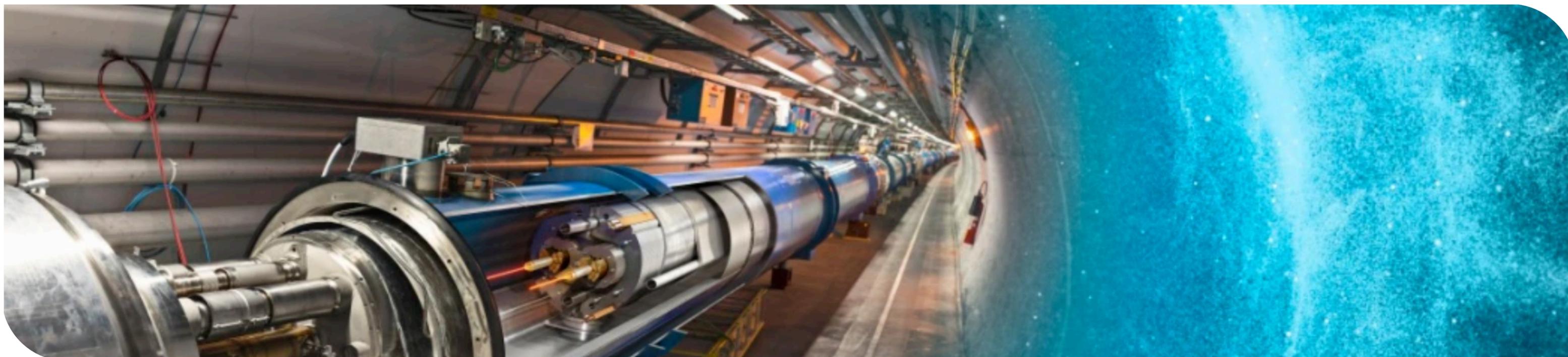


Moderne Experimentalphysik II

Teilchenphysik - Vorlesung 13

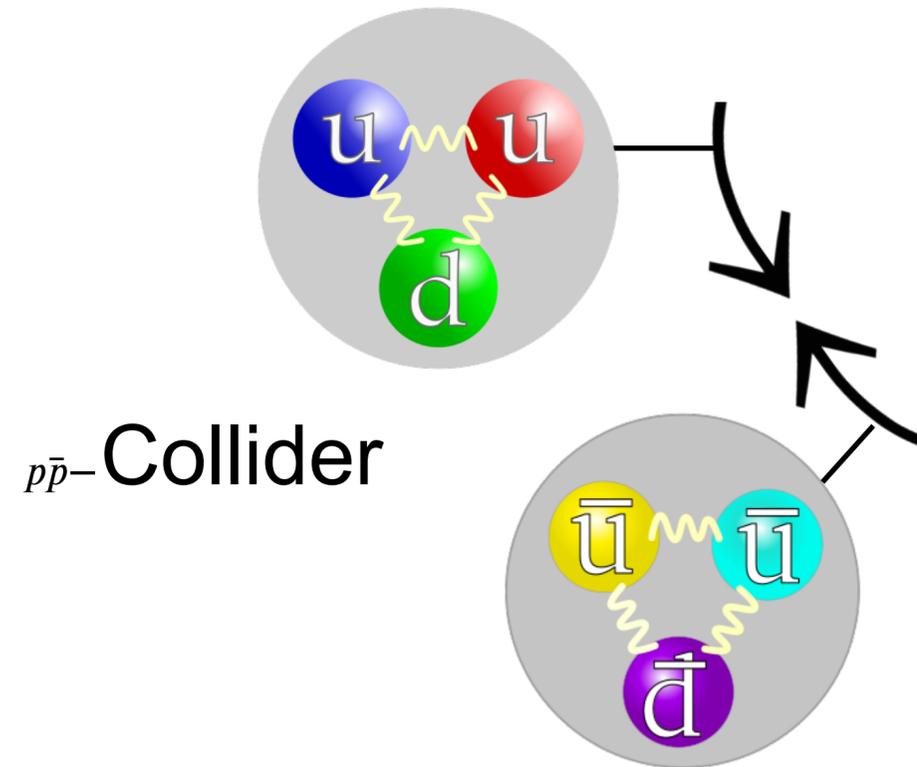
Prof. Dr. Markus KLUTE (markus.klute@kit.edu), Dr. Roger Wolf (roger.wolf@kit.edu)
Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



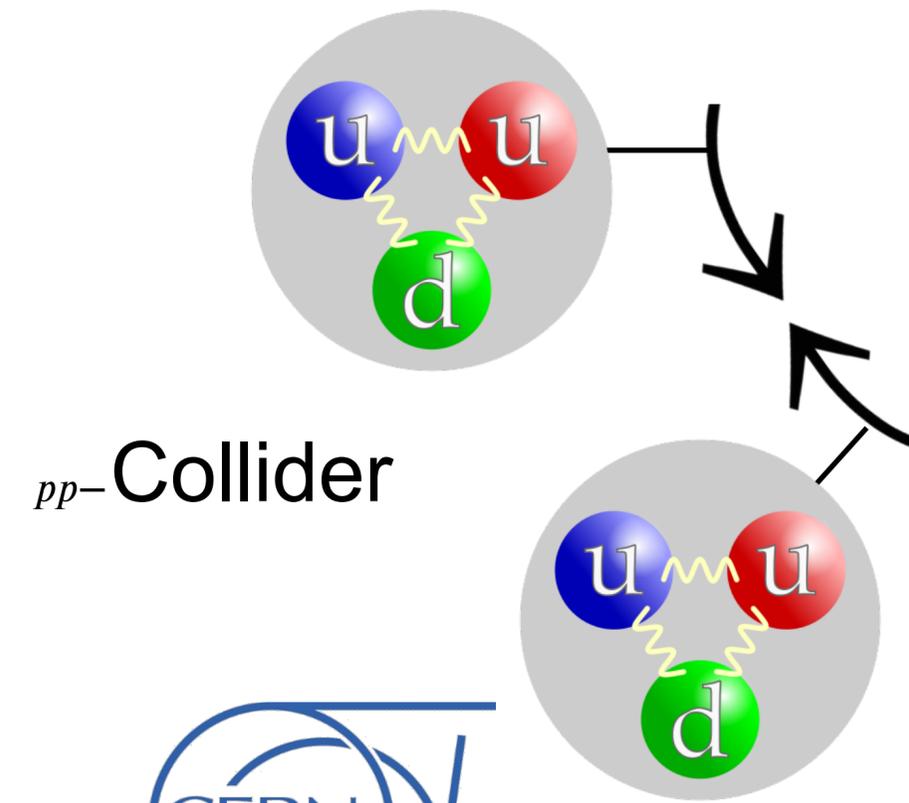
Nachweis des Higgs-Bosons am CERN

- Wettrennen: wer findet zuerst Evidenz für das Higgs-Boson?

$$\sqrt{s} = 1,96 \text{ TeV}$$



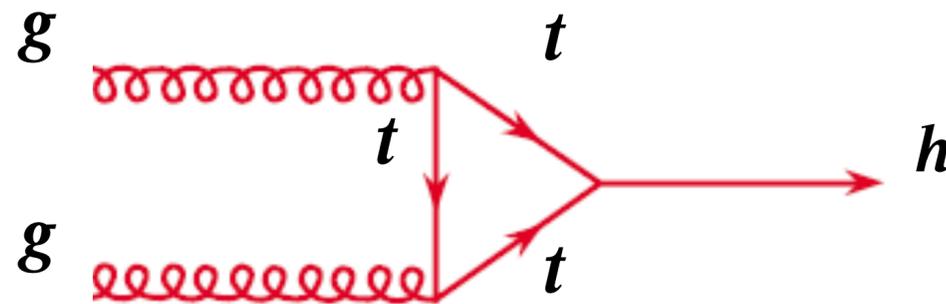
$$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$$



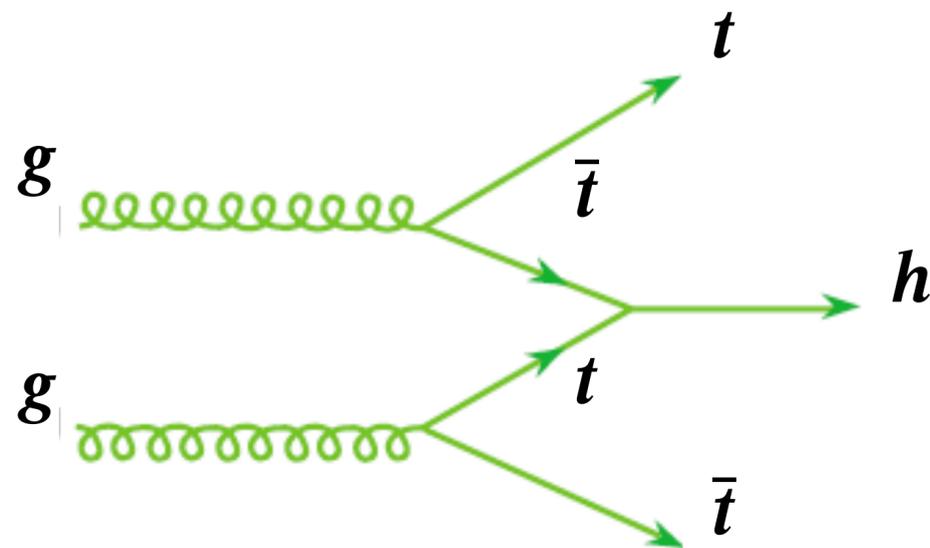
Higgs-Erzeugung am Large Hadron Collider

- Higgs-Produktionsmechanismen bei hoher *cms*-Energie $\sqrt{s} \sim$ einige TeV
 - 4 Produktionsmechanismen: dominant am LHC ist **Gluon – Gluon Fusion**

