

Belle II 実験における Bhabha散乱のトリガー条件の検討

奈良女子大学大学院 人間文化研究科
物理学専攻 高エネルギー物理学研究室
福井 千尋

目次

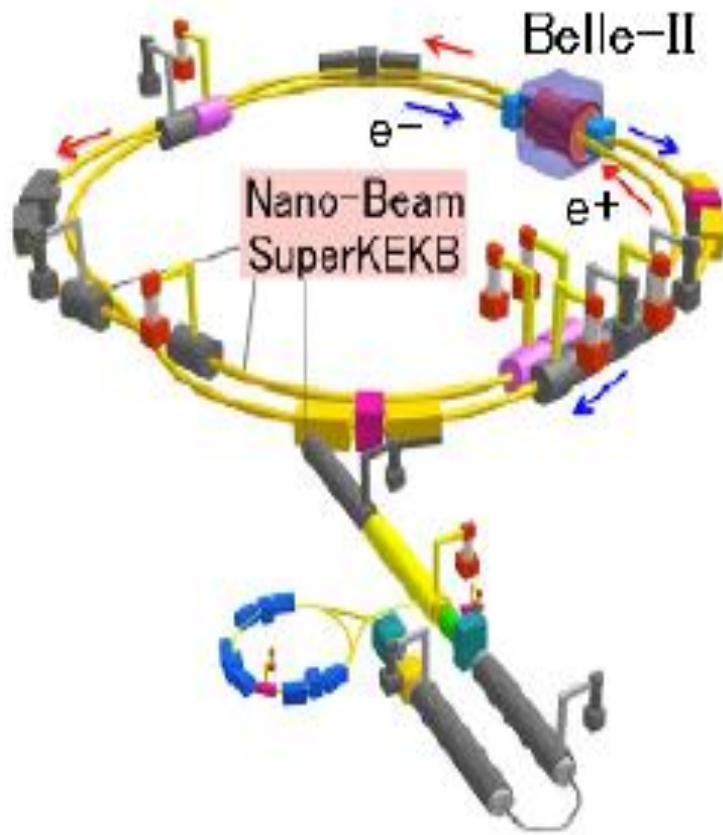
- Belle II 実験
 - Bファクトリー実験とその高度化
 - SuperKEKB加速器
 - Belle II 測定器
- 低マルチプリシティ事象とBhabha散乱
 - $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ 事象
 - Bhabha散乱
 - 輻射補正とイベントジェネレーター
- Bhabha散乱のトリガー条件
 - Belle 実験でのトリガー
 - Belle II 実験での改善の可能性
 - Bhabha識別条件の付加
- まとめ

Belle II 実験

Bファクトリー実験とその高度化

- B中間子を大量に生成し、その崩壊過程を研究
- 高エネルギー加速器研究機構(Belle実験)とSLAC国立加速器研究所ではB中間子の崩壊におけるCP対称性の破れを測定
 - 小林・益川のノーベル物理学賞にも決定的な貢献
- $B^0 \rightarrow \Phi K^0$ や $B^0 \rightarrow \eta' K^0$ など稀崩壊過程におけるCP非保存の測定による新物理の探索
 - 更なるルミノシティの向上が必要
- 様々な物理過程(終状態に発生する粒子数が少ない低マルチプリシティ事象など)も研究可能になる

SuperKEKB加速器



- 電子7GeV・陽電子4GeVの非対称エネルギー衝突加速器
- 新物理探索のため、ルミノシティ向上(KEKB加速器で到達したルミノシティの約40倍)
- 既存の周長3kmのトンネル内の加速器コンポーネントの置換によりアップグレード
- 極低エミッタンスのビームを有限角度で衝突させるナノビーム方式

Belle II 測定器

粒子識別・飛行時間測定
(TOP)

K^\pm と π^\pm の識別

電磁カロリメーター
(ECL)

電子・光子のエネルギー測定

荷電粒子識別装置
(A-RICH)

K^\pm と π^\pm の識別

崩壊点検出器
(PXD+SVD)

長寿命粒子識別
(KLM)

中性 K 中間子、 μ 粒子検出

中央飛跡検出器
(CDC)

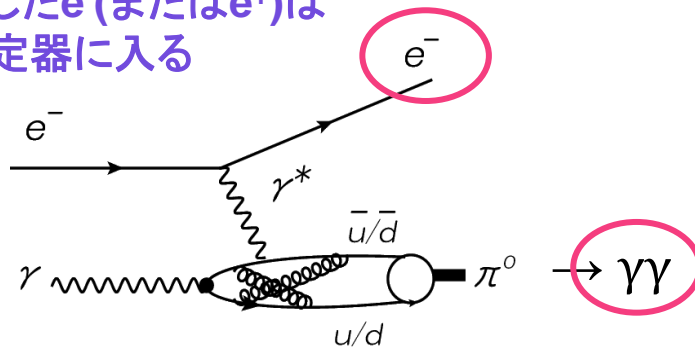
荷電粒子の飛跡・運動量測定

低マルチプリシティ事象と Bhabha散乱

$\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ 事象 (低マルチプリシティ事象の代表)

- 仮想光子とほぼ実光子の衝突による π^0 生成
- Transition Form Factor という非摂動論的QCDの最も基本的な量の一つ
- 終状態では電子(or 陽電子)一つと π^0 ($\rightarrow\gamma\gamma$:多くは近接)一つが検出される
- Bhabha散乱(電子・陽電子の弾性散乱)と識別が難しい

仮想光子 γ^* を放出した e^- (または e^+) は大きく散乱されて測定器に入る



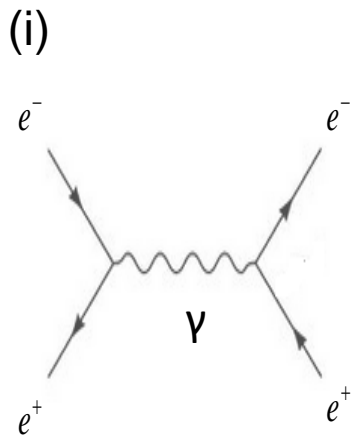
参考

Phy.Rev.D86,092007(2012)

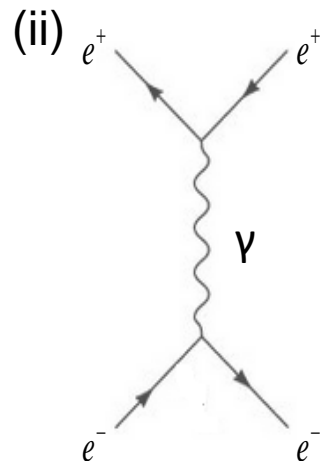
Bhabha散乱

最低次のファインマン図

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$



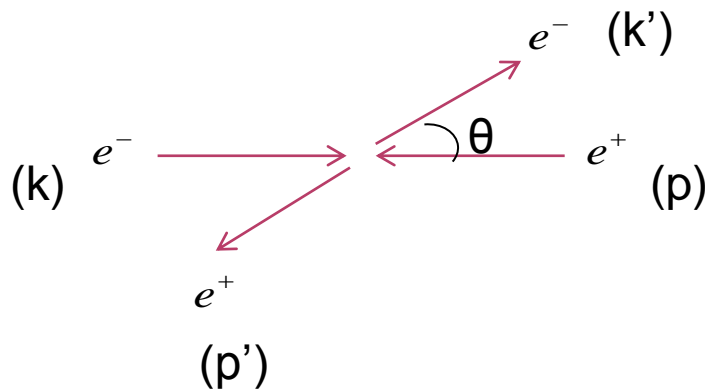
s チャンネル



t チャンネル

- 量子電磁気学(QED)に基づく
= 既によくわかっている
- 測定器の較正やルミノシティ測定に必要なだけ記録すれば十分
- 終状態が電子以外のフェルミ粒子対であれば(i)のみ。
Bhabha散乱は(ii)も寄与し、これが大きい
- $O(\alpha^2)$ の反応

