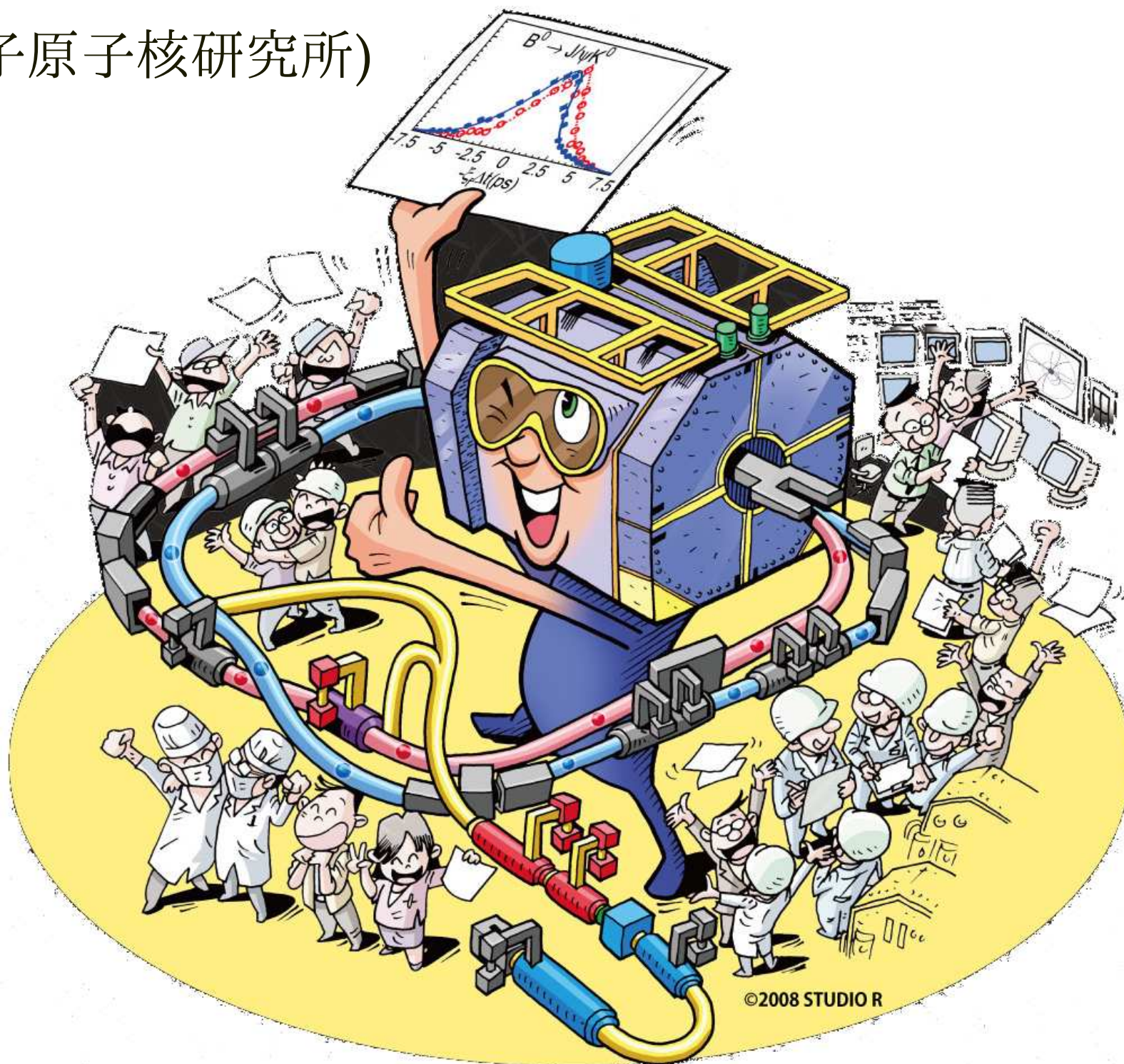


高エネルギー加速器セミナー I — Belle 実験 2

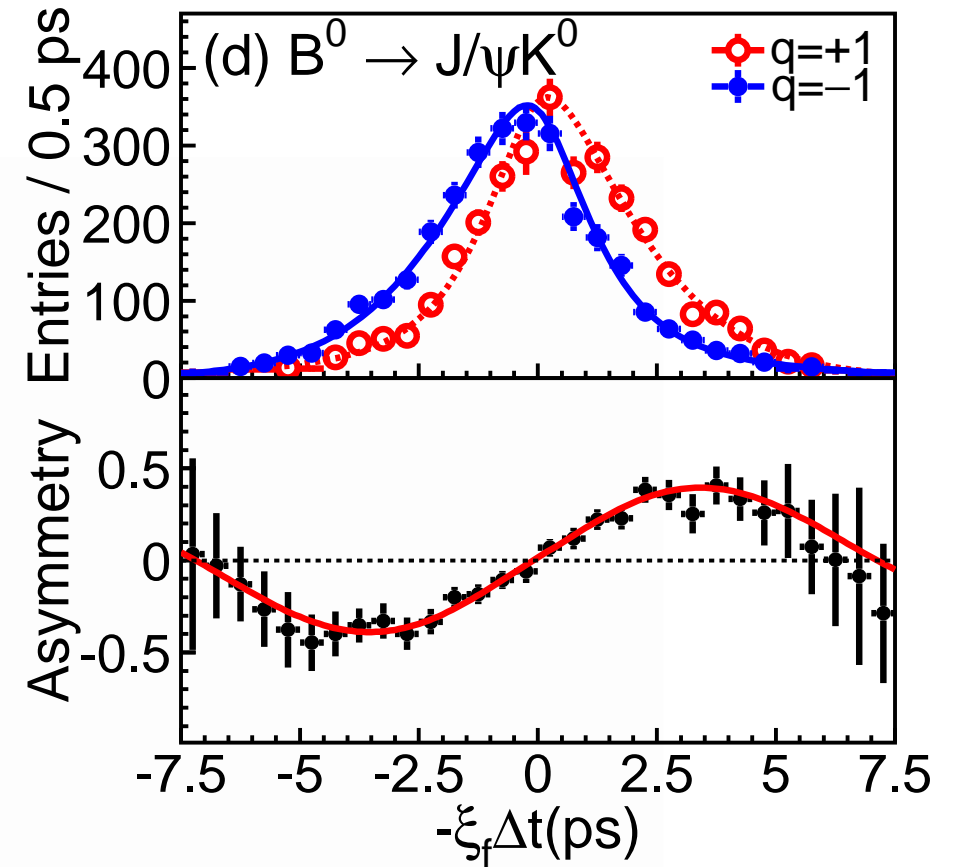
中尾 幹彦 (KEK 素粒子原子核研究所)

2009年6月17日



今回 (第2回) は Belle 測定器の原理と実験結果、Belle の見学

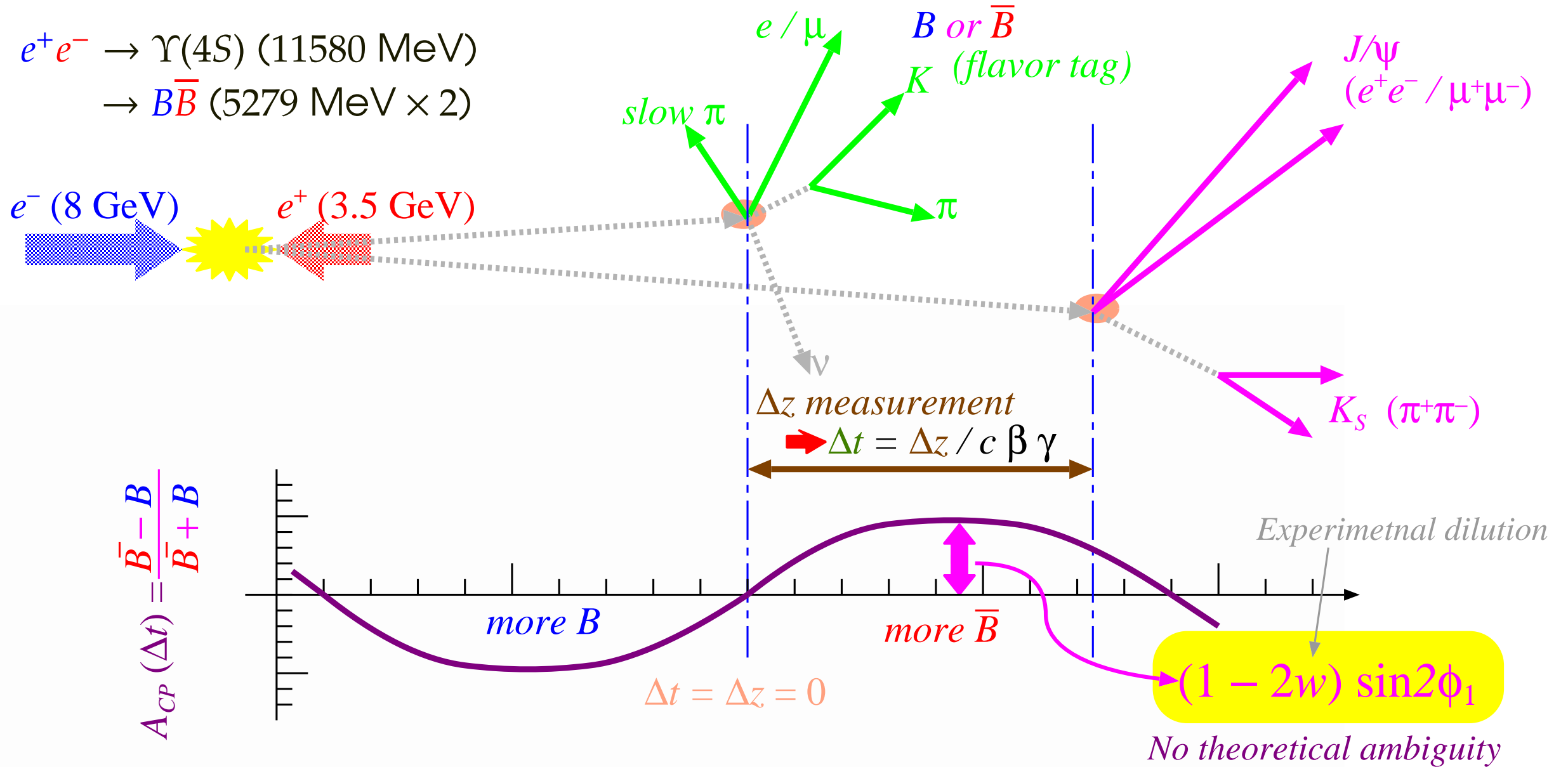
- Belle 実験への要求
- 粒子測定
 - 荷電粒子検出・測定・粒子識別
 - 中性粒子検出・測定
 - 崩壊点測定
- 物理量測定
 - B 中間子崩壊同定
 - B 中間子フレーバー同定
 - 時間分布と CP 非対称性測定



Belle 実験への要求

this is a dummy text to prevent rotating the pdf output.
dummy text to prevent rotating the pdf output. this is a
text to prevent rotating the pdf output.

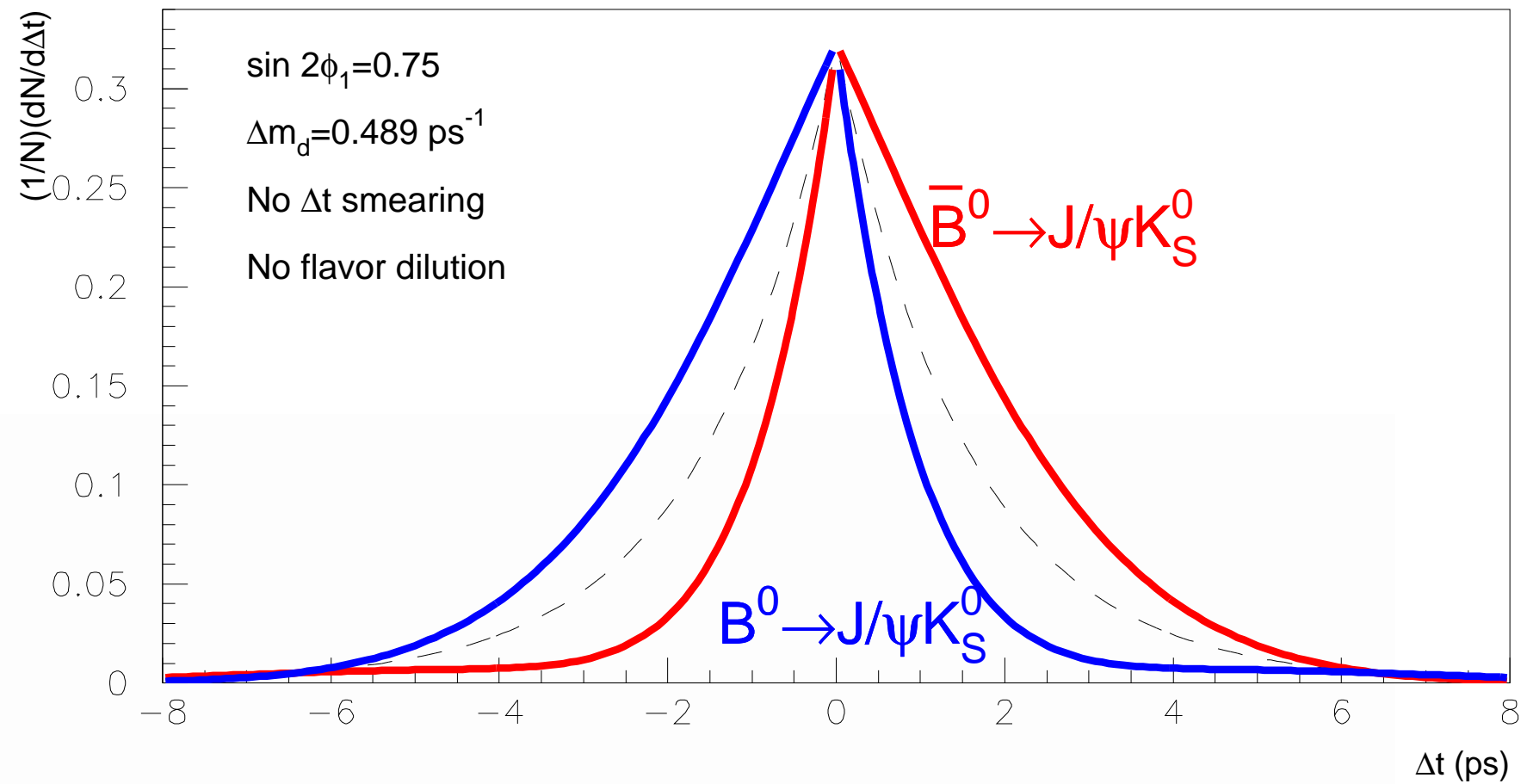
CP 対称性の破れの測定 (前回の最後)



KEKB / Belle requirements

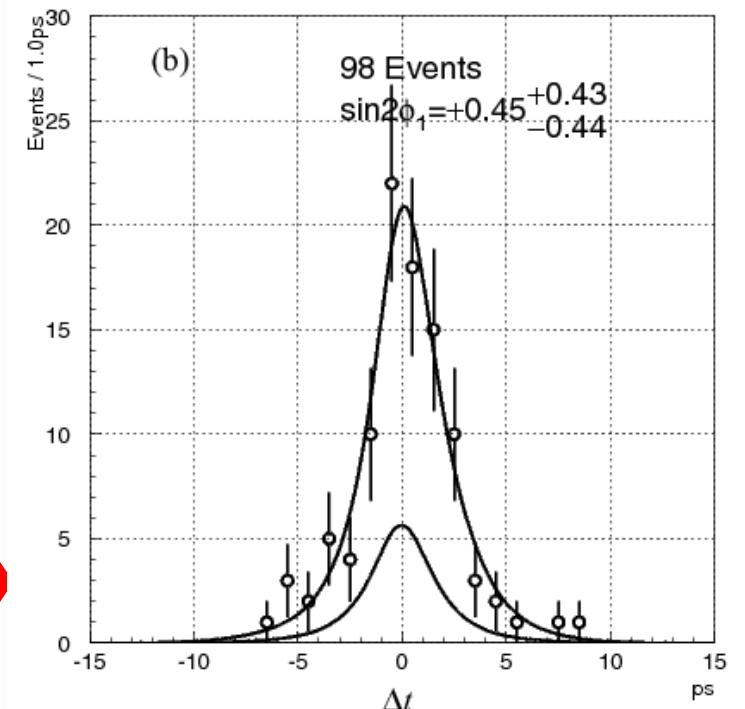
- 非対称エネルギー
- 崩壊点測定
- レプトン識別
- たくさんの B
- 精度良い運動量
- K/π 識別

原理的には
こうなるはず



- $e^{-\Delta t/\tau}$ からずれ: $e^{-\Delta t/\tau} \times \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m \Delta t)$
- Δz の分解能が十分良いことが必要
- 差が有意にわかるだけの統計量が必要

