

LHC-ATLAS実験における 前方陽子検出器を用いた二光子共鳴探索の 背景事象推定

日本物理学会 2021年秋季大会

2021年9月17日 17pT2-4

東大理, 東大素セ^A

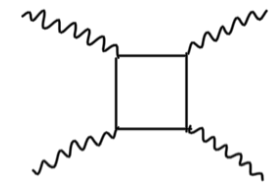
舘野元, 田中純一^A, 寺師弘二^A, 奥村恭幸^A, 江成祐二^A, 増渕達也^A



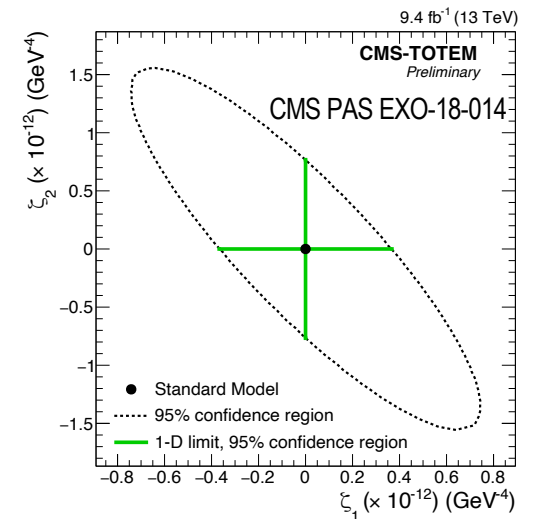
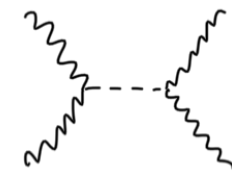
高エネルギー光子-光子散乱

光子-光子散乱に寄与するO(100) GeVの新粒子の予言

- 荷電粒子 $\mathcal{L}_{4\gamma} = \zeta_1 F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} F_{\rho\sigma} F^{\rho\sigma} + \zeta_2 F_{\mu\nu} F^{\nu\rho} F_{\rho\lambda} F^{\lambda\mu}$
Vector-like fermionなど



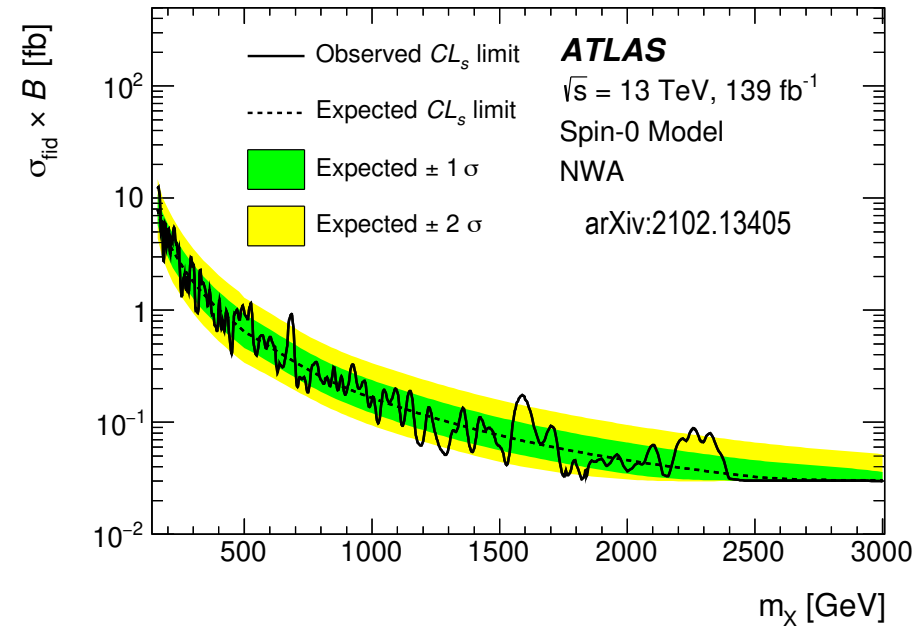
- 中性粒子 $\mathcal{L}_{\gamma\gamma} = f_{0^+}^{-1} \varphi (F_{\mu\nu})^2 + f_{0^-}^{-1} \tilde{\varphi} F_{\mu\nu} F_{\rho\lambda} \epsilon^{\mu\nu\rho\lambda} + f_2^{-1} h^{\mu\nu} (-F_{\mu\rho} F_{\nu}^{\rho} + \eta_{\mu\nu} (F_{\rho\lambda})^2 / 4)$
 - Axion-like particle
 - KKグラビトン
 - Strongly-interacting heavy dilaton



