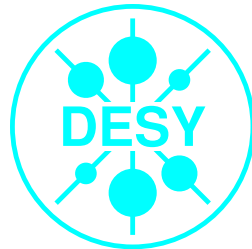


Instantonen/Sphaleronen im Standardmodell der Teilchenphysik

Von der Materie-Antimaterie Asymmetrie im Universum
bis zu Experimenten an Beschleunigern

Andreas Ringwald

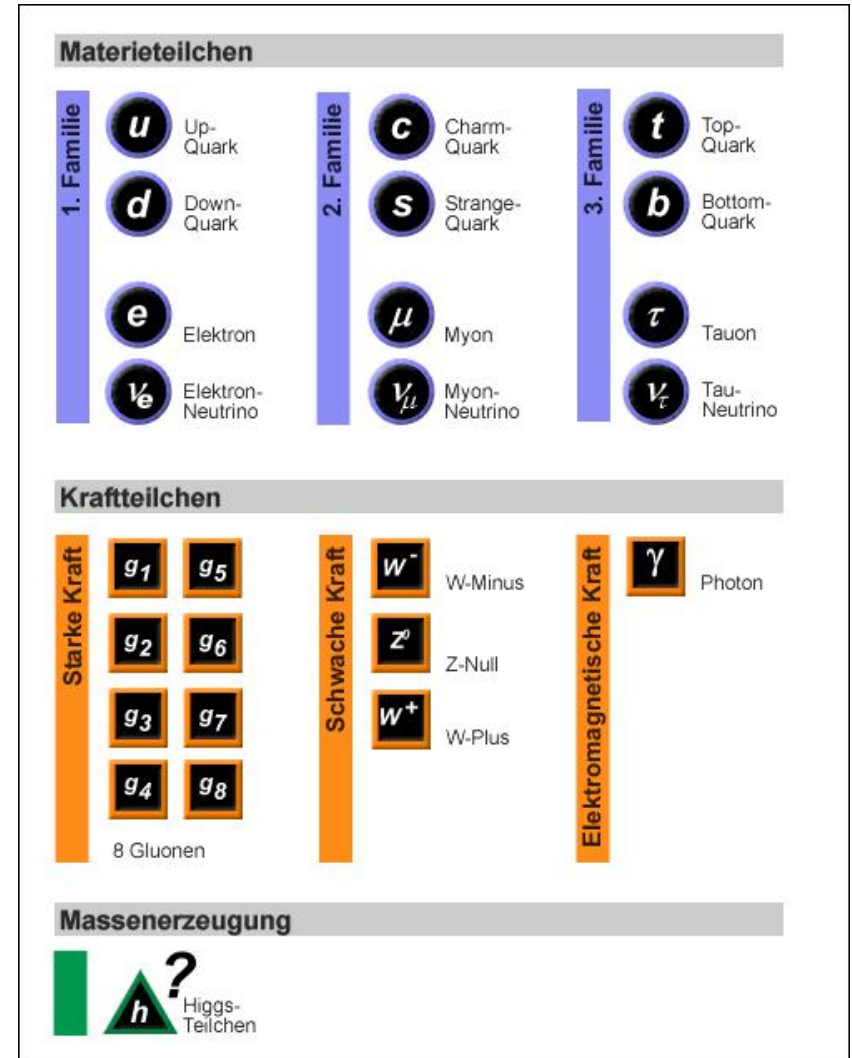


HELMHOLTZ
| GEMEINSCHAFT

Physikalisches Kolloquium, 13. September 2006, Regensburg

1. Einleitung

- Standardmodell der **elektroschwachen** (QED) und **starken** (QCD) Wechselwirkung

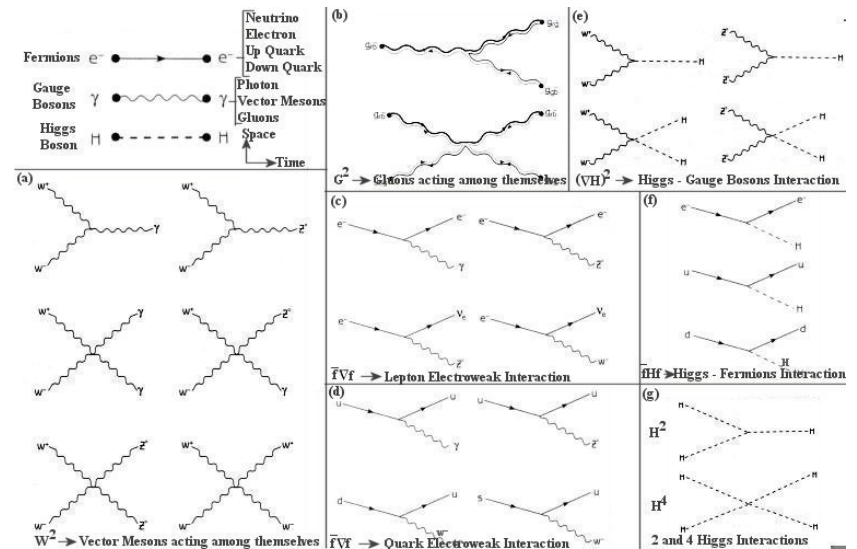


1. Einleitung

- Standardmodell der **elektroschwachen (QED)** und **starken (QCD)** Wechselwirkung

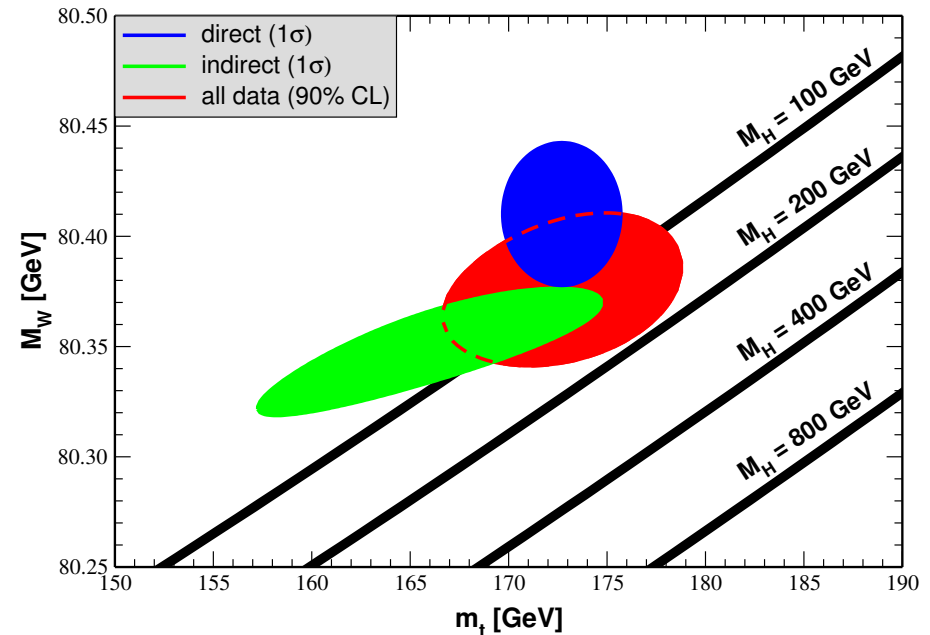
$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} \\ & + \bar{L}\gamma^\mu(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g\tau W_\mu - \frac{1}{2}g'Y B_\mu)L \\ & + \bar{R}\gamma^\mu(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g'Y B_\mu)R \\ & + |(i\partial_\mu - \frac{1}{2}g\tau W_\mu - \frac{1}{2}g'Y B_\mu)\phi|^2 - V(\phi) \\ & - (g_1\bar{L}\phi R + g_2\bar{L}\bar{\phi}R + \text{herm.conj.}) \\ & + \frac{1}{2}g_s(\bar{\Psi}_q^j\gamma^\mu\lambda_{jk}^a\Psi_q^k)G_\mu^a \end{aligned}$$