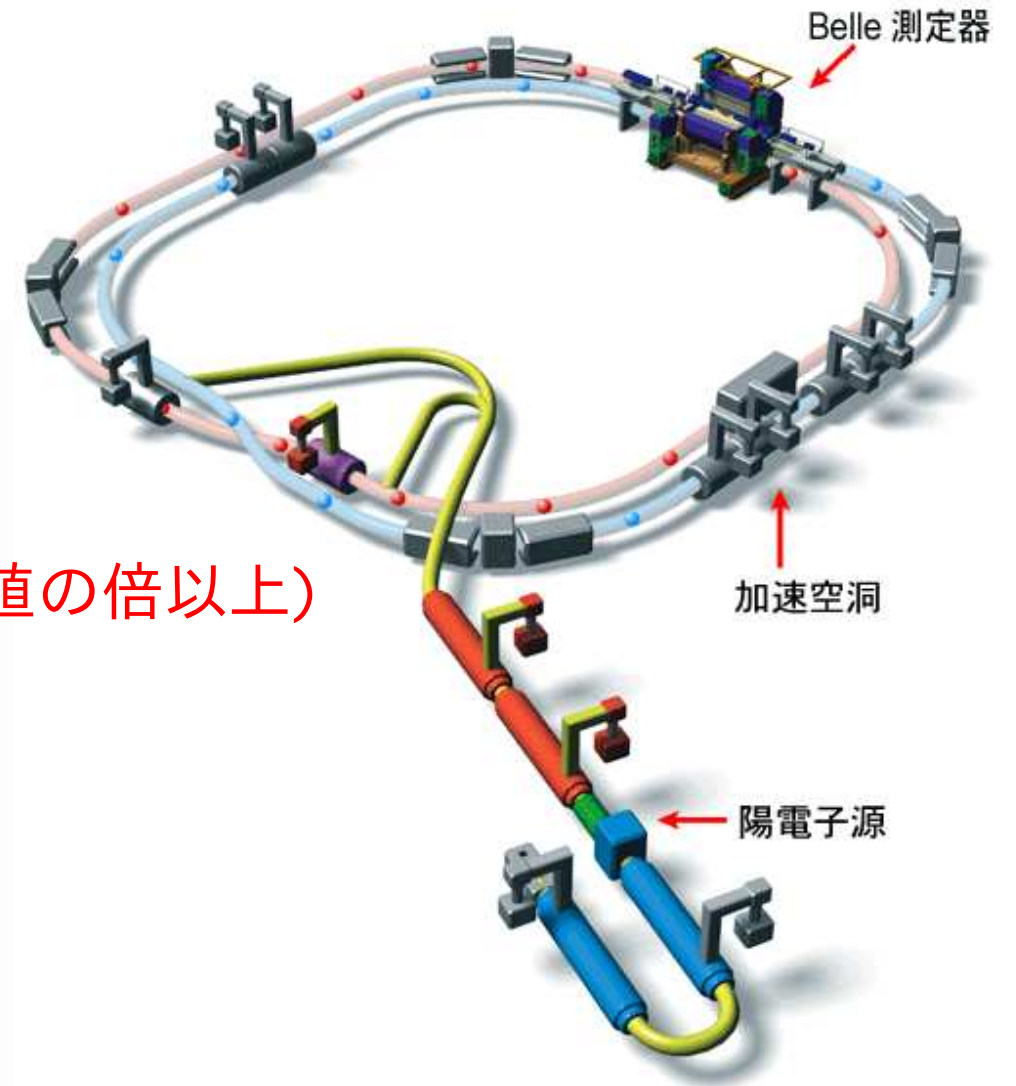
(2000年夏—500万個の B 中間子事象を生成出来たが、
使えるのは 98 事象で、まだとても有意にはわからない)



B 中間子生成

- KEKB 加速器 — 非対称エネルギー
(2-リング必要なので、一般的ではなかった)
- $\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ 生成 ($\sigma \sim 1 \text{ nb}$)
- 高ルミノシティ —
($N_{BB} = \sigma \times \int \mathcal{L} dt$)

6月15日に $2.08 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 達成 (設計値の倍以上)



これまでに約 8 億の
B 中間子事象を生成

B 中間子再構成

- さまざまな短寿命の中間状態を経て中間子 (π^\pm 、 K^\pm 、 K_L^0)、レプトン (e^\pm 、 μ^\pm 、 $\nu_{e,\mu,\tau}$)、核子 (p 、 n)、光子 (γ) に崩壊してゆく
- 崩壊例 1 — CP (電荷・パリティ変換) 固有状態への崩壊
 B^0 または $\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi + K_S^0$ (B^0 と \bar{B}^0 の区別がつかない)
 - \downarrow $K_S^0 (s\bar{d}) \rightarrow \pi^+\pi^-$
 - \downarrow $J/\psi (c\bar{c}) \rightarrow e^+e^-$ または $\mu^+\mu^-$
- 崩壊例 2 — フレーバー固有状態への崩壊
 $B^0 \rightarrow D^{*+}e^-\bar{\nu}_e$ (\bar{B}^0 の場合は $D^{*-}e^+\nu_e$ に崩壊と区別できる)
 - \downarrow $D^{*+} (c\bar{d}) \rightarrow D^0\pi^+$
 - \downarrow $D^0 (c\bar{u}) \rightarrow K^-\pi^+$
- 測定できるのは個々の π^\pm 、 K^\pm 、 e^\pm 、 μ^\pm 、 p 、 \bar{p} 、 γ で、崩壊過程は中間状態を仮定してすべての組合せの中から再構成する必要がある

B 中間子測定効率

- データ収集効率 — 不感時間などのロスを除き 90% 以上
- トリガ効率 — ほぼ 100 %
- 粒子検出効率
 - Belle 検出器は θ で 17~150° をカバー
 - 運動量にもよるが、荷電粒子で 90%、光子で 80%
 - その他に粒子識別効率は 90~95%
- B 中間子同定効率
 - B 中間子は平均 5 個程度の粒子へ崩壊
 - バックグラウンド除去などによる効率ロス
(運動量分解能が良いほど、バックグラウンドとの区別がつく)

結局、数~十数パーセントの B 中間子同定効率になることが多い

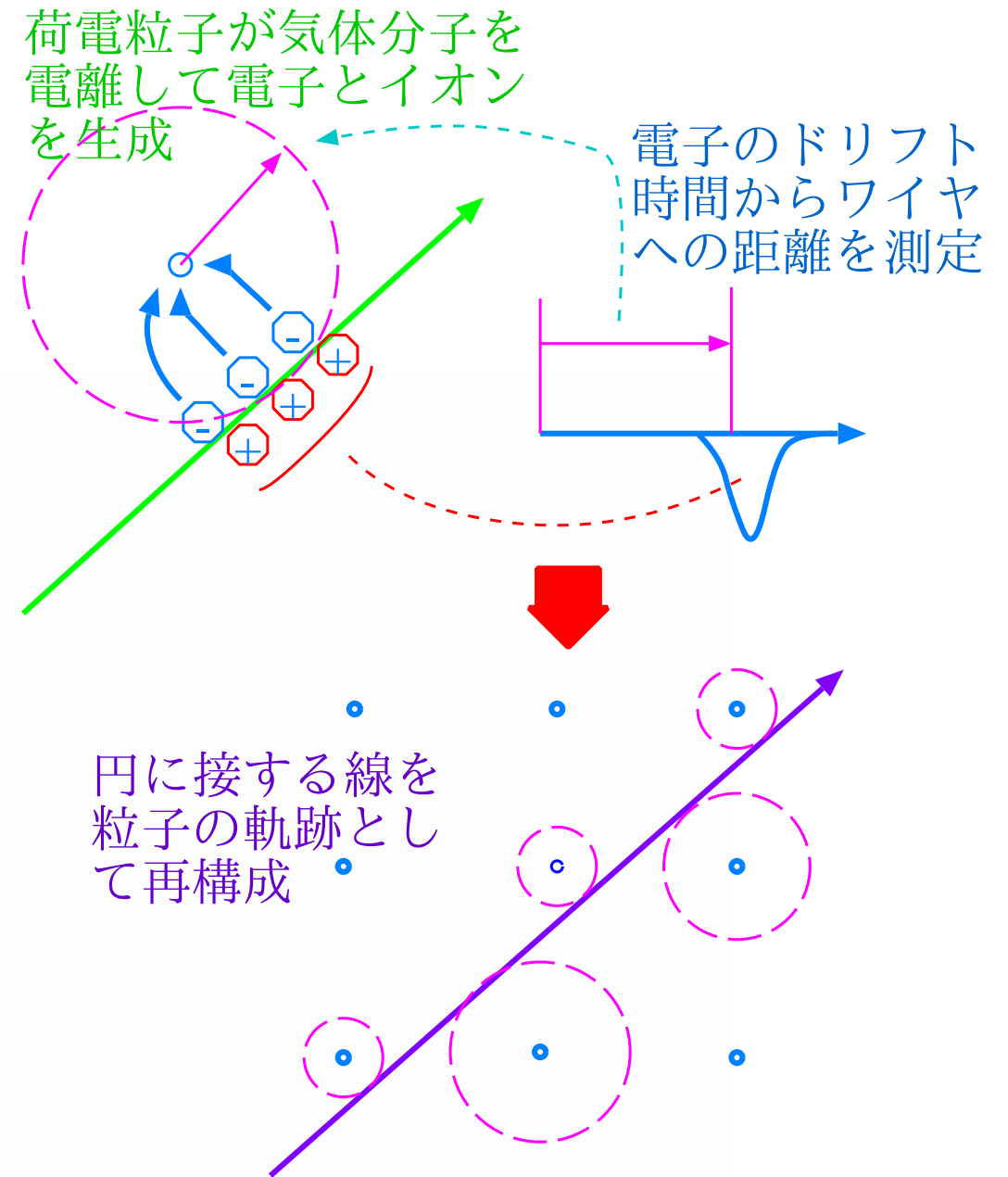
➡ 個々の測定効率や運動量分解能を上げることが重要

粒子測定

this is a dummy text to prevent rotating the pdf output.
dummy text to prevent rotating the pdf output. this is a
text to prevent rotating the pdf output.

荷電粒子検出

- 高速の荷電粒子は気体を電離
ヘリウム 50%・エタン 50%
- ワイヤの電極間に電場を
かけることにより電子を集める
- 電子のドリフト速度は飽和して
ほぼ一定 $\sim 4 \text{ cm}/\mu\text{s}$
 - ➡ ドリフト時間から距離
- 電極付近の電場急勾配 ($\propto \frac{1}{r}$)
ドリフト電子がさらに電離を
起こし、雪崩増幅 ($\sim \times 10^4$)
 - ➡ 十分大きな電気信号
- $30 \mu\text{m}$ 径の金コート
のタングステン線を使用



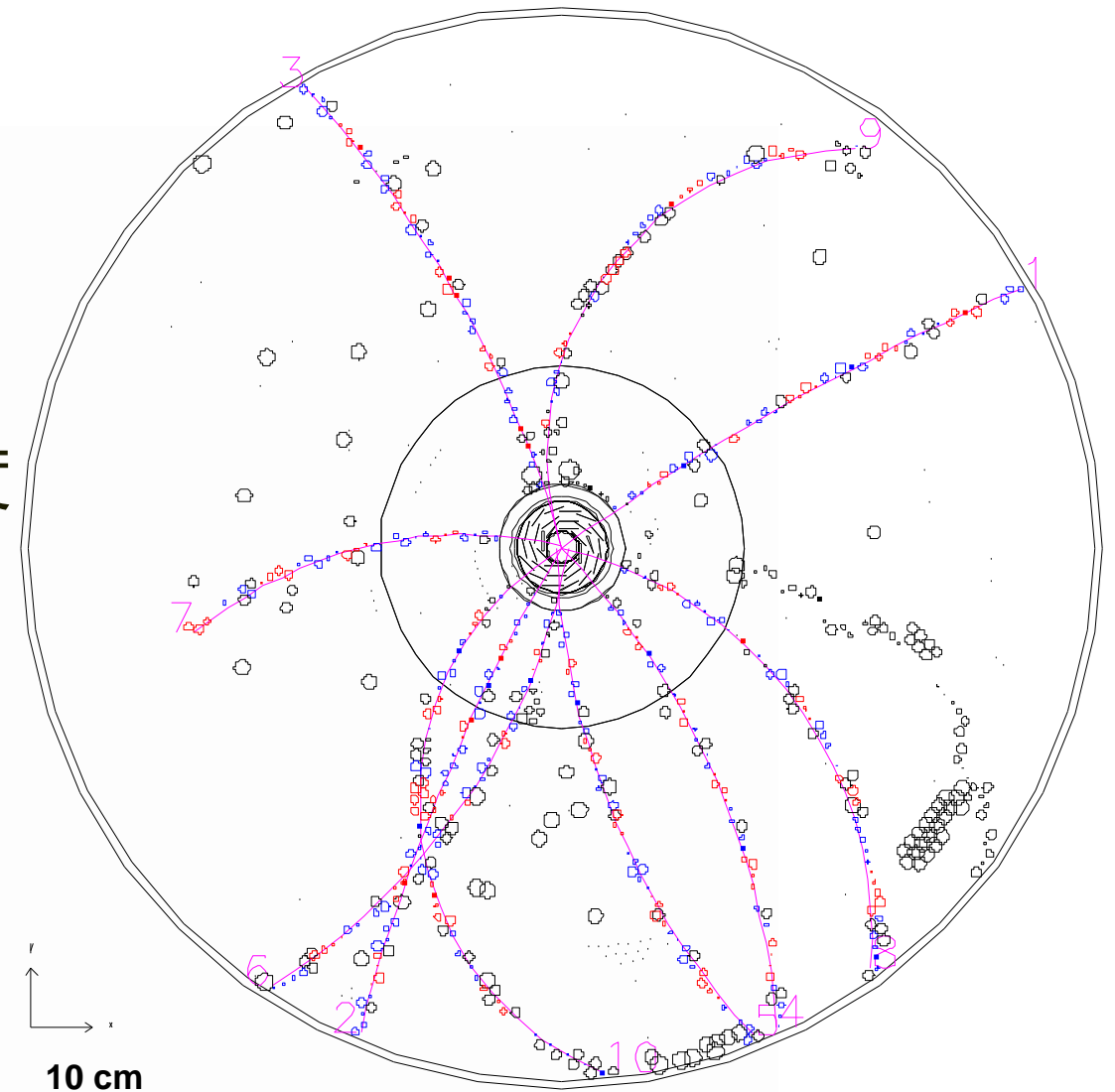
荷電粒子の運動量測定 (CDC)

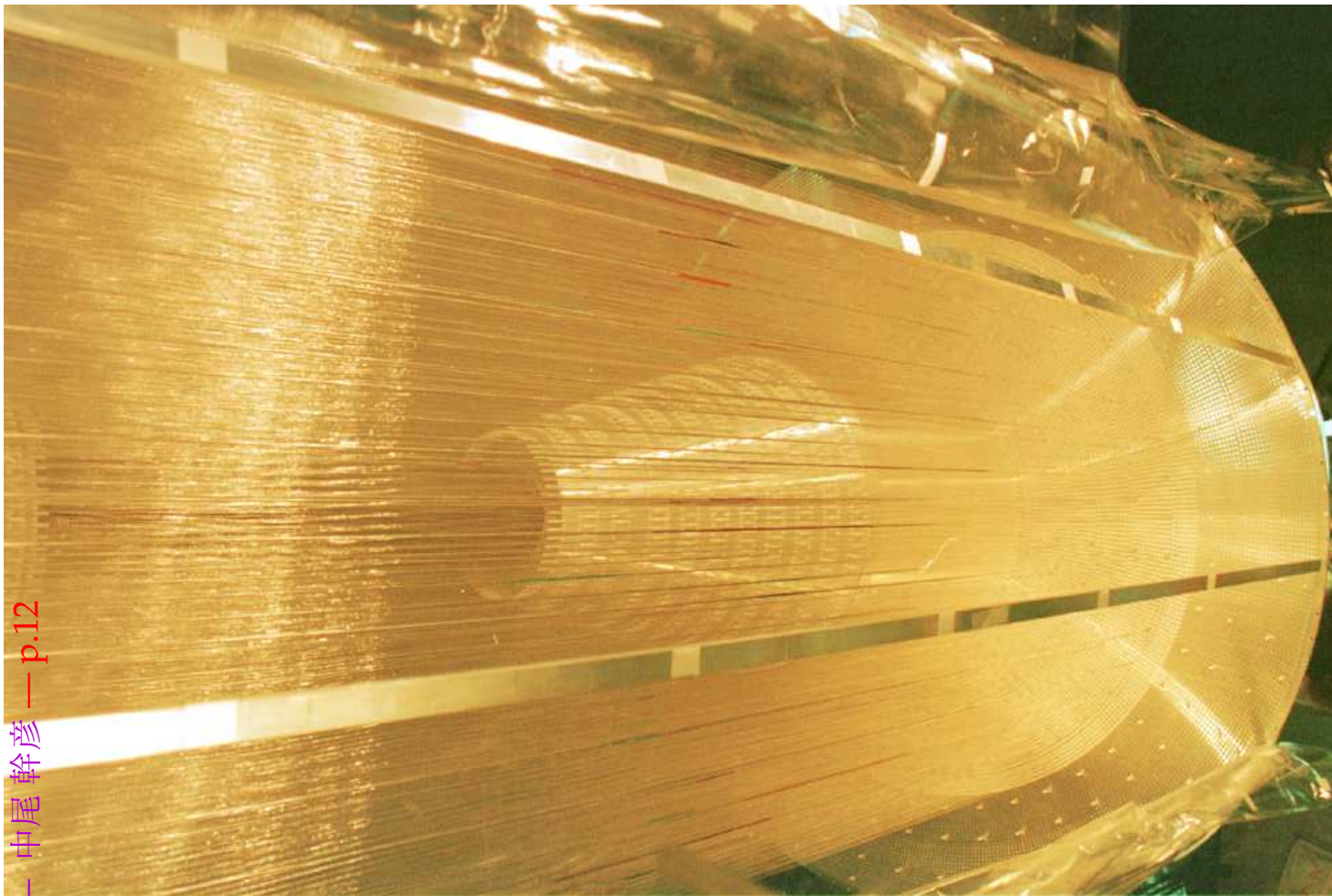
- 検出器は 1.5T の均一磁場中に設置
- 磁場は超伝導ソレノイドで生成
- 均一磁場中の荷電粒子はローレンツ力により円運動を描く

$$R = \frac{p}{eB}$$

- 運動量の磁場と平行な成分は一定
この測定のため半数のワイヤに角度

8400 本の信号ワイヤと
磁場中の曲率半径から
運動量を測定

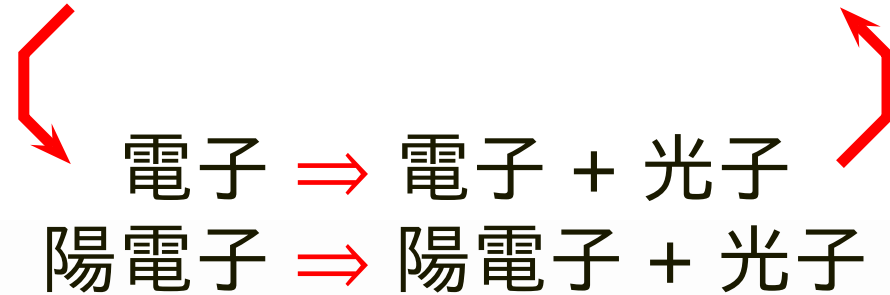




例えば飛跡検出器の
8400本のワイヤの
信号を処理したのち
多数の回路で読み出し
多数の計算機で解析

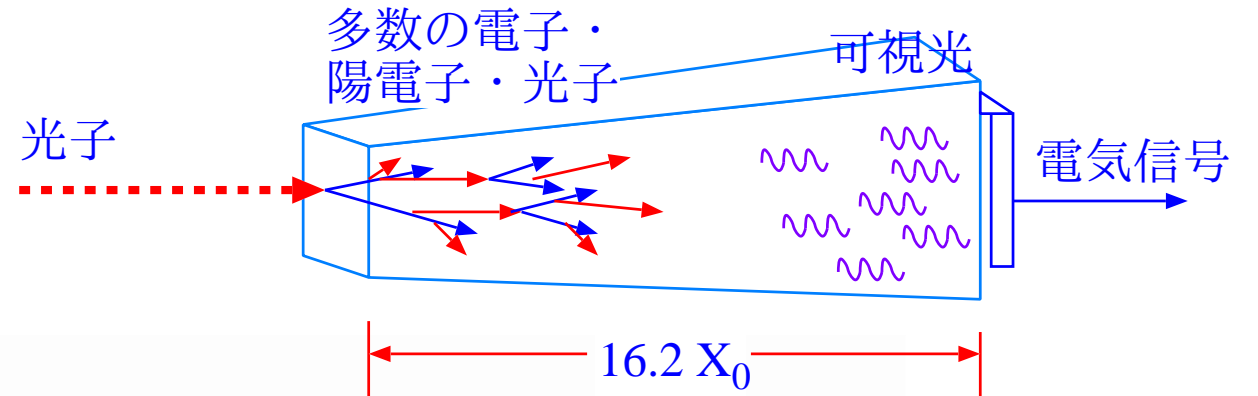
光子測定 (電磁シャワー測定)

