

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 最終感度

日本物理学会 2022年秋季大会

2022年9月8日 8pA431-1

東大理, 東大素セ^A

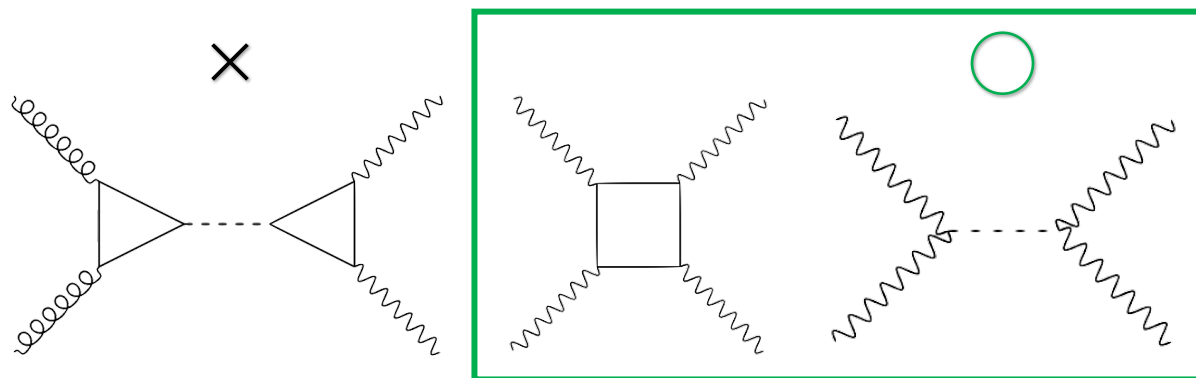
舘野元, 田中純一^A, 奥村恭幸^A, 江成祐二^A, 増渕達也^A, 寺師弘二^A



陽子-陽子衝突における光子-光子散乱

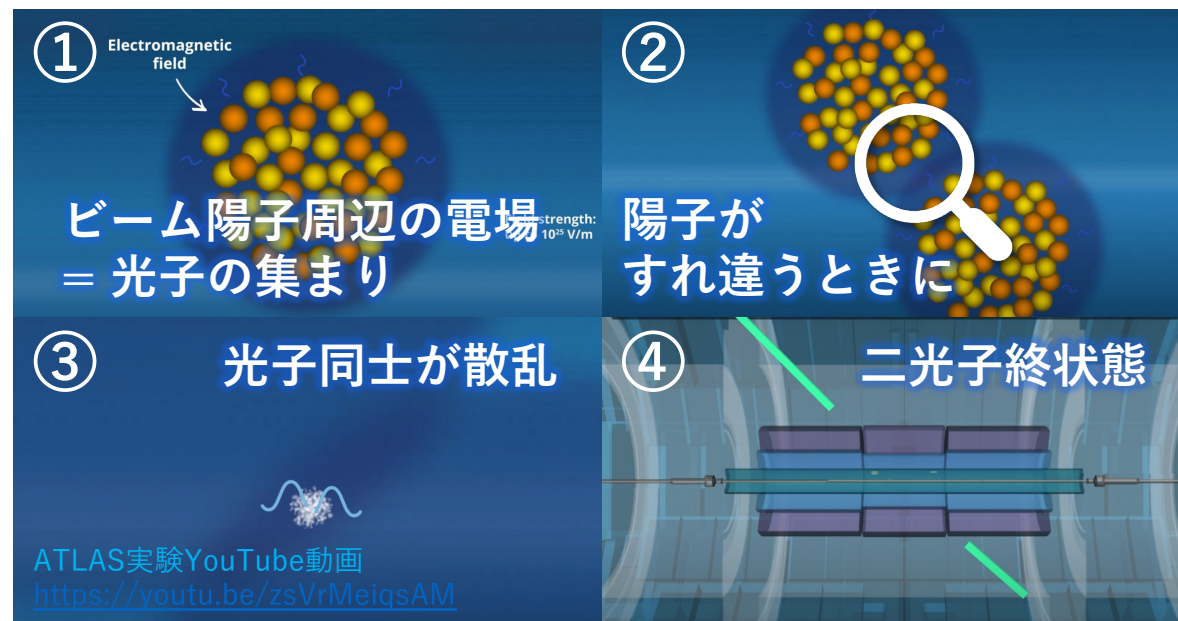
光子と結合する $O(100-1000)$ GeVの新粒子をLHC-ATLAS実験で探索

- Vector-like fermion
- **Axion-like particle**
- KKグラビトン
- Strongly-interacting heavy dilaton



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

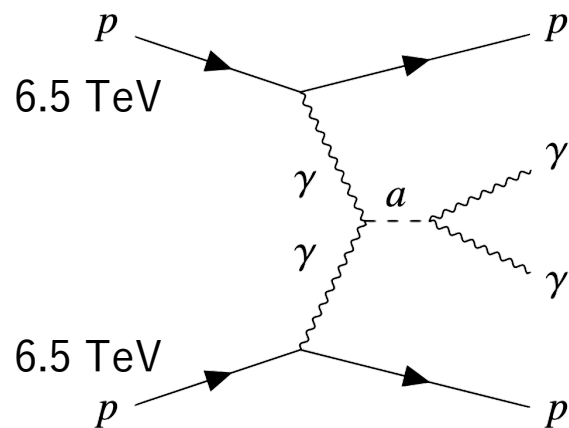


- 終状態二光子が**back-to-back** (方位角)
- QCD相互作用が起これず
余計な粒子が出てこない
- **陽子は壊れずに残る**

本研究の目的

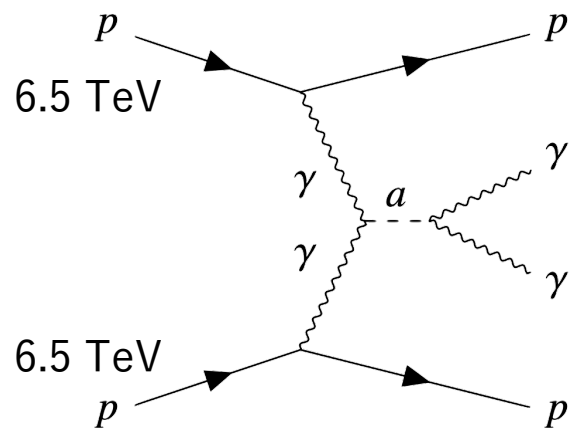
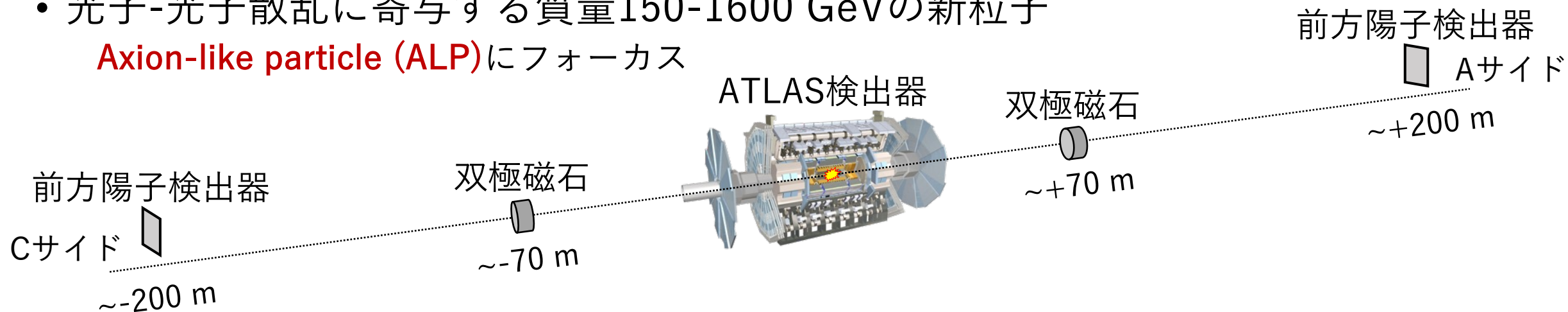
- 前方陽子検出器を利用した二光子共鳴探索
 2017年の14.6 fb⁻¹のデータを使用 / 二光子トリガー: $E_T^{\gamma 1} \geq 35$ GeV, $E_T^{\gamma 2} \geq 25$ GeV
- 光子-光子散乱に寄与する質量150-1600 GeVの新粒子
Axion-like particle (ALP)にフォーカス
 - 強いCP問題を解決するために導入されたアクシオンの拡張
 - パラメータ: 質量 m_a と(光子との)結合定数 f^{-1}

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



本研究の目的

- 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 / 二光子トリガー: $E_T^{\gamma 1} \geq 35 \text{ GeV}$, $E_T^{\gamma 2} \geq 25 \text{ GeV}$
- 光子-光子散乱に寄与する質量150-1600 GeVの新粒子
Axion-like particle (ALP)にフォーカス



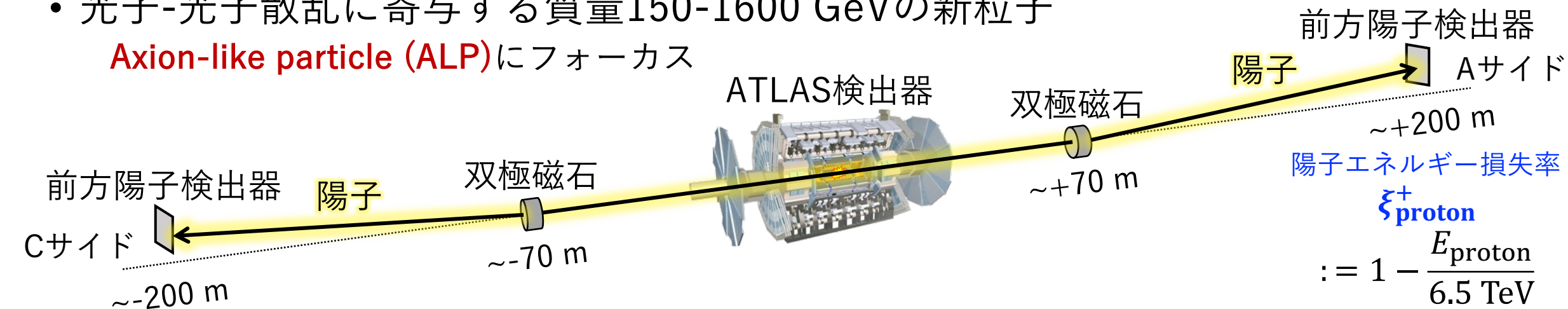
本研究の目的

- 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 / 二光子トリガー: $E_T^{\gamma 1} \geq 35 \text{ GeV}$, $E_T^{\gamma 2} \geq 25 \text{ GeV}$

