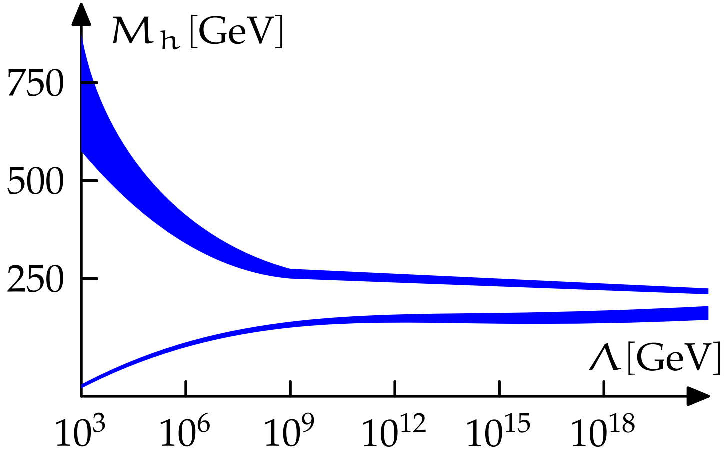
Pseudo-Axionen in Little-Higgs-Modellen

Jürgen Reuter
— DESY Theory Group —
⟨juergen.reuter@desy.de⟩

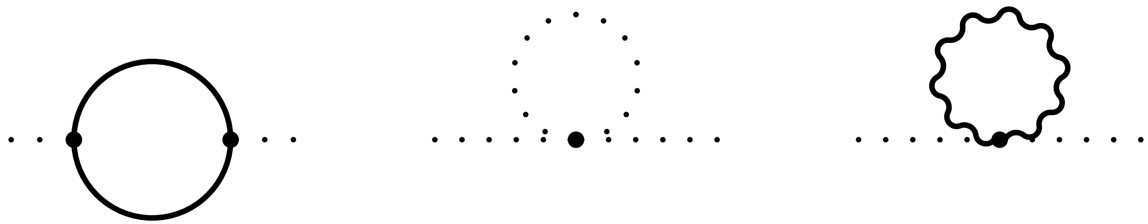
in Zusammenarbeit mit: W. Kilian (DESY), D. Rainwater (Rochester)

DPG Berlin, 8. März 2005



Motivation: Hierarchieproblem

- Effektive Theorien unterhalb einer Skala Λ $\Rightarrow$
- Loop-Integrationen nur bis $\sim \Lambda$:



$\sim \Lambda^2$

Problem: Prinzipiell, $m_h \sim \mathcal{O}(\Lambda^2)$:

$$\boxed{m_h^2 = m_0^2 + \Lambda^2 \times (\text{Loop-Faktoren})}$$

◊ *Leichtes* Higgs favorisiert durch EW Präzisionsobservablen ($m_h < 0.5$ TeV)

- $m_h \ll \Lambda$ $\Leftrightarrow$ Fine-Tuning !?
- **Lösung:** Mechanismus zur Eliminierung der Loop-Beiträge

Führe (näherungsweise) Symmetrie zum Schutz der Teilchenmassen ein

Traditionell (SUSY):
Spin-Statistik $\Longrightarrow$ Loops von Bosonen und Fermionen

Little Higgs:
Eichgruppen-Struktur $\Longrightarrow$ Loops von Teilchen *gleicher Statistik*

Alte Idee: Georgi/Pais, 1974; Georgi/Dimopoulos/Kaplan, 1984

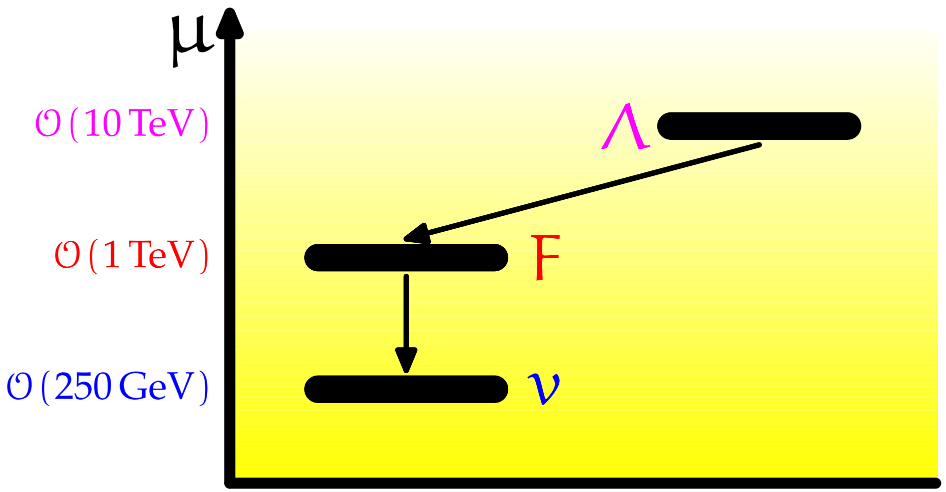
Leichtes Higgs als Pseudo-Nambu-Goldstone-Boson (PNGB) $\Leftrightarrow$ spontan gebrochene (näherungsweise) *globale* Symmetrie; nicht-lineares Sigma-Modell