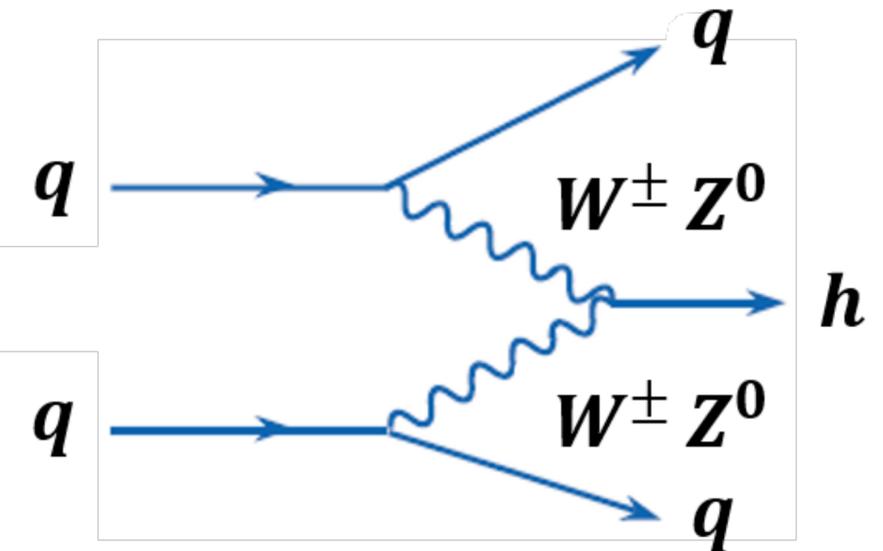
Gluon-Gluon Fusion



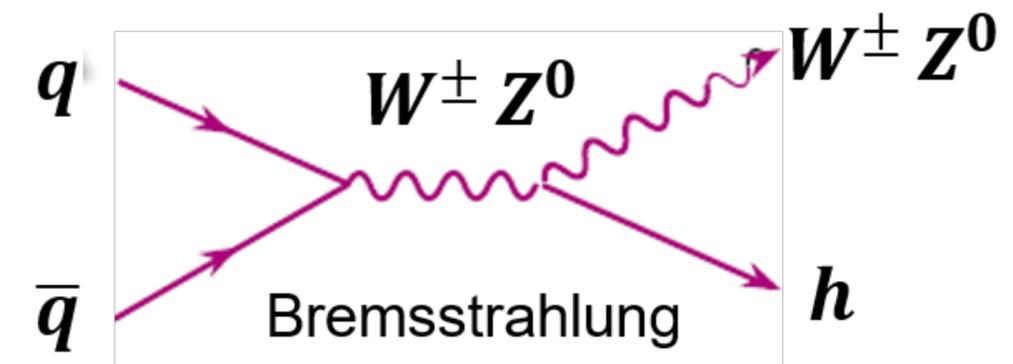
Top-Anti-Top Fusion



Vektorboson Fusion



assoziierte Produktion Higgsstrahlung



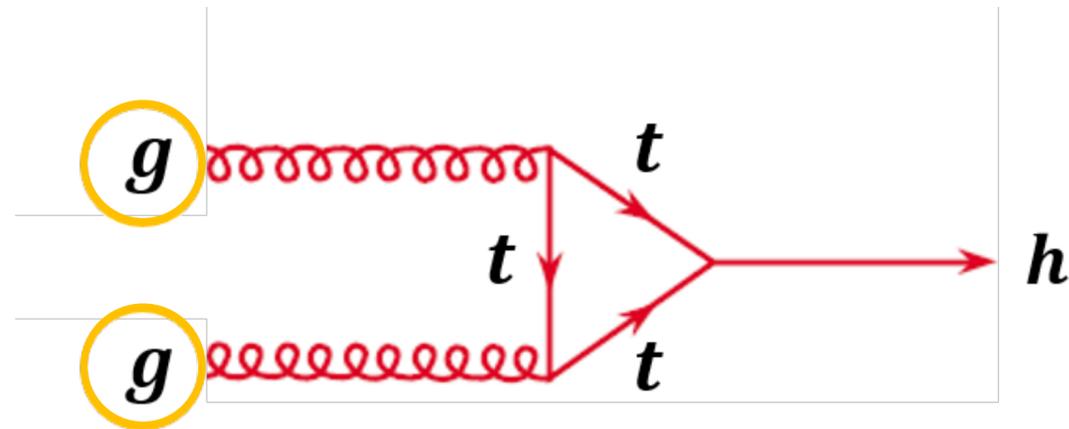
Q: spektrum

Higgs-Erzeugung am Large Hadron Collider

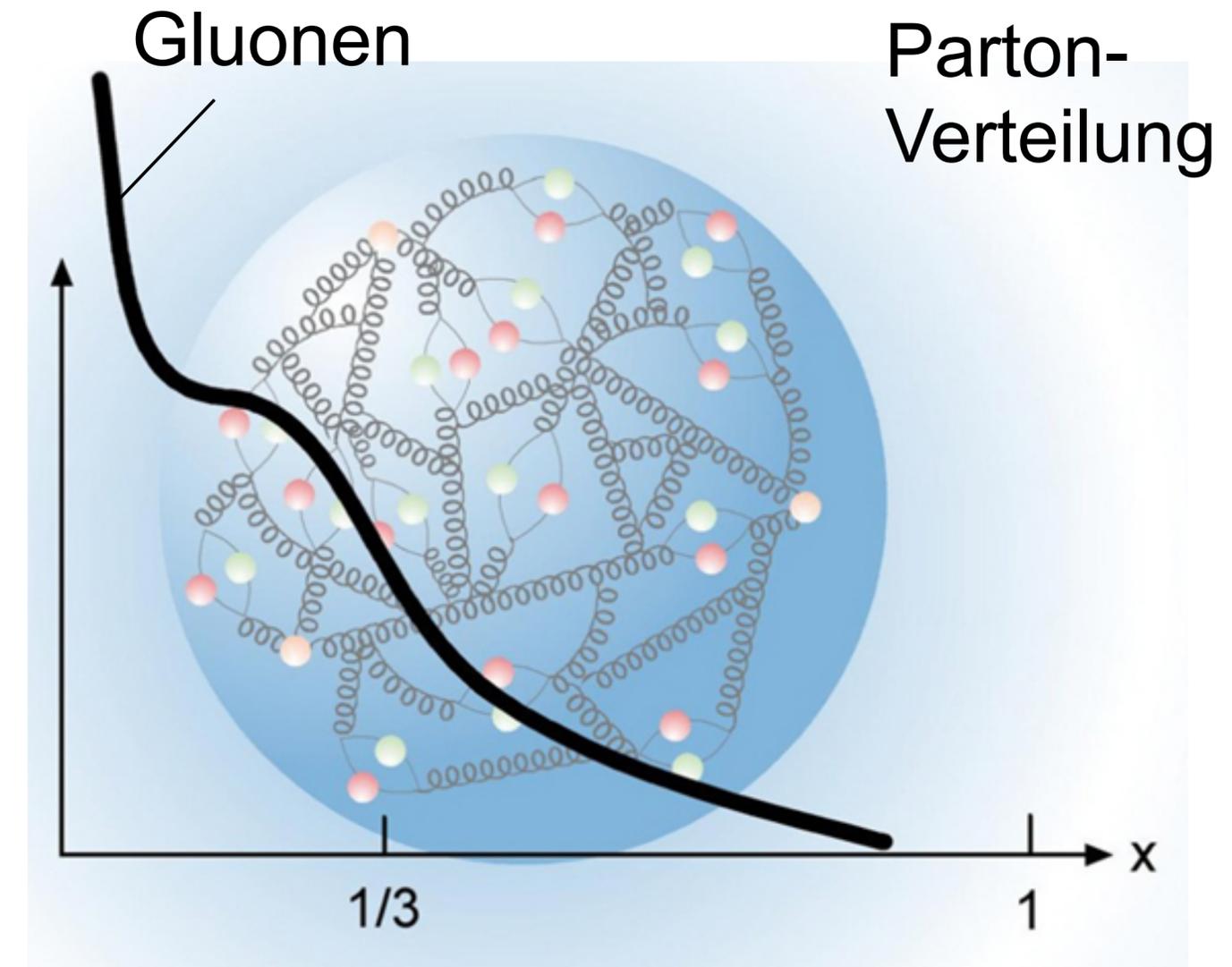
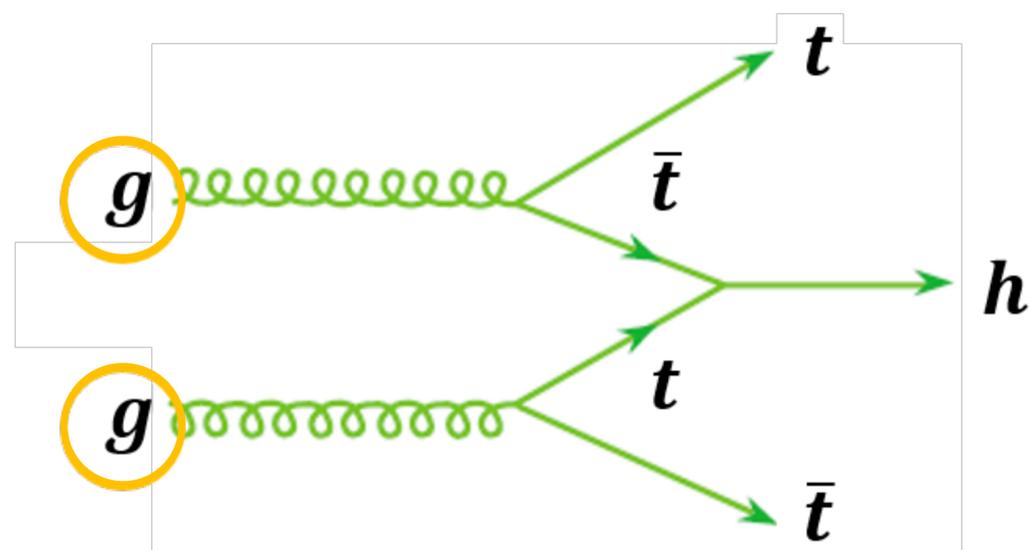
- Higgs-Produktionsmechanismen bei hoher cms -Energie $\sqrt{s} \sim$ einige TeV

- Gluonen mit sehr kleinem Björken- x

Gluon-Gluon Fusion



Top-Anti-Top Fusion



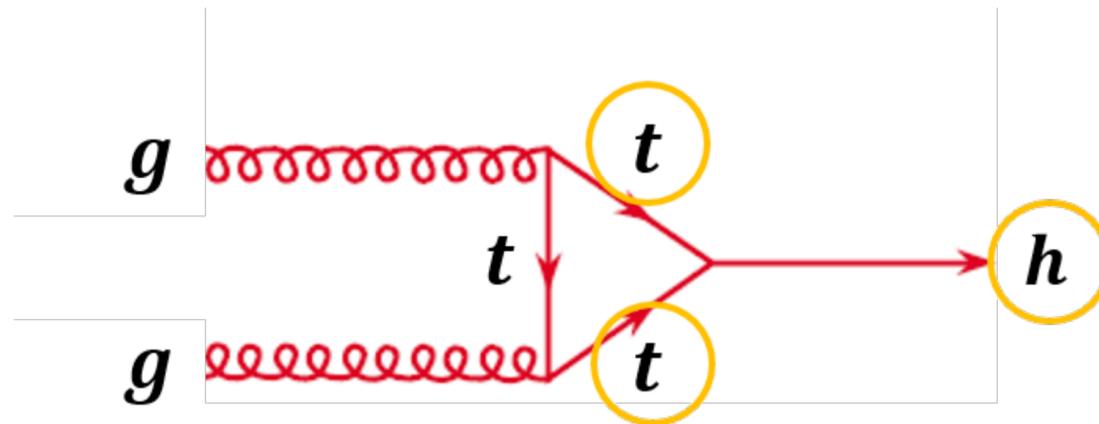
Q: spektrum

Higgs-Erzeugung am Large Hadron Collider

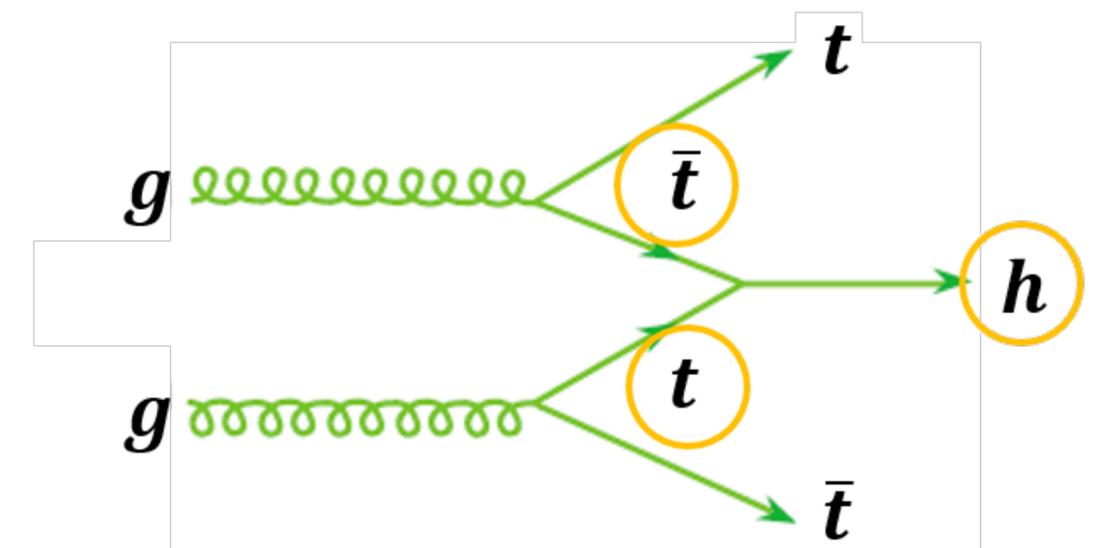
- Higgs-Produktionsmechanismen: weshalb via top-Quarks?

- Kopplung von h an Top-Quark t ist am stärksten

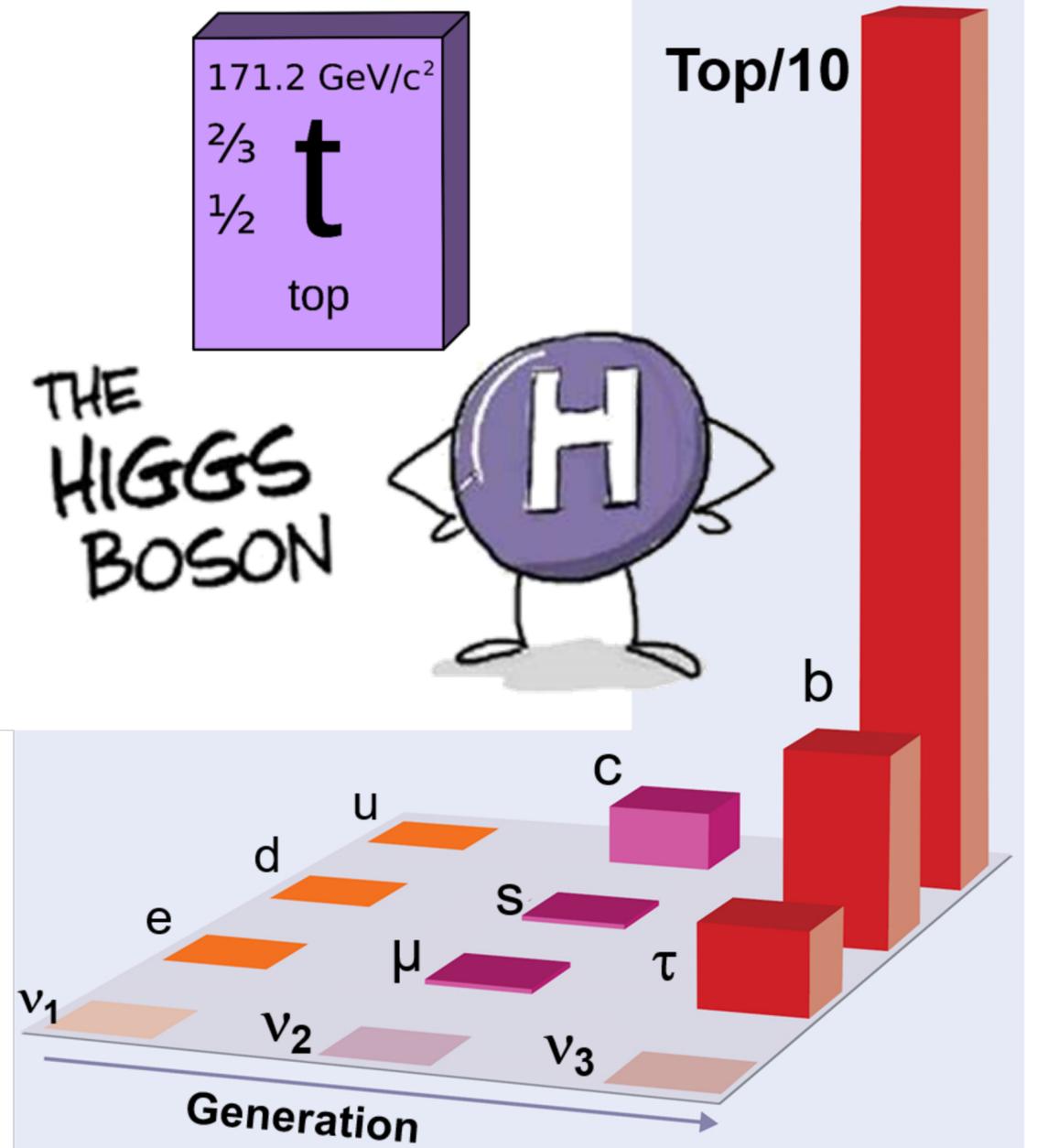
Gluon-Gluon Fusion



Top-Anti-Top Fusion

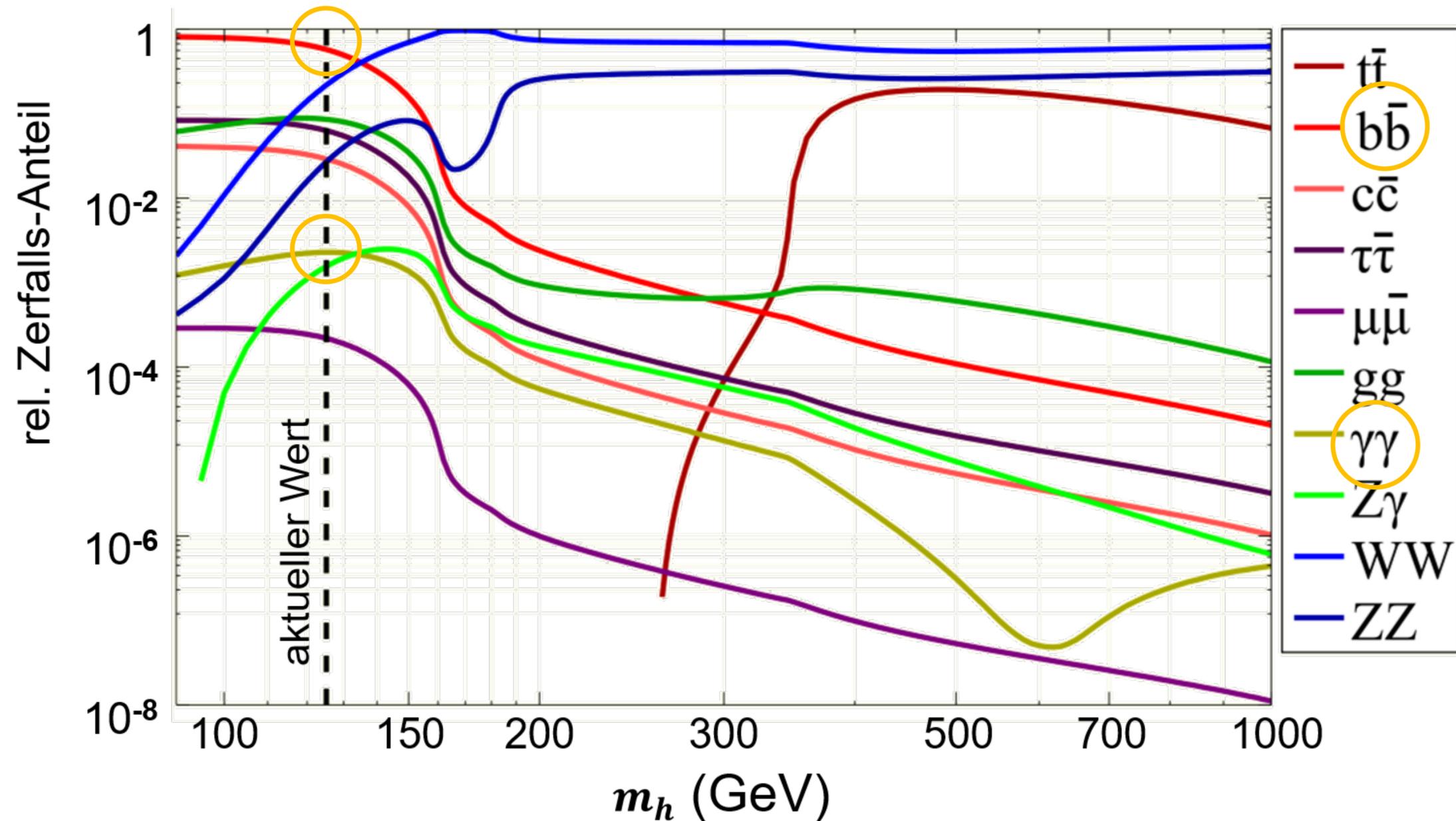
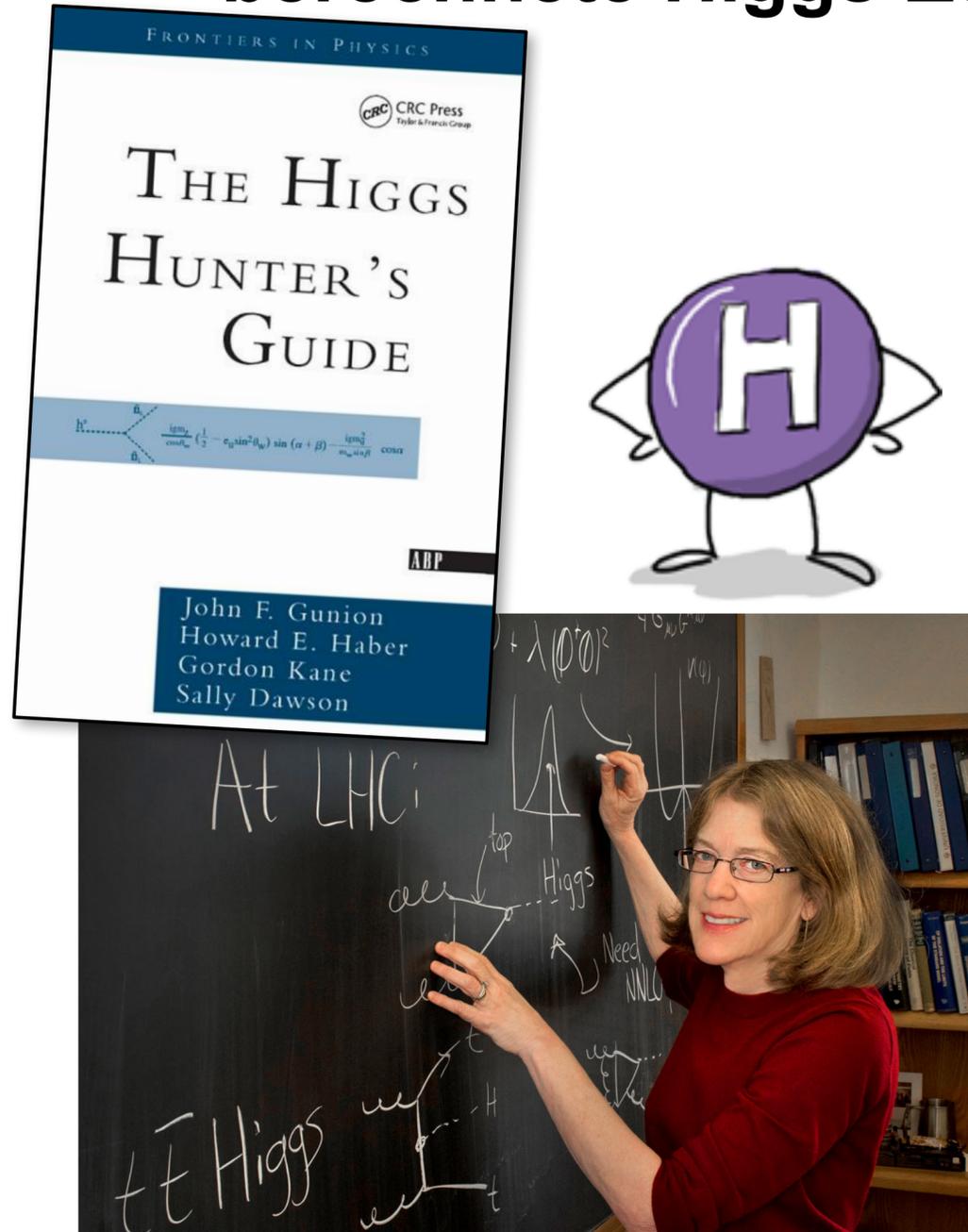


