


$e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の反応を用いた
 π^0 中間子遷移構造関数の測定

高エネルギー物理学研究室

青山美嶺

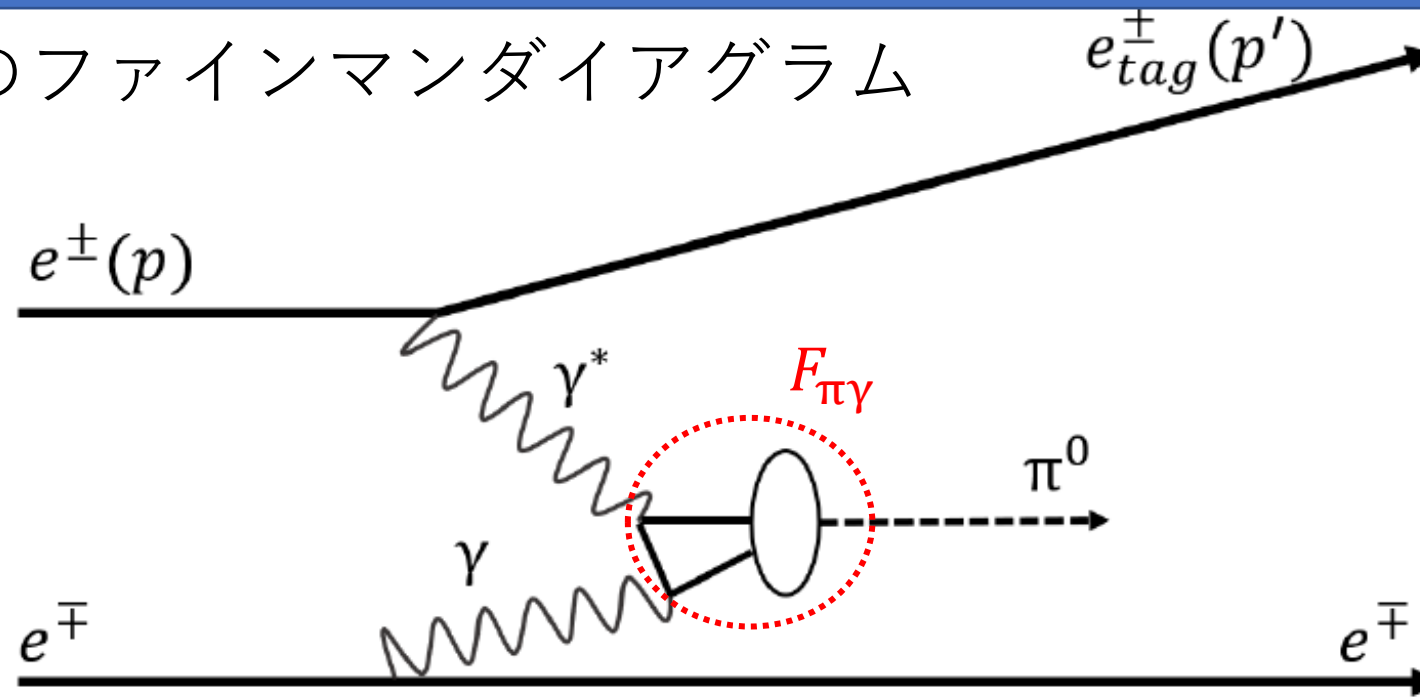


目次

1. 研究目的
2. 研究背景
3. Belle II 実験
4. $e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の事象選別
 1. 前段階の大まかな選別
 2. 未タグ粒子が電子あることを保証する選別
 3. VCS事象の軽減
5. $e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の微分断面積の測定
6. まとめ

研究目的

$e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ のファインマンダイアグラム



本研究の目的は、**終状態に一つの散乱された e^\pm と一つの π^0 の事象を検出し、反応断面積の Q^2 依存性を精度よく測定**

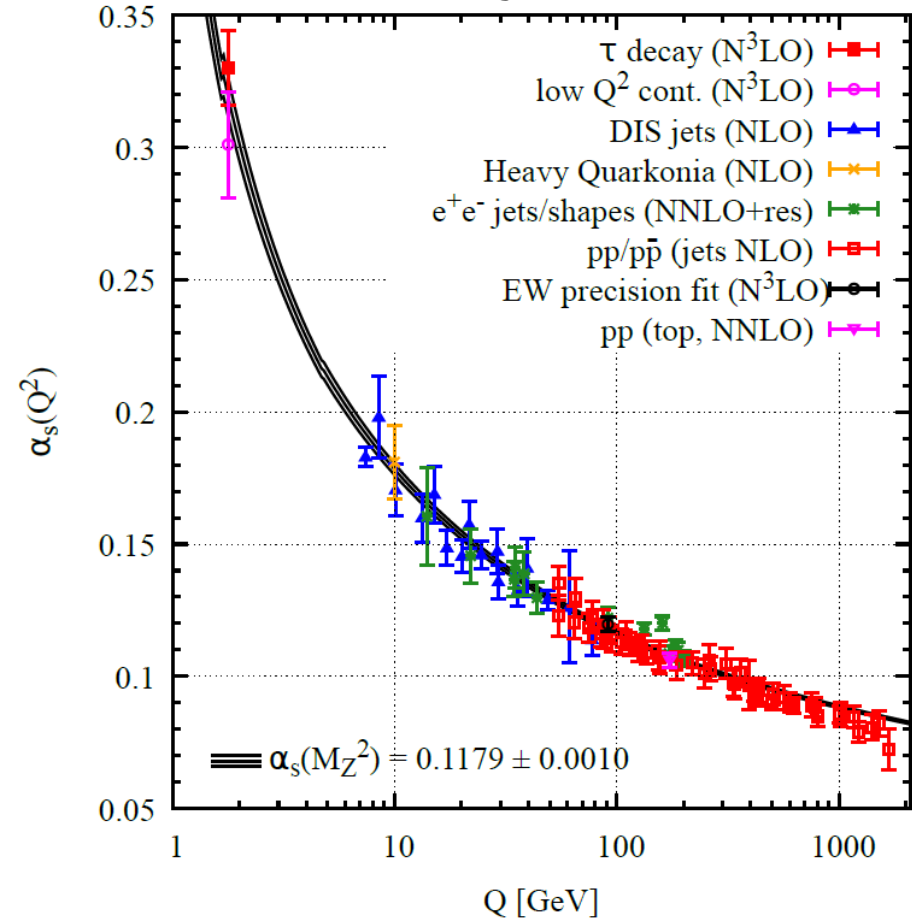
$Q^2 = -(p - p')^2$ p はビームの4元運動量、 p' はtag_eの4元運動量

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} \sim \frac{|F_{\pi\gamma}(Q^2)|^2}{Q^2}$$

それにより、 π^0 遷移構造関数 ($F_{\pi\gamma}(Q^2)$)を測定する

- ハドロンが関与するインクルーシブな高エネルギー現象は量子色力学でよく記述されることが知られている。
- エクスクルーシブ反応は高エネルギー低エネルギー両方関与している。
- エクスクルーシブはQCDではどこまで記述できるかが課題

様々な高エネルギーハドロン反応から求められたクォークとグルーオンの結合定数 α_s とエネルギースケール Q の関係



P. A. Zyla *et al.*, (Particle data group), Prog. Theor. Exp. Phys. **2020** Fig.9.3,083C01 (2020).

研究背景

本過程の重要性は今から約40年前に、LapageとBrodskyらによって指摘。

- 十分高い Q^2 の領域において、TFF（遷移構造関数）は、摂動論的QCD(pQCD)によって取り扱うことが可能で、 π TFF はハードな $\gamma\gamma^* \rightarrow \bar{q}q$ 散乱を記述する散乱振幅と非摂動論的な π 中間子の分布振幅 ($\Phi_\pi(x, Q^2)$) 用いて記述することができる。

$$Q^2 F_{\pi\gamma} = \frac{4f_\pi^{BL}}{3} \int_0^1 \left[\frac{\Phi_\pi^{BL}(x, (1-x)Q)}{1-x} + O(\alpha_s) \right] dx$$

ここで、 x は π^0 内の u, d クォークが持つ縦運動量と π^0 の縦運動量の比、

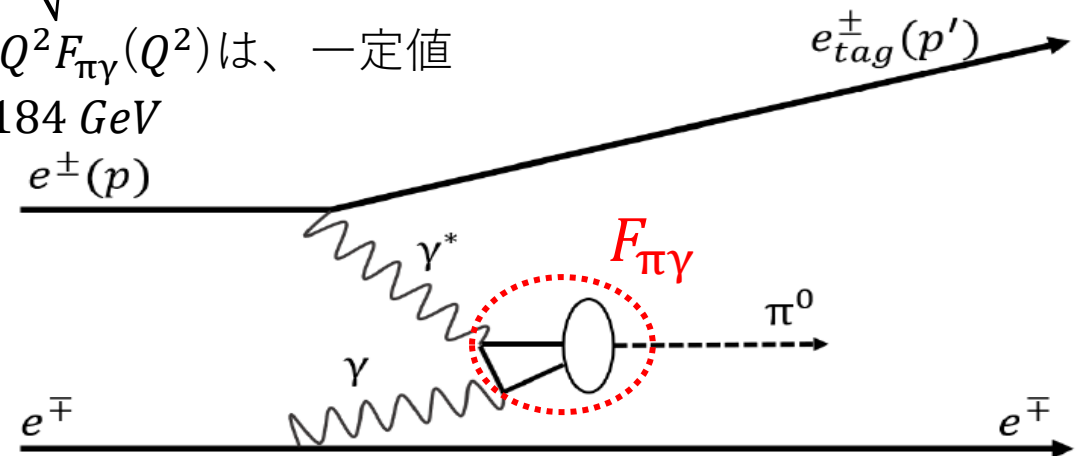
Φ_π^{BL} はLapageとBrodskyが定義した π 中間子の分布振幅、 f_π^{BL} はパイオンの崩壊定数である。
pQCDによれば高い Q^2 の極限での分布振幅の値が知られている。

$$\Phi_\pi^{BL,asym} = \Phi_\pi^{BL}(x, Q^2 \rightarrow \infty) = \sqrt{3f_\pi x(1-x)}$$

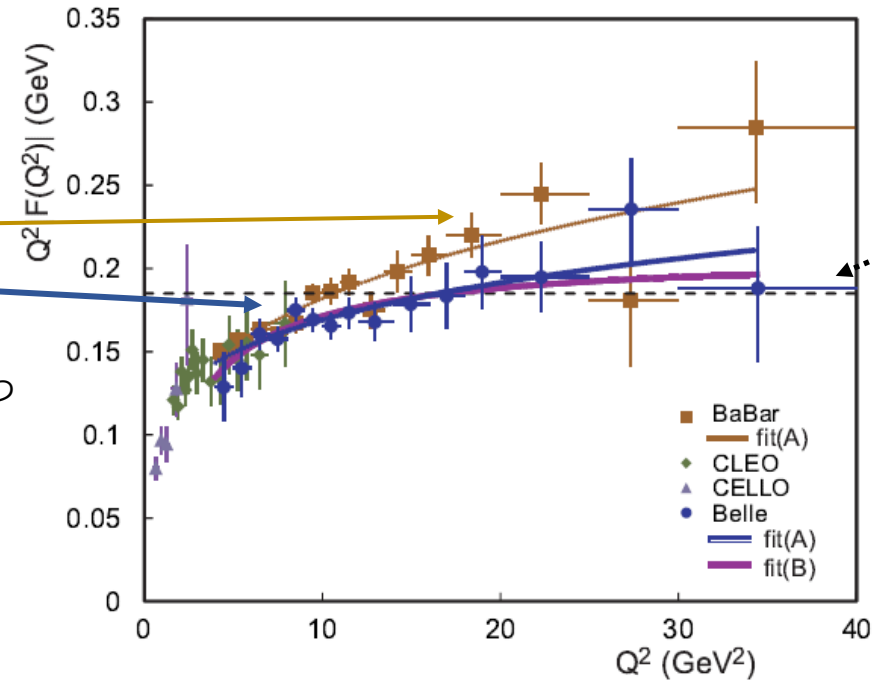
これは漸近解(asymptotic) 呼ばれ、これを用いると $Q^2 \rightarrow \infty$ で $Q^2 F_{\pi\gamma}(Q^2)$ は、一定値

$$\lim_{Q^2 \rightarrow \infty} Q^2 F_{\pi\gamma}(Q^2) = 0.184 \text{ GeV}$$

に近づくと、pQCDは予言する。

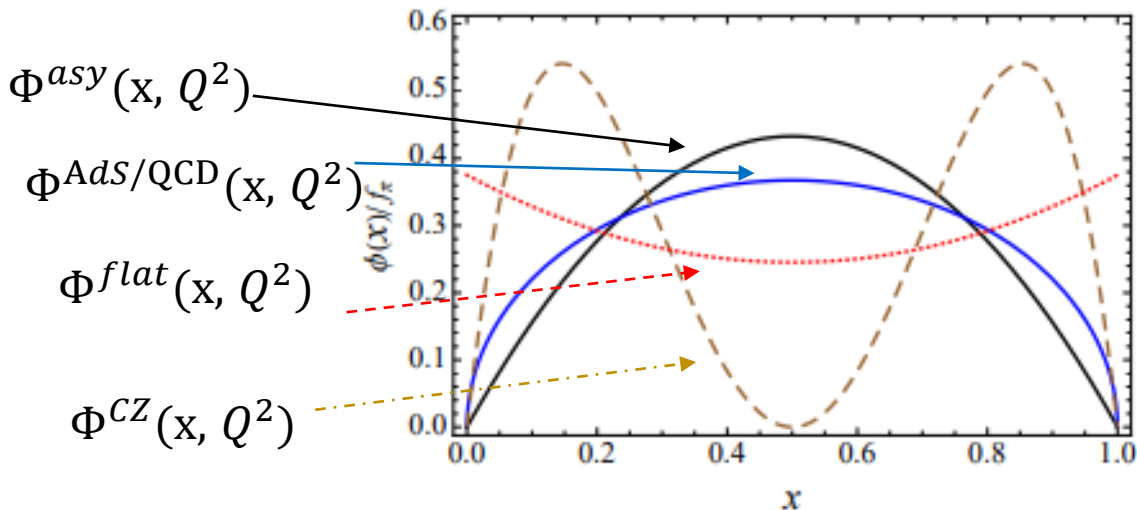


右図：これまでの $F_{\pi\gamma}(Q^2)$ の測定結果
 CELLO、CLEO、BaBar (茶色)、Belle (青)
 $Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$ 以上で測定誤差が大きい。
 BaBarのデータが報告されたとき、その解釈をめぐって議論され、様々な可能性が提案された。



pQCDからの予言
 $Q^2 \lim_{Q^2 \rightarrow \infty} Q^2 F_{\pi\gamma}(Q^2) = 0.184 \text{ GeV}$

4つのモデルによる π^0 の分布振幅

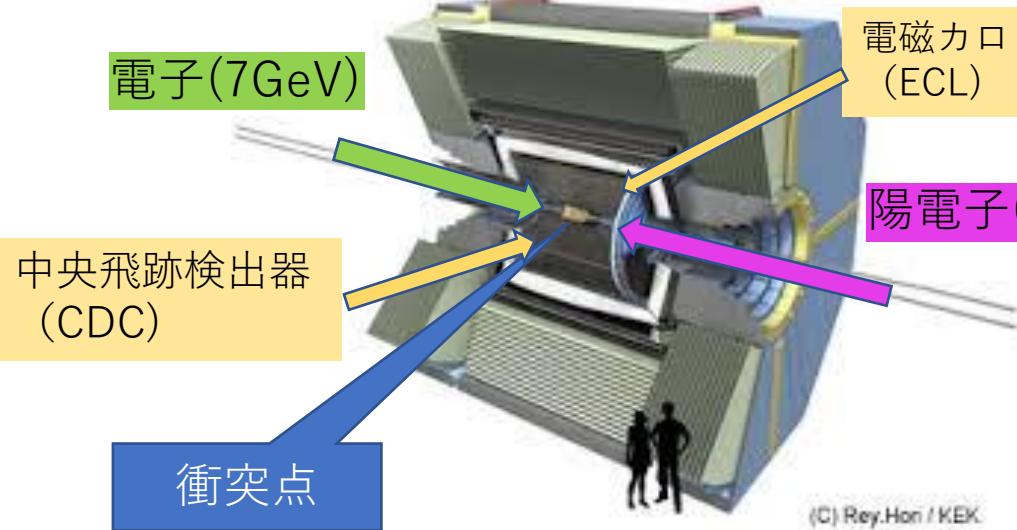


S. Uehara, H. Nakazawa, Y. Watanabe
et al., [Belle Collaboration], Phys. Rev, D **86**, 092007 (2012).

- 分布振幅は、ハドロン中でクォークが運動量比 x をもつ振幅を表す。
- 現状のデータでは左図のモデルを説明するのに精度が不足
- $F_{\pi\gamma}(Q^2)$ を精度よく測定することが重要

