

Observation of CP violation in charm decays

2020.3.3 谷

目次

- CP violation
- detectors
- event selection
- evaluation of errors
- conclusion

中間子の表記：

$$\begin{array}{ll} B^0 : d\bar{b} & \bar{B}^0 : \bar{d}b \\ B^+ : u\bar{b} & B^- : \bar{u}b \end{array} \quad \begin{array}{ll} D^0 : c\bar{u} & \bar{D}^0 : \bar{c}u \\ D^+ : c\bar{d} & D^- : \bar{c}\bar{d} \end{array}$$

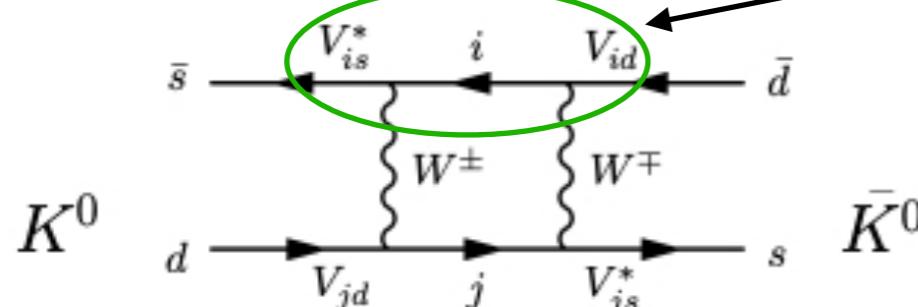
CP violation in quarks

CP violation

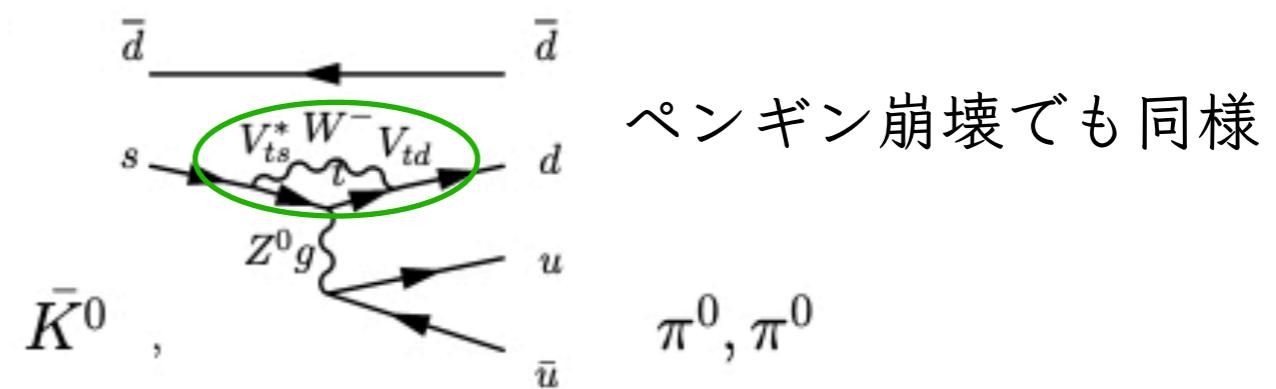
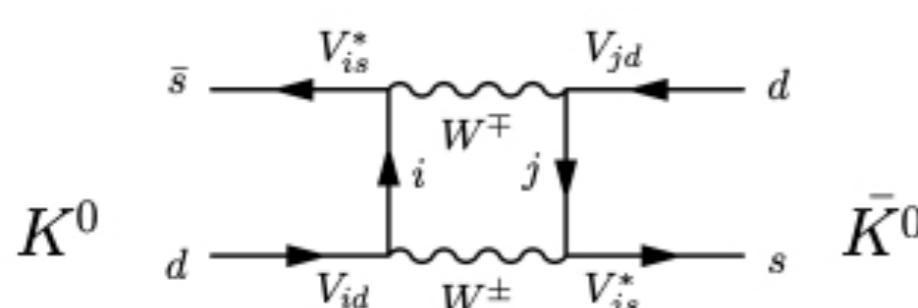
- クオークでの CP violation : CKM行列(ユニタリ行列)の成分に複素位相が残ってしまうことに起因

$$\begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{c} d' \\ s' \\ b' \end{array} \right] = V \left[\begin{array}{c} d \\ s \\ b \end{array} \right], \\
 \text{フレーバー固有状態} \qquad \qquad \text{質量固有状態}
 \end{array}
 \qquad
 V = \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{1}{2}\lambda^2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

ex) $K^0 - \bar{K}^0$ 振動



box-diagram 中に t が飛ぶと
振幅に $|V_{ts}^* V_{td}|^2$ が現れる



D^0 の CP violation

- 中性中間子の固有状態 :

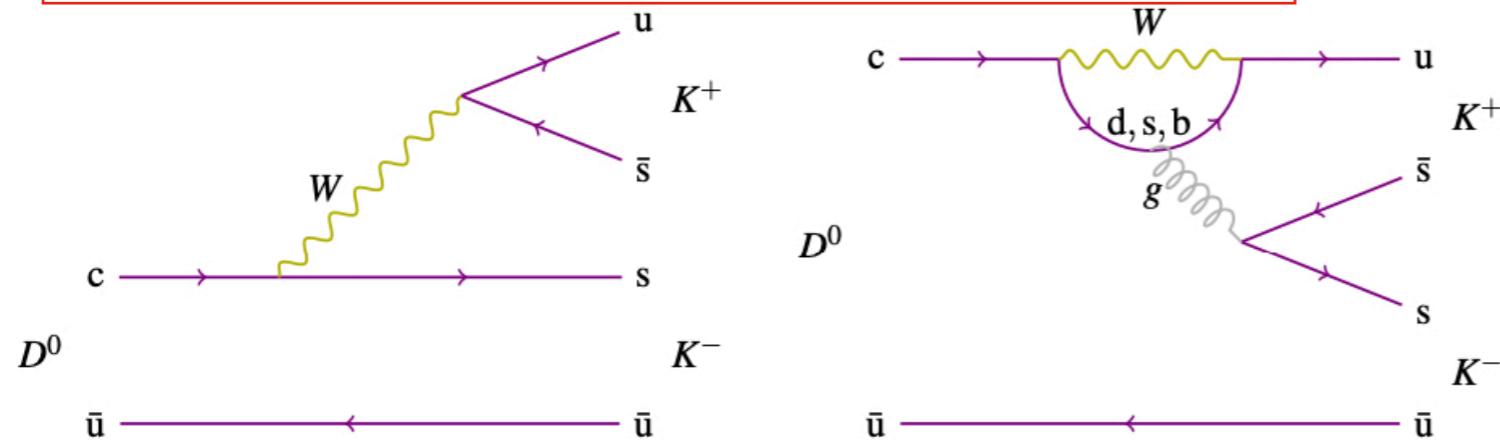
$$|D_{1,2}\rangle = p |D^0\rangle \pm q |\bar{D}^0\rangle, \quad |p|^2 + |q|^2 = 1$$

- $\left|\frac{q}{p}\right| = 1$ のとき、 D_1 と D_2 は CP 固有状態
- CP violation の方法

if $p = q = 1$:

$$\begin{aligned} D_{1,2} &= D^0 \pm \bar{D}^0 \\ &= c\bar{u} \pm \bar{c}u \\ &\xrightarrow{cp} \bar{u}c \pm c\bar{u} \\ &= \pm D_{1,2} \end{aligned}$$

① 1 つの終状態に対して CP 位相の異なる複数のプロセスがある場合 (Direct CPV)



② 混合の際に破れ、終状態によらない場合 (Indirect CPV)

$$P(D^0(t) \rightarrow \bar{D}^0) \neq P(\bar{D}^0(t) \rightarrow D^0)$$

これは $\left|\frac{q}{p}\right| \neq 1$ のときに成立

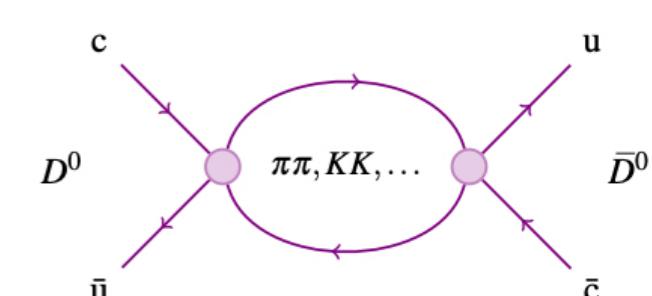
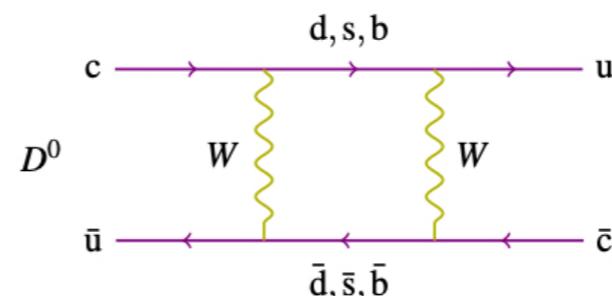
$$\begin{aligned} A_f(D^0 \rightarrow f) &= T_f e^{i(\delta_T - \gamma_T)} + P_f e^{i(\delta_P - \gamma_P)} \\ &= T_f [1 + r_f e^{i(\delta_f - \gamma)}] \end{aligned}$$

$$\bar{A}_{\bar{f}}(\bar{D}^0 \rightarrow \bar{f}) = T_f [1 + r_f e^{i(\delta_f + \gamma)}]$$

T_f - Tree P_f - Penguin

r_f - Ratio of Penguin and Tree

δ_f - strong phase shift γ - weak CP phase



D^0 での CP 破れの測定

- CP asymmetry:

(D 生成からの時間 t での) D^0 と \bar{D}^0 の、CP 固有状態 f に崩壊する様子の違い

$$A_{CP}(f; t) = \frac{\Gamma(D^0(t) \rightarrow f) - \Gamma(\bar{D}^0(t) \rightarrow f)}{\Gamma(D^0(t) \rightarrow f) + \Gamma(\bar{D}^0(t) \rightarrow f)}$$

- direct CPV 成分と indirect CPV 成分に分離

$$A_{CP}(f) \simeq a_{CP}^{\text{dir}}(f) + \frac{\langle t(f) \rangle}{\tau(D^0)} A_{\Gamma}(f)$$

decay time の平均

CP 固有状態 f の例

$$f = \pi^- \pi^+ \pi^0$$

direct

indirect

$$\xrightarrow{CP} (-\pi^-)(-\pi^+)(-\pi^0) = -f \quad (\text{CP odd})$$

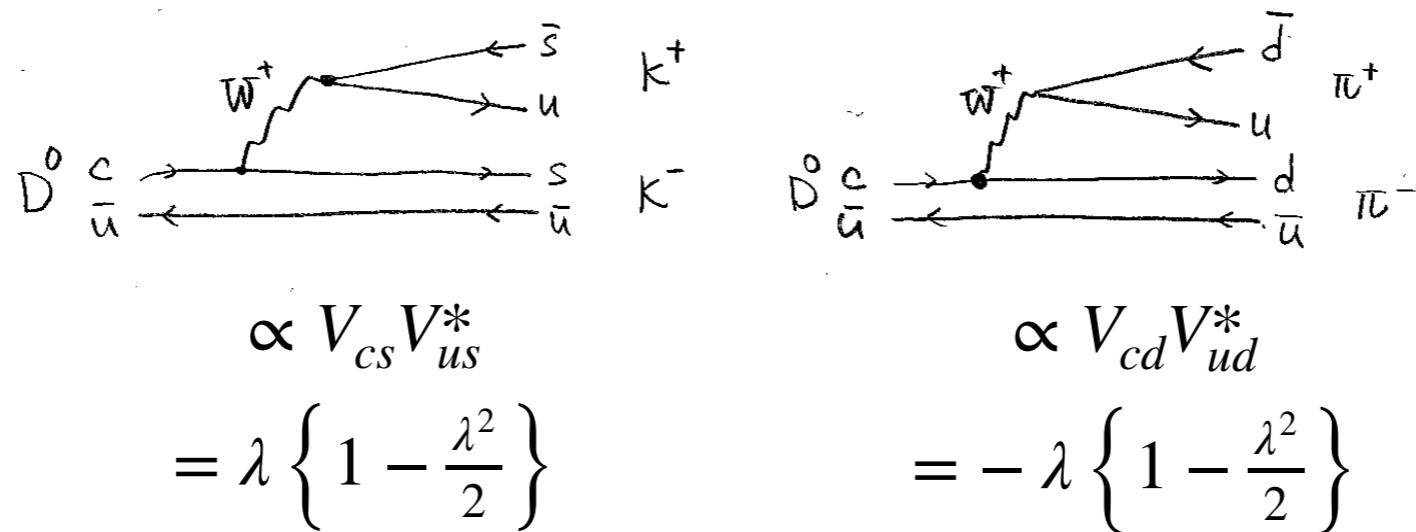
$$f = K^- K^+$$

$$\xrightarrow{CP} (-K^+)(-K^-) = f \quad (\text{CP even})$$

今回は $f = K^- K^+$ と $f = \pi^- \pi^+$ を扱う

U-spin 対称性

- $s \leftrightarrow d$ の変換の対称性
- U-spin 対称性の極限では、 $D^0 \rightarrow K^-K^+$ と $D^0 \rightarrow \pi^-\pi^+$ の寄与は大きさが同じで符号が逆 (U-spin 対称性の破れの程度は不明)



- 今回の測定では以下の ΔA_{CP} を測定：

$$\begin{aligned}\Delta A_{CP} &\equiv A_{CP}(K^-K^+) - A_{CP}(\pi^-\pi^+) \\ &\approx \Delta a_{CP}^{\text{dir}} - \frac{\Delta \langle t \rangle}{\tau(D^0)} A_\Gamma,\end{aligned}$$

decay width のアシンメトリは
終状態によらないと仮定

解析に用いる D^0

- π -tag 事象 : $pp \rightarrow D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+$ (分岐比: 67.7%)
- μ -tag 事象 : $pp \rightarrow \bar{B} \rightarrow D^0\mu^-\nu X$