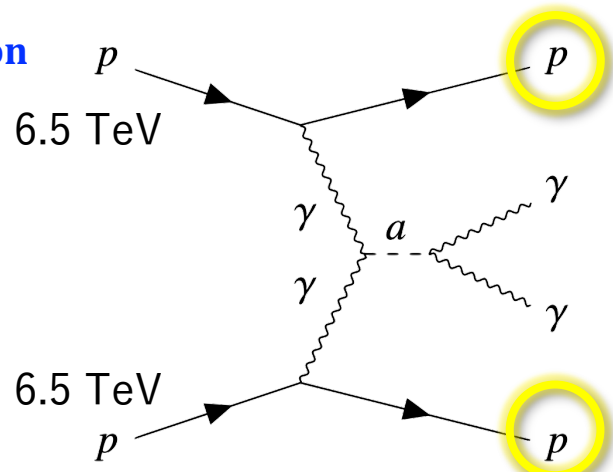
- 光子-光子散乱に寄与する質量150-1600 GeVの新粒子

Axion-like particle (ALP)にフォーカス



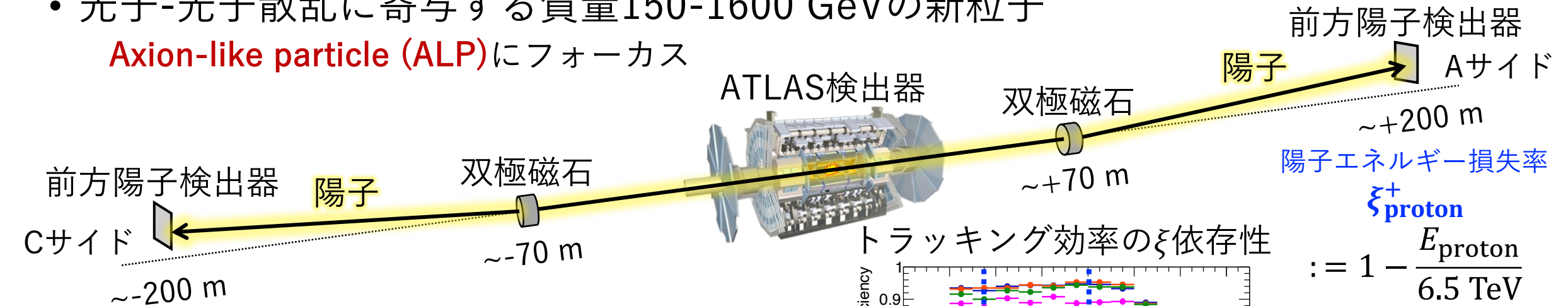
陽子エネルギー損失率

ξ_{proton}^{-}

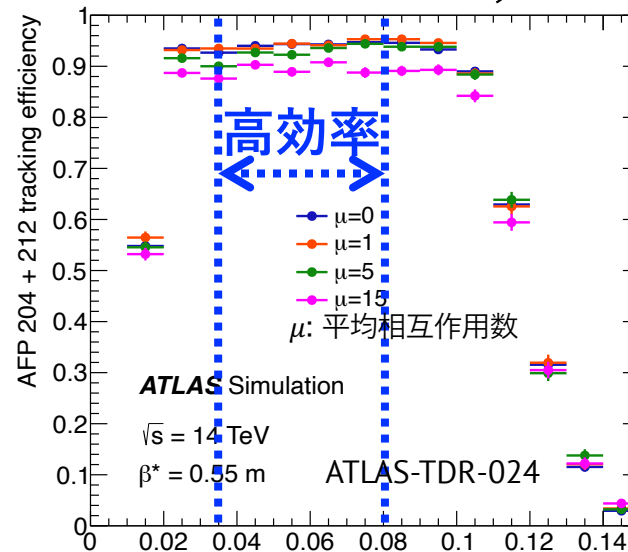


本研究の目的

- 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 / 二光子トリガー: $E_T^{\gamma 1} \geq 35 \text{ GeV}$, $E_T^{\gamma 2} \geq 25 \text{ GeV}$
- 光子-光子散乱に寄与する質量150-1600 GeVの新粒子
Axion-like particle (ALP)にフォーカス

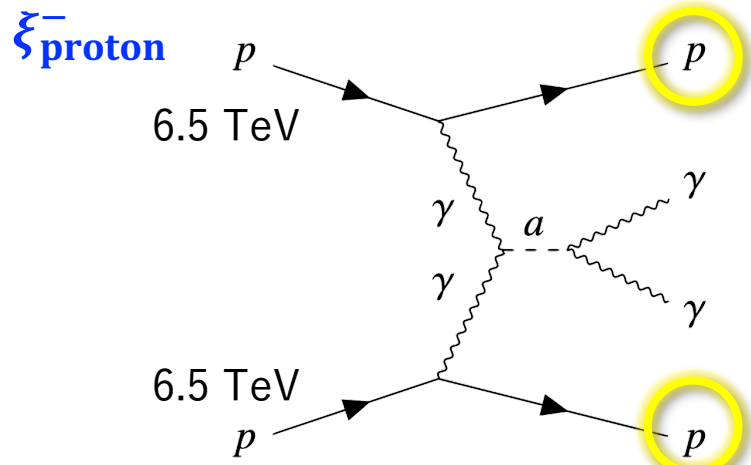


-tracking efficiencyのξ依存性



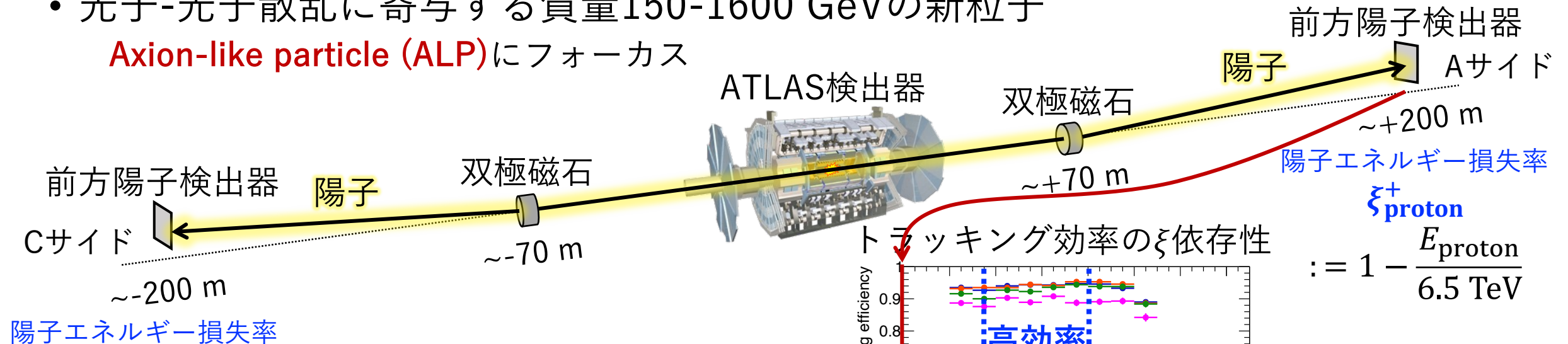
$$:= 1 - \frac{E_{\text{proton}}}{6.5 \text{ TeV}}$$

陽子エネルギー損失率ξ

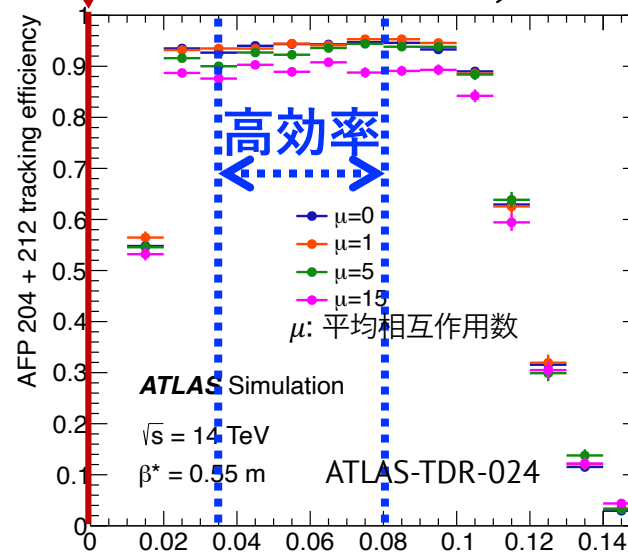


本研究の目的

- 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 / 二光子トリガー: $E_T^{\gamma 1} \geq 35 \text{ GeV}$, $E_T^{\gamma 2} \geq 25 \text{ GeV}$
- 光子-光子散乱に寄与する質量150-1600 GeVの新粒子
Axion-like particle (ALP)にフォーカス



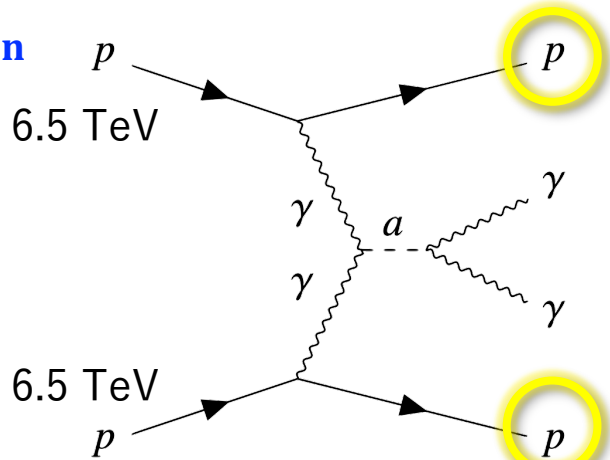
トラッキング効率の ξ 依存性



$$:= 1 - \frac{E_{\text{proton}}}{6.5 \text{ TeV}}$$

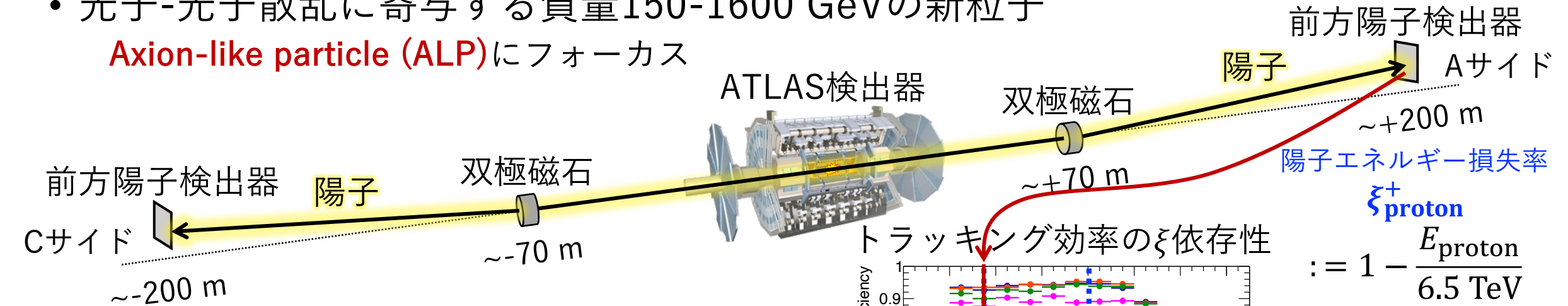
陽子エネルギー損失率 ξ

ξ_{proton}^-



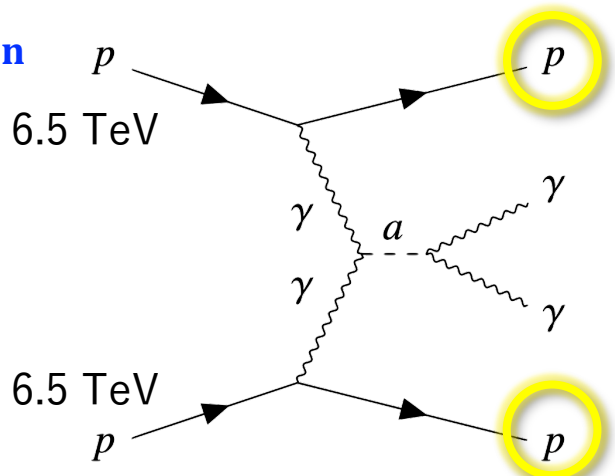
本研究の目的

- 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 / 二光子トリガー: $E_T^{\gamma 1} \geq 35$ GeV, $E_T^{\gamma 2} \geq 25$ GeV
- 光子-光子散乱に寄与する質量150-1600 GeVの新粒子
Axion-like particle (ALP)にフォーカス

