

# 高輝度電子-陽電子衝突型加速器 を用いた ダークマターの探索

2020/2/14 修士論文発表会

高エネルギー物理学研究室  
藪内 晶友美(saa\_yabuuchi@cc.nara-wu.ac.jp)

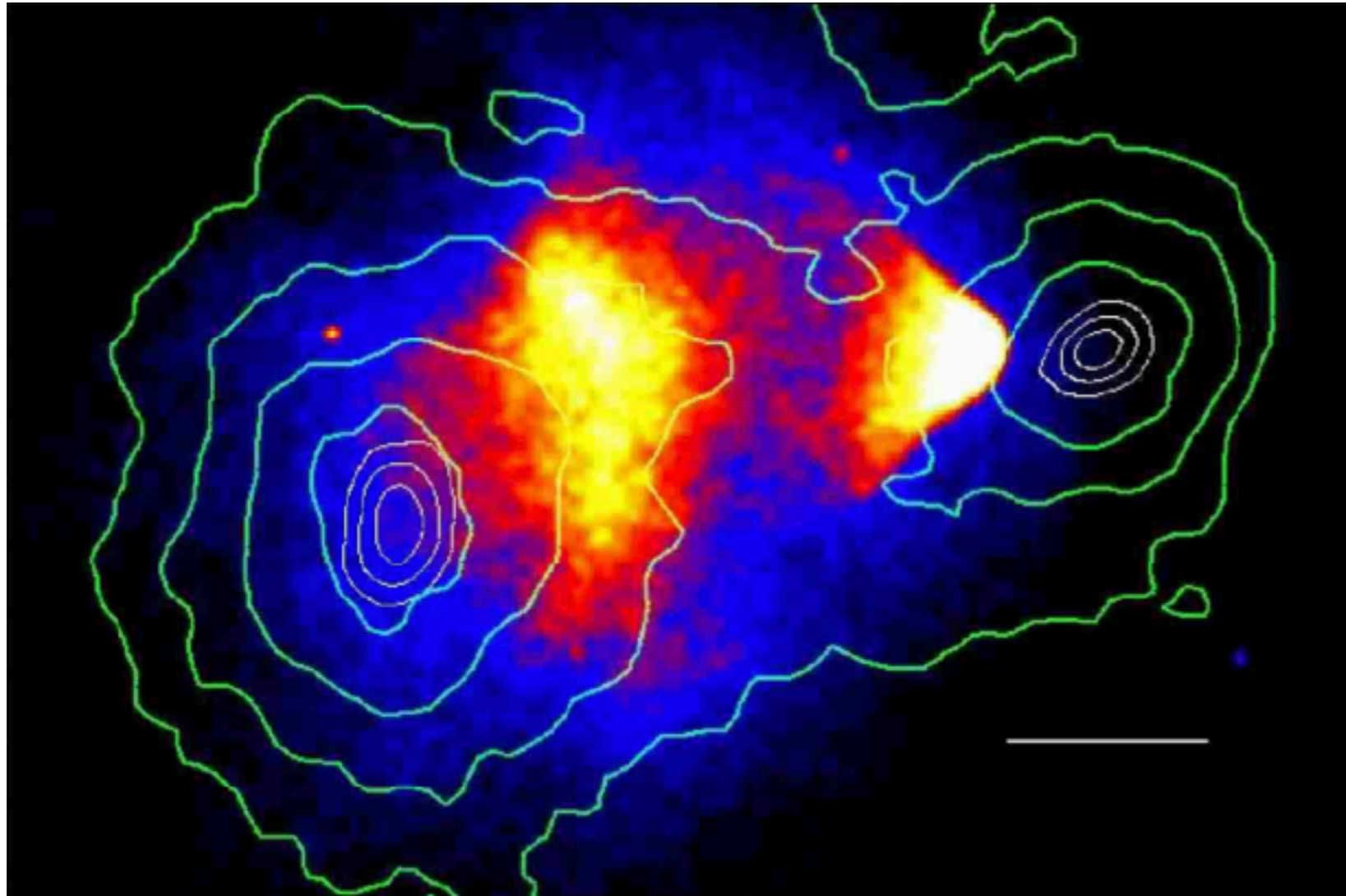
 Belle II



# Contents

1. 研究のモチベーション
2. Belle II実験
3. ダークフォトンの  
検出感度測定
4. まとめ

# (1) ダークマター



◀ 銀河団同士の衝突  
(カラー)：x線観測  
(緑)：重力レンズ

- ・ 光では見えない重力源が存在。
- ・ 質量の多い部分(重力レンズ)と明るい部分(X線)がずれている。

# ダークマター

宇宙の観測からダークマターの確かな証拠が数多く報告されている。

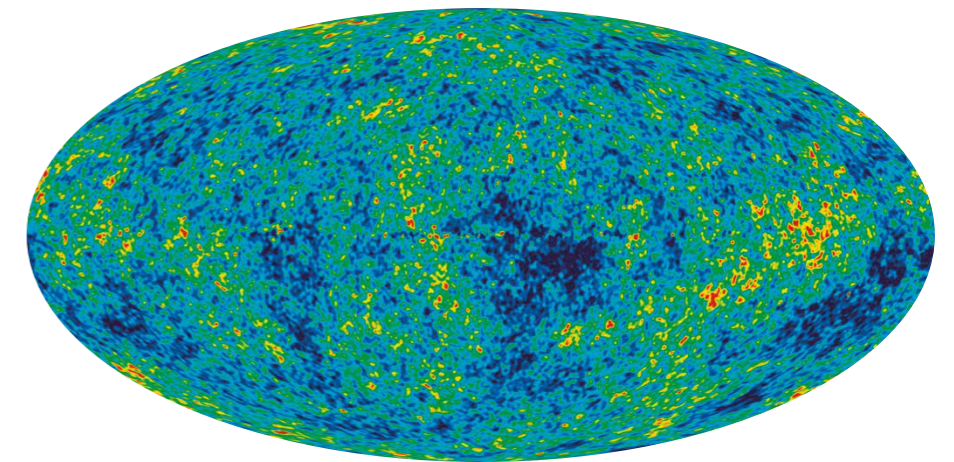
現在の宇宙でDMは通常物質(バリオン)の5倍

$$\Omega_{\text{DM}} = 26.8\%, \quad \Omega_{\text{通常}} = 4.9\%$$

素粒子の標準理論では対応する粒子は存在しない。

→素粒子物理、宇宙物理にとって大きな課題。

**ダークマター**を足掛かりにした新物理の探索が期待される。



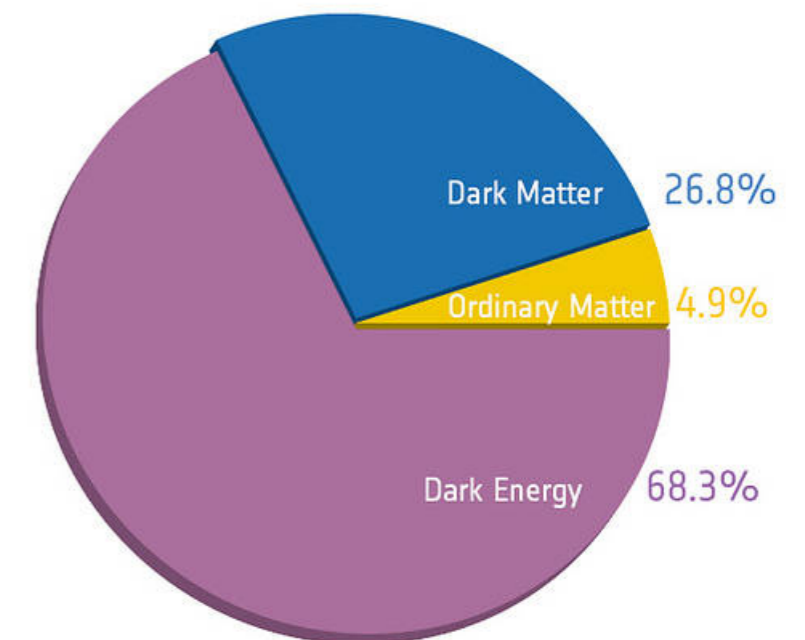
-200  $T(\mu\text{K})$  +200

▲WMAP衛星による宇宙背景放射(CMB)スペクトル

▼宇宙の組成比

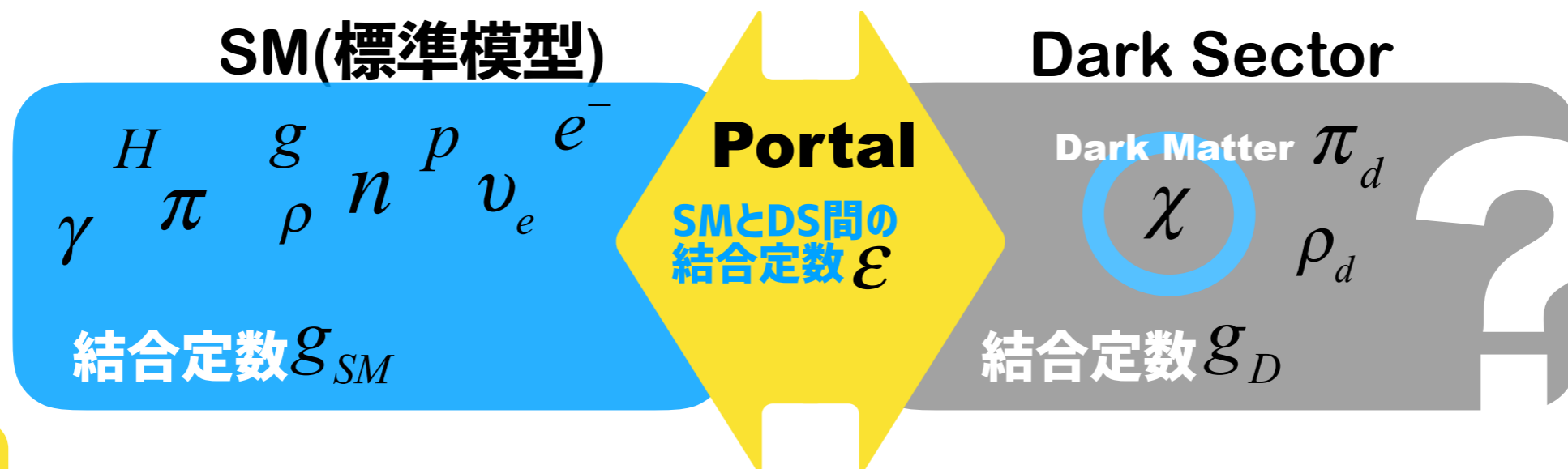
## ダークマターの性質

- 1.電氣的に中性
- 2.色荷を持たない
- 3.有限な質量持ち、非相対論的に運動
- 4.十分長い寿命を持つ



# ダークセクター

「**ダークセクター(DS : Dark Sector)**」という枠組みが注目されている。  
 残存するダークマターの量を説明するには、宇宙初期に標準模型の粒子(SM)とDS間の相互作用が必要、**仲介粒子のみを介して相互作用が可能と仮定。**  
 →その相互作用を媒介する粒子を「**仲介粒子(ポータル)**」と呼ぶ。



## 仲介粒子

- DMのひとつ、SMとDSの両方に結合する
- SMとの相互作用、ゲージ不変、ローレンツ不変を仮定
- ゲージ不変より、可能な相互作用は**4つ**に絞られる▶▶
- SMとの結合定数はフリーパラメータとする  
→**高統計**の実験が必要

**ベクターポータル(A')**→**ダークフォトン**など  
 スカラーポータル→**ダークヒッグス**など  
 擬スカラーポータル→**ALPs**など  
 ニュートリノポータル→**右巻きニュートリノ**

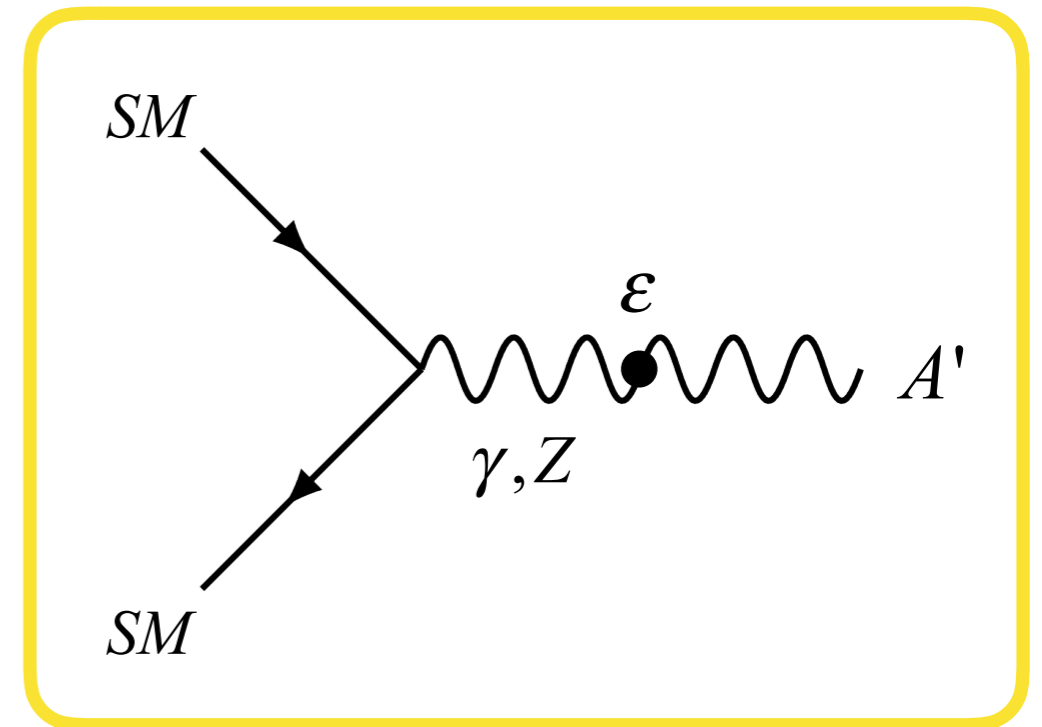
# ダークフォトン模型 : $A'$

SMの $U(1)_Y$ のテンソル場  $B_{\mu\nu}$ と、  
 DSの $U(1)_D$ のダークボソンのテンソル場  $A'^{\mu\nu}$ が  
**運動項**を通して**混合**、  
 ゲージ対称性に矛盾することなく  
 標準理論粒子との相互作用が可能。  
**(Kinematic coupling)**

ラグランジアンの運動項はSMの電弱相互作用  
 の破れのあと、

$$\frac{\varepsilon_Y}{2} B_{\mu\nu} A'^{\mu\nu} \rightarrow \frac{\varepsilon_Y}{2} (\cos\theta_W F_{\mu\nu} - \sin\theta_W Z_{\mu\nu}) A'^{\mu\nu}$$

$F_{\mu\nu}$ は光子、 $Z_{\mu\nu}$ は $Z^0$ のテンソル

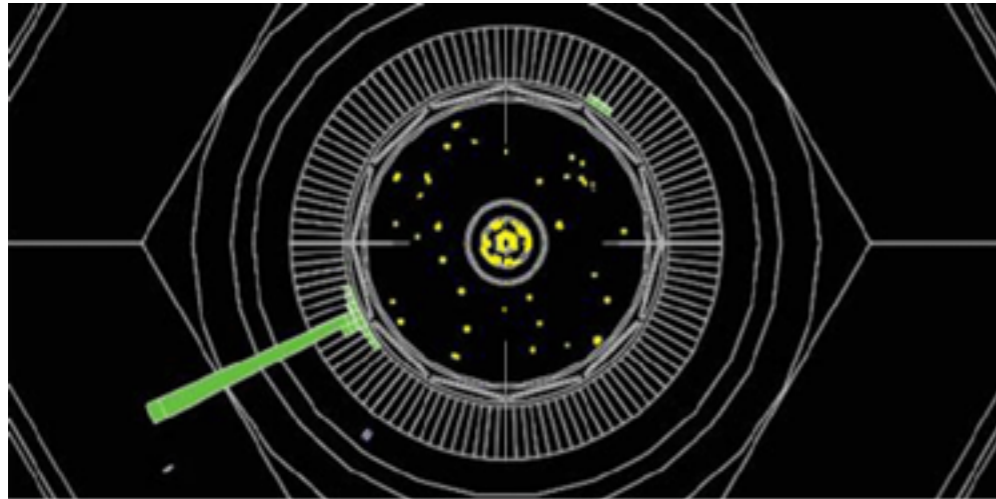


ダークフォトン $A'$ と  
標準理論の結合定数

$$\varepsilon = \varepsilon_Y \cos\theta_W$$

※以下、 $\varepsilon$ はフリーパラメータとして扱う

# $e^+e^-$ 衝突現象を用いたダークフォトン探索



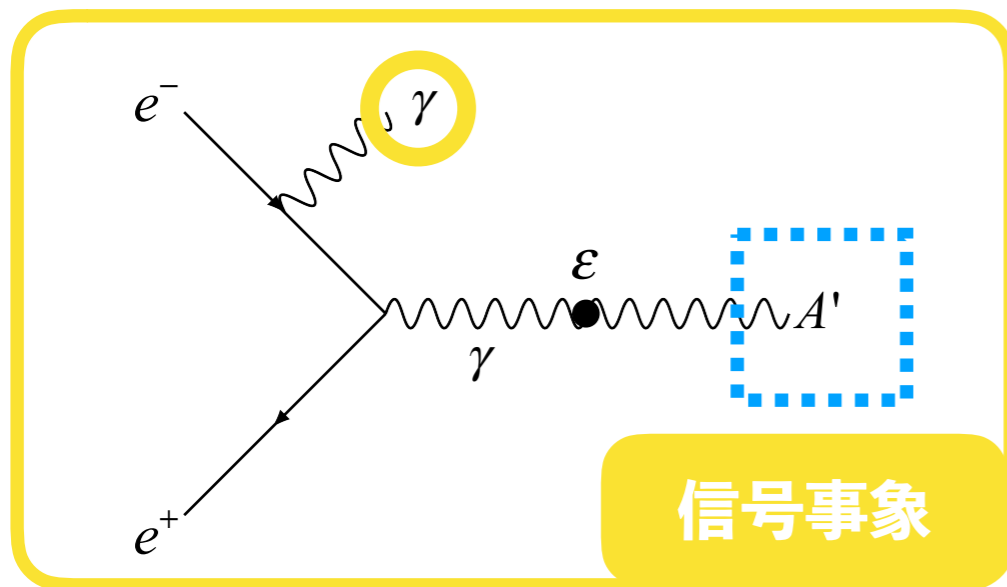
▲1光子事象のイベントディスプレイ

$e^+e^-$ 衝突型加速器でのinvisible粒子の探索  
→終状態が1つの光子のみの事象を利用。

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \text{invisible}$$

光子のエネルギー $E_\gamma$ を測定する事によって  
invisibleな系の質量 $M_{inv}$ が決まる。

$$E_\gamma = \frac{1 - M_{inv}^2}{s}$$



▲ $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + A'$ 事象 ( $A'$ は観測されない)

