technische universität
dortmund

lehrstuhl
physik e5

Suche nach dem Lepton-Flavor verletzenden Zerfall $J/\psi \to e^{\pm}\mu^{\mp}$ bei LHCb

Normierungskonstante

Kevin Sedlaczek

19. September 2016

Lehrstuhl für Experimentelle Physik 5a

Übersicht

1) Motivation der Analyse

2) Der LHCb Detektor

3) Analyse

4) Ergebnis

5) Ausblick

Übersicht

1) Motivation der Analyse

2) Der LHCb Detektor

3) Analyse

4) Ergebnis

5) Ausblick

Motivation

- Überprüfung des Standardmodells
  - Theorie des Aufbaus der Materie [2,3]
  - Fundamentale Wechselwirkungen
  - Erhaltungsgrößen
- Nicht vollständig:
  - Dunkle Materie
  - Neutrinooszillation
  - Materie-Antimaterie-Asymmetrie

Motivation

- Im Standardmodell verbotener Zerfall: $\mathrm{J}/\psi \to e^{\pm}\mu^{\mp}$
- Suche nach *Erweiterungen* des Standardmodells

- BESIII Analyse [4]: $\mathcal{B}(J/\psi \to e\mu) < 1.6 \times 10^{-7}$

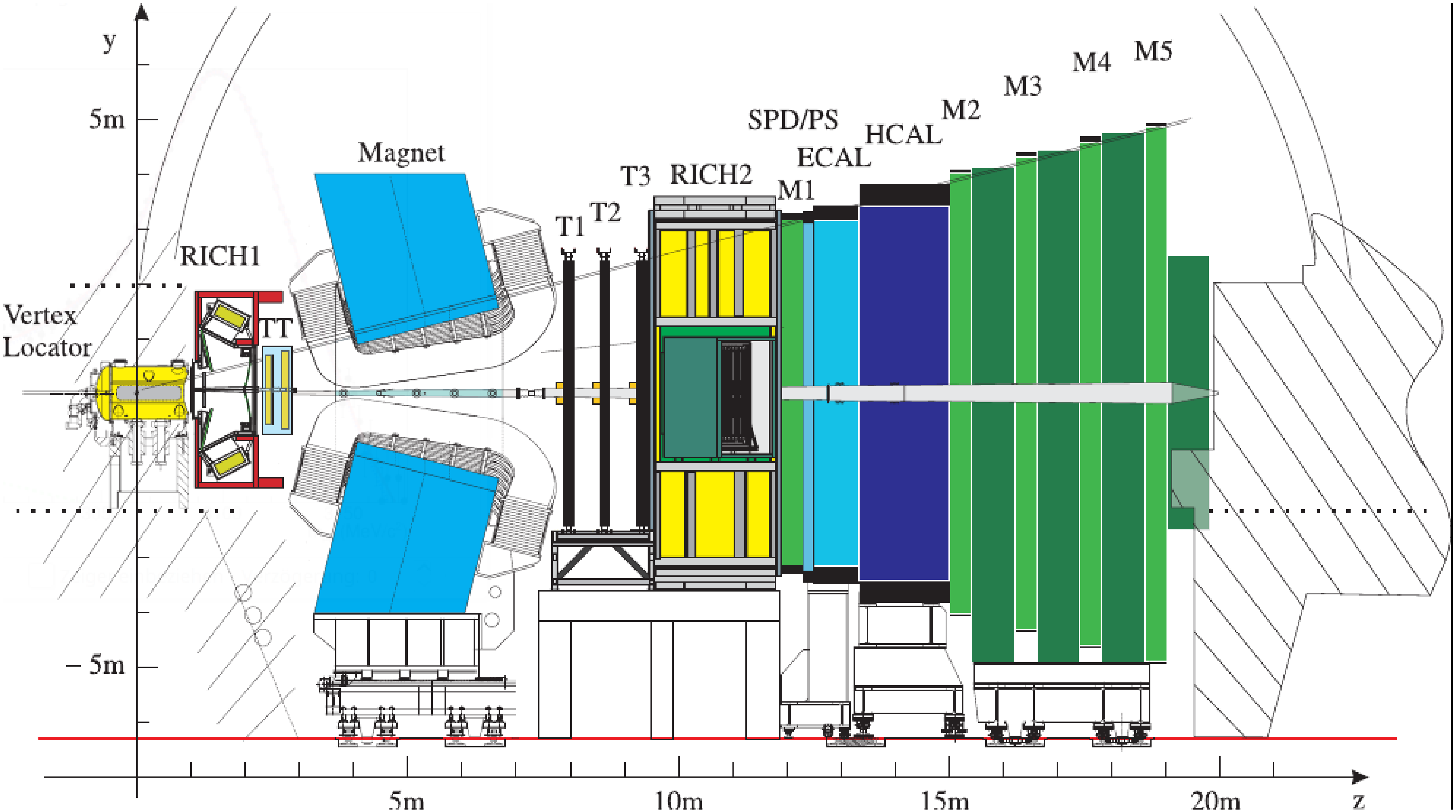
- Bisher keine Analyse mit Daten vom LHCb