光子 \Rightarrow 電子・陽電子対 (対生成)
 エネルギーが半分以下になる、数は倍に



(陽) 電子はエネルギーを失う (制動輻射)

- 平均 $1 X_0$ で 1 回反応
- 最終的に、元のエネルギーに比例した強さの (可視) 光になる
- 光の透過率の高い必要
- 光検出器 (フォトダイオード) で電気信号に
- 方向は、衝突点から来ることを仮定して運動量にする

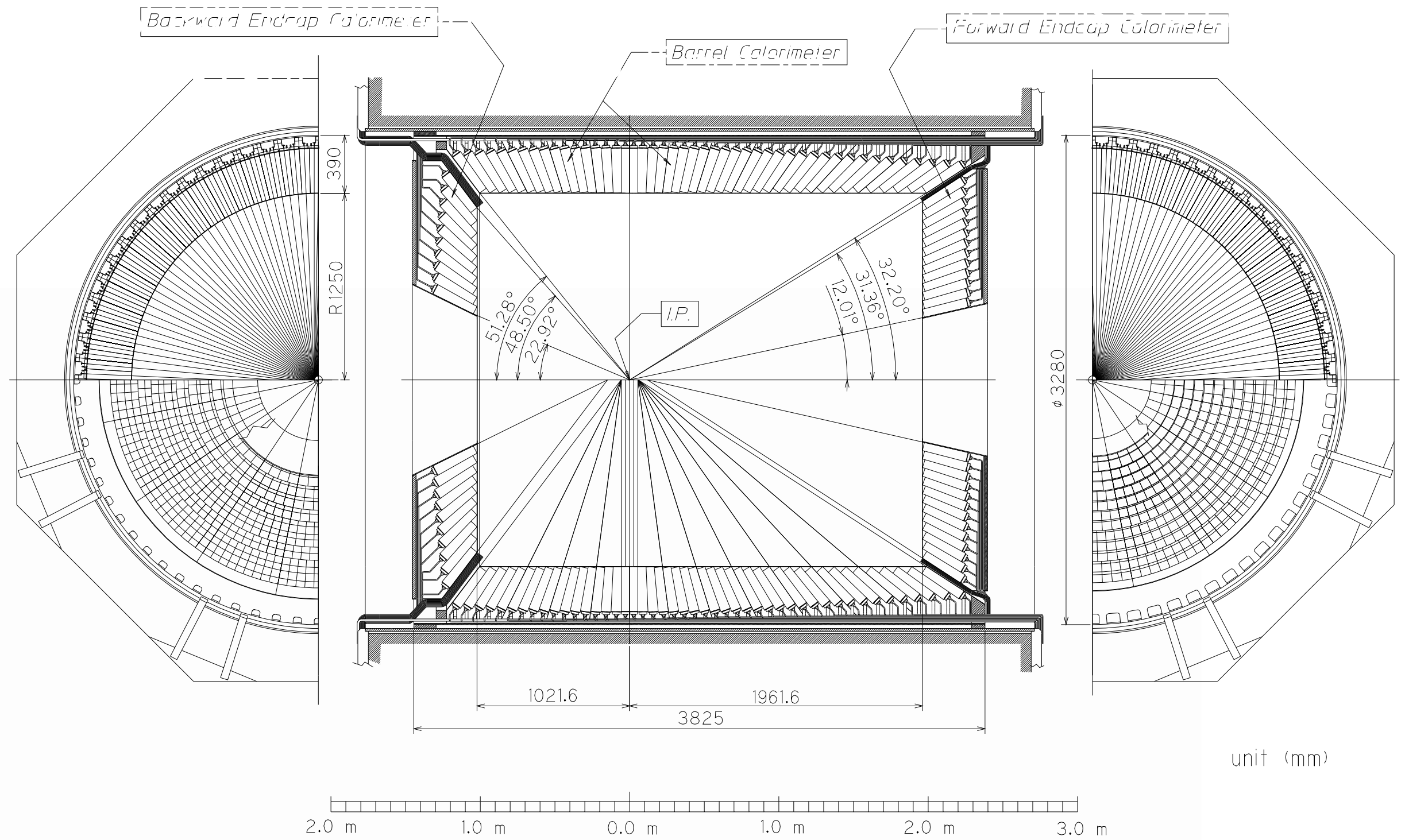


CsI (ヨウ化セシウム結晶)

重い物質ほど小さくて済む
 約 9000 本を使用

1																	18
1 H	2 He																
3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne										
11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar										
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	*2															

BELLE CsI ELECTROMAGNETIC CALORIMETER



粒子識別

- CDC で運動量を測定しただけでは e, μ, π, K, p の区別はつかない。
- 電子は電磁シャワーによりカロリメータに大きなエネルギーを残す
他の粒子は電離損失分を残すだけ (MIP: minimum ionizing particle)
- μ は透過力が強く、鉄をもつき抜ける
 - ソレノイドの外側には洩れ磁場を抑えるため鉄板で覆う
 - 鉄板の間に検出器を設置して、粒子の通過を測定
 - 精度はそれほど必要ないが、大面積
 - K_L の測定にも使われる
- π, K, p は速度差を測定
 - 物質通過の際発生するチェレンコフ光が速度によることを利用
 - 検出器への到達時間差 (TOF: time of flight) を利用
 - CDC での電離損失が運動量ではなく速度に依存することを利用
 - 光速に近いと、速度差の測定は容易ではなく、一長一短

チェレンコフ光測定

- 粒子速度は屈折率 n の物質中の光速度 (c/n) を越えることが出来る
- このとき、チェレンコフ光が角度 $\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$ に放射される
- 運動量 p 、質量 m の粒子の速度 β はローレンツ変換の式

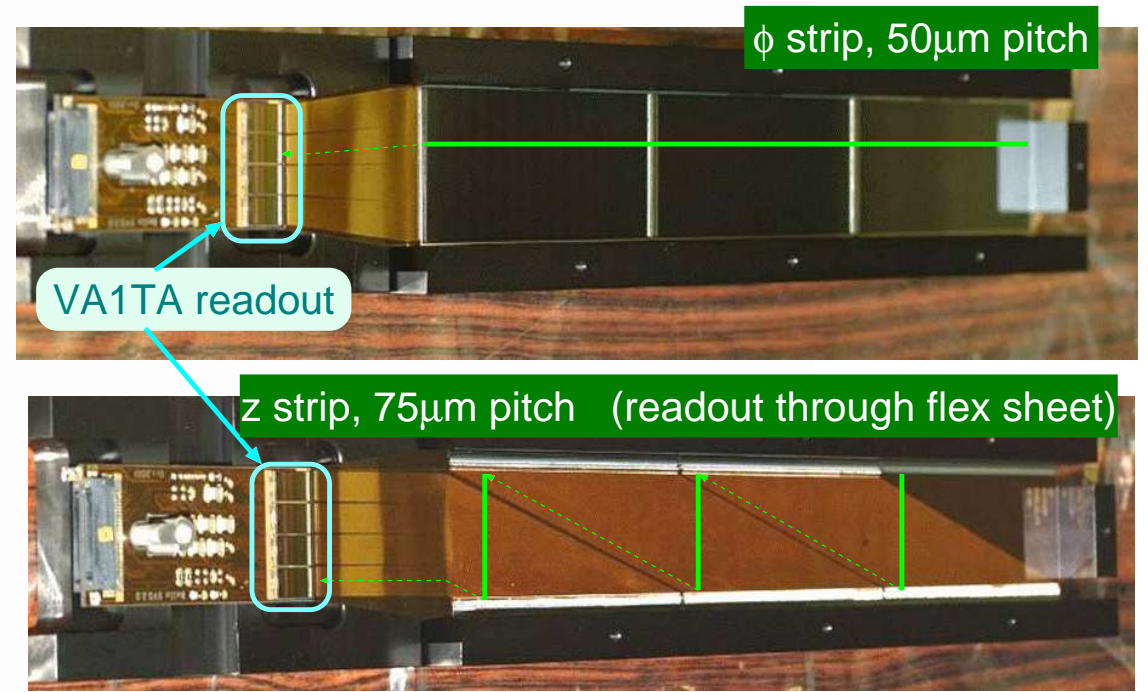
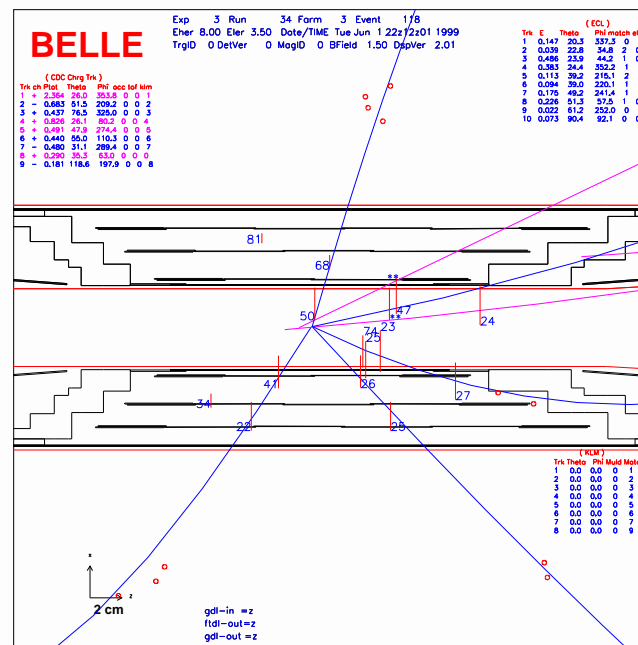
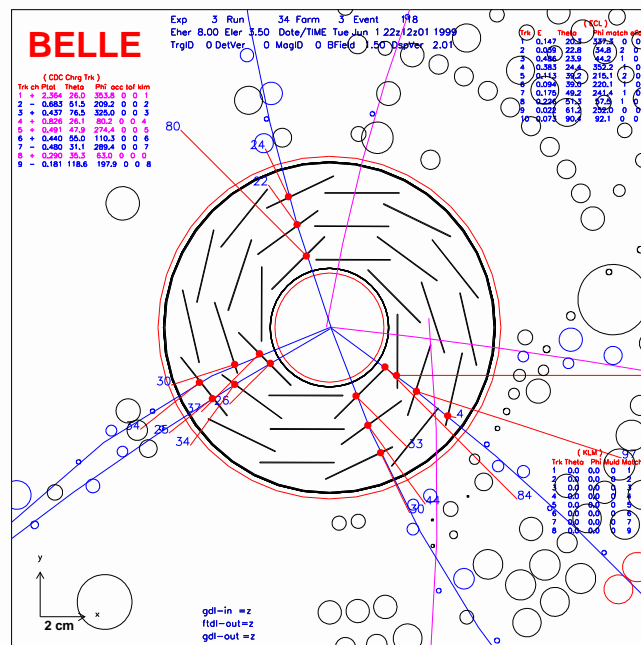
$$\begin{pmatrix} E \\ p \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} 1 & \beta \\ \beta & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m \\ 0 \end{pmatrix}$$

より、 $\beta = p/E = p/\sqrt{p^2 + m^2}$

- 例: $p = 1 \text{ GeV}/c$ の π ($m_\pi = 0.14 \text{ GeV}/c^2$) と K ($m_K = 0.5 \text{ GeV}/c^2$) で $\beta_\pi = 0.99$ 、 $\beta_K = 0.89$ なので、 $n < 1.1$ ならば π のみチェレンコフ光
- Belle では $n=1.01\sim 1.03$ のシリカエアロジェルを使用
透明で非常に軽い固体、水分を吸収しない加工 (KEK で開発)
- 1 m の距離での飛行時間差だと 380 ps (測れないことはない)

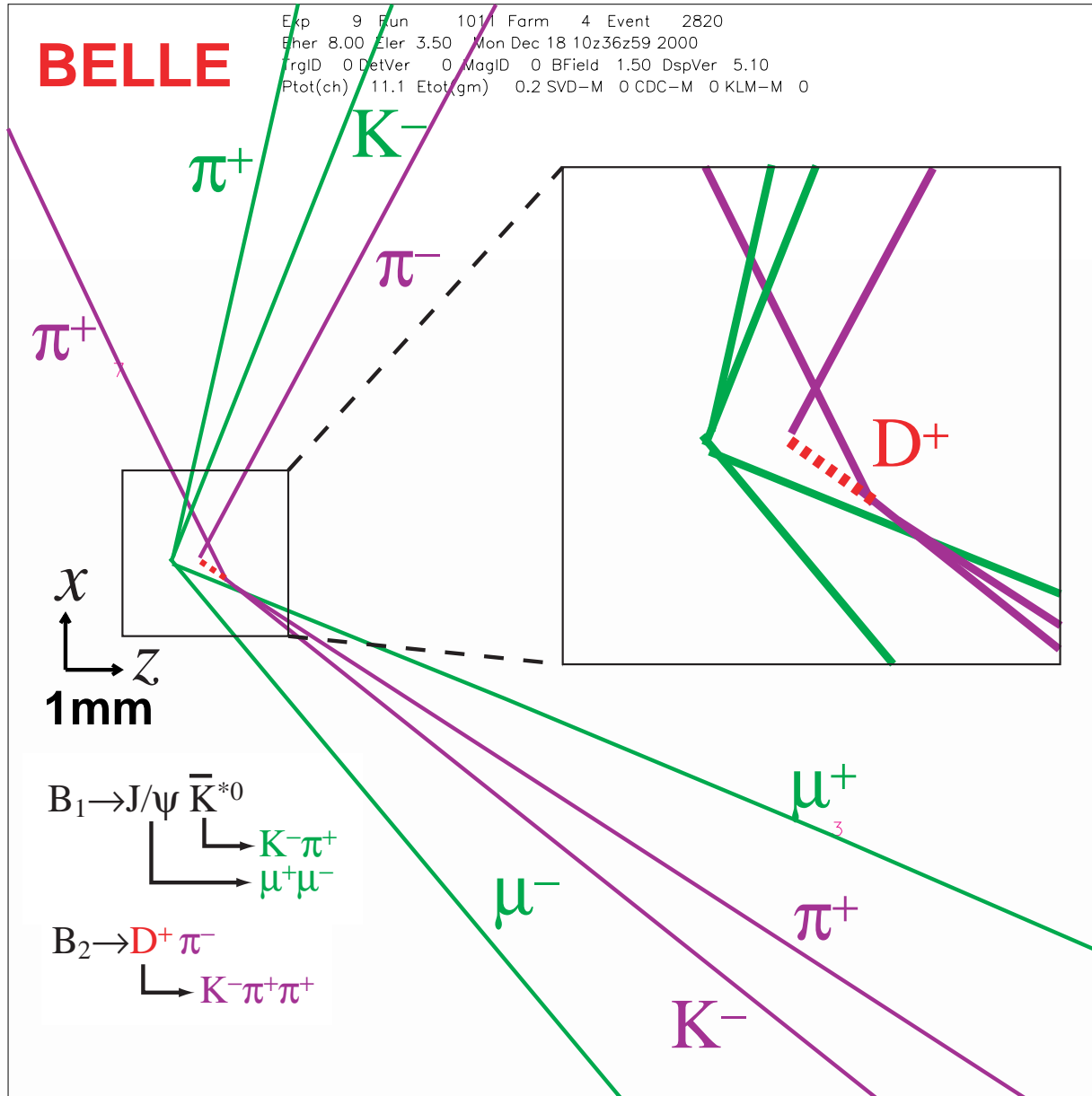
崩壊点測定

- 崩壊点を精度良く測定するために、衝突点近傍には、シリコン検出器を設置
- 原理は荷電粒子測定と同様 (シリコン内に電子・ホールペアを生成)
- 0.1 mm の z 軸崩壊点分解能 — $\Delta z = 0.2 \text{ mm}$ の測定には十分