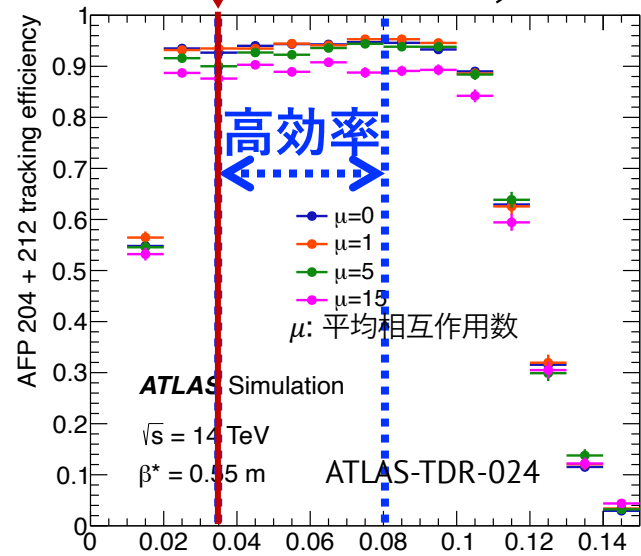


陽子エネルギー損失率

ξ_{proton}^-



トラッキング効率の ξ 依存性

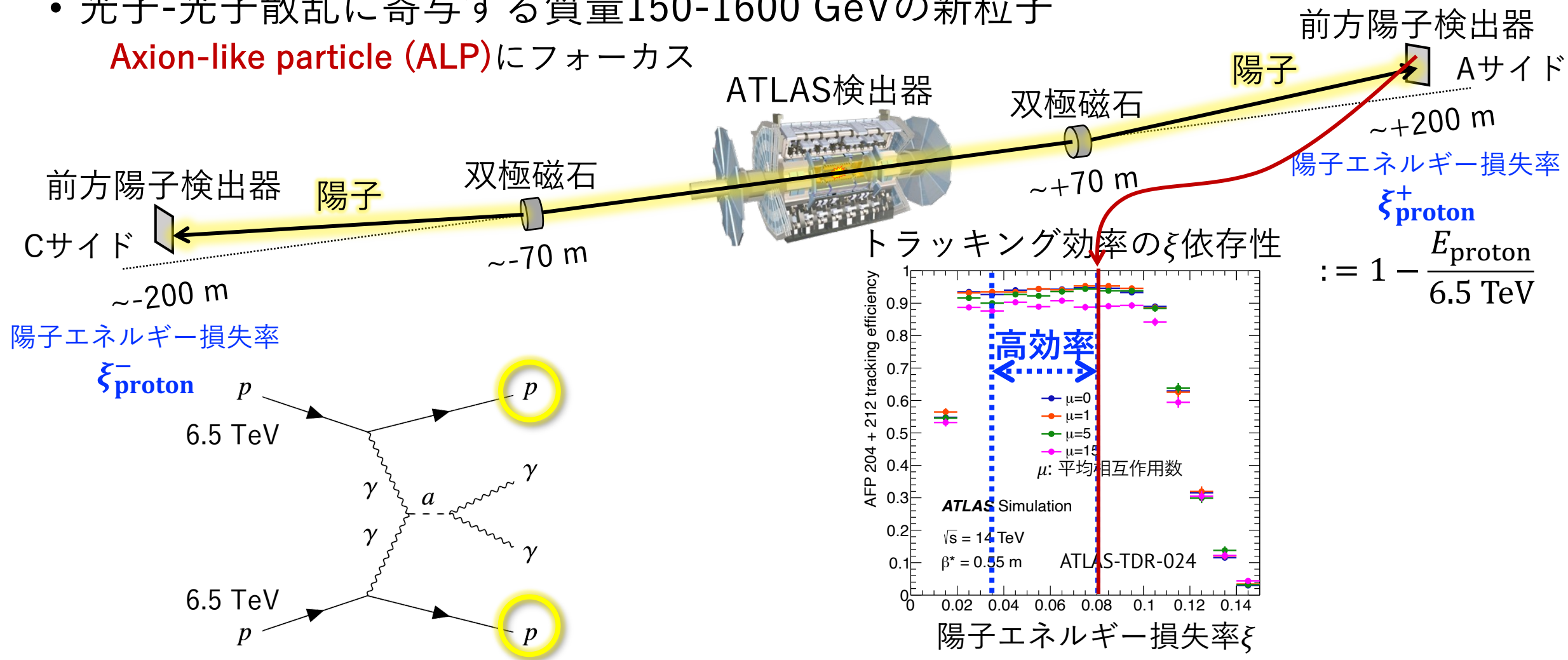


$$:= 1 - \frac{E_{\text{proton}}}{6.5 \text{ TeV}}$$

陽子エネルギー損失率 ξ

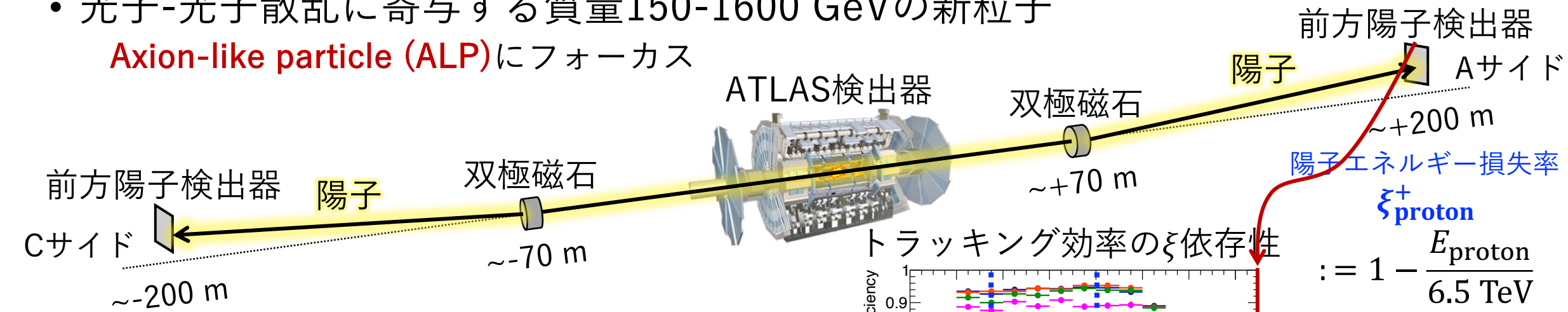
本研究の目的

- 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 / 二光子トリガー: $E_T^{\gamma 1} \geq 35 \text{ GeV}$, $E_T^{\gamma 2} \geq 25 \text{ GeV}$
- 光子-光子散乱に寄与する質量150-1600 GeVの新粒子
Axion-like particle (ALP)にフォーカス



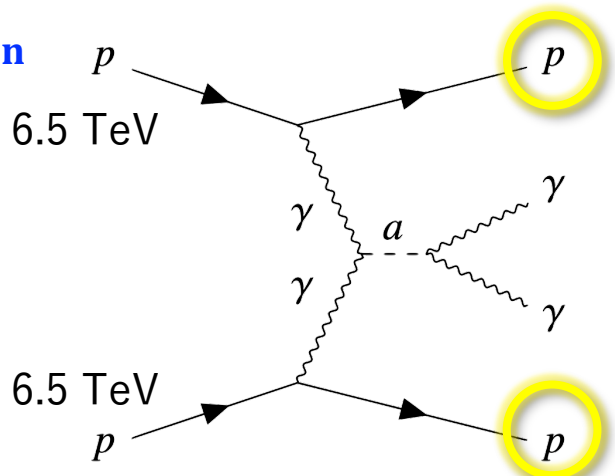
本研究の目的

- 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 / 二光子トリガー: $E_T^{\gamma 1} \geq 35$ GeV, $E_T^{\gamma 2} \geq 25$ GeV
- 光子-光子散乱に寄与する質量150-1600 GeVの新粒子
Axion-like particle (ALP)にフォーカス

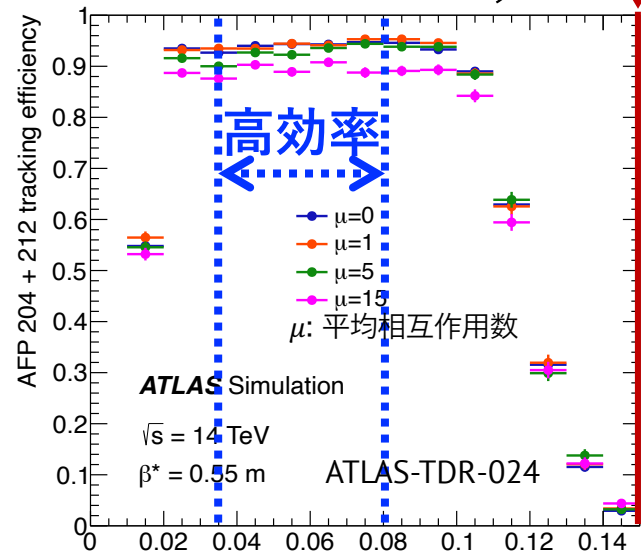


陽子エネルギー損失率

ξ_{proton}^-



トラッキング効率のξ依存性

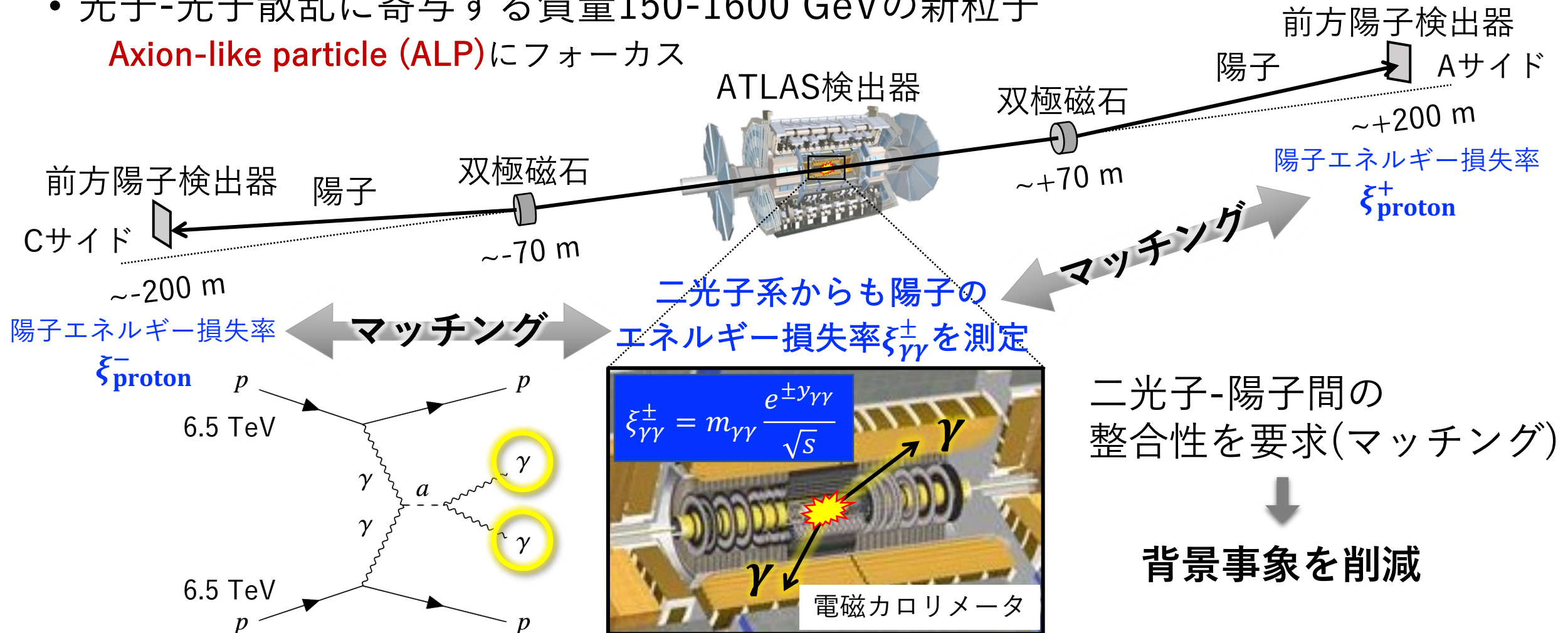


$$:= 1 - \frac{E_{\text{proton}}}{6.5 \text{ TeV}}$$

陽子エネルギー損失率ξ

本研究の目的

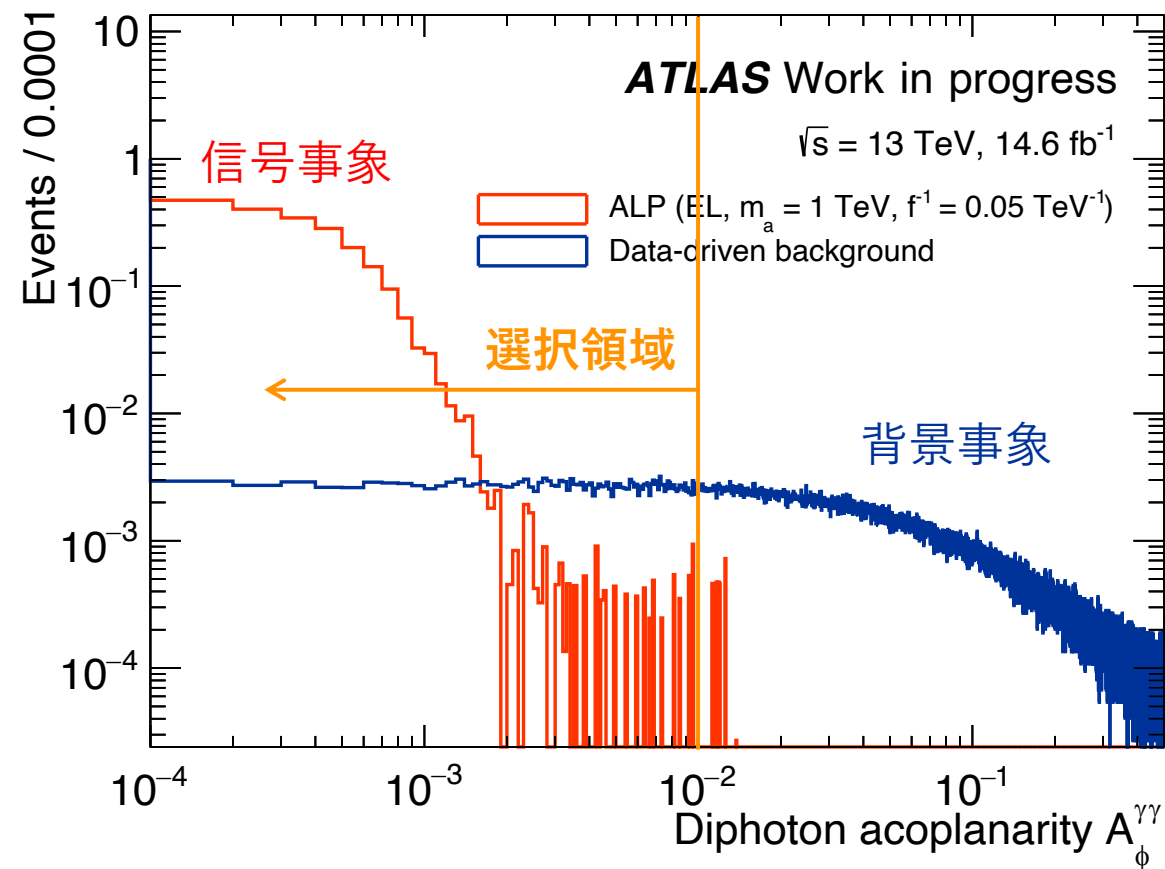
- 前方陽子検出器を利用した二光子共鳴探索
2017年の14.6 fb⁻¹のデータを使用 / 二光子トリガー: $E_T^{\gamma 1} \geq 35$ GeV, $E_T^{\gamma 2} \geq 25$ GeV
- 光子-光子散乱に寄与する質量150-1600 GeVの新粒子
Axion-like particle (ALP)にフォーカス



