{25} \text{ GeV}$$



# Probleme des Standard-Modells

Trotz des großen Erfolgs des Standard-Modells in den experimentellen Tests gibt es viele Gründe, die nahelegen, dass das Standard-Modell wahrscheinlich nur eine Approximation einer allgemeineren und umfassenderen Theorie ist. Einige dieser Gründe sind:

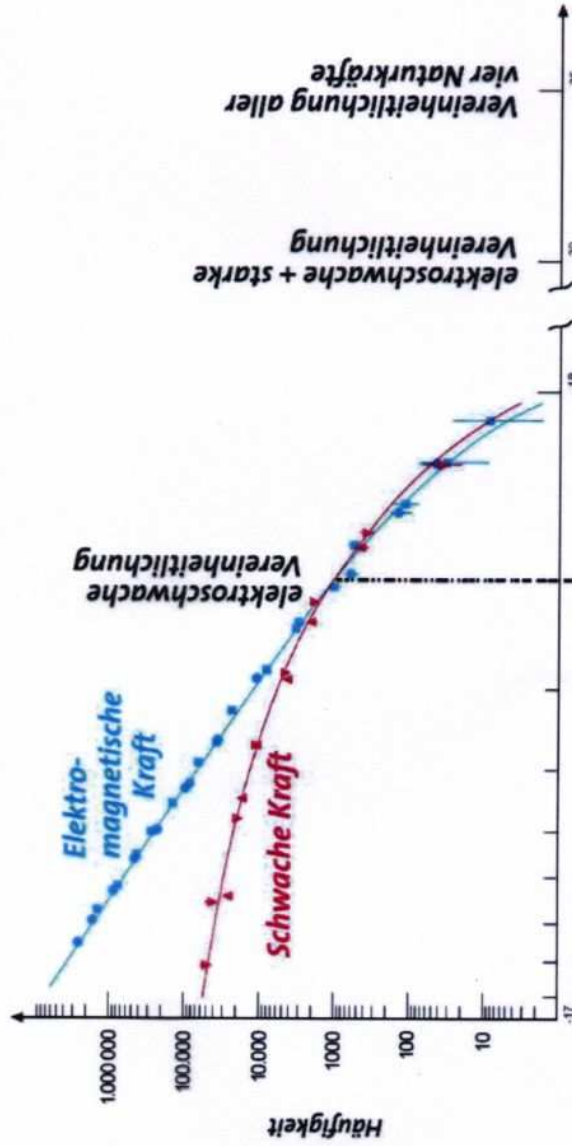
- 1) Anzahl der Parameter im Standard-Modell:
- |   |                          |
|---|--------------------------|
| ▶ Kopplungen:<br>$g_{em}, G_F, \alpha_s$                            | <u>18</u><br>3           |
| ▶ Fermionmassen<br>$m_f, f = q, l^- (\nu)$                          | 9 (+3, $m_\nu \neq 0$ )  |
| ▶ Higgs-Bosonmasse<br>$m_H = v \sqrt{2\lambda}$                     | 1                        |
| ▶ schwacher Mischungswinkel<br>$\sin^2 \theta_w$                    | 1                        |
| ▶ Quarkmischung & CP-Verletzung<br>CKM-Matrix + Phase $\delta_{13}$ | 4 (+24, $m_\nu \neq 0$ ) |
| (▶ starke CP-Verletzung<br>$\theta_{eff}$ )                         | 1                        |

# Probleme des Standard-Modells

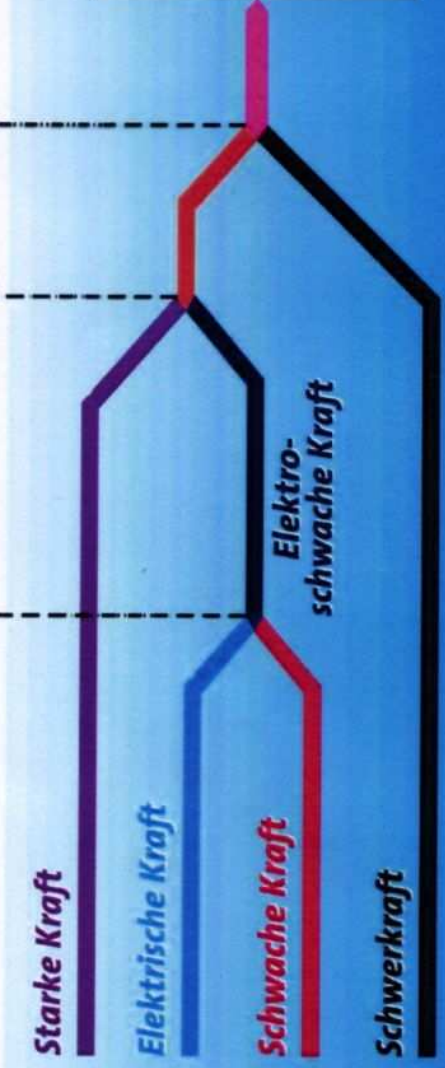
## 2) Offene Fragen, z.B.