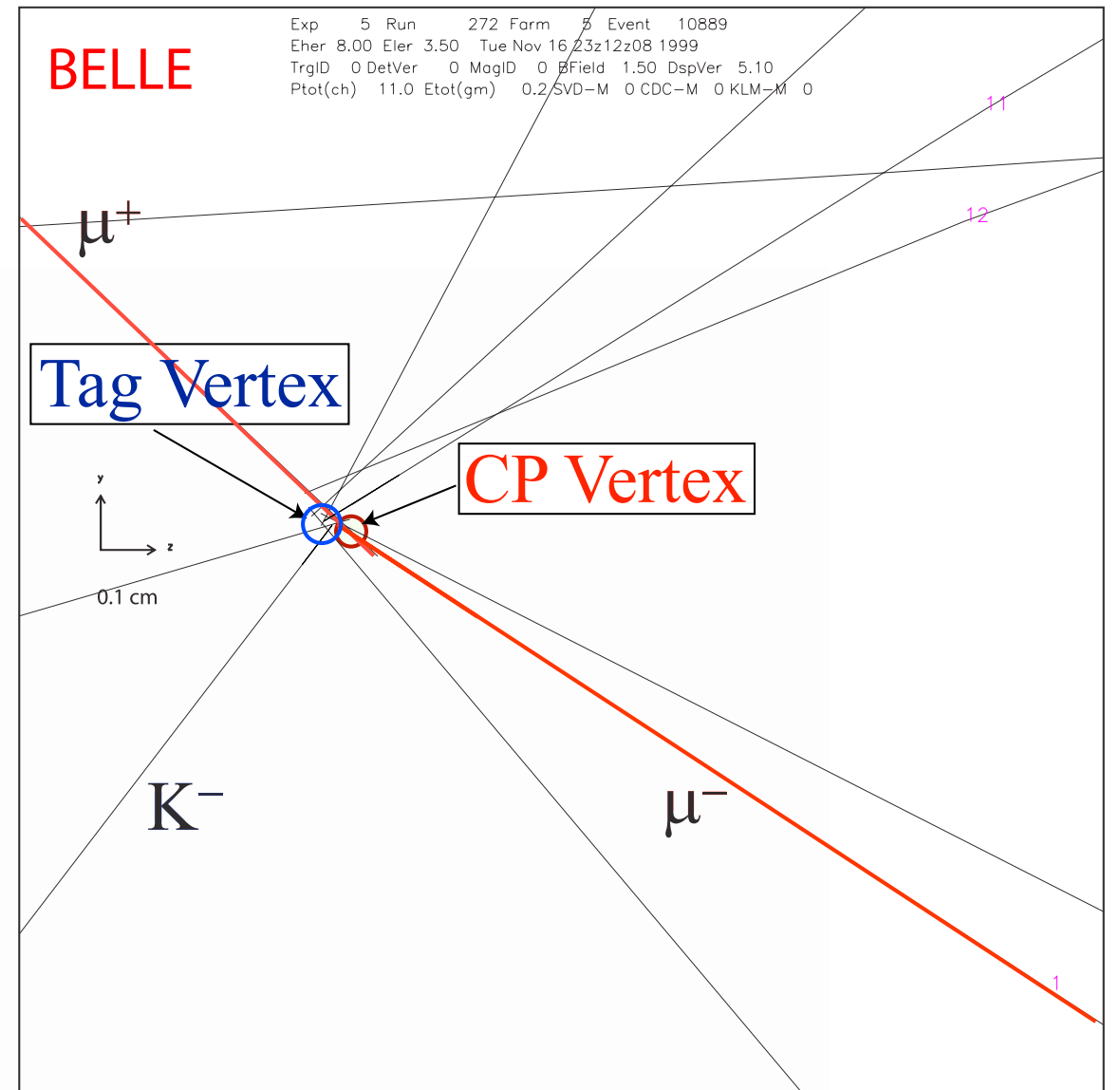


崩壊点測定

特にいい例



ごく普通の例

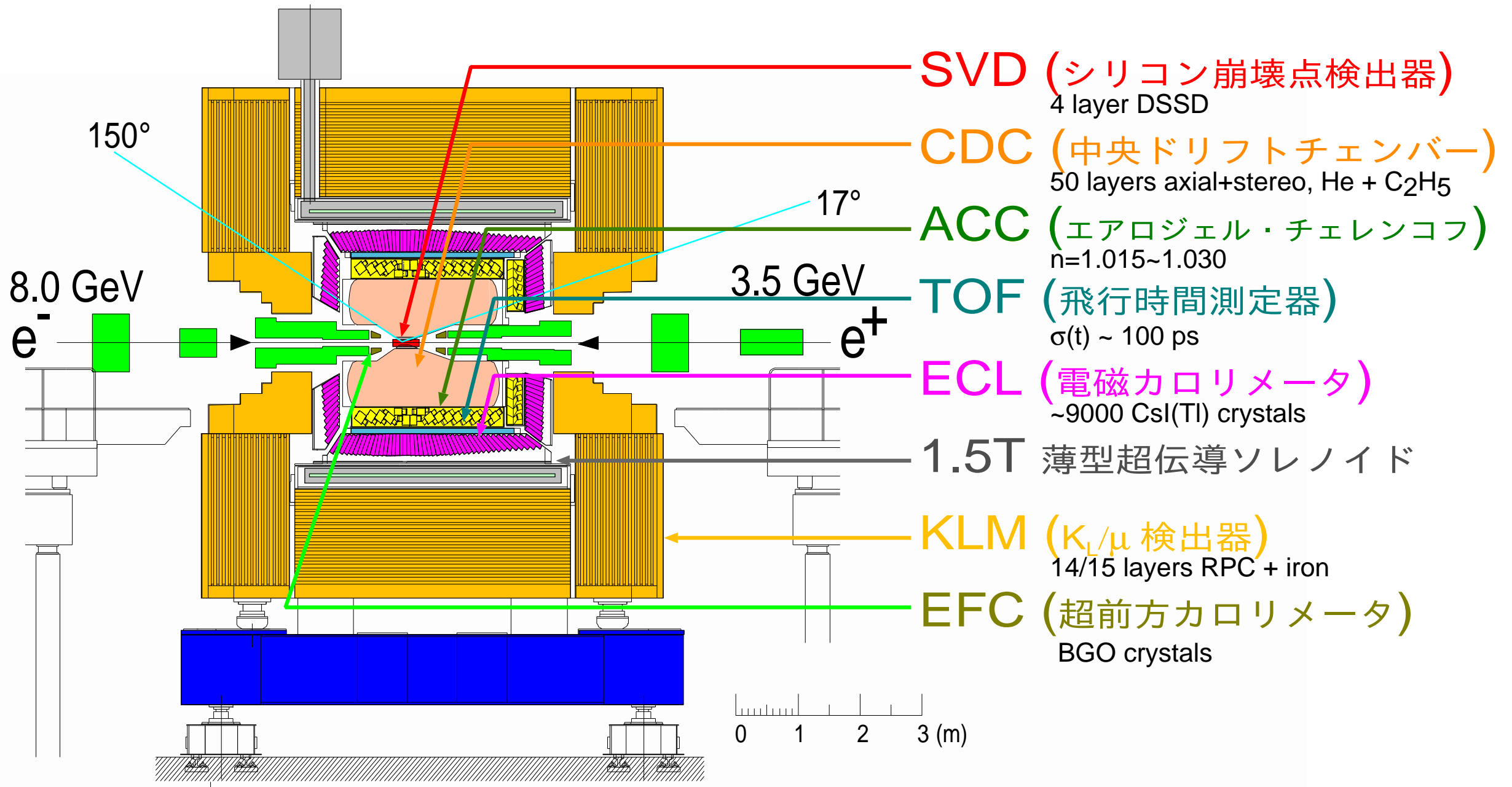


$\beta\gamma c\tau \sim 200 \mu\text{m}$ に対して、崩壊点分解能は $\sim 100 \mu\text{m}$

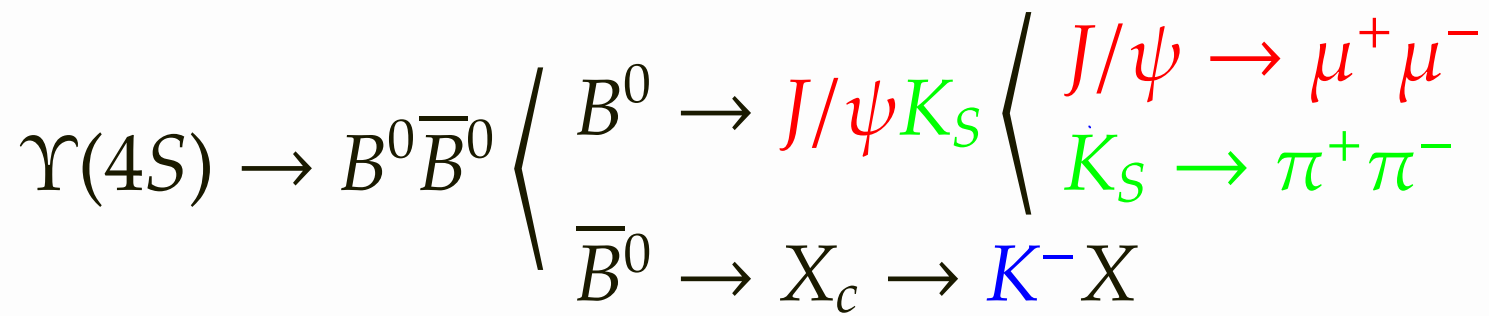
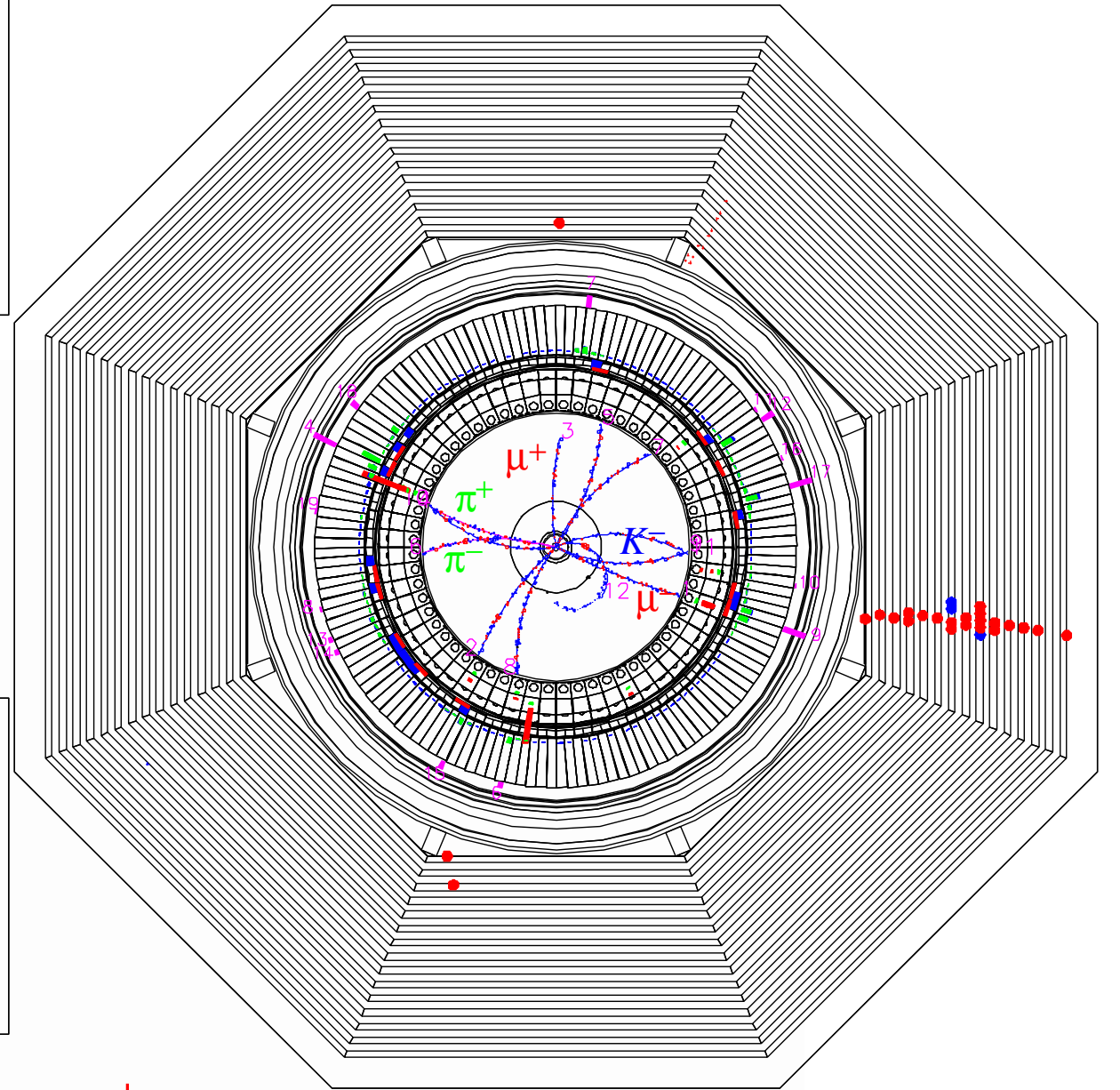
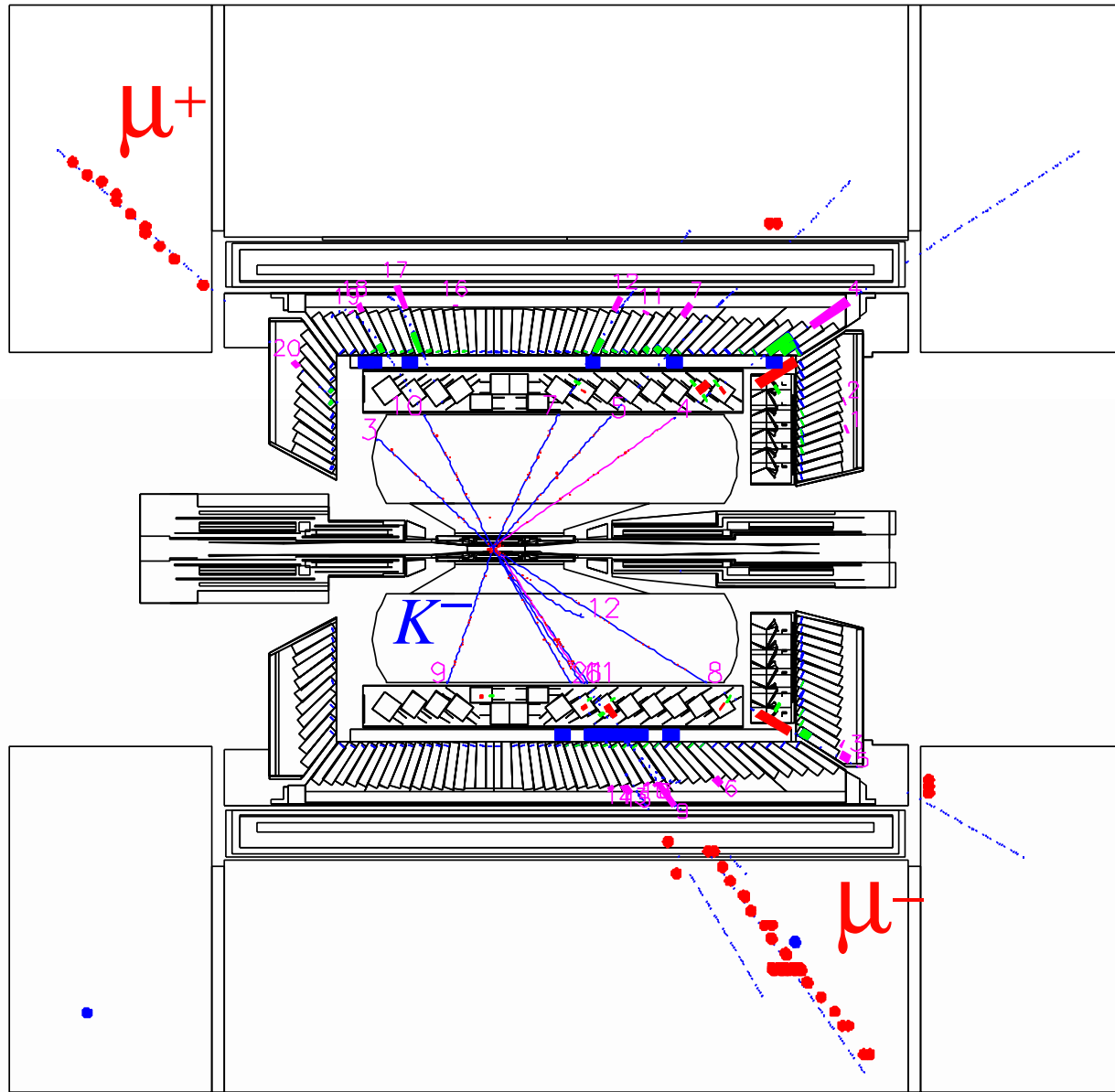
7 種の粒子のための 7 検出器 ($e, \mu, \pi, K, p, \gamma, K_L^0$)

荷電粒子 — 崩壊点精密測定、運動量測定、粒子識別

光子 — エネルギーと方向 / K_L^0 は方向のみ



事象例



物理量測定

this is a dummy text to prevent rotating the pdf output.
dummy text to prevent rotating the pdf output. this is a
text to prevent rotating the pdf output.