1. Back-to-backな二光子を選ぶ

- $p_T \geq 40$ GeVの(isolated) 光子が2つある事象のみ
- アコプラナリティカット

$$A_{\phi}^{\gamma\gamma} = 1 - \frac{|\Delta\phi_{\gamma\gamma}|}{\pi} < 0.01$$

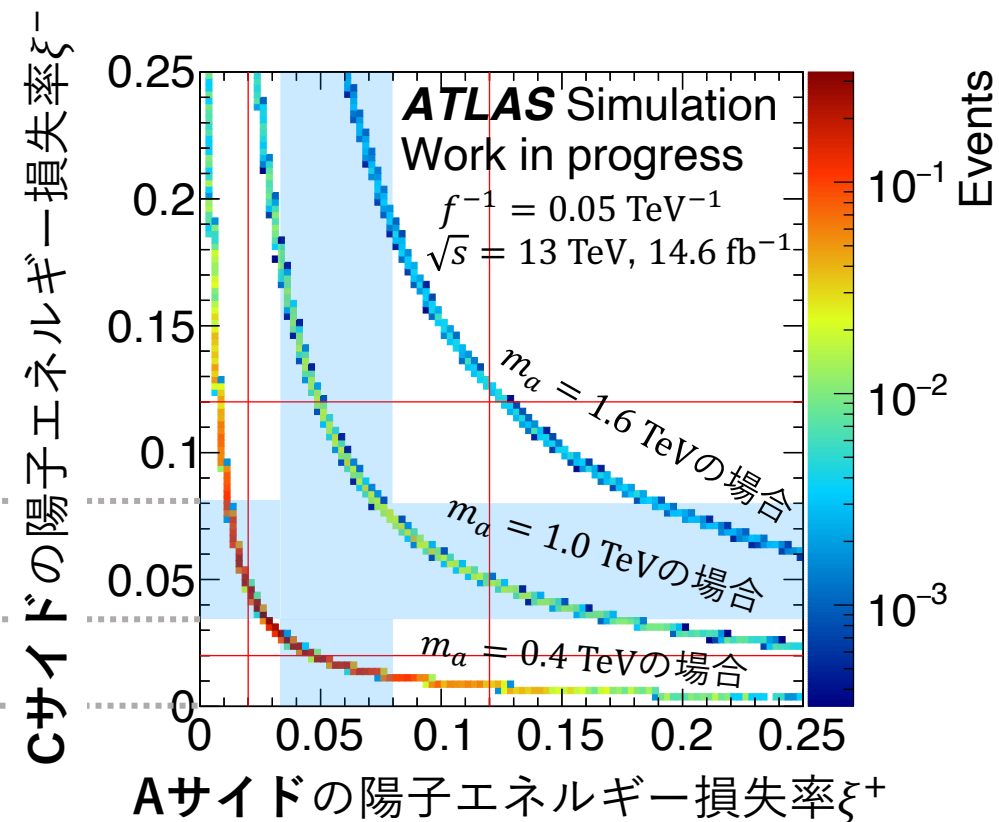
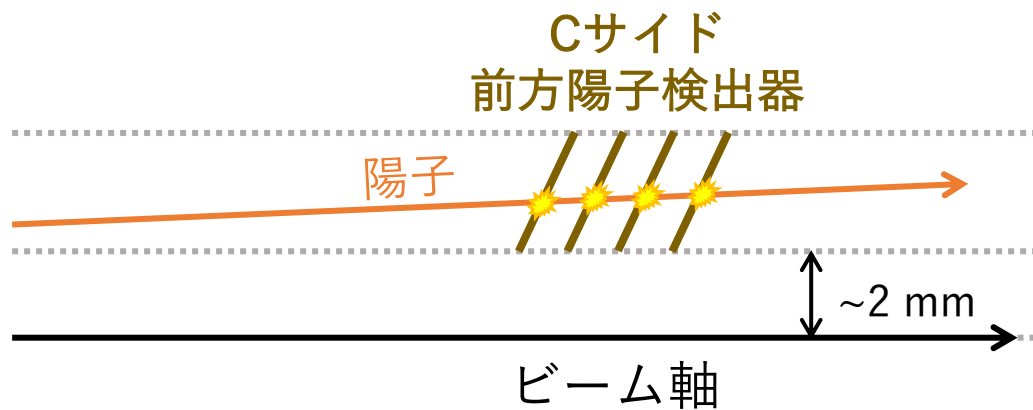


事象選択

1. Back-to-backな二光子を選ぶ

2. 前方陽子の再構成効率が高い領域に注目

- $\xi_{\gamma\gamma}^{\pm} \in [0.028, 0.093)$
- $\xi_{\text{AFP}}^{\pm} \in [0.035, 0.08)$

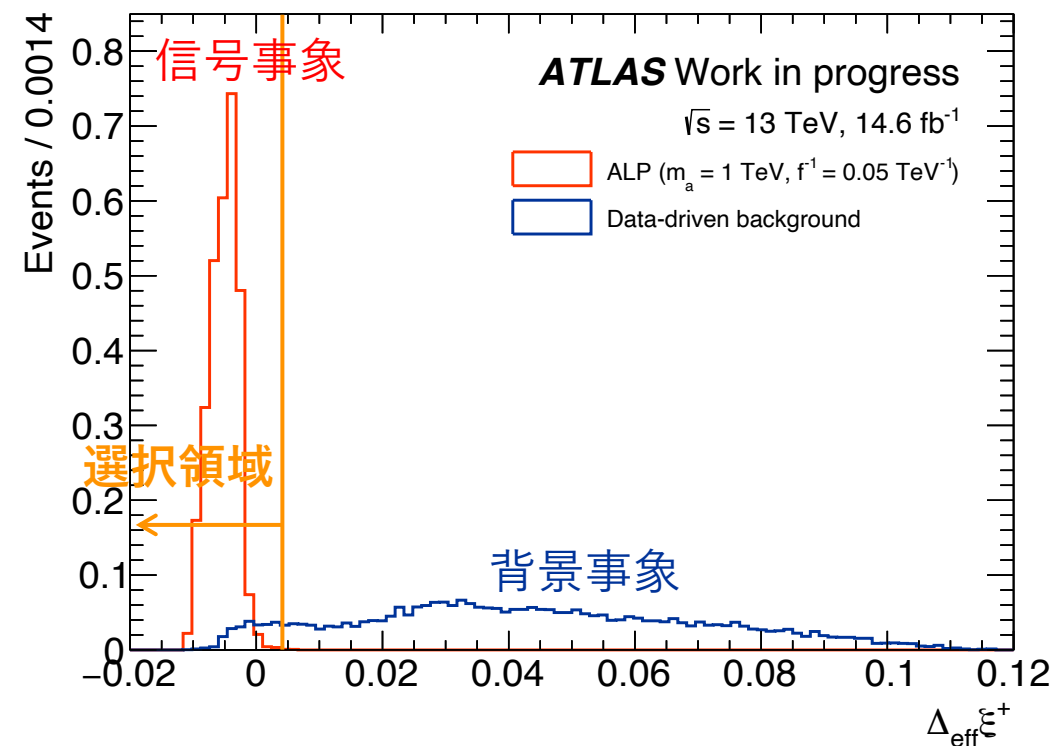


事象選択

1. Back-to-backな二光子を選ぶ
2. 前方陽子の再構成効率が高い領域に注目
3. 2通りの方法で測定した陽子エネルギー損失率の整合性を要求

- 陽子を各サイドで1つずつ選ぶ
- $\xi_{\text{proton}}^{\pm}$ と $\xi_{\gamma\gamma}^{\pm}$ のマッチングによる背景事象削減

$$\Delta_{\text{eff}}^{\xi^{\pm}} = |\xi_{\text{proton}}^{\pm} - \xi_{\gamma\gamma}^{\pm}| - 0.1\xi_{\gamma\gamma} < 0.004$$



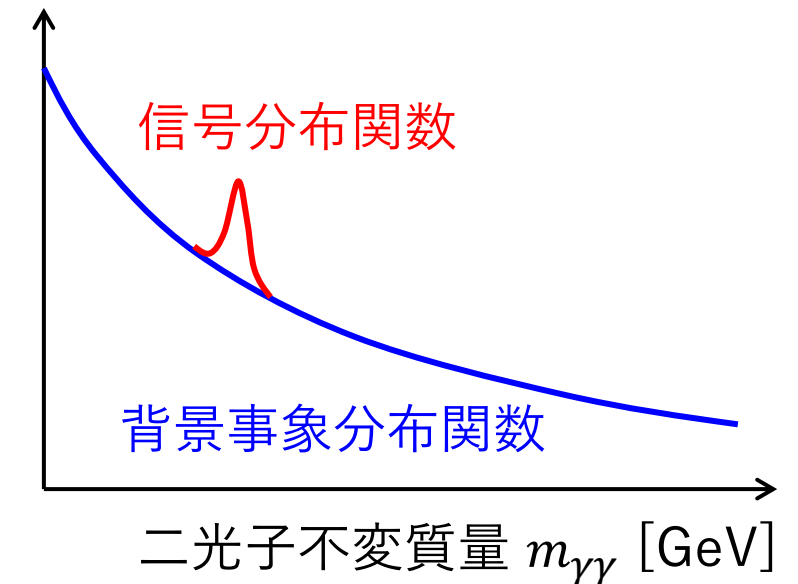
解析戦略

1. Back-to-backな二光子を選ぶ
2. 前方陽子の再構成効率が高い領域に注目
3. 2通りの方法で測定した陽子エネルギー損失率の整合性を要求
各サイドで要求

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

(≥ 1 proton tagging)

