



$B \rightarrow D K^*$ 崩壊の研究

東北大学 素粒子実験研究室

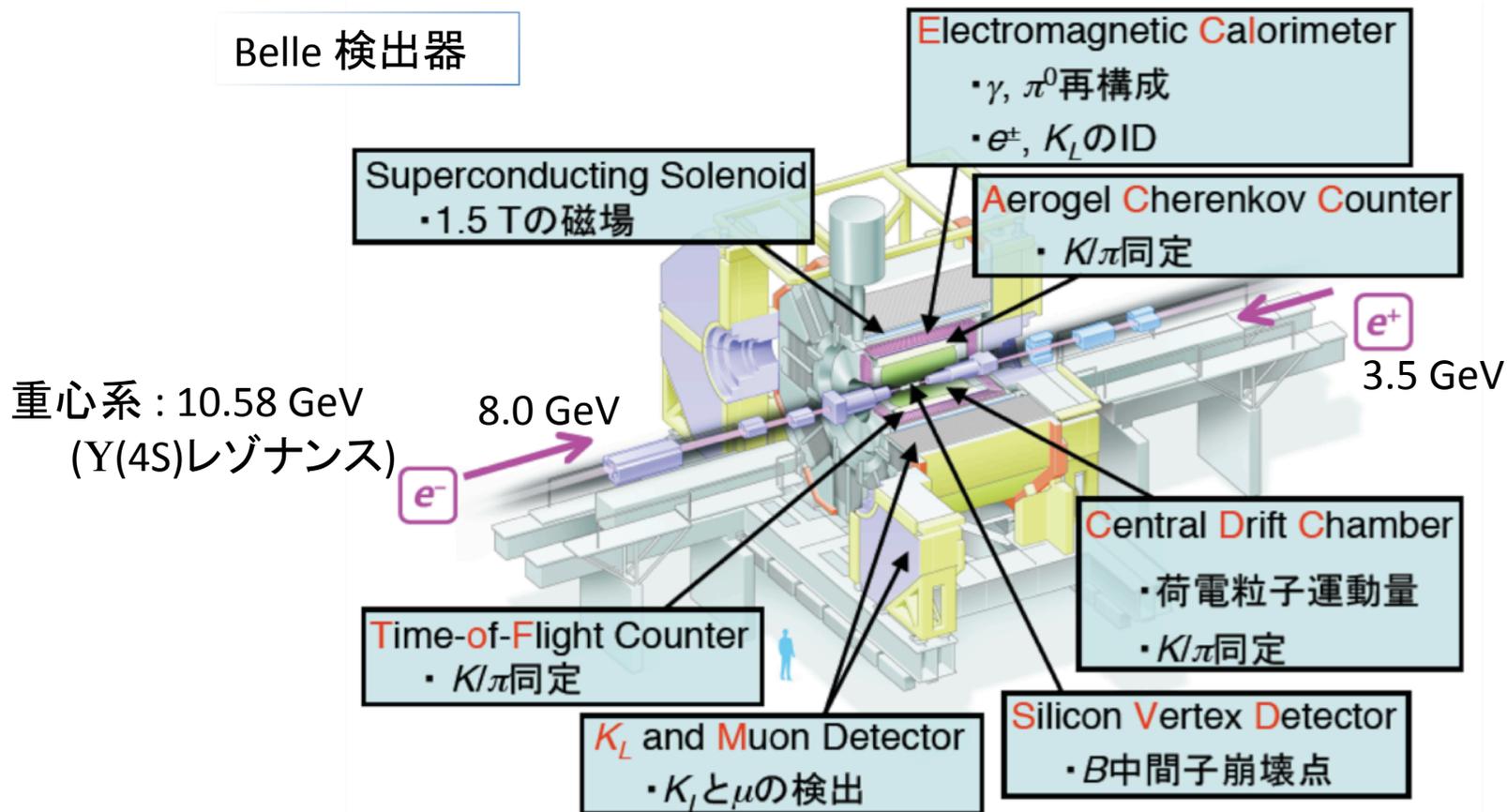
根岸健太郎

目次

- 序論
 - Belle 実験
 - CP非保存角 ϕ_3
 - $B \rightarrow DK^{(*)}$ 崩壊
- $B^0 \rightarrow D K^{*0}$ 崩壊分岐比の測定
- まとめ

Belle 実験

- 約300人 (14ヶ国) による共同研究。
- 積分ルミノシティ ~ 1000/fb (うち710.5/fbが $\Upsilon(4S)$)
(ピークルミノシティ 21.1/nb/sec)



CP非保存角 ϕ_3

- CKM(カビボ・小林・益川)行列

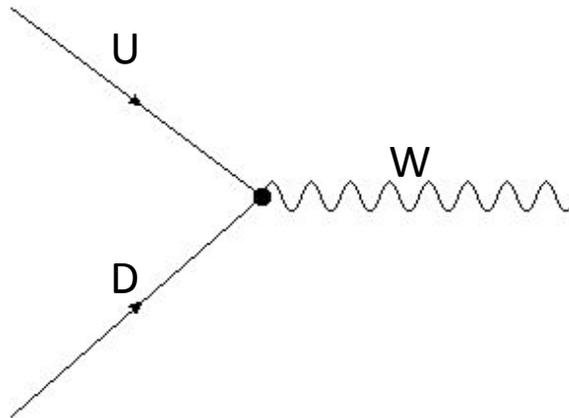
- アップタイプクォークとダウンタイプクォークがWボゾンと相互作用する

$$L_{int} = -\frac{g}{\sqrt{2}}(\overline{U}_L\gamma_\mu V_{CKM}D_LW_\mu^+) + h.c$$

U = (u, c, t)

D = (d, s, b)

U_L, D_L : 左巻き成分



CP非保存角 ϕ_3

- CKM(カビボ・小林・益川)行列

- アップタイプクォークとダウンタイプクォークがWボゾンと相互作用する

$$U = (u, c, t)$$

$$D = (d, s, b)$$

U_L, D_L : 左巻き成分

$$L_{int} = -\frac{g}{\sqrt{2}} (\overline{U}_L \gamma_\mu V_{CKM} D_L W_\mu^+) + h.c$$

- クォークとWボゾンとの結合の混合に関するユニタリ行列

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

$$V_{CKM} V_{CKM}^\dagger = I$$

ユニタリ条件

各成分は複素数

複素位相は V_{ub}, V_{td} に押し込められる

CP非保存角 ϕ_3

- CKM(カビボ・小林・益川)行列

- アップタイプクォークとダウンタイプクォークがWボゾンと相互作用する

$$U = (u, c, t)$$

$$D = (d, s, b)$$

U_L, D_L : 左巻き成分

$$L_{int} = -\frac{g}{\sqrt{2}} (\overline{U}_L \gamma_\mu V_{CKM} D_L W_\mu^+) + h.c$$

- クォークとWボゾンとの結合の混合に関するユニタリ行列

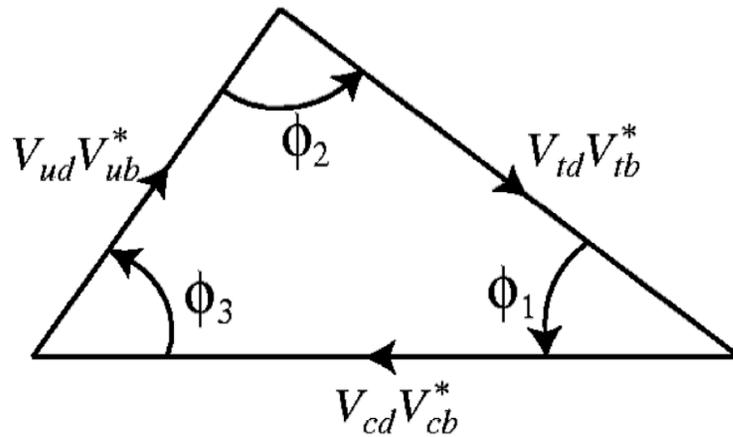
$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad V_{CKM} V_{CKM}^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

各成分が複素数なので、この等式から複素平面上に三角形がかける

ユニタリティ三角形

- ユニタリティ三角形とCP非保存角 ϕ_3



$$\phi_1 = (21.15^{+0.90}_{-0.88})^\circ$$

$$\phi_2 = (89.0^{+4.4}_{-4.2})^\circ$$

$$\phi_3 = (71^{+21}_{-25})^\circ$$

(CKMfitter, 2010)