最低次の断面積



Mandelstam変数

$$s \equiv (k + p)^2 = 4E^2$$

$$t \equiv (k - k')^2 = -2E^2(1 - \cos\theta)$$

$$u \equiv (k - p')^2 = -2E^2(1 + \cos\theta)$$

不変振幅の絶対値の二乗

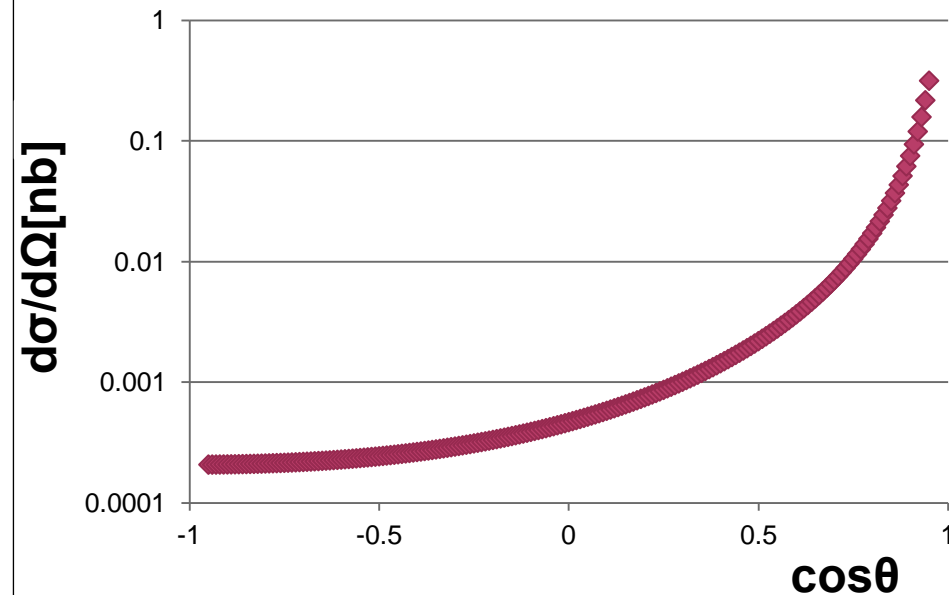
$$\begin{aligned} |m|^2 &= 2e^4 \left(\frac{s^2 + u^2}{t^2} + \frac{2u^2}{ts} + \frac{u^2 + t^2}{s^2} \right) \\ &= 2e^4 \left\{ \frac{4 + (1 + \cos\theta)^2}{(1 - \cos\theta)^2} - \frac{(1 + \cos\theta)^2}{1 - \cos\theta} + \frac{(1 + \cos\theta)^2 + (1 - \cos\theta)^2}{4} \right\} \end{aligned}$$

微分断面積

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{64\pi^2 s} |m|^2$$

最低次の散乱断面積

< 微分断面積 >



重心系エネルギーをY(4S)にあわせるとB中間子対を生成

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow B\bar{B}) \sim 1.1 \text{ nb}$$

散乱角 $17^\circ < \theta < 163^\circ$ (重心系)で

39.9 nb

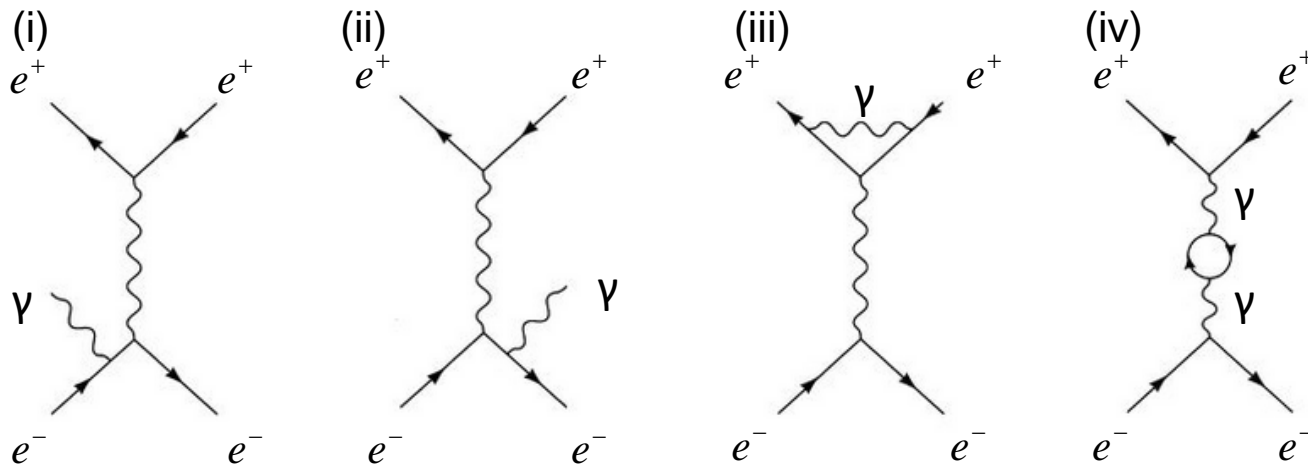
→ 事象を間引き(プリスケール)する
もしB中間子対の生成と同じレートにしたければ
1/40にプリスケール

輻射補正

Bhabha散乱の $O(\alpha^3)$ 補正項

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$$

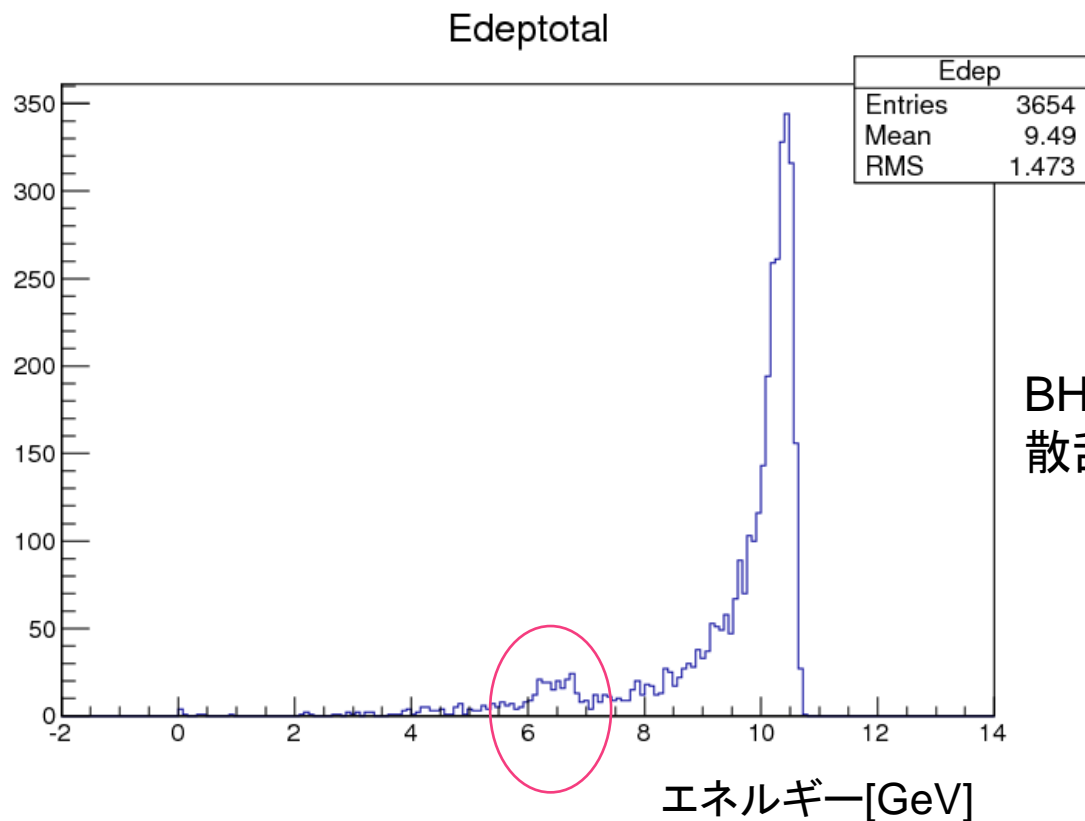
$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$