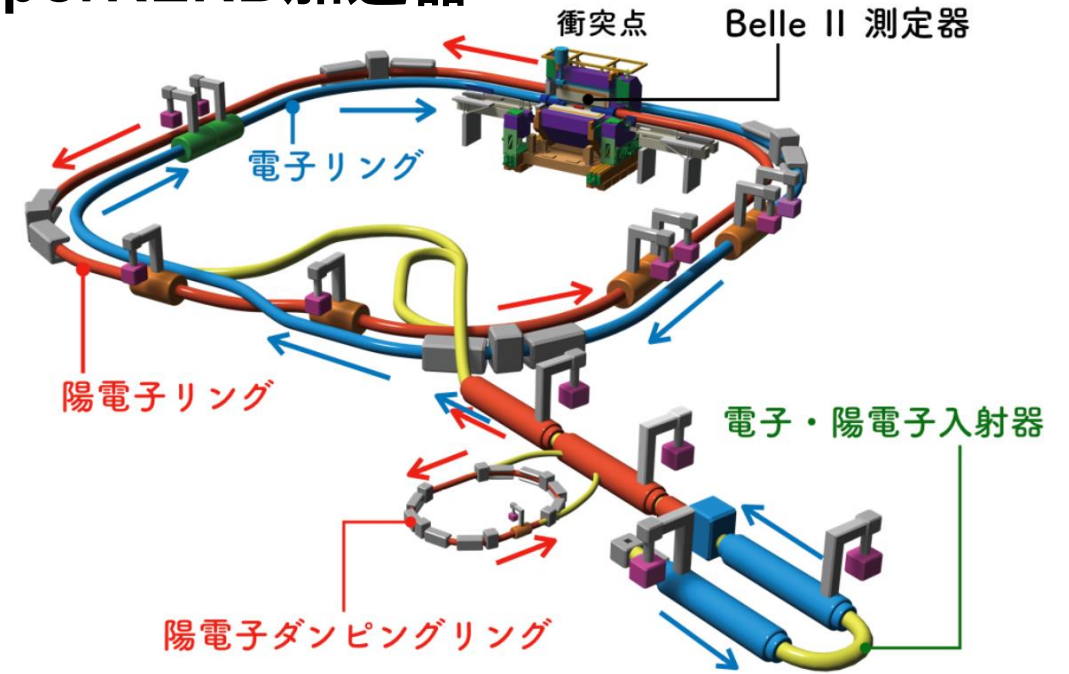
- **SuperKEKB加速器**を使い7 (GeV)の電子と4(GeV)の陽電子を衝突させている。
- B中間子の物理、新物理の探索、稀な物理事象を高統計・高精度に探索することを目的とする。

Belle II 検出器



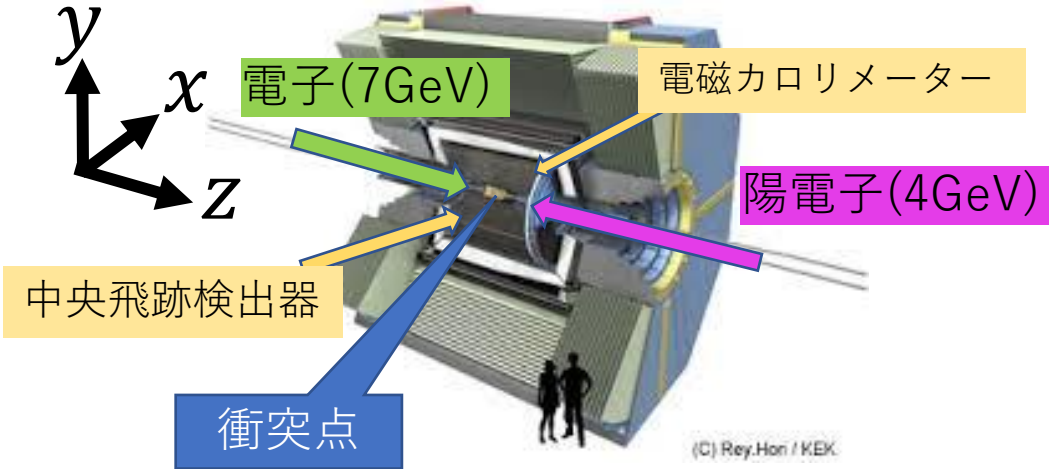
崩壊点位置検出器：崩壊点の測定
中央飛跡検出器：荷電粒子の飛跡、運動量測定
粒子識別検出器：粒子の識別
電磁カロリメーター：電子の識別、光子のエネルギー測定

SuperKEKB加速器

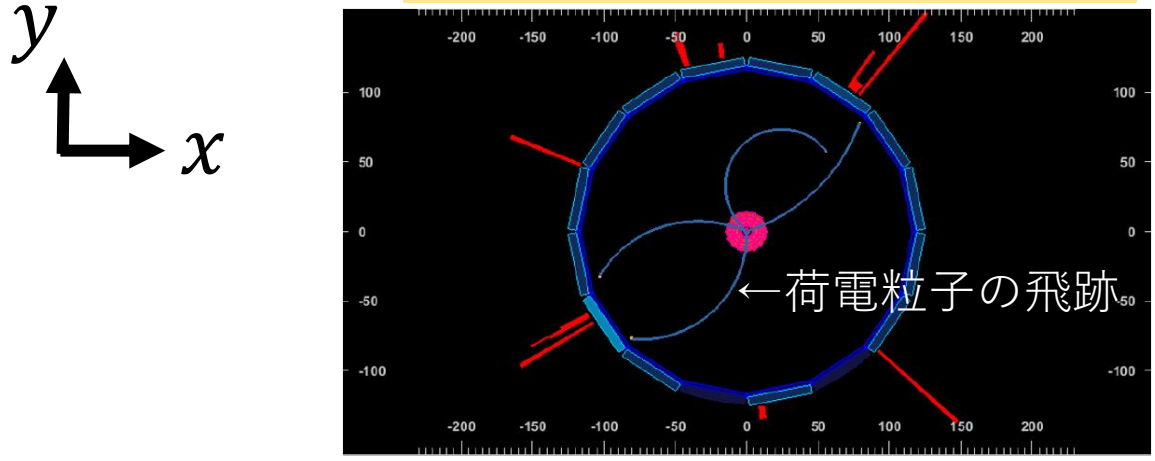


Belle II 実験

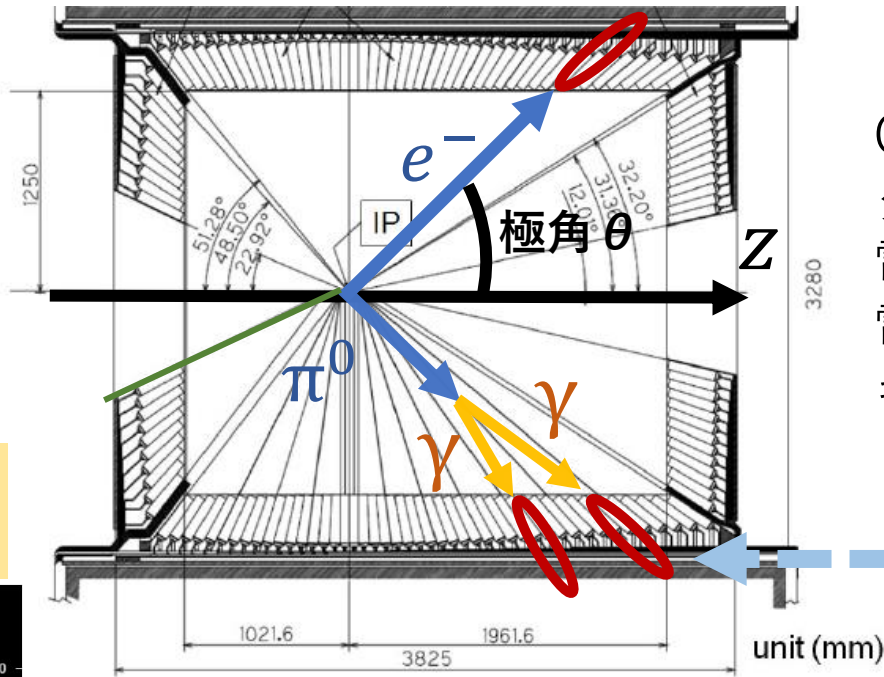
Belle II 検出器



中央飛跡検出器
Central Drift Chamber (CDC)



電磁カロリメーター
Electromagnetic calorimeter (ECL)

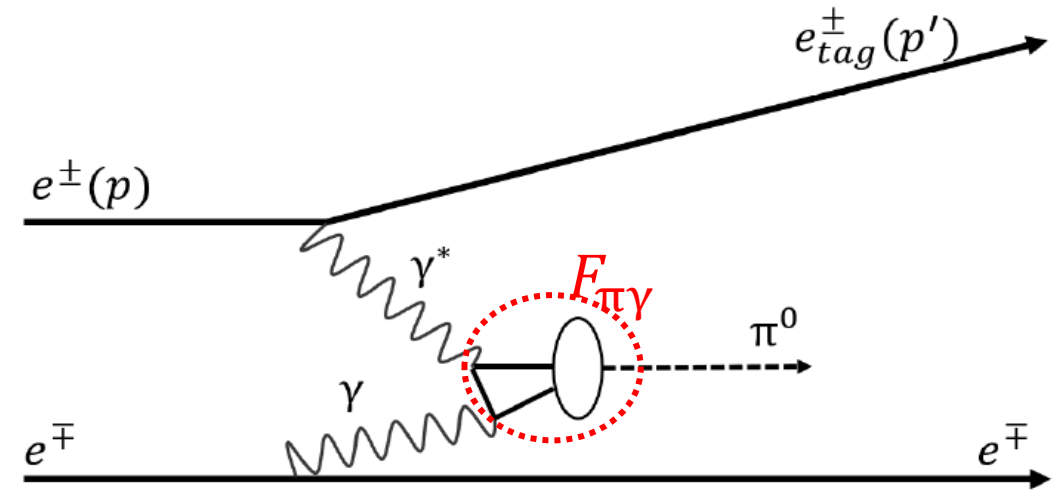
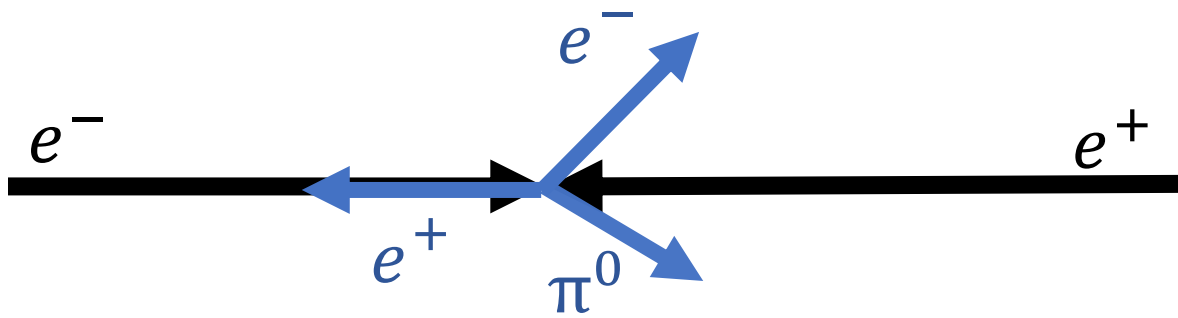


CsI結晶シンチレーターと反応し生じた電磁シャワーにより電子、光子のエネルギーを測定する。

クラスタ

荷電粒子の飛跡を再構成し、運動量を測定する。

$e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の特徴



- 終状態に電子（または陽電子）が一つ。
- π^0 が一つ。
- もう一方の陽電子（または電子）がビーム軸に沿って抜けている。

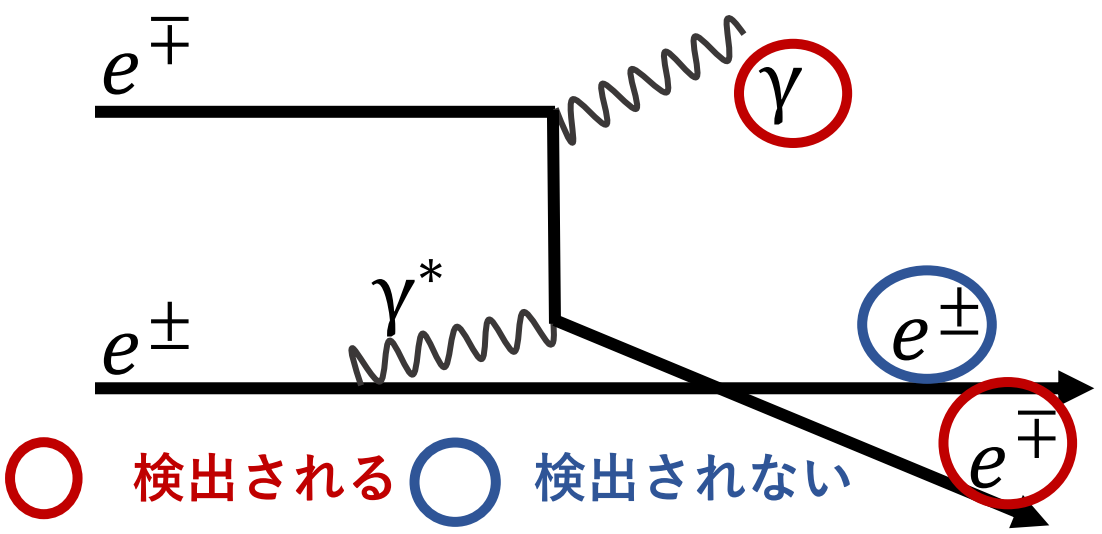
※必要の時には電子と陽電子をまとめて電子とよぶ。

※以降、ビームに沿って抜けた粒子を未タグ粒子、検出された粒子をタグ粒子と呼ぶ。

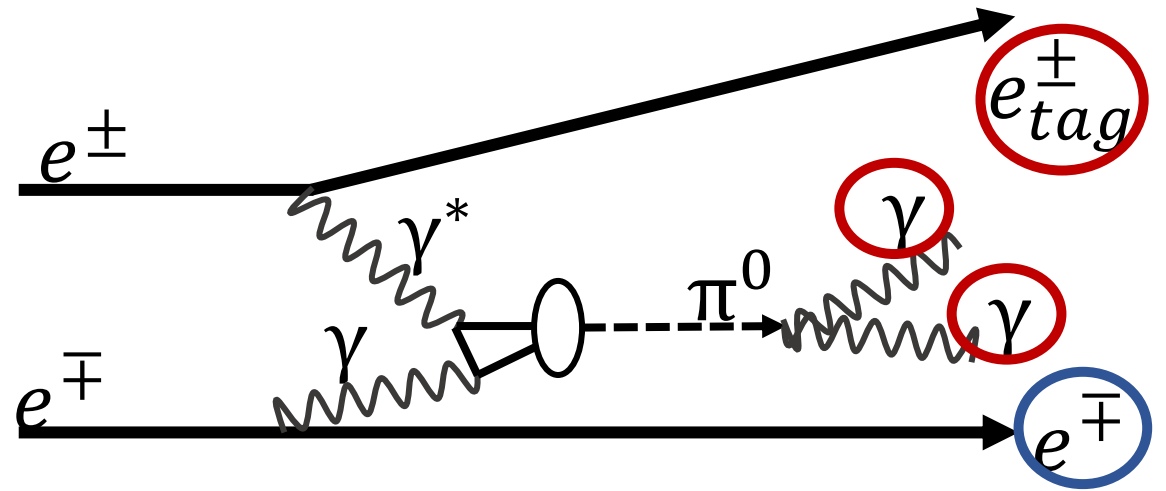
$e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の背景事象

1. Radiative Bhabha 散乱 ($e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\gamma$)
2. **Virtual Compton scattering : VCS** ($e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\gamma$)
(特殊な Radiative Bhabha 散乱) ← **主な背景事象 (断面積が数千倍) !**
3. e^+e^- 対消滅におけるハドロン生成
($e^+e^- \rightarrow \bar{q}q$ 生成粒子のほとんどの粒子がビーム軸方向に抜けた場合背景事象となる)

VCS($ee \rightarrow ee\gamma$) のファインマンダイアグラム



$ee \rightarrow ee\pi^0$ のファインマンダイアグラム



終状態の違いは γ か π^0 のみで、非常によく似ている!!

