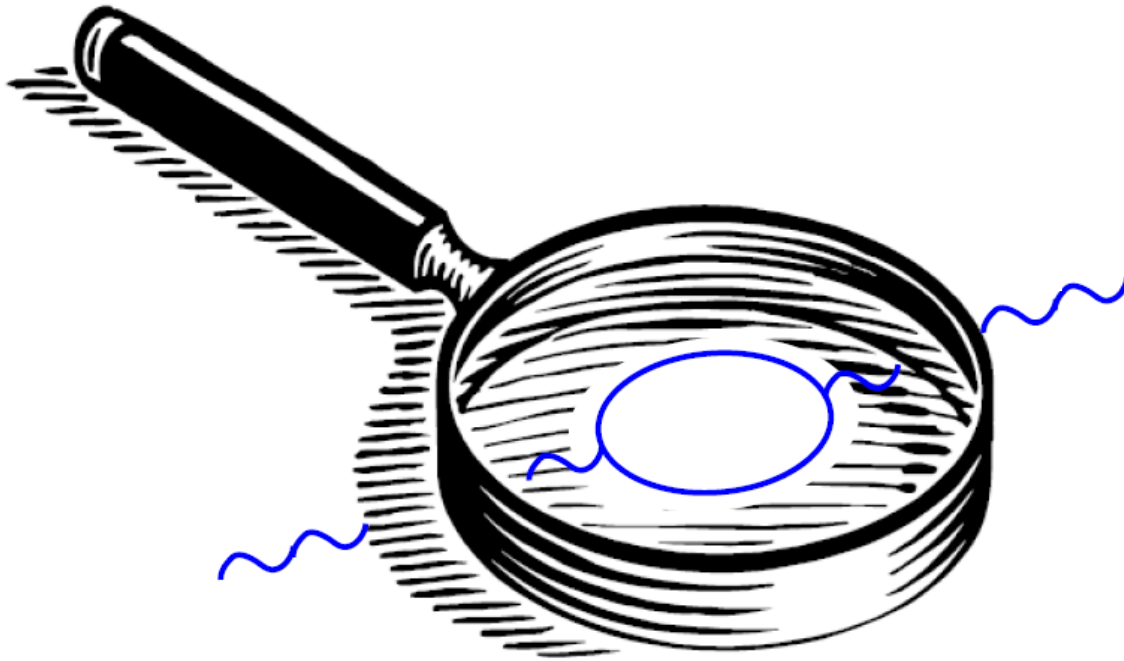
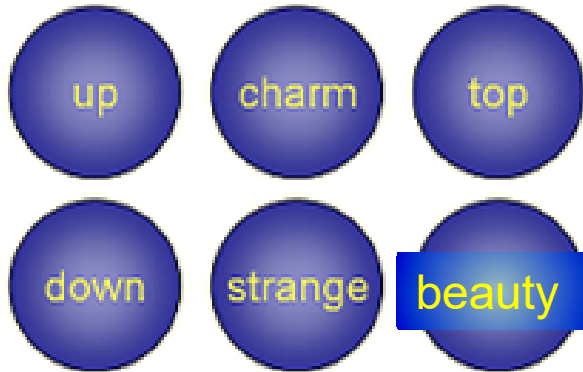


# Mit Quantenkorrekturen neuen Phänomenen auf der Spur

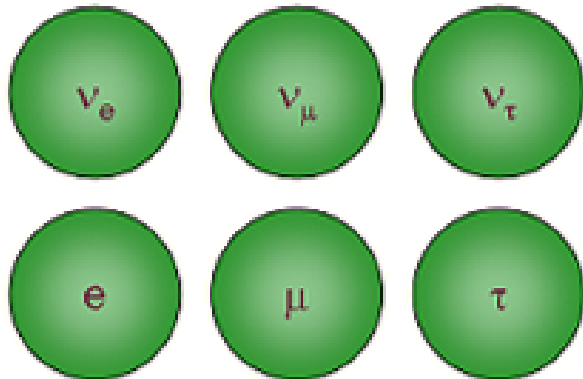


# Standardmodell der Teilchenphysik

Quarks:



Leptons:



Force carriers

Anordnung der Quarks und Leptonen in Paaren ist wichtig für schwache WW



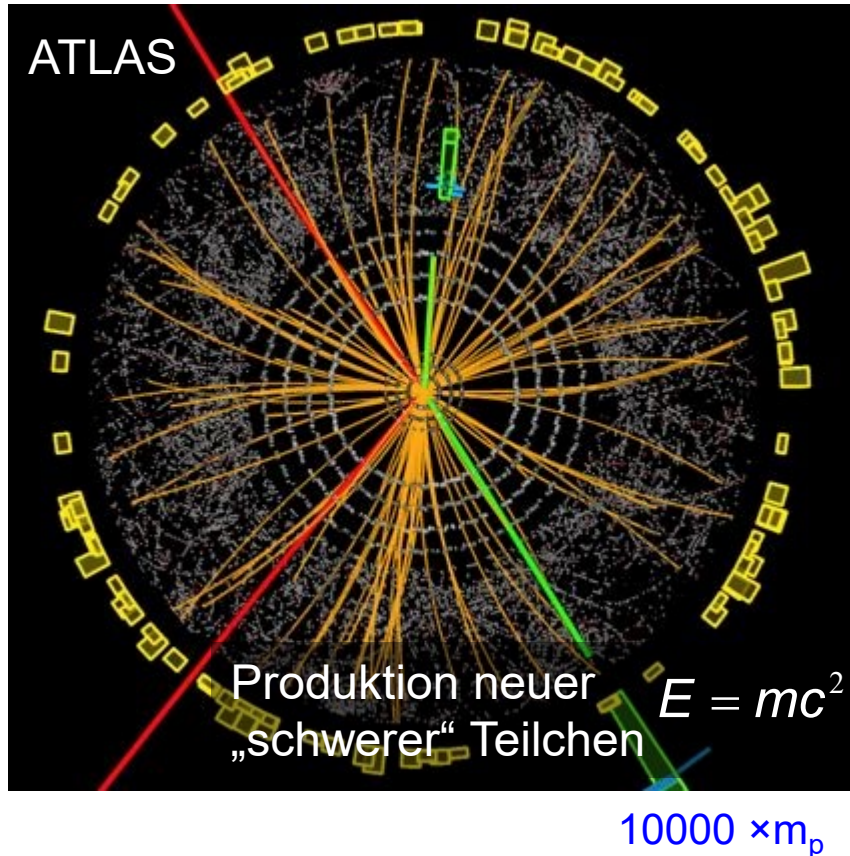
The Higgs boson

Trotz grandioser Erfolge kann Theorie einige Beobachtungen nicht beschreiben: Dark Matter, Baryonasymmetrie

→ Neue Phänomene (NP) bei höheren Energieskalen?!

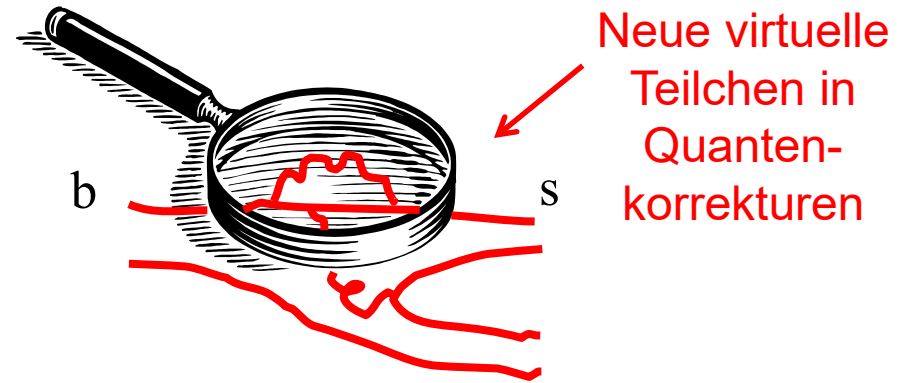
# Suche nach Neuen Phänomenen

## Bei höchsten Energien



Direkte Suchen am LHC bis 10 TeV

## Mit Präzisionsexperimenten



*Myon ( $g-2$ )*

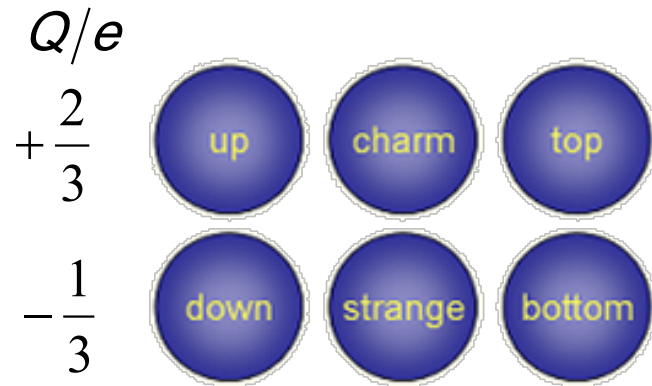
*Elektrisches Dipolmoment*

*Lepton-Flavor Verletzung*

*Seltene K-, c- and b-hadron Zerfälle*

Indirekte Suchen bis O(100 TeV++)

# Quark-Sektor

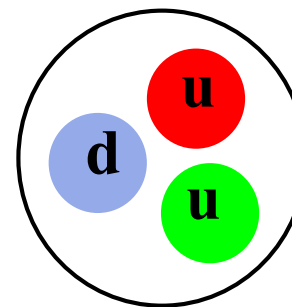


Massen			
u	d	s	
2.3	4.8	95	MeV/c <sup>2</sup>
c	b	t	
1270	4200	173500	MeV/c <sup>2</sup>

Quarks tragen Farbladung **r g b**:  
Ladungen der starken Wechselwirkung

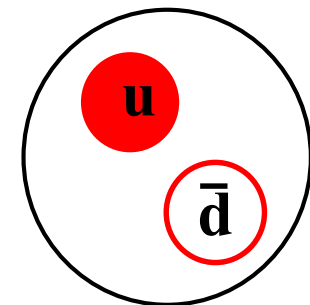
Quarks existieren nicht frei, sondern nur in farbneutralen gebunden Zuständen =  
Hadronen: Baryonen  $qqq$  and Mesonen  $q\bar{q}$ .

Baryon



p

Meson



$\pi^+$

# Hadronen mit “schweren Quarks”

## Mesonen $|\bar{q}q\rangle$

$$\mathbf{s} \quad K^+ = |u\bar{s}\rangle \quad K^0 = |d\bar{s}\rangle$$

$$\mathbf{c} \quad D^+ = |c\bar{d}\rangle \quad D^0 = |c\bar{u}\rangle$$

$$\mathbf{b} \quad B^+ = |u\bar{b}\rangle \quad B^0 = |d\bar{b}\rangle$$

$$B_c^+ = |c\bar{b}\rangle \quad B_s = |s\bar{b}\rangle$$

## Anti-Mesonen

$$\bar{K}^0 = |\bar{d}s\rangle \quad K^- = |\bar{u}s\rangle$$

$$\bar{D}^0 = |\bar{c}u\rangle \quad D^- = |\bar{c}d\rangle$$

$$\bar{B}^0 = |\bar{d}b\rangle \quad B^- = |\bar{u}b\rangle$$

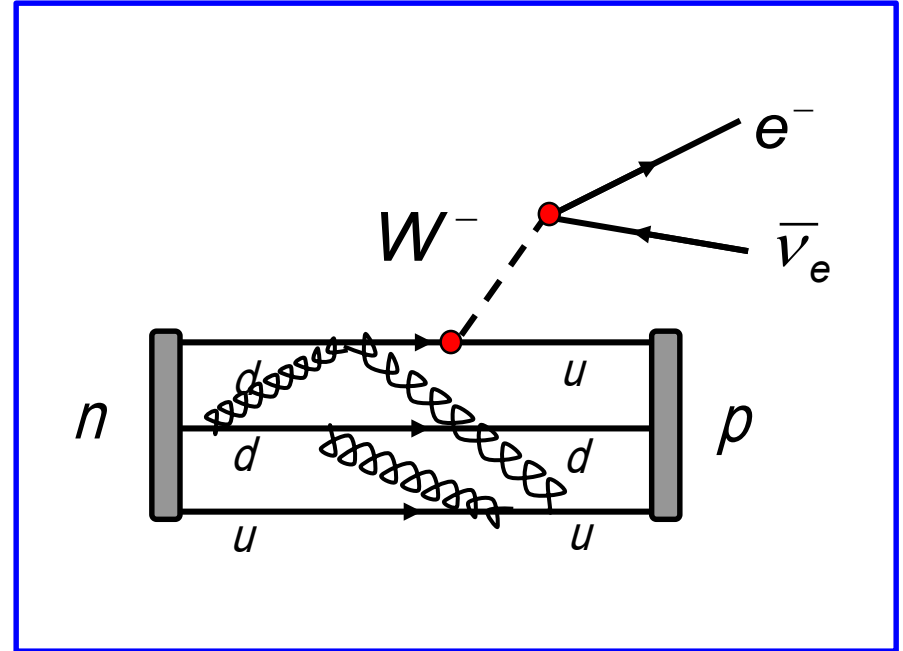
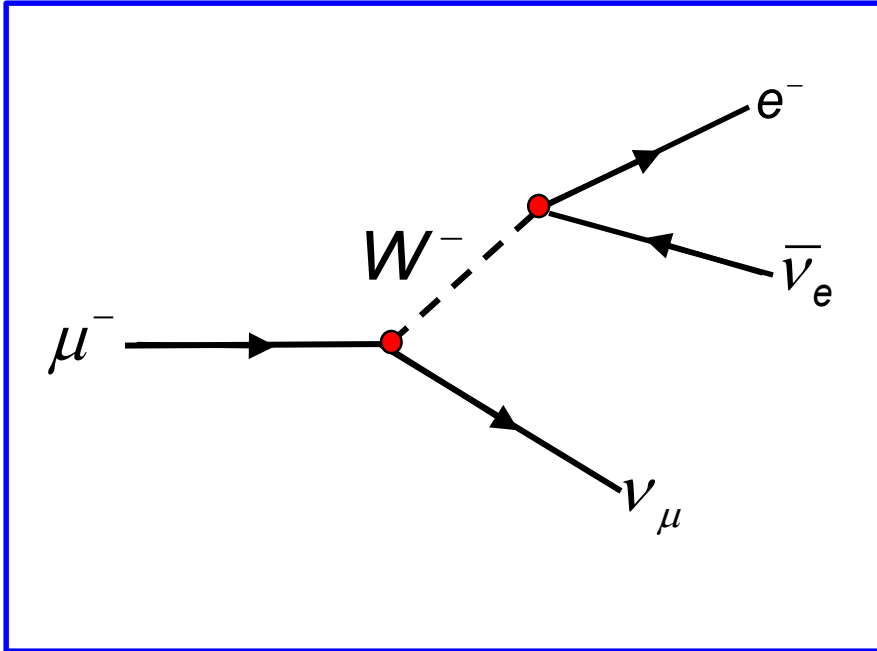
$$\bar{B}_s = |\bar{s}b\rangle \quad B_c^- = |\bar{c}b\rangle$$

