

Belle II実験phase2運転における $ee \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 断面積測定解析

前田 陽祐(名大KMI)

for the Belle II collaboration

2018年10月31日

Flavor Physics Workshop 2018

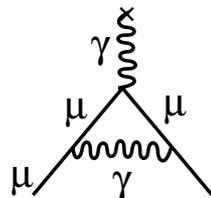
於 東大IPMU



ミューオン $g-2$ と $ee \rightarrow \pi\pi$ 反応過程

□ 標準模型による理論値

$$a_\mu^{\text{SM}} = a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{EW}} + a_\mu^{\text{Had,LO}} + a_\mu^{\text{Had,HO}} + a_\mu^{\text{Had,LbL}}$$



誤差²の内訳



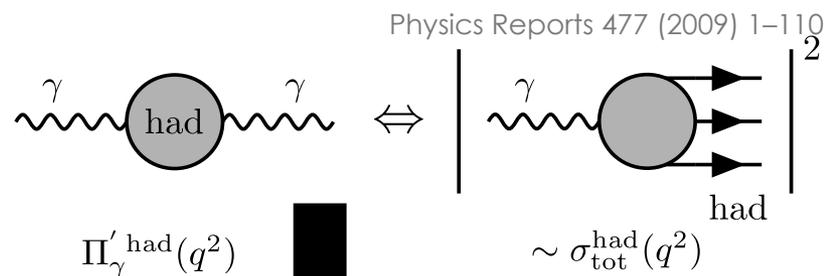
□ ハドロン相互作用の効果が支配的な不定性の要因

□ QCDでは計算が困難

→ $ee \rightarrow (\text{hadrons})$ 断面積の測定結果をもとに計算

□ この測定値の精度が理論計算の誤差を決めている

□ $ee \rightarrow \pi\pi$ 反応過程が最も大きく寄与する



$$a_\mu^{\text{had;LO}} = \left(\frac{\alpha m_\mu}{3\pi}\right)^2 \int_{m_\pi^2}^{\infty} \frac{ds}{s^2} K(s) R(s) \quad \mathcal{O}(1)$$

$$R_{\text{had}}(s) = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}) / \frac{4\pi\alpha(s)^2}{3s}$$



Belle II実験での $ee \rightarrow \pi\pi$ 断面積測定

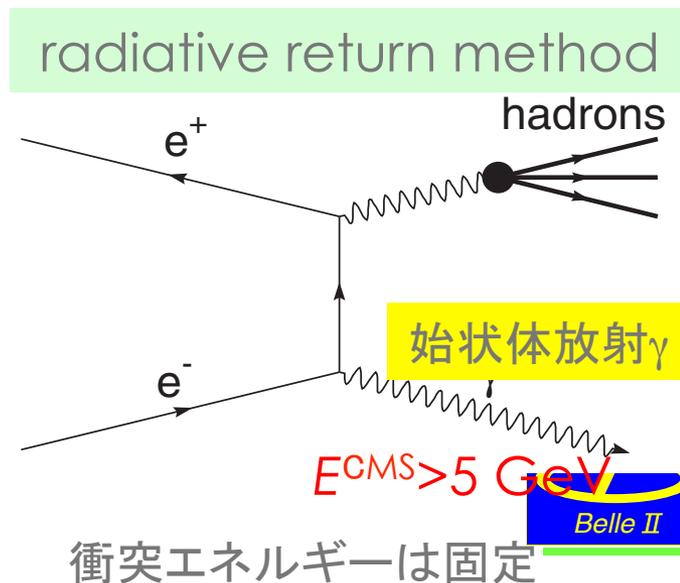
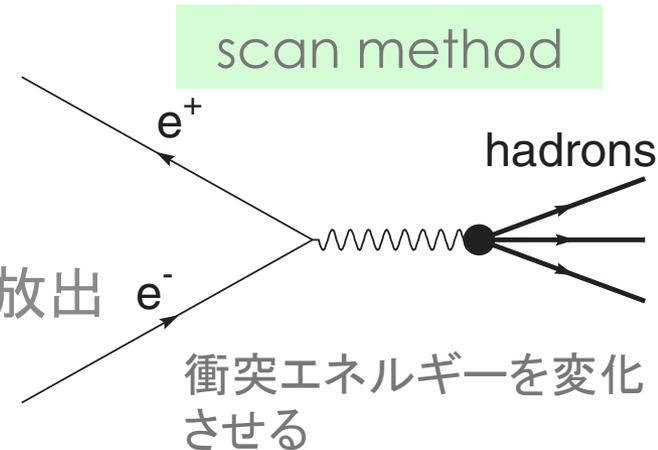
□ radiative return method:

$ee \rightarrow \pi\pi\gamma$ 事象を観測

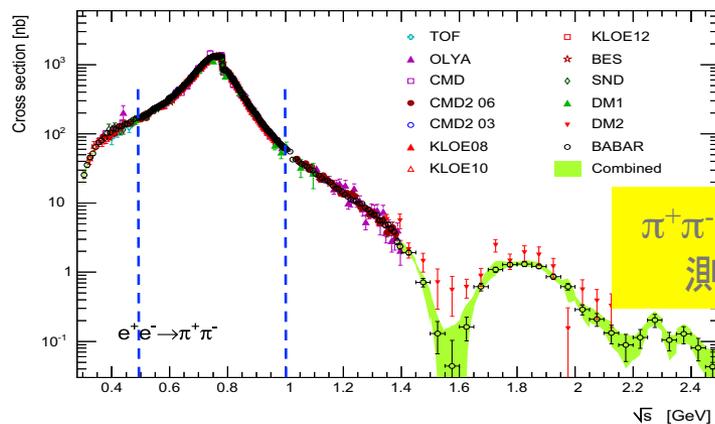
- 始状態放射 (ISR) で高エネルギー γ を放出
→ 実効的に低いエネルギーでの衝突を再現
- 見たいハドロンを全て捉え、
その不変質量を再構成
→ 各種実験的補正
(選別効率, 背景事象, unfolding...)
→ 各 \sqrt{s} での断面積に焼き直し