最終的に二光子質量分布を関数でフィットして
信号事象数を測定



信号分布のモデリング

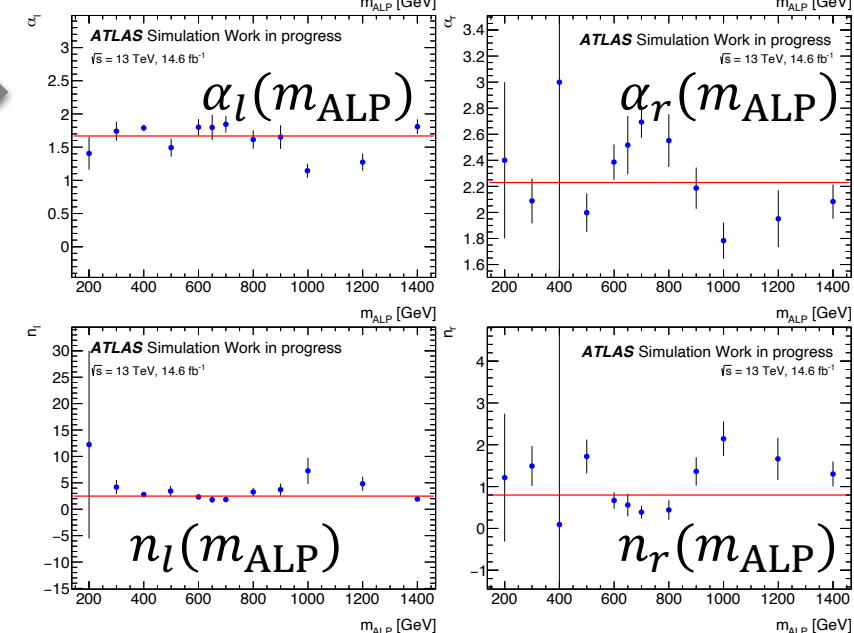
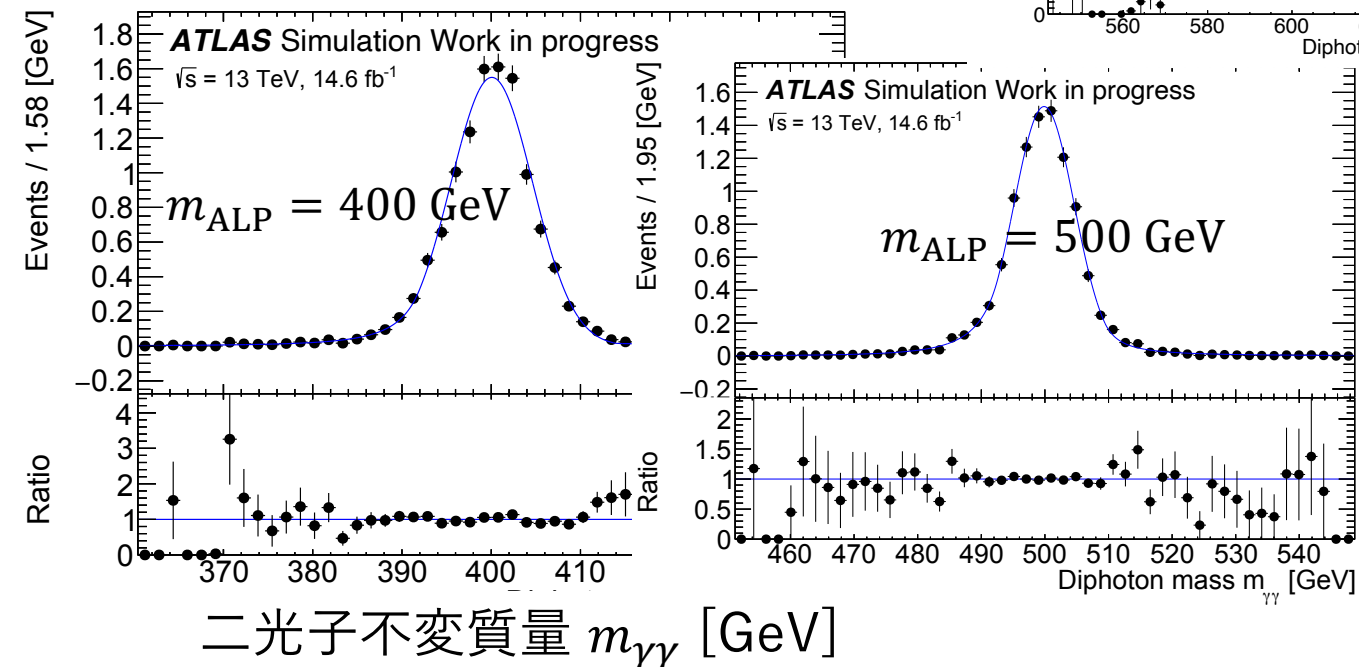
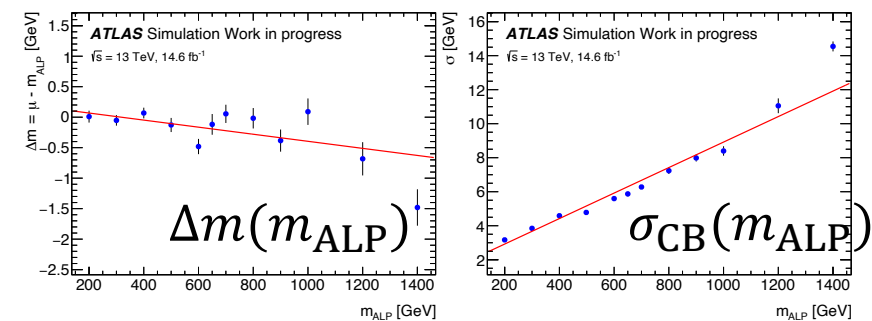
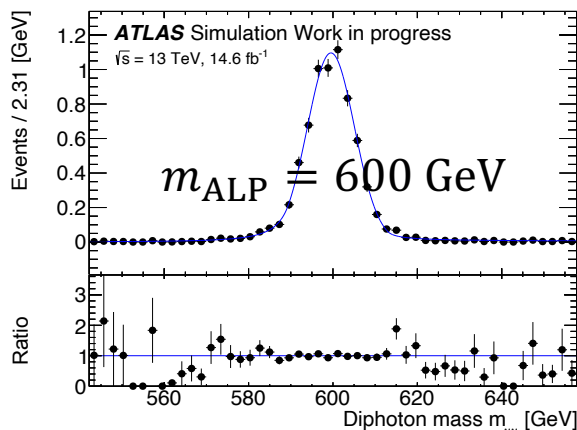
Double-sided crystal ball関数で信号分布をパラメトライズ

$$F(m_{\gamma\gamma}; \mu_{\text{CB}}, \sigma_{\text{CB}}, \alpha_{l,r}, n_{l,r})$$

任意のALP質量に対してその質量に特化した信号モデルを作る

各質量の信号MCサンプルをフィット

各パラメータの質量依存性をパラメトライズして内挿



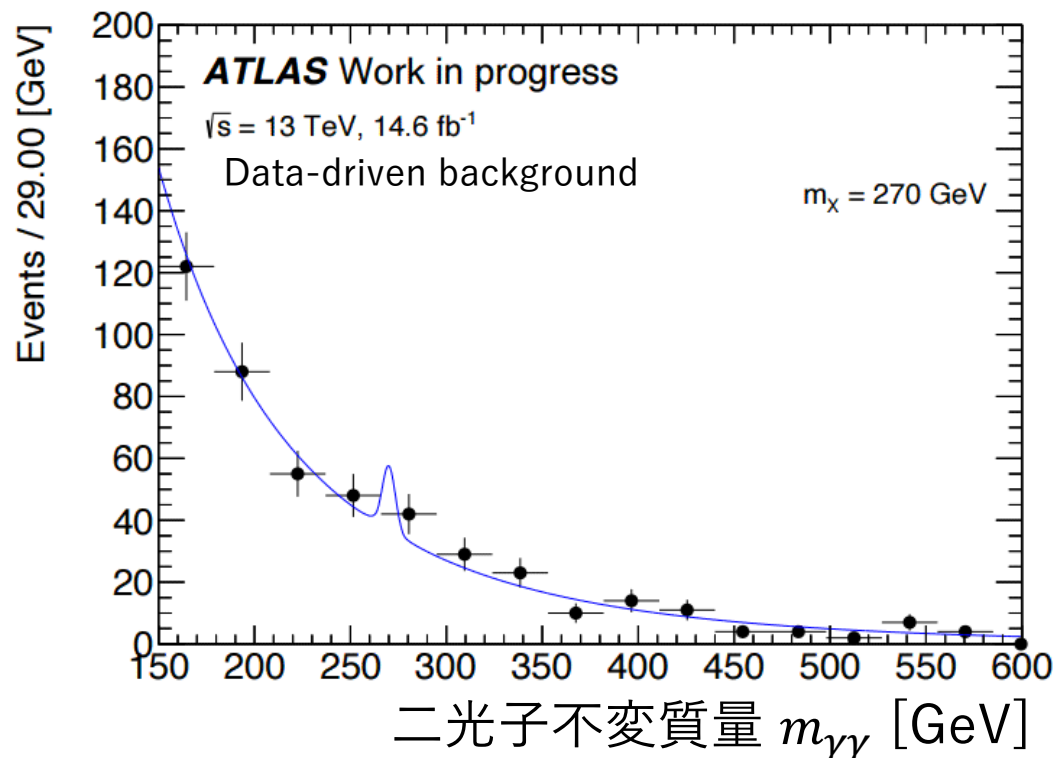
信号分布のモデリング

Double-sided crystal ball関数で信号分布をパラメトライズ

$$F(m_{\gamma\gamma}; \mu_{CB}, \sigma_{CB}, \alpha_{l,r}, n_{l,r})$$

任意の
特化し

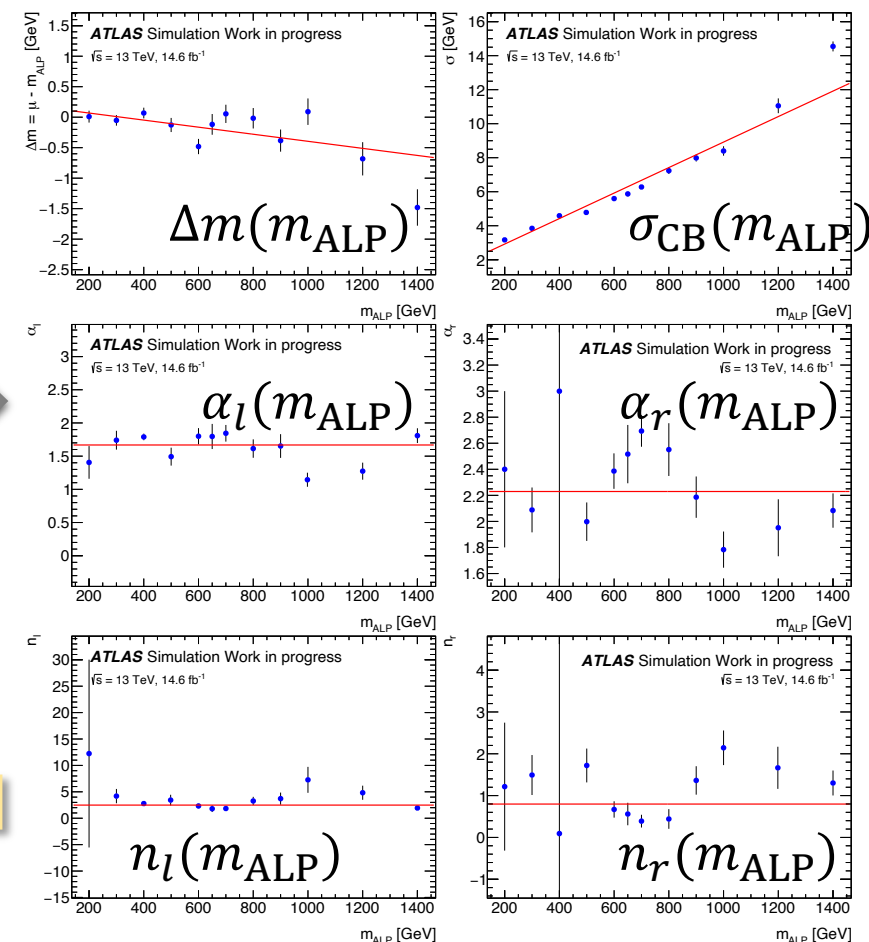
各質量



ALP質量の関数として信号モデリングしたので
 任意の質量のALPを高感度で探索できる

二光子不変質量 $m_{\gamma\gamma}$ [GeV]

