$B^0 \to DK^{*0}$崩壊の研究

東北大学
根岸 健太郎

目次

- 序論
  - Belle実験
  - CP非保存角ϕ_3
  - $B \to DK$崩壊
- R_{DK^*}測定
- まとめ

Belle実験について

CP非保存角ϕ_3とは

ϕ_3測定のための$B \to DK$崩壊

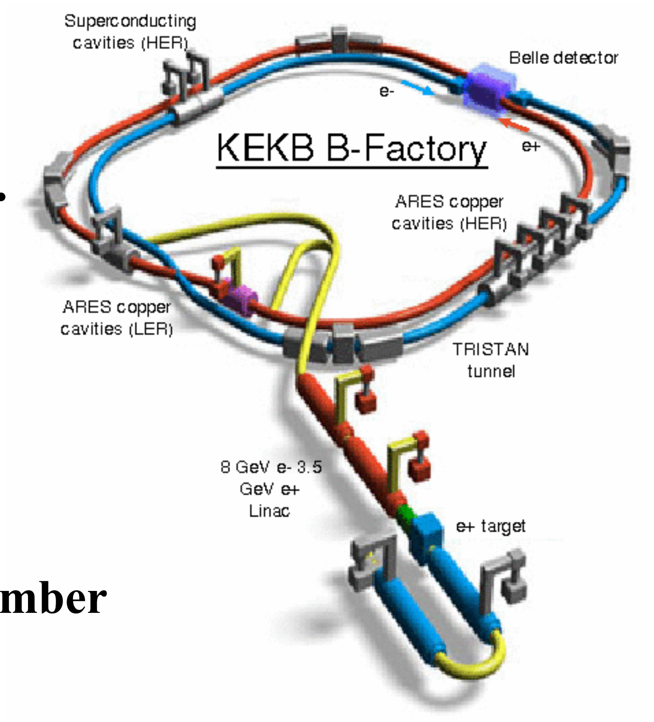
序論

Belle実験

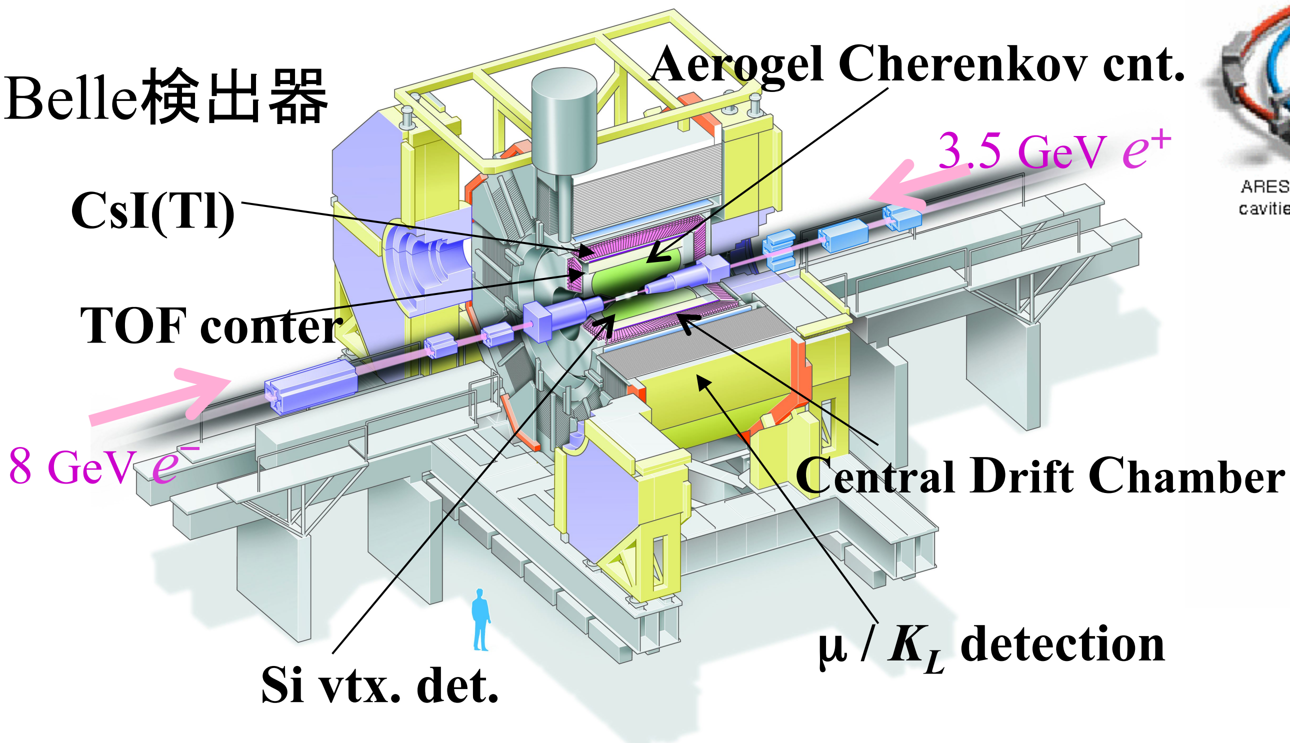
- Belle実験
  - e^+e^-衝突でΥ(4S)($b\bar{b}$レゾナンス)を生成

Υ(4S) → B^+B^- ~ 50 %
→ $B^0\bar{B}^0$ ~ 50 %

- KEKB加速器
  - e^- : 8.0 GeV, e^+ 3.5 GeV, 重心エネルギー10.6 GeV (非線形)
  - e^+e^-衝突器として世界最高のルミノシティ



- Belle検出器

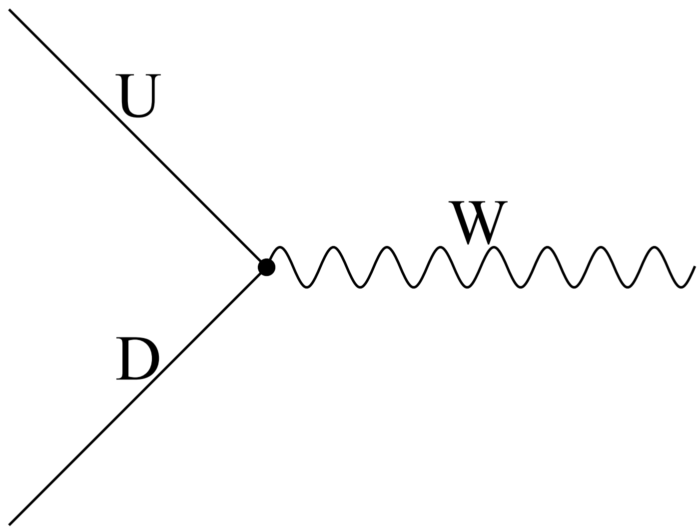


CP非保存角 ϕ_3

- CKM(Caibbo-小林-益川)行列
  - 弱い相互作用のCharged currentに入ってくる行列
  - 質量の固有状態とフレイバーの固有状態を混合

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

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(Caibbo-小林-益川)行列
  - 弱い相互作用のCharged currentに入ってくる行列
  - 質量の固有状態とフレイバーの固有状態を混合

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

U = (u, c, t)
D = (d, s, b)
U_L, D_L : 左巻き成分

  - CKM行列はユニタリでなければならない

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

各成分は複素数

複素位相はV_{ub}, V_{td}に押し込める事が出来る

$$V_{CKM} V_{CKM}^\dagger = 1$$

ユニタリ条件

CP非保存角 ϕ_3

- CKM(Caibbo-小林-益川)行列
  - 弱い相互作用のCharged currentに入ってくる行列
  - 質量の固有状態とフレイバーの固有状態を混合

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

U = (u, c, t)
D = (d, s, b)
U_L, D_L : 左巻き成分

  - CKM行列はユニタリでなければならない

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

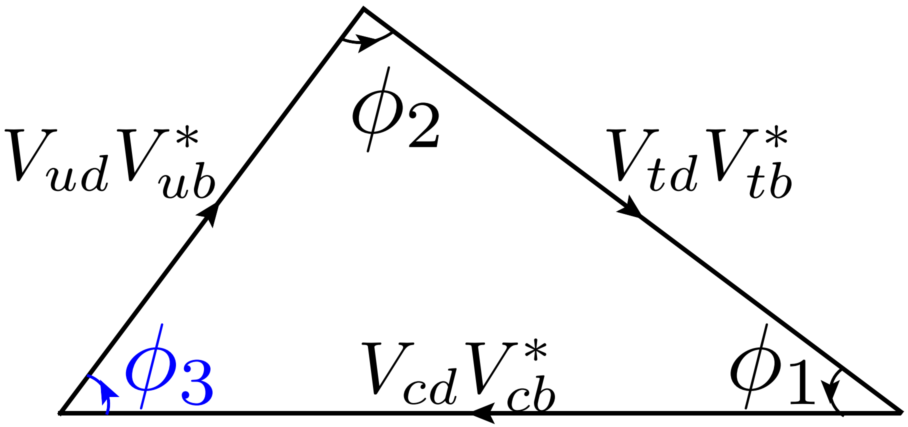
$$V_{CKM} V_{CKM}^\dagger = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

  - 各項が複素数 → 複素平面上に三角形 → ユニタリ三角形

ユニタリ三角形

- ユニタリ三角形



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

$$\sim -\arg(V_{ub})$$

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

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

$$\phi_3 = (68^{+13}_{-14})^\circ$$

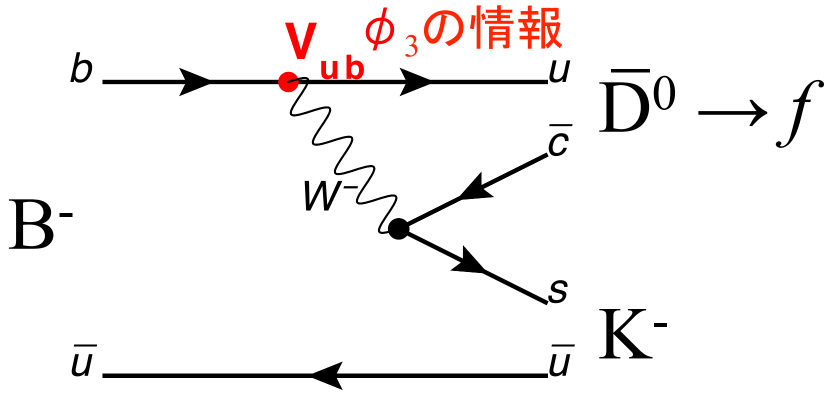
ICHEP 2010
EPS 2011

ϕ_3の精度が悪い
精度の向上
→ SMパラメターの精密測定
→ New Physicsの手掛かり?

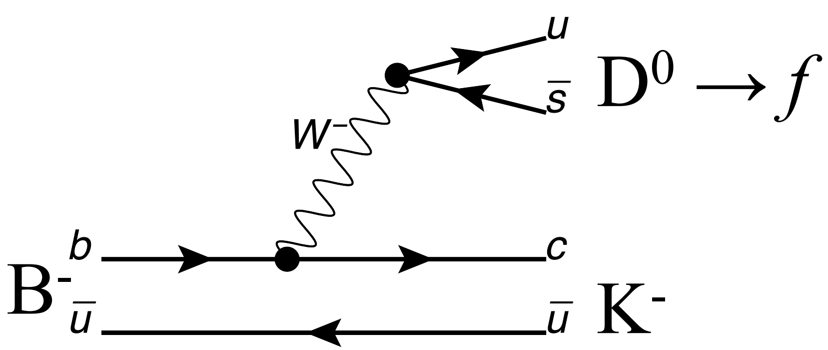
- b → u遷移のある(V_{ub}の含まれる)モードで観測する事となる。
  - どのように観測するか → 次ページ

ϕ_3測定とB → DK崩壊

D : D^0 or $\bar{D}^0$



経路A



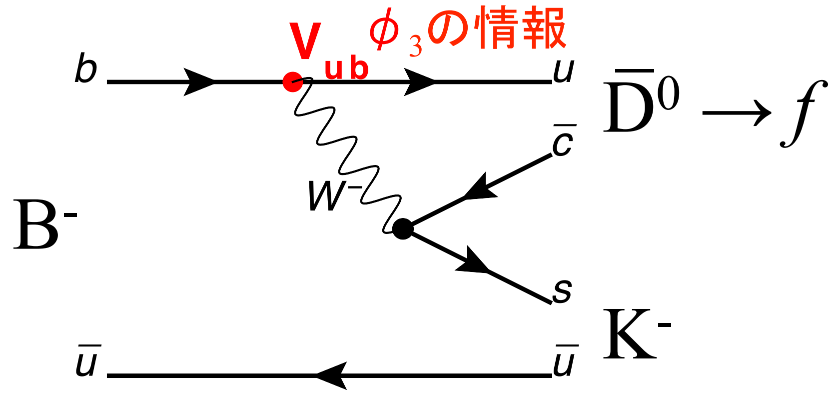
経路B

- $\bar{D}^0$, D^0が同じ終状態 f へ崩壊
  - 終状態が同じ二つのtree diagramが干渉
- 経路Aにb → u遷移が含まれる → ϕ_3の影響が入ってくる

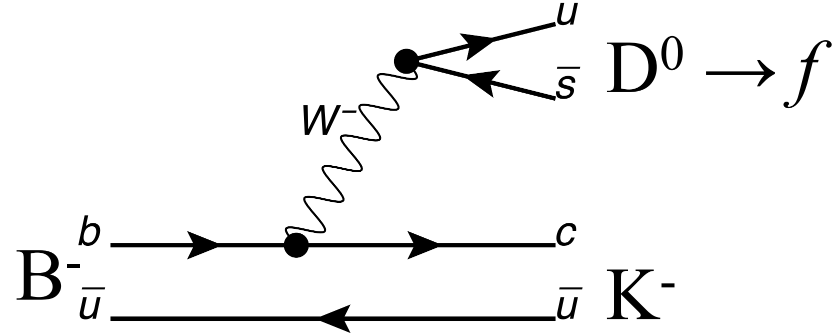
かなりざっくりした説明↑
勿論他にも色々効果が入って来る訳で、、、
もう少し具体的に、
- どんな観測量を測るのか?
- どんな f を使うの?

ϕ_3測定とB → DK崩壊

D : D^0 or $\bar{D}^0$

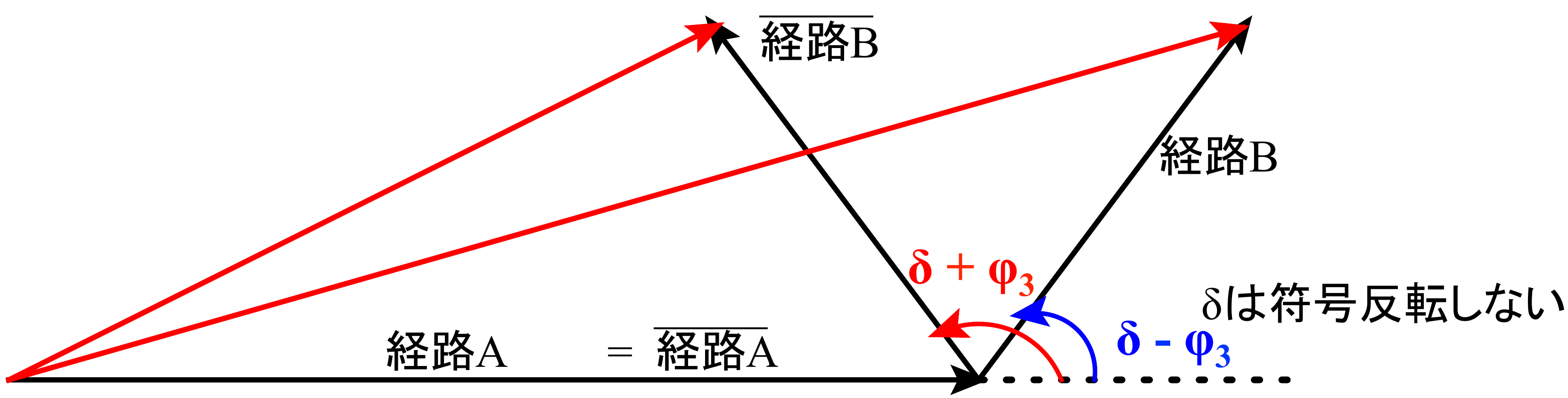


経路A



経路B

- Charge conjugateで弱い相互作用の位相は符号が反転する。
- 経路A,B間でに異なる強い相互作用の位相δが入ってくる

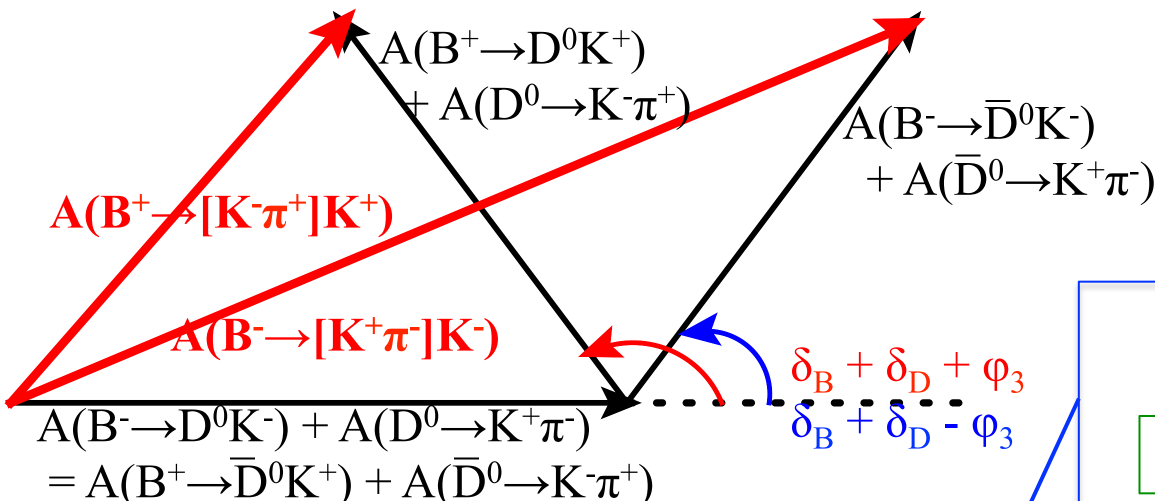


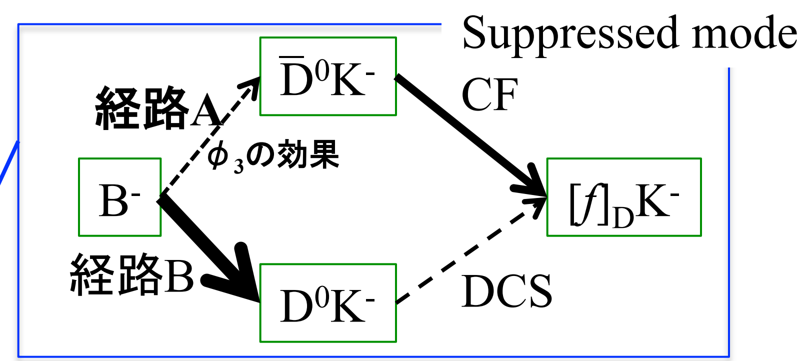
- 観測されるのは赤い線の(経路A,Bの干渉を経た)二乗

B → DK崩壊に続くD崩壊の例 –ADS法–

D. Atwood, I. Dunietz and A. Soni, PRL78, 3257 (1997)
PRD 63, 036005 (2001)

- D → Kπ, Kππ^0, Kπππ, etc
  - D崩壊がFlavor Specific (Favored, Suppressed mode)
  - Sup. modeで崩壊振幅は小さい、CP非保存の影響が大きい