このような補正項も考慮してBhabha散乱を生成するイベントジェネレーター(BHWIDEプログラム)を用いた

Bhabha散乱のトリガー条件

Bhabha散乱の 電磁カロリメーターでの全検出エネルギー



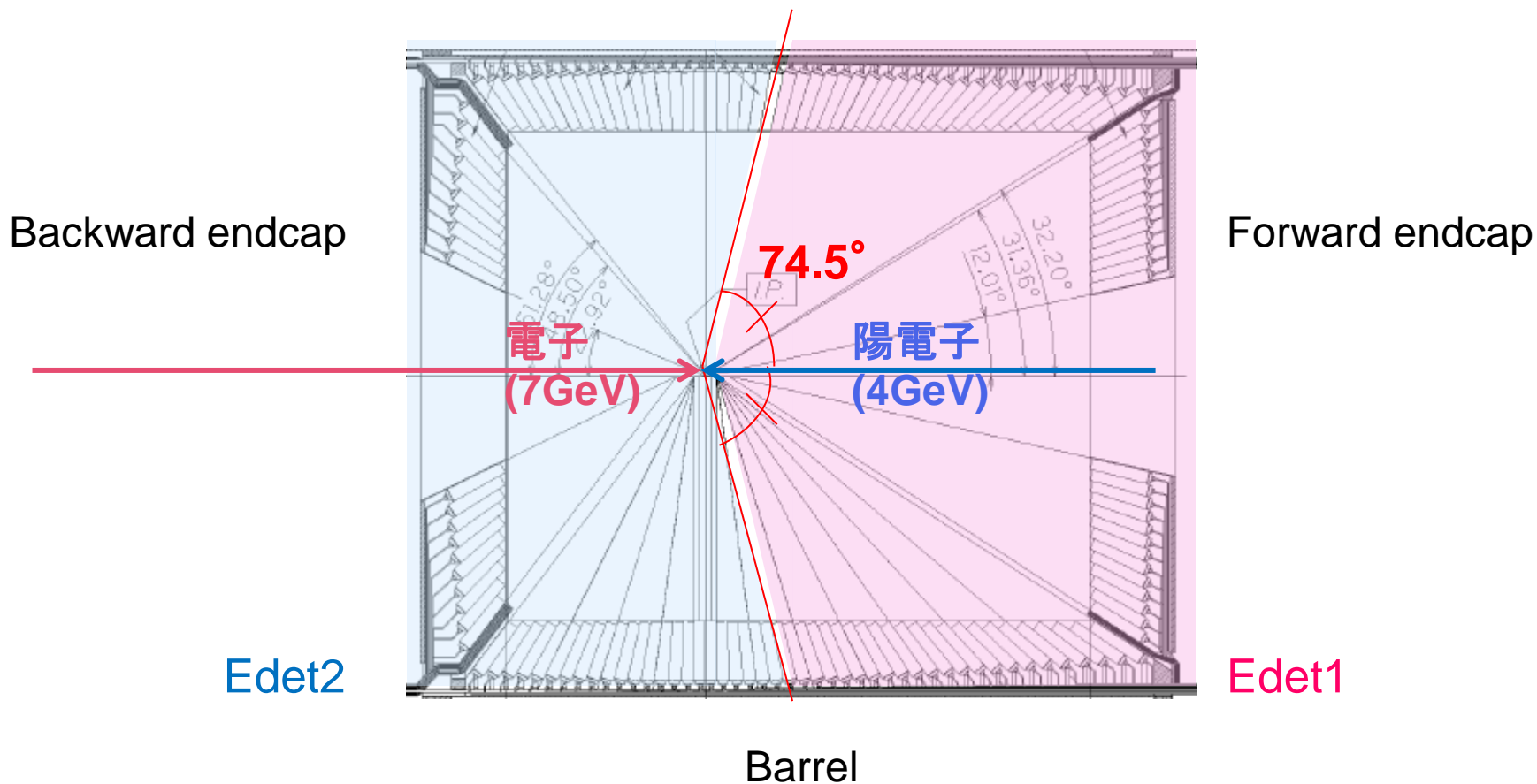
全検出エネルギーが
低い事象もある

BHWIDEジェネレーターで
散乱角 $19.7^\circ < \theta < 160.3^\circ$ (重心系)

Bhabha散乱はECLで検出する
エネルギーが大きい！
(電子7GeV・陽電子4GeVの衝突実験)

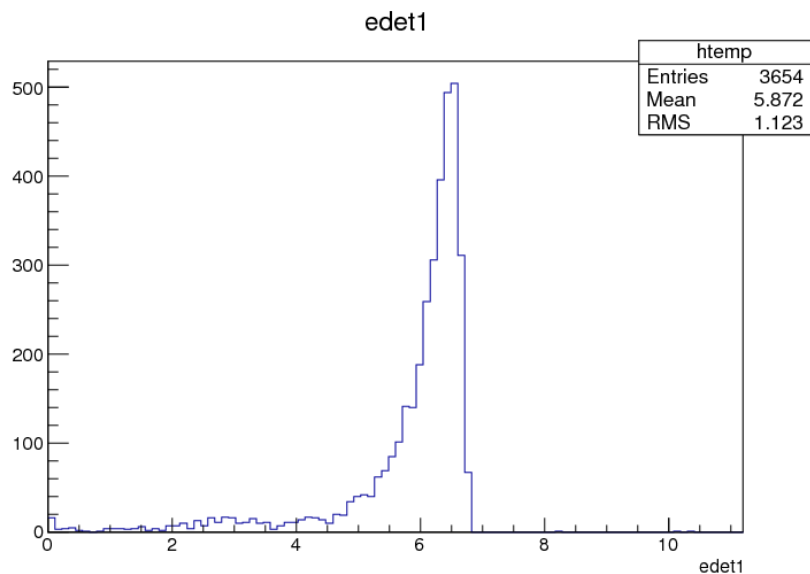
電子・陽電子によるエネルギー損失

$\theta=90^\circ$ in CM $\Leftrightarrow \theta=74.5^\circ$ in lab.



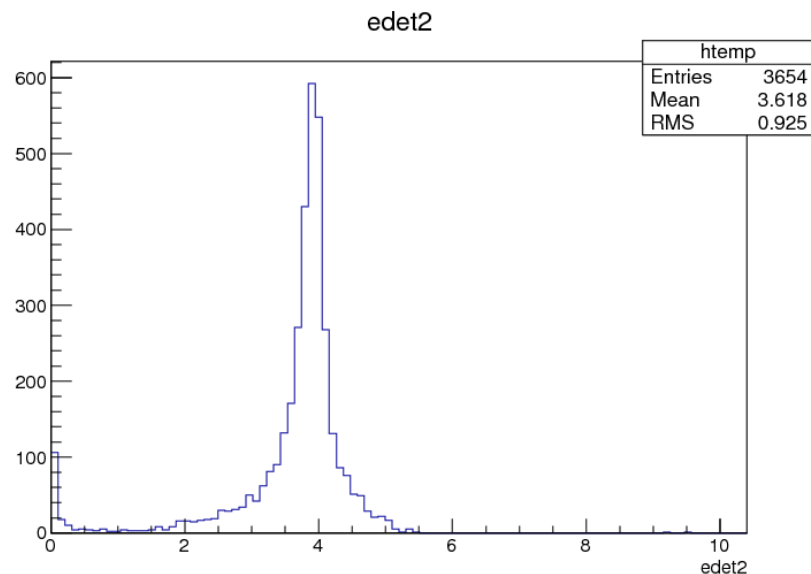
Edet1, Edet2の分布

(電子7GeV・陽電子4GeVの衝突実験)



エネルギー[GeV]

電子が支配的

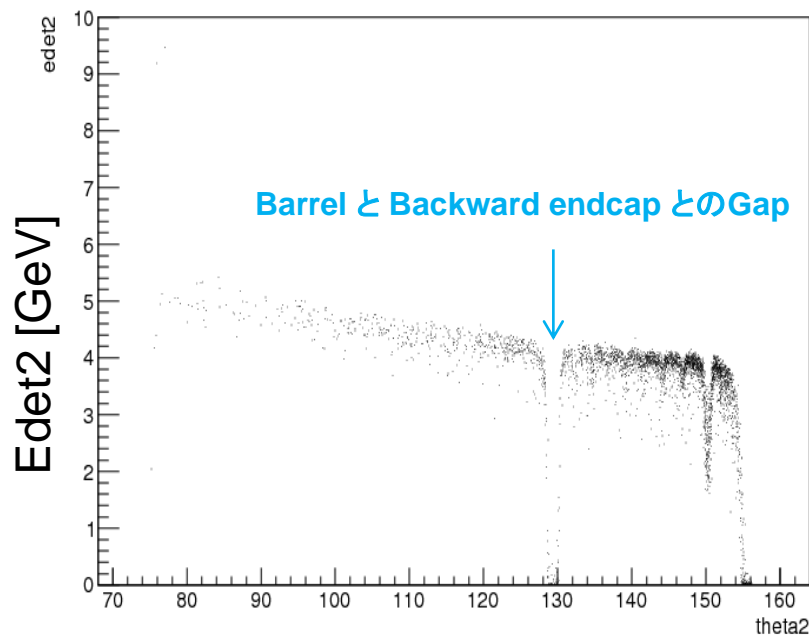


エネルギー[GeV]