Q: spektrum



Higgs-Zerfallskanal: abhängig von m_h

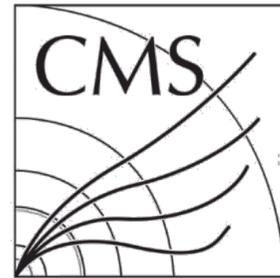
- berechnete Higgs-Zerfalls-Kanäle für verschiedene Werte von m_h



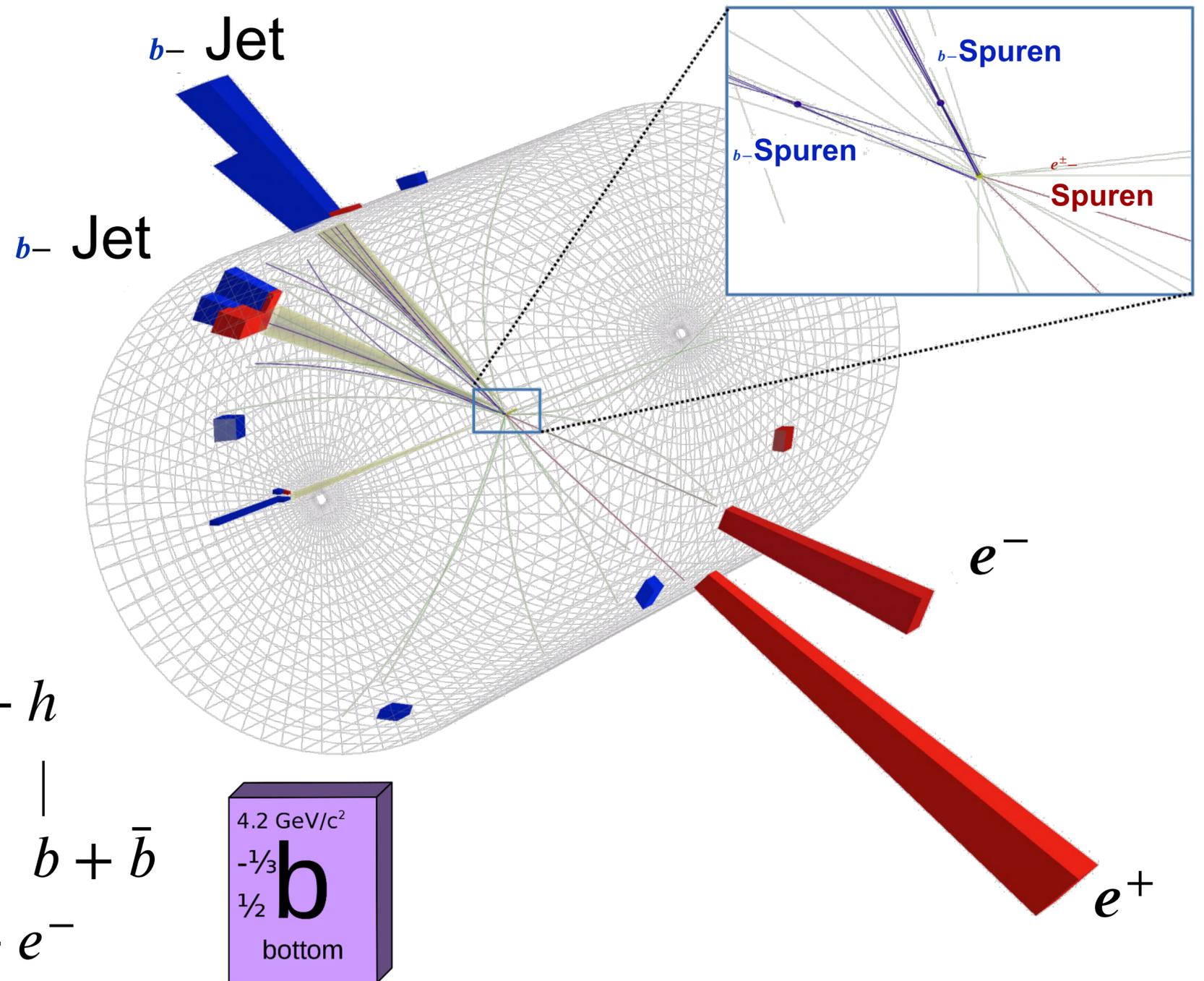
Higgs-Zerfall $h \rightarrow b\bar{b}$ dominant bei $m_h = 125 \text{ GeV}$

■ Beobachtung $h \rightarrow b\bar{b}$ in CMS

- Analysen zum Nachweis des Higgs-Bosons*
- hoher Untergrund durch **hadronische Produktion von b -Quarks**, daher $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ wichtig

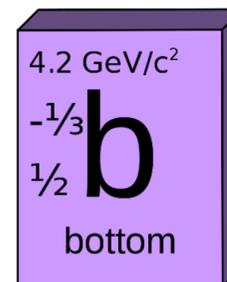


$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ (2017)



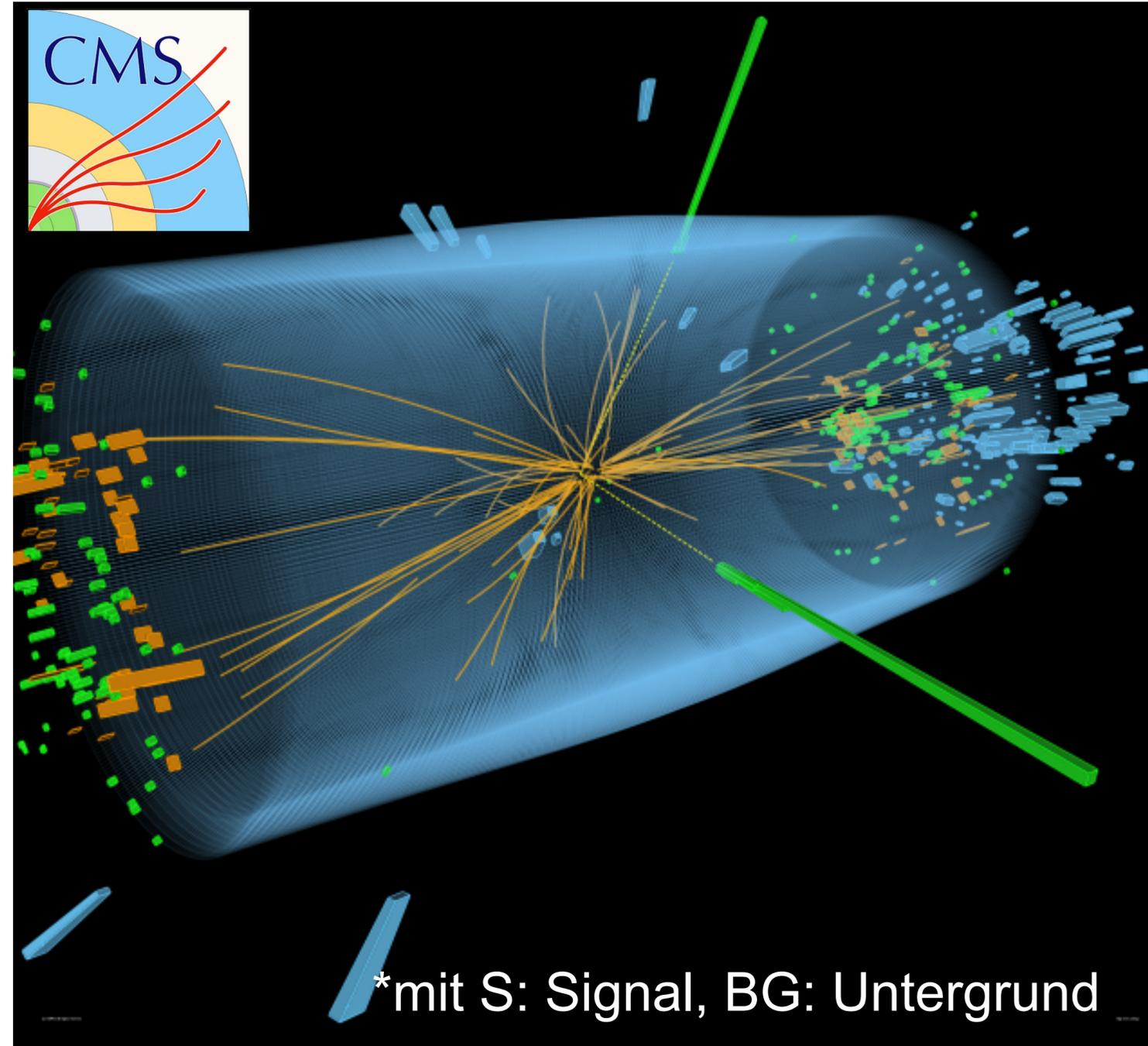
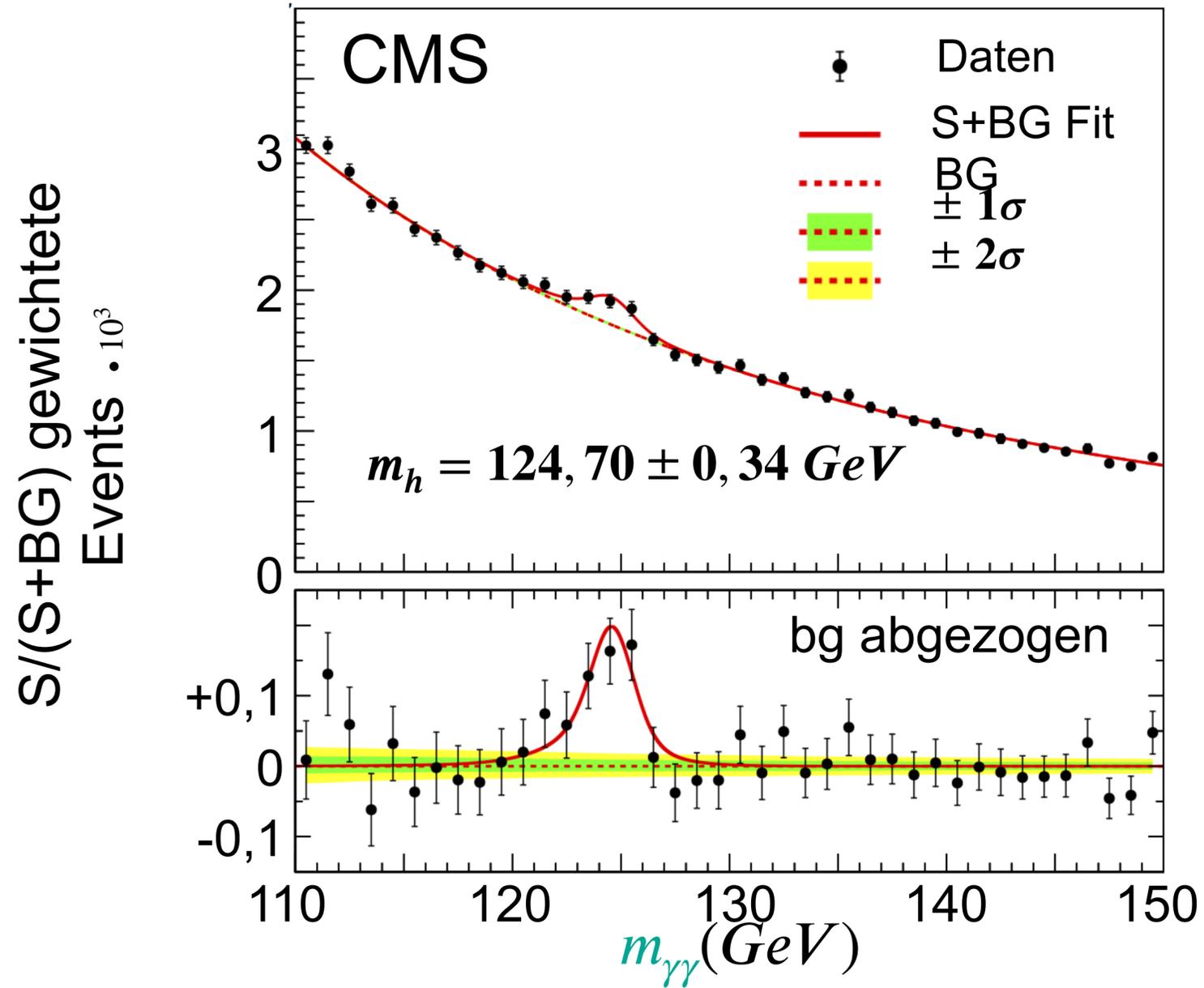
$$pp \rightarrow Z^0 + h$$