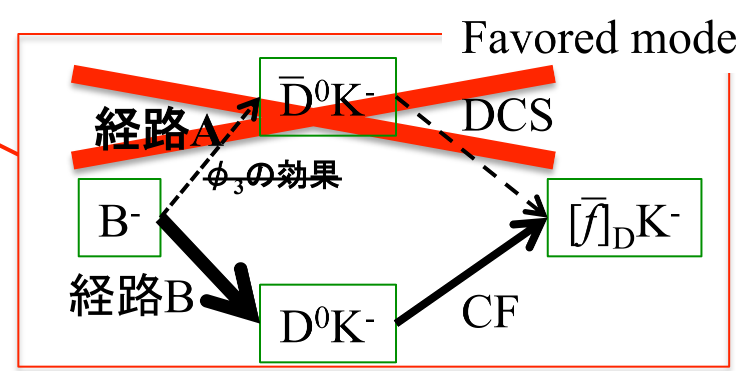
典型的に求める二つの変数

$$R_{ADS} = \frac{\Gamma(B^- \to D_{\rm sup}K^-) + \Gamma(B^+ \to D_{\rm sup}K^+)}{\Gamma(B^- \to D_{\rm fav}K^-) + \Gamma(B^+ \to D_{\rm fav}K^+)}$$

$$= r_B^2 + r_D^2 + 2r_B r_D \cos(\delta_B + \delta_D)\cos\phi_3$$

$$A_{ADS} = \frac{\Gamma(B^- \to D_{\rm sup}K^-) - \Gamma(B^+ \to D_{\rm sup}K^+)}{\Gamma(B^- \to D_{\rm sup}K^-) + \Gamma(B^+ \to D_{\rm sup}K^+)}$$

$$= \frac{\pm 2r_B r_D \sin(\delta_B + \delta_D)\sin\phi_3}{R_{ADS}}$$



B → DK崩壊に続くD崩壊の例 –GLW法–

- D → Kπ, $K\pi\pi^0$, Kπππ, etc
  - D崩壊がFlavor Specific (Favored, Suppressed mode)
  - Sup. modeで崩壊振幅は小さい、CP非保存の影響が大きい

- D → KK, ππ, etc
  - D崩壊がCP固有モード
  - 比較的大きな崩壊振幅

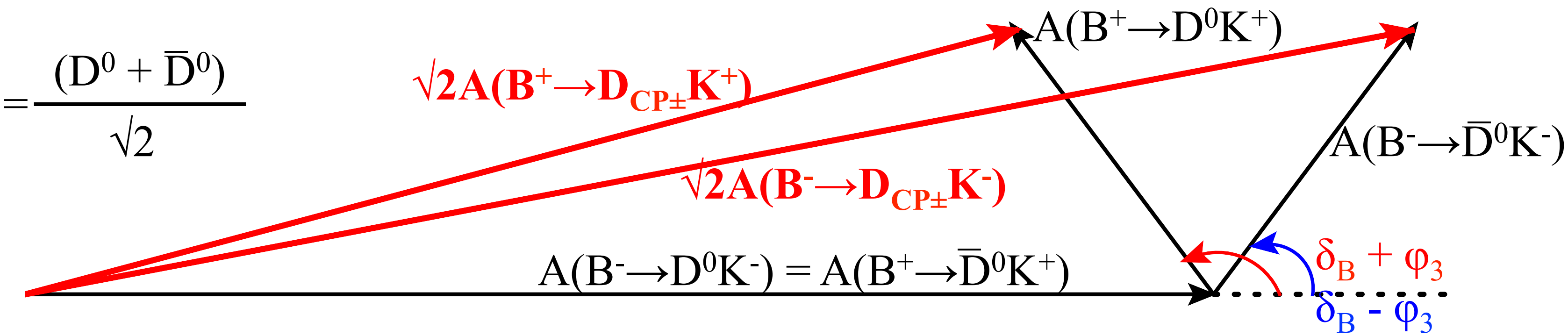
M. Gronau and D. Wyler, PLB 265, 172 (1991)

典型的に求める二つの変数

$$R_\pm = \frac{\Gamma(B^- \to D_\pm K^-) + \Gamma(B^+ \to D_\pm K^+)}{\Gamma(B^- \to D_{\rm fav} K^-) + \Gamma(B^+ \to D_{\rm fav} K^+)} = 1 + r_B^2 \pm 2 r_B \cos\delta_B \cos\phi_3$$

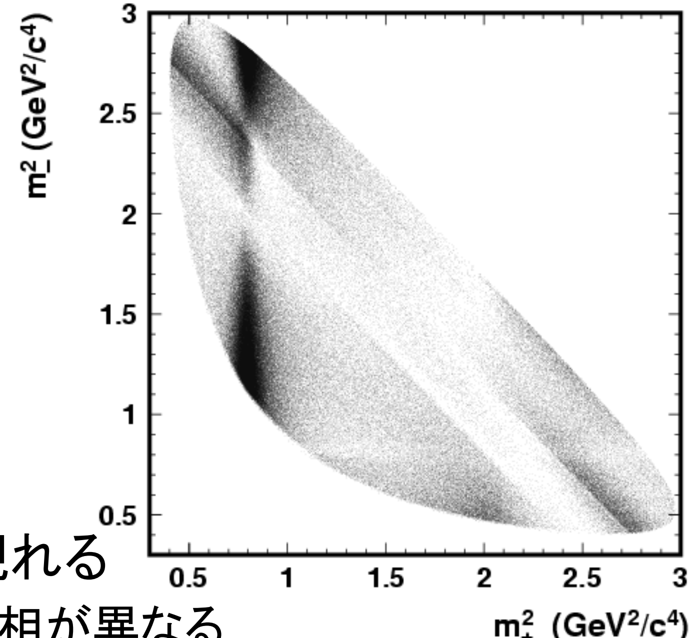
$$A_\pm = \frac{\Gamma(B^- \to D_\pm K^-) - \Gamma(B^+ \to D_\pm K^+)}{\Gamma(B^- \to D_\pm K^-) + \Gamma(B^+ \to D_\pm K^+)} = \frac{\pm 2 r_B \sin\delta_B \sin\phi_3}{R_\pm}$$

$$D_{CP\pm} = \frac{(D^0 + \bar{D}^0)}{\sqrt{2}}$$



B → DK崩壊に続くD崩壊の例 –Dalitz plot analysis–

- D → Kπ, Kππ^0, Kπππ, etc
  - D崩壊がFlavor Specific (Favored, Suppressed mode)
  - Sup. modeで崩壊振幅は小さい、CP非保存の影響が大きい
- D → KK, ππ, etc
  - D崩壊がCP固有モード
  - 比較的大きな崩壊振幅
- D → K_Sππ, etc
  - D崩壊が三体崩壊
  - 三体崩壊のレゾナンス分布にϕ_3の影響が現れる
    - ・ 経由するレゾナンスにより強い相互作用の位相が異なる



$D^{*-} \to \bar{D}^0 \pi^-$
$\bar{D}^0 \to K_S \pi^+ \pi^-$

A. Poluektov, PRL81, 112002 (2010)

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

B → DKを用いたϕ_3測定

- D → Kπ, $K\pi\pi^0$, Kπππ, etc
  - D崩壊がFlavor Specific (Favored, Suppressed mode)
  - Sup. modeで崩壊振幅は小さい、CP非保存の影響が大きい
- D → KK, ππ, etc
  - D崩壊がCP固有モード
  - 比較的大きな崩壊振幅
- D → $K_S\pi\pi$, etc
  - D崩壊が三体崩壊
  - 三体崩壊のレゾナンス分布にϕ_3の影響が現れる
    - 経由するレゾナンスにより強い相互作用の位相が異なる
- 全部ひっくるめて、連立方程式を作る事になるので、他のモードを解析すればする程ϕ_3の制限がかかる！

ϕ_3の測定の一般的なお話オワリ、
次からは自分の研究した$B^0 \rightarrow DK^{*0}$について

$B^0 \rightarrow DK^{*0}$

- Neutral Bを使うということは、、、

✕ B^0-$\bar{B}^0$ mixingの効果
(φ$_3$以外の効果)が入ってきてしまう

頑張ろうとすると、
Δt, *qr*, …色々測らないといけない物が増える。

→ 大変

$B^0 \to DK^{*0}$

- Neutral Bを使うということは、、、
  - ~~=~~ OK!! B^0-$\bar{B}^0$ mixingの効果(ϕ_3以外の効果)が入ってきてしまう
    - K^{*0}によるSelf Taggingで解決

$$K^{*0} \to \begin{cases} K^+\pi^- \sim 2/3 \\ K^0\pi^0 \sim 1/3 \end{cases}$$

$K^+\pi^-$でK^*を組んだ → K^{*0} → B^0の崩壊

$K^-\pi^+$でK^*を組んだ → $\bar{K}^{*0}$ → $\bar{B}^0$の崩壊

えらい楽

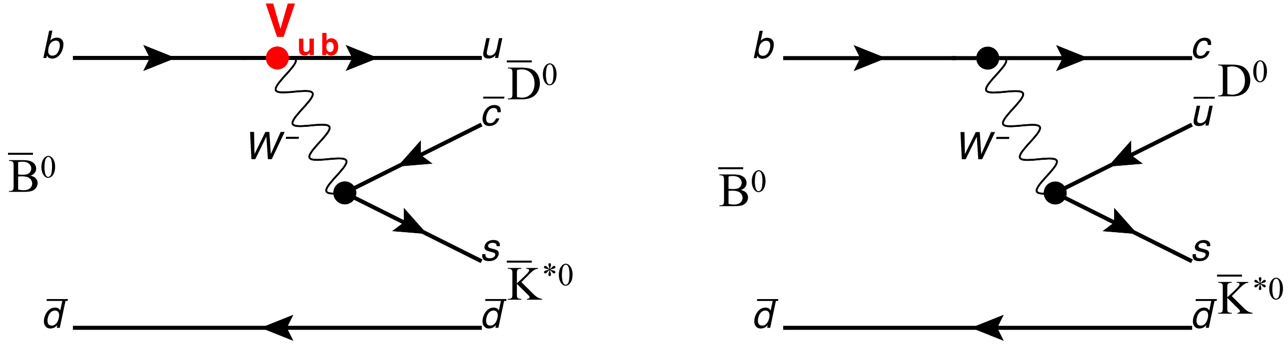
$B^0 \to DK^{*0}$

- Neutral Bを使うということは、、、
  - ~~=~~ OK!! B^0-$\bar{B}^0$ mixingの効果(φ₃以外の効果)が入ってきてしまう
    - K*0によるSelf Taggingで解決

$$K^{*0} \to \begin{cases} K^+\pi^- \sim 2/3 \\ K^0\pi^0 \sim 1/3 \end{cases}$$

● Charged Bの測定とは独立

● 干渉の効果が大きい



経路A, B共に
Color Suppressed

▲ DKπ non-resonant modeの効果

- ここで求めるのは

Suppressed mode

$$R_{DK^*} \cong \frac{\Gamma(B^0 \to [K^+\pi^-]_D K^{*0}) + \Gamma(\bar{B}^0 \to [K^-\pi^+]_D \bar{K}^{*0})}{\Gamma(B^0 \to [K^-\pi^+]_D K^{*0}) + \Gamma(\bar{B}^0 \to [K^+\pi^-]_D \bar{K}^{*0})}$$

$$= r_S^2 + r_D^2 + 2kr_S r_D \cos(\delta_S + \delta_D)\cos\phi_3$$

Favored mode

$B^0 \rightarrow [K\pi]_D[K\pi]_{K^{*0}}$

R_{DK^*}測定

Selection Criteria

- K±/π±同定
  - Efficiency = 90 %, Fake rate ~ 10 %
- D^0, K^{*0}の再構成
  - D^0 : $|M_{K\pi} - M_{D0}| < 0.015$ GeV (±3σ)
  - K^{*0} : $|M_{K\pi} - M_{K^{*}0}| < 0.050$ GeV (±1Γ)
- B^0の再構成
  - 二つの運動学的変数を利用

$$M_{\rm bc} \equiv \sqrt{E_{\rm beam}^2 - (p_{D^0} + p_{K^{*0}})^2}$$

·再構成したBの不変質量に対応

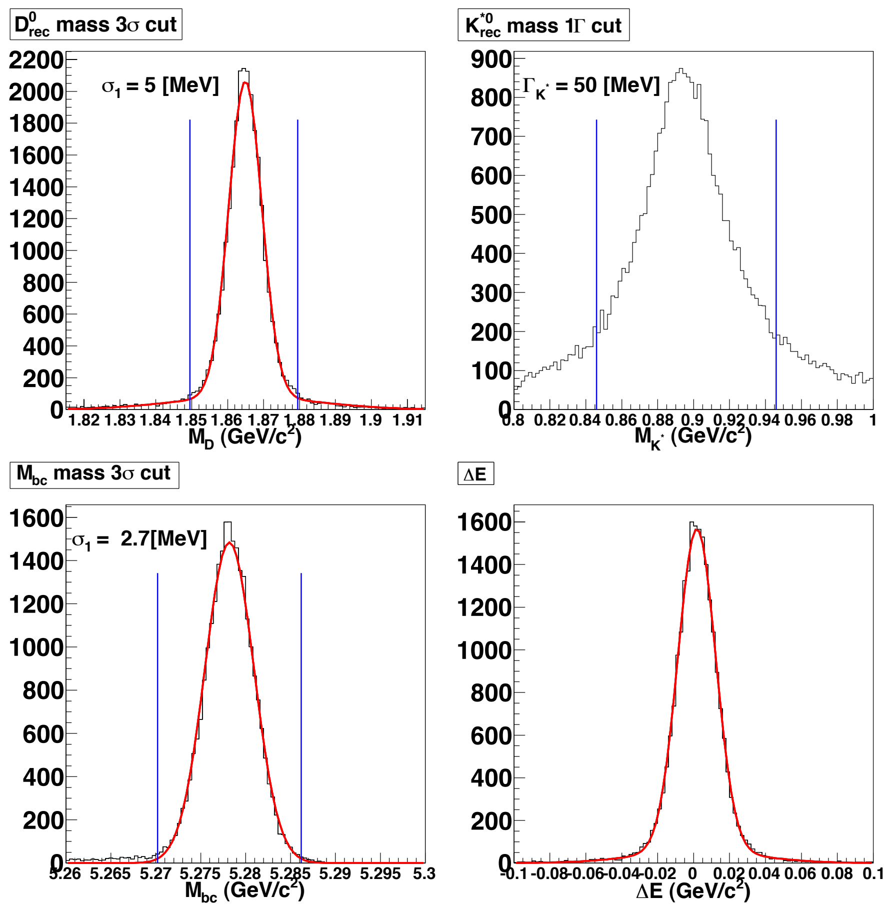
•$|M_{bc} - M_{B0}| < 0.008$ GeV (±3σ)

$$\Delta E \equiv E_{D^0} + E_{K^{*0}} - E_{\rm beam}$$

·エネルギーの保存に対応
シグナルだと ~ 0

•Fit → シグナルの導出

Signal MC



バックグラウンドの抑制

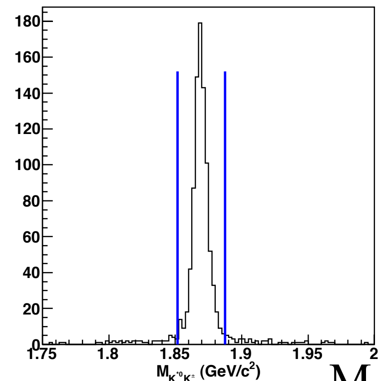
- ϕ_3測定のモードはは基本的にバックグラウンドとの戦いである
  - BBバックグラウンド : B → XY…
  - qqバックグラウンド : $e^+e^- \to qq$　　(q = (u, d, s, c))

- BBバックグラウンドの抑制
  - 終状態が同じになる崩壊を抑制
    - $[K^-K^-\pi^+]D^-\pi^+$
  - D*イベント
    - $D^{*+} \to D^0\pi^+$崩壊のD^0を捉えシグナルを再構成してしまう
      $\Delta M < 0.15$ GeV のイベントを除去