各パラメータの質量依存性を
 パラメトライズして内挿



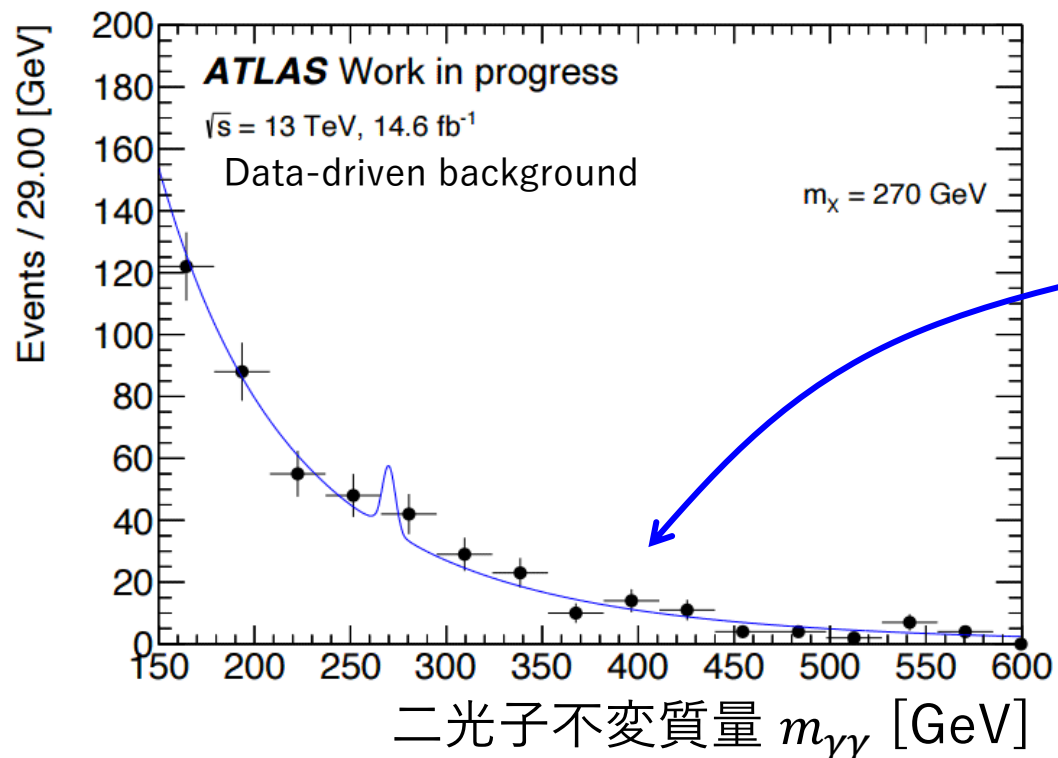
信号分布のモデリング

Double-sided crystal ball関数で信号分布をパラメトライズ

$$F(m_{\gamma\gamma}; \mu_{CB}, \sigma_{CB}, \alpha_{l,r}, n_{l,r})$$

任意の
特化し

各質量



信号+背景事象(BG)分布関数を
フィットするため(s+bフィット)
信号モデルも背景事象モデルも
パラメータは最後に決まる
(各ALP質量に対して)



しかし予めBG関数の

- 妥当性
 - 不定性
 - パラメータの初期値
- は確認・決定しておく必要がある

ALP質量の関数として信号モデリングしたので
任意の質量のALPを高感度で探索できる

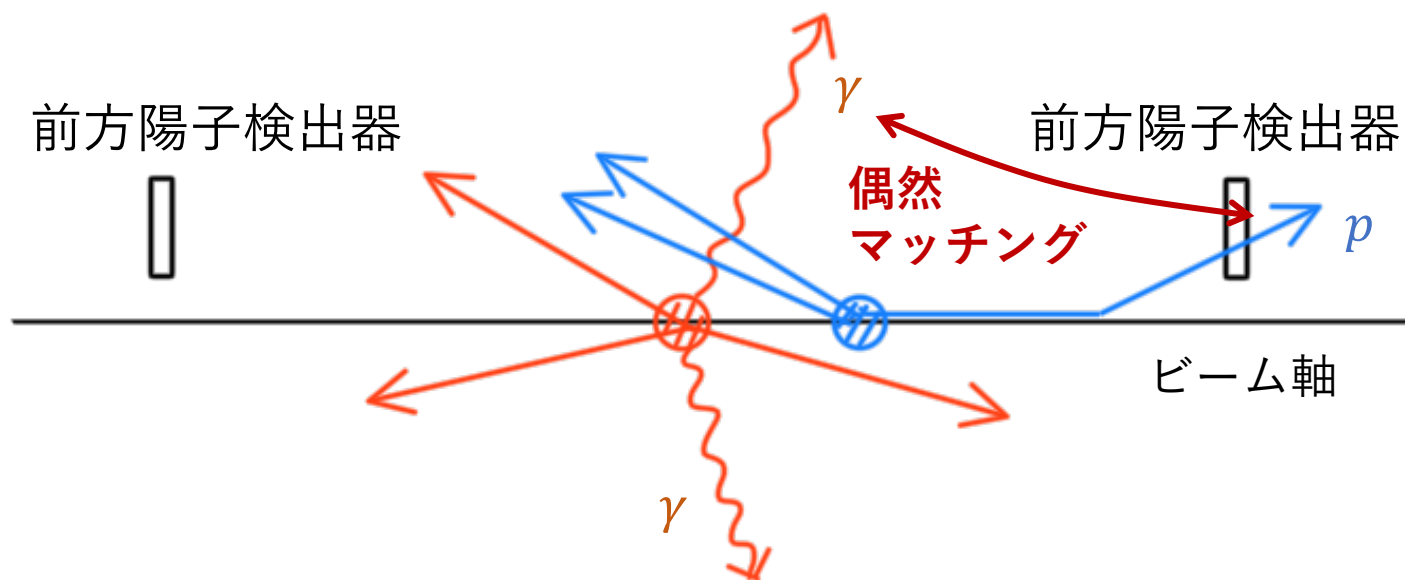
二光子不変質量 $m_{\gamma\gamma}$ [GeV]

背景事象モデルの評価方針

二光子と陽子に相関がない事象(**組合せ背景事象**)が支配的

例

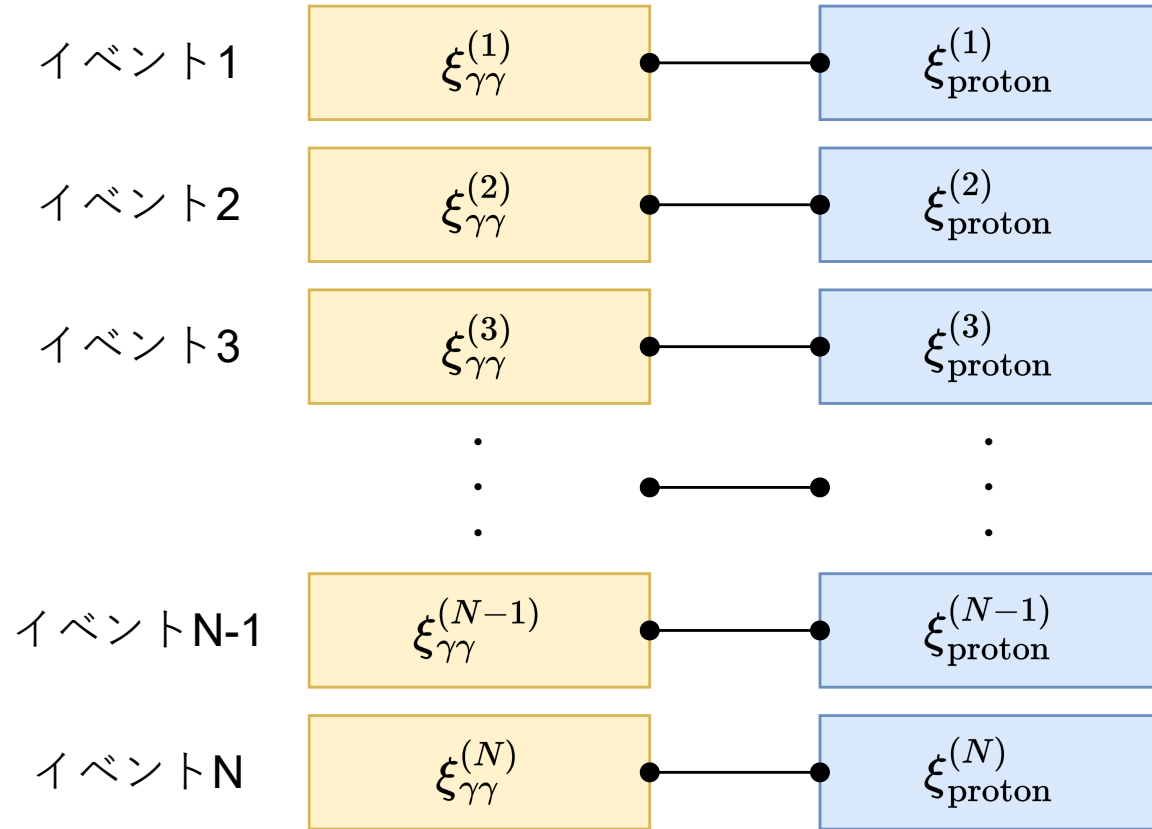
背景事象由来の二光子生成と
パイルアップ陽子(別のバーテックス由来の陽子)



