
Messung von zeitabhängigen Asymmetrien

- Zwei Beispiele:
 - $B_d \rightarrow J/\Psi K_s$
 - B_s -Mischung
- Welche Werkzeuge brauchen wir?
- Was begrenzt die Auflösung?
- Welches Experiment hat welche Stärken und Schwächen?

Kurze Erinnerung

$$|B_L\rangle = p|B^0\rangle + q|\bar{B}^0\rangle \quad A_f = \langle f|\mathcal{H}|B^0\rangle$$

$$|B_H\rangle = p|B^0\rangle - q|\bar{B}^0\rangle \quad \bar{A}_{\bar{f}} = \langle \bar{f}|\mathcal{H}|\bar{B}^0\rangle$$

$$\left|\frac{q}{p}\right| \neq 1 \rightarrow \text{CP Verletzung in Mixing}$$

$$\left|\frac{\bar{A}_{\bar{f}}}{A_f}\right| \neq 1 \rightarrow \text{CP Verletzung im Zerfall}$$

$$\lambda_f = \frac{q}{p} \frac{\bar{A}_{\bar{f}}}{A_f} \quad \text{Im}(\lambda_f) \neq 0 \rightarrow \text{Interferenz zwischen Mischung und Zerfall}$$

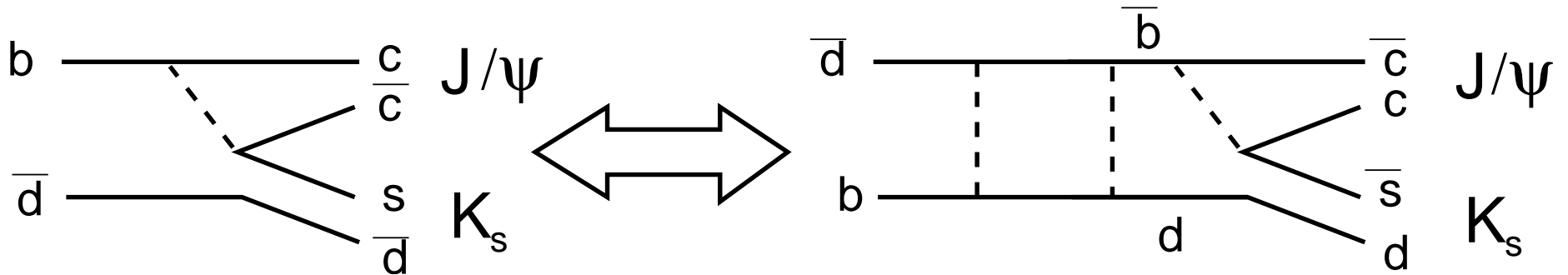
$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{CP}(t) &= \frac{\Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP})} \\ &= -\frac{1 - |\lambda_f|^2}{1 + |\lambda_f|^2} \cos(\Delta mt) + \frac{2\text{Im}\lambda_f}{1 + |\lambda_f|^2} \sin(\Delta mt) \end{aligned}$$

$$\text{Im}(\lambda_f) = -\eta_f \sin[2 * (\phi_{mix} + \phi_f)]$$

$$CP|f\rangle = \eta_f|f\rangle$$

$B_d \rightarrow J/\psi K_s$

Gleicher Endzustand erreichbar durch Zerfall & Mischung+Zerfall



- CP Verletzung in B-Mixing vernachlässigbar
- CP Verletzung in Zerfall vernachlässigbar
- $CP(J/\psi K_s) = -1$

$$\begin{aligned}
 \mathcal{A}(t) &= \frac{\Gamma(\bar{B} \rightarrow J/\psi K_s)(t) - \Gamma(B \rightarrow J/\psi K_s)(t)}{\Gamma(\bar{B} \rightarrow J/\psi K_s)(t) + \Gamma(B \rightarrow J/\psi K_s)(t)} \\
 &= -1 * \sin(2(\phi_{mix} + \phi_{J/\psi K_s})) * \sin(\Delta m_d t)
 \end{aligned}$$

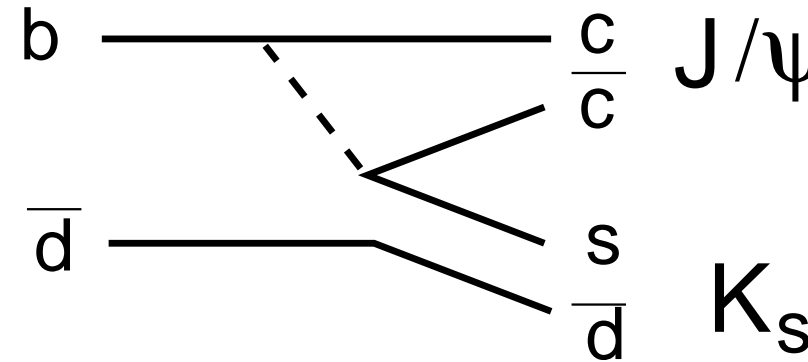
$\phi_{mix}; \phi_{J/\psi K_s}$: Phase in B-Mischung und Zerfall

$CP|J/\psi K_s\rangle$

B_d : $J^P = 0^{-1}$ (Pseudoskalar)

J/ψ : : $J^{CP} = 1^{-1-1}$ (Vector)

K_s : : $J^{CP} = 0^{-1-1}$ (Pseudoskalar)



$CP|J/\psi K_s\rangle$

B_d : $J^P = 0^{-1}$ (Pseudoskalar)

J/ψ : : $J^{CP} = 1^{-1-1}$ (Vector)

K_s : : $J^{CP} = 0^{-1-1}$ (Pseudoskalar)

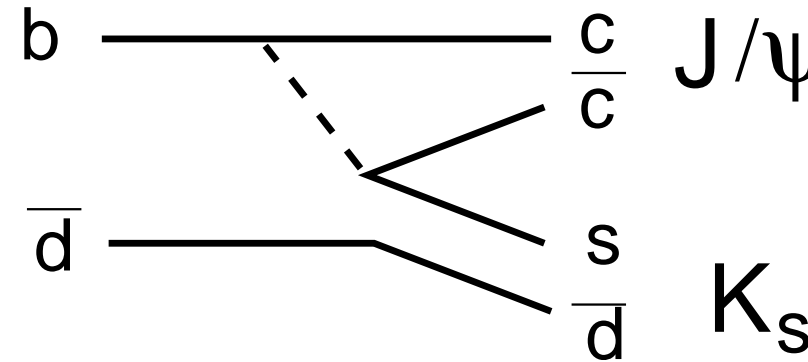
Drehimpulserhaltung:

$$0 = J(J/\psi\phi) = |\vec{S} + \vec{L}|; \rightarrow L = 1$$

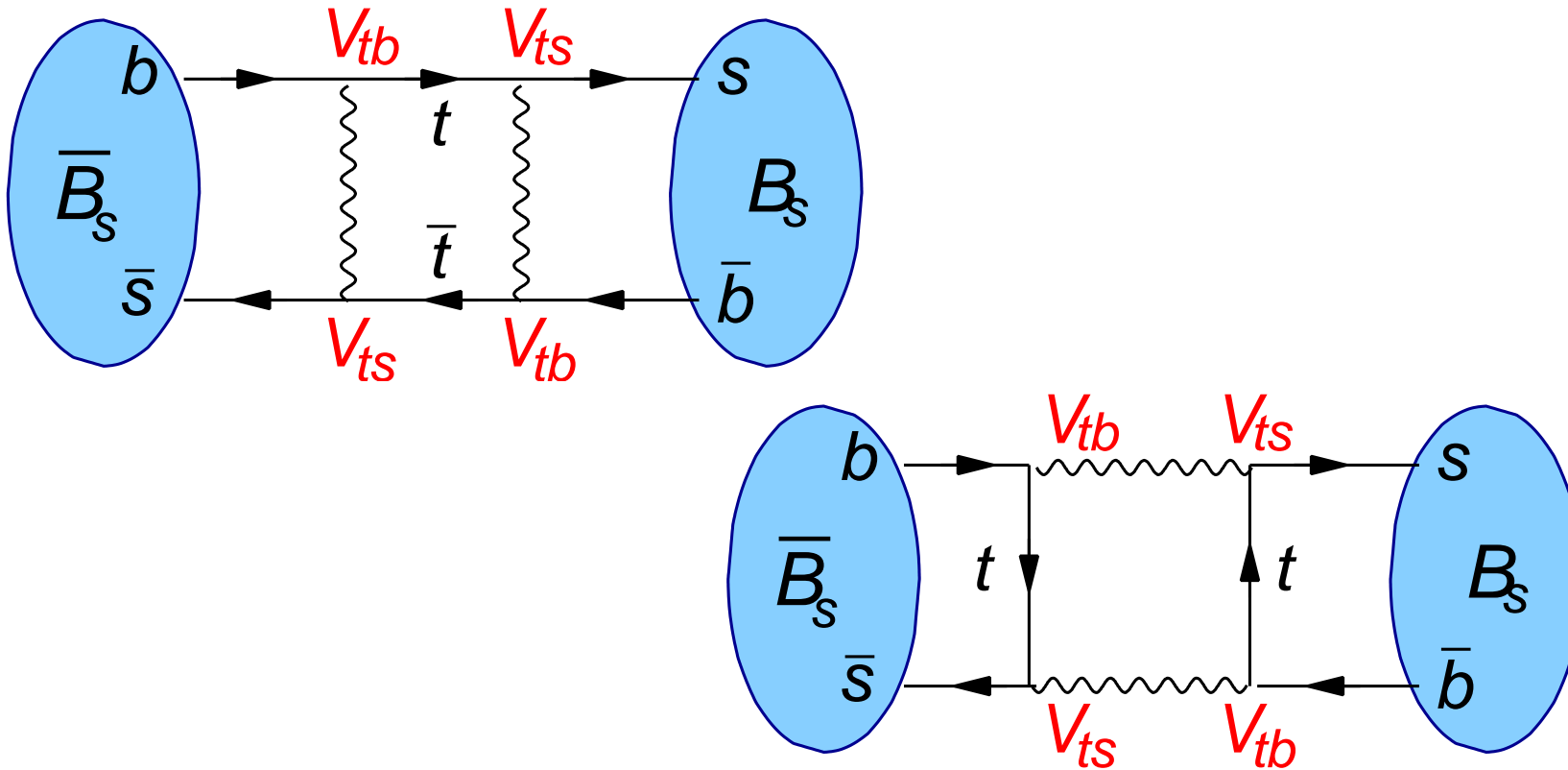
$$P(J/\psi\phi) = P(J/\psi) * P(\phi) * (-1)^L$$

$$\begin{aligned} CP(J/\psi\phi) &= CP(J/\psi) * CP(\phi) * (-1)^L \\ &= -1; \end{aligned}$$

\rightarrow CP odd Endzustand ($\omega = -1$)



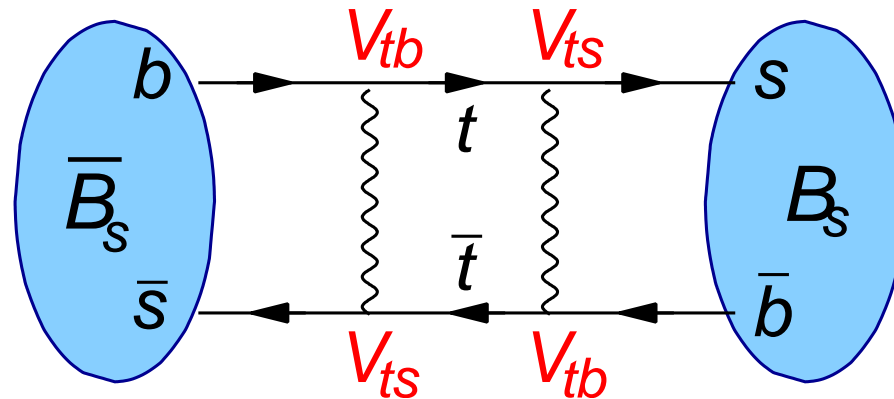
CP Verletzung in B Mischung



2 dominate Graphen mit gleicher Phase;
 t dominiert in Schleife (GIM -Mechanismus)

GIM Mechanismus

GIM: Glashow, Iliopolus, Maiani (1970)



Bei gleichen Quark-Massen, keine Mischung möglich:

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

Top Beitrag dominiert nicht, weil es das schwerste Quark ist,
sondern weil $m_u \sim m_c \neq m_t$

Historisch führte das zur Vorhersage des charm Quarks!

CP Verletzung in B Mischung

Model unabhängig: CP Verletzung in Mischung $< \mathcal{O}\left(\frac{\Delta\Gamma}{\Delta m}\right)$

	B_d	B_s
$\Delta m = m_H - m_L$	0.5 ps^{-1}	17.8 ps^{-1}
$\Delta\Gamma/\Gamma = (\Gamma_L - \Gamma_H)/\Gamma$	$\mathcal{O}(0.01)$	$\mathcal{O}(0.1)$
$\tau = 1/\Gamma$	1.5 ps	1.5 ps

CP Verletzung in B Mischung

Model unabhängig: CP Verletzung in Mischung $< \mathcal{O}\left(\frac{\Delta\Gamma}{\Delta m}\right)$

	B_d	B_s
$\Delta m = m_H - m_L$	0.5 ps^{-1}	17.8 ps^{-1}
$\Delta\Gamma/\Gamma = (\Gamma_L - \Gamma_H)/\Gamma$	$\mathcal{O}(0.01)$	$\mathcal{O}(0.1)$
$\tau = 1/\Gamma$	1.5 ps	1.5 ps

$$\frac{\Delta\Gamma}{\Delta m} = \frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} \frac{\Gamma}{\Delta m} = \frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} \frac{1}{\tau * \Delta m}$$

$$B_d : \mathcal{O}(0.01) \frac{1}{1.5 \text{ ps} * 0.5 \text{ ps}^{-1}} \sim \mathcal{O}(0.01)$$

$$B_s : \mathcal{O}(0.1) \frac{1}{1.5 \text{ ps} * 18 \text{ ps}^{-1}} \sim \mathcal{O}(0.01)$$

CP-Verletzung in $B_{d/s}$ Mischung ist vernachlässigbar!

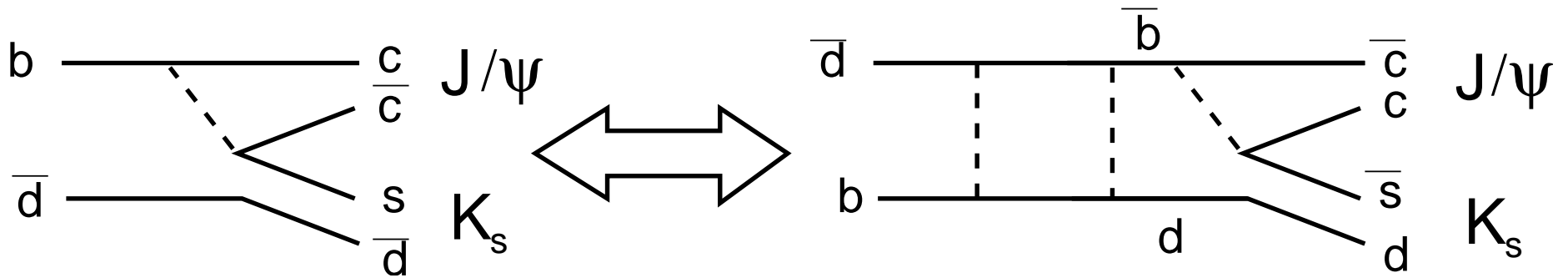
CP Verletzung im Zerfall

Keine Pinguinverschmutzung:

Es gibt keine signifikanten Beiträge von (Pinguin)-Diagrammen mit zusätzlicher Phase in $B_d \rightarrow J/\psi K_s$ (laut Theoretikern)



$B_d \rightarrow J/\psi K_s$

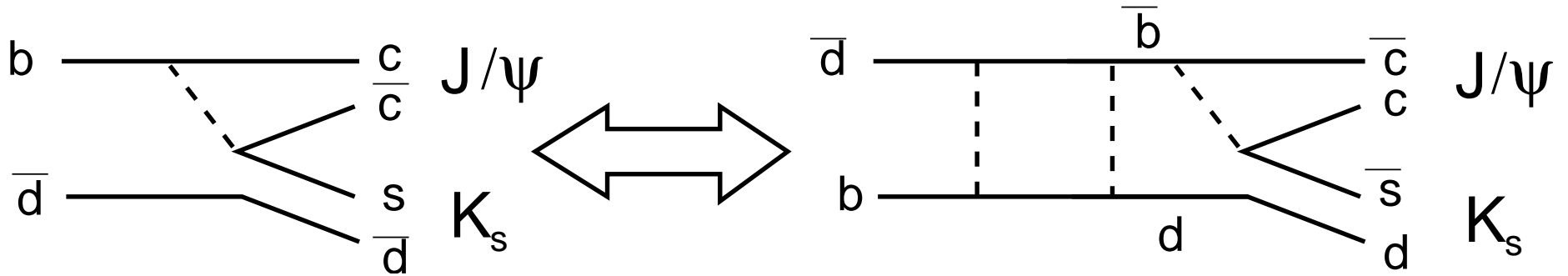


$$\begin{aligned}
 \mathcal{A}(t) &= \frac{\Gamma(\bar{B} \rightarrow J/\psi K_s)(t) - \Gamma(B \rightarrow J/\psi K_s)(t)}{\Gamma(\bar{B} \rightarrow J/\psi K_s)(t) + \Gamma(B \rightarrow J/\psi K_s)(t)} \\
 &= \sin 2(\phi_{mix} + \phi_{J/\psi K_s}) * \sin(\Delta m_d t)
 \end{aligned}$$

$$\phi_{mix} = ?$$

$$\phi_{J/\psi K_s} = ?$$

$B_d \rightarrow J/\psi K_s$



$$\begin{aligned}
 \mathcal{A}(t) &= \frac{\Gamma(\bar{B} \rightarrow J/\psi K_s)(t) - \Gamma(B \rightarrow J/\psi K_s)(t)}{\Gamma(\bar{B} \rightarrow J/\psi K_s)(t) + \Gamma(B \rightarrow J/\psi K_s)(t)} \\
 &= \sin 2(\phi_{mix} + \phi_{J/\psi K_s}) * \sin(\Delta m_d t)
 \end{aligned}$$

