

Moderne Experimentalphysik III: Kerne und Teilchen (Physik VI)

Günter Quast, Roger Wolf, Pablo Goldenzweig
20. Juli 2017

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IEKP) – PHYSICS FACULTY



Direkte Higgs Suchen und Entdeckung



Higgs Boson...

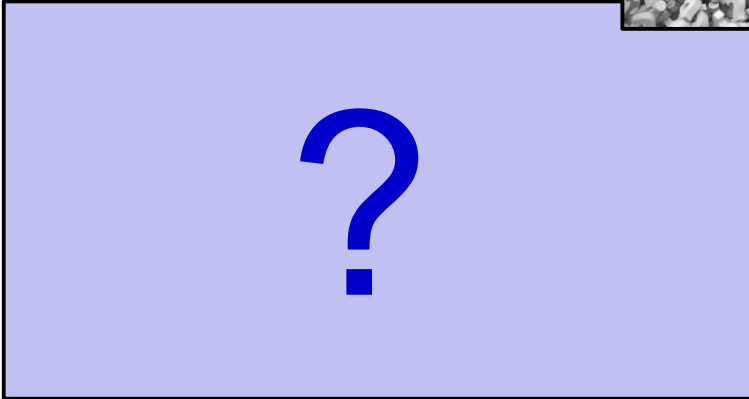
Google-Suche

Auf gut Glück!

Google.de angeboten auf: [English](#)

Direkte Suche bei LEP-II

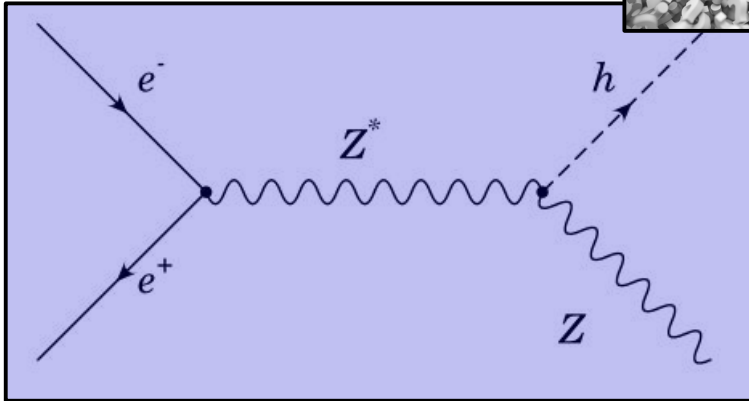
- Hauptproduktion in e^+e^- :



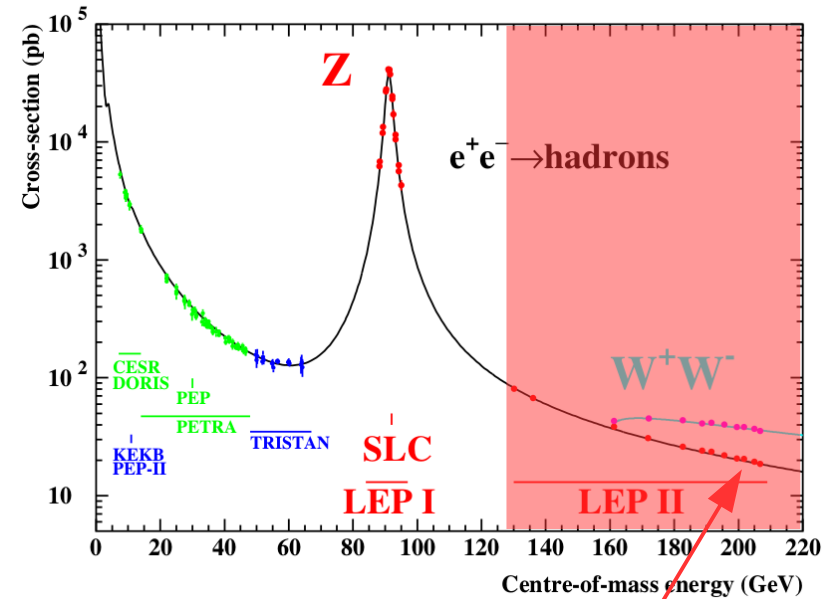
- Higgs Boson koppelt an Masse.
- Kopplung am stärksten für schwerste Objekte.

Direkte Suche bei LEP-II

- Hauptproduktion in e^+e^- :



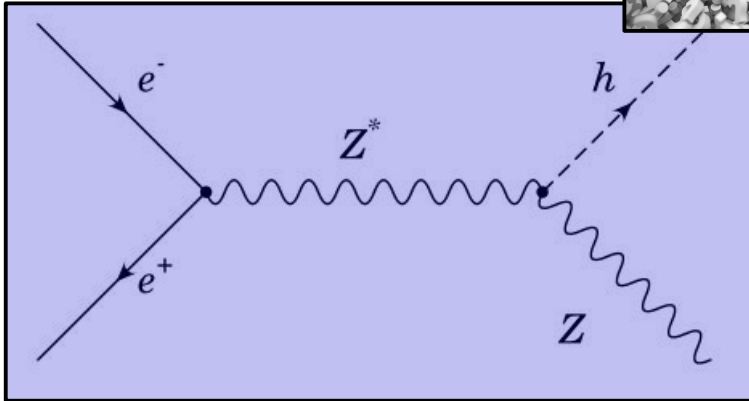
- Higgs Boson koppelt an Masse.
- Kopplung am stärksten für schwerste Objekte.



Year	1996		1997	1998	1999			2000		
E_{CM} nominal [GeV]	161	172	183	189	192	196	200	202	205	207

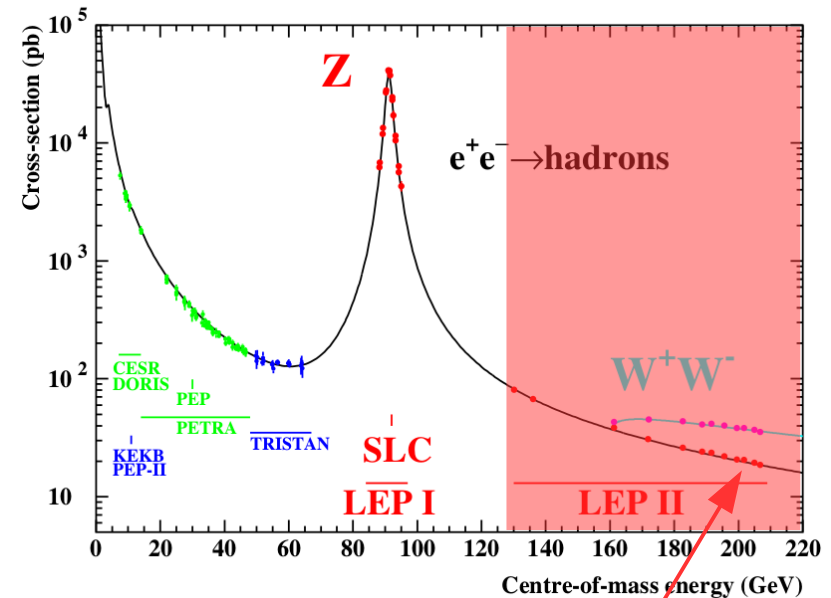
Direkte Suche bei LEP-II

- Hauptproduktion in e^+e^- :



- Higgs Boson koppelt an Masse.
- Kopplung am stärksten für schwerste Objekte.

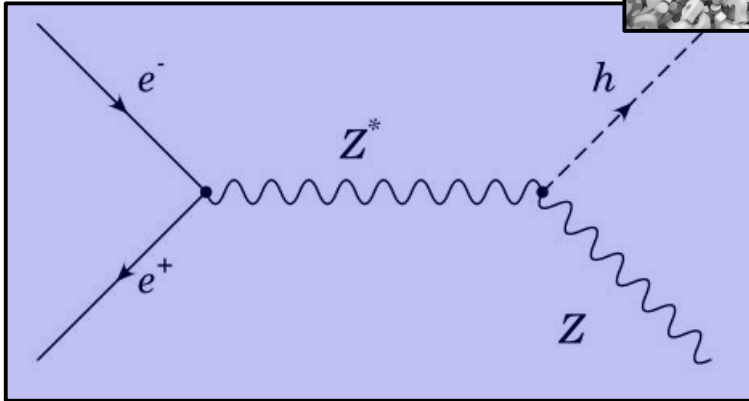
Wie groß war die maximale Reichweite der LEP-Experimente in m_H ?



Year	1996		1997	1998	1999		2000			
E_{CM} nominal [GeV]	161	172	183	189	192	196	200	202	205	207

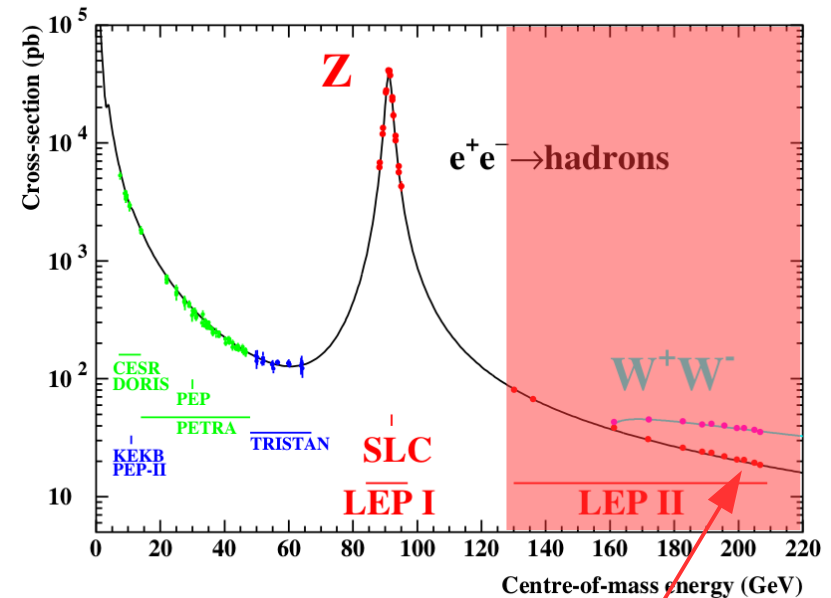
Direkte Suche bei LEP-II

- Hauptproduktion in e^+e^- :



- Higgs Boson koppelt an Masse.
- Kopplung am stärksten für schwerste Objekte.

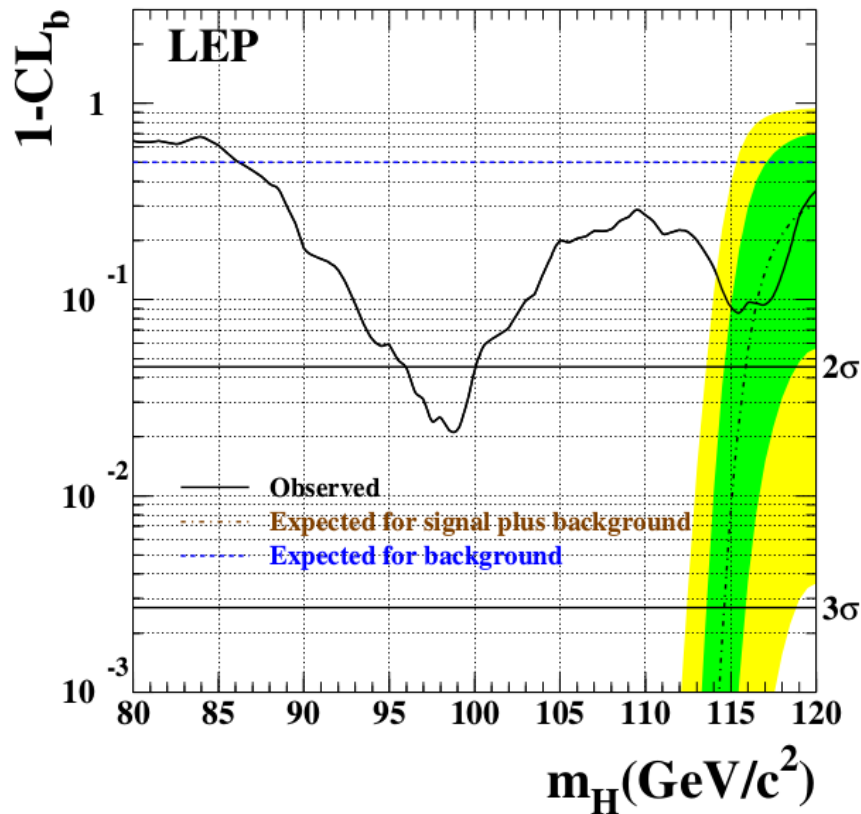
Wie groß war die maximale Reichweite der LEP-Experimente in $m_H? \approx 117 \text{ GeV}$



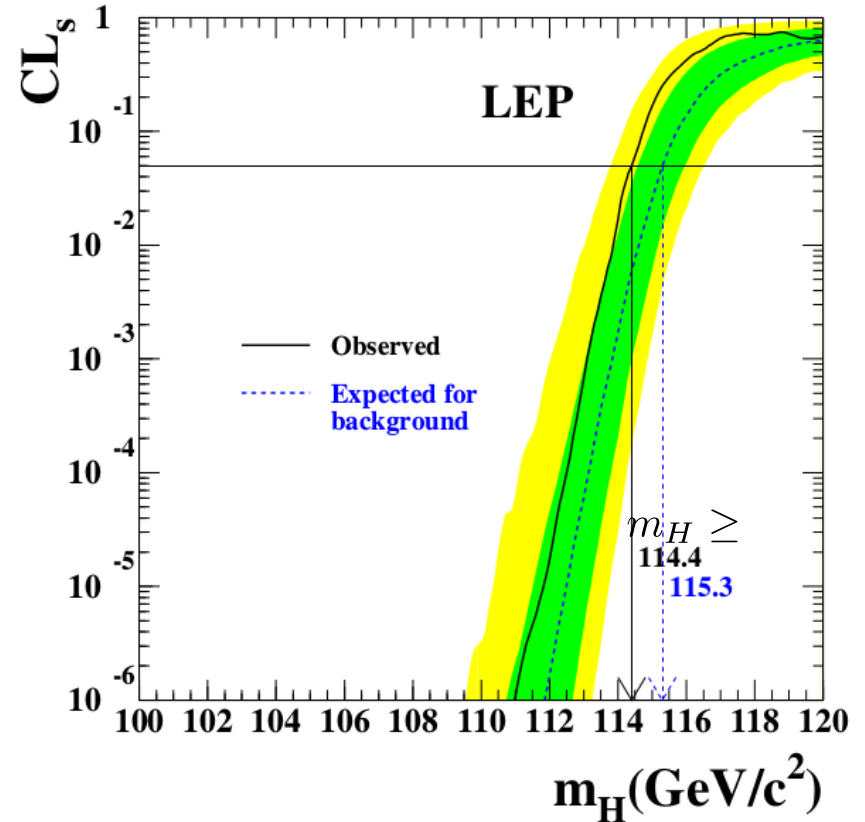
Year	1996		1997	1998	1999			2000		
E_{CM} nominal [GeV]	161	172	183	189	192	196	200	202	205	207

Ergebnis LEP-II

- **p-Wert** (Untergrundkompatibilität) :



- **Limit auf Masse (@ 95% CL):**

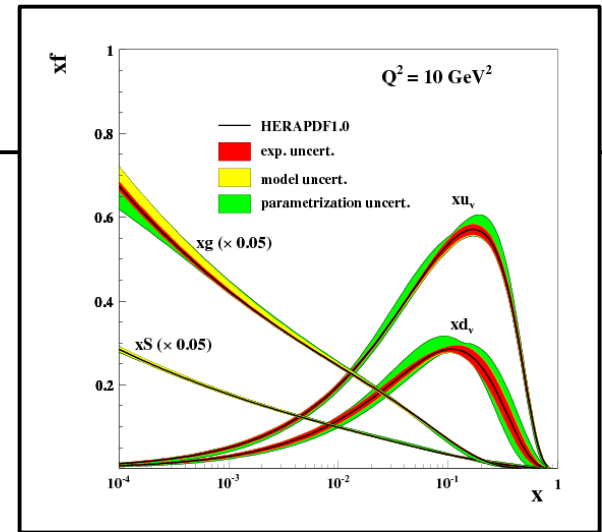


- **Kein Signal** beobachtet
- Untere Schranke auf Masse: $m_H > 114.4 \text{ GeV}$ (@ 95% CL)

Direkte Suche am Tevatron (FNAL)

- Auch am Tevatron wurden Suchen durchgeführt ($\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$)

Welchen mittleren Impulsbruchteil benötigen die Partonen im Proton, um ein Higgs Boson bei 125 GeV erzeugen zu können?

