Suche nach dem Zerfall $B^0 \to \eta\phi$ am BABAR-Experiment

Stephan Otto

Institut für Kern- und Teilchenphysik
Technische Universität Dresden

Öffentliche Verteidigung
28. April 2005

Inhalt

Das Standardmodell

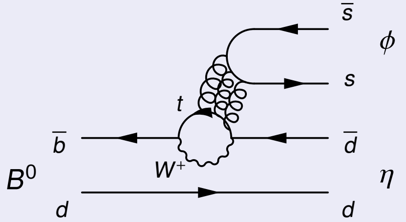
- Leptonen („leichte“, freie Elementarteilchen)
  - e^-, μ^-, τ^-, ν_e, ν_μ, ν_τ
- Quarks (gebundene Elementarteilchen)
  - u, d, s, c, b, t
- Mesonen („mittelschwere“ Teilchen): Quark und Antiquark ($q\bar{q}$)
  - π, K, η, ϕ, D, B, ...
- Baryonen („schwere“ Teilchen): 3 Quarks (qqq)
  - p, n, Λ, Σ, ...
- elektroschwache Wechselwirkung: Photonen, Z- und W-Bosonen
  - $q \to q + \gamma, Z^0$
  - $u \to d' + W^+$
  - $d' = V_{ud}d + V_{us}s + V_{ub}b$
  - V_{ub} komplex $\Rightarrow$ CP-Verletzung
- starke Wechselwirkung: Gluonen
  - $q \to q + g$
- genaue Berechnung von Zerfallsraten und CP-Verletzung
- hypothetische „Higgs“-Teilchen, mehr als 20 Parameter, ...

Quarkzustände

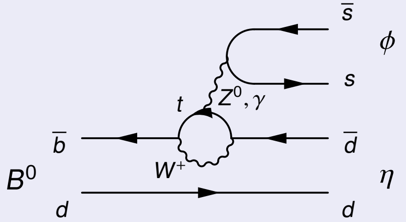
$$
\begin{aligned}
|B^0\rangle &= |d\bar{b}\rangle \\
|\bar{B}^0\rangle &= |b\bar{d}\rangle \\
|\eta\rangle &= \frac{1}{\sqrt{6}}\left(|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle - 2|s\bar{s}\rangle\right) \\
|\phi\rangle &= |s\bar{s}\rangle
\end{aligned}
$$

- reiner „Pinguin"-Zerfall
- b als „Valenz"-Quark
- d als „Zuschauer"-Quark
- „Faktorisierung" in η und ϕ

gluonischer Pinguin



elektroschwacher Pinguin



Theoretische Beschreibung

- Verzweigungsverhältnis des Zerfalls:

$$\mathcal{B}(B^0 \to \eta\phi) = \frac{\Gamma(B^0 \to \eta\phi)}{\Gamma(B^0)}$$

- Partialbreite des Zerfalls:

$$\Gamma(B^0 \to \eta\phi) = \int \left| \langle \eta\phi | \mathcal{H}_{\mathrm{eff}} | B^0 \rangle \right|^2 \mathrm{d}\Phi$$

- effektiver Hamilton-Operator:

$$\mathcal{H}_{\mathrm{eff}} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{tb}^* V_{td} \sum_i C_i \mathcal{O}_i$$

- CKM-Matrix-Elemente V_{tb}, V_{td}: Quark-Mischung
- Wilson-Koeffizienten C_i: perturbative (kurzreichweitige) QCD
- Pinguin-Operatoren $\mathcal{O}_i$: nichtperturbative (langreichweitige) QCD

Experimentelle Bedeutung

- Pinguin-Übergänge: mögliche „neue Physik“ in der Quark-Schleife
  - neue Familien, neue Higgs-Felder, Supersymmetrie, ...
- Pinguin-Beiträge: mögliche „direkte“ *CP*-Verletzung
  - Überlagerung von Pinguin- und „Baum“-Übergängen
- Pinguin-Zerfälle: saubere Untersuchung von Pinguin-Übergängen
  - keine Unterdrückung durch Baum-Übergänge

Experimentelle Bedeutung

- Pinguin-Übergänge: mögliche „neue Physik“ in der Quark-Schleife
  - neue Familien, neue Higgs-Felder, Supersymmetrie, ...
- Pinguin-Beiträge: mögliche „direkte“ *CP*-Verletzung
  - Überlagerung von Pinguin- und „Baum“-Übergängen
- Pinguin-Zerfälle: saubere Untersuchung von Pinguin-Übergängen
  - keine Unterdrückung durch Baum-Übergänge

Vorhersagen

	$\mathcal{B}(B^0 \to \eta\phi)$		
	$N_c = 2$	$N_c = 3$	$N_c = \infty$
Du, Xing (1993)		1.5×10^{-11}	1.0×10^{-7}
Deandrea *et al.* (1994)	1.30×10^{-8}	8.55×10^{-12}	4.8×10^{-8}
Du, Guo (1997)	6.11×10^{-9}		7.73×10^{-8}