Ziel: Ermittelung einer oberen Grenze des Verzweigungsverhältnisses.

Übersicht

Der LHCb Detektor

[1]



Übersicht

1) Motivation der Analyse

2) Der LHCb Detektor

3) Analyse

4) Ergebnis

5) Ausblick

Analyseschritte

$\mathrm{J}/\psi \rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp}$

Selektion der Signalereignisse

- Selektion mit Hilfe einer multivariaten Analyse

Parallel durchgeführte Arbeit

$$\mathcal{BR}(\mathrm{J}/\psi \rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp}) < N_{\mathbf{J}/\psi\rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp},\mathbf{95}\,\%} \cdot \alpha$$

Analyseschritte

$J/\psi \rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp}$

Selektion der Signalereignisse
- Selektion mit Hilfe einer multivariaten Analyse

Parallel durchgeführte Arbeit

+

Ergebnis dieser Arbeit

Normierungskonstante
- Selektion der Kandidaten
- Bestimmung der Anzahl
- Effizienzen der Analyse

$B^{+} \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu\mu)K^{+}$

$$\alpha = \frac{\mathcal{BR}(B^{+} \rightarrow J/\psi K^{+})\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow \mu^{\pm}\mu^{\mp})}{N_{J/\psi \rightarrow \mu^{\pm}\mu^{\mp}}} \frac{(\epsilon_{\text{ges}})_{J/\psi \rightarrow \mu^{\pm}\mu^{\mp}}}{(\epsilon_{\text{ges}})_{J/\psi \rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp}}}$$

Analyseschritte

$J/\psi \rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp}$

Selektion der Signalereignisse
- Selektion mit Hilfe einer multivariaten Analyse

Parallel durchgeführte Arbeit

+

Ergebnis dieser Arbeit

Normierungskonstante
- Selektion der Kandidaten
- Bestimmung der Anzahl
- Effizienzen der Analyse

$B^{+} \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu\mu)K^{+}$

Obere Abschätzung
- Berechnung der erwarteten oberen Ausschlussgrenze

$\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp})$

Datensatz

$$B^+ \rightarrow \mathrm{J}/\psi(\rightarrow \mu\mu)K^+$$

- Daten aus dem Jahr **2012 (Run 1)**
- Schwerpunktsenergie: $\sqrt{s} = 8$ TeV
- Integrierte Luminosität: **2 fb^{-1}**
- Monte Carlo Simulation

Selektionsvariable	Bedingung
m_B	$\in [5129,\ 5429]\ \mathrm{MeV}/c^2$
$B^+ : \chi^2_{\mathrm{IP}}$	< 25
$B^+ : \chi^2_{\mathrm{VD,PV}}$	> 100
$B^+ : \mathrm{DIRA}$	$> 0{,}9995$

$\Rightarrow$ $$\epsilon_{\mathrm{strip}} = (8{,}744 \pm 0{,}006)\ \%$$

Selektion

- **C**ut **R**ecursive **OP**timizer
- Selektion f $\mathrm{J}/\psi \to e^{\pm}\mu^{\mp}$
- Vergleichbarkeit

(1) Massenfenster
(2) Primärvertex
(3) Fehlidentifikation
(4) Signalereignis
(5) Spurübereinstimmung

Selektionsvariable	Bedingung
$m_{\mu\mu}$	$\in [2946,\ 3176]$ MeV/c²
$\mu^- : \chi^2_{\mathrm{IP}}$	> 36
$\mu^+ : \chi^2_{\mathrm{IP}}$	> 36
μ^- : GhostProb	$< 0{,}3$
μ^+ : GhostProb	$< 0{,}3$
J/ψ : BKGCAT(Nur MC)	$== 0$
J/ψ : DIRA	> 0

$$\epsilon_{\text{Selektion}} = \frac{N_{\text{MC-events after selection}}}{N_{\text{MC-events after strip}}} = (82{,}09 \pm 0{,}03)\ \%$$