□ $\pi\pi\gamma$ (signal) と同時に $\mu\mu\gamma$ (normalization) を測定

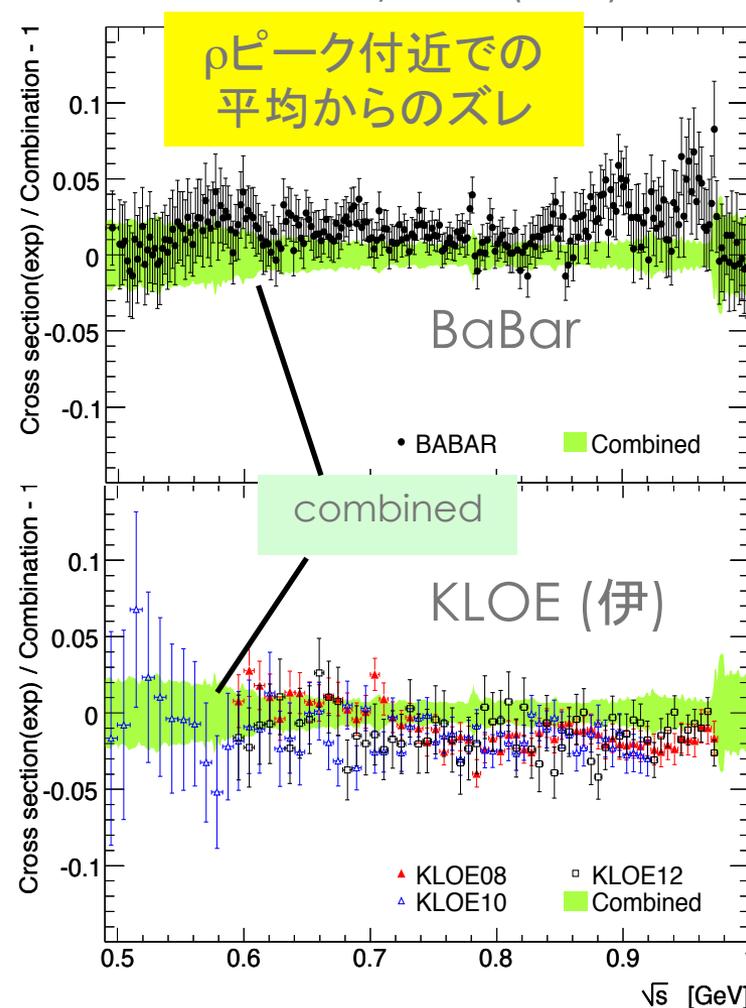
- 各種系統誤差を相殺



$\pi\pi$ 生成断面積測定 of 現状



Eur. Phys. J. C (2017) 77:827



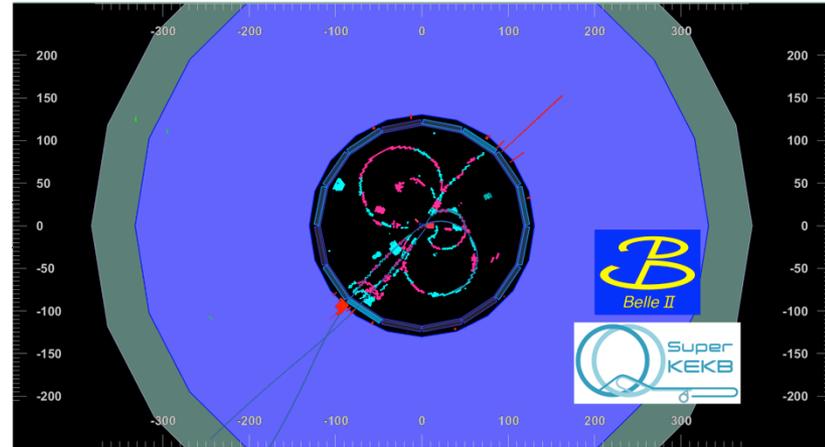
- 既に高精度 ($\lesssim 1\%$) での測定が数々の実験でなされている
- しかし実験間で数%のズレがある
→ 世界平均の誤差は依然大きい
- Belle IIでの検証が重要
 - 目標精度 : 0.5%
(BaBarと同レベル/超えるレベル)

Belle / Belle IIでの測定

- Belle実験では, この測定に適したトリガーを持たなかったため高精度の測定は不可能
- Phase2運転での解析
 - $\pi\pi$ 質量分布
 - ρ メソン共鳴ピークの観測
 - シミュレーションとの比較 : 全体像の理解
 - 各種系統誤差の理解
 - 先ずはトリガー効率

Belle II phase2運転

- 今年3月下旬から開始
- 4月にfirst collision
- 7月中旬までの運転で
472 pb⁻¹のデータを取得



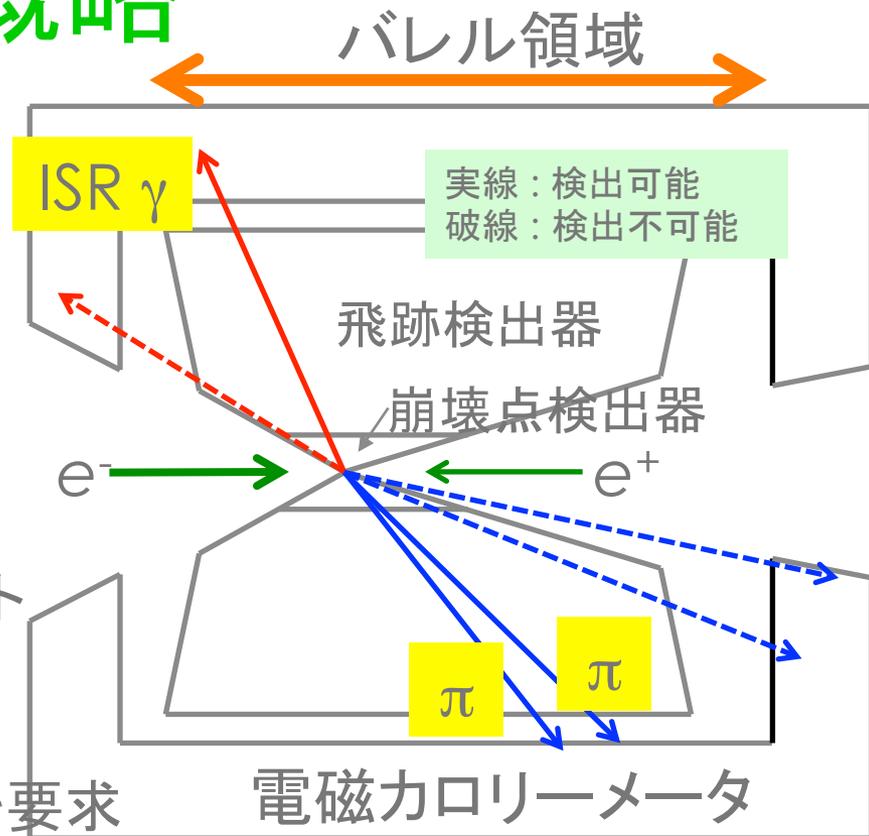
解析概略

□ 要求するオブジェクト

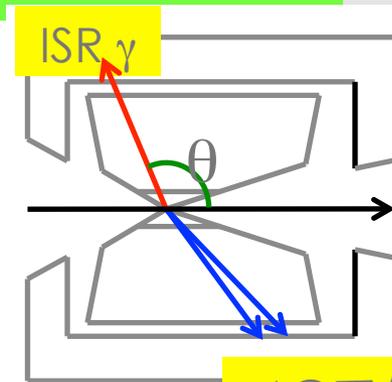
- 高エネルギーの γ (ISR)
($E_{CMS} > 3 \text{ GeV}$)
- 異符号の2トラック
($p > 1 \text{ GeV}/c$)