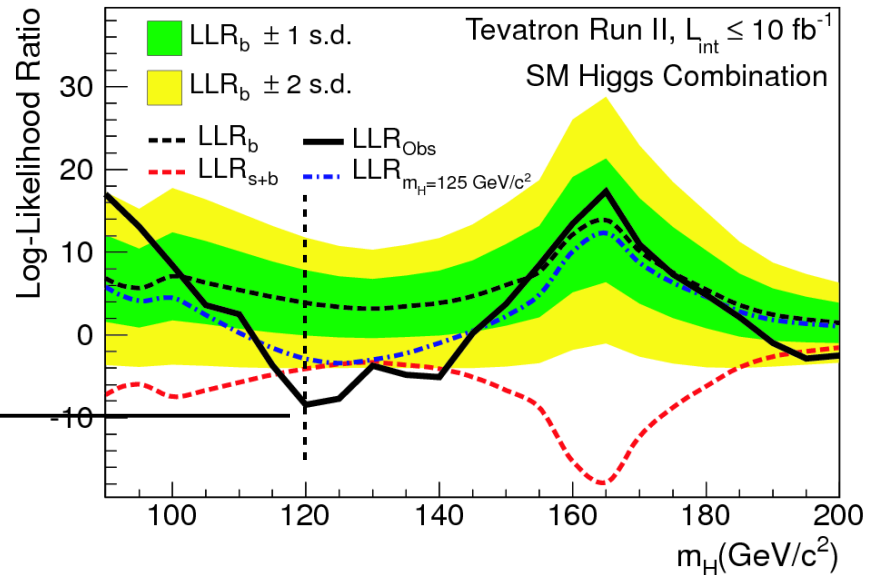
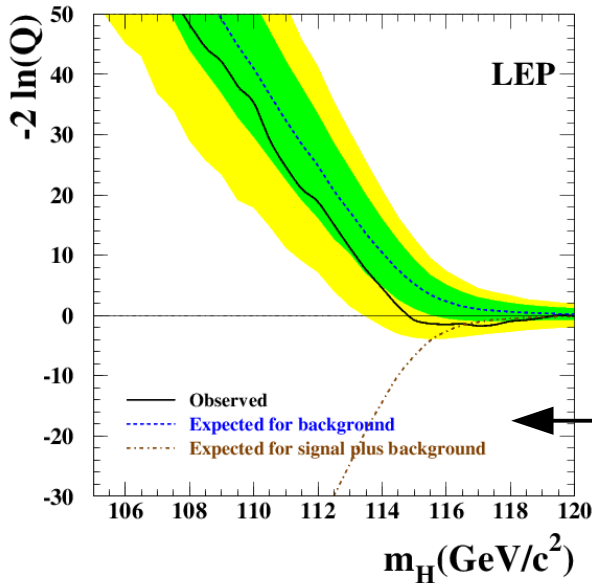
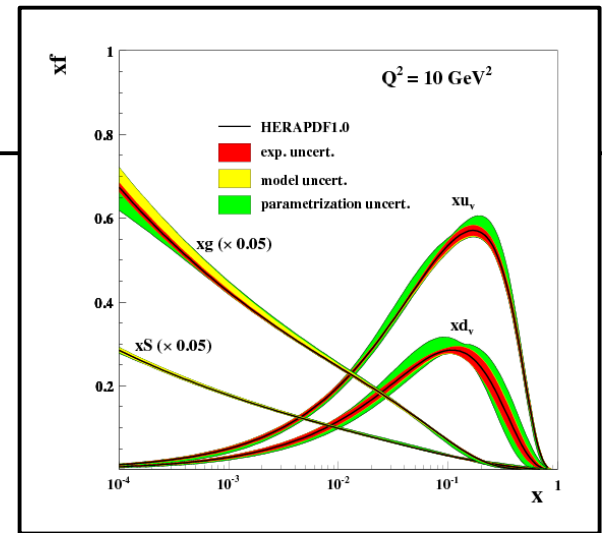


Direkte Suche am Tevatron (FNAL)

- Auch am Tevatron wurden Suchen durchgeführt ($\sqrt{s} = 1.96$ TeV)

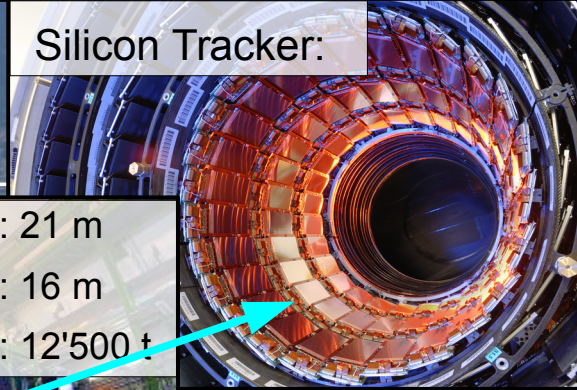
Welchen mittleren Impulsbruchteil benötigen die Partonen im Proton, um ein Higgs Boson bei 125 GeV erzeugen zu können?

$$\sqrt{\langle x_1 x_2 \rangle} \gtrsim \frac{m_H}{\sqrt{s}} \approx 0.06$$



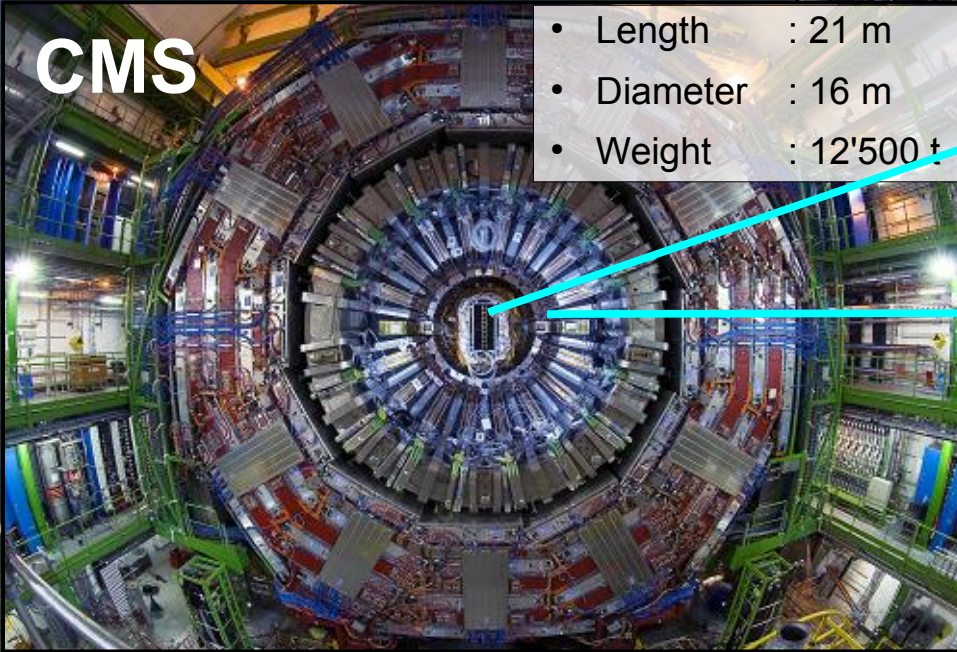
Direkte Suche am LHC

Silicon Tracker:

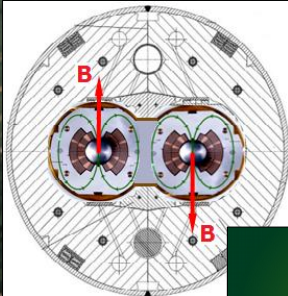
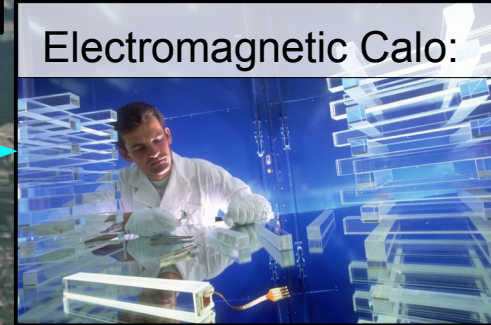


CMS

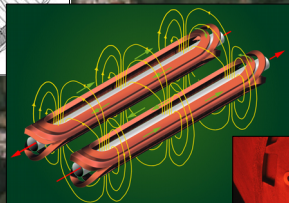
- Length : 21 m
- Diameter : 16 m
- Weight : 12'500 t



Electromagnetic Calo:

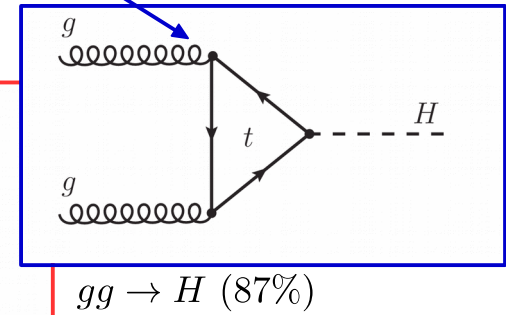
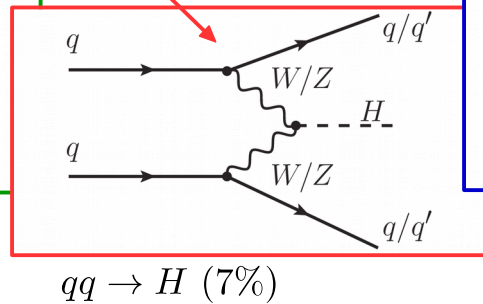
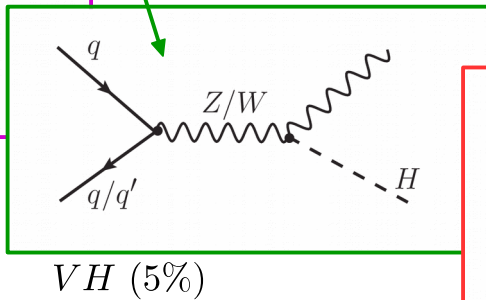
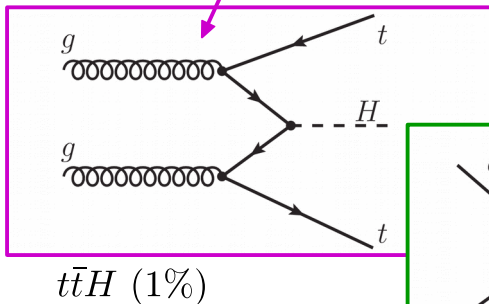
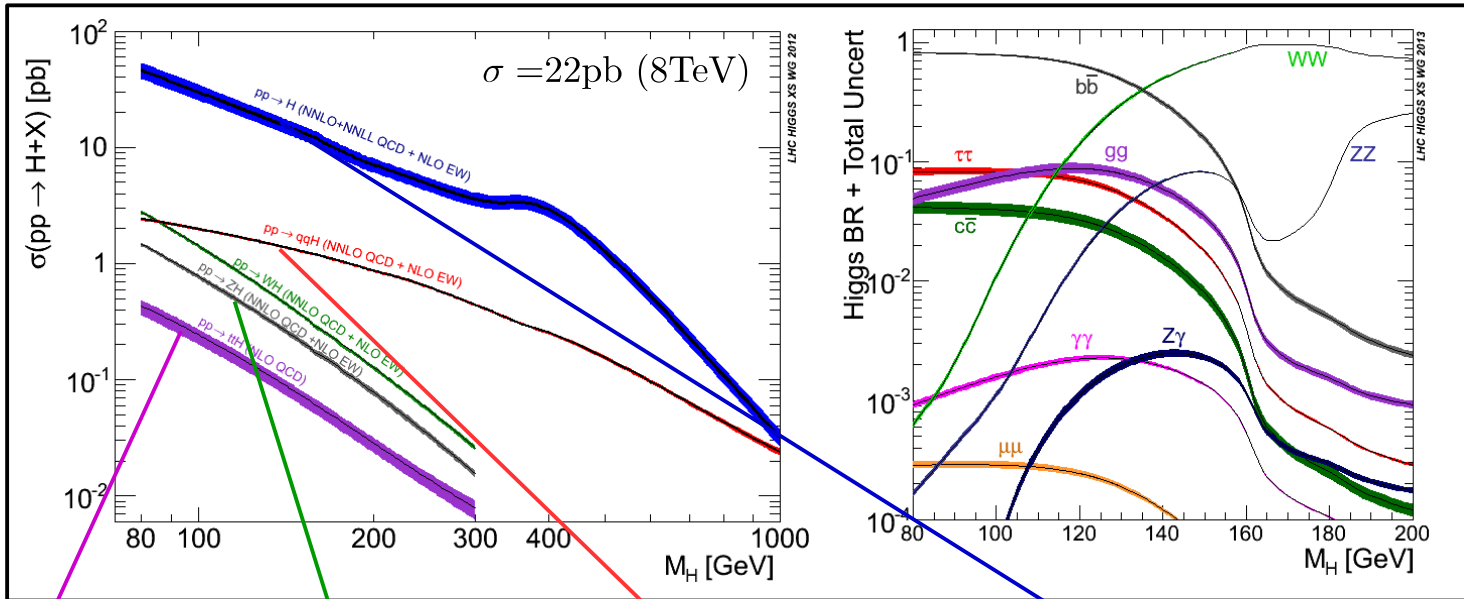


- 8.3 T
- 11.8 kA
- 160 cyc

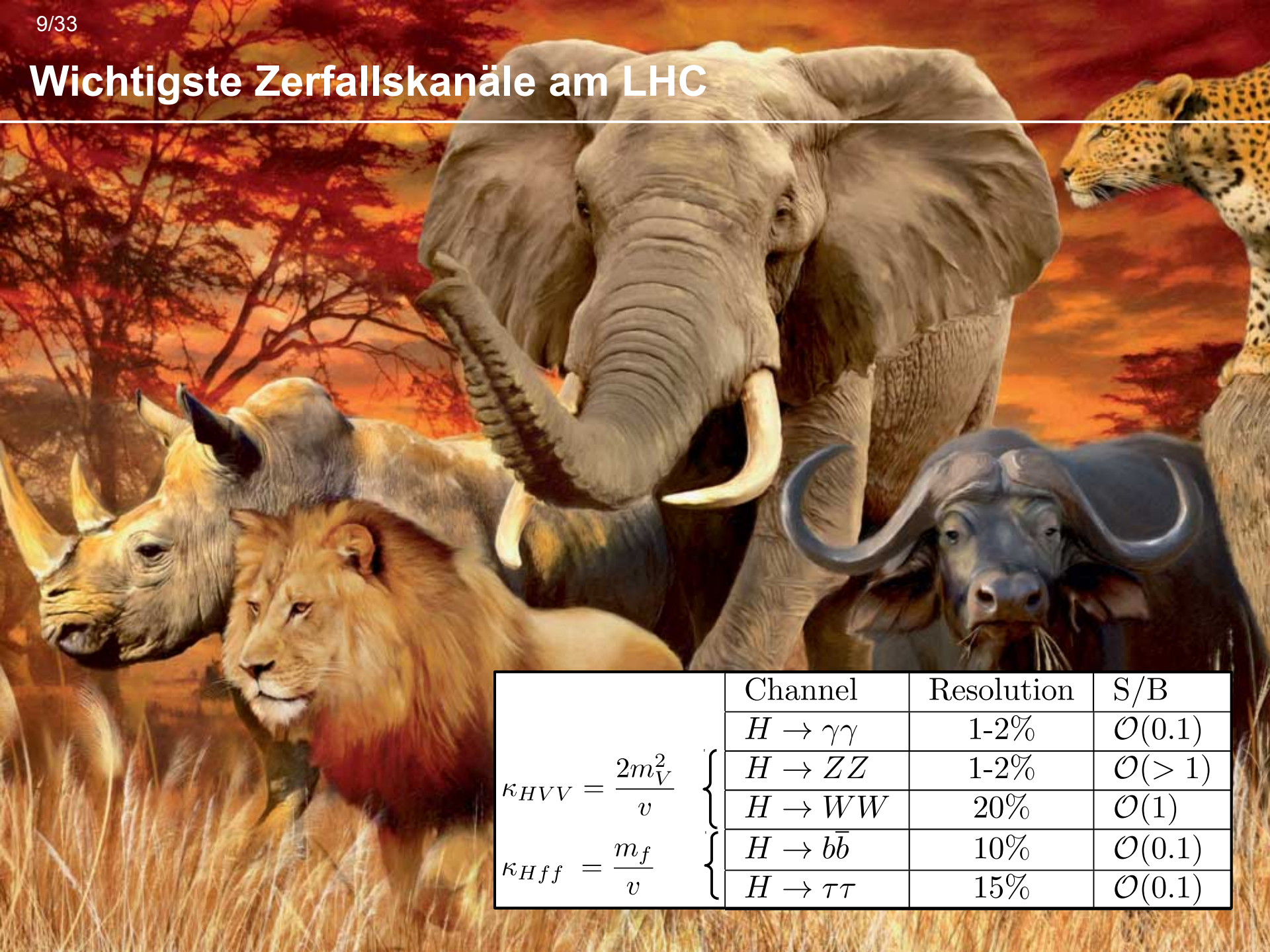


- Energy density 500 kJ/m.
- Tension 200'000 t/m.