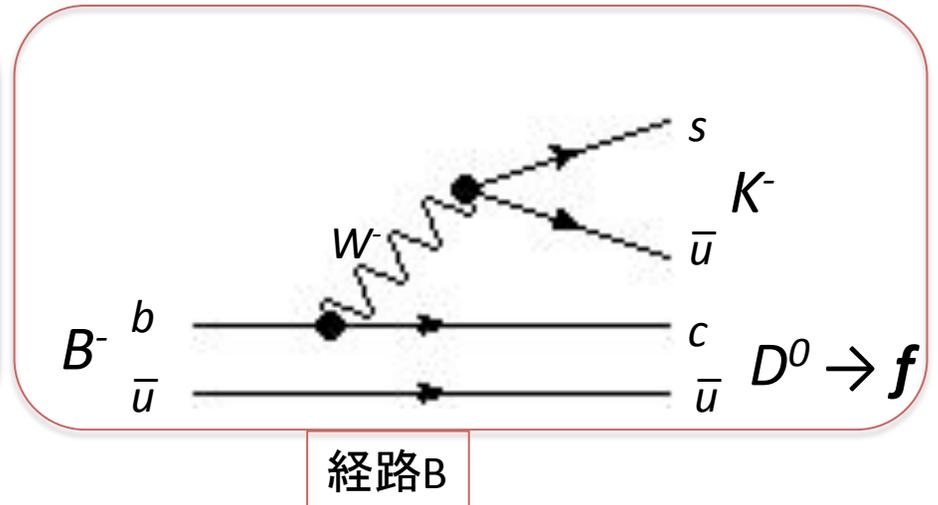
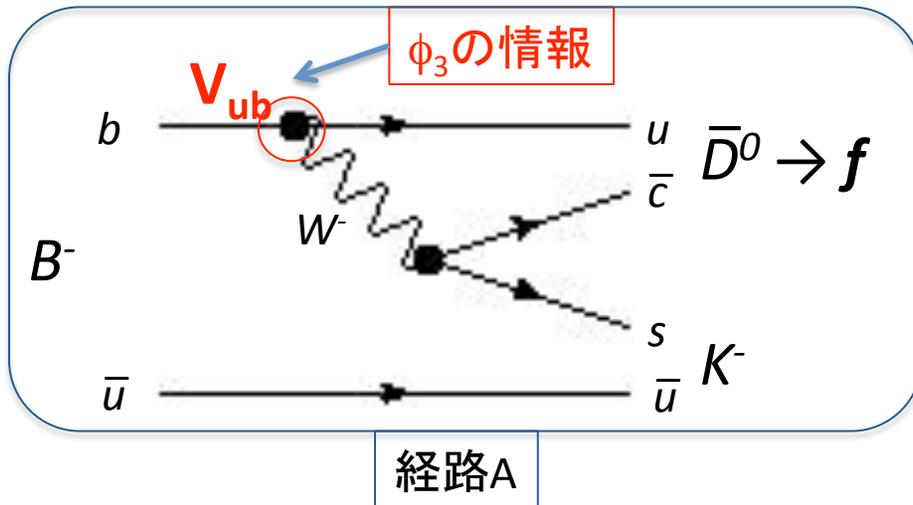
ϕ_3 が最も精度が悪い
精度の向上が望まれる

$$\begin{aligned} \phi_3 &\equiv \arg\left(\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{-V_{cd}V_{cb}^*}\right) \\ &\sim -\arg(V_{ub}) \end{aligned}$$

b \rightarrow u遷移(V_{ub} が含まれる)のあるモードで観測する事になる

B → DK(*)崩壊

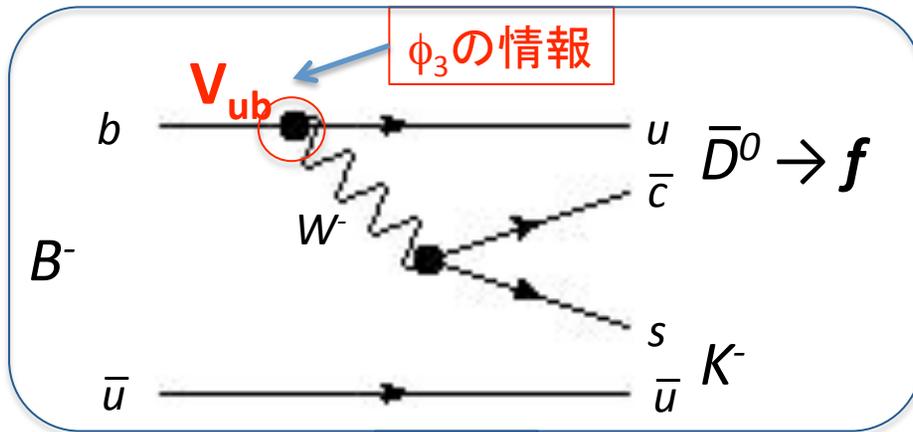
D: D⁰ または \bar{D}^0



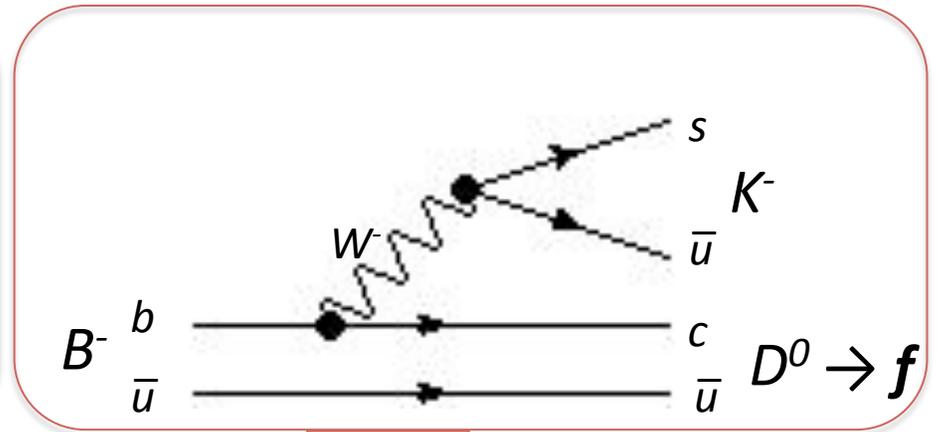
- 二つのtree diagramが書ける
 - D⁰, \bar{D}^0 が同じ終状態に崩壊する事で干渉する
 - 経路Aにb → u遷移が含まれ、 ϕ_3 の情報が入ってくる

B → DK(*)崩壊

D: D⁰ または \bar{D}^0



経路A



経路B

小

崩壊のアンプリチュード

大

Charge conjugateで
弱い相互作用の位相 ϕ_3 は
符号がひっくり返る

経路B

$$A(B^- \rightarrow D^0 K^-) = A(B^+ \rightarrow \bar{D}^0 K^+)$$

A(B⁺ → D⁰ K⁺)

経路A のcharge conjugate

+ ϕ_3

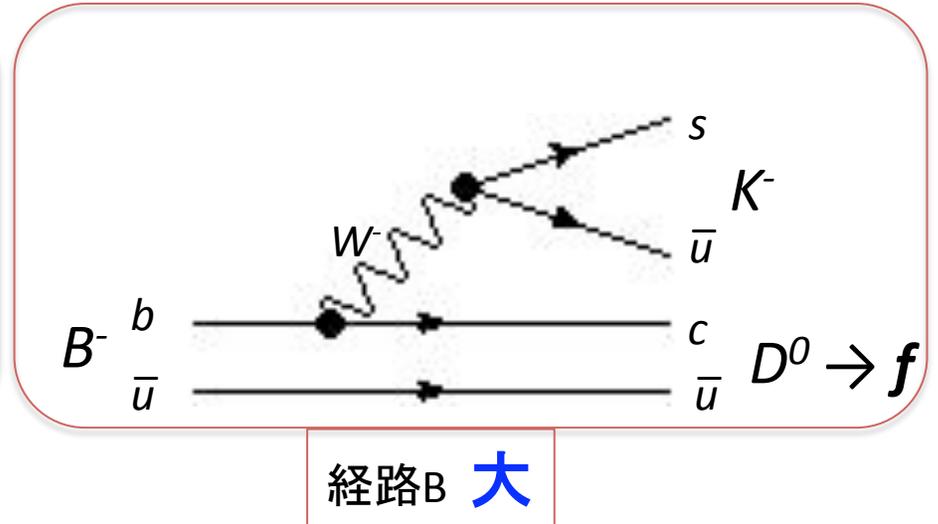
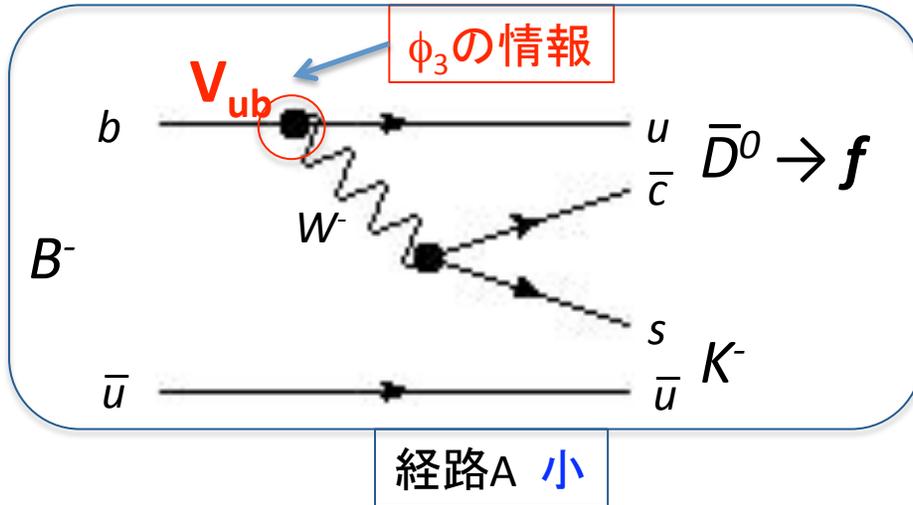
- ϕ_3