陽電子が支配的

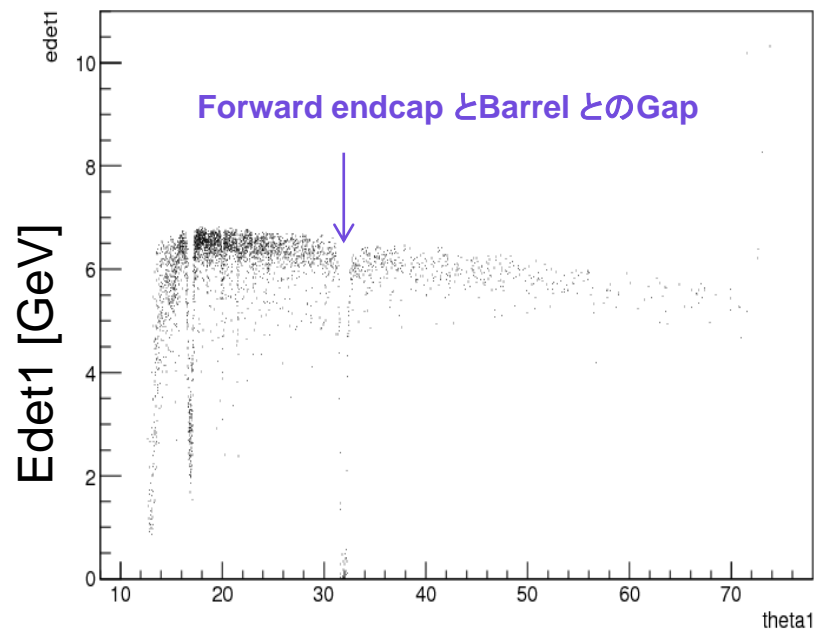
Edet1の θ_1 依存, Edet2の θ_2 依存

edet2:theta2 {theta2>74.5}

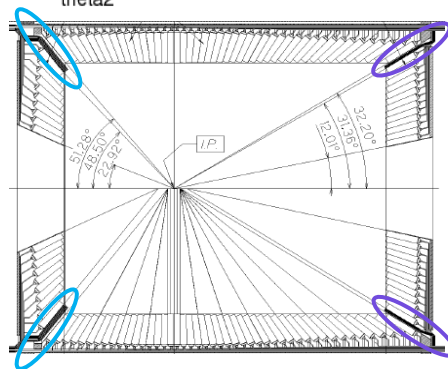


陽電子の散乱角 θ_2 [°]

edet1:theta1 {theta1<74.5}



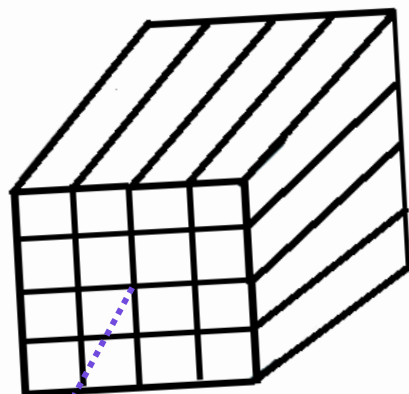
電子の散乱角 θ_1 [°]



ECLには内部検出器の配線や配管を通す隙間(Gap)がある

電磁カロリメーターにおけるトリガーセル(TC)

(CsIカウンター 8,736 本)



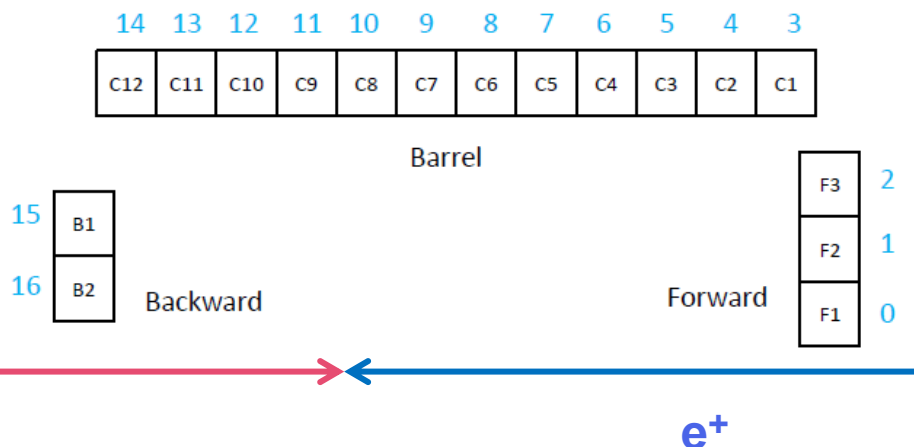
$4 \times 4 = 16$ 本のCsIカウンターの束
= トリガーセル(TC)

衝突点(IP)

- Belle / Belle II では全体で576個のTC
- TC内の16本のカウンター検出エネルギー和 $> 0.1\text{GeV}$ を要求

Belle実験でのBhabhaトリガー

TC θ ID



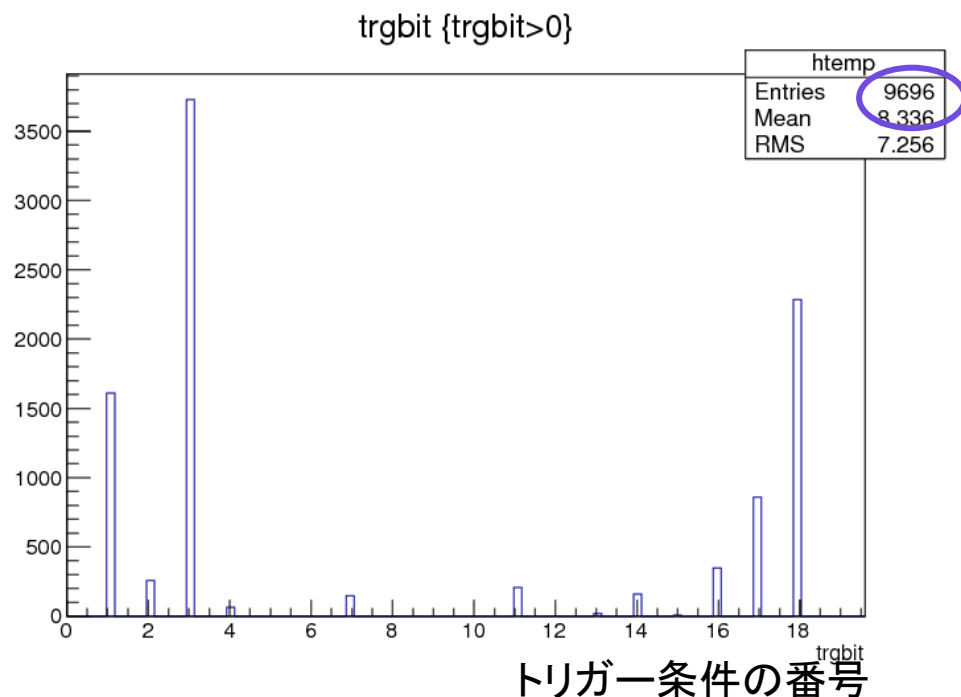
同一の θ (ビーム軸からのpolar angle) にあるTCのエネルギーを足し、F1~F3, C1~C12, B1~B2とする。

それらの組み合わせ18通りを考慮

trgbit	Combination(θ ID)	Energy cut(GeV)
1	F1+F2+F3+B1+B2	5.0
2	F3+C12	3.0
3	F2+F3(+backward gap)	5.0
4	C1(+backward gap)	4.0
5	C1+C11+C12	5.0
6	C2+C11+C12	5.0
7	C1+C2+C11	5.0
8	C2+C10+C11	5.0
9	C2+C9+C10	5.0
10	C2+C3+C10	5.0
11	C2+C3+C9	5.0
12	C3+C4+C9	5.0
13	C3+C4+C8	5.0
14	C4+C5+C8	5.0
15	C5+C7+C8	5.0
16	C5+C6+C7	5.0
17	C11+C12(+forward gap)	3.0
18	B1(+forward gap)	3.0