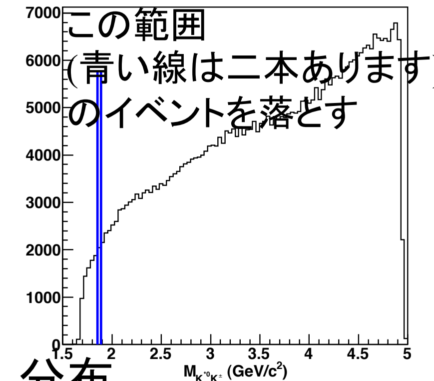
$\Delta M : M_{D*\pm} - m_{D0}$

$\Delta M \sim m_\pi$ (0.140 GeV)にピーク

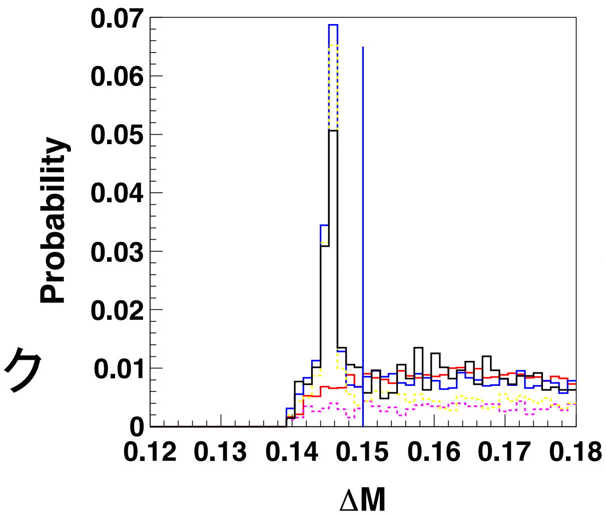
$[K^-K^-\pi^+]D^-\pi^+$



Signal MC



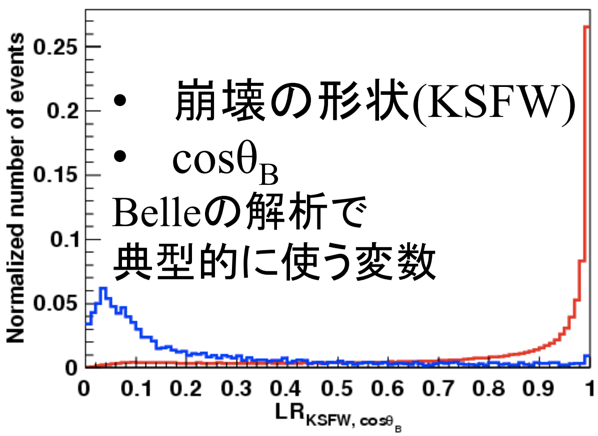
$M_{KK\pi}$分布



赤:シグナル
黒:BB BG
青:qq BG
緑:charm
紫:u, d, s

qqバックグラウンドの抑制

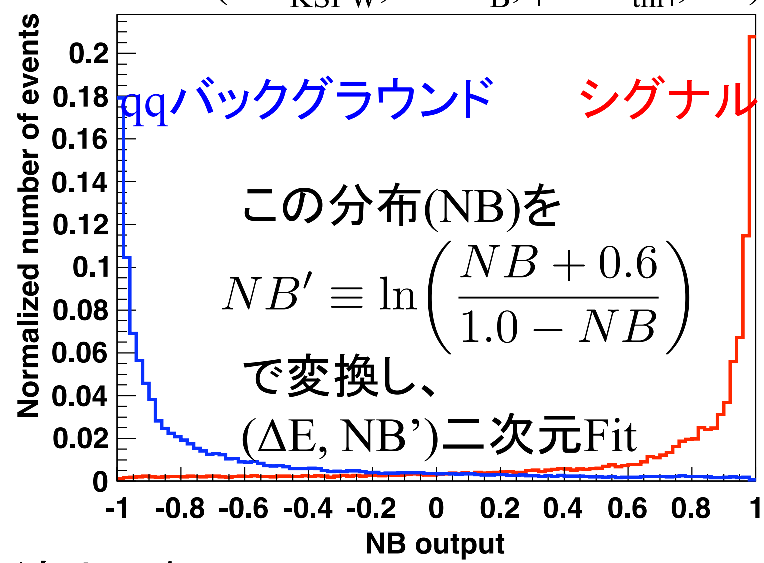
- Neural Network (NeuroBayes)
  - qqバックグラウンドとシグナルで分布の違う変数をインプットし、Neural Networkで分離させる、B→DKでは新しい手法



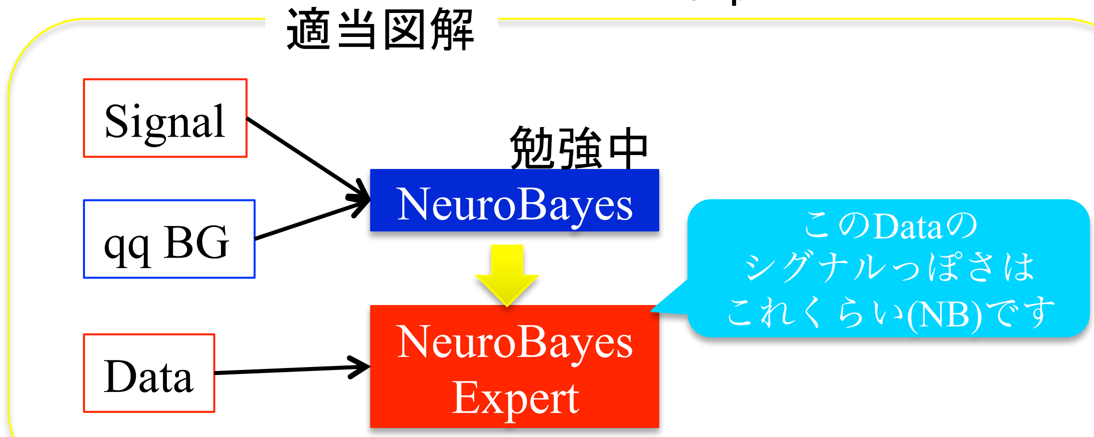
- $|\cos\theta_{thr}|$
- Δz
- $\cos\theta^K_D$
- $|qr|$
- ΔQ
- DK*の距離
- $\cos\theta_B$

シグナルとBGで
分布が違うと考えられる
変数(7つ)

NB = f(LR_{KSFW}, $\cos\theta_B$, $|\cos\theta_{thr}|$, …)

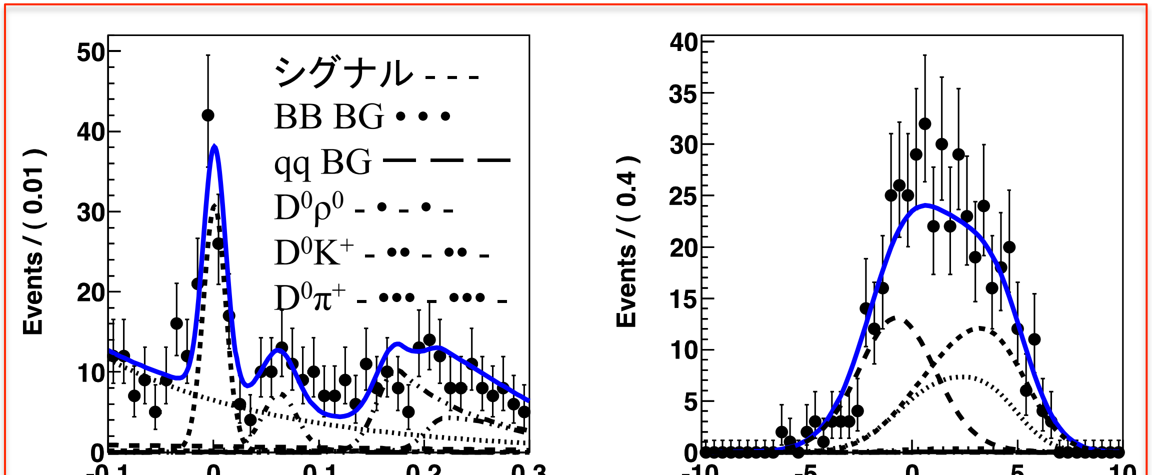


適当図解

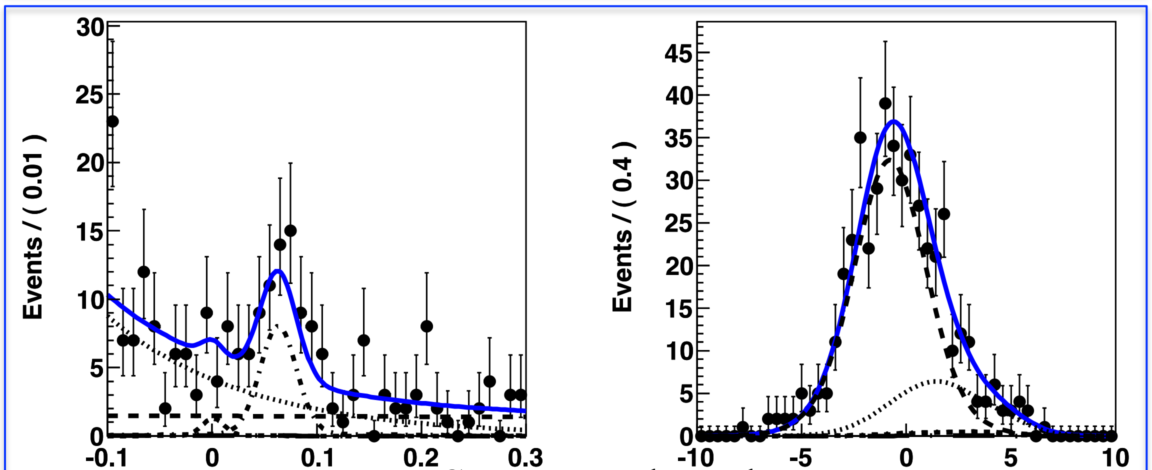


Result

- $B^0 \to [K\pi]DK^{*0}$でR_{ADS}を測定



Favored mode



Suppressed mode

- 得られたシグナル数
  - $N_{fav.} = 190 \pm 22$
  - $N_{sup.} = 7.7 \pm 10$
- 得られたR_{DK^*}

$$R_{DK^*} = \frac{N_{sup.}/\epsilon_{sup.}}{N_{fav.}/\epsilon_{fav.}}$$

$$= (4.1^{+5.6+2.8}_{-5.0-1.8}) \times 10^{-2}$$

$$< 0.16 \quad (95\% C.L.)$$

  - 過去のBelleやBaBarより強い上限値

まとめ

Summary and Plan

- まとめ
  - SMのパラメータの測定それ自体とても重要
    - New Physicsの手掛かりとなる可能性
  - Neutral Bでのϕ_3測定は未だ行われていない
    - Charged Bでの結果とのクロスチェック
  - $B^0 \to [K\pi]_D K^{*0}$でのR_{DK^*}の上限値を更新する事に成功
    - R_{DK^*} < 0.24 (95% C.L.) @BaBar 2009 with 465M BB
      < 0.16 (95% C.L.) @Belle My result with 772M BB
    - ただいま論文を書いている所です。大変です。
- 今後の方針、課題
  - $B^0 \to [K_S\pi\pi]_D K^{*0}$のDalitz解析
    - 一生懸命頑張りたいと思います。

BACK UP

$\mathbf{R_{DK^*}}$

$$R_{DK^*} \equiv \frac{\Gamma(B^0 \to [K^+\pi^-]_D K + \pi^-) + \Gamma(\bar{B}^0 \to [K^-\pi^+]_D K^-\pi^+)}{\Gamma(B^0 \to [K^-\pi^+]_D K^+\pi^-) + \Gamma(\bar{B}^0 \to [K^+\pi^-]_D K^-\pi^+)}$$
$$= r_S^2 + r_D^2 + 2kk_D r_S r_D \cos(\delta_S + \delta_D)\cos\phi_3$$

$$A_{DK^*} \equiv \frac{\Gamma(B^0 \to [K^+\pi^-]_D K + \pi^-) - \Gamma(\bar{B}^0 \to [K^-\pi^+]_D K^-\pi^+)}{\Gamma(B^0 \to [K^+\pi^-]_D K^+\pi^-) + \Gamma(\bar{B}^0 \to [K^-\pi^+]_D K^-\pi^+)}$$
$$= \frac{2kk_D r_S r_D \sin(\delta_S + \delta_D)\sin\phi_3}{R_{DK^*}}$$

$B^0 \to DK^{*0}$モードに特有

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

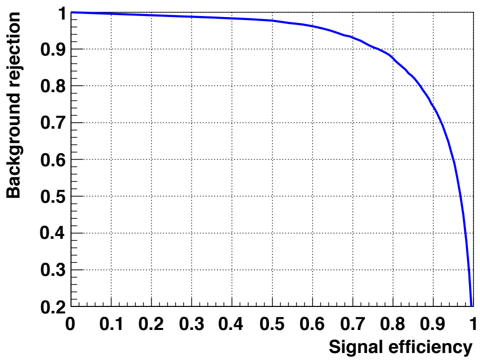
$$ke^{i\delta_S} \equiv \frac{\int dp A_A(p) A_B(p) e^{i\delta(p)}}{\sqrt{\int dp A_A^2(p) \int dp A_B^2(p)}}$$

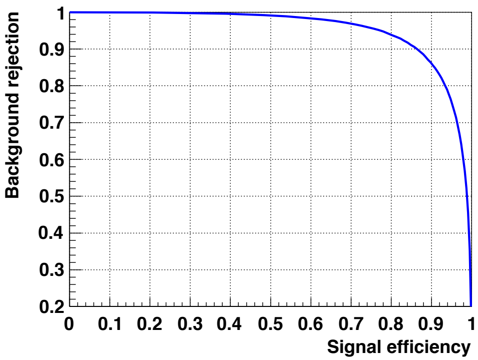
他の実験で良く測定されている

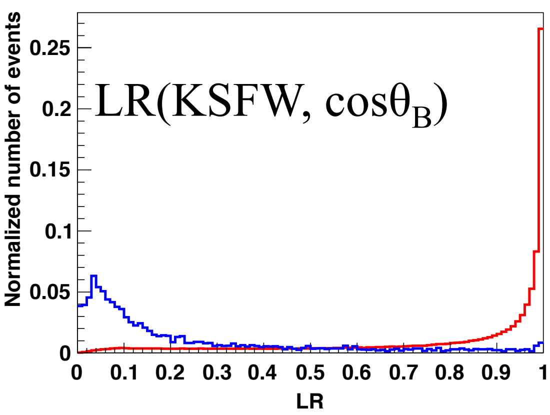
$$r_D^2 \equiv \frac{\Gamma(D^0 \to K^+\pi^-)}{\Gamma(D^0 \to K^-\pi^+)} = \frac{\int dm A_{DCS}^2(m)}{\int dm A_{CF}^2(m)}$$

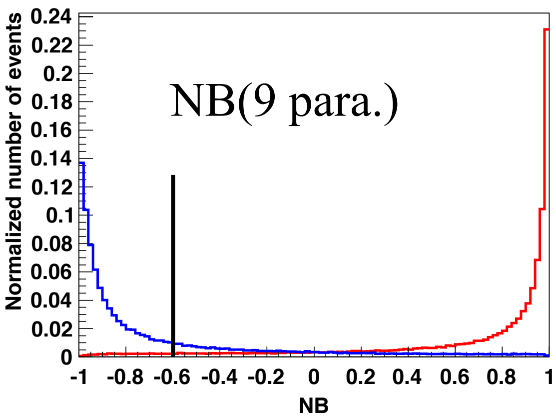
$$k_D e^{i\delta_D} \equiv \frac{\int dm A_{DCS}(m) A_{CF}(m) e^{i\delta(m)}}{\sqrt{\int dm A_{DCS}^2(m) \int dm A_{CF}^2(m)}}$$