もしダークフォトン $A'$ が生成されていれば  
 $M_{inv}$ の分布に $A'$ の質量 $M_{A'}$ のピーク構造が見える。  
( $M_{inv} = M_{A'}$ )

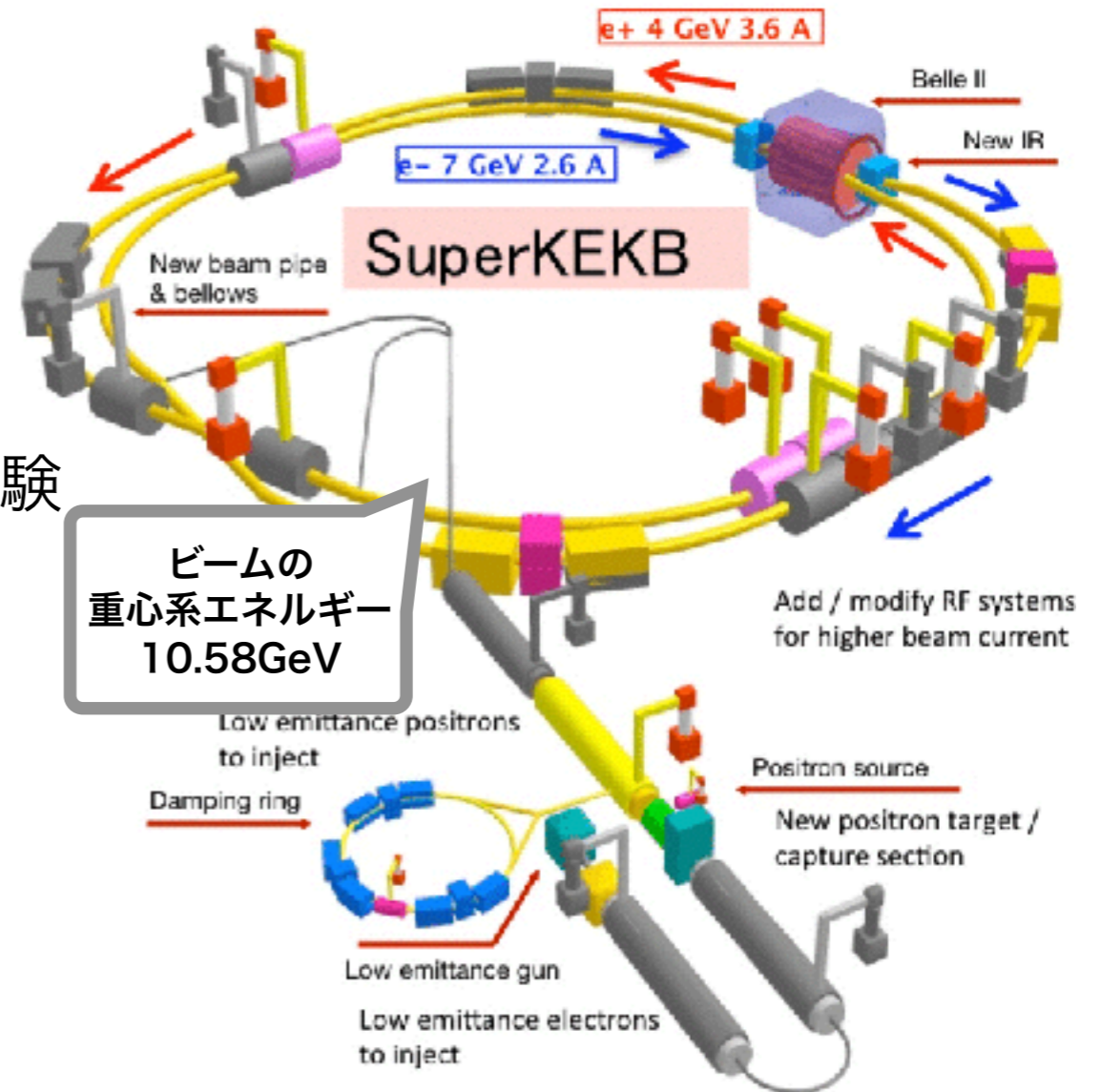
# 2. Belle II実験



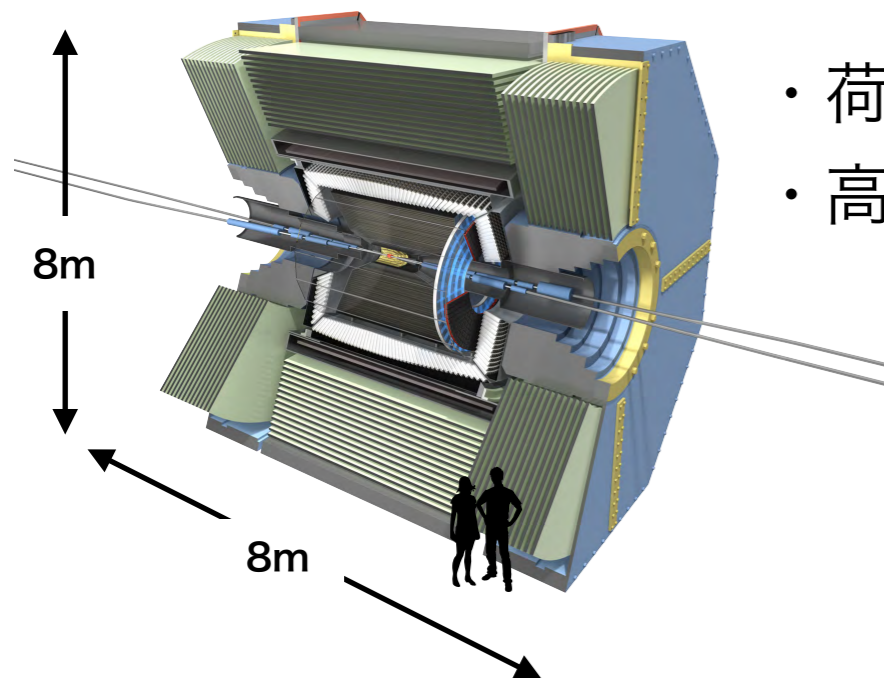
# Belle II 実験

非対称エネルギーの電子-陽電子衝突型加速器  
**SuperKEKB**と、**Belle II 検出器**  
 を用いて行われるルミノシティフロンティア実験

B中間子の物理をはじめ、**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



- ・ 荷電粒子、光子等の中性粒子の検出能力を備えた大型測定器
- ・ 高い運動量分解能、エネルギー分解能、粒子識別能力を持つ

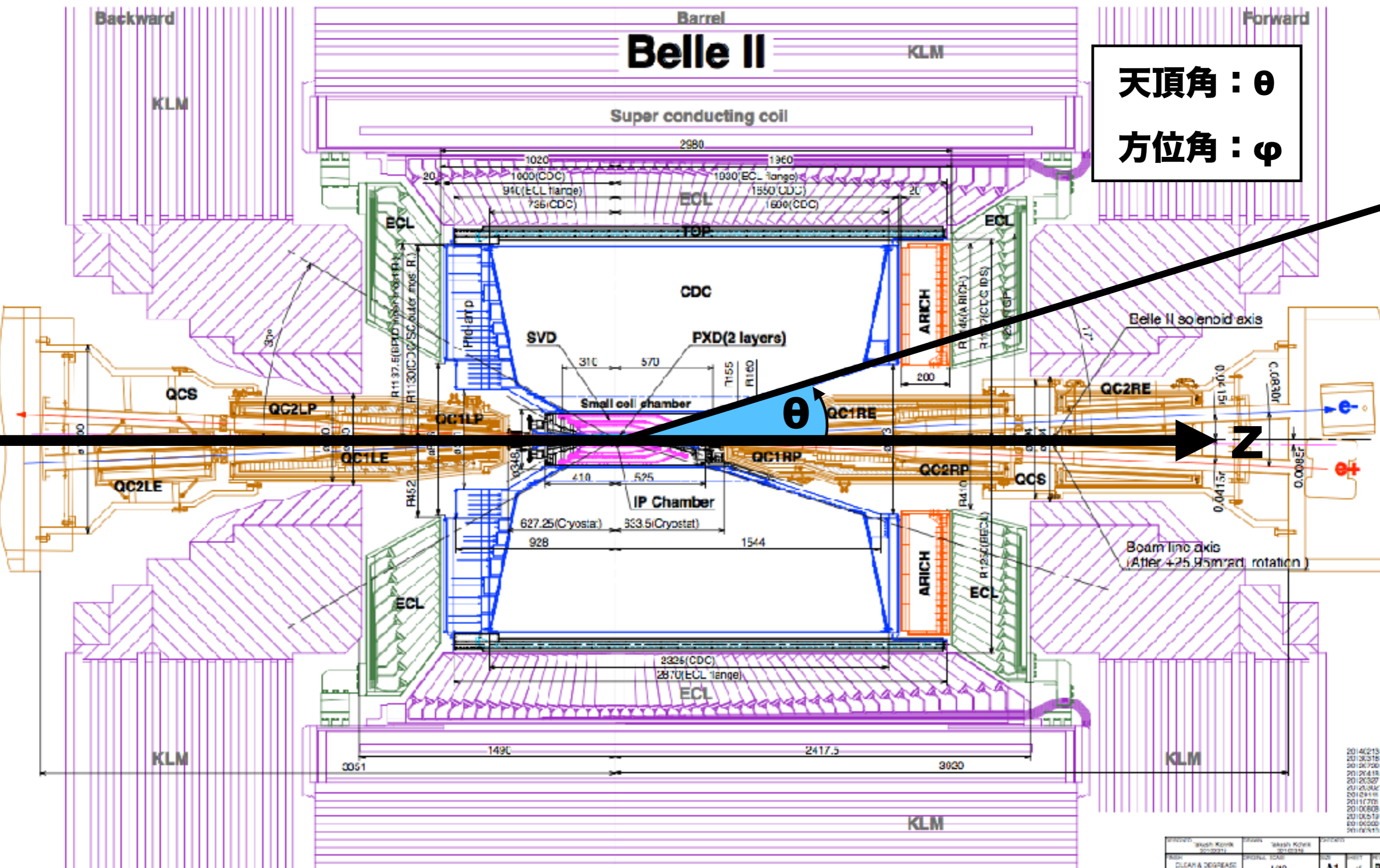
**崩壊点検出器**：粒子の崩壊点の検出

**中央飛跡検出器**：荷電粒子の飛跡・運動量・エネルギー損失の測定

**粒子識別検出器**：粒子の種類同定

**電磁カロリメータ**：電子の識別・**光子のエネルギー測定**

TOP VIEW



天頂角 :  $\theta$   
方位角 :  $\phi$

DESIGNER	WASHI KOVAC	DATE	2014/02/13
CHECKER	WASHI KOVAC	DATE	2013/03/18
APPROVER	WASHI KOVAC	DATE	2012/06/28
DATE	2012/04/18	REV	1
DATE	2012/03/27	REV	2
DATE	2012/03/04	REV	3
DATE	2012/01/11	REV	4
DATE	2011/07/28	REV	5
DATE	2010/08/08	REV	6
DATE	2010/05/17	REV	7
DATE	2010/05/09	REV	8
DATE	2010/04/13	REV	9

2014/02/13 R1P  
 QC25X151203  
 Belle-II(Nano beam)  
 IR=41.5mm (Top view A)

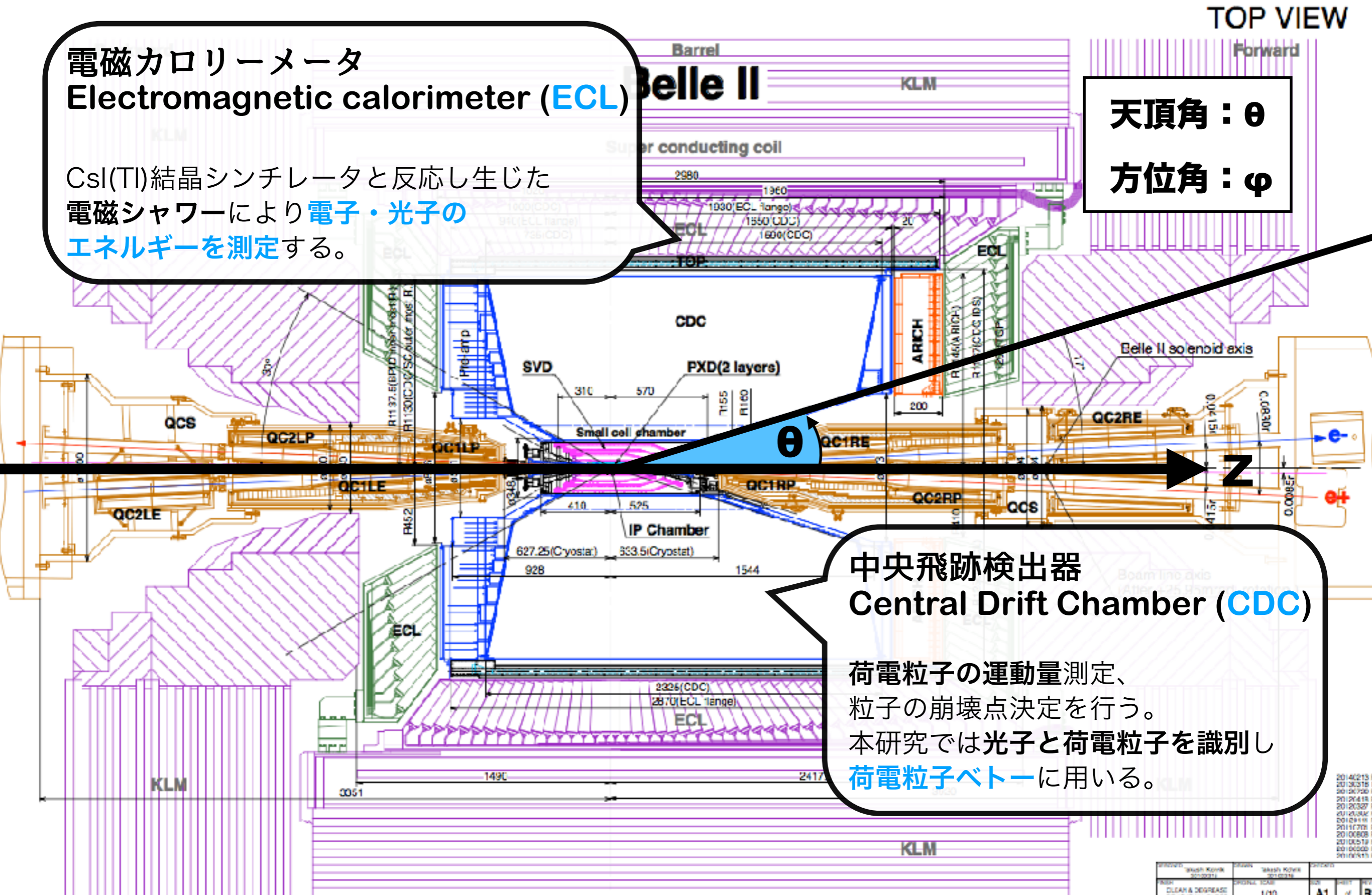
## 電磁カロリメータ Electromagnetic calorimeter (ECL)

CsI(Tl)結晶シンチレータと反応し生じた  
電磁シャワーにより電子・光子の  
エネルギーを測定する。

天頂角： $\theta$   
方位角： $\phi$

## 中央飛跡検出器 Central Drift Chamber (CDC)

荷電粒子の運動量測定、  
粒子の崩壊点決定を行う。  
本研究では光子と荷電粒子を識別し  
荷電粒子ベトーに用いる。



PROJECT	BRNSH KOVIM	BRNSH KOVIM	BRNSH KOVIM
REV	CLEAN & DEGREASE REMOVE ALL BURRS	1/10	A1
DATE	Celle-II(Nano beam) IR=41.5mm (Top view A)		20140213 20130318 20120720 20120418 20120327 20120304 20120116 20110708 20110608 20100517 20100509 20100415

# 3. ダークフォトンの 検出感度測定

モンテカルロシミュレーションによる検出効率や背景事象、  
トリガーの評価を行い

Belle II実験でのダークフォトン・ダークマターの  
探索可能領域について報告する。

# 信号事象MCサンプルの生成

信号事象  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + A'$  (1光子事象) の  
モンテカルロ(MC)サンプルを独自に生成。

$\beta = 1 - M_{A'}^2 / s$  とすると生成断面積は

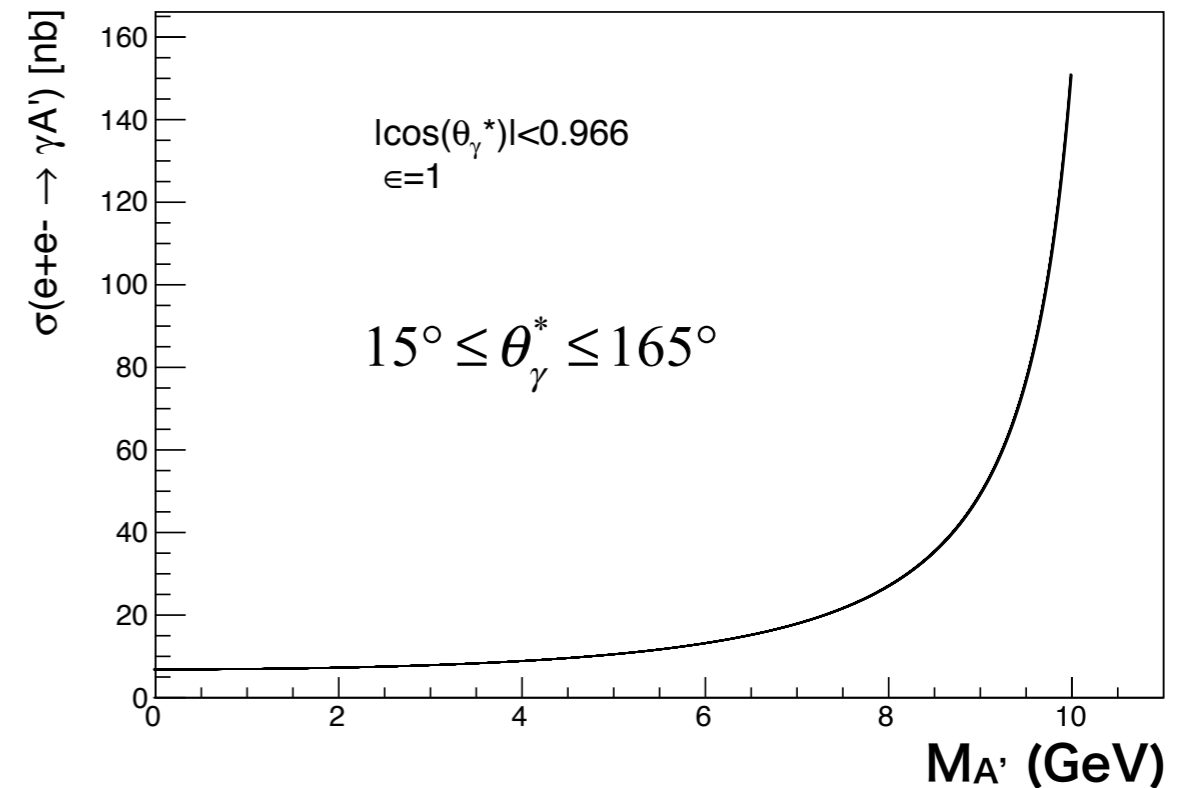
$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma + A') = \frac{3\alpha\epsilon^2}{s} \int d\cos\theta \frac{8 - 8\beta + 3\beta^2 + \beta^2 \cos 2\theta}{\beta \sin^2 \theta}$$