Bhabha識別条件のパターン分布

Bhabha散乱 10,000 イベント

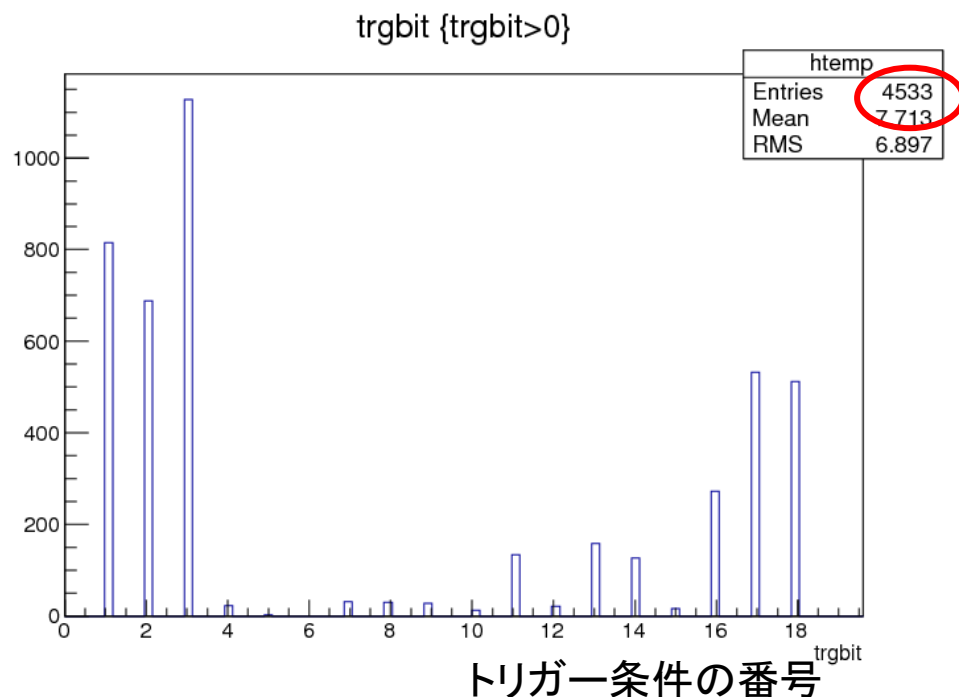


検出効率97%

trgbit	Combination(θ ID)	Energy cut(GeV)
1	F1+F2+F3+B1+B2	5.0
2	F3+C12	3.0
3	F2+F3(+backward gap)	5.0
4	C1(+backward gap)	4.0
5	C1+C11+C12	5.0
6	C2+C11+C12	5.0
7	C1+C2+C11	5.0
8	C2+C10+C11	5.0
9	C2+C9+C10	5.0
10	C2+C3+C10	5.0
11	C2+C3+C9	5.0
12	C3+C4+C9	5.0
13	C3+C4+C8	5.0
14	C4+C5+C8	5.0
15	C5+C7+C8	5.0
16	C5+C6+C7	5.0
17	C11+C12(+forward gap)	3.0
18	B1(+forward gap)	3.0

Bhabha識別条件のパターン分布

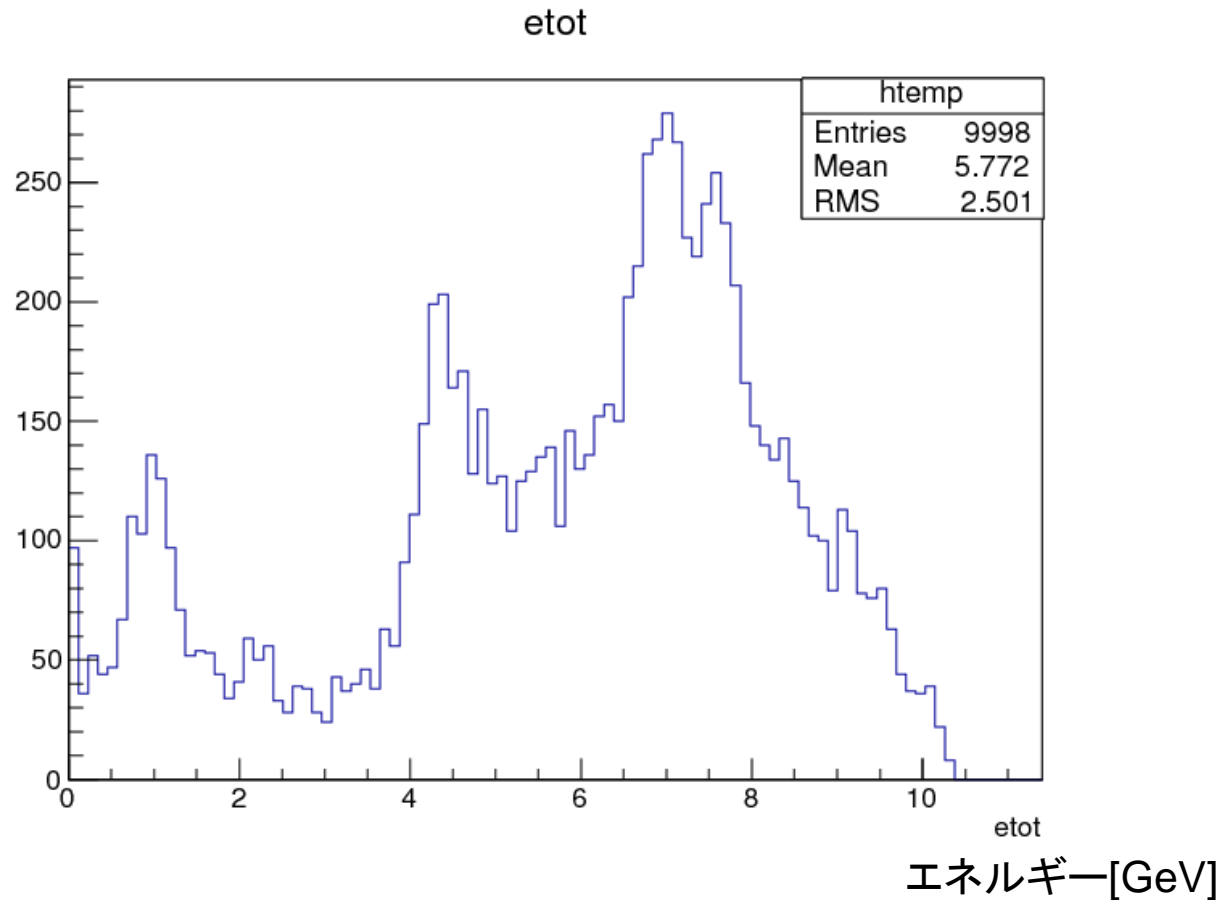
$\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ 10,000 イベント



誤認率45%

trgbit	Combination(θ ID)	Energy cut(GeV)
1	F1+F2+F3+B1+B2	5.0
2	F3+C12	3.0
3	F2+F3(+backward gap)	5.0
4	C1(+backward gap)	4.0
5	C1+C11+C12	5.0
6	C2+C11+C12	5.0
7	C1+C2+C11	5.0
8	C2+C10+C11	5.0
9	C2+C9+C10	5.0
10	C2+C3+C10	5.0
11	C2+C3+C9	5.0
12	C3+C4+C9	5.0
13	C3+C4+C8	5.0
14	C4+C5+C8	5.0
15	C5+C7+C8	5.0
16	C5+C6+C7	5.0
17	C11+C12(+forward gap)	3.0
18	B1(+forward gap)	3.0

$\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ 事象の ECLにおける全検出エネルギー

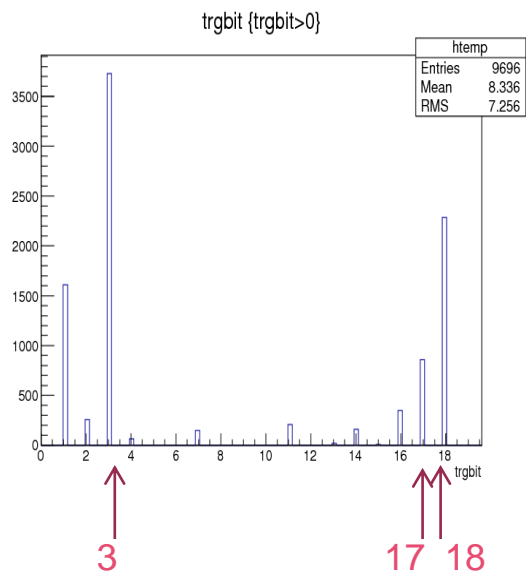


Bhabha散乱と似てECLでとらえるエネルギーが非常に大きい

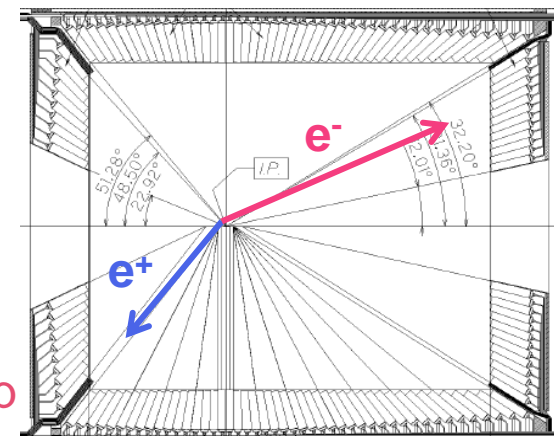
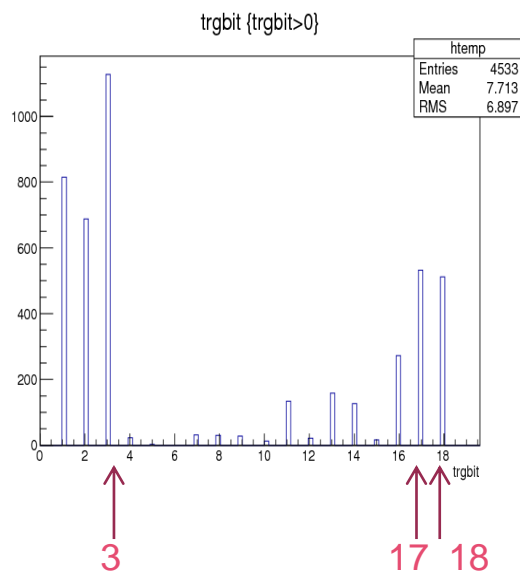
Bhabhaトリガーの検討

