

Messung der CP-Verletzung im $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ Zerfall am Belle Experiment

Kolja Prothmann, Jeremy Dalseno,
Christian Kiesling

Max-Planck-Institut für Physik

- 1 Physik Motivation
- 2 Analyse Verfahren
- 3 Zusammenfassung

DPG 2011



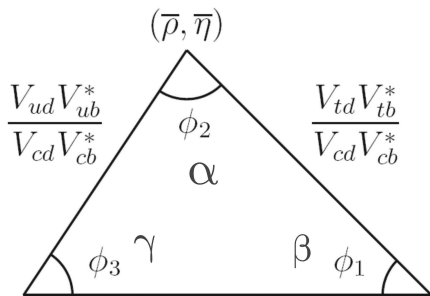
CKM Matrix und das Unitaritäts Dreieck

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{cd} & V_{td} \\ V_{us} & V_{cs} & V_{ts} \\ V_{ub} & V_{cb} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 & \lambda & \lambda^3 \\ \lambda & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

Wolfenstein Parametrisierung

- Die Unitaritätsbedingung der CKM Matrix führt zu $\sum_k V_{ik} V_{jk}^* = 0$
- Dreieck im komplexen Raum
- sehr kleine Winkel im Kaon System, große Winkel im B Meson System

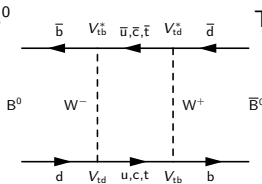
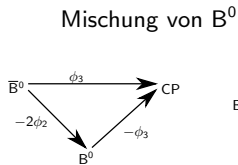
$$\frac{V_{ud} V_{ub}^*}{\mathcal{O}(\lambda^3)} + \frac{V_{cd} V_{cb}^*}{\mathcal{O}(\lambda^3)} + \frac{V_{td} V_{tb}^*}{\mathcal{O}(\lambda^3)} = 0$$



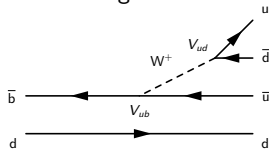
$$\phi_1 = \arg \left(-\frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{td} V_{tb}^*} \right) \quad \phi_3 = \arg \left(-\frac{V_{ud} V_{ub}^*}{V_{cd} V_{cb}^*} \right)$$

$$\phi_2 = \arg \left(-\frac{V_{td} V_{tb}^*}{V_{ud} V_{ub}^*} \right)$$

CP-Verletzung und der Winkel ϕ_2



Tree level Diagramm



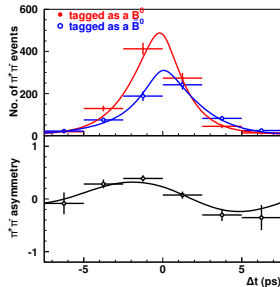
$$a_{CP}(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}; t) - \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP}; t)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}; t) + \Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP}; t)} =$$

$$A_{CP} \cos \Delta m_d \Delta t + S_{CP} \sin \Delta m_d \Delta t$$

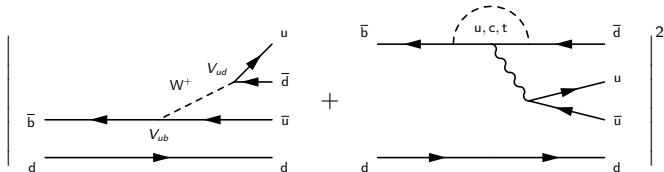
$$\begin{aligned} \lambda_{CP} &= \left(\frac{V_{td} V_{tb}^*}{V_{td}^* V_{tb}} \right) \cdot \left(\frac{V_{ud}^* V_{ub}}{V_{ud} V_{ub}^*} \right) \\ &= e^{-i2(\phi_1 + \phi_3)} \\ &= e^{i2(\phi_2)} \end{aligned}$$