Produktion und Zerfall

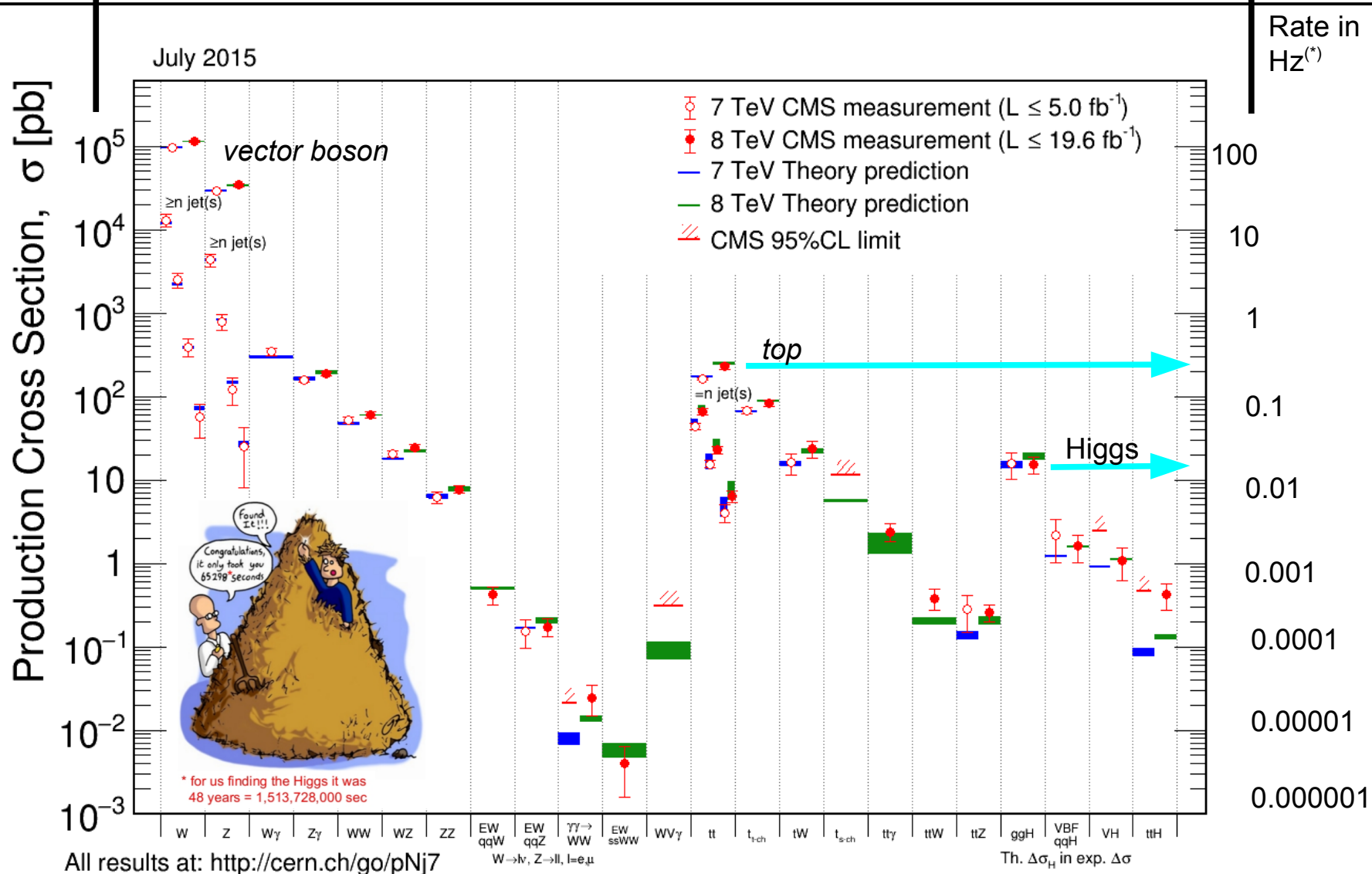


Wichtigste Zerfallskanäle am LHC



	Channel	Resolution	S/B
$\kappa_{HVV} = \frac{2m_V^2}{v}$	$H \rightarrow \gamma\gamma$	1-2%	$\mathcal{O}(0.1)$
	$H \rightarrow ZZ$	1-2%	$\mathcal{O>(> 1)$
	$H \rightarrow WW$	20%	$\mathcal{O}(1)$
$\kappa_{Hff} = \frac{m_f}{v}$	$H \rightarrow b\bar{b}$	10%	$\mathcal{O}(0.1)$
	$H \rightarrow \tau\tau$	15%	$\mathcal{O}(0.1)$

Die Herausforderung

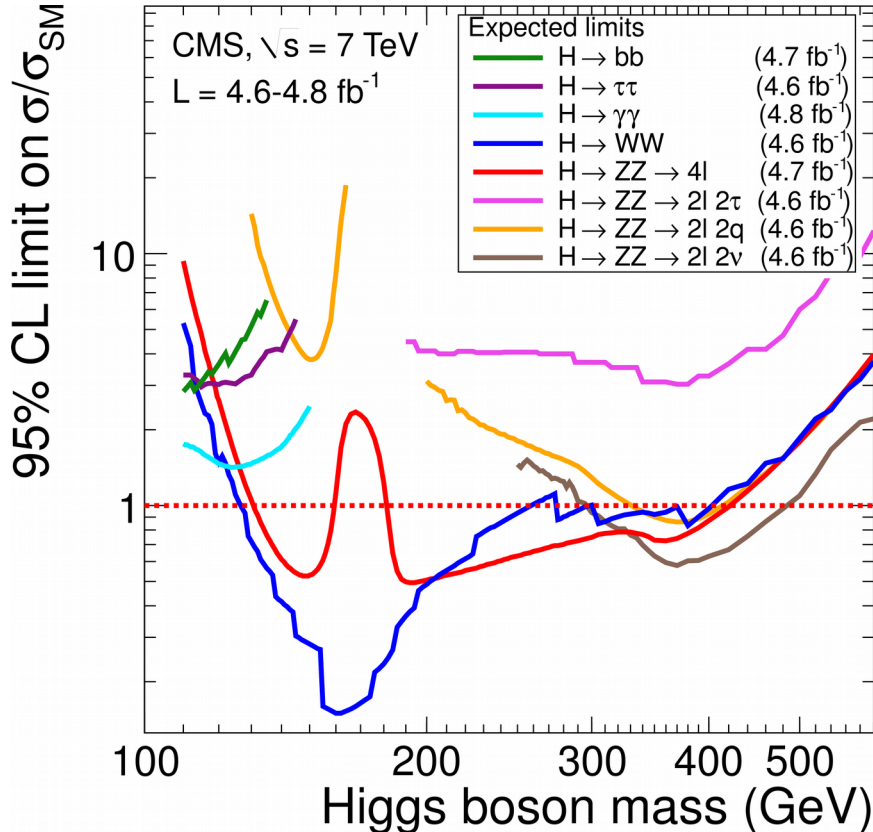


(*) for $\mathcal{L} = 1 \text{ nb}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

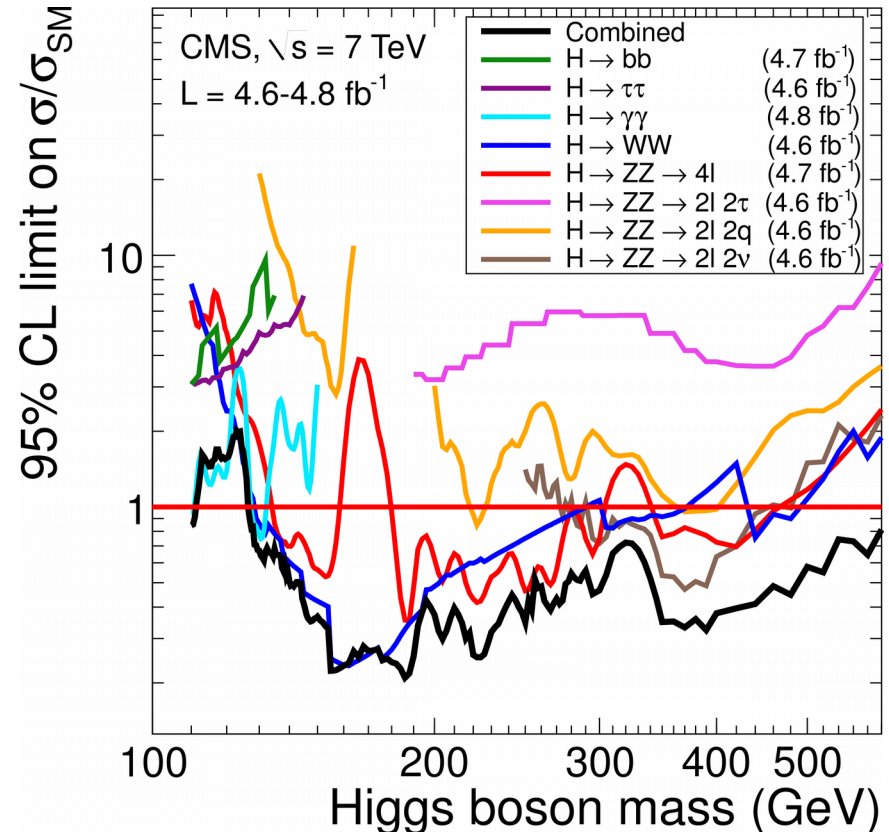
Verlauf der Suche bis Mitte 2012

Anm: ausgeschlossen sind alle Bereiche oberhalb der Kurven

- Ausschluß des SM bis auf **engen Massenbereich** des Higgs Bosons
- Erwartete (Ausschluß-)Sensitivität:

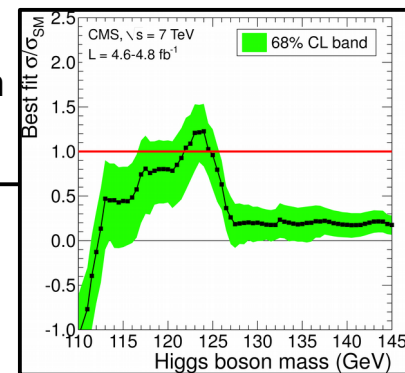


- Beobachteter Massenausschluß:

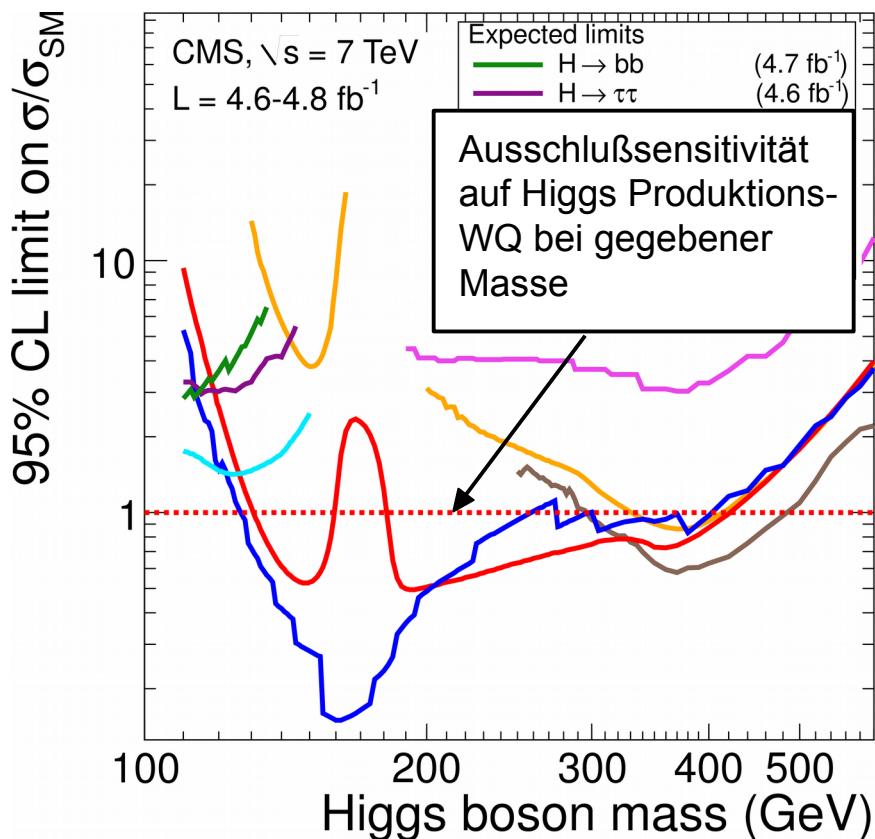


Verlauf bis Mitte 2012

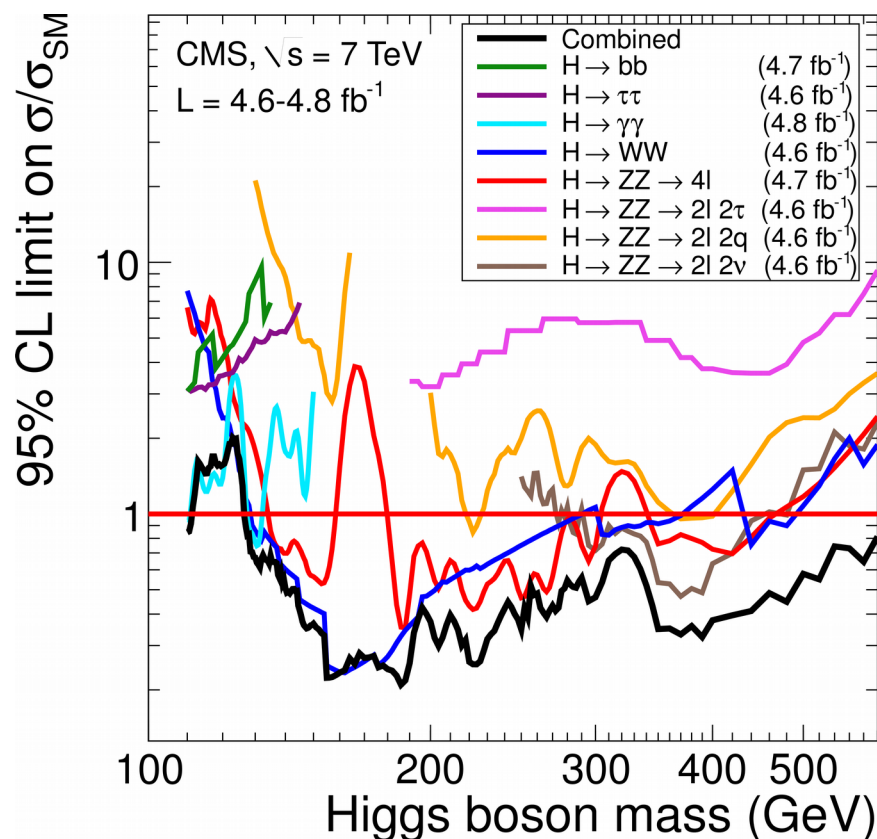
- Ausschluß des SM bis auf **engen Massenbereich** des Higgs Bosons