Trigger

L0-Trigger	
	L0MuonDecision_TOS
	L0HadronDecision_TOS
HLT1-Trigger	
	Hlt1TrackAllL0Decision_TOS
	Hlt1TrackMuonDecision_TOS
HLT2-Trigger	
	Hlt2Topo2BodyBBDTDecision_TOS
	Hlt2Topo3BodyBBDTDecision_TOS
	Hlt2Topo4BodyBBDTDecision_TOS
	Hlt2TopoMu2BodyBBDTDecision_TOS
	Hlt2TopoMu3BodyBBDTDecision_TOS
	Hlt2TopoMu4BodyBBDTDecision_TOS

$$\epsilon_{\text{Trigger}} = \frac{N_{\text{MC-events after trigger}}}{N_{\text{MC-events after selection}}} = (74{,}15 \pm 0{,}04)\,\%$$

Effizienzen

Generator ϵ_{gen}	$(16{,}099 \pm 0{,}021)\,\%$
Vorselektion ϵ_{strip}	$(8{,}744 \pm 0{,}006)\,\%$
Selektion $\epsilon_{\text{Selektion}}$	$(82{,}09 \pm 0{,}03)\,\%$
Trigger $\epsilon_{\text{Trigger}}$	$(74{,}15 \pm 0{,}04)\,\%$
Gesamt $\epsilon_{J/\psi\to\mu^\pm\mu^\mp,\text{ges}}$	$(0{,}857 \pm 0{,}001)\,\%$

$$\epsilon_{J/\psi\to\mu^\pm\mu^\mp,\text{ges}} = \epsilon_{\text{gen}} \cdot \epsilon_{\text{strip}} \cdot \epsilon_{\text{Selektion}} \cdot \epsilon_{\text{Trigger}}$$