ただの二光子共鳴探索ではなく

光子-光子散乱に特化した解析で探索できれば

- 新粒子発見時に信号の種類を特定しやすい
- 通常の二光子共鳴探索と結果を統合できる
- 同じEFTラグランジアンで統一的に結果を解釈できる



陽子-陽子衝突における光子-光子散乱

ビーム粒子周辺の等価光子同士での散乱

① Electromagnetic field
ビーム粒子周辺の電場 = 等価光子の集まり
Field strength: up to 10^{25} V/m

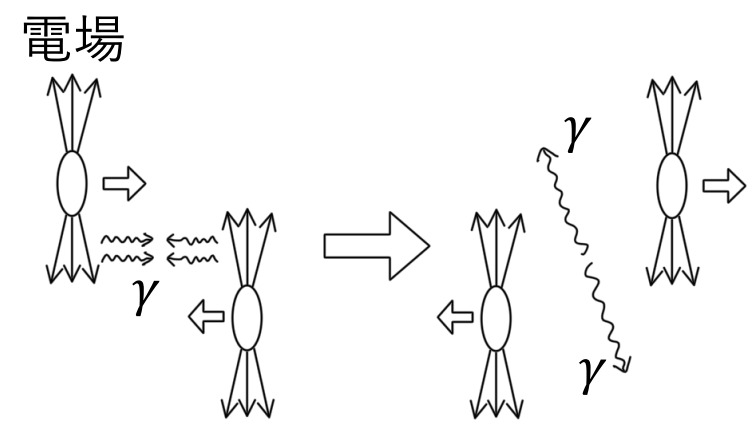
② ビーム粒子がすれ違うときに

③ 等価光子同士が散乱

④ イベントディスプレイ

ATLAS実験YouTube動画
<https://youtu.be/zsVrMeigsAM>

陽子衝突でも同じパターンの光子-光子散乱が起こるはず



イベントの特徴

- **二光子が**
 - **back-to-back**
 - **排他的**(他にオブジェクトが無い)
- **陽子を壊さない**

特別な検出器で捉えたい

光子-光子散乱に寄与する新粒子を探索

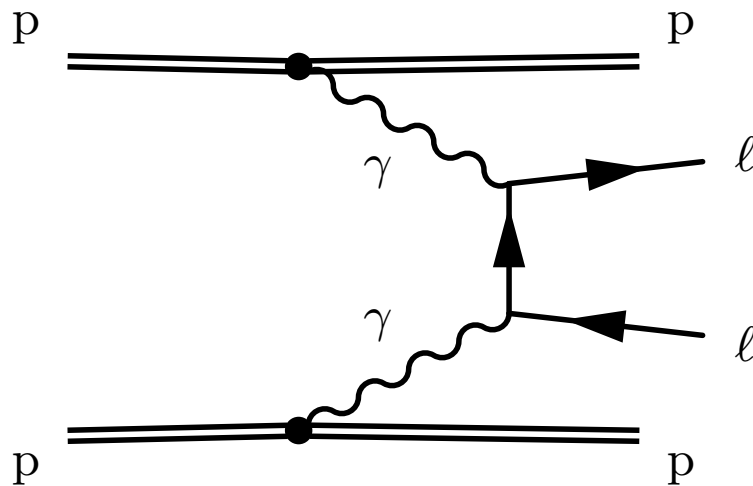
鉛イオン同士の衝突実験では観測済み

Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 052001

陽子-陽子衝突における光子-光子散乱

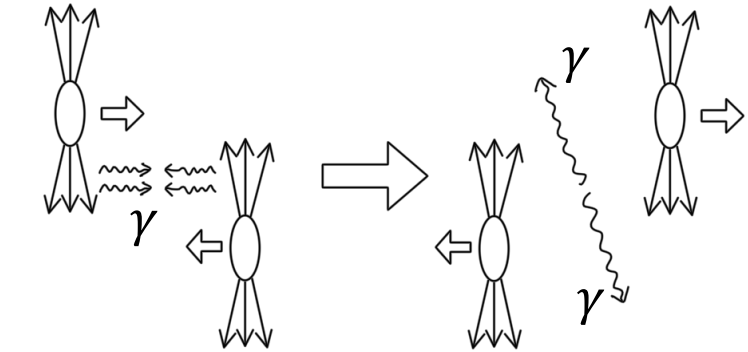
2レプトン終状態を通して
陽子衝突における等価光子同士
の反応を観測済み

Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 261801



陽子衝突でも同じパターンの
光子-光子散乱が起こるはず

電場



イベントの特徴

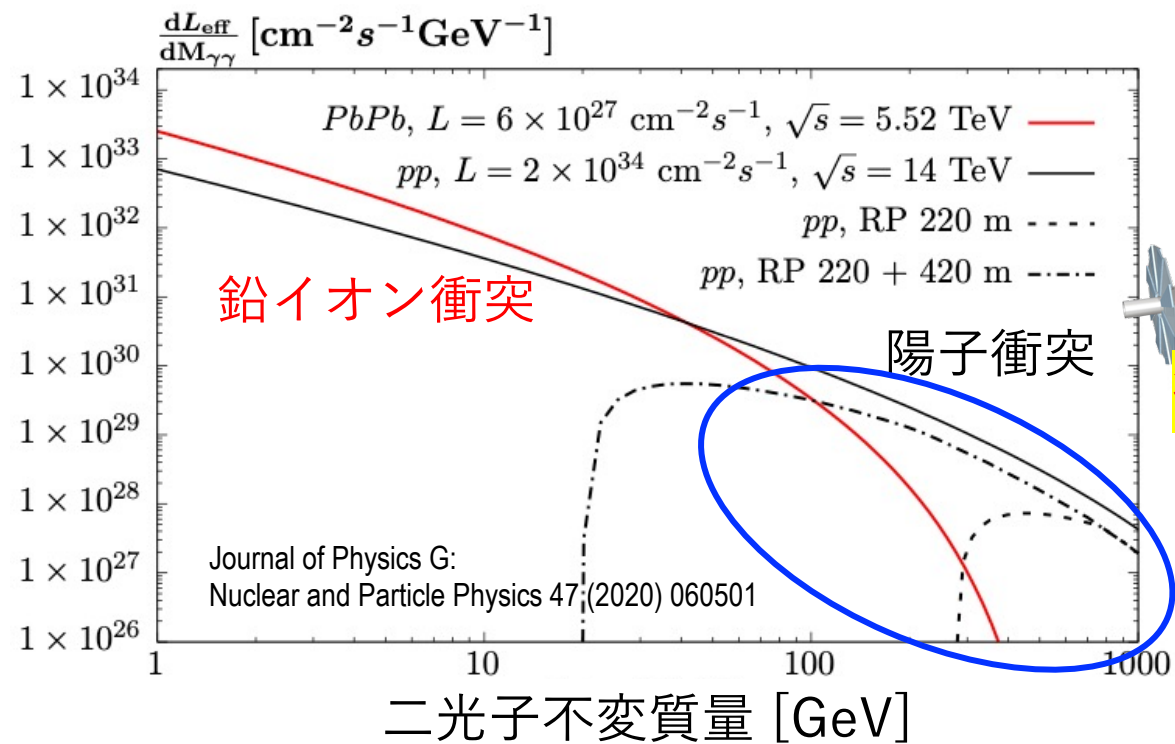
- **二光子が**
 - **back-to-back**
 - **排他的** (他にオブジェクトが無い)
- **陽子を壊さない**

特別な
検出器で
捉えたい

光子-光子散乱に寄与する
新粒子を探索

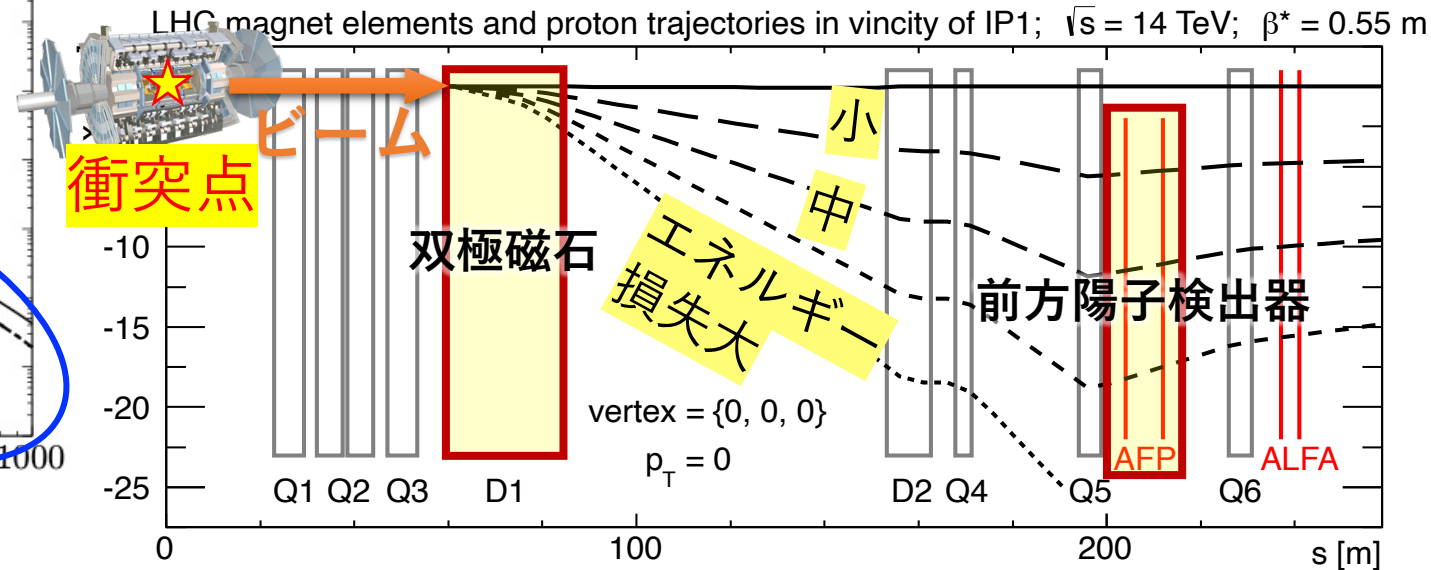
前方陽子検出器の利用

光子-光子の実効瞬間ルミノシティ



高質量領域では陽子衝突を用いた方が (ATLAS実験では) 感度が高い

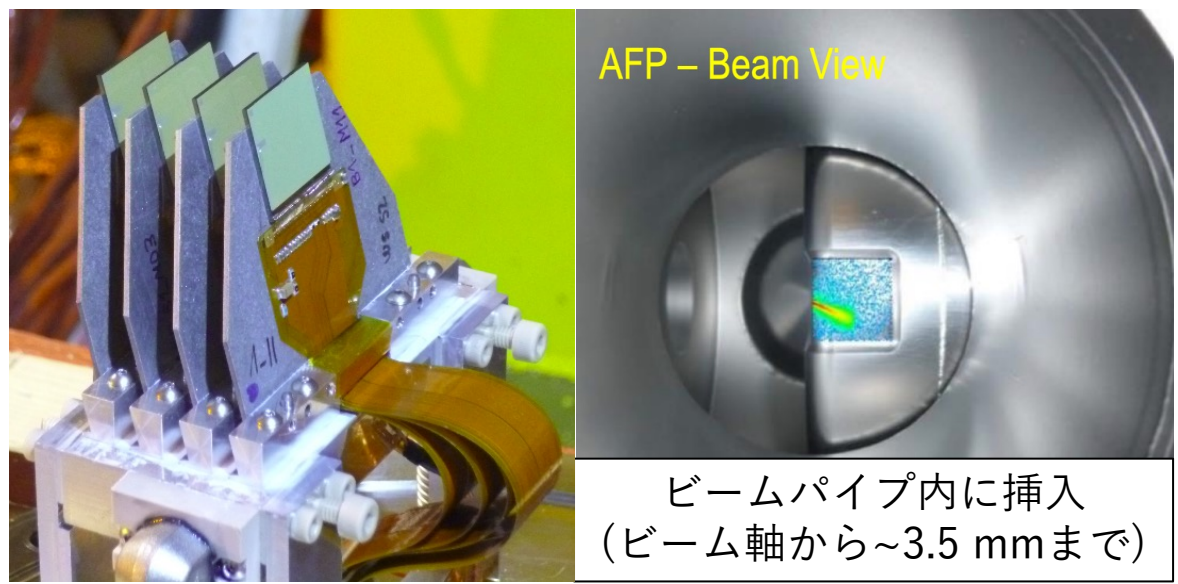
前方陽子検出器を利用し
壊れていない陽子に対する要求を
イベント選択条件に含めることで
SN比を大幅に上げる



陽子は反応により数百GeVのエネルギーを損失
→ ビームの一部として残るがLHCマグネットに
曲げられて軌道がやや逸れる

陽子エネルギー損失率ξによって軌道が変わる

前方陽子検出器の利用



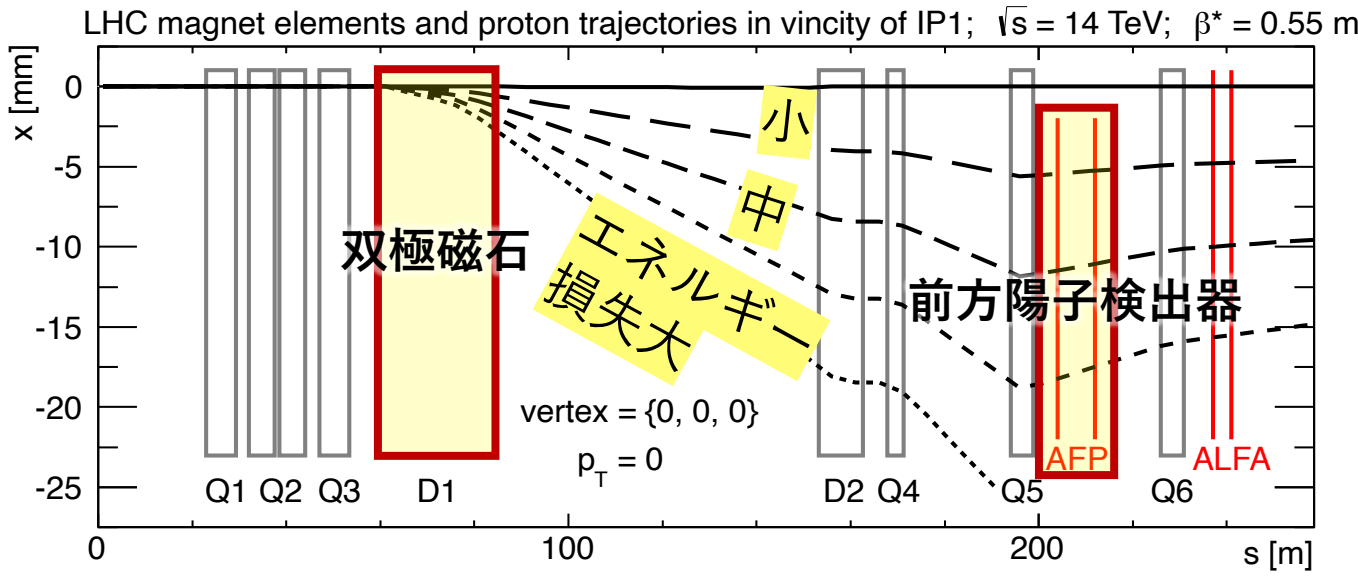
AFP – Beam View

ビームパイプ内に挿入
(ビーム軸から~3.5 mmまで)