## Baryonen $|qqq\rangle$

$$\Lambda = |uds\rangle \quad \Lambda_c^+ = |udc\rangle \quad \Lambda_b = |udb\rangle$$

	M [GeV/c <sup>2</sup> ]	$\tau$ [ps]
D	2	0.4
B	5...6	1.5

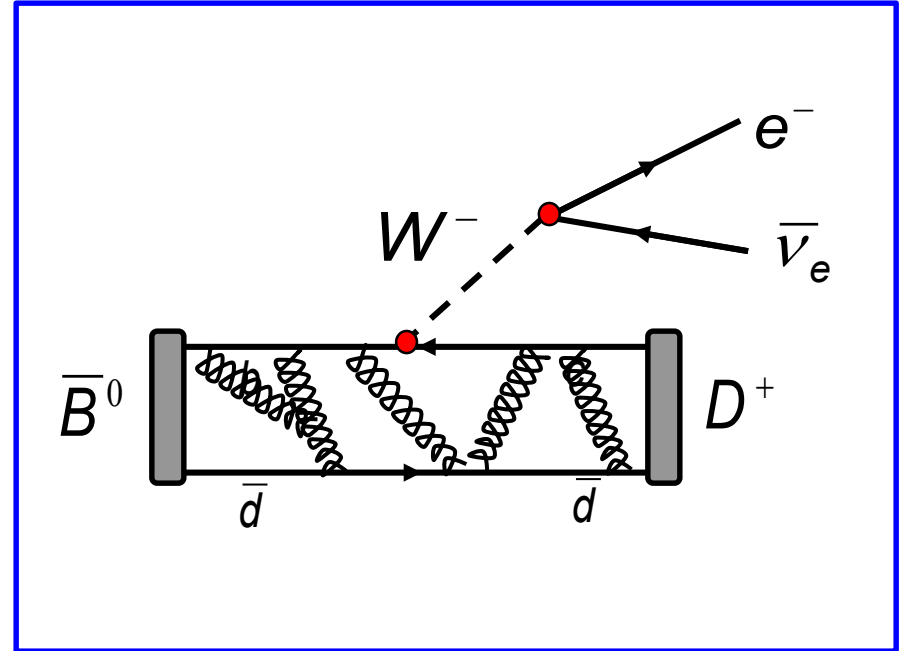
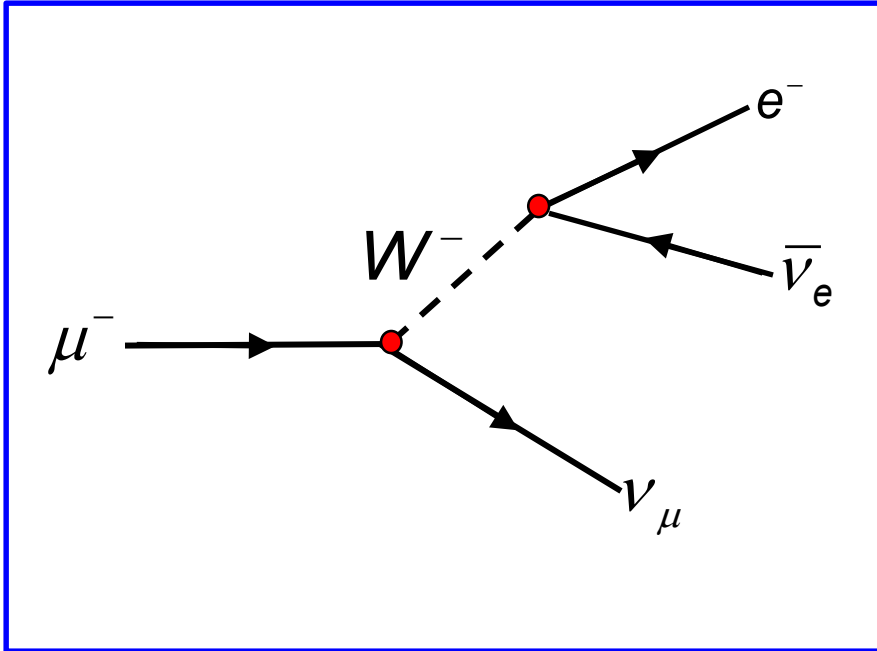
# $\beta$ -Zerfälle



$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \uparrow \\ \mu^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u \\ \uparrow \\ d \end{pmatrix}$$

# Schwache Zerfälle von b-Mesonen

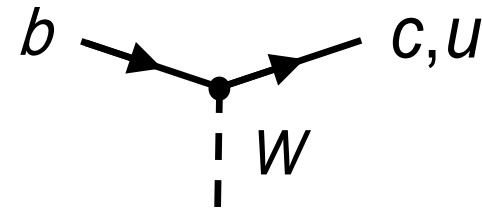
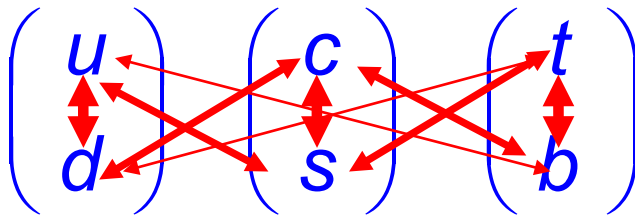


$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

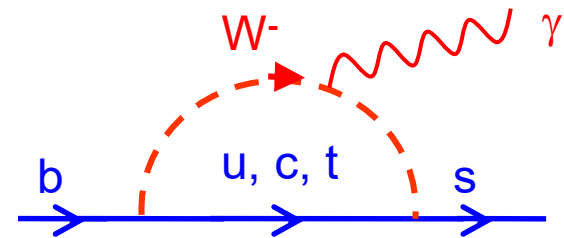
$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

# Quark Mischung

*N.Cabibbo (1963), M.Kobayashi & T.Maskawa (1973)*



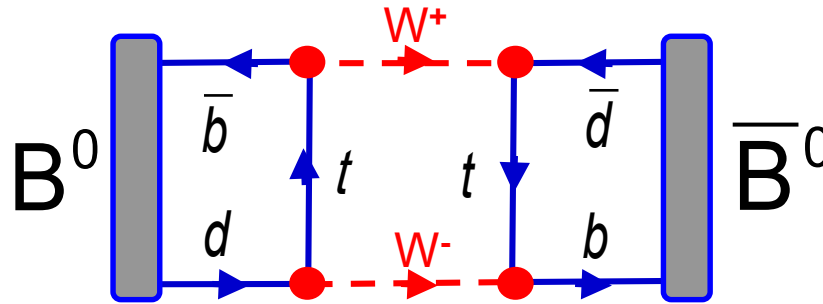
Quarkmischung erlaubt weitere interessante Übergänge mit "Loops":



Virtueller  
Teilchenaustausch:  
schwere Teilchen in Loops

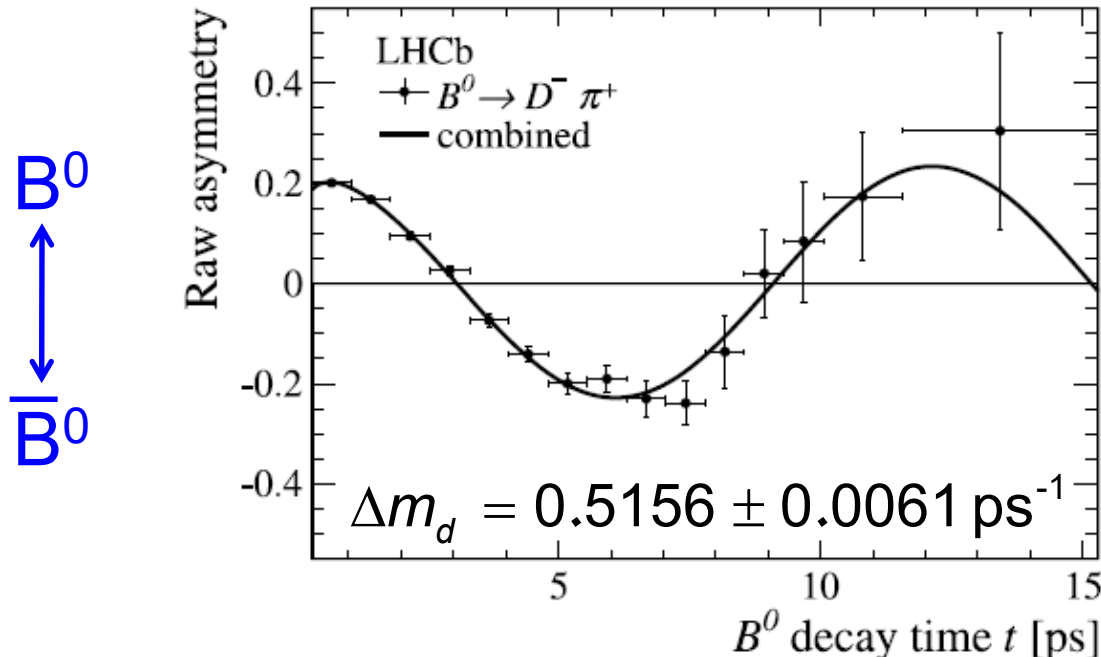


# Quanten-Loops at Work



*Erstmals beobachtet  
ARGUS (DESY), 1987*

*Phys. Lett. B 719 (2013) 318.*

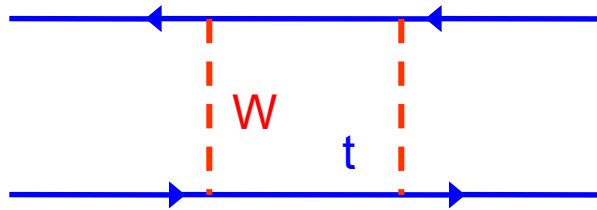


Interessant:

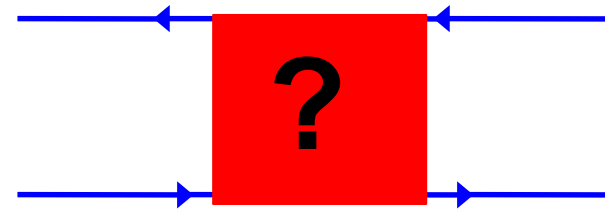
B-meson (5 GeV)  
sensitive auf Teilchen  
mit 100 – 200 GeV

# “Neue Phänomene” in Quanten-Loops

Standardmodell



Neue Phänomene



+

$$\mathcal{A}_{tot} = \mathcal{A}_{SM} + \mathcal{A}_{NP}$$

Strategie: Durch Messung ( $\rightarrow \mathcal{A}_{tot}$ ) und Vergleich mit Standardmodell ( $\mathcal{A}_{SM}$ ) kann man  $\mathcal{A}_{NP}$  testen

Man sucht nach Abweichungen vom Standardmodell:

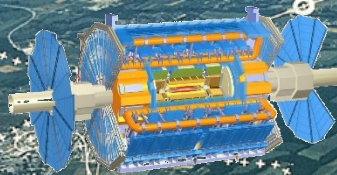
Loop-Prozesse und Messgrößen mit kleinem Theorie-Fehler