- ohne Fine-Tuning: $v \sim \Lambda/4\pi$

Neue Zutat: Arkani-Hamed/Cohen/Georgi/..., 2001

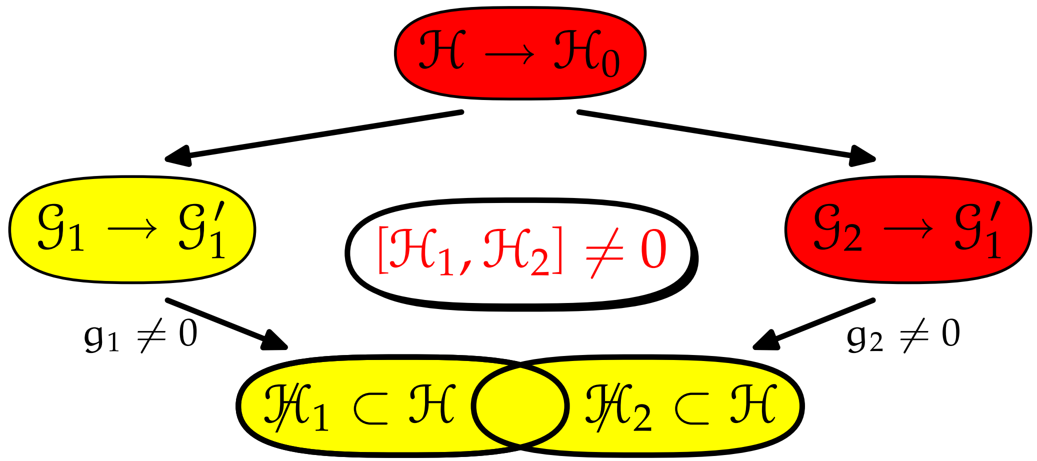
Eichgruppen-Struktur eliminiert quadratische Divergenzen auf 1-Loop-Niveau $\Longrightarrow$ 3-Skalen-Modell

Skalen und Higgs-Massen



- Skala Λ: globale SB, neue Dynamik, UV-Einbettung
- Skala F: Pseudo-Goldstone-Bosonen, neue Vektor-Bosonen und Fermionen
- Skala v: Higgs, $W^\pm$, Z, $\ell^\pm$, ...

Boson-Massen radiativ (Coleman-Weinberg), **aber:** Higgs durch Symmetrien *gegen quadratische Korrekturen auf 1-Loop-Niveau* geschützt



Wie funktioniert nun Little Higgs?

$$M_H \sim g_1 g_2 \, \Lambda / 16\pi^2$$

- Erweiterter skalarer (Higgs-) Sektor

Erweiterte globale Symmetrie

- **Spezifische Form des Potentials:**

$$\mathcal{V}(h, \Phi) = C_1 F^2 \left| \Phi + \frac{i}{F} h \otimes h \right|^2 + C_2 F^2 \left| \Phi - \frac{i}{F} h \otimes h \right|^2$$

h masselos @ 1-Loop-Level, $\langle h \rangle = v$, $M_h \sim v$, $M_\Phi \sim F$, $i \cdot \langle \Phi \rangle \sim v^2/F$

h und Φ mischen

- $\boxed{\textbf{Erweiterter Eichsektor:}}$ $\mathrm{SM}' \times \mathcal{G} \to \mathrm{SM} \implies$ Zusätzl. EW Eichbosonen: $B', Z', W'^{\pm}$ (Hyperladungs-Singletts & -Tripletts)

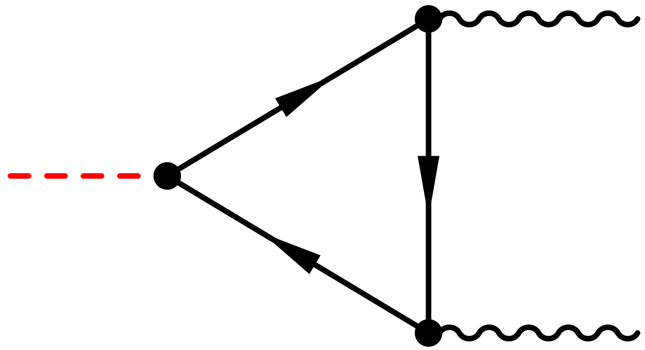
- Erweiterter Top-Sektor: neue Quarks, t, t'-Loops $\Rightarrow$ $M_h^2 < 0$ $\Rightarrow$ EWSB