角度分布はSMとA'の結合が  
ベクター型であることから決まっている。

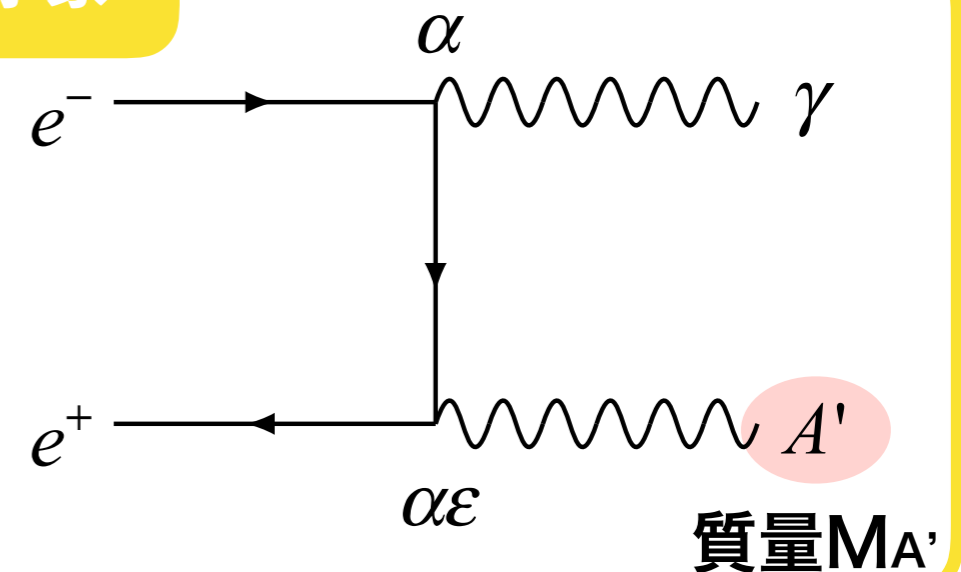
$\beta=1, \epsilon=1$  のとき

上の式は  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  の生成断面積に一致する。

▼  $\epsilon=1$  のときのA'の生成断面積  $\sigma^{A'}$



信号事象



# 信号事象MCサンプルの生成条件

- それぞれの $M_{A'}$ に対してMCサンプルを**10,000** イベントずつ生成。
- 作成したMCサンプルは実機をモデルにしたBelle II検出器シミュレーションを通し、その後実際のデータと同様の解析を行った。

$$M_{A'} = 0, 0.2, 0.5, 1, 1.7, 2.5, 3, 5, 6, 7, 8 \text{ (GeV)}$$

$$\theta^*_{\gamma} : f(\theta) = \frac{8 - 8\beta + 3\beta^2 + \beta^2 \cos 2\theta}{\beta \sin^2 \theta}$$

$$\theta [15, 165 \text{ (度)}]$$

$\phi^*_{\gamma}$  : 一様分布

$$\phi [0, 360 \text{ (度)}]$$

# 主要な背景事象

- ① イベント中に2個以上の光子が生成されているにも関わらず  
光子が1つしか検出できなかった場合

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

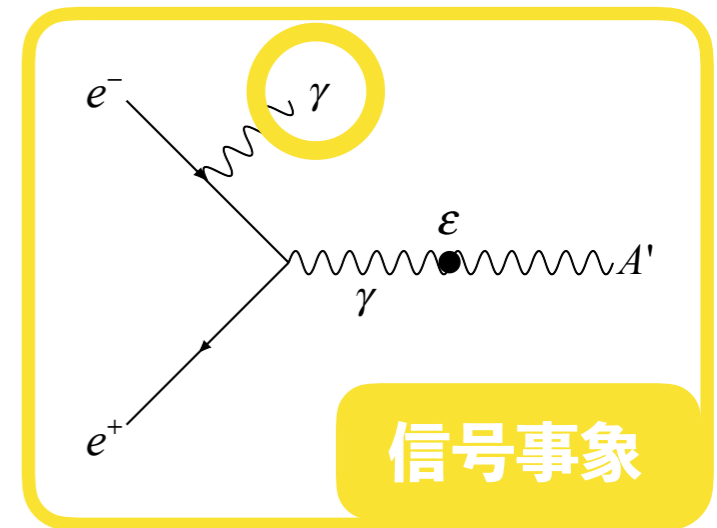
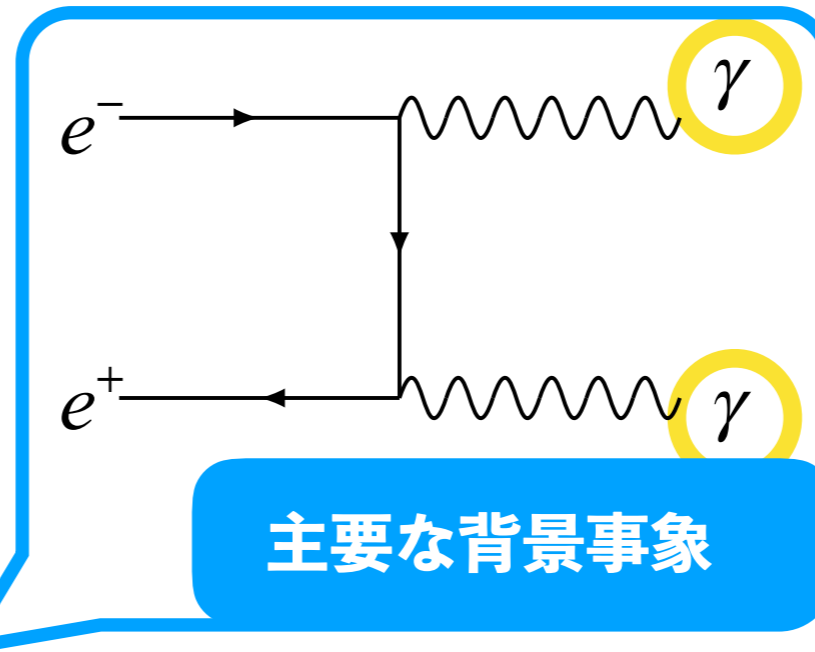
- ② 荷電粒子が検出できなかった場合

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

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-(\gamma)$$

- ③ ビーム由来の背景事象

ビームガス散乱・タウシェック散乱など



ダークフォトン探索において  
QED由来の背景事象を  
取り除くことは  
最も重要な課題。



背景事象のMCサンプルを用いて  
選別後に残る  
背景事象の事象数を  
定量的に見積もる。

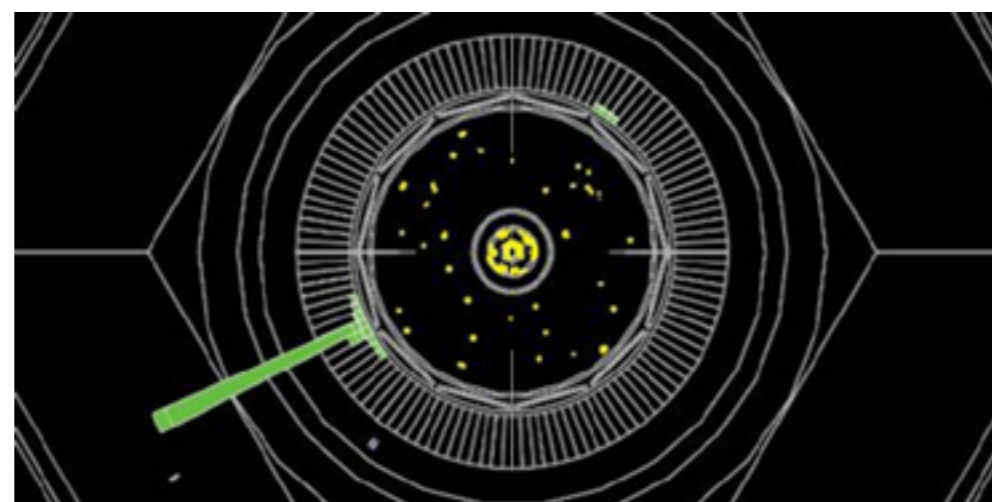
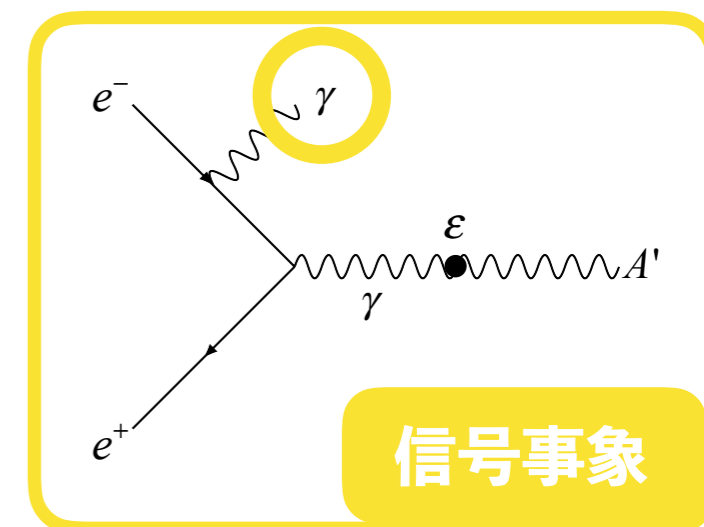
# 1光子事象のプレセレクション

① イベント中の**1番**高いエネルギーを持った光子に対して

$E_\gamma > 2 \text{ GeV}$  かつ  $20^\circ < \theta_\gamma < 145^\circ$ を要求

② 飛跡検出器・崩壊点検出器の情報から

よく再構成された荷電粒子の飛跡が**0本**



▲ 1光子事象のイベントディスプレイ



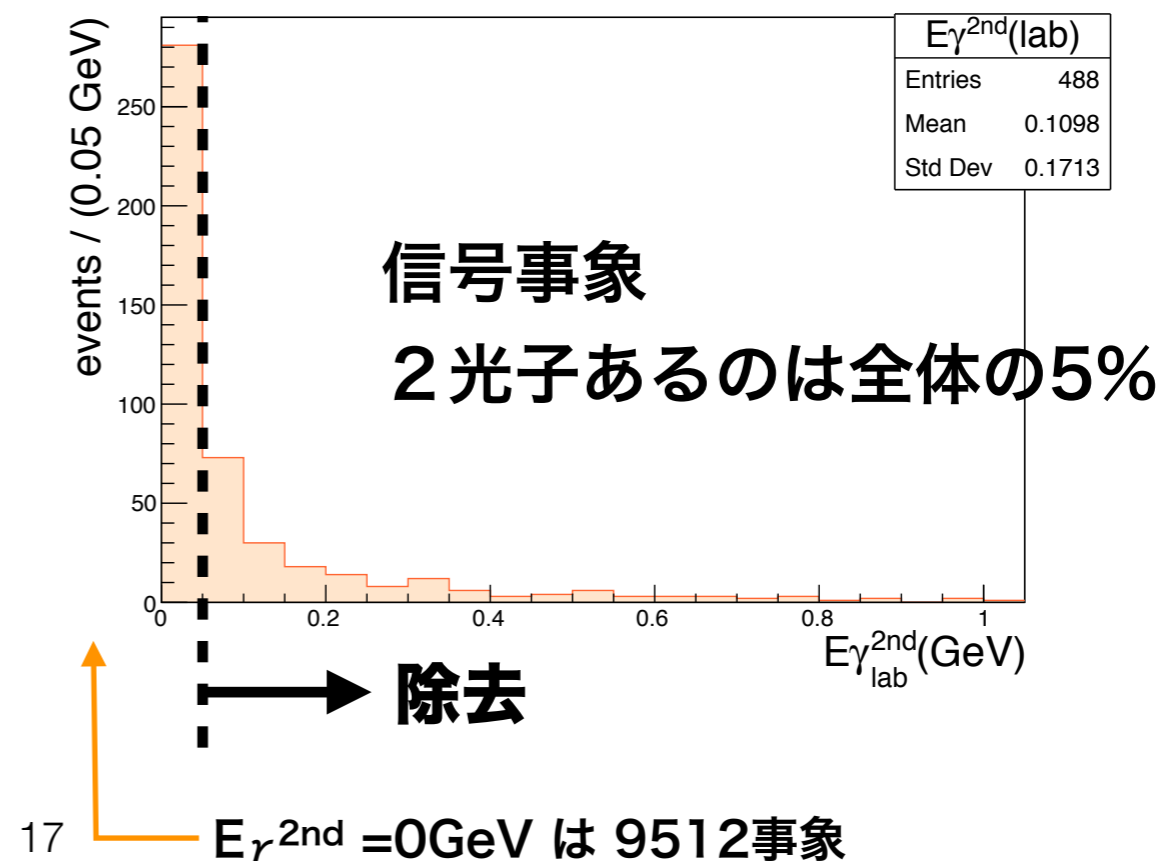
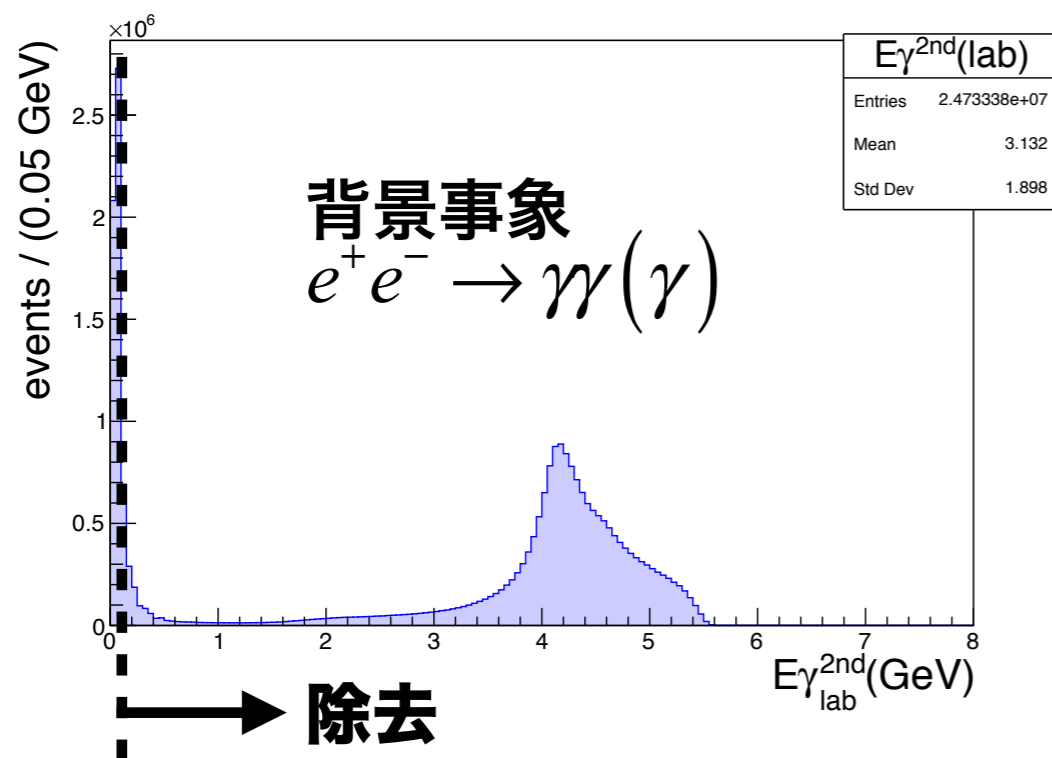
# 背景事象の除去