信号選別条件を決めるために、様々な観測量について、信号事象や背景事象がどのように分布するかを知る必要がある。

いくつかの疑似事象をモンテカルロシミュレーション (MC) で生成。

生成したMCサンプルはBelle II 検出器シミュレーションを通し、実際のデータと同様に解析。

信号事象の発生

Belleの解析で用いたものと同じシングル π^0 の事象発生プログラムを使用し、信号 MC生成。

背景事象の発生

最大の背景事象のVCS事象の発生に特化したプログラムTEEGGを用い、VCS MCを生成。

使用した実験データ

Belle II 測定器で2019年3月末から2019年12月末までに測定したデータ合わせて12.4 fb^{-1} のデータを使用した。

- (1)前段階の大まかな選別。
- (2)未タグ粒子が電子あることを保証する選別。
- (3)VCS事象の軽減。

(1) 前段階の大まかな選別

電子が一つ

電子の飛跡の条件：

運動量 $P_t > 0.15$ GeV、衝突点からきている、電子である確率 > 0.7 、 $E > 1.5$ GeVを要求。

π^0 の数が一つ

二つの γ から π^0 を再構成、

$0 < M_{\gamma\gamma} < 0.5$ GeV、 $E > 0.5$ GeVを要求。

γ (光子) について

$E > 0.1$ GeV、 $0.3 < \theta_\gamma < 2.6$ radianを要求。

電子以外の飛跡がない

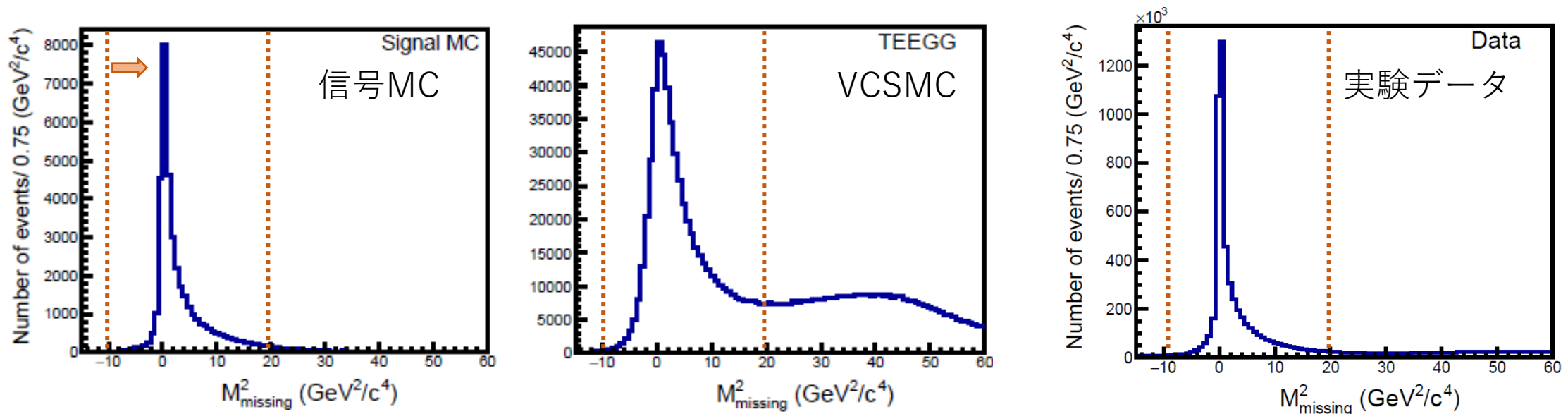
飛跡の条件：

運動量 $P_t > 0.15$ GeV、衝突点からきている、電子である確率 < 0.7 を要求。

(2) 未タグ粒子が電子あることを保証する選別。

1. $M_{missing}^2$

- $M_{missing}^2 = (p_e^- + p_e^+ - p_e^{tag} - p_{\pi^0})^2$ で定義される。
- p_e^\pm はビーム電子と陽電子の 4 元運動量、 p_e^{tag} と p_{π^0} はタグされた電子と π^0 候補の 4 元運動量。終状態でビーム軸に逃げているのは電子、 $M_{missing}^2$ は電子の質量の二乗になる。

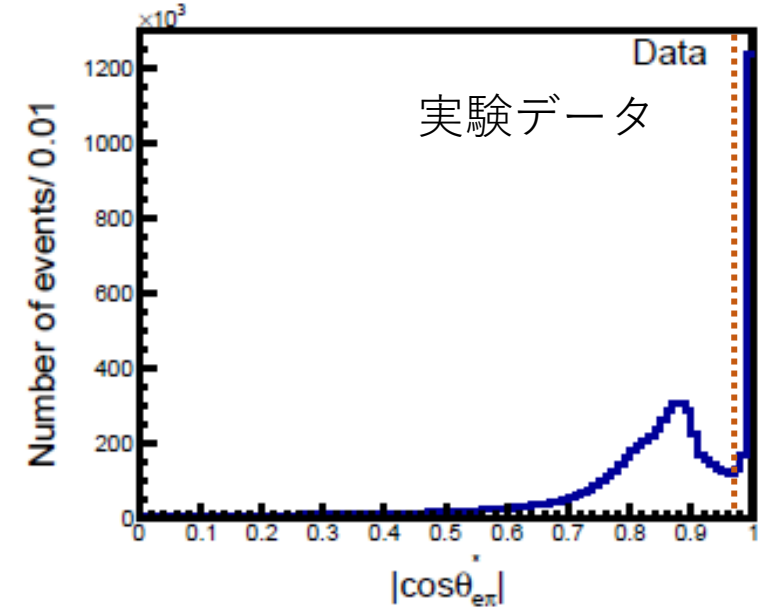
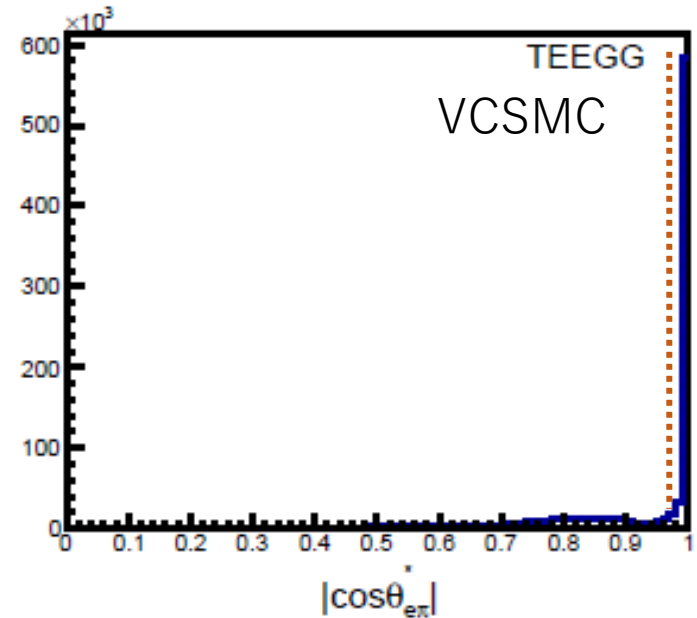
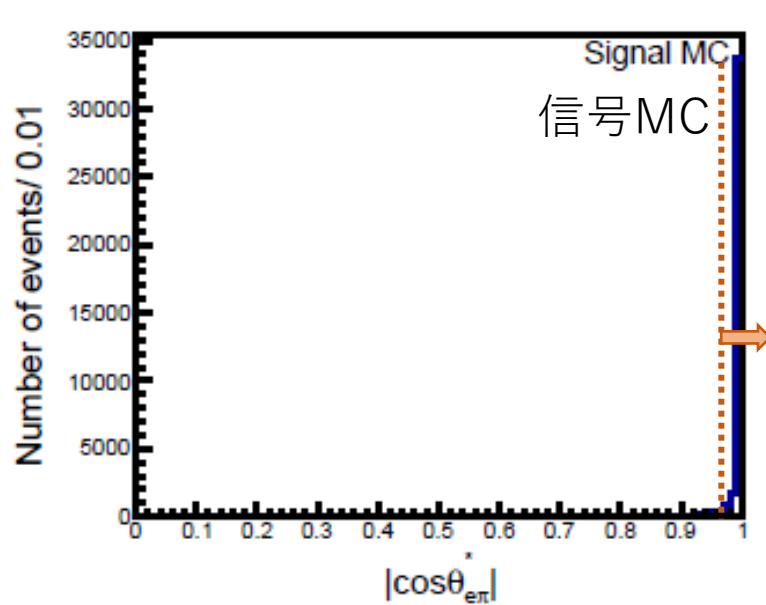
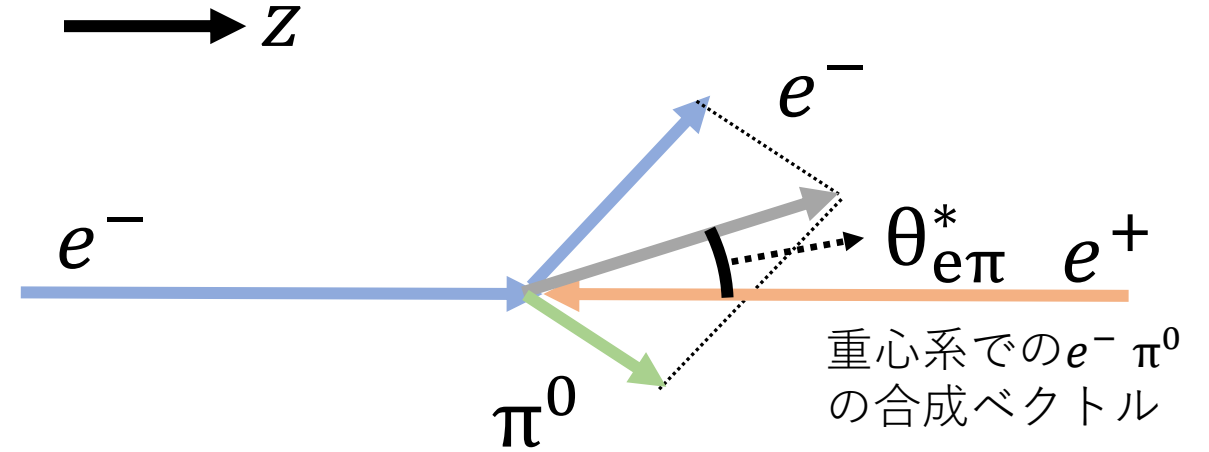


$-10 \text{ GeV}^2/c^4 < M_{missing}^2 < 20 \text{ GeV}^2/c^4$ を条件とした。

(2) 未タグ粒子が電子あることを保証する選別。

2. $\cos \theta_{e\pi}^*$

- $\theta_{e\pi}^*$ は重心系での e と π^0 の合成ベクトルと z 軸との間の角度。
- e と π^0 の合成ベクトルの方向は、未タグ電子の逆方向であり、ビーム方向に向いている ($\cos \theta_{e\pi}^*$ ほぼ ± 1) ことが期待される。

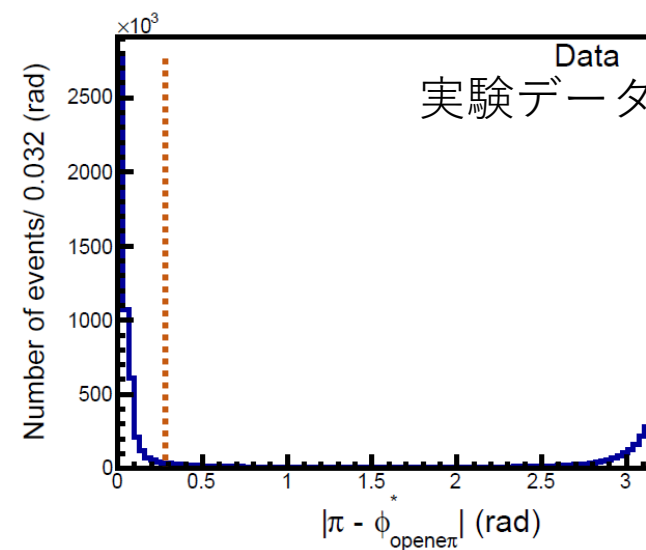
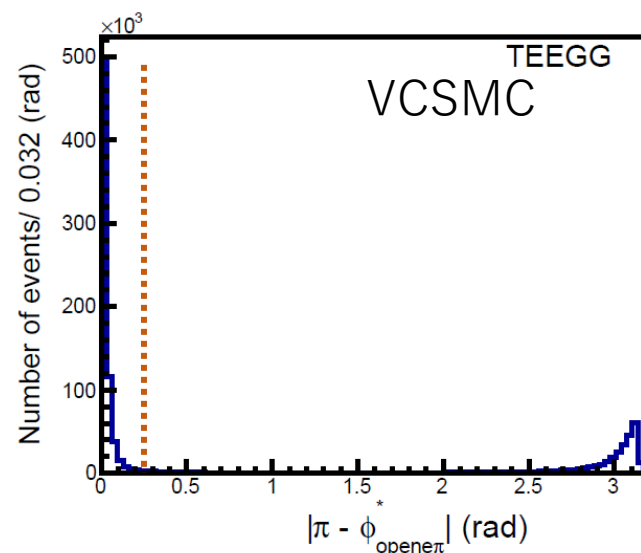
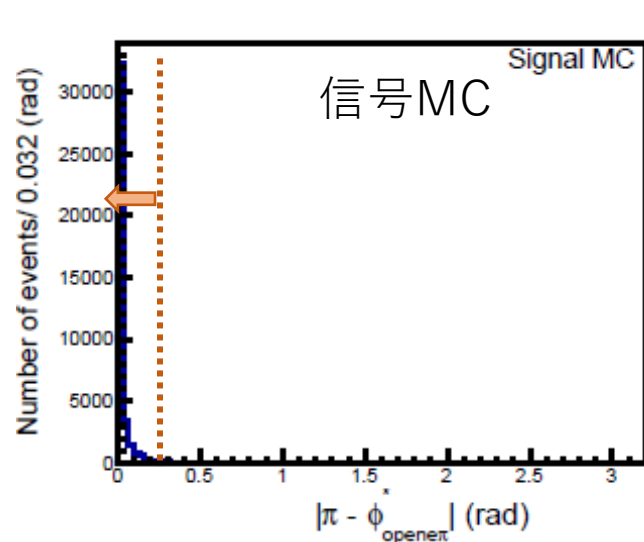
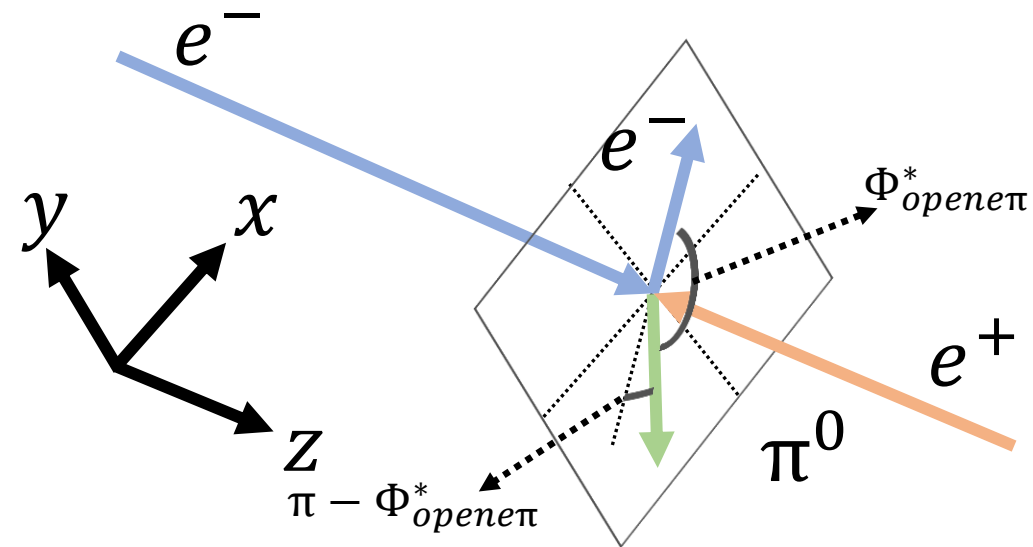