Experimentelle Bedeutung

- Pinguin-Übergänge: mögliche „neue Physik“ in der Quark-Schleife
  - neue Familien, neue Higgs-Felder, Supersymmetrie, ...
- Pinguin-Beiträge: mögliche „direkte“ *CP*-Verletzung
  - Überlagerung von Pinguin- und „Baum“-Übergängen
- Pinguin-Zerfälle: saubere Untersuchung von Pinguin-Übergängen
  - keine Unterdrückung durch Baum-Übergänge

Unsicherheiten

- Entwicklungsparameter N_c
- Skalenabhängigkeit
- Quark-Massen

Vorhersagen

	$\mathcal{B}(B^0 \to \eta\phi)$		
	$N_c = 2$	$N_c = 3$	$N_c = \infty$
Du, Xing (1993)		1.5×10^{-11}	1.0×10^{-7}
Deandrea *et al.* (1994)	1.30×10^{-8}	8.55×10^{-12}	4.8×10^{-8}
Du, Guo (1997)	6.11×10^{-9}		7.73×10^{-8}

Experimentelle Bedeutung

- Pinguin-Übergänge: mögliche „neue Physik“ in der Quark-Schleife
  - neue Familien, neue Higgs-Felder, Supersymmetrie, ...
- Pinguin-Beiträge: mögliche „direkte“ *CP*-Verletzung
  - Überlagerung von Pinguin- und „Baum“-Übergängen
- Pinguin-Zerfälle: saubere Untersuchung von Pinguin-Übergängen
  - keine Unterdrückung durch Baum-Übergänge

Unsicherheiten

- Entwicklungsparameter N_c
- Skalenabhängigkeit
- Quark-Massen

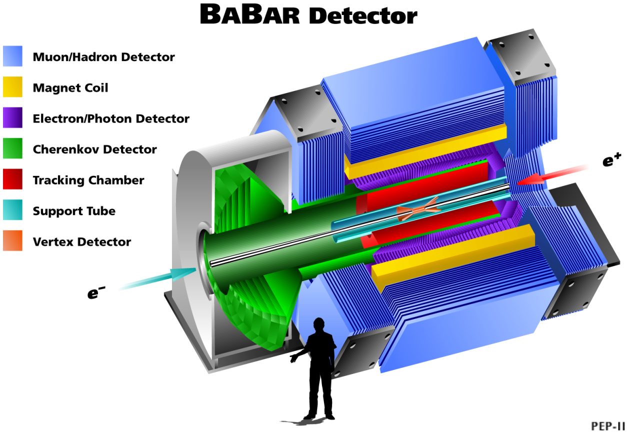
Messung (CLEO)

$$\mathcal{B}(B^0 \to \eta\phi) < 9 \times 10^{-6}\,(90\%)$$

Vorhersagen

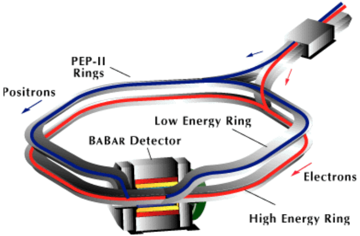
	$\mathcal{B}(B^0 \to \eta\phi)$		
	$N_c = 2$	$N_c = 3$	$N_c = \infty$
Du, Xing (1993)		1.5×10^{-11}	1.0×10^{-7}
Deandrea *et al.* (1994)	1.30×10^{-8}	8.55×10^{-12}	4.8×10^{-8}
Du, Guo (1997)	6.11×10^{-9}		7.73×10^{-8}

Das *BABAR*-Experiment



- $E_{e^-} = 9\,\mathrm{GeV}$
- $E_{e^+} = 3.1\,\mathrm{GeV}$
- $E_{CMS} = 10.6\,\mathrm{GeV}$
- $\beta\gamma = 0.56$
- $L_{goal} = 3\,\mathrm{nb}^{-1}\mathrm{s}^{-1}$
- $L_{max} = 9\,\mathrm{nb}^{-1}\mathrm{s}^{-1}$

$$e^+e^- \to \Upsilon(4S) \to B^0\overline{B}^0$$



Datenanalyse

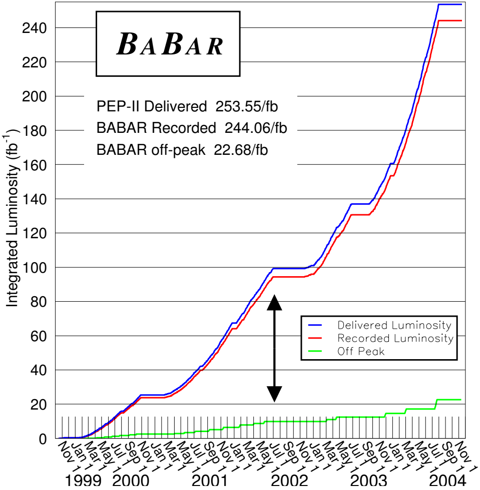
Datensätze

Daten von 1999 bis 2002

- $81.6\,\mathrm{fb}^{-1}$ auf Resonanz
- $\Rightarrow$ 86×10^6 $B\bar{B}$-Paare
- $\Rightarrow$ 277×10^6 $q\bar{q}$-Paare
- $9.6\,\mathrm{fb}^{-1}$ im Kontinuum
- $\Rightarrow$ 33×10^6 $q\bar{q}$-Paare