Hochraten-Experimente um hohe Präzision zu erreichen: **LHCb**

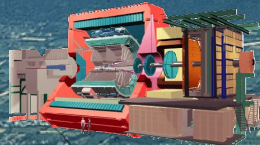


# Large Hadron Collider

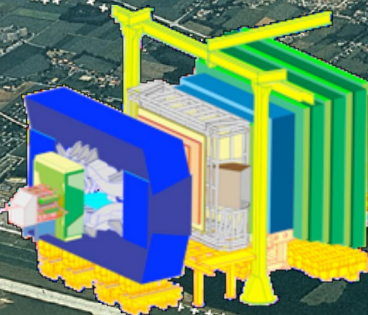
ATLAS



ALICE



CMS



RAC00 Physiker

TU Dortmund  
80 Institute

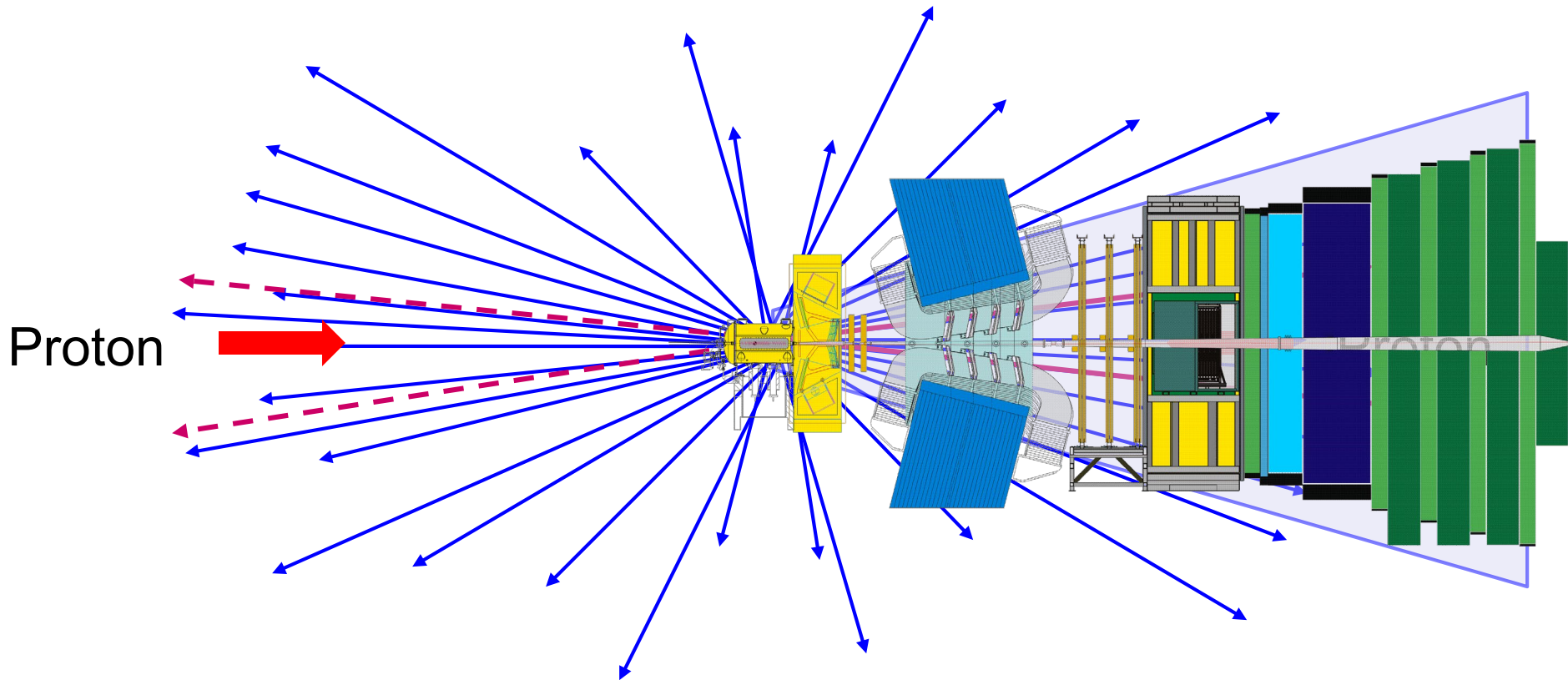
Uni Heidelberg

MPI Heidelberg

Uni Bonn



# B und D Mesonen am LHC

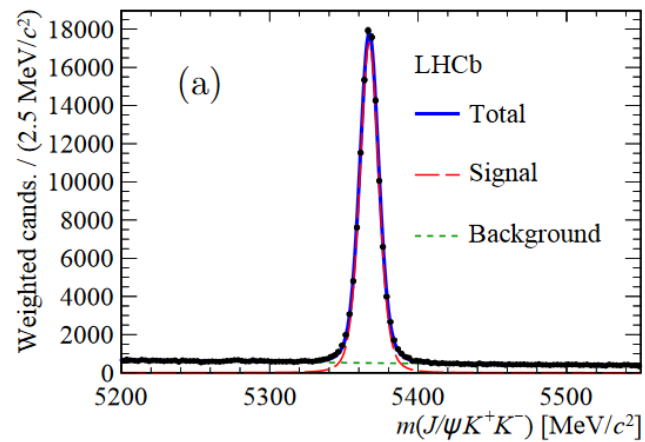
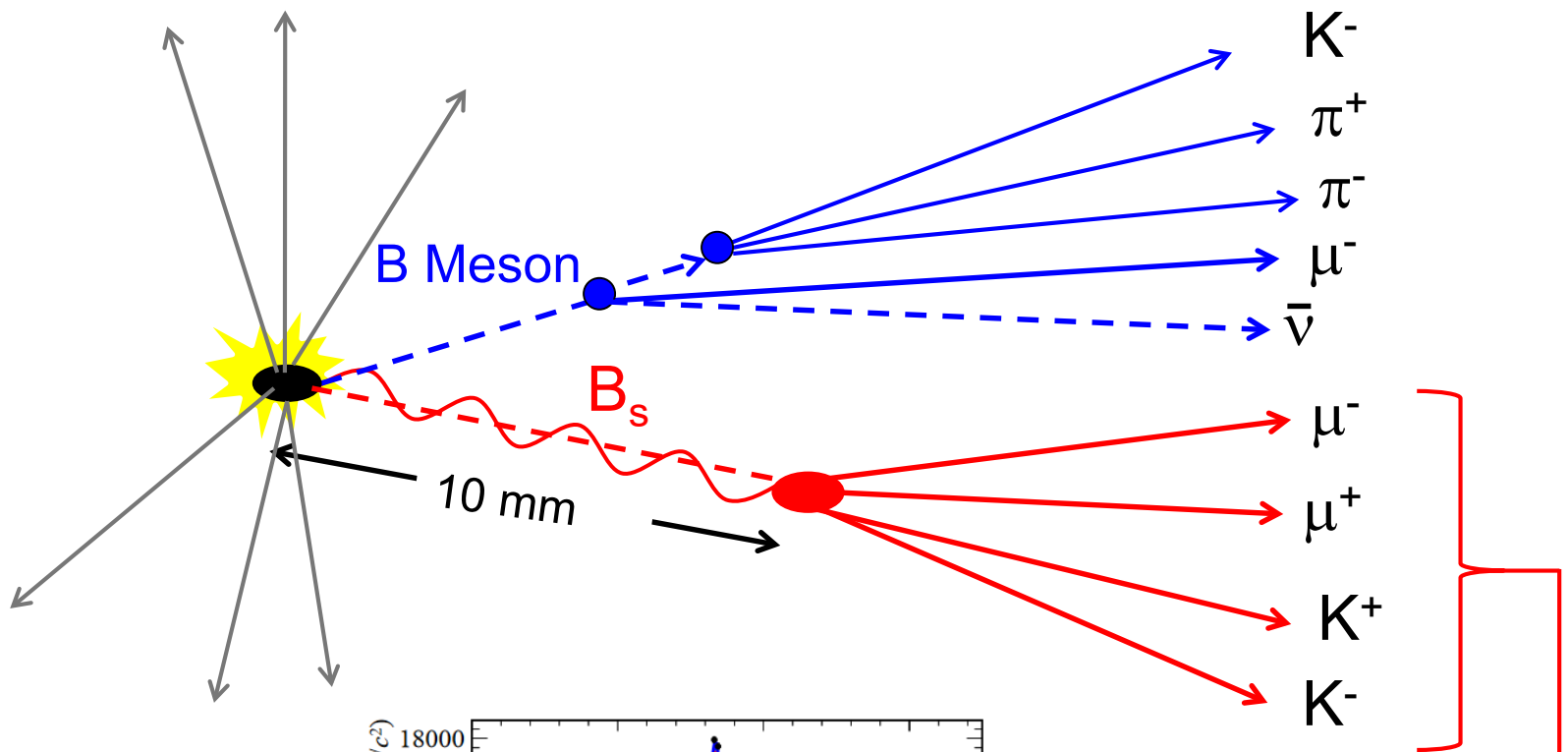


## B und D Mesonen Produktion am LHC:

1 000 000 000 000  $B\bar{B}$  / Jahr in LHCb

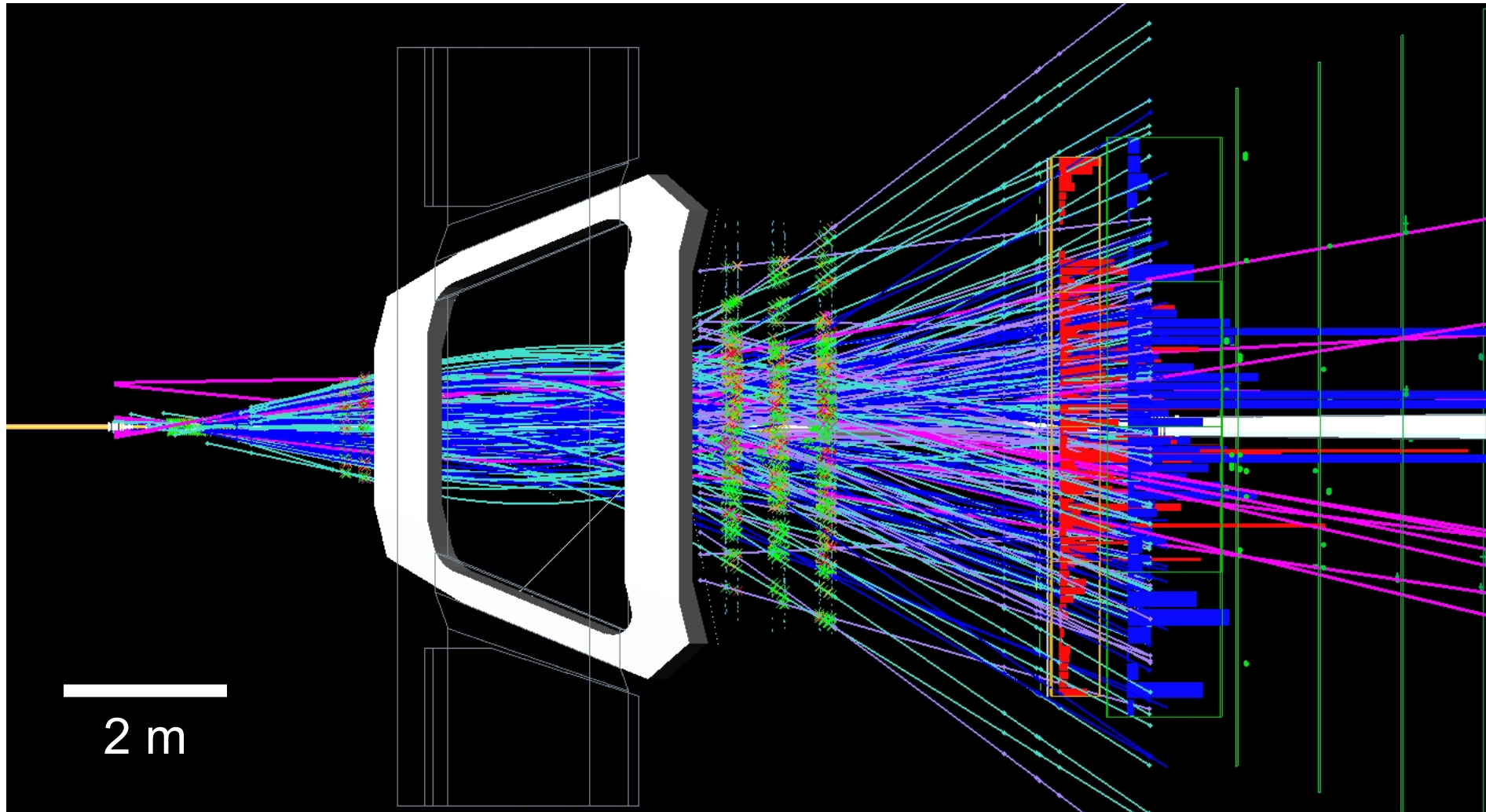
20 000 000 000 000  $D\bar{D}$  / Jahr in LHCb

# $B\bar{B}$ Ereignis in LHCb



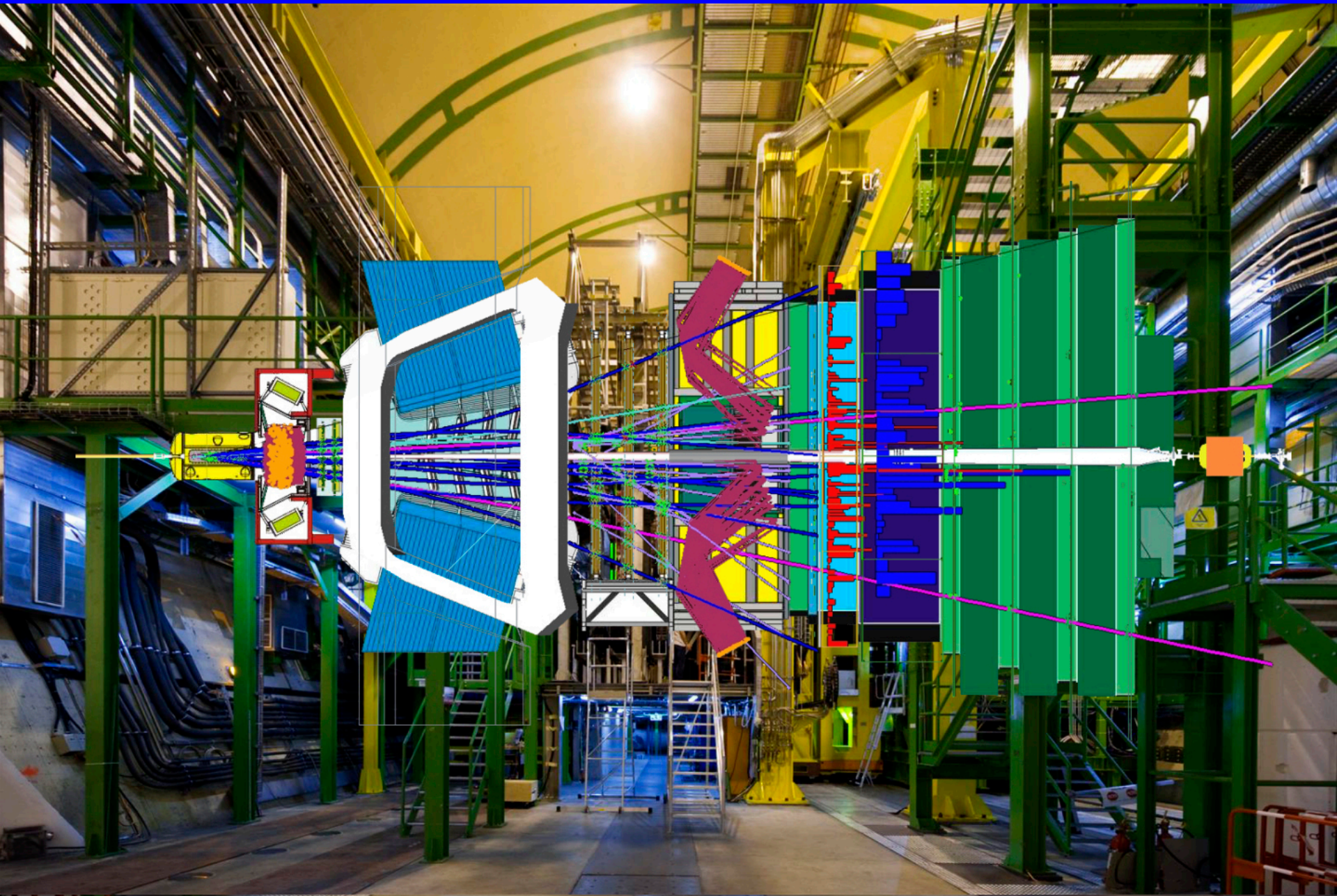
Addiere Impulse  
& Energie

# $B\bar{B}$ Ereignis in LHCb

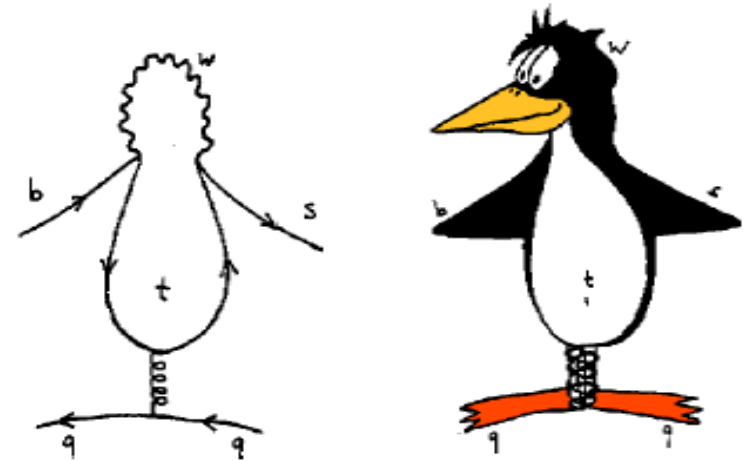
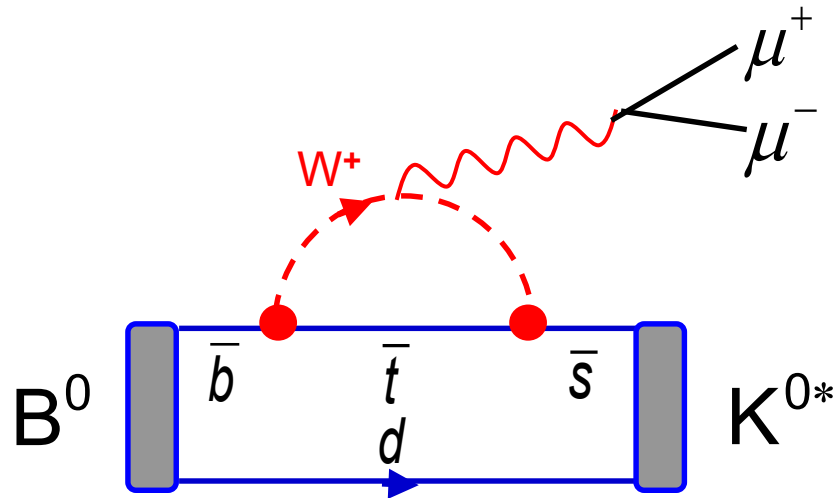