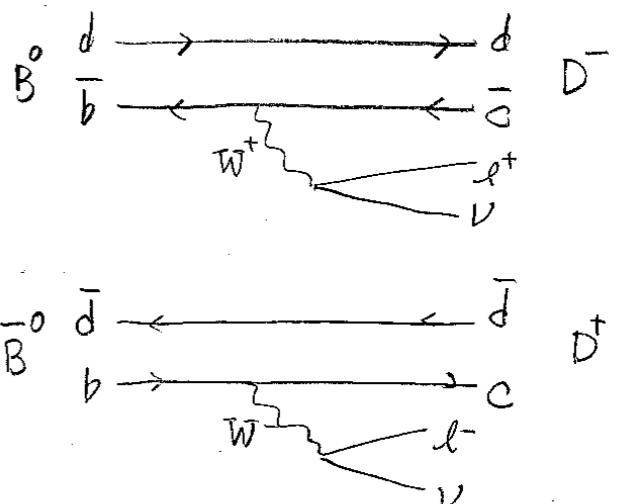
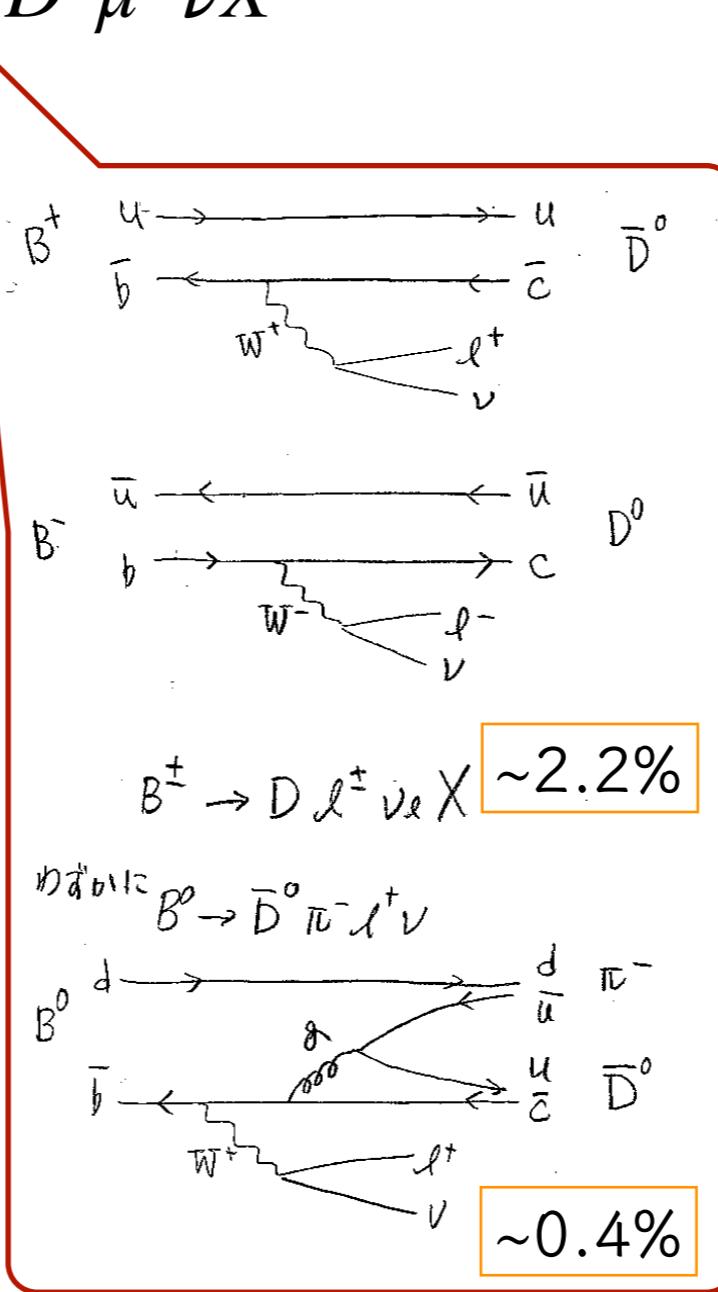
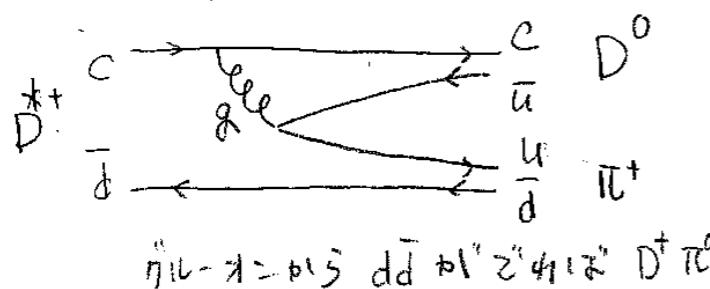
$$D^* : I(J^P) = \frac{1}{2}(1^-)$$

$$D : I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

$$D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+ \quad (68\%)$$

$$D^{*+} \rightarrow D^+\pi^0 \quad (31\%)$$

$$D^{*+} \rightarrow D^+\gamma \quad (1\%)$$



- 実験でのアシンメトリ：

$$A_{\text{raw}}^{\pi\text{-tagged}}(f) \equiv \frac{N(D^{*+} \rightarrow D^0(f)\pi^+) - N(\bar{D}^0(f)\pi^-)}{N(D^{*+} \rightarrow D^0(f)\pi^+) + N(\bar{D}^0(f)\pi^-)},$$

$$A_{\text{raw}}^{\mu\text{-tagged}}(f) \equiv \frac{N(\bar{B} \rightarrow D^0(f)\mu^-\bar{\nu}_\mu X) - N(B \rightarrow \bar{D}^0(f)\mu^+\nu_\mu X)}{N(\bar{B} \rightarrow D^0(f)\mu^-\bar{\nu}_\mu X) + N(B \rightarrow \bar{D}^0(f)\mu^+\nu_\mu X)}$$

- これらの近似：

$$A_{\text{raw}}^{\pi\text{-tagged}}(f) \approx A_{CP}(f) + A_D(\pi) + A_P(D^*),$$

$$A_{\text{raw}}^{\mu\text{-tagged}}(f) \approx A_{CP}(f) + A_D(\mu) + A_P(B),$$

興味のある CP asymmetry

pp からの $D^{*-}(\bar{B})$ と $D^{*+}(B)$ の
生成断面積の差

$\pi^-(\mu^-)$ と $\pi^+(\mu^+)$ の再構成効率の差

- この近似は $O(10^{-6})$ まで妥当

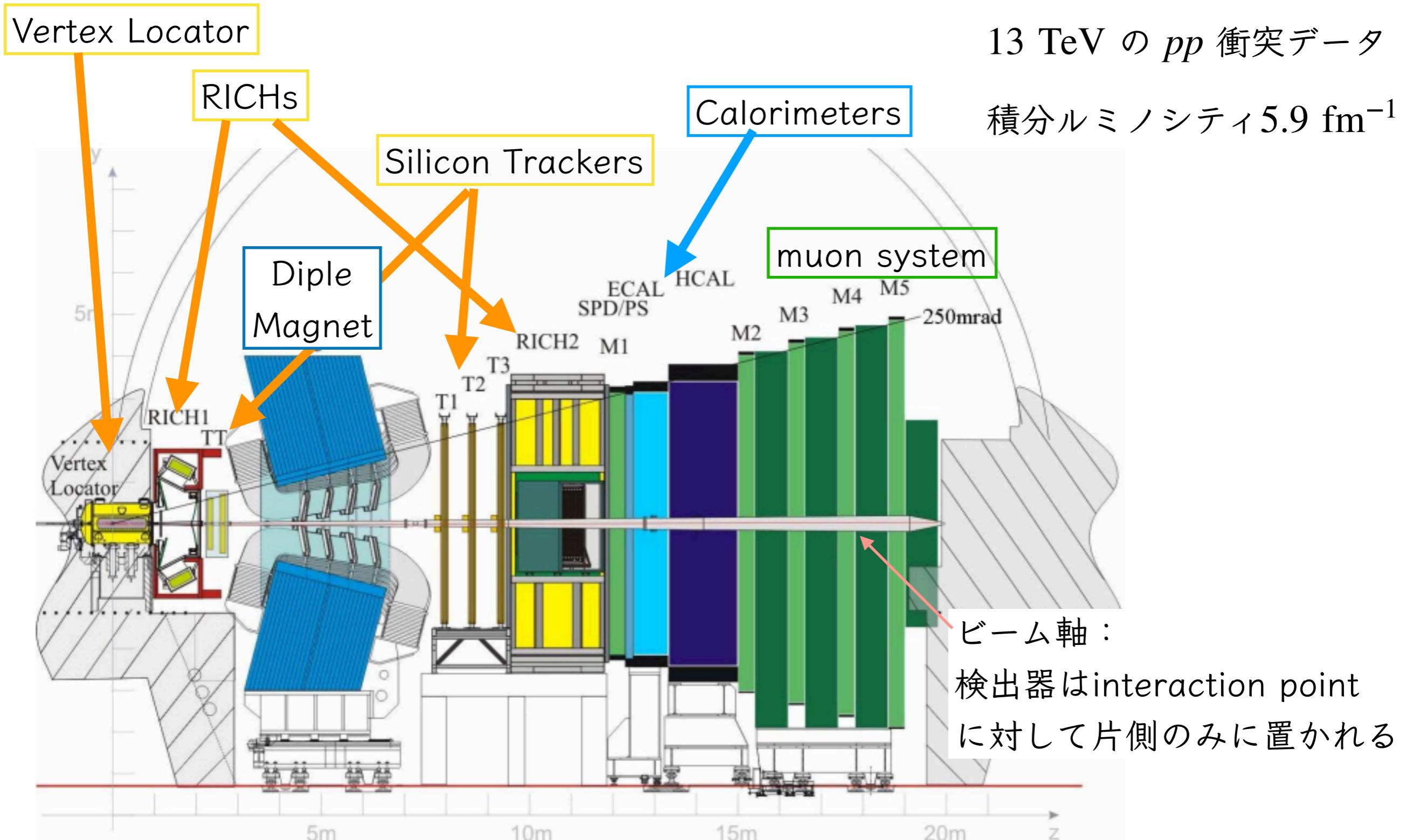
これらの項の寄与は小さい $\simeq O(10^{-2})$

- 終状態 $f = K^-K^+$ と $f = \pi^-\pi^+$ の CP asymmetry の差 ΔA_{CP} は、終状態 f に非依存な項はキャンセルし、

$$\Delta A_{CP} = A_{\text{raw}}(K^-K^+) - A_{\text{raw}}(\pi^-\pi^+).$$

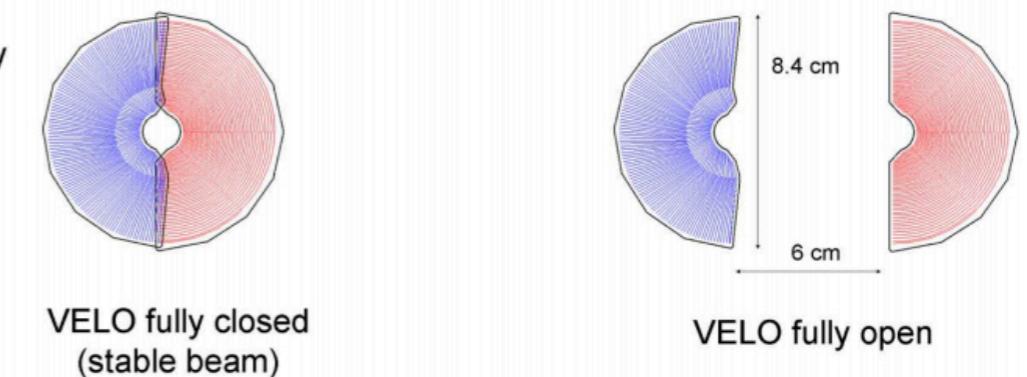
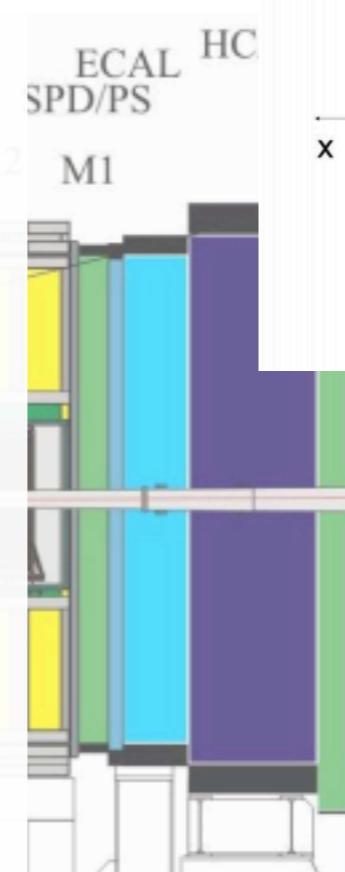
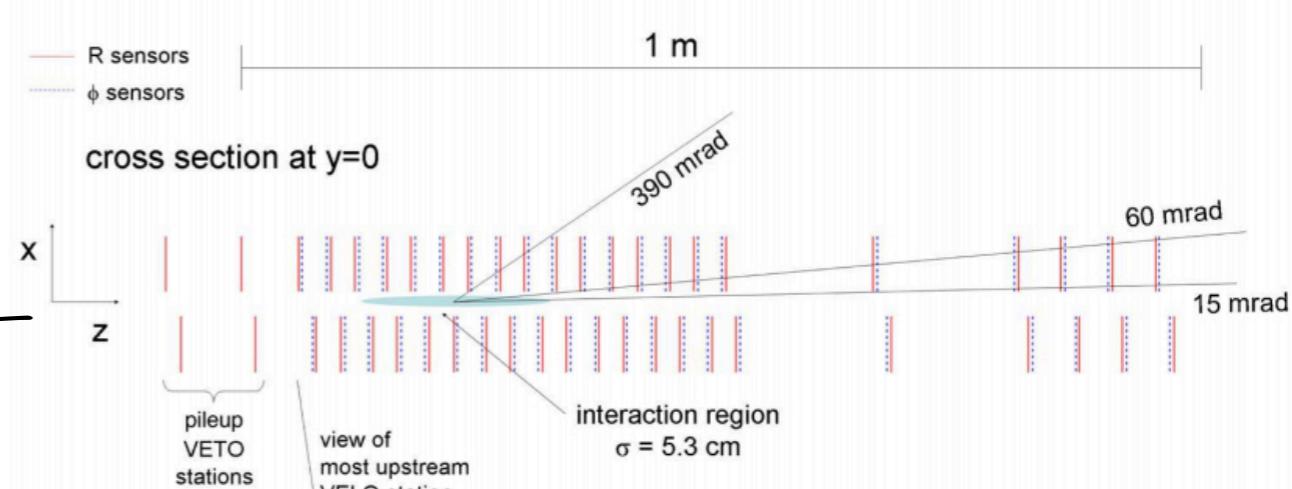
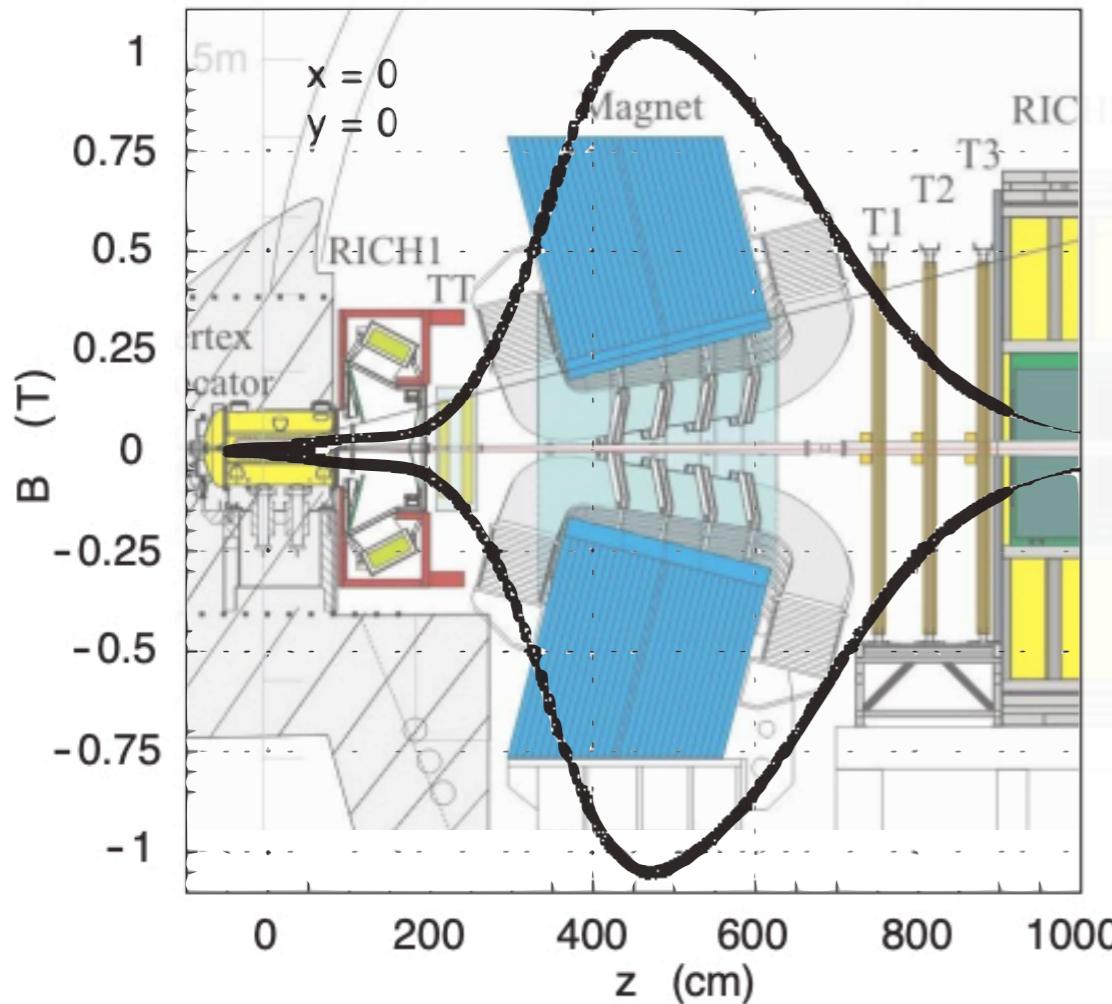
LHCb detector