A(B⁻ → \bar{D}^0 K⁻)

経路A

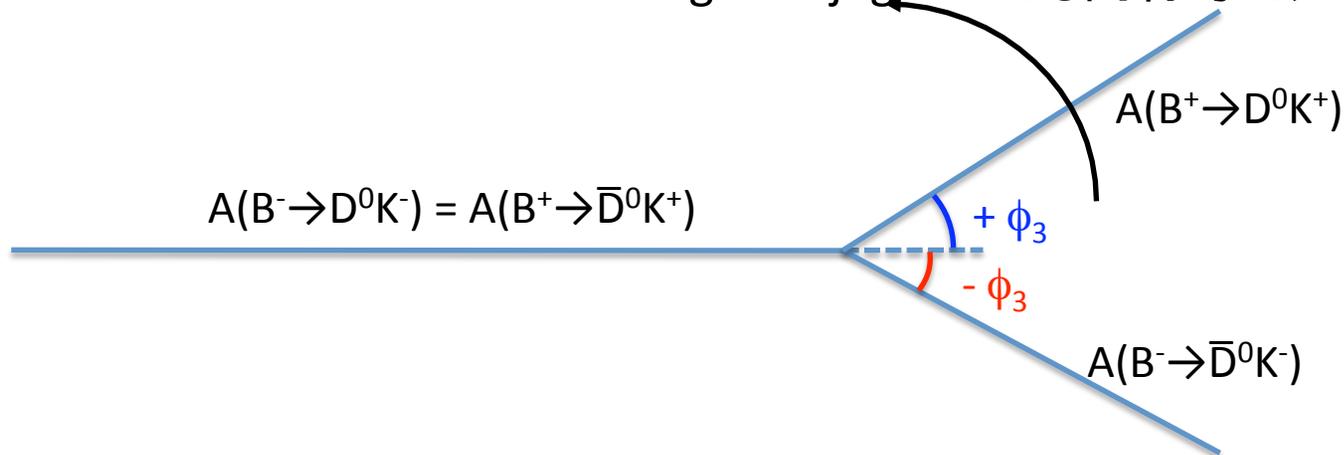
B → DK(*)崩壊

D: D⁰ または \bar{D}^0



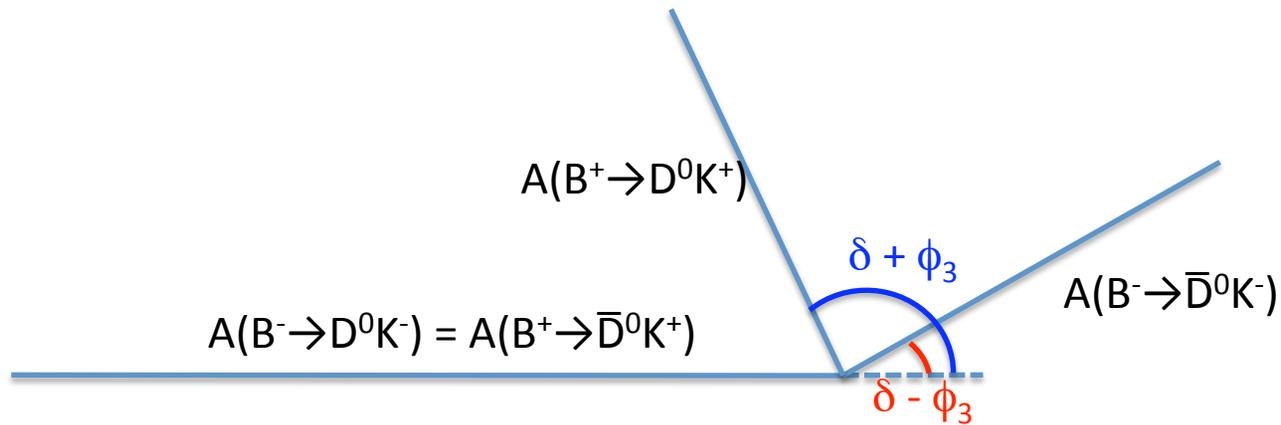
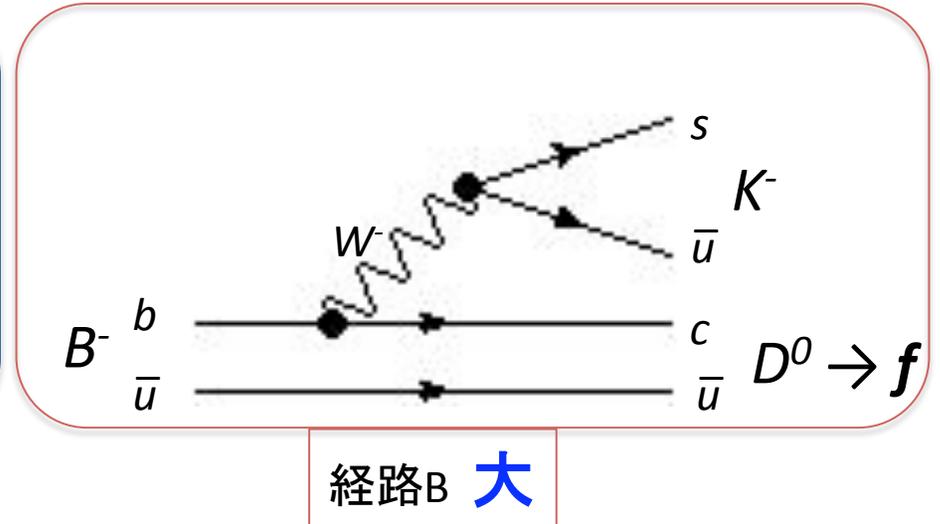
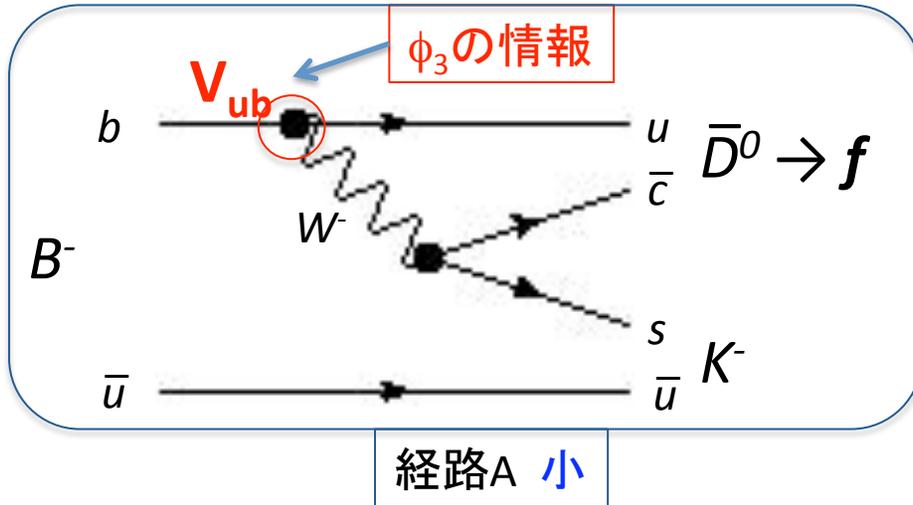
強い相互作用の位相 (δ)