[www.weltderphysik.de]



1. Einleitung

- Standardmodell der **elektroschwachen (QFD)** und **starken (QCD)** Wechselwirkung sehr erfolgreich
- ✓ Quantenkorrekturen (Störungstheorie)



[Particle Data Group: pdg.lbl.gov]

1. Einleitung

- Standardmodell der **elektroschwachen (QFD)** und **starken (QCD)** Wechselwirkung sehr erfolgreich
- ✓ Quantenkorrekturen (Störungstheorie)
- Es gibt Prozesse, die nicht durch gewöhnliche Störungstheorie beschrieben werden können:

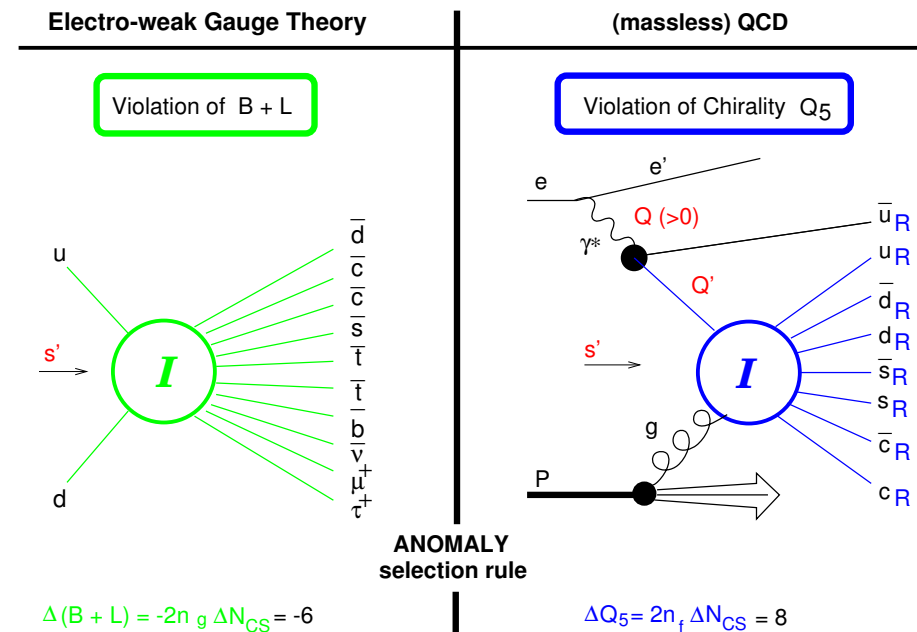
[Adler '69; Bell,Jackiw '69; Bardeen '69]]

B+L/Chiralitäts-verletzende Prozesse in **QFD/QCD**

- Induziert durch **topologische Fluktuationen** der nicht-Abelschen Eichfelder, insbesondere **Instantonen**

A. Ringwald (DESY)

[Belavin *et al.* '75; 't Hooft '76]



Kolloquium, Regensburg

Fahrplan:

- 2. Anomalien im Standardmodell**
- 3. Materie-Antimaterie Asymmetrie im Universum?**
- 4. Anomale Prozesse an Beschleunigern?**
- 5. Zusammenfassung**

2. Anomalien im Standardmodell

- **Klassischer QCD** Lagrangian, für $m_q = 0$ [$q = \text{Spalte}(u, d, s, \dots)$],

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}}^0 = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + i\bar{q}_L \gamma^\mu D_\mu q_L + i\bar{q}_R \gamma^\mu D_\mu q_R$$

invariant unter der **globalen Transformation**

$$U(1)_{R-L} \equiv U(1)_A : q_R \xrightarrow{G} e^{i\theta} q_R, \quad q_L \xrightarrow{G} e^{-i\theta} q_L$$

⇒ Der **axiale Strom** ist **erhalten auf klassischem Niveau**:

$$\partial_\mu (\bar{q}_R \gamma^\mu q_R - \bar{q}_L \gamma^\mu q_L) = \partial_\mu (\bar{q} \gamma^\mu \gamma_5 q) = 0$$

- $U(1)_A$ ist keine Symmetrie der Theorie auf Quantenniveau:

Axialer Strom nicht erhalten \Leftrightarrow **Aximale Anomalie:**

[Adler '69; Bell, Jackiw '69]

$$\partial_\mu (\bar{q} \gamma^\mu \gamma_5 q) = \hbar 2 n_f \nu \quad ; \quad \nu \equiv \frac{\alpha_s}{16\pi} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G_{\mu\nu}^a G_{\rho\sigma}^a \equiv \frac{\alpha_s}{8\pi} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu}$$

- ν sogenannte **topologische Ladungsdichte**. Kann geschrieben werden als totale Divergenz,

$$\nu = \partial^\mu K_\mu(x) \quad ; \quad K_\mu = \frac{\alpha_s}{4\pi} \epsilon_{\mu\alpha\beta\gamma} A_a^\alpha \left(\partial^\beta A_a^\gamma + \frac{1}{3} g f_{abc} A_b^\beta A_c^\gamma \right)$$

K_μ sogenannter **Chern-Simons Strom**

\Rightarrow Für genügend schnell verschwindende Felder kann Integral der Anomalie über Raumzeit, $\int d^4x \partial_\mu (\bar{q} \gamma^\mu \gamma_5 q) = 2 n_f \int d^4x \nu \equiv 2 n_f \int d^4x \partial_\mu K^\mu$,

geschrieben werden als

$$\underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} dt \partial_t \int d^3x \bar{q} \gamma^0 \gamma_5 q}_{Q_5(t=\infty) - Q_5(t=-\infty)} = 2 n_f \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} dt \partial_t \int d^3x K^0}_{N_{CS}(t=\infty) - N_{CS}(t=-\infty)}$$

in Kürze also

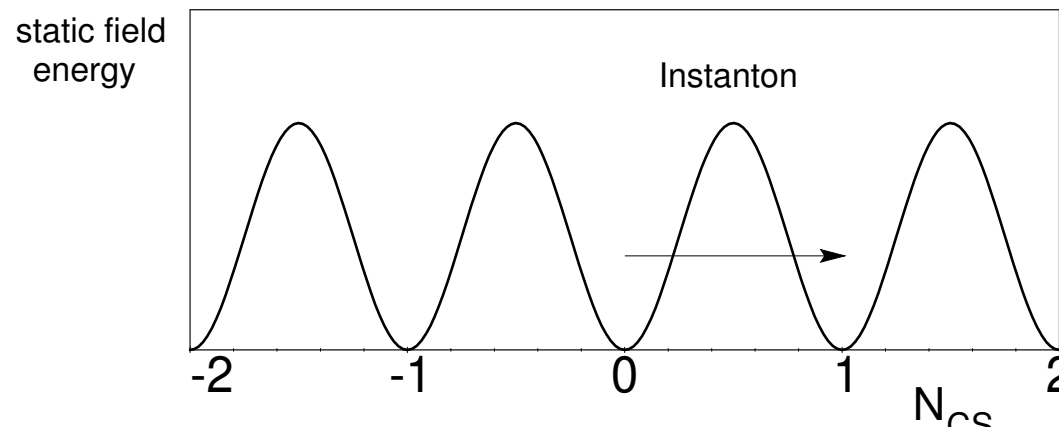
$$\Delta Q_5 = 2 n_f \Delta N_{CS}[G]$$

d.h. im Hintergrund von Gluonfeldern, welche sich zeitlich derart entwickeln, daß sich ihre Chern-Simons Zahl $N_{CS} = \int d^3x K^0$ um ΔN_{CS} ändert, ändert sich die axiale Ladung Q_5 um $2 n_f \Delta N_{CS}$