$|\cos \theta_{e\pi}^*| > 0.98$ を条件とした。

(2)未タグ粒子が電子あることを保証する選別。

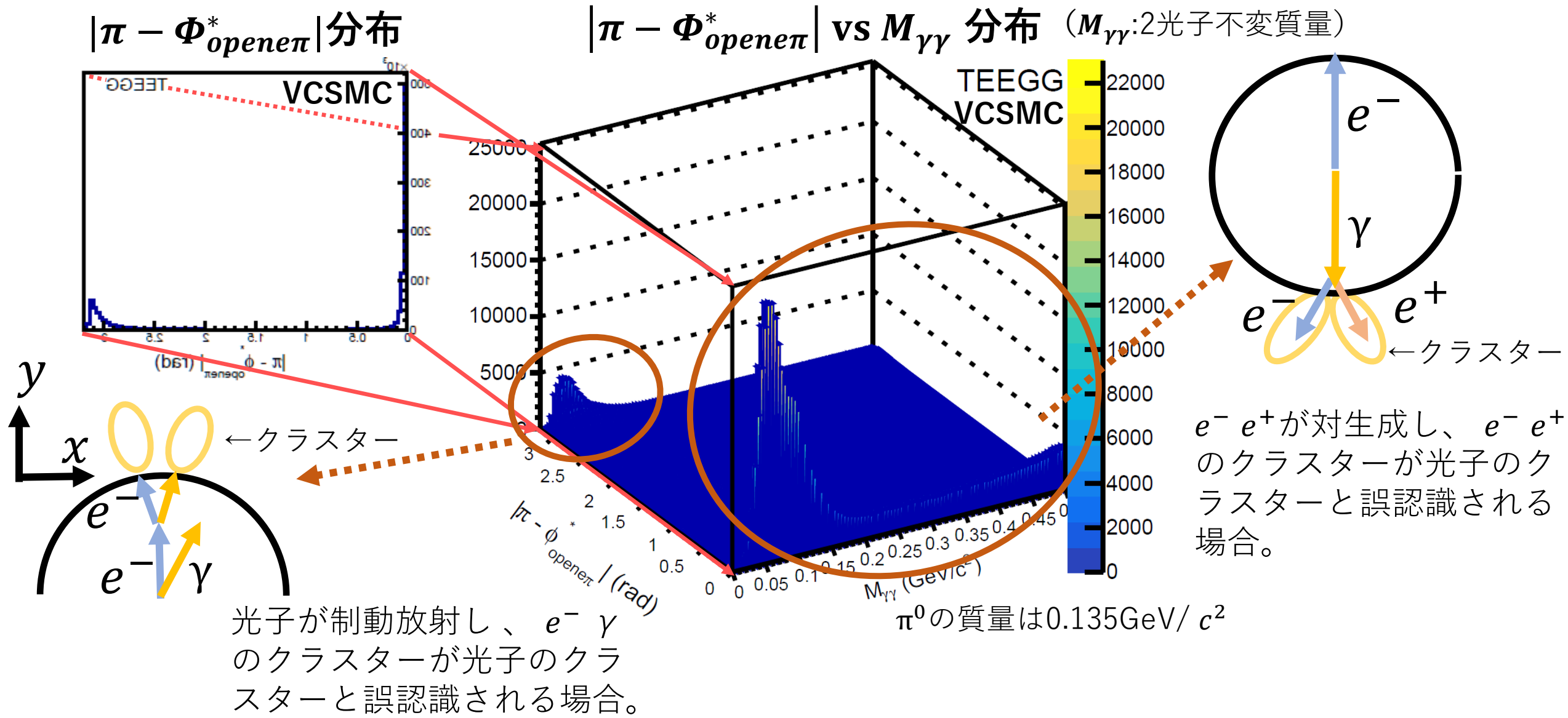
3. $|\pi - \Phi_{open\pi}^*|$

- $\Phi_{open\pi}^*$ は重心系でのx-y平面のタグされたeと π^0 の間の角度。
- eと π^0 はx-y平面でback-to-back($|\pi - \Phi_{open\pi}^*| \sim 0$)になっていなければならない。



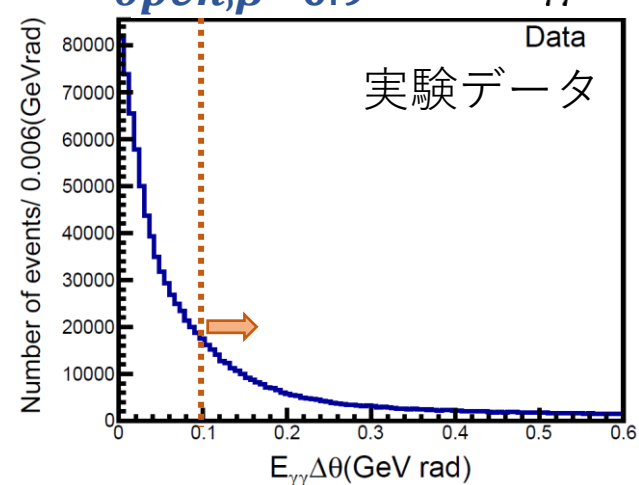
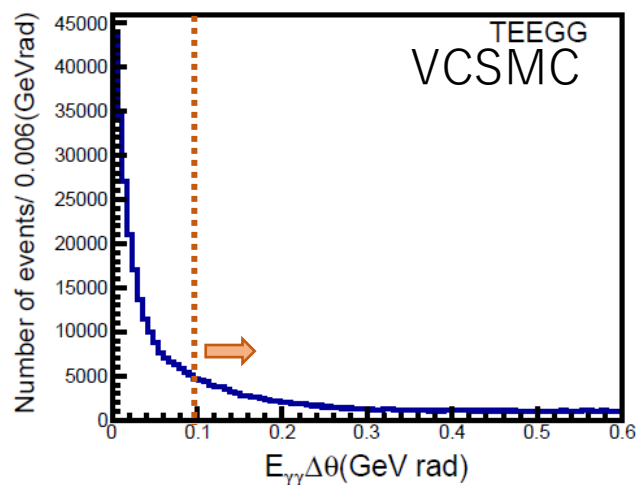
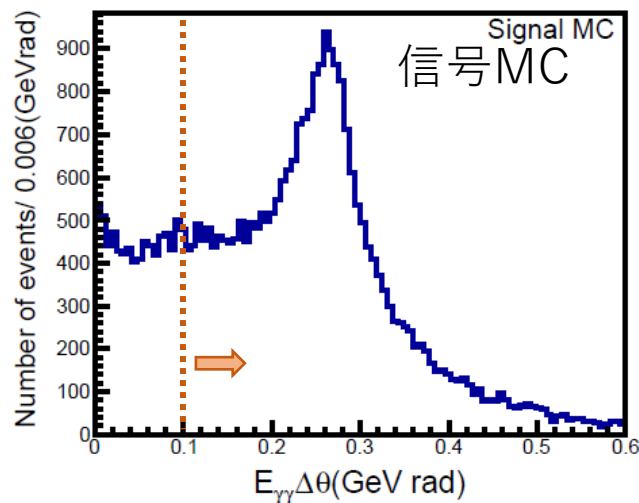
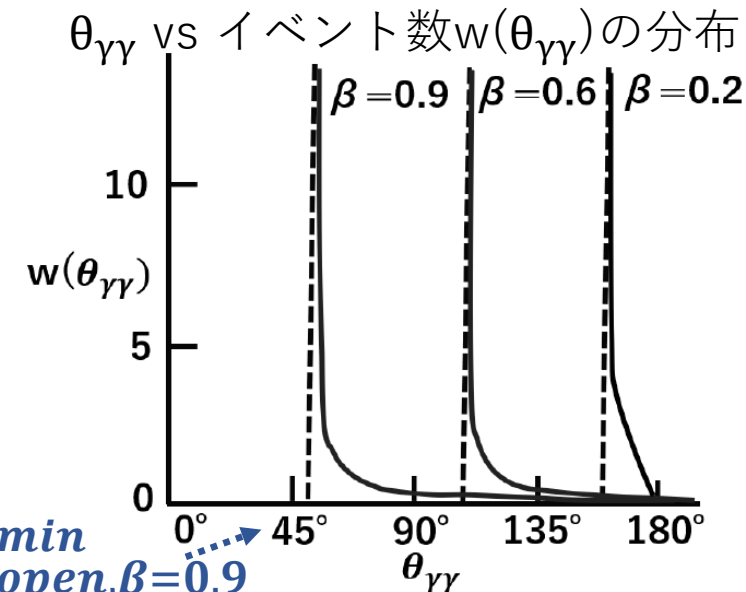
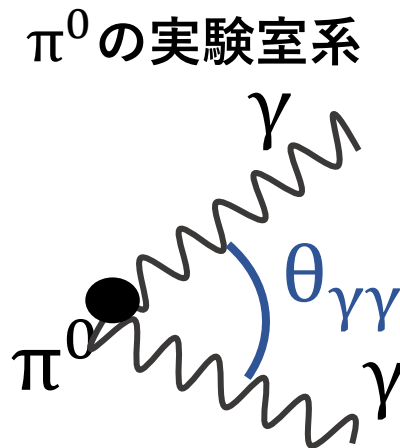
$|\pi - \Phi_{open\pi}^*| < 0.25 \text{ rad}$ を条件とした。

(2) 未タグ粒子が電子あることを保証する選別。



(3)VCS事象の軽減

- $E_{\gamma\gamma} \Delta \theta_{\gamma\gamma}$
 $E_{\gamma\gamma}$ は二つの光子のエネルギー、 $\Delta \theta_{\gamma\gamma}$ は二つの光子の極角の差である。
 $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 崩壊の多くは開き角の最低値 θ_{open}^{min} 付近に集中し、VCS事象の $\Delta \theta_{\gamma\gamma}$ は0付近であることが予想される。

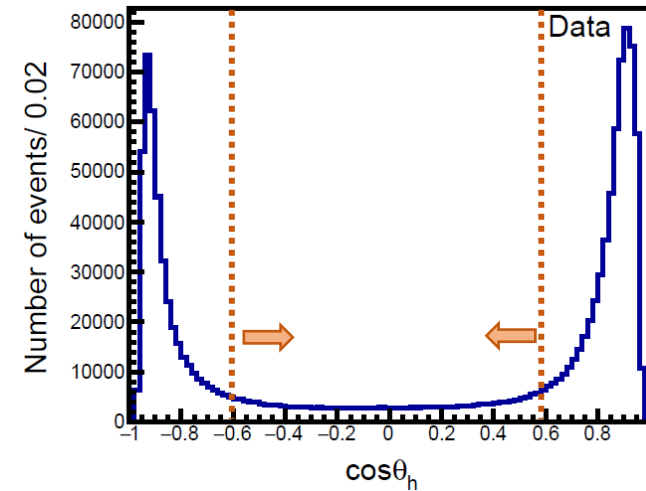
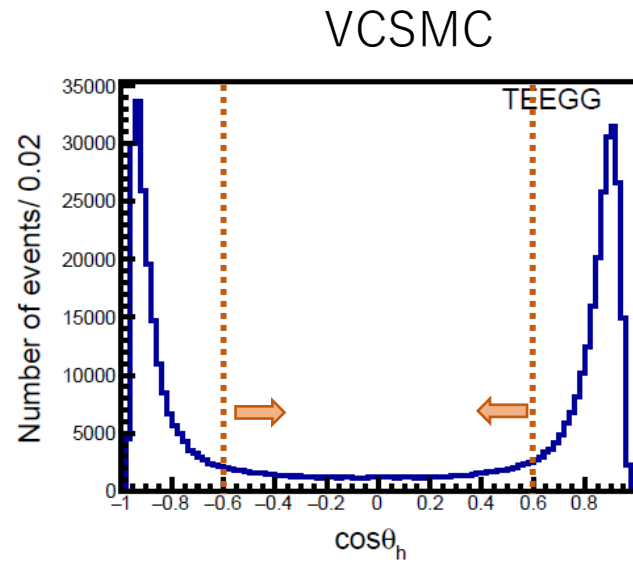
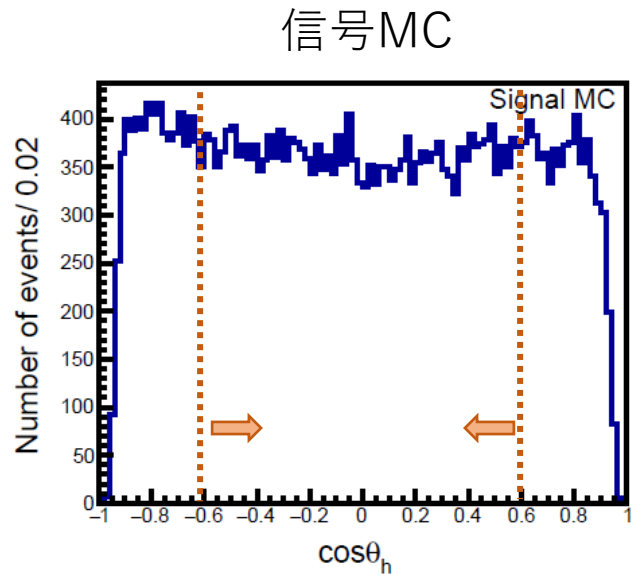
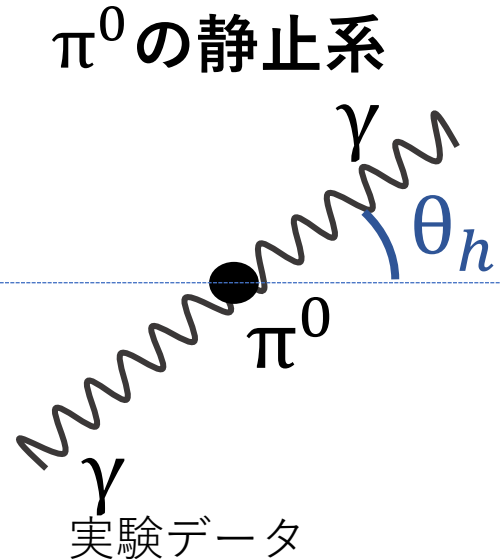


$E_{\gamma\gamma} \Delta \theta_{\gamma\gamma} > 0.1$ (GeV · rad)を条件とした。

(3)VCS事象の軽減

2. $\cos\theta_h$

$\cos\theta_h$ は π^0 の静止系における光子の放出方向と π^0 の方向との間の角度である。この角度はヘリシティ角と呼ばれる。 π^0 のスピンはゼロであるので、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊の $\cos\theta_h$ の分布は一様である。



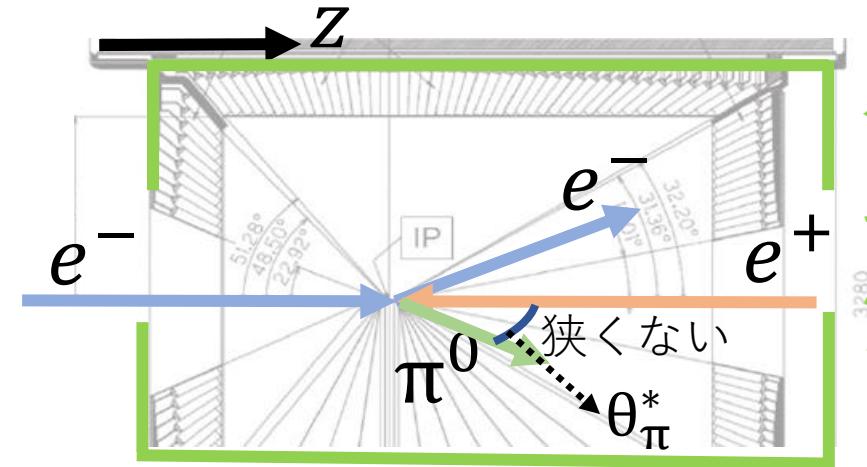
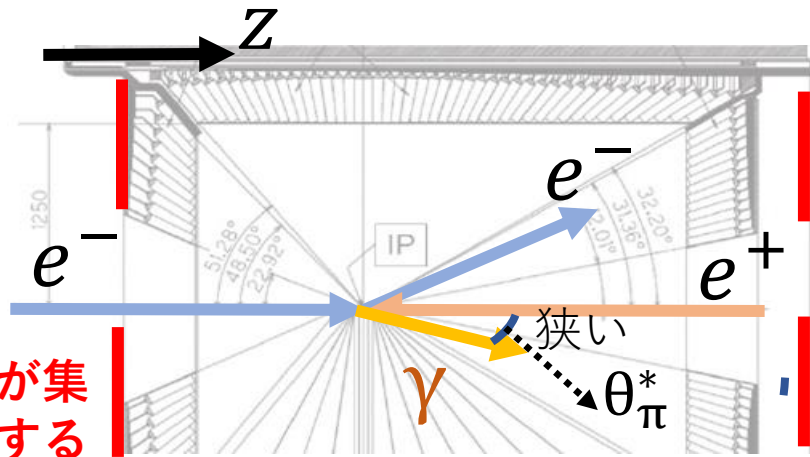
$|\cos\theta_h| < 0.6$ を条件とした。