Eigenschaften der Pseudo-Axionen

- Higgs $\in$ PNGB $\Rightarrow$ Rang-Reduktion der globalen Symmetriegruppe
- Higgs entspricht außerdiagonalem Generator (QCD: Kaon)
- diagonaler Generator: η in QCD; *koppelt pseudoskalar an Fermionen*, verhält sich wie Axion $\Rightarrow$ Pseudo-Axion der LHM
- analoge Teilchen: Techni-Axion, Topcolor-Axion, (N)MSSM-Axion
- Einfluß auf EW und T Phänomenologie

QCD-(PQ)-Axion: $\mathcal{L}_{\text{Ax.}} = \frac{1}{\Lambda}\frac{\alpha_s}{8\pi^2} A_g \eta G_{\mu\nu}\tilde{G}^{\mu\nu}, \quad \tilde{F}^{\mu\nu} = \frac{1}{2}\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}F_{\rho\sigma}$

Anomale $U(1)_\eta$**:**



Eigenschaften der Pseudo-Axionen

- η EW Singlett
- $\xi = \exp\left[\frac{i}{F}\eta\right]$ exaktes NGB $\Rightarrow \eta$ $\boxed{\text{kein Potential, nur Ableitungskopplungen}}$
- Fermion-Kopplg. brechen globale Symm., erzeugen Potential und Masse
- **explizite Symmetriebrechung** $\Rightarrow m_\eta$ und $g_{\eta\gamma\gamma}$ unabhängig $\Rightarrow$ Axion-Bounds *nicht anwendbar*
- *kein neues Hierarchie-Problem* $\Rightarrow m_\eta \lesssim v \sim 250$ GeV
- η-Kopplungen an SM-Teilchen v/F unterdrückt
- Branching ratios (BRs): dominant ($t\bar{t}$,) $b\bar{b}$, $\tau^+\tau^-$, ...

Chirale Struktur der Yukawa couplings in LHM mit schwerem $SU(2)$ Singlett T:

$\bar{T}TH$	$O(\frac{v}{F})$
$\bar{T}tH$	$O(1)\,\mathcal{P}_L + O(\frac{v}{F})\,\mathcal{P}_R$
$\bar{t}tH$	$O(1)$

$\bar{T}T\eta$	$O(1)\,\gamma_5$
$\bar{T}t\eta$	$O(1)\,\mathcal{P}_R + O(\frac{v}{F})\,\mathcal{P}_L$
$\bar{t}t\eta$	$O(\frac{v}{F})\,\gamma_5$

Das μ Modell (Simple-Group model)

- "Moose"-artiges Modell   Schmaltz (2004), Kilian/Rainwater/JR (2004)
- μ-Term bricht globale Symm. explizit ($\to$ MSSM) $\Rightarrow$ EWSB, kein Fine-Tuning
- erweiterte Eichgruppe: $SU(3) \times U(1)$; global $U(3) \to U(2)$

$$\Phi_{1/2} = \exp\left[\pm i \frac{F_{2/1}}{F_{1/2}} \Theta\right] \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{1/2} \end{pmatrix} \qquad \Theta = \frac{1}{\sqrt{F_1^2 + F_2^2}} \begin{pmatrix} \eta & 0 & h^* \\ 0 & \eta & \\ h^T & & \eta \end{pmatrix}$$

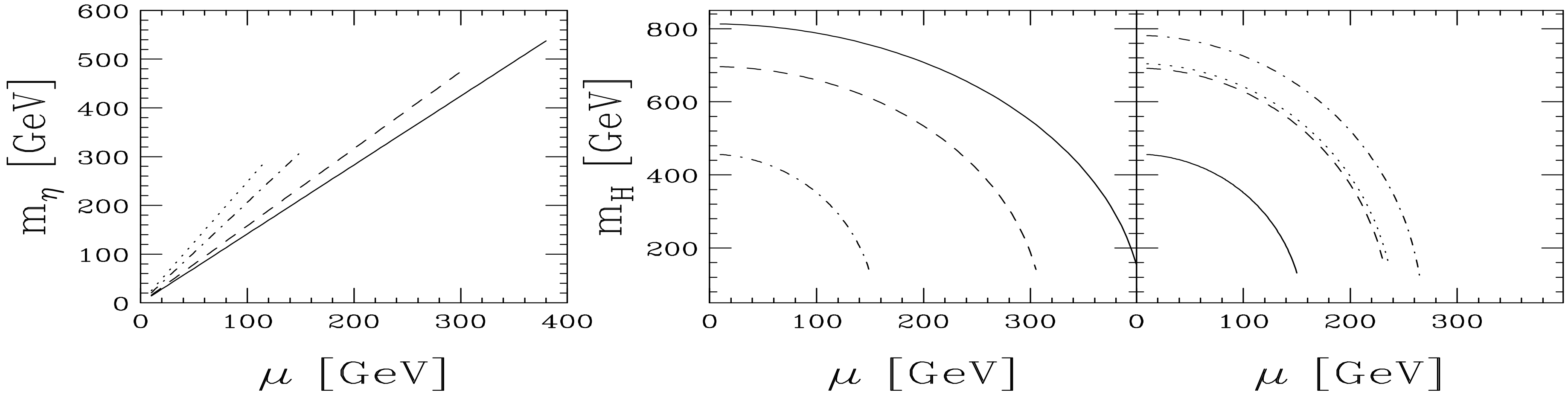
Skalares Potential ($\kappa \equiv F_1/F_2 + F_2/F_1 \geqslant 2$):