- Analog, in der **QFD**,

$$\Delta(B + L) = -2 n_g \Delta N_{CS}[W]$$

- Klassische Vakuumfelder, d.h. klassische Eichfelder mit verschwindender Energie, haben **ganzzahlige** N_{CS} .
- Aus topologischen Gründen ist es nicht möglich, Eichfelder verschiedener Chern-Simons Zahlen glatt ineinander zu deformieren \Rightarrow klassische Vakua sind durch **Energiebarrieren** separiert [Jackiw,Rebbi 176; Callan,Dashen,Gross '76]



- **Instanton** beschreibt $\Delta N_{CS} = 1$ **Tunnelübergänge**. Assoziiert mit anomaler Verletzung von Quantenzahlen, [’t Hooft '76]

$$\Delta Q_5 = 2 n_f \text{ in QCD}; \quad \Delta(B + L) = -2 n_g \text{ in QFD}$$

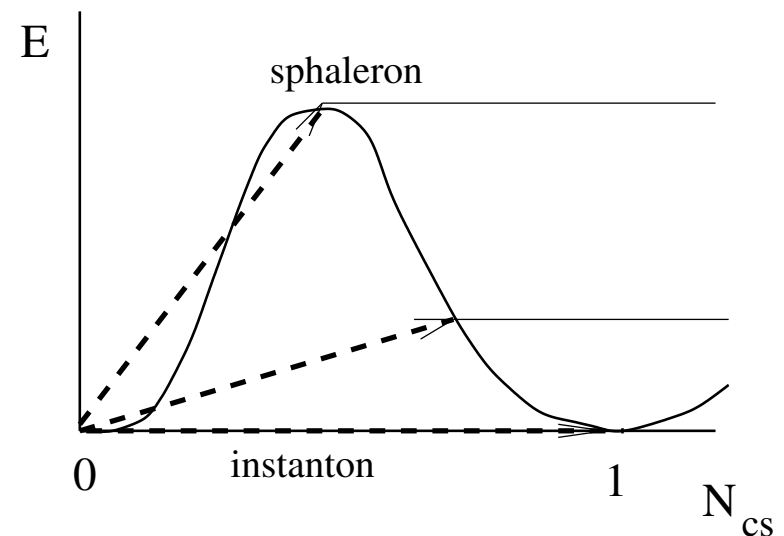
3. Materie-Antimaterie Asymmetrie im Universum?

- Bei niederen Energien, $\Delta N_{CS} \neq 0$
Übergänge nur via Tunneln möglich
⇒ Anomale Prozesse exponentiell unterdrückt; Rate $\propto \exp(-4\pi/\alpha_W)$
⇒ z.B. mittlere Lebensdauer von Deuteron $\rightarrow \bar{N} + 3\bar{\ell}$: $\sim 10^{200}$ Jahre
- Bei Energien \gtrsim Barrierenhöhe,
– QFD Sphaleronenergie [Klinkhamer, Manton '84]

$$M_{sp} \sim \pi \frac{m_W}{\alpha_W} \sim 7.5 \text{ TeV}$$

weniger Unterdrückung, da auch
klassische Übergänge möglich

A. Ringwald (DESY)



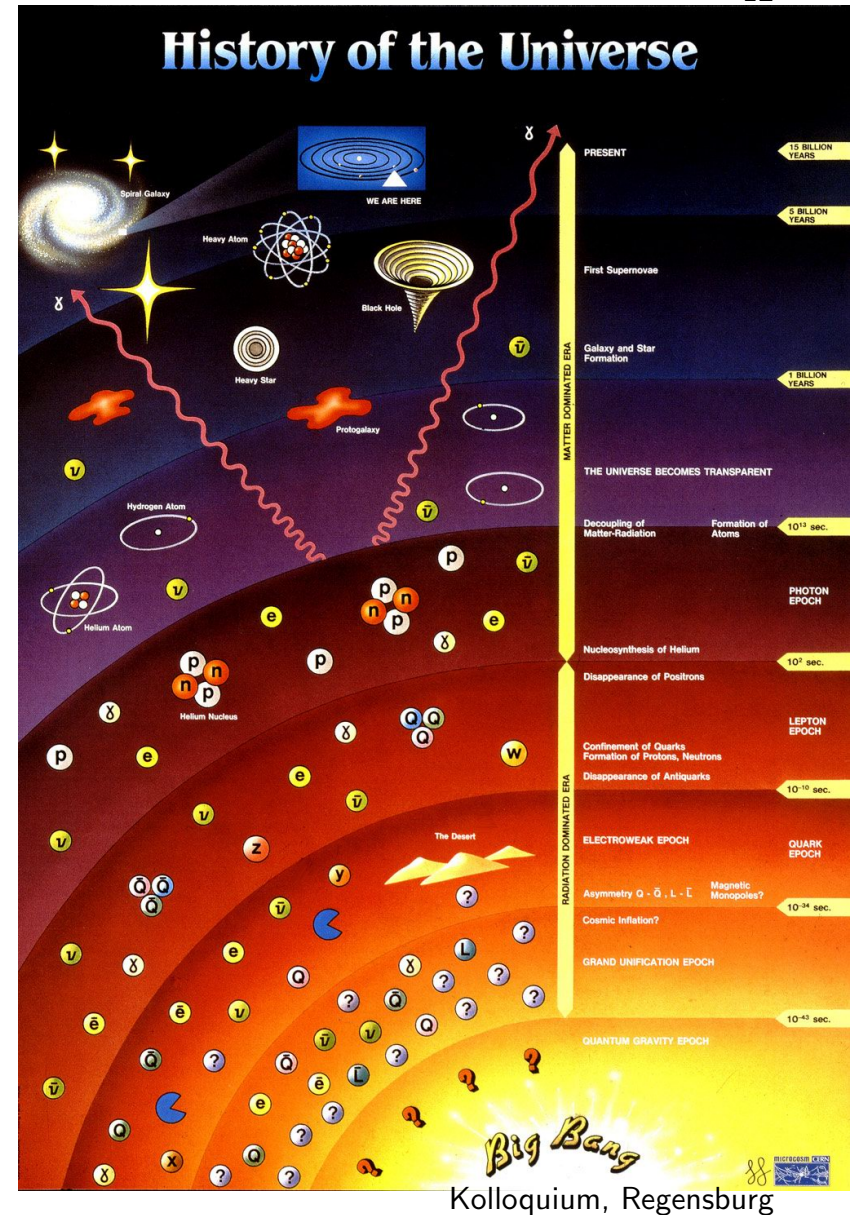
Kolloquium, Regensburg

– Instantonen/Sphaleronen im Standardmodell –

⇒ Anomale Prozesse waren im frühen Universum im Gleichgewicht, d.h. deren Rate \gtrsim Expansionsrate, im Temperaturbereich

[Kuzmin,Rubakov,Shaposhnikov '85;...;AR '88;...;Bödeker '98]

$$100 \text{ GeV} \lesssim T \lesssim 10^{12} \text{ GeV}$$



– Instantonen/Sphaleronen im Standardmodell –

⇒ Anomale Prozesse waren im frühen Universum im Gleichgewicht, d.h. deren Rate \gtrsim Expansionsrate, im Temperaturbereich

[Kuzmin,Rubakov,Shaposhnikov '85;...;AR '88;...;Bödeker '98]