- ▶ Warum drei separate Kopplungen:  $g_{em}, G_F, \alpha_S$ ?  
→ Vereinigung möglich?
- ▶ Warum linkshändige Dubletts/rechtshändige Singulets?  
→ links-rechts-symmetrische Theorie möglich?
- ▶ Warum Quantisierung der elektrischen Ladung?
- ▶ Warum 3 Generationen von Leptonen & Quarks?  
→ weitere Generationen möglich?
- ▶ Ursache der Massenhierarchie der Fermionen?  
$$\left. \begin{array}{l} m_t \gg m_b \gg m_c \gg m_s \gg m_u, m_d \\ m_\tau \gg m_\mu \gg m_e \end{array} \right\} \gg m_\nu$$
- ▶ Ursache der Hierarchiestruktur in der CKM-Matrix?  
$$V_{ud} \approx V_{cs} \gg V_{us} \approx V_{cd} \approx V_{bc} \gg V_{ub}, V_{td}$$
- ▶ Grund der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Weltall?
- ▶ Natur der "Dunklen Materie"?
- ▶ Natur der "Dunklen Energie"?
- ▶ Einbeziehung der Gravitation?
- ▶ zusätzliche Raumdimensionen?

# Vereinheitlichung der Kräfte



# Urknall



$$\alpha_1 := \frac{5}{3} \cdot 4\pi \cdot g_2^2 \sin^2 \theta_w$$

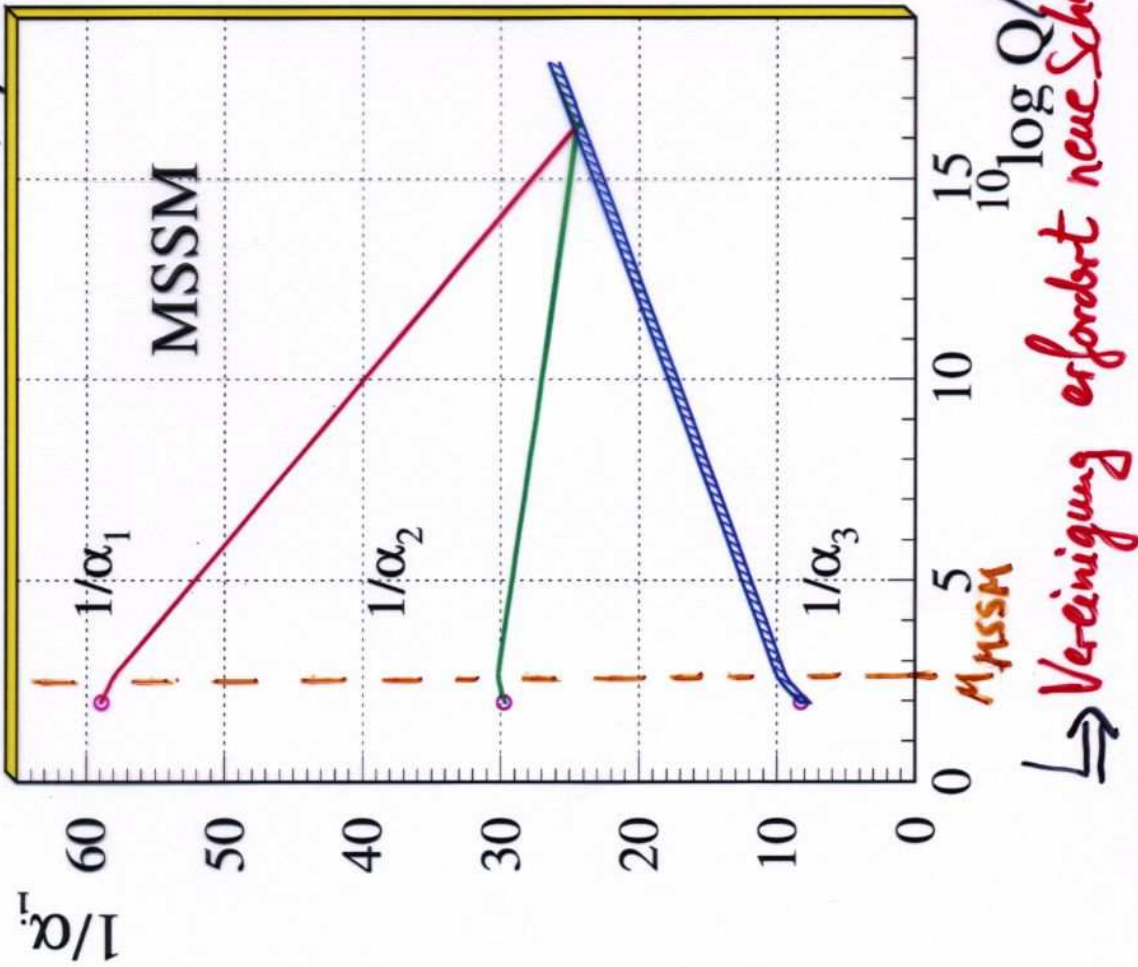
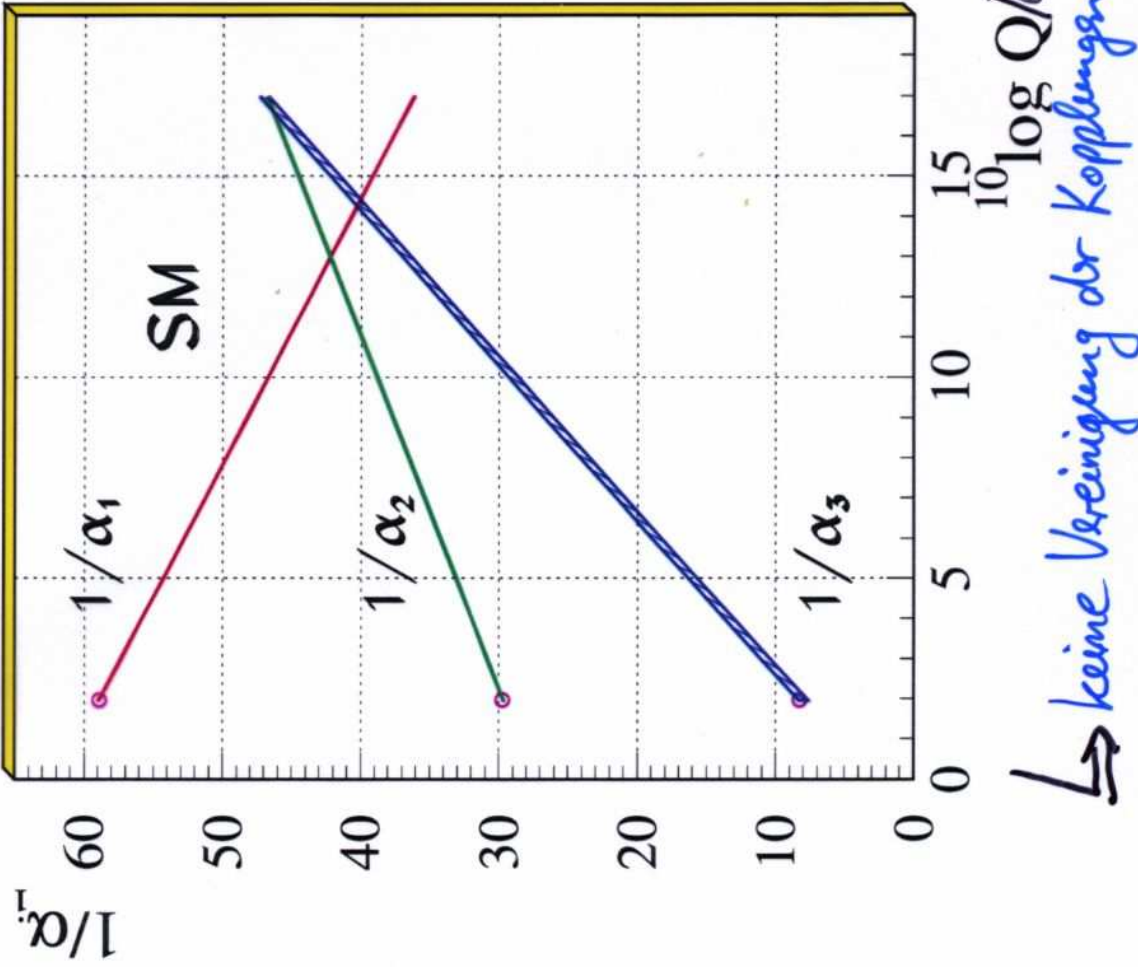
$$\alpha_2 := 4\pi g_w^2$$