$$\phi_{mix} = \arg(V_{td}V_{tb}^*)$$

$$\phi_{J/\psi K_s} = \arg((V_{cb}V_{cd}^*)(V_{us}V_{ud}^*))$$

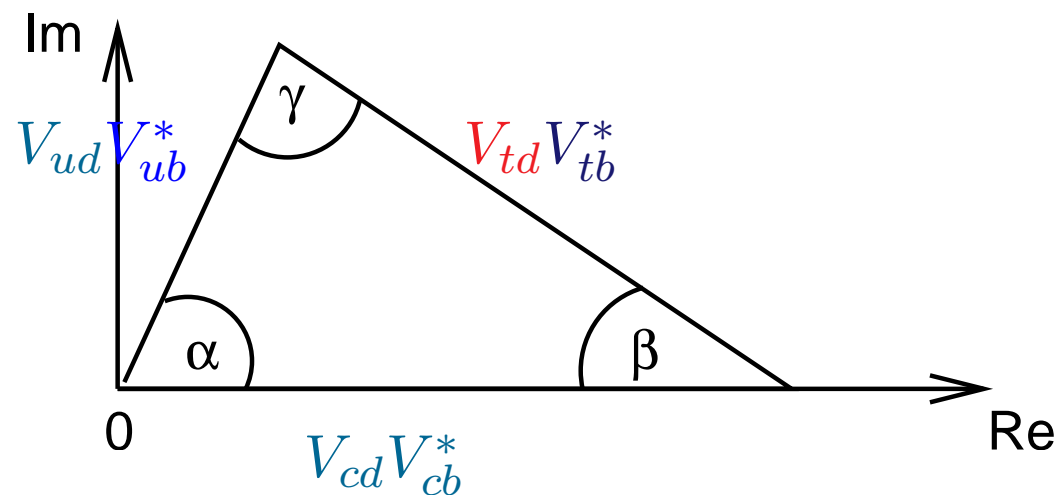
$B_d \rightarrow J/\psi K_s$

$$A(t) = \sin 2(\phi_{mix} + \phi_{J/\psi K_s}) * \sin(\Delta m_d t)$$

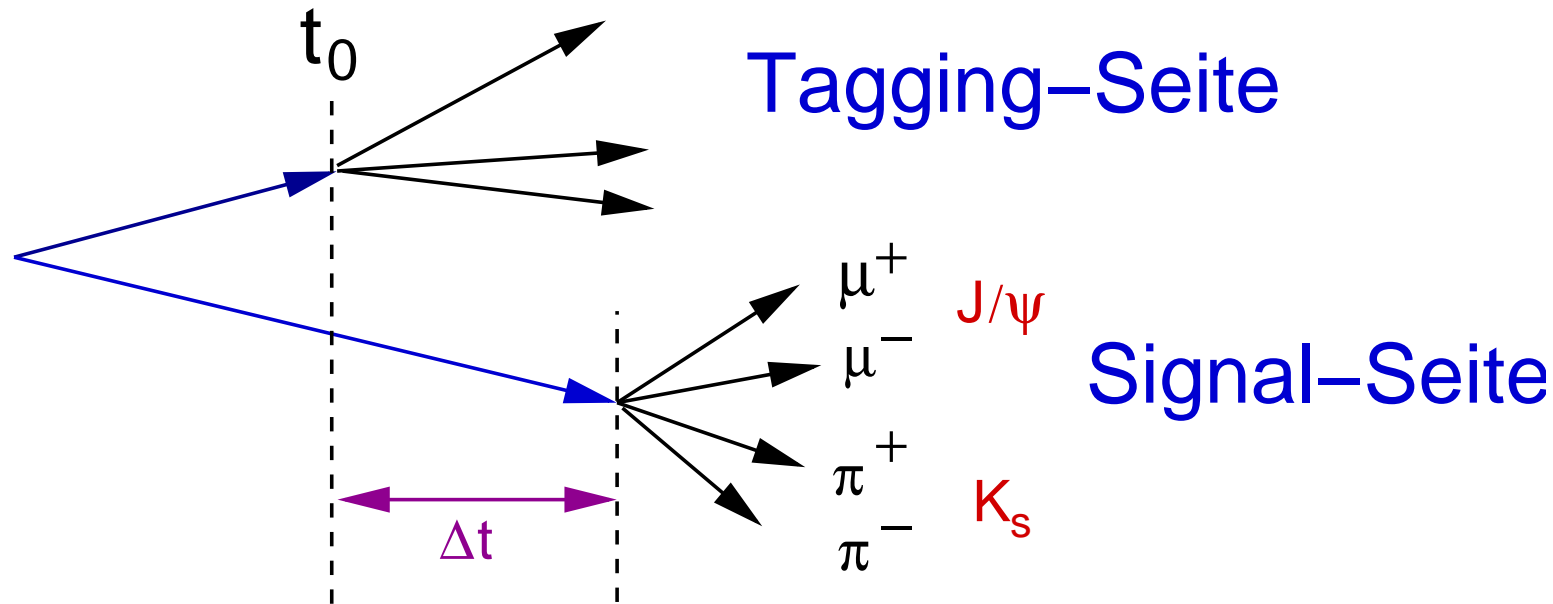
$$\phi_{mix} = \arg(V_{td} V_{tb}^*)$$

$$\phi_{J/\psi K_s} = \arg((V_{cb} V_{cd}^*)(V_{us} V_{ud}^*))$$

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$



$$B_d \rightarrow J/\psi K_s$$

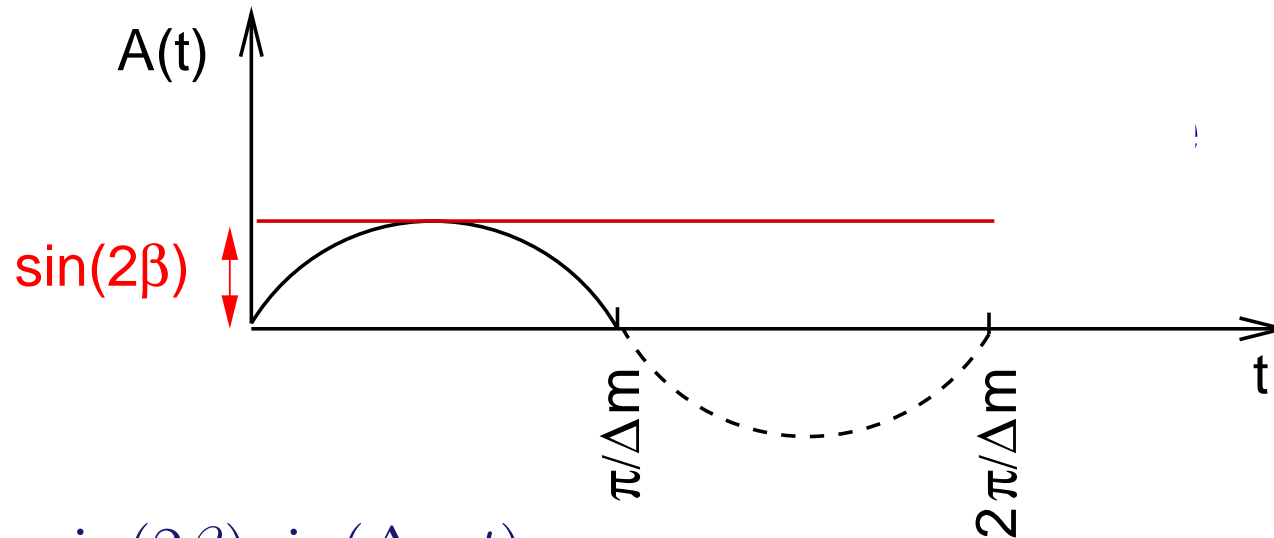
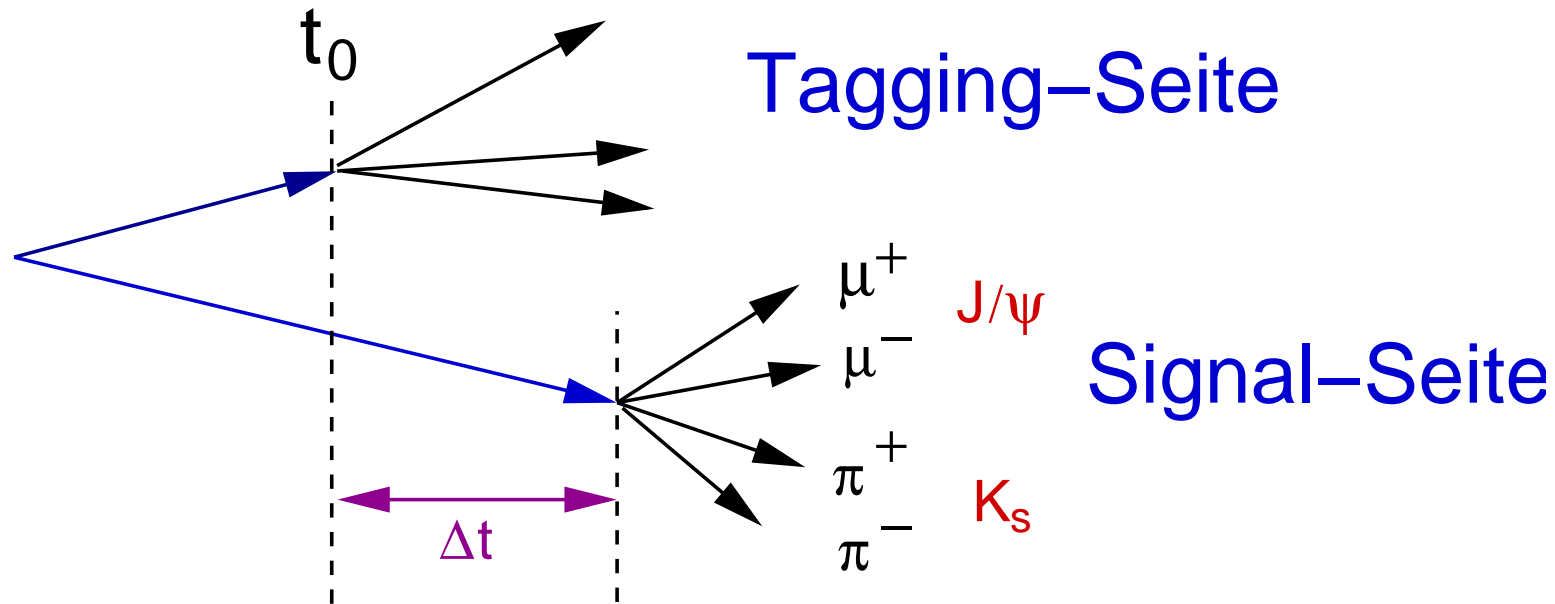


$$\mathcal{A}(t) = \frac{\Gamma(\bar{B} \rightarrow J/\psi K_s)(t) - \Gamma(B \rightarrow J/\psi K_s)(t)}{\Gamma(\bar{B} \rightarrow J/\psi K_s)(t) + \Gamma(B \rightarrow J/\psi K_s)(t)}$$

Bei B-Fabriken verschränkte Zustände

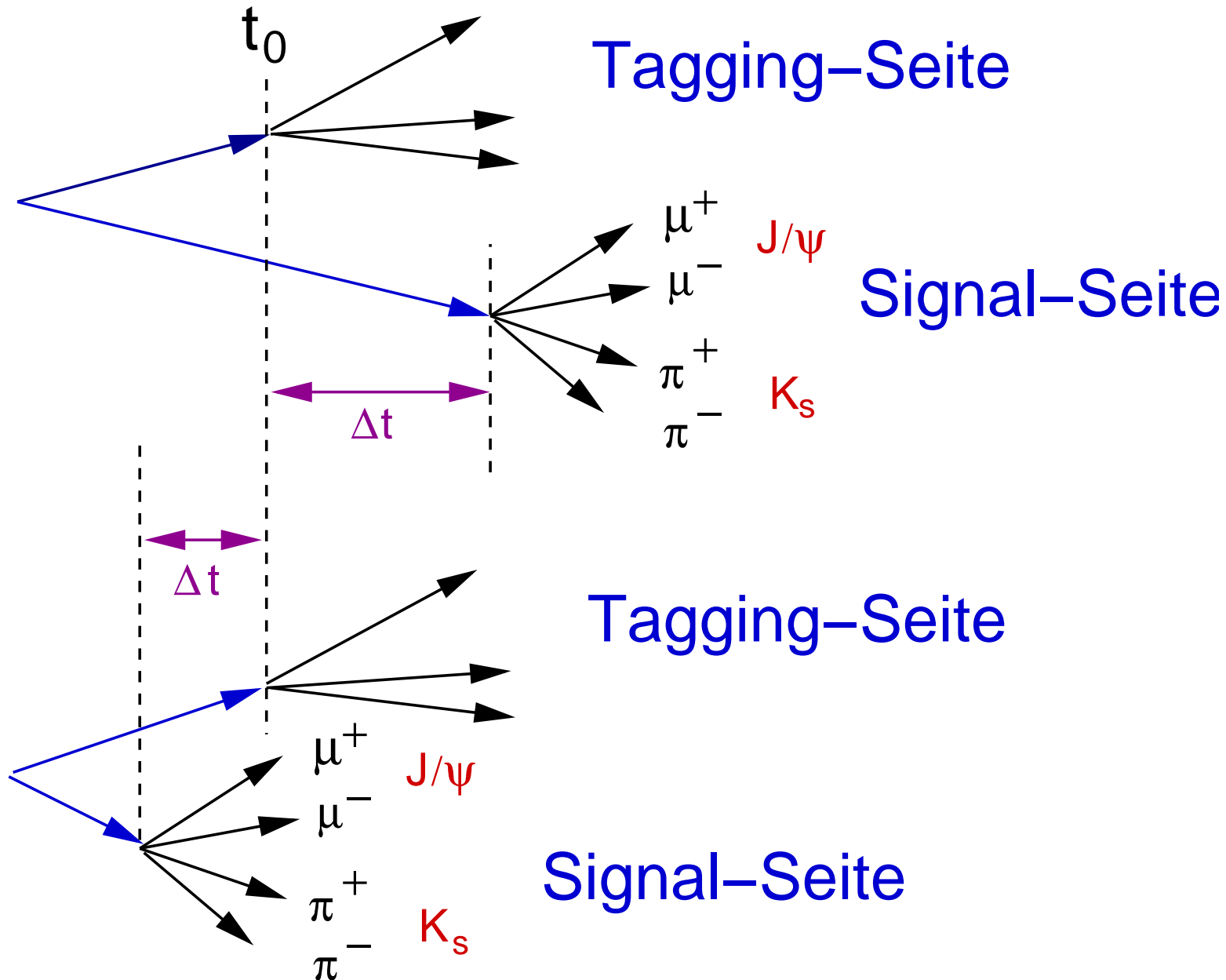
→ bei $t = t_0$ Flavour des Signal-B festgelegt durch Flavour des Tagging-B.

$$B_d \rightarrow J/\psi K_s$$

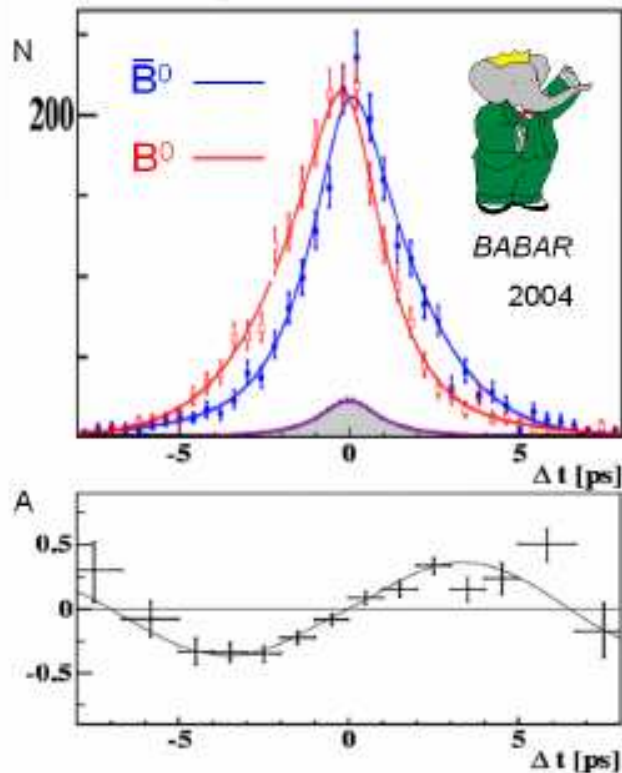


$$\mathcal{A}(t) = \sin(2\beta) \sin(\Delta m t)$$

$B_d \rightarrow J/\psi K_s$



$B_d \rightarrow J/\psi K_s$



$$\mathcal{A}(t) = \sin(2\beta) \sin(\Delta m_d t)$$

Babar:

$$\sin(2\beta) = 0.722 \pm 0.040 \pm 0.023$$

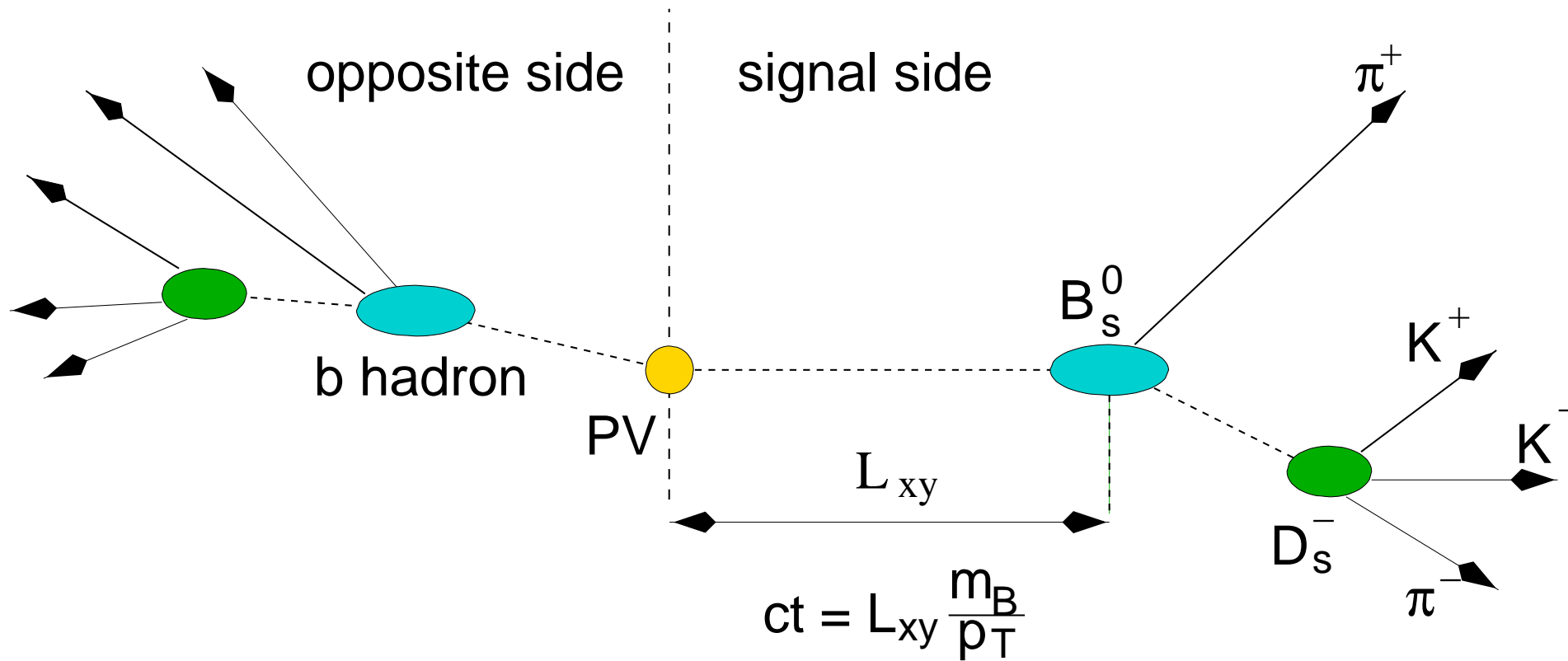
Belle:

$$\sin(2\beta) = 0.652 \pm 0.039 \pm 0.020$$

Warum ist gemessene “Raw-Asymmetrie” kleiner als $\sin(2\beta)$?

Welche Grössen bestimmen die (erreichbare) Auflösung?