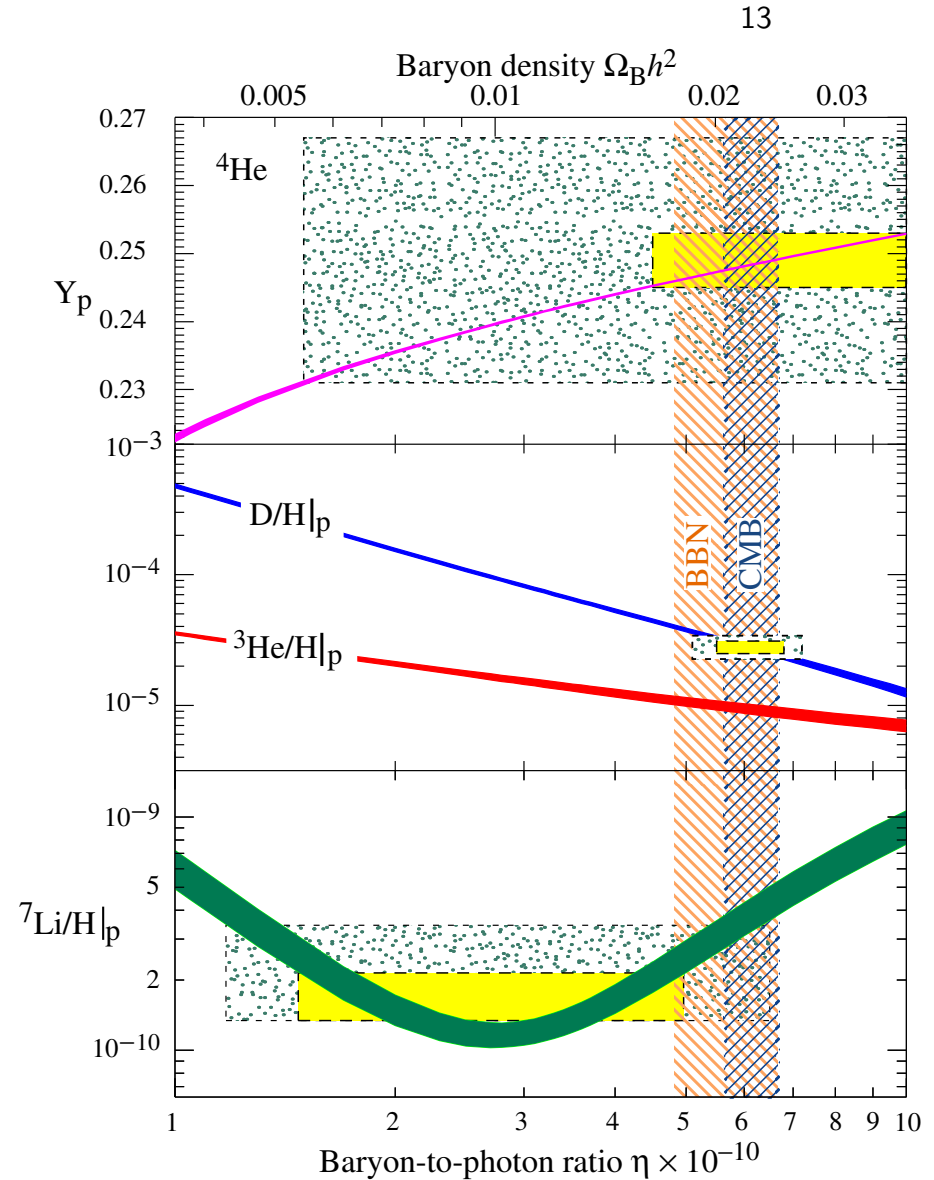
$$100 \text{ GeV} \lesssim T \lesssim 10^{12} \text{ GeV}$$

- Ist es möglich, die beobachtete Materie-Antimaterie Asymmetrie im Universum,

$$\eta_B \equiv \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} = (6.1 \pm 0.3) \times 10^{-10}$$

im Rahmen des Standardmodells zu erklären?

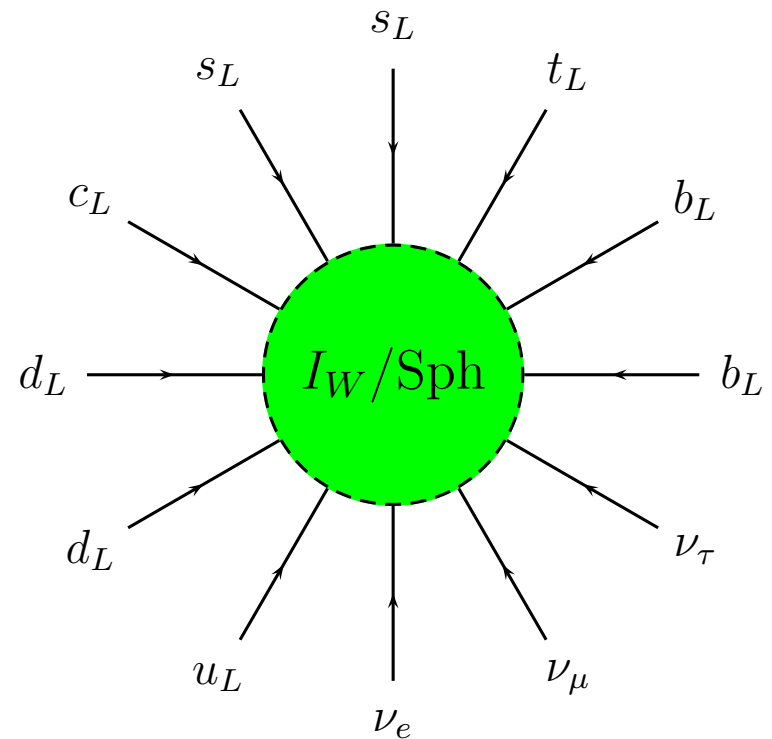
A. Ringwald (DESY)



Kolloquium, Regensburg

– Instantonen/Sphaleronen im Standardmodell –

- Im expandierenden Universum kann die Materie-Antimaterie Asymmetrie dynamisch erzeugt werden, falls es elementare Prozesse gibt, [Sakharov '67]
 - i)* die C und CP verletzen,
 - ii)* die Baryon- und Leptonzahl verletzen,
 - iii)* und die ausserhalb des thermischen Gleichgewichts stattfinden
- Im Rahmen des Standardmodells:
 - i)* ✓
 - ii)* ✓



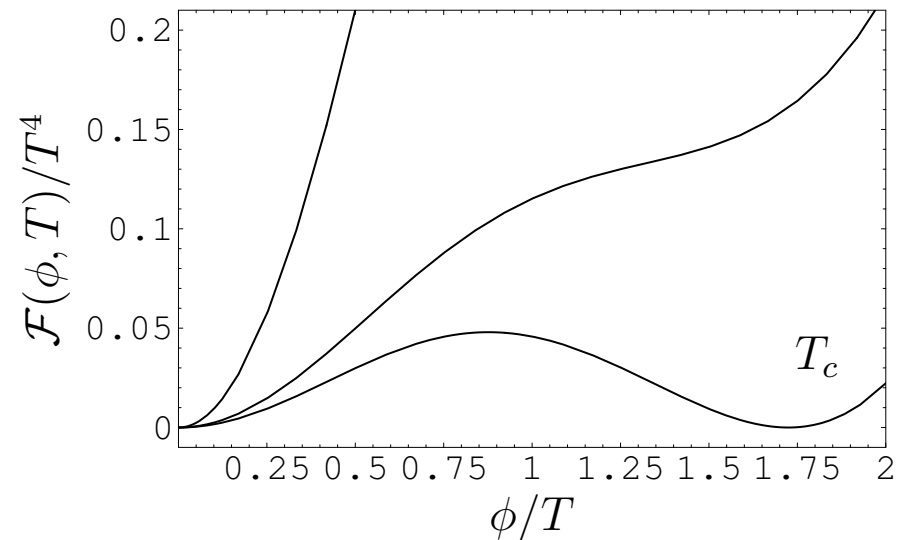
– Instantonen/Sphaleronen im Standardmodell –

- Im expandierenden Universum kann die Materie-Antimaterie Asymmetrie dynamisch erzeugt werden, falls es elementare Prozesse gibt, [Sakharov '67]
 - i*) die C und CP verletzen,
 - ii*) die Baryon- und Leptonzahl verletzen,
 - iii*) und die ausserhalb des thermischen Gleichgewichts stattfinden
- Im Rahmen des Standardmodells:
 - i*) ✓
 - ii*) ✓
 - iii*) Elektroschwacher Phasenübergang zu schwach im minimalen Standardmodell; könnte stark genug sein in supersymmetrischen Erweiterungen (\Leftarrow Labortests!)