$$\alpha_3 := \alpha_s = g_s^2/4\pi$$

# Vereinigung der Kopplungskonstanten (= Grand Unification Theorie GUT)

## im Standardmodell und im minimalen MSSM

Supersymmetrie



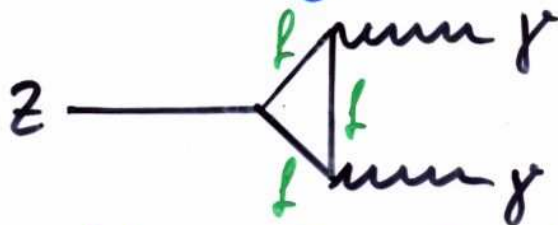


# Anzahl der Generationen / Generationenstruktur

- Aus Z-Resonanzkurve folgte:  
 $\exists$  3 Arten leichter Neutrinos

⇒ Es gibt (mindestens) drei vollständige Generationen von Leptonen und Quarks

Grund: Vermeidung von Dreiecksanomalien



wird nicht im Experiment beobachtet.

Erklärung: Alle (geladenen) Teilchen einer Generation tragen zur Zerfallsamplitude  $Z \rightarrow \gamma\gamma$  im Dreieck bei. Aufhebung aller Einzelbeiträge, wenn je Generation

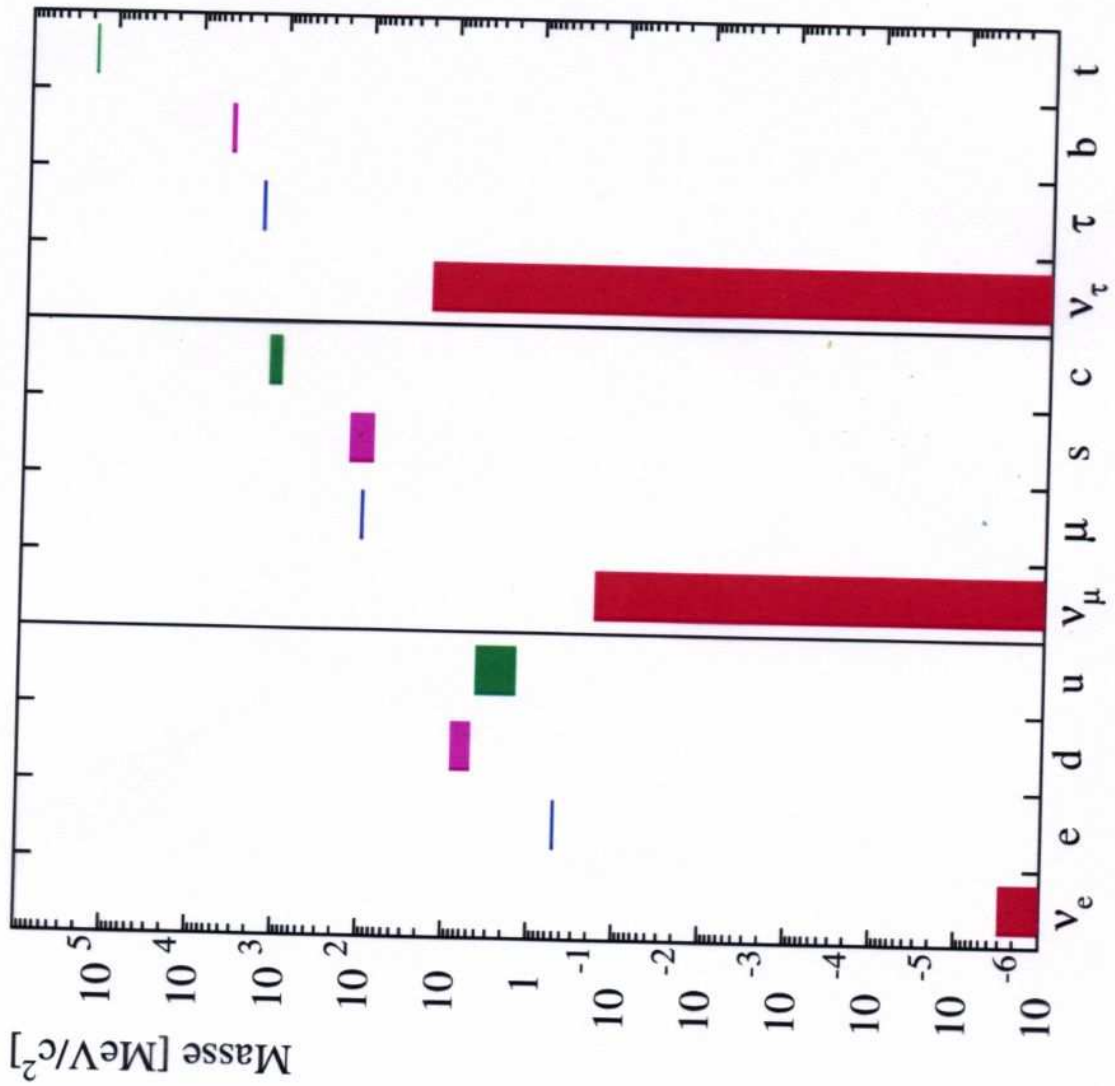
Ladungssumme = 0

$$\begin{array}{ccccccc} -1 & +0 & +3 \cdot \left(-\frac{1}{3}\right) & +3 \cdot \left(+\frac{2}{3}\right) & = & 0 \\ \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & & \\ \text{z.B.: } e & \nu & d & u & & \end{array}$$

NB: Im Standard-Modell keine Erklärung für diese Relation, aber mit GUT-Theorie!

- 4. Generation möglich, wenn  $m_{\nu_4} > \frac{1}{2} M_Z$   
→ dann auch weiteres Lepton und weitere Quarks

## Massenhierarchie der Fermionen



- Neutrino-Massen nur Obergrenzen aus direkten Messungen

- $\nu$ -Oszillationen  $\rightarrow m_{\nu} \approx 10^{-3} \cdot 10^{-2} \text{ eV}$

- Ähnliche Massenstruktur in jeder Generation