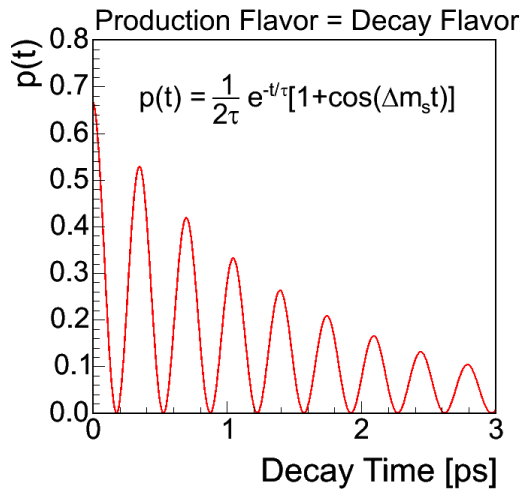
B_s -Mixing



- 1) B_s Rekonstruktion/Selektion
- 2) Messung der Eigenzeit
- 3) Flavour tagging

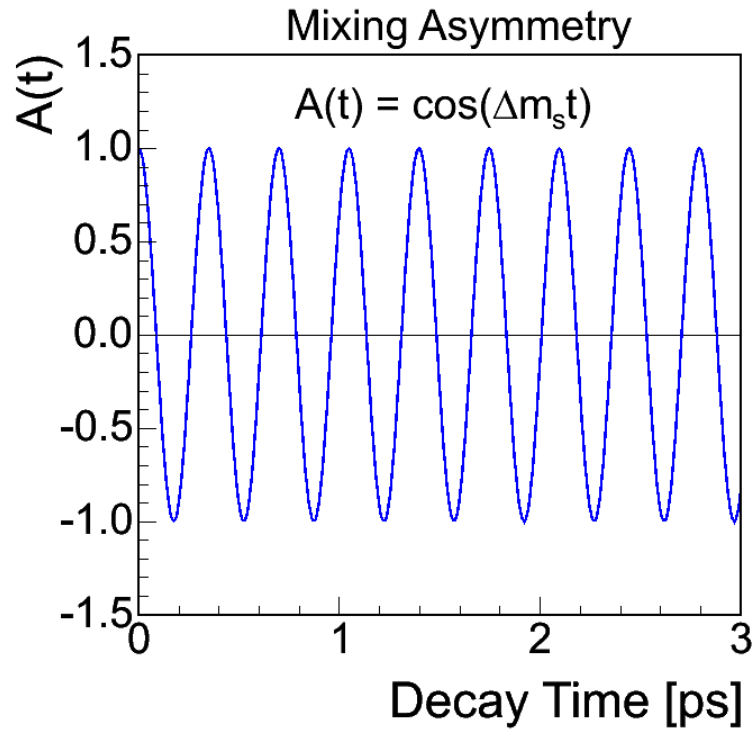
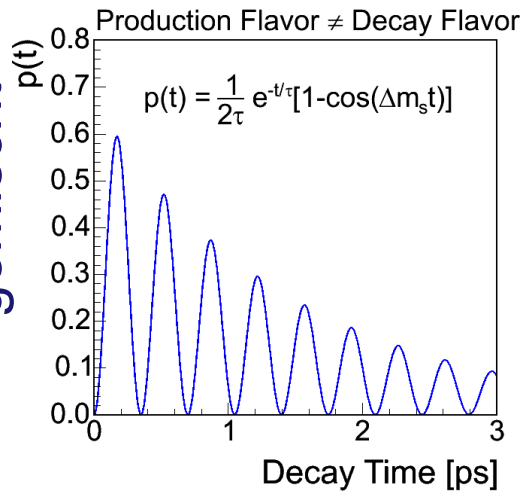
Zeitabhängige Asymmetrie

ungemischt

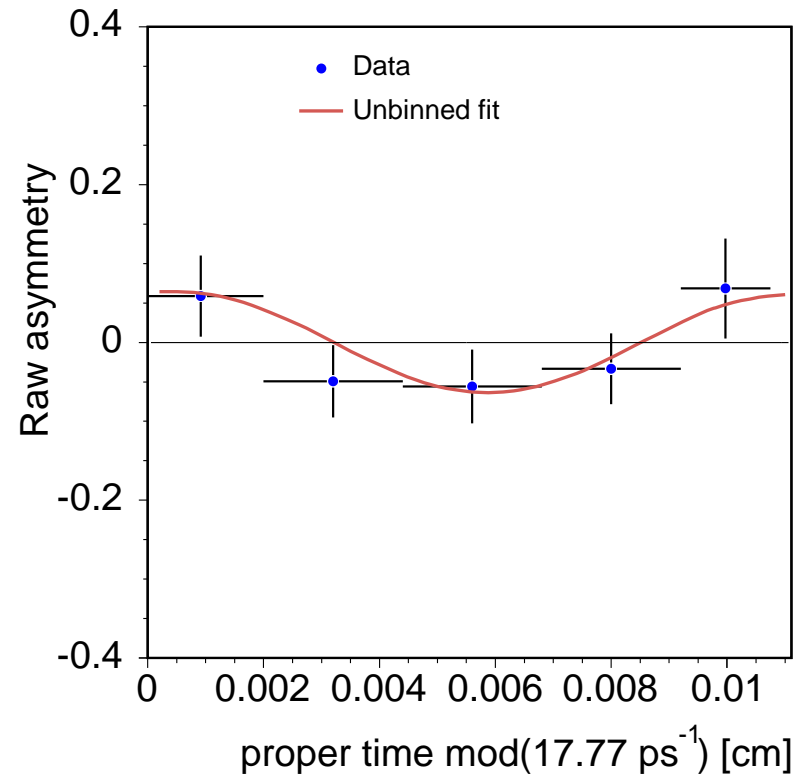
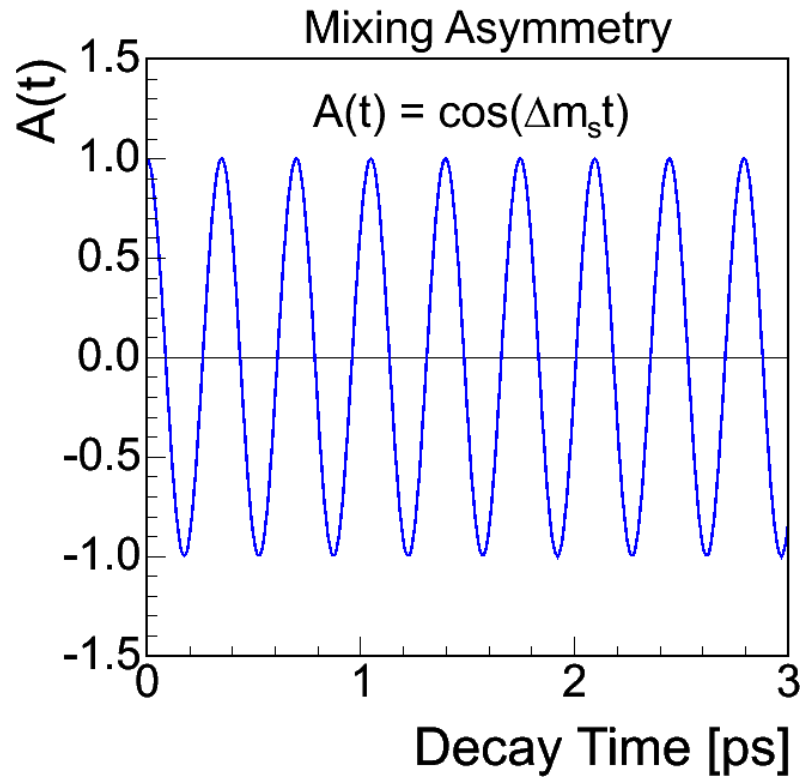


$$A(t) = \frac{N(t)_{ungem.} - N(t)_{gem.}}{N(t)_{ungem.} + N(t)_{gem.}} = \cos(\Delta m_s t)$$

gemischt



Zeitabhängige Asymmetrie



???

Unsicherheiten auf Asymmetrie

S : Anzahl rekonstruierter Signal-Ereignisse

S/B : Wie rein ist das Signal?

$\sigma(ct)$: Eigenzeitauflösung (Ortsauflösung + Impulsauflösung)

ϵ : Tagging Effizienz

D : Dilution (Tagging Reinheit)

“Statistische” Unsicherheit:

$$\sigma(\mathcal{A}) = \sqrt{\frac{2}{S\epsilon D^2}} \sqrt{\frac{S+B}{S}} e^{\frac{(\Delta m_{s/d}\sigma_{ct})^2}{2}}$$

Tagging Dilution

$$\mathcal{A}(t) = \frac{N(B_0 \rightarrow J/\psi K_s)(t) - N(\bar{B}_0 \rightarrow J/\psi K_s)(t)}{N(B_0 \rightarrow J/\psi K_s)(t) + N(\bar{B}_0 \rightarrow J/\psi K_s)(t)}$$

Gemessene Asymmetrie:

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{\text{gemessen}}(t) &= \frac{N(B_0)'(t) - N(\bar{B}_0)'(t)}{N(B_0)'(t) + N(\bar{B}_0)'(t)} \\ &= \frac{N(B_0)(t)(1 - P_{mt}) + N(\bar{B}_0)(t)P_{mt} - N(\bar{B}_0)(t)(1 - P_{mt}) - N(B_0)(t)P_{mt}}{N_{RS}(t) + N_{WS}(t)} \\ &= (1 - 2P_{mt}) \frac{N_{B_0}(t) - N_{\bar{B}_0}(t)}{N_{B_0}(t) + N_{\bar{B}_0}(t)} = (1 - 2P_{mt})\mathcal{A}(t) = D\mathcal{A}(t) \end{aligned}$$

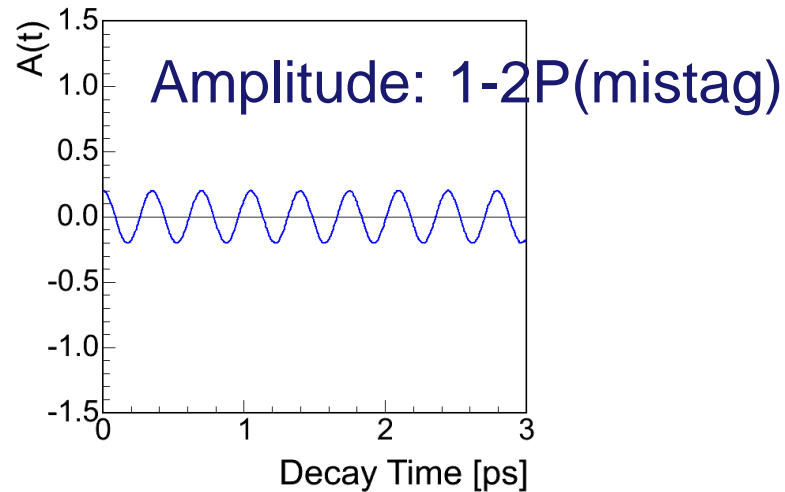
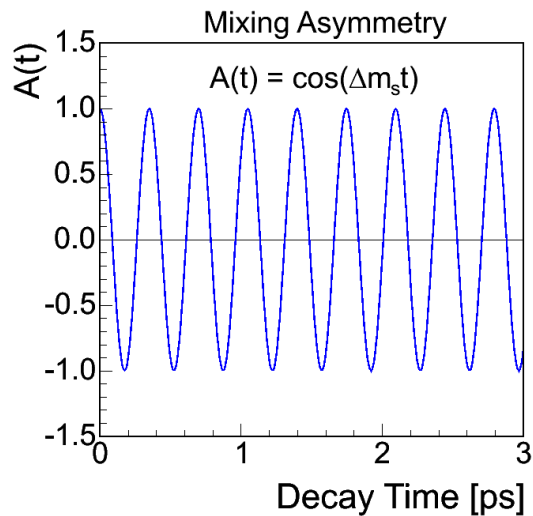
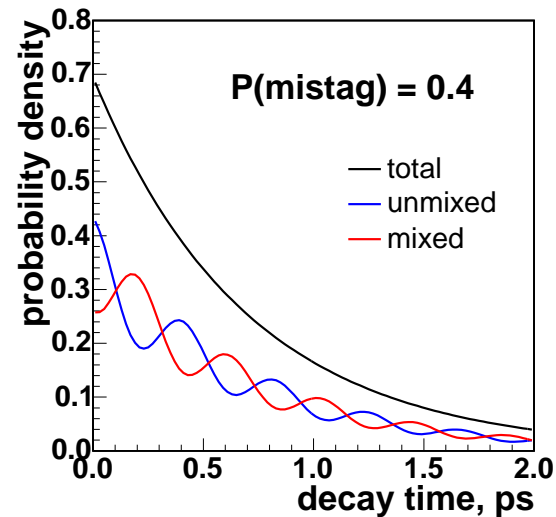
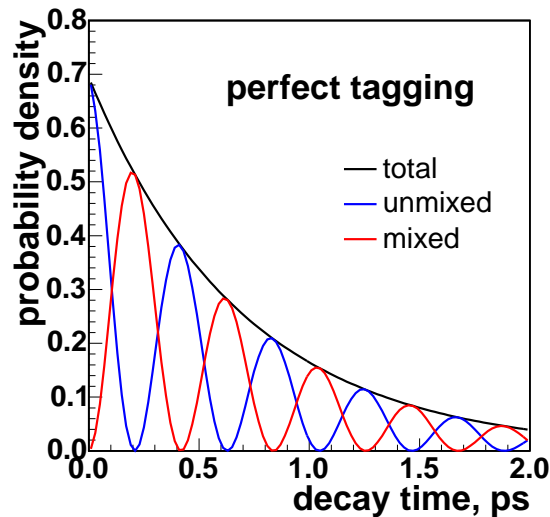
$N'_{B_0}/N'_{\bar{B}_0}$: als B_0/\bar{B}_0 getaggte Zustände

P_{mt} : Mistag-Wahrscheinlichkeit

D : Tagging Dilution

Auswirkung der Tagging Dilution

Mis-tag **dämpft** die beobachtete Oszillation!



Asymmetry Measurement

Tagging dilution $D = 1 - 2P_{mt}$

Immer richtig \leftrightarrow 100% Dilution; zufälliger Tag ($P_{mt} = 50\%$) \leftrightarrow 0% Dilution;

Tagging Effizienz $\epsilon = \frac{N_{tagged}}{N_{all}}$

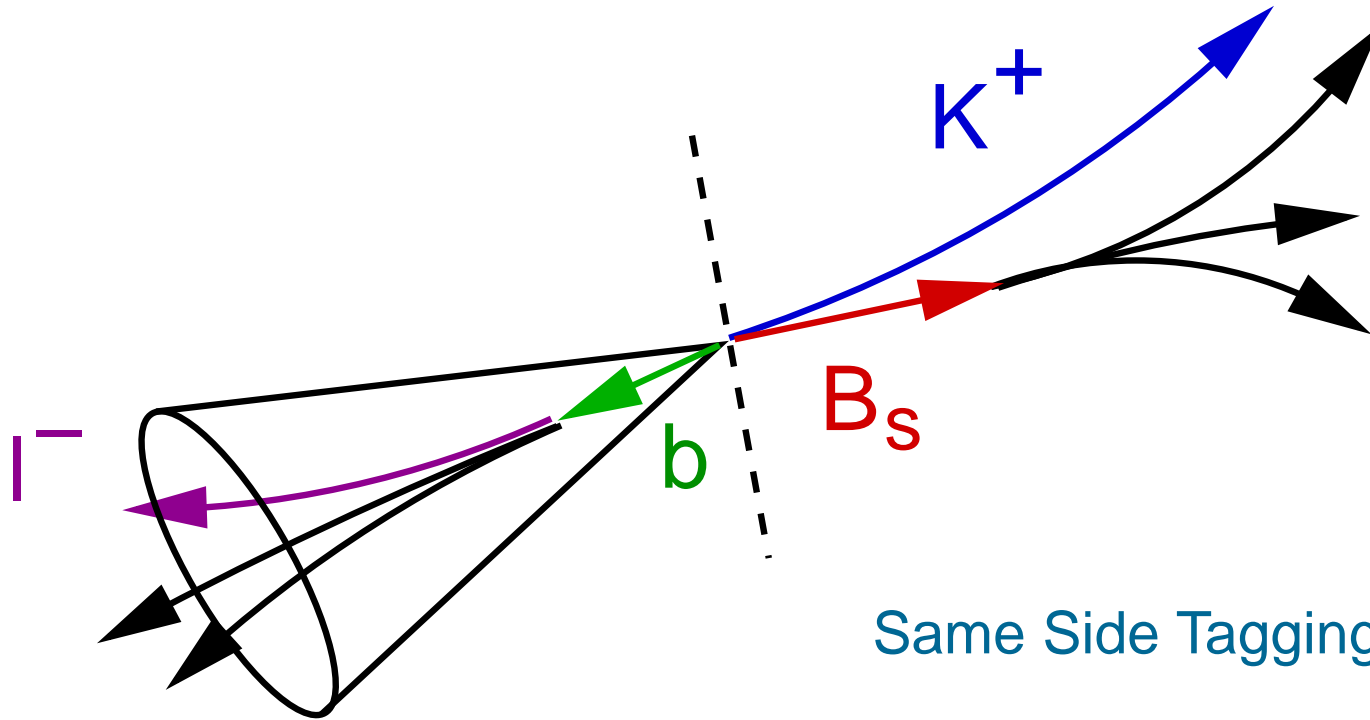
Effektive statistische Grösse des Datensatzes

$$\rightarrow N_{eff} = N_{all} \times \epsilon D^2.$$

[%]	ϵD^2	Reduktion des Datensatzes
D0/CDF	2.5 - 5.0	\times 20-50
BABAR/BELLE	\approx 30	\times 3-4
LHCb (MC Studien)	\approx 8%	\times 12

e^+e^- Experimente eine Grössenordnung besser!

Flavour Tagging Methoden



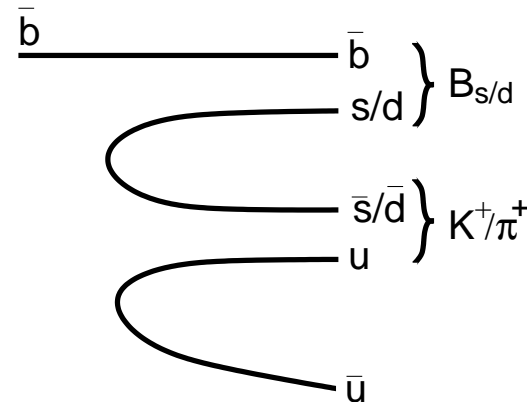
Same Side Tagging

Opposite Side Tagging

$b\bar{b}$ Paarproduktion

→ korrelierte Produktionsflavour

Inklusive Reko. des OS B



Nicht bei $Y(4S)$ möglich!
(keine Fragmentation)

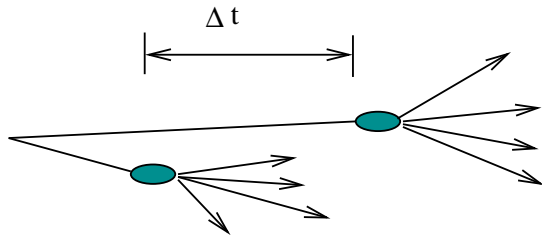
Warum sind OS Tagger schlechter bei $p\bar{p}$?

- Oszillation des tagging B verschlechtert Dilution ($P_{mt} = 12\%$).

OST taggen auf Zerfallsflavour des tagging B .