$$\begin{array}{c} | \qquad | \\ e^+ + e^- \qquad b + \bar{b} \end{array}$$



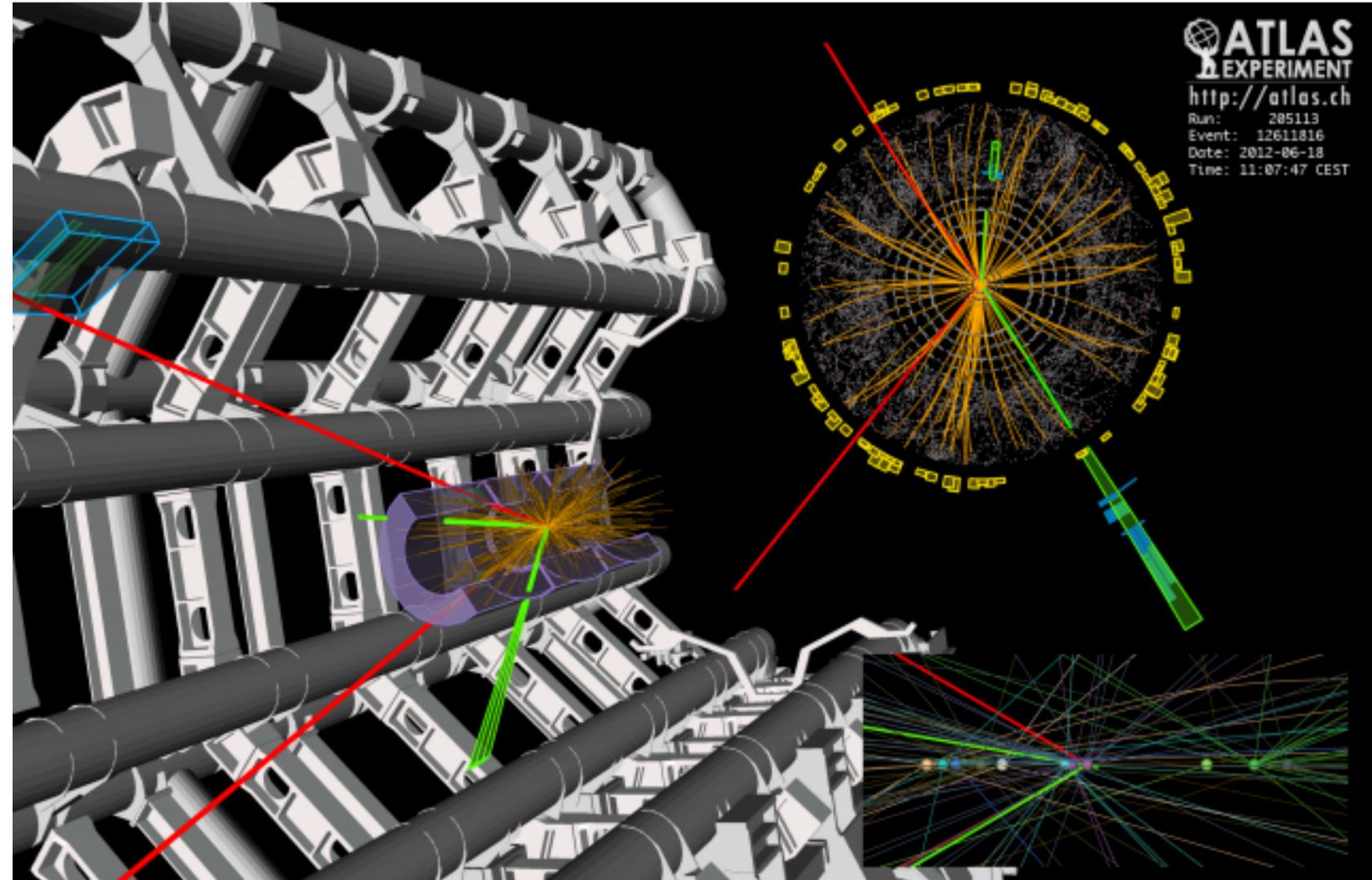
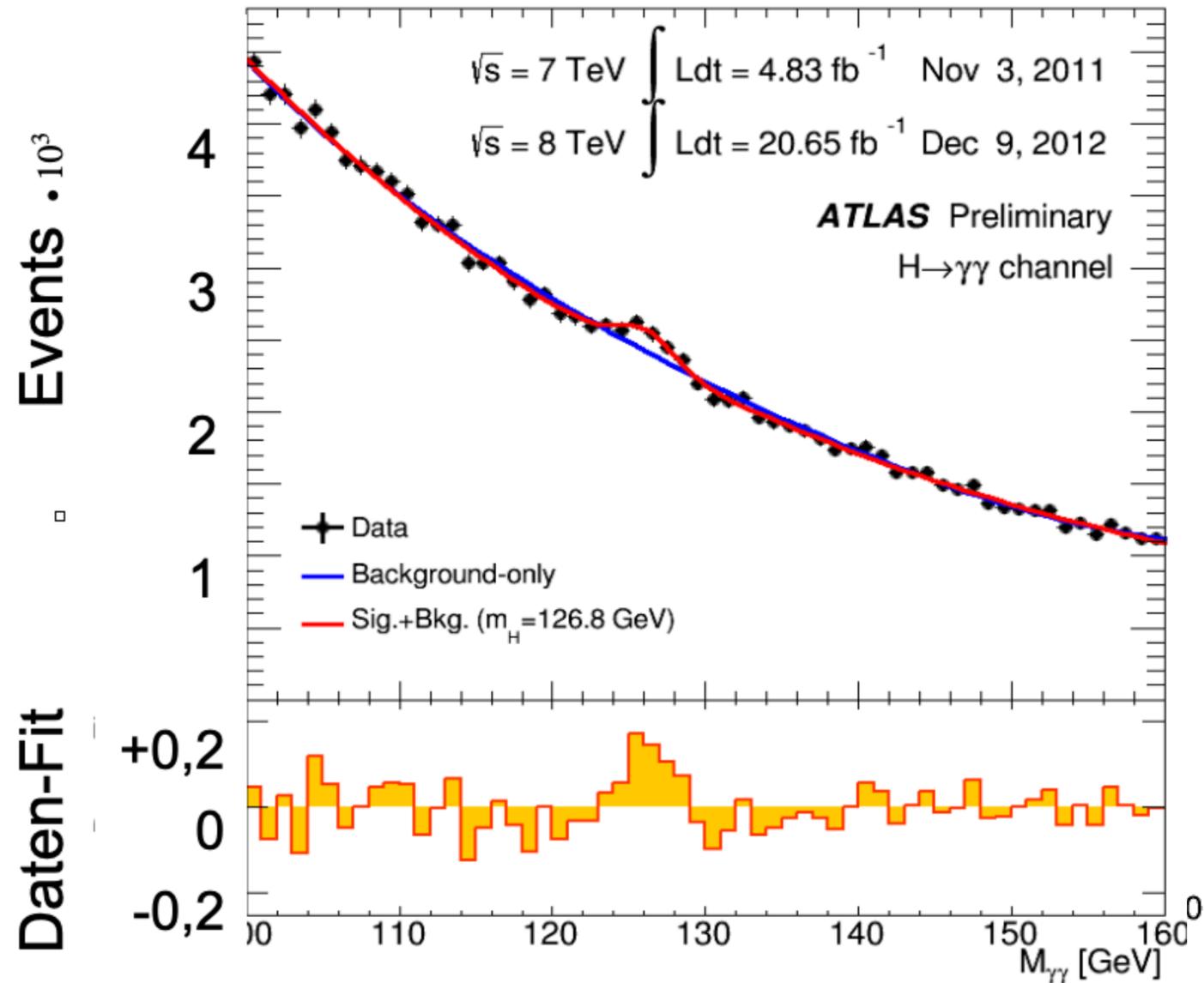
Zerfall $h \rightarrow \gamma\gamma$: $19,7 \text{ fb}^{-1}$ (8 TeV) $5,1 \text{ fb}^{-1}$ (7 TeV)

■ Kandidat $h \rightarrow \gamma\gamma$ in CMS, Peak* in $m_{\gamma\gamma}$



Zerfall $h \rightarrow \gamma\gamma$:

■ ATLAS: Entstehung des $h \rightarrow \gamma\gamma$ Peaks im ersten Jahr



■ CMS & ATLAS verkünden am CERN die Entdeckung des Higgs-Bosons



...nur knapp 50 Jahre Warten...



ATLAS
Sprecherin

CERN
General-
Direktor

CMS
Sprecher



Scientists in Geneva on Wednesday applauded the discovery of a subatomic particle that looks like the Higgs boson. Pool photo by Denis Balibouse

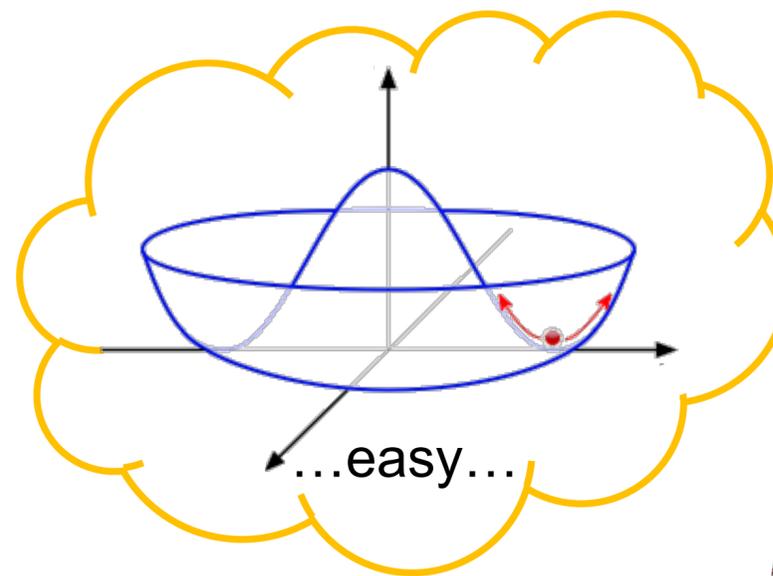
Physicists Find Elusive Particle Seen as Key to Universe

The New York Times

Higgs-Boson Nachweis wird gewürdigt

- **Durchbruch des Jahres 2012, Nobelpreis 2013**

"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider."

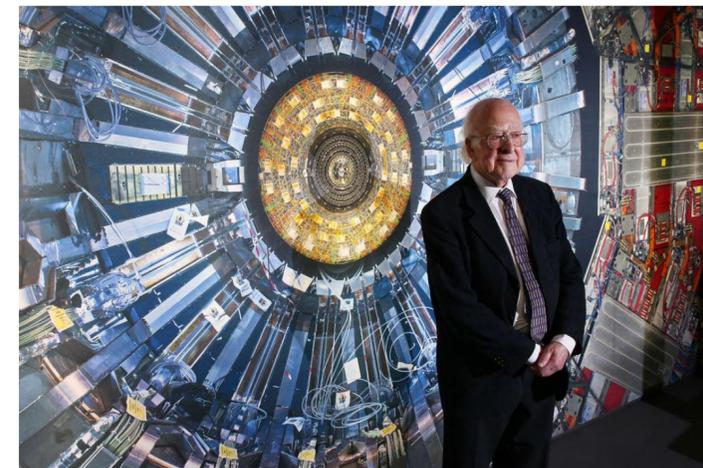


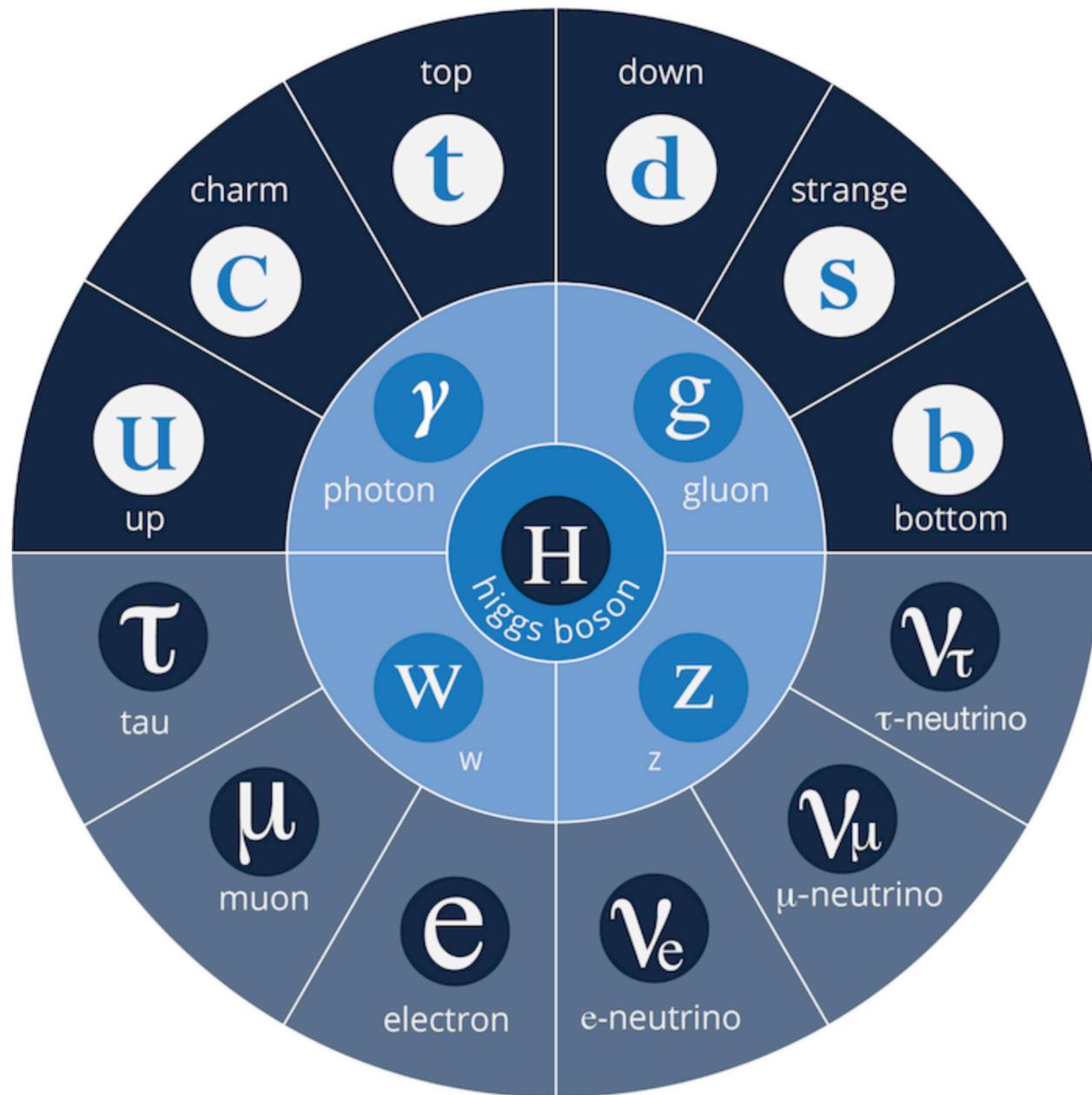
Peter Higgs
François Englert



- **welche Aussagen über Higgs h & Vektorbosonen W^\pm, Z^0 sind korrekt?**
 - die Zerfallsraten von W^\pm, Z^0 in Leptonen & Hadronen werden nur durch die Massen der Fermionen festgelegt
 - ein $p\bar{p}$ -Collider ist wesentlich leistungsfähiger bei der Erzeugung von Higgs-Bosonen h
 - ein $p\bar{p}$ -Collider ist wesentlich leistungsfähiger bei der Erzeugung von intermediären Vektorbosonen W^\pm, Z^0
 - die Erzeugung der Massen von W^\pm, Z^0 beruht auf einer Yukawa-artigen Kopplung \sim zu M_W und M_Z
 - das Higgsfeld (mit VEV) kann angeregt werden