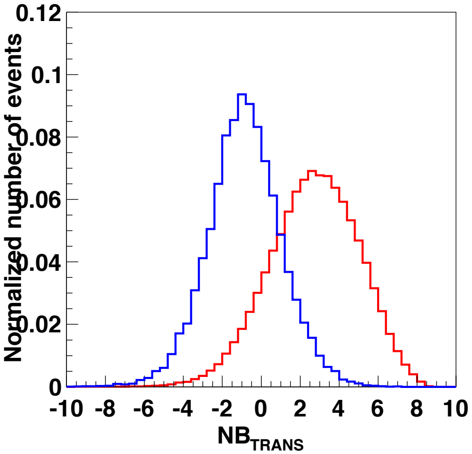
Neurobayes


Background rejection
Signal efficiency


Background rejection
Signal efficiency

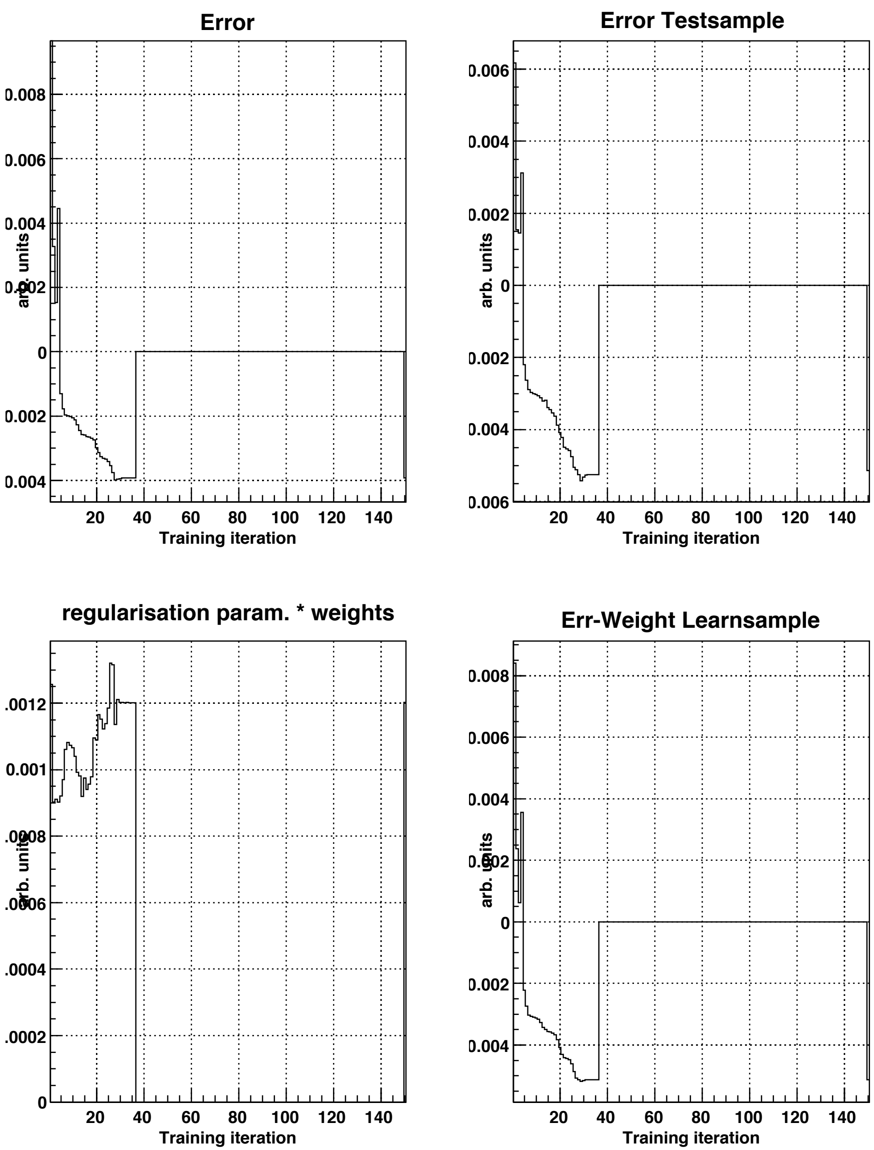

LR(KSFW, cosθ$_B$)
Normalized number of events
LR


NB(9 para.)
Normalized number of events
NB

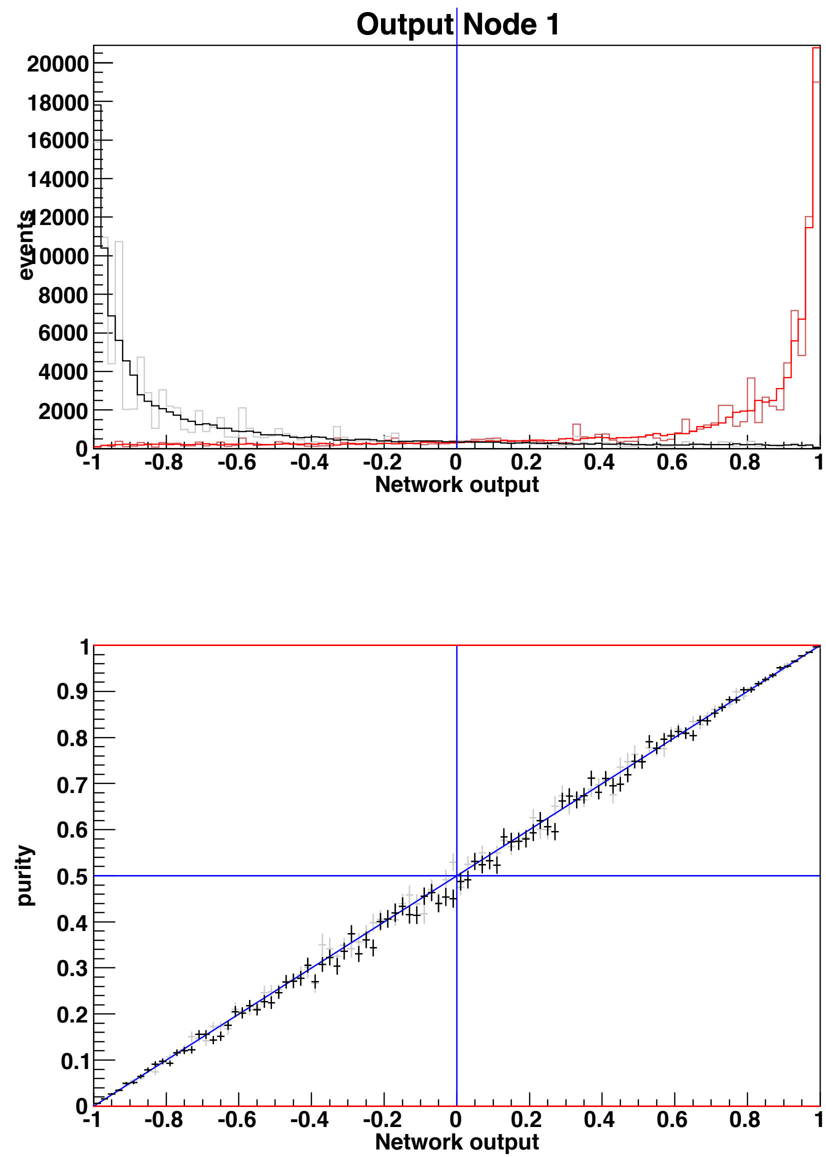

Normalized number of events
NB$_{TRANS}$

NeuroBayes training

Phi-T
NeuroBayes® Teacher



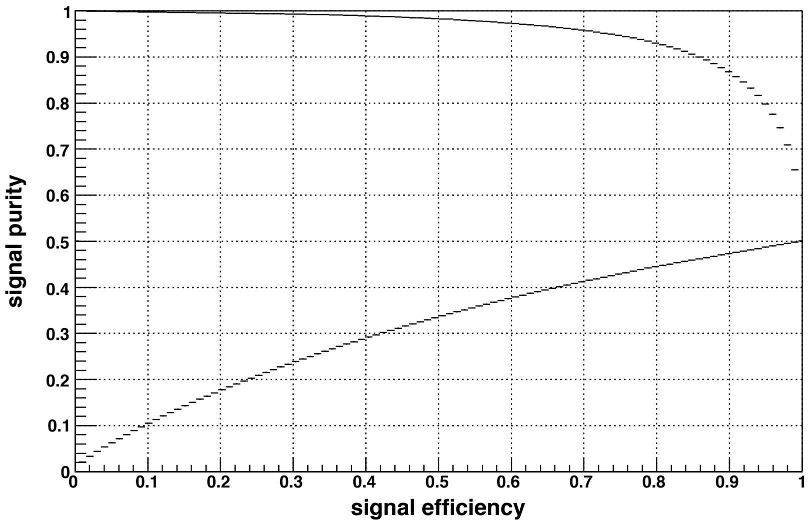
Phi-T
NeuroBayes® Teacher

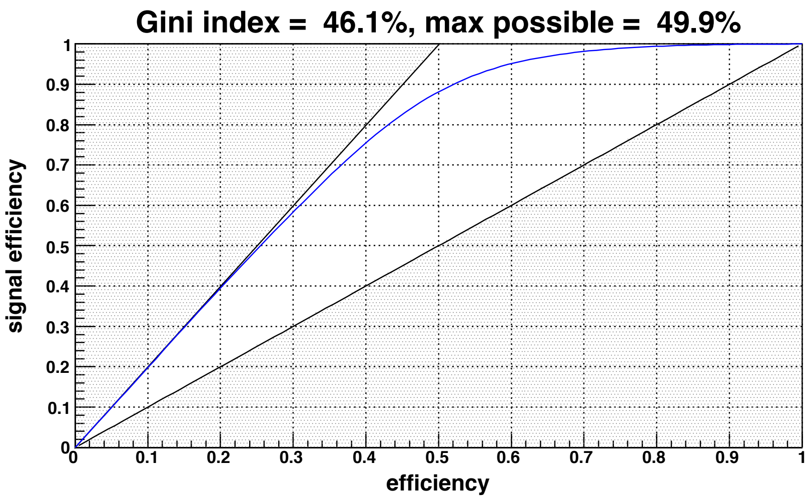


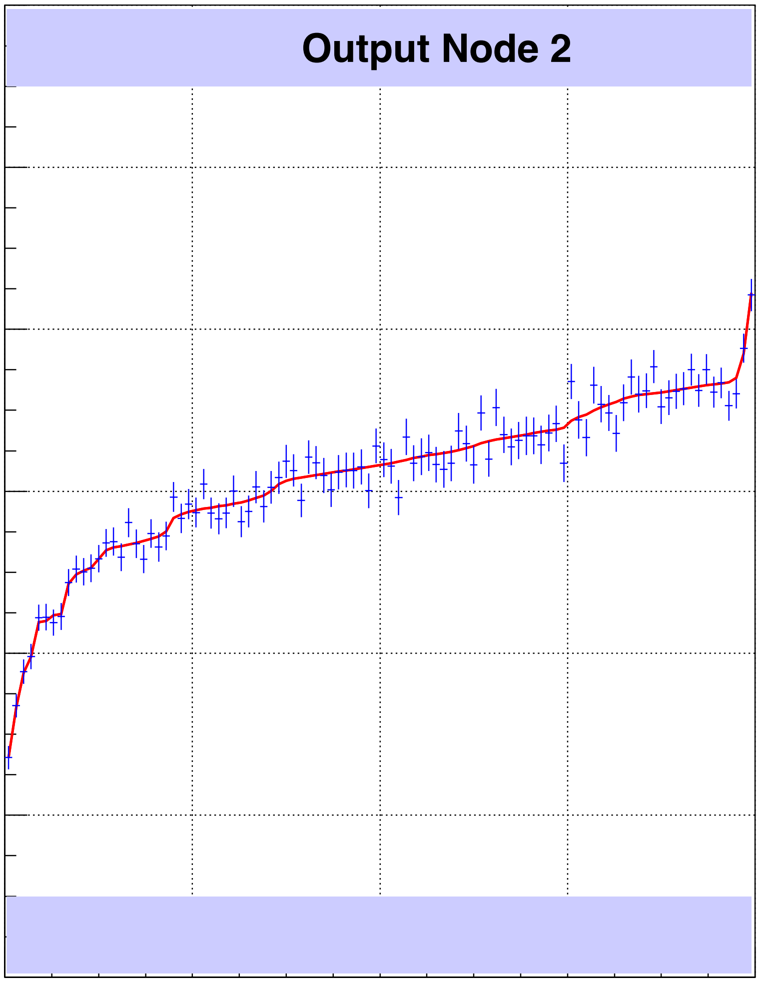
NeuroBayes training

Phi-T

NeuroBayes® Teacher

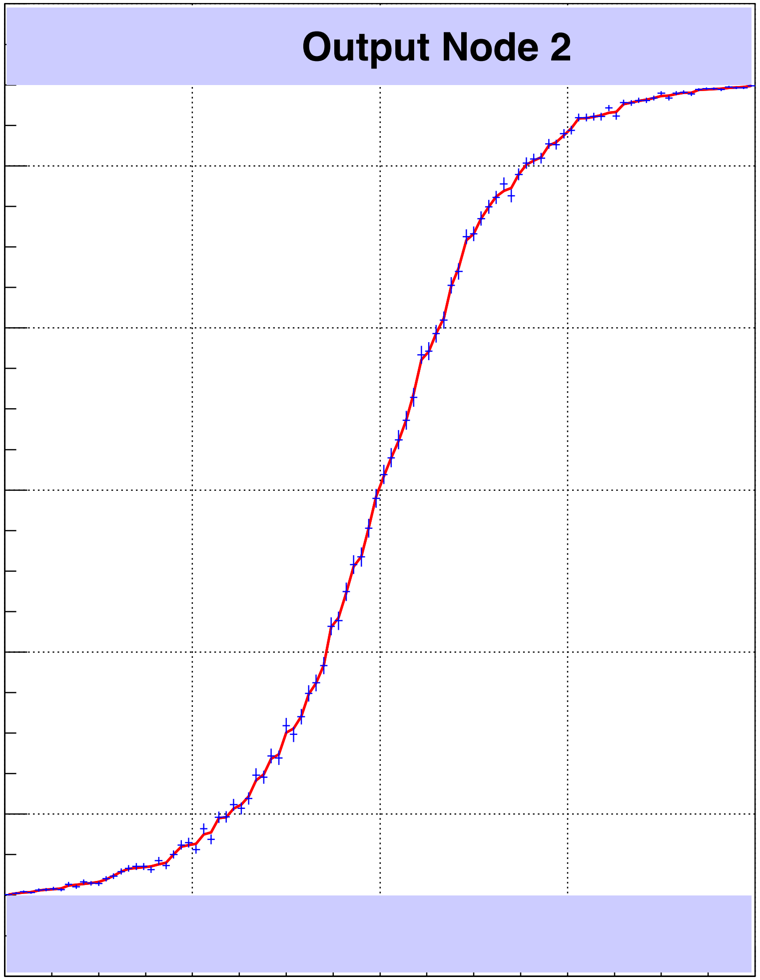




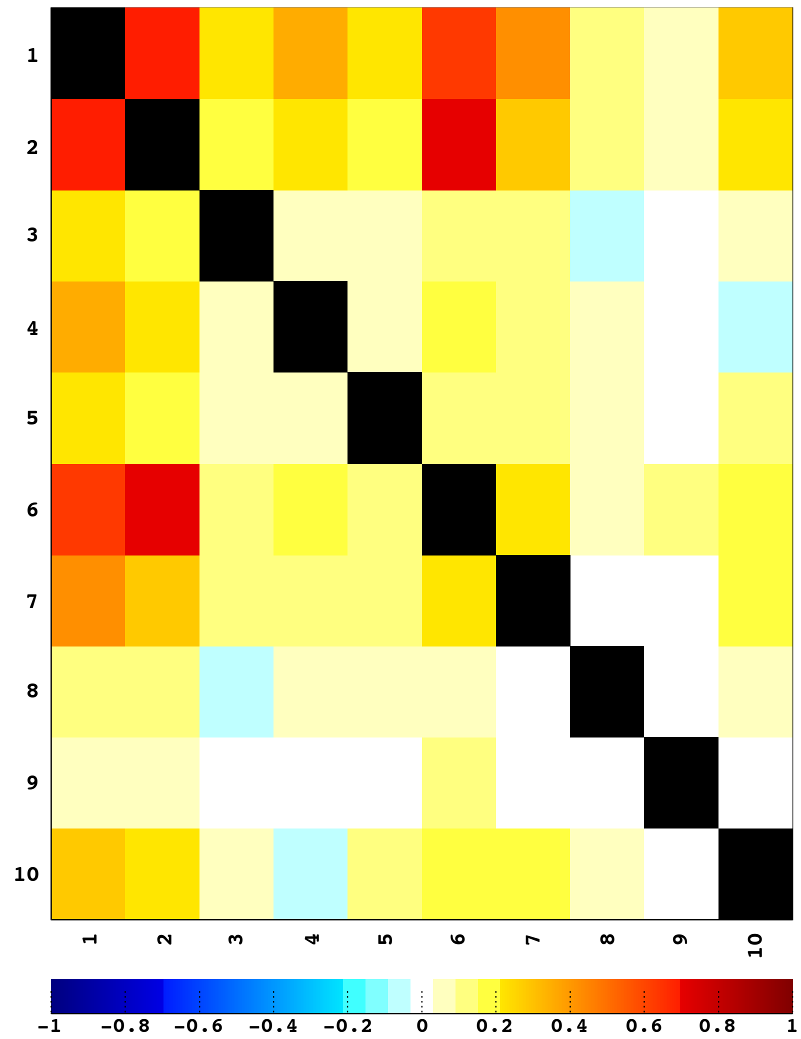


NeuroBayes training

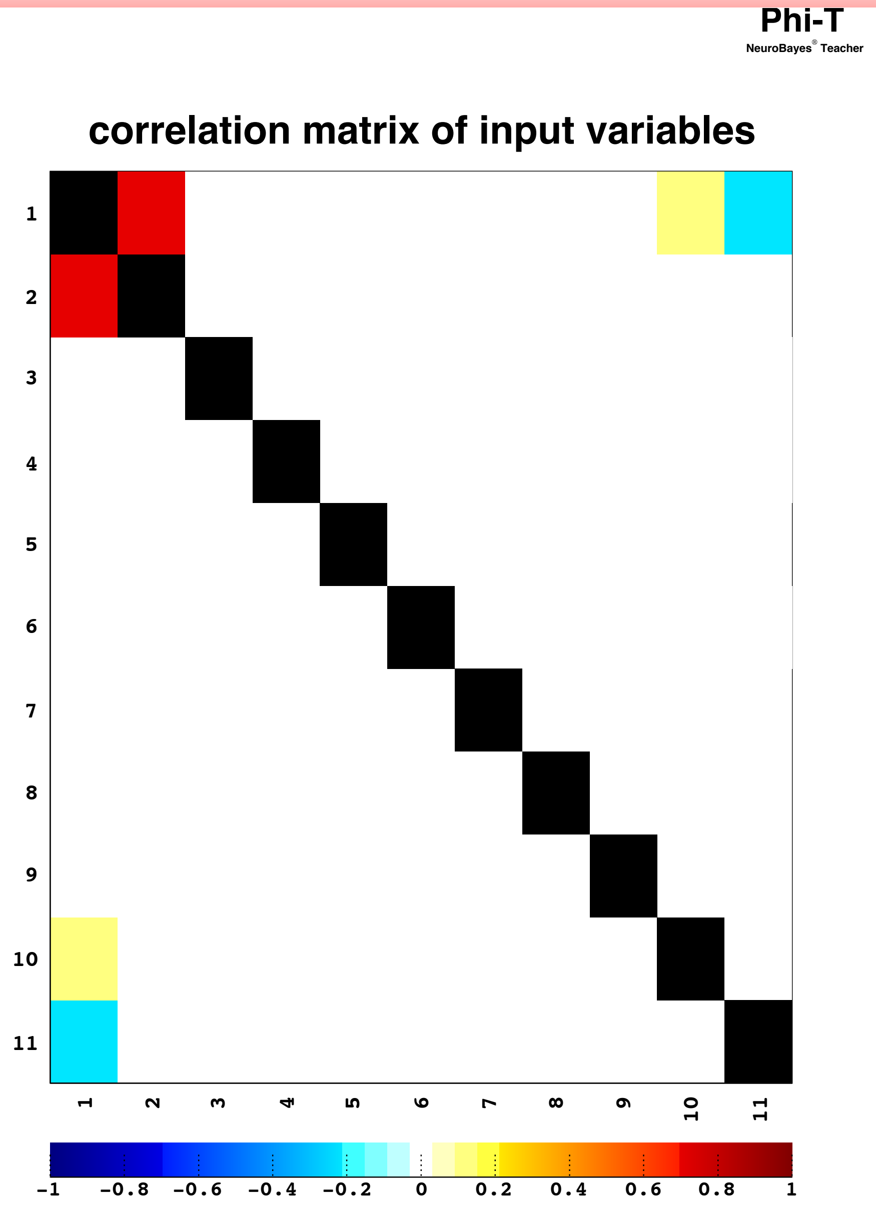
Phi-T
NeuroBayes® Teacher

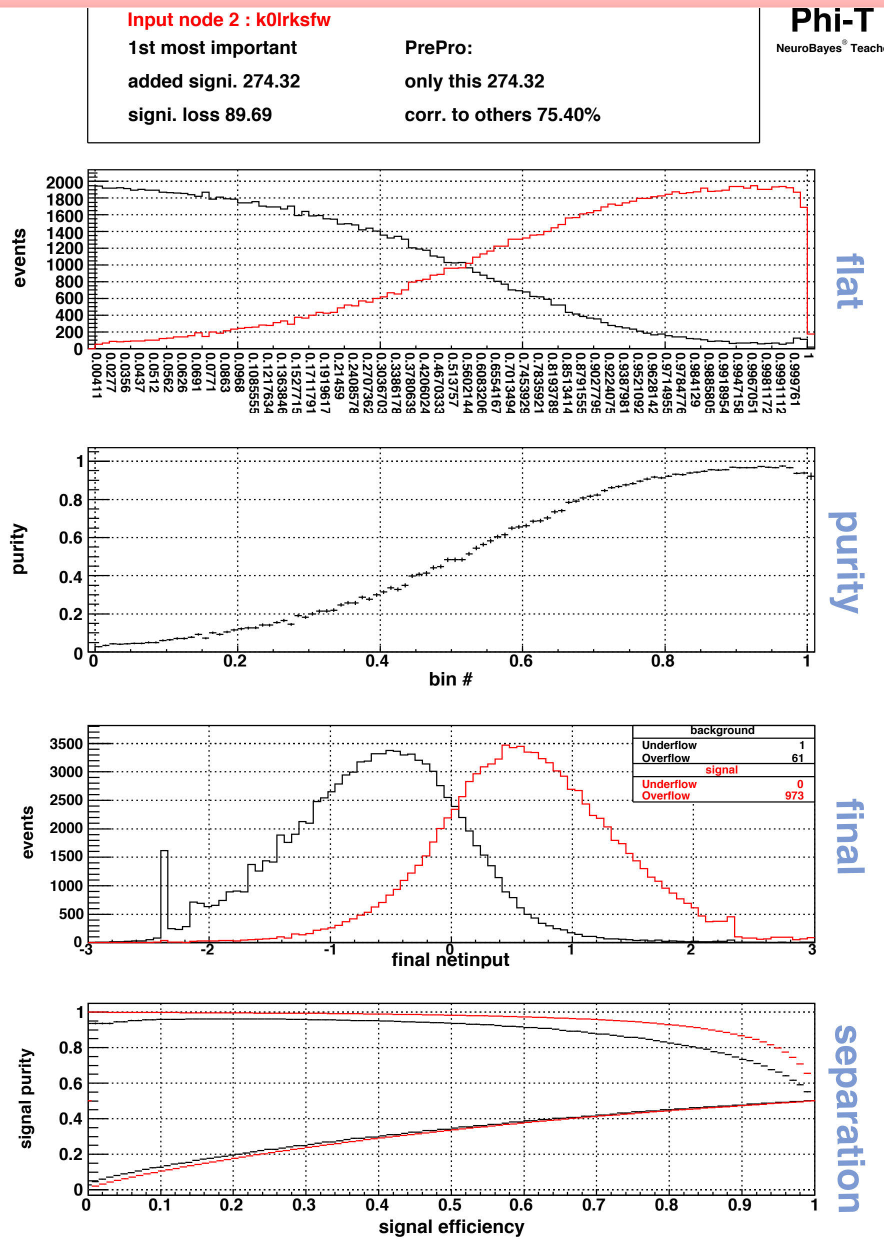


correlation matrix of input variables



NeuroBayes training



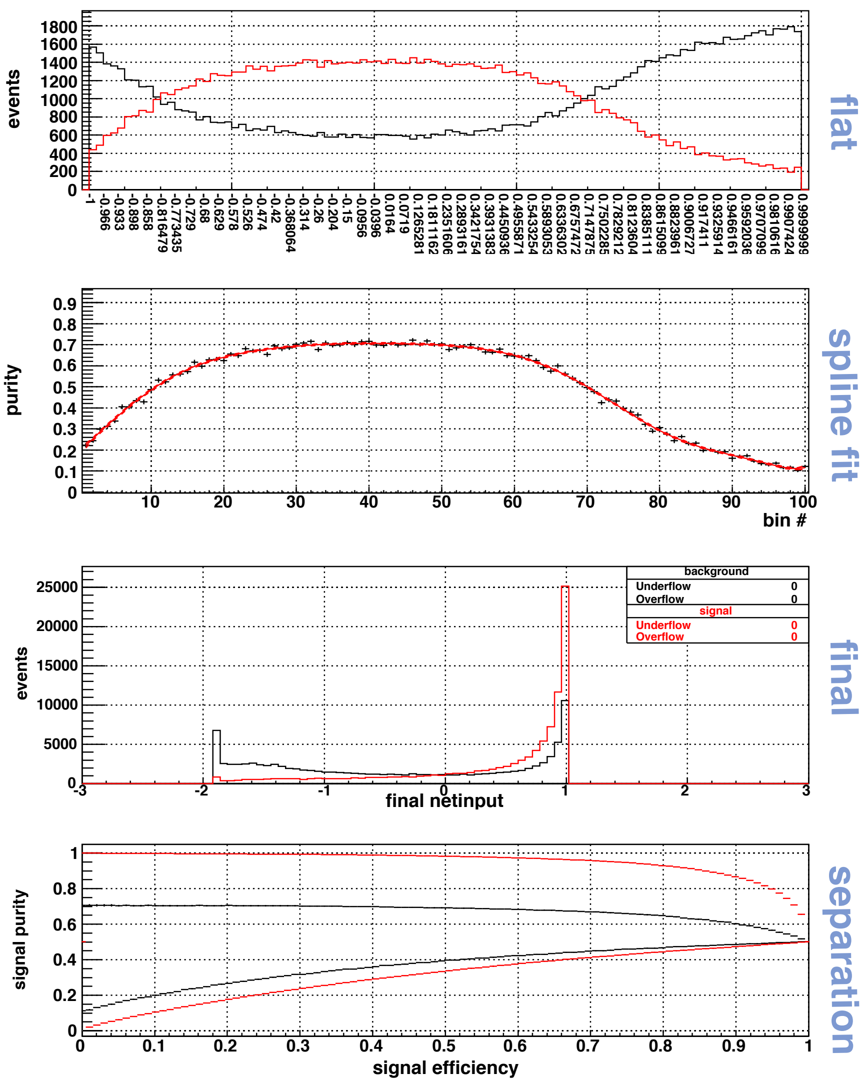


NeuroBayes training

Input node 7 : cosk_d

2nd most important	PrePro:
added signi. 98.59	only this 173.54
signi. loss 77.43	corr. to others 33.00%

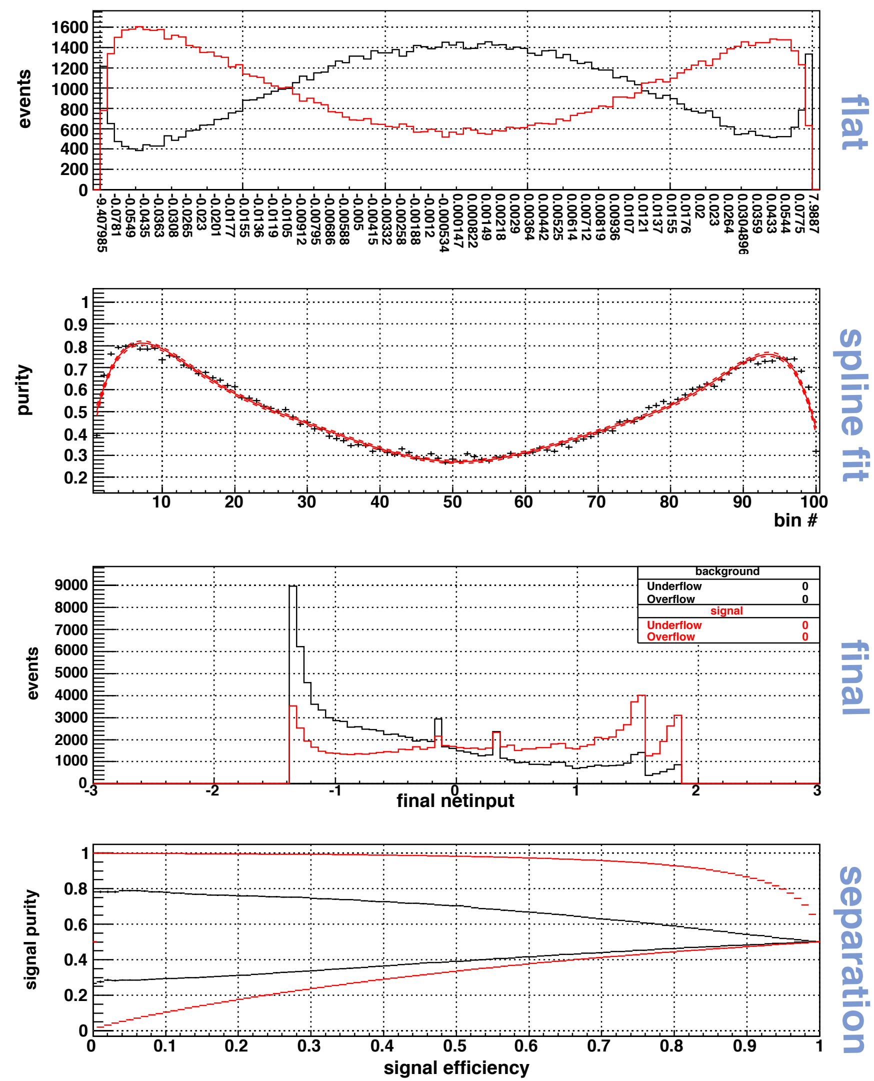
Phi-T
NeuroBayes® Teacher



Input node 4 : dz

3rd most important	PrePro:
added signi. 78.22	only this 144.22
signi. loss 78.43	corr. to others 26.80%

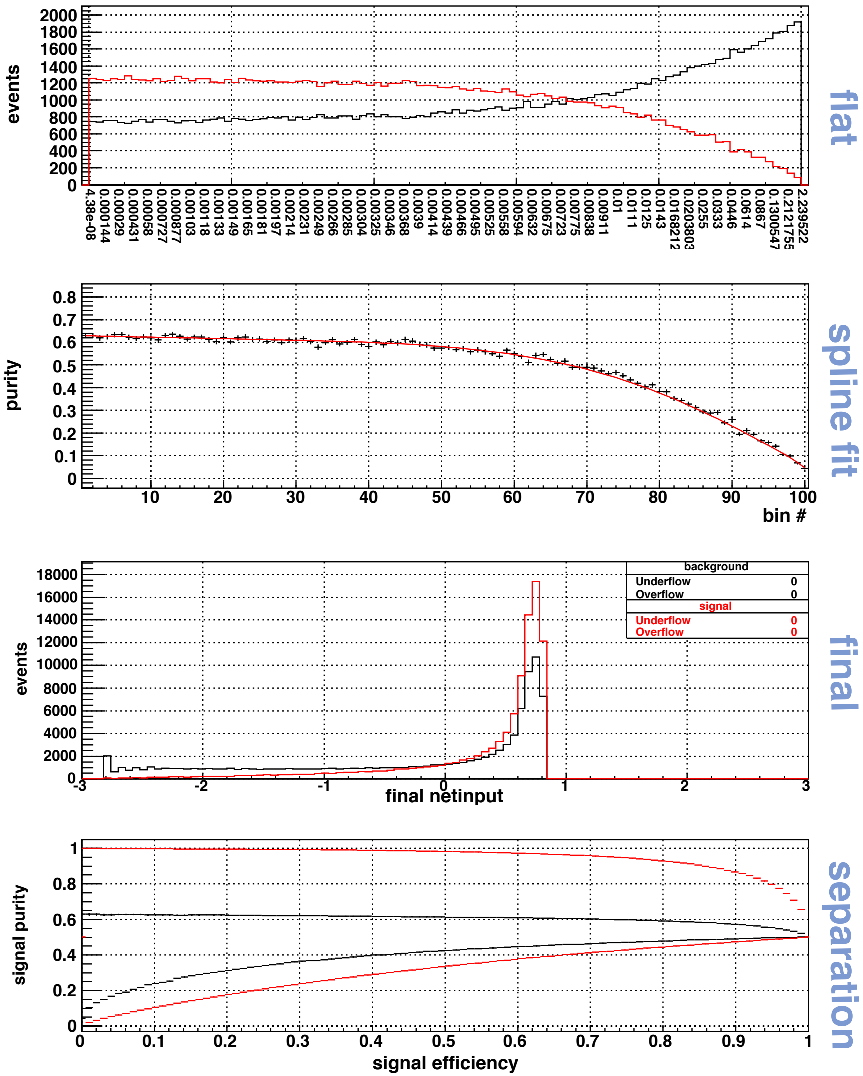
Phi-T
NeuroBayes® Teacher



NeuroBayes training

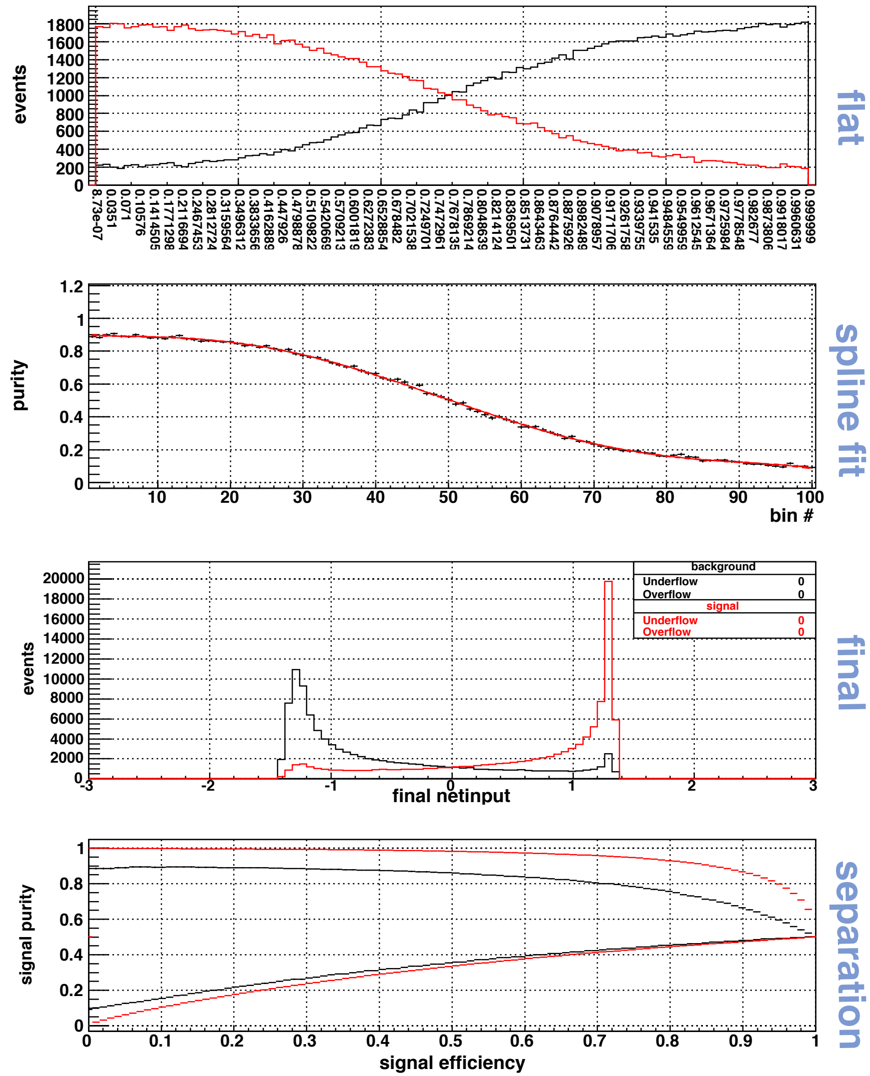
Input node 10 : dist_d_h — **Phi-T** NeuroBayes® Teacher

4th most important	PrePro:
added signi. 71.94	only this 131.60
signi. loss 64.17	corr. to others 27.70%



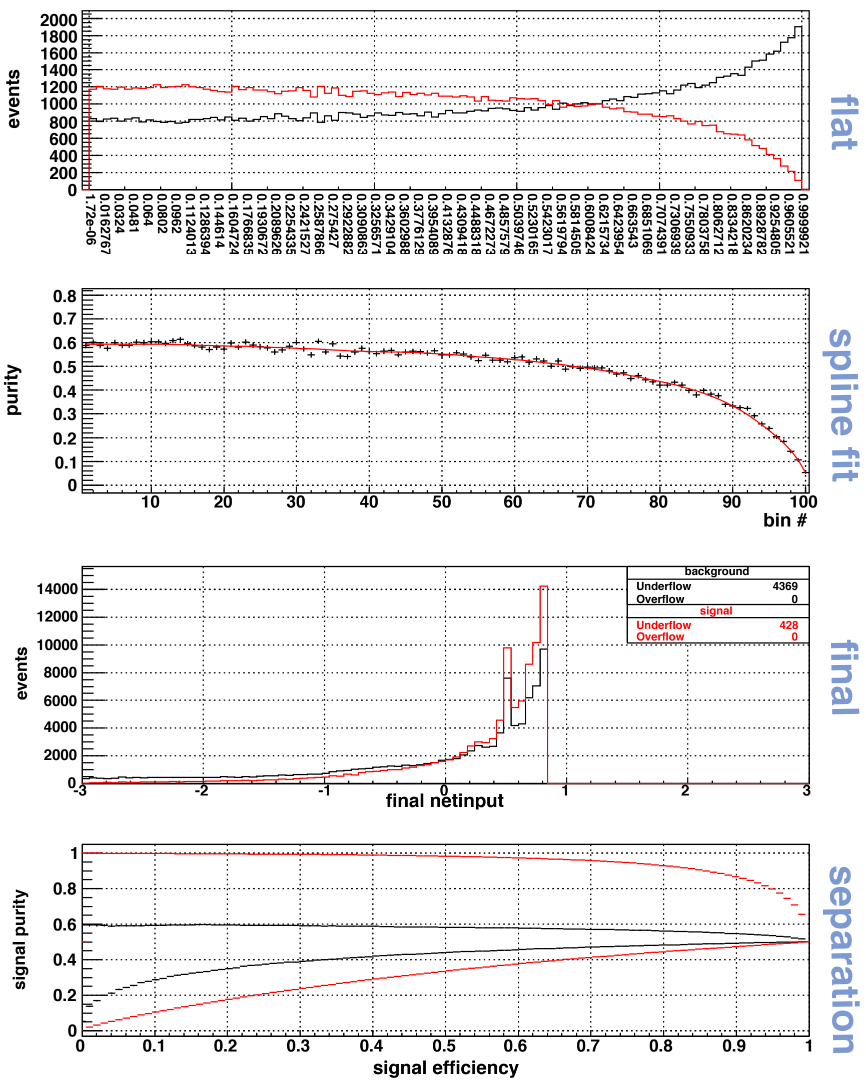
Input node 6 : cos_thr — **Phi-T** NeuroBayes® Teacher

5th most important	PrePro:
added signi. 59.05	only this 251.47
signi. loss 57.09	corr. to others 74.00%

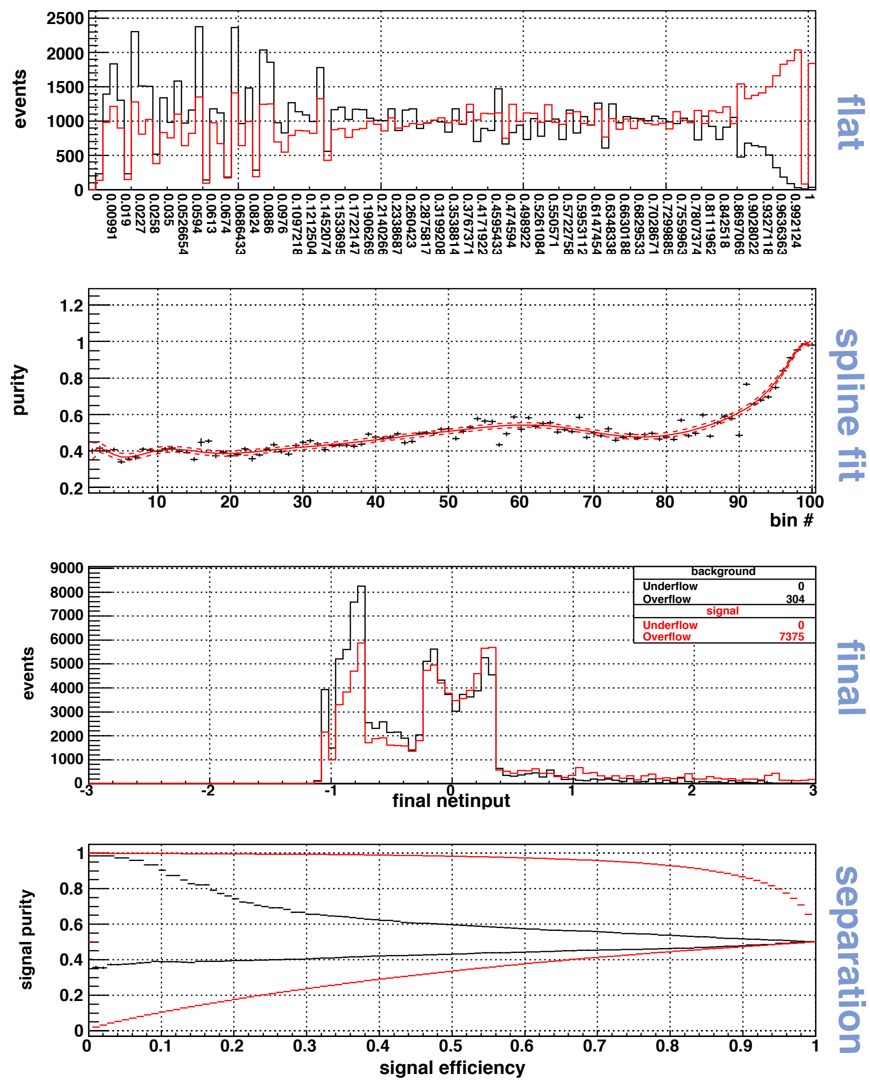


NeuroBayes training

Input node 3 : abs(cosb)		Phi-T
6th most important	PrePro:	NeuroBayes® Teacher
added signi. 46.15	only this 100.29	
signi. loss 46.82	corr. to others 19.10%	