- Ausnahme:  $d \leftrightarrow u$ -Quark  
( $\rightarrow$  Protonstabilität!)

- Leptonmassen präzise gemessen

- Quarkmassen schwierig messbar  
(wg. Confinement)

- t-Quarkmasse am genauesten

# Dunkle Materie, Dunkle Energie

ein bisschen Kosmologie ...

## Homogenes, isotropes, expandierendes Universums:

Materie  
kosmol.  
Konst.;  
Raum-  
krümmung

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

- Friedmann-Lemaître-Lösung der Einstein-Feldgl. :

$$\diamond \Omega_M \equiv \text{Dichte } \rho_M / \text{krit. Dichte } \rho_c; \quad \Omega_\Lambda \equiv c^2 \Lambda / 3\mathcal{H}^2; \quad \Omega_k \equiv -kc^2 / R^2 \mathcal{H}^2$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{krit. Dichte} \\ \text{Hubbel-Konstante} \\ \text{Radius des Raumes} \\ \text{Krümmungsparameter} \end{array} \right\} : \rho_c \equiv 3\mathcal{H}^2 / 8\pi G_N \approx 6 \text{ GeV} / c^2 \text{ m}^3$$

$$: \mathcal{H} = \dot{R} / R \approx 75 \text{ km/s Mpc}$$

$$: R$$

$$: k = +1, 0, -1$$

- Materiedichte  $\rho_M \hat{=} \sum \text{Baryonen, Leptonen, Neutrinos, Photonen, DM-Teilchen(?)}$   
(baryonische Materiedichte  $\rho_B \hat{=} \sum \text{Baryonen}$ )

- Dunkle Materie  $\hat{=} \text{nicht-leuchtende Materie, i.W. Neutrinos, DM-Teilchen(?)}$  ← z.B. Axion-Teilchen

$$\bullet \text{ Dunkle Energie } \leftrightarrow \rho_\Lambda = \Omega_\Lambda \cdot \rho_c$$

(i.W. kosmologische Konstante)