シリコントラックが
LHCマグネットの情報と合わせて
陽子運動量スペクトロメータの役割
→ **陽子エネルギー損失率を測定**

$$\xi_{\text{proton}} = 1 - \frac{E_{\text{信号陽子}}}{E_{\text{ビーム}}}$$

前方陽子検出器を利用し
壊れていない陽子に対する要求を
イベント選択条件に含めることで
SN比を大幅に上げる

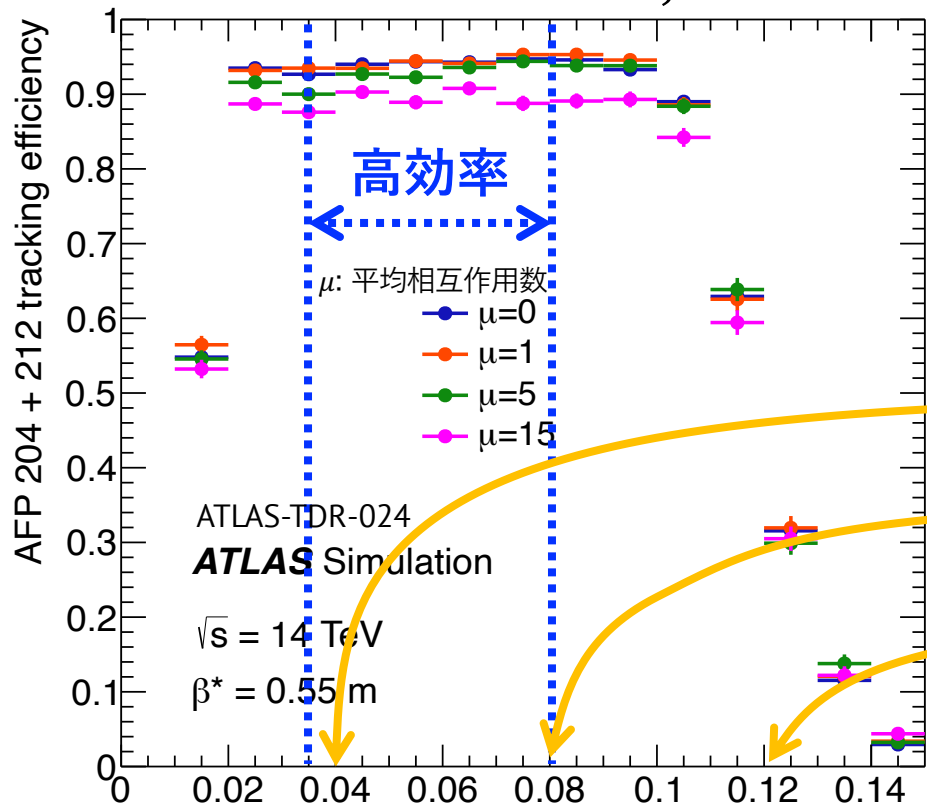


陽子は反応により数百GeVのエネルギーを損失
→ ビームの一部として残るがLHCマグネットに
曲げられて軌道がやや逸れる

陽子エネルギー損失率ξによって軌道が変わる

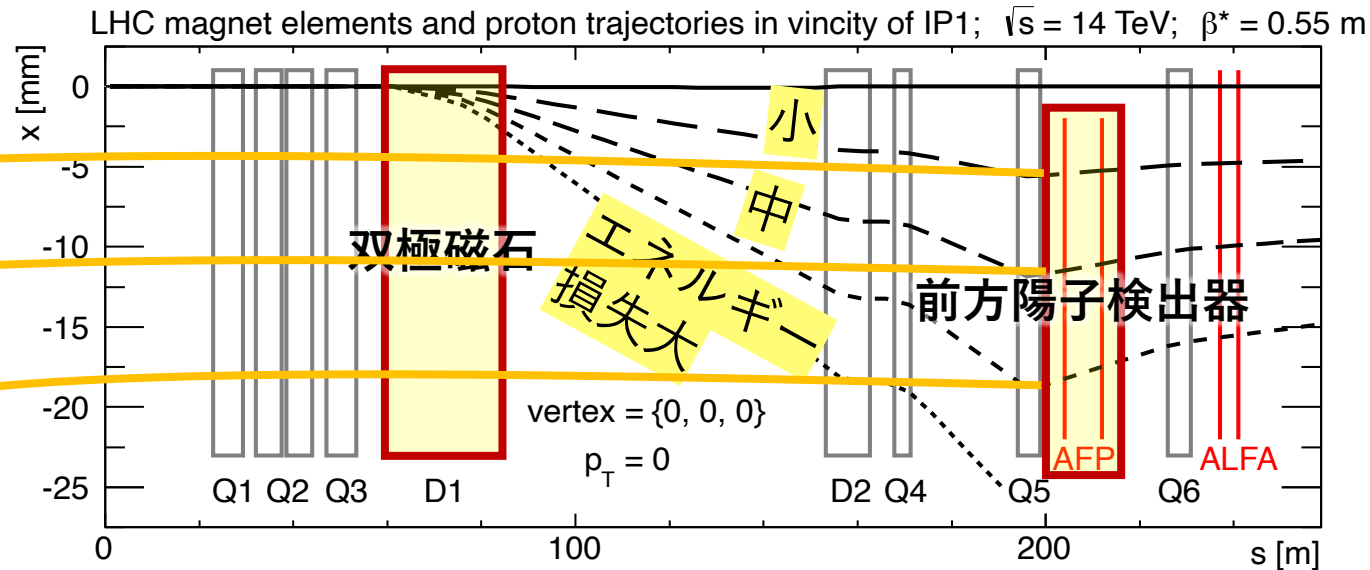
前方陽子検出器の利用

トラッキング効率の ξ 依存性



陽子エネルギー損失率 ξ
本解析では高効率の
 $0.035 \leq \xi < 0.08$ に注目

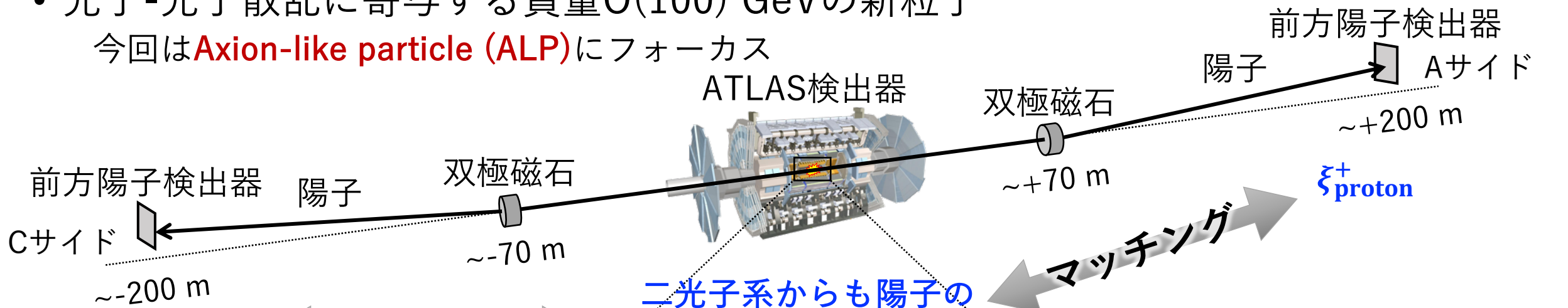
前方陽子検出器を利用し
 壊れていない陽子に対する要求を
 イベント選択条件に含めることで
 SN比を大幅に上げる



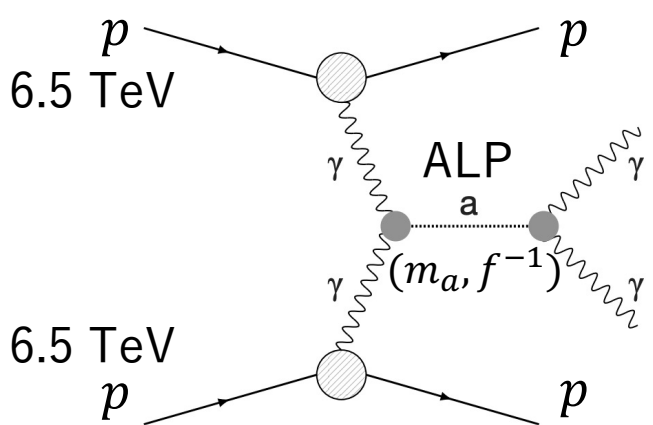
陽子は反応により数百GeVのエネルギーを損失
 → ビームの一部として残るがLHCマグネットに
 曲げられて軌道がやや逸れる
陽子エネルギー損失率 ξ によって軌道が変わる

本研究の目的

- 等価光子と前方陽子検出器を利用した二光子共鳴探索 (2017年の14.6 fb⁻¹のデータを使用)
背景事象推定手法の確立と検証、感度評価
- 光子-光子散乱に寄与する質量O(100) GeVの新粒子
今回は**Axion-like particle (ALP)**にフォーカス