charge conjugatedでも同符号で入ってくる



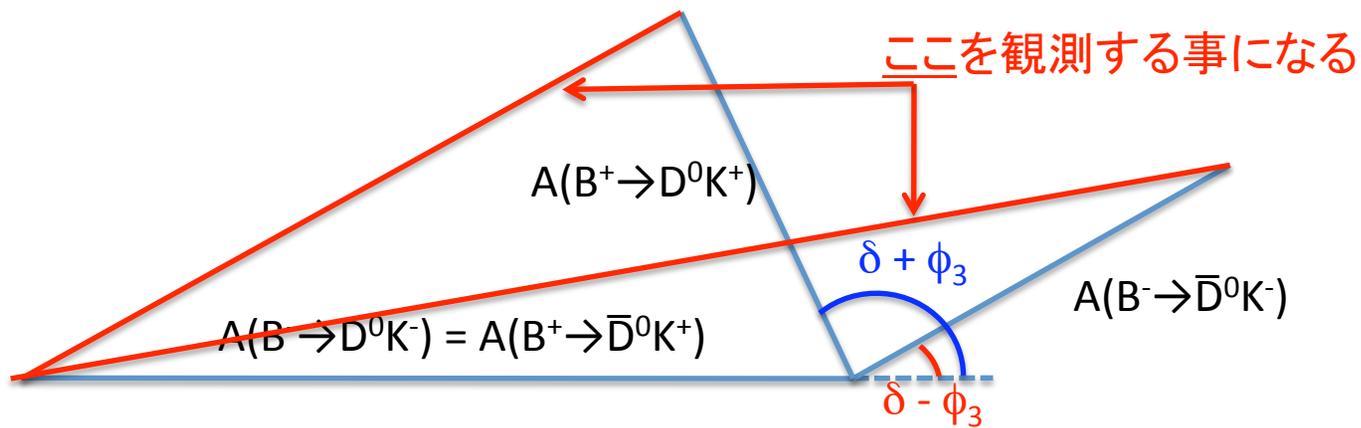
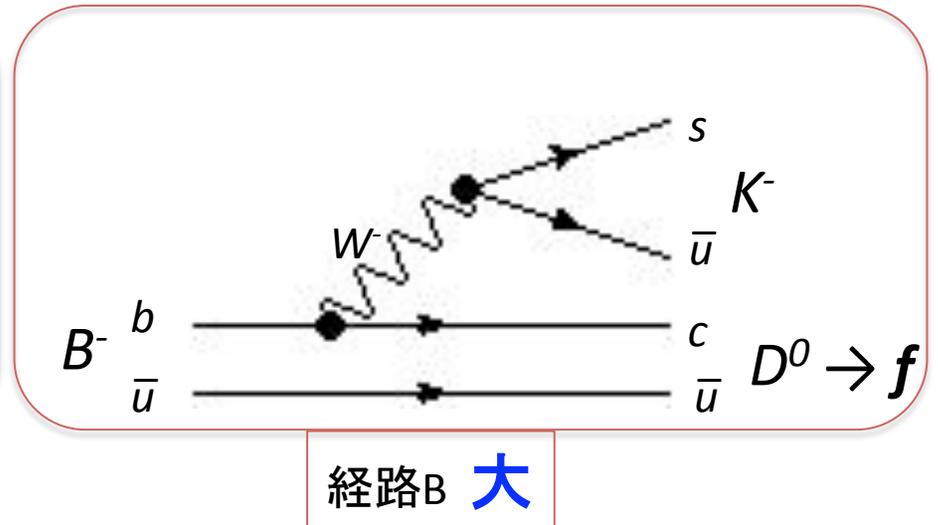
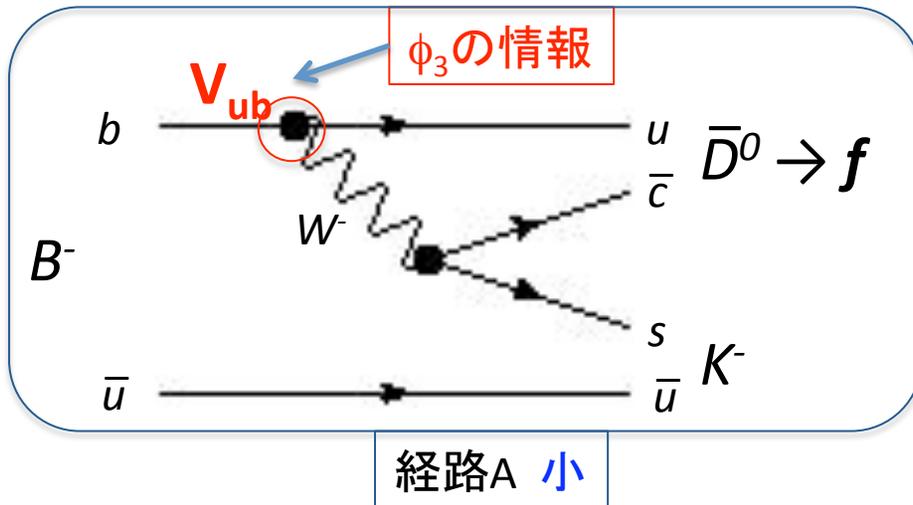
B → DK(*)崩壊

D: D⁰ または \bar{D}^0



B → DK(*)崩壊

D: D⁰ または \bar{D}^0

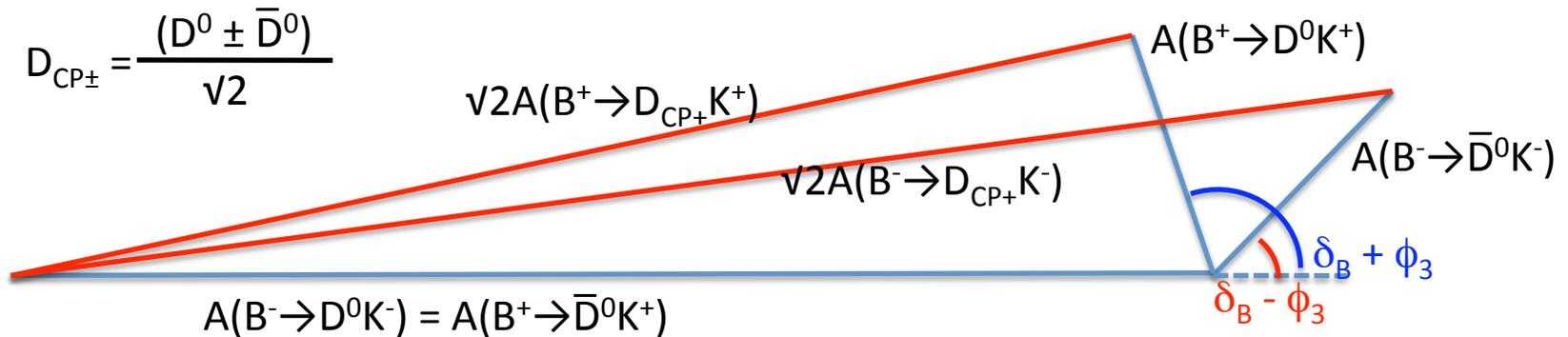


- Bの崩壊を解析し、強い相互作用の位相 δ と共に ϕ_3 を測る

B → DK(*)崩壊に続くDの崩壊の例

- D → K⁺K⁻
 - 比較的大きな崩壊振幅

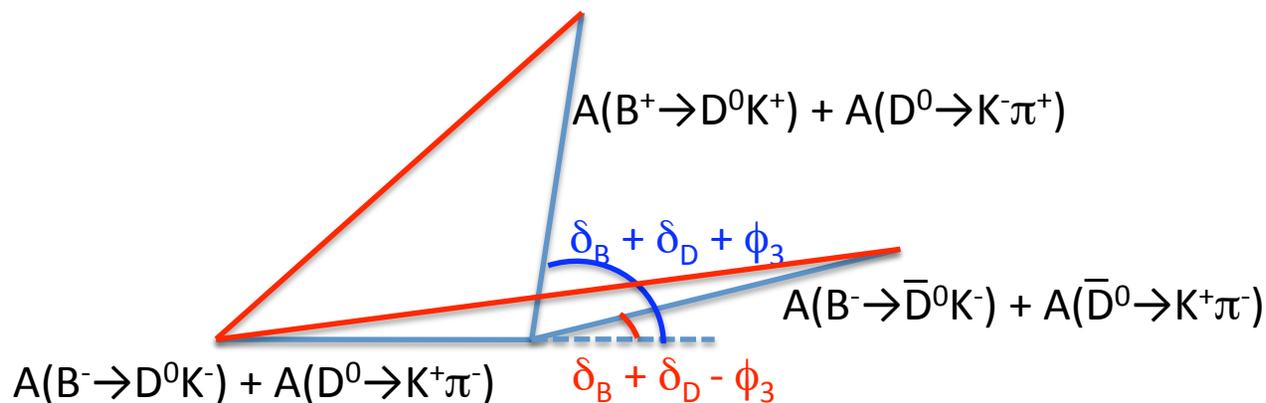
M. Gronau and D. Wyler, PL B265, 172 (1991)