LHCb detector



Dipole Magnet / VELO

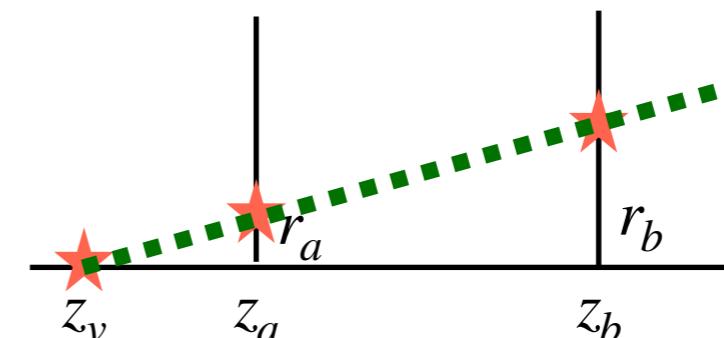
磁場はVELO からトラッカーまでの領域をカバー
 磁場の向きの違いによる系統誤差を抑えるため、
 磁場の向きを周期的に変更



Vetex Locator (VELO):

- b, c 崩壊によるsecondary vertexの id
- ビーム軸等からの pile-up に veto をかける役割も

$$z_v = \frac{kz_a - z_b}{k - 1}, \quad k = \frac{r_b}{r_a}$$

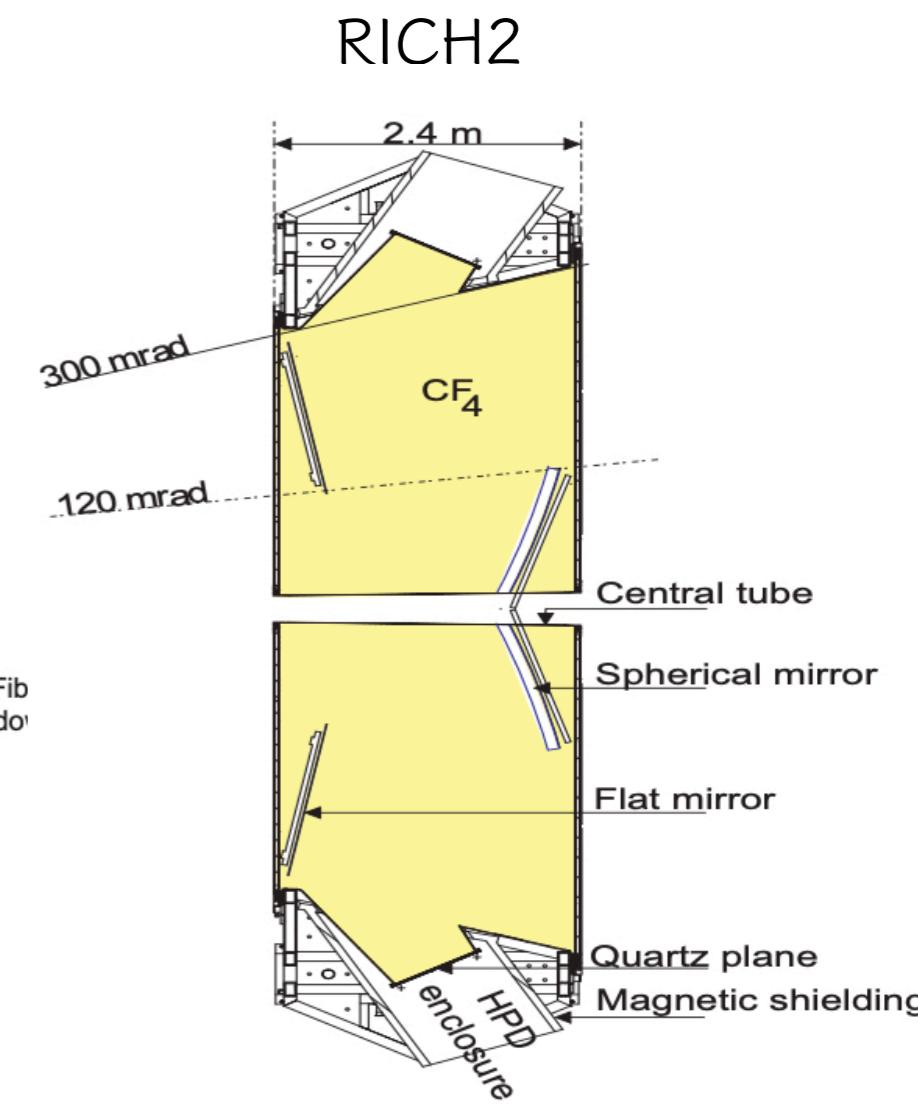
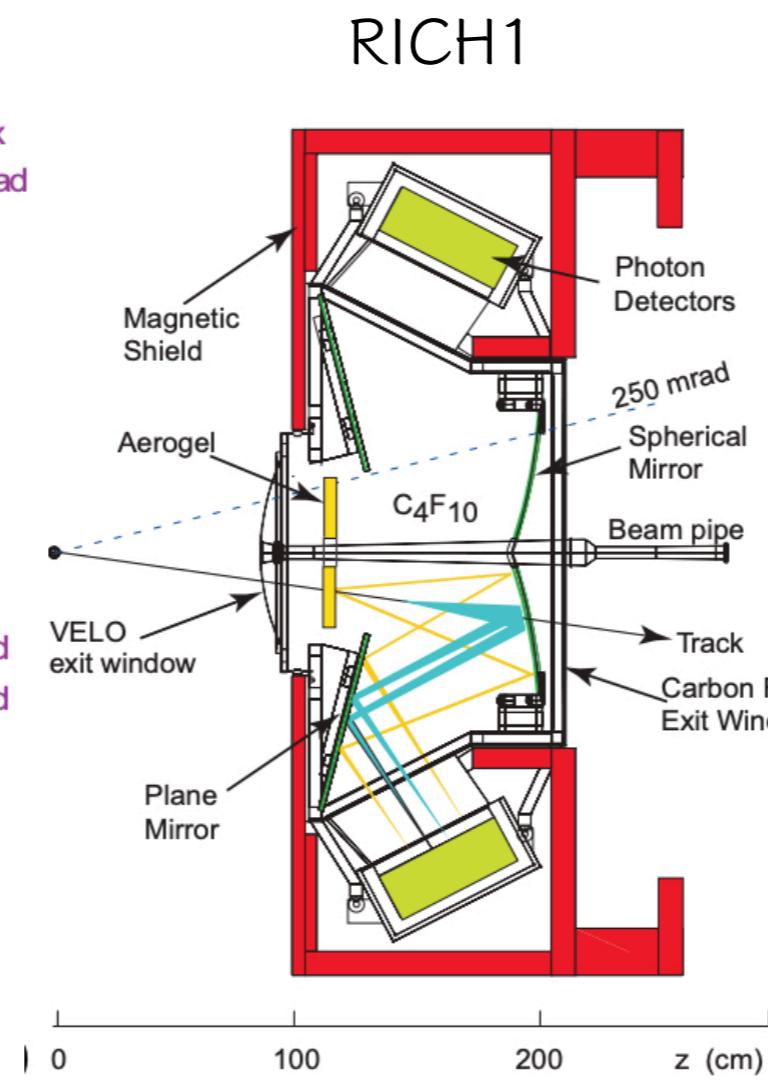
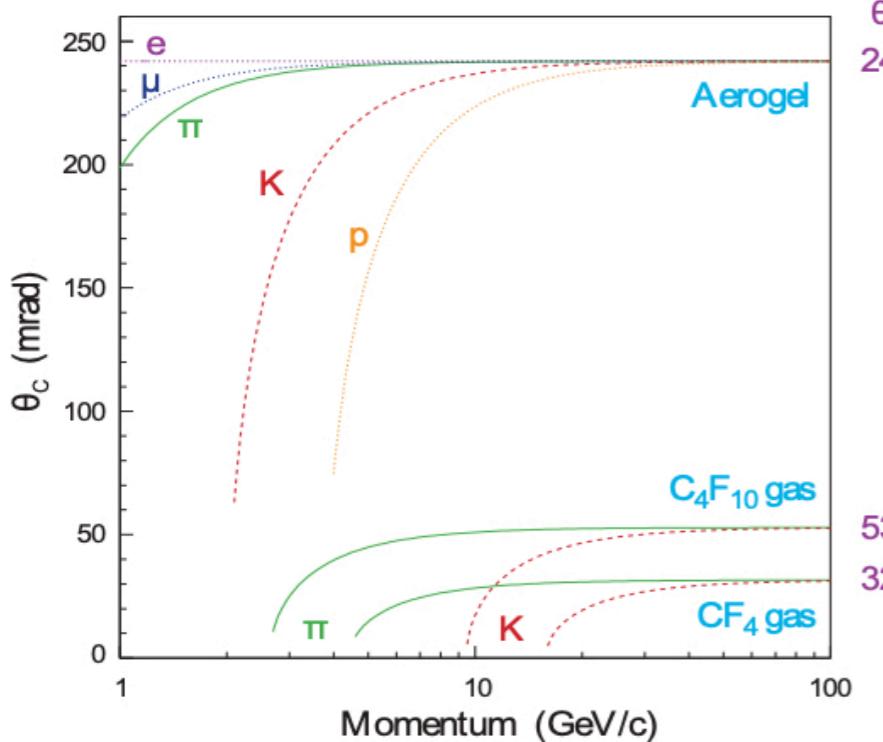