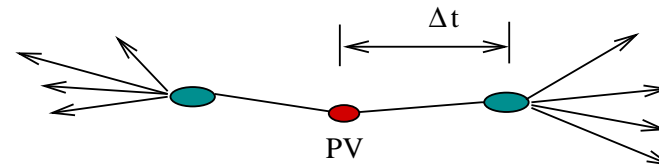
$e^+e^- @ Y(4S)$:

Zerfallsflavour des OS B
und Produktionsflavour
des Signal B korreliert

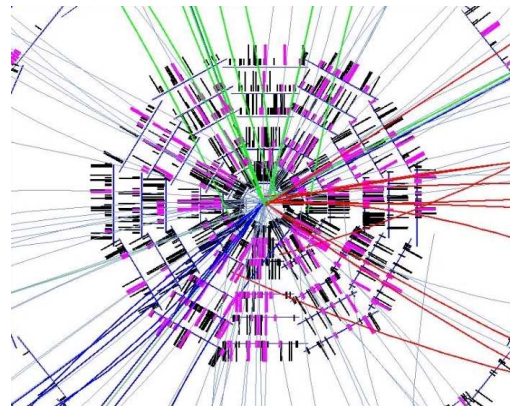


Hadron Collider:

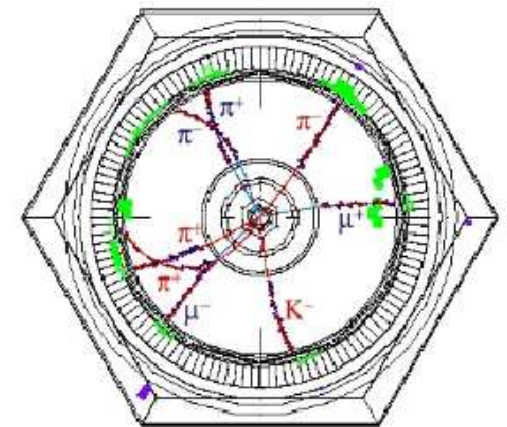
Produktionsflavour des
OS B und Signal B
korreliert



- Inklusive OS B -
Rekonstruktion schwierig
- OS B in Forwärtsrichtung;
ausserhalb der Akzeptanz,
tag auf falsche Information



CDF



BABAR

MC Vorhersagen für Flavour-Tagger

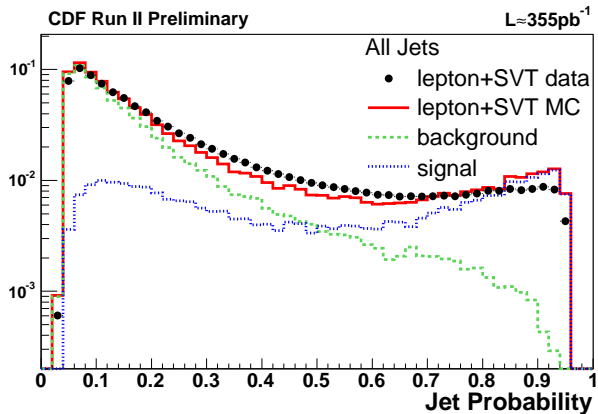
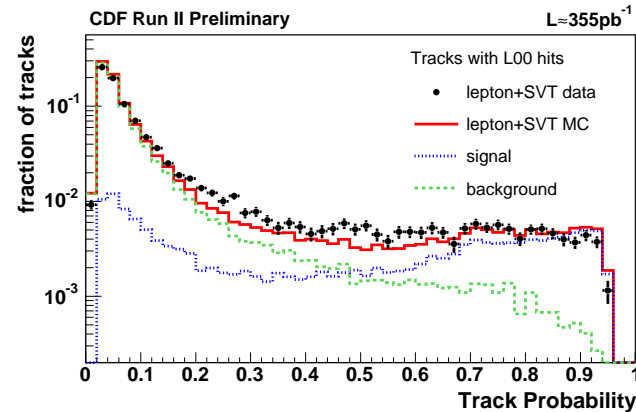
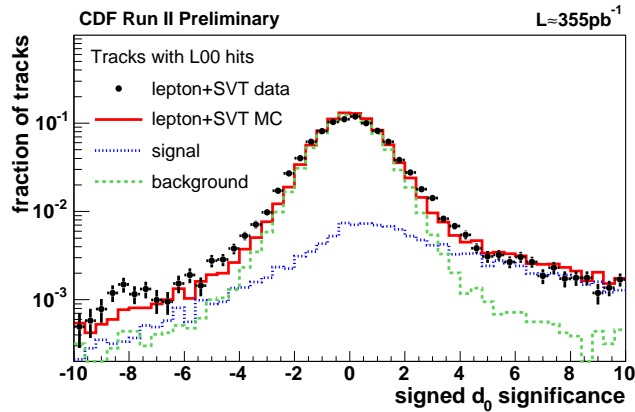
MC beschreibt sehr gut:

- Zerfälle (Kinematik/Winkelverteilung der Zerfallsprodukte)
→ Studien zum Physik-Untergrund, Signal-Trigger-Studien ...
- B Fragmentation → Same Side Tagging

MC beschreibt nicht gut (noch nicht getuned ...):

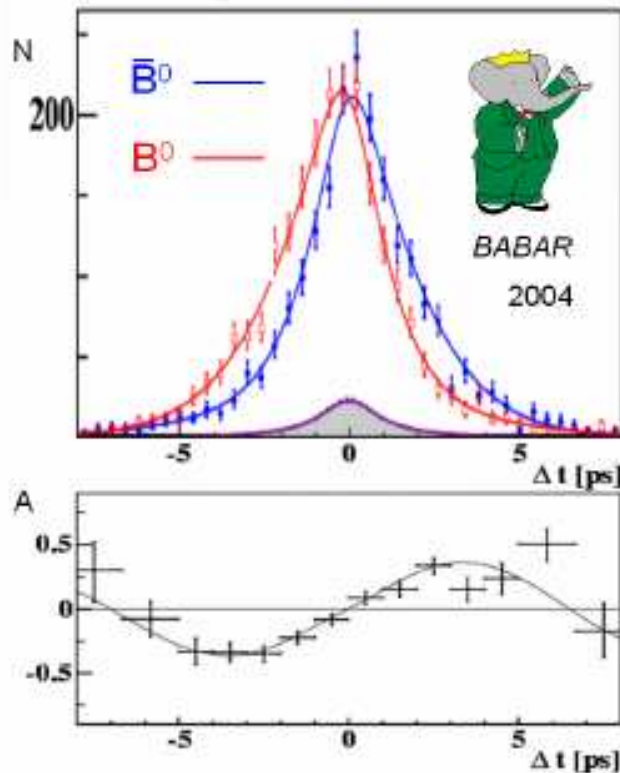
- Underlying Event ($q\bar{q}$, gg , ...)
→ MC Vorhersagen von OS-Tagger Dilution haben
 $\pm 30\%$ Unsicherheiten

MC Vorhersagen für Flavour-Tagger



Vernünftige Übereinstimmung von allen Variablen aber
 ϵ_{D^2} Faktor 2 schlechter auf Daten, wie auf Monte Carlo

Tagger Kalibration



$$\mathcal{A}(t) = \sin(2\beta) \sin(\Delta m_d t)$$

Amplitude der gemessenen Oszillation:

$$\propto D^* \sin(2\beta)$$

→ Tagging Dilution muss vorher auf Daten bestimmt werden

→ Tagger Kalibration ist eigenständige komplexe Analyse

Bei Mischungsanalyse wird Frequenz gemessen,
Dilution (bei ausreichend Statistik) **gleichzeitig messbar**.

Unsicherheiten auf Asymmetrie

S : Anzahl rekonstruierter Signal-Ereignisse

S/B : Wie rein ist das Signal?

$\sigma(ct)$: Eigenzeitauflösung (Ortsauflösung + Impulsauflösung)

ϵ : Tagging Effizienz

D : Dilution (Tagging Reinheit)

“Statistische” Unsicherheit:

$$\sigma(\mathcal{A}) = \sqrt{\frac{2}{S\epsilon D^2}} \sqrt{\frac{S+B}{S}} e^{\frac{(\Delta m_{s/d} \sigma_{ct})^2}{2}}$$

Eigenzeitauflösung

$$ct = \frac{LM_B}{p}$$

$$\sigma_{ct} = \sqrt{\left(\frac{M_B}{p} * \sigma_L\right)^2 + \left(\frac{LM_B}{p^2} * \sigma_p\right)^2}$$

$$\frac{\sigma_{ct}}{ct} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_p}{p}\right)^2}$$

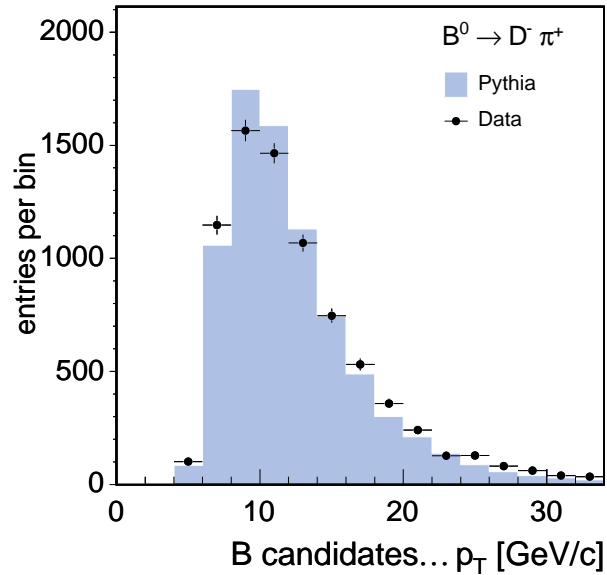
Bei **vollständig rekonstruierten** B Zerfällen $\frac{\sigma_{p(B)}}{p(B)} < 1/1000$,

Unsicherheit durch Vertexplosion dominiert.

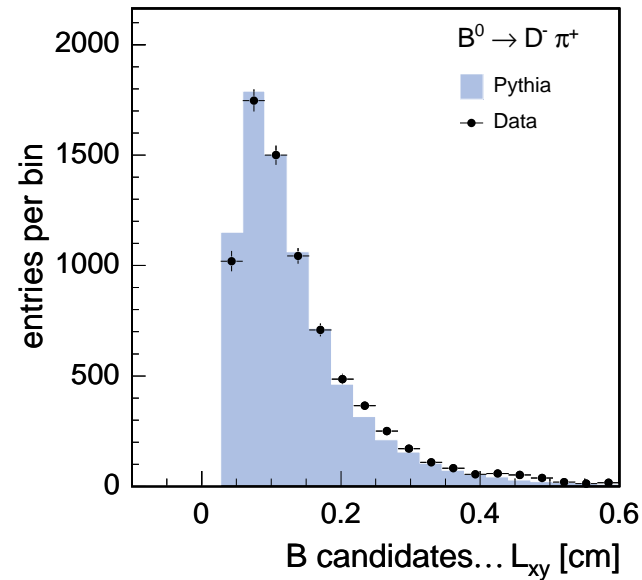
$$\frac{\sigma_{ct}}{ct} \approx \frac{\sigma_L}{L}$$

CDF-Auflösung

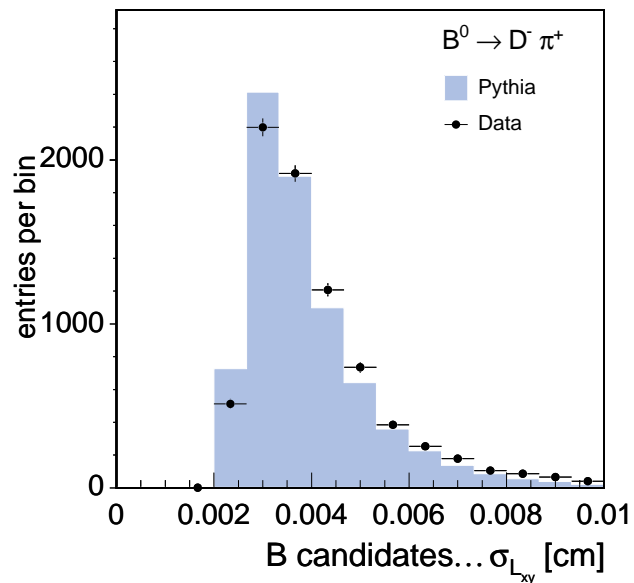
$\chi^2 / \text{NDF} = 74.68 / 16$, Prob = 0.00%, K-Prob = 0.10%



$\chi^2 / \text{NDF} = 48.28 / 20$, Prob = 0.04%, K-Prob = 0.97%



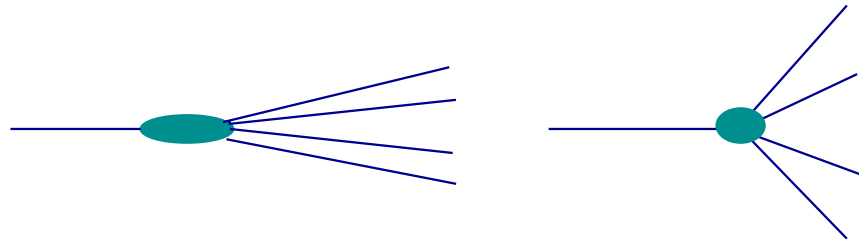
$\chi^2 / \text{NDF} = 121.26 / 14$, Prob = 0.00%, K-Prob = 0.00%



Trigger-Cut on L_{xy}

Eigenzeitauflösung

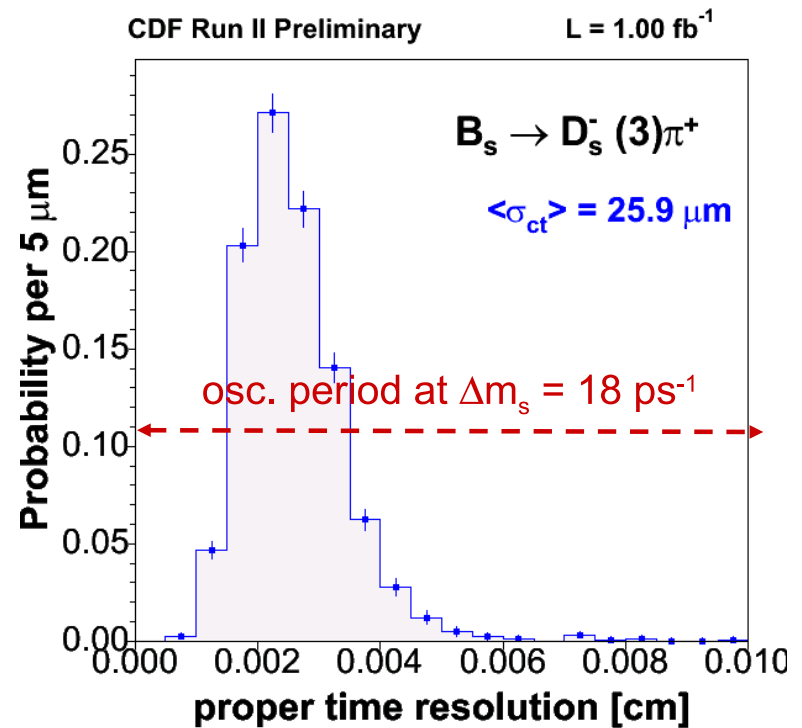
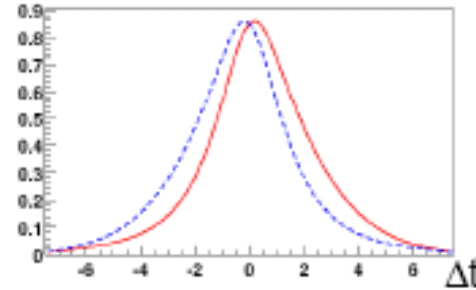
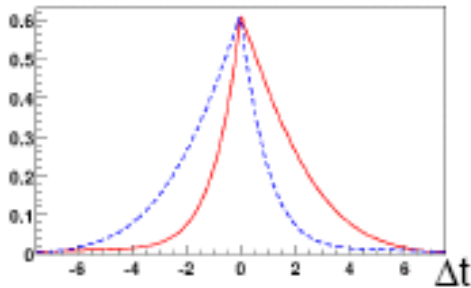
	$\langle p(B) \rangle$	$\langle L \rangle$	σ_L	σ_{ct}
CDF	$p_T = 12 \text{ GeV}$	$L_T = 1.5 \text{ mm}$	$25 \mu\text{m}$	100 fs
Babar	$p \approx p_z = 3 \text{ GeV}$	$L_z = 0.25 \text{ mm}$	$150 \mu\text{m}$	2000 fs
LHCb	$p \approx p_z = 50 \text{ GeV}$	$L_z = 15 \text{ mm}$	$100 \mu\text{m}$	40 fs



- Vertexauflösung hochenergetischer B haben grössere Unsicherheiten (Öffnungswinkel)
- Unterschiedliche Auflösung der Detektoren in x/y und z (z.B. $\sigma_{L_{xy}}(\text{LHCb}) = 30 \mu\text{m}$)
- Auflösung: Primärvertex \gg B-Vertex \gg Tagging B-Vertex

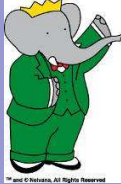


Eigenzeitauflösung

$\sigma(\mathcal{A}) = \sqrt{\frac{2}{S\epsilon D^2}} \sqrt{\frac{S+B}{S}} e^{\frac{(\Delta m_s/d\sigma_{ct})^2}{2}}$	CDF	Babar	LHCb
$\Delta m_d = 0.5 \text{ ps}^{-1}$	1.0	1.6	1.0
$\Delta m_s = 18 \text{ ps}^{-1}$	5.1	inf	1.3



Für Asymmetriemessung muss σ_{ct} vorab bekannt sein!

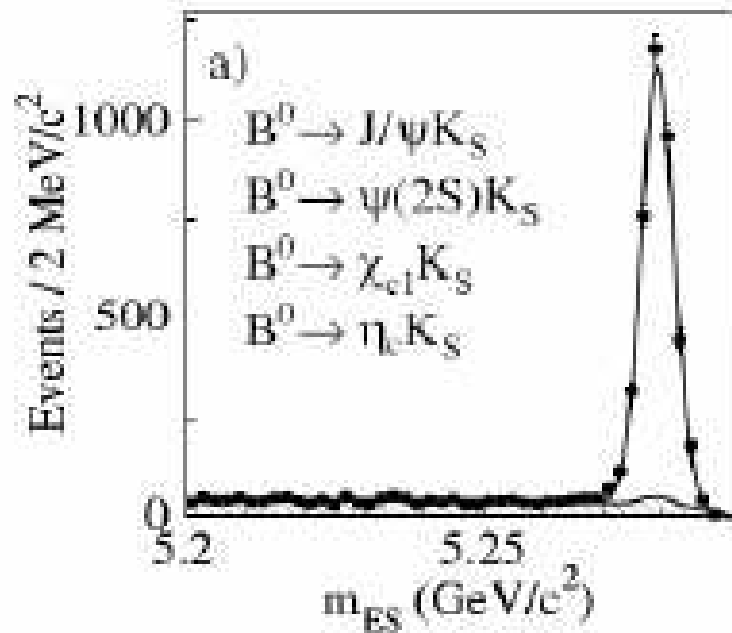
Signal Datensatz

	 Babar/PEP (e^+e^-)	 CDF/Tevatron $(p\bar{p})$	 LHCb/LHC (pp)	start 2007
$\sigma_{xx \rightarrow b\bar{b}} [\mu\text{b}]$	0.001	100	500	
$\mathcal{L} [\text{fb/y}]$	200	0.6	2	
$b\bar{b}$ pairs/y [10^9]	0.2	60	1.000	
$\sqrt{s} [\text{GeV}]$	Y(4S): 10,6 $B\bar{B}$ produced in coherent state	1.980 produce heavy & excited B's: $B_s, \Lambda_b, \Sigma_b, B^{**}, B_s^{**}, \dots$	14.000	

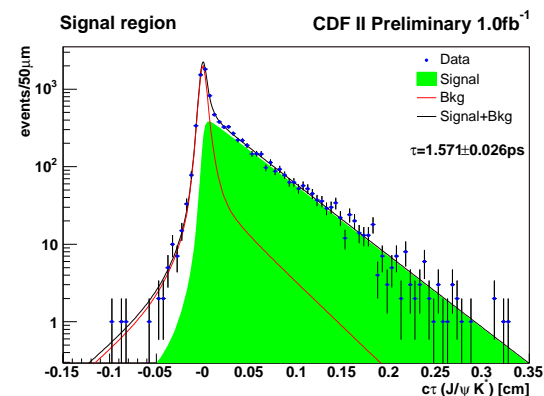
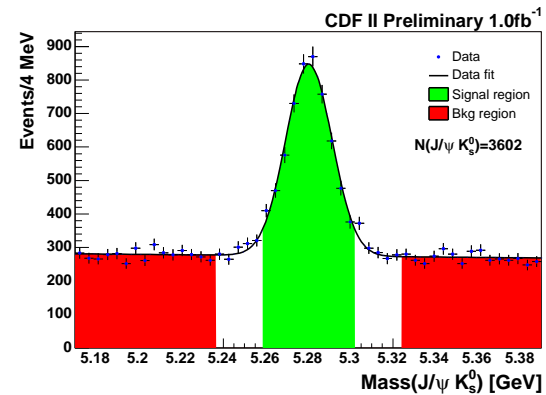
Signal-Datensatz

LHCb/CDF Wesentlich höherer Wirkungsquerschnitt im Vergleich zu B-Fabriken, aber **Verluste durch Schnitte in Trigger & Rekonstruktion**.