$$-V = -(\delta m^2 + \mu^2 \kappa)(h^\dagger h) - \mu^2 \kappa \frac{\eta^2}{2} + \left(\frac{\mu^2 \kappa^2}{12 F_1 F_2} - \delta\lambda\right)(h^\dagger h)^2 + \ldots$$

δm, $\delta\lambda$ 1-Loop-Beiträge (Coleman-Weinberg-Potential)

$\boxed{m_\eta = \sqrt{\kappa}\,\mu \geqslant \sqrt{2}\,\mu}$ kein Fine-tuning: $\mu \sim v$ $m_H^2 = -2(\delta m^2 + m_\eta^2)$

Das μ Modell (Simple-Group model)



Links: $F_1/F_2 = 1$, 1/2, 1/4, 1/6 Mitte: festes $F_2 = 2.0$ TeV. Rechts: festes $F_1/F_2 = 1/4$, versch. F_1 [TeV]: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 (jeweils —, $---$, $-\cdot-$·, $\cdots$)

- schwere Partner für up-type SM-Fermionen ($\Psi_L = (t_L, b_L, T_L)^T$)
- Annahmen: *keine Mischung* zwischen SM und Fermionen in 1./2. Familie, minimales M_T (LHC)
- **freie Parameter:** $F_{1,2}$ und μ mit $\sqrt{F_1^2 + F_2^2} \gtrsim 2$ TeV [ΔT, Kontakt-WW]
  $F_1 \gtrsim v$, $F_2 > F_1$ (Fermionen-Mischung/-Universalität)

η Verzweigungsverhältnisse

"Golden Point" (erfüllt EW Präzisions- und Flavour-Limits):

$$\begin{aligned} F_1 &= 0.5 & m_{U,C} &= 0.7 \\ F_2 &= 2 & m_{Z'} &= 1.2 \\ \Lambda &= 5 & m_{W'} &= 0.95 \\ m_T &= 1 & & [\text{TeV}] \end{aligned}$$