(3) VCS事象の軽減

3. $|\cos \theta_{\pi}^*|$

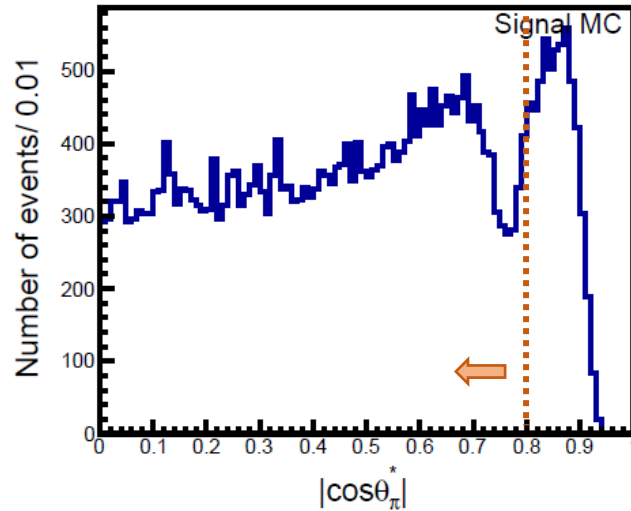
θ_{π}^* は電子・陽電子
ビームの重心系に
おける π^0 のビーム
軸に対する極角
(θ)である。

γ が集中する

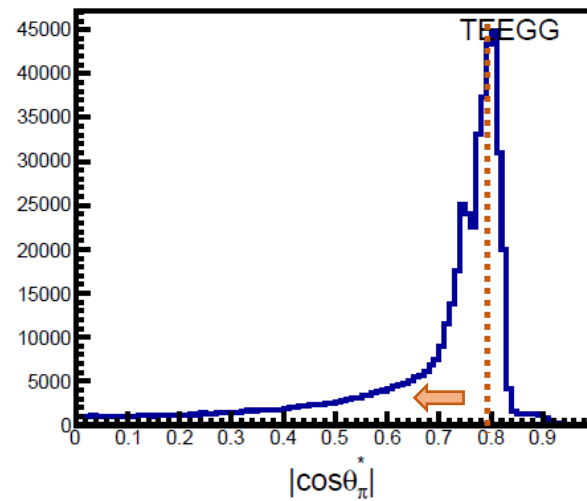


$\leftarrow \pi^0$ はどこに
でも飛んでくる

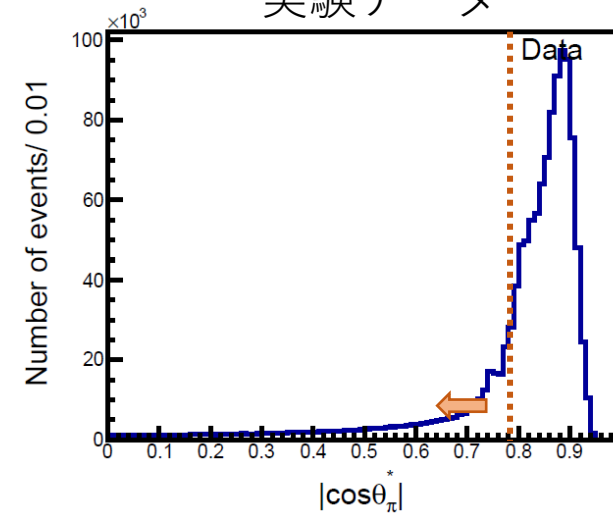
信号MC



VCSMC



実験データ



$|\cos \theta_{\pi}^*| < 0.8$ を条件とした。

- (1)前段階の大まかな選別。→カット 1
- (2)未タグ粒子が電子あることを保証する選別。→カット 2
- (3)VCS事象の軽減。→カット 3

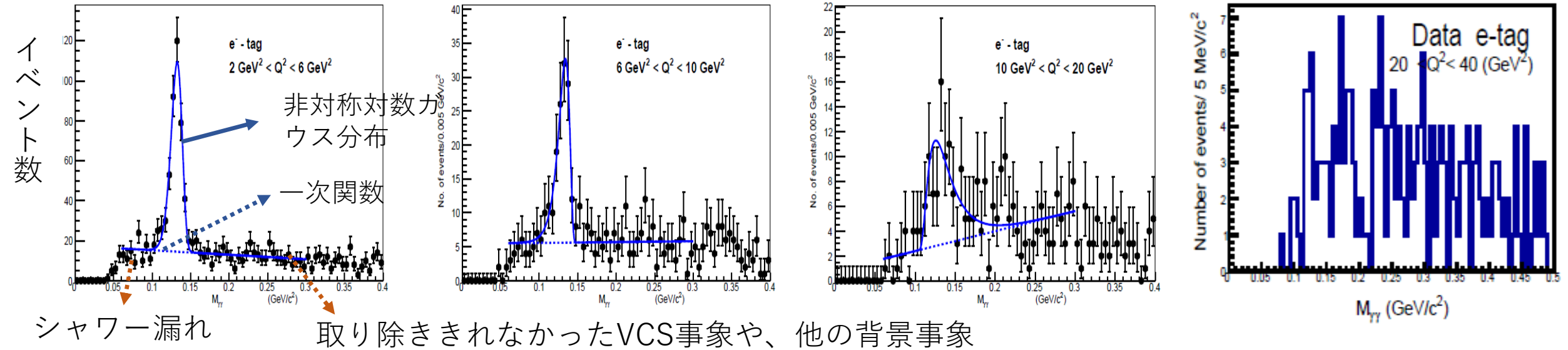
条件によるイベント数の変化の表

	条件なし	カット 1	カット1+2	カット1+2+3
実験データ	6.2×10^9	7.3×10^6	1.2×10^5	5973
信号事象 MC	1.0×10^5	3.9×10^4	3.4×10^4	13880
TEEGG	1.0×10^8	1.0×10^6	5.1×10^5	2334

カット 3 における信号の検出効率の低下率は**40%(=13884/34408)** で許容範囲内
一方、VCS 背景事象は**0.5%(=2334/507500)**にまで減少できている。

最終選別に残った事象に対する 2 光子不変質量 ($M_{\gamma\gamma}$) と信号数の決定

実験データを使用した e^- タグの $M_{\gamma\gamma}$ の分布



π^0 の質量は $0.135 \text{ GeV}/c^2$

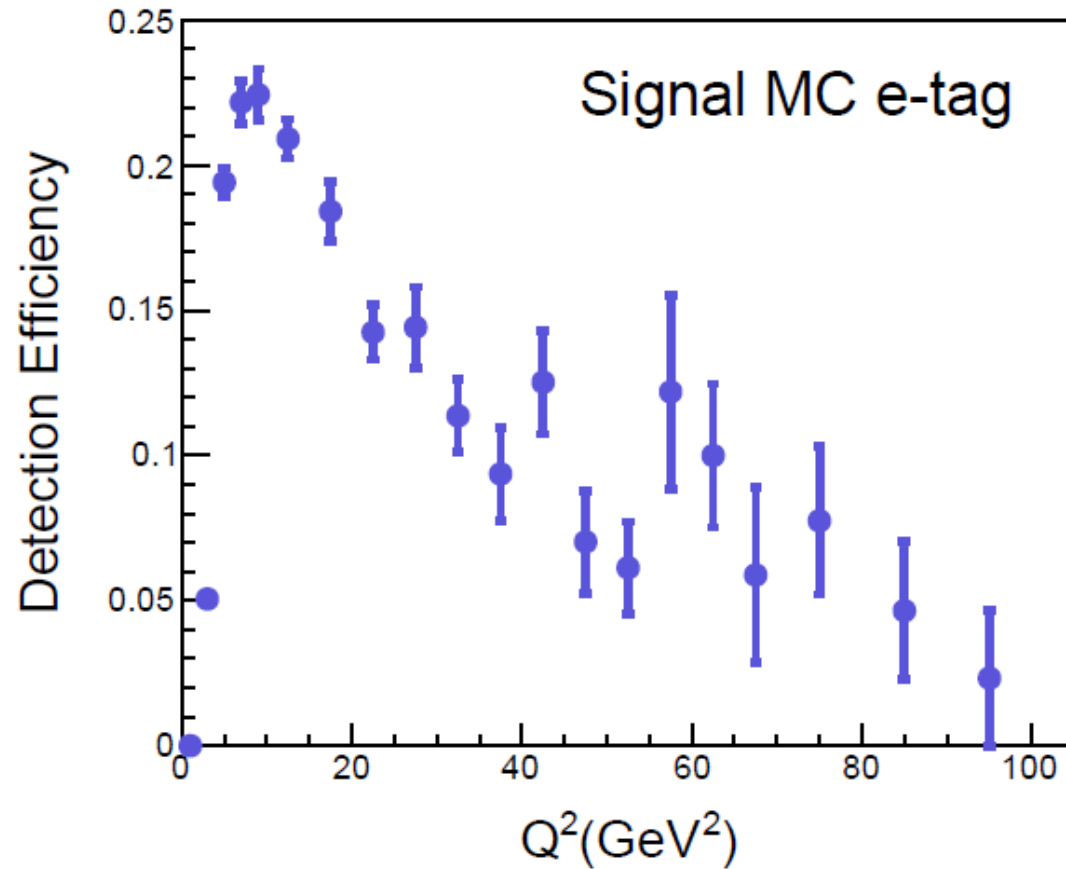
Q^2 が 0 から 10 GeV^2 の領域で、きれいなピークが見えている。

- 信号事象数は各 Q^2 領域において、すべての選別条件を通過した事象に対する $M_{\gamma\gamma}$ 分布をフィットして求めた。
- フィットは、Maximum Likelihood法を用いて行った。
- 信号事象の形には非対称対数ガウス分布、背景事象形には一次関数を用いた。

各 Q^2 の領域ごとの信号数の結果をもといて、反応断面積を以下の式で計算した。

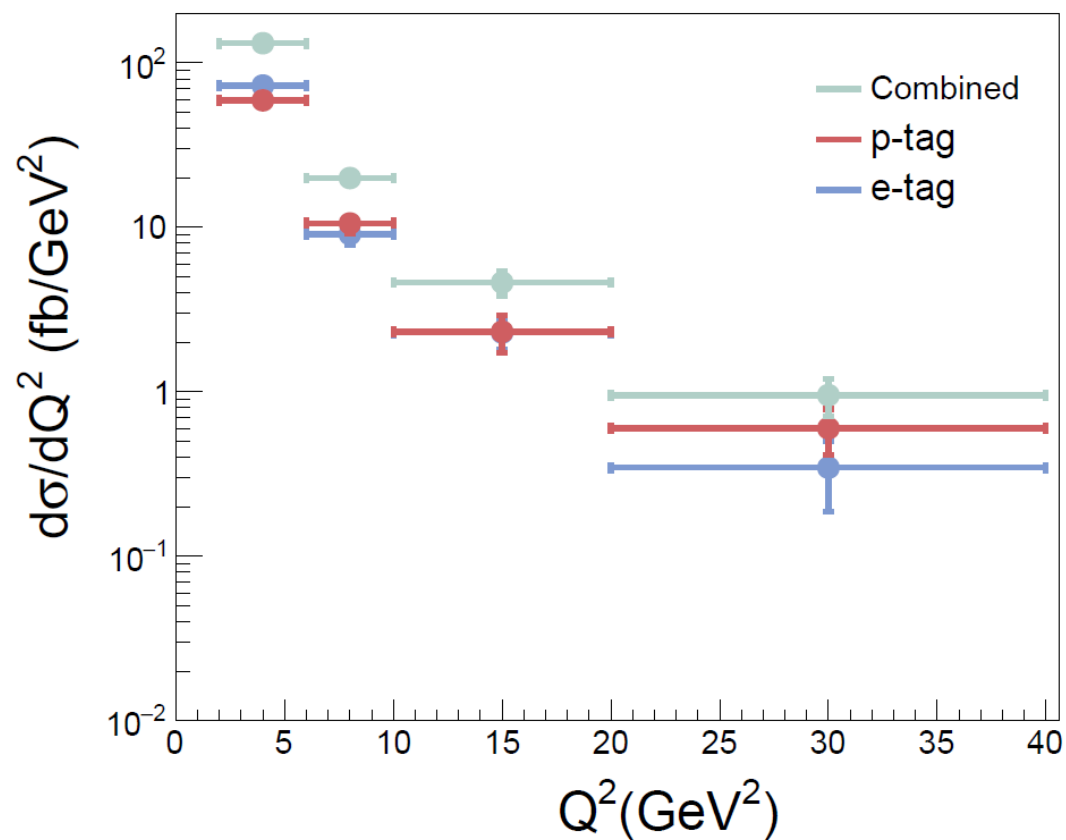
$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{N(1 - b)}{\eta B \int L dt (1 + \delta) \Delta Q^2}$$

ここで、 N は信号領域内の信号事象と背景事象の和で、 b はバックグラウンドが含まれている割合である。 η は検出効率である。 B は $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊分岐比、 $\int L dt$ は総積分ルミノシティ、 δ は放射補正である。 B はPDGの値、 $B = 0.988$ を用いた。 δ には先行研究の値 $\delta = 0.02$ を用いた。

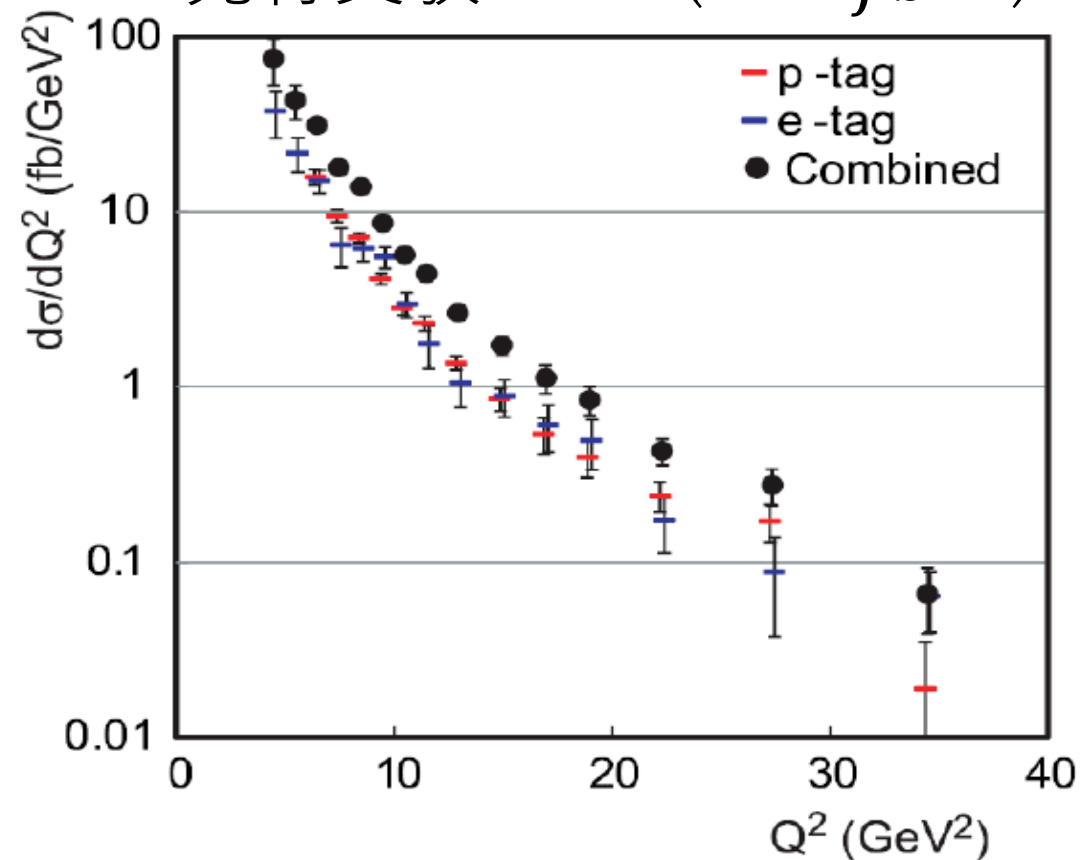


- 信号事象の検出は、信号MCサンプルを用いて、以下の式から求めた。
- 検出効率 $\eta_i = \frac{N_{obs,i}}{N_{gen,i}}$
- i は Q^i の領域番号、分母の $N_{gen,i}$ は i 番目の Q^2 の領域に生成された事象数、 $N_{obs,i}$ は最終選別を通過した事象数である。
- Q^2 があがるにつれ、検出効率が下がるのは、 Q^2 があがるにつれ、 π^0 の運動量が高くなり、二つの光子の間の角度が狭まり、ECLで観測されるクラスターを二つに分けるのが難しくなるからである。

本研究 (12.4 fb^{-1})