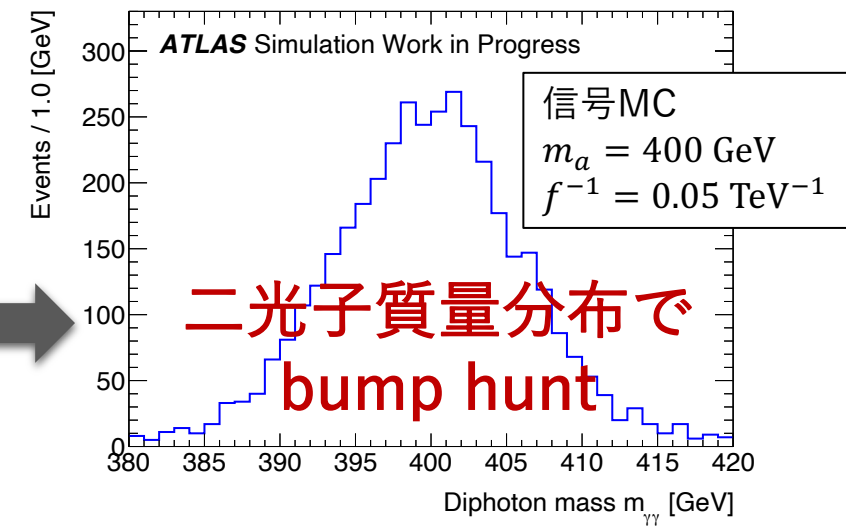


二光子系からも陽子のエネルギー損失率 $\xi_{\gamma\gamma}^{\pm}$ を測定



$$\xi_{\gamma\gamma}^{\pm} = m_{\gamma\gamma} \frac{e^{\pm y_{\gamma\gamma}}}{\sqrt{s}}$$

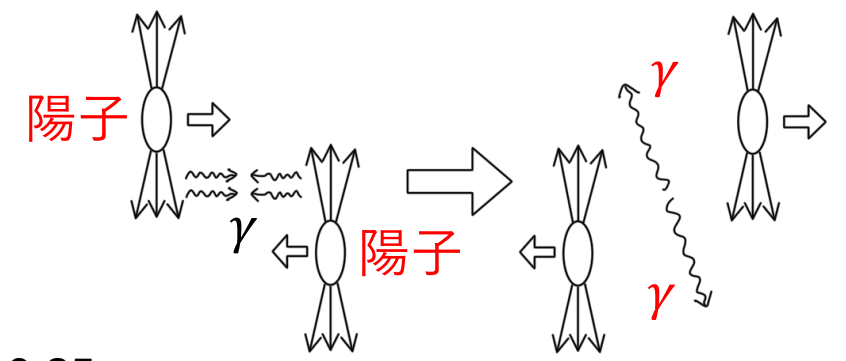
電磁カロリメータ



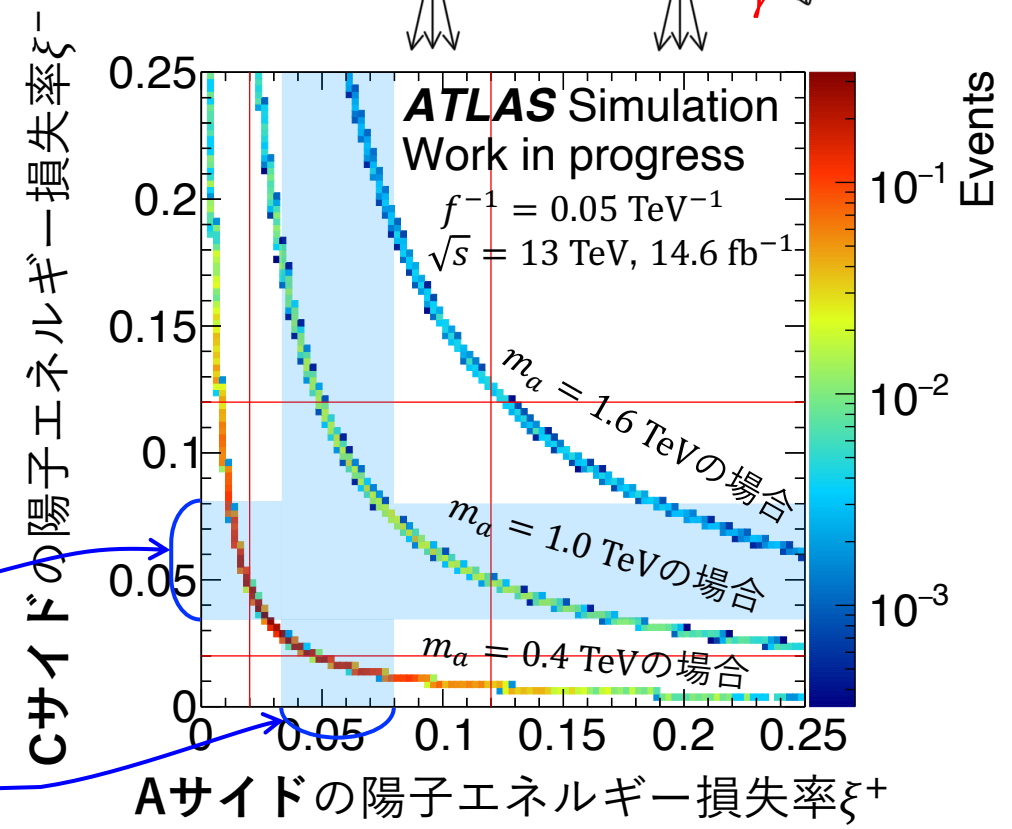
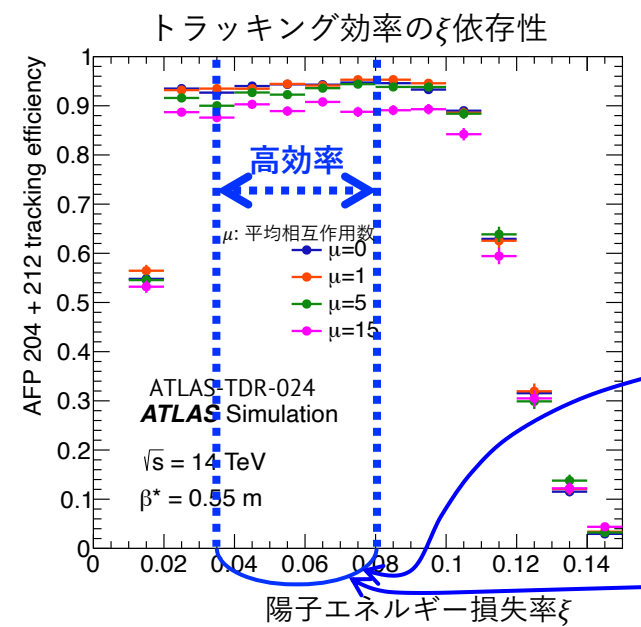
解析の戦略

- ALP: 強いCP問題を解決するために導入されたアクシオンの拡張
- パラメータ: 質量 m_a と(光子との)結合定数 f^{-1}

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial^\mu a \partial_\mu a - \frac{1}{2} m_a^2 a^2 - \frac{1}{f} a F^{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu}$$



- 3つの戦略
 - Back-to-backな二光子を選ぶ
 - 前方陽子の再構成効率が低い領域に注目



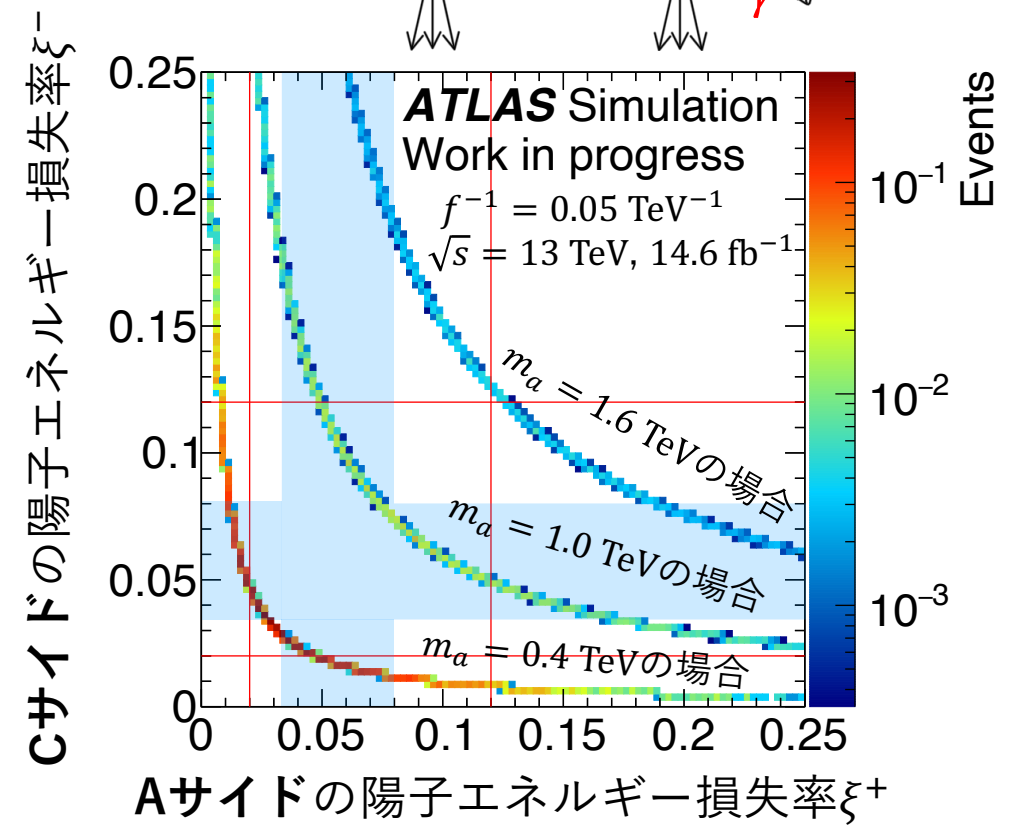
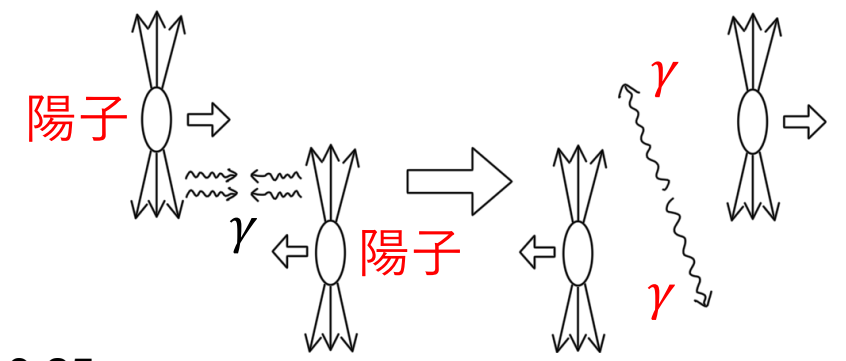
解析の戦略