A. Ringwald (DESY)

[..;Procopec *et al.* '02;Carena *et al.* '05]

Phasenübergang 1. Ordnung:



Kolloquium, Regensburg

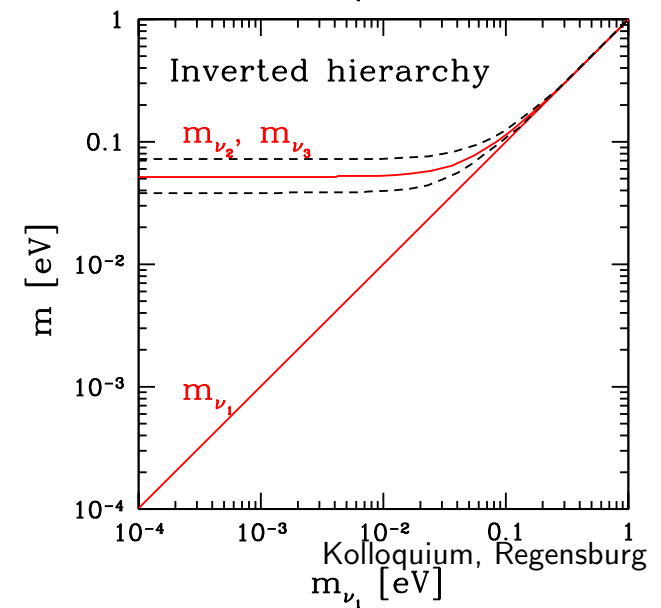
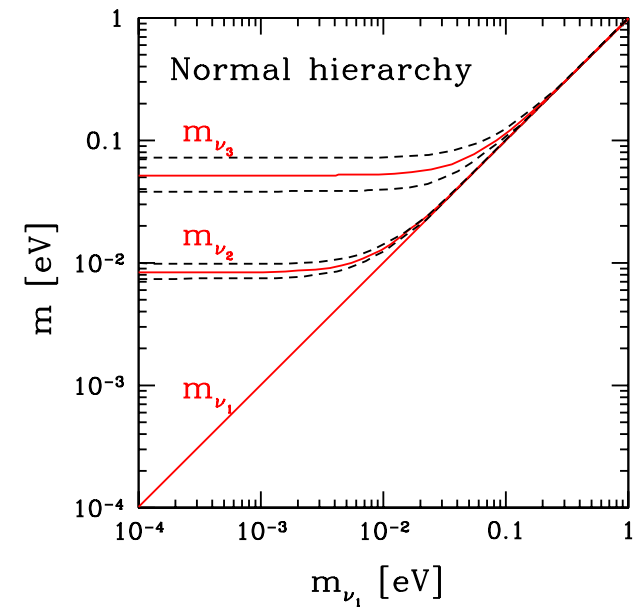
Baryogenese via Leptogenese

[Fukugita, Yanagida '86;...;Buchmüller,Plümacher '96-'04;...]

- See-saw Mechanismus:

[Minkowski '77; Yanagida '79; Gell-Mann,Ramond,Slansky '79]

$m_\nu \sim 0.01$ eV für Standardmodell-Neutrinos



Baryogenese via Leptogenese

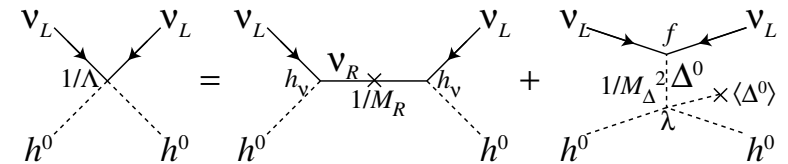
[Fukugita, Yanagida '86;...;Buchmüller,Plümacher '96-'04;..]

- See-saw Mechanismus:

[Minkowski '77; Yanagida '79; Gell-Mann,Ramond,Slansky '79]

$m_\nu \sim 0.01$ eV für Standardmodell-Neutrinos natürlich, wenn es schwere Neutrinos mit $M_M \sim 10^{15}$ GeV gibt,

$$m_\nu = -m_D \frac{1}{M_M} m_D^T$$



[Mohapatra *et al.* '04]

Baryogenese via Leptogenese

[Fukugita, Yanagida '86;...; Buchmüller, Plümacher '96-'04;...]

- See-saw Mechanismus:

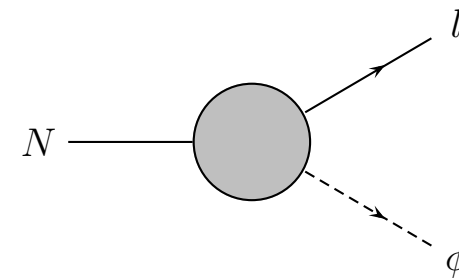
[Minkowski '77; Yanagida '79; Gell-Mann, Ramond, Slansky '79]

$m_\nu \sim 0.01$ eV für Standardmodell-Neutrinos natürlich, wenn es schwere Neutrinos mit $M_M \sim 10^{15}$ GeV gibt,

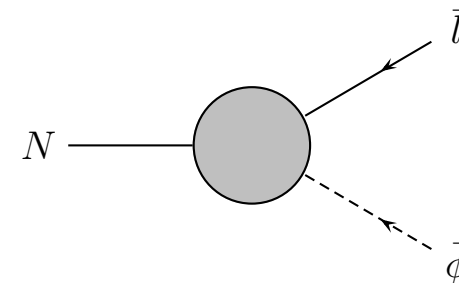
$$m_\nu = -m_D \frac{1}{M_M} m_D^T$$

- CP und L verletzende, außerhalb des thermischen Gleichgewichts stattfindende Zerfälle der schweren Neutrinos N in leichte Leptonen l and Higgs Bosonen ϕ

⇒ Leptonasymmetrie, $\eta_L = \kappa \epsilon / g_*$



$$\Gamma(N \rightarrow l\phi) = (1 + \epsilon) \Gamma/2$$



$$\Gamma(N \rightarrow \bar{l}\bar{\phi}) = (1 - \epsilon) \Gamma/2$$

Baryogenese via Leptogenese

[Fukugita, Yanagida '86;...; Buchmüller, Plümacher '96-'04;...]