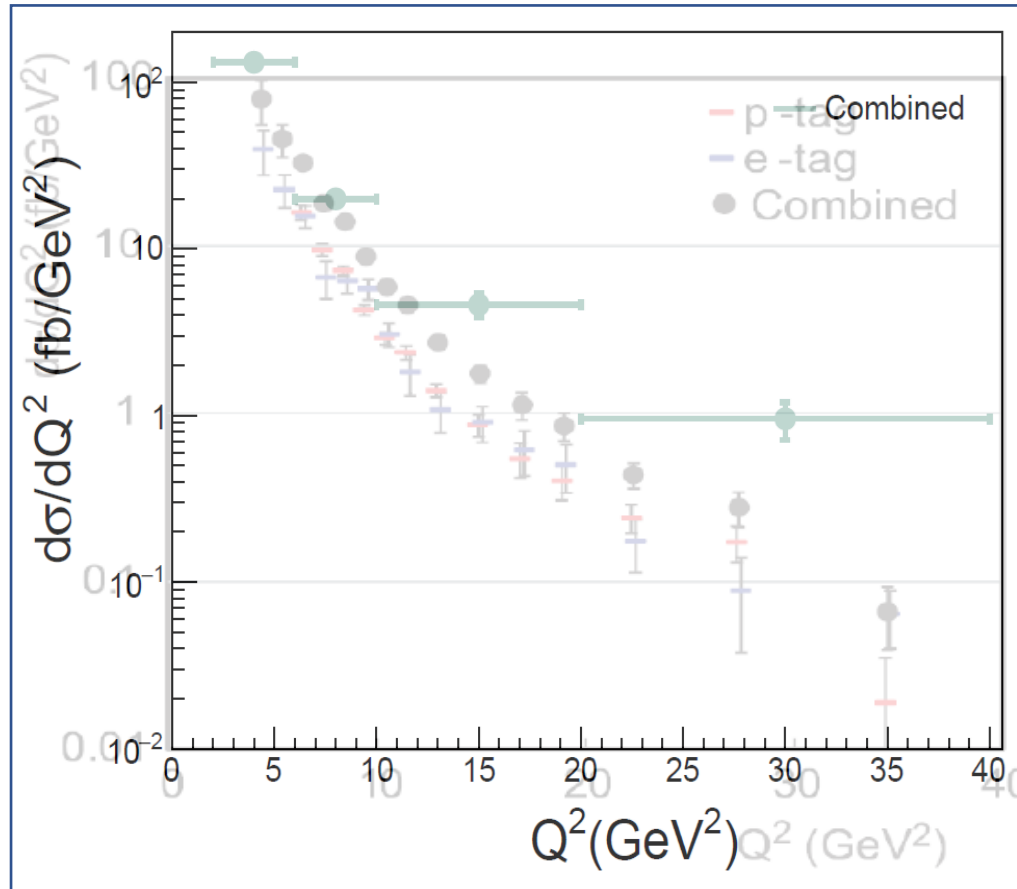


先行実験 Belle (759 fb^{-1})

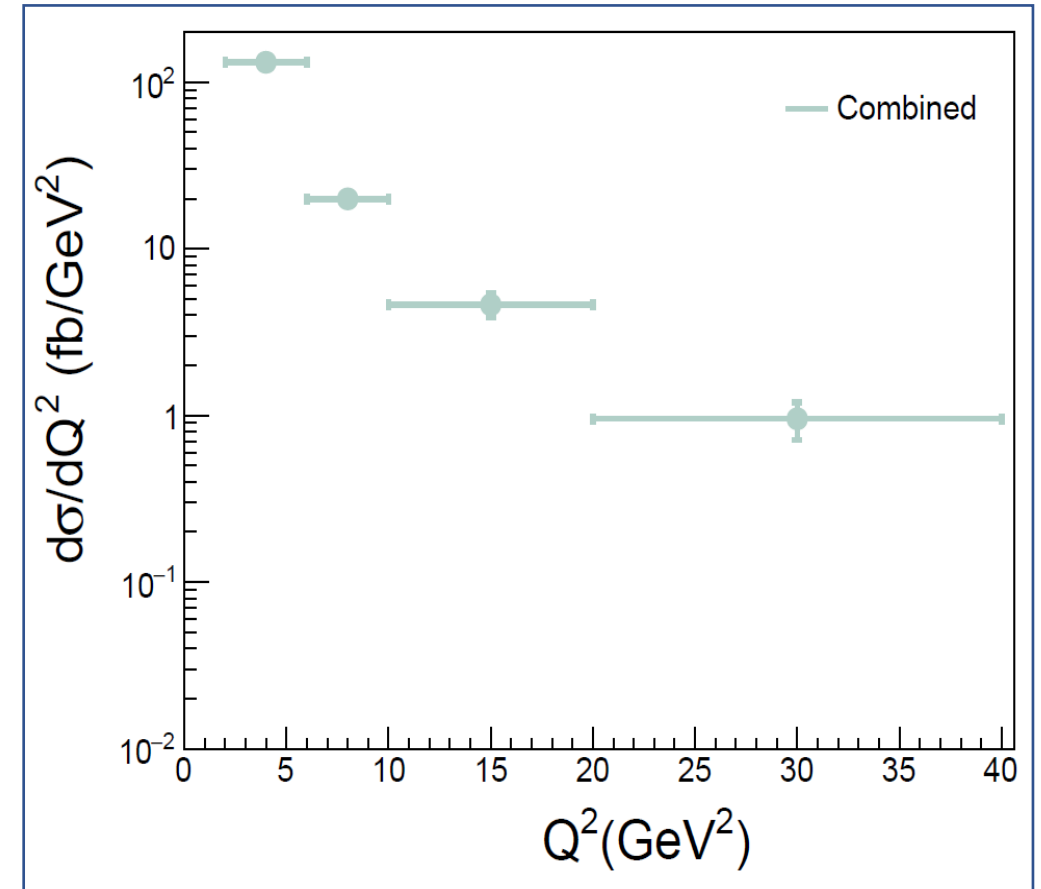


$e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の微分断面積の測定

本研究(12.4 fb^{-1})と先行実験 Belle(759 fb^{-1})
の図を重ねた



本研究(12.4 fb^{-1})



Q^2 が 10 GeV^2 付近で、先行実験の結果をよく再現している。

12.4 fb^{-1} のデータを用いて、 $e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の事象の解析を行い、多量の背景事象の中から本過程の信号であることを示す綺麗な π^0 信号を確認することに成功した。

また、その事象数から微分断面積の Q^2 依存性を Q^2 が2 GeV^2 から100 GeV^2 の領域を測定し、 Q^2 が10 GeV^2 付近で、先行実験の結果をよく再現している。

本研究目的は微分断面積の Q^2 依存性をはかり、 $F_{\pi\gamma}(Q^2)$ 精度よく測定することだったが、 Q^2 の高い領域で検出効率が落ち、統計量が足りないことがわかった。

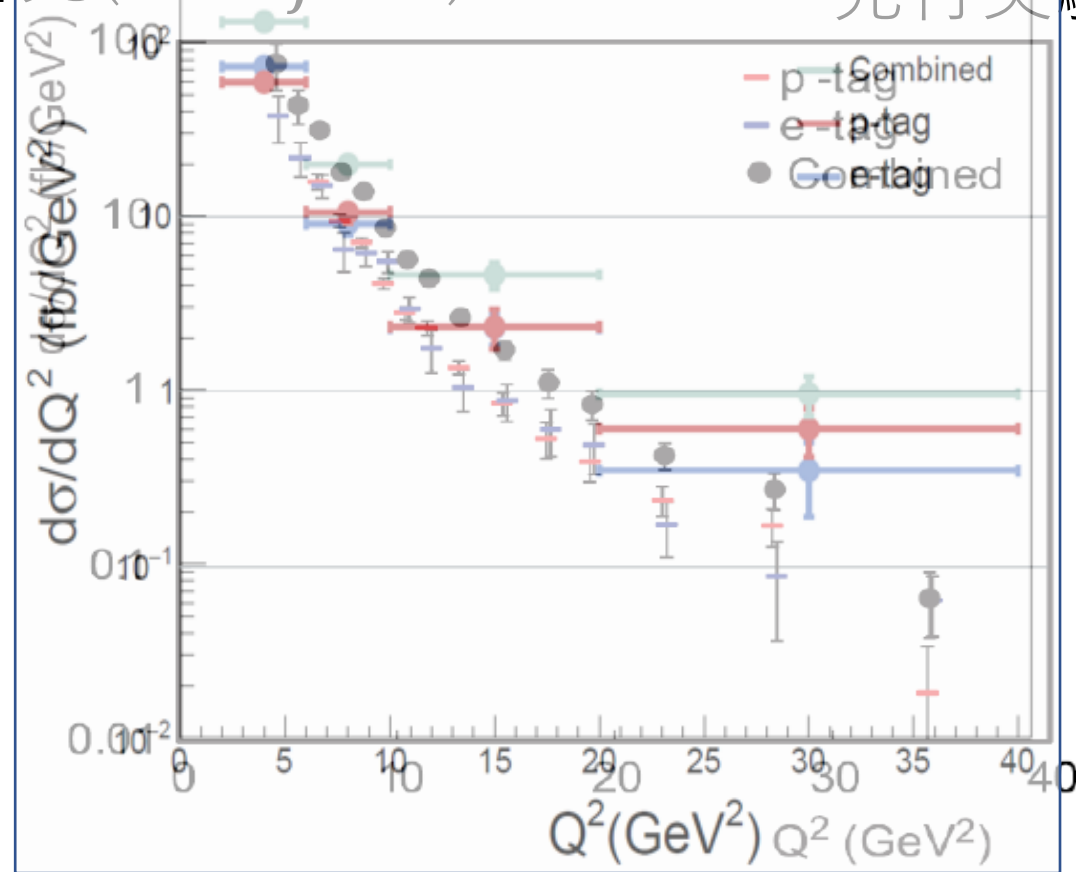
Belle II 実験では、2022年までには500 fb^{-1} のデータ取得を予定しており、これはBabarのデータ量442 fb^{-1} とほぼ同じデータ量。 Q^2 が高い領域での高統計が期待される。

Back up

$e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の微分断面積の測定

本研究 (12.4 fb^{-1})

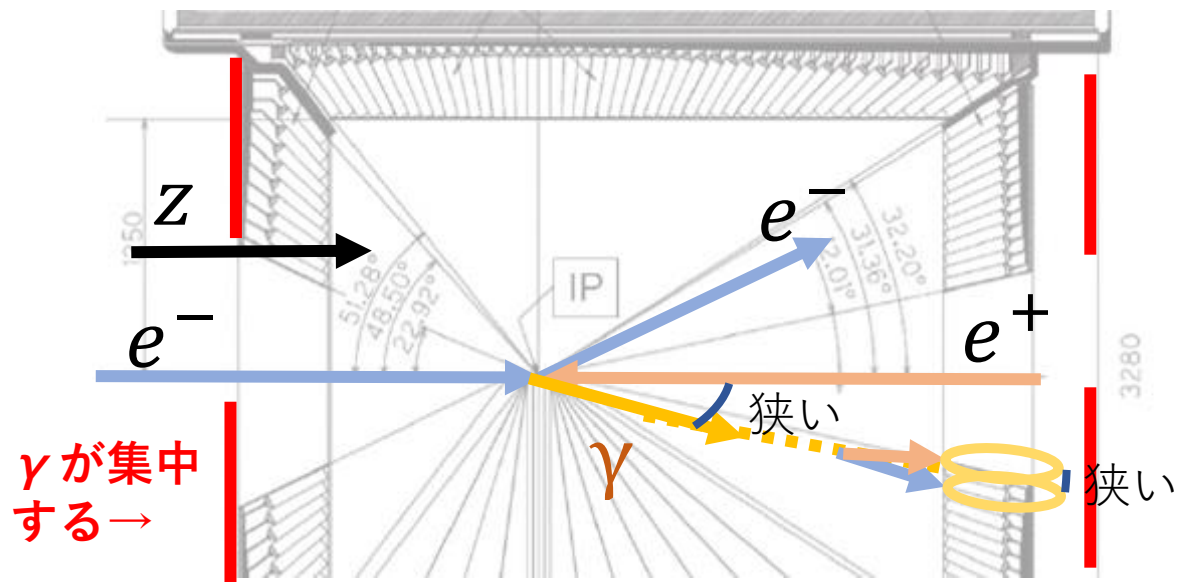
先行実験 Belle (759 fb^{-1})



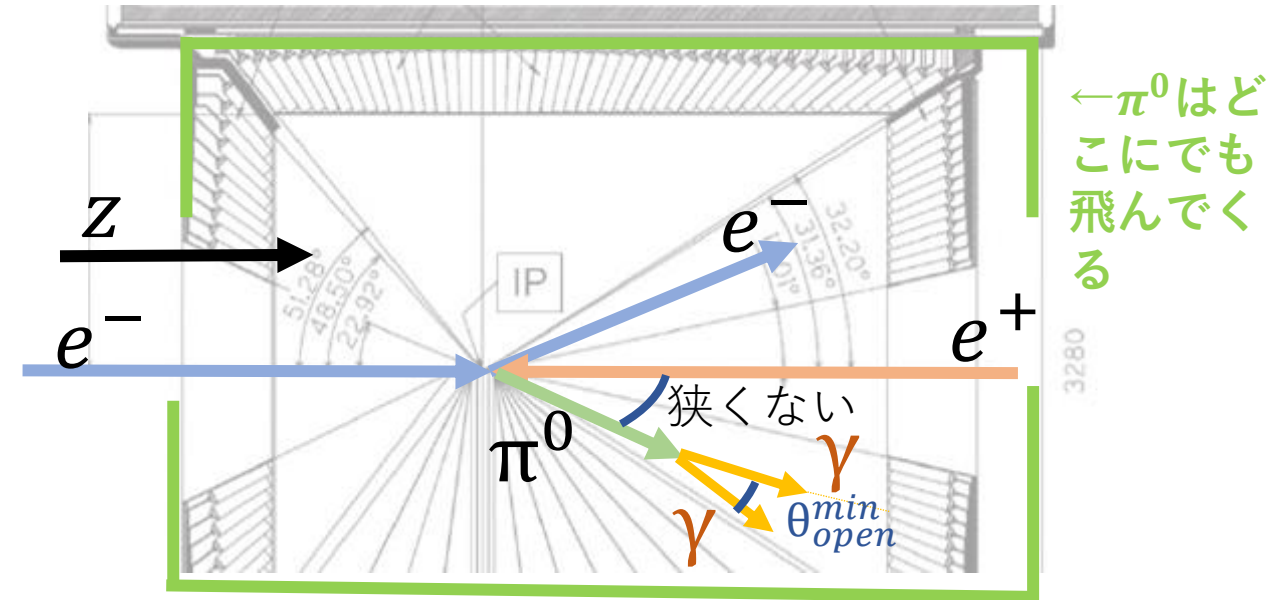
誤差の範囲内で先行実験の結果をよく再現している。

$e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の事象選別 (3)VCS事象の軽減

終わりの状態がほとんど同じ”、”違いは γ か π^0 のみ”、しかし、一個の γ でも $\gamma \rightarrow e^+ e^-$ 等で2個のクラスターに分かれることがよくある。



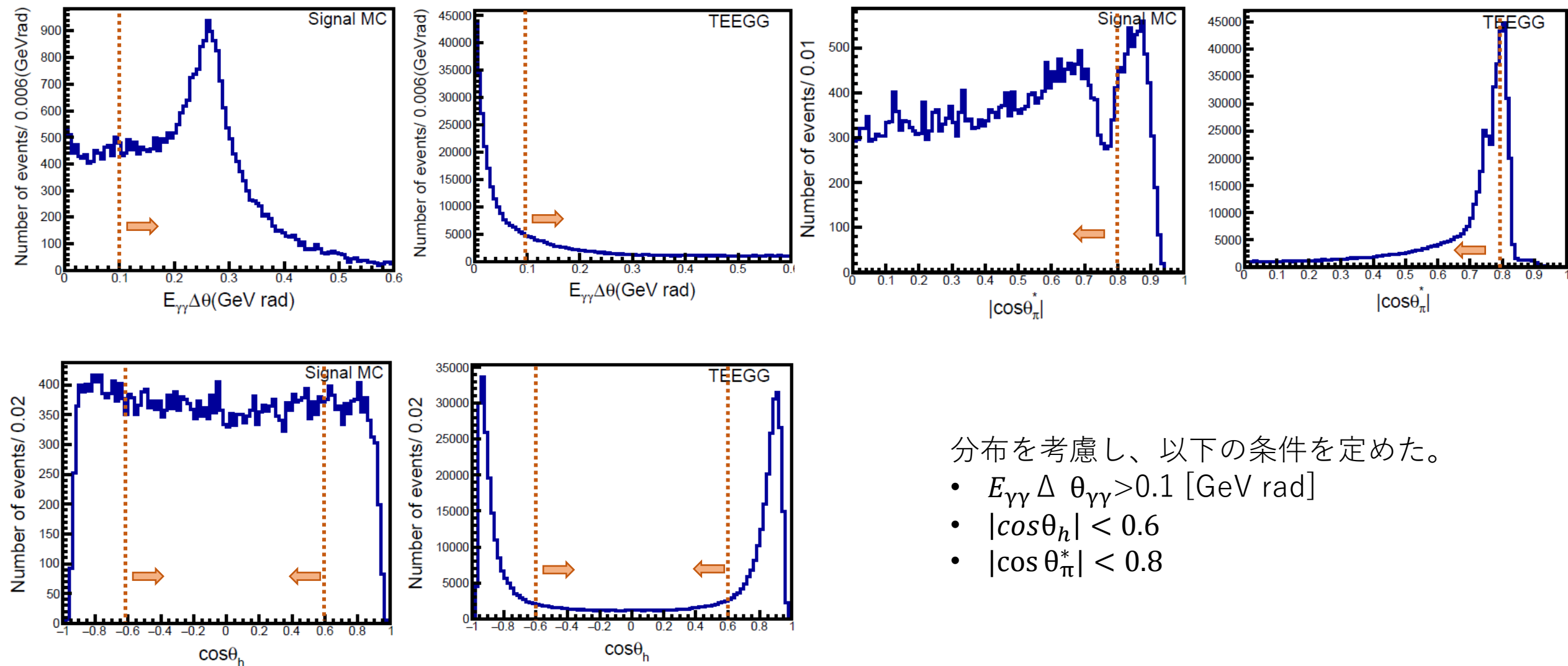
VCS事象で放出される光子は e^- と同じ方向に放出されることが多い。一つの γ から作られる二つのクラスターは前方、後方に集中する。