40 Millionen Mal pro Sekunde





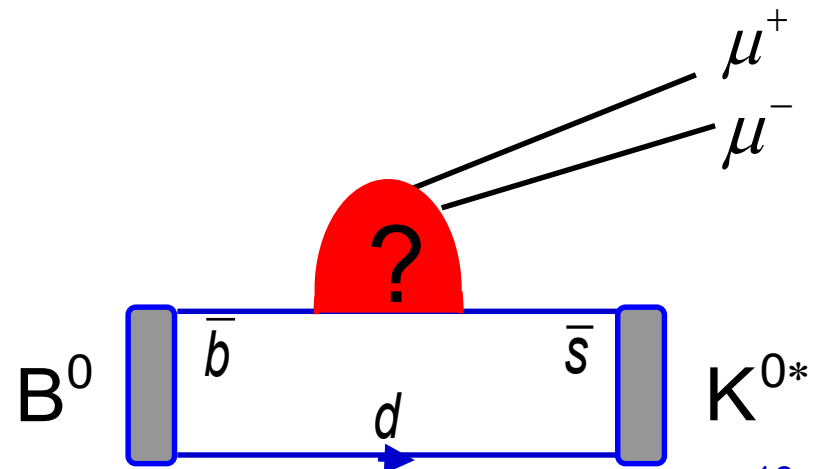
# Neue Phänomene in Pinguin-Zerfällen



by A. Lenz

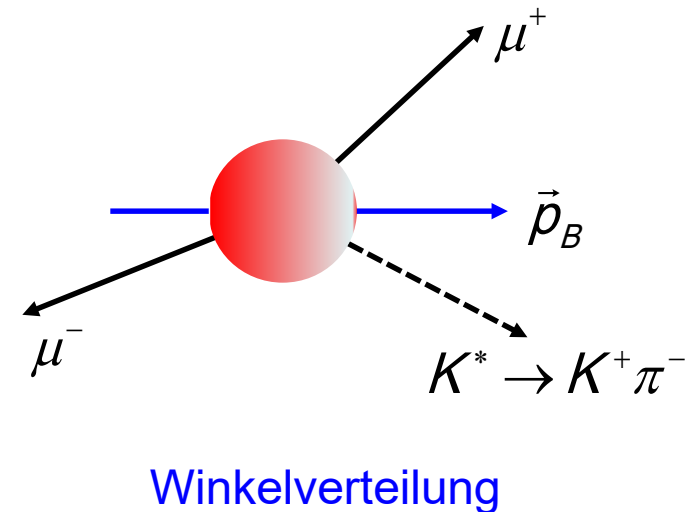
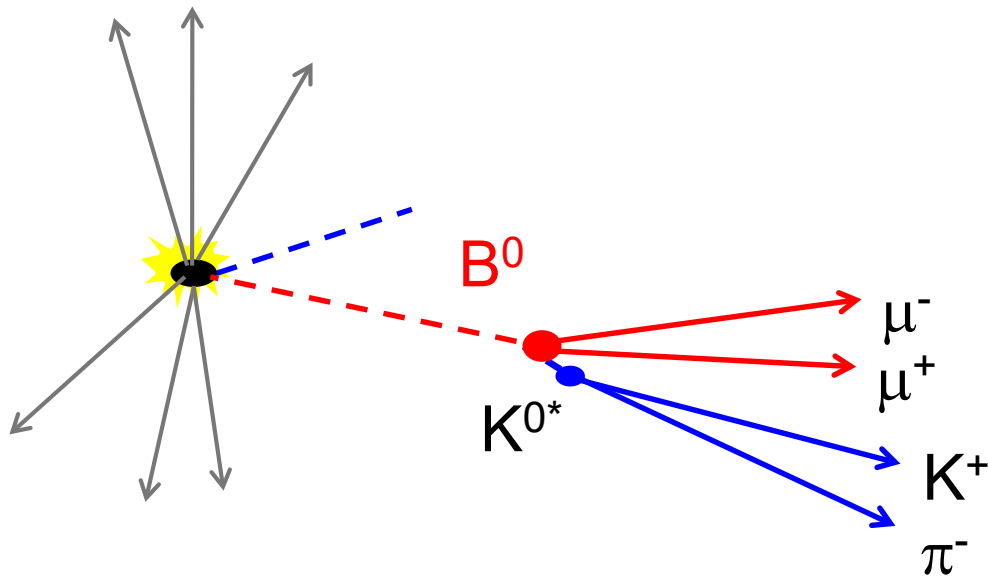
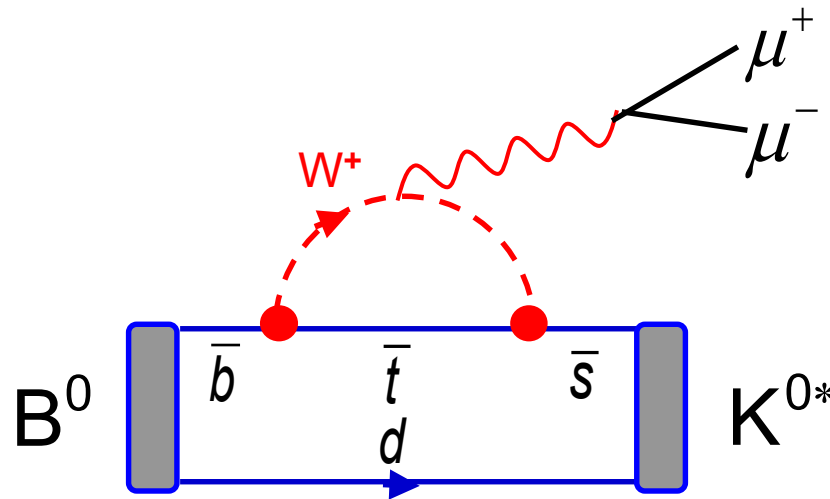
## Theorie:

Zerfallskanal besitzt hohe Sensitivität für neue Phänomene. Observablen: Raten, Winkelverteilungen...



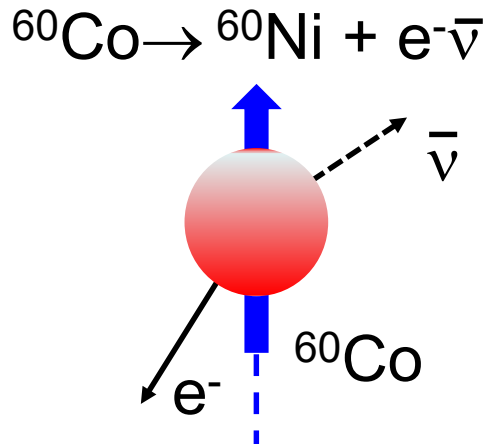


# Neue Phänomene in Pinguin-Zerfällen



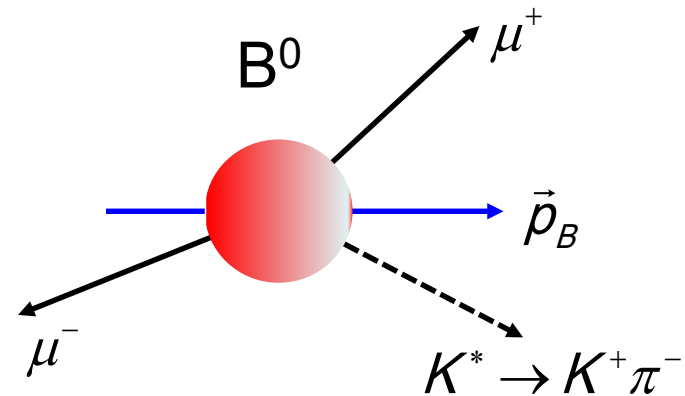
# Für Experten

## Winkelverteilung in $\beta$ -Zerfällen



“Wu-experiment” um Lorentz-Struktur von  $\beta$ -Zerfall zu studieren.

*Chien-Shiung Wu, 1956*

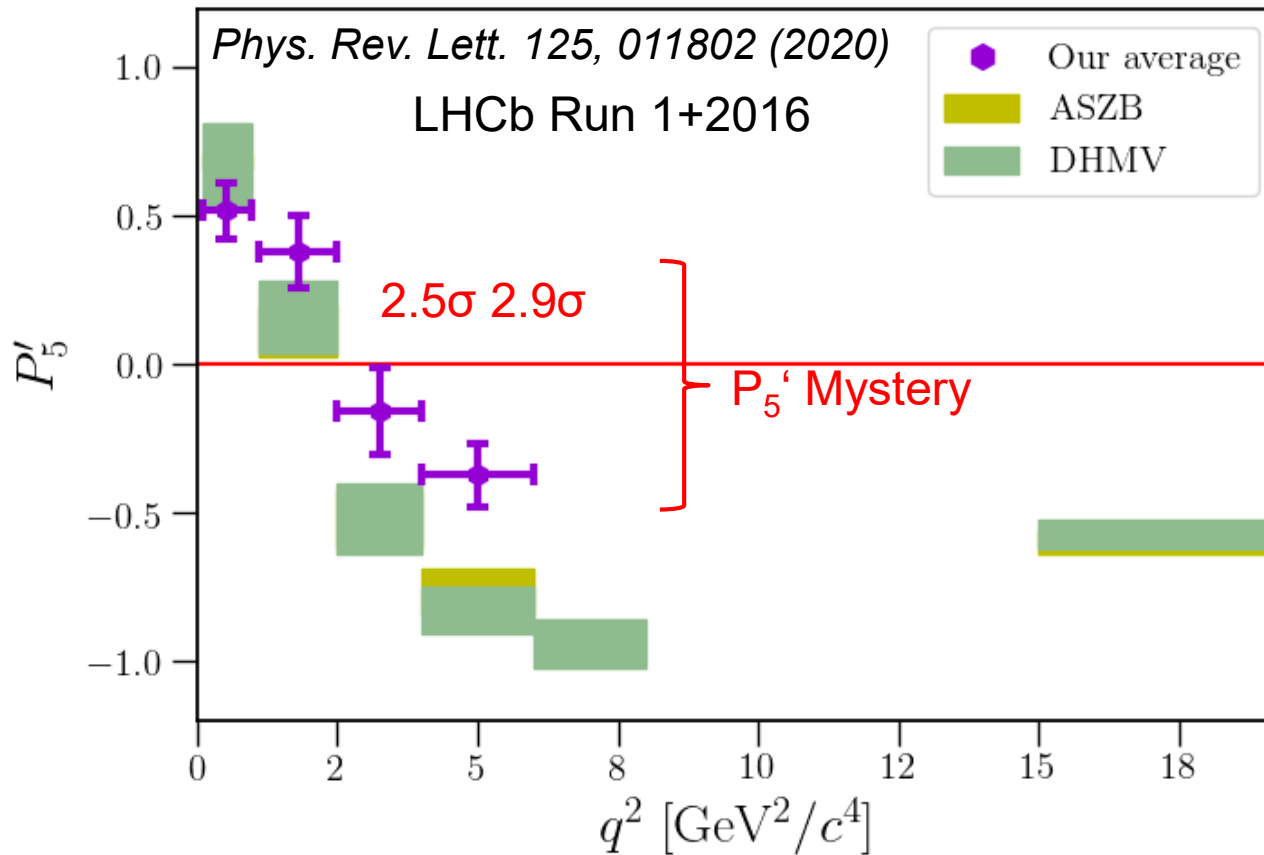


“Wu-experiment” mit B-Zerfällen: Lorentz-Struktur

# Winkelverteilung in $B^0 \rightarrow K^{0*} + \mu\mu$

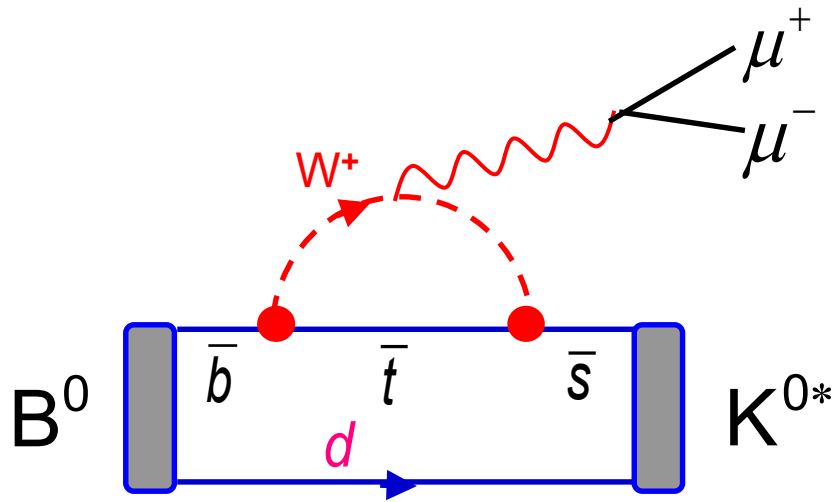
Beschreibe Winkelverteilung mathematisch und messe Koeffizienten der Beschreibung:

z.B.  $P_5'$



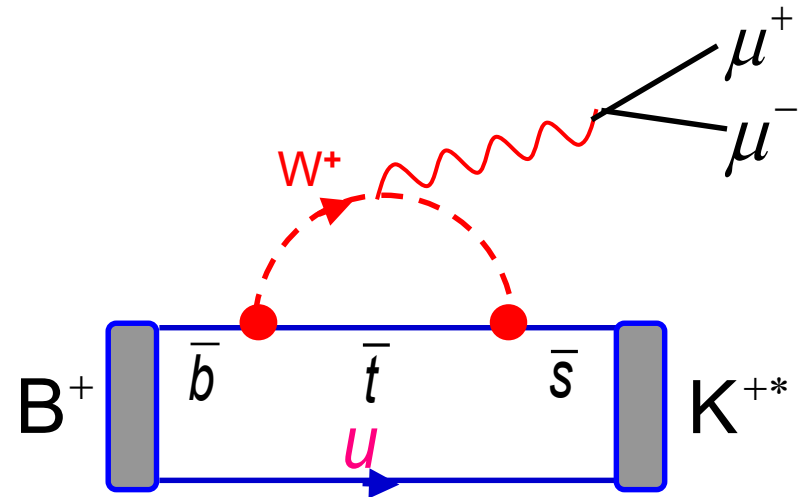
- Statistische Fluktuation oder wirklicher Effekt?
- Neue Physik oder Problem mit der Theorie?