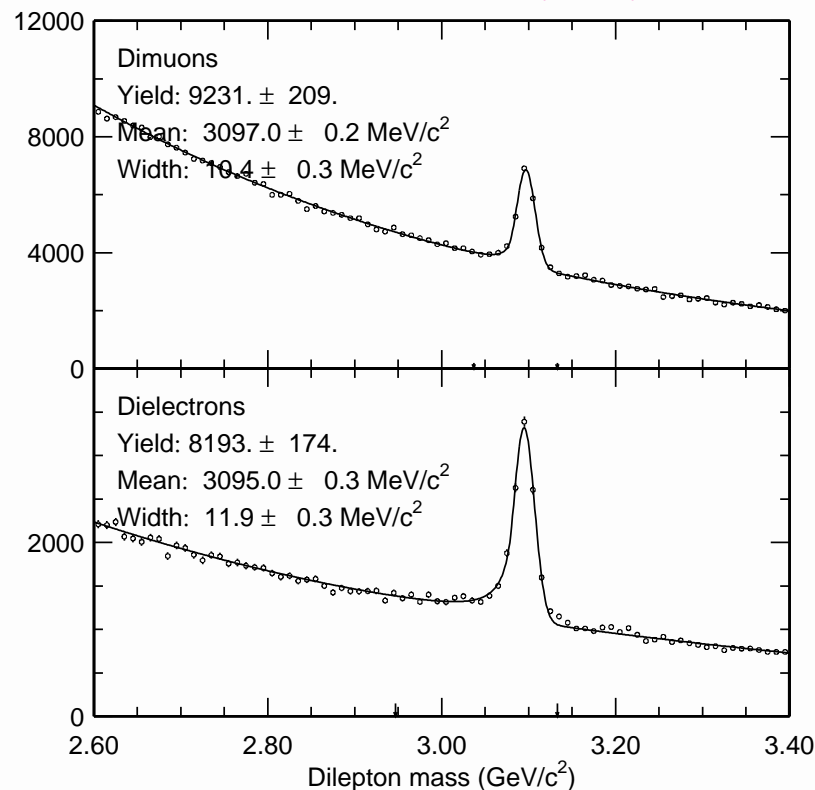
不変質量

- 粒子を組み合わせて不変質量を計算 ($c = 1$ 単位系を使用)

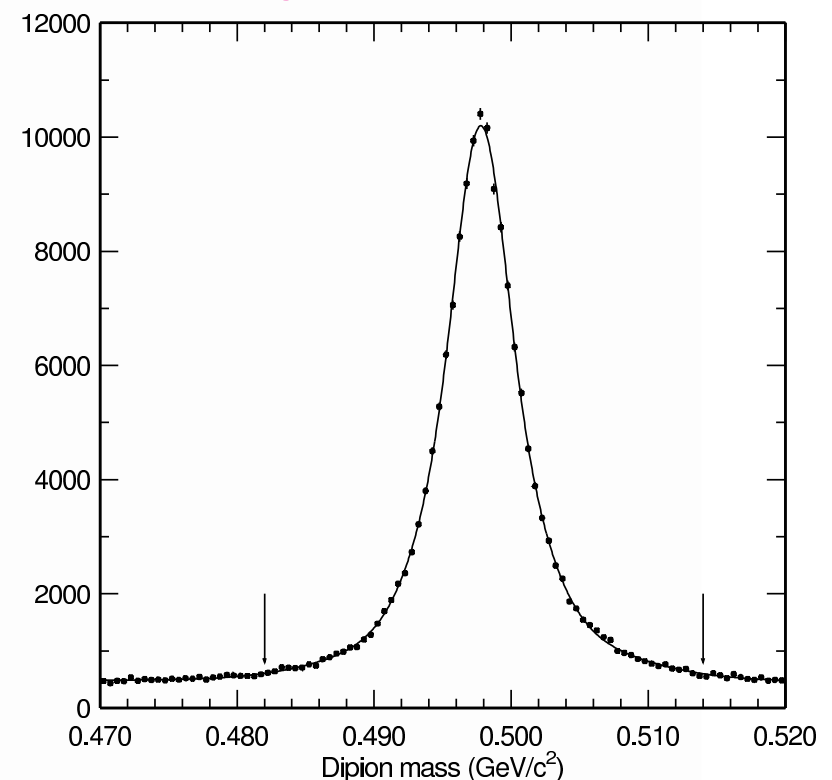
$$M = \sqrt{(\sum E_i)^2 - |\sum \vec{p}_i|^2} = \sqrt{\left(\sum \sqrt{|p_i|^2 + M_i^2}\right)^2 - |\sum \vec{p}_i|^2}$$

- 個々の運動量は測定、質量は既知の値を仮定 (粒子識別が重要)
- 正しくない組合せも多数 — 統計的処理
幅は運動量測定精度で決まり、荷電粒子で $>0.4\%$ 、光子で $>2\%$

$J/\psi \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-$



$K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$



B 中間子同定

- B 中間子の $\Upsilon(4S)$ 重心系エネルギーは $E = 10580 \text{ MeV}/2 = 5290 \text{ MeV}$
- 重心系運動量は 341 MeV
($M = 5279 \text{ MeV}/c^2 \Rightarrow p = 340 \text{ MeV}/c$)
- 重心系エネルギーの広がり $\sim 0.05\%$
 \Leftrightarrow 検出器の運動量測定精度は $\sim 0.4\%$
不変質量のかわりに Beam-energy constrained mass

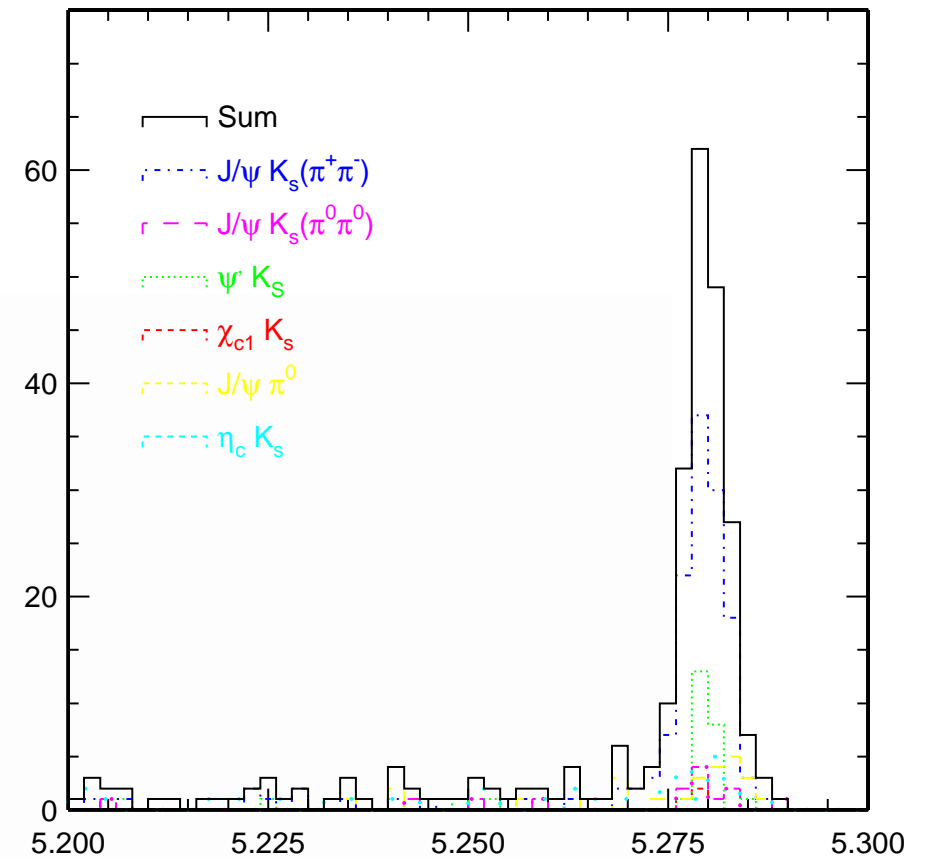
$$M_{bc} = \sqrt{(E_{\text{beam}}^*)^2 - (p_B)^2}$$

運動量が小さいため、運動量の誤差の寄与がほとんどない

- エネルギー測定も独立な測定量

$$\Delta E = E_B - E_{\text{beam}}^*$$

$B \rightarrow J/\psi K_S^0$ 他



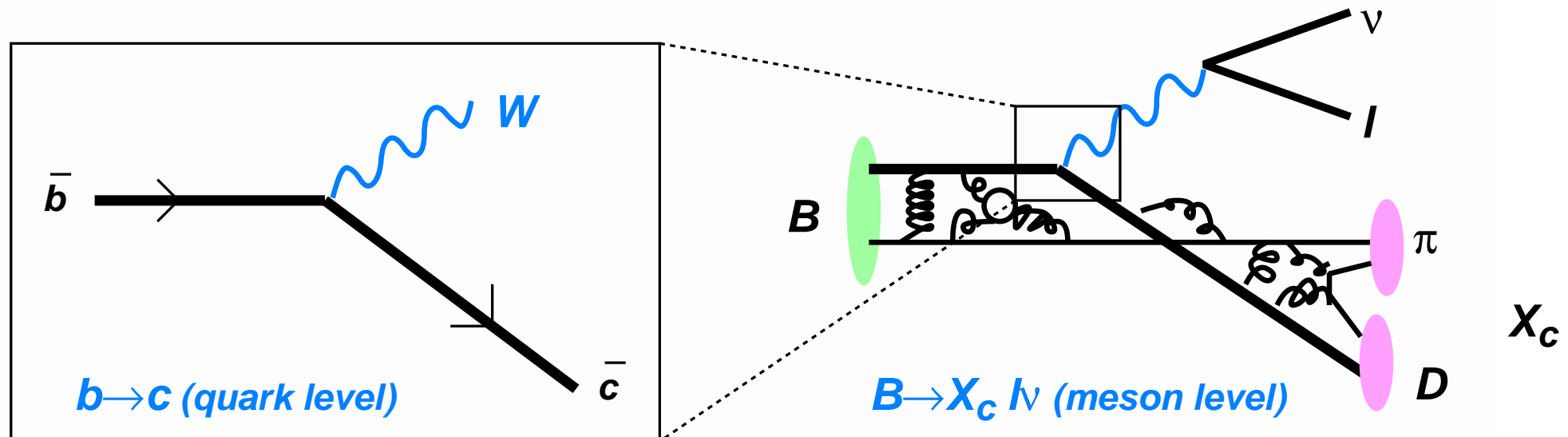
事象の計数

- B 中間子計数から分岐比を計算— 計数 \propto 分岐比 \propto |確率振幅|²
- 理論的扱いが難しい場合が多い (CP 非対称性測定の方が理論的に簡単)
- 例: 小林益川行列要素の大きさ $|V_{cb}|$ 、 $|V_{ub}|$ は分岐比から求める
小林益川理論検証のための重要なステップ

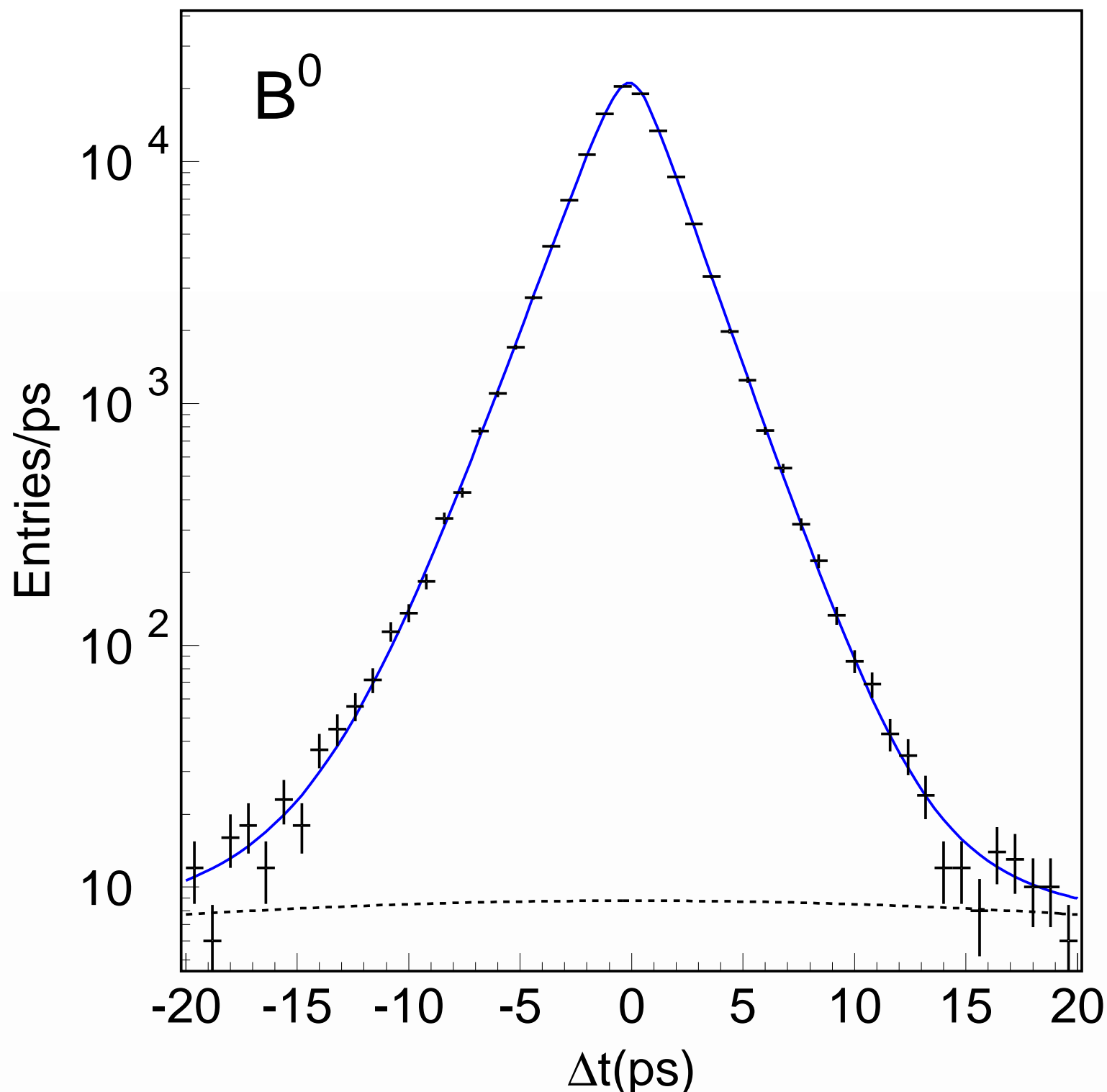
$$\mathcal{B}(B \rightarrow X_c \ell \nu) = \Gamma(B \rightarrow X_c \ell \nu) / \Gamma_{\text{total}}$$

$$\Gamma(B \rightarrow X_c \ell \nu) = \frac{G_F^2 m_b^5}{192 \pi^3} |V_{cb}|^2 (1 + A_{ew}) A_{\text{pert}}(r, \mu)$$

$$\times \left[z_0(r) \left(1 - \frac{\mu_\pi^2 - \mu_G^2 + \frac{\rho_D^3 + \rho_{LS}^3}{m_b}}{2m_b^2} \right) - 2(1-r)^4 \frac{\mu_G^2 + \frac{\rho_D^3 + \rho_{LS}^3}{m_b}}{m_b^2} + d(r) \frac{\rho_D^3}{m_b^3} + O(1/m_b^4) \right].$$



B 中間子の寿命の測定



- B^0, B^+ の寿命は非常に精度よく決まっている

$$\tau_{B^0} = 1.530 \pm 0.009 \text{ ps}$$

$$\tau_{B^+} = 1.638 \pm 0.011 \text{ ps}$$

$$\text{ratio: } 1.071 \pm 0.009$$

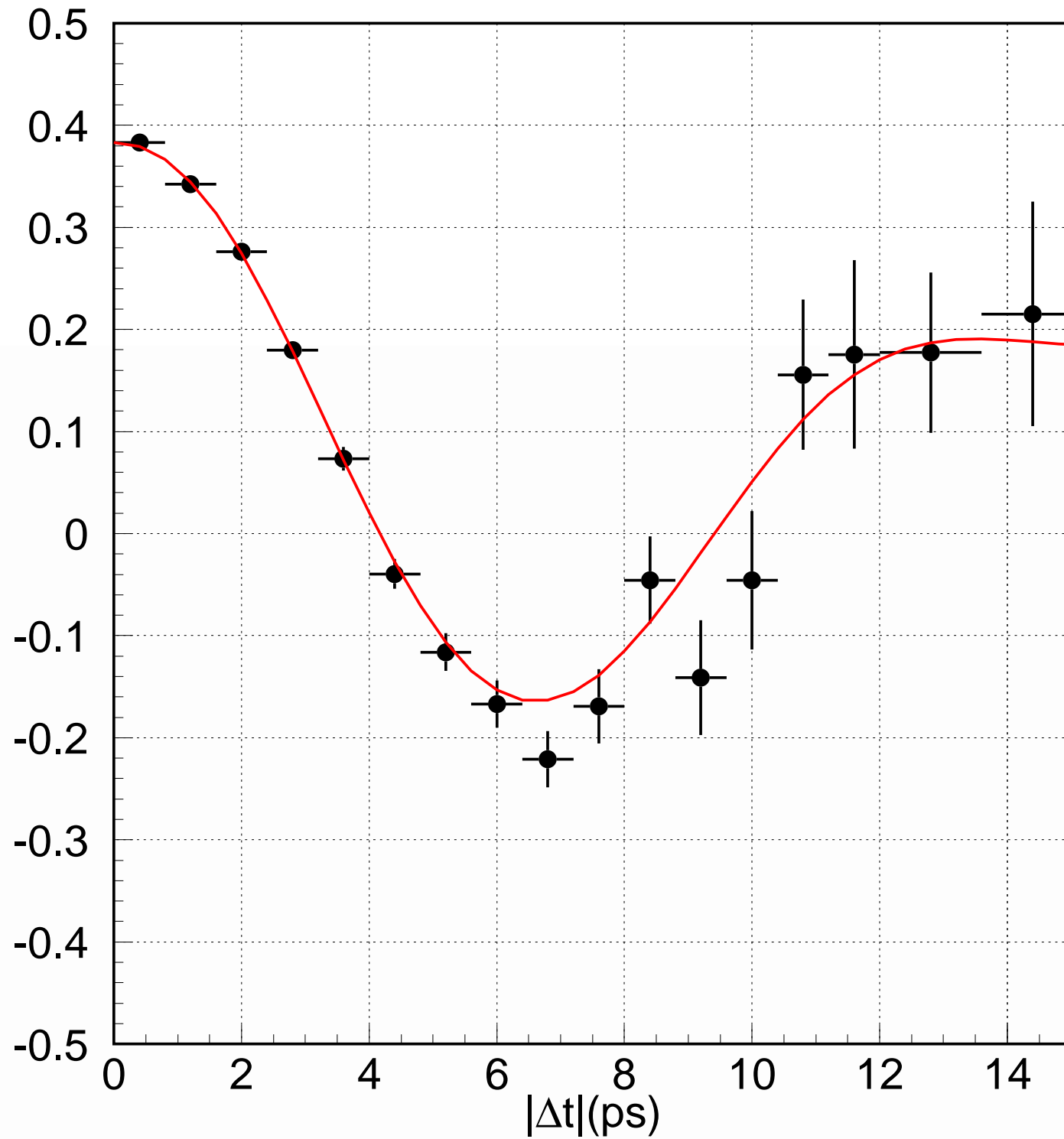
(2007 年の世界平均)

- 左右対称なのは、2つの B 崩壊の時間差を見ているため (どちらが先かは定義できない)