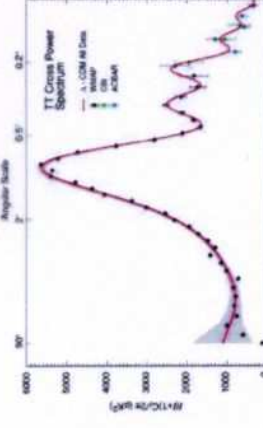
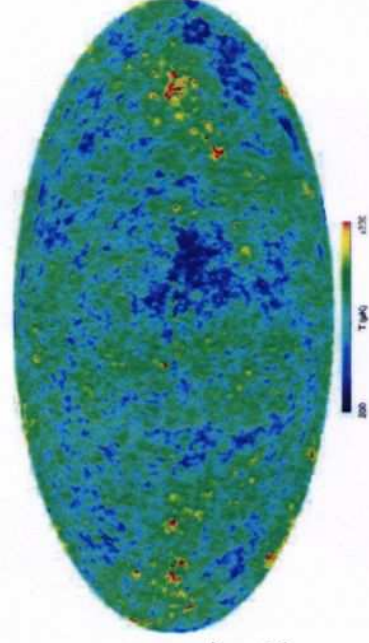
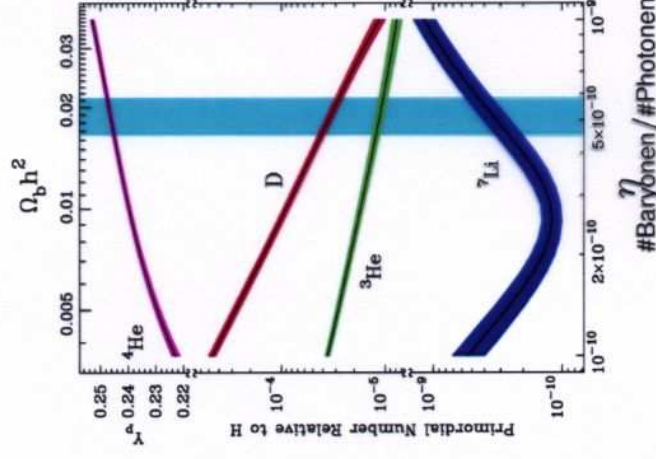
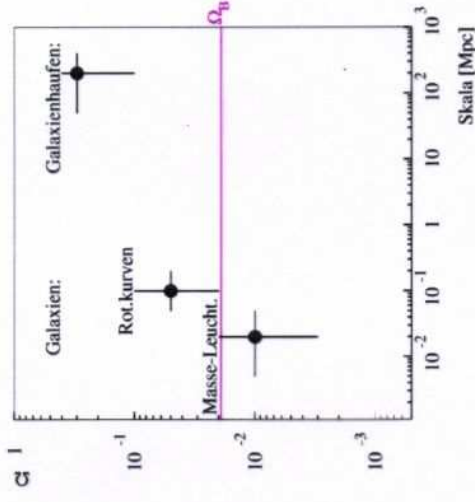
## Experimentelle Fakten:

- Astrophysikalische Beobachtungen "Dunkler Materie":
  - Masse-Leuchtkraft-Verhältnis von Galaxien
  - Rotationskurven von Galaxien
  - Gravitationslinsen-Effekt an Galaxienhaufen
  - Masse-Leuchtkraft-Verhältnis $\Rightarrow \Omega_M \approx 0.3$
- baryonischer Materieanteil aus Nukleosynthese:
  - primordialer Deuterium-Anteil aus:  $p + n \leftrightarrow d + \gamma$
  - Maßstab für Baryon-/ $\gamma$ -Dichte $\Rightarrow \Omega_B \approx 0.04$
- Anisotropie der Hintergrundstrahlung (CMB), z.B. COBE, Boomerang, Maxima, WMAP
  - Entkopplung Strahlung von Materie (ca. 270 000 Jahre nach Urknall)
  - Temperaturfluktuationen in CMB-Strahlung

- Peakposition der Fluktuationen  $\rightarrow \begin{cases} \Omega_k \approx 0 \\ \Omega_\Lambda \approx 0.7 \\ \Omega_M \approx 0.3 \end{cases}$
- Stärke der Fluktuationen  $\rightarrow$

$\Rightarrow$   $\exists$  Dunkle Materie! und  $\exists$  Dunkle Energie!

Dunkle Materie  $\neq$  Baryonen!