Ex) パターン番号 = 3

Bhabha散乱



$\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$

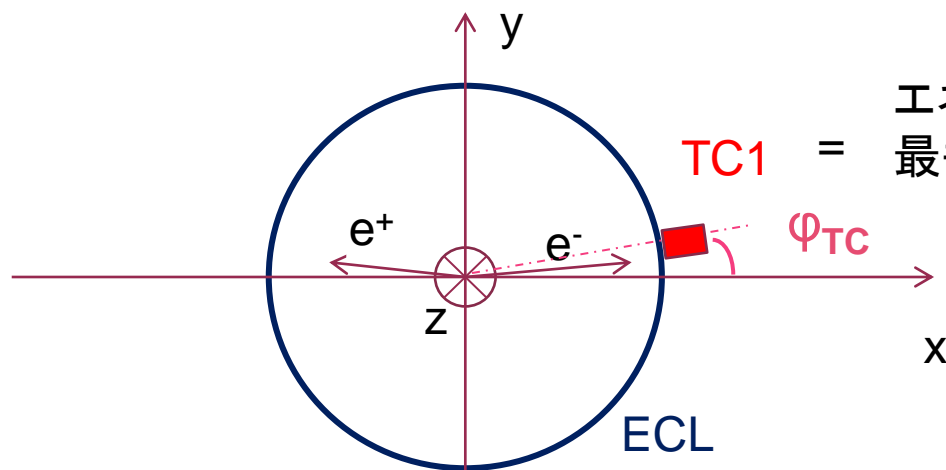


Gap

trgbit	Combination(θ ID)	Energy cut(GeV)
1	F1+F2+F3+B1+B2	5.0
2	F3+C12	3.0
3	F2+F3(+backward gap)	5.0
4	C1(+backward gap)	4.0
5	C1+C11+C12	5.0
6	C2+C11+C12	5.0
7	C1+C2+C11	5.0
8	C2+C10+C11	5.0
9	C2+C9+C10	5.0
10	C2+C3+C10	5.0
11	C2+C3+C9	5.0
12	C3+C4+C9	5.0
13	C3+C4+C8	5.0
14	C4+C5+C8	5.0
15	C5+C7+C8	5.0
16	C5+C6+C7	5.0
17	C11+C12(+forward gap)	3.0
18	B1(+forward gap)	3.0

Gapを考慮しているトリガー条件(パターン番号 = 3, 4, 17, 18)で識別されたものについて考える。

Bhabha散乱の場合



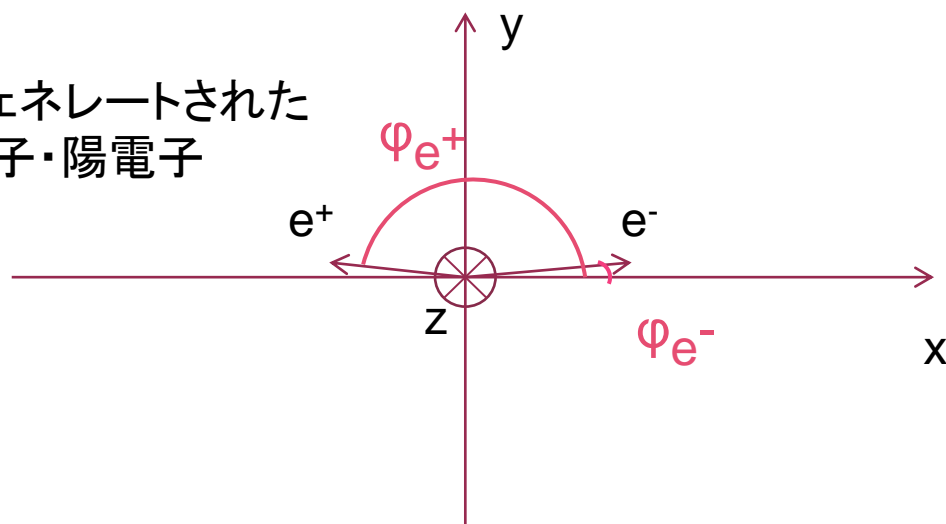
エネルギーが
最も大きいTC

$$\varphi_{TC} - \varphi_{e^+} = \Delta\varphi_{e^+}$$

$$\varphi_{TC} - \varphi_{e^-} = \Delta\varphi_{e^-}$$

とする。

ジェネレートされた
電子・陽電子

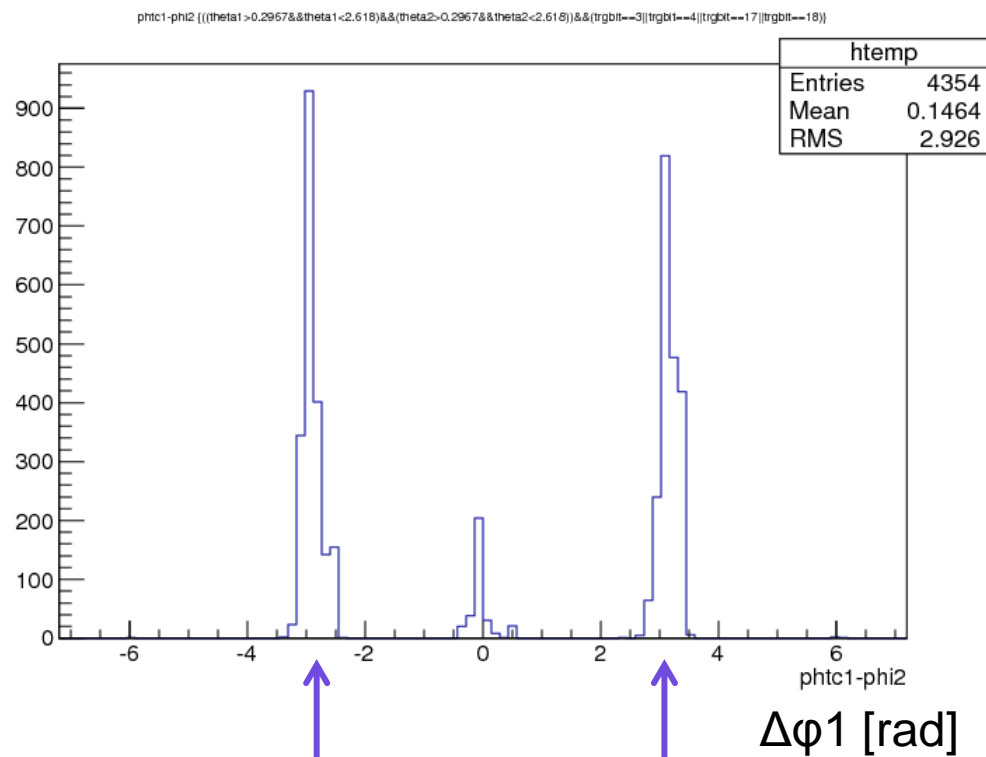
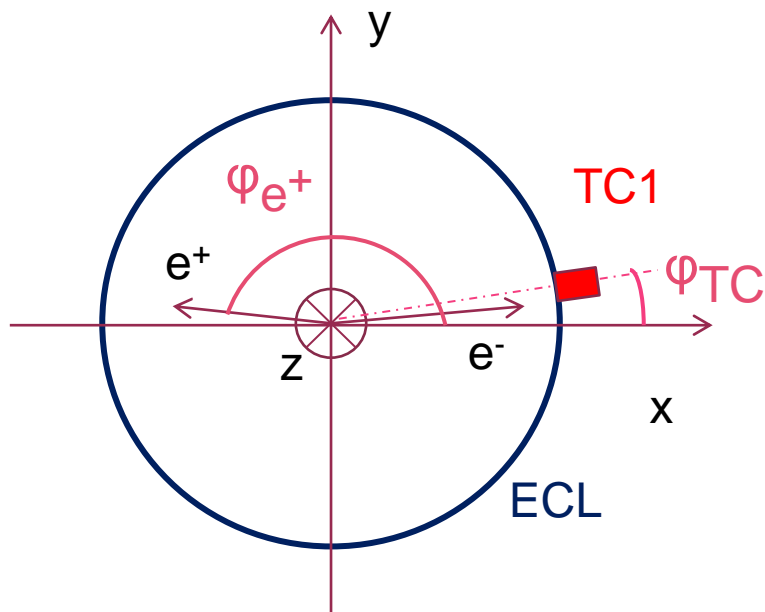