- 本来 $e^{-|\Gamma\Delta t|}$ の分布が検出器の分解能によって少しなまっている

➡ 検出器の分解能の理解

B 中間子の混合の測定



- フレーバー固有状態への崩壊を測定
- 混合がなければ 2 つの B 中間子は常に異なるフレーバー固有状態 (OF) へ崩壊する
- フレーバー非対称性

$$A_f(t) = \frac{N(\text{OF}) - N(\text{SF})}{N(\text{OF}) + N(\text{SF})}$$

完全に $\cos(\Delta m \Delta t)$ ではないのは検出器が完全でないため

世界平均 (2007)

$$\Delta m = 0.507 \pm 0.005 \text{ ps}^{-1}$$

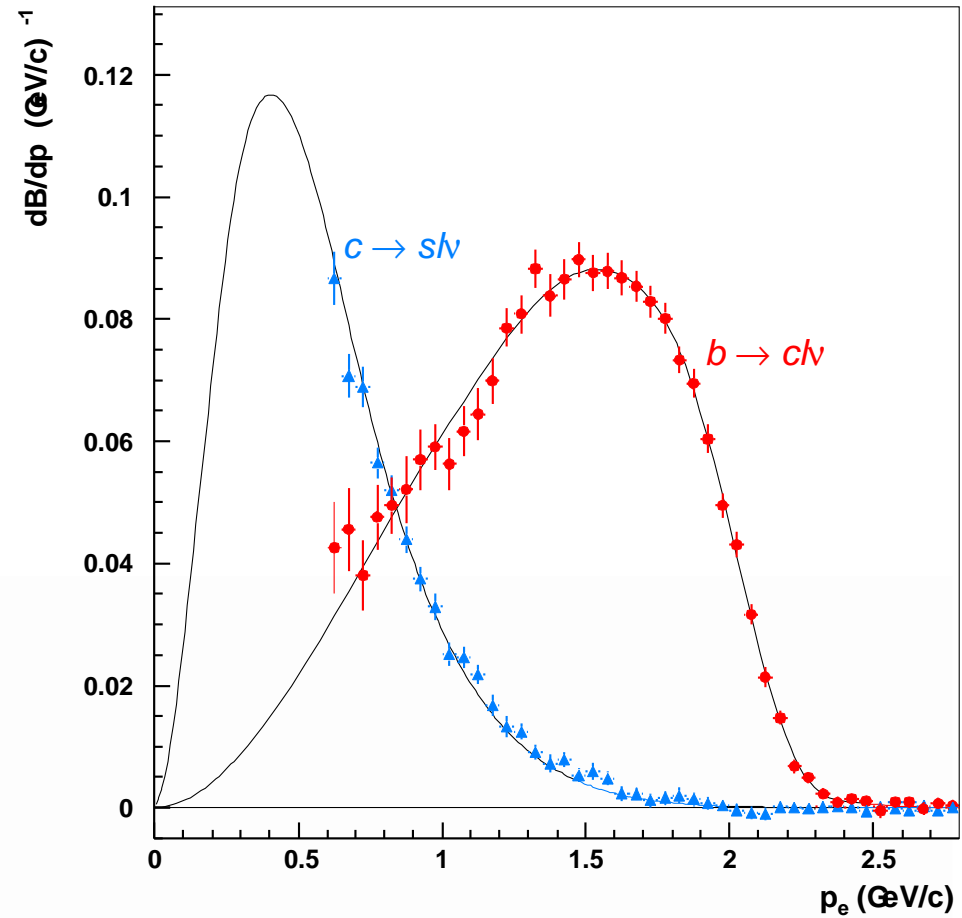
$$x = \Delta m / 2\Gamma = 0.776 \pm 0.008$$

フレーバー同定

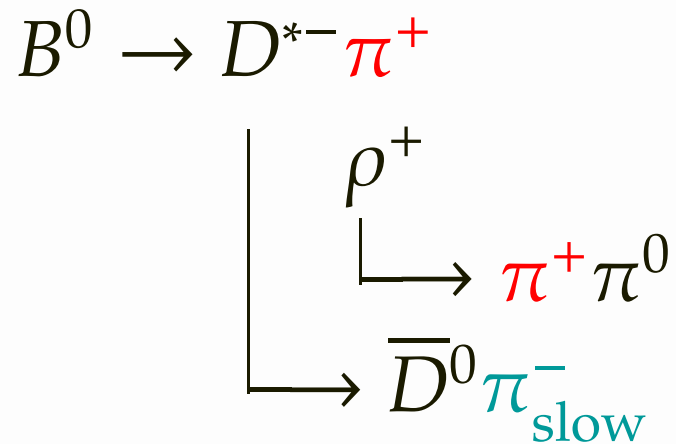
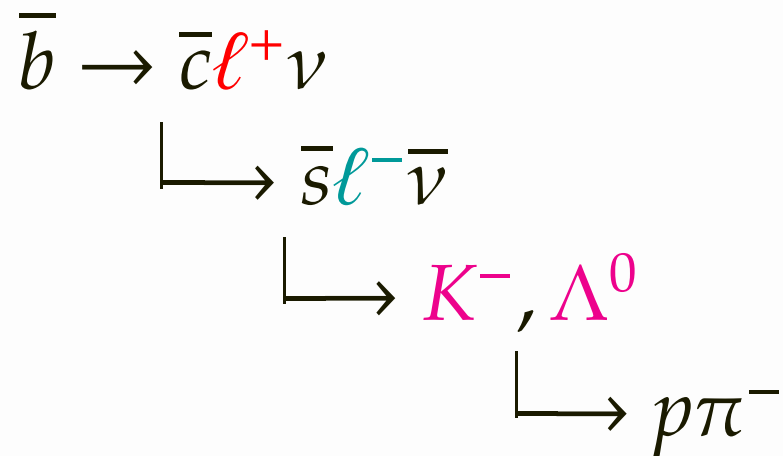
— B or not B , that is the question. —

- レプトンタグ
 - High- p ℓ^+
 - Medium- p ℓ^-
- ハドロンタグ
 - K^-
 - $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$
 - High- p π^+
 - Low- p π^-

B^0 らしい
符号



個々のフレーバー識別能力は千差万別
 $q = +1$ として確かさを一変数 " r " ($0 < r < 1$)
 にまとめる (逆符号なら \bar{B}^0 らしい、 $q = -1$)



フレーバータグ実効効率

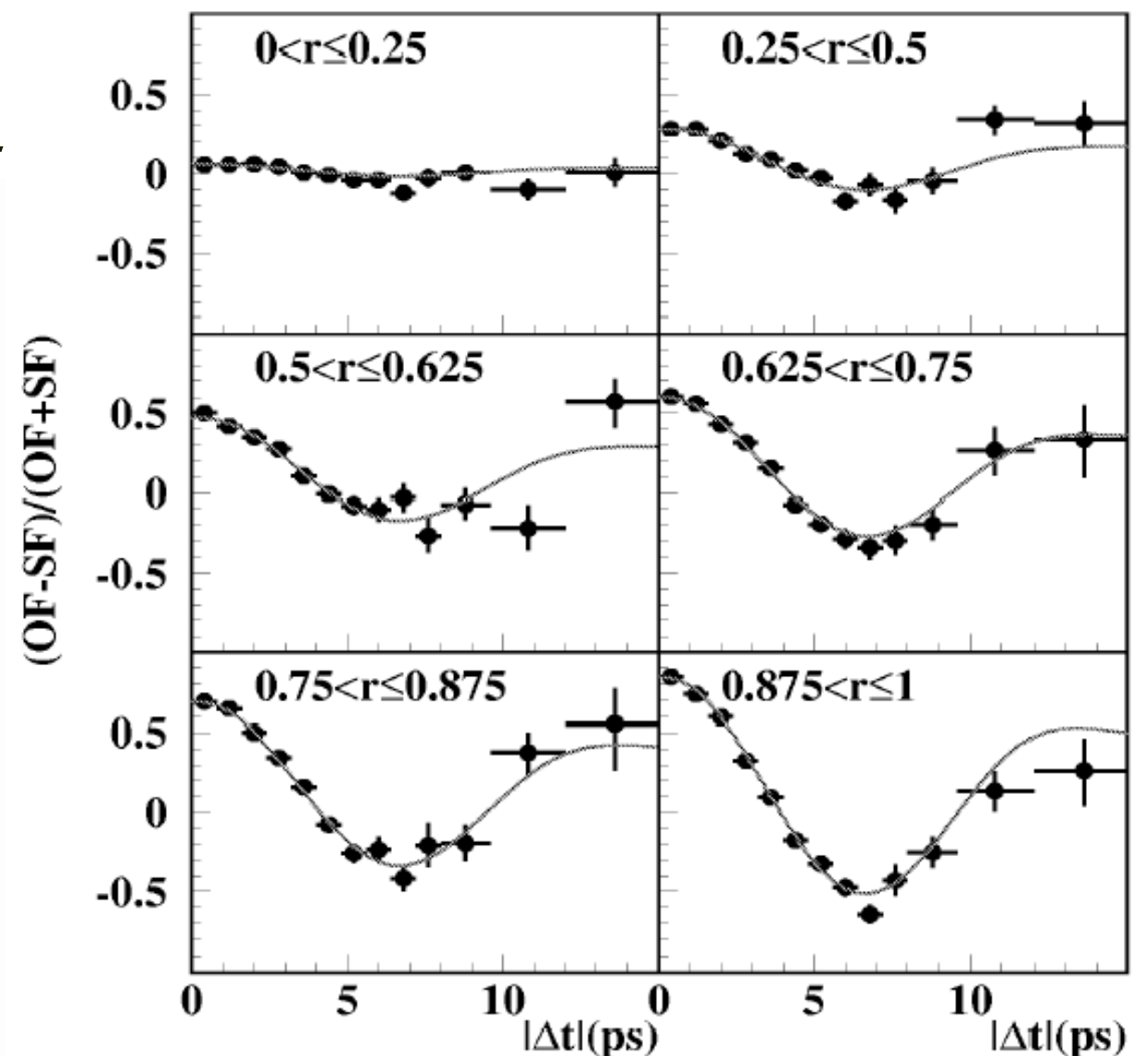
- フレーバータグアルゴリズムはほぼ必ず B か \bar{B} かを判断する

- フレーバータグを間違える割合 $1 - 2w$ は中間子混合振幅で測定

$$\frac{N_{\text{OF}} - N_{\text{SF}}}{N_{\text{OF}} + N_{\text{SF}}} = \frac{1}{1 - 2w} \cos(\Delta m_d \Delta t)$$

- 完璧なフレーバータグなら振幅 1 の振動 (6 つの r に分類)

- CP 非対称性も $\frac{1}{1-2w}$ で薄まる

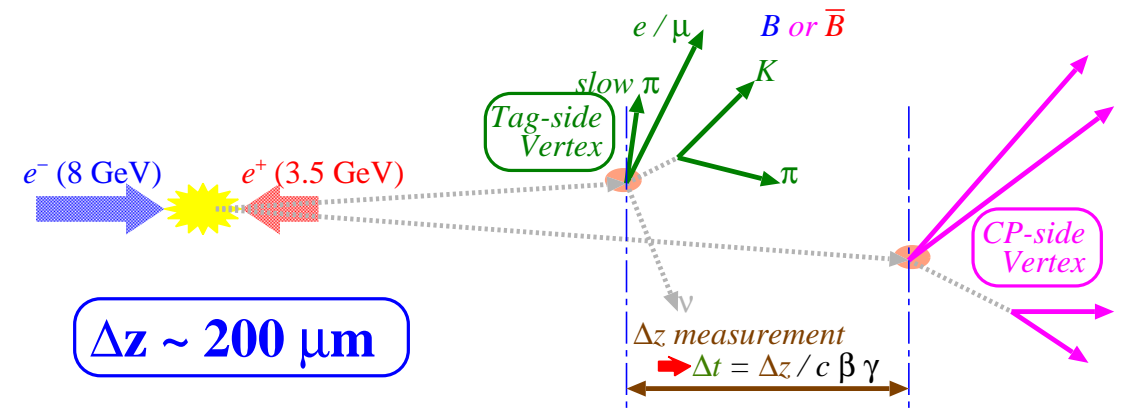


フレーバータグ実効効率は

$$\epsilon_{\text{effective}} = 28.7 \pm 0.5\% \quad (\text{効率が高いことと、精度良く分かっていることが重要})$$

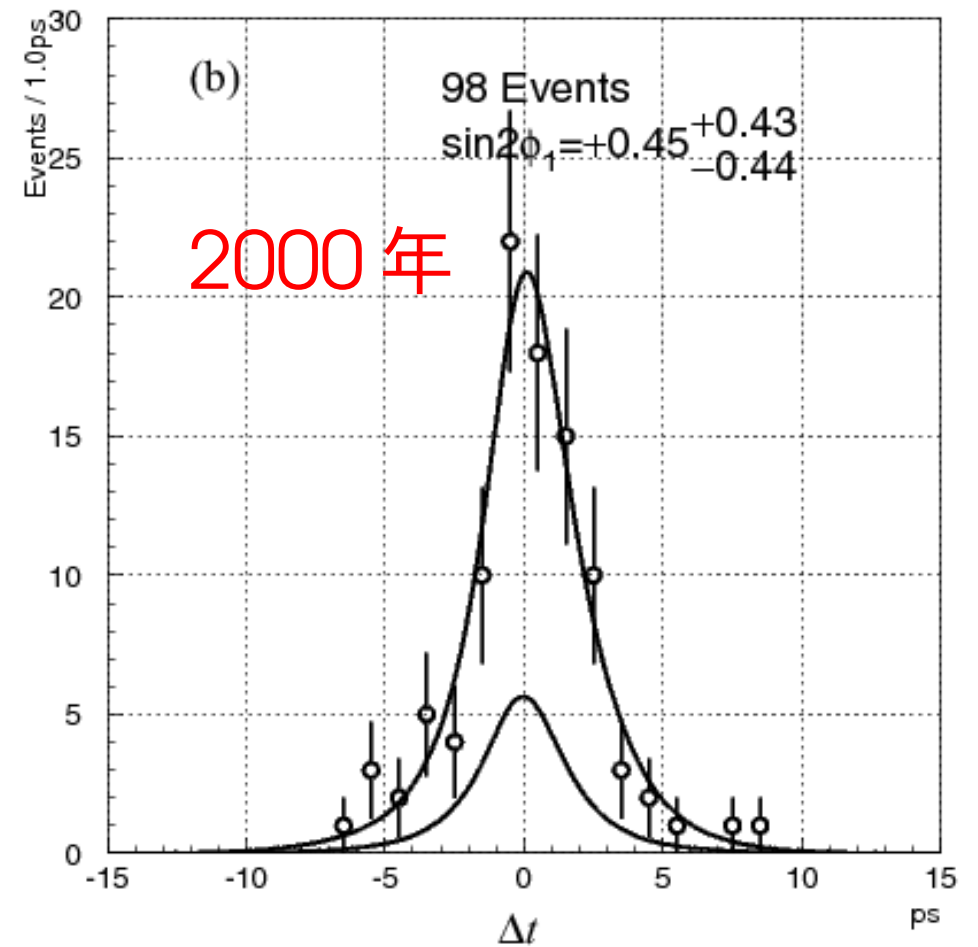
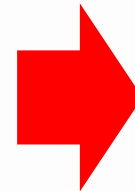
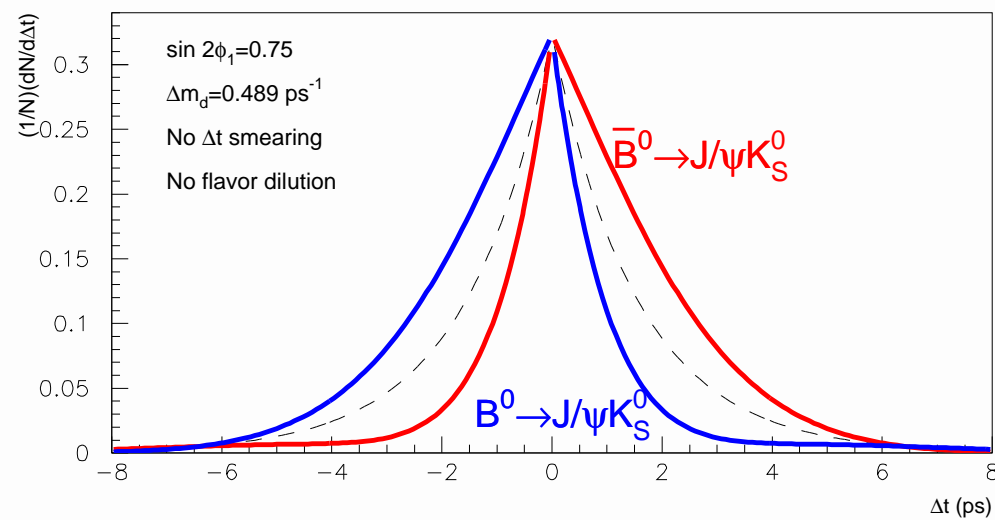
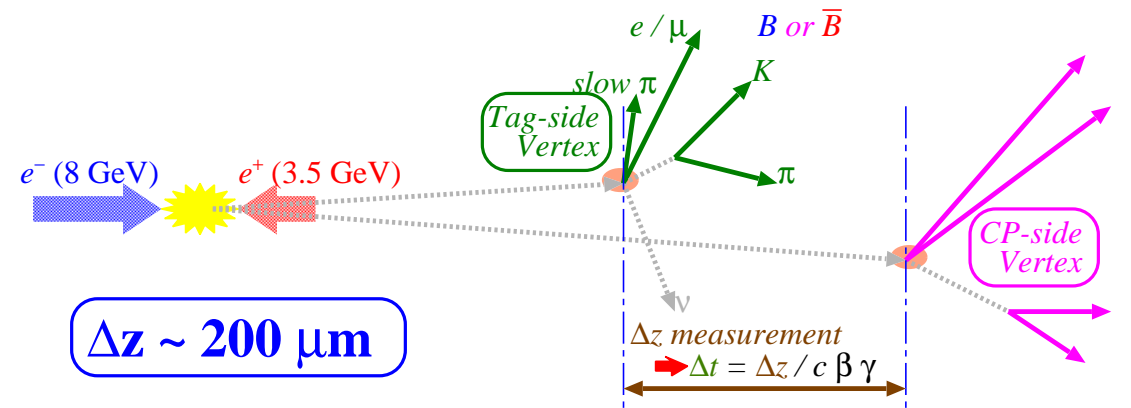
CP 非対称性の測定