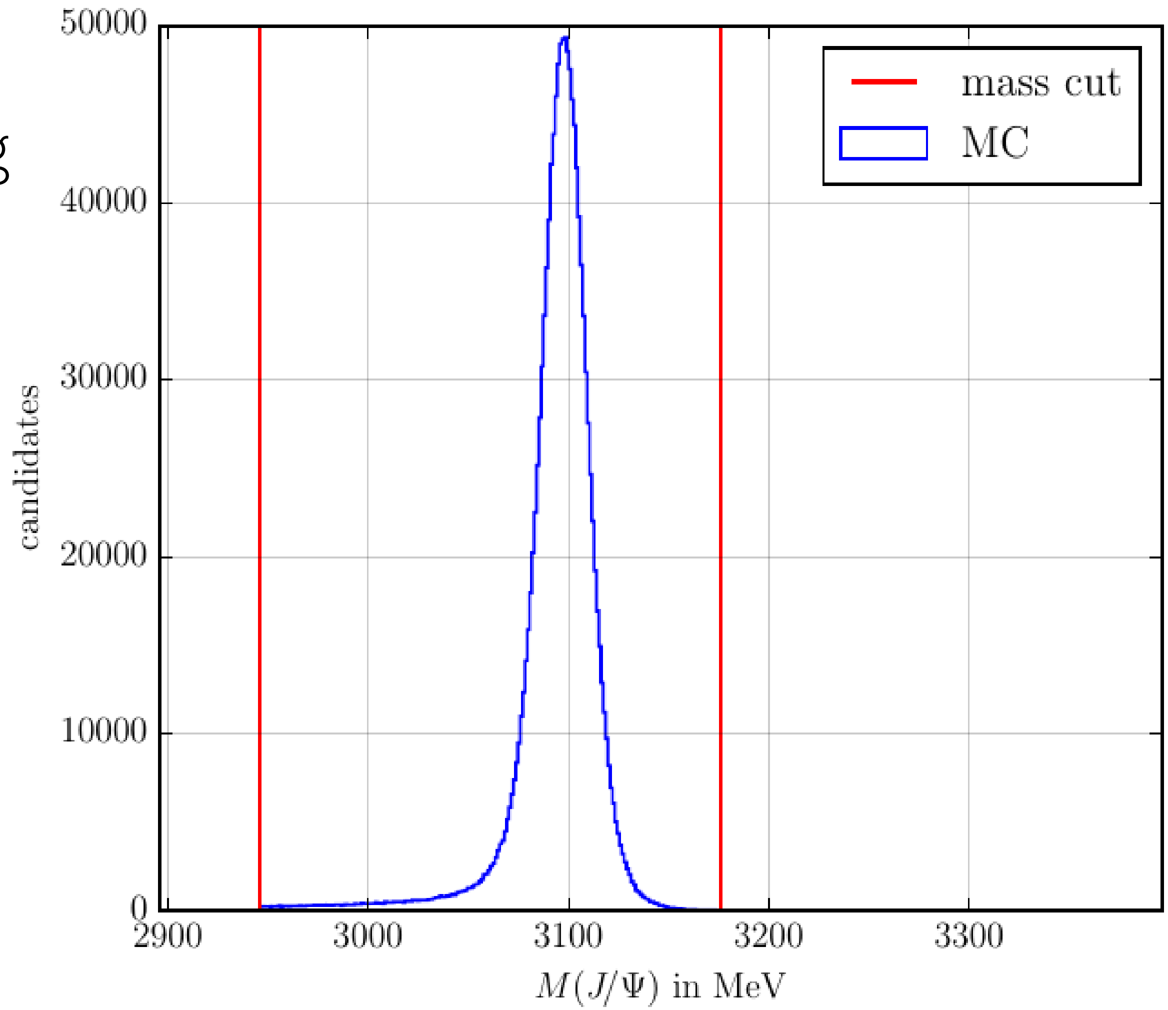
Massenfit

- Gesucht: Anzahl der Signalkandidaten $B^+ \to \mathrm{J}/\psi(\to \mu\mu)K^+$
- *extended maximum-likelihood-fit* (`RooFit`)
- Massenbereich: [m(J /ψ) – 150 MeV, m(J /ψ) + 80 MeV]
- Skalierungsfaktor 13, 4524 (→100 000 Ereignisse)
- Gesamtmodell aus Signalfunktion **S** und Untergrundfunktion **B**