RICH detectors

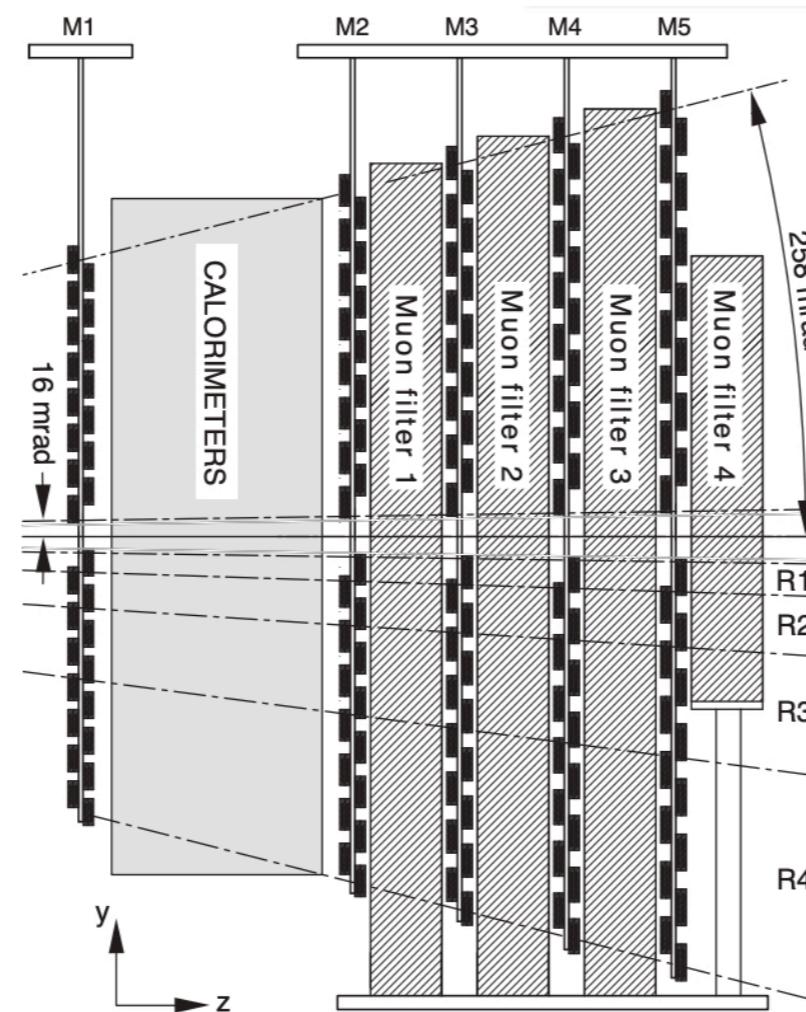
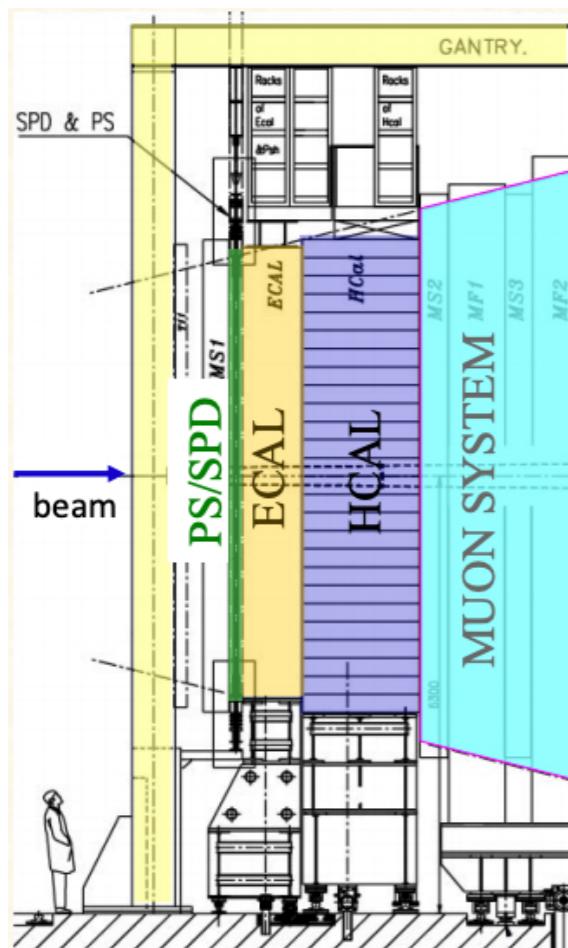
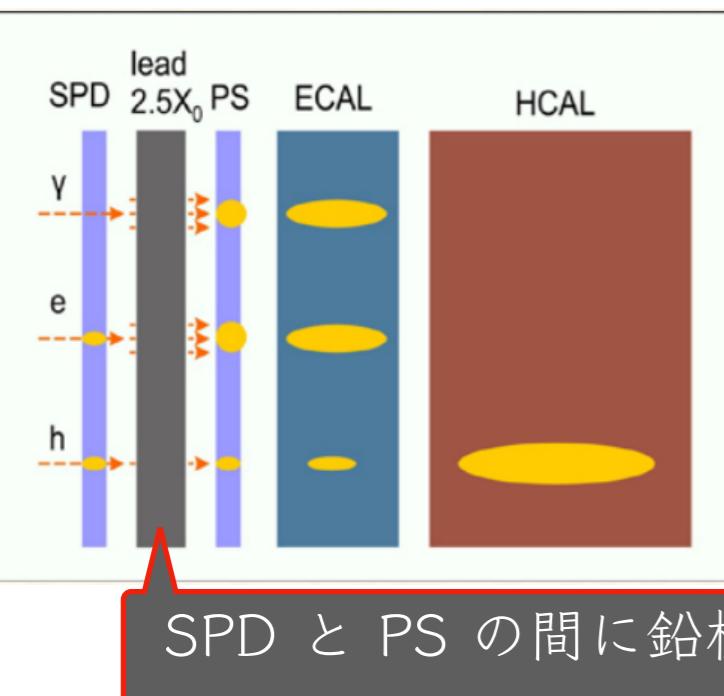
- Ring Imaging Cherenkov detectors : π と K の識別
 - RICH1(上流) : low momentum (1~60GeV)に対応
 - RICH2(下流) : high momentum (15~100GeV以上)に対応

aerogel, C₄F₁₀ gas

CF₄ gas

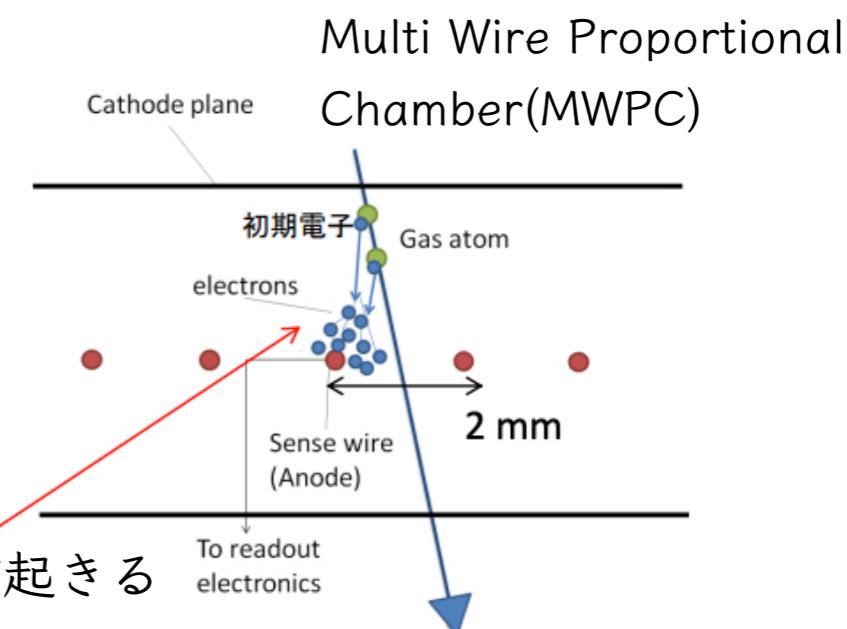


calorimeters/muon system



5つの μ station:

- タンクスチタン線の MWPC
gas: (Ar(40)+CO₂(55)+CF₄(5))
Ar : base gas, CO₂: quencher
- それぞれの station が更に 4 つの領域 (R1~R4) に分かれている



- ECAL の前に scintillator pad detector (SPD) と preshower detector (PS) \rightarrow γ / e の識別
- high energy γ の id のため、ECALは大きい (~25 radiation lengths)

event selection

online event selection

- カロリメータ、 μ システムでのハードウェアトリガ
- ソフトウェアトリガ①
 - 少なくとも1つのトラックが大きい p_T を持っている
そのトラックが Primary Vertex (PV) で生成したものでない
or
 - 2本のトラックが secondary vertex を構成
($\uparrow D^0$ の崩壊点)
- ソフトウェアトリガ②
 - D^0 の再構成 (decay vertex, トラック, $p_T(D^0)$, $p(D^0)$ と flight direction のなす角, PID, χ_{IP}^2 などに条件をかける)
 - invariant mass の計算

D^0 候補を用いたときと、用いないときでそれぞれ reconstruction した PV の χ^2 の差

offline event selection

- tag用 π/μ の検出の非対称領域をカット
 - 磁場の向きと π/μ の運動量・電荷によっては、粒子が検出器に入らないことがある
 - カットされたイベント: 35% (π -tag)、10% (μ -tag)

π -tag の D^0 ($D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+$): χ_{IP}^2 に条件を課し B decay からの D^0 を抑える

- その後 π と D^0 から D^{*+} の vertex を再構成

μ -tag の D^0 ($\bar{B} \rightarrow D^0\mu^-\nu X$):

- dedicated boosted decision tree (BDT) によりフィルタ
 - D^0 由来でない荷電 K, π などを組み合わせてしまう bg を抑える
 - $B \rightarrow c\bar{c}\pi^\pm X, B \rightarrow c\bar{c}K^\pm X$ という bg を抑える
 - μ と π or μ と K の invariant mass を組み、 $J/\psi, \psi(2S)$ に一致した
ら排除

$c\bar{c}$ 共鳴 $\rightarrow \mu^-\mu^+$ と崩壊 (全体の~6%)

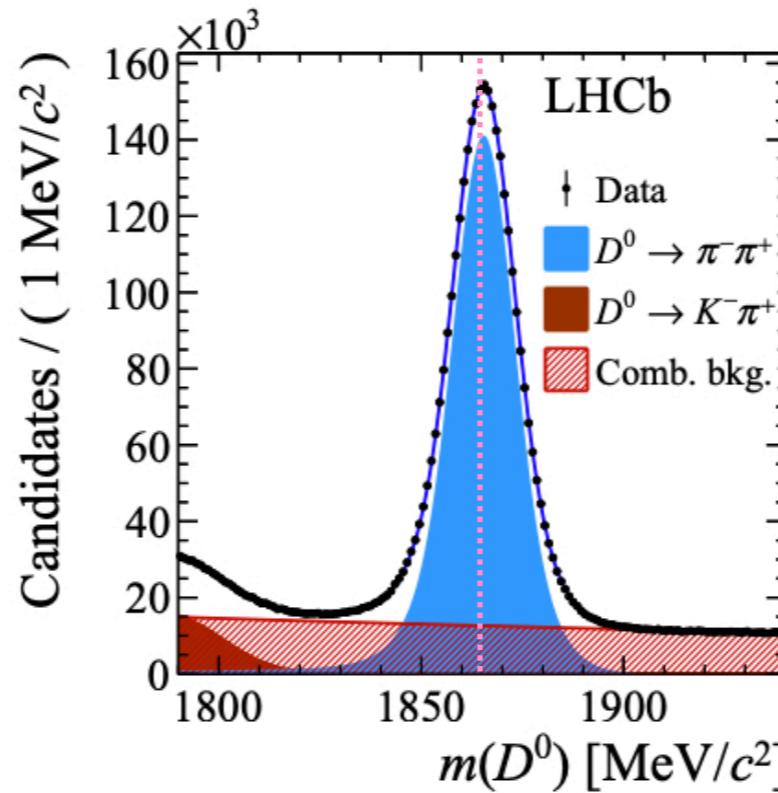
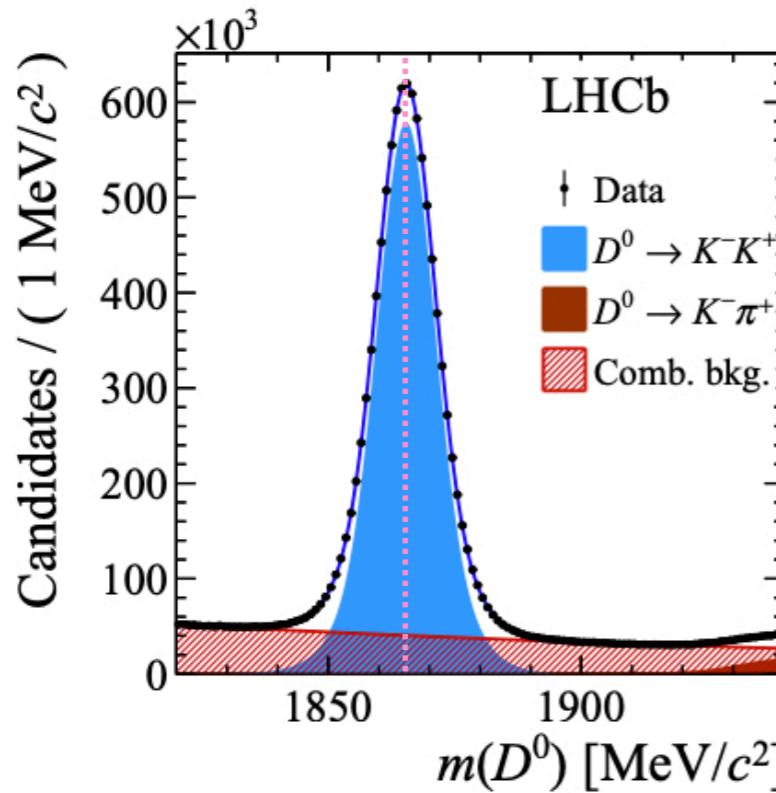
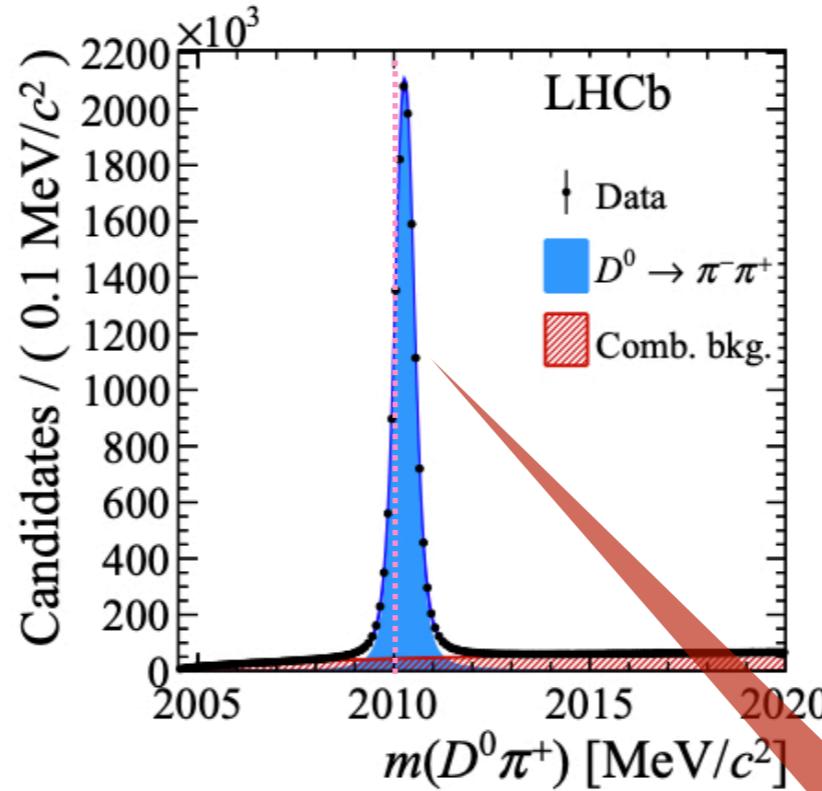
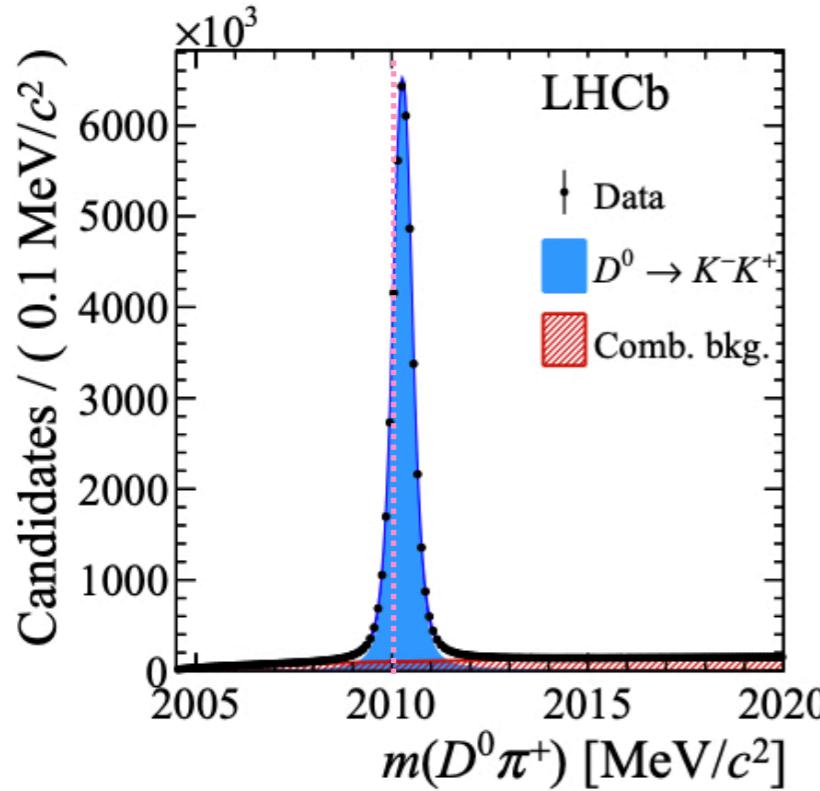
残ったイベント: D^{*+}, B の多重候補をもつものもある \leftarrow どちらかをランダムに残す
多重候補をもつイベントの割合: 10% (π -tag)、0.4% (μ -tag)