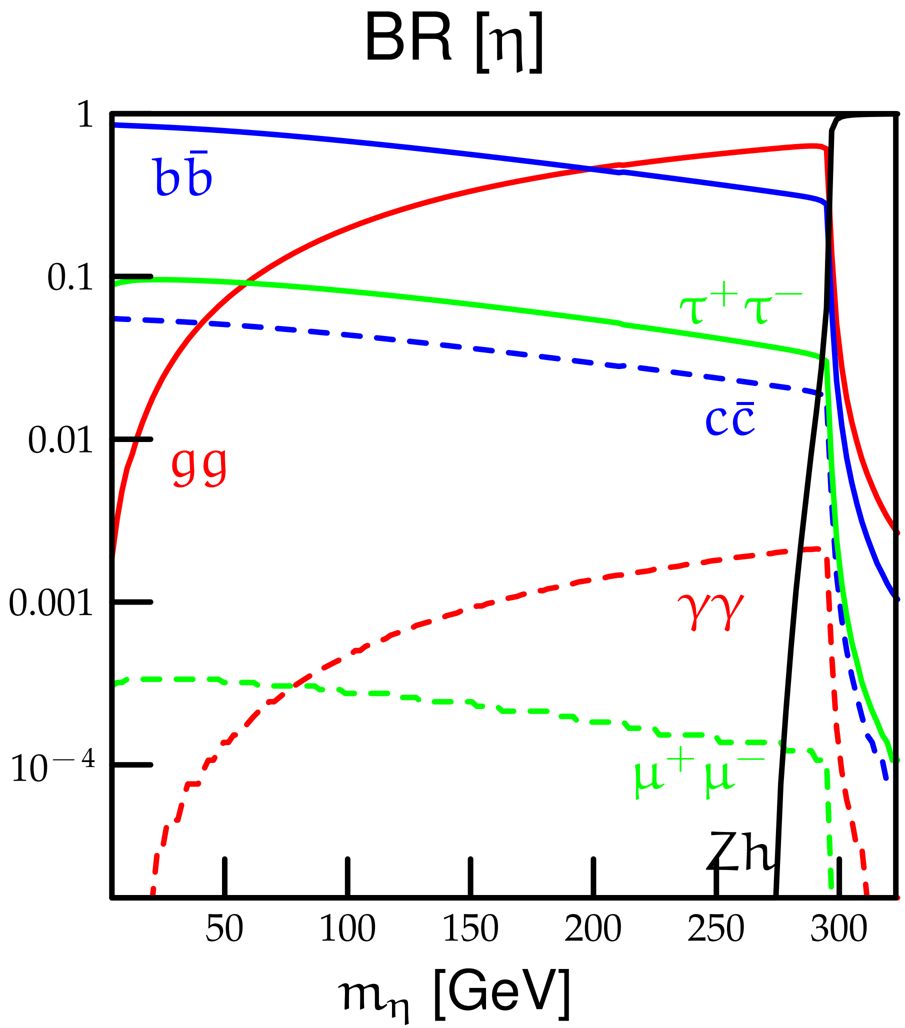
$ZH\eta$**-Kopplung:**

$$\mathcal{L}_{ZH\eta} \propto \frac{m_Z}{\sqrt{2}F} Z_\mu (\eta \partial^\mu H - H \partial^\mu \eta)$$

N.B.: v/F-Unterdrückung aufgehoben!

η analog zu A in 2HDM für kleines $\tan\beta = F_1/F_2 < 1$ (Flavour)

neue Higgs-Zerfälle ($H \to Z\eta$, $[H \to \eta\eta]$)



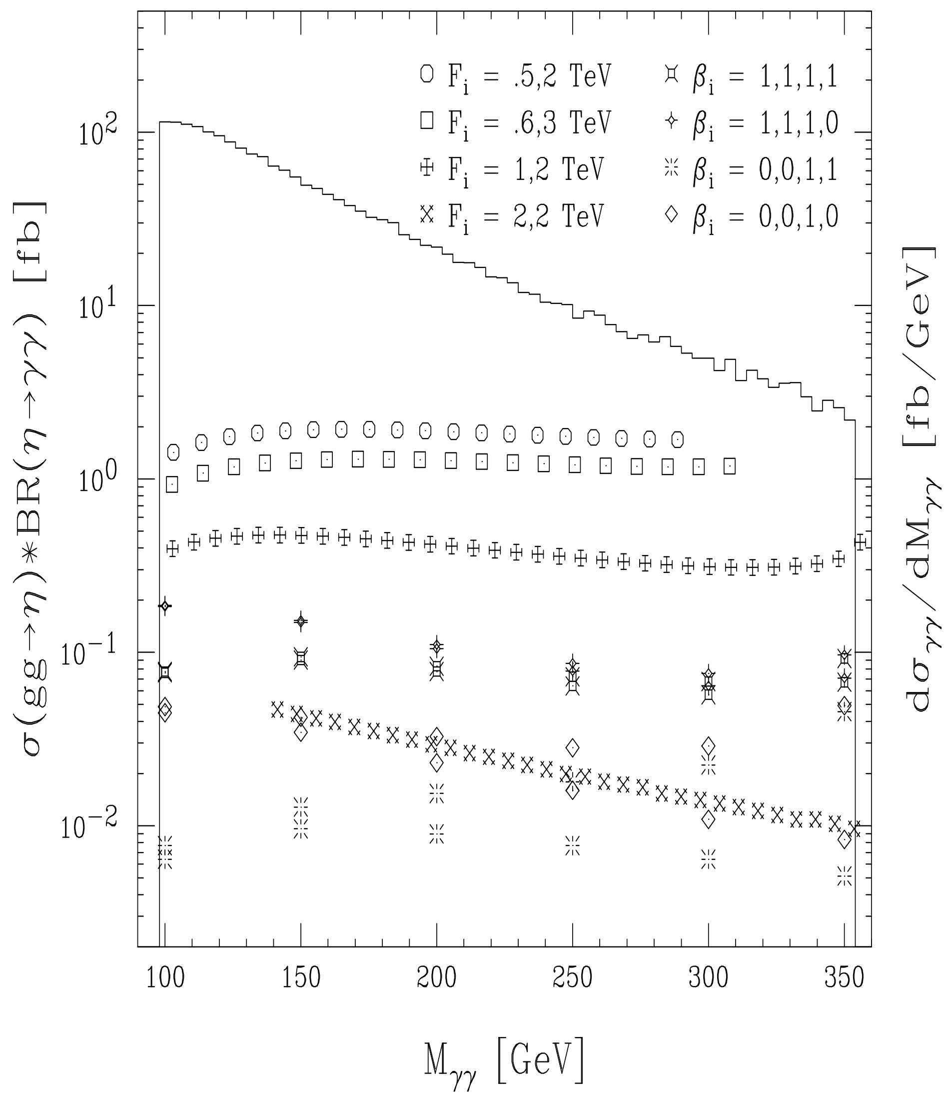
- **Gluon-Fusion** (axiale $U(1)_\eta$-Anomalie) (analog zu $gg \to H \to \gamma\gamma$ s. ATLAS/CMS TDR)

- v/F-Unterdrückung im Loop aufgehoben!