③ エネルギーが2番目に高い光子に対して

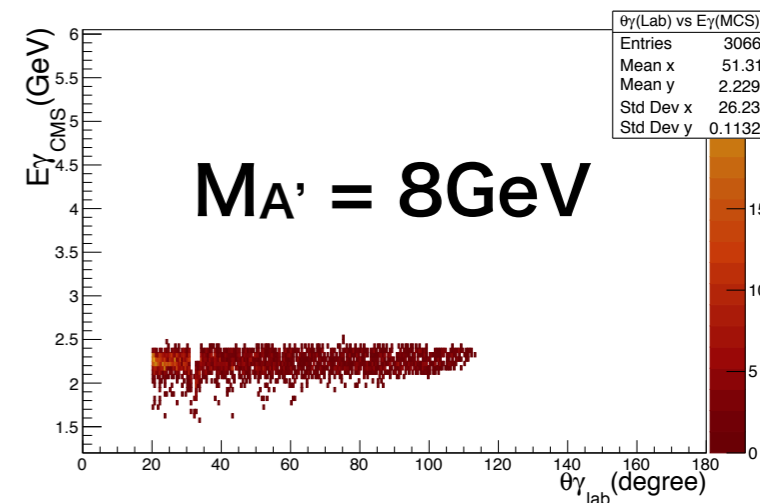
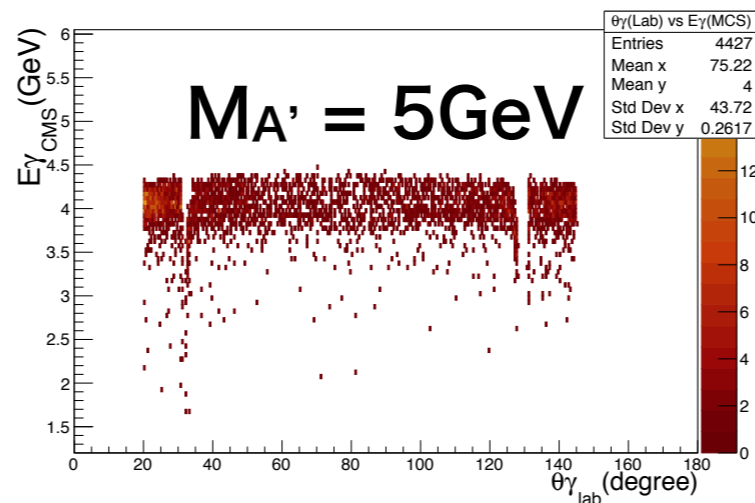
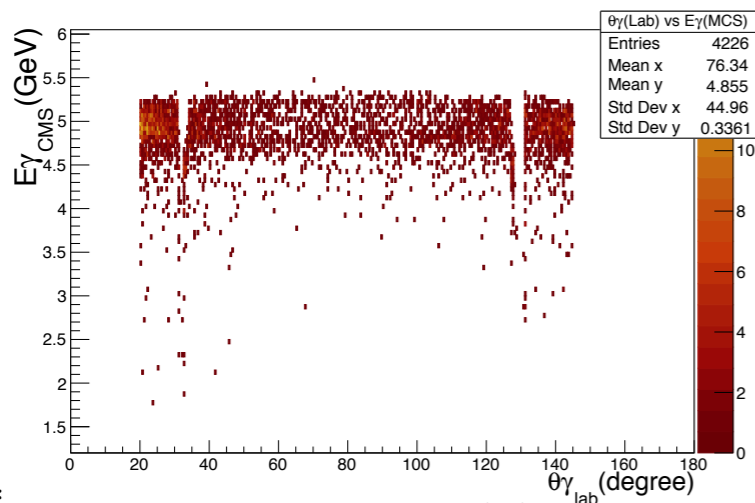
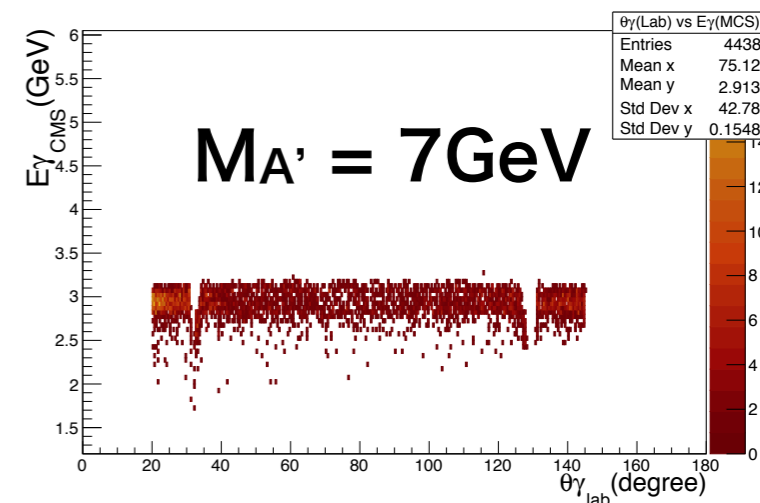
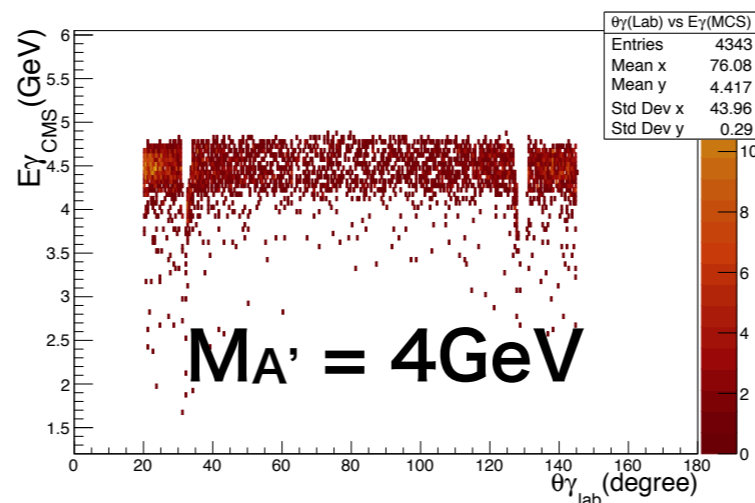
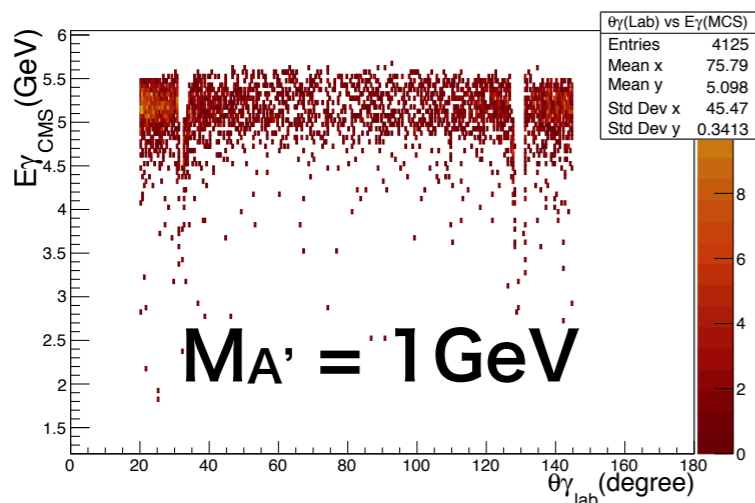
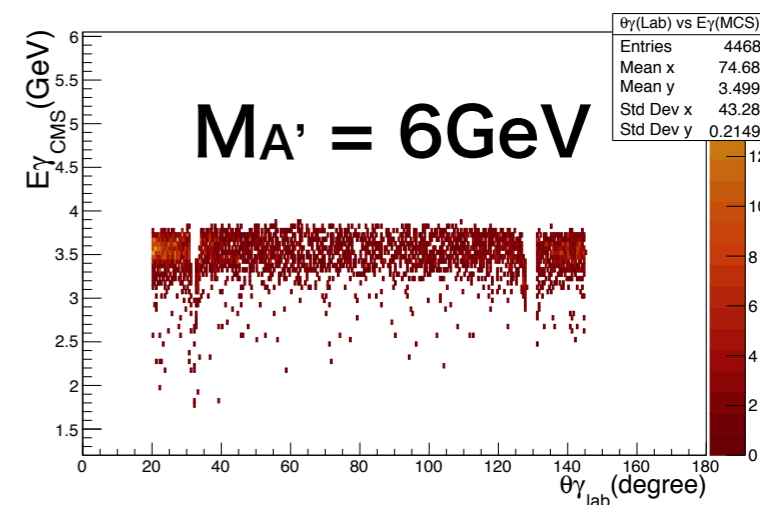
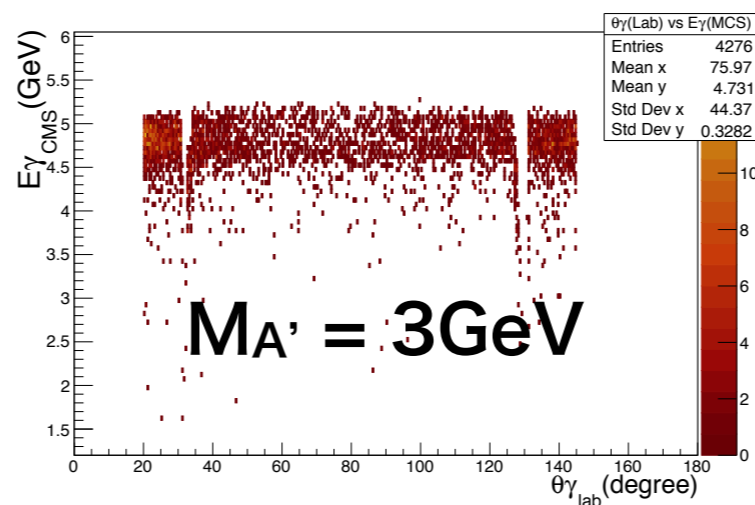
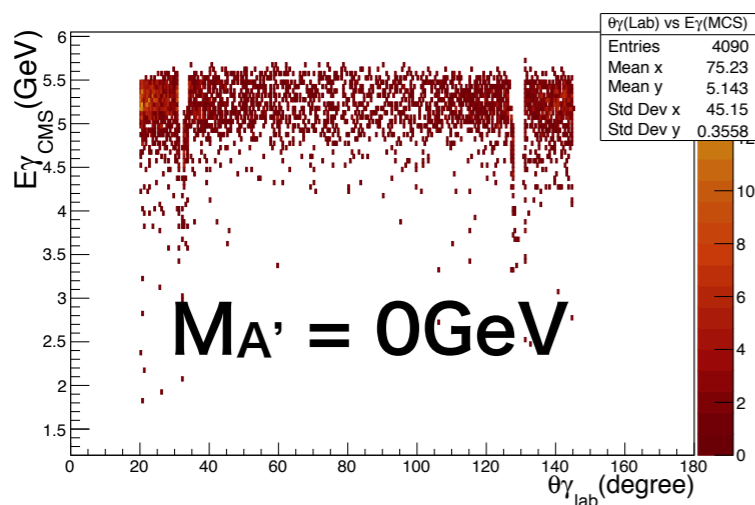
$$E_{\gamma^{2nd}} \leq 0.05 \text{ GeV} \ \&\& \ 20^\circ < \theta^{2nd}_{\gamma} < 145^\circ \text{ を要求}$$

$\rightarrow e^+e^- \rightarrow \gamma(\gamma)$  事象を除く

▼ 選択②後残った、2番目に高いエネルギーを持った光子の $E_{\gamma^{2nd}}$ 分布図



# 選別③後の信号事象 $e^+e^- \rightarrow \gamma + A'$ の分布



光子の重心系エネルギー  $E_\gamma^*$

光子の角度  $\theta_\gamma^{lab}$

•  $E_\gamma$  は帯状に分布

•  $M_{A'}$  が小さいと  $E_\gamma$  は大きく、 $M_{A'}$  が大きいと  $E_\gamma$  は小さくなる

# 背景事象の $E_{\gamma}^*$ vs $\theta_{\gamma}^{lab}$ 分布

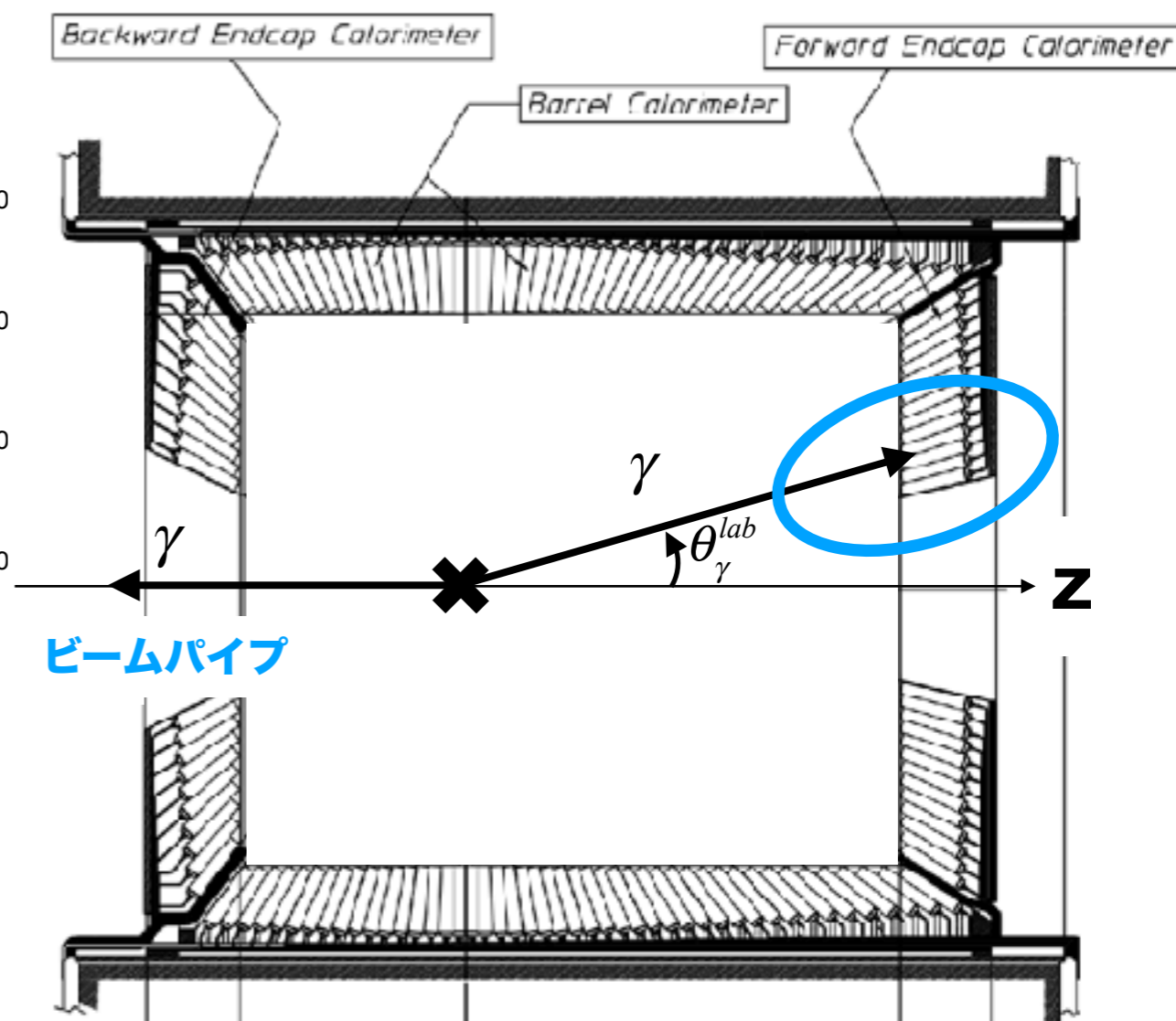
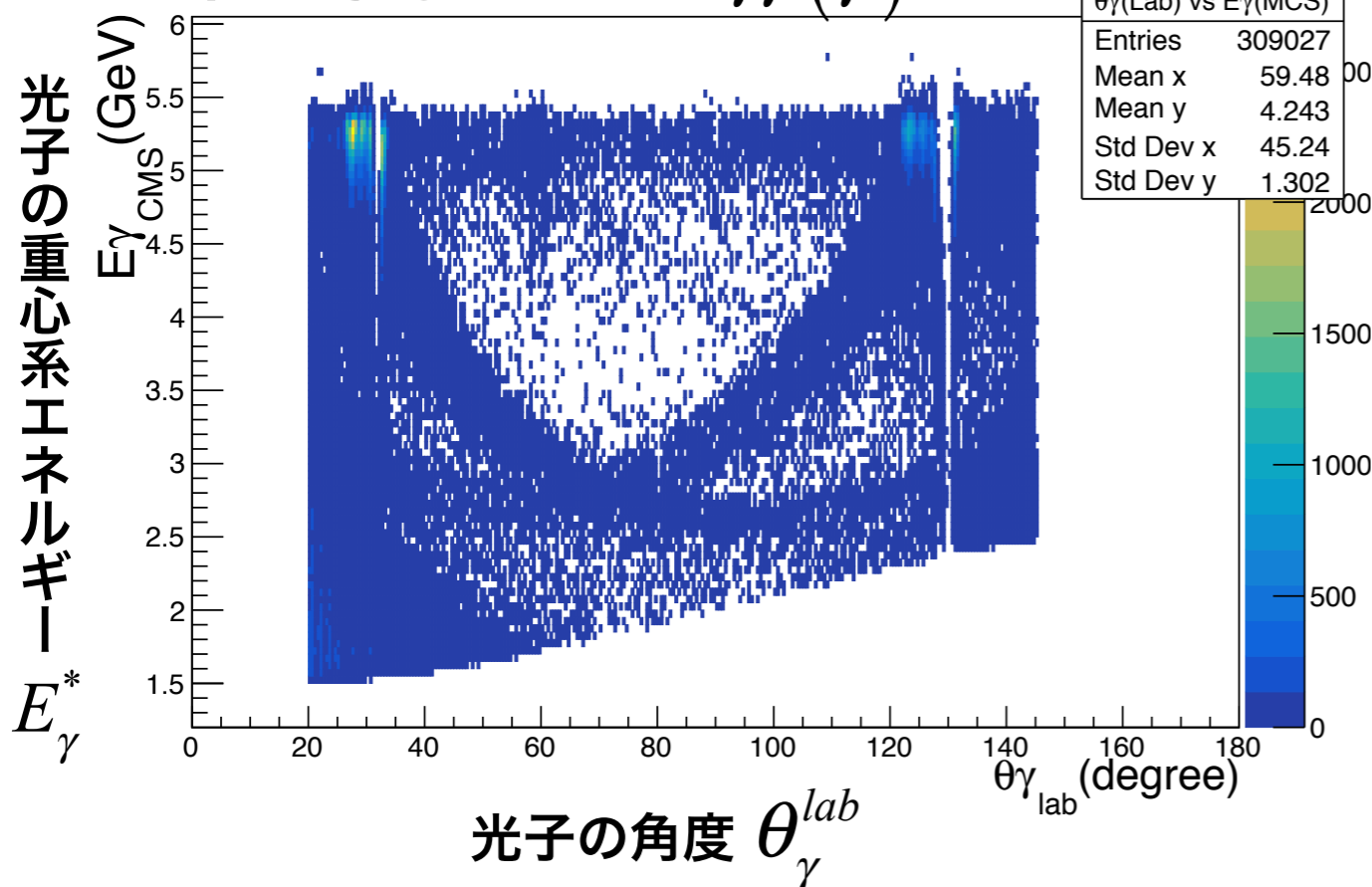
選別③後の背景事象  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  の分布