□ 事象選別

- ISRはバレル中央領域にヒット
← アクセプタンスが大きい
- $10 < M(\pi\pi\gamma) < 11 \text{ GeV}/c^2$
← 他に粒子が存在しないことを要求
- $E/p < 0.8$
← (陽)電子でないことの要求
← Radiative Bhabha ($ee \rightarrow ee\gamma$) を除去



解析概略

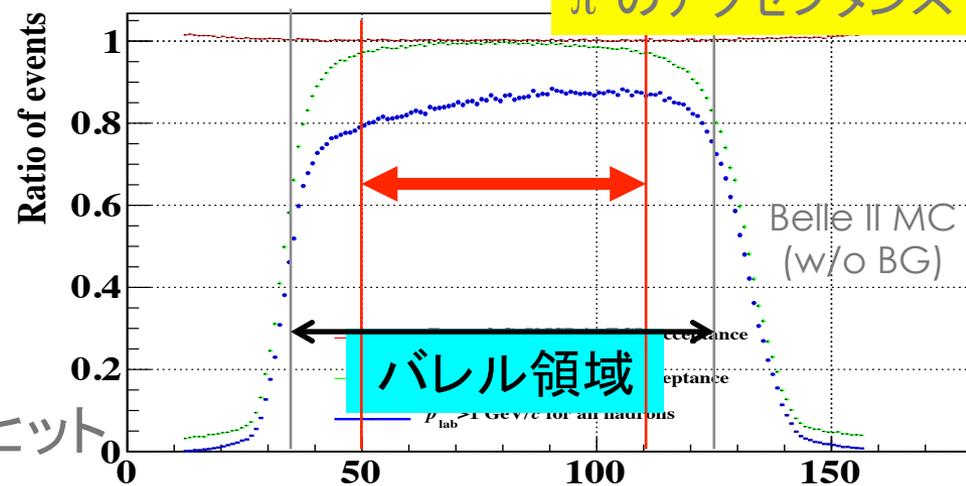


□ 要求するオブジェクト

- 高エネルギーの γ (ISR) ($E_{\text{CMS}} > 3 \text{ GeV}$)
- 異符号の2トラック ($p > 1 \text{ GeV}/c$)

□ 事象選別

- ISRはバレル中央領域にヒット
←アクセプタンスが大きい
- $10 < M(\pi\pi\gamma) < 11 \text{ GeV}/c^2$
←他に粒子が存在しないことを要求
- $E/p < 0.8$
←(陽)電子でないことの要求
←Radiative Bhabha($ee \rightarrow ee\gamma$)を除去