Input node 5 : abs(qr)		Phi-T
7th most important	PrePro:	NeuroBayes® Teacher
added signi. 44.10	only this 105.70	
signi. loss 43.56	corr. to others 20.90%	

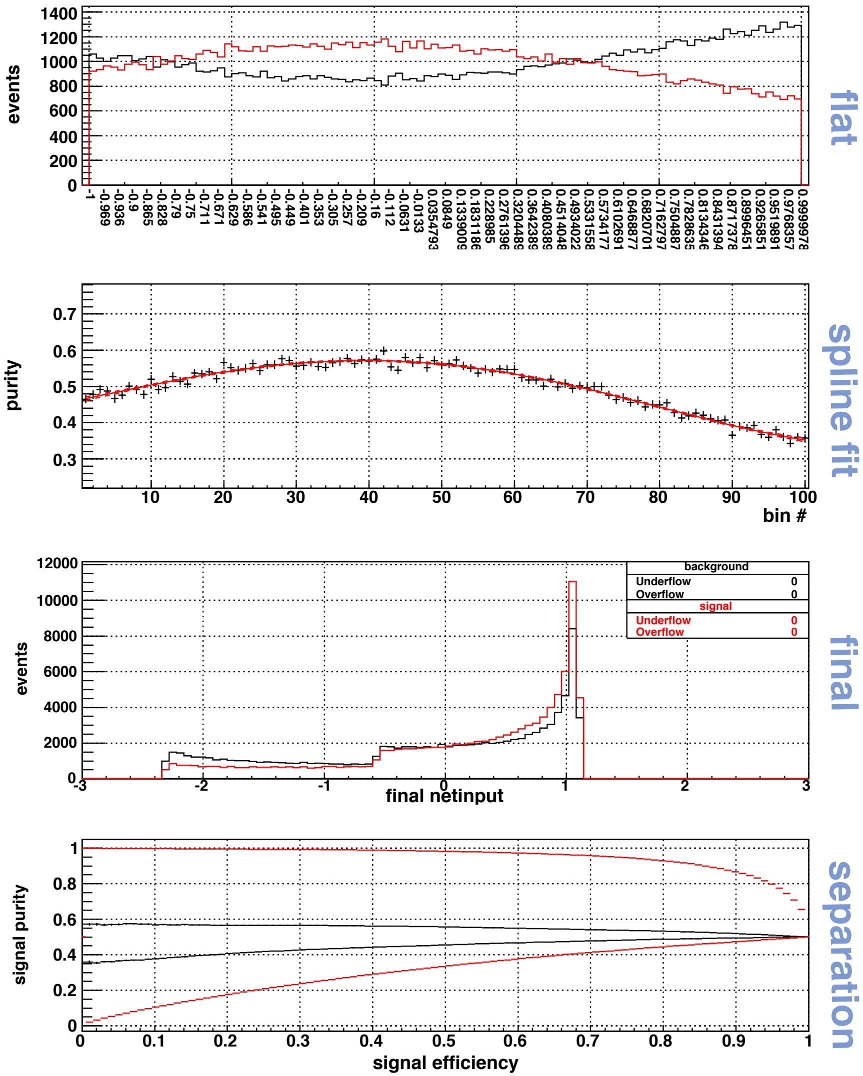


NeuroBayes training

Input node 8 : cosd_b

8th most important	PrePro:
added signi. 31.19	only this 54.89
signi. loss 31.20	corr. to others 13.60%

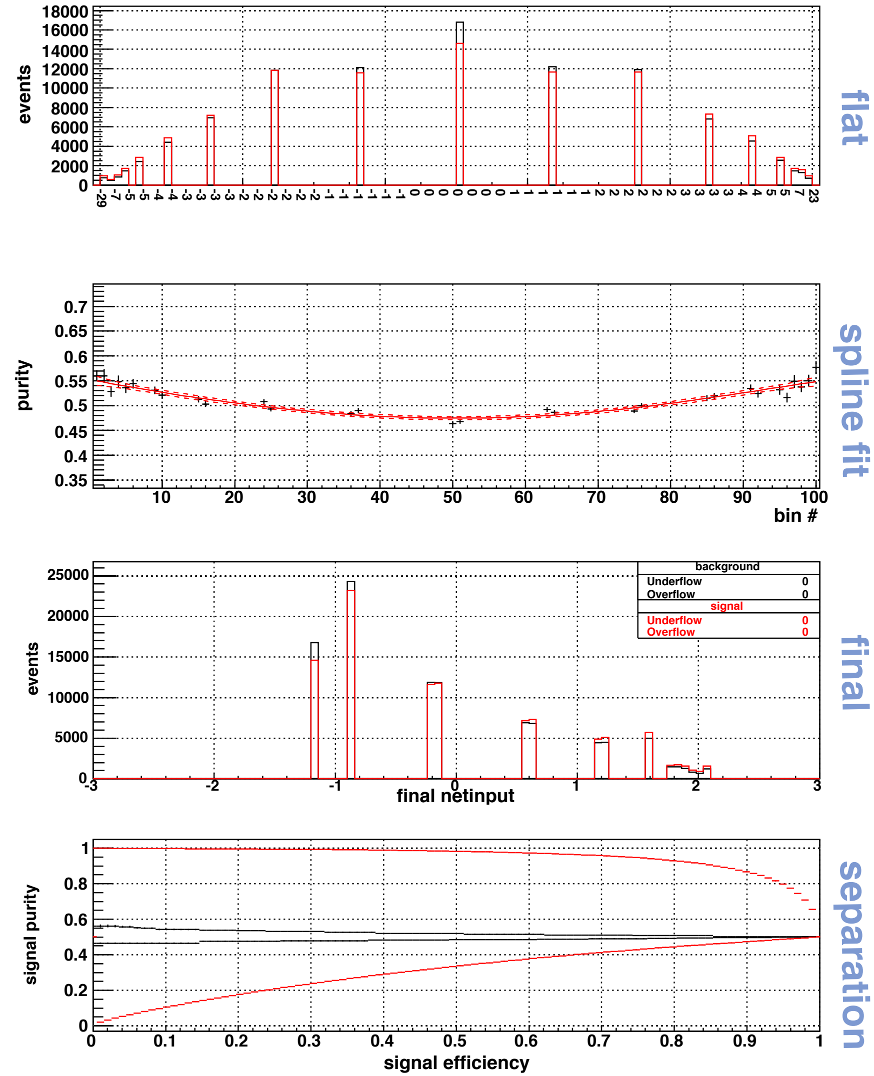
Phi-T
NeuroBayes® Teacher



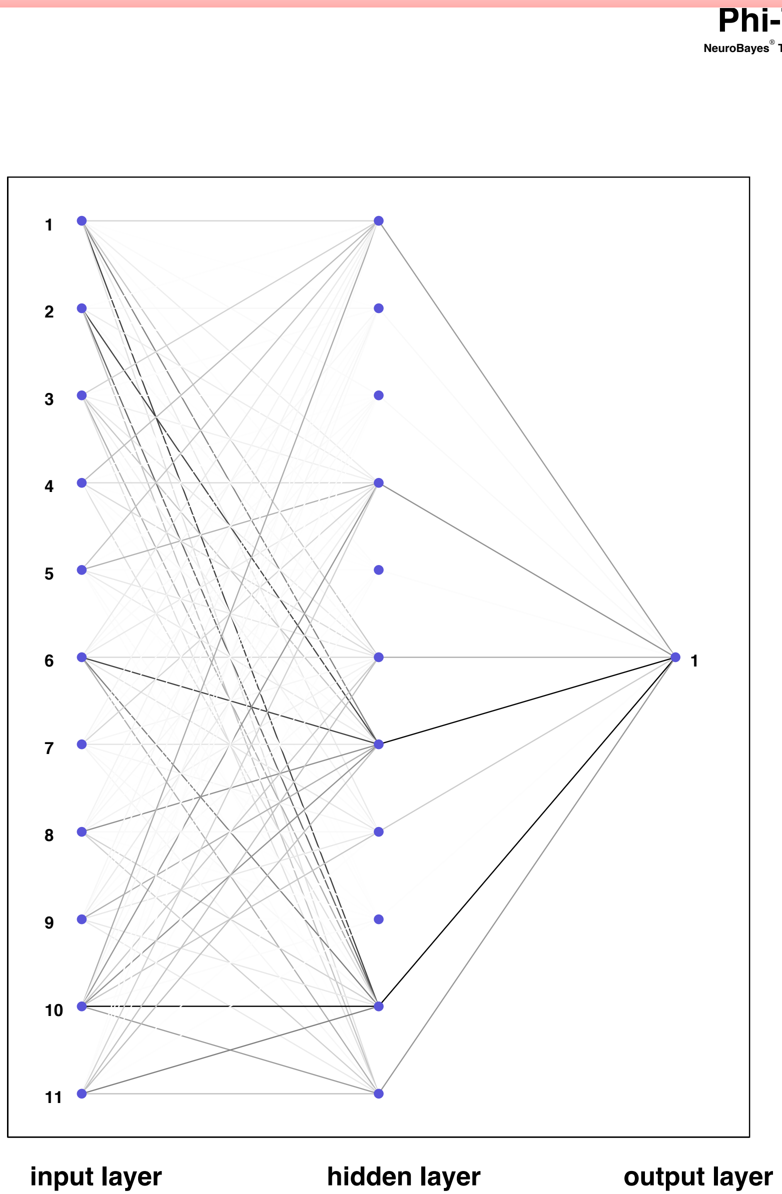
Input node 9 : dq

9th most important	PrePro:
added signi. 3.04	only this 19.57
signi. loss 3.04	corr. to others 10.30%