特徴(1) エンドキャップ方向に事象が多い

特徴(2) 1つの光子がECLの間隙を通り抜ける事象がある

特徴(3) 3光子事象によるバンド構造

背景事象  $e^+e^- \rightarrow \gamma(\gamma)$



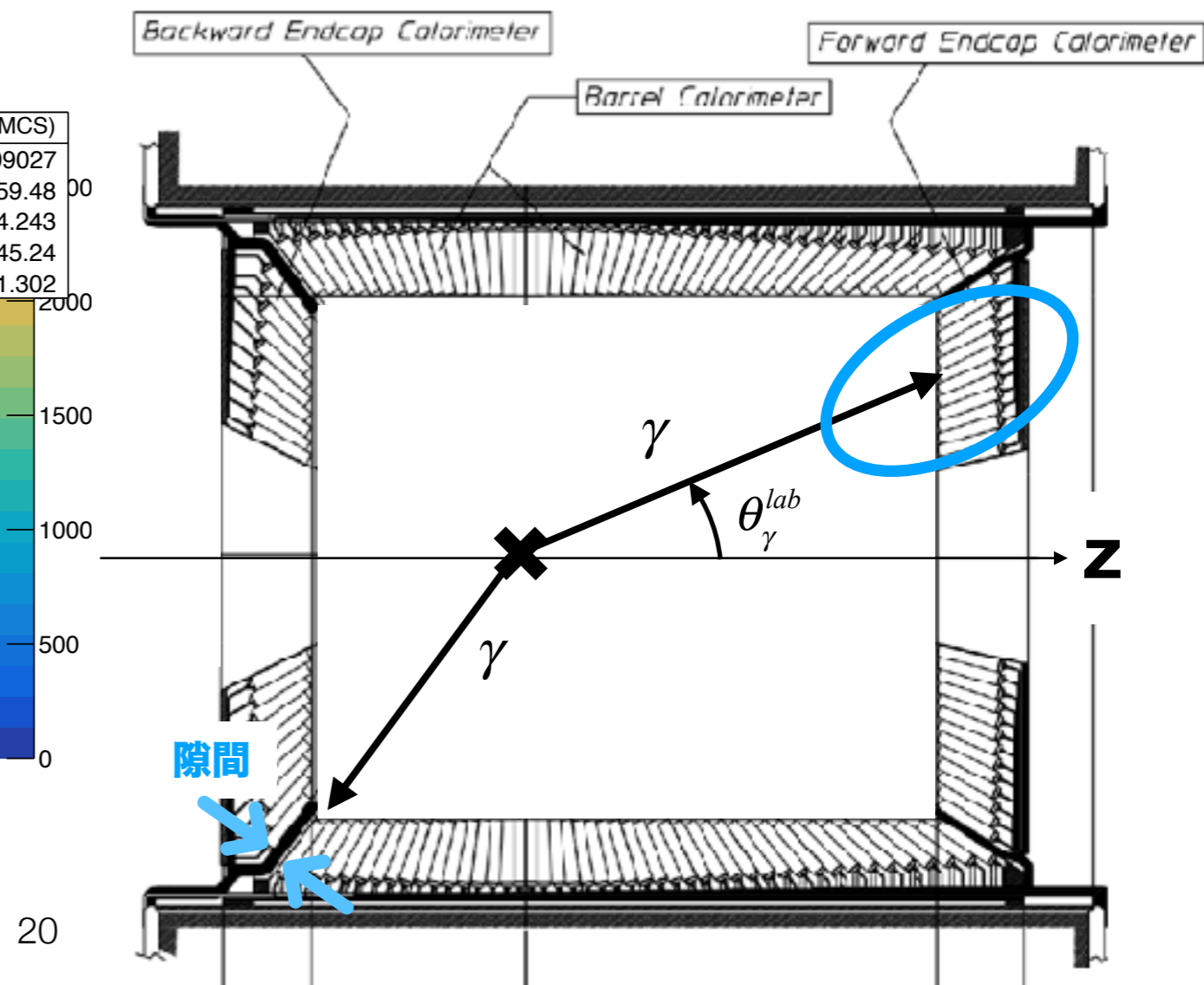
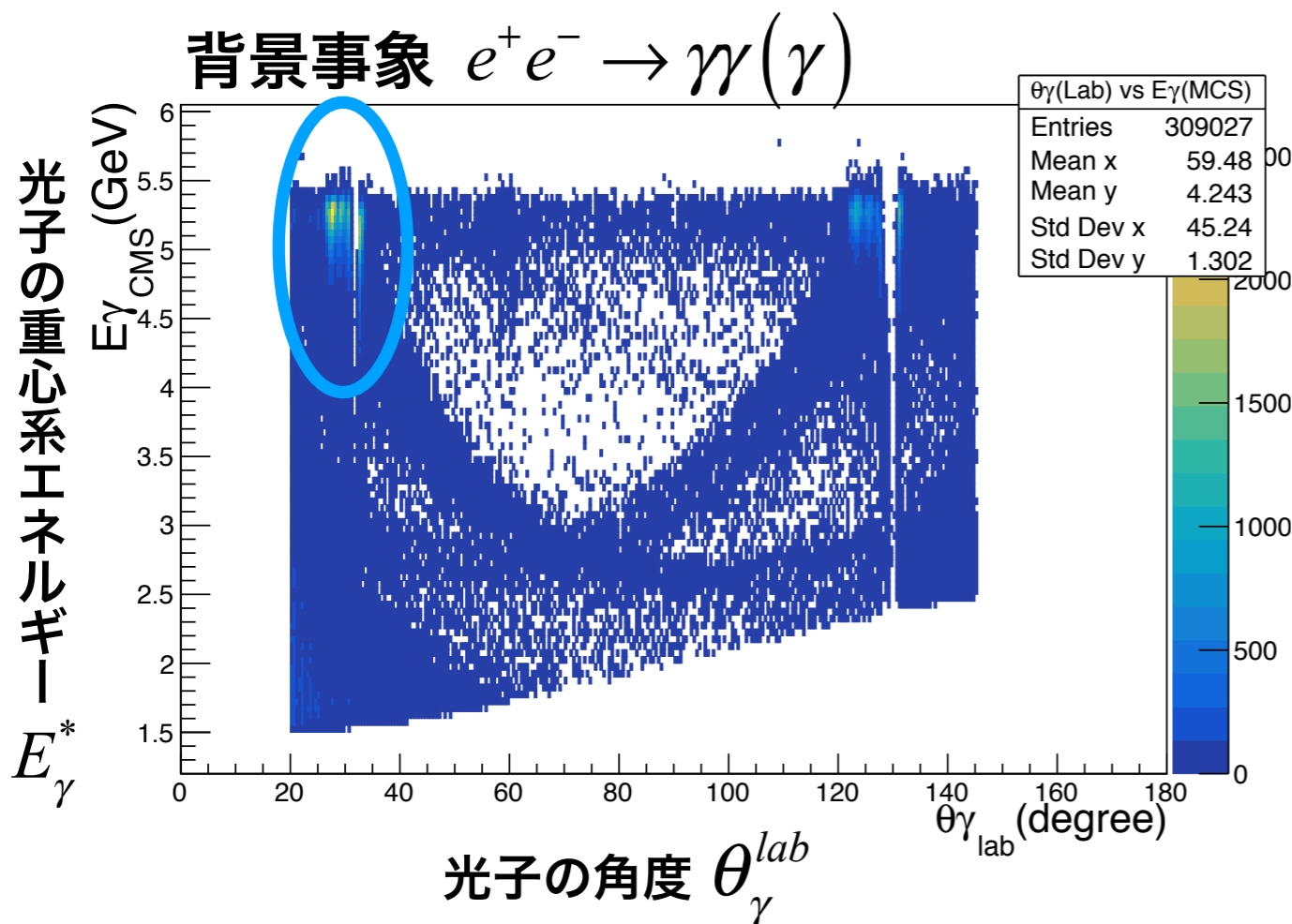
# 背景事象の $E_{\gamma}^*$ vs $\theta_{\gamma}^{\text{lab}}$ 分布

## 選別③後の背景事象 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ の分布

特徴(1) エンドキャップ方向に事象が多い

特徴(2) 1つの光子がECLの間隙を通り抜ける事象がある

特徴(3) 3光子事象によるバンド構造



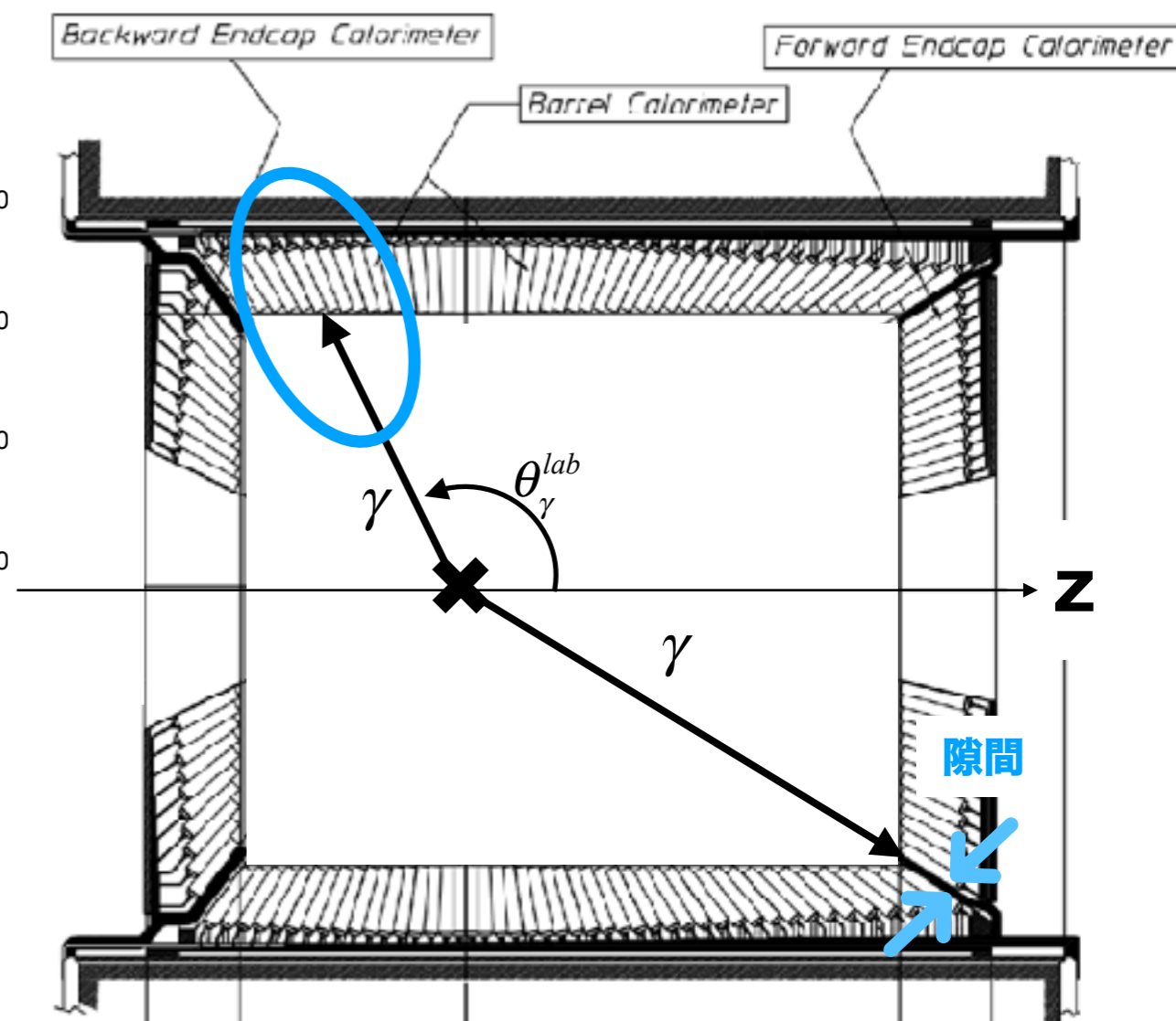
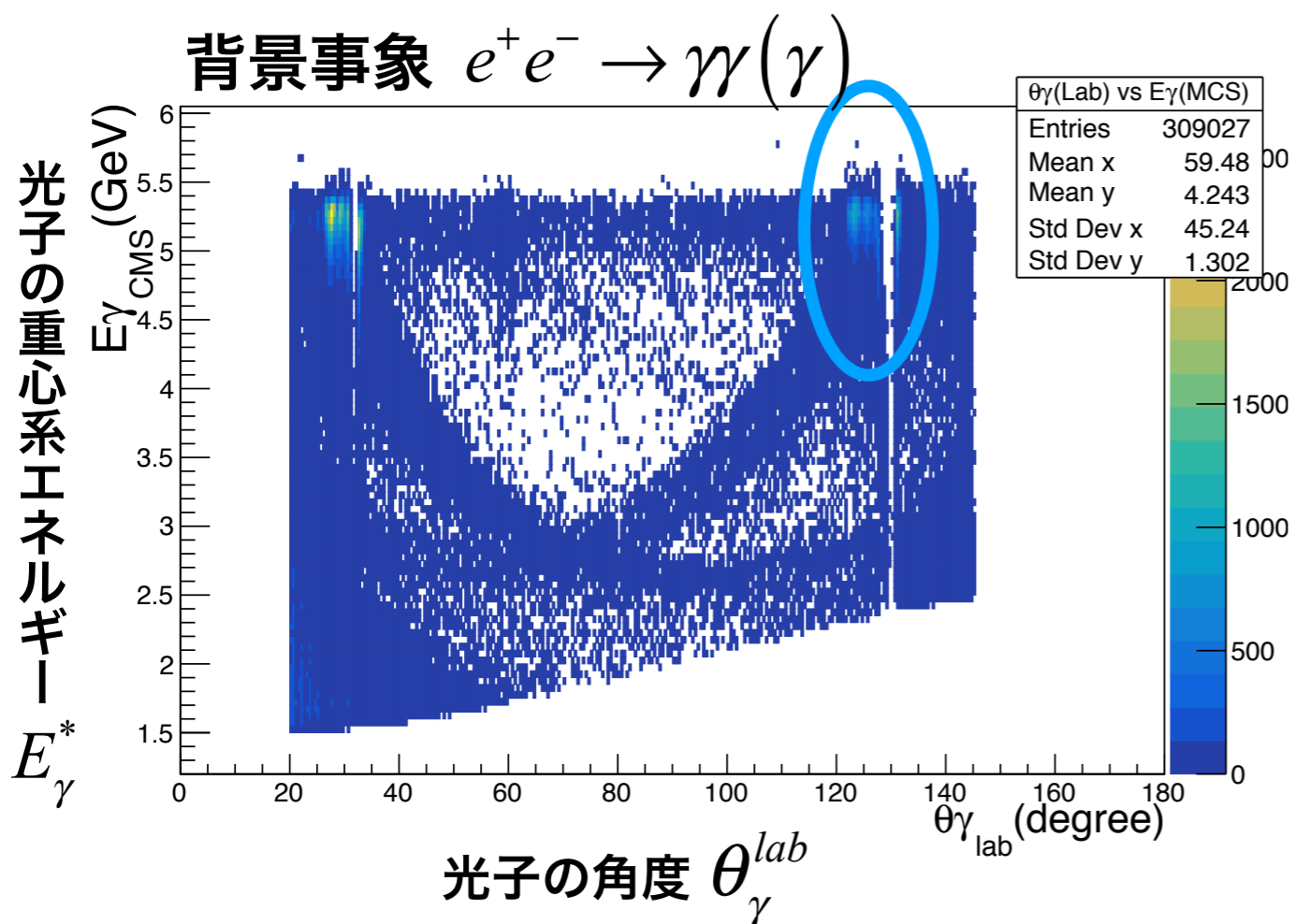
# 背景事象の $E_{\gamma}^*$ vs $\theta_{\gamma}^{lab}$ 分布

## 選別③後の背景事象 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ の分布

特徴(1) エンドキャップ方向に事象が多い

特徴(2) 1つの光子がECLの間隙を通り抜ける事象がある

特徴(3) 3光子事象によるバンド構造



# 背景事象の $E_{\gamma}^*$ vs $\theta_{\gamma}^{lab}$ 分布

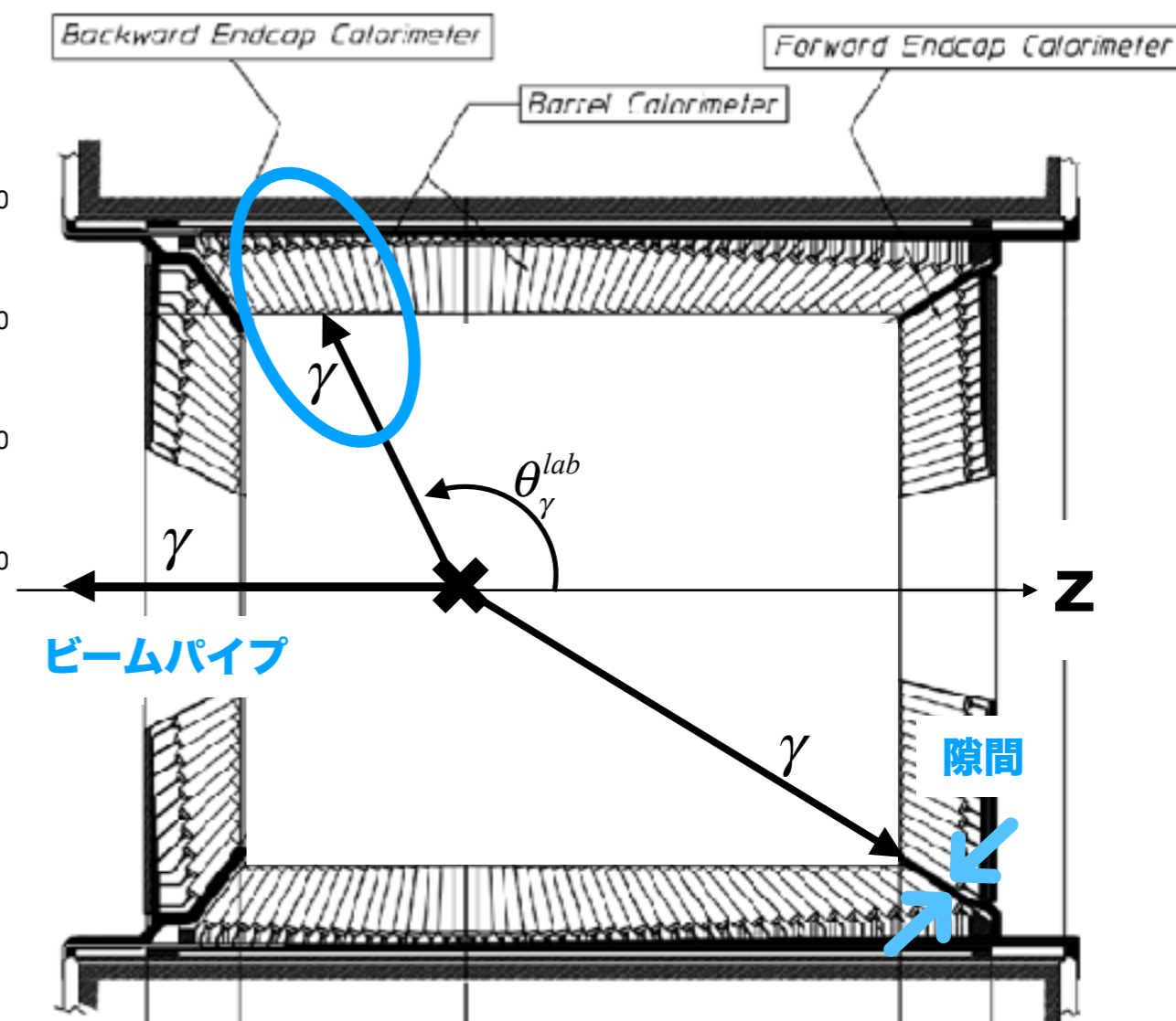
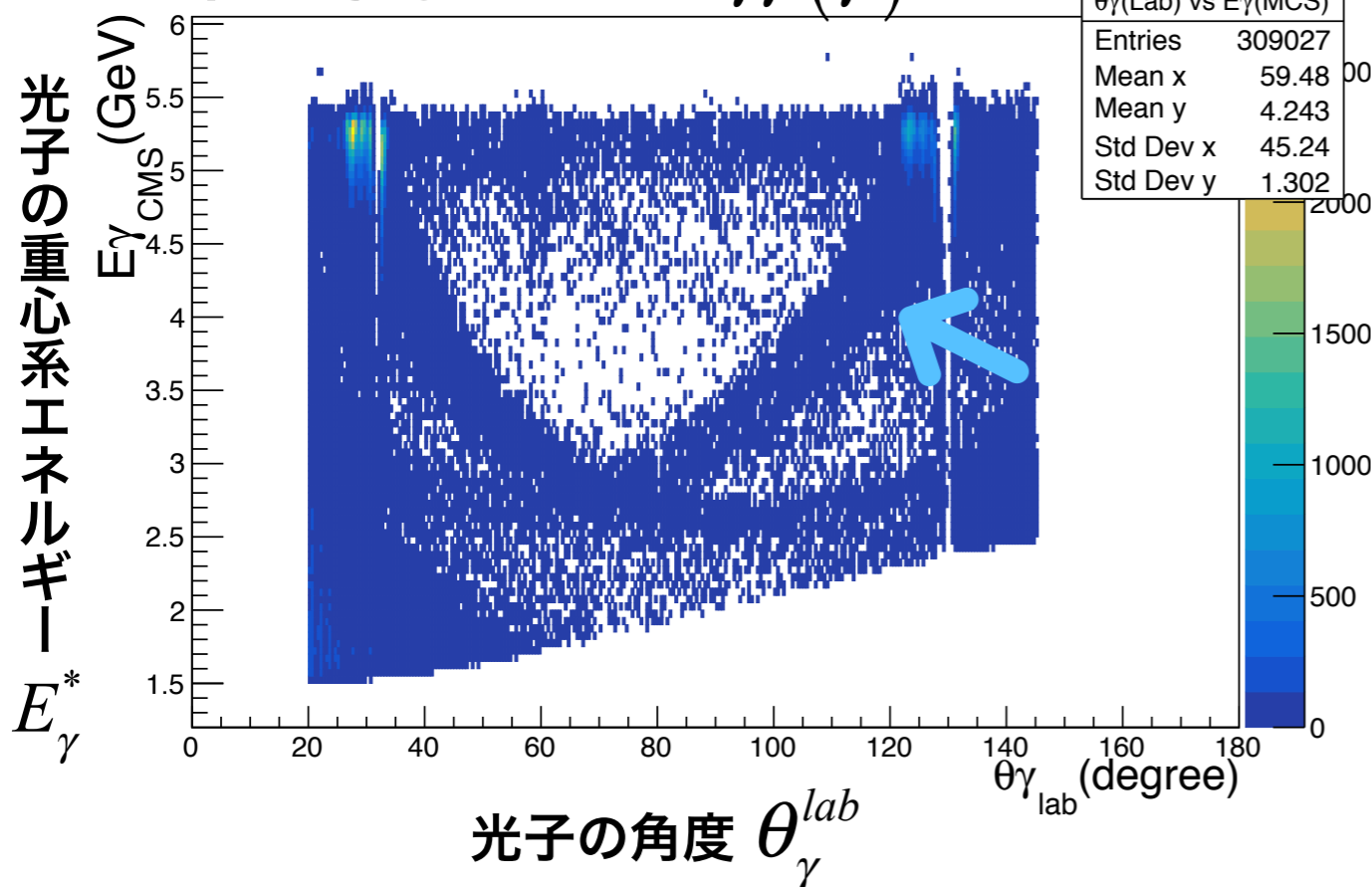
## 選別③後の背景事象 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ の分布