- ALP: 強いCP問題を解決するために導入されたアクシオンの拡張
- パラメータ: 質量 m_a と(光子との)結合定数 f^{-1}

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial^\mu a \partial_\mu a - \frac{1}{2} m_a^2 a^2 - \frac{1}{f} a F^{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu}$$

- 3つの戦略
 1. Back-to-backな二光子を選ぶ
 2. 前方陽子の再構成効率が低い領域に注目
 3. 陽子エネルギー損失率を2通りの方法で測定し整合性を要求

ξ_{proton}^\pm と $\xi_{\gamma\gamma}^\pm$ のマッチングによる背景事象削減



事象選択条件

○ トリガー

- $E_T^{\gamma 1} \geq 35 \text{ GeV}$, $E_T^{\gamma 2} \geq 25 \text{ GeV}$

1. Preselection

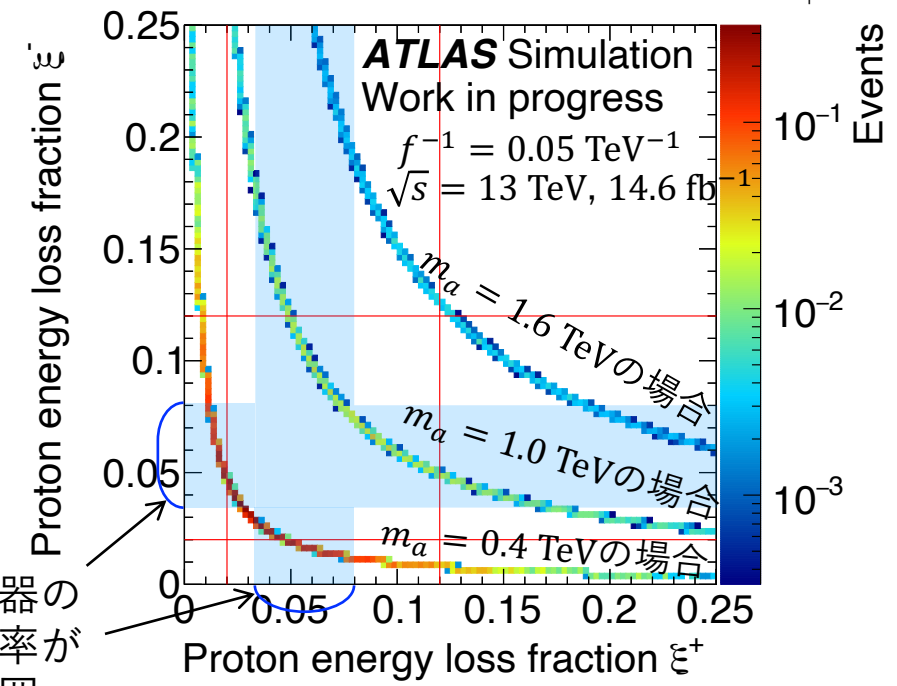
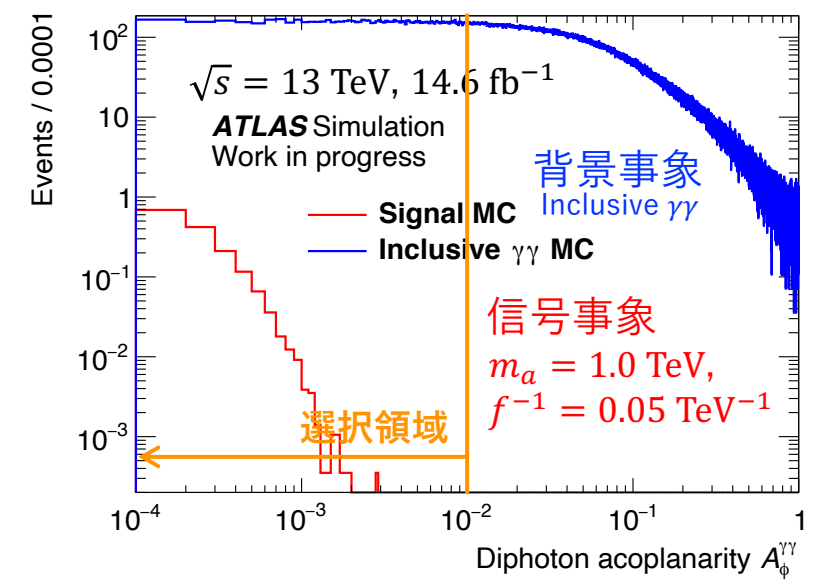
- $p_T \geq 40 \text{ GeV}$ の(isolated)光子が2つある事象のみ
- 前方陽子検出器の再構成陽子のうち $\xi_{\gamma\gamma}^{\pm}$ に最も近い $\xi_{\text{proton}}^{\pm}$ を持つ陽子を各サイド1つずつ選択

2. アコプラナリティカット

- $A_{\phi}^{\gamma\gamma} = 1 - \frac{|\Delta\phi_{\gamma\gamma}|}{\pi} < 0.01$ (二光子がback-to-back)

3. 前方陽子再構成効率カット

- $\xi_{\gamma\gamma}^{\pm}$ と $\xi_{\text{proton}}^{\pm}$ が陽子再構成効率の高い範囲内 [0.035, 0.08) にある事象のみ



前方陽子検出器の陽子再構成効率が保証される範囲

事象選択条件

○ トリガー

- $E_T^{\gamma 1} \geq 35 \text{ GeV}$, $E_T^{\gamma 2} \geq 25 \text{ GeV}$

1. Preselection

- $p_T \geq 40 \text{ GeV}$ の(isolated)光子が2つある事象のみ
- 前方陽子検出器の再構成陽子のうち $\xi_{\gamma\gamma}^{\pm}$ に最も近い $\xi_{\text{proton}}^{\pm}$ を持つ陽子を各サイド1つずつ選択

2. アコプラナリティカット

- $A_{\phi}^{\gamma\gamma} = 1 - \frac{|\Delta\phi_{\gamma\gamma}|}{\pi} < 0.01$ (二光子がback-to-back)

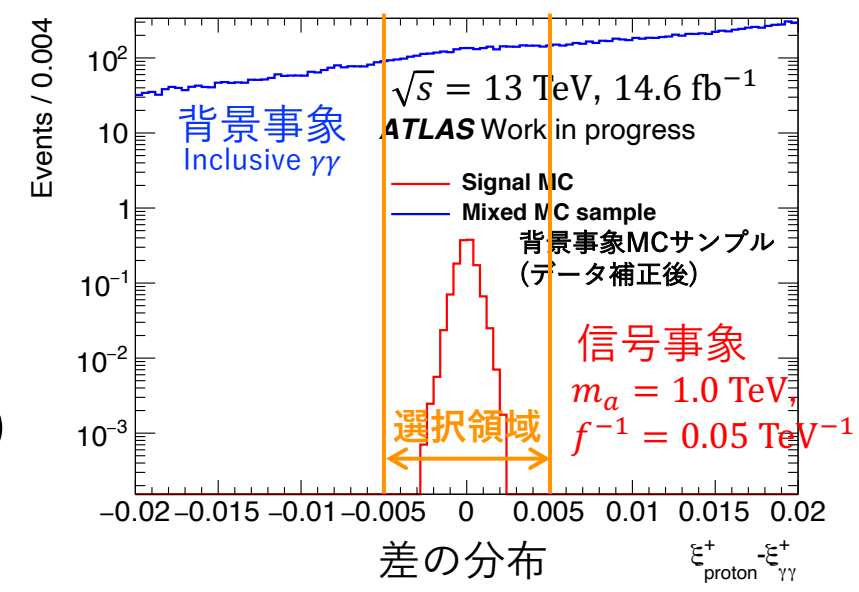
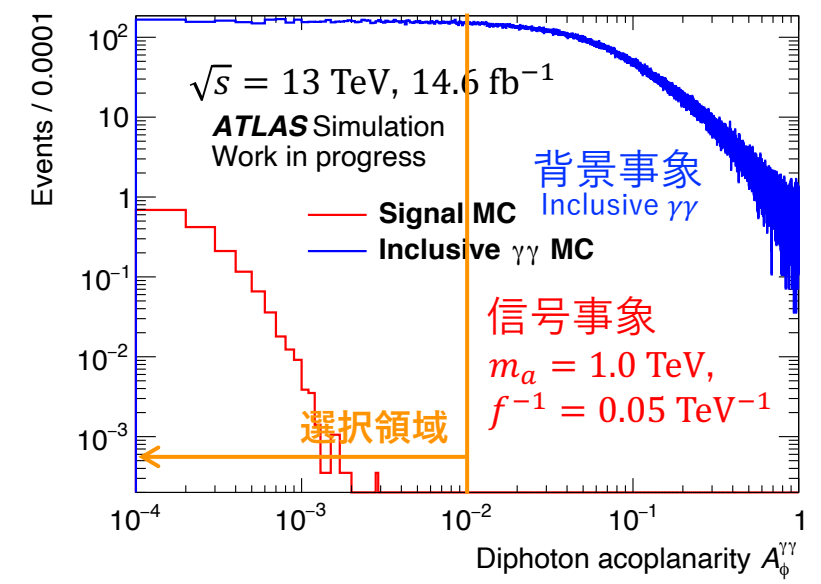
3. 前方陽子再構成効率カット