Peter
Higgs





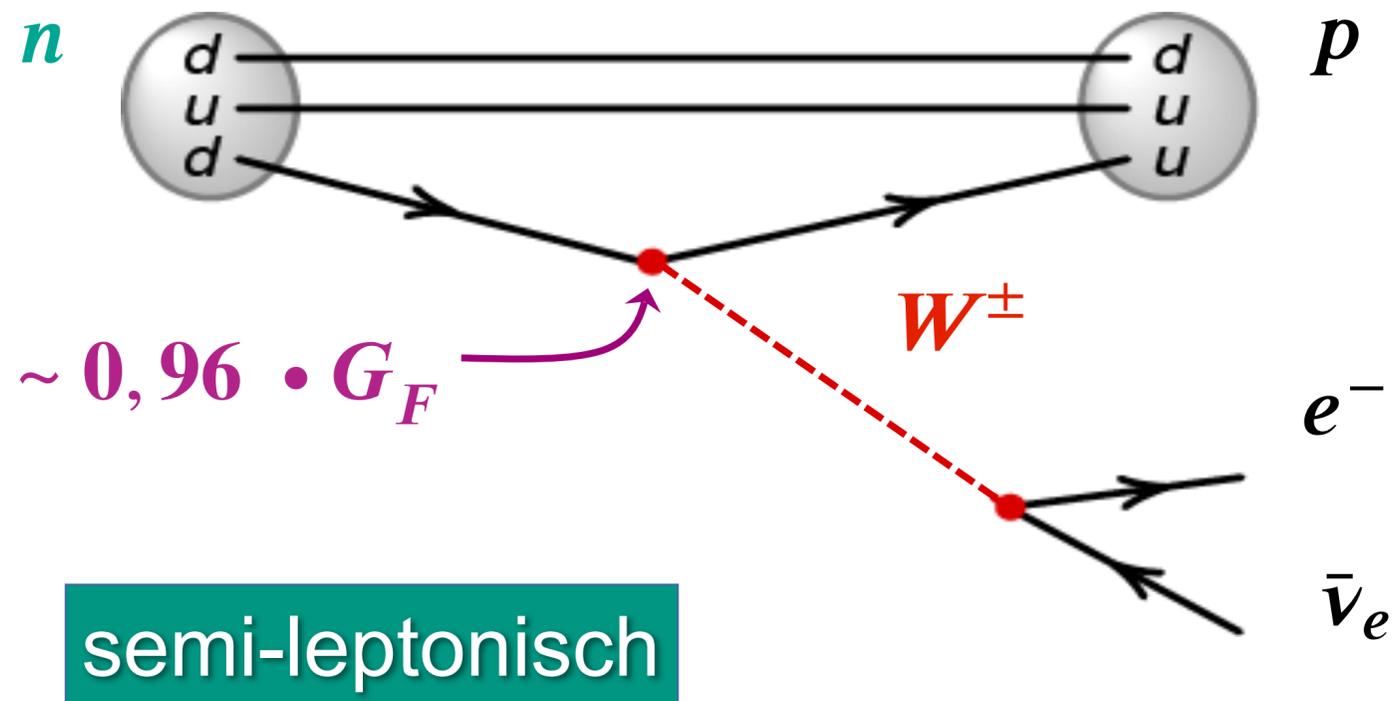
■ 5. Wechselwirkungen

- 5.1 Quarkonium
- 5.2 Farbwechselwirkung in der QCD
- 5.3 Elektroschwache Prozesse
- 5.4 Elektroschwache Vereinheitlichung
- 5.5 Schlüsselexperiment der elektroschwachen Wechselwirkung
- **5.6 Quarkmischung**

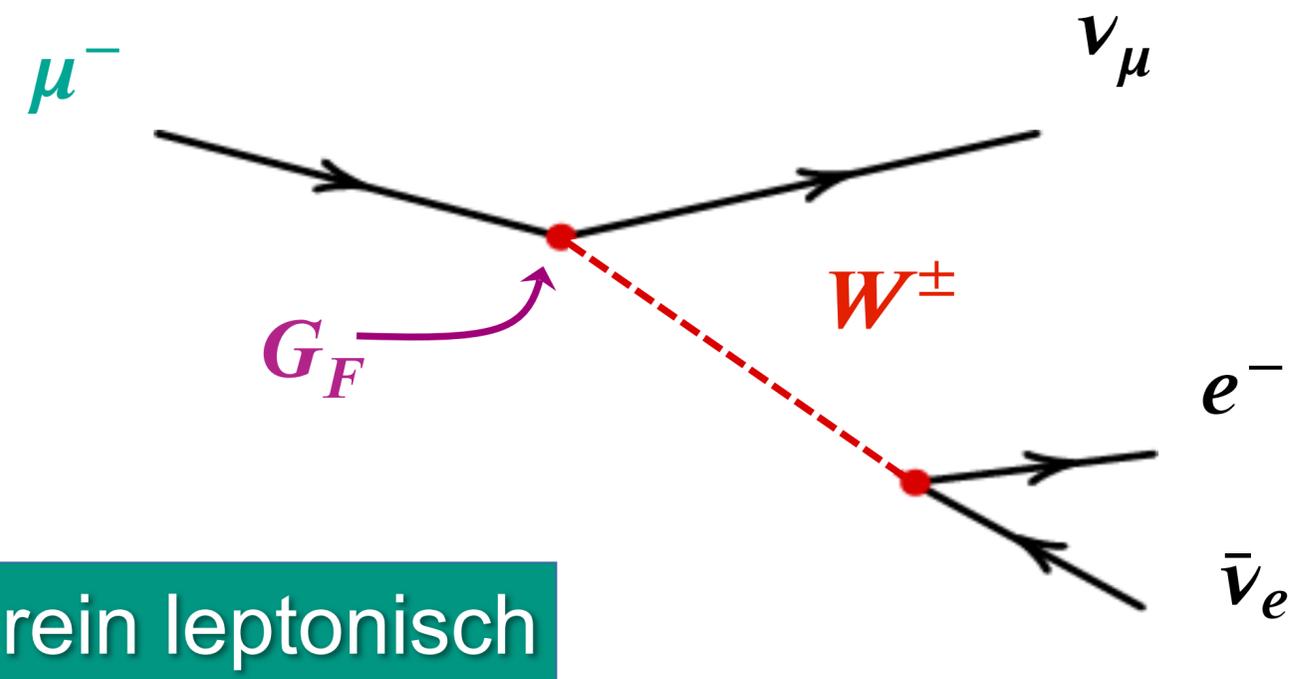
Schwache Wechselwirkung von Quarks

- **bisher: CC-Reaktionen mit universeller Kopplungskonstante g (G_F)**
 - Beobachtung: unterschiedliche Stärke von schwachen Prozessen im **rein leptonischen** vs. **semi-leptonischen** Kanal

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$



- **N. Cabbibo: schwache Wechselwirkung koppelt an gedrehte Zustände**

- zunächst nur Mischung der ersten beiden Generationen

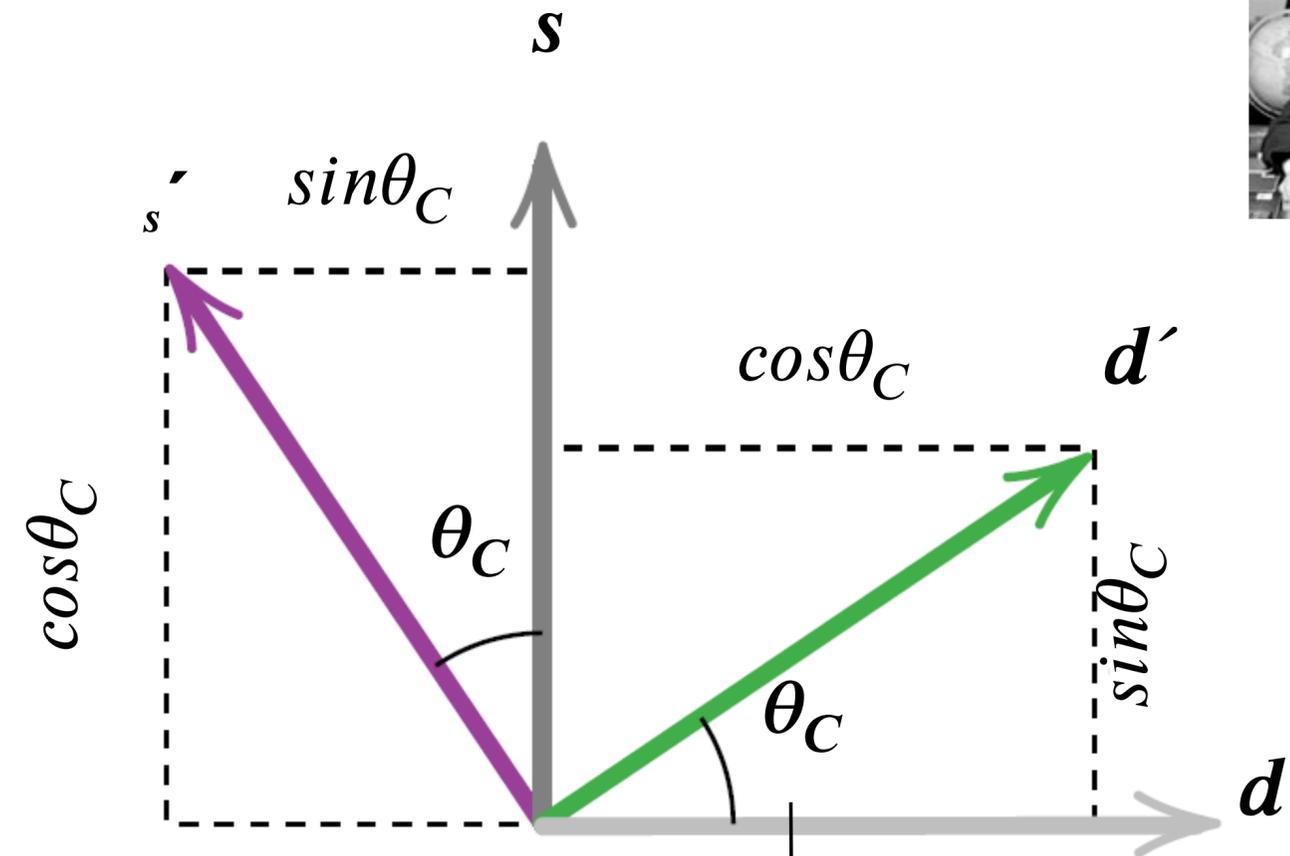


$$\begin{aligned} |d'\rangle &= \cos\theta_C \cdot |d\rangle + \sin\theta_C \cdot |s\rangle \\ |s'\rangle &= \cos\theta_C \cdot |s\rangle - \sin\theta_C \cdot |d\rangle \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_C & \sin\theta_C \\ -\sin\theta_C & \cos\theta_C \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \end{pmatrix}$$

$$\cos\theta_C \sim 0,98$$

$$\sin\theta_C \sim 0,22$$



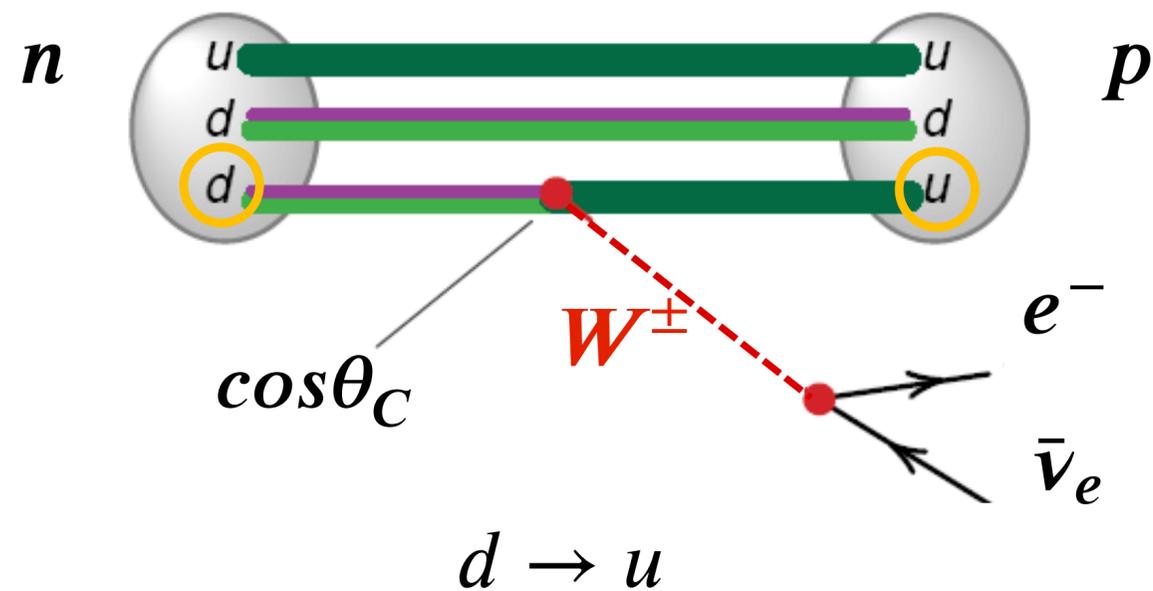
- 'Cabibbo-gedrehte' Quark-Zustände d', s'

Cabibbo-Winkel $\theta_C \sim 13^\circ$

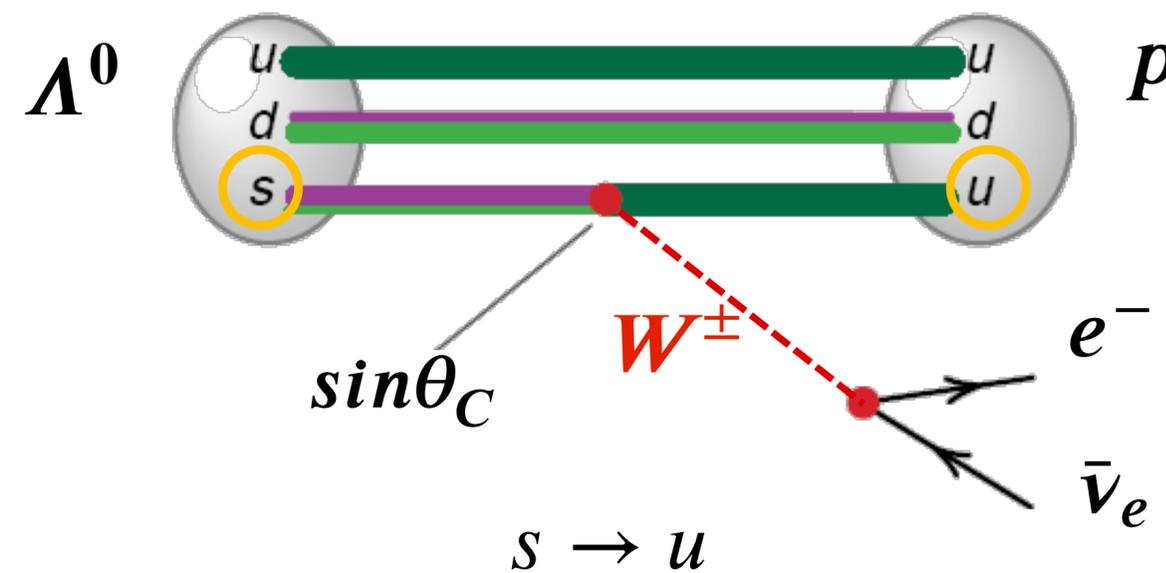
Schwache Wechselwirkung von Quarks

- schwache Eigenzustände d', s' : keine Eigenzustände der starken Ww.