$$A_{CP} = \frac{|\lambda_{CP}|^2 - 1}{|\lambda_{CP}|^2 + 1} = 0$$

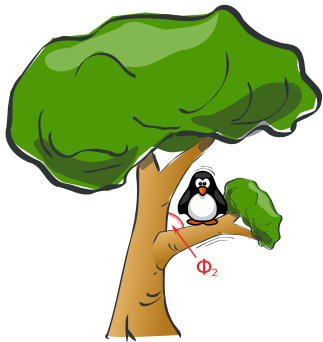
$$S_{CP} = \frac{2 \operatorname{Im} \lambda_{CP}}{|\lambda_{CP}|^2 + 1} = \sin(2\phi_2)$$



Das Pinguin-Diagramm



- naive Abschätzung ergibt eine starke Unterdrückung des Pinguin-Diagramms
- Messung zeigt direkte CP-Verletzung
- Wir messen nur einen $\phi_2^{\text{eff}} = \phi_2 + \Delta\phi_2$



How the penguin distorts the tree level measurement

Eliminierung des Pinguins: Isospinanalyse

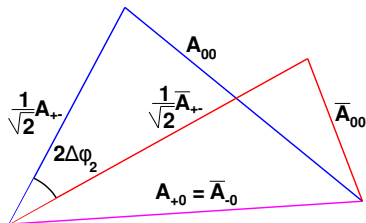
$\phi_2^{\text{eff}} = \phi_2 + \Delta\phi_2$ Jetzt werden die Verzweigungsverhältnisse von folgenden Zerfällen benötigt:

- $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)$
- $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \pi^+\pi^0)$
- $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0)$
- $\mathcal{A}_{CP}(B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)$
- $\mathcal{A}_{CP}(B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0)$
- $\mathcal{S}_{CP}(B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)$

Um die Pinguinbeiträge zu eliminieren nutzen wir die Isospin Relationen aus:

$$A^{+0} = \frac{1}{\sqrt{2}}A^{+-} + A^{00},$$

$$A^{-0} = \frac{1}{\sqrt{2}}\bar{A}^{+-} + \bar{A}^{00}.$$



Vierfache Doppeldeutigkeit

Rekonstruktion der Ereignisse

$$B^0 \rightarrow \pi^+\pi^- \quad (B^0 \rightarrow K^+\pi^-, B^0 \rightarrow K^+K^-)$$

- Kombination von zwei Teilchen mit entgegengesetzter Ladung (Pion Hypothese)

$$\Delta E = E_{rec} - E_{beam}$$

$$M_{BC} = \sqrt{E_{beam}^2 + \vec{p}^2}$$

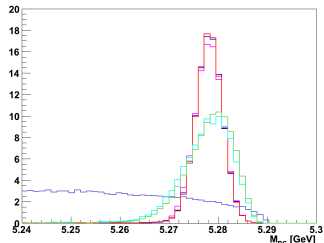
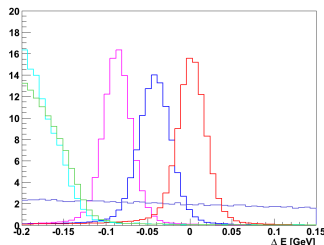
- Vertex-Fit
- B-tag
Bestimmung des Flavours mit dem Rest des Ereignisses

Analysefenster

- $5.24 \text{ GeV} < M_{BC} < 5.3 \text{ GeV}$
- $-0.2 \text{ GeV} < \Delta E < 0.15 \text{ GeV}$
- Elektronenveto

Ereignismultiplizität von 1.01

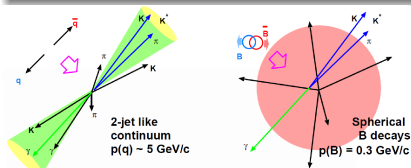
Alle Komponenten normiert



Untergrundunterdrückung

Vorhergehende Belle Analyse (Ishino et al.)