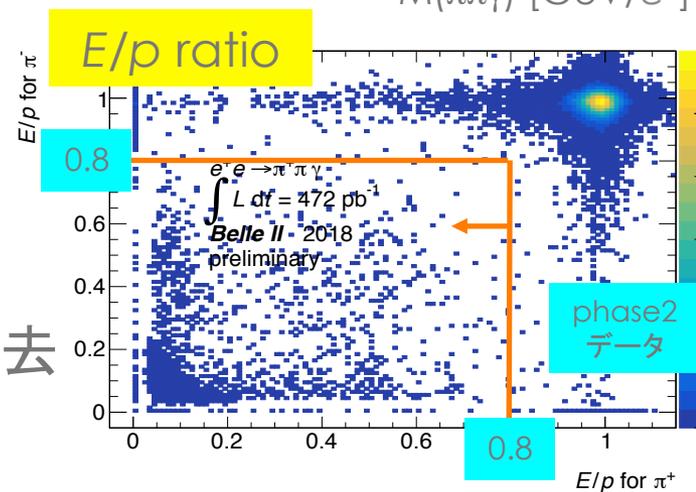
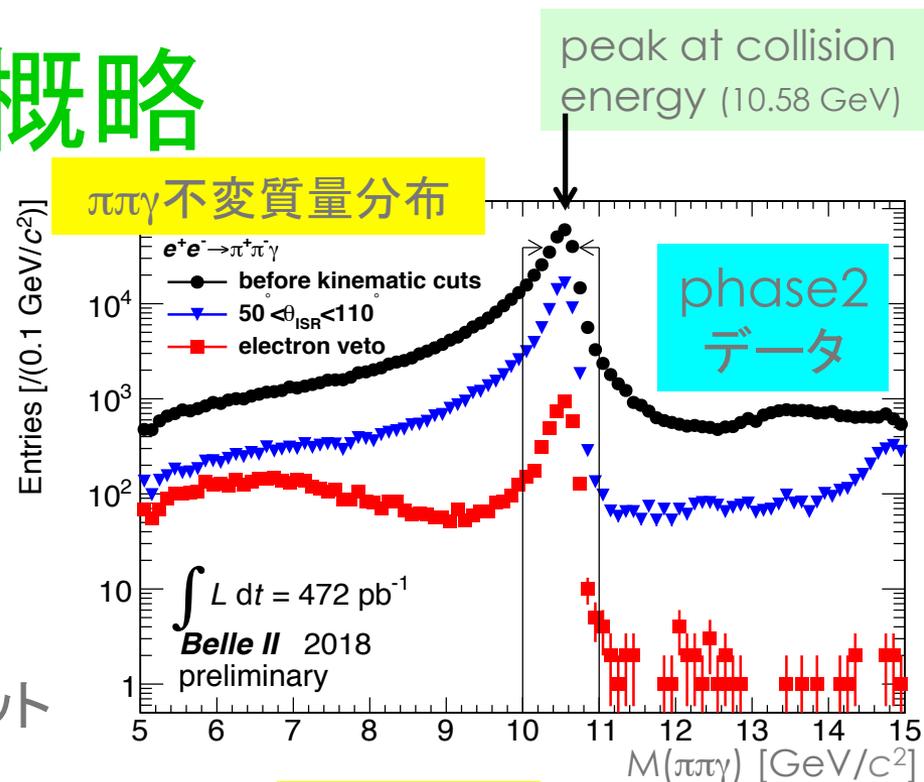
ISR γ の角度 θ [°]

— π^\pm の両方が飛跡検出器に入る

— 運動量が1 GeV/c以上

解析概略

- 要求するオブジェクト
 - 高エネルギーの γ (ISR) ($E_{CMS} > 3$ GeV)
 - 異符号の2トラック ($p > 1$ GeV/c)
- 事象選別
 - ISRはバレル中央領域にヒット
← アクセプタンスが大きい
 - $10 < M(\pi\pi\gamma) < 11$ GeV/c²
← 他に粒子が存在しないことを要求
 - $E/p < 0.8$
← (陽)電子でないことの要求
← Radiative Bhabha ($ee \rightarrow ee\gamma$) を除去



$\pi\pi$ 不変質量分布

□ ρ メソンの明瞭なピークを観測!

Belle II最初の ρ の「再発見」

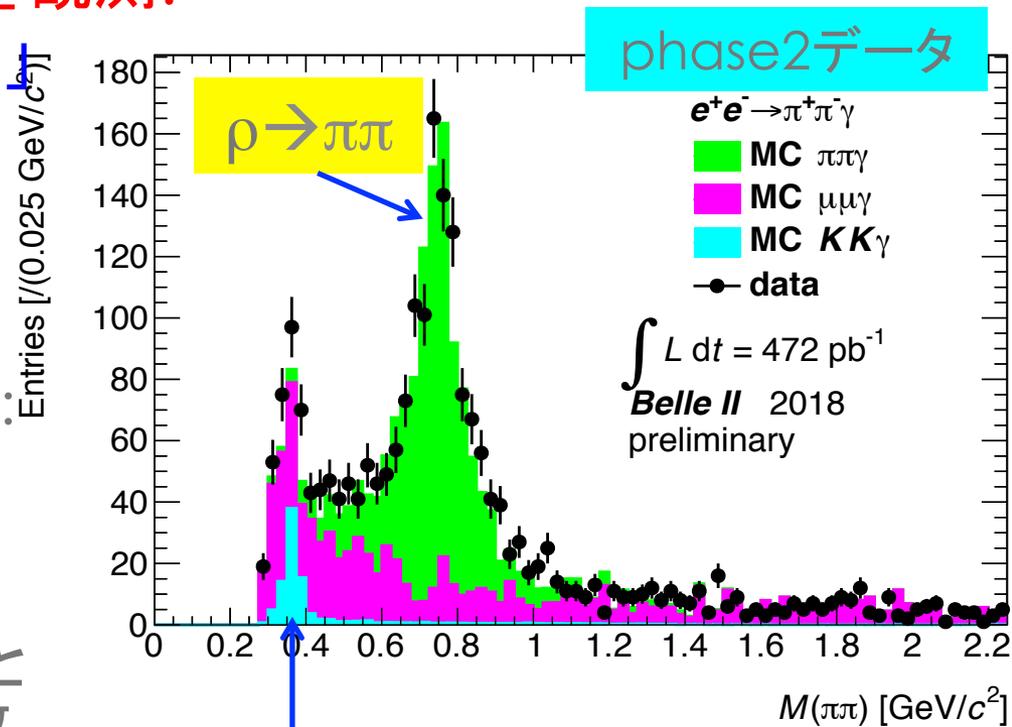
□ E/p 以外の粒子識別を課していない
 $\rightarrow \mu\mu\gamma / KK\gamma$ の寄与が含まれる