- 二光子として観測されるプロセス(フェイク含む)は様々
 - 検出器の実機応答を含んだ方が良い
- **データドリブンな評価が望ましい**

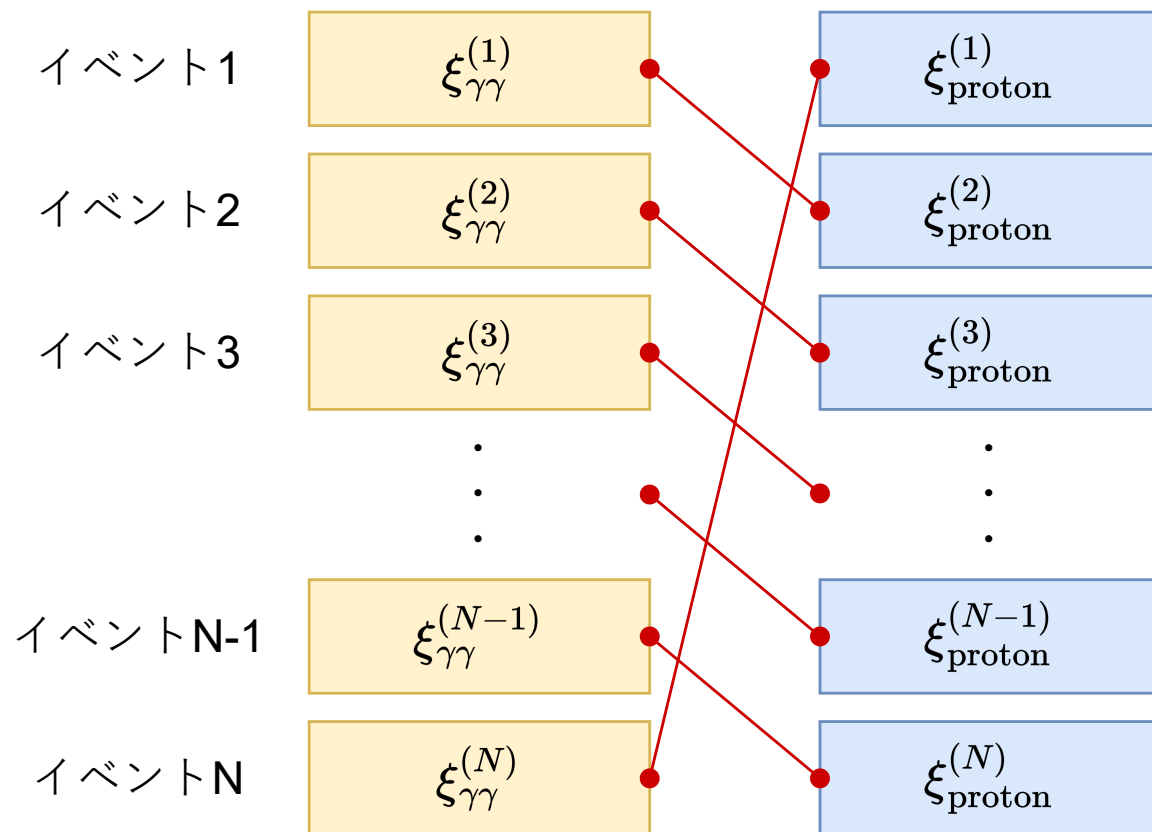
背景事象のサンプル

イベント毎に光子と陽子の測定値が記録されたデータ



背景事象のサンプル

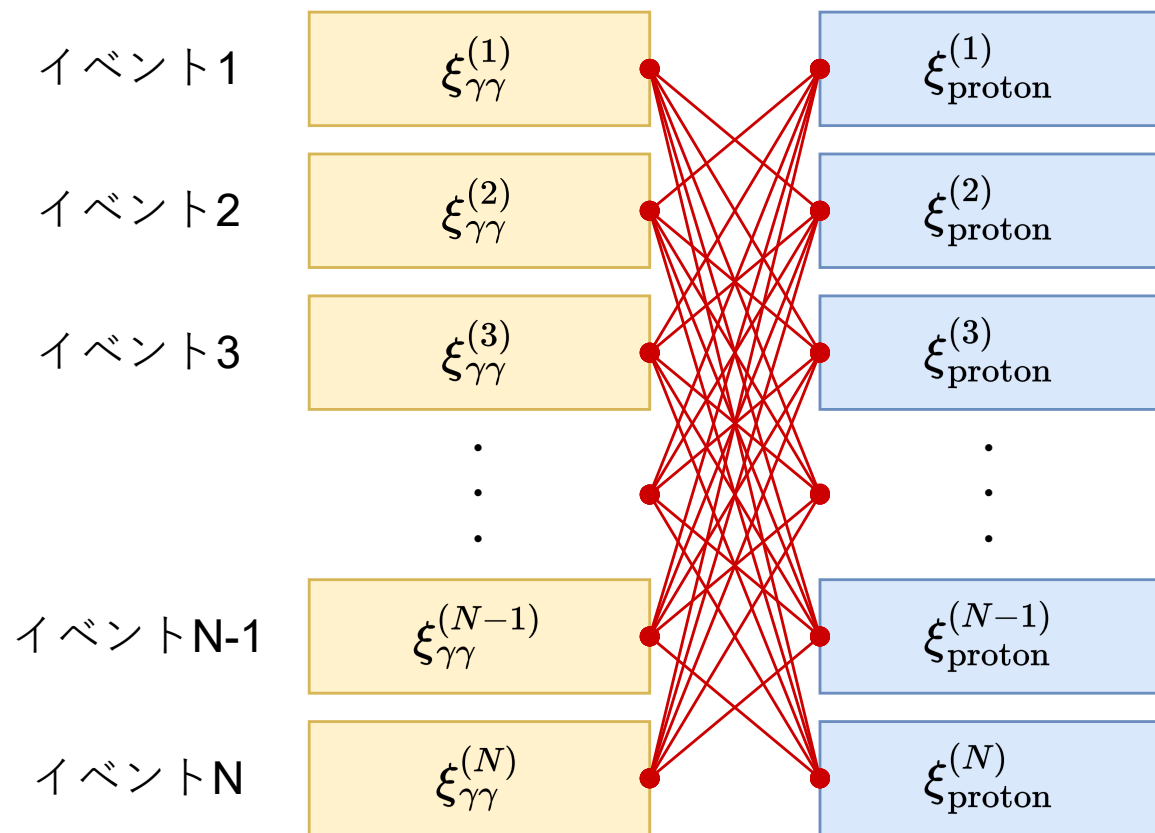
イベント毎に光子と陽子の測定値が記録されたデータ



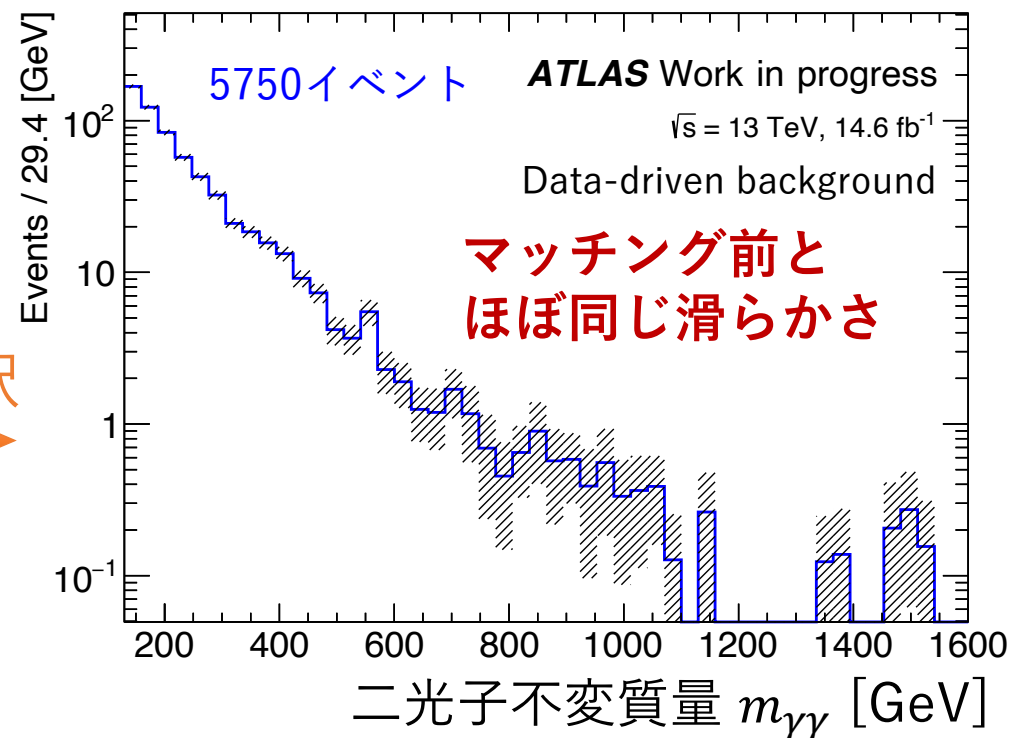
陽子の再割り当てにより二光子-陽子間に相関がない状態を再現

背景事象のサンプル

イベント毎に光子と陽子の測定値が記録されたデータ



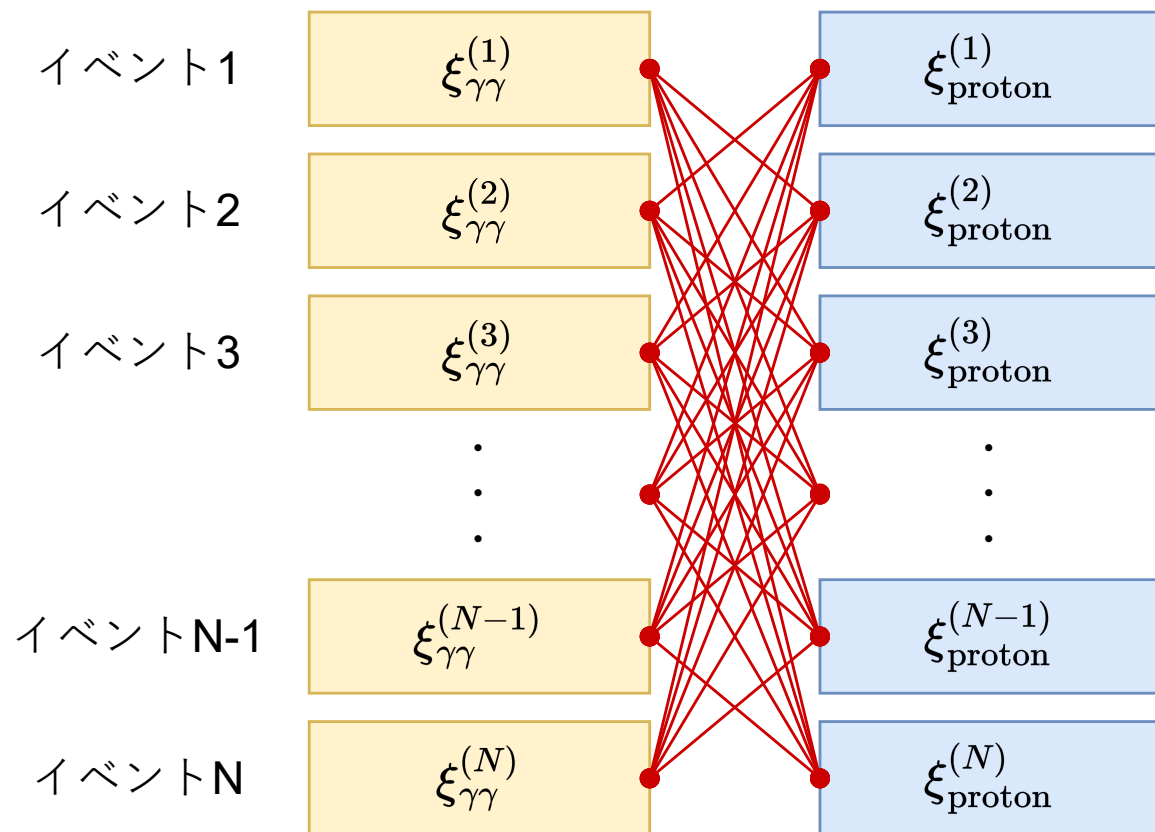
事象選択



可能な割り当て方を全て使ってサイズを拡大

背景事象のサンプル

イベント毎に光子と陽子の測定値が記録されたデータ



可能な割り当て方を全て使ってサイズを拡大

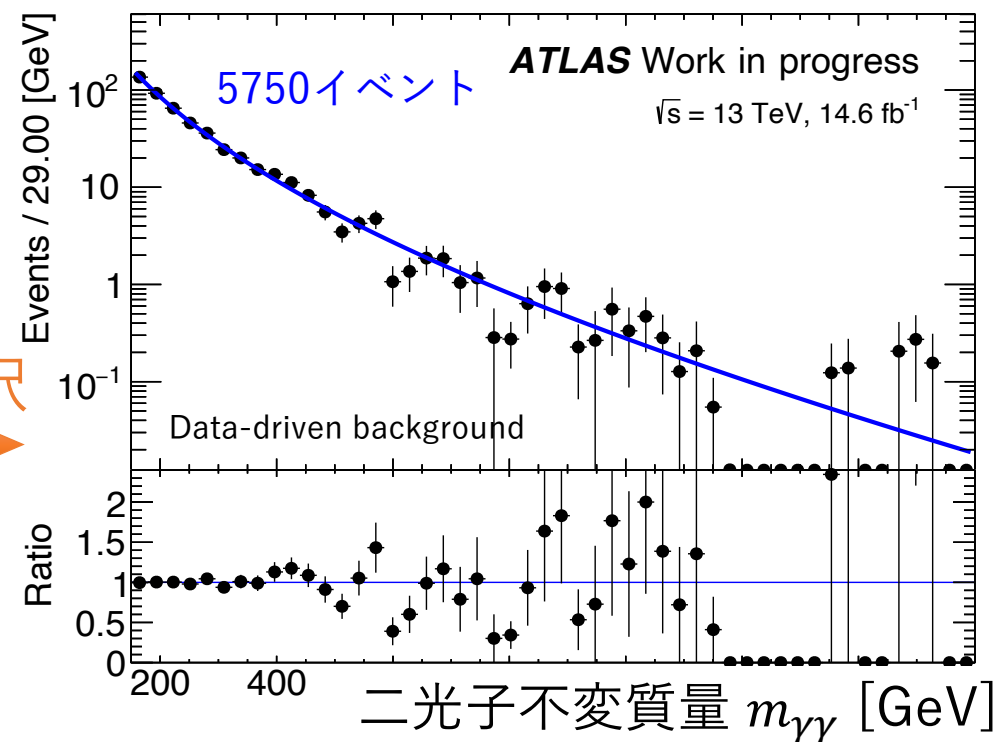
事象選択



BG関数