$$\mathrm{G}(m_{\mu\mu}) = \mathrm{S}(m_{\mu\mu}) + \mathrm{B}(m_{\mu\mu})$$

Massenfit

- Gaußverteilung
- Ausläufer
- → *Crystal Ball*



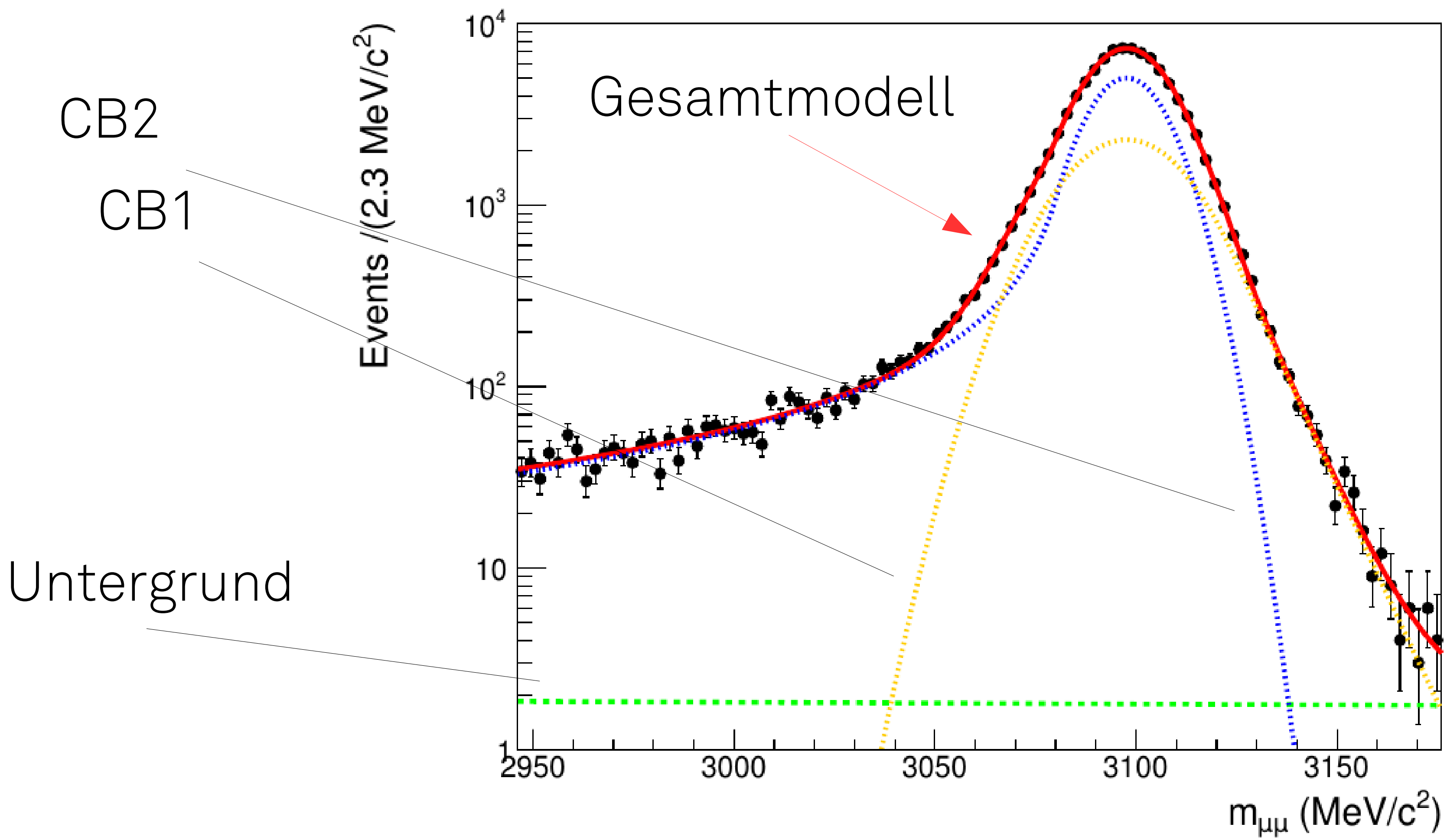
Massenfit

- Signalmodell: *Double Crystal Ball* Funktion
- Untergrundmodell: Exponentialfunktion
- Gesamtmodell: Zwei CB Funktionen + Exp. Untergrund

$$CB(x;\alpha,n,\mu,\sigma,N) = N \cdot \begin{cases} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), & \text{falls } \frac{x-\mu}{\sigma} > -\alpha \\ A \cdot \left(B - \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-n}, & \text{falls } \frac{x-\mu}{\sigma} \leqslant -\alpha \end{cases}$$

$$B(x;c) = \mathrm{e}^{c \cdot x}$$

$$\mathrm{G}(m_{\mu\mu};f) = \mathrm{CB}_1(m_{\mu\mu};\alpha_1,\mu,\sigma_1,n_1) + f\mathrm{CB}_2(m_{\mu\mu};\alpha_2,\mu,\sigma_2,n_2) \\ + \mathrm{B}(m_{\mu\mu};c)$$


CB2
CB1
Untergrund
Gesamtmodell
Events /(2.3 MeV/c^2)
10^4
10^3
10^2
10
1
2950
3000
3050
3100
3150
$m_{\mu\mu}$ (MeV/c^2)

Ergebnisse des Massenfits

- Anzahl der Signalereignisse: freier Parameter des Modells
- Ergebnis der Ausgleichsrechnung: 99 700 ± 334
- Skalierungsfaktor 13, 4524
- Skalierungsfaktor → $N_{\mathbf{J}/\psi\rightarrow\mu^{\pm}\mu^{\mp}} = 1\,341\,204 \pm 4493$

Übersicht

Berechnung der Normierungskonstante

$$\alpha = \frac{\mathcal{BR}(B^+ \to \mathrm{J}/\psi K^+)\mathcal{BR}(\mathrm{J}/\psi \to \mu^\pm\mu^\mp)}{N_{\mathrm{J}/\psi\to\mu^\pm\mu^\mp}} \frac{(\epsilon_{\mathrm{ges}})_{\mathrm{J}/\psi\to\mu^\pm\mu^\mp}}{(\epsilon_{\mathrm{ges}})_{\mathrm{J}/\psi\to e^\pm\mu^\mp}}$$

Gesamteffizienz aus parallel durchgeführter Analyse:

$$\epsilon_{\mathrm{J}/\psi\to e^\pm\mu^\mp,\mathrm{tot}} = (1,2 \pm 0,4)\cdot 10^{-6}$$