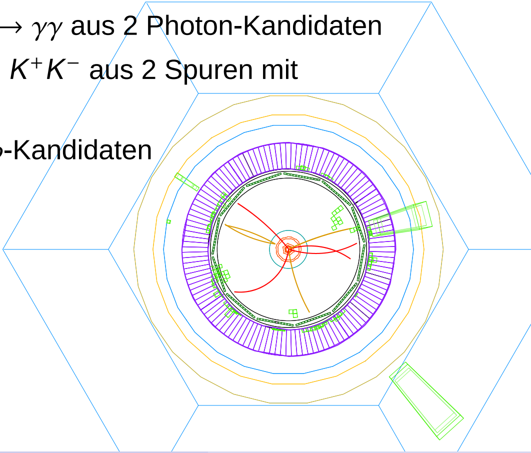
Monte-Carlo-Simulation

- 109×10^6 $B\bar{B}$-Ereignisse
- 76×10^3 „Signal“-Ereignisse



Ereignis-Rekonstruktion

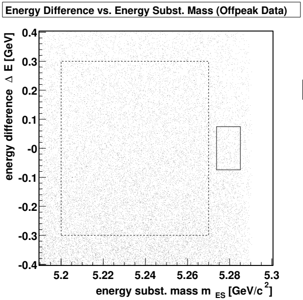
- Spuren in Vertex-Detektor, Driftkammer und Čerenkov-Detektor
- Photon-Kandidaten aus Energie-Clustern im Kalorimeter
- η-Kandidaten im Kanal $\eta \to \gamma\gamma$ aus 2 Photon-Kandidaten
- η-Kandidaten im Kanal $\eta \to \pi^+\pi^-\pi^0$ aus 2 Spuren und π^0-Kandidaten
- π^0-Kandidaten im Kanal $\pi^0 \to \gamma\gamma$ aus 2 Photon-Kandidaten
- ϕ-Kandidaten im Kanal $\phi \to K^+K^-$ aus 2 Spuren mit Kaon-Identifizierung
- B^0-Kandidaten aus η- und ϕ-Kandidaten



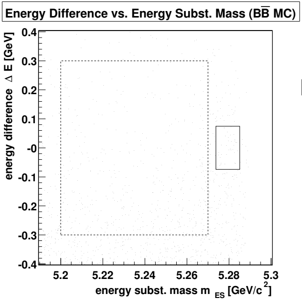
Ereignis-Variablen

$$
\begin{aligned}
(\uparrow) \quad \Delta E &= E_B^* - \tfrac{1}{2} E_0^* \\
(\rightarrow) \quad m_{\mathrm{ES}} &= \sqrt{(\tfrac{1}{2} E_0^*)^2 - {p_B^*}^2}
\end{aligned}
$$

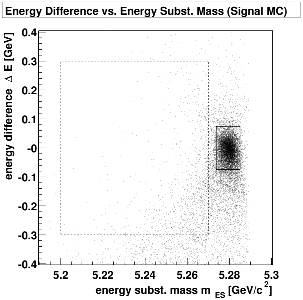
Kontinuum



$B\bar{B}$-MC



Signal-MC

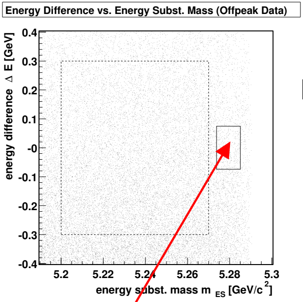


Ereignis-Variablen

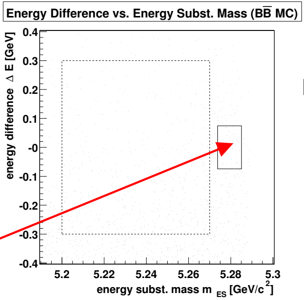
$$(\uparrow) \quad \Delta E = E_B^* - \tfrac{1}{2}E_0^*$$

$$(\rightarrow) \quad m_{ES} = \sqrt{(\tfrac{1}{2}E_0^*)^2 - p_B^{*\,2}}$$

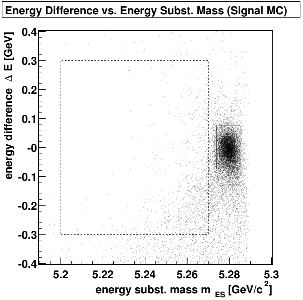
Kontinuum



$B\overline{B}$-MC



Signal-MC



Untergrund

Ereignis-Variablen

Fisher-Diskriminante

$$\mathcal{F} = \sum_{i=1}^{9} c_i \sum_j \left|\boldsymbol{p}_{ij}\right| + c_{10}\left|\cos \measuredangle(\boldsymbol{t}, \boldsymbol{z})\right| + c_{11}\left|\cos \measuredangle(\boldsymbol{p}_0, \boldsymbol{z})\right|$$