- $\xi_{\gamma\gamma}^{\pm}$ と $\xi_{\text{proton}}^{\pm}$ が陽子再構成効率の高い範囲内 [0.035, 0.08)にある事象のみ

4. 陽子と二光子の測定間の整合性の要求(マッチング)

- $\Delta\xi^{\pm} = |\xi_{\text{proton}}^{\pm} - \xi_{\gamma\gamma}^{\pm}| < 0.005$ (陽子と二光子の ξ が矛盾しない)

両サイド(±)のうちどちらか一方でも条件を満たせば事象選択

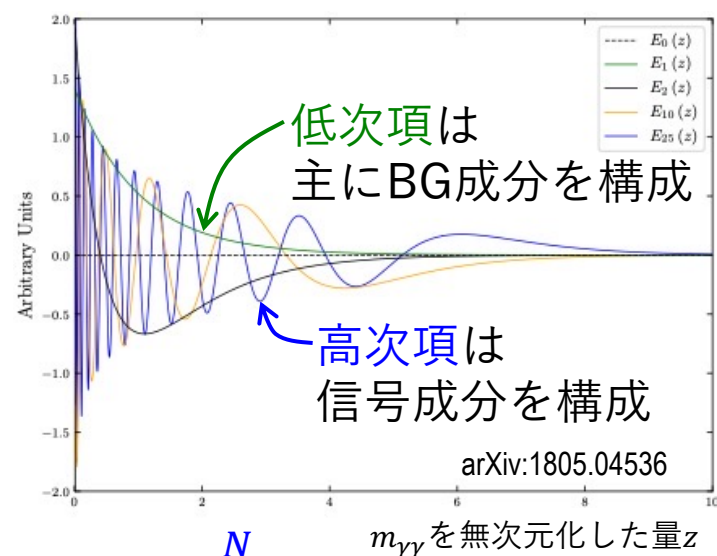


背景事象の推定手法

Functional decomposition (FD)を使う

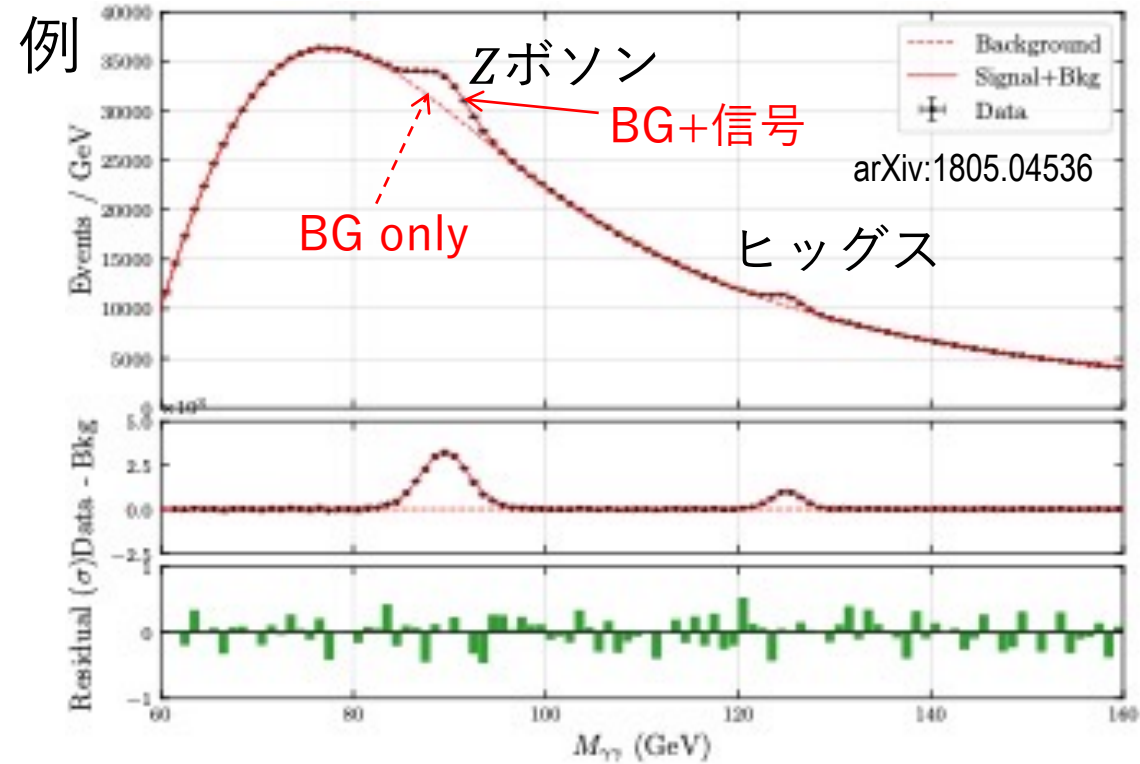
データの二光子不変質量分布から**信号と背景事象をモデル**する手法

- データ D
 - 仮定する信号分布 S (normalized)
- を専用の正規直交関数系 → の線形和で表す (decomposition)



$$D = B + \mu S = \sum_{n=0}^{N_{BG}-1} b_n E_n(z) + \mu \sum_{n=0}^N s_n E_n(z)$$

BGをオーバーフィットしない程度に精度良くフィットできるように低次と高次の境目 N_{BG} を最適化

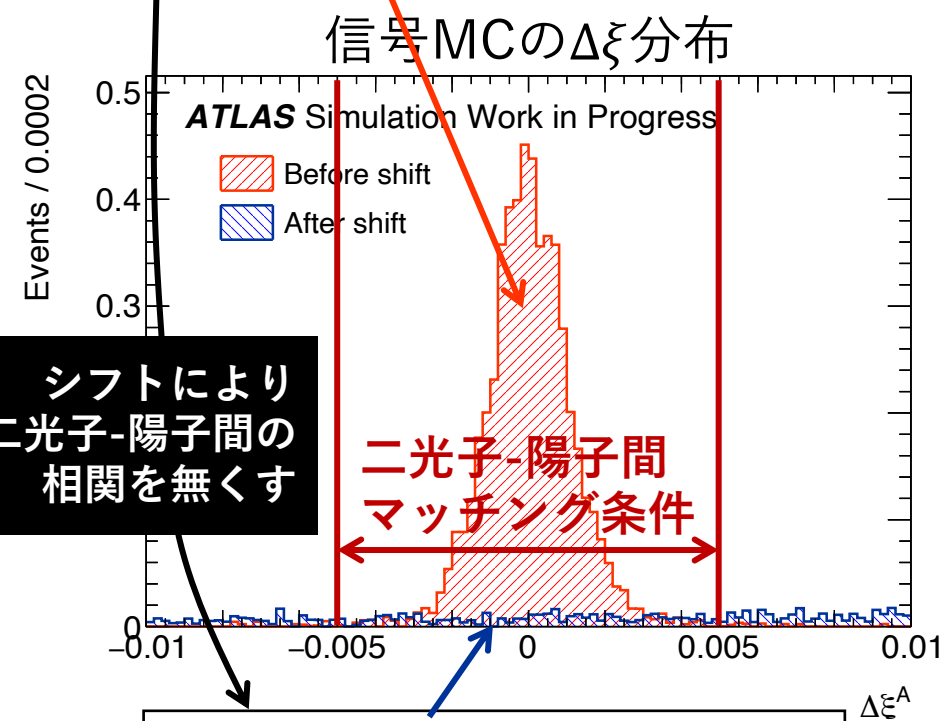


手法の正しさを事前に検証しておくことが重要 → 信号事象と背景事象のサンプルが必要

背景事象のサンプル

支配的な組合せ背景事象のサンプルを作成

データには
単一バーテックス由来の事象
(特殊な背景事象や信号混入)
が入り得る



マッチング領域から排除
→ 組合せ背景事象のサンプル

データ (preselection前)		
イベント番号	光子コンテナ番号	陽子コンテナ番号
1	1	1
2	2	2
3	3	3
⋮	⋮	⋮
N-1	N-1	N-1
N	N	N