B → DK^(*)崩壊に続くDの崩壊の例

- D → K⁺K⁻
 - 比較的大きな崩壊振幅
- D → K⁺π⁻
 - 崩壊振幅は小さいが、CP非保存の影響が大きい

D. Atwood, I Dunietz and A. Soni, PRL78, 3257 (1997)
PRD63, 036005 (2001)



B → DK^(*)崩壊に続くDの崩壊の例

- D → K⁺K⁻
 - 比較的大きな崩壊振幅
- D → K⁺π⁻
 - 崩壊振幅は小さいが、CP非保存の影響が大きい
- D → K_Sπ⁺π⁻
 - 3体崩壊のレゾナンス分布にφ₃の情報が現れる
 - 現在最も精度良い測定がこの方法を用いたもの

A. Poluektov, PRL81, 112002 (2010)

$$\phi_3 = 78.4^\circ(\text{stat}) \pm 3.6^\circ(\text{syst}) \pm 8.9^\circ(\text{model}) - 11.6^\circ + 10.8^\circ$$

* 大きなモデル不定性を持つ

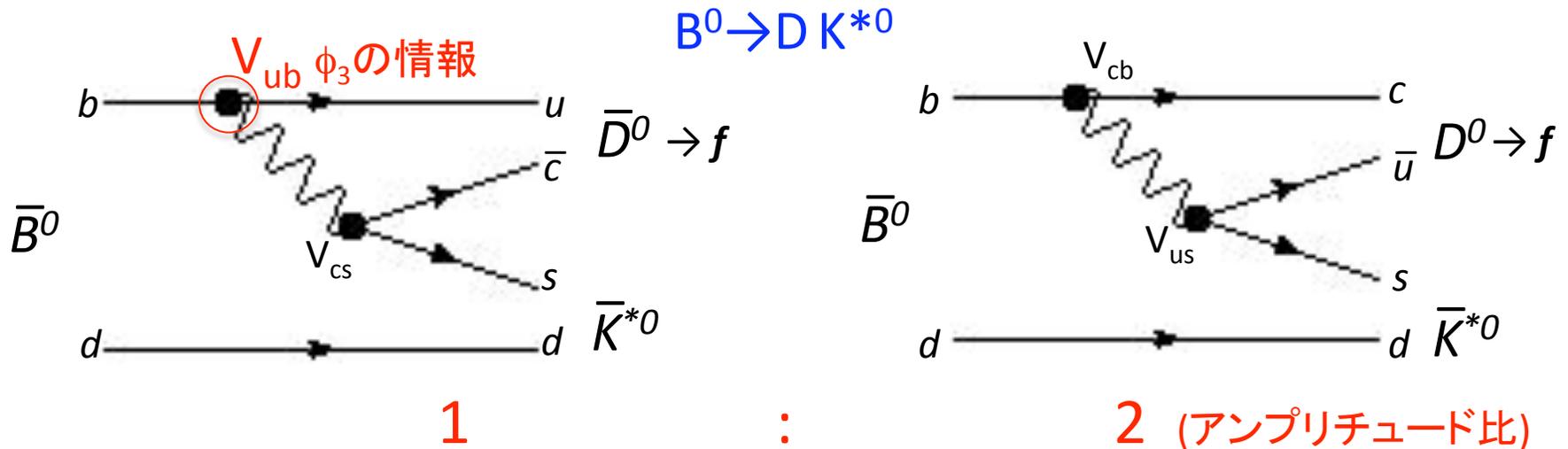
$B \rightarrow DK^{(*)}$ 崩壊に続くDの崩壊の例

- $D \rightarrow K^+K^-$
 - 比較的大きな崩壊振幅
- $D \rightarrow K^+\pi^-$
 - 崩壊振幅は小さいが、CP非保存の影響が大きい
- $D \rightarrow K_S \pi^+ \pi^-$
 - 3体崩壊のレゾナンス分布に ϕ_3 の情報が現れる
 - 現在最も精度良い測定がこの方法を用いたもの
- $B^- \rightarrow [K^*K]DK^-$
 - 東北大D1善明さん、発表はこの後

$B \rightarrow DK^{(*)}$ 崩壊に続くDの崩壊の例

- $D \rightarrow K^+K^-$
 - 比較的大きな崩壊振幅
- $D \rightarrow K^+\pi^-$
 - 崩壊振幅は小さいが、CP非保存の影響が大きい
- $D \rightarrow K_S \pi^+ \pi^-$
 - 3体崩壊のレゾナンス分布に ϕ_3 の情報が現れる
 - 現在最も精度良い測定がこの方法を用いたもの
- $B^- \rightarrow [K^*K]DK^-$ **乞うご期待**
 - 東北大D1善明さん、発表はこの後

研究動機



- K^{*0} の崩壊には $K^+ \pi^-$ を使用する事で、
B中間子のフレーバーが一意に解る ($B^0 \bar{B}^0$ タグ)。

$K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^- \sim 2/3$ $\rightarrow K^0 \pi^0 \sim 1/3$	K^* を組むKの電荷が + $\rightarrow K^{*0} \rightarrow B^0$ - $\rightarrow \bar{K}^{*0} \rightarrow \bar{B}^0$
--	---

- 荷電Bの ϕ_3 測定で用いる解析手法が中性Bで応用できる。
 - 本研究では $f = K^+ \pi^-$ を使用。
- 二つの経路のアンプリチュードの差が荷電Bのモードより小さい
 - ϕ_3 の感度が高いと予想される。

B → \bar{D}^0 K^{*0} 崩壊の再構成

PDGの値

$$M_{D^0} = 1.865 \text{ GeV}$$

$$M_{K^{*0}} = 0.896 \text{ GeV}$$

$$M_{B^0} = 5.279 \text{ GeV}$$

- K^\pm/π^\pm 同定
 - Efficiency ~ 90 %, Fake rate ~ 10 %
- D^0, K^{*0} 中間子の再構成
 - D^0 : $|M_{K\pi} - M_{D^0}| < 0.015 \text{ GeV}$ ($\pm 3 \sigma$)
 - K^{*0} : $|M_{K\pi} - M_{K^{*0}}| < 0.050 \text{ GeV}$ ($\pm 1 \Gamma$)
- B^0 中間子の再構成

$$M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^2 - (p_{D^0} + p_{K^{*0}})^2}, \quad \Delta E = E_{D^0} + E_{K^{*0}} - E_{beam}$$

ちゃんと運動量が合ってるか? ちゃんとエネルギーが合ってるか?