- WQ groß für $F_1 \ll F_2$

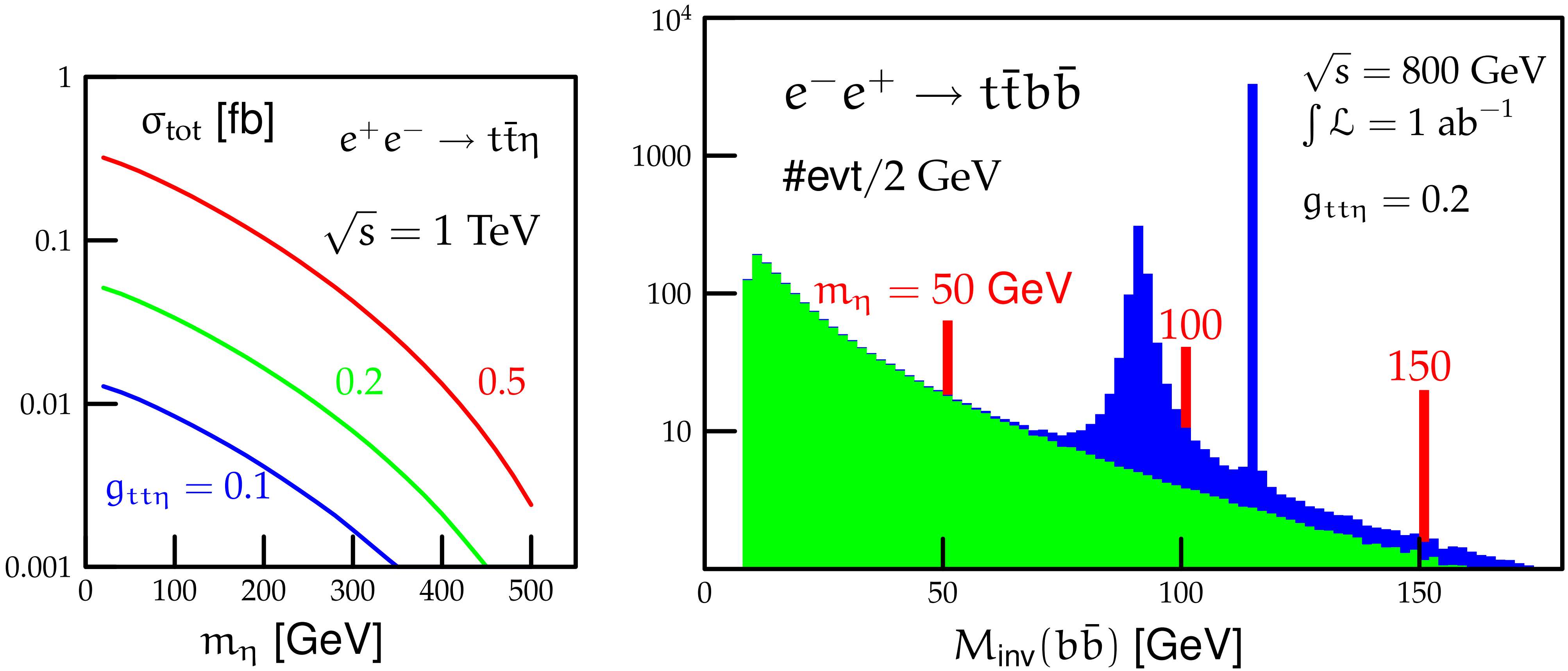
- "Golden Point" LHC(300 fb^{-1}):
  $m_\eta \sim 320$ GeV 7σ
  5σ für $m_\eta = 240$ GeV
  (SLHC bis $m_\eta = 130$ GeV)
  $S : B \sim 1/10 - 1/50$

- NLO-Wirkungsquerschnitte; Diphoton-Bkgd. (Diphox Binoth); $p_T(\gamma) > 40$ GeV, $|\eta_\gamma| < 2.5$, $\epsilon_\gamma = 0.8$