Gesamteffizienz der Selektion dieser Analyse:

$$\epsilon_{\mathrm{J}/\psi\to\mu^\pm\mu^\mp,\mathrm{ges}} = (0{,}857 \pm 0{,}001)\,\%$$

Korrektur der bestimmten Signalereignisse

Gesucht ist die Anzahl aller J/ψ (detached)

1. Berechne die Anzahl der B+ Mesonen

$$N_{B^+} = \frac{N_{\mathrm{J}/\psi \to \mu^\pm \mu^\mp}}{\mathcal{BR}(B^+ \to \mathrm{J}/\psi K^+)\mathcal{BR}(\mathrm{J}/\psi \to \mu^\pm \mu^\mp)} \cdot \frac{1}{(\epsilon_{\mathrm{ges}})_{\mathrm{J}/\psi \to \mu^\pm \mu^\mp}}$$
$$= (2,56 \pm 0,08) \cdot 10^{12}$$

2. Anzahl der B^- Mesonen entspricht dieser.
3. Wenn $f_u \approx f_d$, so entspricht dies auch der Anzahl der B^0
4. Unter gleicher Annahme Berechnung der B_s Mesonen

$$N_{B_s} \approx N_{B^+} \cdot \frac{f_s}{f_u} = N_{B^0} \cdot \frac{f_s}{f_d} = (6.8 \pm 0.6) \cdot 10^{11}$$

Korrektur der bestimmten Signalereignisse

Gesucht ist die Anzahl aller J/ψ (detached):

$$N_{\text{korr}} = (2N_{B^+} + 2N_{B_s} + N_{B^0}) \cdot \mathcal{BR}(B \to \mathrm{J}/\psi X) = (9,9 \pm 0,4) \cdot 10^{10}$$

Ladungskonjugierte

Berechnung der Normierungskonstante

$$N_{\text{korr}} = (2N_{B^+} + 2N_{B_s} + N_{B^0}) \cdot \mathcal{BR}(B \to \text{J}/\psi X) = (9,9 \pm 0,4) \cdot 10^{10}$$

Über die korrigierte Anzahl lässt sich die Normierungskonstante berechnen:

$$\alpha = \frac{1}{N_{\text{korr}} \cdot (\epsilon_{\text{ges}})_{\text{J}/\psi \to e^\pm \mu^\mp}} = (1,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-5} \ .$$

Berechnung der Normierungskonstante

$$\mathcal{BR}(\mathrm{J}/\psi \to e^{\pm}\mu^{\mp}) < N_{\mathrm{J}/\psi\to e^{\pm}\mu^{\mp},95\,\%} \cdot \alpha = \boxed{(7 \pm 1)} \cdot \boxed{((1,3 \pm 0,4)\cdot 10^{-5})}$$
$$= (9,2 \pm 3,4)\cdot 10^{-5}\,.$$

Ergebnis der parallel durchgeführten Analyse

In dieser Arbeit bestimmte Konstante

$$\boxed{\mathcal{BR}(\mathrm{J}/\psi \to e^{\pm}\mu^{\mp}) < (9,2 \pm 3,4)\cdot 10^{-5}}$$

Übersicht

1) Motivation der Analyse

2) Der LHCb Detektor

3) Analyse

4) Ergebnis

5) Ausblick

Einordnung & Ausblick

In dieser Analyse bestimmte Abschätzung:

$$\mathcal{BR}(\mathrm{J}/\psi \to e^{\pm}\mu^{\mp}) < (9,2 \pm 3,4) \cdot 10^{-5}$$

$$\Updownarrow$$

$$\mathcal{B}(J/\psi \to e\,\mu) < 1.6 \times 10^{-7} \qquad [4]$$

Abschätzung der BESIII-Kollaboration.

Einordnung & Ausblick

- Kontrollkanal eignet sich zur Bestimmung von **α**
- Analyse mit Daten des LHCb möglich

Verbesserungen

- Angepasster Datensatz $\mathbf{J}/\psi\rightarrow\mu^{\pm}\mu^{\mp}$
- Optimierung der Selektion
- Modellation der Massenverteilung
- Ausgleichsrechnung auf ganzem Datensatz
- Berücksichtigung systematischer Fehler

Genauere Bestimmung der Anzahl Signalkandidaten

Literaturverzeichnis

[1] R. Antunes-Nobrega et al. „LHCb reoptimized detector design and performance: Technical Design Report“. In: CERN-LHCC-2003-030 ; LHCb-TDR-9. Technical Design Report LHCb (2003). url: https://cds.cern.ch/record/630827.