- B 中間子事象を集める
- 崩壊点を測定する
- 検出器の測定誤差などを決める
- 反対側が B^0 か \bar{B}^0 かを決める
- 最後に CP 非対称性の測定



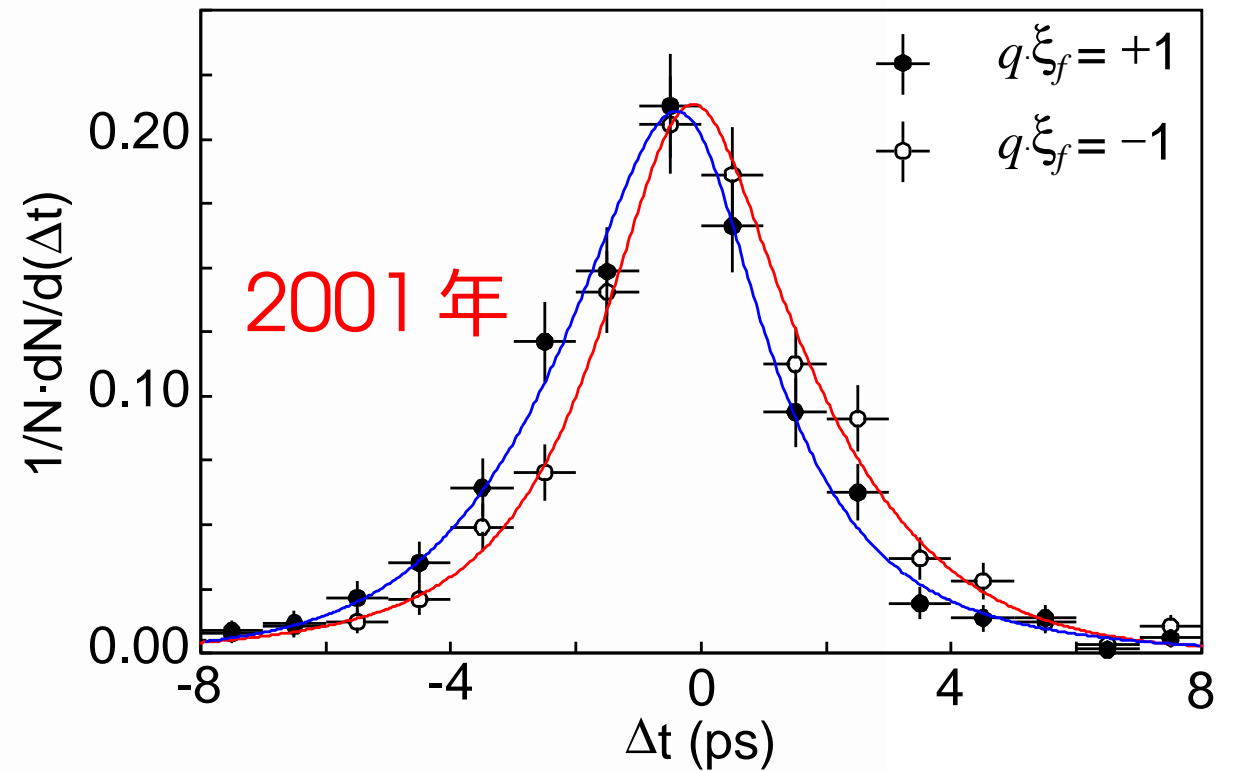
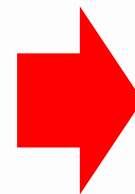
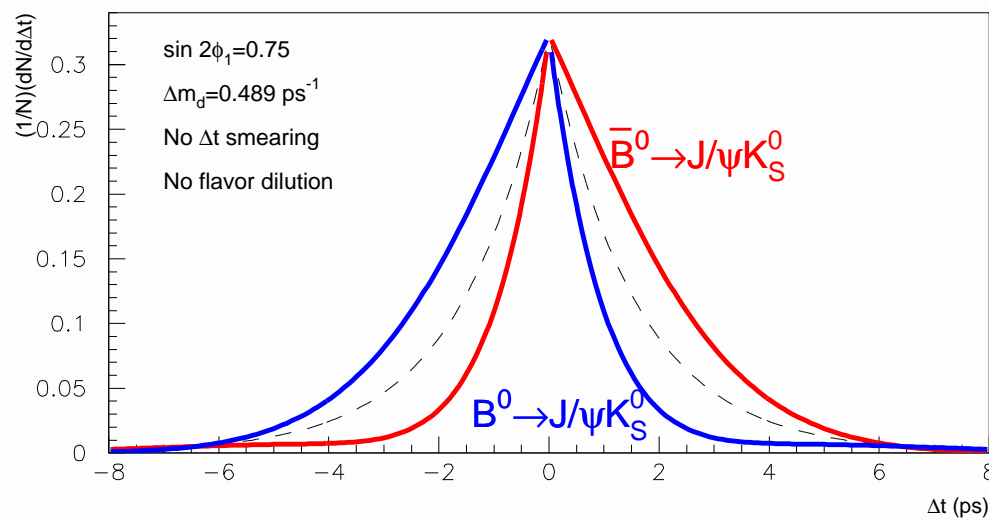
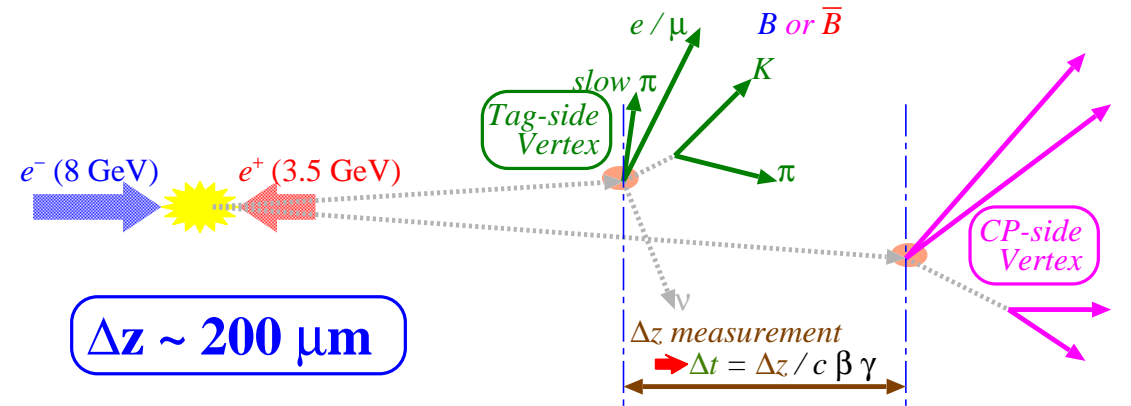
CP 非対称性の測定

- B 中間子事象を集める
- 崩壊点を測定する
- 検出器の測定誤差などを決める
- 反対側が B^0 か \bar{B}^0 かを決める
- 最後に CP 非対称性の測定



CP 非対称性の測定

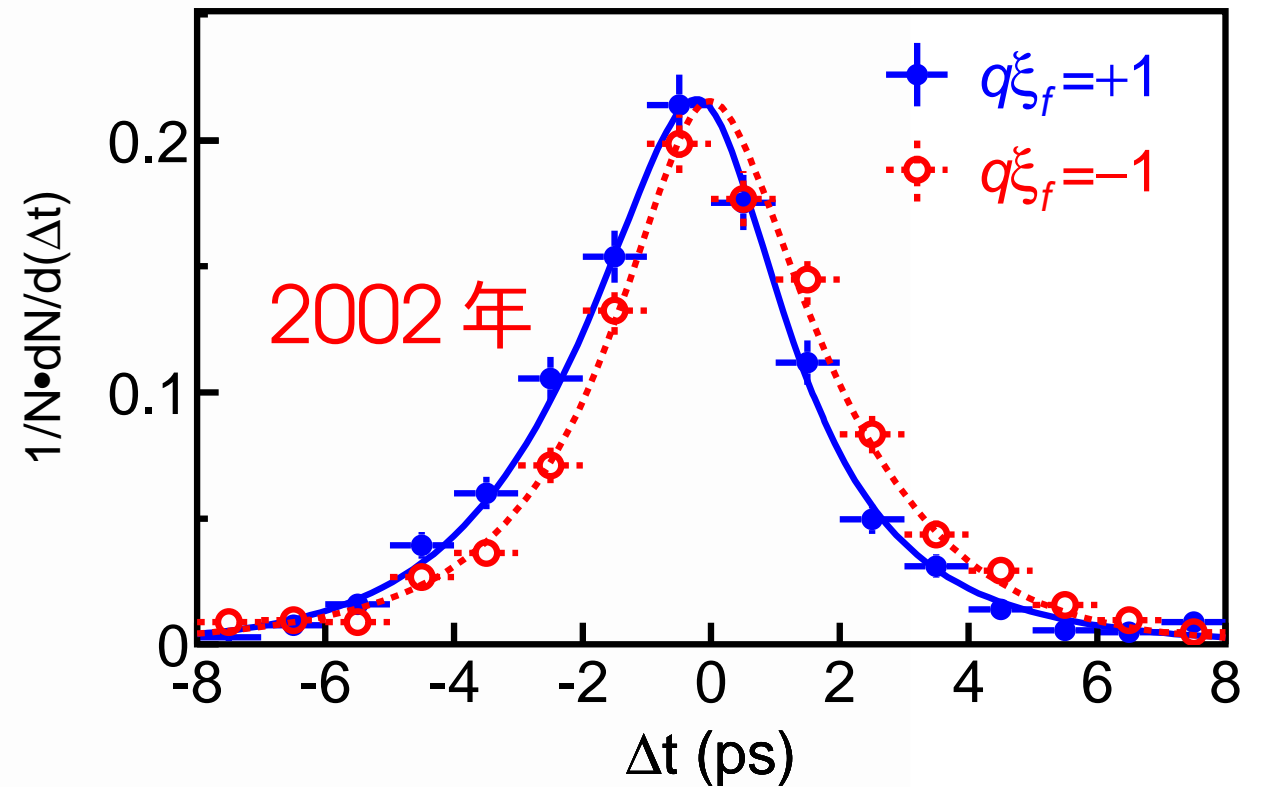
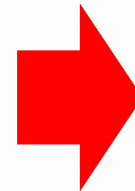
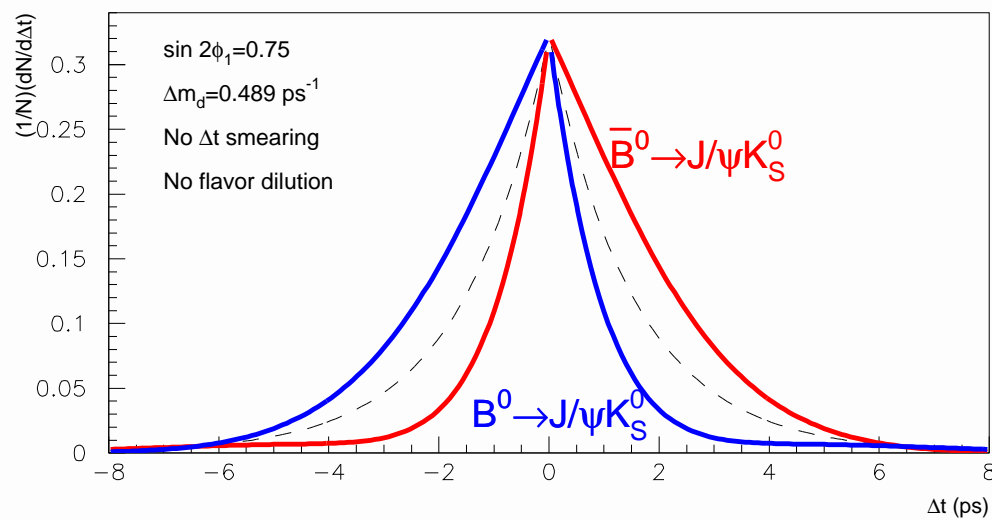
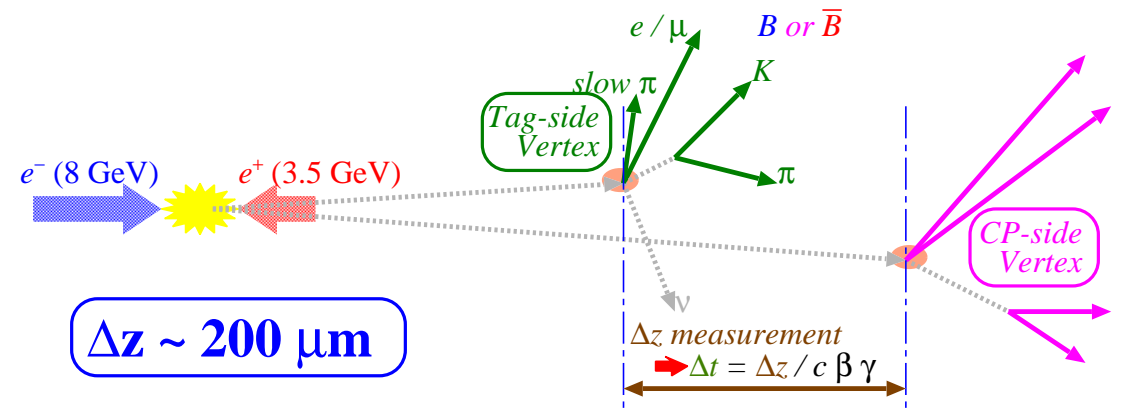
- B 中間子事象を集める
- 崩壊点を測定する
- 検出器の測定誤差などを決める
- 反対側が B^0 か \bar{B}^0 かを決める
- 最後に CP 非対称性の測定



CP 対称性の破れが確実なものに

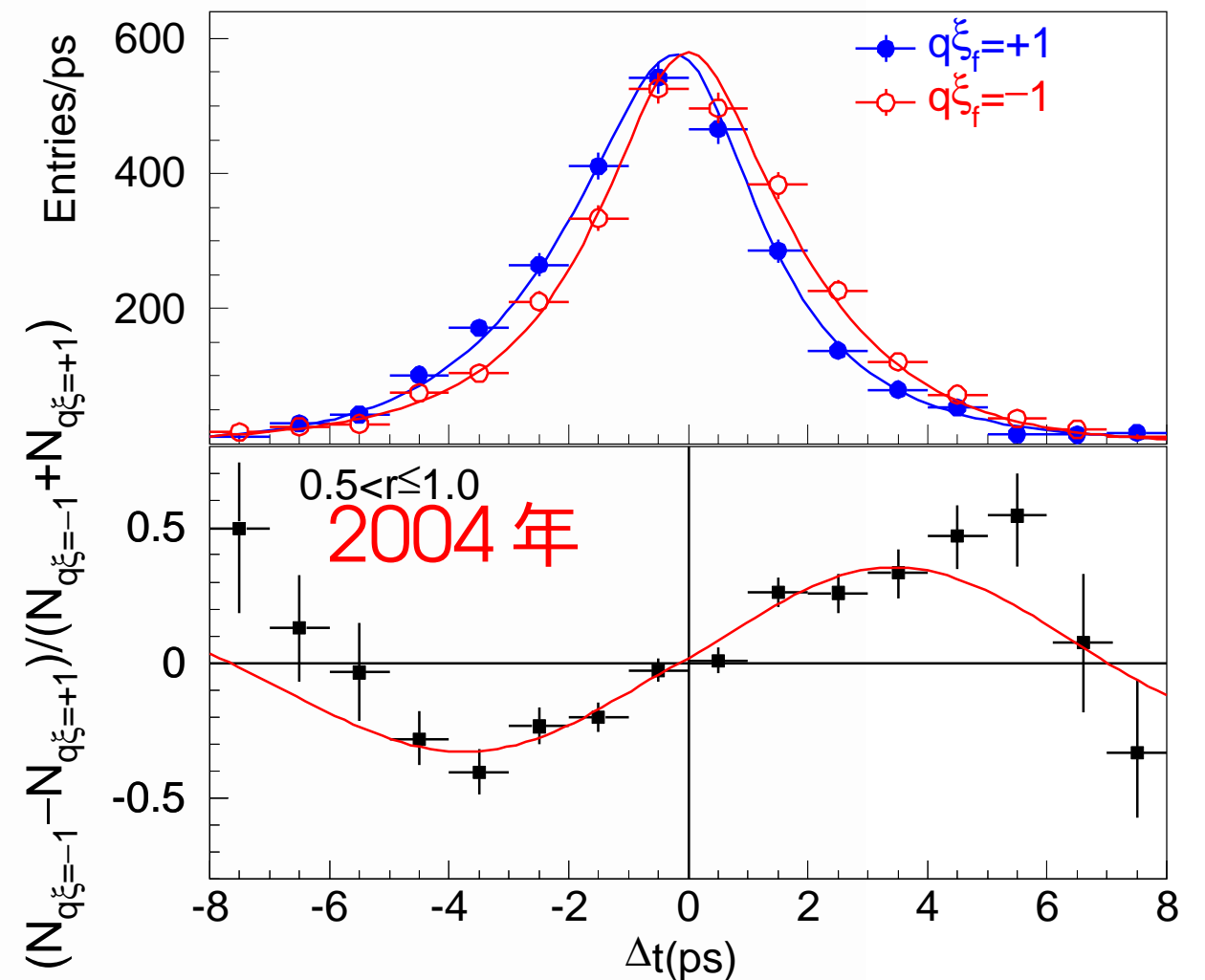
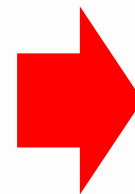
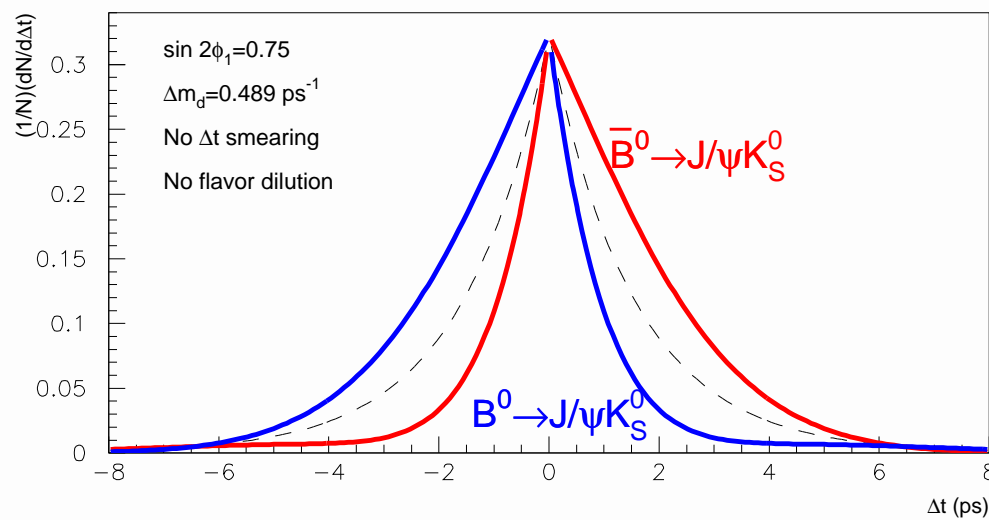
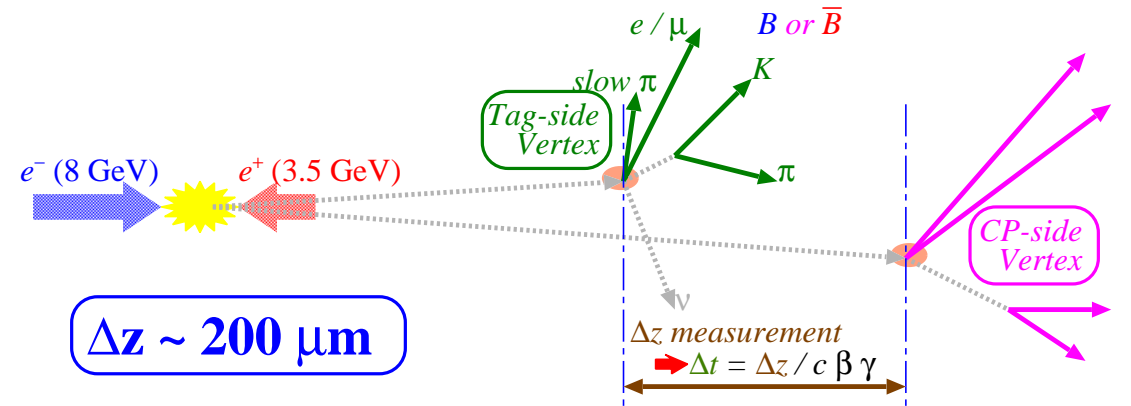
CP 非対称性の測定