$\Delta\varphi_{e^+}$ か $\Delta\varphi_{e^-}$ のいずれかが
 $\pm\pi$ rad になる

Bhabha散乱の方位角の差($\Delta\varphi_{e^+}$)

Gapを考慮しているトリガー条件
(パターン番号3,4,17,18のどれか)で識別されたもの

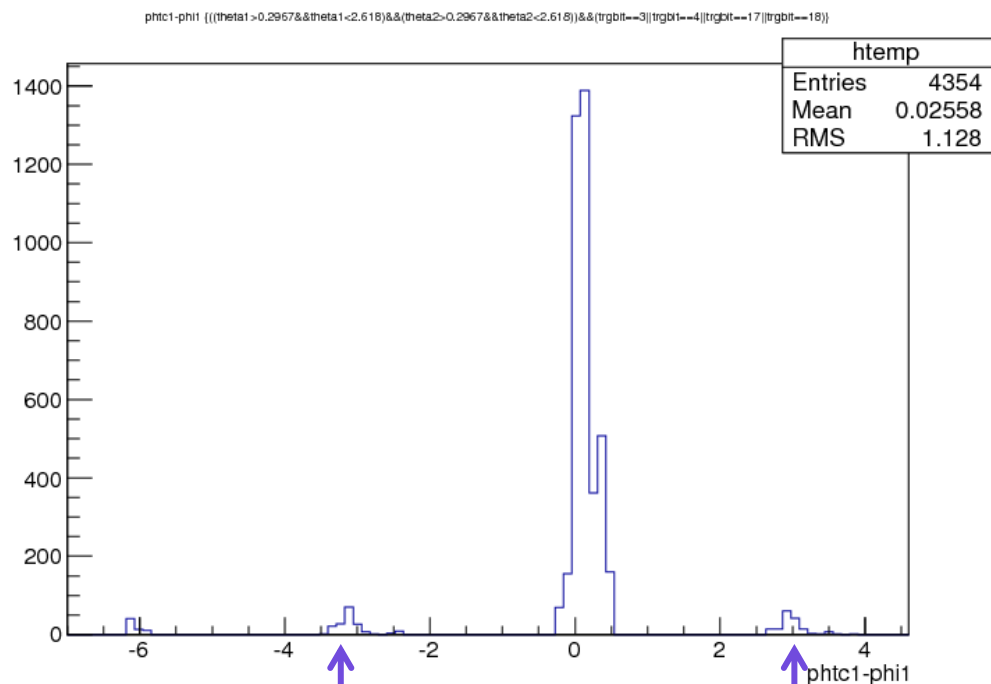
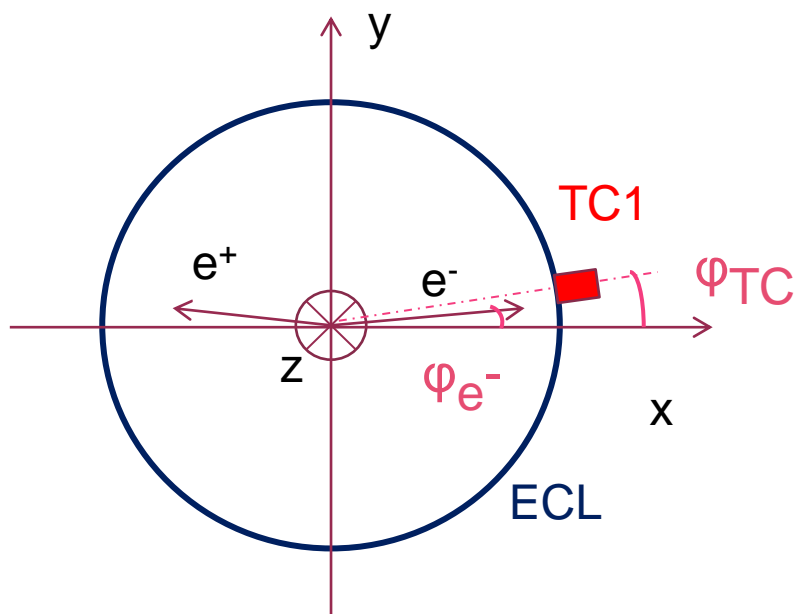
$$\Delta\varphi_{e^+} = \varphi_{TC} - \varphi_{e^+}$$



±π rad に事象の集中がみられる

Bhabha散乱の方位角の差($\Delta\varphi_{e^-}$)

$$\Delta\varphi_{e^-} = \varphi_{TC} - \varphi_{e^-}$$

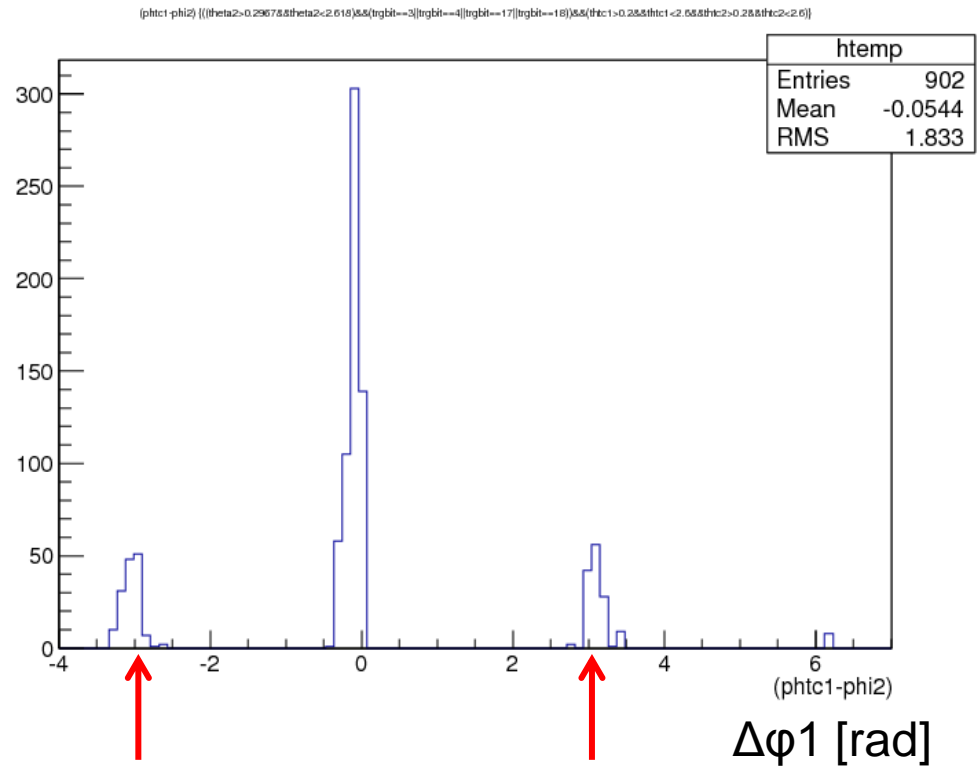
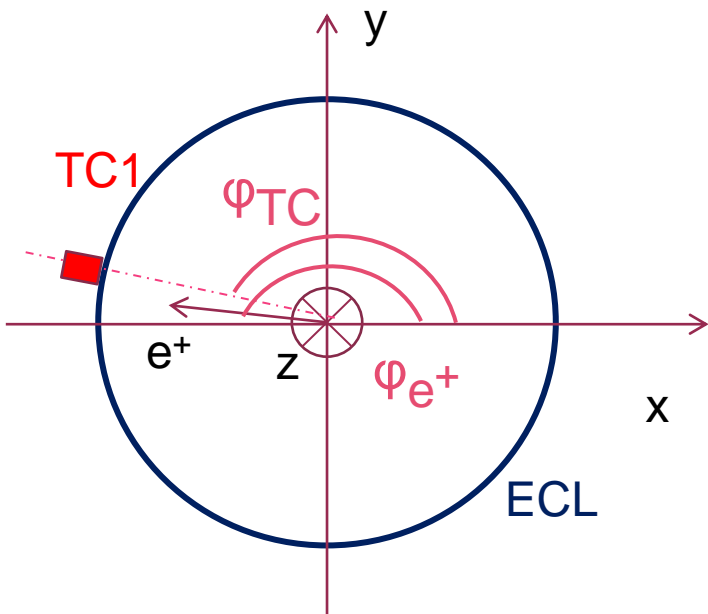