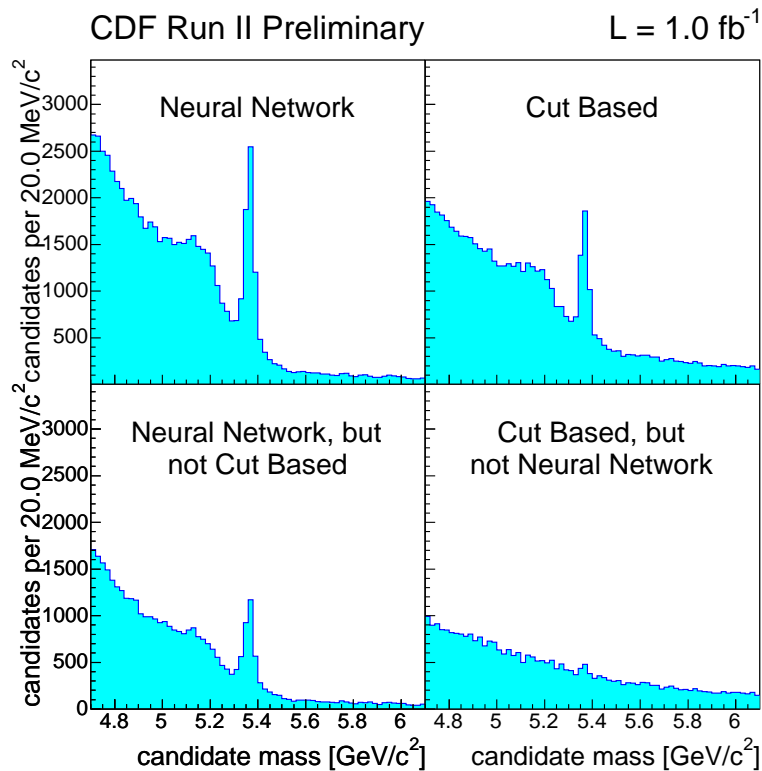
Hadron Collider statistisch weit überlegen in leicht triggerbaren Kanälen mit wenig Untergrund ... (z.B. $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-$)



≈ 4400 tagged B^0 (200 fb^{-1})



Signal-Datensatz



Viele Diplom- & Doktorarbeiten
über Signalselektion ...

z.B. Optimierung durch
NN Selektion

Signifikanz des B_s -Mixing von
4.4 auf 5.2 σ durch optimierte
Ereignisselektion

Zusammenfassung

	B-Fabriken	$p\bar{p}$
ϵD^2	30 %	5-8 %
σ_{ct}	2 ps	40-100 fs
$b\bar{b}/y$	0.2×10^9	$100-1000 \times 10^9$
ϵ	$\sim 50-90 \%$	0.2-2 % (LHCb) 0.1-0.5 % (CDF)

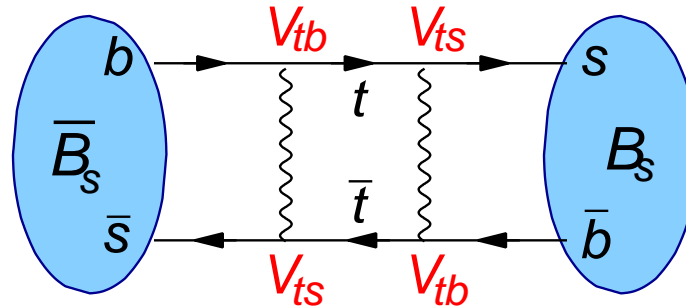
- zeitabhängige Asymmetrie sehr komplexe Analyse
- B-Fabriken dominieren B_d gegenüber Tevatron (bis auf $B_d \rightarrow \mu\mu$)
- B_d Kanäle B-Fabriken vs. LHCb noch unentschieden
- CDF/LHCb einzig in schweren B Hadronen ($B_s, B_c, \lambda_b \dots$)

Neue Physik in B_s Mischung?

- B_s System noch relative unerforscht
- kleine CP-verletzende Phase in B_s Mixing in SM, grosse Beiträge in NP Modellen
- Tagging dauert so lange bis es verstanden ist geht's auch schneller ???

Untagged CP-Analyse im B_s System: $B_s \rightarrow J/\Psi\phi$

Mixing 1×1



schwache Eigenzustände B & $\bar{B} \neq$ Masseneigenzustände B_H & B_L

	B_d	B_s
$\Delta m = m_H - m_L$	0.5 ps^{-1}	17.8 ps^{-1}
$\Delta\Gamma = \Gamma_L - \Gamma_H$	$\mathcal{O}(0.01)\Gamma_d$	$\mathcal{O}(0.1)\Gamma_s$
ϕ	$= \arg(V_{tb}V_{td}^*) (=2\beta)$	$= \arg(V_{tb}V_{ts}^*) (=2\beta_s)$

B_d System:

langsame Mischung, nicht messbares $\Delta\Gamma$, gr. CP-verl. Phase

B_s System:

schnelle Mischung, signifikantes $\Delta\Gamma$, k(l)eine CP-Verletzung

Im Rahmen des Standard Modells $\phi_s = 0$:

→ Masseneigenzustände \equiv CP-Eigenzuständen

$$CP(B_H) = -1 \text{ (CP odd)}$$

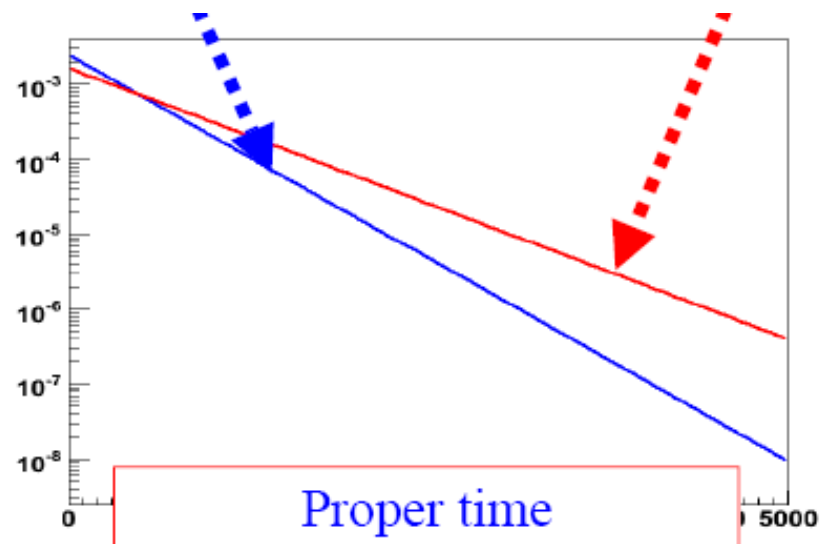
$$CP(B_L) = +1 \text{ (CP even)}$$

$$\Gamma_H = \Gamma_{\text{odd}}$$

$$\Gamma_L = \Gamma_{\text{even}}$$

$$\tau_L = 1/\Gamma_L$$

$$\tau_H = 1/\Gamma_H$$



$B_s \rightarrow J/\psi\phi$

B_s : $J^P = 0^{-1}$ (Pseudoskalar)

J/ψ : : $J^{CP} = 1^{-1-1}$ (Vector)

ϕ : : $J^{CP} = 1^{-1-1}$ (Vector)

Drehimpulserhaltung:

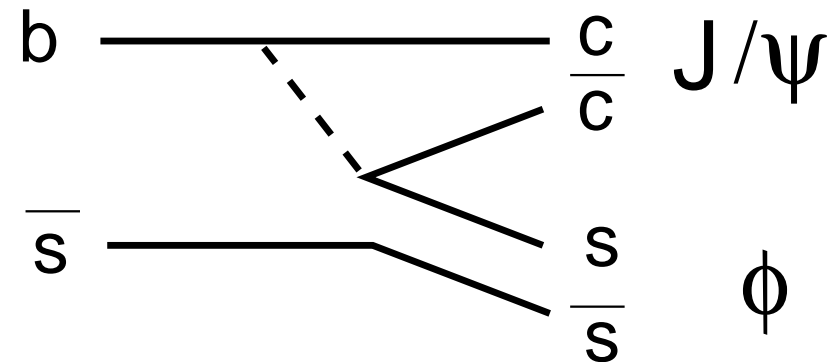
$$0 = J(J/\psi\phi) = |\vec{S} + \vec{L}|; \rightarrow L = 0, 1, 2$$

$$P(J/\psi\phi) = P(J/\psi) \cdot P(\phi) \cdot (-1)^L$$

$$CP(J/\psi\phi) = CP(J/\psi) \cdot CP(\phi) \cdot (-1)^L$$

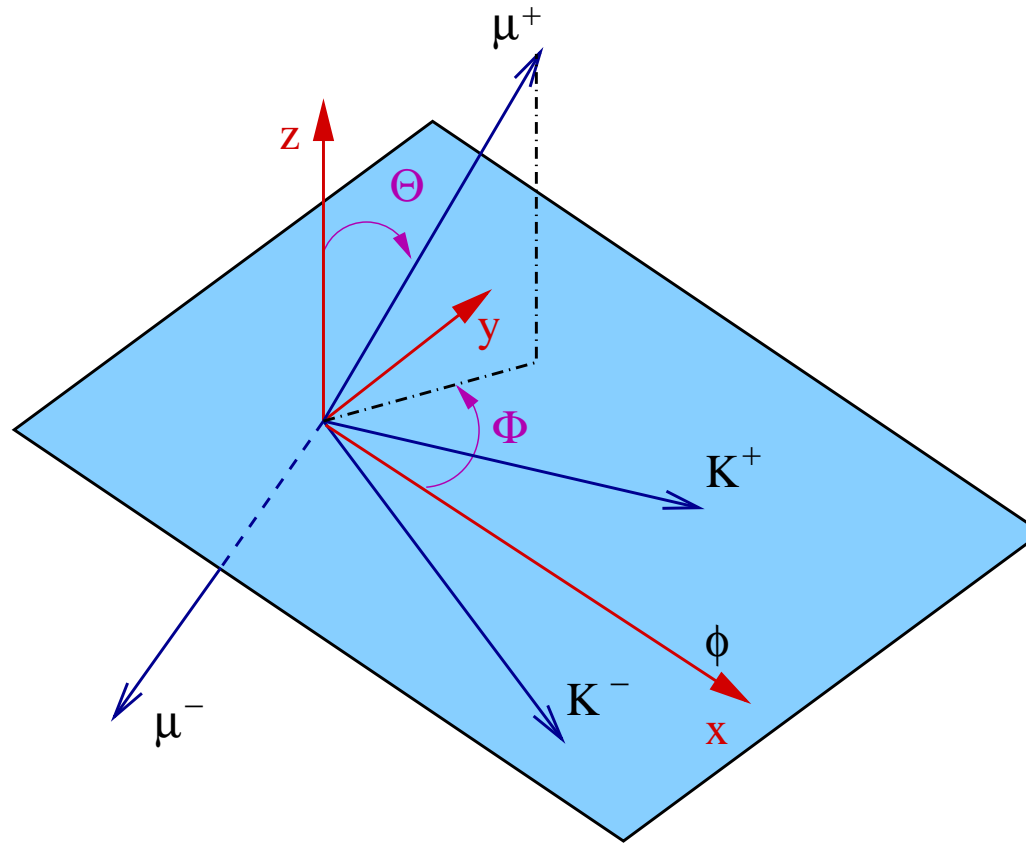
$L = 0, 2 \rightarrow CP$ even Endzustand

$L = 1 \rightarrow CP$ odd Endzustand



Endzustand kein CP-Eigenzustand sondern. linear Kombination!

Transversity Basis

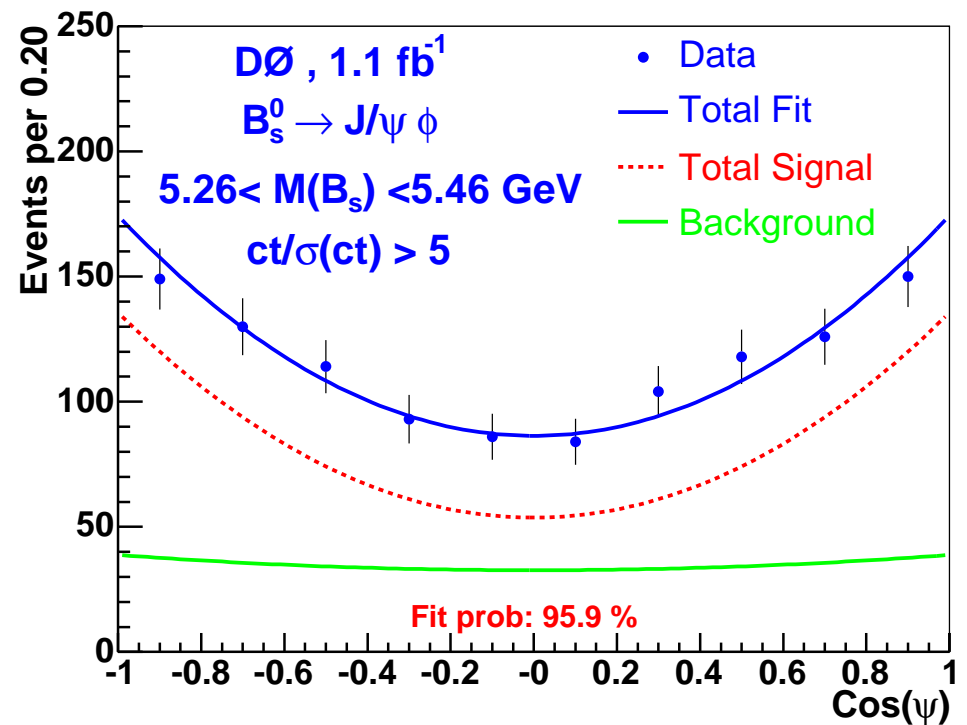
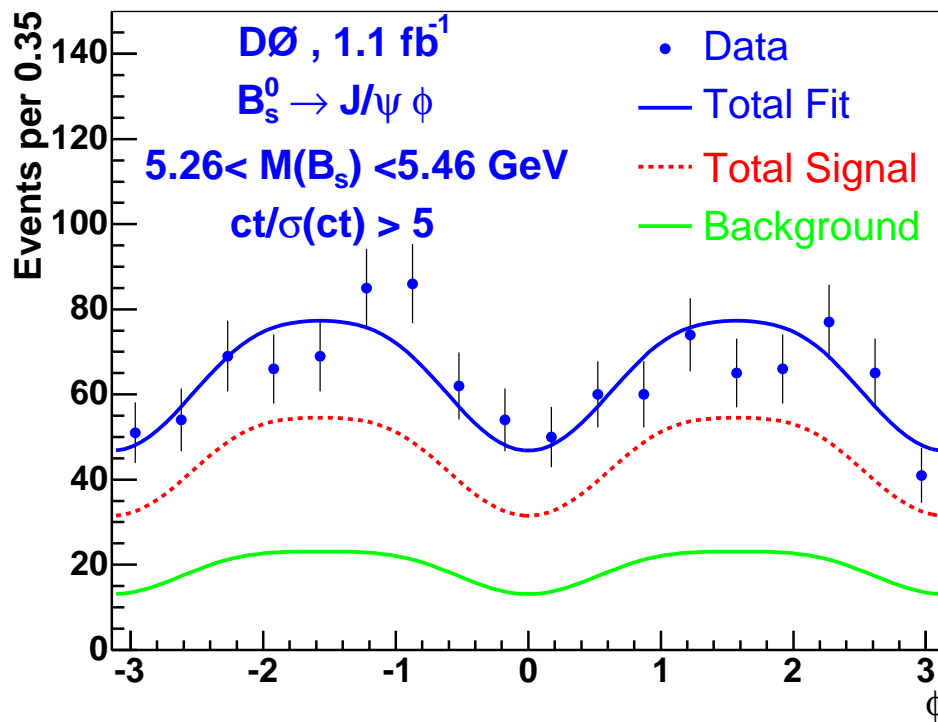


- im J/ψ Ruhes-System
- K^+K^- Ebene definiert x/y Ebene, K^+ def. positive y Achse
- θ, ϕ Polar- und Azimuthwinkel des μ^+
- Ψ Helizitätswinkel des ϕ
(Winkel zwischen $\vec{p}(K^+)$ und $-\vec{p}(J/\Psi)$ in ϕ Ruhesystem)

Transversity Basis

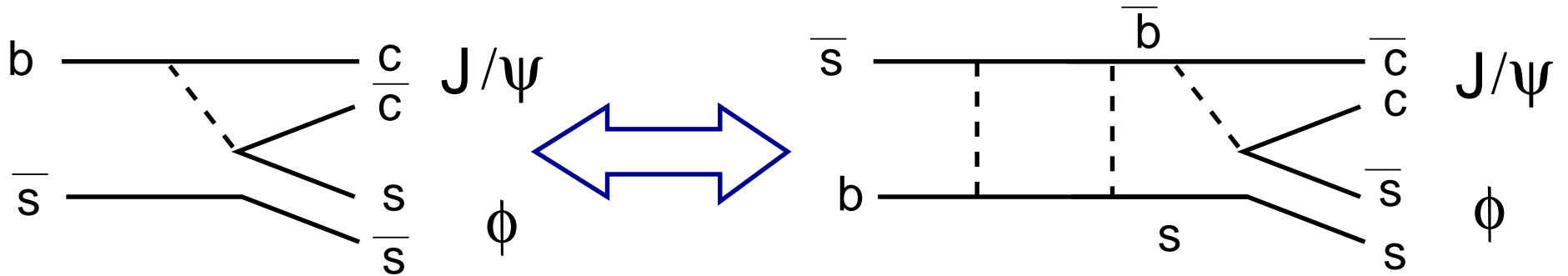
θ , ϕ unterscheiden $L = 0$ und $L = 2$

θ , ϕ nicht sensitive auf $L = 1 \leftrightarrow L = 0, 2$ (CP even \leftrightarrow CP odd)