特徴(1) エンドキャップ方向に事象が多い

特徴(2) 1つの光子がECLの隙間を通り抜ける事象がある

特徴(3) 3光子事象によるバンド構造

背景事象  $e^+e^- \rightarrow \gamma(\gamma)$



# 背景事象の除去

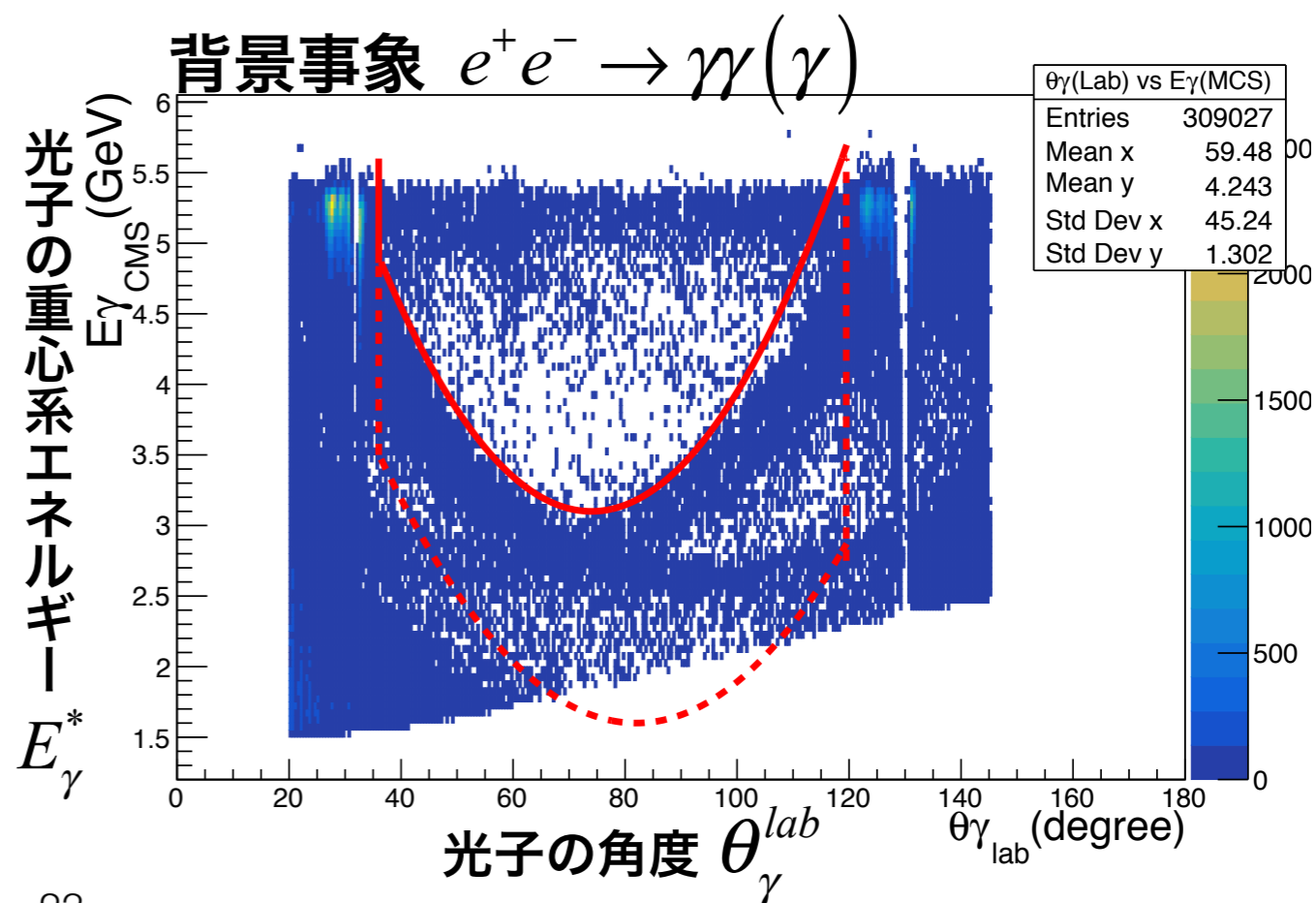
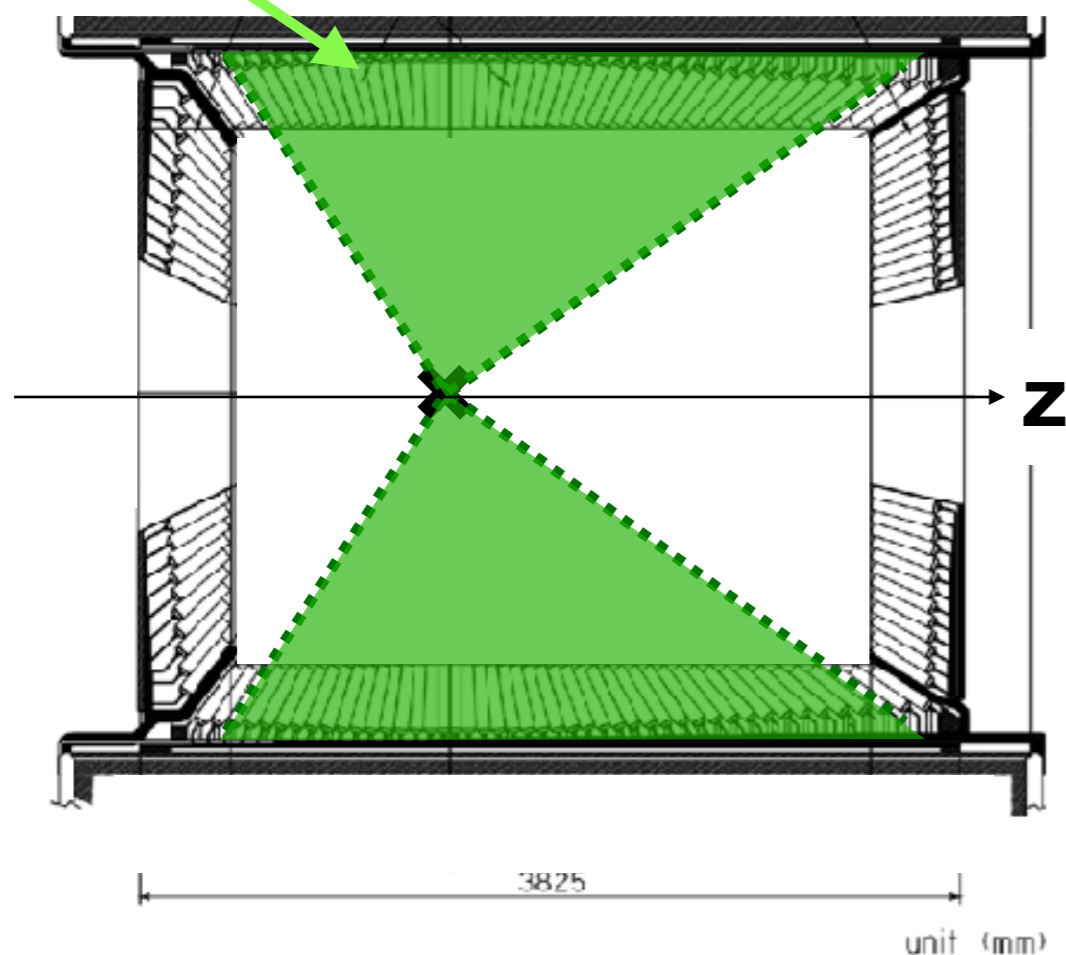
④ 検出光子が**バレル部分** ( $35^\circ < \theta_\gamma < 120^\circ$ )にあることを要求

⑤  $E_\gamma^*$ が十分大きい事を要求

Minvの値によって**2種類**の条件を課す

▶  $Minv \leq 6 \text{ GeV}$  :  $E_\gamma^*$ が **—** より大きい

▶  $Minv > 6 \text{ GeV}$  :  $E_\gamma^*$ が **⋯⋯** より大きい

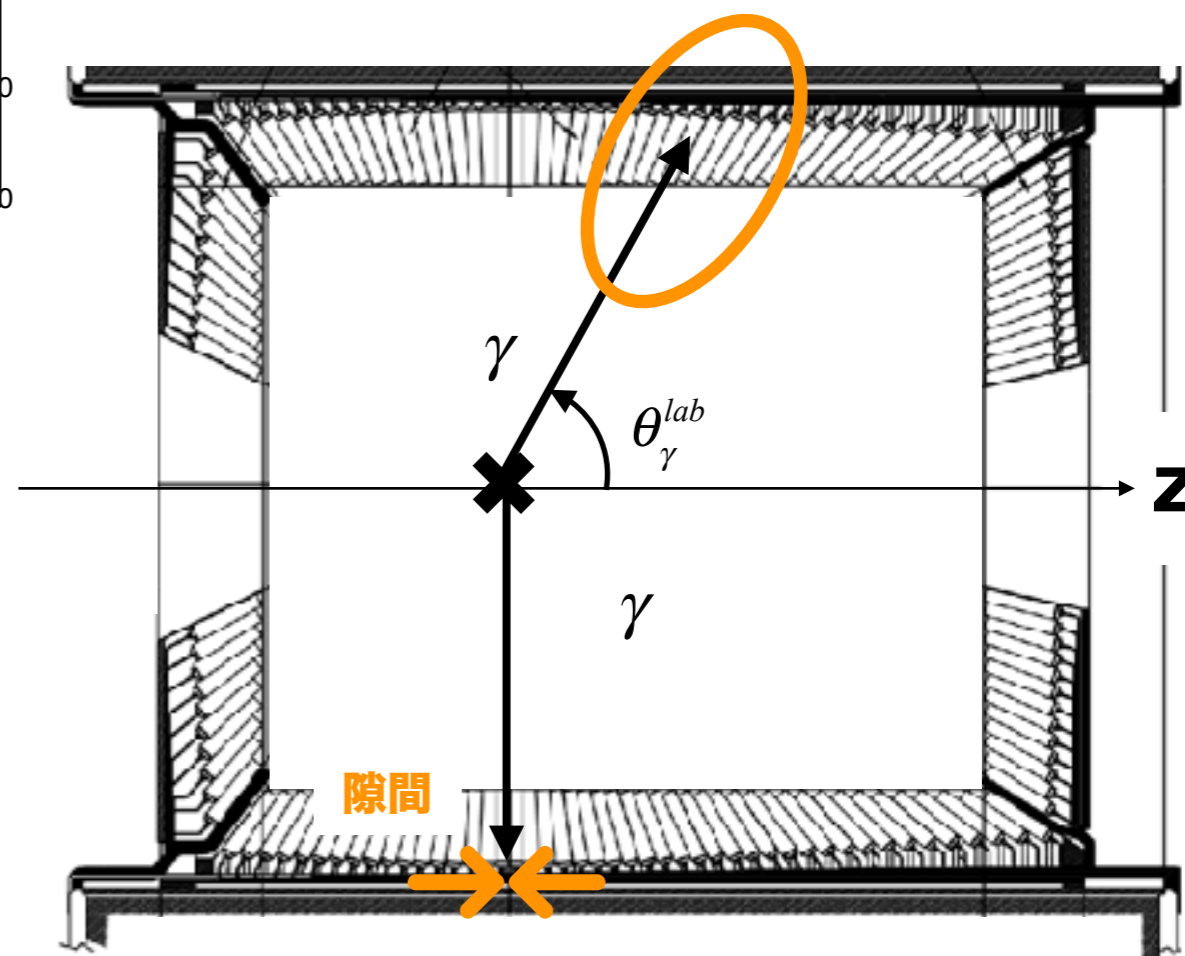
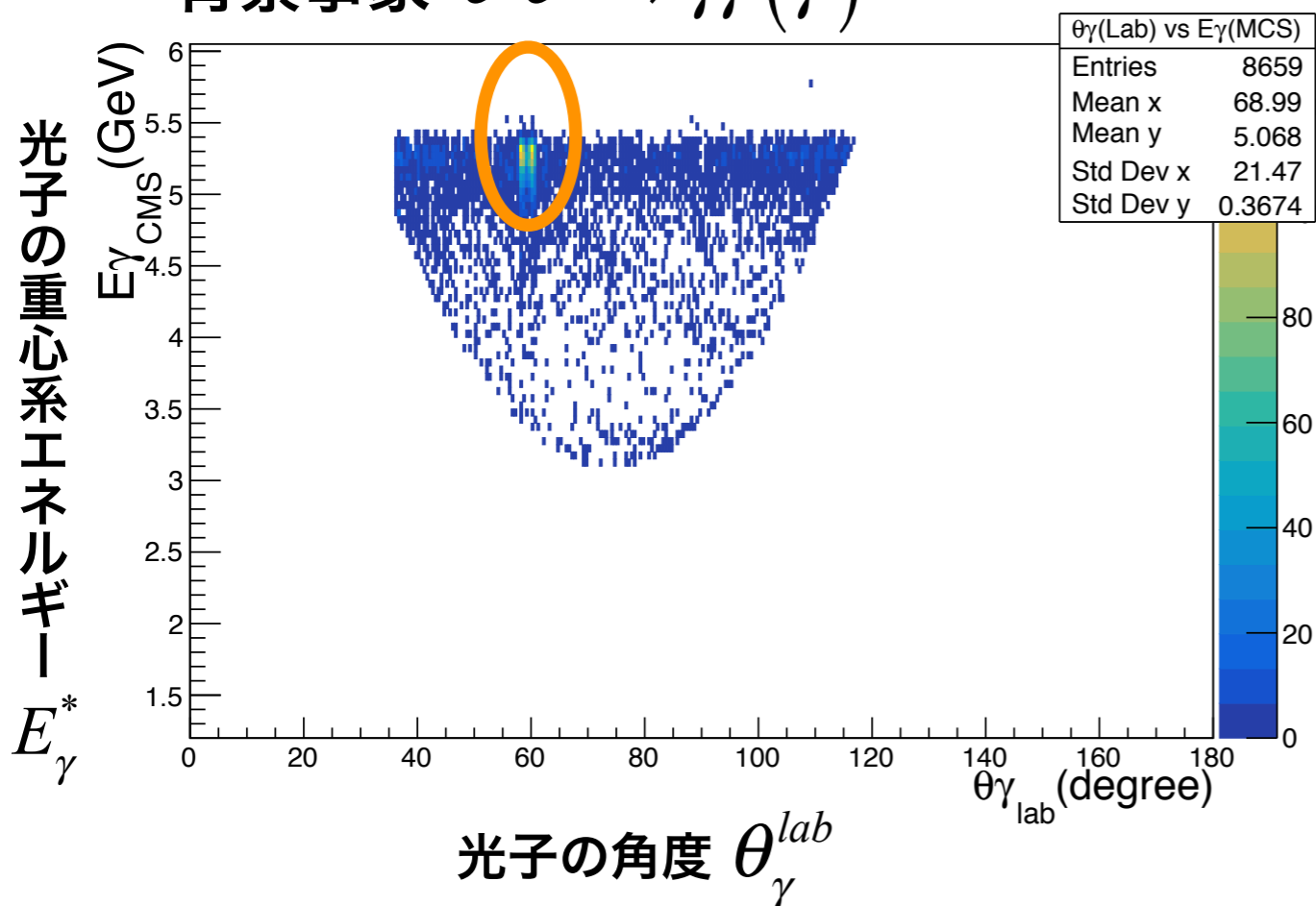


# 背景事象の除去

⑥ **ECLの隙間**に光子が逃げたことによる事象を除く

! ( $4.5 \text{ GeV} < E_{\gamma}^*$  &&  $58^{\circ} \leq \theta_{\gamma} < 61^{\circ}$ ) を要求