□ 低質量領域 ($< 0.5 \text{ GeV}/c^2$):
 $\phi \rightarrow K^+K^-$ ピーク

□ 高質量領域 ($> 1 \text{ GeV}/c^2$):
 $\mu\mu\gamma$ 過程が支配的

□ シミュレーションの予想と観測した分布はよく一致

MCではトリガー効率は100%と仮定



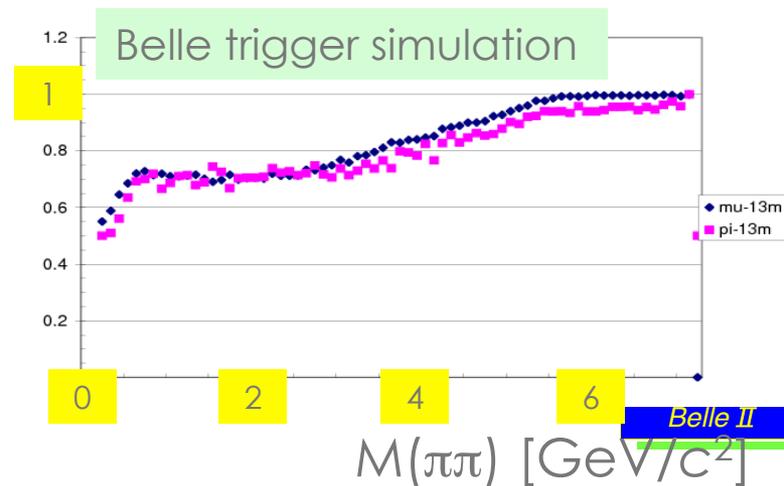
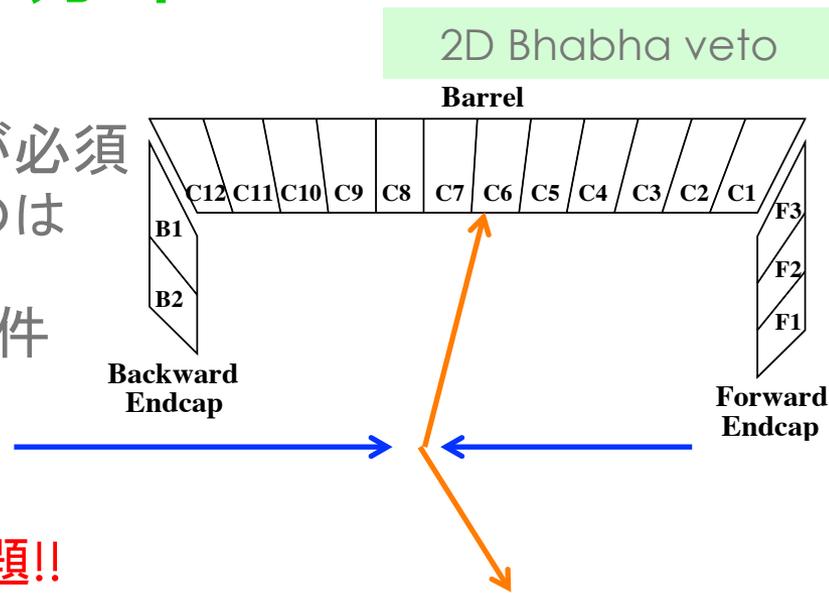
$\phi \rightarrow K^+K^-$