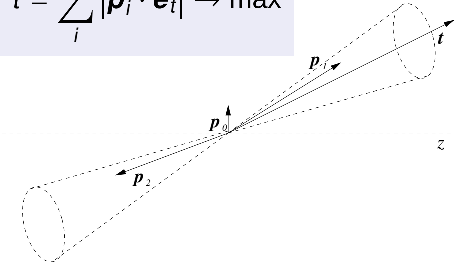
Ereignis-Variablen

Fisher-Diskriminante

$$\mathcal{F} = \sum_{i=1}^{9} c_i \sum_j \left|\boldsymbol{p}_{ij}\right| + c_{10}\left|\cos\measuredangle(\boldsymbol{t},\boldsymbol{z})\right| + c_{11}\left|\cos\measuredangle(\boldsymbol{p}_0,\boldsymbol{z})\right|$$

„Thrust“

$$t = \sum_i \left|\boldsymbol{p}_i \cdot \boldsymbol{e}_t\right| \to \max$$



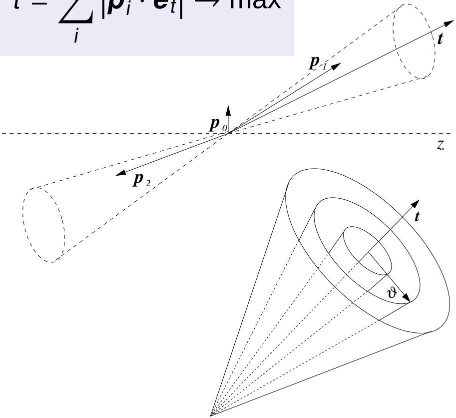
Ereignis-Variablen

Fisher-Diskriminante

$$\mathcal{F} = \sum_{i=1}^{9} c_i \sum_j \left|\boldsymbol{p}_{ij}\right| + c_{10}\left|\cos\measuredangle(\boldsymbol{t},\boldsymbol{z})\right| + c_{11}\left|\cos\measuredangle(\boldsymbol{p}_0,\boldsymbol{z})\right|$$

„Thrust“

$$t = \sum_i \left|\boldsymbol{p}_i \cdot \boldsymbol{e}_t\right| \to \max$$



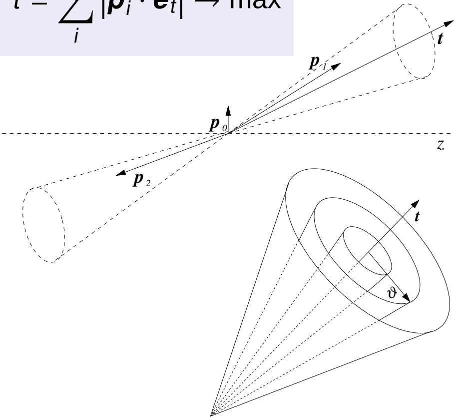
Ereignis-Variablen

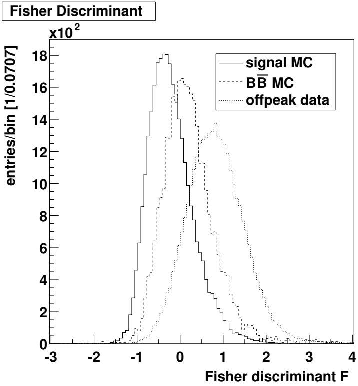
Fisher-Diskriminante

$$\mathcal{F} = \sum_{i=1}^{9} c_i \sum_j \left|\boldsymbol{p}_{ij}\right| + c_{10}\left|\cos \measuredangle(\boldsymbol{t}, \boldsymbol{z})\right| + c_{11}\left|\cos \measuredangle(\boldsymbol{p}_0, \boldsymbol{z})\right|$$

„Thrust“

$$t = \sum_i \left|\boldsymbol{p}_i \cdot \boldsymbol{e}_t\right| \to \max$$

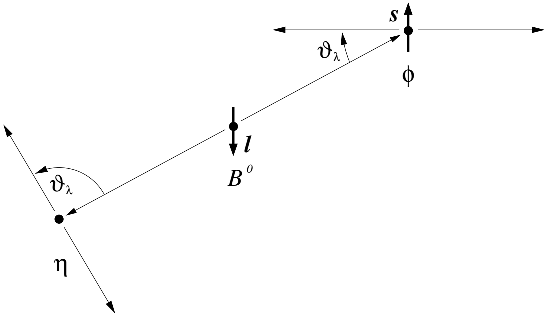


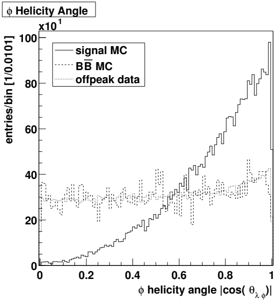


Ereignis-Variablen

„Helizität“

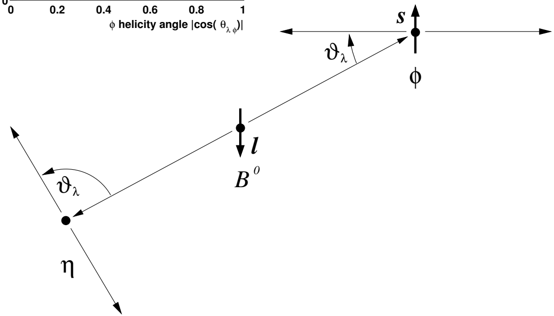
$$\lambda = \frac{\boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{p}}{|\boldsymbol{p}|}$$