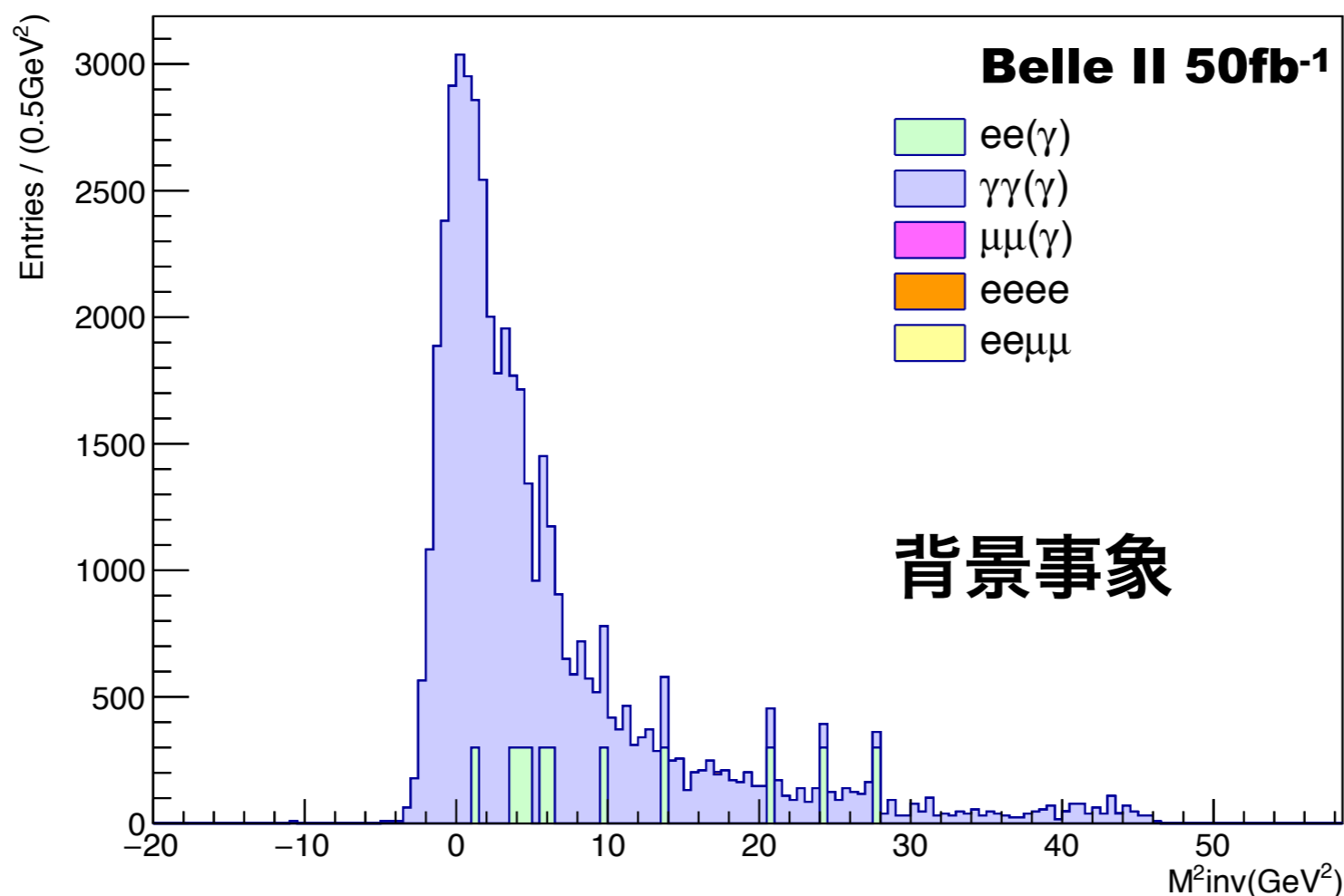
背景事象  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$





# 弱い選別(①～⑥)後の $M^2_{inv}$ 分布

Recoil mass distribution



- 背景事象を全て足し合わせ50fb<sup>-1</sup>で規格化。
- 信号事象の検出率は約10%。
- 以上の選別で残る背景事象はほとんどが $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
- 信号の感度を上げるにはさらにこの事象を落とす必要がある。

# 弱い選別で残る背景事象の様子

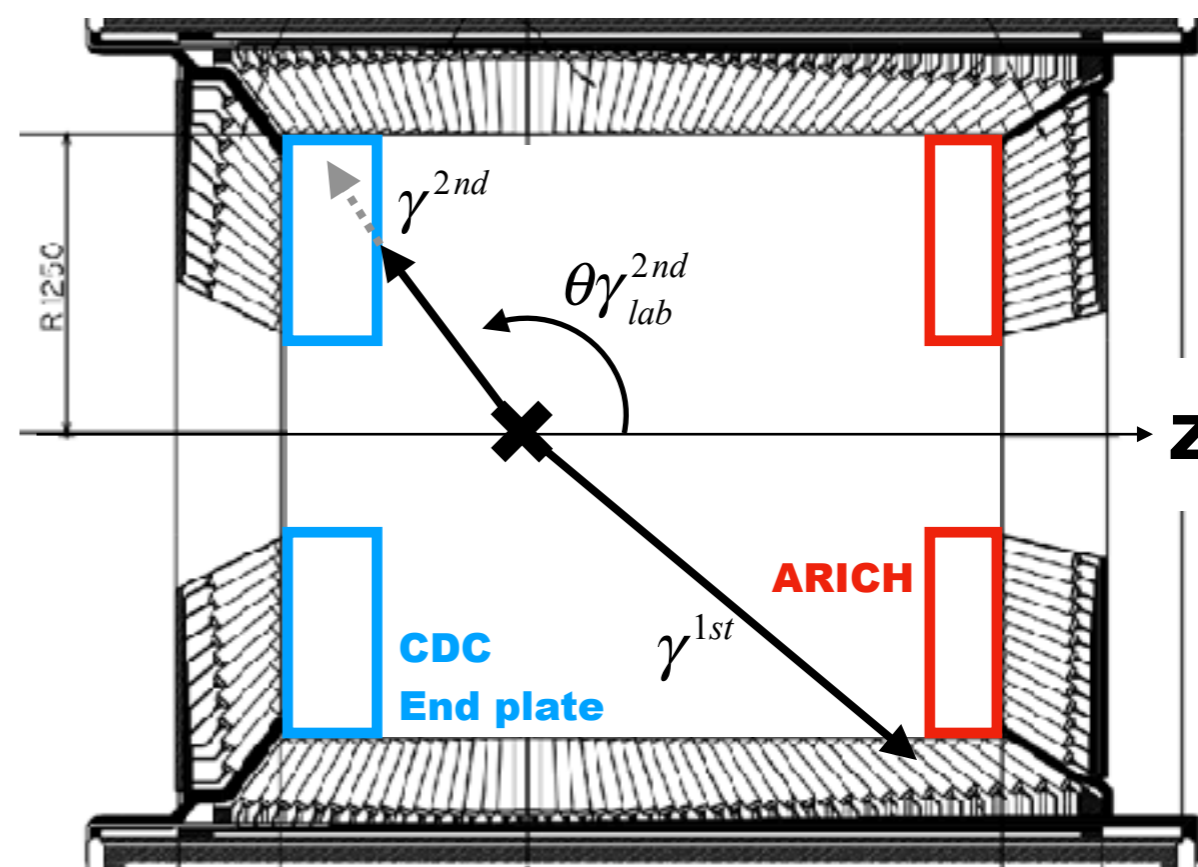
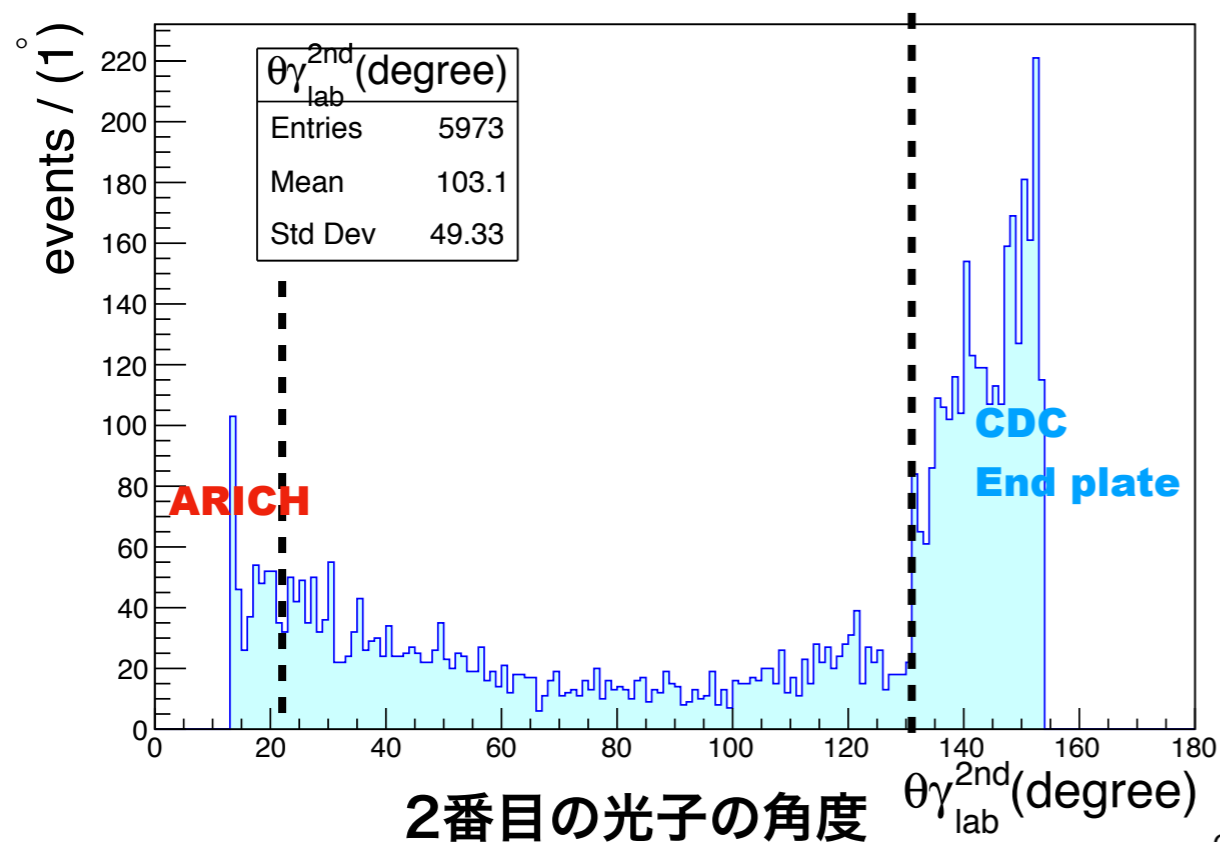
## 弱い選別(①~⑥)後の背景事象 $e^+ + e^- \rightarrow \gamma(\gamma)$ の $\theta_{lab}^{2nd}$ 分布

- ・ **130°~150°付近** : 多量の背景事象が存在

考えられる理由

- ▶ CDCの読み出し回路が搭載されたエンドプレートで光子のエネルギーが吸収されている?
- ▶ ビームバックグラウンドの光子?
- ▶  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma(\gamma)$  事象のうち、1光子がビームパイプに抜けた?

→ 内側の検出器に信号が残っていないか確認が必要

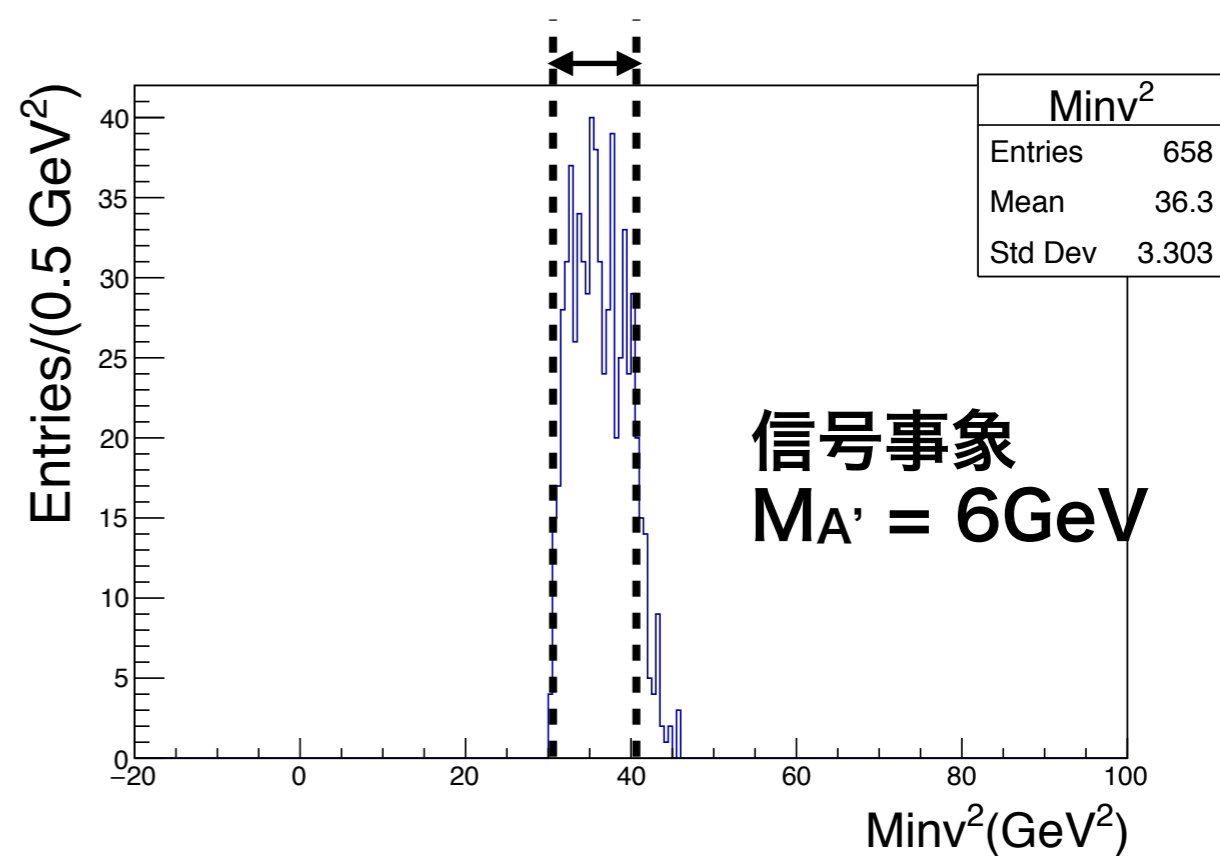
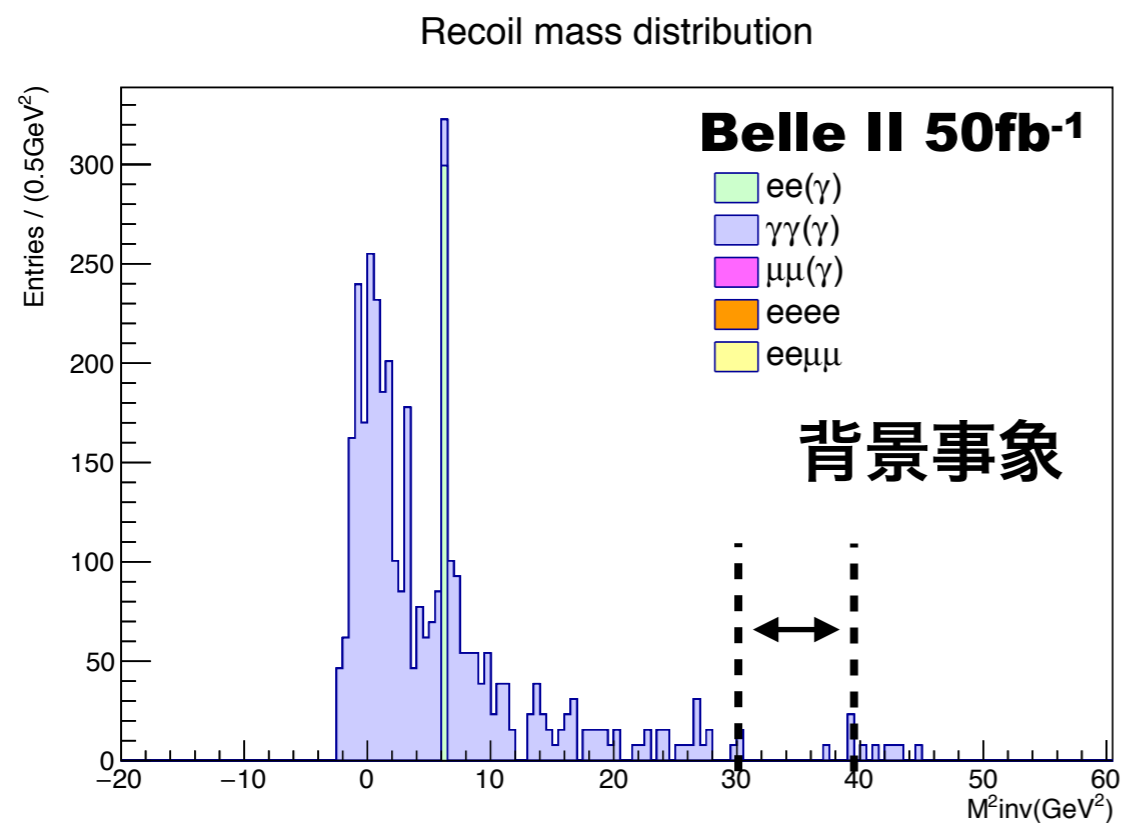


# 背景事象の除去

## ⑦ 完全な1光子事象を要求する

( Belle II検出器で再構成可能な最低エネルギーは0.02GeVなので、  
0.02GeV以上の光子を全て取り除く)

## 強い選別(①～⑦)後の $M_{inv}^2$ 分布



## 背景事象数の評価方法

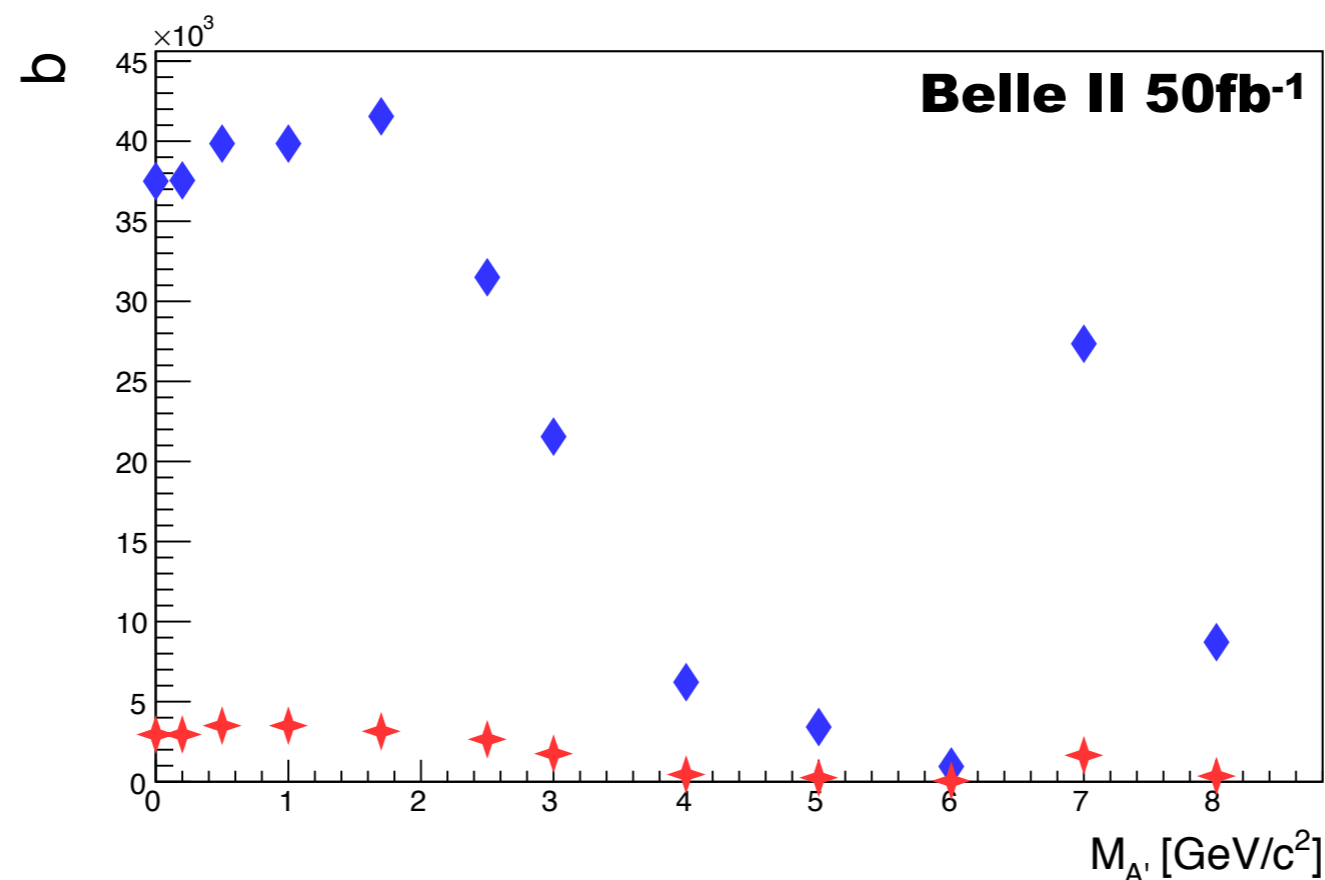
それぞれのダークフォトンの質量 $M_{A'}$ に対する背景事象数を評価する。