$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 崩壊の多くは開き角の最低値 θ_{open}^{min} 付近に集中する。

これらの違いを利用してVCS事象を取り除く！

4.VCS事象を軽減する条件

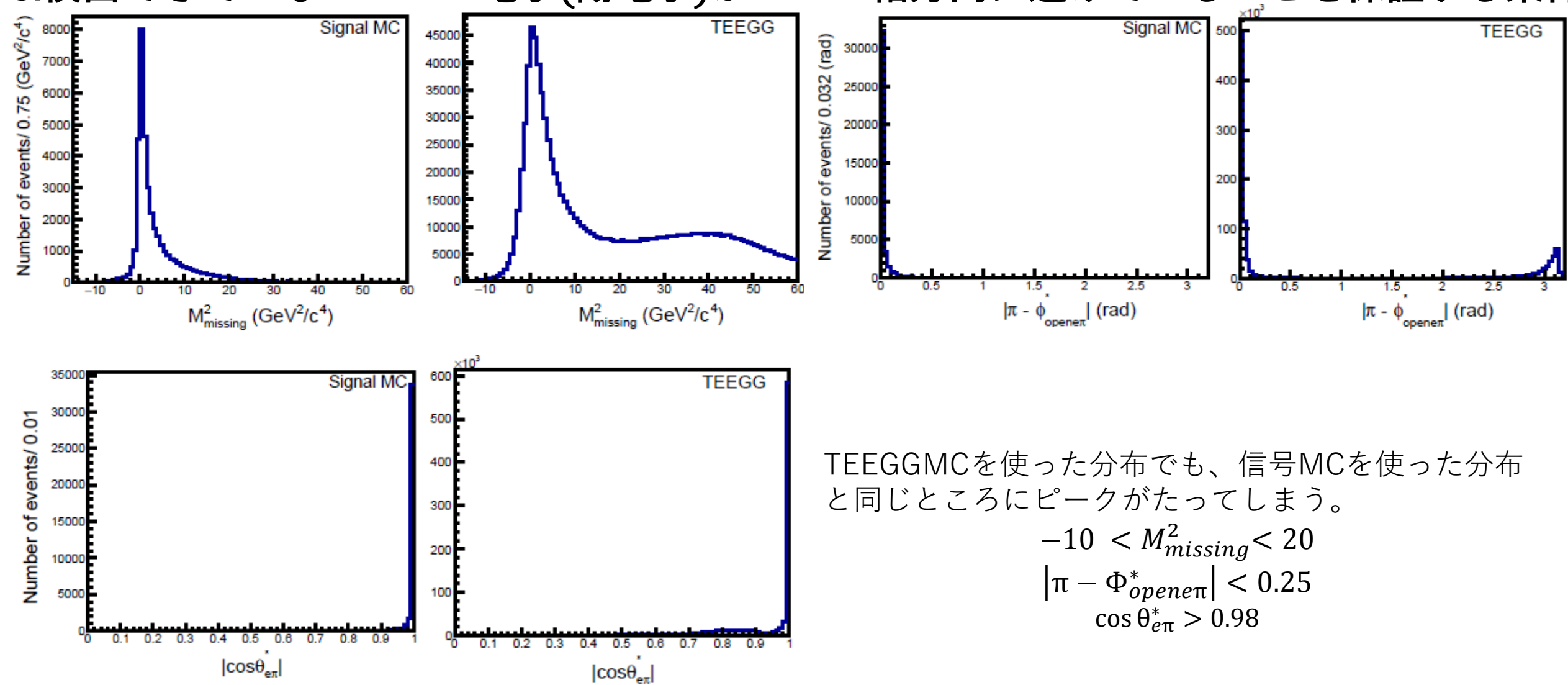


分布を考慮し、以下の条件を定めた。

- $E_{\gamma\gamma} \Delta \theta_{\gamma\gamma} > 0.1$ [GeV rad]
- $|\cos\theta_h| < 0.6$
- $|\cos\theta_\pi^*| < 0.8$

$e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の事象選別 (2)逃げていた粒子が電子であることの保証。

3.検出できていない一つの電子(陽電子)がビーム軸方向に逃げていることを保証する条件



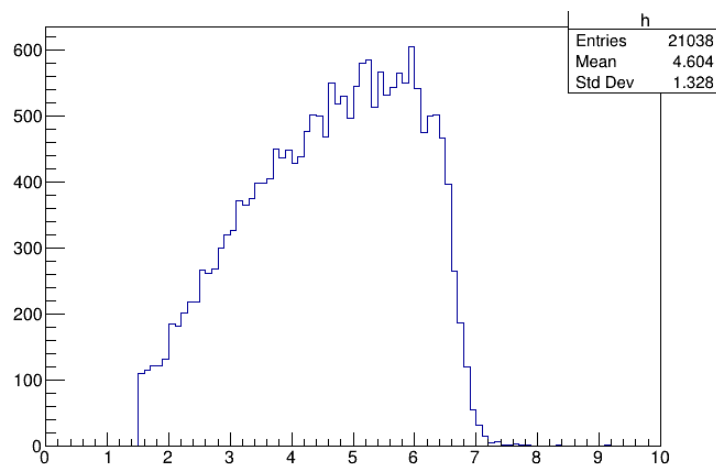
TEEGMCを使った分布でも、信号MCを使った分布と同じところにピークがたってしまう。

$$-10 < M^2_{\text{missing}} < 20$$

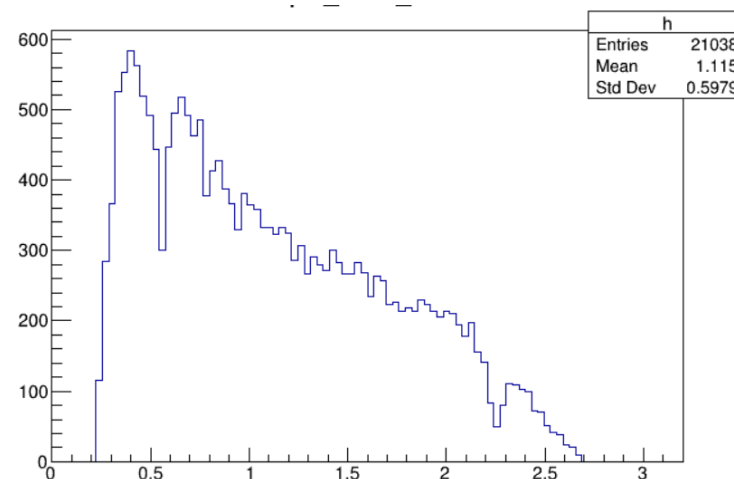
$$|\pi - \Phi_{\text{open}\pi}^*| < 0.25$$

$$\cos\theta_{e\pi}^* > 0.98$$

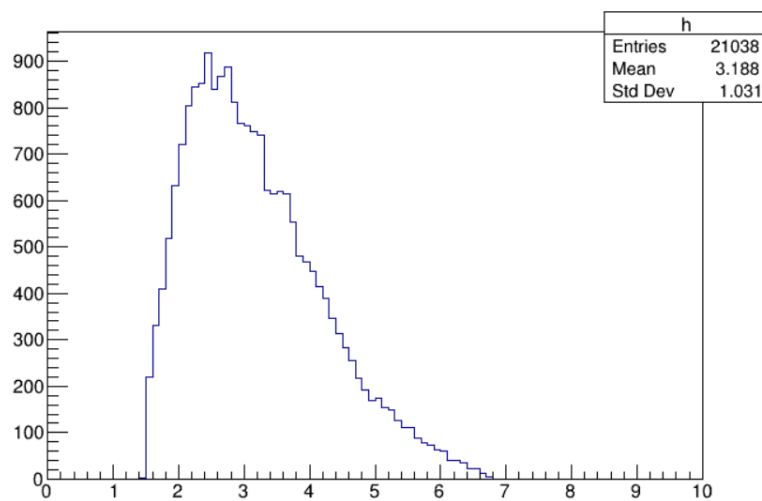
電子のエネルギー分布



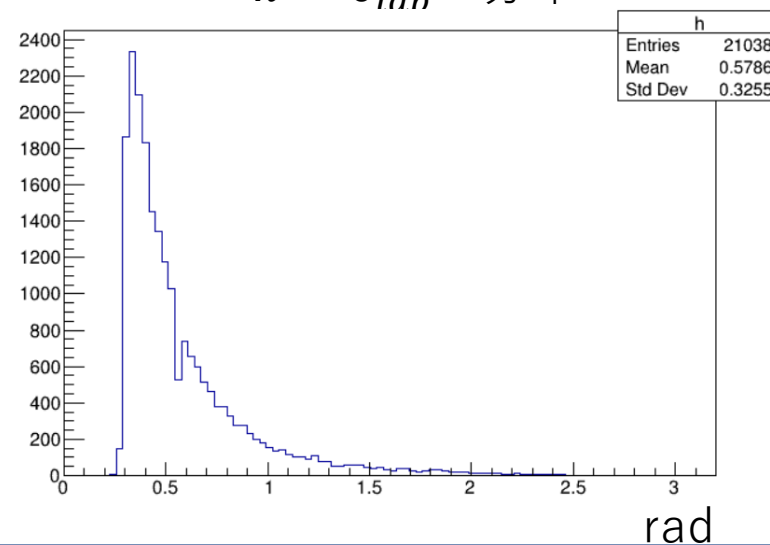
電子の θ_{lab} の分布



π^0 の運動量の分布 GeV



π^0 の θ_{lab} の分布 rad



https://agira.desy.de/browse/BIIDP-2195



Belle II Data Production / BIIDP-2195

MC13 low multiplicity samples at Y(4S) for single-photon analysis

Comment Agile Board More Reopen Issue

Details

Type: Task Status: **CLOSED** (View Workflow)
 Priority: Major Resolution: Done
 Labels: MC13 low-multiplicity
 Epic Link: MC13

Description

Only BGx1.0

Generator	Number of events	preselection efficiency
BHWIDE ee	154920 M (20fb-1)	7746 nb -> 1.21 nb
TEEGG NONE ee	233.4 M (20fb-1)	11.67 nb -> 3.17 nb
TEEGG SOFT ee	177.8 M (20fb-1)	8.89 nb -> 2.30 nb
TEEGG HARD ee	87.8 M (20fb-1)	4.39 nb -> 1.39 nb
BABAYAGA.NLO gg	2520 M (100fb-1)	25.2 nb -> 2.39 nb
KKMC mumu	22.96 M (20fb-1)	none
KKMC nunu*	3.9 M (50ab-1)	none
KKMC nuenu	8.65 M (50ab-1)	none

*numunumu and nutautau, number of events corresponds to the combined xsec of $2 \times 39e-6$ nb

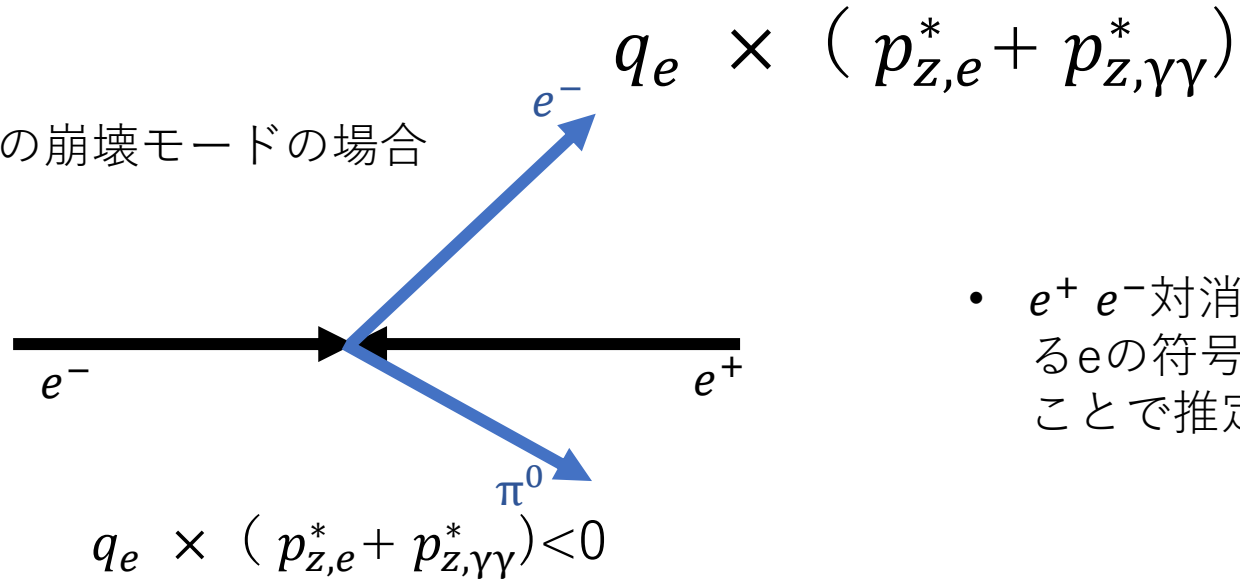
The KKMC mumu sample is the same as the generic mumu sample requested elsewhere.

The generator preselection will reduce the number of events for subsequent simulation and reconstruction steps significantly.
 The number of events requested is before any preselection is applied!