π の質量を仮定するため、
本来の位置からずれる

トリガー効率

→中澤さんの講演
→藪内さんのポスター

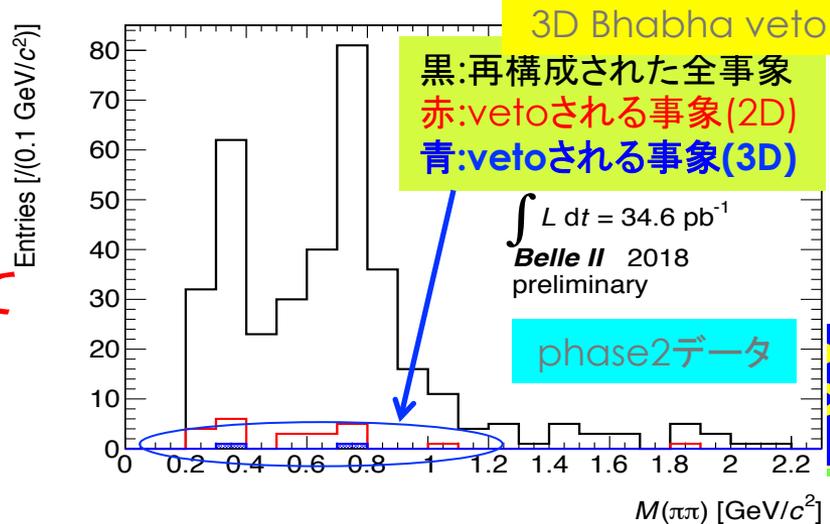
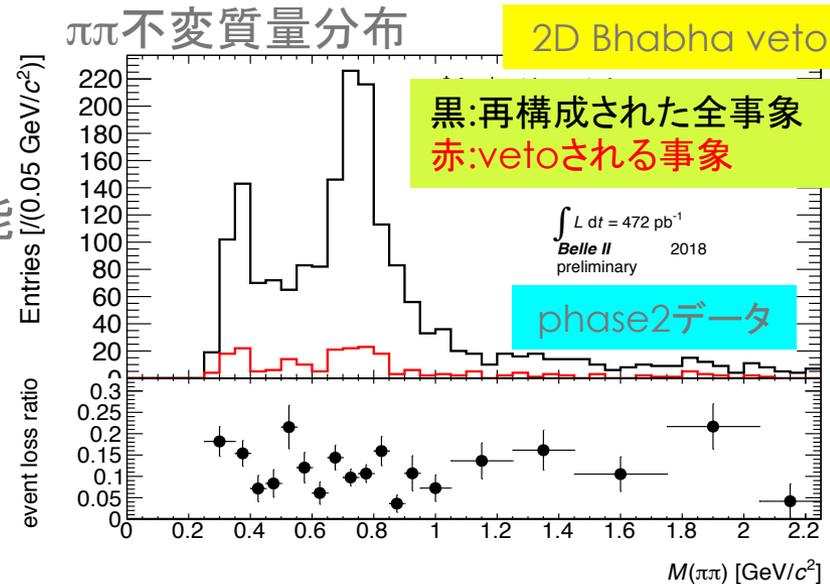
- 精密測定では高いトリガー効率が必要
 - offline解析で精度よく見積もるのは困難
- $ee \rightarrow \pi\pi\gamma$ 解析で用いるトリガー条件
 - カロリーメータでの全エネルギー $> 1 \text{ GeV}$
 - Bhabha veto
 - ← $\pi\pi\gamma$ 事象をvetoしてしまうと問題!!
- phase2でのBhabha vetoロジック
 - *2D Bhabha veto*: θ のみ
→Belleでは大きなロス
 - *3D Bhabha veto*: ϕ も使う
- phase2ではBhabhaも全部取っているので直接ロスするイベントを調べられる



Bhabha vetoによるロスの見積もり

- 2D Bhabha veto
 - phase2の殆どの期間で利用可能
 - $(12.3 \pm 0.8_{\text{stat}})\%$ ($M(\pi\pi) < 2 \text{ GeV}/c^2$)
 - Belleから改良しているが大きなロス
- 3D Bhabha veto
 - phase2最後に導入 (34.6 pb⁻¹のみ)
 - γ の角度領域を広げて統計を稼ぐ [50°, 110°] → [17°, 128°]
 - 2 events / 360 events → $(0.6 \pm 0.4_{\text{stat}})\%$
 - 2Dよりよい性能