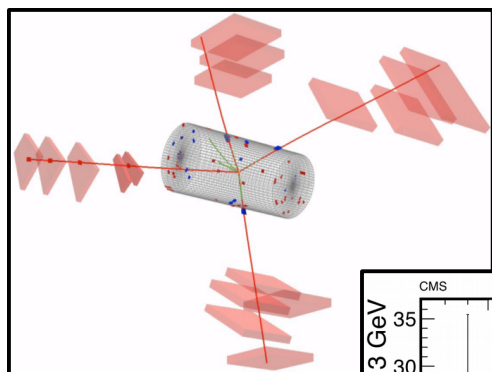
- Erwartete (Ausschluß-)Sensitivität:



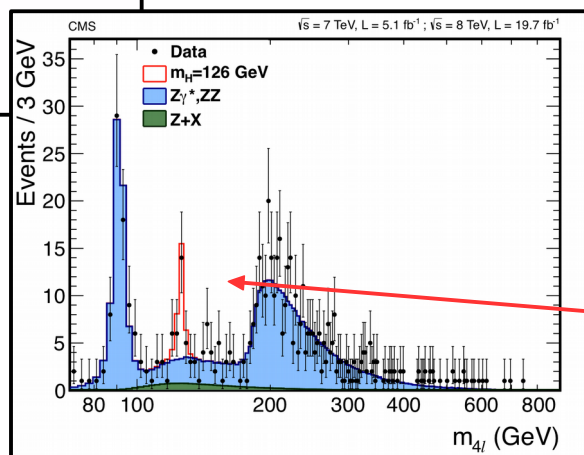
- Beobachteter Massenausschluß:



Die Entdeckung

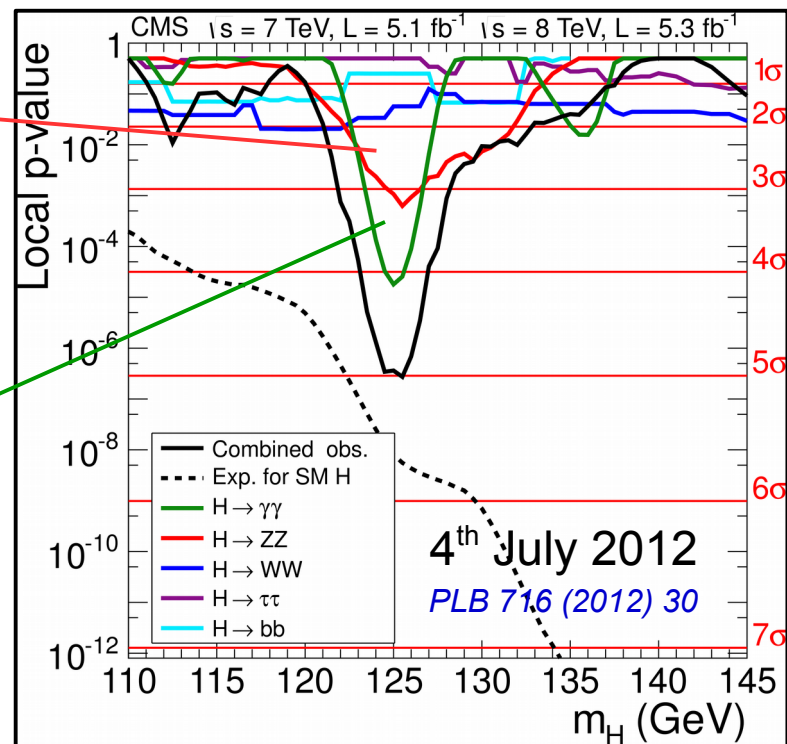
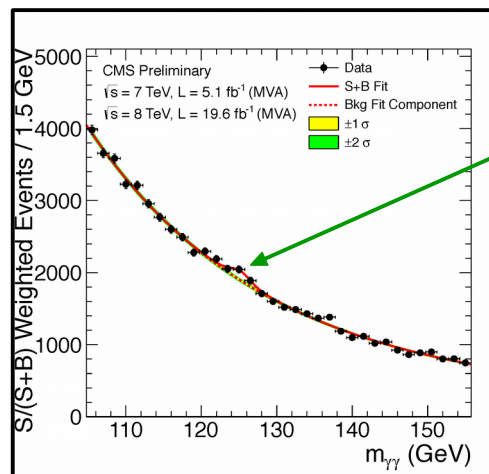
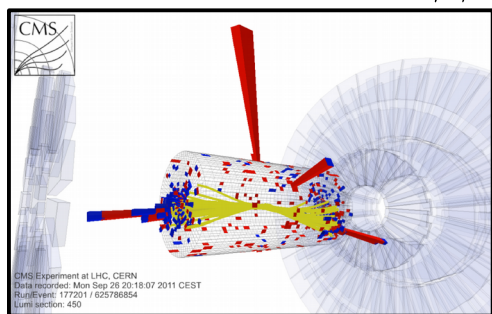


$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$$



- **Klare Beobachtung** in bosonischen Zerfallskanälen
- Fermionische Kanäle noch nicht klar, weil noch nicht sensitiv genug (\rightarrow erfolgte **etwas später**)

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

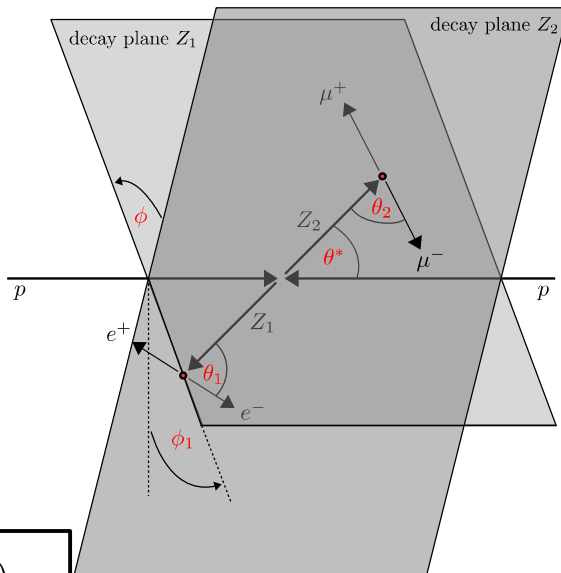


Spin & CP

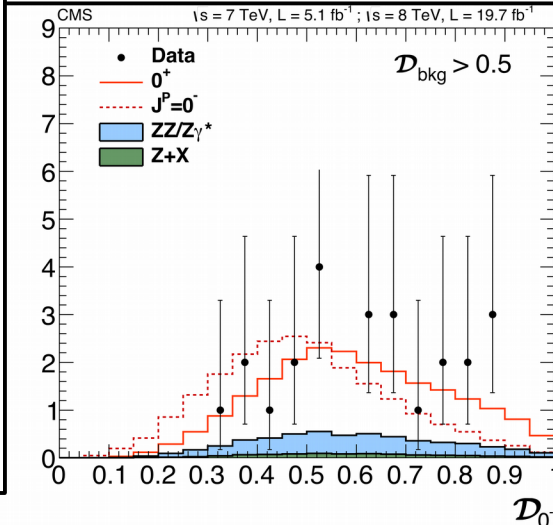
- Golden decay channel:
 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$
 (vgl VL-16 Folie 5ff)

$$P(Y_L^m(\theta, \varphi)) = (-1)^L \cdot Y_L^m(\theta, \varphi)$$

$$P(4\ell) = (-1)^L (-1)^2 (+1)^2 = (-1)^L$$



PRD 89 (2014) 092007



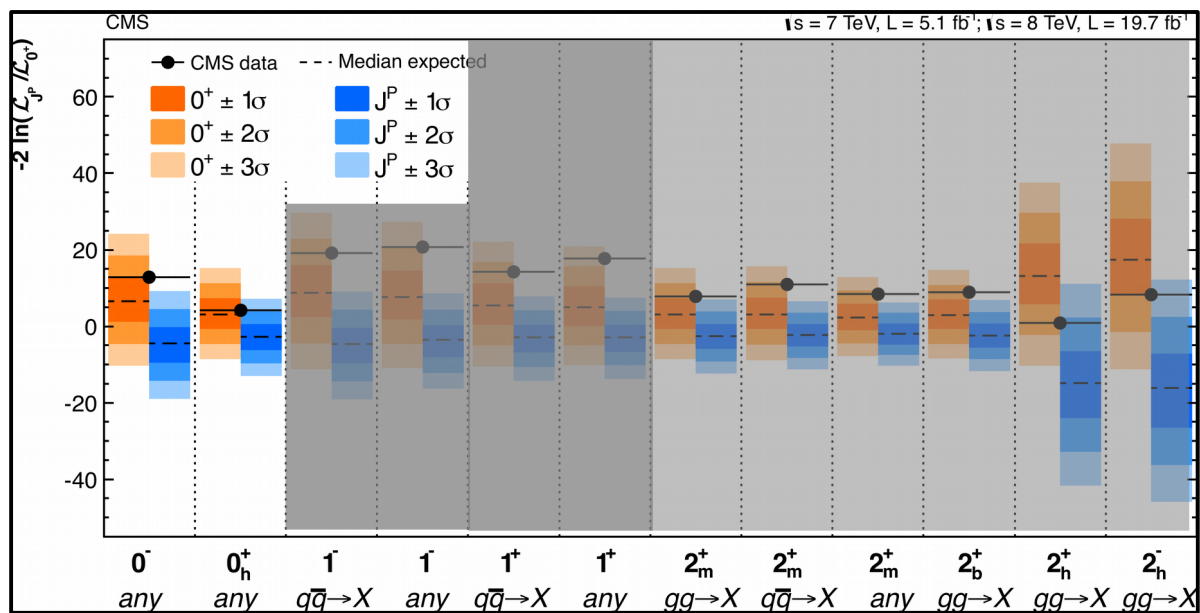
0^+

$$|0, 0\rangle = \sqrt{\frac{1}{3}}|1, 1\rangle \otimes |1, -1\rangle - \sqrt{\frac{1}{3}}|1, 0\rangle \otimes |1, 0\rangle + \sqrt{\frac{1}{3}}|1, -1\rangle \otimes |1, 1\rangle$$

0^-

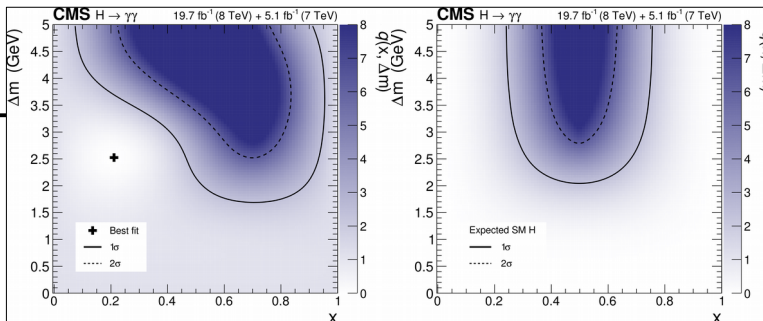
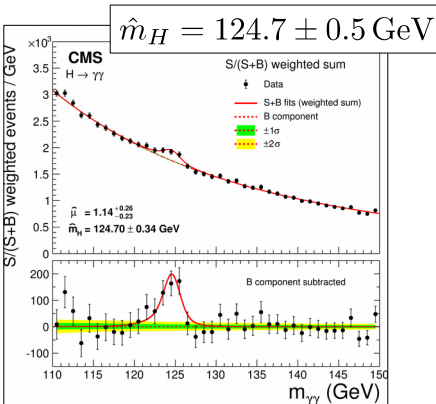
$$|1, \pm 1\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}}|1, \pm 1\rangle \otimes |1, 0\rangle - \sqrt{\frac{1}{2}}|1, 0\rangle \otimes |1, \pm 1\rangle$$

Test of pure spin hypotheses (based on $\mathcal{O}(50)$ evts):



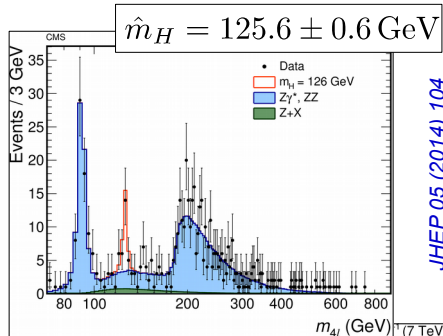
Compatibility

EPJ C 74 (2014) 3076

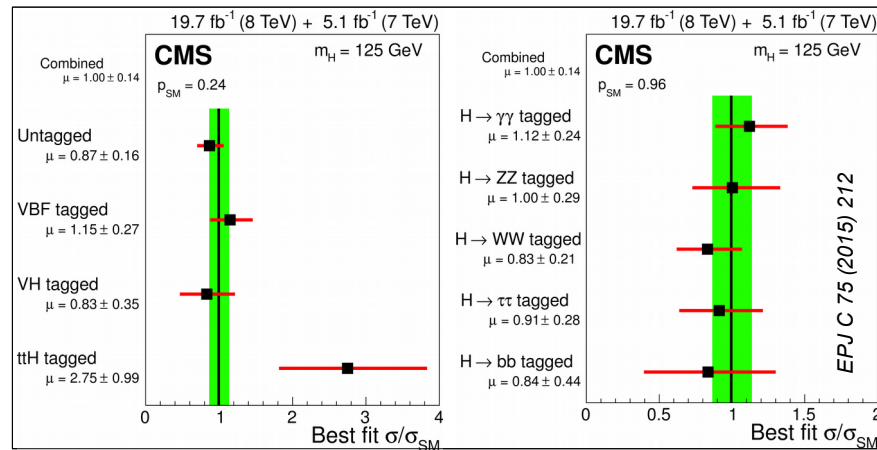
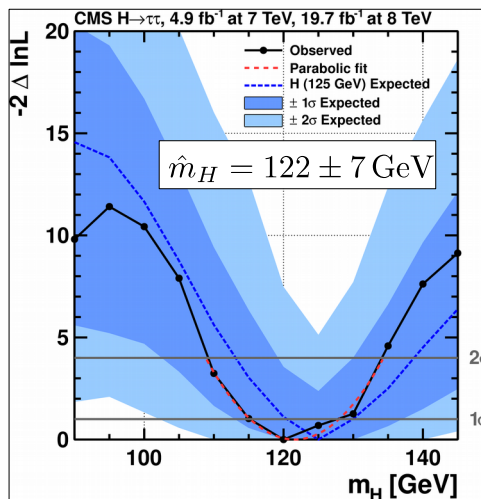


Coupling across production modes or decay channels:

PRD 89 (2014) 092007

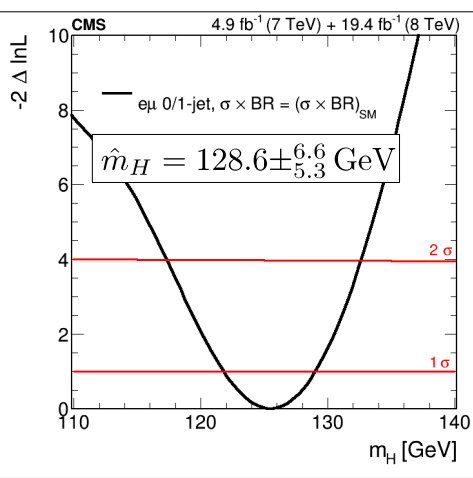
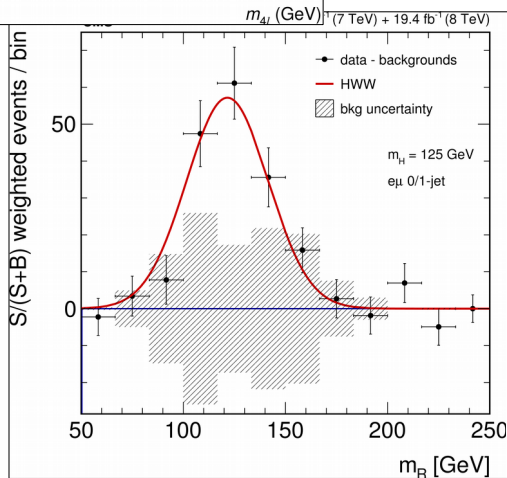