シフトデータ		
イベント番号	光子コンテナ番号	陽子コンテナ番号
1	1	2
2	2	3
3	3	4
⋮	⋮	⋮
N-1	N-1	N
N	N	1

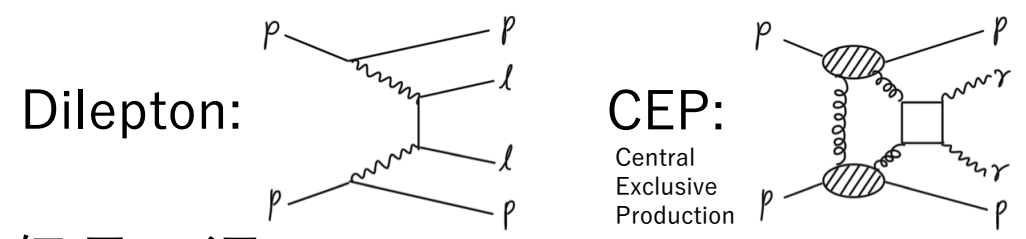
データドリブンなサンプル

本解析特有の事象選択の効率などをより正確に再現

背景事象サンプルの確認

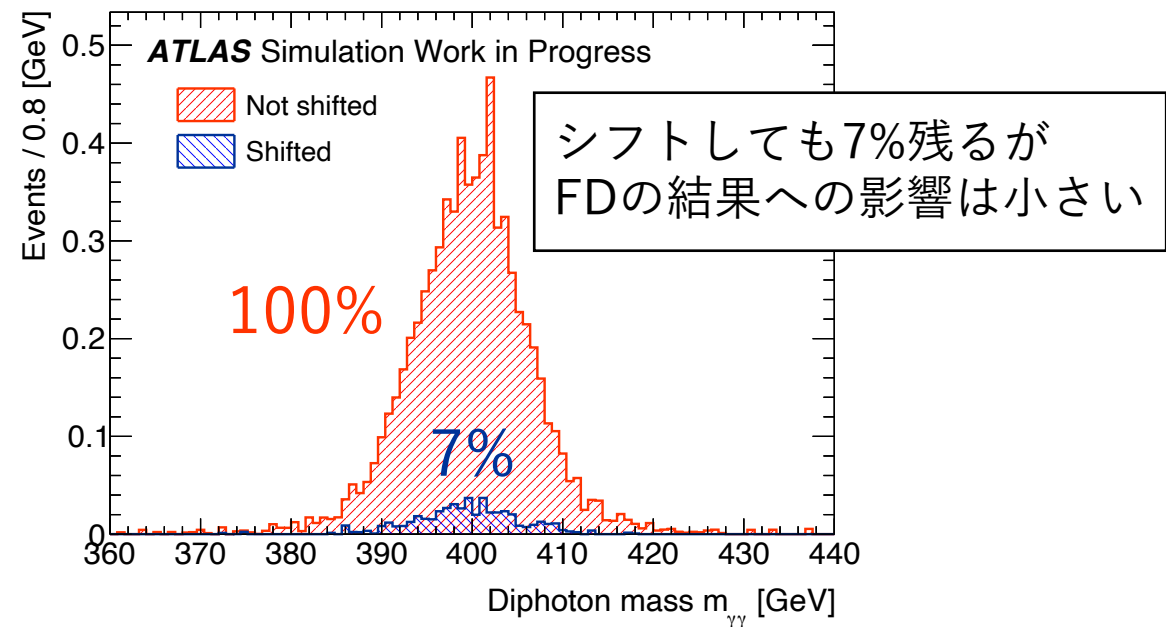
シフトデータ作成の際の注意点

- ① 単一バーテックスに由来する背景事象
→ 今回は無視(寄与はわずか)

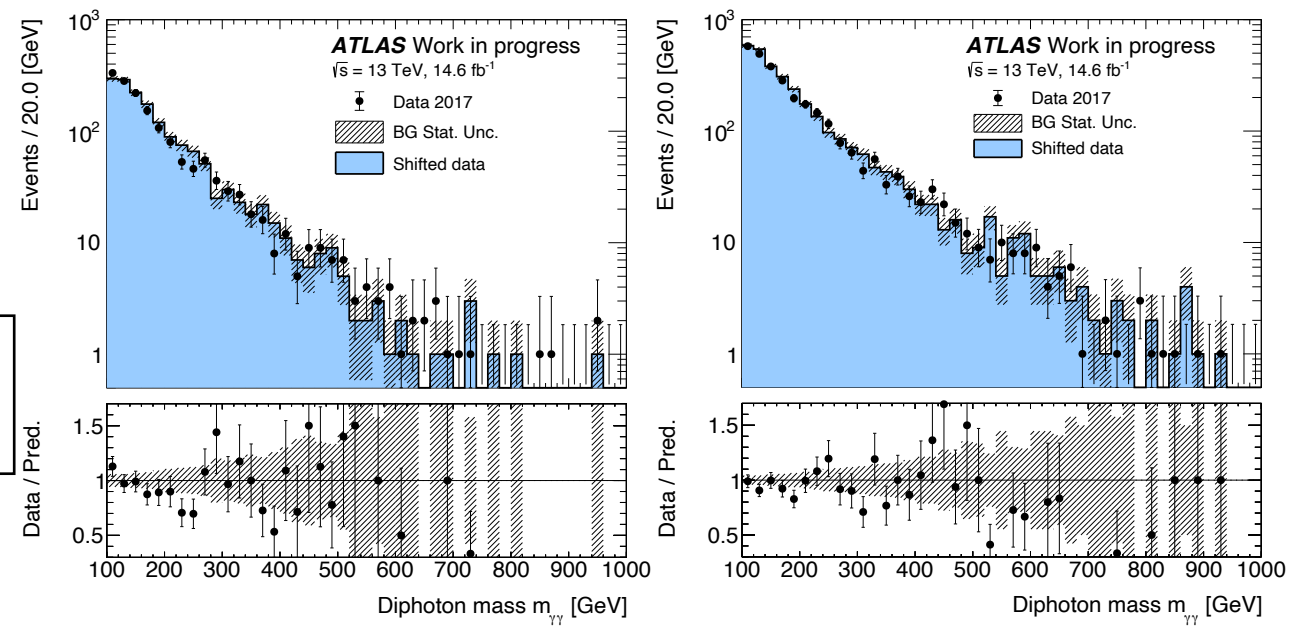
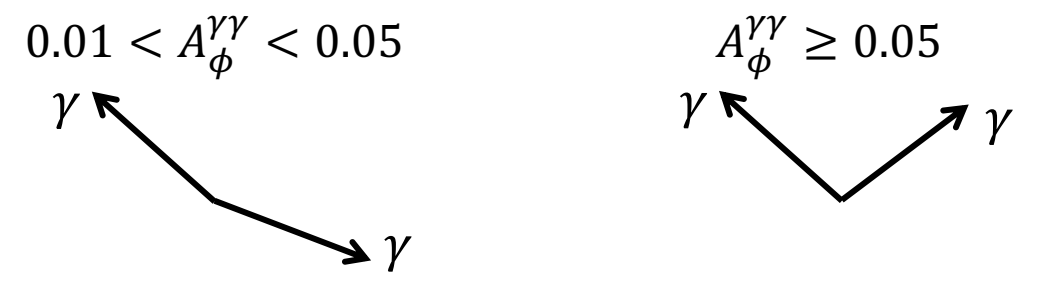


- ② 信号の混入

信号MCの二光子不変質量分布



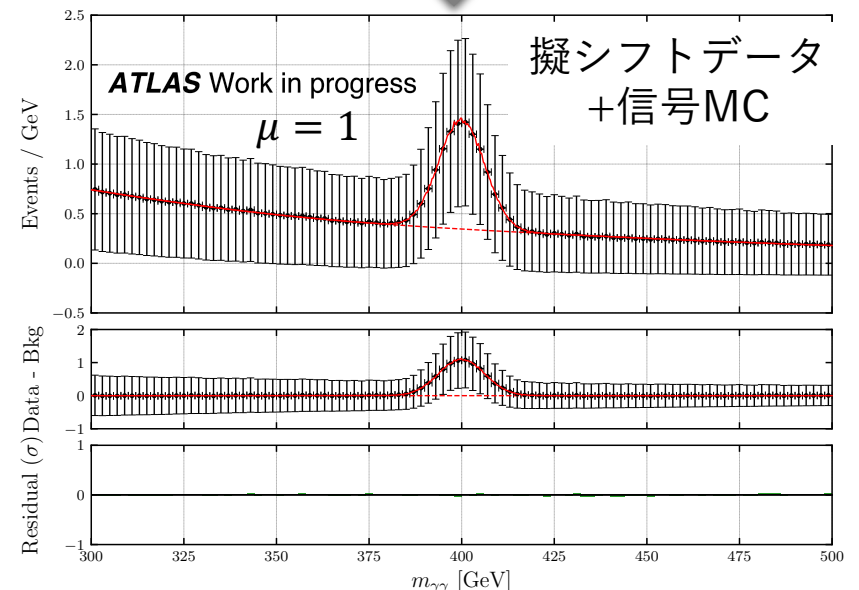
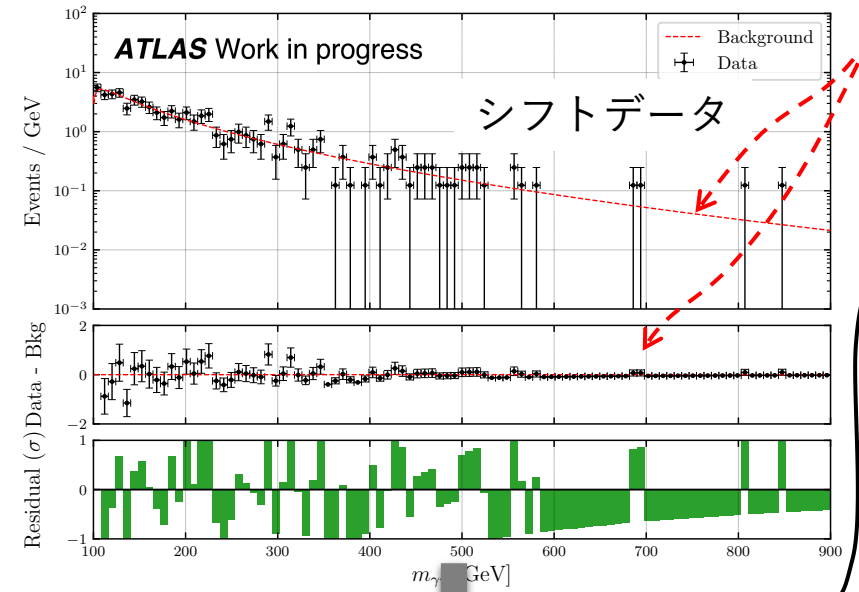
- ③ データとの予期せぬ不一致の可能性