- β -Zerfall des Neutrons n und des Λ^0 Baryons



$$\Gamma \sim \cos^2 \theta_C$$

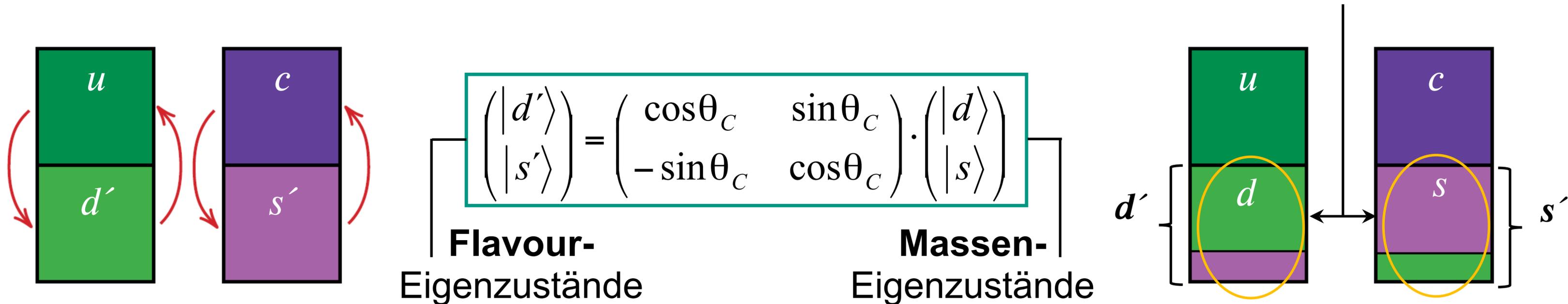


$$\Gamma \sim \sin^2 \theta_C$$

$$\Gamma(n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e) + \Gamma(\Lambda^0 \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e) \sim (\cos^2 \theta_C + \sin^2 \theta_C) \sim 1 \text{ (volle Stärke)}$$

Schwache Wechselwirkung von Quarks

- **N. Cabibbo: schwache Wechselwirkung koppelt an gedrehte Zustände**
 - 'Cabibbo-gedrehte' Quark-Zustände d', s' **keine Masseneigenzustände**
 - schwache Zustände d' und s' ohne definierte Masse, besser: **Massenanteile**



- w^\pm – Bosonen koppeln **nicht** an die Masseneigenzustände d, s sondern an die „**Cabibbo-gedrehten**“ Quark-Flavour Zustände d', s'

Kobayashi & Maskawa: 3 Generationen

- **Mischung der 3 Quark-Generationen**

- Motivation: Beschreibung der *CP*- Verletzung* erfordert **3 Quarkfamilien**

- **theoretische Vorhersage** der beiden Quarkflavours: **Bottom b , Top t**

- Aufstellung einer **unitären 3×3 Mischungsmatrix**
für LH Quarkzustände

- 'berühmte' **CKM**-Mischungsmatrix:
Cabbibo- Kobayashi- Maskawa- Matrix



N. Cabibbo



M. Kobayashi



T. Maskawa

- **Mischung der 3 Quark-Generationen**

- Massen- und Flavour-Eigenzustände der Quarks stimmen nicht überein

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}_L$$

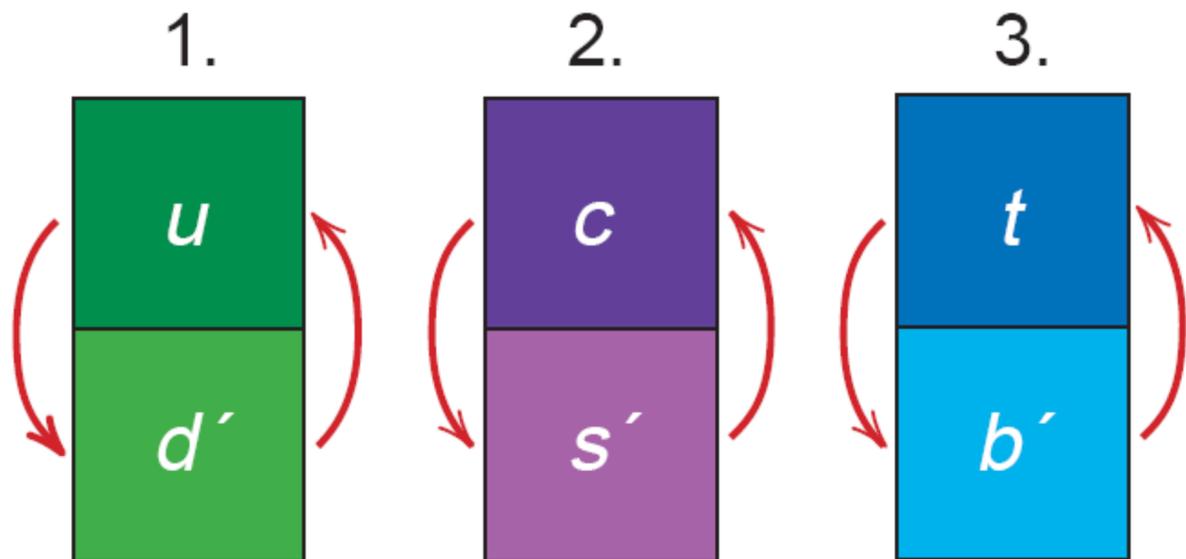
Flavour-
Eigenzustände

Massen-
Eigenzustände



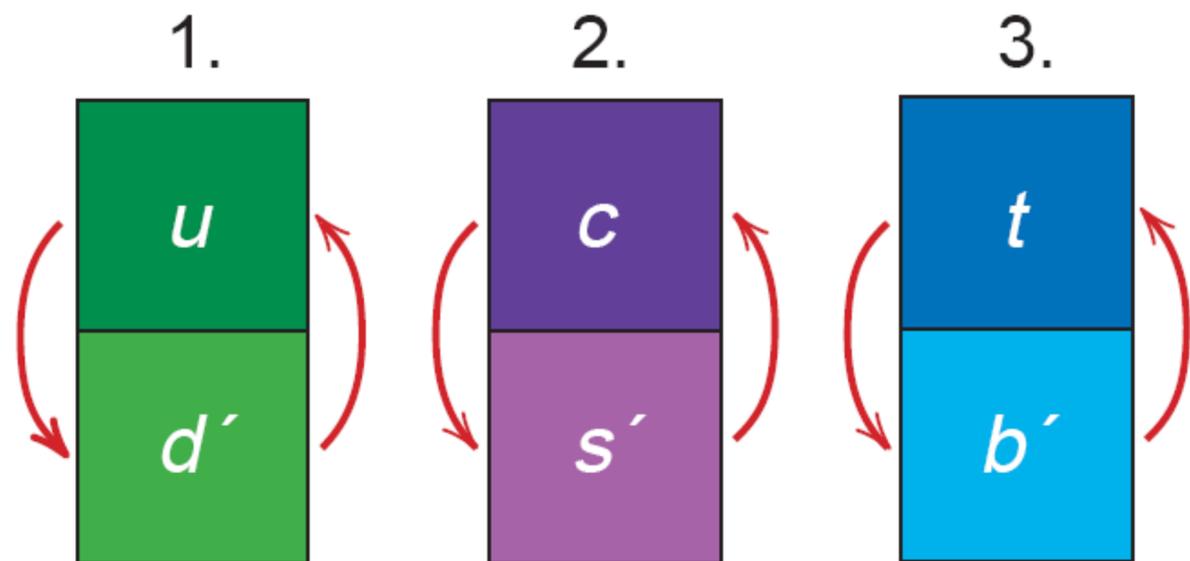
CKM muss **unitär** sein

- 3 reelle (Euler) Winkel θ_{ij}
- 1 imaginäre CP-Phase δ



- Mischung der 3 Quark-Generationen: aktuelle CKM-Werte

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97370 \pm 0.00014 & 0.2245 \pm 0.0008 & 0.00382 \pm 0.00024 \\ 0.221 \pm 0.004 & 0.987 \pm 0.011 & 0.0410 \pm 0.0014 \\ 0.0080 \pm 0.0003 & 0.0388 \pm 0.0011 & 1.013 \pm 0.030 \end{bmatrix}$$



$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0005$$

CKM sollte **unitär** sein

(3 σ Abweichung, interessant!)

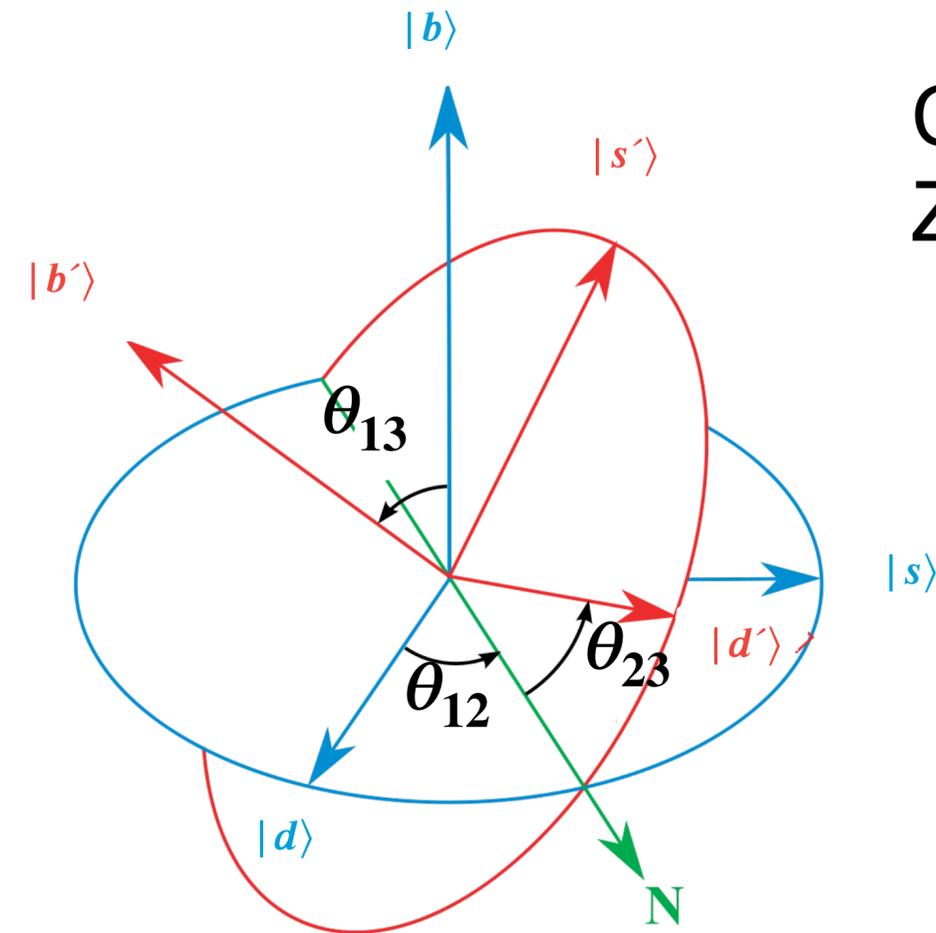
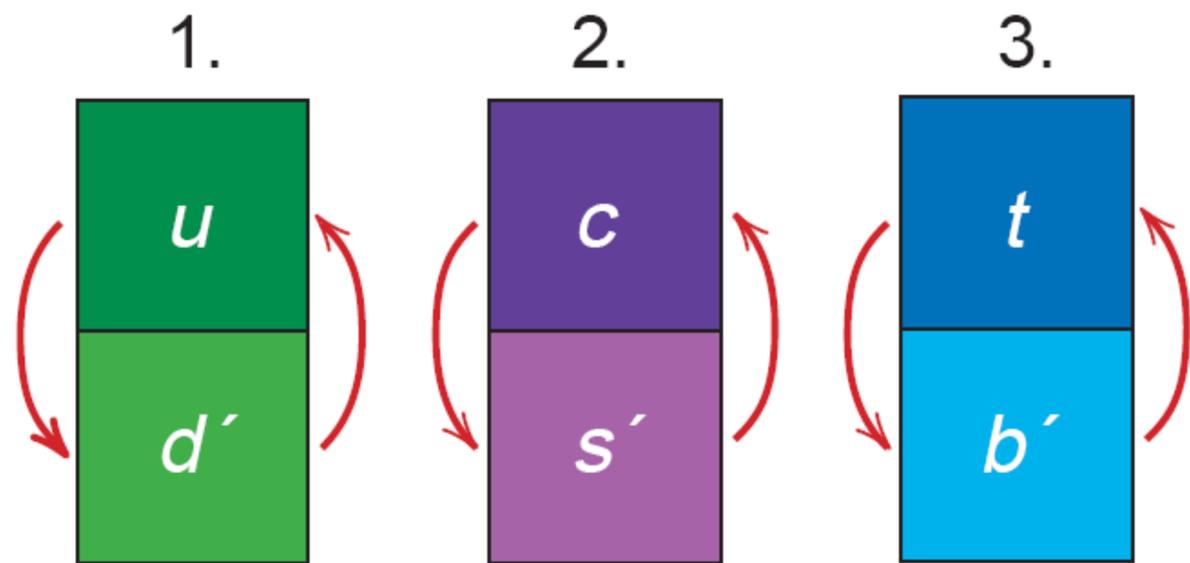
■ Mischung der 3 Quark-Generationen: Stärke der Übergänge

- 3 reelle (Euler) Winkel θ_{ij}

θ_{12} : Mischung 1. & 2. Generation

θ_{23} : Mischung 2. & 3. Generation

θ_{13} : Mischung 1. & 3. Generation



CKM-gedrehte Zustände

Konzept der 3 Euler-Winkel zur Mischung

- CKM-Darstellung: Drehung mit 3 Euler-Winkeln

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix}}_{\text{2. \& 3. Generation}} \underbrace{\begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta_{13}} & 0 & c_{13} \end{bmatrix}}_{\text{1. \& 3. Generation}} \underbrace{\begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{1. \& 2. Generation}}$$

$$\begin{aligned}
 c_{ij} &= \cos\theta_{ij} \\
 s_{ij} &= \sin\theta_{ij}
 \end{aligned}$$

$\delta = CP$ -
verletzende
Phase

- aktuelle Werte: grundlegend gilt $s_{13} \ll s_{23} \ll s_{12}$

$$\theta_{12} = (13,04 \pm 0,05)^\circ \quad \theta_{23} = (2,38 \pm 0,06)^\circ \quad \theta_{13} = (0,201 \pm 0,011)^\circ$$

$$\delta_{13} = (68,8 \pm 4,5)^\circ$$

- CKM-Darstellung: Drehung mit 3 Euler-Winkeln

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{-i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{-i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

$$c_{ij} = \cos\theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin\theta_{ij}$$

„Standard“-Parametrisierung

$\delta = CP$ -
verletzende
Phase

- aktuelle Werte: grundlegend gilt $s_{13} \ll s_{23} \ll s_{12}$

$$\theta_{12} = (13,04 \pm 0,05)^\circ \quad \theta_{23} = (2,38 \pm 0,06)^\circ \quad \theta_{13} = (0,201 \pm 0,011)^\circ$$

$$\delta_{13} = (68,8 \pm 4,5)^\circ$$

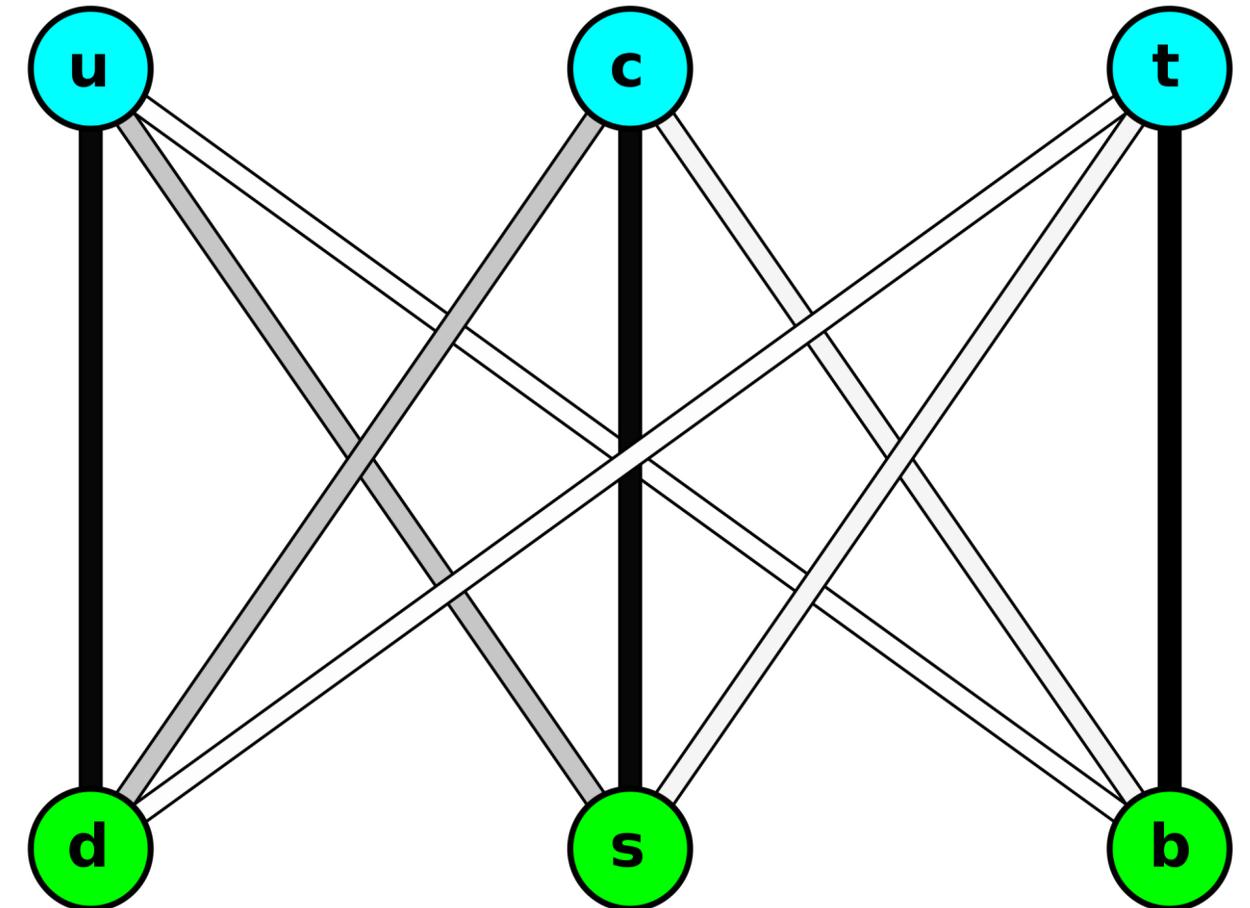
- **Stärke der Übergänge zwischen Familien**