Attachments

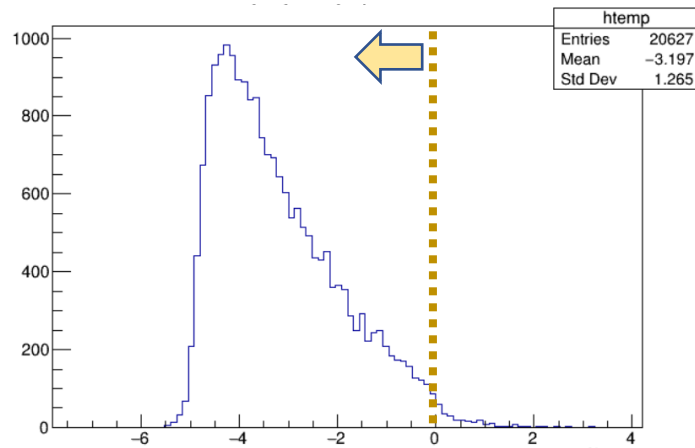
$e^+ e^-$ 対消滅由来の背景事象の選別に有効的な変数

今回の崩壊モードの場合

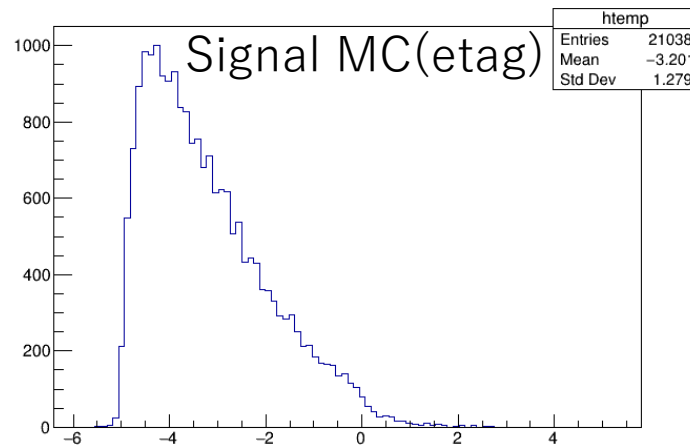


- $e^+ e^-$ 対消滅からのBGは上の変数で予想されるeの符号は逆の符号を持つイベント調べることで推定できる。

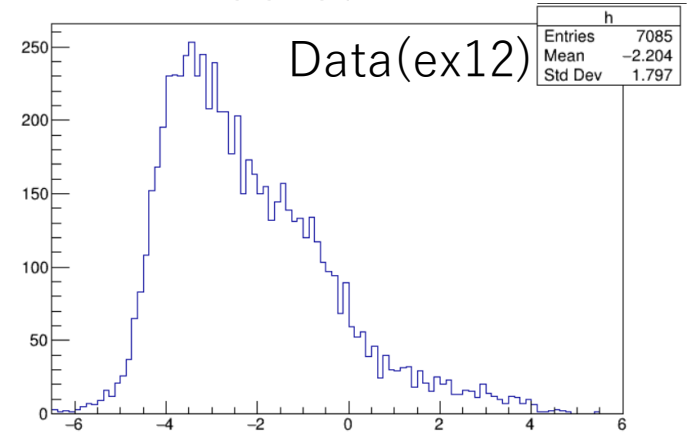
Signal MC(ptag)



Signal MC(etag)

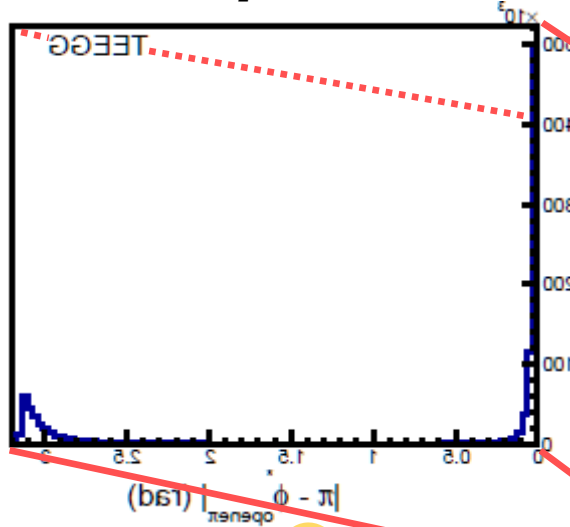


Data(ex12)

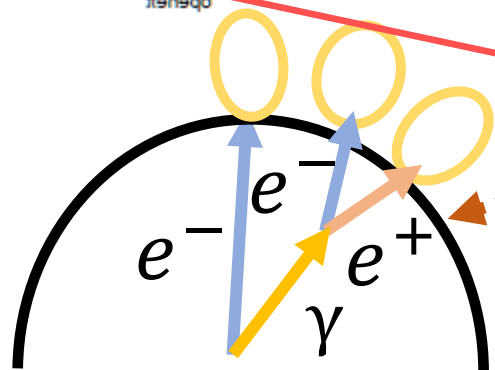
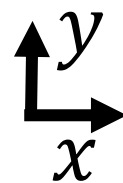
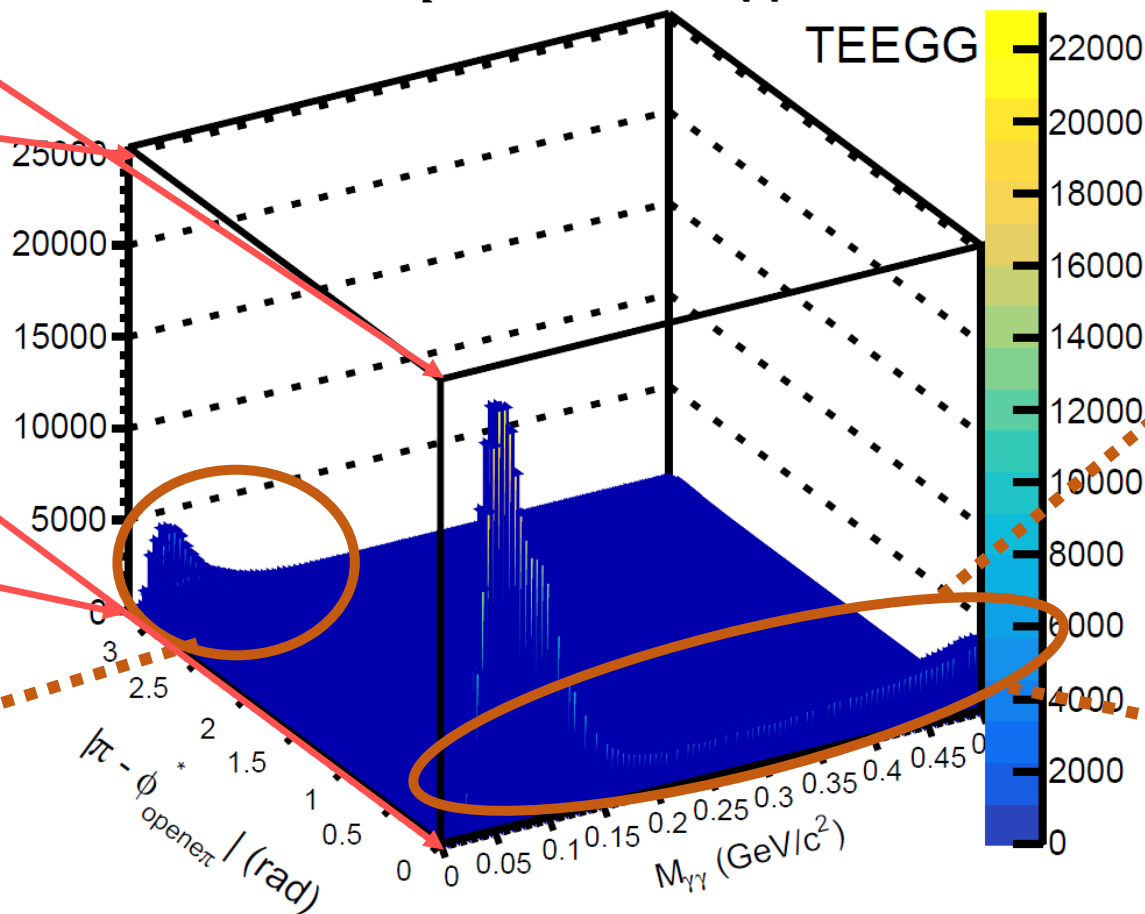


$e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の事象選別 (2)逃げていく粒子が電子であることの保証

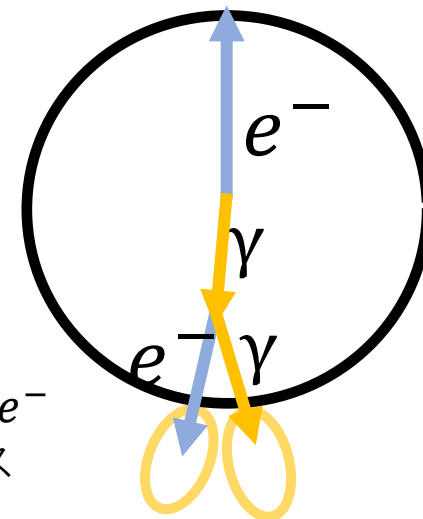
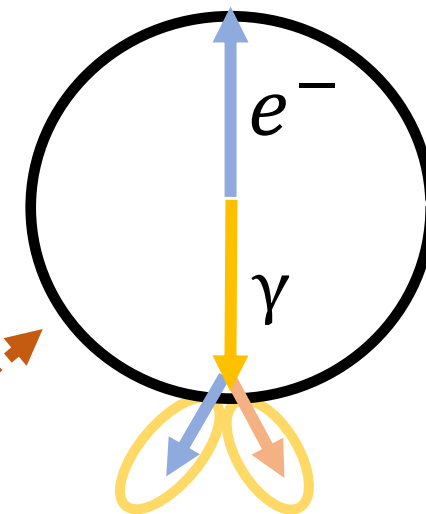
$|\pi - \Phi_{open\pi}^*|$ 分布



$|\pi - \Phi_{open\pi}^*|$ vs $M_{\gamma\gamma}$ 分布



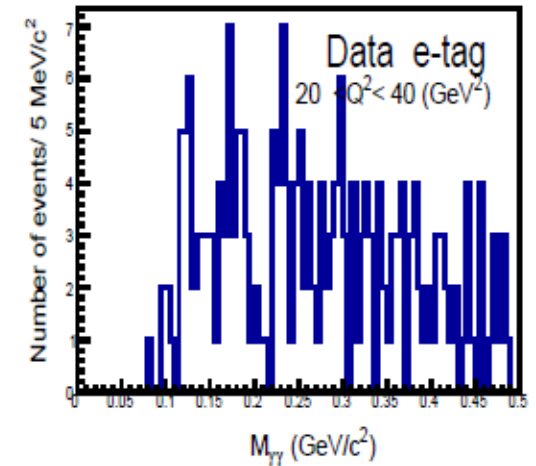
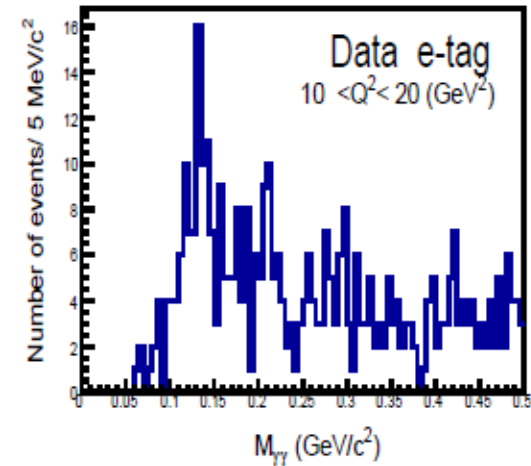
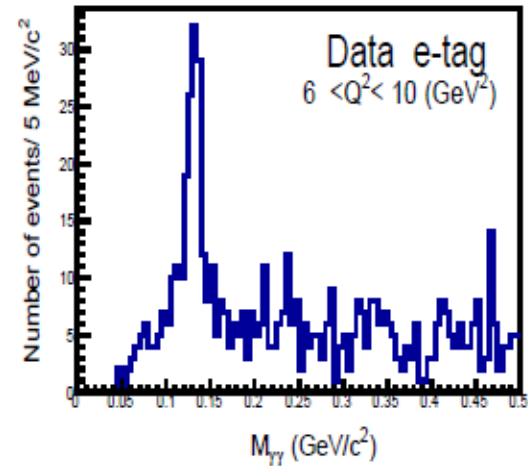
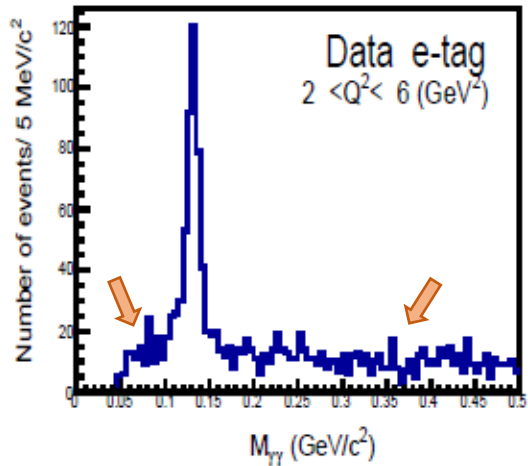
e^-e^+ が対生成し、 e^-e^+ のクラスターが光子のクラスターと誤認識される場合。



光子がコンプトン散乱し、 e^- のクラスターが光子のクラスターと誤認識される場合。

最終選別に残った事象に対する 2 光子不変質量 ($M_{\gamma\gamma}$)

実験データを使用した e^- タグの $M_{\gamma\gamma}$ の分布



π^0 の質量は $0.135 \text{ GeV}/c^2$

Q^2 が 0 から 10 GeV^2 の領域で、きれいなピークが見えている。

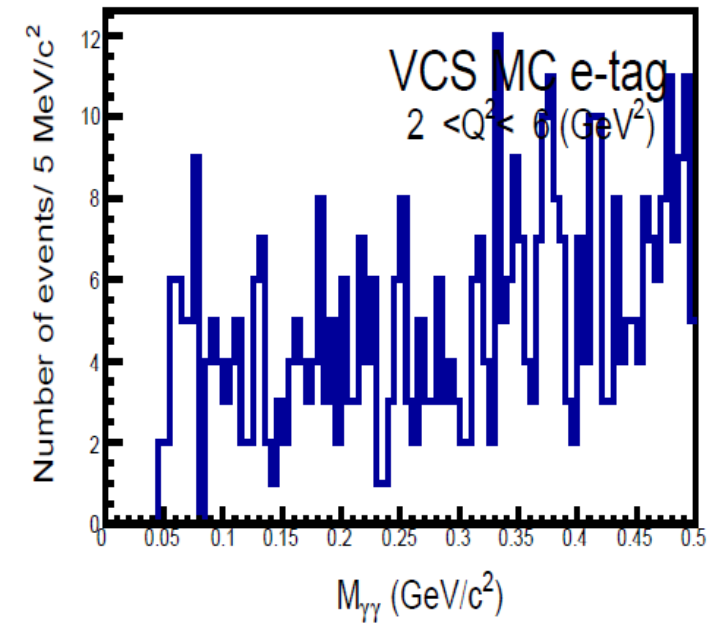
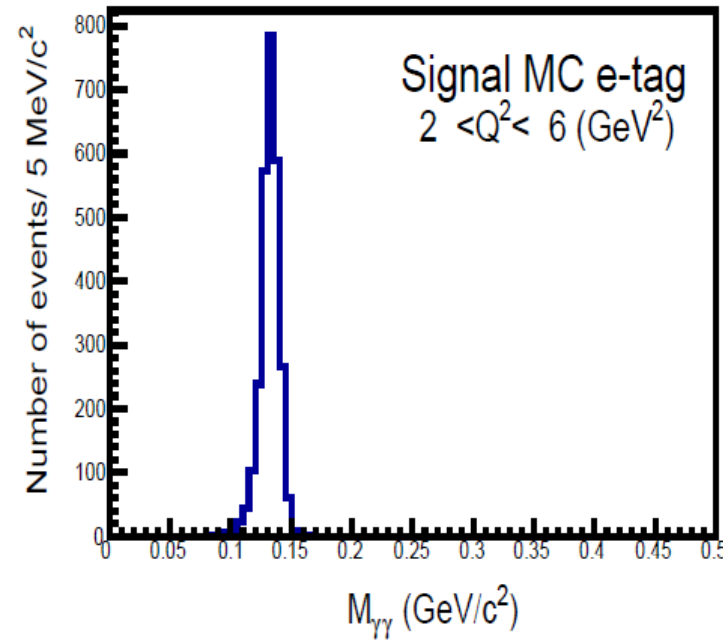
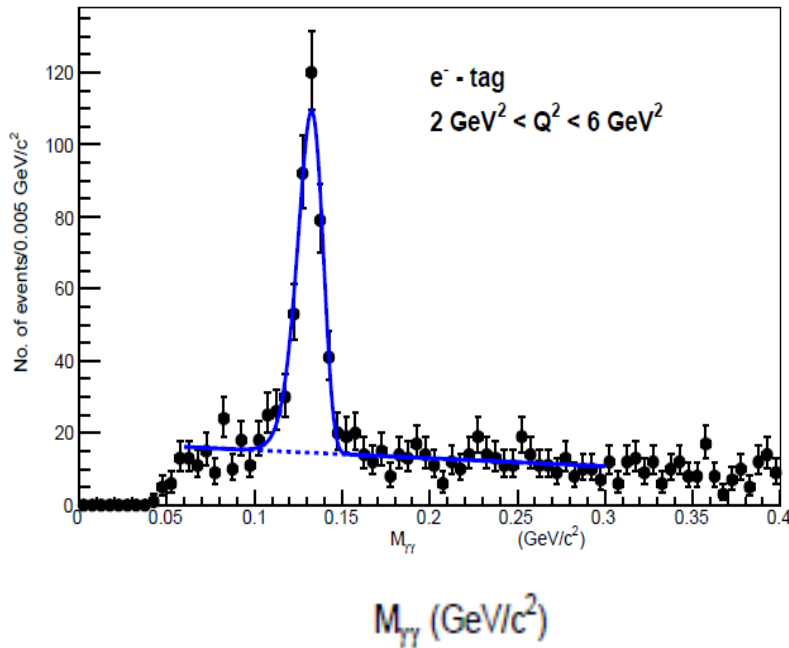
Q^2 が 20 GeV^2 以上の領域では、ピークが見られない。

Q^2 が低い所にテールがあり、これはシャワー漏れが原因である。

Q^2 が高い所のテールは、取り除ききれなかった VCS 事象や、他の背景事象だと考えられる。

$e^+e^- \rightarrow e^\pm(e^\mp)\pi^0$ の信号数の決定

実験データ、信号MC、VCS MCを使用した e^- タグの $M_{\gamma\gamma}$ の分布



- 信号事象数は各 Q^2 領域において、すべての選別条件を通過した事象に対する $M_{\gamma\gamma}$ 分布をフィットして求めた。
- フィットは、Maximum Likelihood法を用いて行った。
- 信号事象の形には非対称対数ガウス分布、背景事象形には一次関数を用いた。