JHEP 05 (2014) 104



EPJ C 75 (2015) 212

JHEP 01 (2014) 096



Overall coupling consistency:

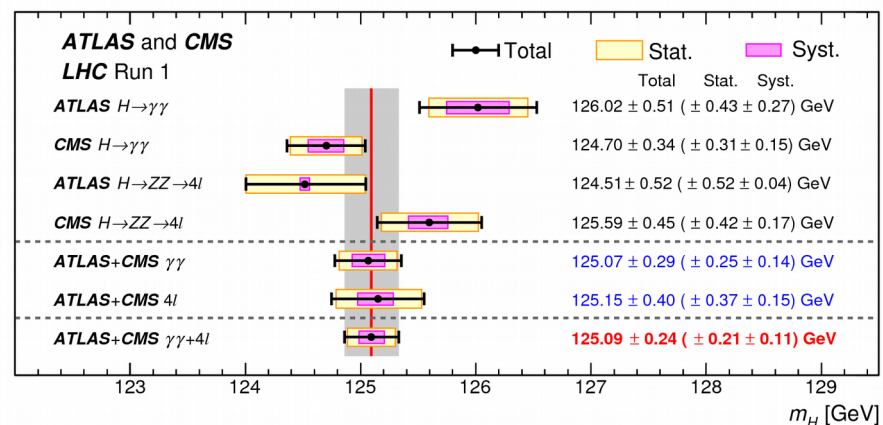
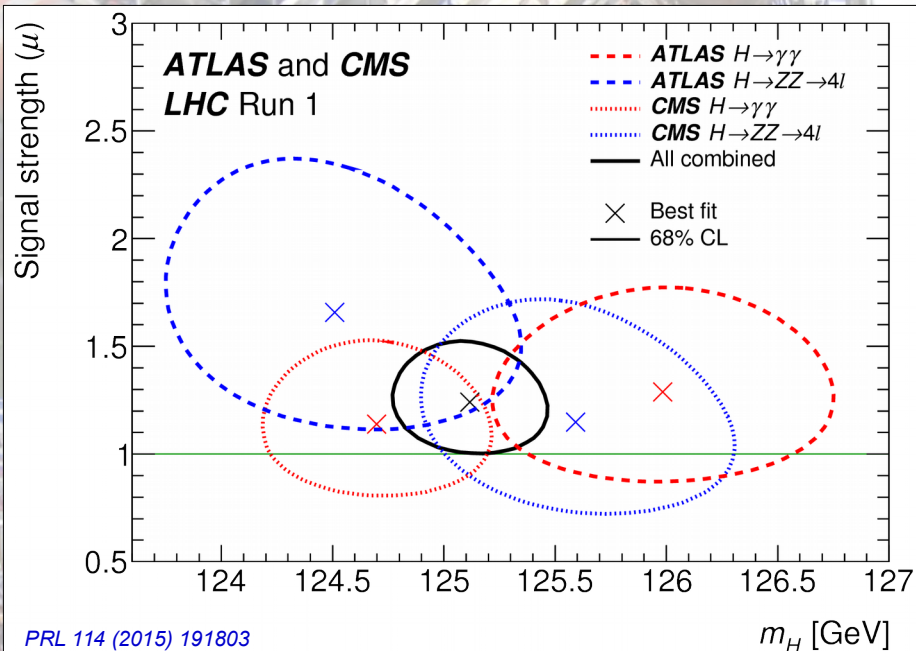
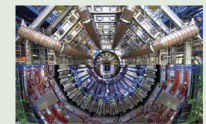
- Event categories : 227
- Nuisance parameters: $\mathcal{O}(2500)$
- 16 MB binary file of stat. model (~145 MB in human readable form).

$\mu = \sigma/\sigma_{SM} = 1.00 \pm 0.14$
 $p\text{-value} = 84\%$

EPJ C 75 (2015) 212

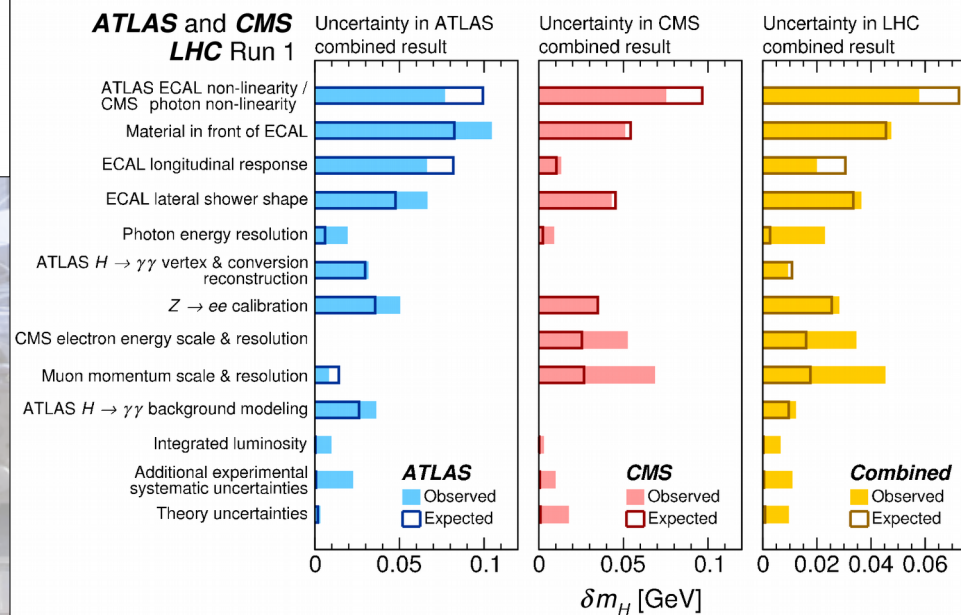
Mass

- ATLAS+CMS LHC run-1 combination:



$$125.06 \pm 0.21 (\text{stat.}) \pm 0.19 (\text{syst.}) \text{ GeV}$$

ATLAS and CMS LHC Run 1



Coupling structure

- Event categories : 574
 - Nuisance parameters: 4268
- $\mu = \sigma/\sigma_{SM} = 1.09 \pm 0.11$

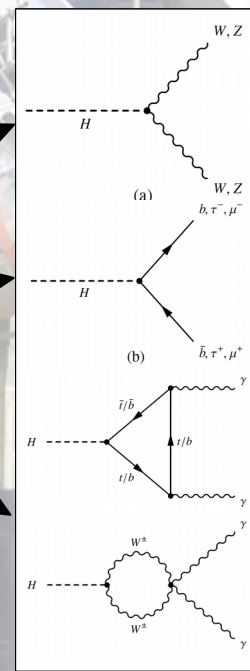
- ATLAS+CMS LHC run-1 combination:

Considered **production modes**:

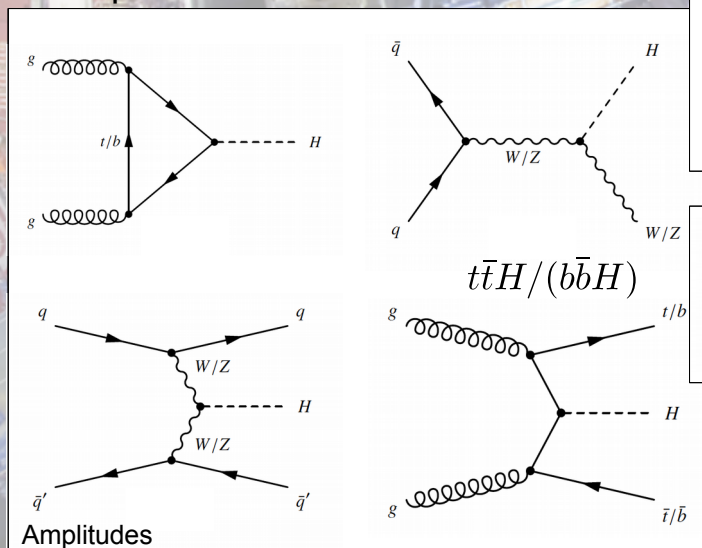
Production process	Cross section [pb]		Order of calculation
	$\sqrt{s} = 7$ TeV	$\sqrt{s} = 8$ TeV	
ggF	15.0 ± 1.6	19.2 ± 2.0	NNLO(QCD)+NLO(EW)
VBF	1.22 ± 0.03	1.58 ± 0.04	NLO(QCD+EW)+~NNLO(QCD)
WH	0.577 ± 0.016	0.703 ± 0.018	NNLO(QCD)+NLO(EW)
ZH	0.334 ± 0.013	0.414 ± 0.016	NNLO(QCD)+NLO(EW)
[ggZH]	0.023 ± 0.007	0.032 ± 0.010	NLO(QCD)
bbH	0.156 ± 0.021	0.203 ± 0.028	5FS NNLO(QCD) + 4FS NLO(QCD)
ttH	0.086 ± 0.009	0.129 ± 0.014	NLO(QCD)
tH	0.012 ± 0.001	0.018 ± 0.001	NLO(QCD)
Total	17.4 ± 1.6	22.3 ± 2.0	

Considered **decay channels**:

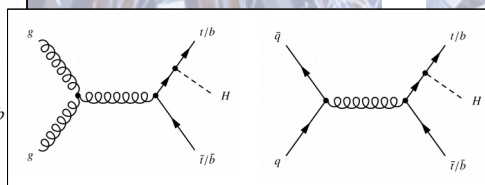
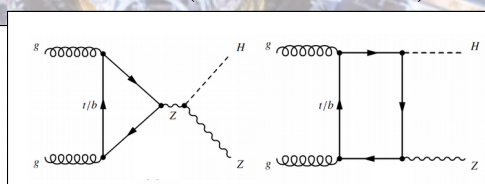
Decay channel	Branching ratio [%]
$H \rightarrow bb$	57.5 ± 1.9
$H \rightarrow WW$	21.6 ± 0.9
$H \rightarrow gg$	8.56 ± 0.86
$H \rightarrow \tau\tau$	6.30 ± 0.36
$H \rightarrow cc$	2.90 ± 0.35
$H \rightarrow ZZ$	2.67 ± 0.11
$H \rightarrow \gamma\gamma$	0.228 ± 0.011
$H \rightarrow Z\gamma$	0.155 ± 0.014
$H \rightarrow \mu\mu$	0.022 ± 0.001



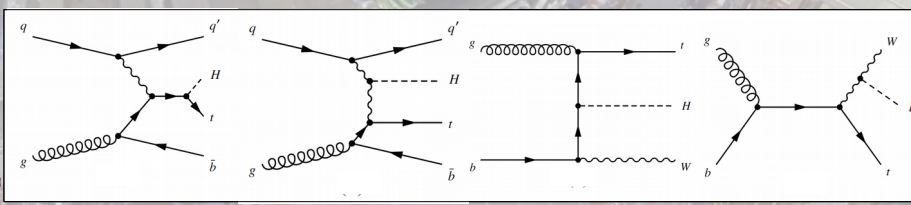
Main production modes:



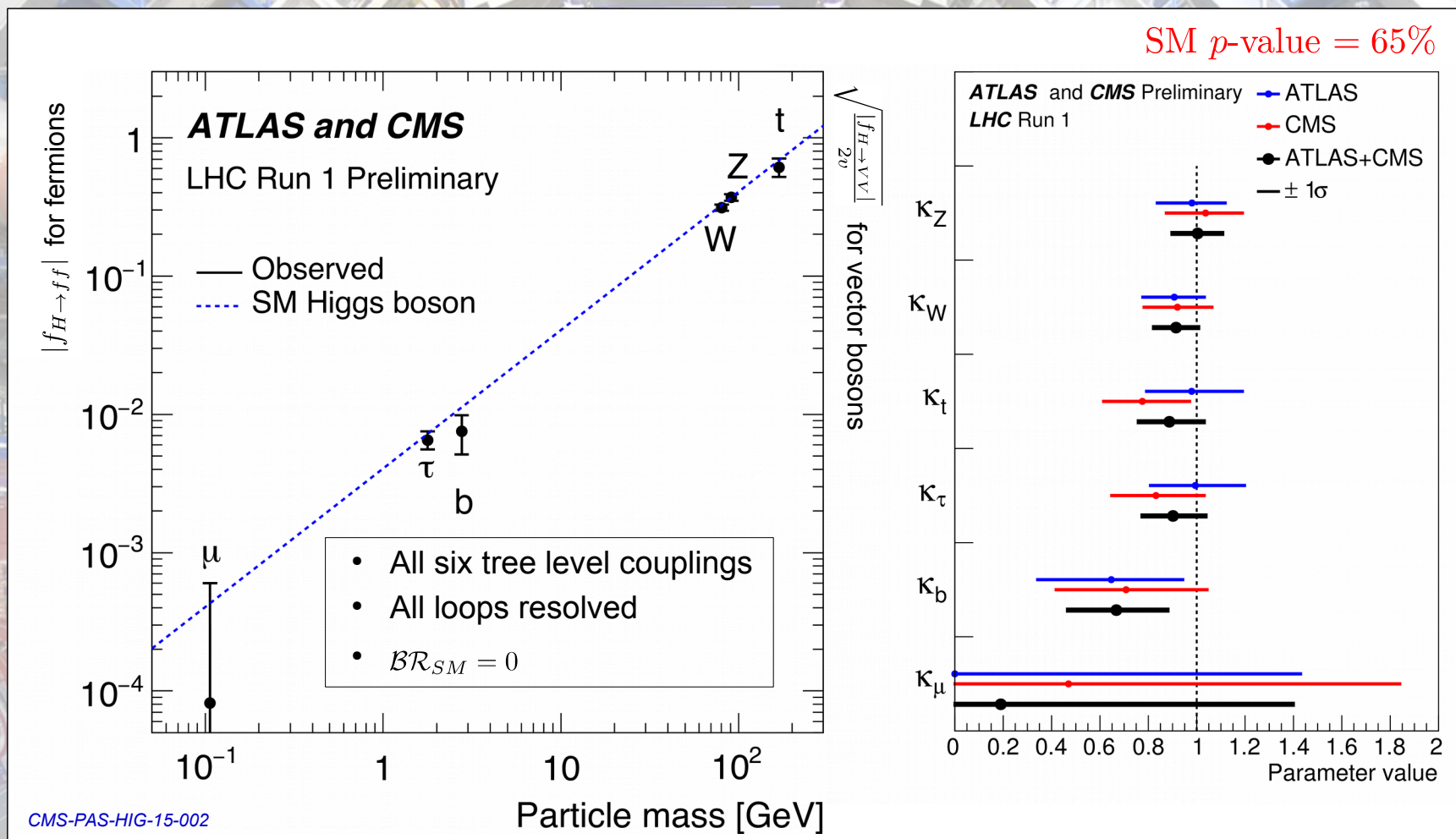
$gg \rightarrow ZH$ (10% to $ZHbb$)



$tqH + tHW$



“Money plot”