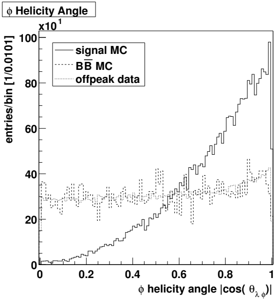


„Helizität“

$$\lambda = \frac{\boldsymbol{s}\cdot\boldsymbol{p}}{|\boldsymbol{p}|}$$

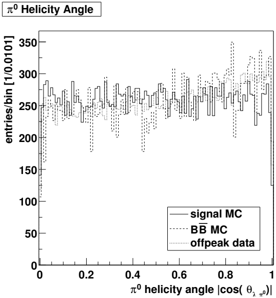


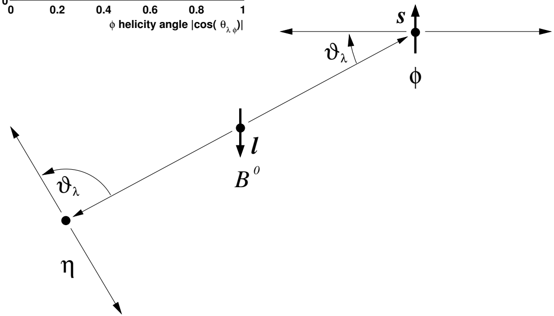
Ereignis-Variablen

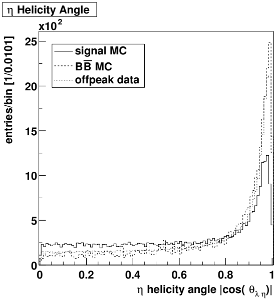


„Helizität“

$$\lambda = \frac{\boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{p}}{|\boldsymbol{p}|}$$

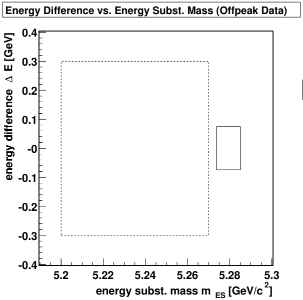




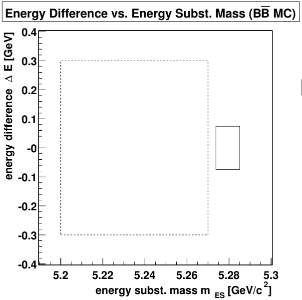


$$
\begin{array}{llcl}
(\uparrow) & \Delta E & = & E_B^* - \frac{1}{2}E_0^* \\
(\rightarrow) & m_{ES} & = & \sqrt{(\frac{1}{2}E_0^*)^2 - {p_B^*}^2}
\end{array}
$$

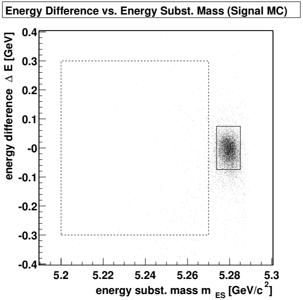
Kontinuum



$B\bar{B}$-MC



Signal-MC

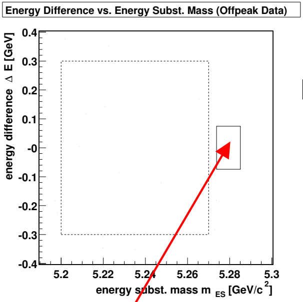


Ereignis-Variablen

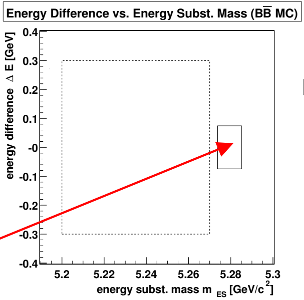
$$(\uparrow) \quad \Delta E = E_B^* - \tfrac{1}{2} E_0^*$$