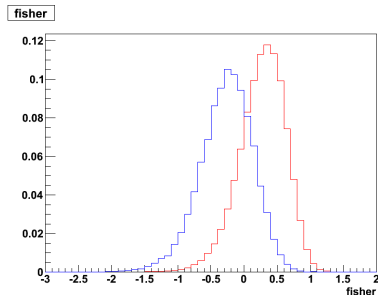
- Schnitt auf die $\frac{b\bar{b}}{q\bar{q}}$ Discriminante
- $K\pi$, KK Yield aus anderen Analysen



Mehr Signal Ereignisse, kleinere statistische Fehler
Rekonstruktionseffizienz von 57%

Neue Methode

- Vermeidung von Schnitten
- Bestimmung von $K\pi$, KK in gleichem Fit



	vorherige Analyse		neue Analyse	
$B^0\bar{B}^0$ Paare	535 mio.	535 mio.	770 mio.	
$\pi^+\pi^-$ Ereignisse	1464	≈ 1680	≈ 2360	

Bestimmung der Signalausbeute

$$\mathcal{L} = PDF_{\pi^+\pi^-} Y_{\pi^+\pi^-} \cdot PDF_{K^+\pi^-} Y_{K^+\pi^-} \cdot PDF_{K^+K^-} Y_{K^+K^-} \cdot PDF_{\text{rare}B^+} Y_{\text{rare}B^+} \cdot PDF_{\text{rare}B^0} Y_{\text{rare}B^0} \cdot PDF_{q\bar{q}} Y_{q\bar{q}}$$

Erweiterter unbinned maximum Likelihood fit:

$$-2 \left[\log(\mathcal{L}) - Y_{\pi^+\pi^-} - Y_{K^+\pi^-} - Y_{K^+K^-} - Y_{\text{rare}B^+} - Y_{\text{rare}B^0} - Y_{q\bar{q}} \right]$$

Falls keine Korrelationen zwischen den einzelnen Komponenten bestehen:

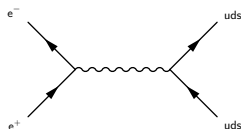
$$PDF_{\pi^+\pi^-} = PDF_{\Delta E} \cdot PDF_{M_{BC}} \cdot PDF_{\mathcal{L}^+} \cdot PDF_{\mathcal{L}^-} \cdot PDF_{\text{fisher}} \cdot PDF_{\Delta t} \cdot PDF_q$$

Andernfalls muss eine höher dimensionale PDF konstruiert werden
→ z.B. Kontinuum Untergrund

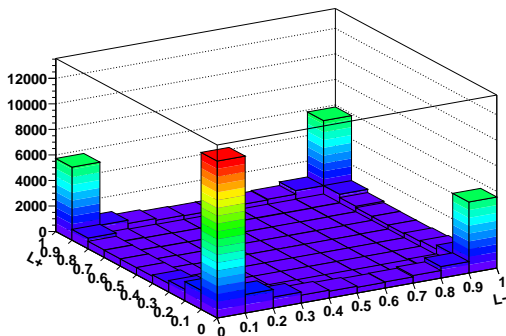
- $\mathcal{BR}(B^0 \Rightarrow \pi^+\pi^-)$
- $A_{cp}(\pi^+\pi^-)$
- $S_{cp}(\pi^+\pi^-)$
- $\mathcal{BR}(B^0 \Rightarrow K^+\pi^-)$
- $A_{cp}(K^+\pi^-)$
- $\mathcal{BR}(B^0 \Rightarrow K^+K^-)$

Korrelationen im Kontinuum Untergrund

- \mathcal{L}^+ := "Likelihood $\frac{K}{\pi}$ des positiven Tracks"
- \mathcal{L}^- := "Likelihood $\frac{K}{\pi}$ des negativen Tracks"



	$\frac{PDF(K)}{PDF(K) + PDF(\pi)}$		
	\mathcal{L}^+	\mathcal{L}^-	q
\mathcal{L}^+	1	16%	-6%
\mathcal{L}^-		1	6%
q			1