$t\bar{t}\eta$ assoziierte Produktion

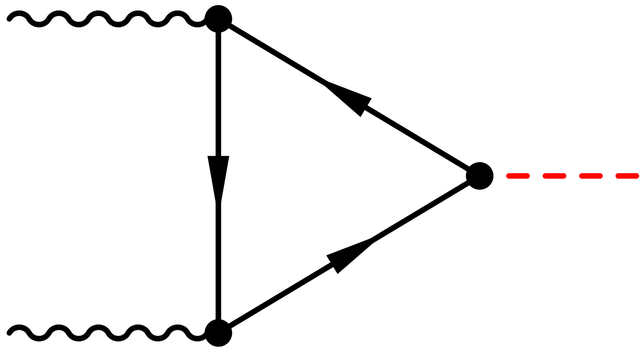
Problem: WQ vs. Untergrund



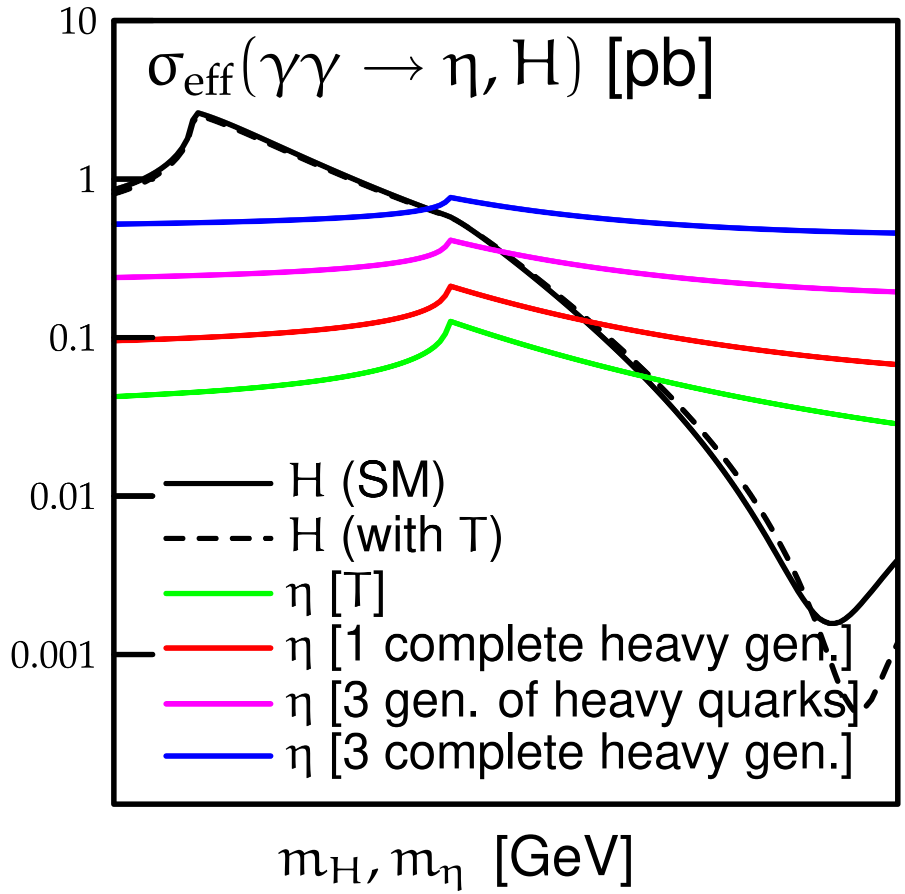
Möglichkeit: $Z^* \to H\eta$ (analog zu A in 2HDM)

Kilian/JR/Rainwater (in prep.)

- Photon-Collider als Präzisionsmaschine für die Higgs-Physik (s-Kanal-Resonanz, Anomalie-Kopplung)