- D^* や B 、tag用の π や μ の運動量, η , ϕ 分布が K^-K^+ モードと $\pi^-\pi^+$ モードで異なっていたら相殺されない
 $\rightarrow K^-K^+$ モードに対する分布に重みを掛けて補正、 ΔA_{CP} への寄与 10^{-4} 以下になった

$$A_{\text{raw}}^{\pi\text{-tagged}}(f) \approx [A_{CP}(f)] + A_{\text{D}}(\pi) + A_{\text{P}}(D^*),$$

$$A_{\text{raw}}^{\mu\text{-tagged}}(f) \approx [A_{CP}(f)] + A_{\text{D}}(\mu) + A_{\text{P}}(B),$$

mass distributions



上段： π -tag イベント
下段： μ -tag イベント
左： K^-K^+ モード
右： $\pi^-\pi^+$ モード

桃色の破線：
 D^{*+}, D^0 の質量
(それぞれ 2010, 1864 MeV)

$m(D^0\pi)$ の分布： D^0 の再構成に失敗した、という bg と sig が区別できない

μ -tag イベントは photon radiation を考慮した関数で表現されている

$$(\bar{B} \rightarrow D^0 \mu^- \nu X)$$

evaluation of errors

ΔA_{CP} に対する sys errors

① sig と bg の mass model 由来

- 基本となるモデルに即した擬データを生成、それを別モデルで fit することで見積もる

② (μ -tag) 再構成失敗により、 D^0 と \bar{D}^0 を間違える

- $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ モードにおける K の電荷と μ の電荷を比較することで見積もる

③ パラメータの分布への重み付けの際のエラー

④ (π -tag) B 由来の D^0 がわずかに含まれている可能性

- D^0 の impact parameter 分布から見積もる

⑤ (π -tag) $m(D^0)$ のピークには含まれておらず $m(D^0\pi)$ のピークにのみ存在する bg

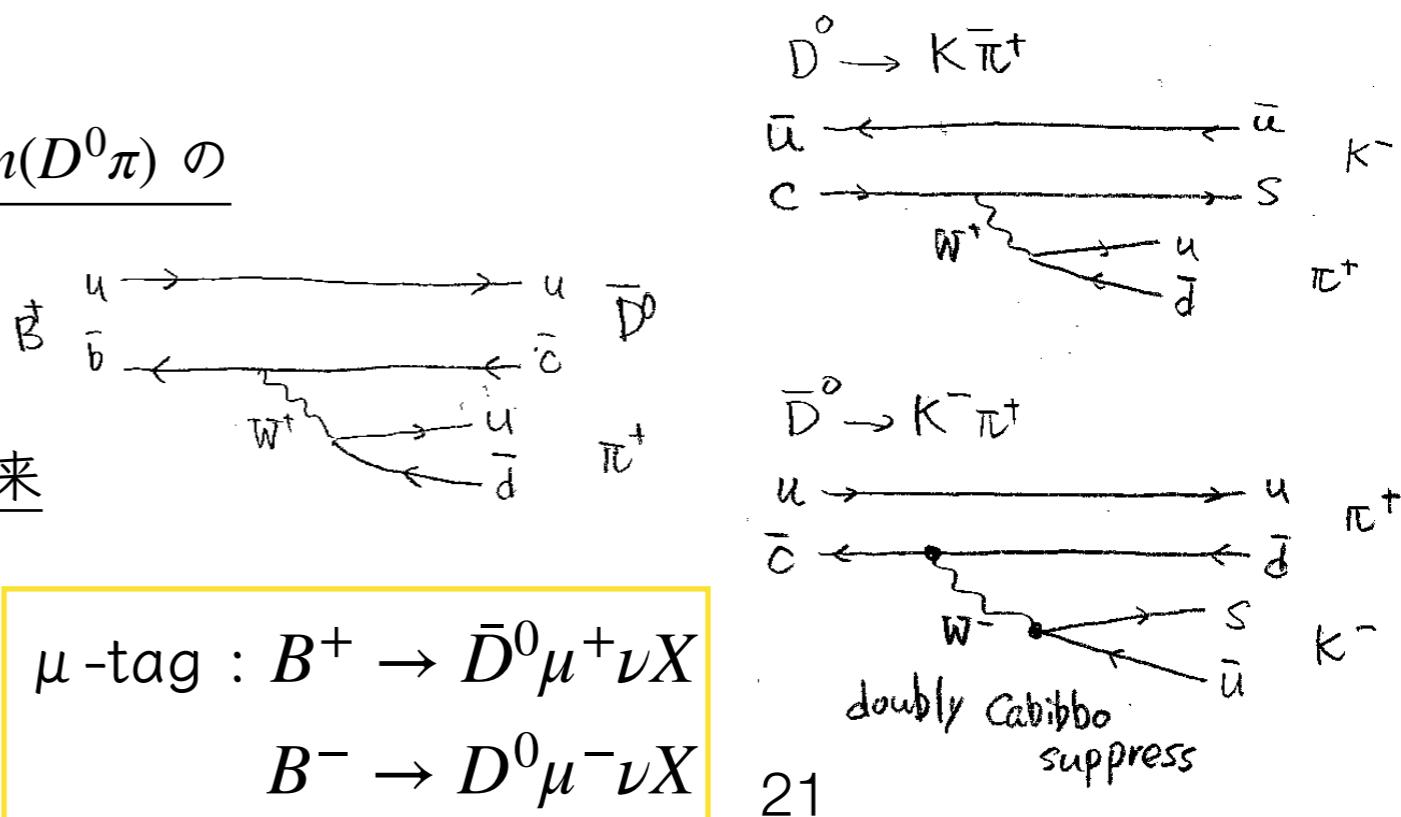
- $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0, \pi^- l^+ \nu_l$ 等が該当

⑥・⑦ (μ -tag) B と \bar{B} の割合・ B の再構成効率由来

$$\begin{aligned}\pi\text{-tag : } & D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+ \\ & D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^-\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu\text{-tag : } & B^+ \rightarrow \bar{D}^0 \mu^+ \nu X \\ & B^- \rightarrow D^0 \mu^- \nu X\end{aligned}$$

Source	π -tagged	μ -tagged	$\times 10^{-4}$
Fit model	0.6	2	
Mistag	—	4	
Weighting	0.2	1	
Secondary decays	0.3	—	
Peaking background	0.5	—	
B fractions	—	1	
B reco. efficiency	—	2	
Total	0.9	5	



結果

- bg のアシンメトリ：
 - K^-K^+ モードと $\pi^-\pi^+$ モードでのバックグラウンドの差
 - 主なbg は D^0 候補を Primary Vertex からの π と組み合わせてしまうこと
- error を含めた ΔA_{CP} の値：

$$\Delta A_{CP}^{\pi\text{-tagged}} = [-18.2 \pm 3.2 \text{ (stat.)} \pm 0.9 \text{ (syst.)}] \times 10^{-4},$$

$$\Delta A_{CP}^{\mu\text{-tagged}} = [-9 \pm 8 \text{ (stat.)} \pm 5 \text{ (syst.)}] \times 10^{-4}.$$

- 過去のデータとも合わせて

$$\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}, \quad (\text{significance: } 5.3\sigma)$$

- decay time の情報とdecay width $A_\Gamma = (-2.8 \pm 2.8) \times 10^{-4}$ を用いて

$$\Delta a_{CP}^{\text{dir}} = (-15.7 \pm 2.9) \times 10^{-4}$$

まとめ

- 中性 D 中間子におけるCPの破れの測定
- 2つの崩壊モード $D^0 \rightarrow K^-K^+$ と $D^0 \rightarrow \pi^-\pi^+$ でのCP破れの程度の差 ΔA_{CP} を測定
- π -tag 事象 ($pp \rightarrow D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+$)
 μ -tag 事象 ($pp \rightarrow \bar{B} \rightarrow D^0\mu^-\nu X$) の2種類のイベントを解析
- 測定結果 :

$$\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4},$$

(significance: 5.3σ)

references

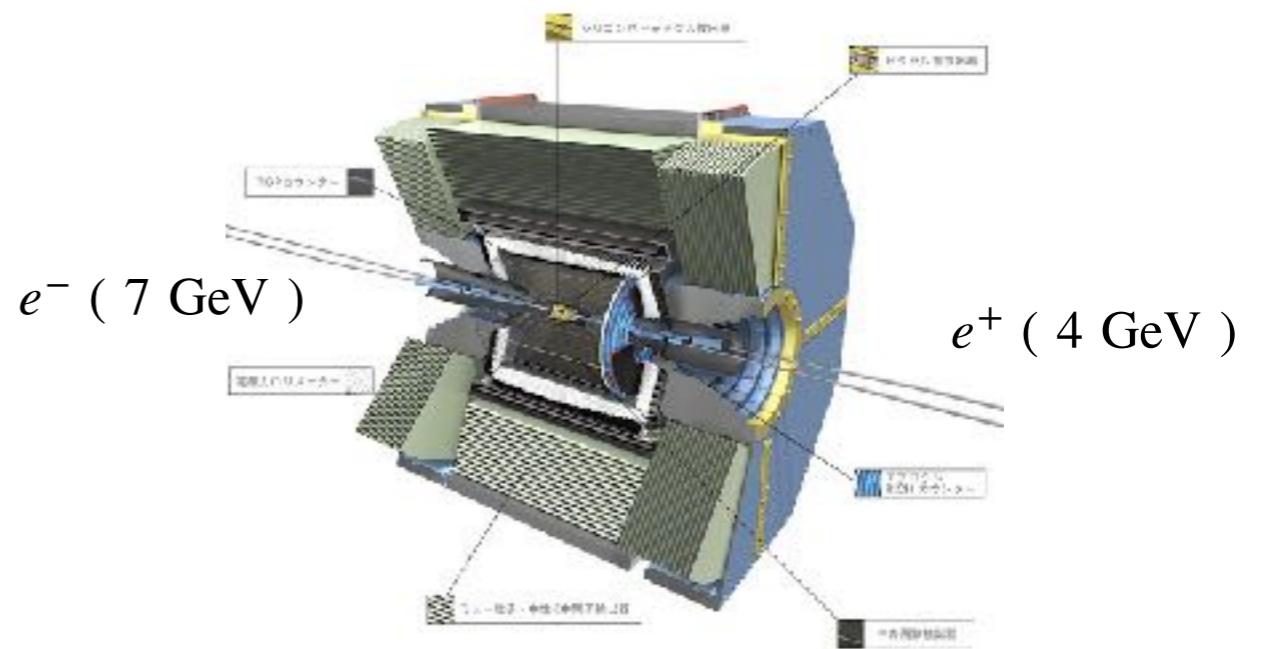
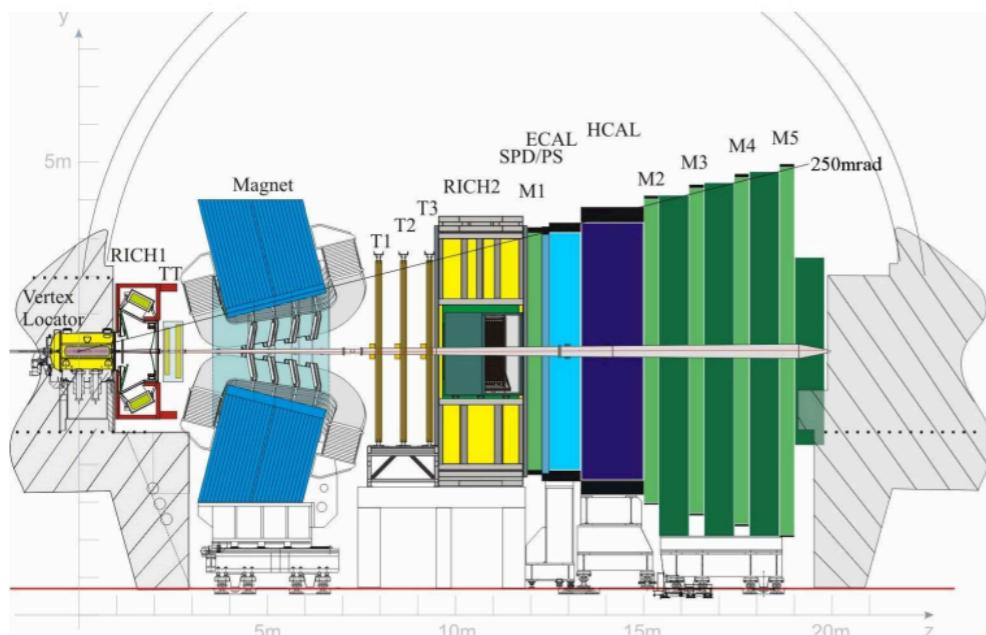
- [http://azusa.shinshu-u.ac.jp/~coterra/enjoyphys/CPV/
revCP4207.pdf](http://azusa.shinshu-u.ac.jp/~coterra/enjoyphys/CPV/revCP4207.pdf)
- [https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/3/08/
S08005/pdf](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/3/08/S08005/pdf)
- <https://arxiv.org/pdf/1503.00032.pdf>
- <https://cds.cern.ch/record/2255089/files/LHCb-TALK-2017-032.pdf>
- [https://dev.classmethod.jp/machine-learning/
2017ad_20171211_dt-2/](https://dev.classmethod.jp/machine-learning/2017ad_20171211_dt-2/)
- https://qiita.com/woody_egg/items/232e982094cd3c80b3ee
- <https://arxiv.org/pdf/1111.5023.pdf>
- <http://pdg.lbl.gov/2012/tables/rpp2012-tab-mesons-bottom.pdf>
- <http://pdg.lbl.gov/2016/tables/rpp2016-tab-mesons-charm.pdf>