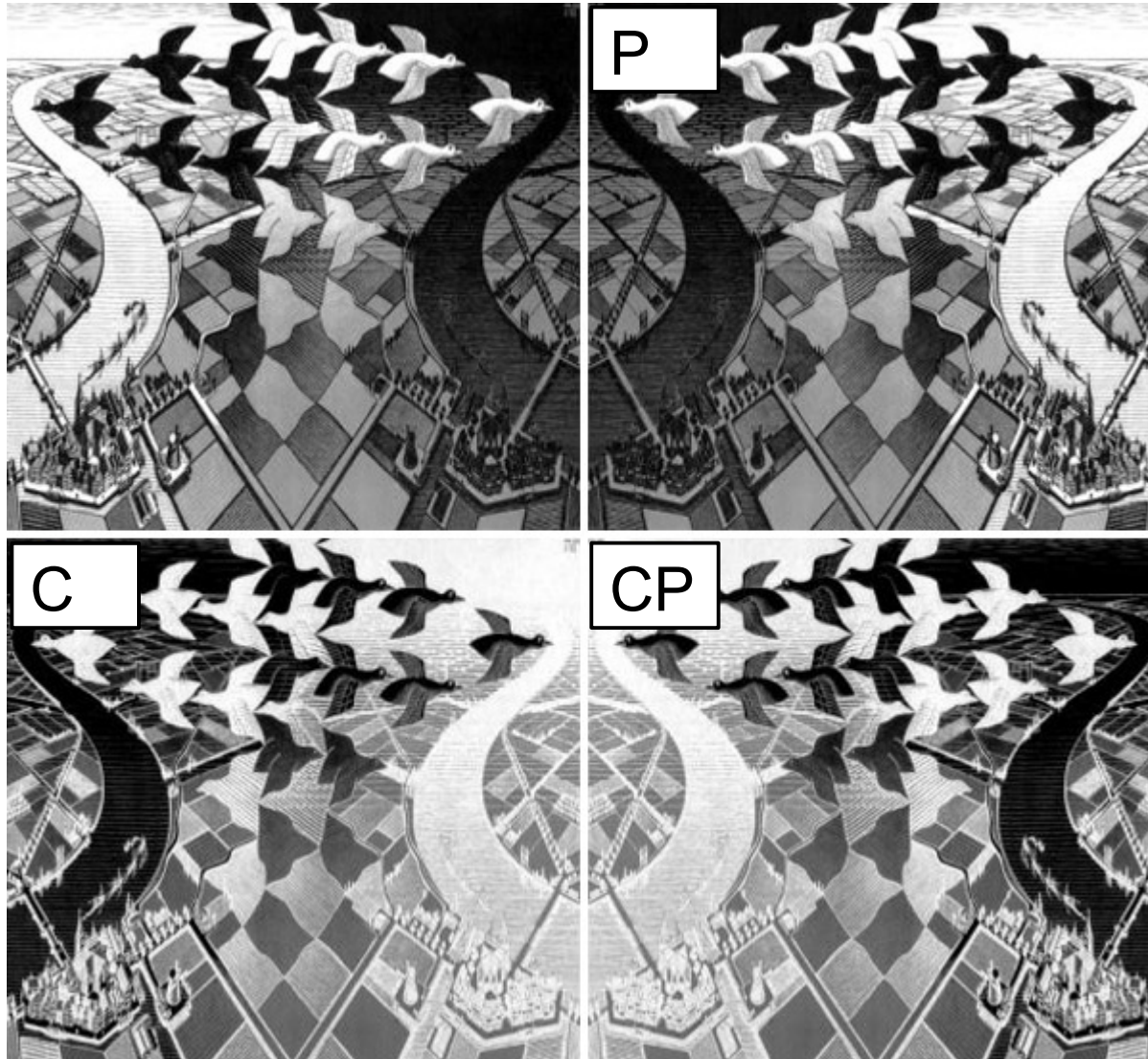


$$|f_{H \rightarrow ff}^{\text{obs}}| = \kappa_f \cdot |f_{H \rightarrow ff}^{\text{SM}}| = \kappa_f \cdot \frac{m_f}{v} \quad f = \mu, \tau, b, t$$

$$\sqrt{\frac{|f_{H \rightarrow VV}^{\text{obs}}|}{2v}} = \sqrt{\kappa_V} \cdot \sqrt{\frac{|f_{H \rightarrow VV}^{\text{SM}}|}{2v}} = \sqrt{\kappa_V} \cdot \frac{m_V}{v} \quad V = W, Z$$

Within measurement accuracy
unique scaling as expected
within the SM.

CP-Verletzung



M.C. Escher - C.P. Escher

CP-Verletzung

- Betrachte Übergang $X \rightarrow Y$. CP-Verletzung bedeutet:

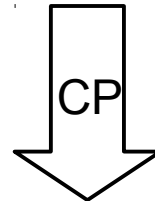
$$\mathcal{A}(X \rightarrow Y) \neq \mathcal{A}(\bar{X} \rightarrow \bar{Y}) \quad (1)$$

C und P-Operation für Fermionen im SM:

$$\psi^P = \gamma^0 \psi \quad \psi^C = i\gamma^2 \psi^*$$

- Bei schwacher WW wird bei CP-Operation Amplitude komplex konjugiert \rightarrow **komplexe CKM-Matrix = CP-Verletzung** (vgl [VL-22 Folie 18](#))
- Beispiel CC im Quarksector nach Anwendung von CP:

$$-\frac{e}{\sqrt{2} \sin \theta_W} \left(W_\mu^+ (\bar{d} \ \bar{s} \ \bar{b})_L \mathcal{M}_{CKM}^\dagger \gamma^\mu \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}_L \right) + W_\mu^- (\bar{u} \ \bar{c} \ \bar{t})_L \gamma^\mu \mathcal{M}_{CKM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_L$$



$\mathcal{M}_{CKM} \neq \mathcal{M}_{CKM}^*$
wenn Matrix komplexwertig

$$-\frac{e}{\sqrt{2} \sin \theta_W} \left(W_\mu^- (\bar{d} \ \bar{s} \ \bar{b})_L \mathcal{M}_{CKM}^{\dagger*} \gamma^\mu \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}_L \right) + W_\mu^+ (\bar{u} \ \bar{c} \ \bar{t})_L \gamma^\mu \mathcal{M}_{CKM}^* \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_L$$

CP-Verletzung im $K^0 \bar{K}^0$ -System

- Betrachte $|K^0\rangle = |d\bar{s}\rangle$ $|\bar{K}^0\rangle = |\bar{d}s\rangle$ (vgl. [VL-17 Folie 8](#) → EZ der starken WW)

Überprüfen Sie Parität und
Ladungskonjugation des K^0

$$\hat{P} |K^0\rangle = ?$$

$$\hat{P} |\bar{K}^0\rangle = ?$$

$$\hat{C} |K^0\rangle = ?$$

$$\hat{C} |\bar{K}^0\rangle = ?$$



Erinnerung: [VL-16 Folie 5ff](#)

CP-Verletzung im $K^0 \bar{K}^0$ -System

- Betrachte $|K^0\rangle = |d\bar{s}\rangle$ $|\bar{K}^0\rangle = |\bar{d}s\rangle$ (vgl [VL-17 Folie 8](#) → EZ der starken WW)

Überprüfen Sie Parität und Ladungskonjugation des K^0

$$\hat{P} |K^0\rangle = - |K^0\rangle$$

$$\hat{P} |\bar{K}^0\rangle = - |\bar{K}^0\rangle$$

$$\hat{C} |K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle$$

$$\hat{C} |\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle$$



Erinnerung: [VL-16 Folie 5ff](#)

CP-Verletzung im $K^0 \bar{K}^0$ -System

- Betrachte $|K^0\rangle = |d\bar{s}\rangle$ $|\bar{K}^0\rangle = |\bar{d}s\rangle$ (vgl. [VL-17 Folie 8](#) → EZ der starken WW)

Überprüfen Sie Parität und Ladungskonjugation des K^0

$$\hat{P} |K^0\rangle = - |K^0\rangle$$

$$\hat{P} |\bar{K}^0\rangle = - |\bar{K}^0\rangle$$

$$\hat{C} |K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle$$

$$\hat{C} |\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle$$



Erinnerung: [VL-16 Folie 5ff](#)

CP-Eigenzustände → Linearkombinationen aus $|K^0\rangle$ und $|\bar{K}^0\rangle$



CP-Verletzung im $K^0 \bar{K}^0$ -System

- Betrachte $|K^0\rangle = |d\bar{s}\rangle$ $|\bar{K}^0\rangle = |\bar{d}s\rangle$ (vgl. [VL-17 Folie 8](#) → EZ der starken WW)

Überprüfen Sie Parität und Ladungskonjugation des K^0

$$\hat{P} |K^0\rangle = - |K^0\rangle$$

$$\hat{P} |\bar{K}^0\rangle = - |\bar{K}^0\rangle$$

$$\hat{C} |K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle$$

$$\hat{C} |\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle$$



Erinnerung: [VL-16 Folie 5ff](#)

CP-Eigenzustände → Linearkombinationen aus $|K^0\rangle$ und $|\bar{K}^0\rangle$

$$|K_+^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$$

$$\hat{C}P |K_+^0\rangle = + |K_+^0\rangle$$

$$|K_-^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$$

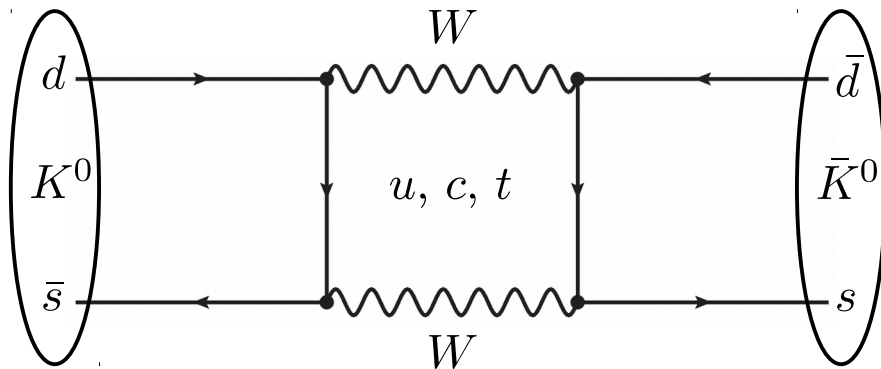
$$\hat{C}P |K_-^0\rangle = - |K_-^0\rangle$$



Übergang von K^0 nach \bar{K}^0

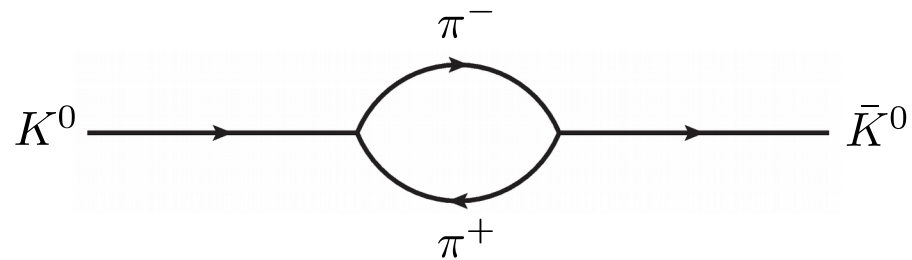
- In schwacher WW **Übergang** K^0 - \bar{K}^0 möglich

Short range Übergang:



- Spielt eine Rolle für Massendifferenz Δm der physikalischen Zustände
- Virtueller W-Boson Austausch

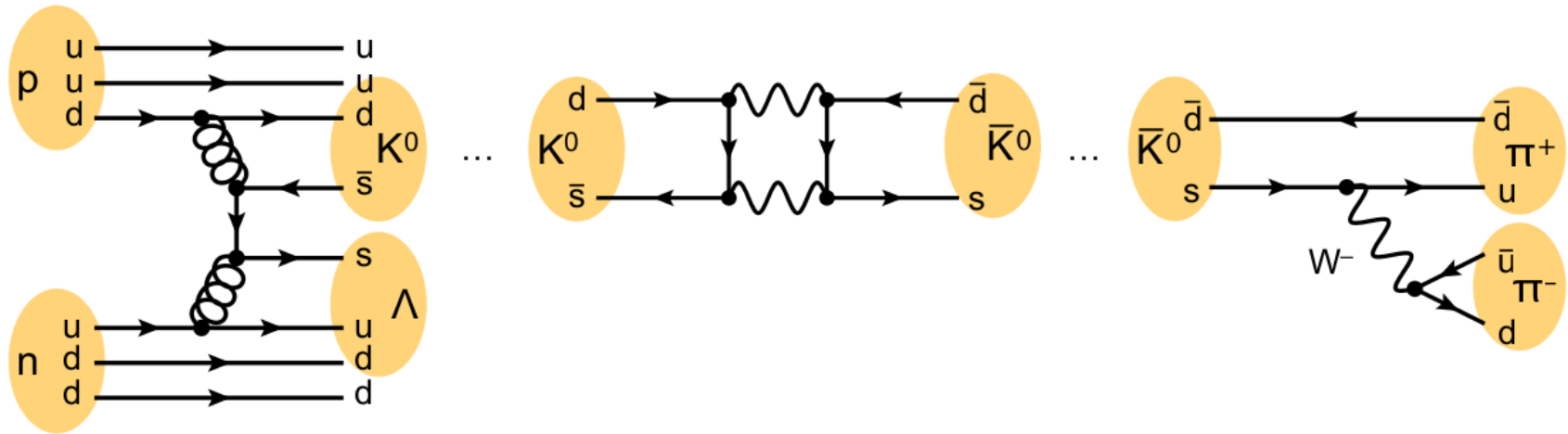
Long range Übergang:



- Spielt eine Rolle für Differenz der Zerfallsbreite $\Delta\Gamma$ der physikalischen Zustände
- “on-shell” Austausch

Produktion und Zerfall neutraler Kaonen

- Kette von **Produktion bis Zerfall**:



Paarweise Produktion
von Strangeness durch
starke WW

Propagation durch
elektroschwache
WW (in EZ der WW)

Zerfall durch
elektroschwache
WW

- Bis hierhin nehme an CP sei in schwacher WW erhalten \rightarrow EZ der schwachen WW $|K_+^0\rangle$ und $|K_-^0\rangle$

CP-Eigenzustände des Zerfalls

- Annahme CP erhalten $\rightarrow |K_+^0\rangle$ und $|K_-^0\rangle$ zerfallen in unterschiedliche **CP-Eigenzustände in Endzustand** (vgl. [VL-16 Folie 11](#) und [VL-17 Folie 8](#))

- Zerfall: $|K_+^0\rangle$ CP=+1**

$$K_+^0 \rightarrow \pi^+\pi^- / \pi^0\pi^0$$

$$\hat{C}\hat{P}(\pi\pi) = (-1)^{\ell+1}(-1)^{\ell+1} = +1$$

- Zerfall: $|K_-^0\rangle$ CP=-1**

$$K_-^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 / \pi^0\pi^0\pi^0$$

$$\hat{C}\hat{P}(\pi\pi\pi) = (-1)^\ell(-1)^{\ell+1} = -1$$

- Diese Zerfälle werden in der Tat beobachtet
- Geringere Zerfallsbreite für Zerfall in $\pi\pi\pi$ ($\Gamma_{\pi\pi\pi} < \Gamma_{\pi\pi}$, \rightarrow läuft langsamer ab)
- Bezeichnung:

$$|K_+^0\rangle = |K_S^0\rangle \quad (\text{"K-short"}) \quad \tau_{K_S^0} = 0.9 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$|K_-^0\rangle = |K_L^0\rangle \quad (\text{"K-long"}) \quad \tau_{K_L^0} = 5.1 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

CP-Eigenzustände des Zerfalls

- Annahme CP erhalten $\rightarrow |K_+^0\rangle$ und $|K_-^0\rangle$ zerfallen in unterschiedliche **CP-Eigenzustände in Endzustand** (vgl. [VL-16 Folie 11](#) und [VL-17 Folie 8](#))

- Zerfall: $|K_+^0\rangle$ CP=+1**

$$K_+^0 \rightarrow \pi^+\pi^- / \pi^0\pi^0$$

$$\hat{C}\hat{P}(\pi\pi) = (-1)^{\ell+1}(-1)^{\ell+1} = +1$$

- Zerfall: $|K_-^0\rangle$ CP=-1**

$$K_-^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0 / \pi^0\pi^0\pi^0$$

$$\hat{C}\hat{P}(\pi\pi\pi) = (-1)^\ell(-1)^{\ell+1} = -1$$

- Diese Zerfälle werden in der Tat beobachtet
- Geringere Zerfallsbreite für Zerfall in $\pi\pi\pi$ ($\Gamma_{\pi\pi\pi} < \Gamma_{\pi\pi}$, \rightarrow läuft langsamer ab)
- Bezeichnung:

$$|K_+^0\rangle = |K_S^0\rangle \quad (\text{"K-short"})$$

$$\tau_{K_S^0} = 0.9 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$|K_-^0\rangle = |K_L^0\rangle \quad (\text{"K-long"})$$

$$\tau_{K_L^0} = 5.1 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$



Warum ist das der Fall?