- See-saw Mechanismus:

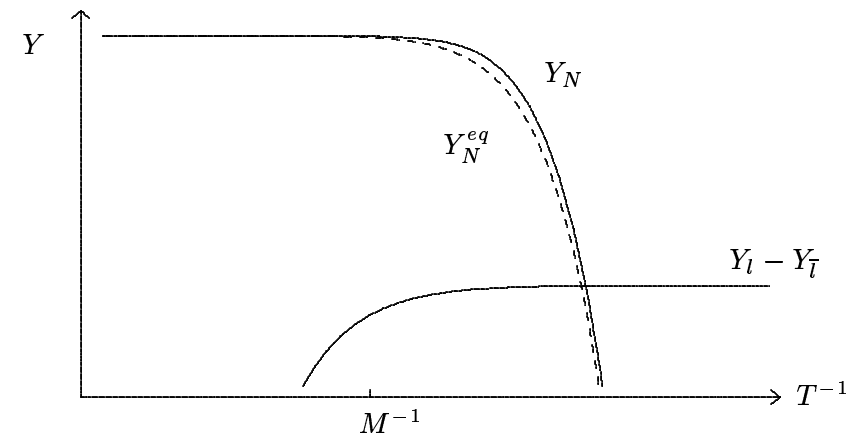
[Minkowski '77; Yanagida '79; Gell-Mann, Ramond, Slansky '79]

$m_\nu \sim 0.01$ eV für Standardmodell-Neutrinos natürlich, wenn es schwere Neutrinos mit $M_M \sim 10^{15}$ GeV gibt,

$$m_\nu = -m_D \frac{1}{M_M} m_D^T$$

- CP und L verletzende, außerhalb des thermischen Gleichgewichts stattfindende Zerfälle der schweren Neutrinos N in leichte Leptonen l and Higgs Bosonen ϕ

⇒ Leptonasymmetrie, $\eta_L = \kappa \epsilon / g_*$



Baryogenese via Leptogenese

[Fukugita, Yanagida '86;...; Buchmüller, Plümacher '96-'04;...]

- See-saw Mechanismus:

[Minkowski '77; Yanagida '79; Gell-Mann, Ramond, Slansky '79]

$m_\nu \sim 0.01$ eV für Standardmodell-Neutrinos natürlich, wenn es schwere Neutrinos mit $M_M \sim 10^{15}$ GeV gibt,

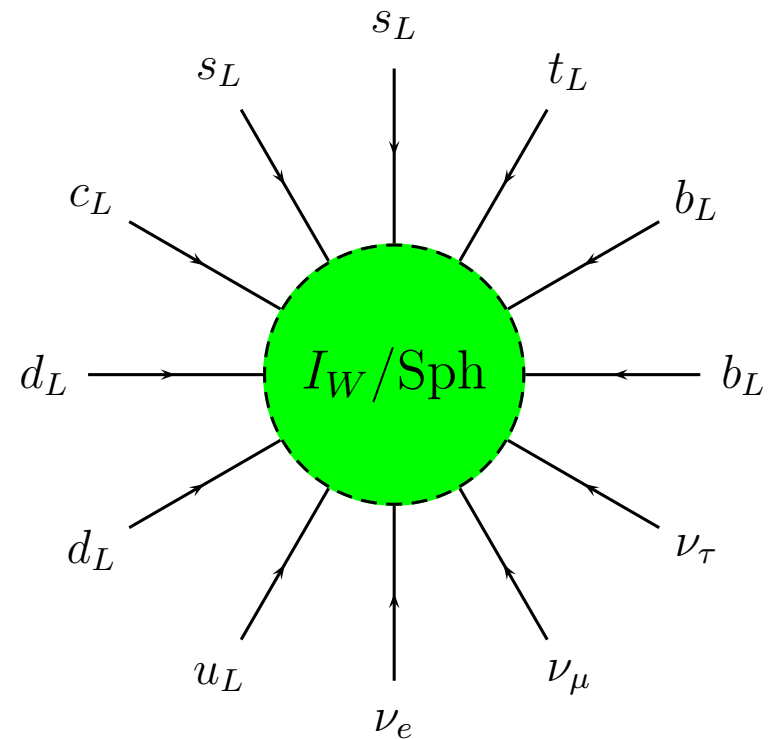
$$m_\nu = -m_D \frac{1}{M_M} m_D^T$$

- CP und L verletzende, außerhalb des thermischen Gleichgewichts stattfindende Zerfälle der schweren Neutrinos N in leichte Leptonen l and Higgs Bosonen ϕ

⇒ Leptonasymmetrie, $\eta_L = \kappa \epsilon / g_*$

⇒ Anomale Prozesse ⇒ Baryonasymmetrie,

$$\eta_B = c \eta_L$$

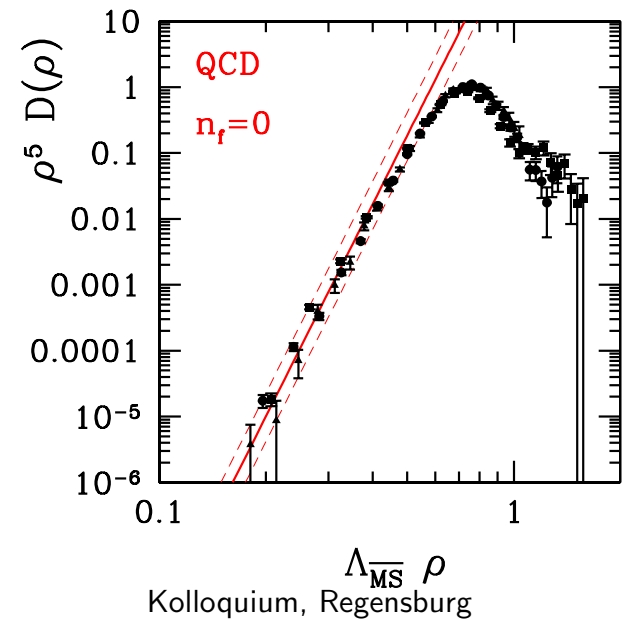
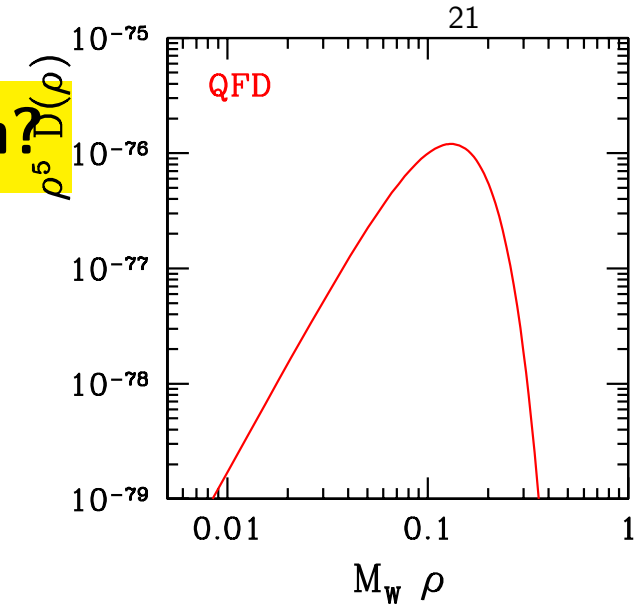


4. Anomale Prozesse an Beschleunigern?

- Natürliche Skala: Sphaleronenergie

$$M_{\text{sp}} \sim \frac{\pi}{\alpha \rho} \sim \begin{cases} 10 \text{ TeV} & \text{in QFD} \\ 10 \text{ GeV} & \text{in QCD} \end{cases}$$

[Klinkhamer, Manton '84;...; AR, F. Schrempp '94-'01;...]