# Vereinheitlichung aller Kräfte

- bisher betrachtet:  
Vereinheitlichung elmag., schwache, starke Kraft
- und *Gravitation*?

Viele offene Fragen:

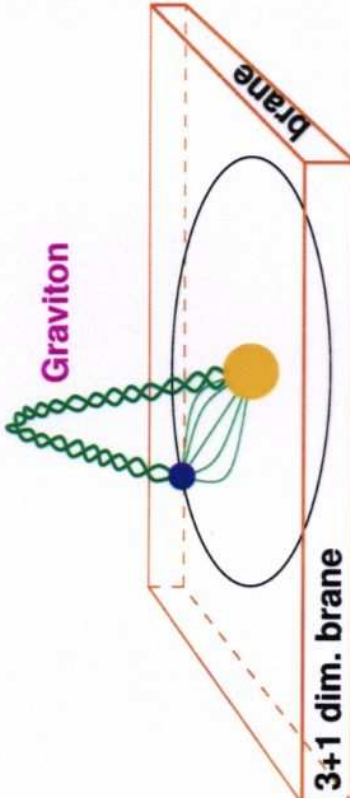
- ▷ Quantentheorie der Gravitation?
- ▷ Warum so viel schwächer?  

schwache Kraft:	relative Stärke	$10^{-5}$	}
Gravitation:	relative Stärke	$10^{-40}$	
- Mögliche Erklärung:  
(motiviert durch String-Theorie)

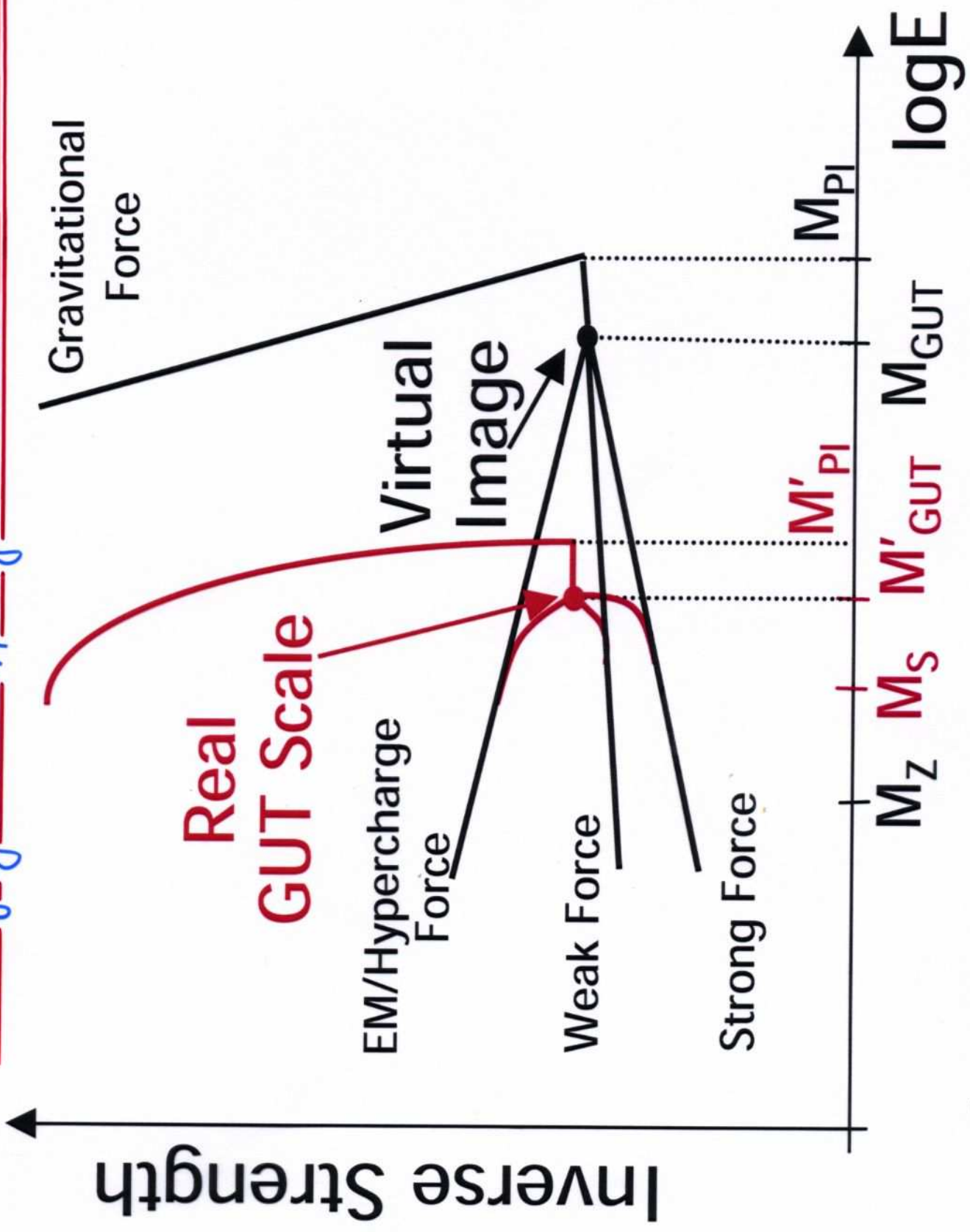
◇ Gravitation in mehr als 3 Raumdimensionen !