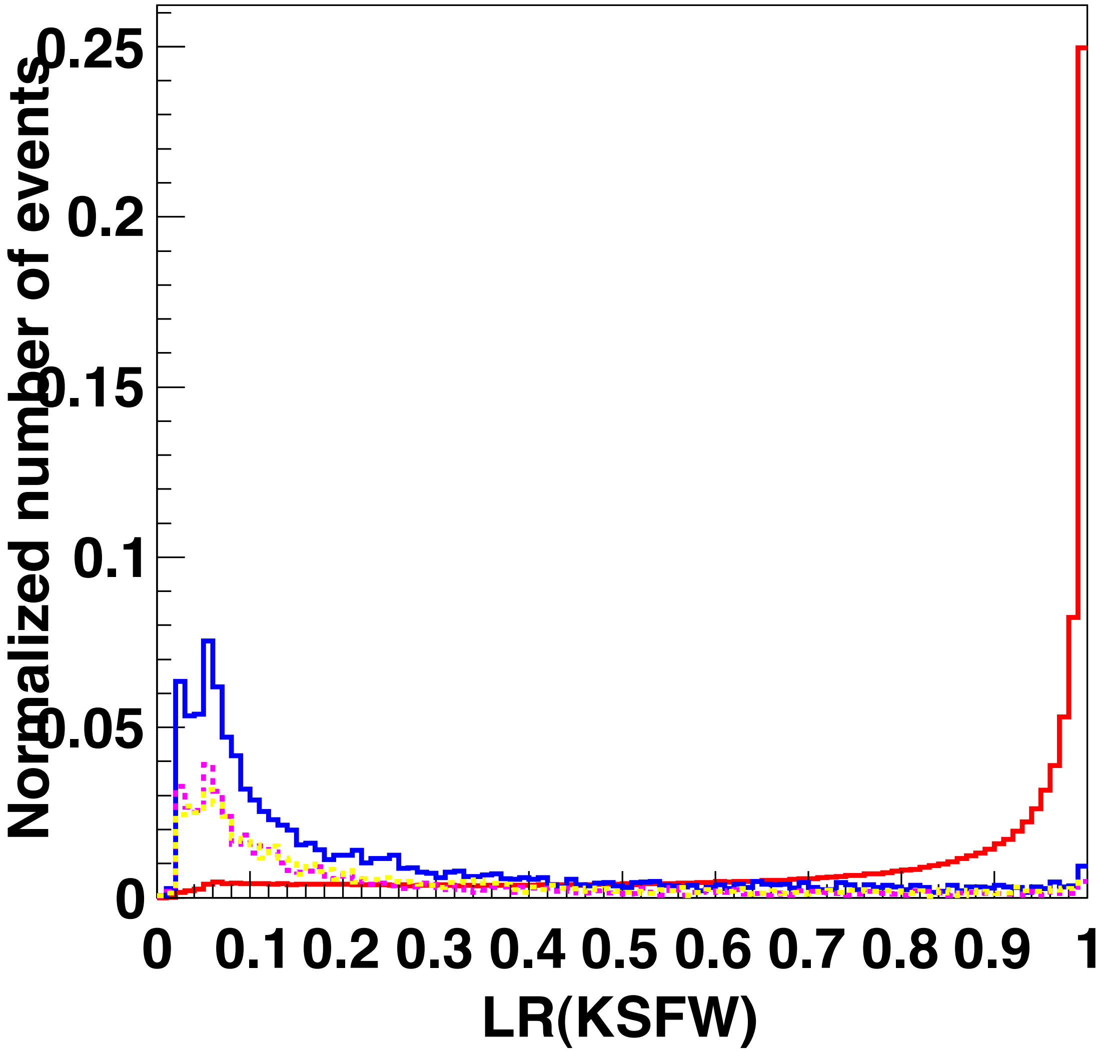
Phi-T
NeuroBayes® Teacher



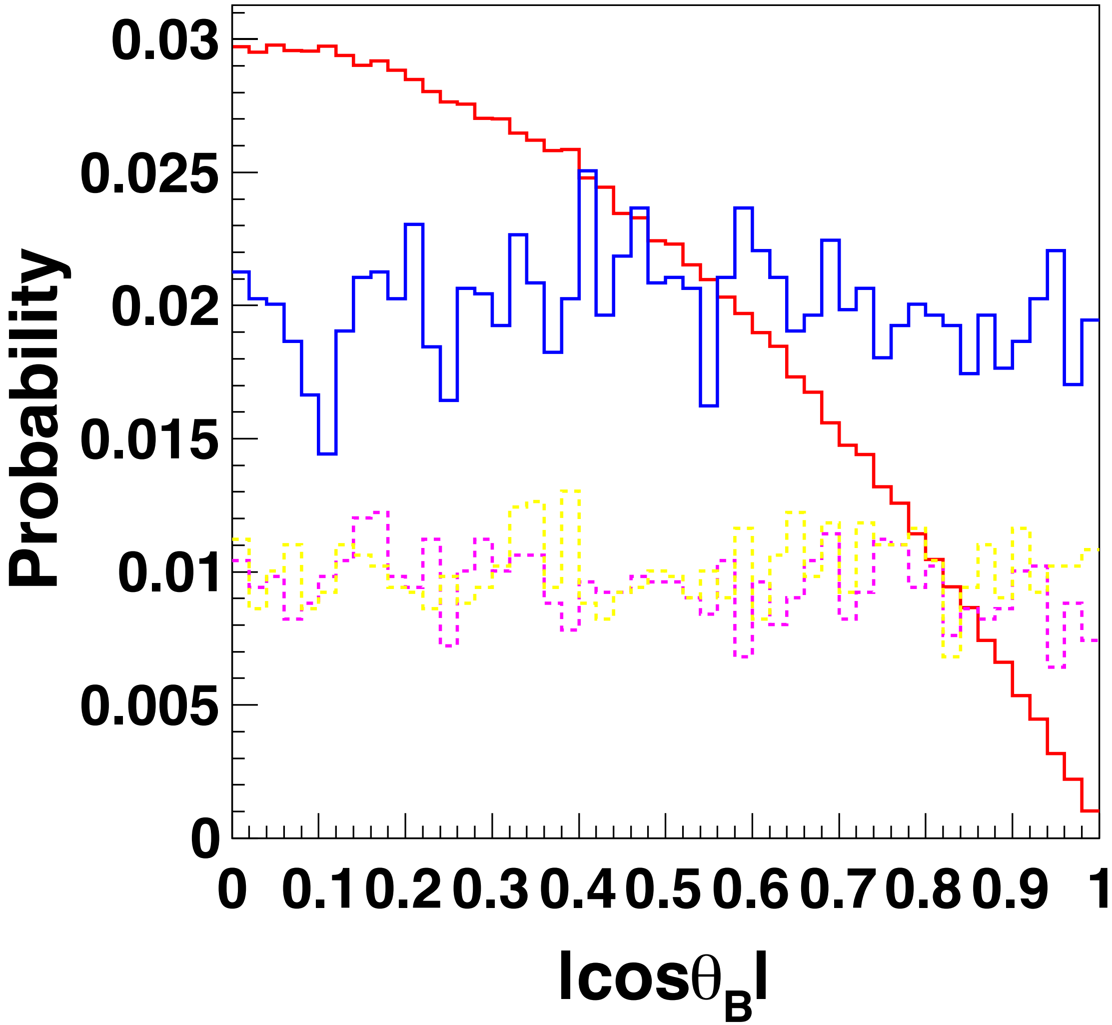
NeuroBayes training



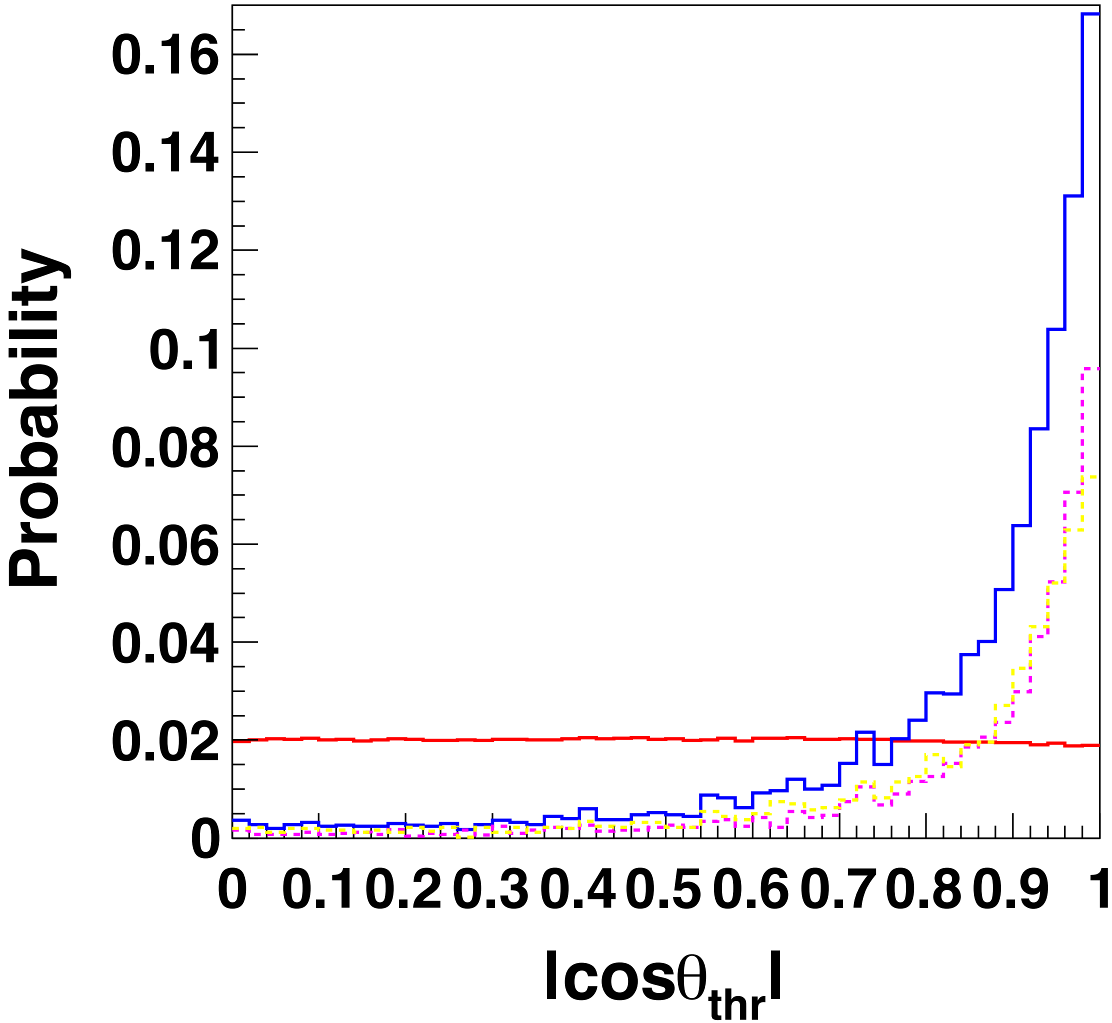
NeuroBayes input parameters



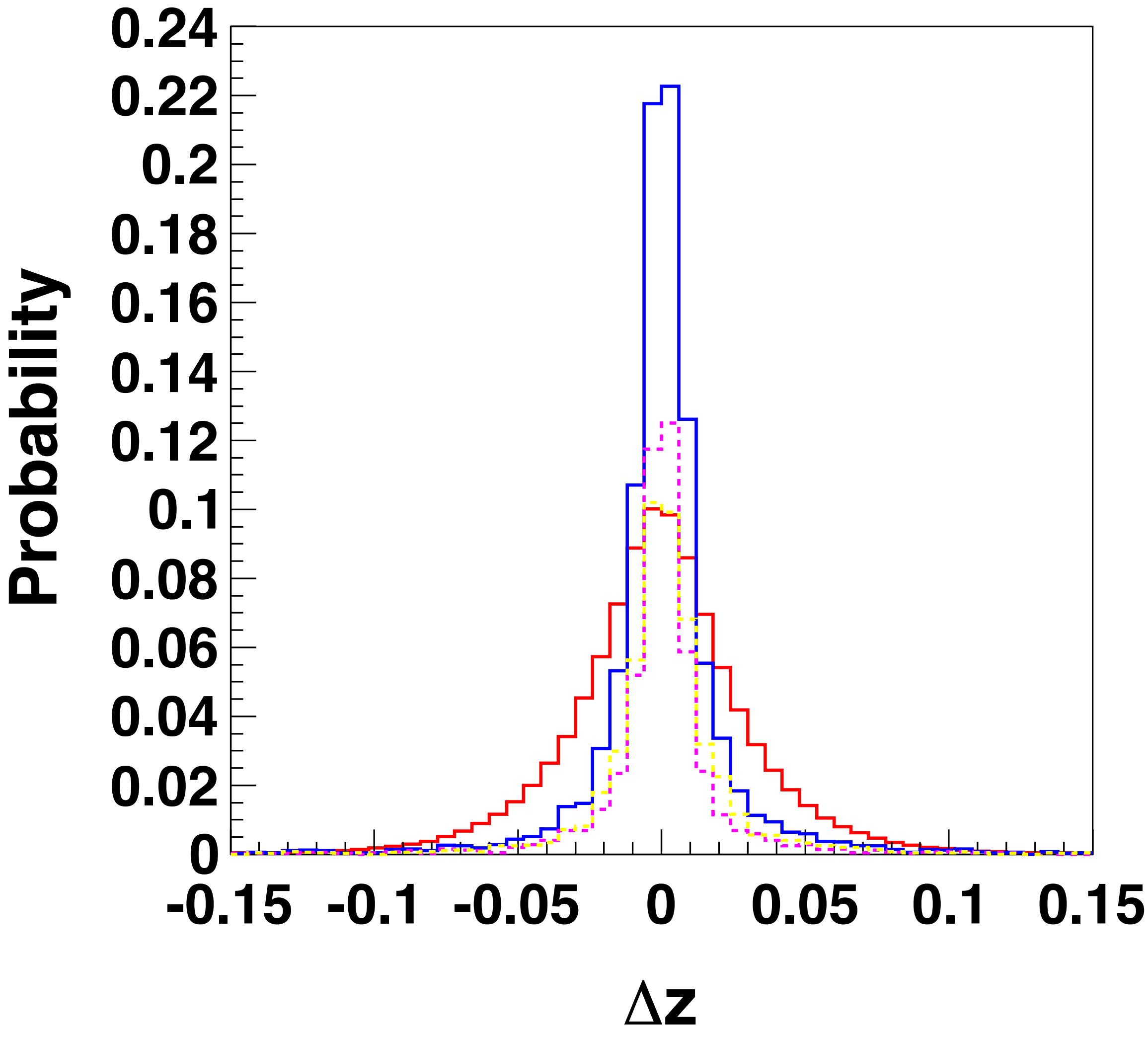
NeuroBayes input parameters



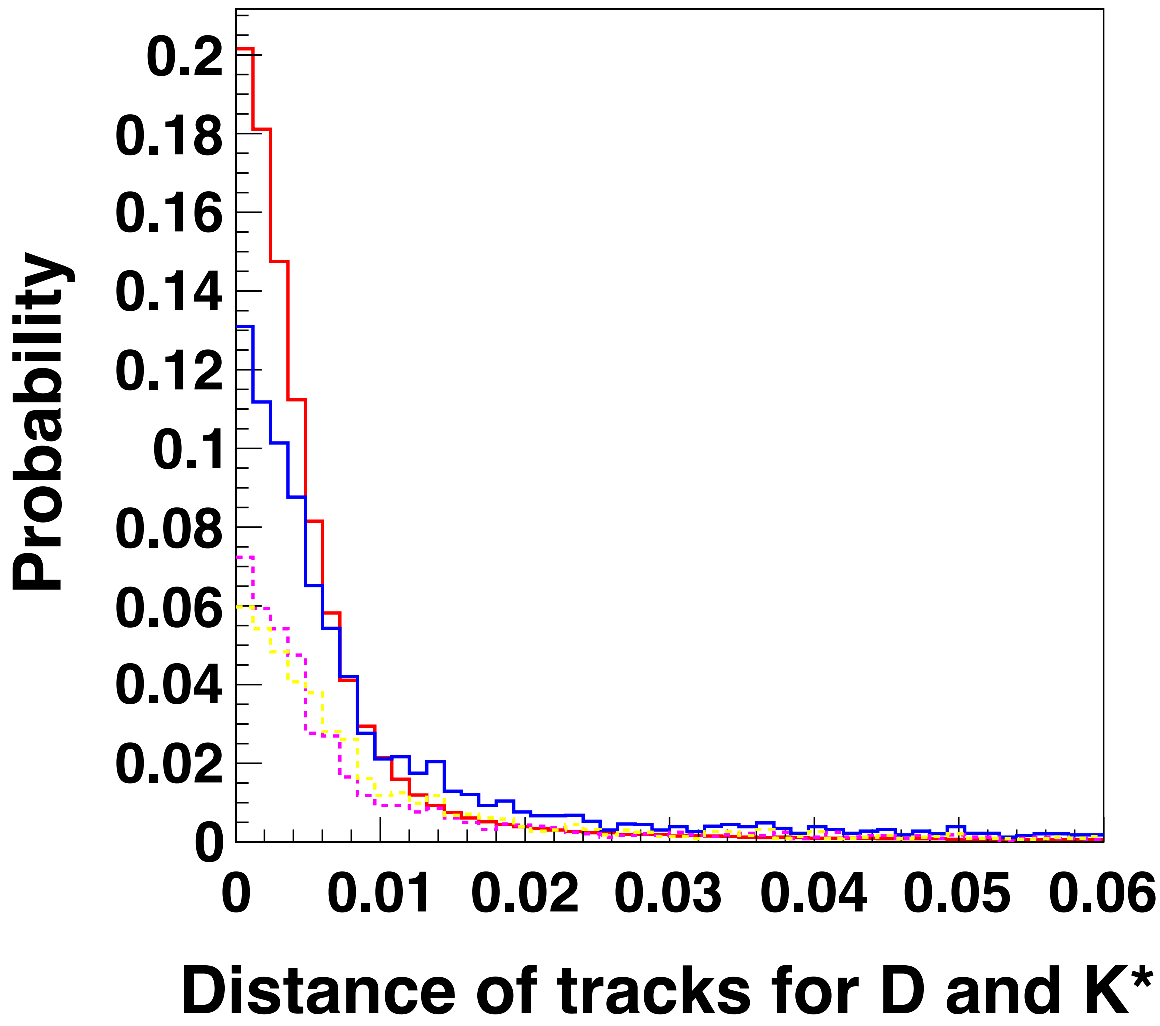
NeuroBayes input parameters



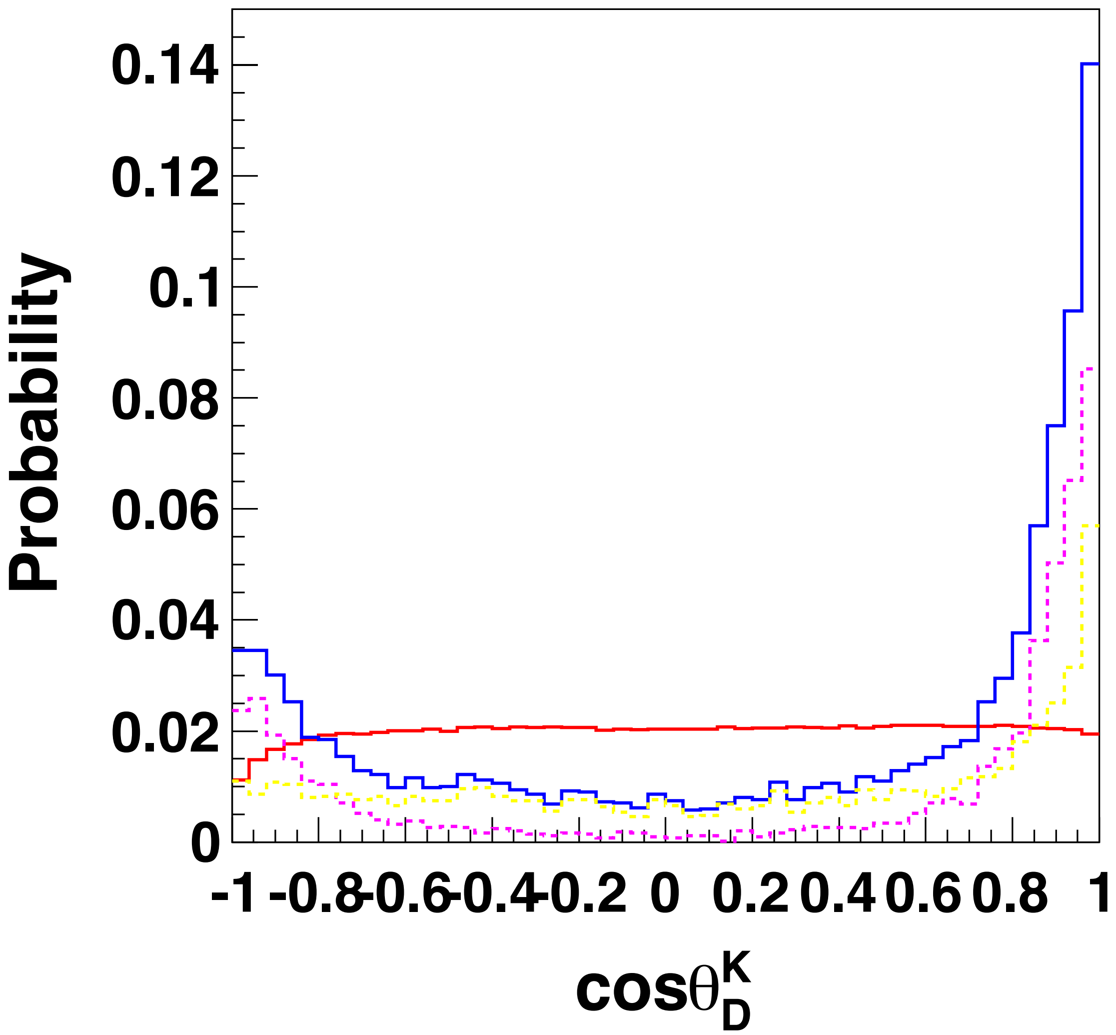
NeuroBayes input parameters



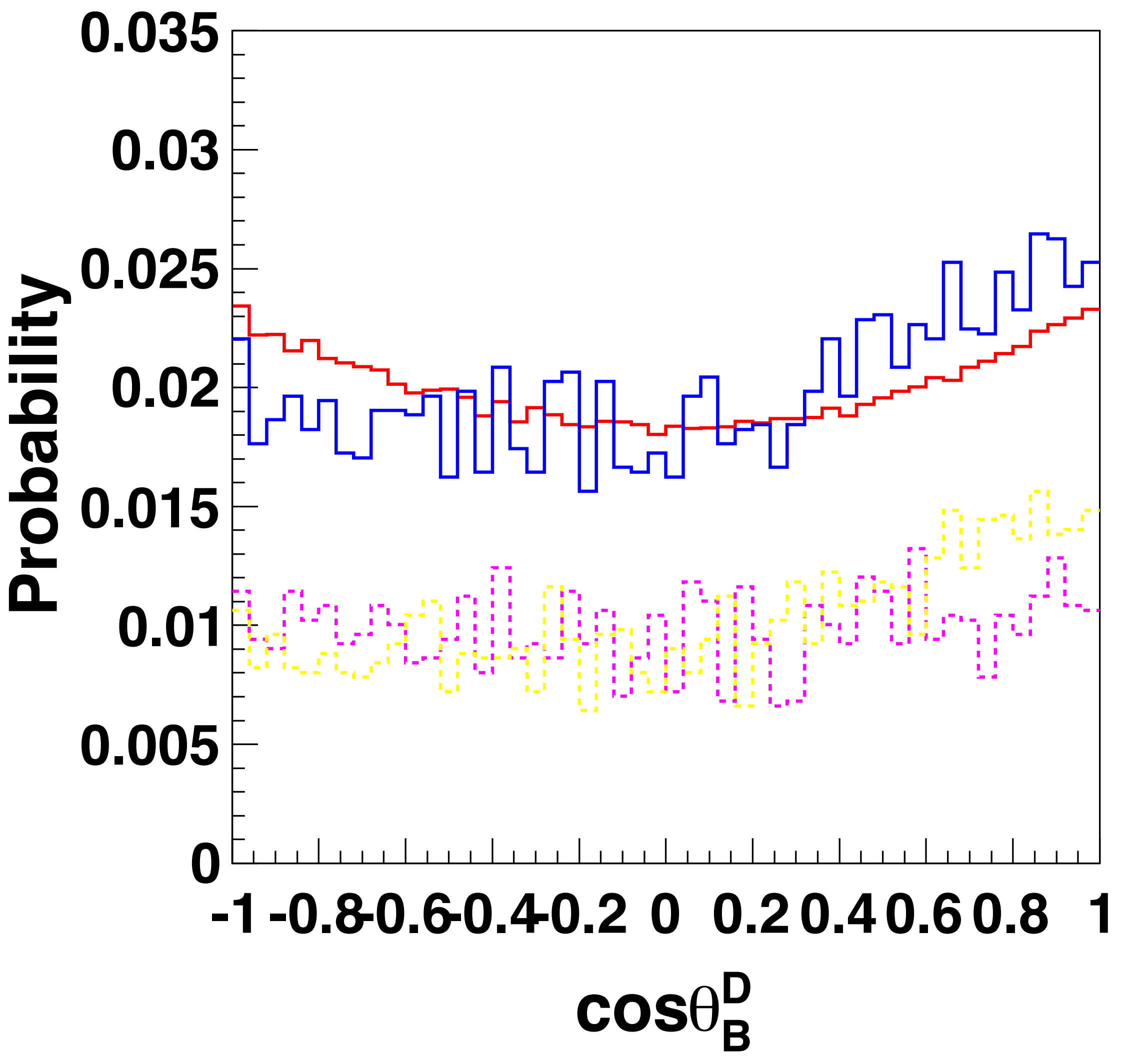
NeuroBayes input parameters



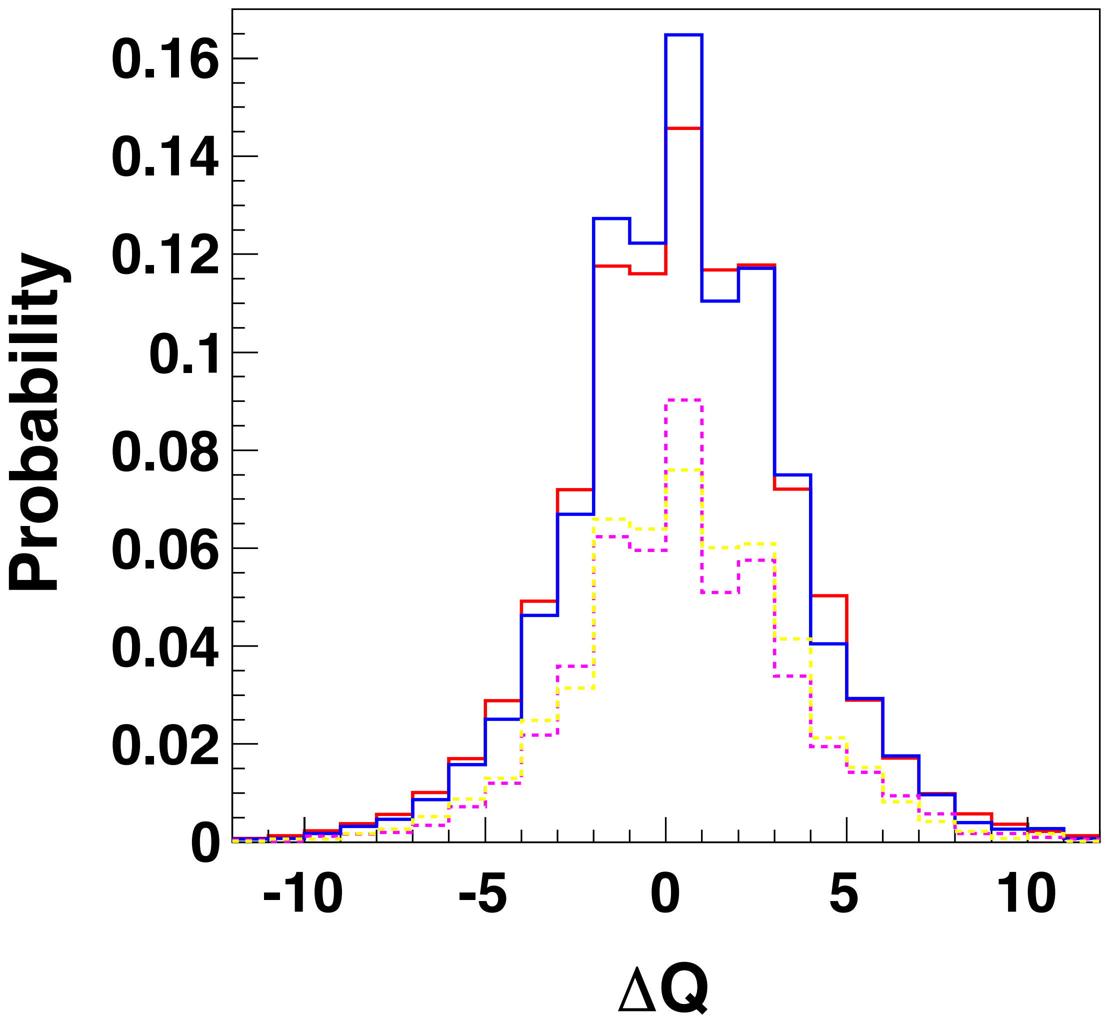
NeuroBayes input parameters



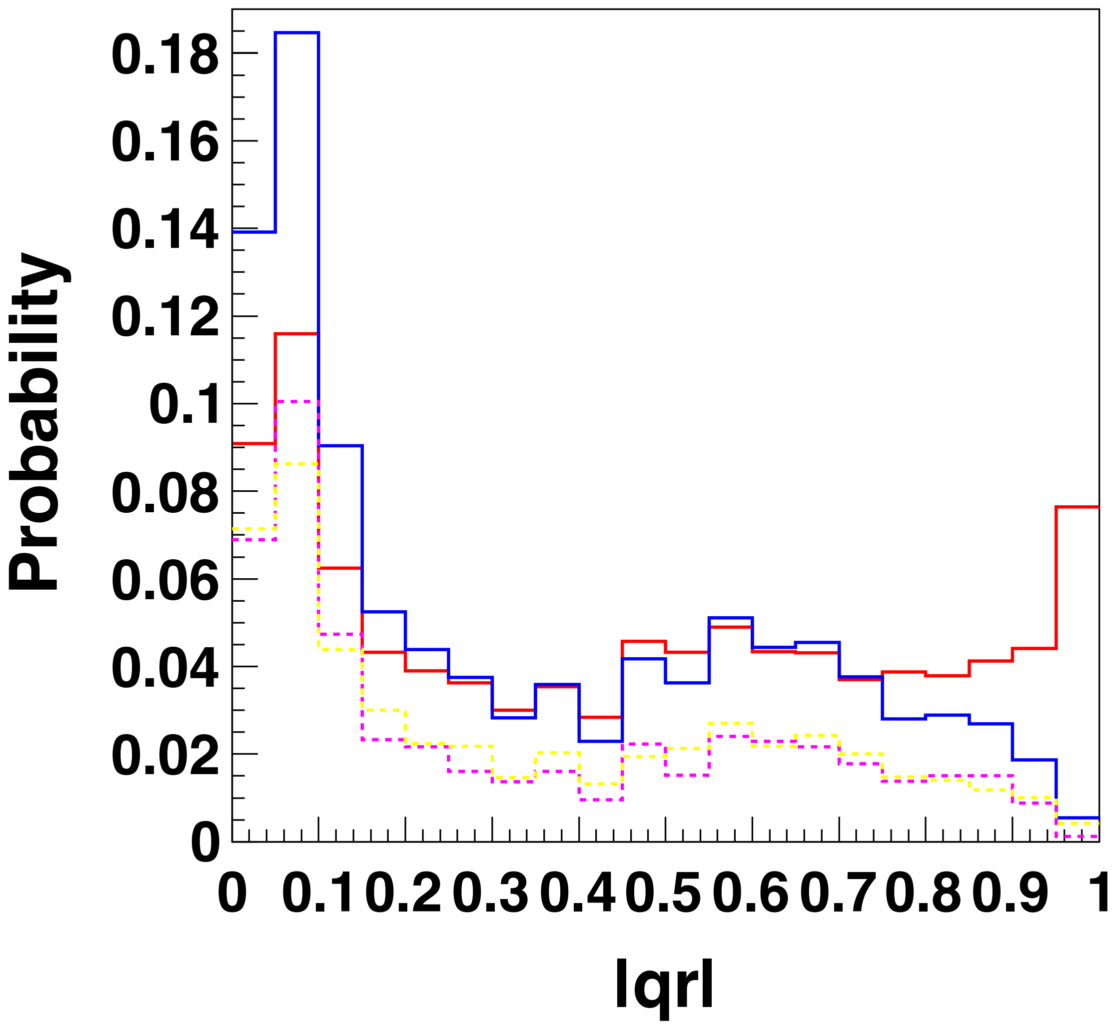
NeuroBayes input parameters



NeuroBayes input parameters

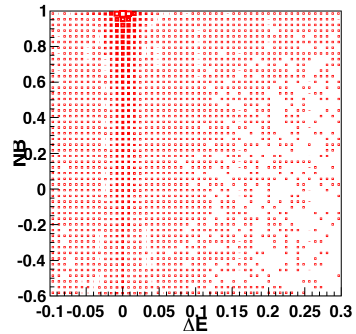


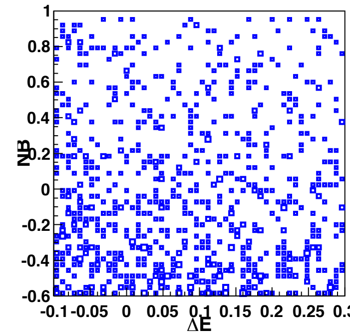
NeuroBayes input parameters



PDF

We perform ΔE-NB’ 2D fit.





PDF for ΔE

- Signal: a double Gaussian fixed from signal MC
- Combinatorial BB: free exponential
- $D^0\rho^0$:
- D^0K^+:
- $D^0\pi^+$:

} Fixed from MC

- Peaking BGs: fixed from MC
  - $[K{*}^0\pi^-]_{D-}\ K^+$
- qq: free 1st order Chebychev

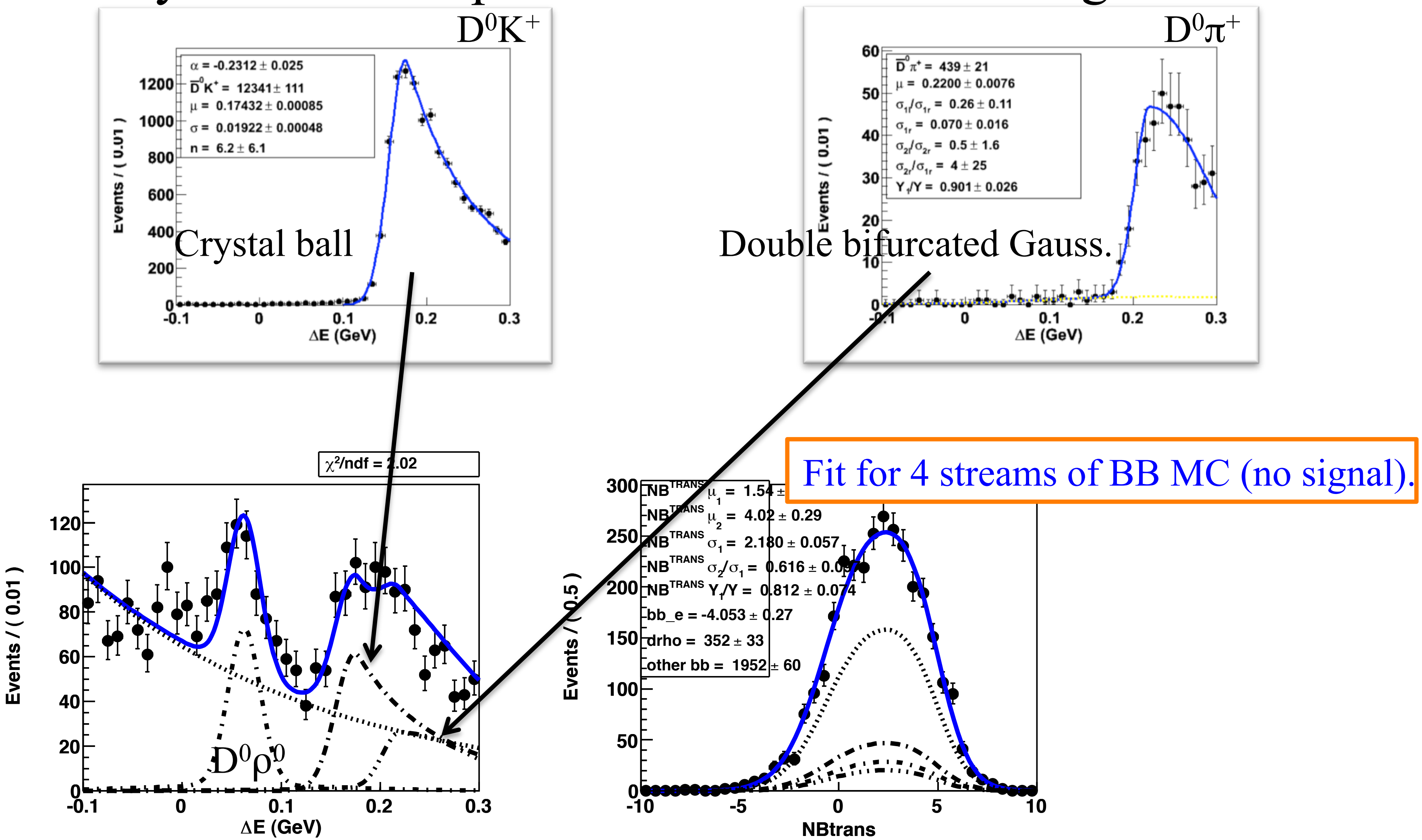
PDF for NB’

- Signal: a double Gaussian fixed from signal MC
- Comb. BB:
- $D^0\rho^0$:
- D^0K^+:
- $D^0\pi^+$:
- Peaking BGs:

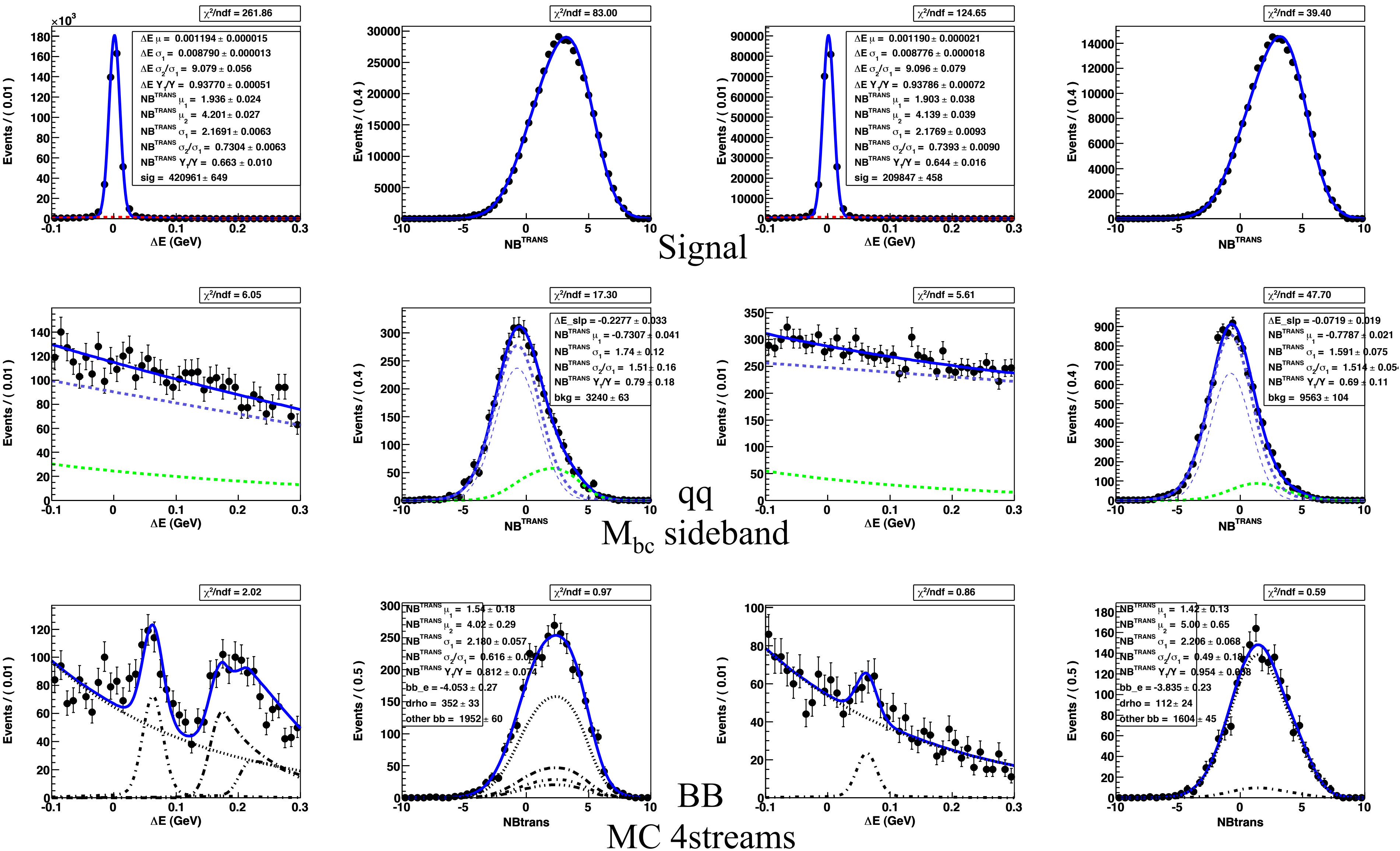
} Double Gaussians Fixed from MC

- qq: a double Gaussian fixed from M_{bc} sideband of the data.

- The yields and shapes are fixed in the fit on signal MC.