# $P_5'$ in $B^+ \rightarrow K^{*+} + \mu\mu$



$$B^0 \rightarrow K^{0*} + \mu\mu$$

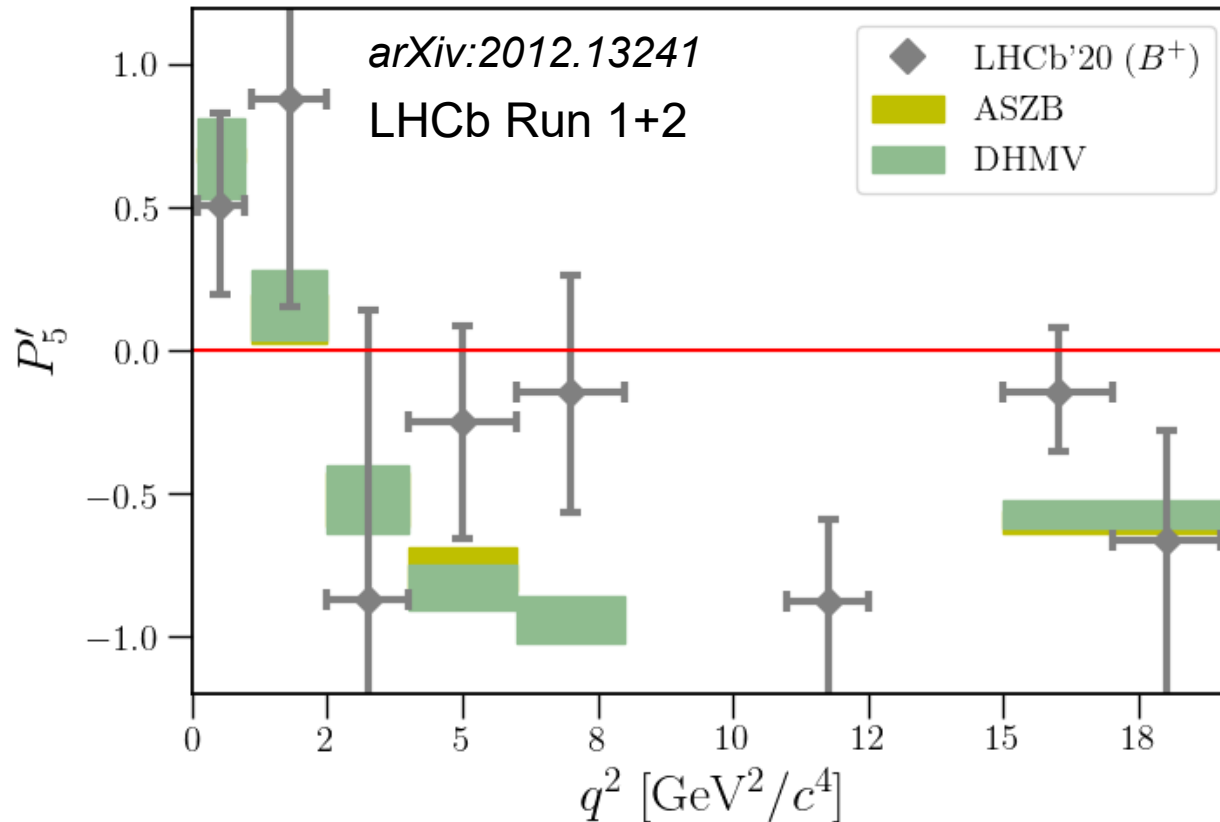
$$d \leftrightarrow u$$



$$B^+ \rightarrow K^{*+} + \mu\mu$$

Austausch des „Zuschauer-Quarks“ sollte an Physik nichts ändern!

# $P_5'$ in $B^+ \rightarrow K^{*+} \mu^+ \mu^-$

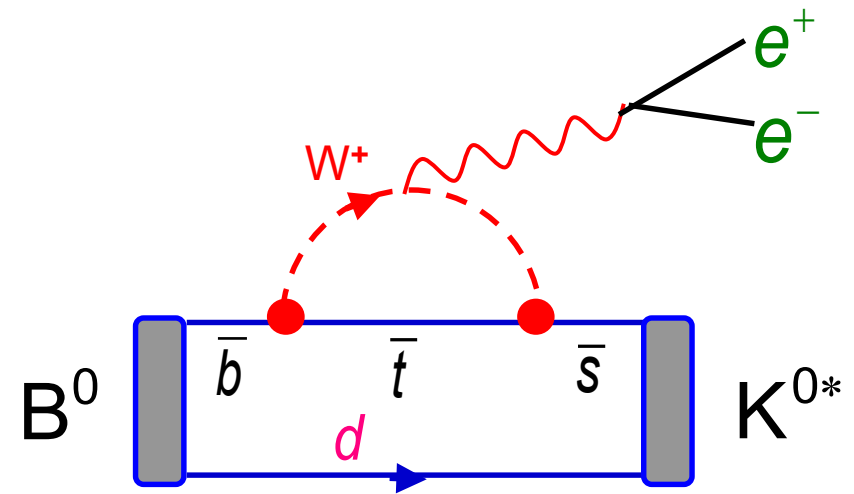
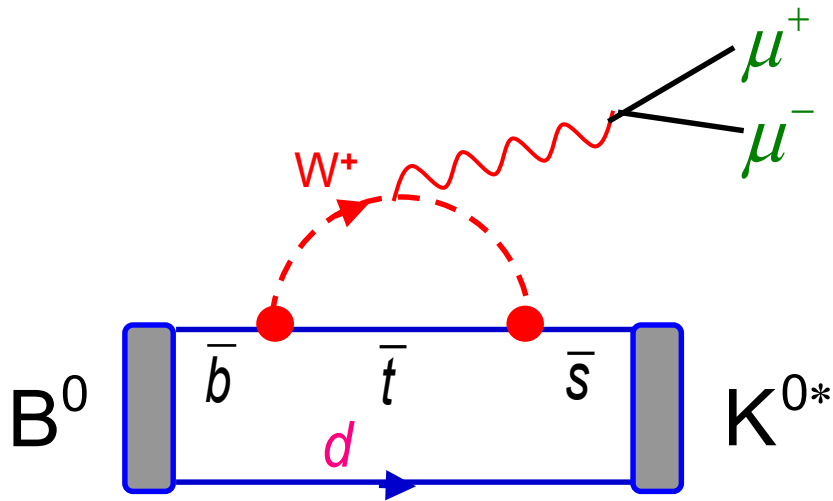


Statistische Unsicherheiten sehr groß, aber interessant!

Vielleicht doch ein wirklicher Effekt?

Theorie-Diskussionen über Unsicherheiten bei  $P_5'$  Vorhersage.

# Wie sieht es mit anderen Leptonen aus?



$$B^0 \rightarrow K^{0*} + \mu\mu$$

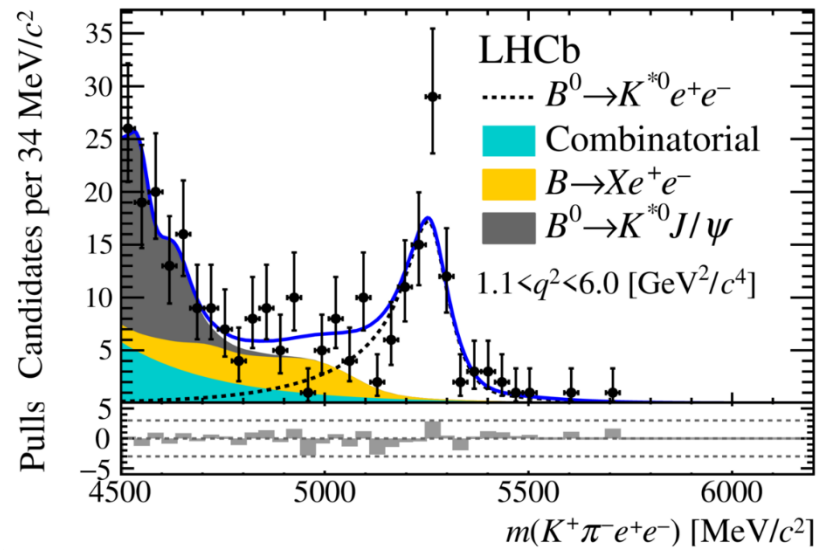
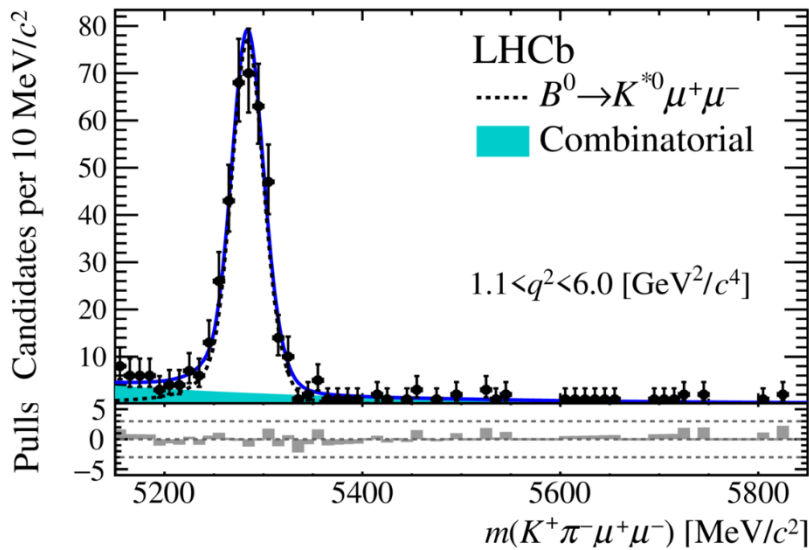
$$\mu^+ \mu^- \leftrightarrow e^+ e^-$$

$$B^0 \rightarrow K^{0*} + ee$$

Standardmodell: e und  $\mu$  verhalten sich gleich - Leptonuniversalität

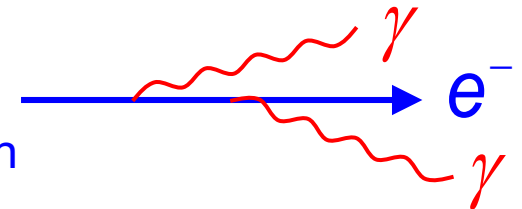
# $B^0 \rightarrow K^{*0} + e^+e^-$

## Problem:



Elektronennachweis in LHCb sehr schwierig:

Bremsstrahlung erschwert „Trigger“ und Rekonstruktion



# Idee: $R_{K^*}$

$$R_{K^*} = \frac{\text{Diagram 1}}{\text{Diagram 2}} \approx 1$$

The diagram shows two Feynman diagrams for the decay of a  $B^0$  meson into a  $K^{0*}$  meson and a  $W^+$  boson, which then decays into a muon pair ( $\mu^+ \mu^-$ ) or an electron pair ( $e^+ e^-$ ).

**Diagram 1 (Top):** A  $B^0$  meson (quarks  $\bar{b}$  and  $\bar{s}$ ) decays into a  $K^{0*}$  meson (quarks  $\bar{t}$  and  $\bar{s}$ ) and a  $W^+$  boson. The  $W^+$  boson decays into a muon pair ( $\mu^+ \mu^-$ ).

**Diagram 2 (Bottom):** A  $B^0$  meson (quarks  $\bar{b}$  and  $\bar{s}$ ) decays into a  $K^{0*}$  meson (quarks  $\bar{t}$  and  $\bar{s}$ ) and a  $W^+$  boson. The  $W^+$  boson decays into an electron pair ( $e^+ e^-$ ).