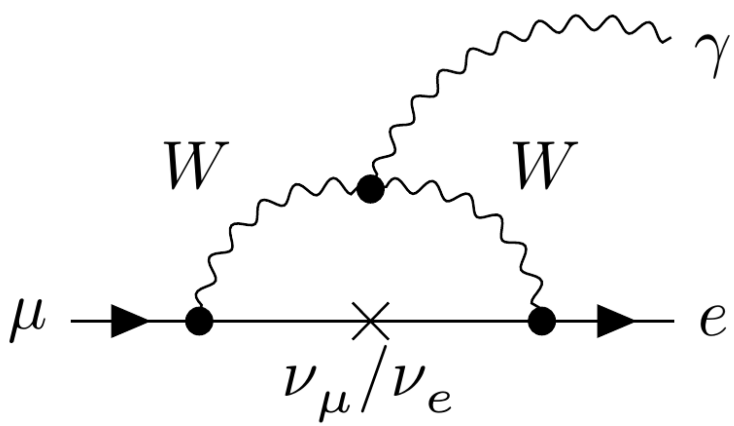
[2] D. Griffiths. Introduction to Elementary Particles. 8. Auflage. Wiley-VCH, 2010.

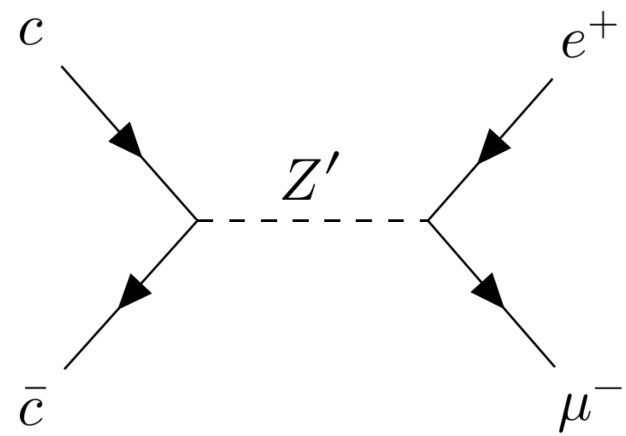
[3] F. Halzen und A.D. Martin. Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics. Wiley-VCH, 1984.

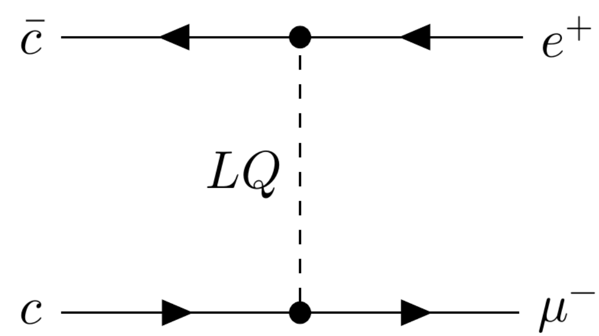
[4] *The BESIII Collaboration.* „Search for the lepton flavor violation process $J/\psi \rightarrow e\mu$ at BESIII“. In: Phys. Rev. D87 (2013). 112007. arXiv: 1304.3205.

Backup

Lepton Flavor Violation







Fit-Ergebnisse

Signalmodell	Fit-Ergebnis
α_1	$1{,}78 \pm 0{,}05$
μ	$3097{,}71 \pm 0{,}05$
σ_1	$10{,}0 \pm 0{,}2$
n_1	$1{,}10 \pm 0{,}05$
α_2	$-1{,}87 \pm 0{,}08$
σ_2	$15{,}6 \pm 0{,}4$
f	$0{,}39 \pm 0{,}03$
n_{BKG}	303 ± 135
n_{Sig}	99700 ± 334
Untergrundmodell	Fit-Ergebnis
c	$-1,1 \cdot 10^{-6} \pm 4,5 \cdot 10^{-3}$

Fehler-Rechnung

- Blablablabla
- Blablablabla
- Blablablabla

Extended maximum-likelihood-fit

- This differs from the standard method of maximum likelihood in that the **normalisation of the probability distribution function** is allowed to vary. It is thus applicable to problems in which the number of samples obtained is itself a relevant measurement. If the function is such that its size and shape can be independently varied, then the estimates given by the extended method are identical to the standard maximum likelihood estimators, though the errors require care of interpretation. If the function does not have this property, then extended maximum likelihood can give better results.