$$- |M_{bc} - M_{B^0}| < 0.008 \text{ GeV} (\pm 3 \sigma)$$

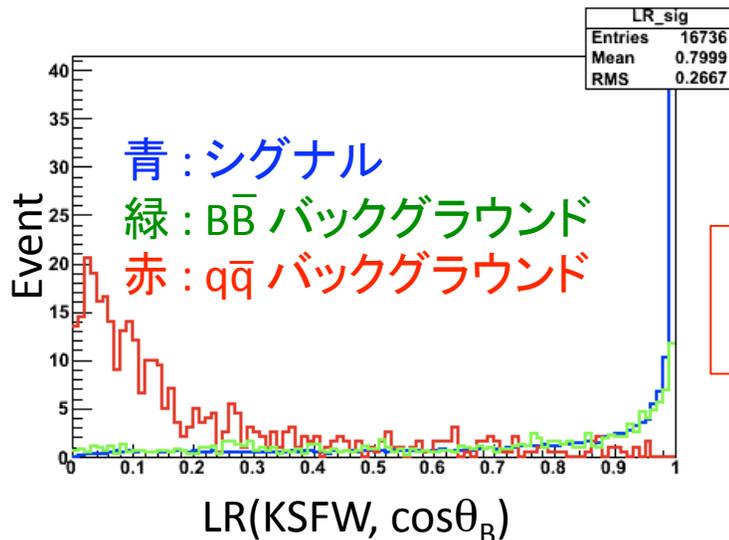
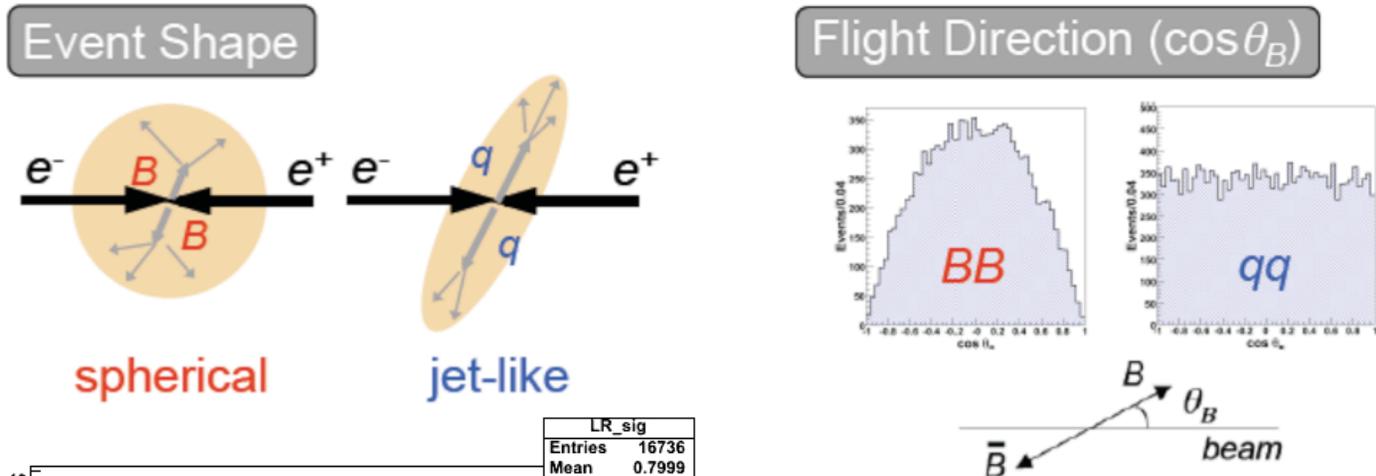
– ΔE → フィット

q \bar{q} バックグラウンドの抑制

q \bar{q} バックグラウンド : $e^+ e^- \rightarrow q\bar{q}$ ($q = (u,d,s,c)$)

B \bar{B} バックグラウンド : $B \rightarrow XY$

- 崩壊の幾何学的な形、B中間子の飛行方向

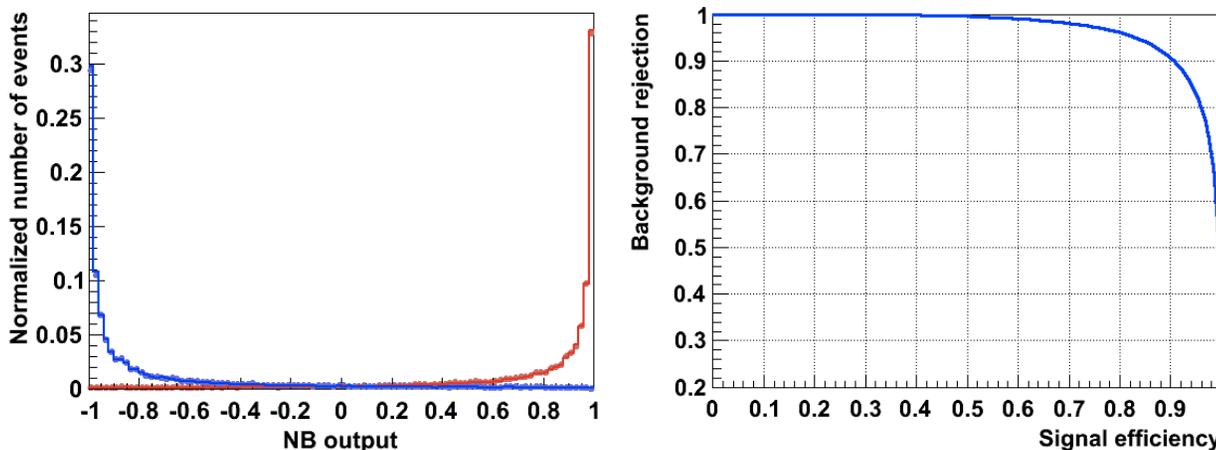


Signal と Background で
分布の違いからよく分離出来ている

q \bar{q} バックグラウンドの抑制

続き

- Neural Net (NeuroBayes)
 - q \bar{q} イベントとシグナルで分布の違う変数をインプットして、ニューラルネットで分離させる、B \rightarrow DKでは新しい手法。



東北大学D3堀井さん指導の下、D1の善明さんと共に同様の手法で解析中。

かなり良く分離出来ている。
(ただし現在optimize中の途中結果)

B \bar{B} バックグラウンドの抑制

D $^-$ K $^+$, D $^-$ π^+ 崩壊の抑制

$$|M_{KK\pi, K\pi\pi} - 1.87 \text{ GeV}| > 0.025 \text{ GeV}$$

Charged D mass

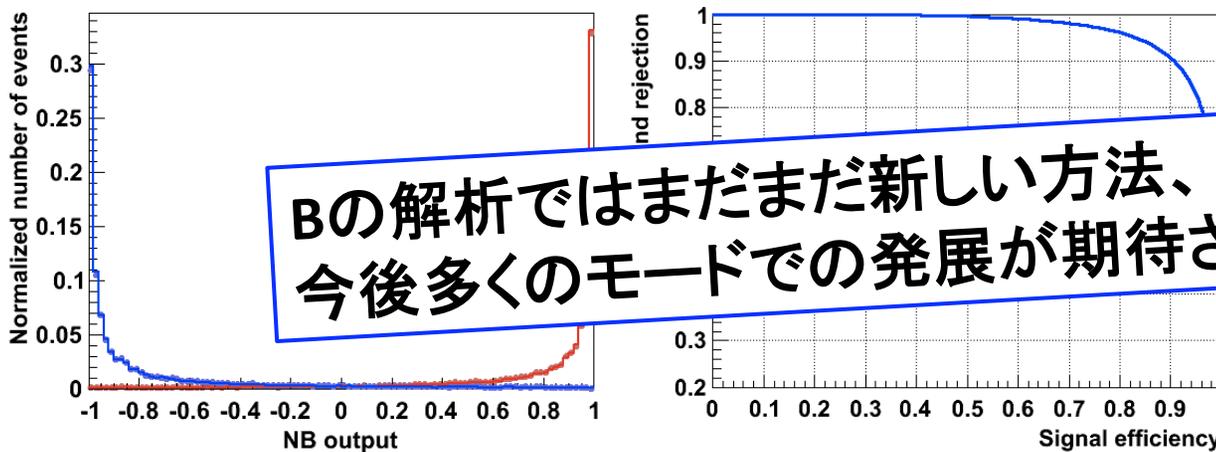
例) D $^-$ [K $^-$ π^+ π^-] K $^-$

シグナルと同じ
終状態を作り得る。

q \bar{q} バックグラウンドの抑制

続き

- Neural Net (NeuroBayes)
 - q \bar{q} イベントとシグナルで分布の違う変数をインプットして、ニューラルネットで分離させる、B \rightarrow DKでは新しい手法。



東北大学D3堀井さん指導の下、D1の善明さんと共に手法で解析中。

Bの解析ではまだまだ新しい方法、今後多くのモードでの発展が期待される。

かなり良く分離出来ている。
(ただし現在optimize中の途中結果)

B \bar{B} バックグラウンドの抑制

D $^-$ K $^+$, D $^-$ π^+ 崩壊の抑制

$$|M_{KK\pi, K\pi\pi} - 1.87 \text{ GeV}| > 0.025 \text{ GeV}$$

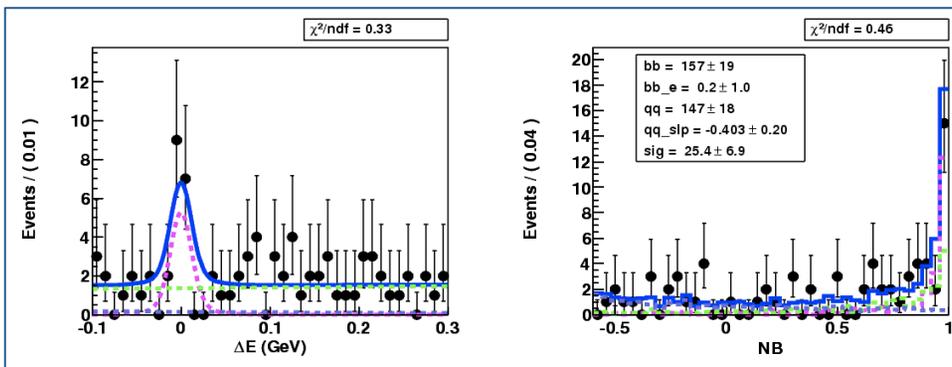
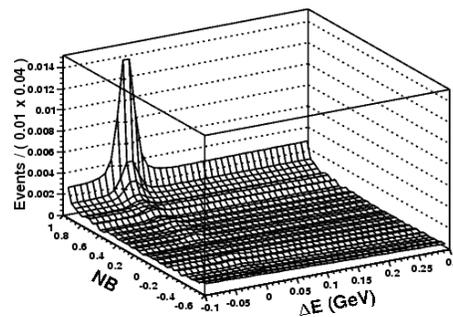
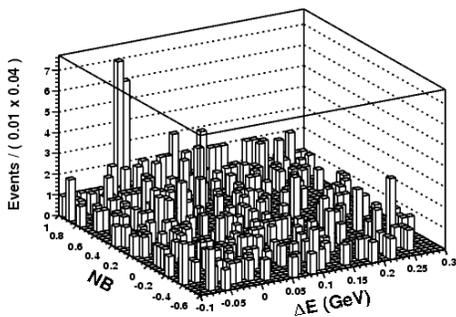
Charged D mass