- Übergänge bevorzugt in der gleichen Generation, aber auch Übergänge in die benachbarte, bzw. 1. & 3.

ausgeprägt



gering



- aktuelle Werte: $s_{13} \ll s_{23} \ll s_{12}$

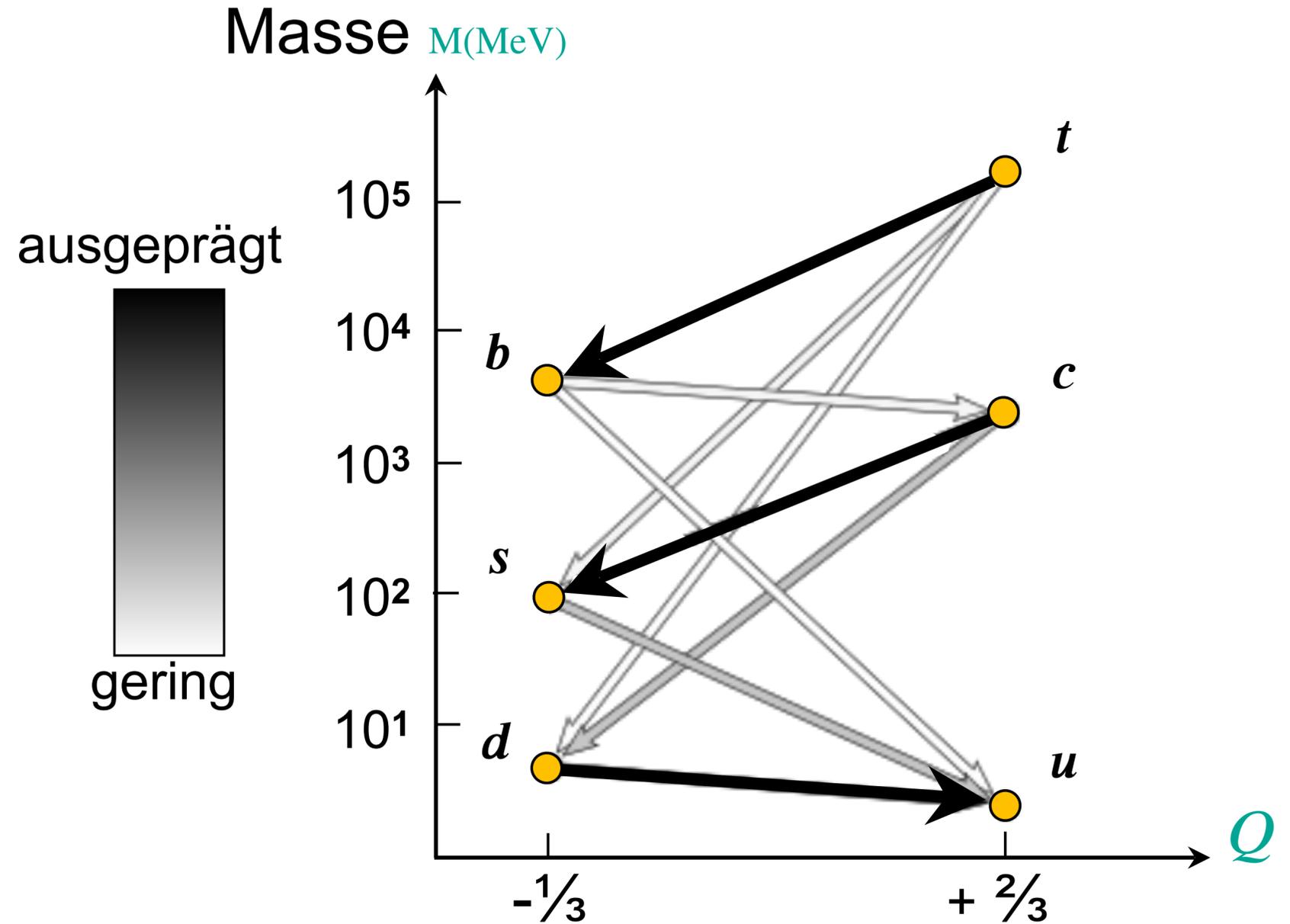
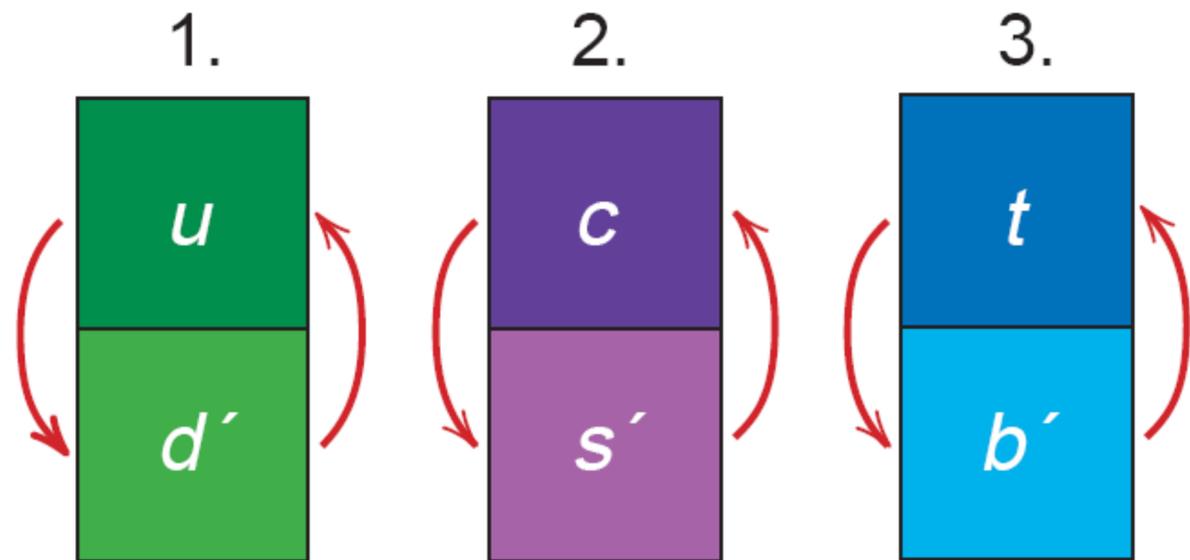
$$\theta_{12} = (13,04 \pm 0,05)^\circ$$

$$\theta_{23} = (2,38 \pm 0,06)^\circ$$

$$\theta_{13} = (0,201 \pm 0,011)^\circ$$

- **Mischung der 3 Quark-Generationen: Stärke der Übergänge**

- Übergänge bevorzugt in der gleichen Generation, aber auch Übergänge in die benachbarte



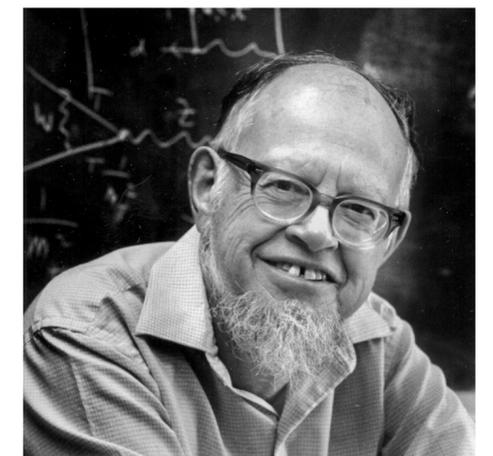
- starke Hierarchie in der Quark-Mischung: Entwicklung (Approximation)

- CKM wird (‘störungstheoretisch’) entwickelt in Ordnungen von $\lambda = \sin\theta_C = 0,22$

$$\begin{array}{l}
 \text{Elemente: } \sim \lambda \\
 \text{Elemente: } \sim \lambda^3
 \end{array}
 \left[\begin{array}{cc}
 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda \\
 -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda^2
 \end{array} \right]
 \begin{array}{l}
 \text{Elemente: } \sim \lambda^2 \\
 \text{größte Elemente: } \sim 1
 \end{array}
 \left[\begin{array}{cc}
 A\lambda^3(\rho - i\eta) & \\
 -A\lambda^2 & 1
 \end{array} \right]$$

- ebenfalls 4 Parameter für CKM-Matrix erforderlich*

- viele Experimente in Flavour-Physik (s. VL im Master) um die 4 Wolfenstein-Parameter (über-) zu bestimmen



Sheldon Glashow

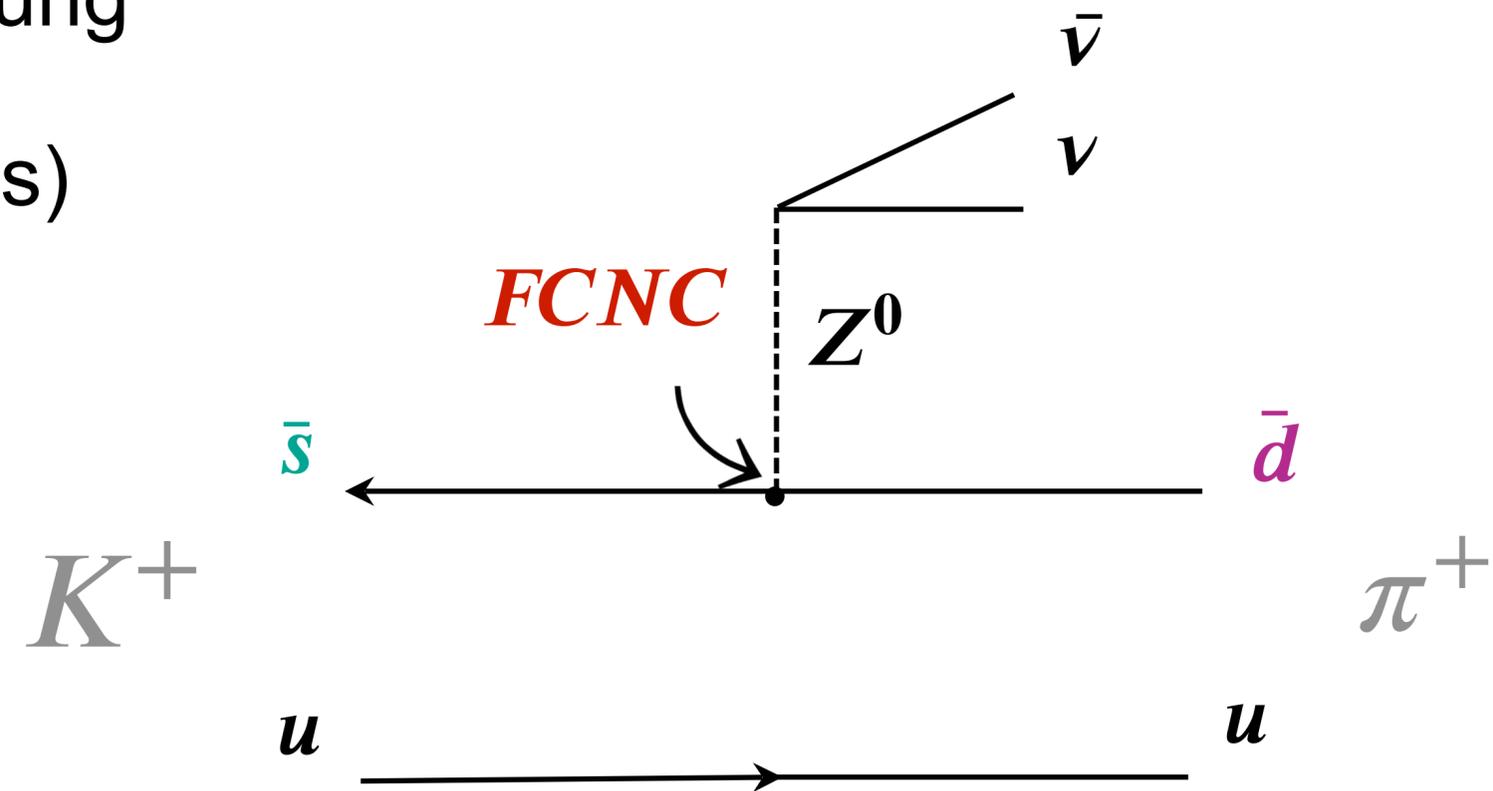
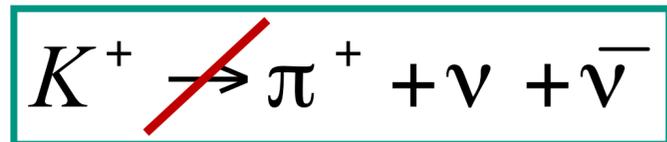
Resultat CKM: der GIM-Mechanismus & *FCNC*

- **Glashow, Iliopoulos & Maiani (GIM)** postulieren 1970 ein neues Quark

- Beobachtung: Prozesse schwacher neutraler Ströme (*NC*) führen **NICHT** zu einer Strangeness- (Flavour-) Änderung

- *FCNC* (**F**lavour **C**hanging **N**eutral **C**urrents) via Z^0 - Austausch **nicht erlaubt**

- Beispiel eines (verbotenen!) *FCNC*: Zerfall des K^+



- **Glashow, Iliopoulos & Maiani (GIM) betrachten Box-Diagramme**

- Prozesse schwacher neutraler Ströme ($_{NC}$) können auch durch sog. **Box-Diagramme** übertragen werden: Austausch von W^+W^- Paar

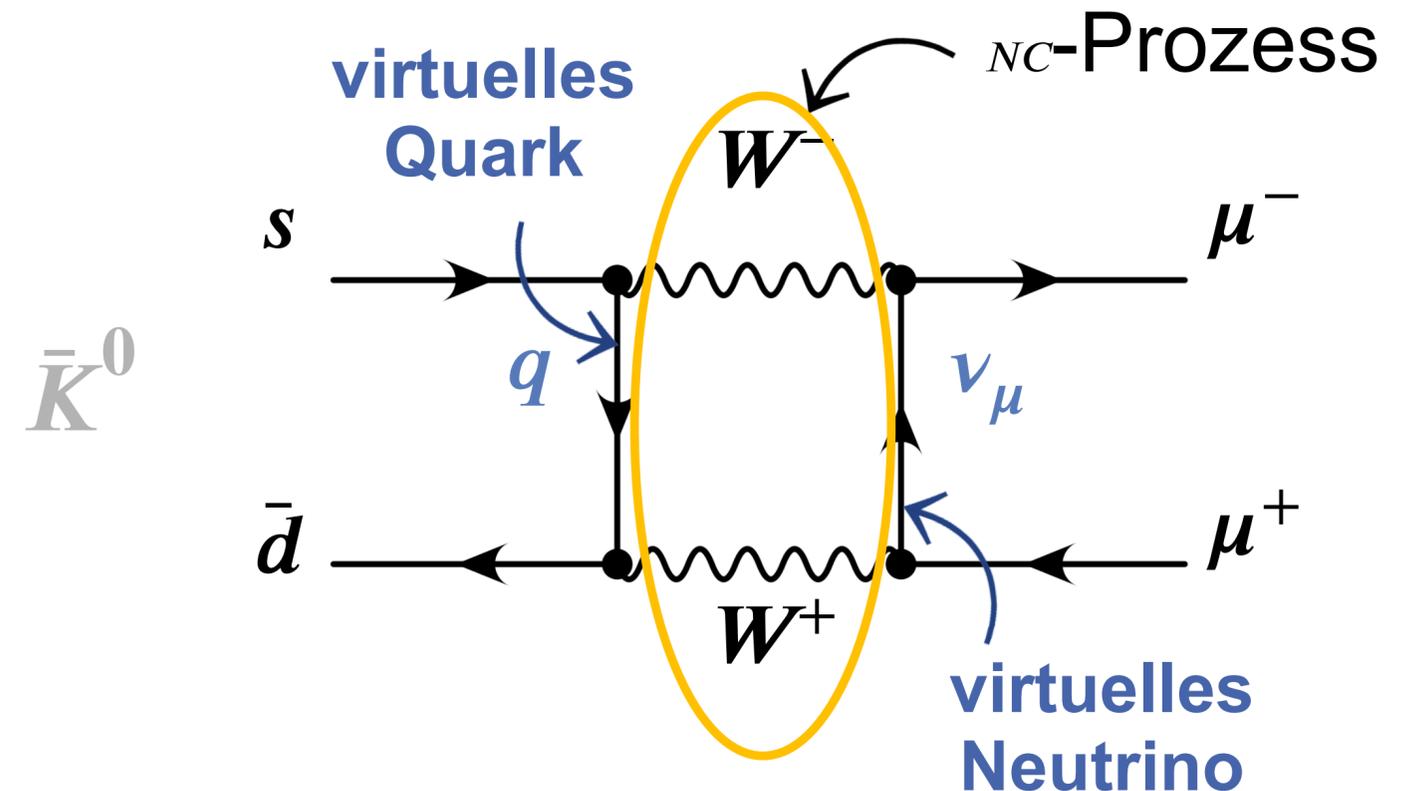
- $_{FCNC}$ bei diesen Prozessen **stark unterdrückt!**