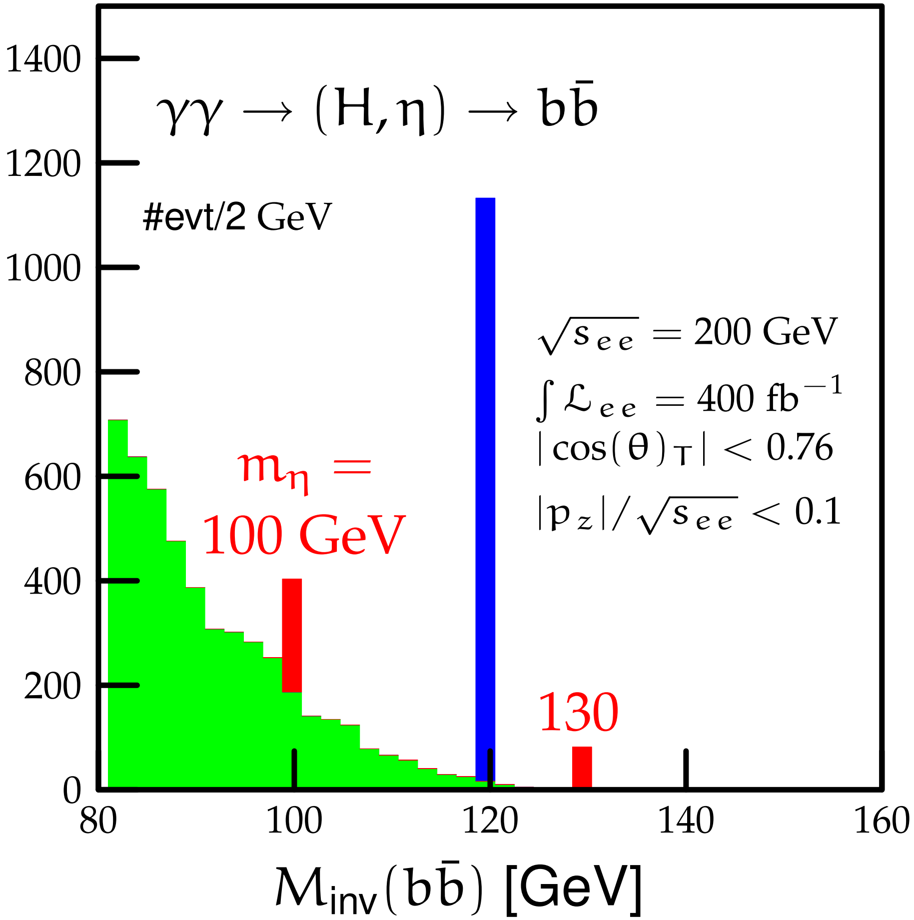


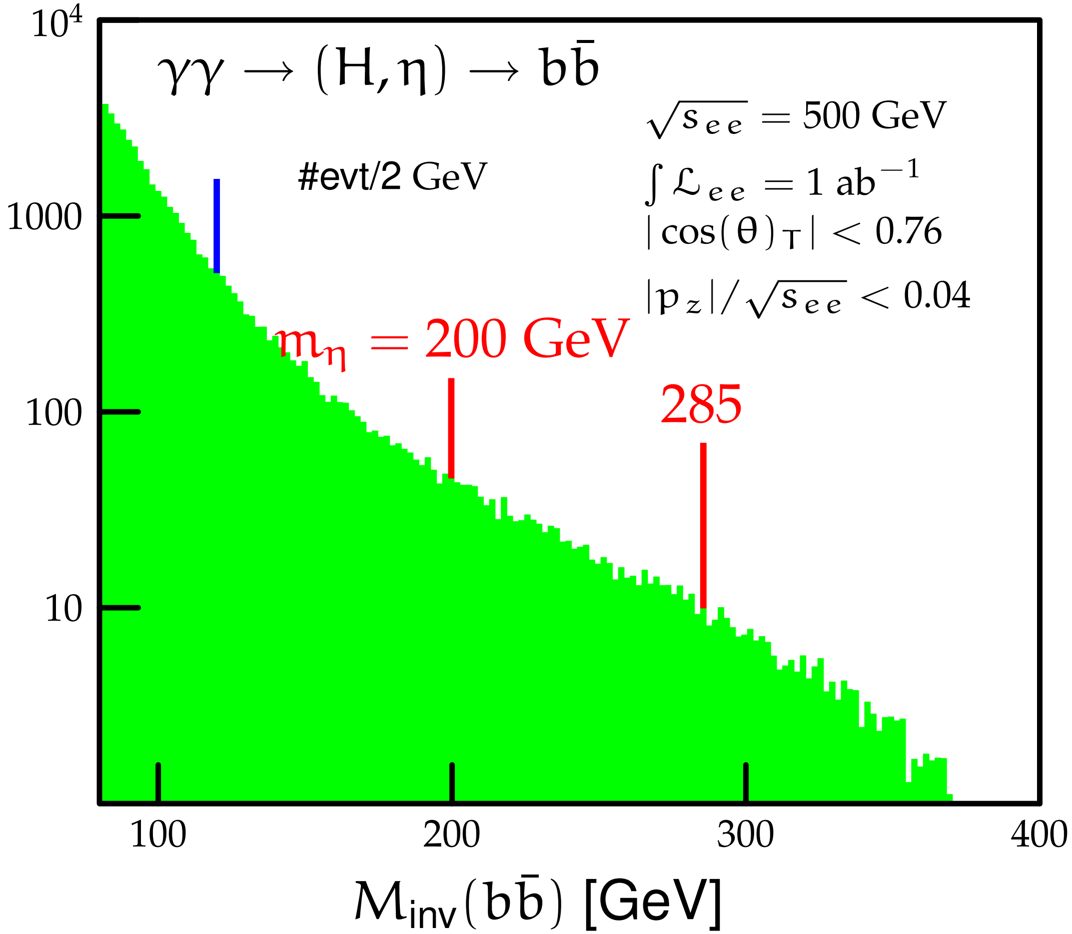
- S/B analog zu LC
- η im μ-Modell mit identischen Parametern wie A im MSSM ($\hookrightarrow$ Mühlleitner et al. (2001))



$$\boxed{g_{bb\eta} = 0.4 \cdot g_{bbh}}$$

m_η	100	130	200	285
$\Gamma_{\gamma\gamma}$[keV]	0.15	0.27	1.1	3.6





◊ Little Higgs elegante Alternative zu SUSY

ungeeichte, anomale $U(1)_\eta$: neue Singlett-(Pseudo)Skalare η

- massives Z' (leicht detektierbar) $\longleftrightarrow$ η physikal. (schwer detektierbar)
- Explizite Symmetriebrechung umgeht Axion-Limits
- **LHC:** η Produktion in Gluon-Fusion, Diphoton-Signal
- Pseudo-Axionen ändern T-Phänomenologie!
- **ILC:** $t\bar{t}$ assoziierte Produktion (m_η klein), $Z^* \to H\eta$
  Photon-Collider: alle Massenbereiche, komplementäre Messung