4. Anomale Prozesse an Beschleunigern?

- Natürliche Skala: Sphaleronenergie

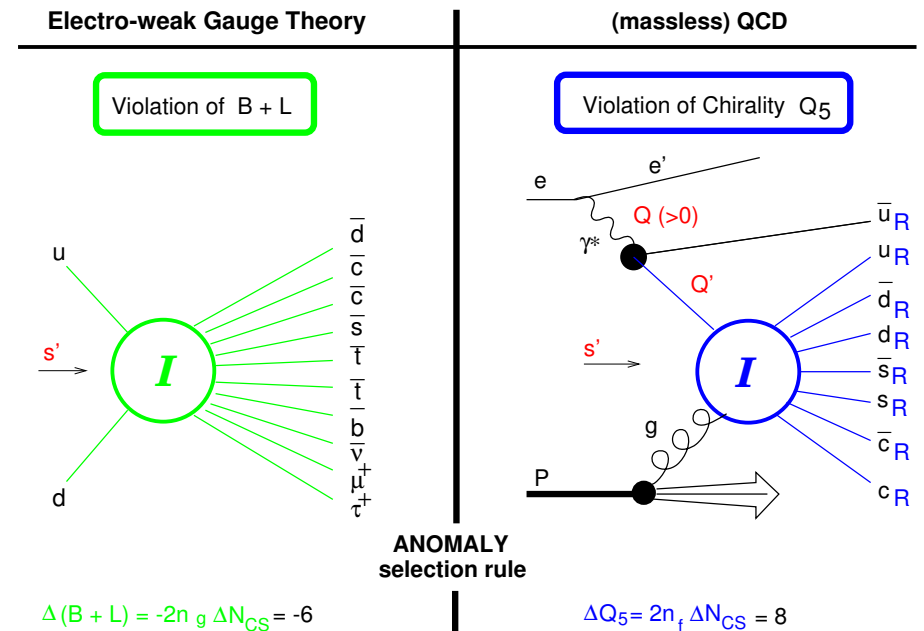
$$M_{sp} \sim \frac{\pi}{\alpha \rho} \sim \begin{cases} 10 \text{ TeV} & \text{in QFD} \\ 10 \text{ GeV} & \text{in QCD} \end{cases}$$

[Klinkhamer, Manton '84;...; AR, F. Schrempp '94-'01;...]

⇒ Anomale Prozesse in

QFD:

QCD:



– Instantonen/Sphaleronen im Standardmodell –

4. Anomale Prozesse ...

- Natürliche Skala: Sphaleronenergie

$$M_{\text{sp}} \sim \frac{\pi}{\alpha \rho} \sim \begin{cases} 10 \text{ TeV} & \text{in QFD} \\ 10 \text{ GeV} & \text{in QCD} \end{cases}$$

[Klinkhamer, Manton '84;...; AR, F. Schrempp '94-'01;...]

⇒ Anomale Prozesse in
QFD: VLHC ($> 20??$)
QCD: HERA ($\leq '07$), LHC ($\geq '07$)



Anomale Prozesse in QCD bei HERA

[Balitsky,Braun '93; AR,F.Schrempp '94-'01]

Monte Carlo Ereignisgenerator für anomale Prozesse in tief-inelastischer eP Streuung

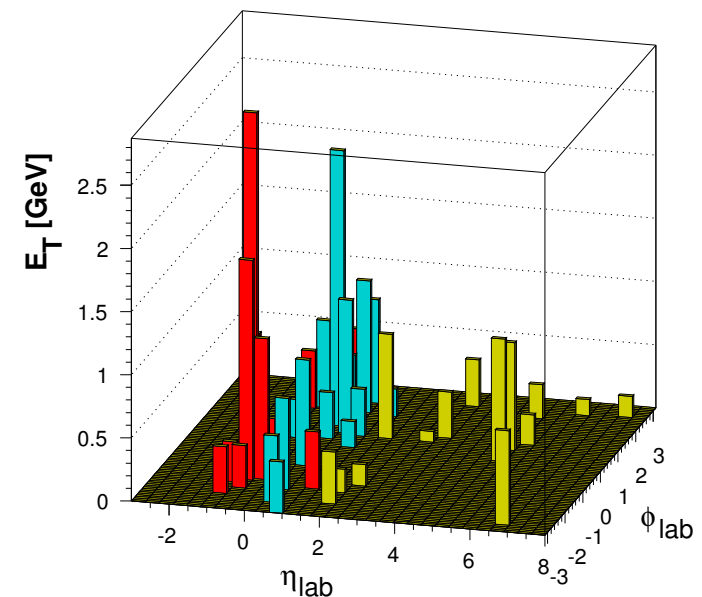
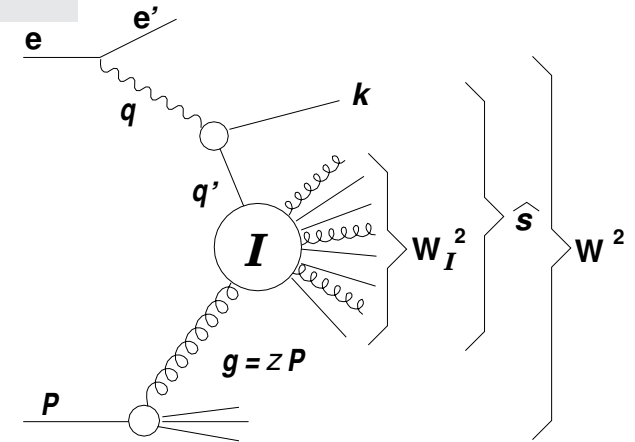
- **Elementarer Prozess:**

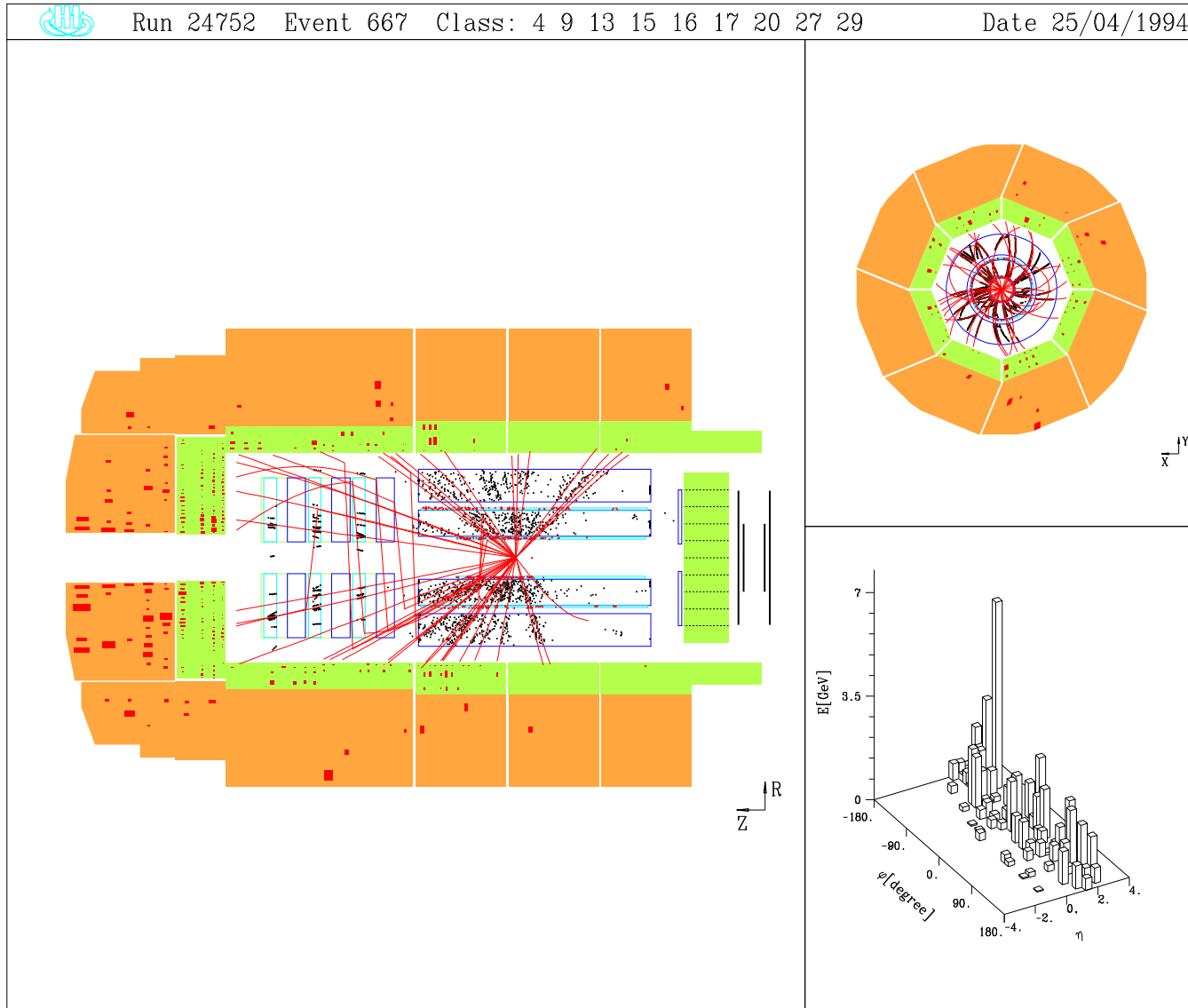
- isotrop in $q'g$ Schwerpunktsystem
- Flavor demokratisch
- große Partonmultiplizität