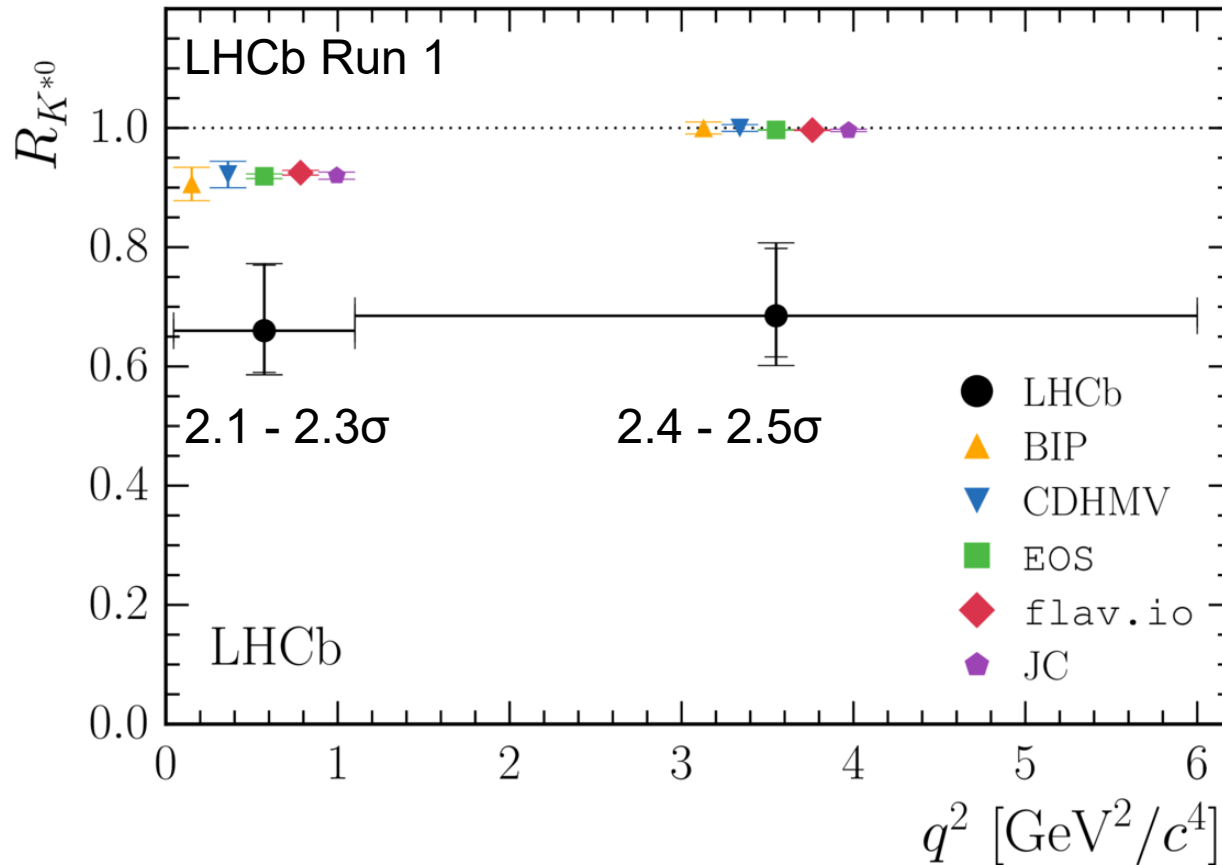


# Idee: $R_{K^*}$

$$R_{K^*} = \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu\mu)}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} ee)} \approx 1$$

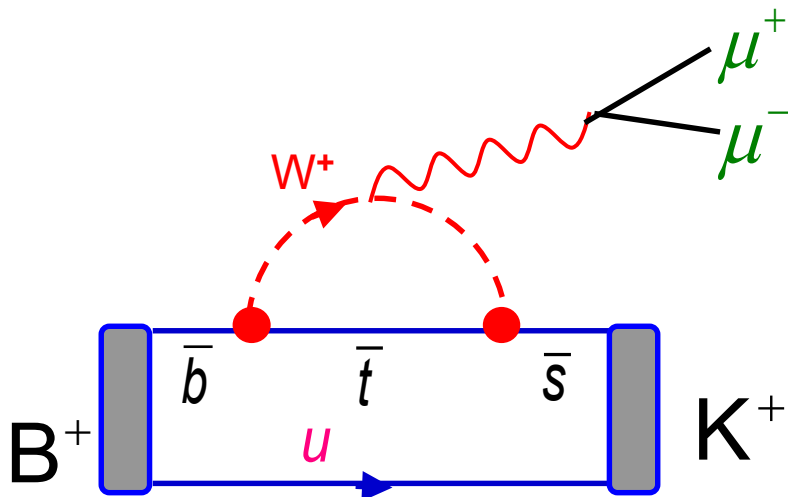
# $R_{K^*}$

*JHEP 08 (2017) 055*

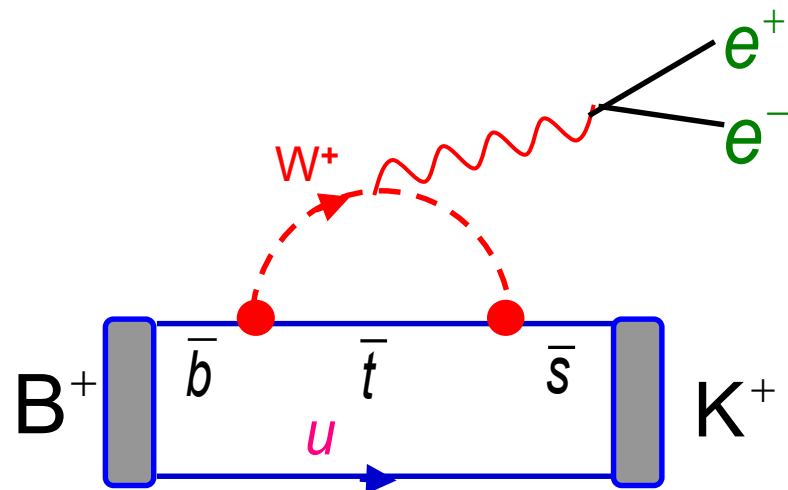


Völlig unerwartet – interessant.

$$R_{K^*} \xleftrightarrow{(d \leftrightarrow u)} R_K$$

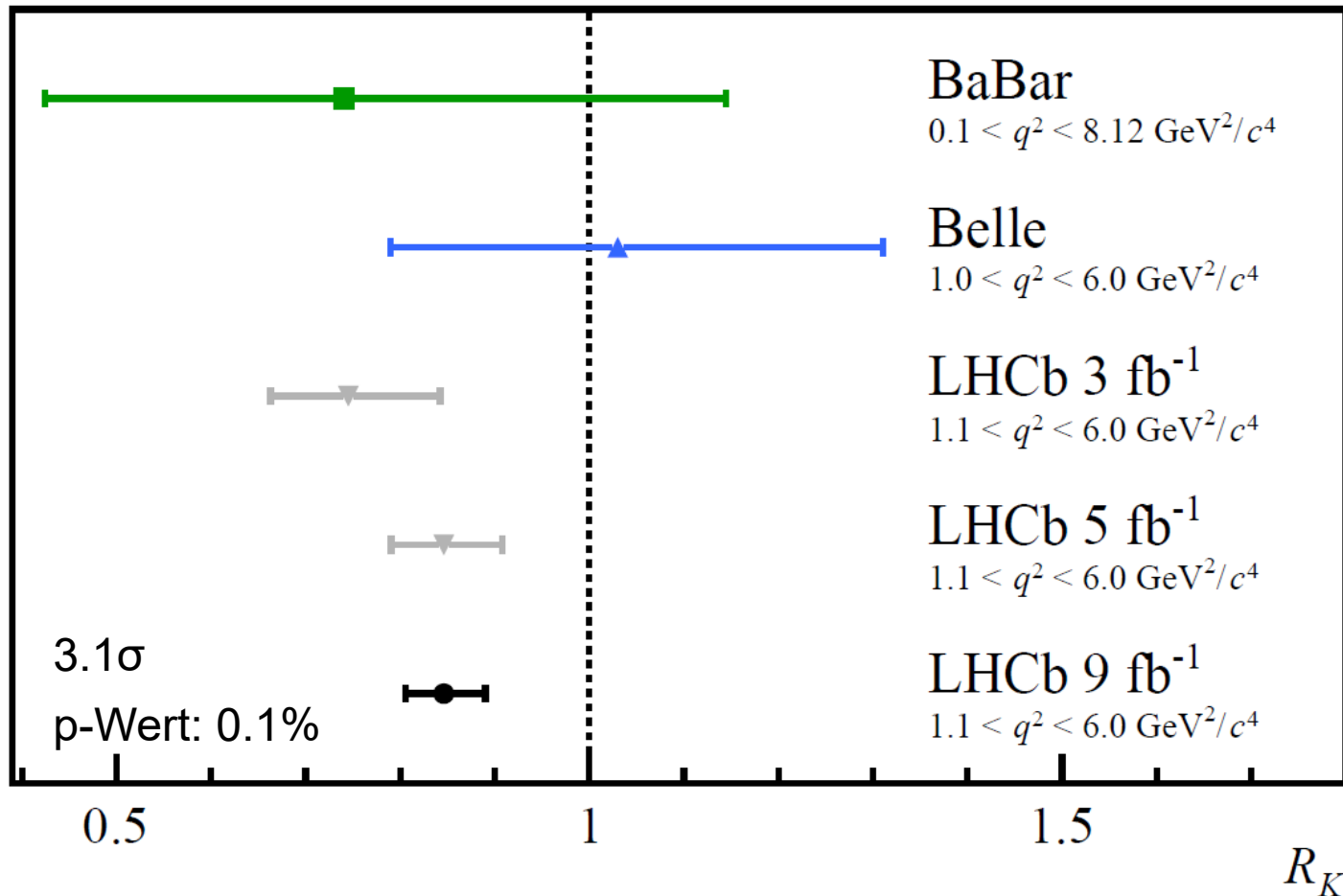


$$R_K = \frac{\text{[Diagram above]}}{\text{[Diagram below]}} \approx 1$$



$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu\mu)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ ee)} \approx 1$$

# $R_K$

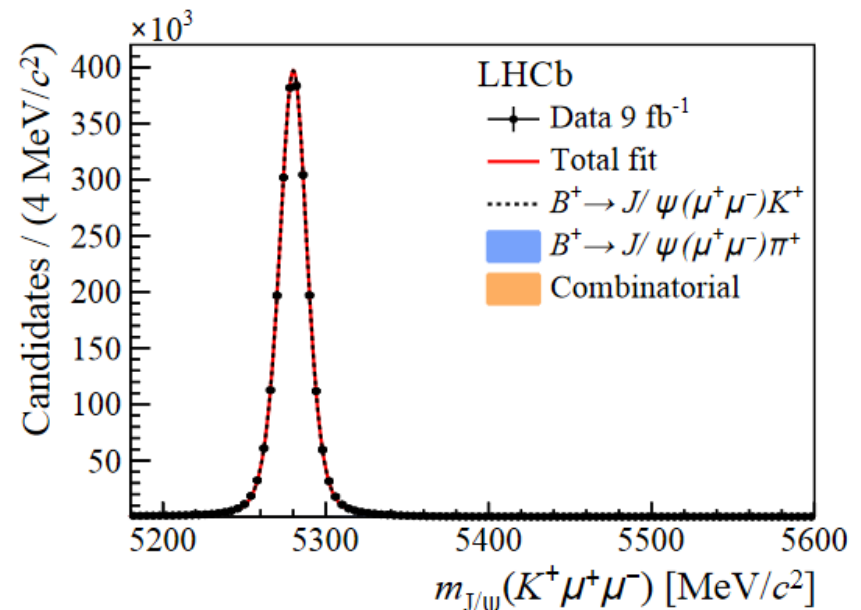
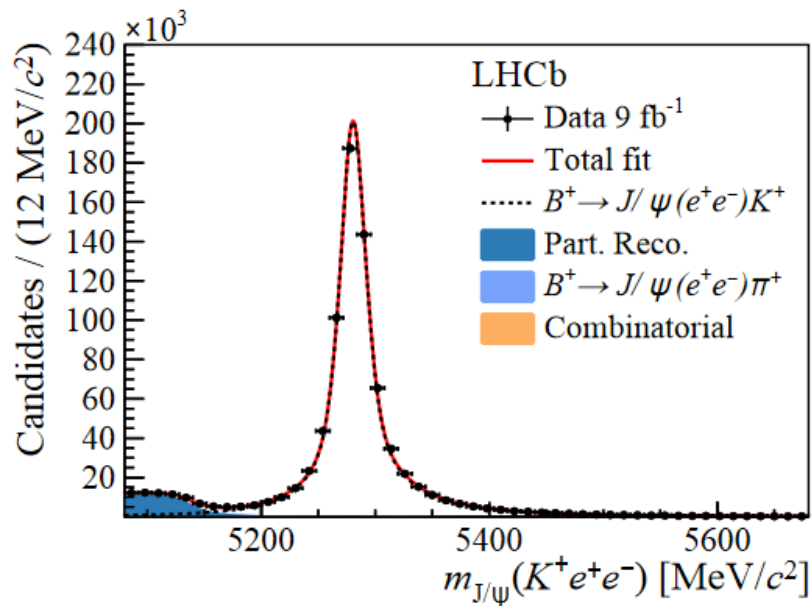


Ist die Leptonuniversalität in B-Zerfällen tatsächlich verletzt?  
Oder ist es vielleicht doch ein Messeffekt?

# Verstehen wir unseren Detektor?

$$r_{J/\psi} = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ J/\psi(\mu^+ \mu^-))}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ J/\psi(e^+ e^-))} = 1,$$

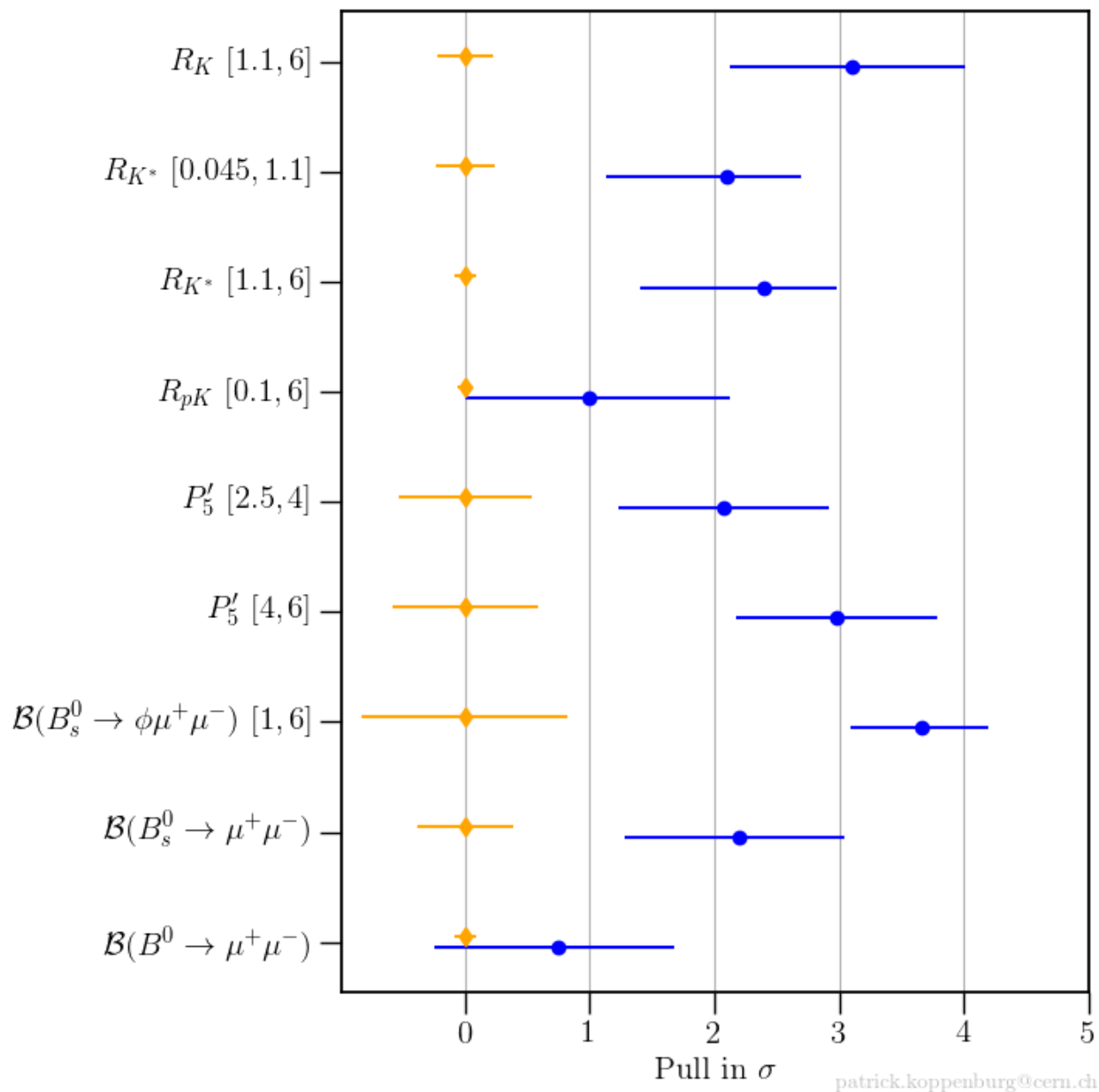
Keine Loops  
→ keine NP



$$r_{J/\psi} = 0.981 \pm 0.020 \text{ (stat + syst)}$$

Keine Anzeichen dass bei der Messung etwas „faul“ ist.