宿題

- LHCb detector の形
- muon system
- e/γ identification
- D^* 質量再構成について
- charm の indirect CP violation
- (combinatorial background)

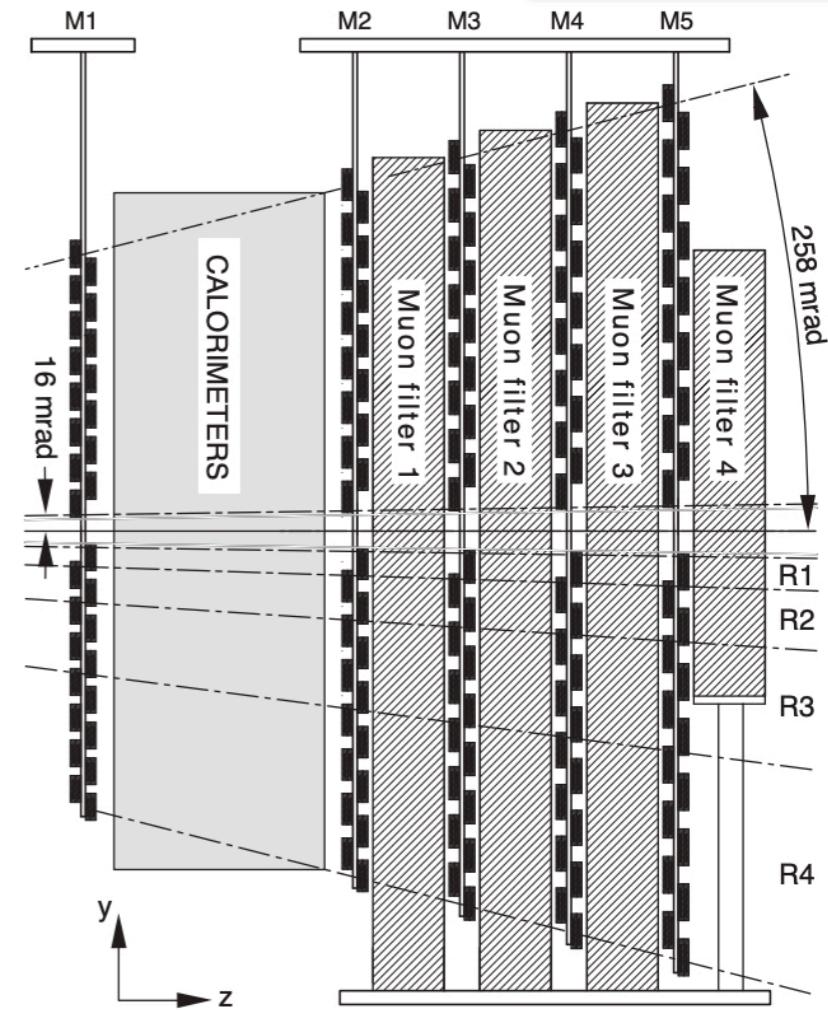
LHCb detector の形

- pp 衝突によって（グルーオンを介して） $b\bar{b}$ 対が生成し、これらを含むハドロンは同じ方向（前方か後方）に飛ぶ。
- 全ての生成粒子を再構成する必要はなく、効率よく $b(\bar{b})$ ハドロンを再構成する観点から、interaction point を覆う形の検出器ではない。
- Belle などでは e^+e^- 衝突から $\Upsilon(4S)$ ($b\bar{b}$)を生成。電子対の重心系で見ると Υ は静止（実際は非対称エネルギーによってboost されている）、back-to-back に b ハドロンと \bar{b} ハドロンが飛ぶ。
- e^+e^- 衝突エネルギー (~11GeV) は Υ の質量に合うよう調整されているので、boost されているとはいえ生成した粒子はそれほど光速に近くないが、 pp 衝突エネルギーは13TeVと高く、ほぼ光速で粒子が飛ぶ、という違いがある。



muon system

- 5枚のmuon station
- M2~M5 (カロリメータ後方) には Muon filter (厚さ80cm 鉄の吸収体)が挟まれている。
- 全てのstation のコインシデンスをとる。フィルタ (とカロリメータ)を全て通過した μ のみにトリガがかかる (およそ 6 GeV/c 以上の運動量の μ)。
- 各station は中心から4つ (R1~R4) に分けられていて、各領域は同程度のアクセプタンスをもつよう、張られているワイヤの数が異なる。



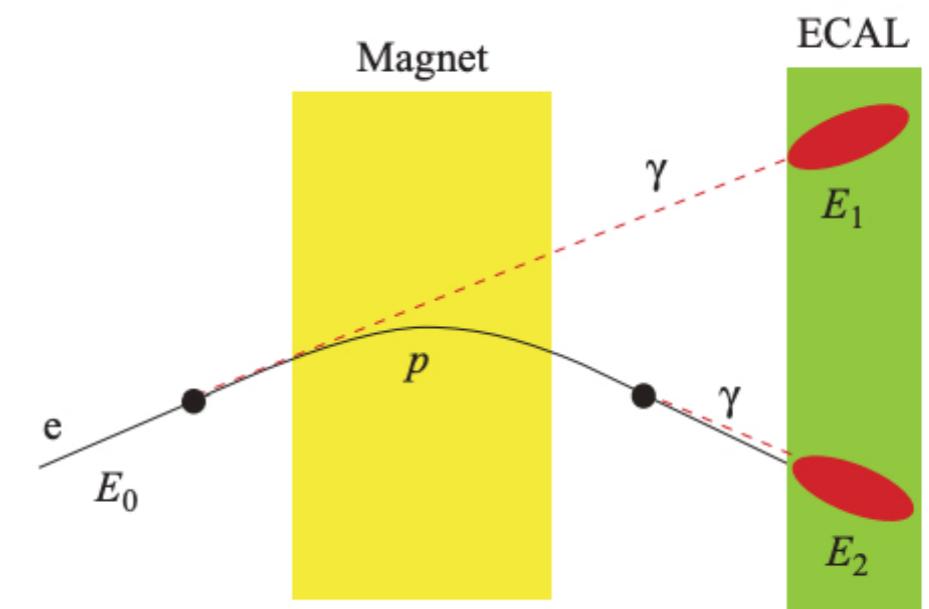
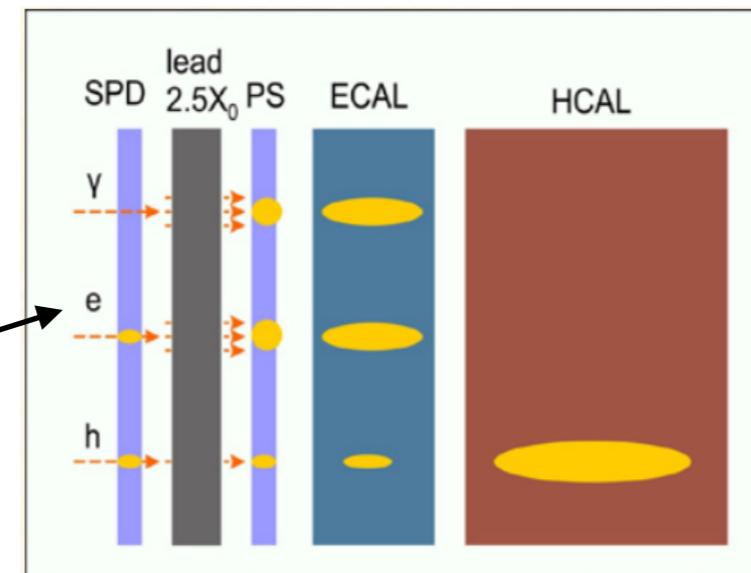
トリガアルゴリズム

1. M3 上のヒット位置を探す
2. M2、M4、M5 上で、M3上のヒット位置によってアタリをつけた領域(field of interest, FOI)についてヒットを探す
3. M2、M3 上のヒット位置をM1 まで外挿、その領域 (FOI) でM1 上でのヒットを探す

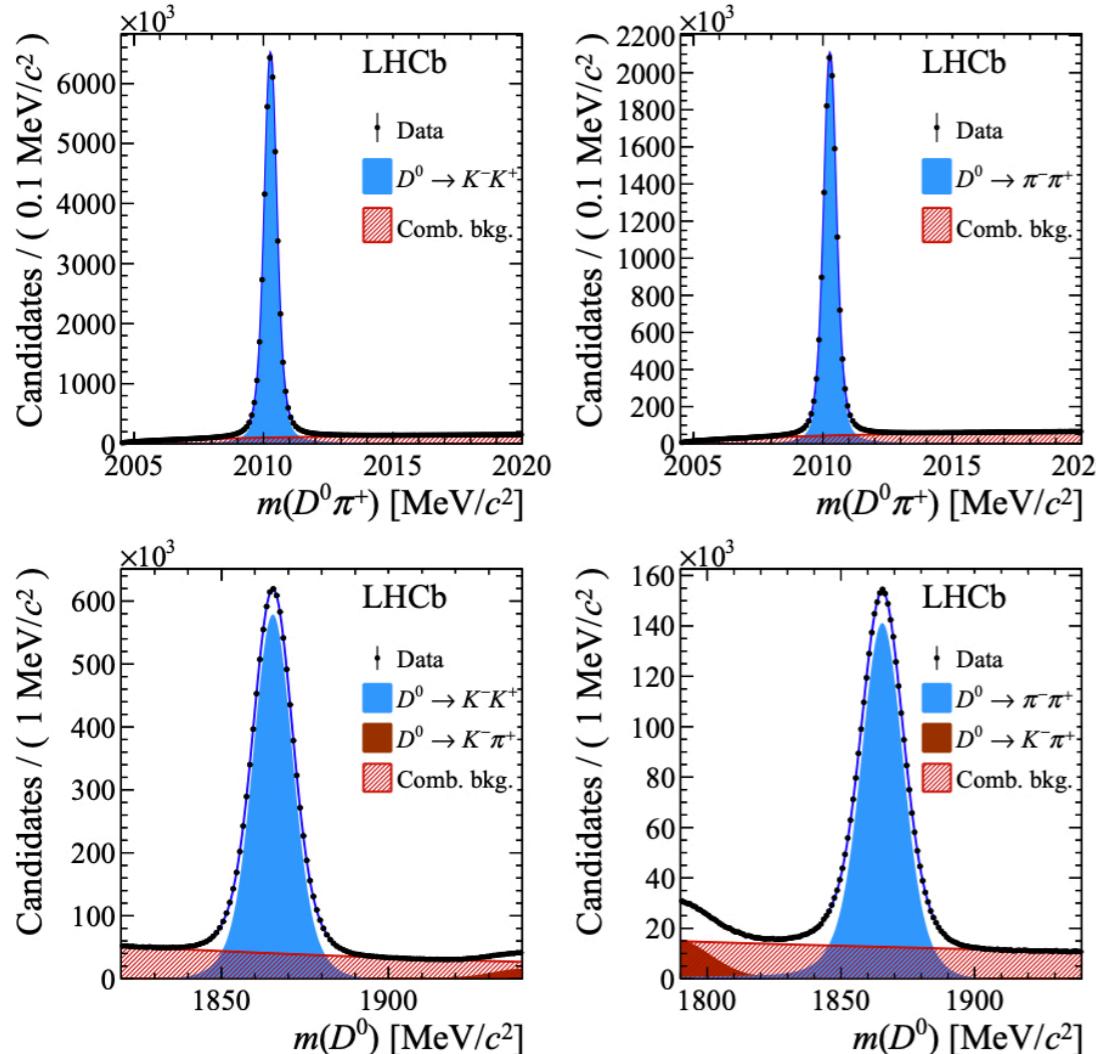
e/γ identification

- electron
 - tracker で得た運動量と ECAL で得たエネルギーを用いる。
 - 電子の制動放射
 - Magnet の後方で制動放射を起こした場合は、光子による elemag クラスタは電子によるものと同じところに生じる (E_2)。
 - Magnet より前方で制動放射を起こした場合は、Magnet 以前のトラックの延長線上にクラスタ (E_1) ができる、その分のエネルギーも考慮する必要がある。
 - 観測される運動量は $p = E_2$ だが、実際の電子のエネルギーは $E_0 = E_1 + E_2$
- photon
 - ECAL 上にクラスタがあり、その延長線上付近のトラックと十分離れていることを要求
 - Magnet の後方で電子対生成を起こした場合、ECAL の最前のカロリメータ SPD でのヒットの有無で判断する