θ , ϕ seperieren Signal/Untergrund

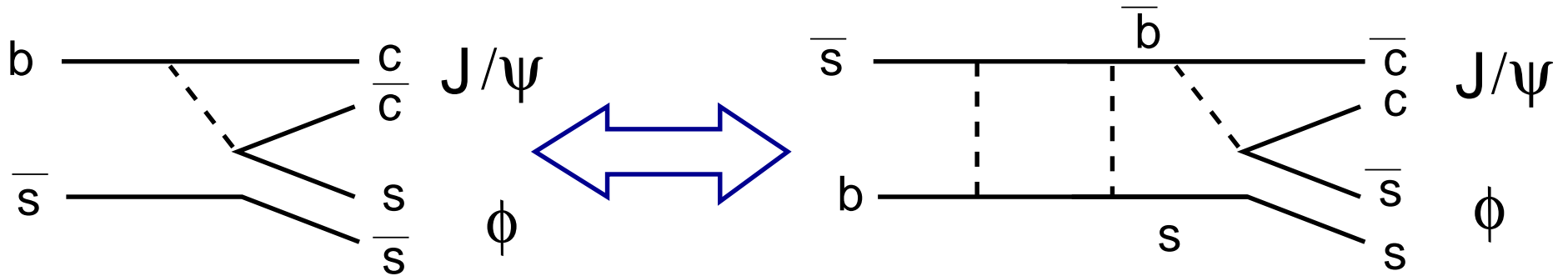
$\Delta\Gamma_s$ in $B_s \rightarrow J/\psi\phi$



$$\begin{aligned}
 \Gamma(B_s/\bar{B}_s \rightarrow J/\psi\phi) &= f_1(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma_L t} \\
 &+ f_2(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma_H t} \\
 &+ f_3(\theta, \phi, \Psi) * (e^{-\Gamma_H t} - e^{-\Gamma_L t}) * \sin(\phi_s) \\
 &\pm f_4(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma t} \sin(\Delta m_s t) \\
 &\pm f_5(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma t} \sin(\Delta m_s t) * \sin(\phi_s)
 \end{aligned}$$

$$\Gamma = \frac{\Gamma_H + \Gamma_L}{2}$$

$\Delta\Gamma_s$ in $B_s \rightarrow J/\psi\phi$

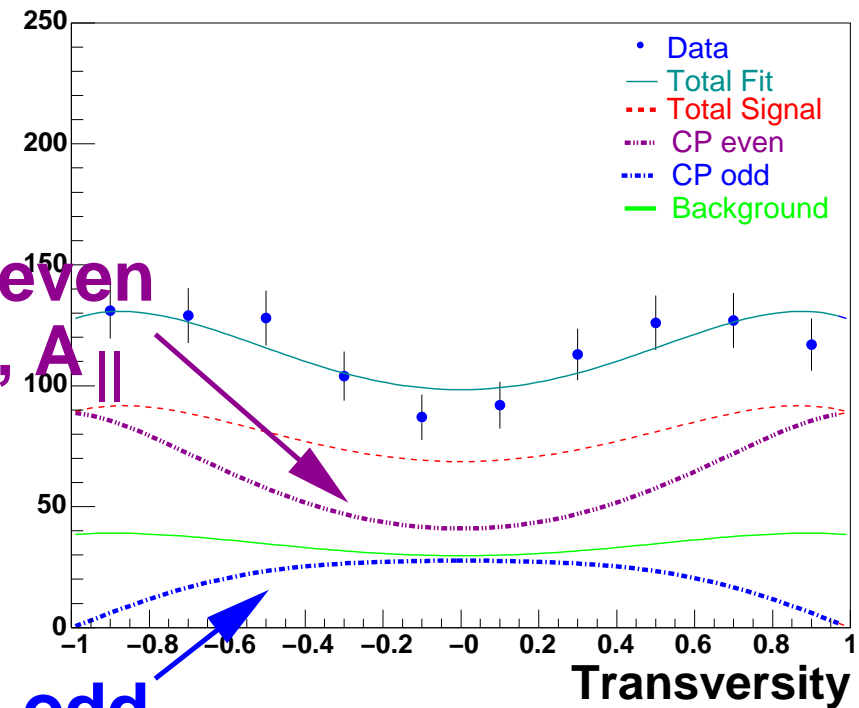
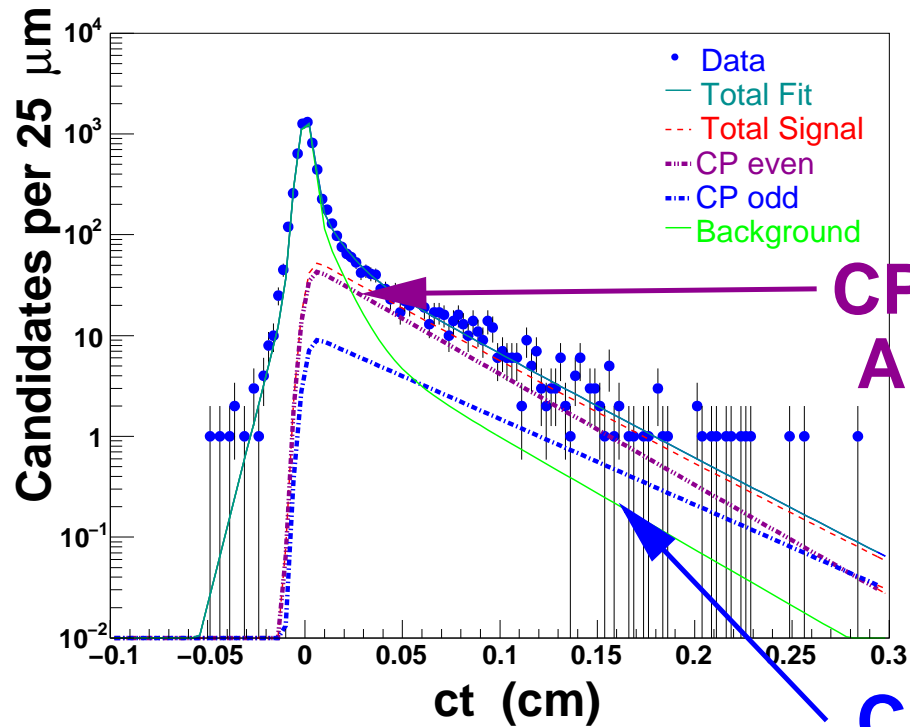


$$\begin{aligned}
 \Gamma(B_s/\bar{B}_s \rightarrow J/\psi\phi) &= f_1(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma_L t} \\
 &+ f_2(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma_H t} \\
 &+ f_3(\theta, \phi, \Psi) * (e^{-\Gamma_H t} - e^{-\Gamma_L t}) * \sin(\phi_s) \\
 &\pm f_4(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma t} \sin(\Delta m_s t) \\
 &\pm f_5(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma t} \sin(\Delta m_s t) * \sin(\phi_s)
 \end{aligned}$$

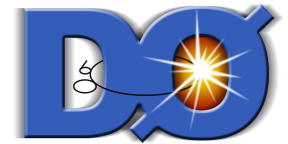
→ ϕ_s klein im SM

→ Kein Flavour-specific Endzustand, B_s/\bar{B}_s Produktionsraten gleich

$\Delta\Gamma_s$ in $B_s \rightarrow J/\psi\phi$

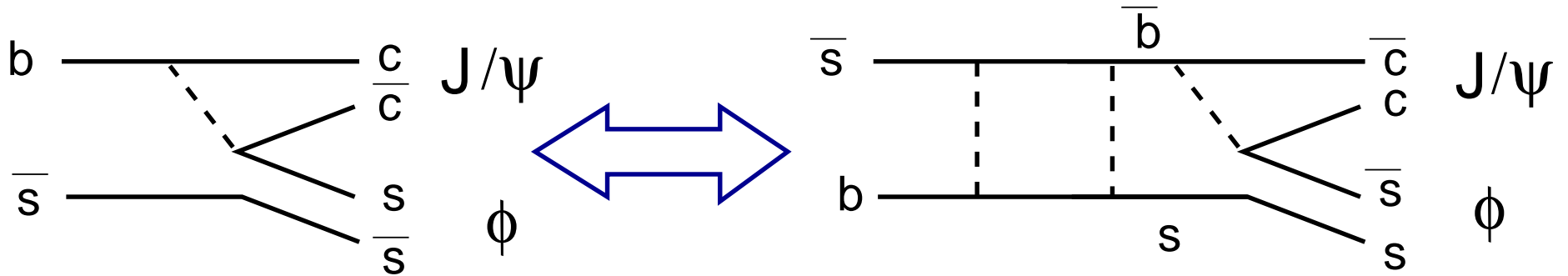


$$\Delta\Gamma_s = 0.12^{+0.08}_{-0.10} \text{ (stat.)} \pm 0.02 \text{ ps}^{-1}$$



Beschreibung des Untergrund entscheidend!

ϕ_s in $B_s \rightarrow J/\psi\phi$



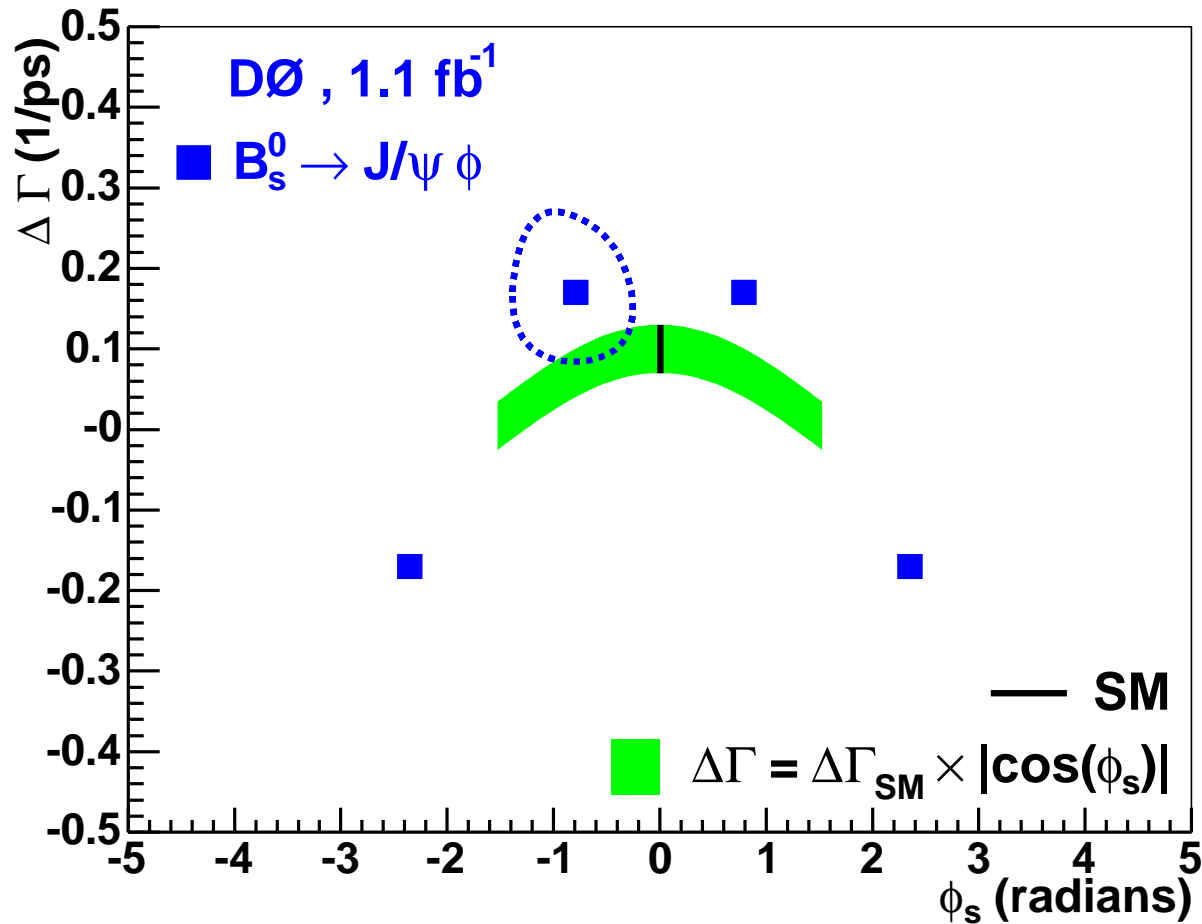
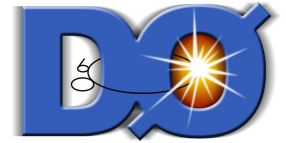
$$\begin{aligned}
 \Gamma(B_s/\bar{B}_s \rightarrow J/\psi\phi) &= f_1(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma_L t} \\
 &+ f_2(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma_H t} \\
 &+ f_3(\theta, \phi, \Psi) * (e^{-\Gamma_H t} - e^{-\Gamma_L t}) * \sin(\phi_s) \\
 &\pm f_4(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma t} \sin(\Delta m_s t) \\
 &\pm f_5(\theta, \phi, \Psi) * e^{-\Gamma t} \sin(\Delta m_s t) * \sin(\phi_s)
 \end{aligned}$$

Test des Standard-Models: Simultaner Fit von $\Delta\Gamma$ und ϕ_s

Untagged nur möglich da $\Delta\Gamma \sim \mathcal{O}(0.1)$ (geht nicht für B_d !)

ϕ_s in $B_s \rightarrow J/\psi \phi$

Simultaner Fit von $\Delta\Gamma_s$ und ϕ_s



$$\Delta\Gamma_s = 0.17 \pm 0.09 \text{ (stat.)} \pm 0.02 \text{ (syst.) ps}^{-1}$$
$$\phi_s = -0.79 \pm 0.56 \text{ (stat.) } {}^{+0.14}_{-0.01} \text{ (syst.)}$$

TABLE II: Sources of systematic uncertainty in the results of the analysis of the decay $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$.

Source	$c\tau(B_s^0)$ μm	$\Delta\Gamma$ ps^{-1}	R_\perp	ϕ_s
Procedure test	± 2.0	± 0.02	± 0.01	–
Acceptance	± 0.5	± 0.001	± 0.003	± 0.01
Reco. algorithm	$-8.0, +1.3$	$+0.001$	± 0.01	-0.01
Background model	$+1.0$	$+0.01$	-0.01	$+0.14$
Alignment	± 2.0	–	–	–
Total	$-8.8, +3.3$	± 0.02	± 0.02	$-0.01, +0.14$

Dominate syst. Unsicherheiten signifikant kleiner bei LHCb
 (niedriger Untergrund durch bessere Eigenzeitauflösung
 (160 fs (D0) \leftrightarrow 40 fs (LHCb))

$B_s \rightarrow J/\psi\phi$ bei LHCb

$\sim 130\text{k}$ rekonstruierte $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ Ereignisse/Jahr ($\epsilon_{tot} = 1.6\%$)

$$\sigma_{ct} = 37 \text{ fs}$$

$B/S < 0.1$ (Rekonstruktions-Schnitt auf $ct/\sigma(ct) > 5$)

$$\epsilon D^2 = 5.5\%$$

Erreichbare Auflösung (getaggted Analyse) mit 1 Jahr Daten (TDR):

$$\sigma_{\sin(\phi_s)}(\text{stat.}) = 0.02\text{-}0.06$$

$$\sigma_{\Delta\Gamma/\Gamma} = 2\%$$

Erreichbare Auflösung (ungetaggte Analyse) mit 1 Jahr Daten:

$$\sigma_{\sin(\phi_s)}(\text{stat.}) < 0.56/\sqrt{\times 100} ???$$

$$\sigma_{\Delta\Gamma/\Gamma} = 2\%$$

$B_s \rightarrow J/\psi\phi$ bei LHCb

$\sim 130\text{k}$ rekonstruierte $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ Ereignisse/Jahr ($\epsilon_{tot} = 1.6\%$)

$$\sigma_{ct} = 37 \text{ fs}$$

$B/S < 0.1$ (Rekonstruktions-Schnitt auf $ct/\sigma(ct) > 5$)

$$\epsilon D^2 = 5.5\%$$

Erreichbare Auflösung (getaggted Analyse) mit 1 Jahr Daten (TDR):

$$\sigma_{\sin(\phi_s)}(\text{stat.}) = 0.02\text{-}0.06$$

$$\sigma_{\Delta\Gamma/\Gamma} = 2\%$$

Erreichbare Auflösung (ungetaggte Analyse) mit 1 Jahr Daten:

$$\sigma_{\sin(\phi_s)}(\text{stat.}) < 0.56/\sqrt{\times 100} ???$$

$$\sigma_{\Delta\Gamma/\Gamma} = 2\%$$

Getaggted Analyse zahlt sich aus wenn Systematik von Untergrund dominiert ?
(Untergrund oszilliert nicht)

Zusammenfassung

	$B_d \rightarrow J/\psi K_s$	$B_s \rightarrow J/\psi \phi$
CP	CP-odd Eigenzustand	komb. aus even/odd Eigenzuständen \rightarrow Winkelanalyse
$\Delta\Gamma$	zu klein, keine Sensitivität	$\Delta\Gamma$ messbar
$\phi (= 2\beta)$	nur tagged Analyse	untagged Analyse möglich da $\Delta\Gamma \mathcal{O}(0.1)$ höhere Sensitivität in tagged Analyse

CP-Verletzung in $B_{d/s}$ Mixing $< \mathcal{O}(0.01)$,

Keine Pinguinverschmutzung in $B_d \rightarrow J/\psi K_s / B_s \rightarrow J/\psi \phi$

Sensitiv zu $\phi_{d/s} = 2\beta_{d/s}$ (CP Verletzung in Int. zw. Mischung & Zerfall)

Weitere Analysen für $\Delta\Gamma_S$

-

Was ist τ_S ?

$$|B_H\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|B^0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\bar{B}^0\rangle$$

$$|B_L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|B^0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|\bar{B}^0\rangle$$

$$|B_H\rangle : \text{CP odd (-1)}$$

$$\tau_L < \tau_H$$

$$|B_L\rangle : \text{CP even (+1)}$$

$$\Delta\Gamma = \Gamma_L - \Gamma_H$$

$$|B^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|B_H\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\bar{B}_L\rangle$$

$$|\bar{B}^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|B_H\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|B_L\rangle$$

$$\Gamma_s = \frac{\Gamma_L + \Gamma_H}{2}$$

($\neq 1/ \langle \tau_s \rangle$ PDG-Mittelwert über alle B_s Lebensdaueremessungen)

$$\Gamma(f, t) = Ae^{-\Gamma_L t} + Be^{-\Gamma_H t}$$

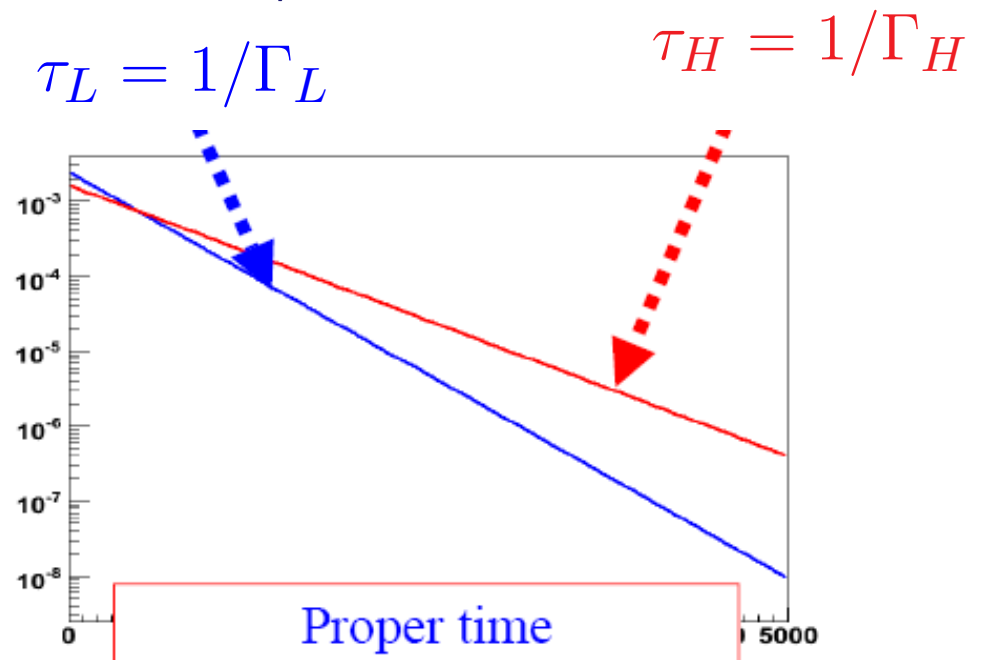
Fit mit einer Exponentialfunktion:

$$\Gamma_f = \Gamma_s + \frac{A-B}{A+B} \frac{\Delta\Gamma}{2} - \frac{2AB}{(A+B)^2} \frac{\Delta\Gamma^2}{\Gamma} + \mathcal{O}\left(\frac{\Delta\Gamma^3}{\Gamma^2}\right)$$

$A = B = \sqrt{2} \rightarrow$ Flavour specific states

(es war eindeutig ein B^0 oder \bar{B}^0 beim Zerfall)

$$\Gamma_{fs} = \Gamma_s - \frac{\Delta\Gamma^2}{\Gamma} + \mathcal{O}\left(\frac{\Delta\Gamma^3}{\Gamma_s}\right)$$



$\tau_L < \tau_H \rightarrow$ Phasenraum für Zerfälle in CP even ist grösser

(fast rein) CP even:

$$B_s \rightarrow K^+ K^-$$

$$B_s \rightarrow D_s^{(*)} D_s^{(*)} \text{ (4 \%)}$$

$$B_s \rightarrow J/\Psi \eta (\pi^+ \pi^- \pi^0)$$

$$B_s \rightarrow J/\Psi \eta (\gamma\gamma)$$

$$B_s \rightarrow \eta_c \phi$$

(fast rein) CP odd:

$$B_s \rightarrow \phi f_0$$

$$B_s \rightarrow \chi_{c0} \phi$$

...