$$(\rightarrow) \quad m_{ES} = \sqrt{(\tfrac{1}{2} E_0^*)^2 - p_B^{*\,2}}$$

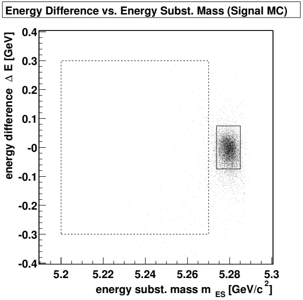
Kontinuum



$B\bar{B}$-MC

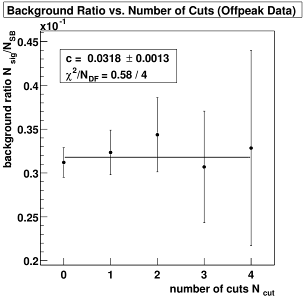


Signal-MC



Unsicherheit

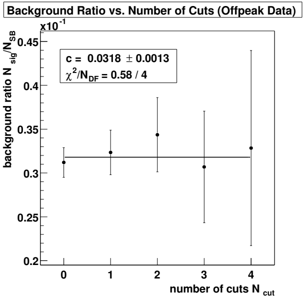
Abzählmethode

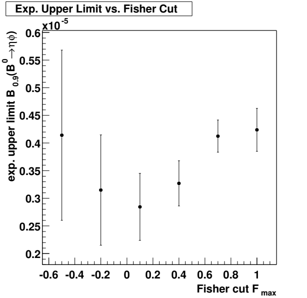


1. Einträge in der Signalbox: N_{sig}
2. Einträge im Seitenband: N_{SB}
3. Untergrundverhältnis aus Kontinuum:

$$R = \frac{N_{\mathrm{sig}}}{N_{\mathrm{SB}}}$$

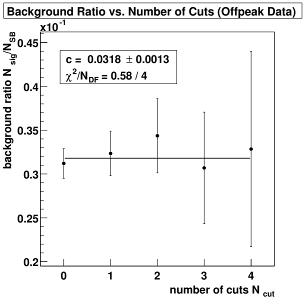
Abzählmethode

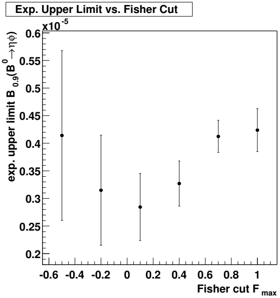




1. Einträge in der Signalbox: N_{sig}
2. Einträge im Seitenband: N_{SB}
3. Untergrundverhältnis aus Kontinuum:
$$R = \frac{N_{\mathrm{sig}}}{N_{\mathrm{SB}}}$$
4. Optimierung der Schnitte

Abzählmethode





1. Einträge in der Signalbox: N_{sig}
2. Einträge im Seitenband: N_{SB}
3. Untergrundverhältnis aus Kontinuum:
$$R = \frac{N_{\text{sig}}}{N_{\text{SB}}}$$
4. Optimierung der Schnitte
5. Untergrundabzug:
$$S = N_{\text{sig}} - R\, N_{\text{SB}}$$
6. Selektionseffizienz aus Signal-MC:
$$\varepsilon = \frac{N_{\text{sig}}}{N_{B^0}}$$
7. Verzweigungsverhältnis:
$$\mathcal{B}(B^0 \to \eta\phi) = \frac{S}{\varepsilon\, \mathcal{B}(\eta)\, \mathcal{B}(\phi)\, N_{B^0}}$$

Maximum-Likelihood-Methode

- N Ereignisse $i = 1 \ldots N$
- 2 Kategorien j: Signal ($j = 1$), Untergrund ($j = 2$)
- 6 Variablen x_k ($k = 1 \ldots 6$) mit Werten x_{ik} und Dichten f_{jk}
- 2 Parameter: Signal-Erwartung (S), Untergrund-Erwartung (B)

globale Likelihood-Funktion

$$\mathcal{L} = \mathcal{P}(S + B) \prod_{i=1}^{N} \left(S\,\mathcal{P}_1(\boldsymbol{x}_i) + B\,\mathcal{P}_2(\boldsymbol{x}_i) \right)$$

Poisson-Dichte

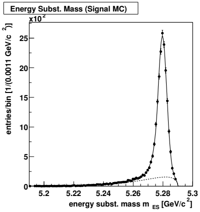
$$\mathcal{P}(n) = n^N e^{-n}$$

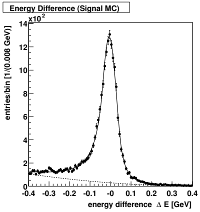
Variablen-Dichten

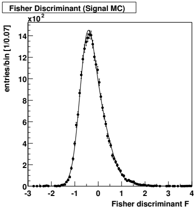
$$\mathcal{P}_j(\boldsymbol{x}_i) = \prod_{k=1}^{6} f_{jk}(x_{ik})$$

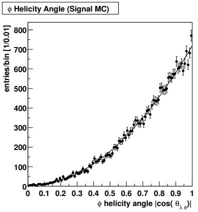
Maximum-Likelihood-Methode

Signal



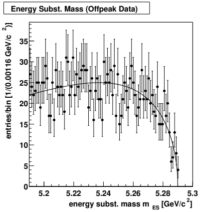


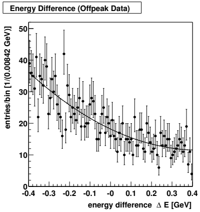


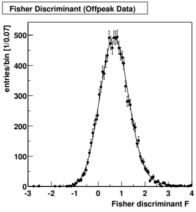


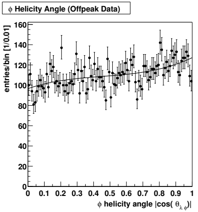
m_{ES} ΔE $\mathcal{F}$ $|\cos(\vartheta_\lambda)|$