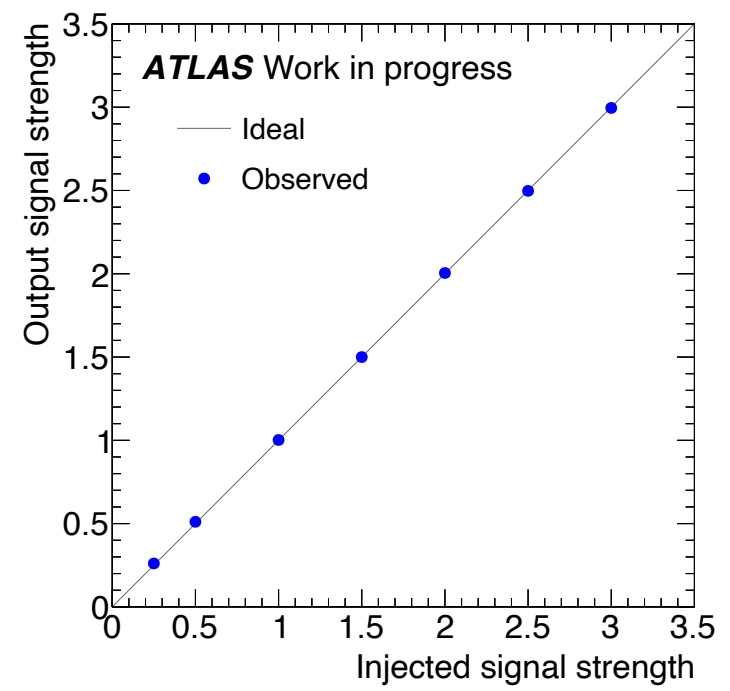
信号のサイドバンドの二光子不変質量分布においてデータとの不一致は見られない

背景事象推定手法の検証

二光子不変質量分布



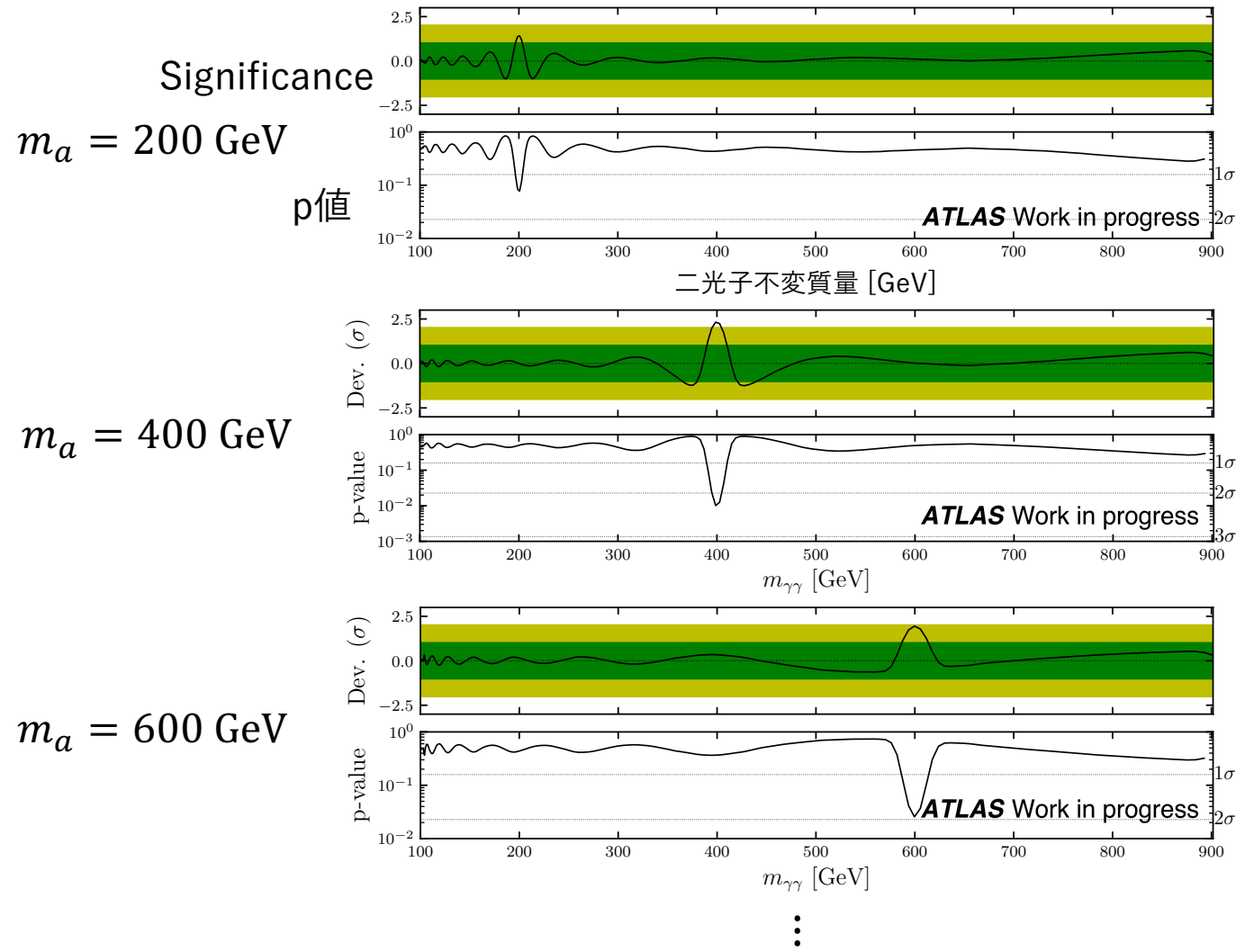
- ① シフトデータ(事象選択後)からFDで背景事象分布を得た
→ 残差から結果がreasonableであることを確認
 $\chi^2/d = 0.0958$
- ② これをもとに同じ誤差を持つ高統計の擬シフトデータを生成(Asimov data)
→ $m_a = 400 \text{ GeV}$, $f^{-1} = 0.05 \text{ TeV}^{-1}$ の
信号MCを異なる強度 μ で入力 → BG+信号フィット



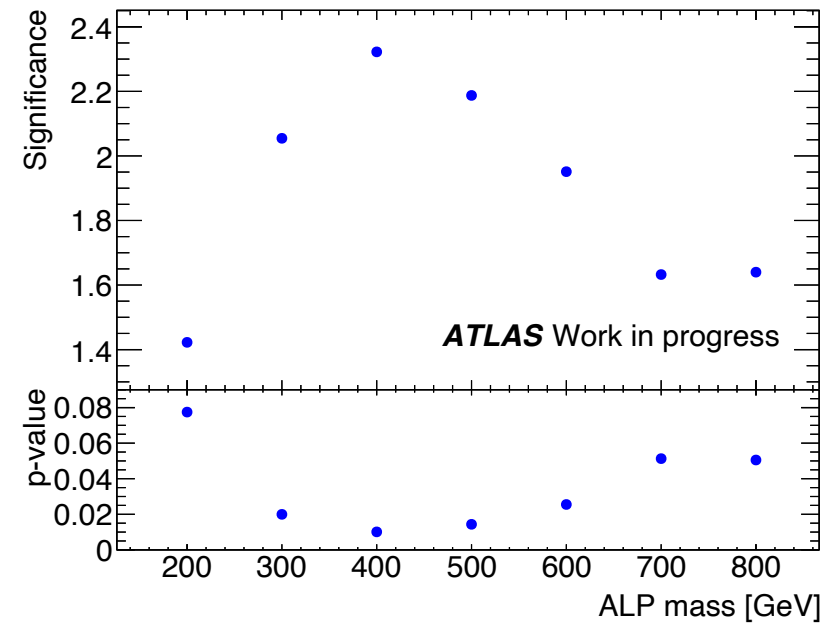
平均1%以内の精度で
各々**入力と整合**

感度評価

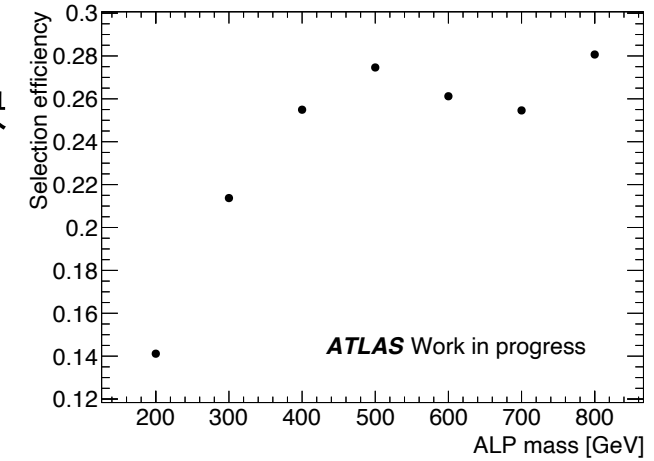
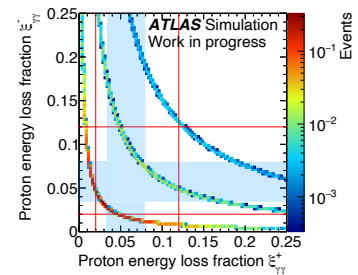
擬データに $f^{-1} = 0.05 \text{ TeV}^{-1}$ の信号MCを強度 $\mu = 1$ で入力
複数通りのALP質量で実験



感度評価結果



信号効率を反映



まとめと展望

まとめ

- 二光子系と前方陽子のkinematicsの整合性を要求して二光子共鳴探索
- 支配的な「組合せ背景事象」を見積もるためにシフトデータを作成
- シフトデータをfunctional decompositionしてBGと信号をモデル
 - FDの想定通りの動作を確認
 - 感度を評価し信号効率から想定される振る舞いを確認

展望

Run2のデータを使ってALPを探索

- 単一バーテックス背景事象の影響を見積もる
- 系統誤差を見積もる
- データの考察: ALP質量/結合定数でスキャン → 観測 or 棄却域の設定