Experiment von Cronin & Fitch

- Erzeuge Strahl neutraler Kaonen aus starker WW: 30 GeV Protonen auf Beryllium-Target
- Kaonenstrahl mit Impuls $p = 1.1 \text{ GeV}$



Berechnen Sie die mittlere Flugstrecke für K_S^0

$$\tau_{K_S^0} = 0.9 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$m_K = 497 \text{ MeV}$$

Experiment von Cronin & Fitch

- Erzeuge Strahl neutraler Kaonen aus starker WW: 30 GeV Protonen auf Beryllium-Target
- Kaonenstrahl mit Impuls $p = 1.1 \text{ GeV}$
- Nach Laufstrecke von $\sim 20 \text{ cm}$ nur noch K_L^0



Berechnen Sie die mittlere Flugstrecke für K_S^0

$$\tau_{K_S^0} = 0.9 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$m_K = 497 \text{ MeV}$$

$$\langle L \rangle_{K_S^0} = \beta \gamma c \tau_{K_S^0} = \frac{p}{m_K} \tau_{K_S^0} \approx 6 \text{ cm}$$

Experiment von Cronin & Fitch

- Erzeuge Strahl neutraler Kaonen aus starker WW: 30 GeV Protonen auf Beryllium-Target
- Kaonenstrahl mit Impuls $p = 1.1 \text{ GeV}$
- Nach Laufstrecke von $\sim 20 \text{ cm}$ nur noch K_L^0
- **In verbleibendem K_L^0 -Strahl immer noch $\pi\pi$ -Zerfälle \rightarrow CP-Verletzung**



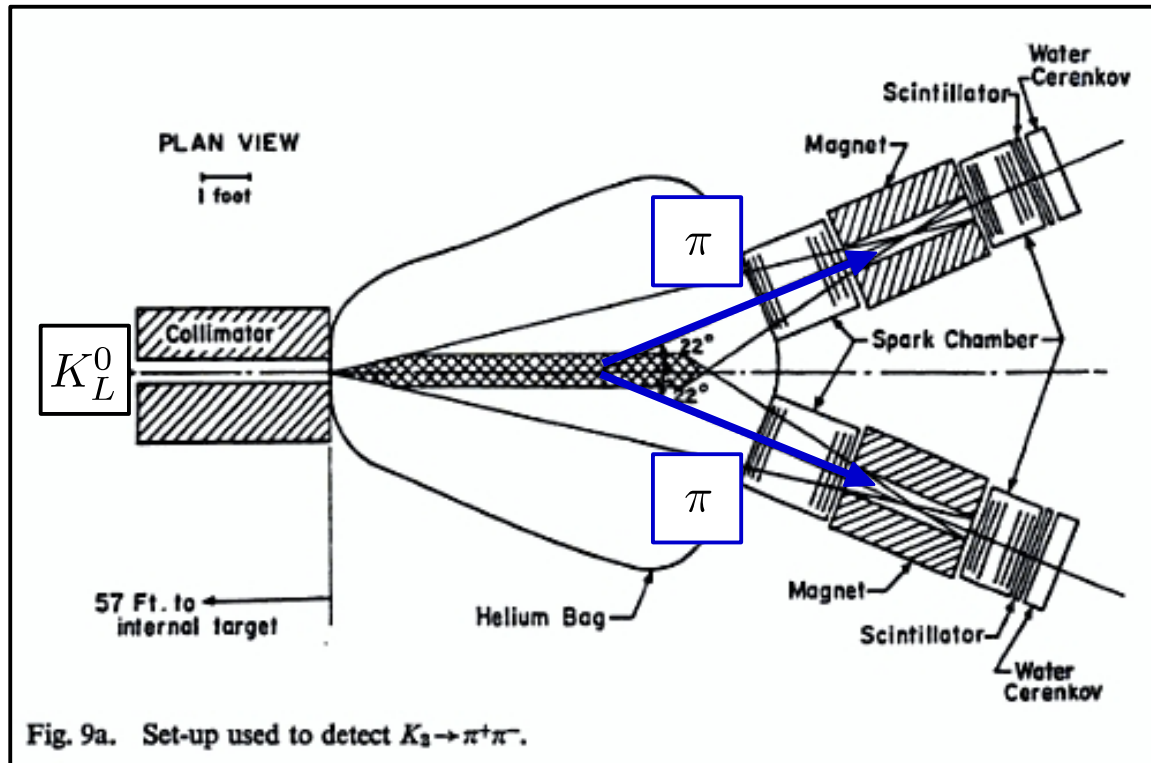
Berechnen Sie die mittlere Flugstrecke für K_S^0

$$\tau_{K_S^0} = 0.9 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

$$m_K = 497 \text{ MeV}$$

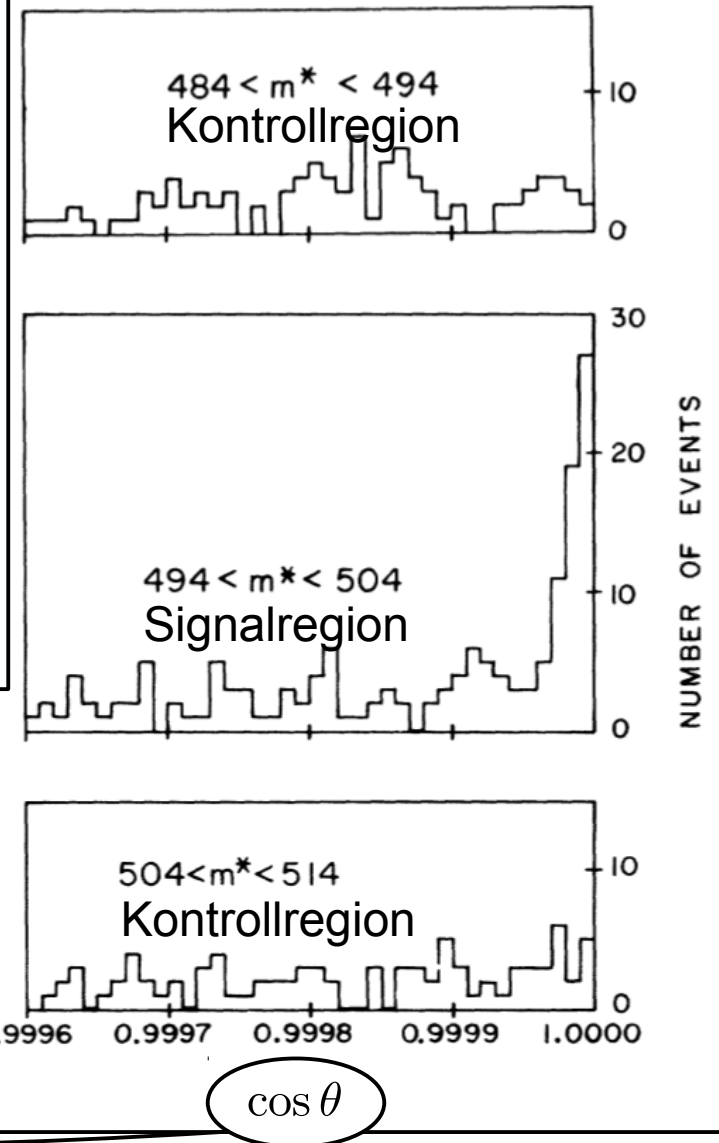
$$\langle L \rangle_{K_S^0} = \beta\gamma c\tau_{K_S^0} = \frac{p}{m_K} \tau_{K_S^0} \approx 6 \text{ cm}$$

Experimenteller Aufbau und Ergebnis



- Beobachtung: $45 \pm 9 K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ Kandidaten aus 22700 K_L^0 -Zerfällen
- **CP in schwacher WW nicht erhalten!**

Winkel der Vektorsumme
beider Pionen relativ zur
Strahlachse



Mögliche Formen der CP-Verletzung (Mischung)

- $\mathcal{A}(K^0 \rightarrow \bar{K}^0) \neq \mathcal{A}(\bar{K}^0 \rightarrow K^0)$: (“indirekte”) **CP-Verletzung in Mischung**

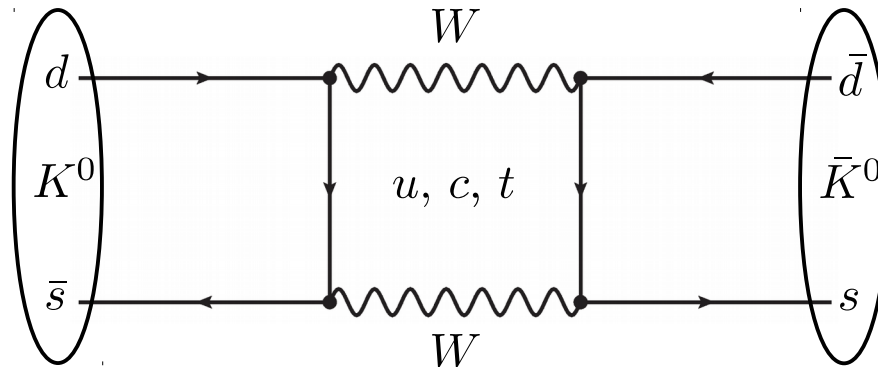
- Physikalische Zustände keine reinen CP-Eigenzustände

$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} (|K_+^0\rangle + \epsilon |K_-^0\rangle)$$

$$|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} (|K_-^0\rangle + \epsilon |K_+^0\rangle)$$

- Heute bekannt: ϵ komplexwertig $|\epsilon| = 2.228(11) \cdot 10^{-3}$

- Relevante Prozesse (\rightarrow Box-Diagramme):

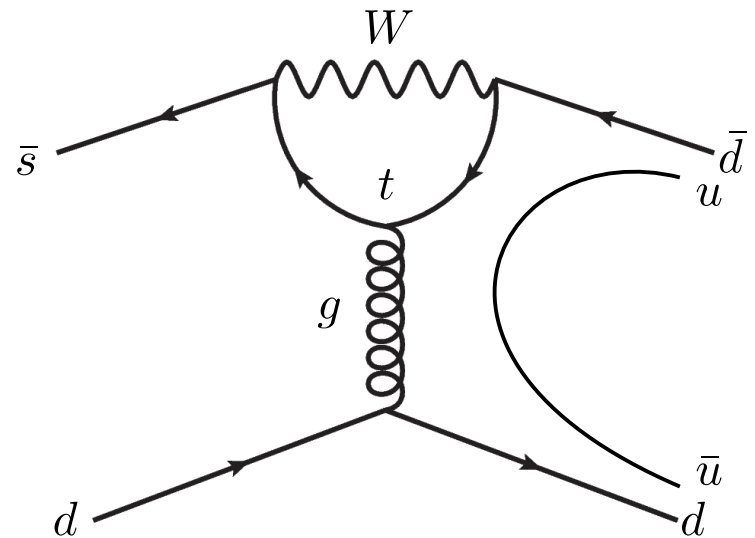
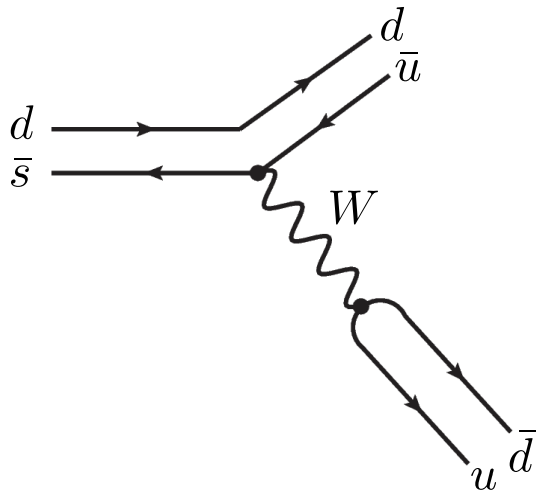


Mögliche Formen der CP-Verletzung (Zerfall)

- $\mathcal{A}(K^0 \rightarrow \pi\pi) \neq \mathcal{A}(\bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi)$: (“direkte”) **CP-Verletzung in Zerfall**
- Beide Prozesse lassen sich aufschlüsseln durch

$$\frac{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0)/\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^0\pi^0)}{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)/\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)} \approx 1 - 6 \operatorname{Re} \left(\frac{\epsilon'}{\epsilon} \right)$$

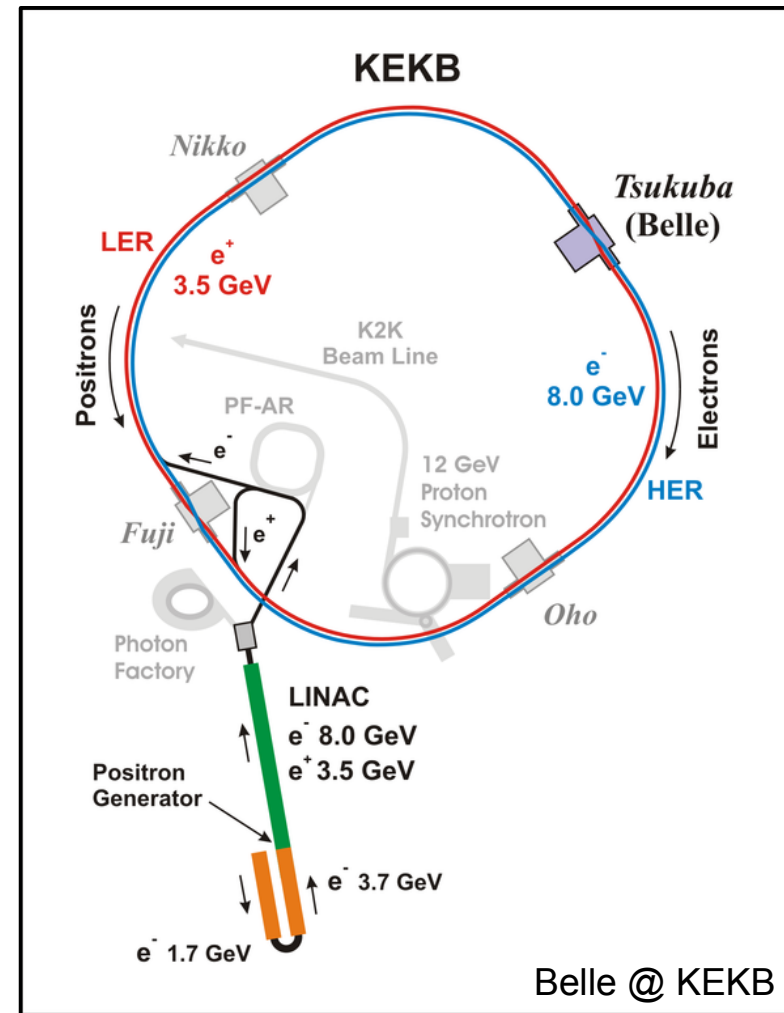
- Heute bekannt: $\operatorname{Re} \left(\frac{\epsilon'}{\epsilon} \right) = 1.65(26) \cdot 10^{-3}$
- Relevante Prozesse (\rightarrow Pinguine & Bäume):



Mögliche Formen der CP-Verletzung (Zerfall+Mischung)

- **CP-Verletzung in der Interferenz** zwischen Mischung und Zerfall
- Beispiel B-Fabriken (**BaBar** und **Belle**)
 - Schwerpunktsenergie auf $\Upsilon(4S)$ -Resonanz
 - Elektron-Positron Collider mit asymmetrischen Strahlenergien

Strahlenergien bei KEKB: $E_{e^-} = 8 \text{ GeV}$
 $E_{e^+} = 3.5 \text{ GeV}$ berechnen Sie die Geschwindigkeit $\beta\gamma$ des Schwerpunktsystems relativ zum Laborsystem