Untergrund

- Blablablabla
- Blablablabla
- Blablablabla

Analyseschritte

$J/\psi \rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp}$

Selektion der Signalereignisse
- Selektion mit Hilfe einer multivariaten Analyse

Parallel durchgeführte Arbeit

$$\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp}) < N_{J/\psi \rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp}, 95\,\%} \cdot \alpha \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu\mu)K^{+}$$

Ergebnis dieser Arbeit

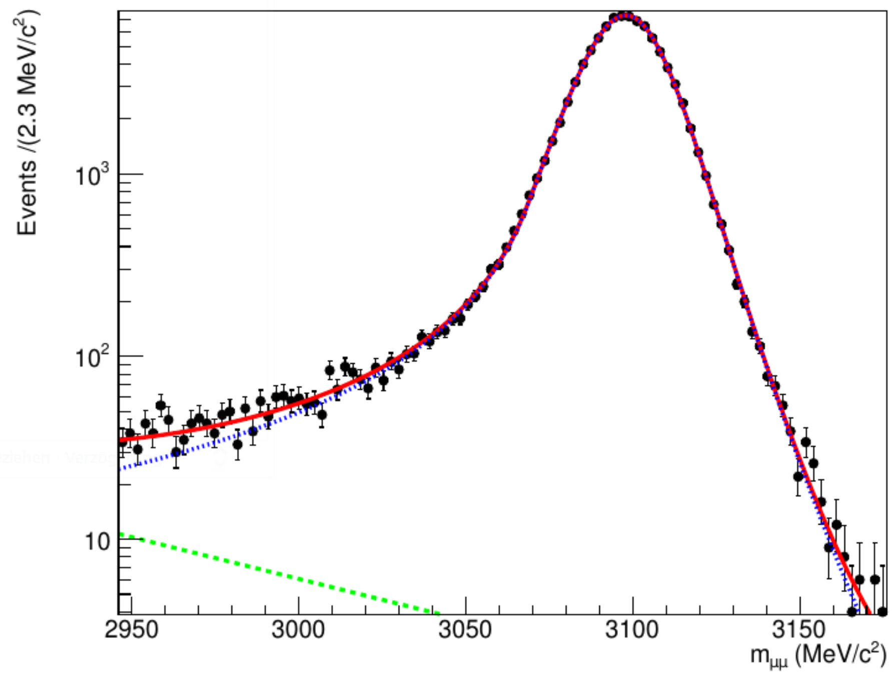
- Selektion der Kandidaten
- Bestimmung der Anzahl
- Effizienzen der Analyse

$$\alpha = \frac{\mathcal{BR}(B^{+} \rightarrow J/\psi K^{+})\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow \mu^{\pm}\mu^{\mp})}{N_{J/\psi \rightarrow \mu^{\pm}\mu^{\mp}}} \frac{(\epsilon_{ges})_{J/\psi \rightarrow \mu^{\pm}\mu^{\mp}}}{(\epsilon_{ges})_{J/\psi \rightarrow e^{\pm}\mu^{\mp}}}$$

Ipatia Funktion

- G = 1. Fall
- K = Bessel-Funktion

$$A_\lambda^2 = \frac{\zeta K_\lambda(\zeta)}{K_{\lambda+1}(\zeta)}$$



$$\mathrm{I}(m,\mu,\sigma,\lambda,\zeta,\beta,a,n) \propto$$

$$\begin{cases} ((m-\mu)^2 + A_\lambda^2(\zeta)\sigma^2)^{\frac{1}{2}\lambda-\frac{1}{4}} e^{\beta(m-\mu)} \cdot K_{\lambda-\frac{1}{2}}\left(\zeta\sqrt{1+(\frac{m-\ mu}{A_\lambda(\zeta)\sigma})^2}\right), & \text{wenn} \frac{m-\mu}{\sigma} > -a \\ \frac{G(\mu-a\sigma,\mu,\sigma,\lambda,\zeta,\beta)}{\left(1-m(n\frac{G(\mu-a\sigma,\mu,\sigma,\lambda,\zeta,\beta)}{G'(\mu-a\sigma,\mu,\sigma,\lambda,\zeta,\beta)}-a\sigma)\right)^n}, & \text{sonst} \end{cases}$$