Untergrund



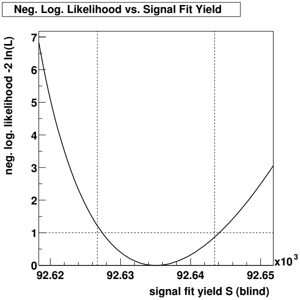






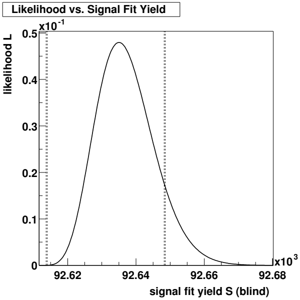
Maximum-Likelihood-Methode

neg. log. Likelihood



$$-2 \ln \mathcal{L} = \frac{\left(S - \overline{S}\right)^2}{\sigma_S^2}$$

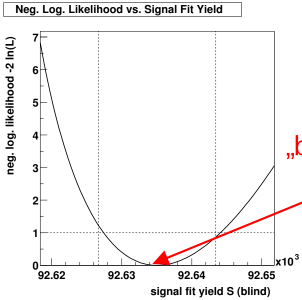
normierte Likelihood



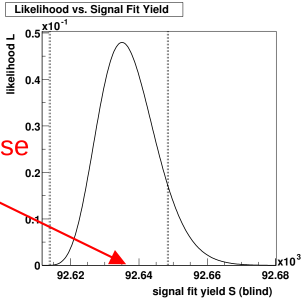
$$\int_{\delta_S}^{S_{0.9}} \mathcal{L}\, \mathrm{d}S = 0.9$$

Maximum-Likelihood-Methode

neg. log. Likelihood



normierte Likelihood

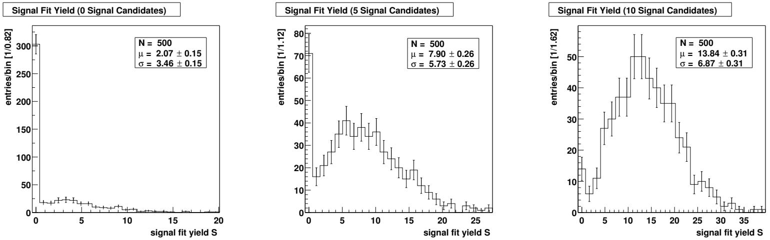


„blinde“ Analyse

$$-2 \ln \mathcal{L} = \frac{\left(S - \overline{S}\right)^2}{\sigma_S^2}$$

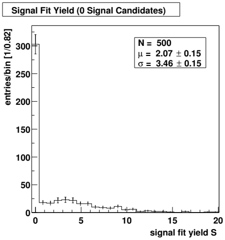
$$\int_{\delta_S}^{S_{0.9}} \mathcal{L}\, dS = 0.9$$

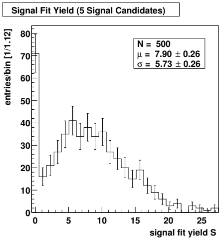
Maximum-Likelihood-Methode

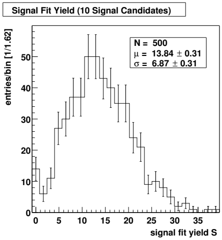


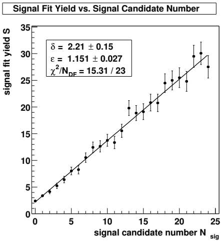
1. „Spielzeug"-Monte-Carlo-Simulationen mit N_{sig} Signal-Ereignissen
2. Verteilung der Signal-Erwartung $\overline{S}$

Maximum-Likelihood-Methode





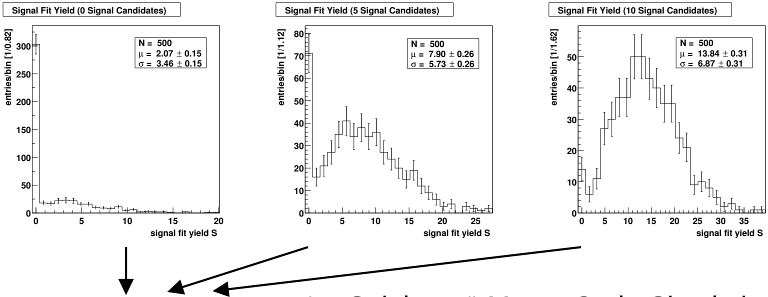


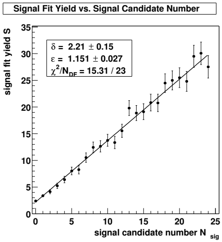


1. „Spielzeug"-Monte-Carlo-Simulationen mit N_{sig} Signal-Ereignissen
2. Verteilung der Signal-Erwartung $\overline{S}$
3. Effizienz ε_S und Verschiebung δ_S:

$$\overline{S} = \varepsilon_S \, N_{\text{sig}} + \delta_S$$

Maximum-Likelihood-Methode

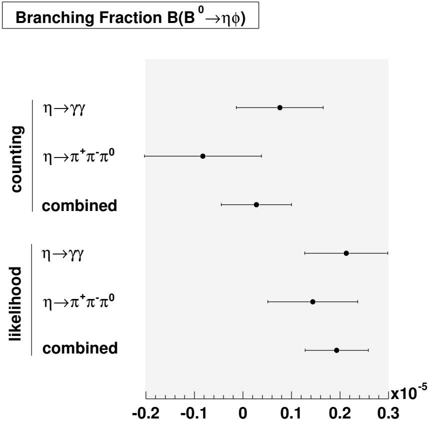


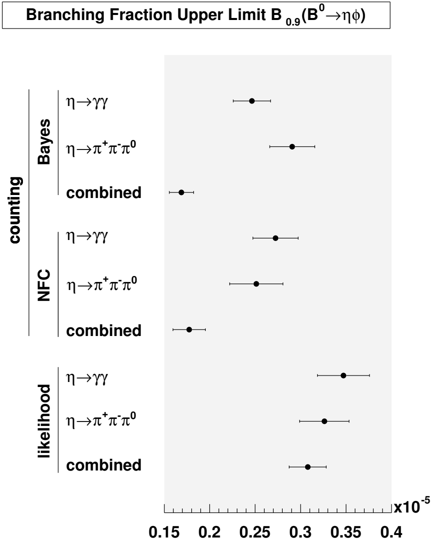


1. „Spielzeug"-Monte-Carlo-Simulationen mit N_{sig} Signal-Ereignissen
2. Verteilung der Signal-Erwartung $\overline{S}$
3. Effizienz ε_S und Verschiebung δ_S:
$$\overline{S} = \varepsilon_S \, N_{\mathrm{sig}} + \delta_S$$
4. korrigierte Signal-Erwartung:
$$S' = \overline{S} - \delta_S$$

Systematische Unsicherheiten

- statistische Unsicherheit der Selektionseffizienz
- statistische Unsicherheit des Untergrundverhältnisses
- Abweichung der Signalverteilung in Simulation und Daten
- Abweichung der Untergrundverteilung in Kontinuum- und Resonanzdaten
- Anteil von Signalereignissen im Resonanzdaten-Seitenband
- Anteil von $B\overline{B}$-Untergrund-Ereignissen in Kontinuum-Untergrund-Erwartung
- Unsicherheit der Photon-Rekonstruktions-Effizienz
- Unsicherheit der Spur-Rekonstruktions-Effizienz
- Unsicherheit der Kaon-Identifizierungs-Effizienz
- Unsicherheit der Anzahl der $B\overline{B}$-Paare
- Unsicherheit der Verzweigungsverhältnisse der η- und ϕ-Zerfälle


Branching Fraction $B(B^0 \to \eta\phi)$
counting
$\eta\to\gamma\gamma$
$\eta\to\pi^+\pi^-\pi^0$
combined
likelihood
$\eta\to\gamma\gamma$
$\eta\to\pi^+\pi^-\pi^0$
combined
-0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3
$x10^{-5}$


Branching Fraction Upper Limit $B_{0.9}(B^0 \to \eta\phi)$
counting
Bayes
$\eta\to\gamma\gamma$
$\eta\to\pi^+\pi^-\pi^0$
combined
NFC
$\eta\to\gamma\gamma$
$\eta\to\pi^+\pi^-\pi^0$
combined
likelihood
$\eta\to\gamma\gamma$
$\eta\to\pi^+\pi^-\pi^0$
combined
0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4
$x10^{-5}$

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Suche nach dem Zerfall $B^0 \to \eta\phi$ in *BABAR*-Daten von 1999 bis 2002
- Kinematische Variablen (m_{ES}, ΔE, ...)
- Ereignisform-Variablen (Fisher-Diskriminante, Helizitätswinkel)
- Abzählmethode (Schnitte, Zählung, Untergrundabzug)
- Maximum-Likelihood-Methode (Variablen-Dichten, Anpassung)
- blinde Analyse zur Vermeidung von persönlicher Beeinflussung
- Bestimmung aller systematischen Unsicherheiten
- (noch) keine statistisch signifikante Beobachtung
- kleinere Unsicherheit des Likelihood-Ergebnisses

Zusammenfassung

- Suche nach dem Zerfall $B^0 \to \eta\phi$ in *BABAR*-Daten von 1999 bis 2002
- Kinematische Variablen (m_{ES}, ΔE, ...)
- Ereignisform-Variablen (Fisher-Diskriminante, Helizitätswinkel)
- Abzählmethode (Schnitte, Zählung, Untergrundabzug)
- Maximum-Likelihood-Methode (Variablen-Dichten, Anpassung)
- blinde Analyse zur Vermeidung von persönlicher Beeinflussung
- Bestimmung aller systematischen Unsicherheiten
- (noch) keine statistisch signifikante Beobachtung
- kleinere Unsicherheit des Likelihood-Ergebnisses

$$\mathcal{B}(B^0 \to \eta\phi) < 3.28 \times 10^{-6}\,(90\%)$$

Zusammenfassung

- Suche nach dem Zerfall $B^0 \to \eta\phi$ in *BABAR*-Daten von 1999 bis 2002
- Kinematische Variablen (m_{ES}, ΔE, ...)
- Ereignisform-Variablen (Fisher-Diskriminante, Helizitätswinkel)
- Abzählmethode (Schnitte, Zählung, Untergrundabzug)
- Maximum-Likelihood-Methode (Variablen-Dichten, Anpassung)
- blinde Analyse zur Vermeidung von persönlicher Beeinflussung
- Bestimmung aller systematischen Unsicherheiten
- (noch) keine statistisch signifikante Beobachtung
- kleinere Unsicherheit des Likelihood-Ergebnisses

$$\mathcal{B}(B^0 \to \eta\phi) < 3.28 \times 10^{-6}\,(90\%)$$

- konsistent mit theoretischen Vorhersagen
- 3-fache Genauigkeit der vorherigen Messung