→ 今後は3D Bhabha vetoを用いて高統計のデータ取得を行える



今後の展望

BaBar の論文での
系統誤差の一覧
PRD86 032013

- 1%を切る精度で測定するためにはあらゆる事象選別効率を精密に把握しなければならない
 - トリガー
 - トラッキング
 - 粒子識別
 - 背景事象
 - アクセプタンス
 - ...
- phase2データで検出器応答をよく把握し, 高統計でのデータ解析に備える
- 500 fb⁻¹程度で信号事象は十分な統計量に

2トラックが近接している
場合の選別効率の低下

Sources

Trigger/filter

Tracking

π -ID

Background

Acceptance

Kinematic fit (χ^2)

Correl. $\mu\mu$ ID loss

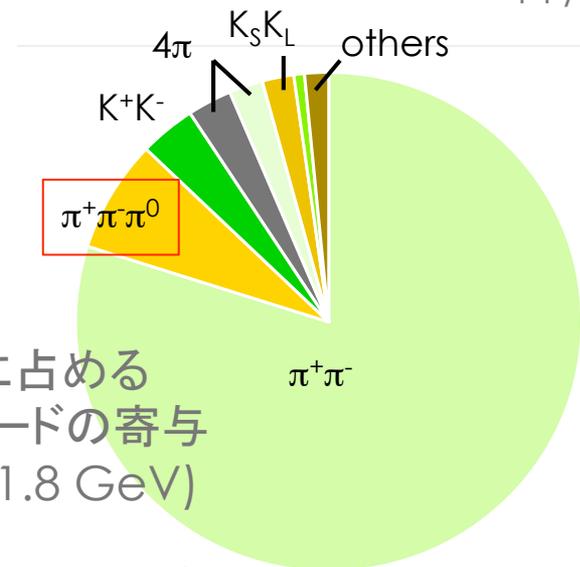
$\pi\pi/\mu\mu$ non-cancel.

Unfolding

ISR luminosity

Sum (cross section)

おまけ



□ $ee \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \gamma$

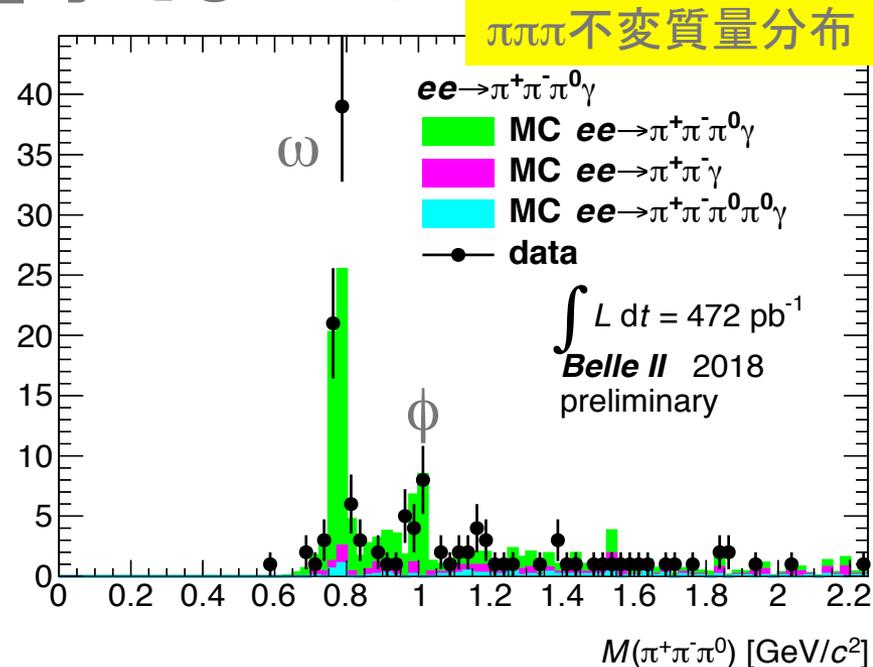
□ ミューオンg-2の計算で
2番目に大きな不定性を与えるモード

□ ω, ϕ のピークを観測

($\omega, \phi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ の
「再発見」)

□ およそシミュレーション
の予測に一致

Entries [(0.025 GeV/c²)]



まとめ

- $ee \rightarrow \pi\pi$ 断面積はミュオン $g-2$ のハドロンの寄与を計算するために重要な入力値
- Belle IIでの精密な測定を行うべくphase2のデータを用いた解析を行っている
- ρ メソンのピークを観測し、シミュレーションと同程度の事象数を得た
- 3D Bhabha vetoを用いることで高いトリガー効率が期待できる