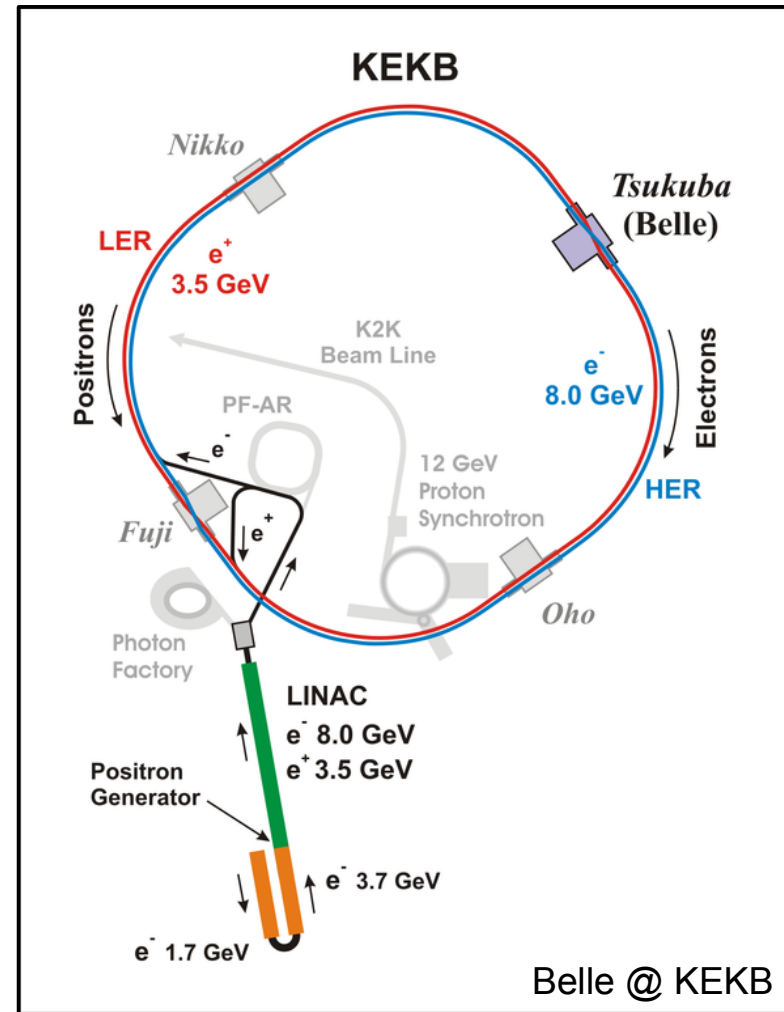


Mögliche Formen der CP-Verletzung (Zerfall+Mischung)

- **CP-Verletzung in der Interferenz** zwischen Mischung und Zerfall
- Beispiel B-Fabriken (**BaBar** und **Belle**)
 - Schwerpunktsenergie auf $\Upsilon(4S)$ -Resonanz
 - Elektron-Positron Collider mit asymmetrischen Strahlenergien

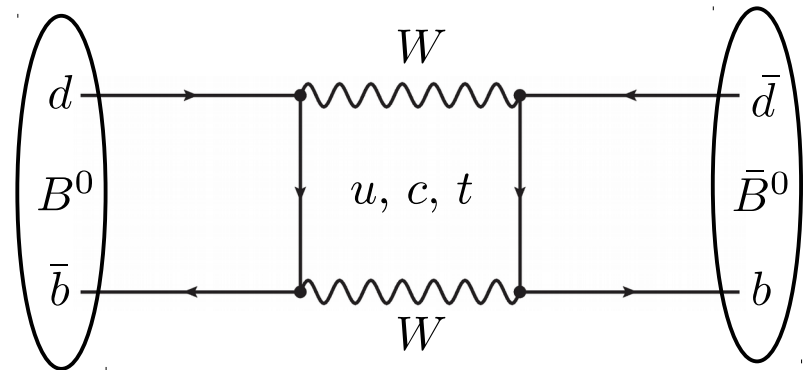
Strahlenergien bei KEKB: $E_{e^-} = 8 \text{ GeV}$
 $E_{e^+} = 3.5 \text{ GeV}$ berechnen Sie die Geschwindigkeit $\beta\gamma$ des Schwerpunktsystems relativ zum Laborsystem

$$\beta\gamma = \frac{E_{e^-} - E_{e^+}}{\sqrt{s}} \approx 0.425$$

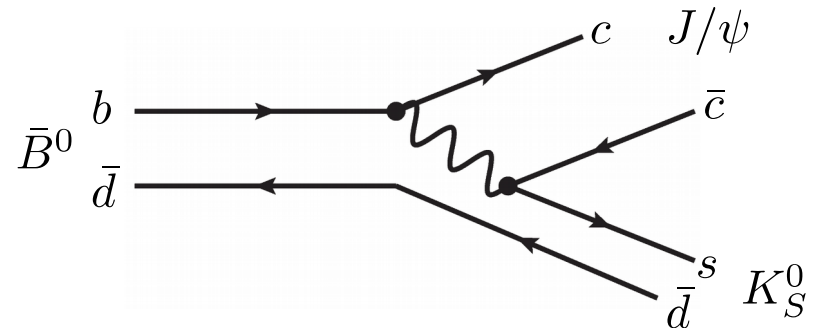
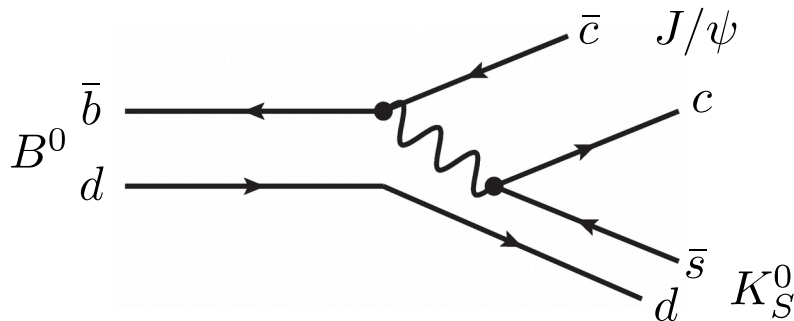


Mögliche Formen der CP-Verletzung (Zerfall+Mischung)

- **CP-Verletzung in der Interferenz** zwischen Mischung und Zerfall
- $BR(\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 \bar{B}^0) \approx 0.5 \rightarrow$ neutrale B-Mesonen propagieren als QM verschränktes System mit 42.5% Lichtgeschwindigkeit in Richtung des Elektronstrahls
- B^0 und \bar{B}^0 oszillieren

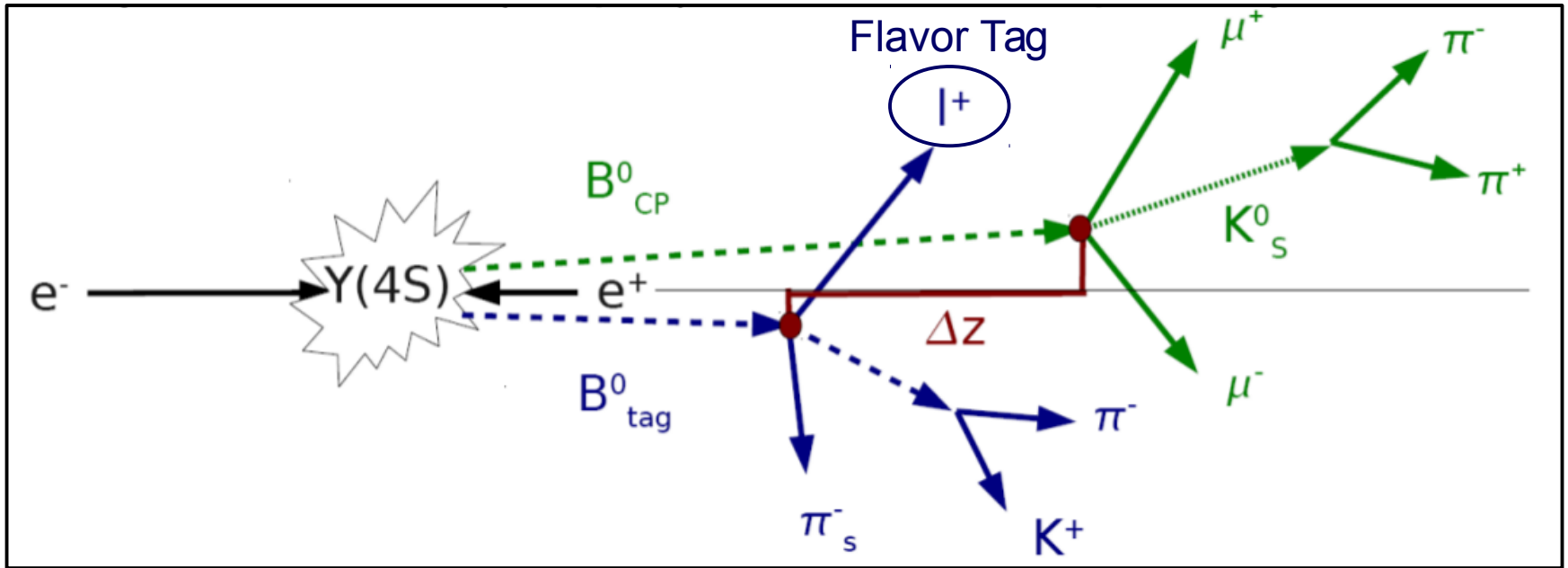


- Sowohl B^0 als auch \bar{B}^0 zerfallen u.a. in den Endzustand $B^0/\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$



Messprinzip

- CP-Verletzung in der Interferenz zwischen Mischung und Zerfall



- Flavor Tag definiert Zustand des verschränkten Partners
- Bestimme Asymmetrie als Funktion der Zeit:

$$\mathcal{A}_\Gamma(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) - \Gamma(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) + \Gamma(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)} = -2 \sin(2\beta) \sin(\Delta M t)$$

Ergebnis

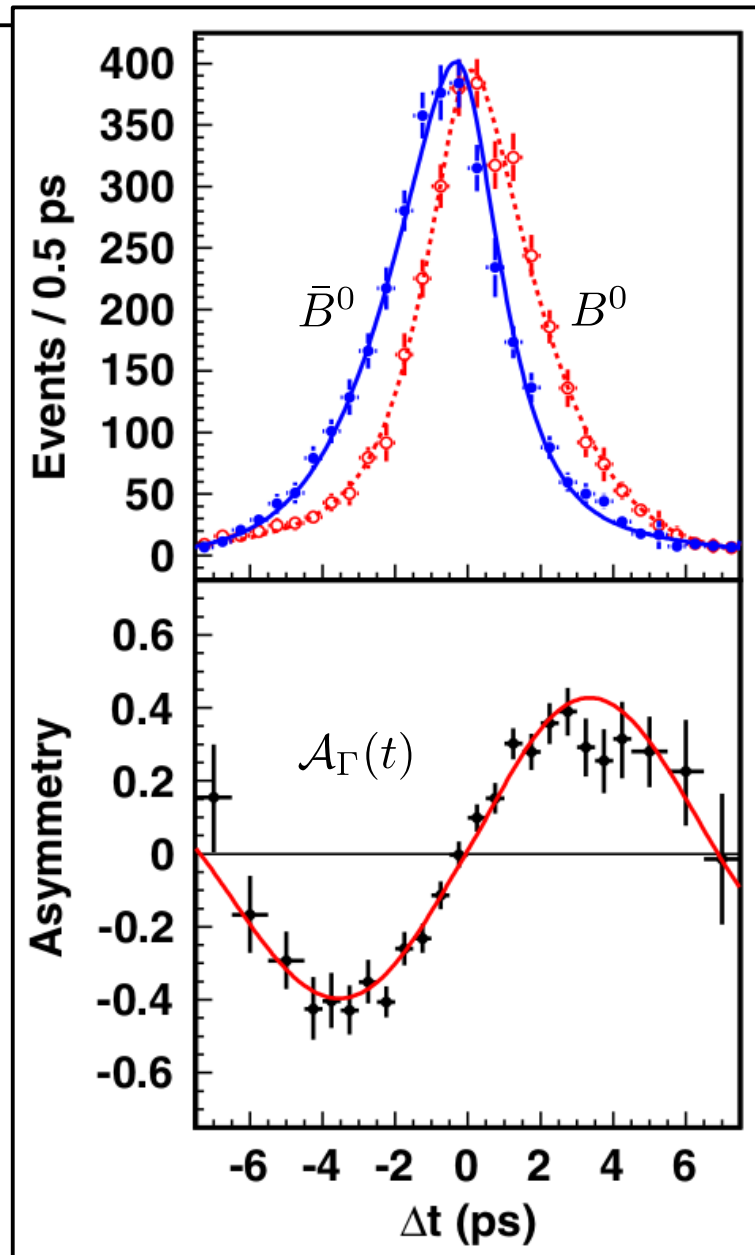
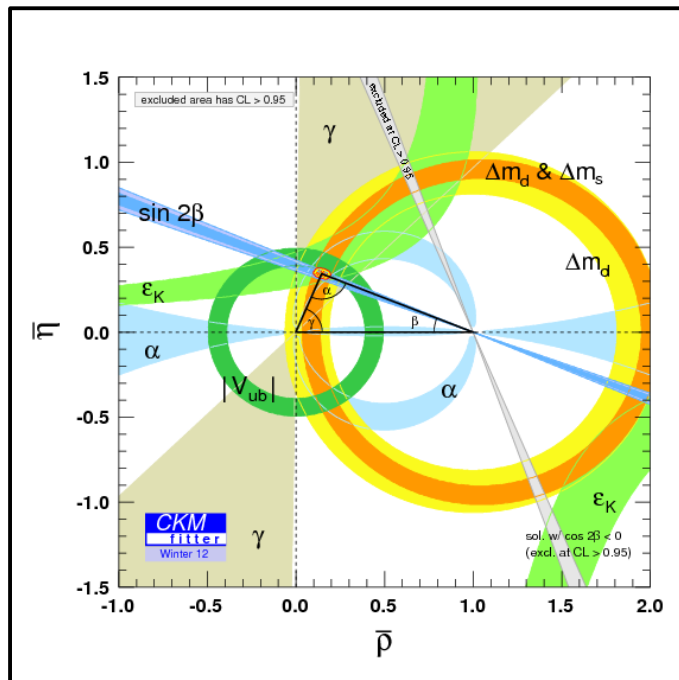
- Asymmetrie aufgetragen als Funktion der Zeit

$$A_{\Gamma}(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) - \Gamma(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) + \Gamma(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)}$$

$$= -2 \sin(2\beta) \sin(\Delta M t)$$

$$\sin(2\beta) = 0.710(11) \quad (\text{CKMfitter 2015})$$

(vgl VL-22 Folie 20)



KW-26-28

9 Elektroschwache Physik

9.1 Eigenschaften der elektroschwachen Wechselwirkung

9.2 Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung

9.3 Quarkmischung und CP-Verletzung



10 Moderne Teilchenphysik

10.1 Schlüsselexperimente der elektroschwachen Wechselwirkung an Collidern

10.2 Neutrino-physik

10.3 Astroteilchenphysik

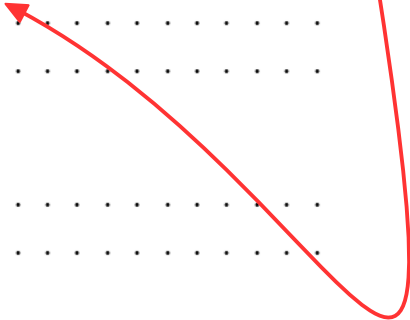
11 Offene Fragen der Teilchenphysik

11.1 Grenzen des SM

11.2 Teilchenphysik und Kosmologie

KW-29

KW-30



- **Keine CP-Verletzung** beobachtbar für Prozesse bei denen:
 - Nur eine Amplitude auftritt:
 $|\mathcal{A}|^2 = |\mathcal{A}^*|^2$
 - In einer Summe von zwei Amplituden eine reell ist:
 $|(\mathcal{A} + \mathcal{B})|^2 = (\mathcal{A} + \mathcal{B})(\mathcal{A}^* + \mathcal{B}) = |(\mathcal{A}^* + \mathcal{B})|^2$
 - In einer Summe von zwei Amplituden beide beim Übergang von Teilchen zu Antiteilchen komplex konjugiert werden:
 $|(\mathcal{A} + \mathcal{B})|^2 = (\mathcal{A} + \mathcal{B})(\mathcal{A}^* + \mathcal{B}^*) = |(\mathcal{A}^* + \mathcal{B}^*)|^2$
- **Zwei komplexwertige Amplituden erforderlich** von denen eine beim Übergang von Teilchen zu Antiteilchen komplex konjugiert wird, die andere nicht oder nur “teilweise”