photon 由来の
電子を含む



D^* の質量再構成について

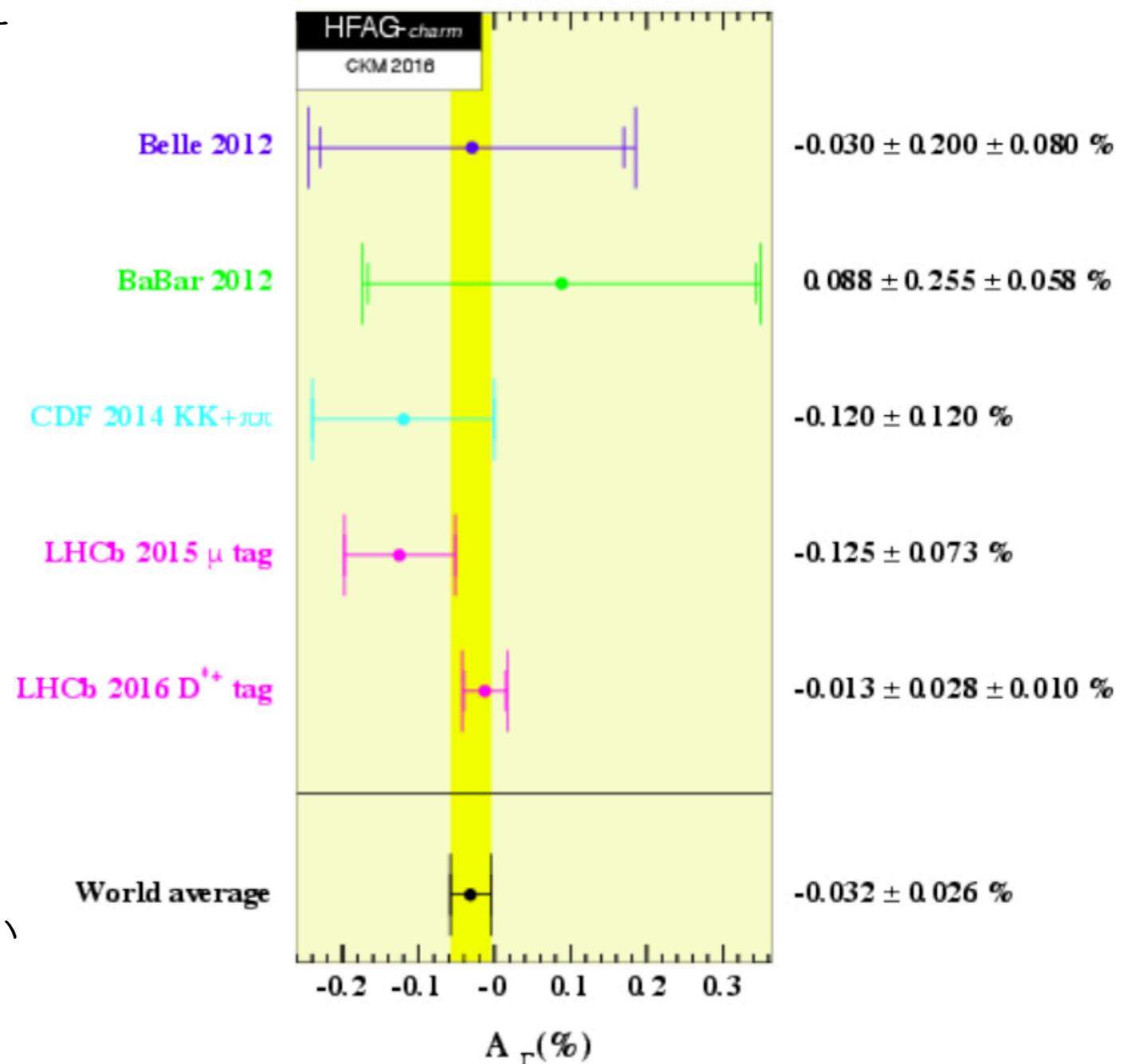


- D^* の崩壊から生じるtagging π の運動量、 D^0 からの2つの粒子 $\pi^+\pi^-$ or K^+K^- の運動量の和によって D^* の運動量 \mathbf{P}_{D^*} とし、エネルギー E_{D^*} については、 D^0 のエネルギーの計算の際に、質量の値 1864 MeV を用いている。崩壊で生じた2つの粒子から不变質量を構成したときに $(1864 \pm 24) \text{ MeV}$ の範囲内となるサンプルを用いる。

<https://arxiv.org/pdf/1111.5023.pdf>

charm の indirect CP violation

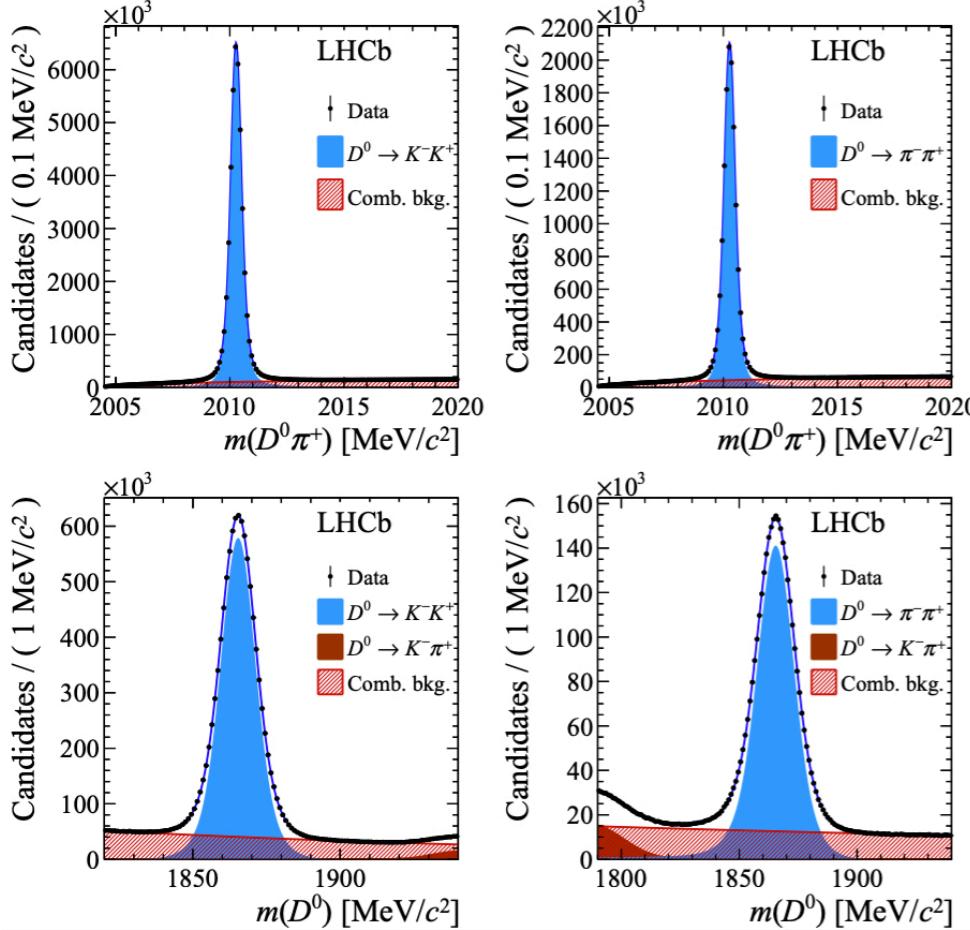
- indirect CP violation については、すでに観測したという論文が出ているのでは？というご指摘がありましたが、見つかりませんでした。(本論文内でも、過去の実験は全て zero consistent と書いてあり、2017年の記事 <https://arxiv.org/pdf/1709.00383.pdf> の段階ではindirect CP violationについての過去の結果がまとめられていました(右図))



なお、予想されるcharm でのCP violation の程度については全体で $10^{-4} - 10^{-3}$ であるが、低エネルギーでの強い相互作用が複雑であることから細かい計算は難しい、と記述がありました。

back up(宿題)

Combinatorial background



- combinatorial background:

任意のトラックの組み合わせのうち、条件を全てクリアしたもの、ということですが、 $m(D^0\pi^+)$ の分布、なぜ値の大きいところのほうが量が多いかという問題について、 π より質量の小さい粒子 (μ や e) を誤って π だと思ってしまう場合には大きい方に値が出て、質量の大きな粒子 (K など) を π だと誤認した場合には小さい値が出る気がしますが、なぜ指数関数で表現できるかは理解できませんでした。

π のエネルギーをカロリメータでの値でなく、運動量と PID からの質量で求めているなら、

$$E = \sqrt{m_\pi^2 + \mathbf{p}^2} > \sqrt{m_\mu^2 + \mathbf{p}^2} = E'$$

実際の値が E' であるにも関わらず、 E と計算されてしまう場合には、エネルギー (~再構成した D^* の質量) は実際より大きく出る？

<https://arxiv.org/pdf/1111.5023.pdf>

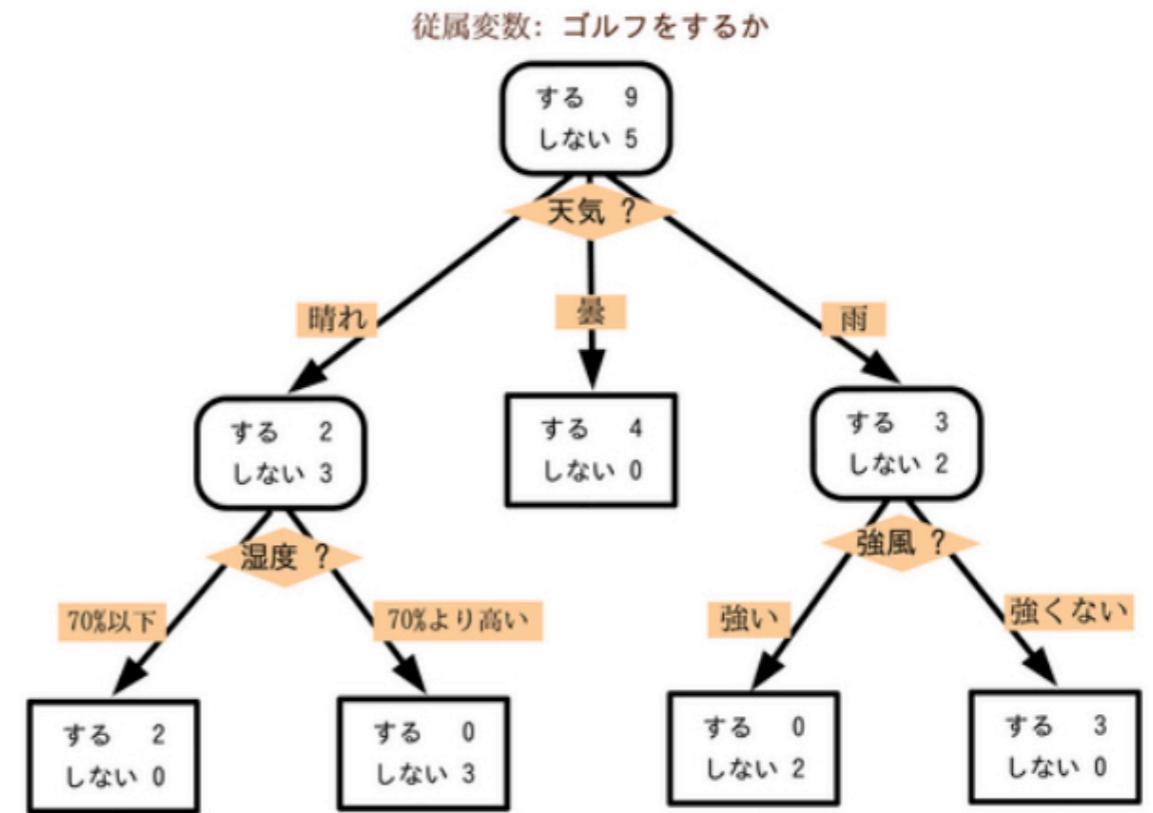
back up

boosted decision tree

- 決定木 (decision tree):

データを複数のパラメータによって分類・回帰するためのグラフ

 - 解釈が容易、様々なパラメータを利用可能
 - 葉が多くなりすぎて、初めのデータに過剰適合してしまいがち
→葉の剪定、別のアルゴリズムを併用する等工夫が必要



- 勾配 boosting (以下は : 勾配降下法)
 - データ y^i とモデル $f_0(x^i)$ に対し誤差関数 $L(y^i, f_0(x^i))$ の最小化を考える。
 - モデルからの(擬似)残差 $\nabla L = \frac{\partial L(y^i, f_0(x^i))}{\partial f_0(x^i)}$ を計算、徐々にモデルを改良していく :
$$f_m(x^i) = f_{m-1}(x^i) - \eta \nabla L(y^i, f) \Big|_{f=f_{m-1}(x^i)} \quad \eta \text{ はステップ倍率 (学習率)}$$
- 決定木を用いた勾配ブースティング : 最初の分類に対して、各データの残差を計算し、その残差を別のパラメータで分類していく学習法

ΔA_{CP} に対する sys errors

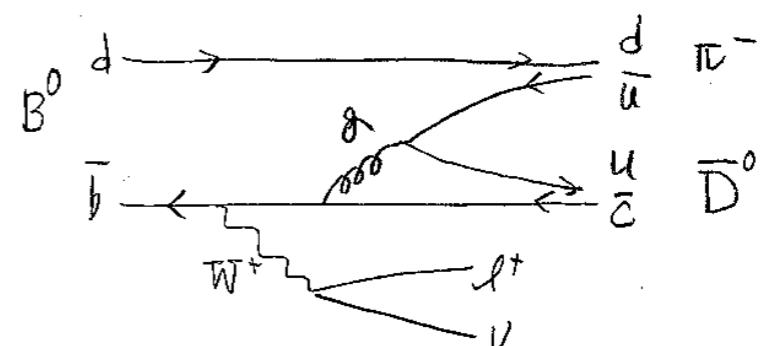
⑥ $(\mu\text{-tag})B$ と \bar{B} の割合の違い

- K^-K^+ モードと $\pi^-\pi^+$ モードで、再構成できた \bar{B} decay の割合がわずかに異なる
- LHCb での b の生成 asymmetry 測定結果を用いる