Korrelation mit q beseitigt durch Ausnutzung der B-tag Qualität (R)
 Separate $\mathcal{L}^+ \mathcal{L}^-$ -Histogramme für jeden R -bin

Zusammenfassung des Analyseverfahren

- 1 Rekonstruktion von $\pi^+\pi^-$ Monte-Carlo-Ereignissen
- 2 Erstellen einer Probability Density Function (PDF) für den Kanal $\pi^+\pi^-$
- 3 Rekonstruktion und Erstellung einer PDF für alle Untergrund Kanäle
- 4 Konstruktion einer globalen PDF und Minimierung von $-2 \log \mathcal{L}(PDF)$

Vorhergehende Belle Analyse (Ishino et al.)

- 6 Komponenten im Fit
($\Delta E, M_{BC}, \mathcal{L}^+, \mathcal{L}^-, \Delta t, q$)
- Schnitt auf die $\frac{b\bar{b}}{q\bar{q}}$ Discriminante
- Untergrund Yield aus anderen Analysen

Neue Methode

- 7 Komponenten im Fit
($\Delta E, M_{BC}, \mathcal{L}^+, \mathcal{L}^-, \Delta t, q, F_{\frac{b\bar{b}}{q\bar{q}}}$)
- Vermeidung von Schnitten
- Bestimmung des Untergrunds in gleichem Fit

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Neuer Ansatz zur Analyse von $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ und $B^0 \rightarrow K^+K^-$
- Statistischer Zugewinn: Bessere Methode + mehr Luminosität
- Modell für 6 Komponenten und jeweils 7 Observablen fertiggestellt
- Methode zur Korrektur der PID Likelihood Histogramme entwickelt

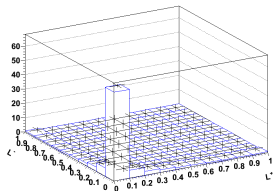
Ausblick

- Toy-Monte-Carlo Ensambletests
Abschätzung der Fehler des Fitters
- Abschätzung der Systematischen Fehler

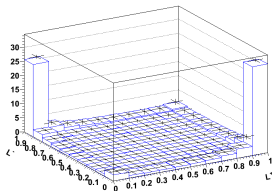
Information in den PID Likelihoods

- Unterscheidung der 3 Signalkanäle
- Messung von A_{CP} bei $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$

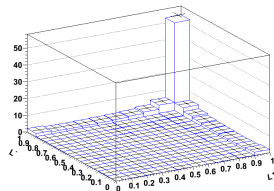
$$B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$$



$$B^0 \rightarrow K^+\pi^-$$



$$B^0 \rightarrow K^+K^-$$



C-Parität

$$C |\Phi\rangle = |\bar{\Phi}\rangle$$

Konjugiert alle multiplikativen Quantenzahlen.

- Elektrische Ladung
- Baryonenzahl, Leptonenzahl
- strangeness, charm, beauty, I_3

P-Parität

$$P |\Phi\rangle = |\tilde{\Phi}\rangle$$

$$P : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix}$$

Entspricht einer Punktspiegelung am Ursprung in 3 Dimensionen

CP-Parität

$$CP |\Phi\rangle = |\bar{\Phi}\rangle$$

Sollte ein Teilchen in sein Antiteilchen überführen ohne die Schwache Wechselwirkung zu brechen. Aber: CP Verletzung 1964 in Kaon Zerfällen gefunden.

CP-Verletzung im Standardmodell

- CP violated in weak interactions
- represented by non-vanishing complex phase in the weak mixing matrix (CKM model, Nobel Prize 2008 for Kobayashi & Maskawa)



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

Precision Measurement of CP-Violation

- verification of the CKM model
- search for new sources of CP Violation \rightarrow New Physics
- B mesons show large CP-Violation, well suited for CP measurements
- high statistics and precision needed to challenge SM