## Große Extra-Dimensionen

(engl.: Large Extra Dimensions, LED)

- Struktur:
    - Graviton auch in Extra-Dim. (so gen.: bulk)
- 
- Konsequenzen
    - ▷ Extra-Dimensionen: *kompakt*  
wg. Abweichungen von Newton-Gravitationsgesetz)
    - ▷ Extra-Dimensionen: bei kleinen Abständen  
≙ bei **hohen Energien** beobachtbar

Vereinigung aller Kopplungen bei zusätzlicher Raumdimensionen

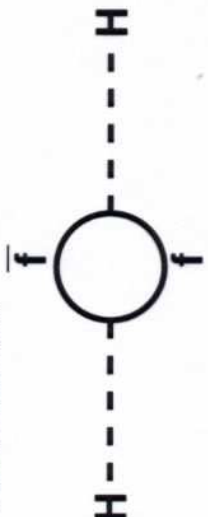


Längenskala

$10^{-18}$  m       $\approx 10^{-19} / 10^{-20}$  m (?)       $10^{-31}$  m       $10^{-33}$  m

3)

## Fundamentale Probleme des Standard-Modells

Problem	Lösungsmöglichkeit(en)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochoenergiebereich existiert nicht (Vakuumpolarisation):  <math>\alpha_{\text{em}}(Q) \rightarrow \infty</math> für <math>Q \rightarrow m_e \cdot \exp(3\pi/\alpha_{\text{em}}) \approx 10^{550}</math> GeV  <math>\rightarrow</math> <u>Standard-Modell ist nicht asymptotisch frei</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vereinheitlichung von elektromagnetischer, schwacher, starker Ww. bei hoher Energie zu asymptotisch freier Theorie (d.h. <math>\alpha(Q) \rightarrow 0</math> für <math>Q \rightarrow \infty</math>)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hierarchie-Problem, Feinabstimmung, Natürlichkeit: <ul style="list-style-type: none"> <li>▷ <u>Hierarchie-Problem</u>: <math>G_F \gg G_N</math> (Gravitationskonstante) <math>\Leftrightarrow m_W \ll m_{\text{Planck}} \equiv \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}} \approx 1.2 \cdot 10^{19}</math> GeV/c<sup>2</sup></li> <li>– Fermionschleifenkorrektur: <div style="text-align: center;">  </div> </li> </ul> </li> <li>– "Neue" Physik ab Energie <math>\Lambda</math> in Schleife <math>\rightarrow m_H^2(m_W) = m_H^2(m_\Lambda) + C g^2 \Lambda^2</math></li> <li>▷ <u>Feinabstimmung</u>: <math>C \approx 0</math> falls <math>m_H \ll \Lambda</math></li> <li>▷ <u>Natürlichkeit</u>: <math>m_H = \mathcal{O}(m_W) \Leftrightarrow C \equiv 0</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Supersymmetrie:  (skalare Fermionen <math>\rightarrow</math> Schleifenkorrektur mit negativem Vorzeichen <math>\rightarrow C \stackrel{!}{=} 0</math> für <math>Q &gt; \Lambda \approx m_{\text{SUSY}}</math>),</li> <li>• Large Extra Dimensions:  (tatsächliches <math>\Lambda_{\text{Planck}} \ll 1.2 \cdot 10^{19}</math> GeV/c<sup>2</sup>)</li> </ul>