# Alle Messungen auf einen Blick



Alles statistische  
Fluktuationen ?

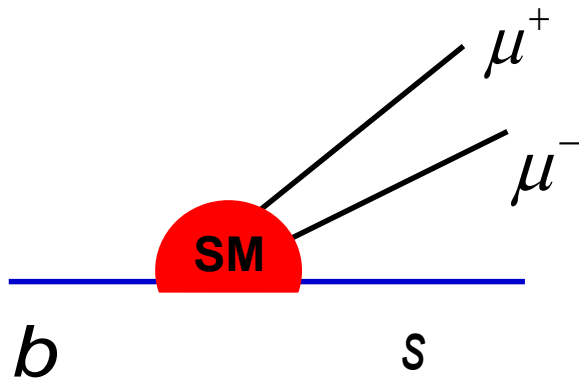
Oder doch  
experimentelles  
Problem?

Oder Theorie-  
Problem?

Oder doch neue  
Phänomene?

# Globale Auswertung aller Daten

Stärke der Kopplung:

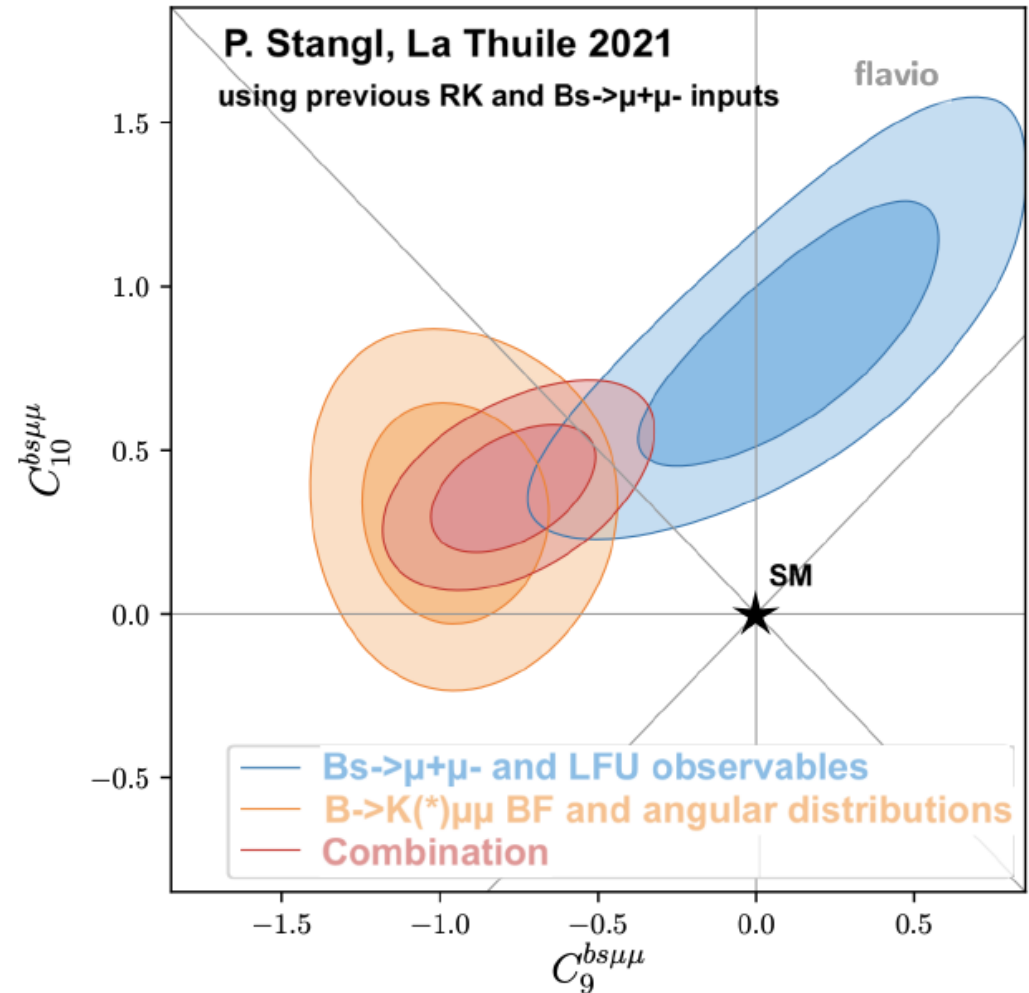


$$C_{obs} = C_{SM} + C_{NP}$$

$>5\sigma$  – Abweichung

Was wäre wenn...

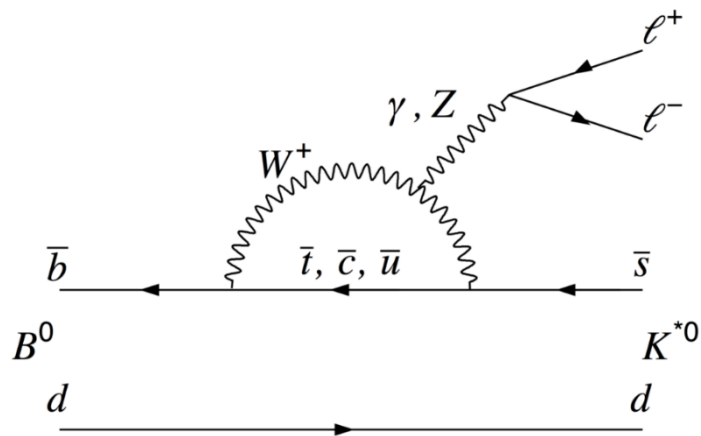
Auswertung aller Daten mit  $b \rightarrow s \mu \mu$





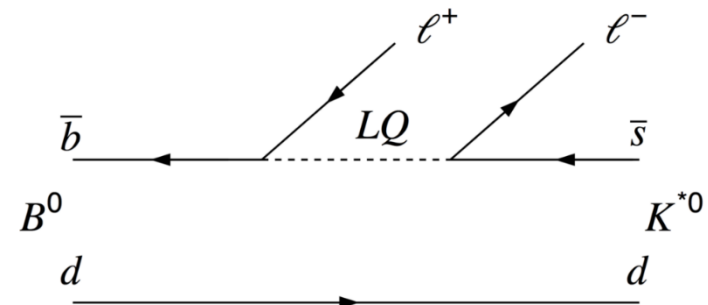
# Neue Phänomene?

## Standardmodell

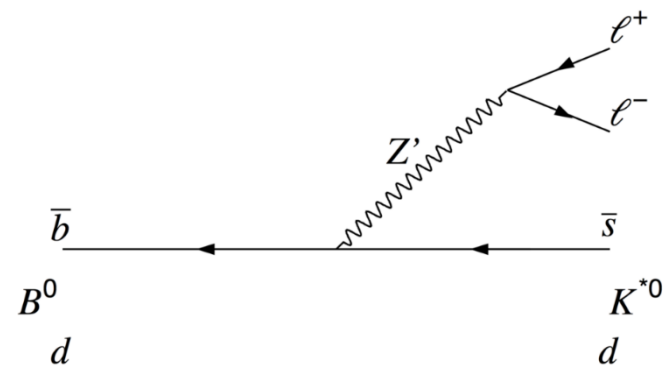


Leptoquarks wäre eine populäre Möglichkeit ein „Problem“ in B-Zerfällen mit Myonen zu erklären

## Leptoquarks

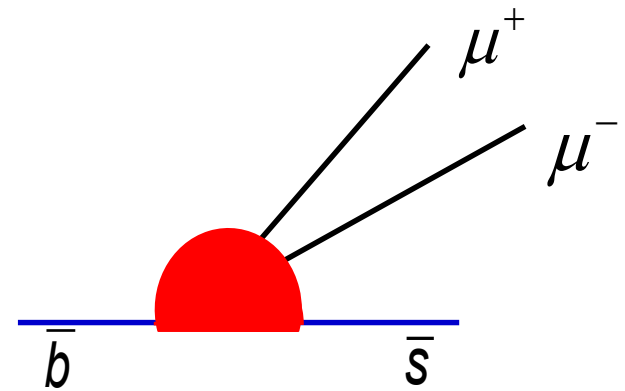


## Neues Z (Z')

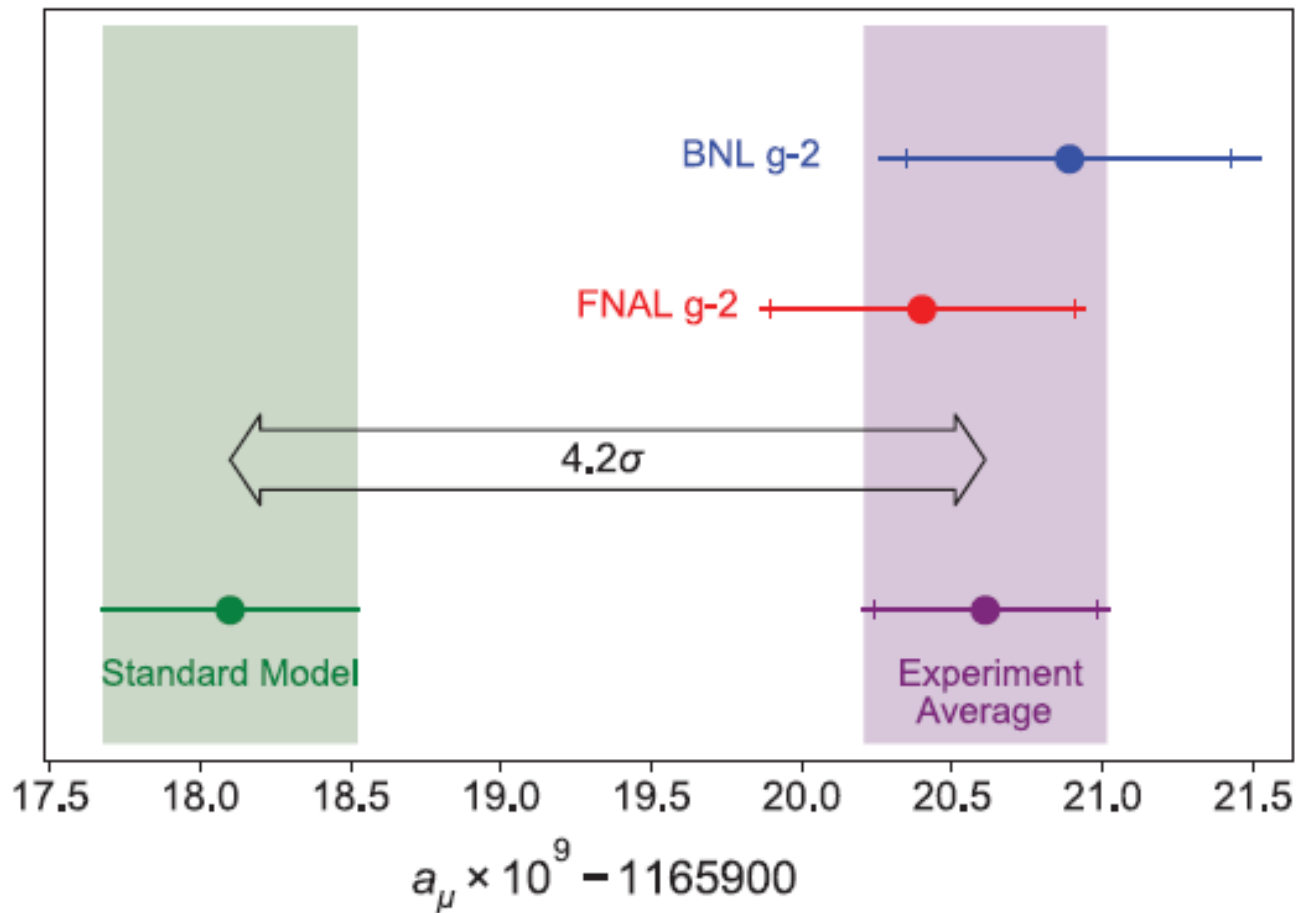
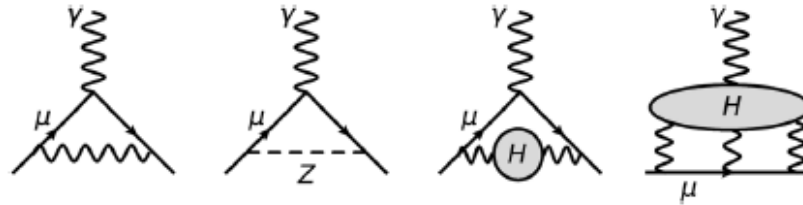