- Beispiel eines (unterdrückten!) $_{FCNC}$:
Oszillation des $\bar{K}^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

- Zerfallskanal ist extrem selten:

$$\Gamma = 6,84 \cdot 10^{-9}$$

(für K_L)



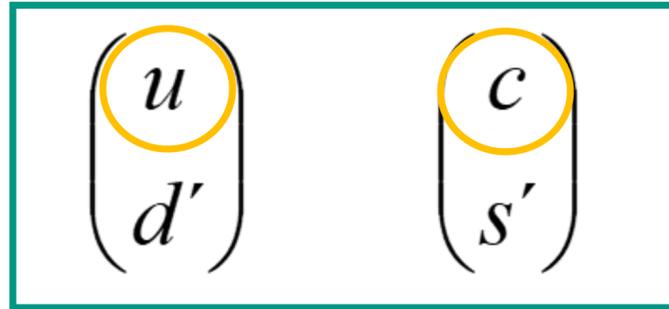
- **Glashow, Iliopoulos & Maiani (GIM)** postulieren 1970 ein 4. Quark: **Charm c**
 - Prozesse schwacher neutraler Ströme (NC) können auch durch sog. **Box-Diagramme** übertragen werden: Austausch von w^+w^- Paar
 - $FCNC$ bei diesen Prozessen ***stark unterdrückt!***
 - erfordert Einführung eines **4. Flavourzustands** von Quarks: **Charm c**
Postulierung VOR der Beobachtung* des J/Ψ , d.h. von Charmonium $c\bar{c}$
 - erfordert **Mischung** des **4. Flavourzustands** von Quarks: **Charm c**
Eingruppierung in **Isospin-Doublets**

GIM



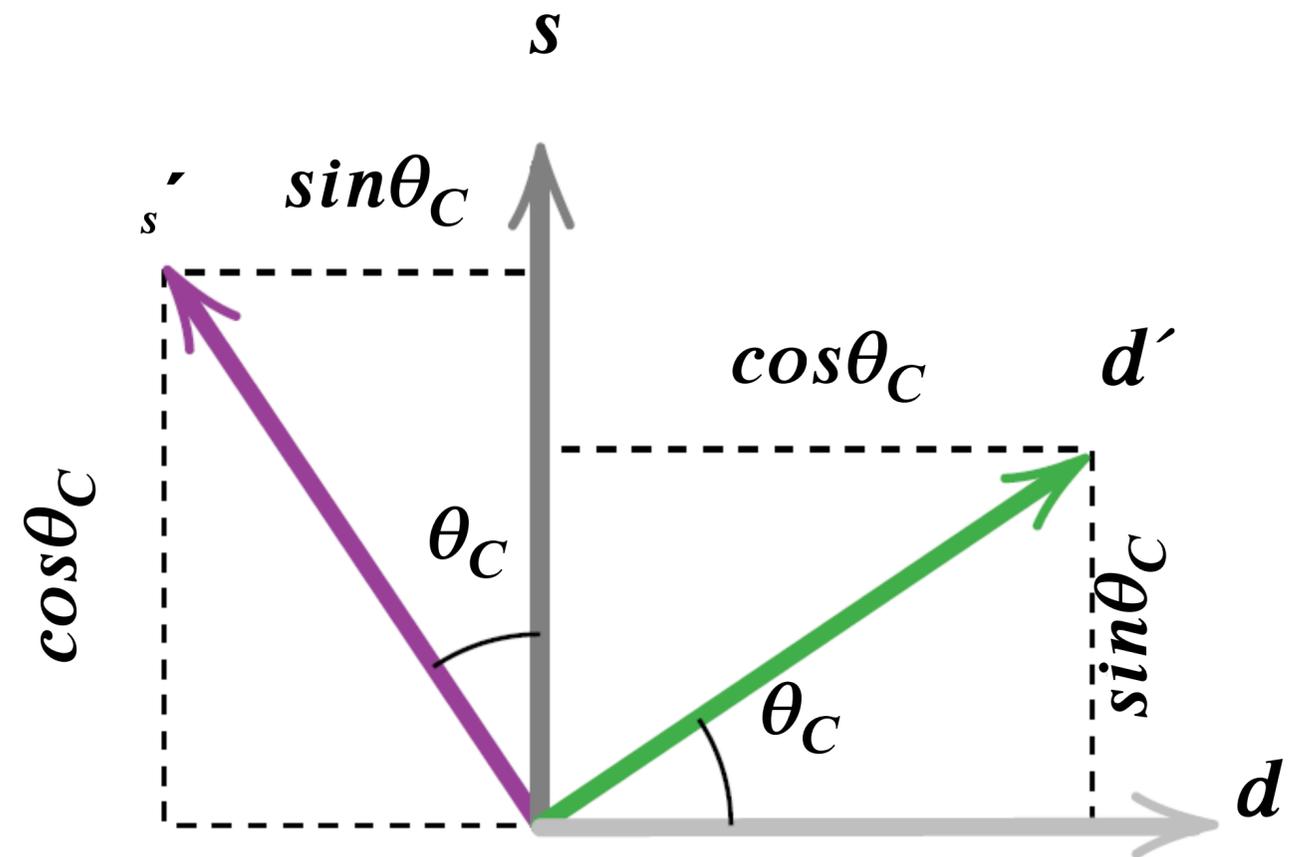
2. Dublett: Übergangsamplituden von u, c

- **Cabbibo Mischung von u, c Quarks**
 - bei W^\pm – Emission zu berücksichtigen:
Cabbibo-Mischung von **2 Quark-Dubletts**



- Zustände u und c koppeln an die Cabbibo-gedrehten Zustände d' und s'

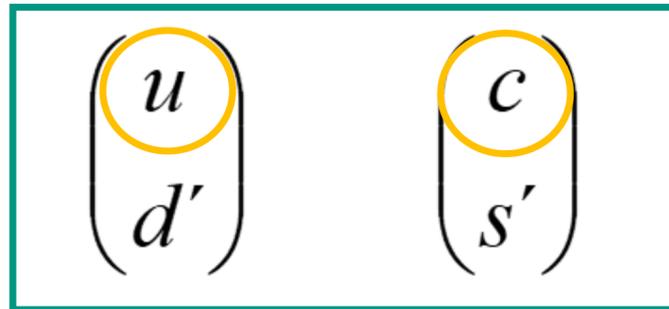
$$\begin{aligned} |d'\rangle &= \cos\theta_C \cdot |d\rangle + \sin\theta_C \cdot |s\rangle \\ |s'\rangle &= \cos\theta_C \cdot |s\rangle - \sin\theta_C \cdot |d\rangle \end{aligned}$$



2. Dublett: Übergangsamplituden von u, c

- Cabibbo Mischung von u, c Quarks

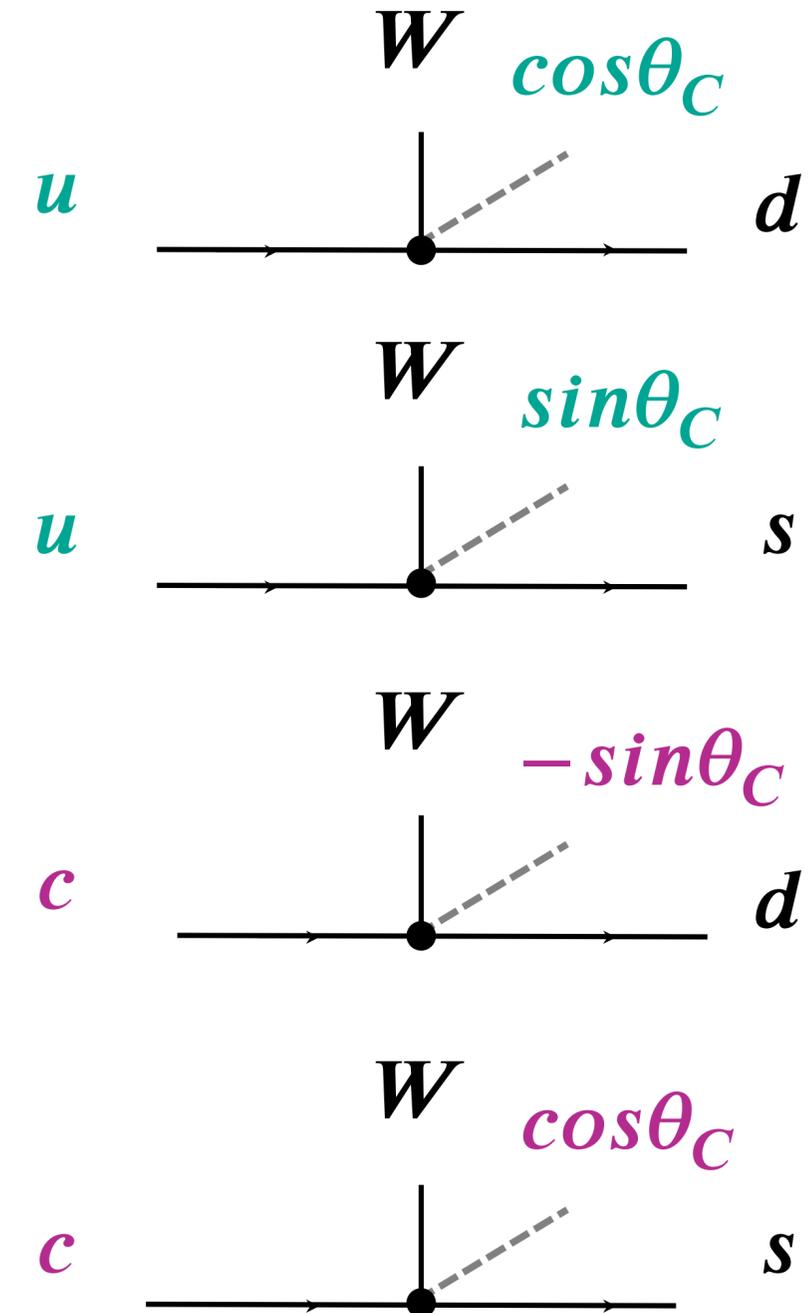
- bei W^\pm - Emission zu berücksichtigen:
Cabibbo-Mischung von 2 Quark-Dubletts



- Zustände u und c koppeln an die Cabibbo-gedrehten Zustände d' und s'

$$ud' = u (d \cdot \cos\theta_C + s \cdot \sin\theta_C)$$

$$cs' = c (-d \cdot \sin\theta_C + s \cdot \cos\theta_C)$$



der seltene Zerfallsmodus $\bar{K}^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

- ein Boxdiagramm weist den Weg

- Boxdiagramme für Zerfall:

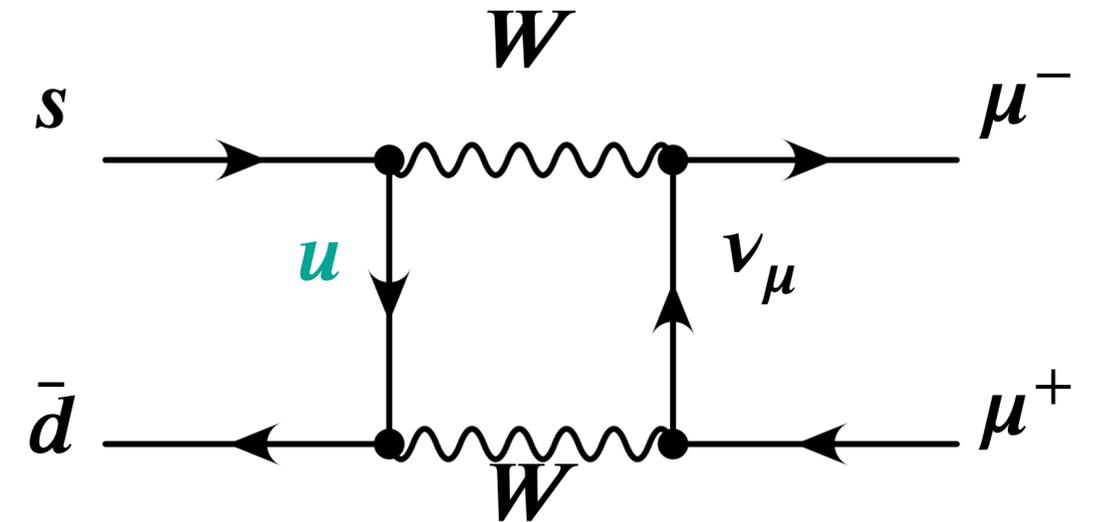
die Feynman-Diagramme für den Austausch eines virtuellen u

bzw. c zeigen ein entgegengesetztes Vorzeichen! (\Rightarrow destruktive Interferenz)

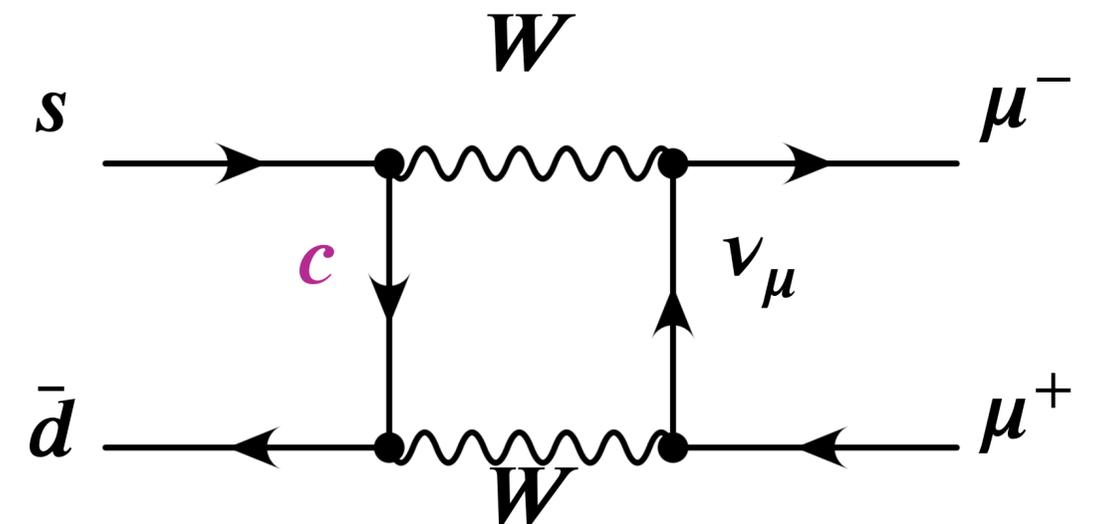
$$\sin\theta_C \cdot \cos\theta_C + \cos\theta_C \cdot (-\sin\theta_C)$$

\Rightarrow gegenseitige Aufhebung der Amplituden

\bar{K}^0



\bar{K}^0



der seltene Zerfallsmodus $\bar{K}^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

- ein Boxdiagramm weist den Weg
 - bei ungebrochener Flavour-Symmetrie von u, c löschen sich die Amplituden **vollständig** aus
 - durch die unterschiedlichen Massen von u, c (gebrochene Symmetrie) sind die Amplituden unterschiedlich:
 - ⇒ für $m(c) \sim GeV$ gute Übereinstimmung
 - ähnliche Box-Diagramme ($\Delta S = 2$) auch für $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ Oszillationen* mit virtuellen u, c, t