例) D $^-$ [K $^-$ π^+ π^-] K $^-$

シグナルと同じ
終状態を作り得る。

現在の状況

- Neurobayesのアウトプットと ΔE の二次元フィット
– Real data SVD1 (152M $B\bar{B}$)分の結果



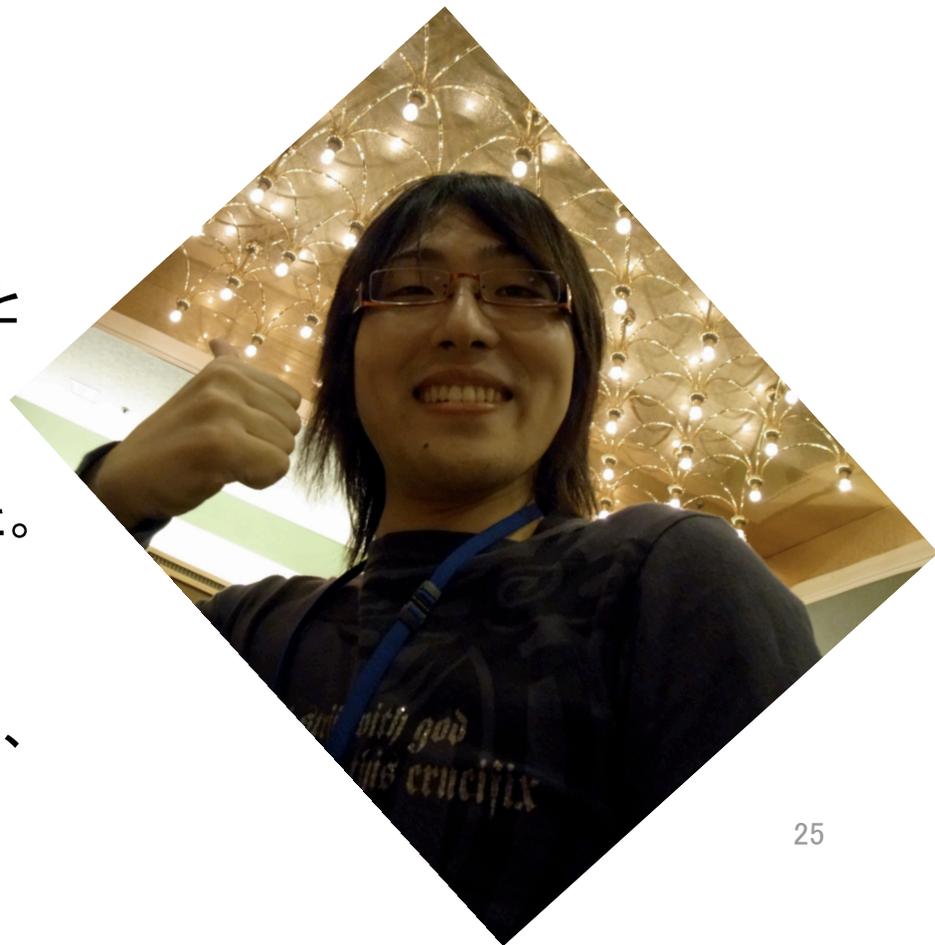
$B^0 \rightarrow [K^+\pi^-]_D K^{*0}$ & charge conjugate
先ずは崩壊分岐比を測っている所です。

まとめ

- クォークにおけるCP非保存は
小林・益川模型で説明出来る。
 - CP非保存角 ϕ_3 の測定はTree diagramを使って行われ、
精度の向上が求められる。
 - 精密測定は新しい物理へのアプローチの一つ。
- $B^0 \rightarrow DK^{*0}$ 崩壊の解析中
 - 修士論文までには ϕ_3 フィットまで行きたいです。

ありがとうございました

東北大で ϕ_3 の解析をしている
D3の堀井さん、D1の善明さん(この後)と
ほぼ同様の方法で解析しています。
今回は、自分の発表が先だったので、
B→DKの基本的な事を多く発表しました。
善明さんの発表では
解析のもう少し立ち入ったお話や、
LHCbの脅威についてのお話もあります、
お楽しみに！



$$R_{ADS} = r_S^2 + r_D^2 + 2kk_D r_S r_D \cos\phi_3 \cos(\delta_S + \delta_D)$$

$$r_S^2 \equiv \frac{\Gamma(B^0 \rightarrow D^0 K^+ \pi^-)}{\Gamma(B^0 \rightarrow \bar{D}^0 K^+ \pi^-)} = \frac{\int dp A_u^2(p)}{\int dp A_c^2(p)}$$

$$r_D^2 \equiv \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow f)}{\Gamma(D^0 \rightarrow \bar{f})} = \frac{\int dm A_{DCS}^2(m)}{\int dm A_{CF}^2(m)}$$

$$k e^{i\delta_S} \equiv \frac{\int dp A_c(p) A_u(p) e^{i\delta(p)}}{\sqrt{\int dp A_c^2(p) \int dp A_u^2(p)}}$$

$$k_D e^{i\delta_D} \equiv \frac{\int dm A_{CF}(m) A_{DCS}(m) e^{i\delta(m)}}{\sqrt{\int dm A_{CF}^2(m) \int dm A_{DCS}^2(m)}}$$

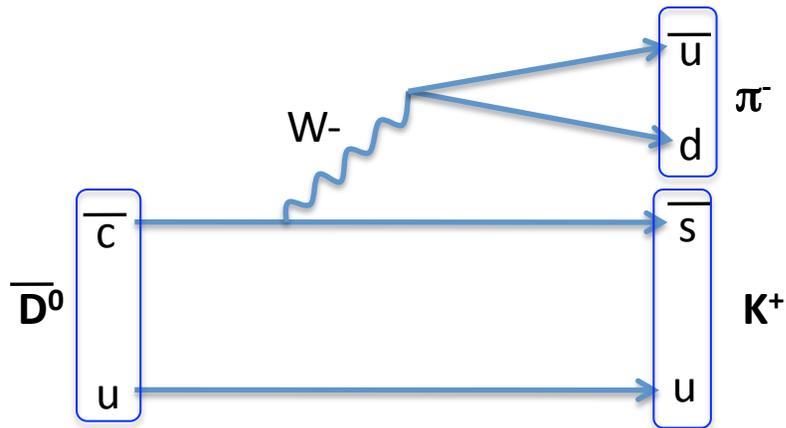
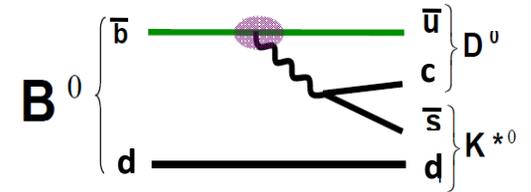
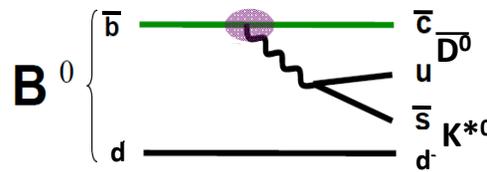
本解析で扱う崩壊