⑦ $(\mu\text{-tag})B$ の再構成効率の違い、 $B^0 - \bar{B}^0$ 振動由来のエラー

- K^-K^+ モード、 $\pi^-\pi^+$ モードそれぞれの decay time に依存

Source	$\pi\text{-tagged}$	$\mu\text{-tagged}$	$\times 10^{-4}$
Fit model	0.6	2	
Mistag	—	4	
Weighting	0.2	1	
Secondary decays	0.3	—	
Peaking background	0.5	—	
B fractions	—	1	
B reco. efficiency	—	2	
Total	0.9	5	



$$\begin{aligned}\pi\text{-tag} : D^{*+} &\rightarrow D^0\pi^+ \\ D^{*-} &\rightarrow \bar{D}^0\pi^-\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu\text{-tag} : B^+ &\rightarrow \bar{D}^0\mu^+\nu X \\ B^- &\rightarrow D^0\mu^-\nu X\end{aligned}$$

raw asymmetries

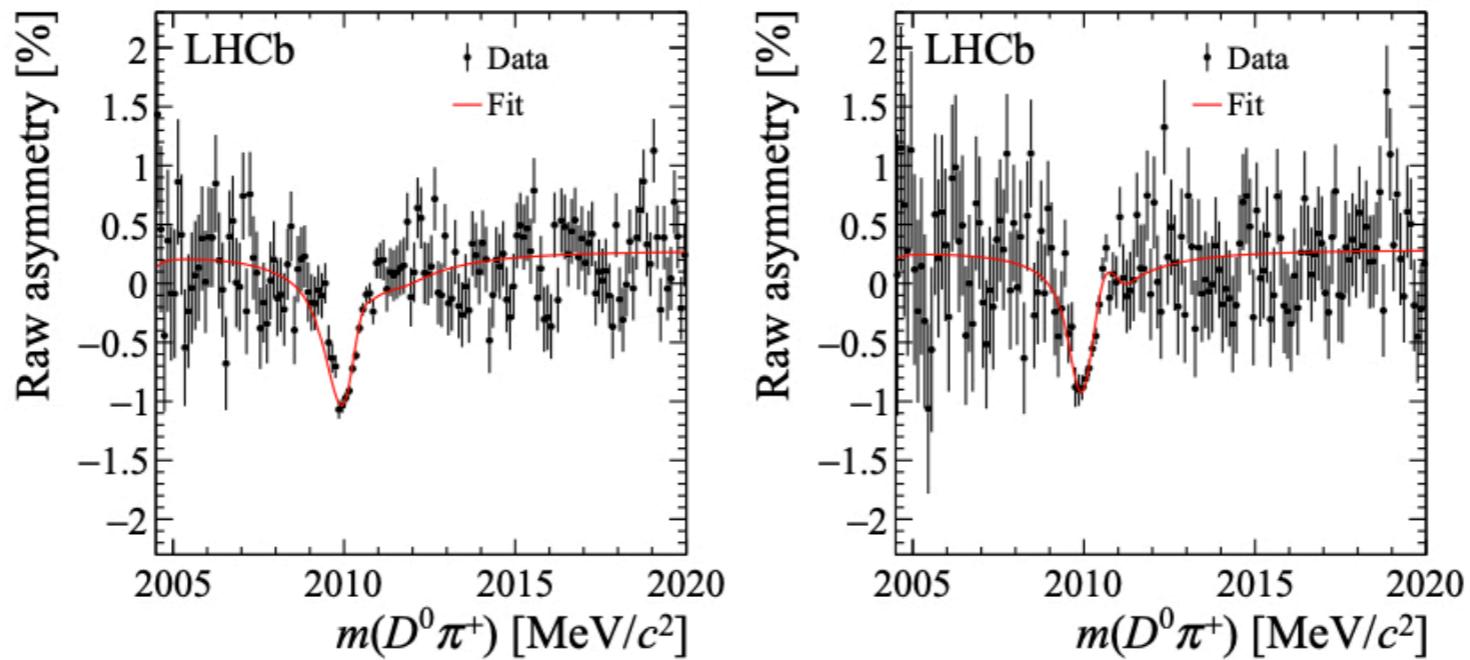


Figure 5: Raw asymmetries in the π -tagged sample for (left) $D^0 \rightarrow K^- K^+$ and (right) $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ candidates as a function of $m(D^0\pi^+)$.

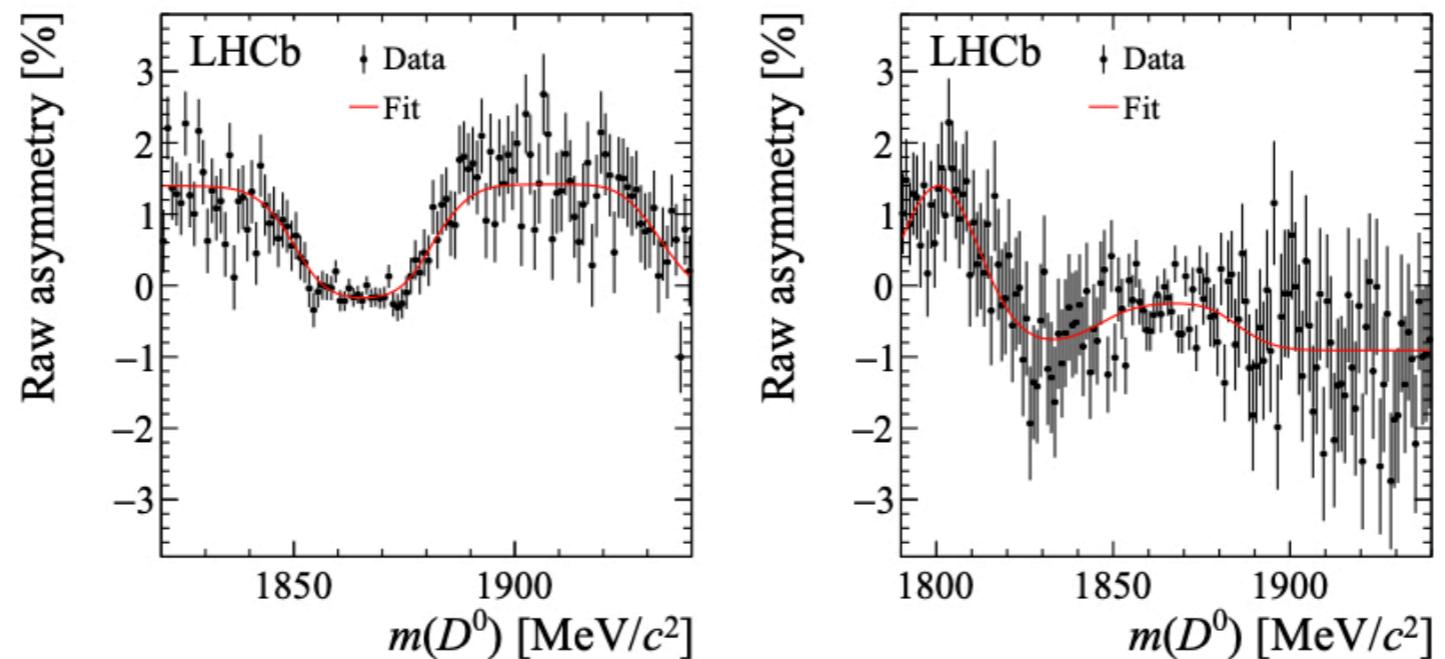


Figure 6: Raw asymmetries in the μ -tagged sample for (left) $D^0 \rightarrow K^- K^+$ and (right) $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ candidates as a function of $m(D^0)$.

B 由来の D^0 の割合の見積もり (π -tag)

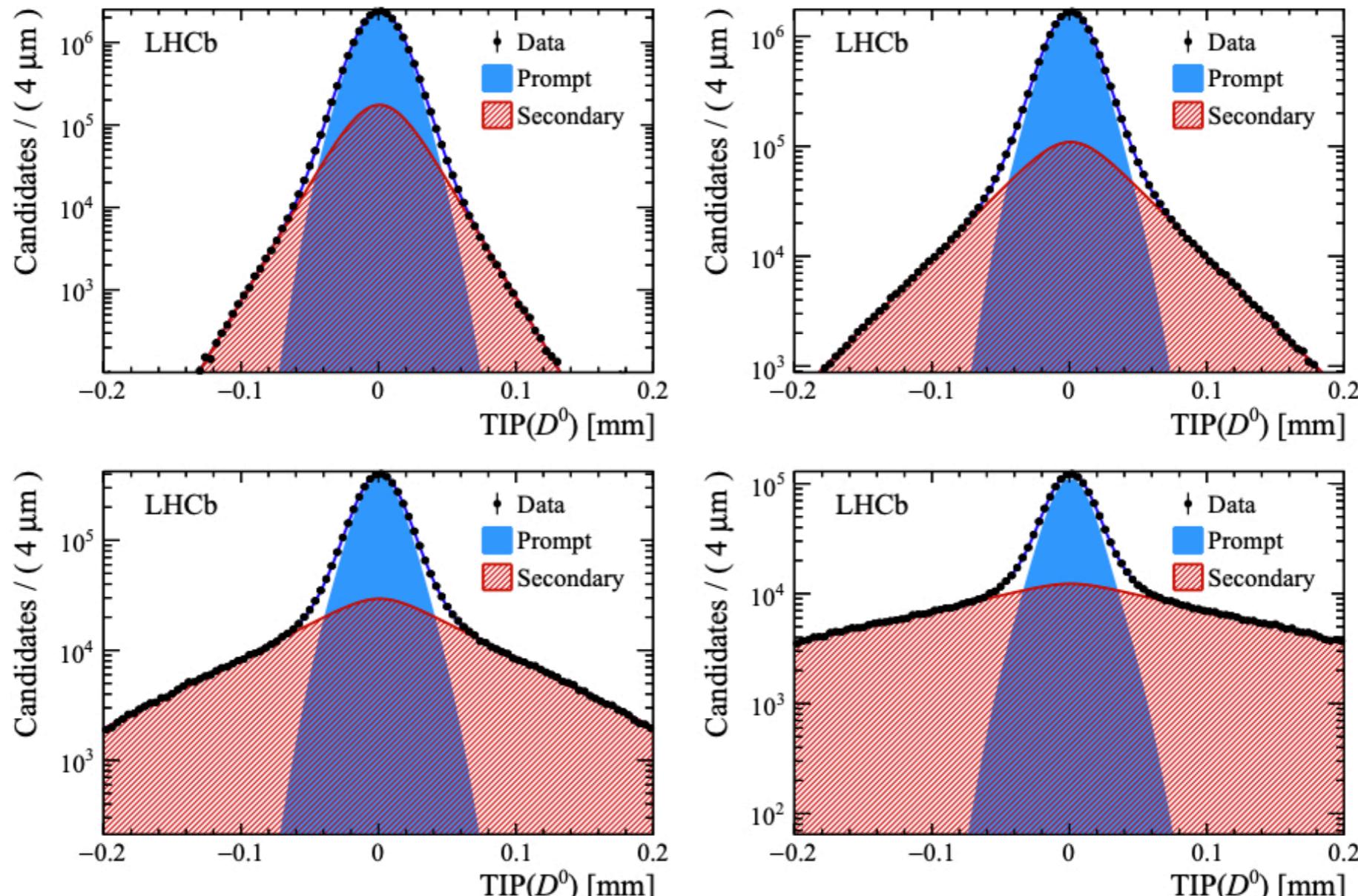


Figure 7: Distributions of the signed D^0 impact parameter in the plane transverse to the beam direction, TIP, in bins of reconstructed D^0 decay time, for the π -tagged $D^0 \rightarrow K^- K^+$ sample: (top left) $\tilde{t} < 1.5$, (top right) $1.5 < \tilde{t} < 3.0$, (bottom left) $3.0 < \tilde{t} < 4.5$ and (bottom right) $\tilde{t} > 4.5$, where $\tilde{t} \equiv t/\tau(D^0)$. The fit results are overlaid and the contributions from prompt and secondary decays are shown, as indicated in the legends. Distributions for the $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$ sample are very similar.

mass distributions

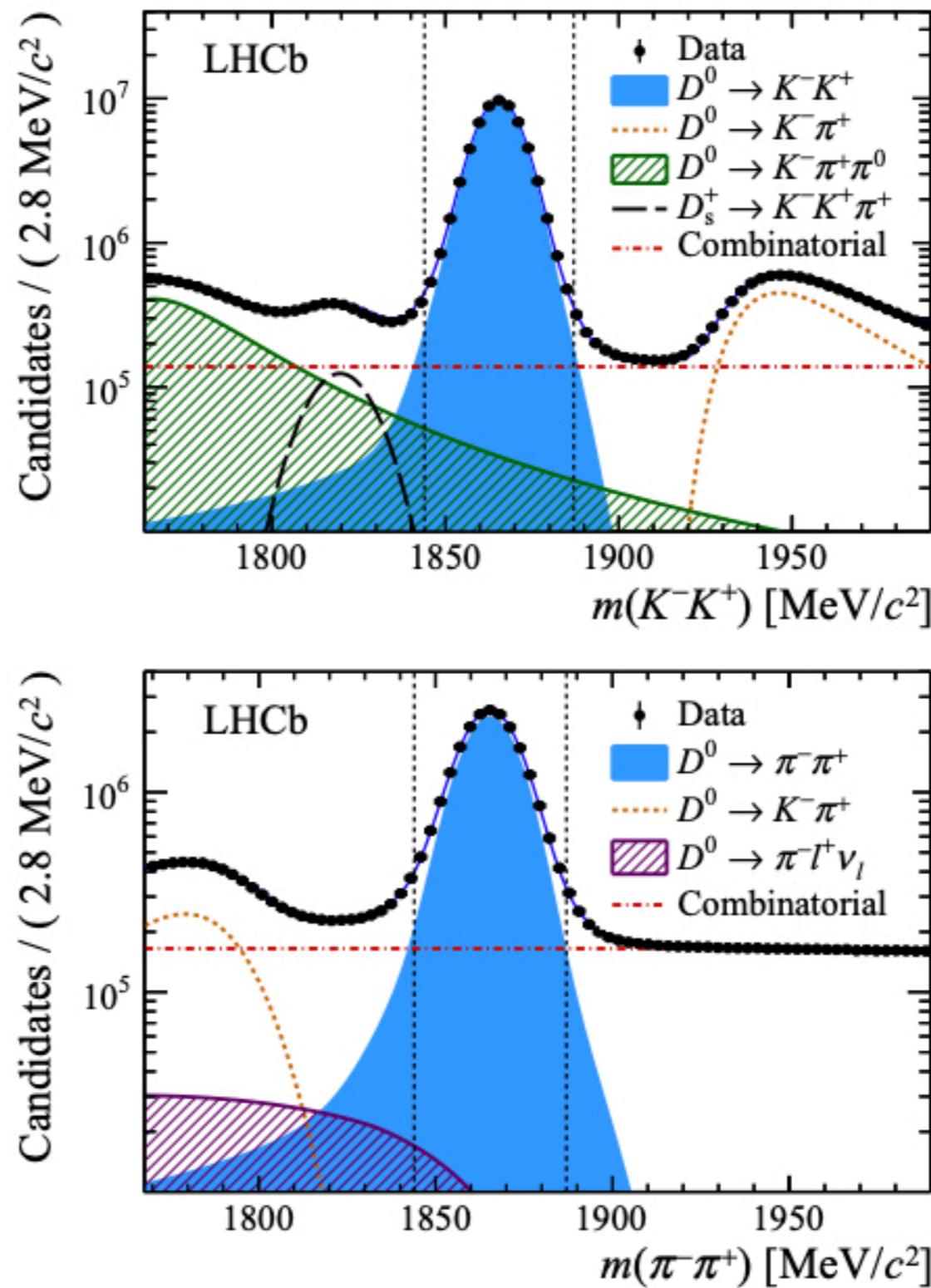


Figure 8: Invariant-mass distributions of (top) $D^0 \rightarrow K^-K^+$ and (bottom) $D^0 \rightarrow \pi^-\pi^+$ candidates in the prompt sample with fit results overlaid. These fits are used to determine the yields and raw asymmetries of (top) $D^0 \rightarrow K^-\pi^+\pi^0$ and (bottom) $D^0 \rightarrow \pi^-l^+\nu_l$ backgrounds, whose mass shapes extend to the D^0 -signal mass region. The various components included in the fit model are indicated in the legends.