$$\langle n_q + n_g \rangle = 2 n_f - 1 + \mathcal{O}(1)/\alpha_s \gtrsim 8,$$

- **Partonschauer**

- **Hadronisierung**





A. Ringwald (DESY)

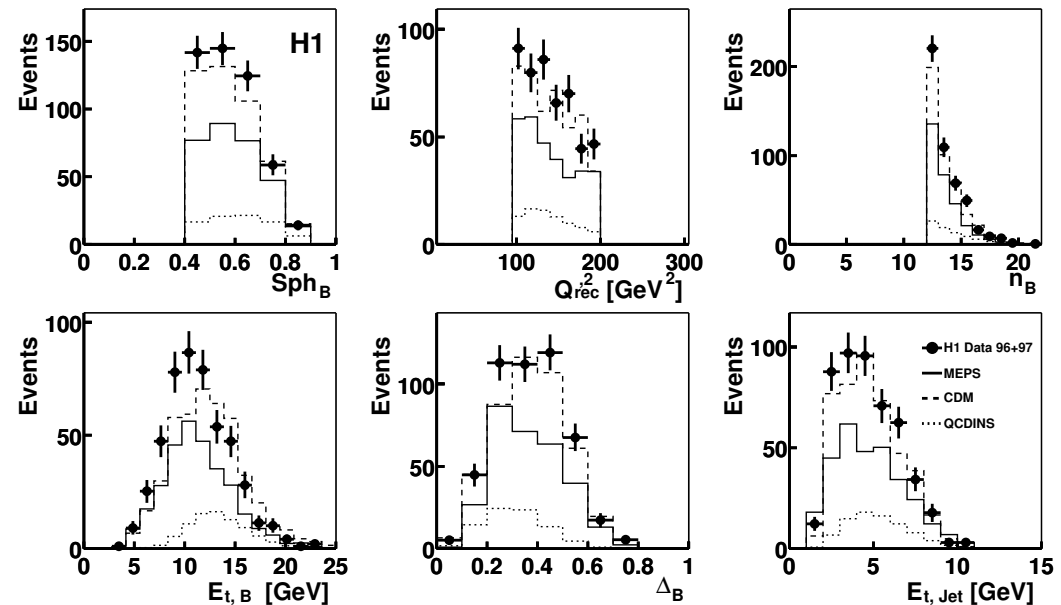
Erste Suche von H1 Kollaboration

[H1 Kollab. '02]

- Vergleich der gemessenen Daten mit Vorhersagen von Ereignisgeneratoren:

QCDINS: anomale Prozesse
MEPS (CDM): norm. Proz.

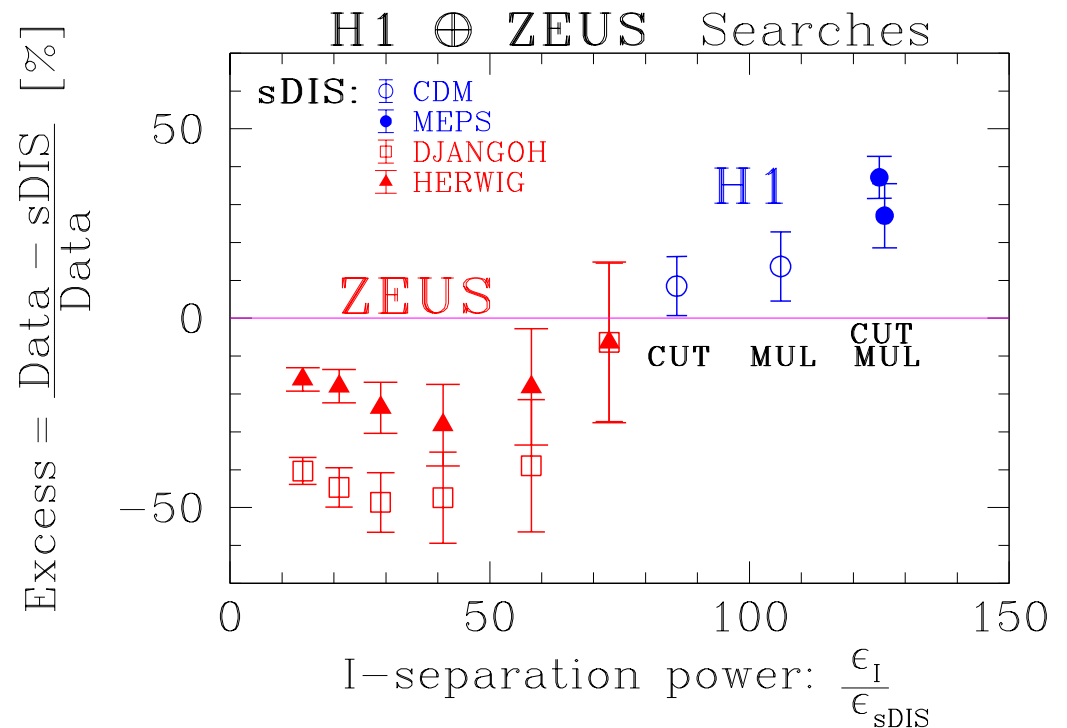
- **Überschuß** von Instantonartigen Ereignissen
- Statistisch **signifikant** im Vergleich zu **MEPS**
- **Unsicherheiten** in Simulationen der normalen Prozesse?



Zusammenfassung der H1/ZEUS Suchen bei HERA I

[H1 Kollab. '02; ZEUS Kollab. '04]

- Instanton-angereicherte Daten durch Schnitte in geeigneten Observablen
- Große Differenzen in Vorhersagen verschiedener Ereignisgeneratoren der normalen Prozesse
- Größere Statistik bei **HERA II** erlaubt härtere Schnitte \Rightarrow größere Instanton-Separierungsleistung $\epsilon_I/\epsilon_{sDIS}$



[F. Schrempp '04]

5. Zusammenfassung

Topologische Fluktuationen der Eichfelder und die assoziierten anomalen Prozesse sind eine unmittelbare Vorhersage der Eichtheorien der elektroschwachen (QFD) und starken (QCD) Wechselwirkung

- Anomale $(B+L)$ -verletzende Prozesse (QFD) sind sehr wichtig im frühen Universum und haben einen entscheidenden Einfluß auf die Entwicklung der Baryon- und Leptonasymmetrie des Universums
 - Elektroschwache Baryogenese?
 - Baryogenese durch Leptogenese?
- Anomale Q_5 -verletzende Prozesse (QCD) können im Labor an Beschleunigern untersucht werden
 - Gegenwärtige Studien bei HERA
 - Zukünftige Studien am LHC

[F.Schrempp; F.Schrempp,Petermann]

Aus diesen Studien lernt man etwas über anomale $(B+L)$ -verletzende Prozesse an zukünftigen Beschleunigern im 100 TeV Bereich (VLHC)