- $f = K^+ \pi^-$

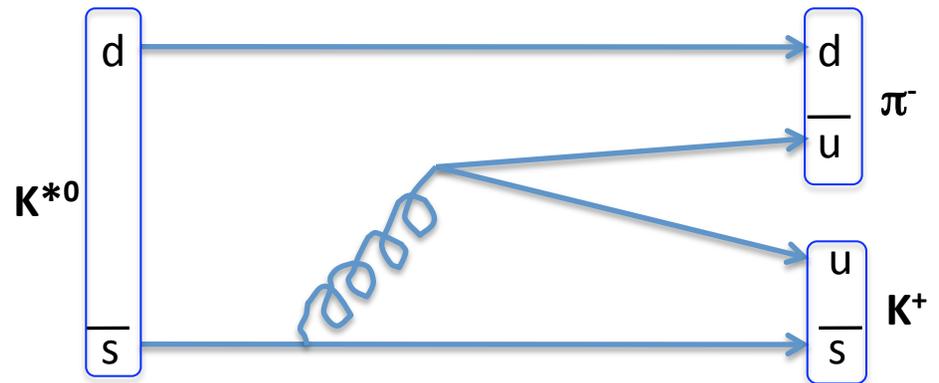


- $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$

- $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$ (B^0, \bar{B}^0 タグ)

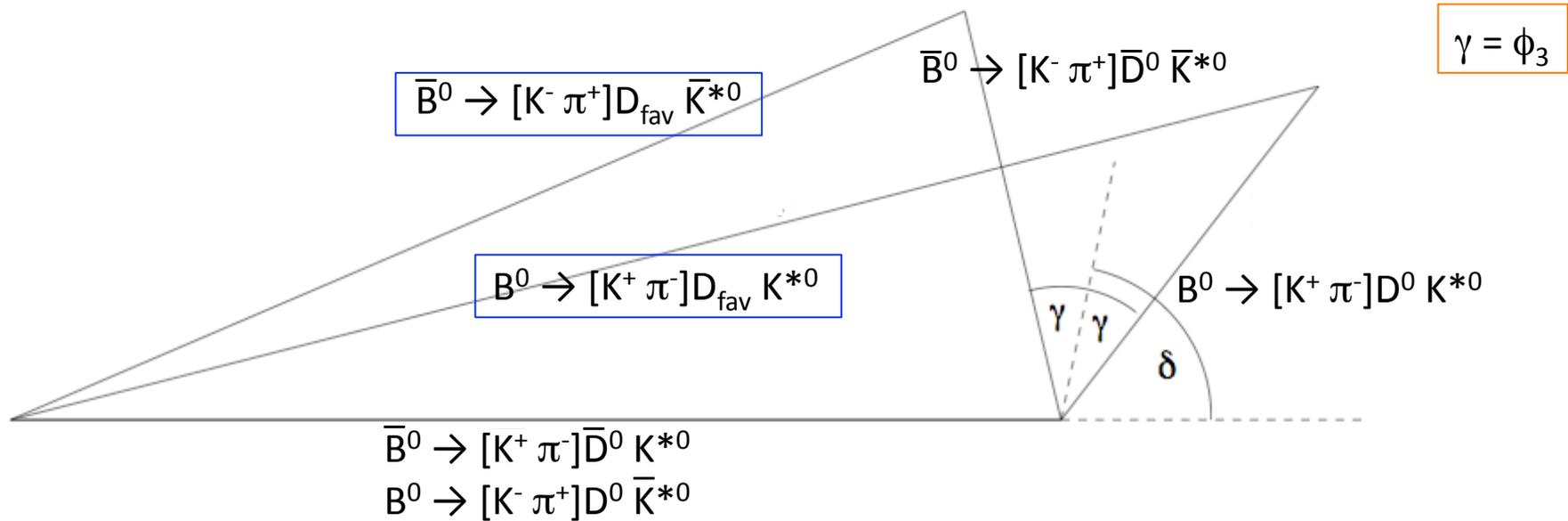


$\text{Br}(\bar{D}^0 \rightarrow K^- \pi^+) = (3.89 \pm 0.05) \%$



$\text{Br}(K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-) \sim 67 \%$

ϕ_3 測定基本概念 (ADS method の様なもの)



$$d(K^*, f_i) \equiv a(K^*)c(f_i) + b(K^*)c(\bar{f}_i) + 2\sqrt{a(K^*)b(K^*)c(f_i)c(\bar{f}_i)\cos(\delta_i + \gamma)}$$

$$\bar{d}(K^*, f_i) \equiv a(K^*)c(f_i) + b(K^*)c(\bar{f}_i) + 2\sqrt{a(K^*)b(K^*)c(f_i)c(\bar{f}_i)\cos(\delta_i - \gamma)}$$

$$a(K^*) \equiv \mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^0 \bar{K}^{*0}) \quad b(K^*) \equiv \mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow \bar{D}^0 \bar{K}^{*0})$$

$$c(f_i) \equiv \mathcal{B}(D^0 \rightarrow K^- \pi^+) \quad c(\bar{f}_i) \equiv \mathcal{B}(D^0 \rightarrow K^+ \pi^-) \quad \text{既知}$$

$$d(K^*, f_i) \equiv \mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow [K^- \pi^+] D \bar{K}^{*0})$$

$$\bar{d}(K^*, f_i) \equiv \mathcal{B}(B^0 \rightarrow [K^+ \pi^-] D K^{*0})$$

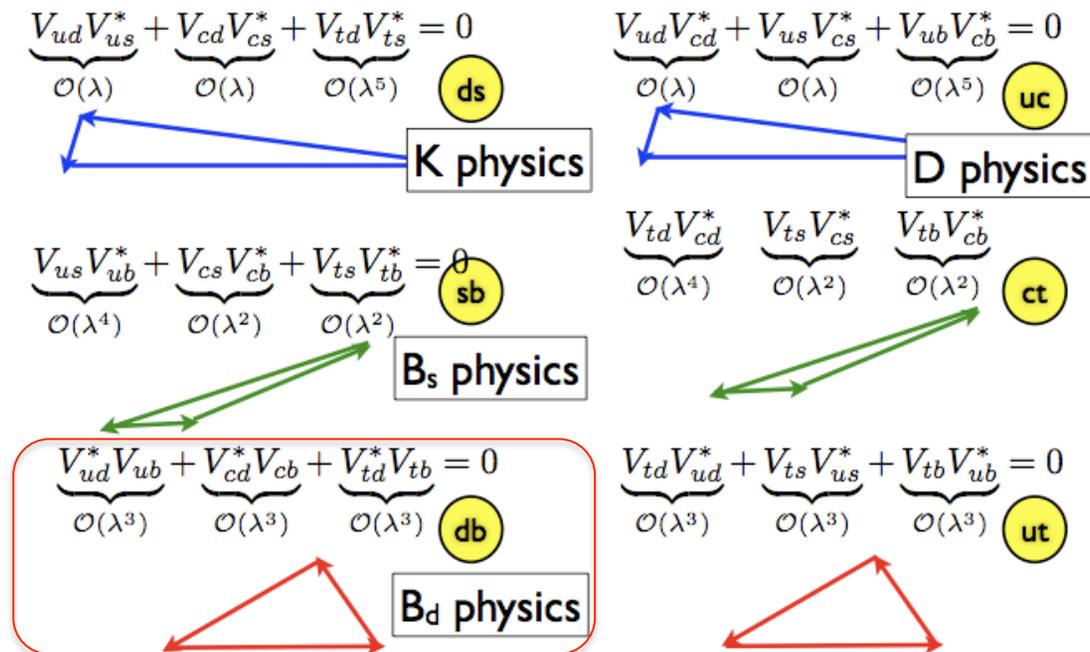
} 直接測るのはコレ

ユニタリティ三角形その他

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

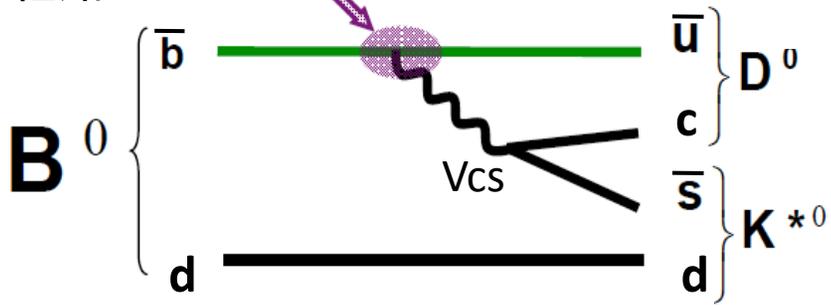
勿論、他の列をとってきても(Bを使わない)
三角形は書けます
(CKM行列の各成分が複素数たりうるので)

- V_{ub} , V_{td} 成分に複素位相を出来るだけ押し込めてるので、三角形が潰れる事になります。



$B^0 \rightarrow D K^{*0}$

經路A



經路B