$\Delta\varphi_{e^-}$ [rad]
 e^+ がTC1を作る場合がある

TC1の反対側に e^+ または e^- がくることを要求してもBhabhaを失わない

$\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ 過程(陽電子が大きく散乱した場合) の方位角の差($\Delta\varphi_{e^+}$)

$$\Delta\varphi_{e^+} = \varphi_{TC} - \varphi_{e^+}$$

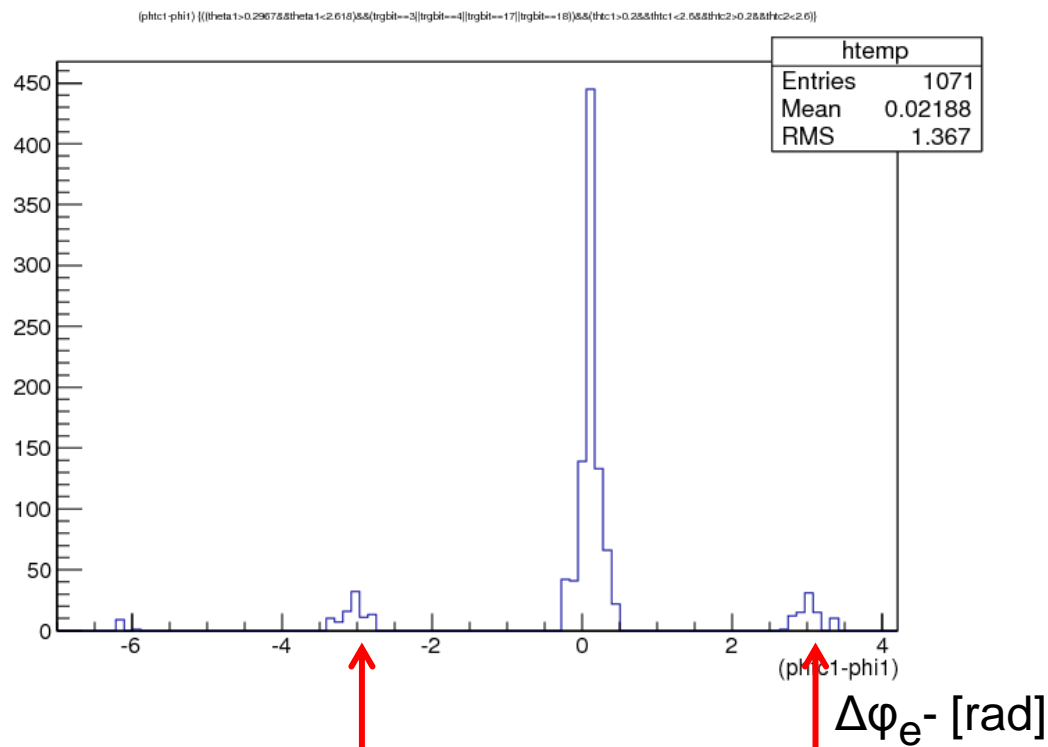
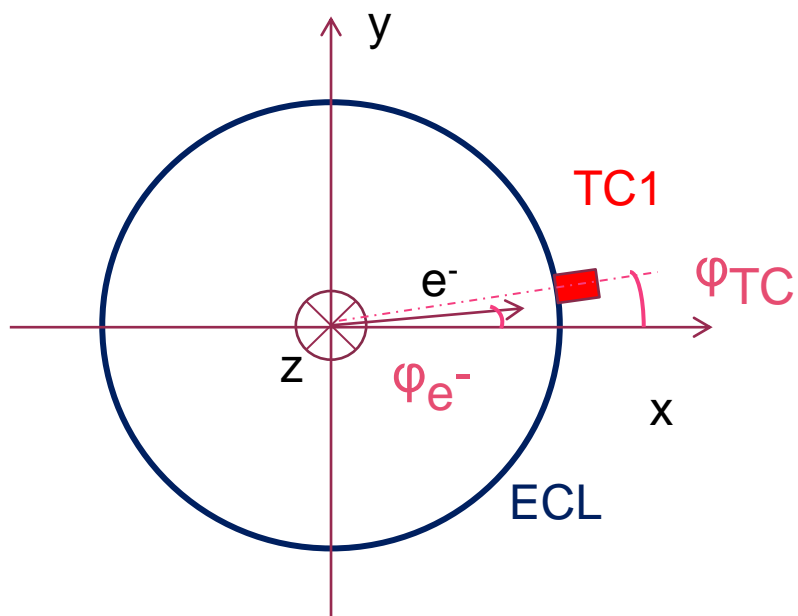


TC1が π^0 によるもの

± π rad にくる事象もあるが、量は少ない

$\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ 過程(電子が大きく散乱した場合) の方位角の差($\Delta\varphi_{e^-}$)

$$\Delta\varphi_{e^-} = \varphi_{TC} - \varphi_{e^-}$$



TC1が π^0 によるもの

± π rad にくる事象もあるが、量は少ない

Bhabhaトリガー条件の追加

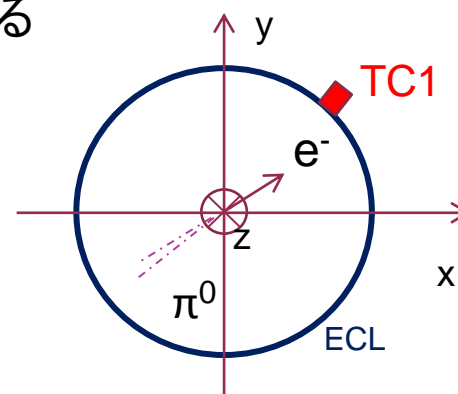
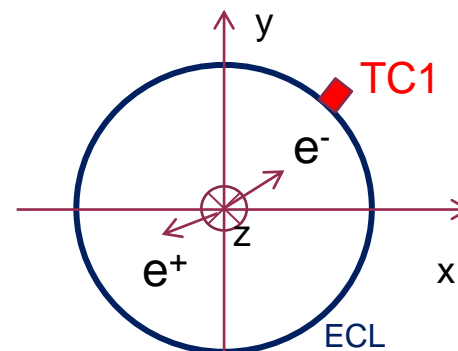
Belle実験でのBhabha識別トリガーにおいてGapを考慮している条件(パターン番号=3,4,17,18)で識別されたものについて以下の条件を追加

➤ Bhabha散乱事象

TC1の反対側に e^- または e^+ がある

➤ $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ 事象

- ・ ほとんど、大きく散乱された e^- (または e^+)がTC1をつくる
- ・ 反対側に荷電粒子なし



TC1の ϕ と e^- (または e^+)の ϕ の間の相関に着目

結果

Gapを考慮している条件(パターン番号=3,4,17,18)で識別されたものに新たに方位角の差の条件を追加した。

➤ Bhabha散乱事象

→ 失われない

➤ $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ 事象 (全10,000事象)

→ TC1の反対側に e^- または e^+ がある 479 events

これはBhabhaから見分けられない。
 $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ として4.8%のロス

まとめ

- Belle II 実験ではBelle 実験の約40倍のルミノシティを目標にし、高頻度の事象の記録を可能にする。
- 高ルミノシティの実験により、様々な物理過程もこれまでにない感度で研究の対象になる。この中には低マルチプリシティ事象が含まれる。
- 低マルチプリシティ事象の一つである $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ 事象はBhabha散乱に誤認されやすい。→ 45%が誤認される
- 今回検討した、TC1と e^+ または e^- の方位角の差に関する条件の追加で $\gamma\gamma^* \rightarrow \pi^0$ 事象をBhabha散乱と誤認する確率が4.8%まで低減可能。
- 中央飛跡検出器と電磁カロリメーターのように複数の測定器コンポーネントの情報を組み合わせる高レベルトリガーの設定と運用が求められる。