Favored mode | Suppressed mode



Systematic uncertainty

Source	R_{DK*} $[10^{-2}]$
Det. Eff.	+ 0.08 - 0.08
PDF	+ 2.81 - 1.85
Fit bias	+ 0.36 - 0.01
Total	**+ 2.83 - 1.85**

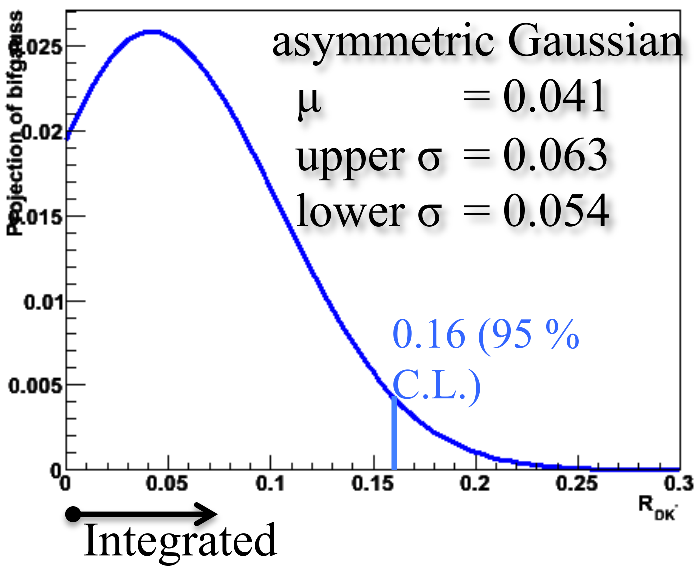
Sig.	+ 0.05 - 0.17
$\bar{D}^0 r^0$	+ 0.04 - 0.08
$\bar{D}^0 K^+$	+ 0.01 - 0.03
$\bar{D}^0 p^+$	+ 0.01 - 0.05
BB	+ 1.76 - 1.17
qq	+ 2.19 - 1.40
Peaking	+ 0.07 - 0.12
sum	**+ 2.81 - 1.85**

- Detection efficiency: MC statistics and PID calibration.
- PDF:
  - Uncertainties due to fixed shape parameters are obtained by varying them ±1s.
  - Uncertainty due to NB′ PDF of BB BG is estimated by applying signal PDF. Assign obtained difference to + and - sides (conservative).
  - Uncertainty due to the peaking background is estimated by applying 0-2 times the expected yields.
  - Uncertainties due to the D^0K^+ and D^0p^+ yields are obtained by applying the error of efficiency and BR.
- Fit bias: obtain the pull distribution from 10,000 pseudo-experiments.

$$R_{DK*} = (4.1^{+5.6\;+2.8}_{-5.0\;-1.8}) \times 10^{-2}$$

Upper limit on R_{DK^*}

- We obtain the upper limit by using an asymmetric Gaussian, where the positive and negative widths correspond to positive and negative errors including the syst. err.



$$R_{DK^*} = (4.1 ^{+5.6}_{-5.0} {}^{+2.8}_{-1.8}) \times 10^{-2}$$
$$< 0.16 \ \ (95\ \%\ \text{C.L.})$$

BaBar'09 $R_{DK^*} < 0.24$ (95 % C.L.)