- B 中間子事象を集める
- 崩壊点を測定する
- 検出器の測定誤差などを決める
- 反対側が B^0 か \bar{B}^0 かを決める
- 最後に CP 非対称性の測定



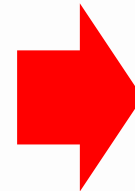
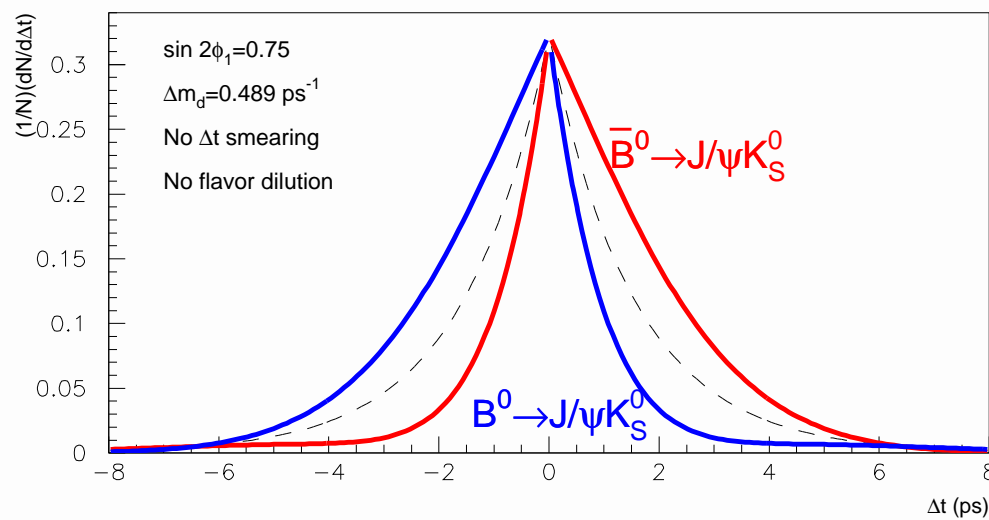
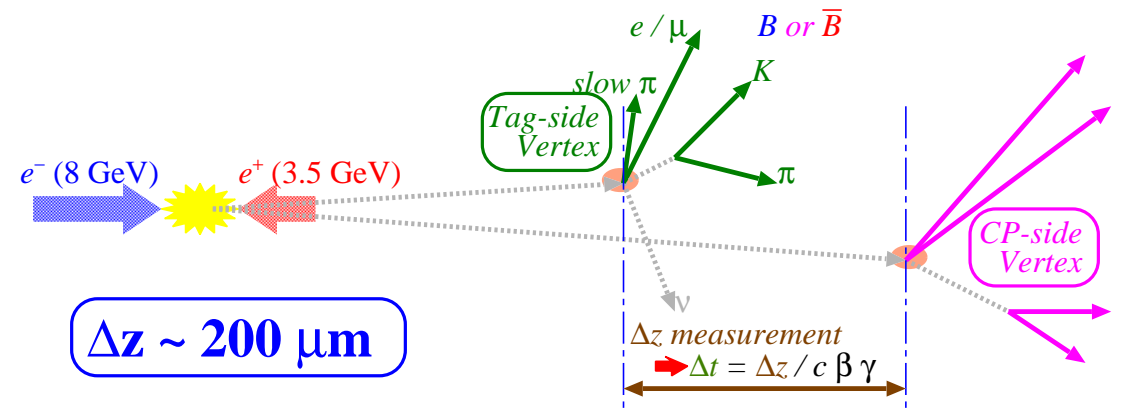
CP 非対称性の測定

- B 中間子事象を集める
- 崩壊点を測定する
- 検出器の測定誤差などを決める
- 反対側が B^0 か \bar{B}^0 かを決める
- 最後に CP 非対称性の測定

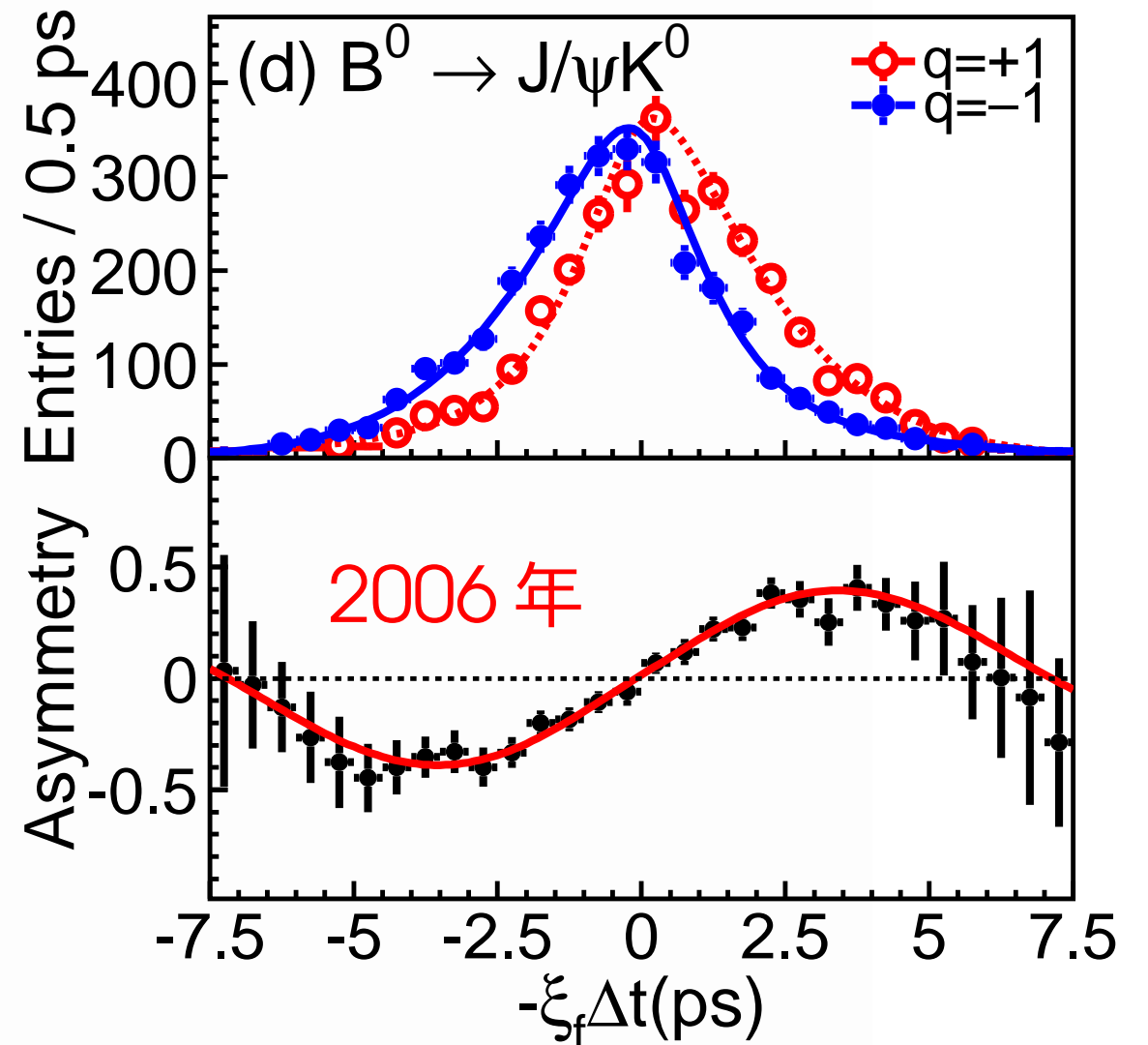


CP 非対称性の測定

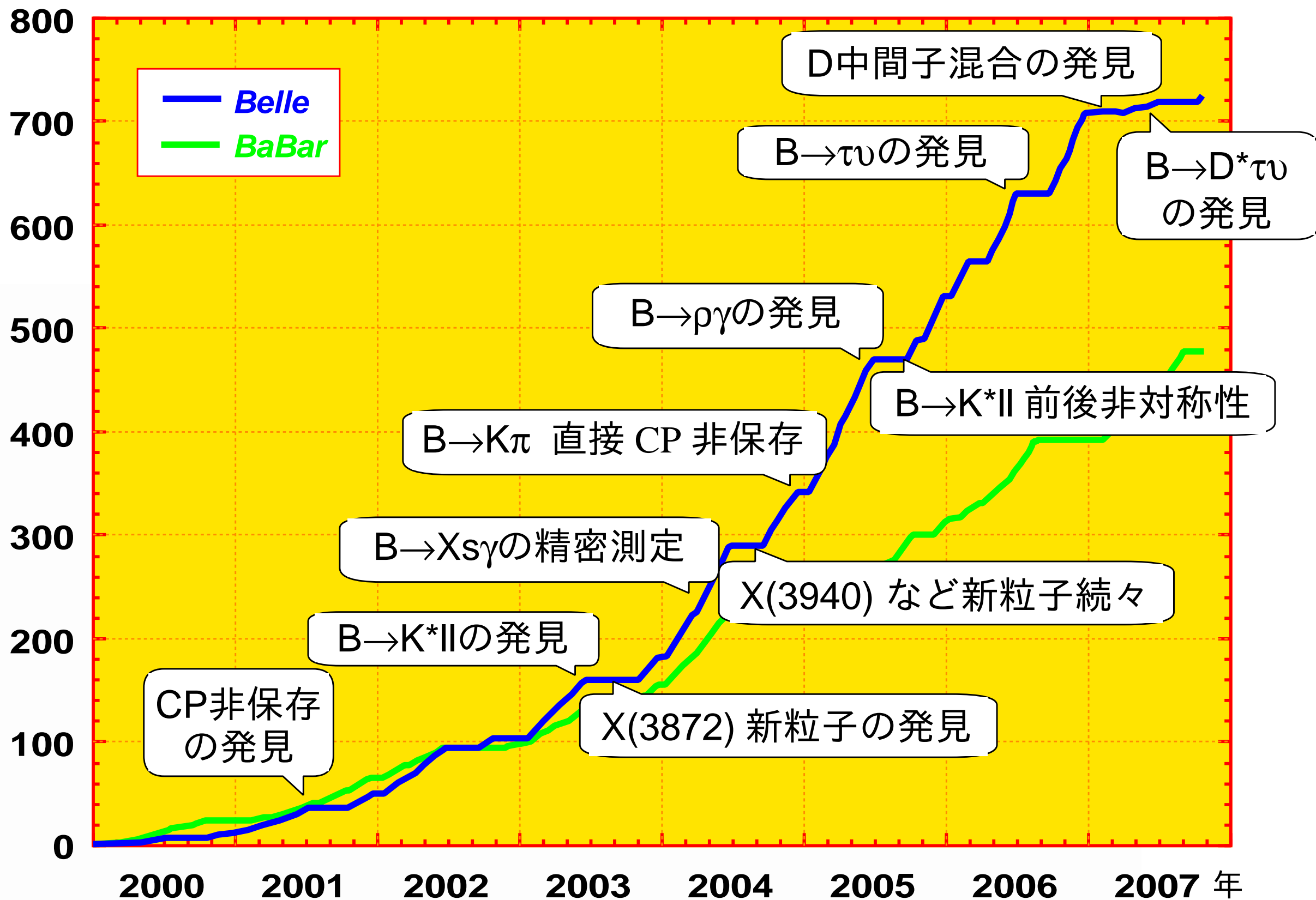
- B 中間子事象を集める
- 崩壊点を測定する
- 検出器の測定誤差などを決める
- 反対側が B^0 か \bar{B}^0 かを決める
- 最後に CP 非対称性の測定

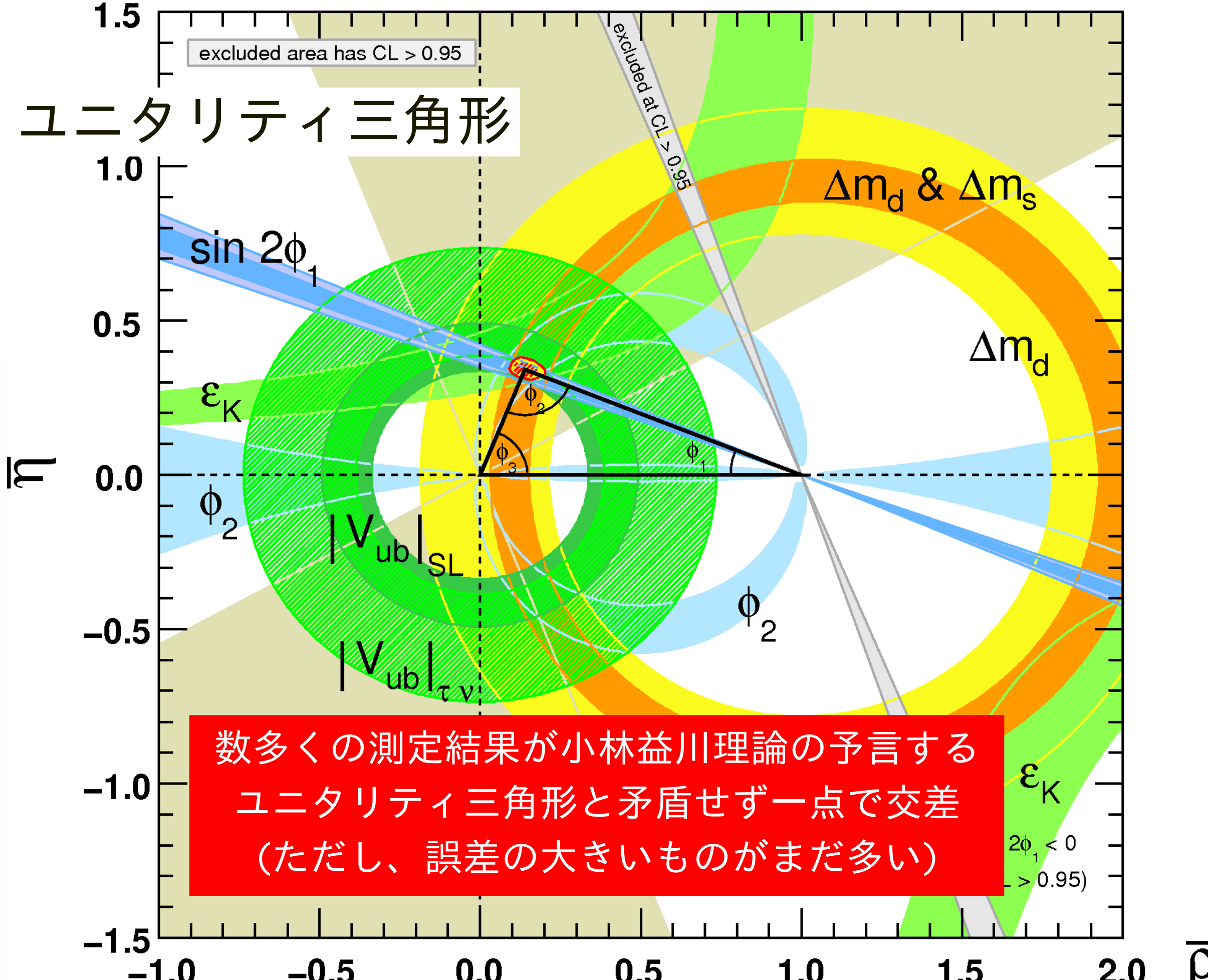


$$\sin 2\phi_1 = +0.642 \pm 0.031 \pm 0.017$$



積分輝度 (単位: fb⁻¹, 約100万 B 中間子対相当)





ユニタリティ三角形

数多くの測定結果が小林益川理論の予言する
ユニタリティ三角形と矛盾せず一点で交差
(ただし、誤差の大きいものがまだ多い)

$2\phi_1 < 0$
(CL > 0.95)