\rightarrow Bestimmung von Γ , $\Delta\Gamma$ aus Zerfällen in flavour specific und in CP even Zustände

$\tau_L < \tau_H \rightarrow$ Phasenraum für Zerfälle in CP even ist grösser

(fast rein) CP even:

$$B_s \rightarrow K^+ K^-$$

$$B_s \rightarrow D_s^{(*)} D_s^{(*)} \text{ (4 \%)}$$

$$B_s \rightarrow J/\Psi \eta (\pi^+ \pi^- \pi^0)$$

$$B_s \rightarrow J/\Psi \eta (\gamma\gamma)$$

$$B_s \rightarrow \eta_c \phi$$

(fast rein) CP odd:

$$B_s \rightarrow \phi f_0$$

$$B_s \rightarrow \chi_{c0} \phi$$

...

\rightarrow Bestimmung von Γ , $\Delta\Gamma$ aus Zerfällen in flavour specific und in CP even Zustände

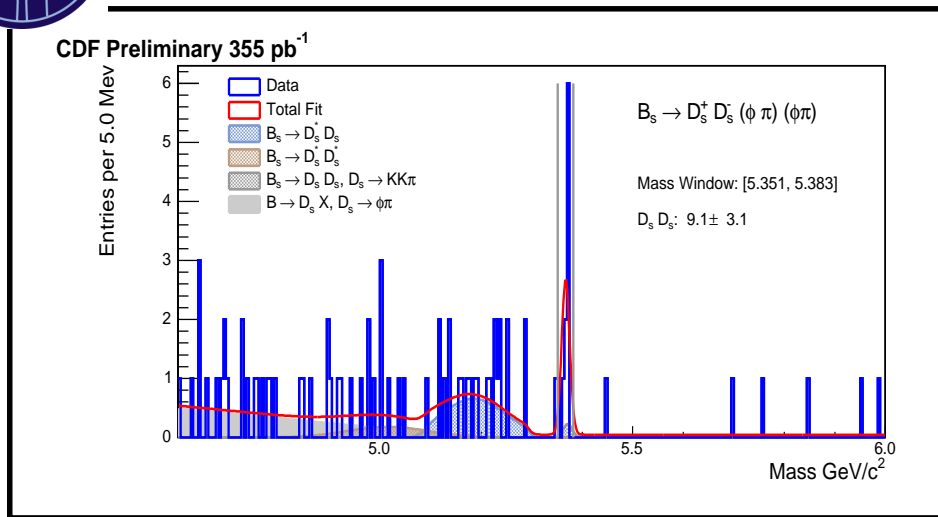
$$\langle \tau_{PDG} \rangle = 1.466 \pm 0.056 \text{ ps}$$

$$\langle \tau_{fs} \rangle = 1.442 \pm 0.0066 \text{ ps}$$

$B_s \rightarrow D_s^{(*)} D_s^{(*)}$

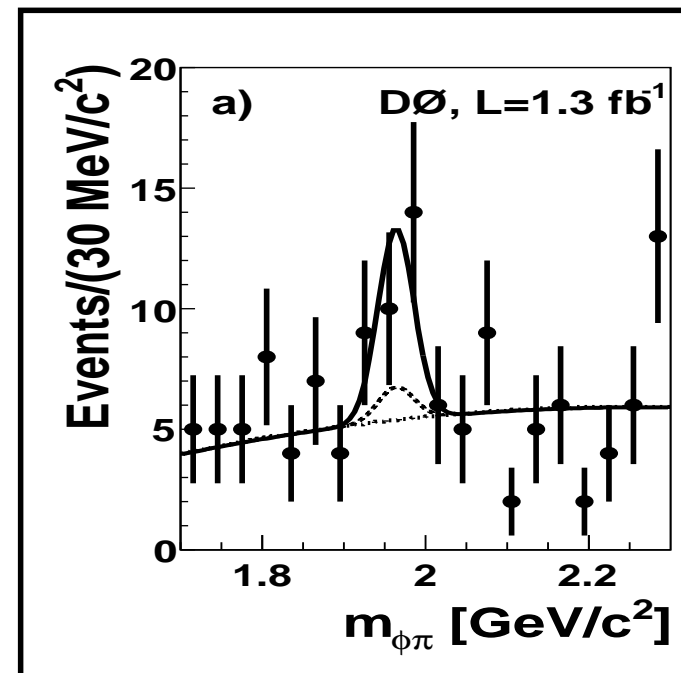
$B_s \rightarrow D_s^{(*)} D_s^{(*)}$ Zerfall hauptsächlich CP even ($> 95\%$)
 Hauptanteil und Zerfallslängenunterschied $\Delta\Gamma_{CP}$

$$\rightarrow BR(B_s \rightarrow D_s^{(*)} D_s^{(*)}) = \left(\frac{\Delta\Gamma_{CP}}{2\Gamma}\right) \left(1 + \mathcal{O}\left(\frac{\Delta\Gamma}{\Gamma}\right)\right)$$



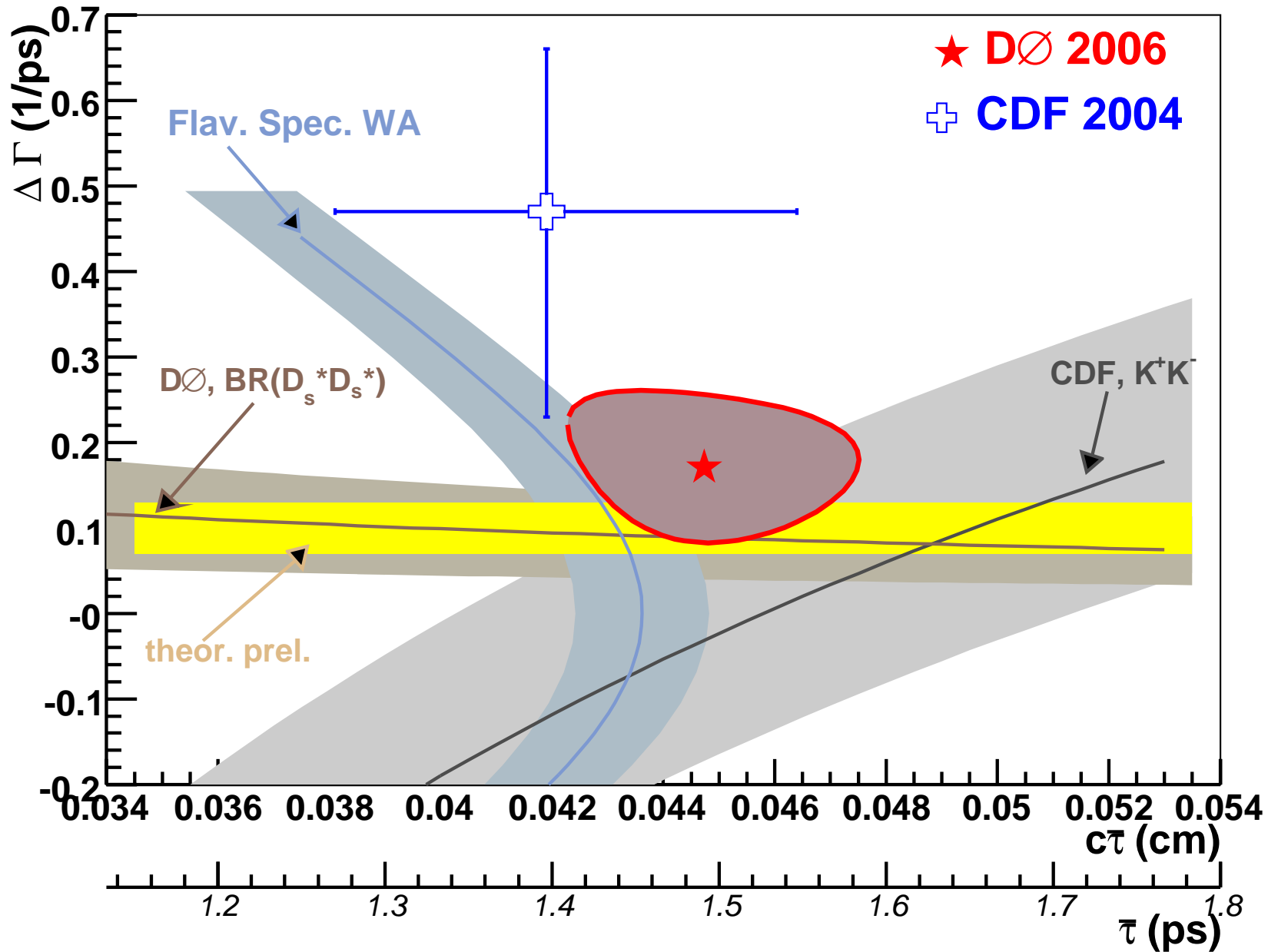
CDF: $N(B_s \rightarrow D_s^{(*)} D_s^{(*)}) \sim 23$

D0: $N(B_s \rightarrow D_s^{(*)} D_s^{(*)}) = 13.4^{+6.6}_{-6.0}$



(hep-ex/0702049)





MC-Studie: ϕ_s @ LHCb

Neben $J/\Psi\phi$ Winkelanalyse auch getaggte Analyse analog zu $\sin(2\beta)$ für CP-even Zerfällen möglich ...

Zerfall	$\sigma(\phi_s)$ [rad]	rek. Ereignisse in 2 fb^{-1}
$B_s \rightarrow J/\psi\eta(\pi^+\pi^-\pi^0)$	0.142	3k
$B_s \rightarrow D_s D_s$	0.133	4k
$B_s \rightarrow J/\psi\eta(\gamma\gamma)$	0.109	8.5k
$B_s \rightarrow \eta_c\phi$	0.108	3k
Reine CP Eigenzustände	0.060	-
$B_s \rightarrow J/\psi\phi$	0.023	131k

... nur geringe Verbesserung der Auflösung durch zusätzliche Kanäle

(LHCb Thesis-2006-42)

Mixing-Formalismus & Amplitudenscan

Likelihood-Analyse

$$\mathcal{L} = f_{Signal} * P_{Signal} + (1 - f_{Signal}) * P_{Untergrund}$$

$$P_{Signal} = P_{Masse,Signal} * P_{ct,Signal};$$

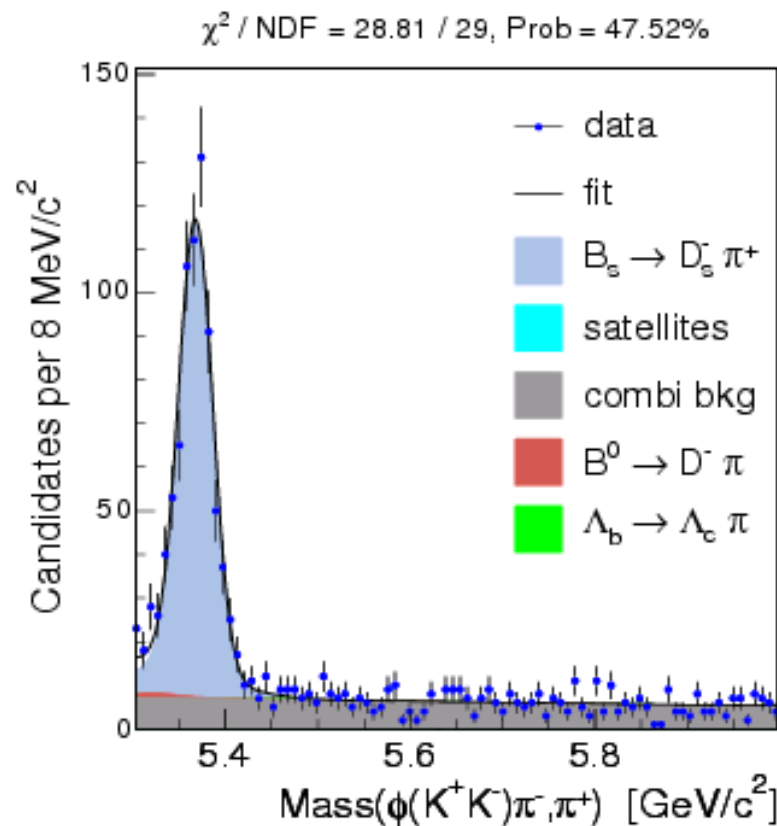
$$P_{Untergrund} = P_{Masse,Untergrund} * P_{ct,Untergrund};$$

Massenverteilung

$$P_{Masse,Signal} = f * G(m, \sigma_{m,1}) + (1 - f) * G(m, \sigma_{m,2});$$

$P_{Masse,Untergrund}$:

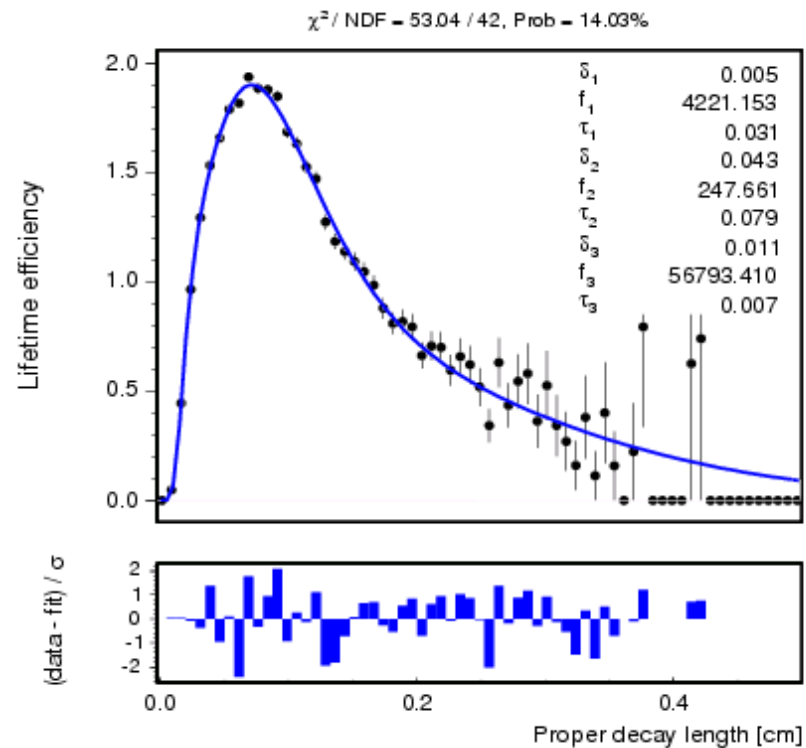
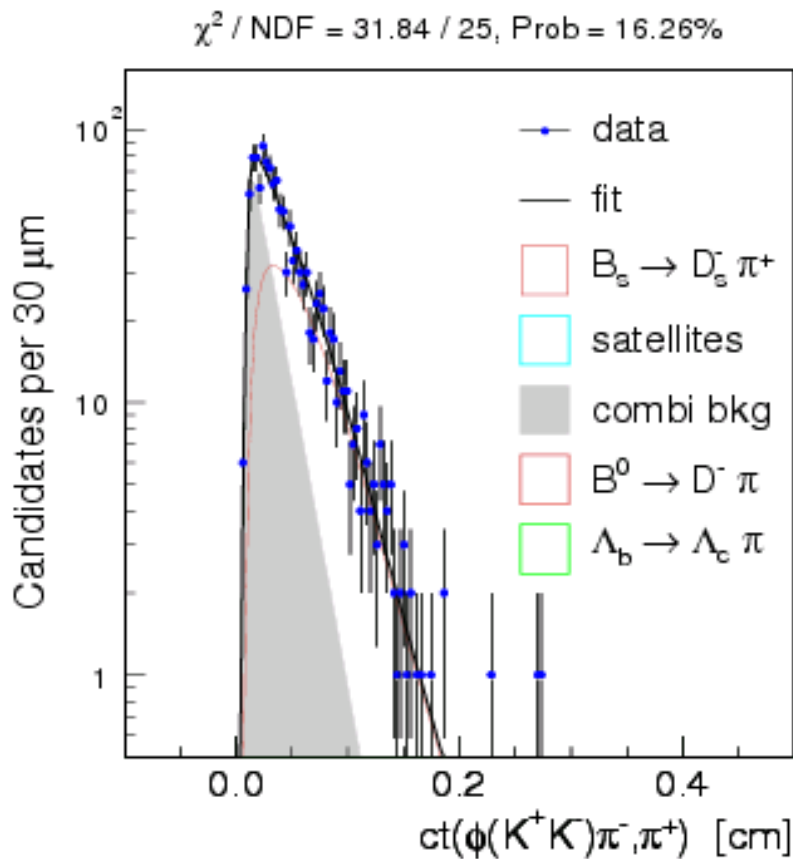
keine physikalische Motivation, man nimmt was passt
(MC/Seitenbänder)



Eigenzeitverteilung

$$P_{ct,Signal} = e^{-\Gamma t'} \otimes G(t - t', \sigma_{ct}) * \epsilon_{ct}(t)$$