# 背景事象数の結果

それぞれの $M_{A'}$ に対して期待される背景事象数  $b$

青：弱い選別 (選別①～⑥  $E_{2nd\gamma} < 0.05\text{GeV}$ )

赤：強い選別 (選別①～⑦ 2光子事象を全て排除)



- 強い選別(⑦)は、弱い選別(⑥)で残っていた  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma(\gamma)$  由来の背景事象を1/10に減少させる。
- 信号の検出効率 は弱い選別から約1%減少した。

# ダークフォトンの検出感度

## 信号の事象数の上限値

前節で求めた予想される背景事象数**b**から、ダークフォトンの質量毎に  
**Likelihood関数**を用いて信号の上限値を算出。

$$\text{Likelihood関数} \quad L(\mu, b) = \frac{(\mu + b)^n}{n!} e^{-(\mu + b)} \cdot \exp\left(-\frac{(m - b)^2}{2\sigma_b^2}\right)$$

真の信号数： $\mu$

真の背景事象数： $b$

$b$ の誤差： $\sigma_b$

観測した背景事象数： $m$

観測した信号と背景事象数の和： $n$

## 90%の信頼度での事象数の上限 $N_{up}$

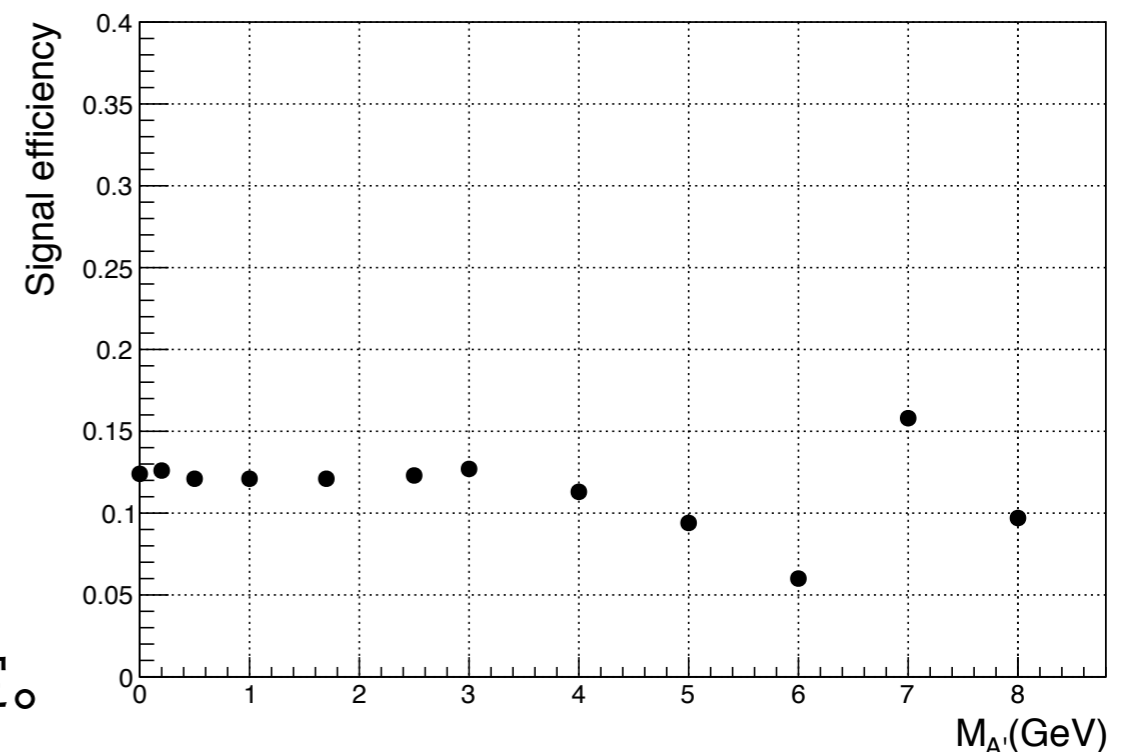
$$N_{up} = \frac{1.28}{\sqrt{\frac{1}{b} \left(1 - \frac{\sigma_b^2}{b}\right)}}$$

求めた $N_{up}$ から、ダークフォトンの  
**生成断面積の上限値 $\sigma^{up}$** は

$$\sigma^{up} = \frac{N_{up}}{L \cdot \eta_{eff}} \quad \text{信号事象の検出効率：}\eta_{eff}$$

$L$ ：ルミノシティ(収集したデータ量)  **$50\text{fb}^{-1}$** と仮定。

▼信号の検出効率  $\eta_{eff}$



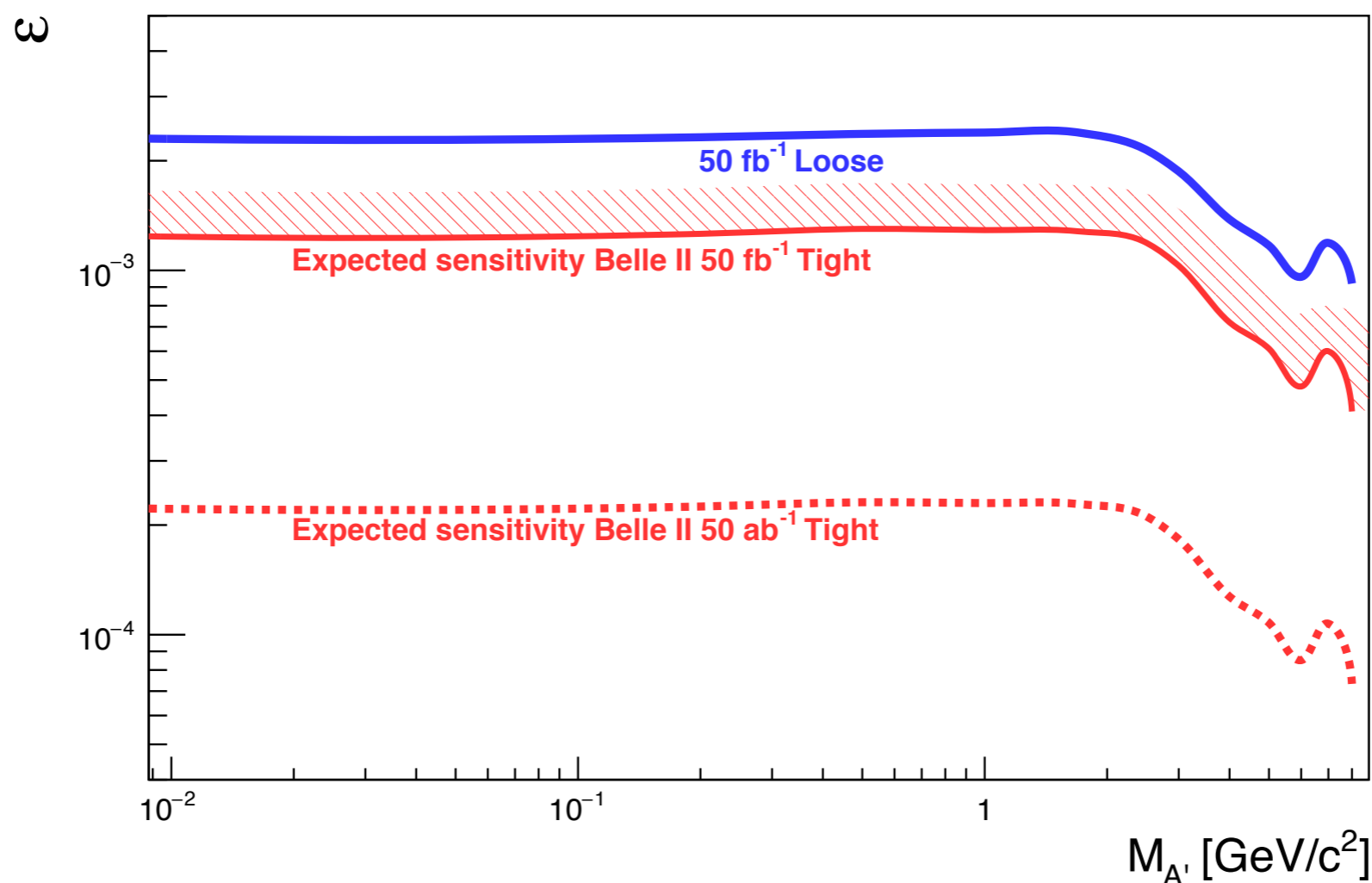
# 結合定数 $\varepsilon$ への制限

## 結合定数 $\varepsilon$ の上限値

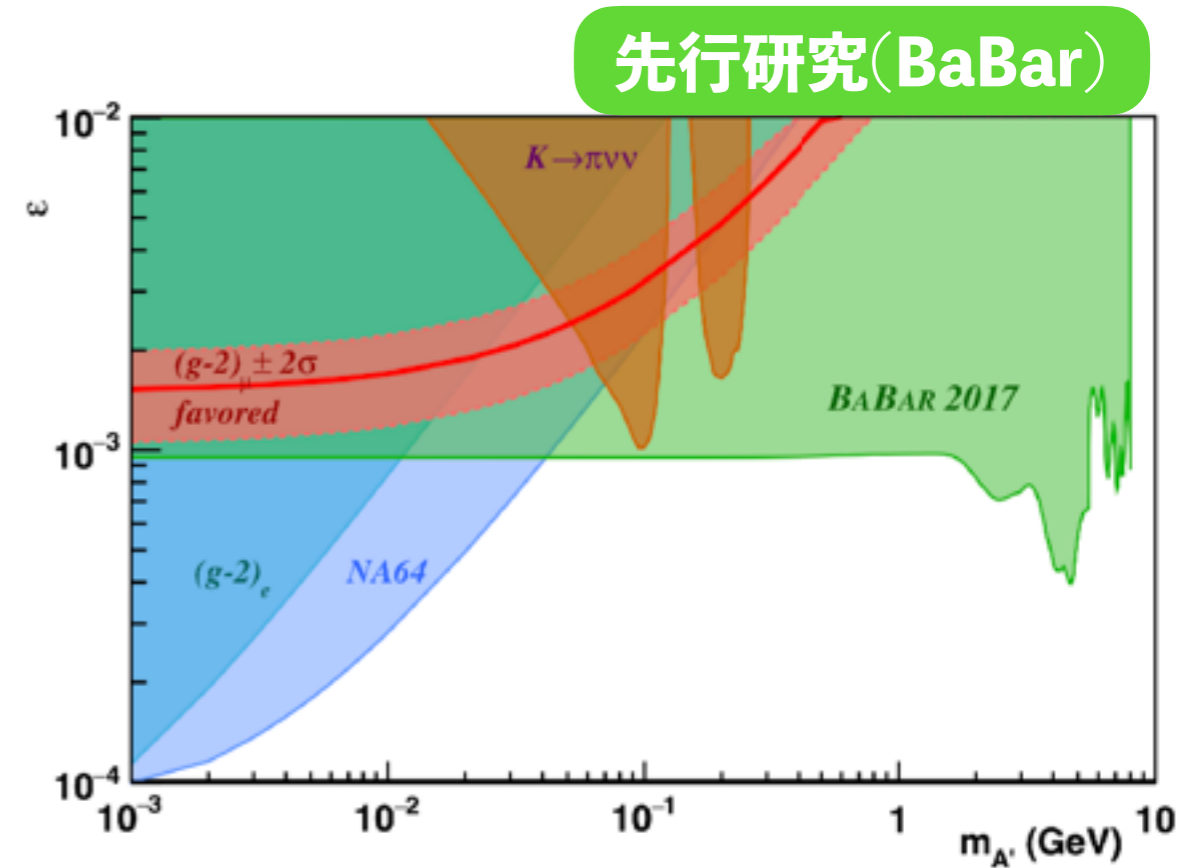
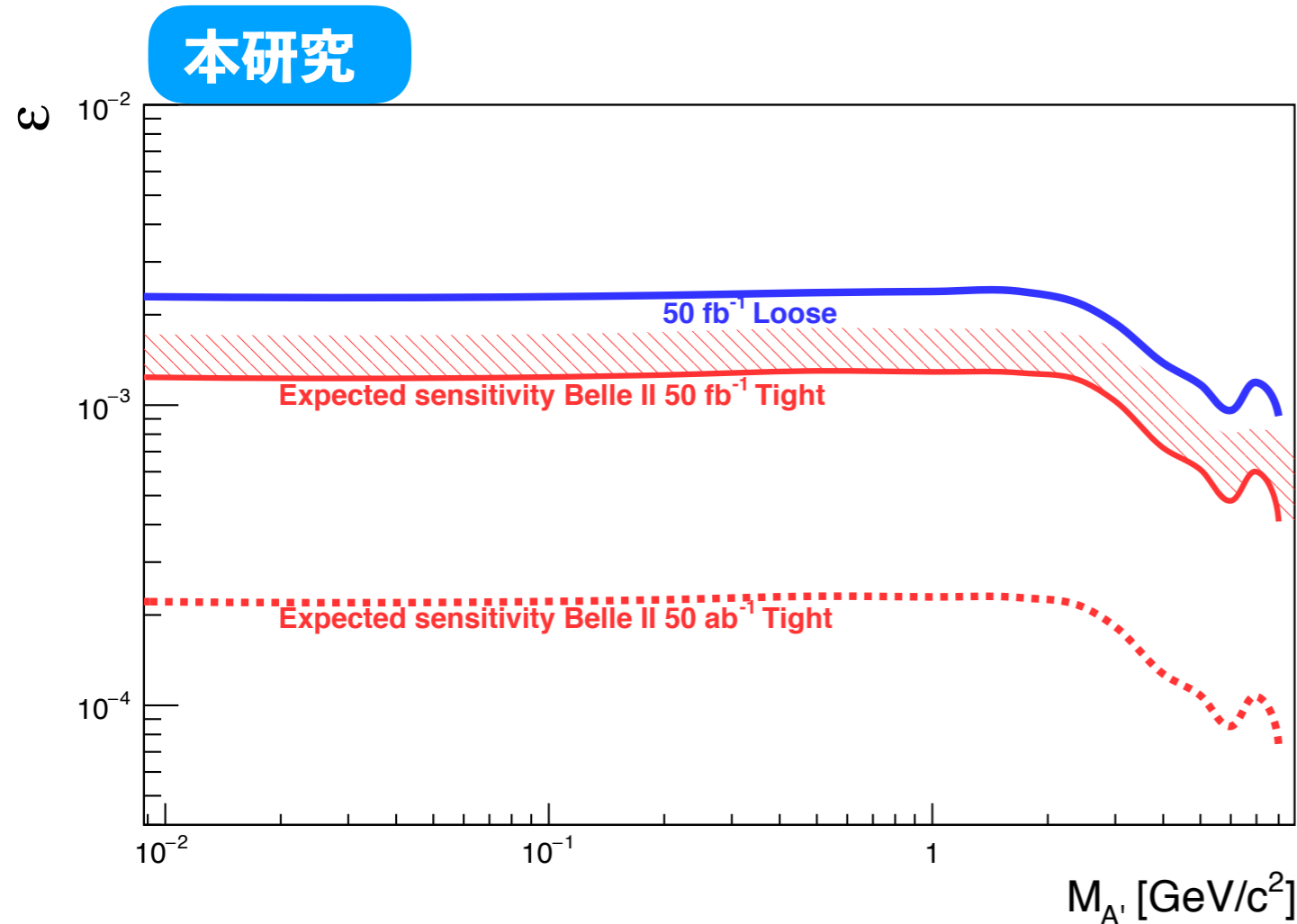
求めた  $\sigma^{up}$  と、 $\varepsilon = 1$  の時の生成断面積  $\sigma_{A'}$  との比をとり、  
 ダークフォトン  $A'$  の結合定数の上限値  $\varepsilon^{up}$  を算出。

$$\varepsilon^{up} = \sqrt{\frac{\sigma^{up}}{\sigma_{A'(\varepsilon=1)}}}$$

### ▼ Belle II実験で期待される結合定数 $\varepsilon$ の上限値



# 結合定数 $\varepsilon$ への制限



- 50fb<sup>-1</sup> (2020年夏達成予定)で先行実験と同等の探索領域を実現
- Belle II実験の目標ルミノシティ50ab<sup>-1</sup>までデータを収集すると、 $\varepsilon \sim O(10^{-4})$ まで探索範囲の拡大が可能。
- BelleIIで探索できる10MeV-5GeVの質量領域は、宇宙のDMの量を説明を試みる様々な理論で注目されている領域である。



# 4.まとめ

# まとめ

Belle II 実験におけるダークフォトン生成事象 ( $e^+e^- \rightarrow \gamma + A'$ ) の検出可能性についてシミュレーションを用いて検出効率と期待される背景事象数を評価した。

- ・ 信号事象の検出効率は10%。
- ・  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  事象が最も大きな背景事象。
- ・ 検出器の隙間等を考慮して、解析条件の最適化した(更に改善の余地あり)。

DMとSMとの結合定数  $\varepsilon$  の  
探索可能領域(信頼度90%)右図に示す。

BelleIIで探索できる10MeV–5GeVの質量領域は、宇宙のDMの量を説明を試みる様々な理論で注目されている領域である。