# Zusammenfassung

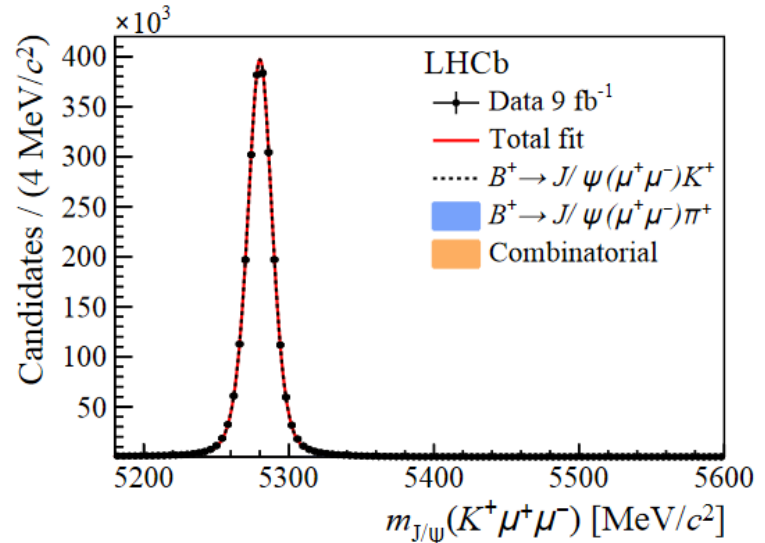
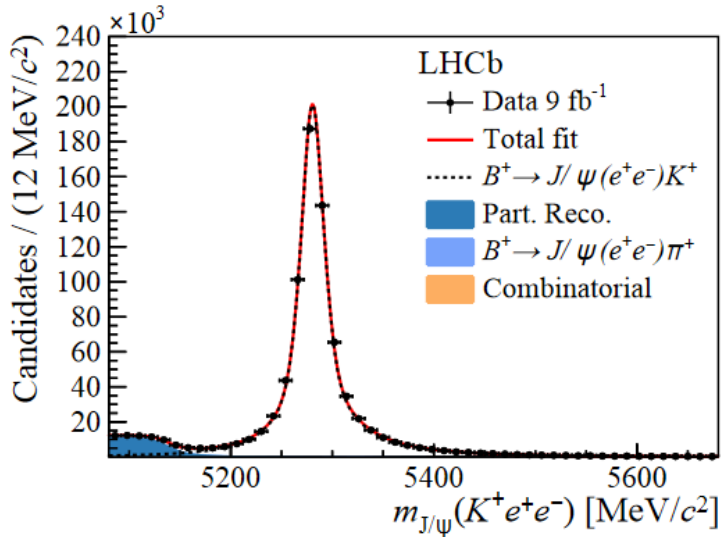
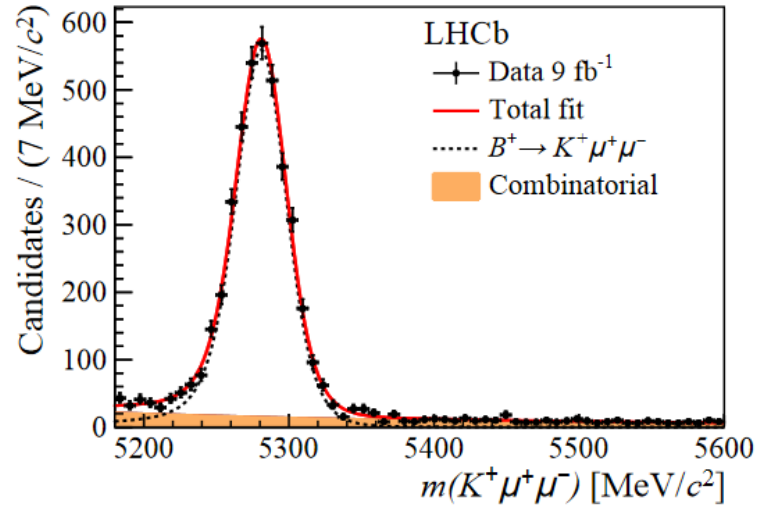
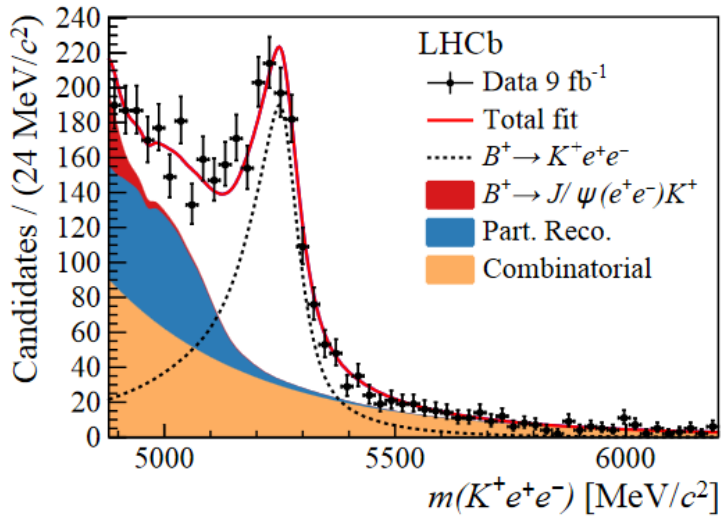
- Messungen sogenannter  $b \rightarrow s\mu\mu$  Pinguin-Übergänge zeigen eine Reihe von Abweichungen zur Standardmodell-Vorhersage:  $P_5'$ ,  $R_K$ , BR
- Signifikanteste Abweichung zur Vorhersage wurde für  $R_K$  mit  $3.1\sigma$  gemessen: Statistische Fluktuation oder wirklicher Effekt?
- Wenn sich das Ergebnis bestätigt, wäre die Elektron-Myon-Universalität in diesen Zerfällen verletzt: Das wäre ein erster Hinweis auf neue Phänomene.
- LHCb startet im Februar 2022 mit einem neuen Detektor in eine neue Datennahme - mind. Faktor 5 mehr Daten.



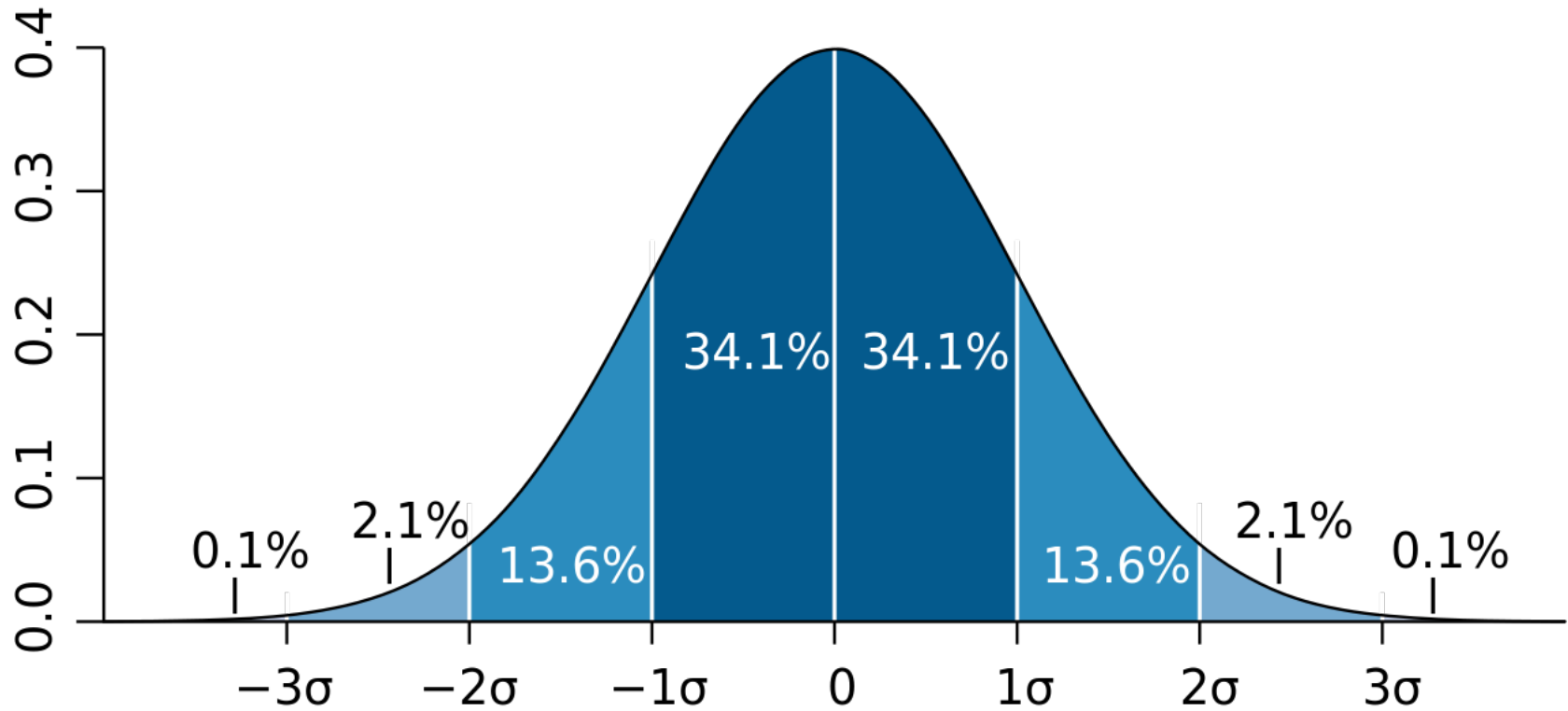
# Myon g-2



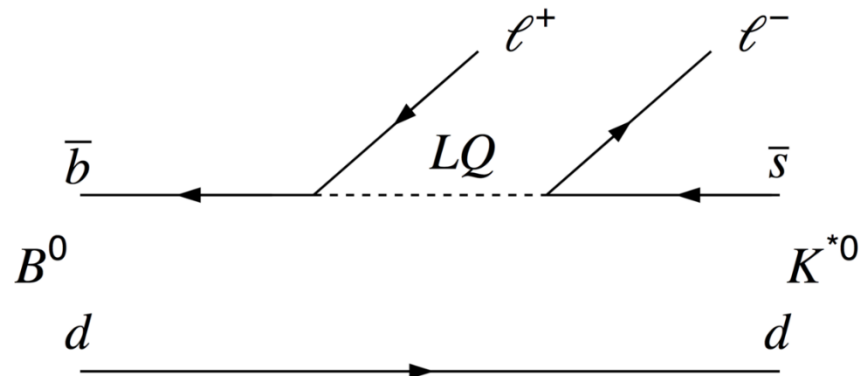
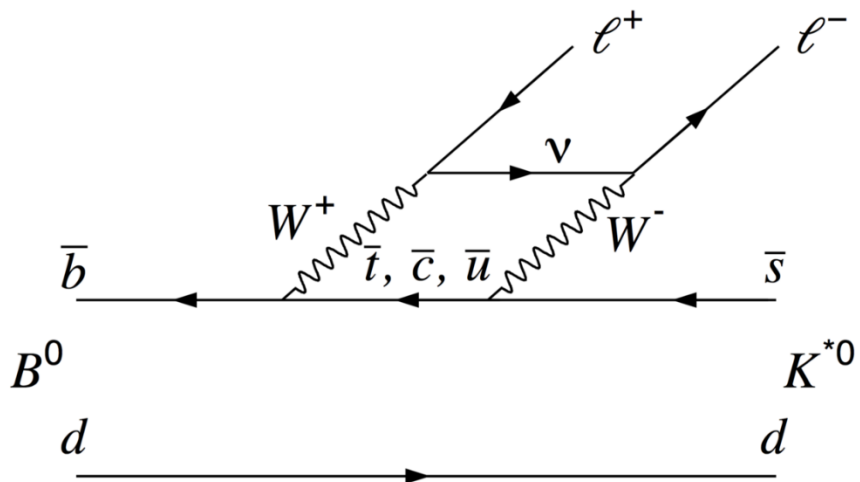
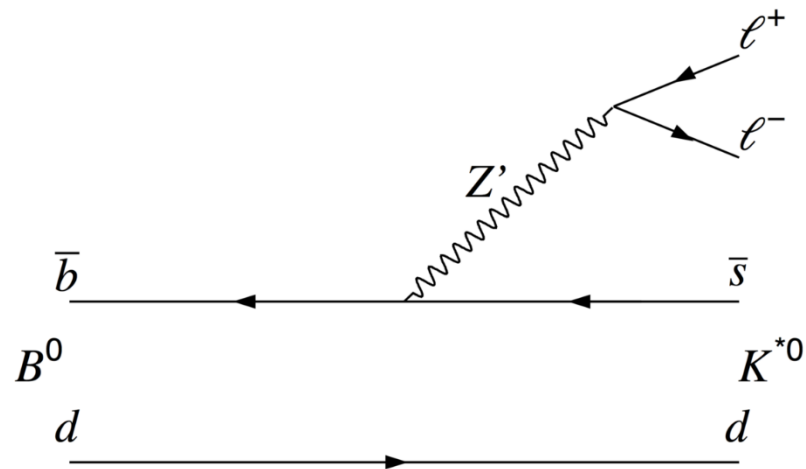
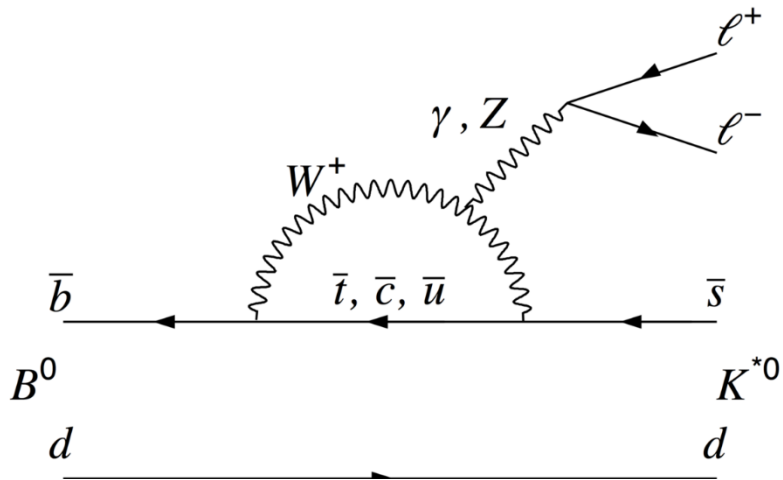
# Daten zu $R_K$



# Standardabweichungen



# Feynman-Graphen



# LHCb Detektor