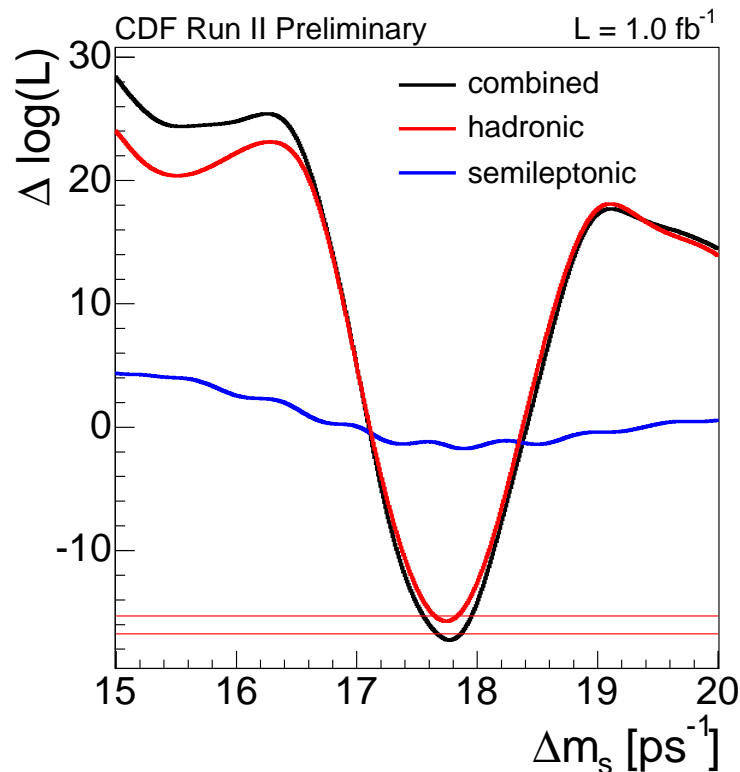
$P_{ct,Untergrund}$: man nimmt wieder was passt



Getaggte ct -Verteilung

$$P_{ct,Signal} = e^{-\Gamma t'} \frac{1 \pm D \cos(\Delta m_s t')}{2} \otimes G(t - t', \sigma_{ct}) * \epsilon_{ct}(t)$$

Direkter Fit nach Δm_s :



$$\mathcal{L}(\Delta m_s) = f_{Sig.} * P_{Mass,Sig.} * P_{ct,Sig.} + f_{Untergr.} * P_{Mass,Untergr.} * P_{ct,Untergr.}$$

Amplituden-Scan

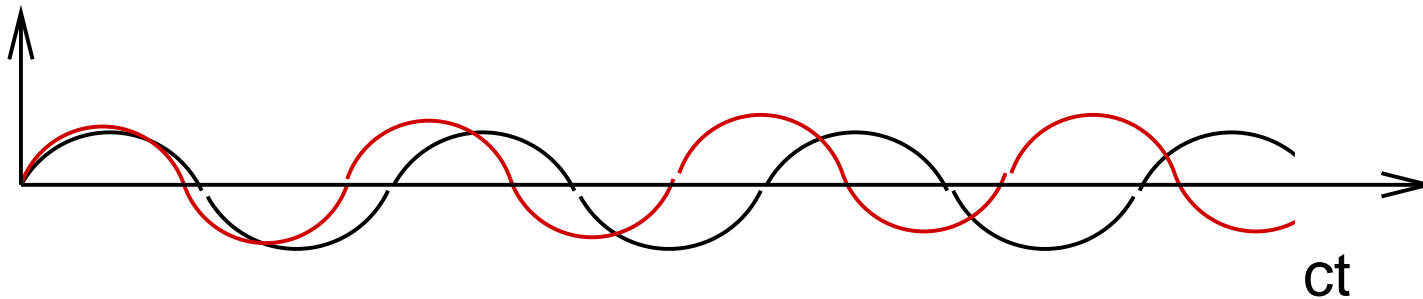
$$P_{ct,Signal}(t) = e^{-\Gamma t'} \frac{1 \pm \mathcal{A}D \cos(\Delta m_s t')}{2} \otimes G(t - t', \sigma_{ct}) * \epsilon_{ct}(t)$$

Fit von \mathcal{A} für verschiedene Δm_s Werte, weiter Parameter fest

Amplituden-Scan

$$P_{ct,Signal}(t) = e^{-\Gamma t'} \frac{1 \pm \mathcal{A} D \cos(\Delta m_s t')}{2} \otimes G(t - t', \sigma_{ct}) * \epsilon_{ct}(t)$$

Fit von \mathcal{A} für verschiedene Δm_s Werte, weiter Parameter fest



Richtige Frequenz: $\mathcal{A} = 1$

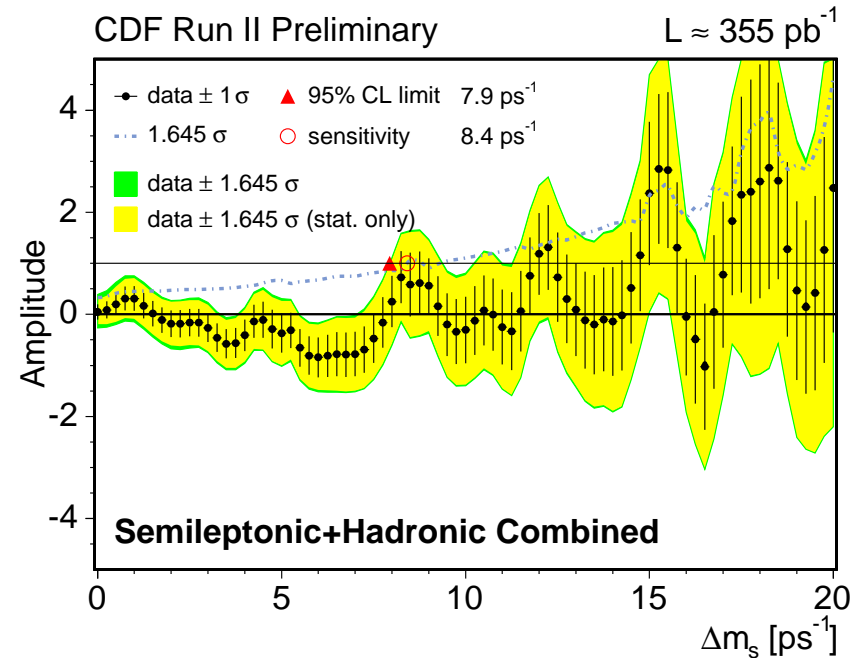
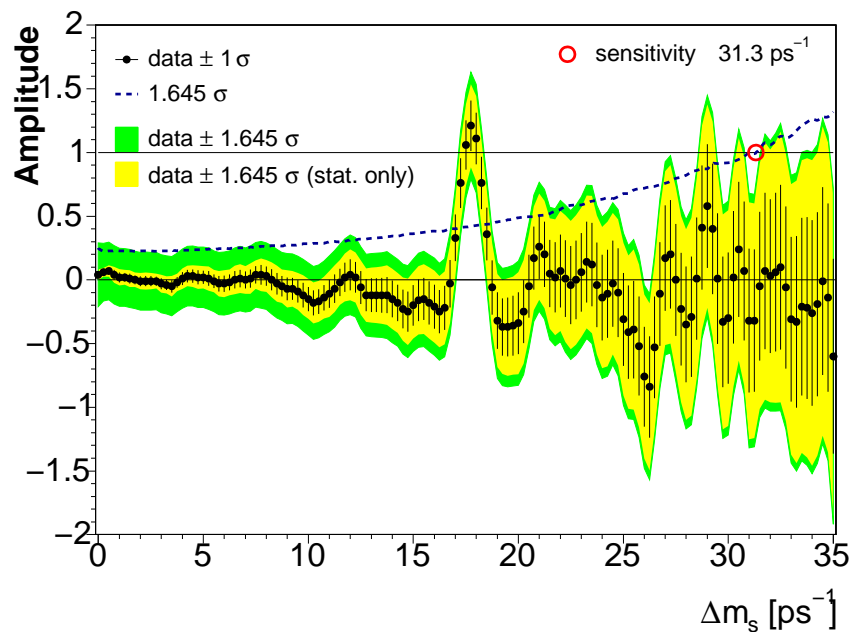
Falsche Frequenz: $\mathcal{A} = 0$

→ Fouriertransformation

Amplituden-Scan

Sensitivität: $1.645\sigma_{\mathcal{A}} = 1$

Limit: $\mathcal{A} + 1.645\sigma_{\mathcal{A}} = 1$



Amplituden-Scan erlaubt einfache Kombination verschiedener
Analysen/Experimente

Historisch benutzt für Limits (Moser & Roussarie)

Zusatzmaterial

Lepton Tagging (I)

Exploit semileptonic decay on OS (BR: 10% each for e and μ)

Signal:

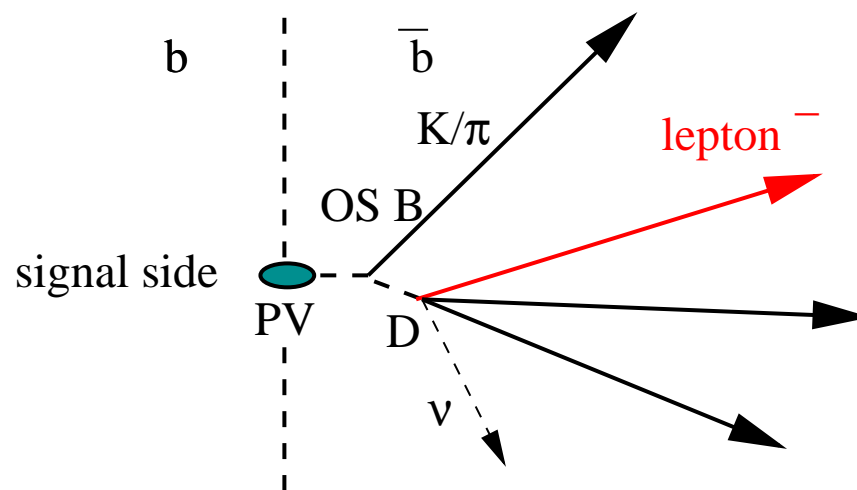
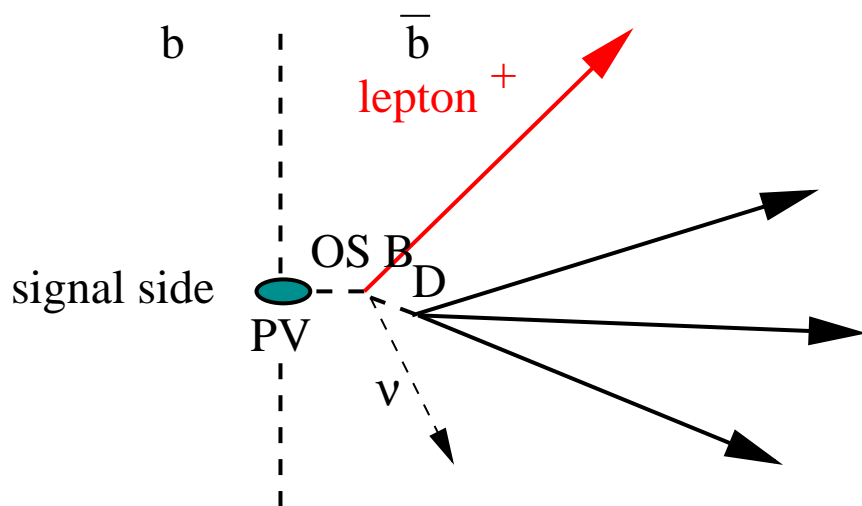
$$b \rightarrow l^- X$$

$$\bar{b} \rightarrow l^+ X$$

Background:

$$b \rightarrow c \rightarrow X l^+$$

$$\bar{b} \rightarrow c \rightarrow X l^-$$

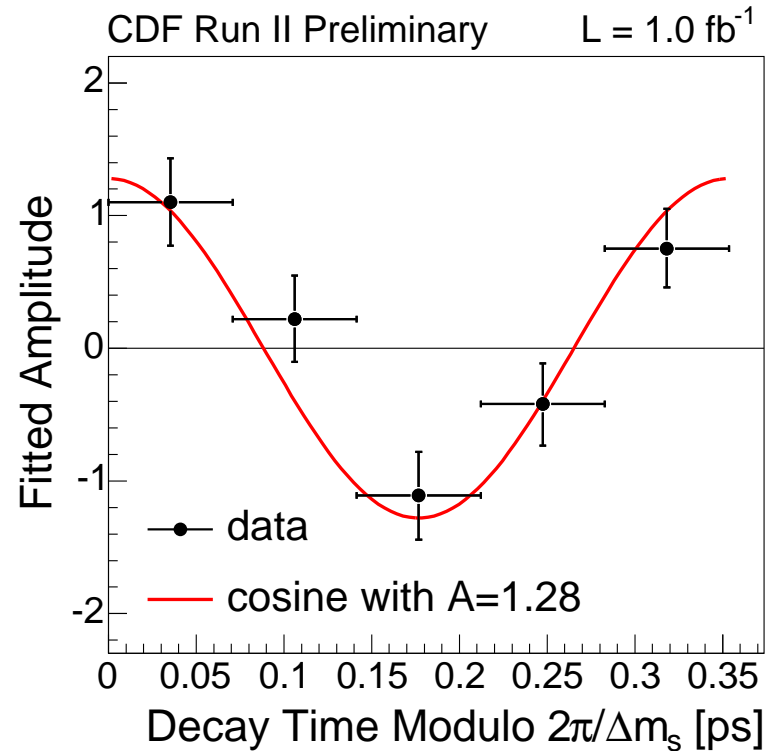
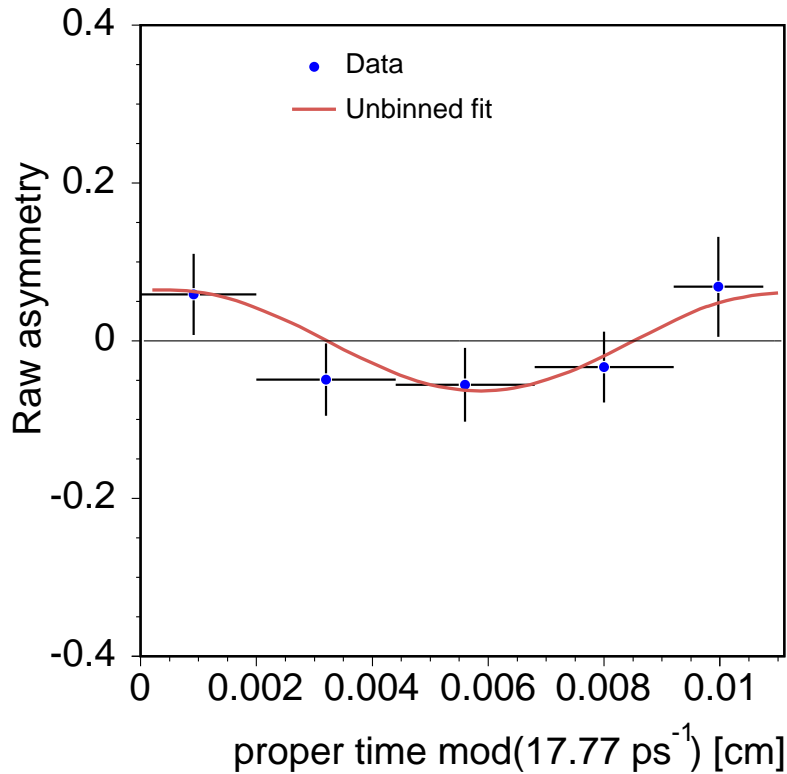


Lepton reconstruction is inclusive
(no secondary vertex is reconstructed).

Ist Mischung direkt sichtbar?

alle Ereignisse mit
Tagging-Dilution $> 10\%$

Gewichtete Ereignisse
(Tagging-Dilution, σ_{ct} , S/N ...)

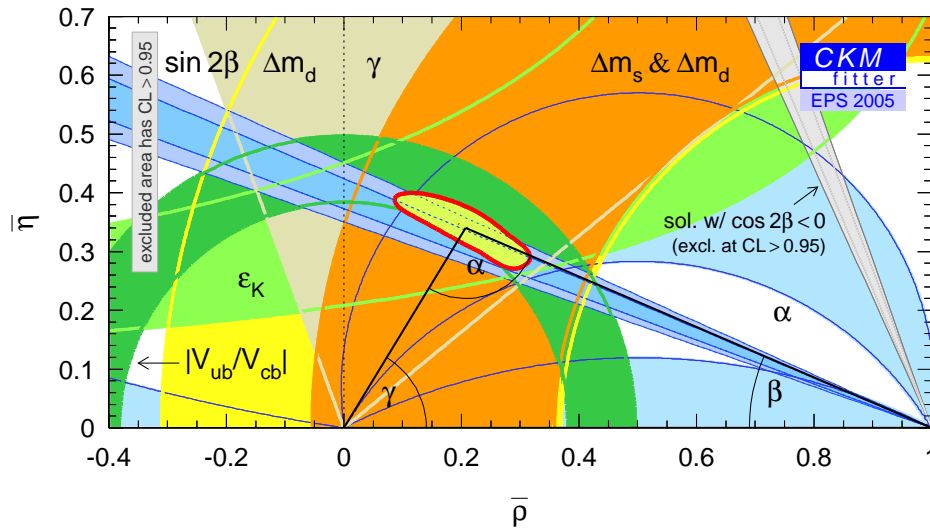


Unbinned Likelihood
Fit als "Sehhilfe"

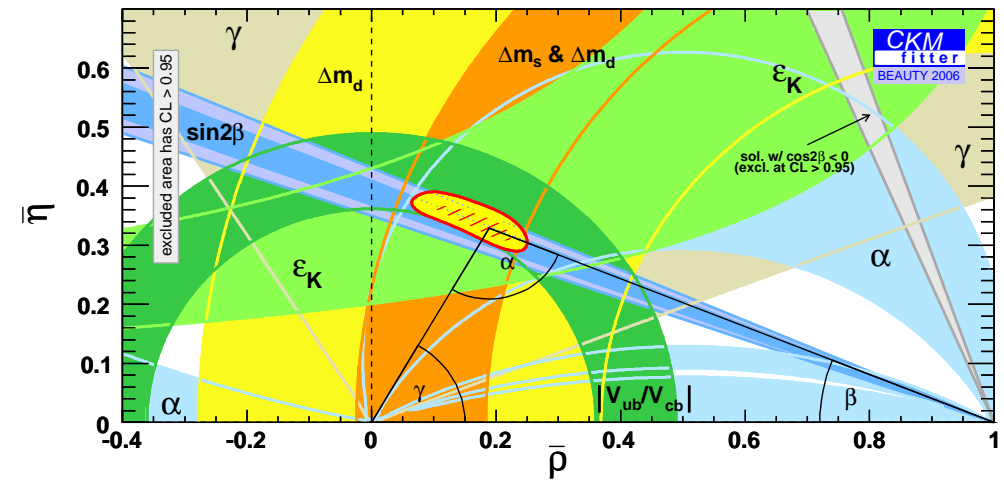


Auswirkungen auf $|V_{td}|/|V_{ts}|$

Stand Sommer '05



Stand Herbst '06



$$|V_{td}|/|V_{ts}| = 0.2061 \pm 0.0007 \text{ (exp.) } \begin{matrix} +0.0081 \\ -0.0060 \end{matrix} \text{ (theo.)}$$

(hep-ex/0702049)

Konsistent mit indirekten Messungen - Unsicherheiten dominiert bei Theorie