$$f(x; a, \alpha_0) = (1 - x^{1/3})^a \cdot x^{\alpha_0}$$

で妥当なフィットができる

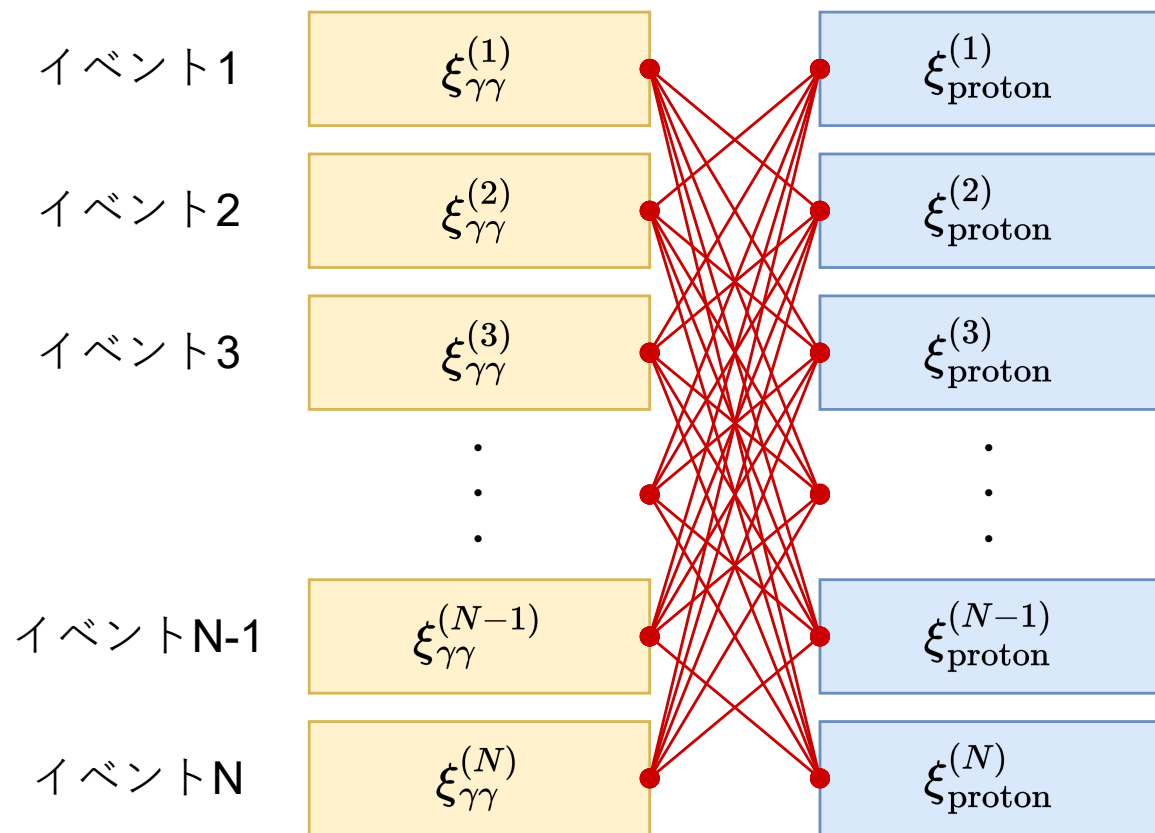


これを使って、BG関数の

- **パラメータの初期値を決定**
- 妥当性を評価
- 不定性を評価

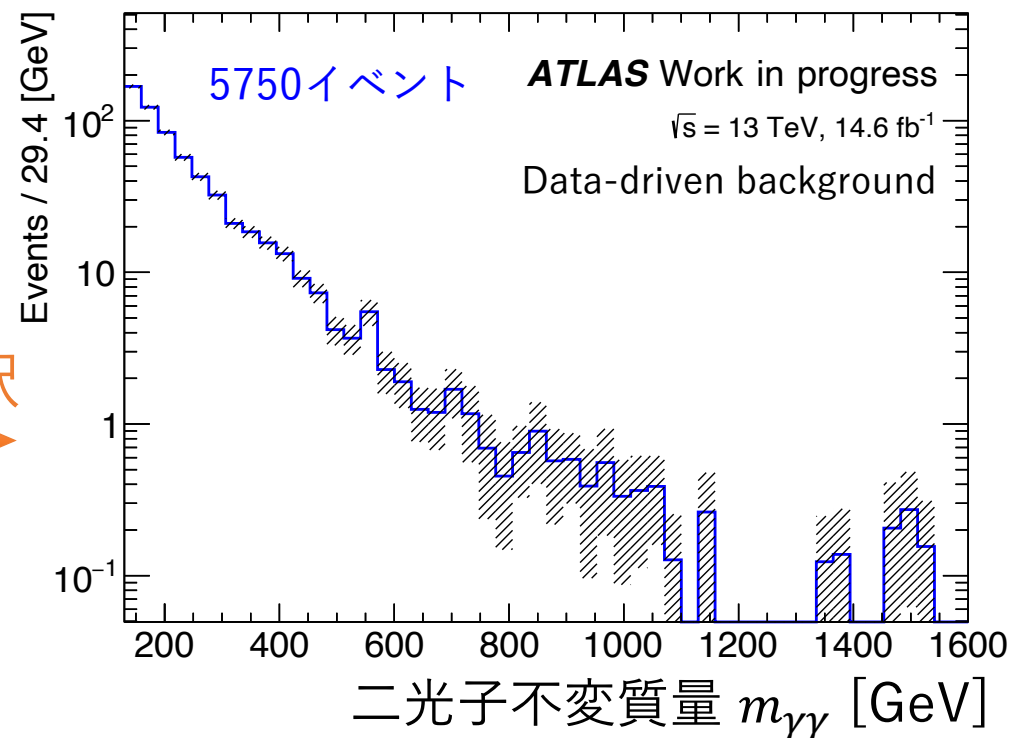
背景事象のサンプル

イベント毎に光子と陽子の測定値が記録されたデータ



可能な割り当て方を全て使ってサイズを拡大

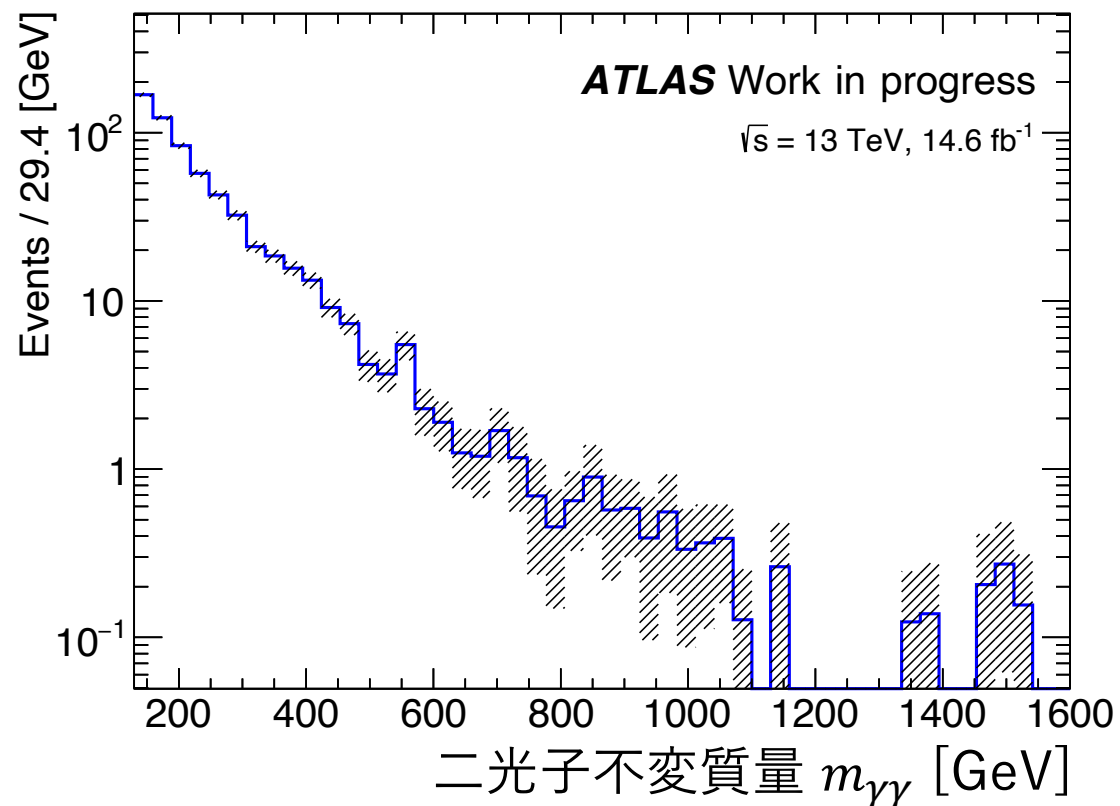
事象選択



これを使って、BG関数の

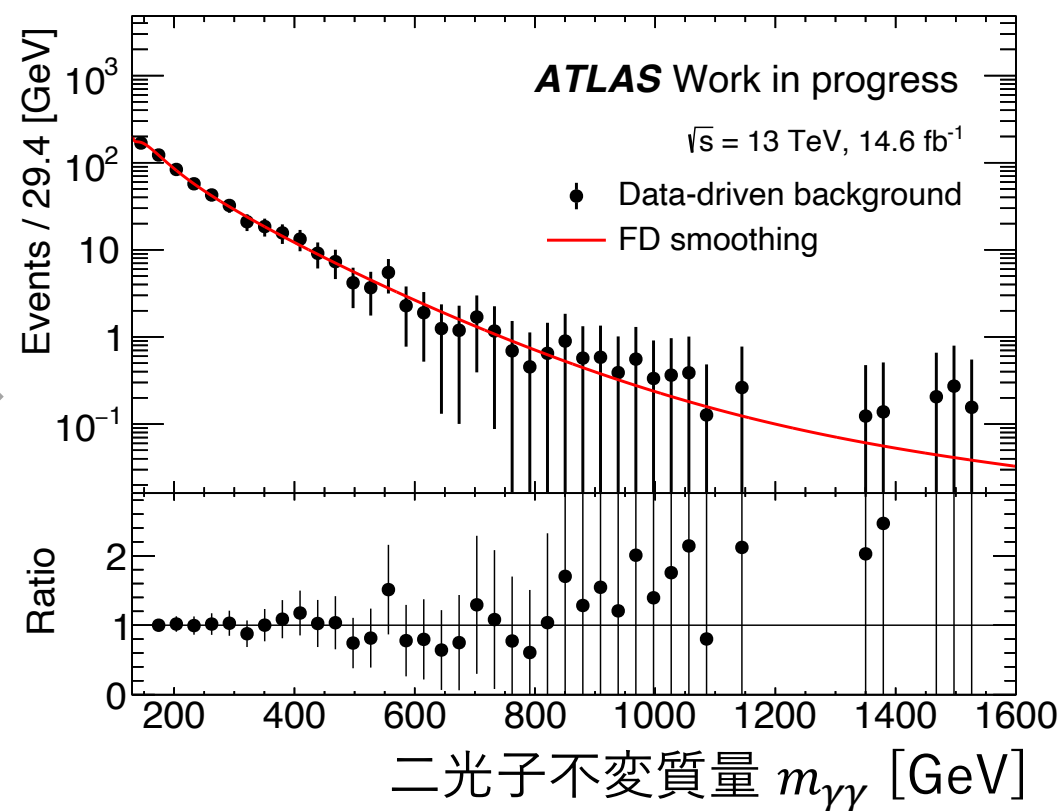
- パラメータの初期値を決定
- 妥当性を評価
- **不定性を評価**

データドリブンBG分布

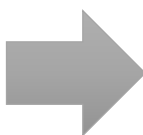
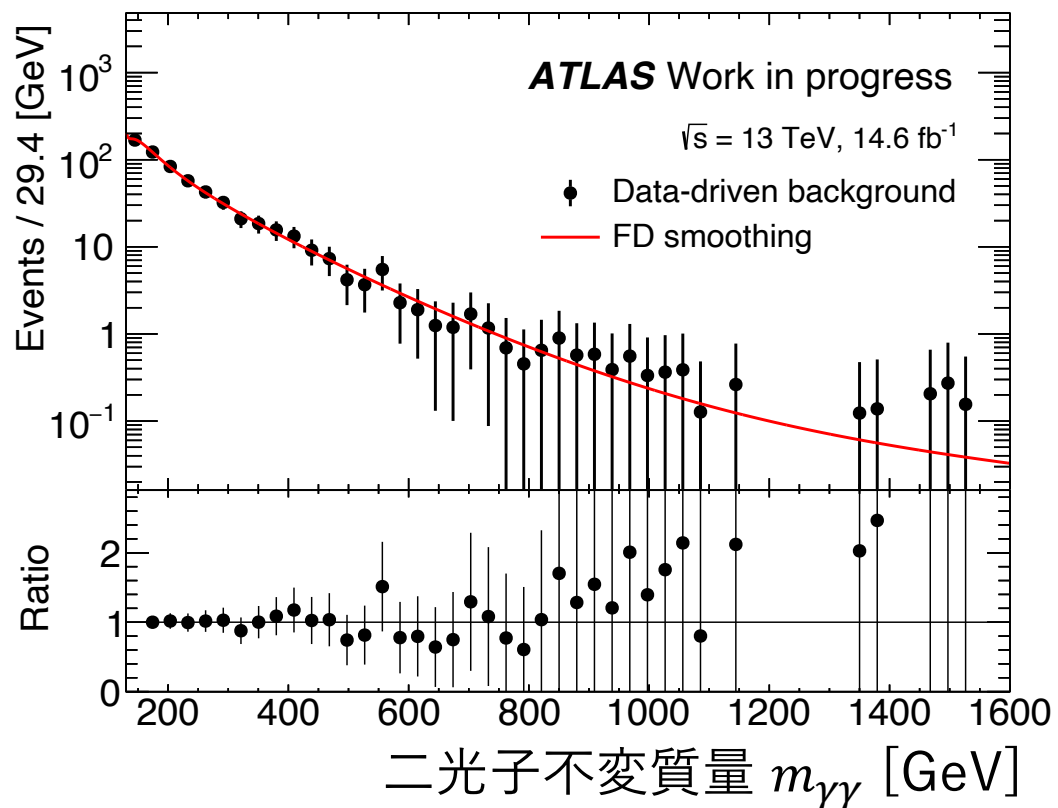


系統誤差を統計誤差と区別するために
 Functional Decompositionでスムージング

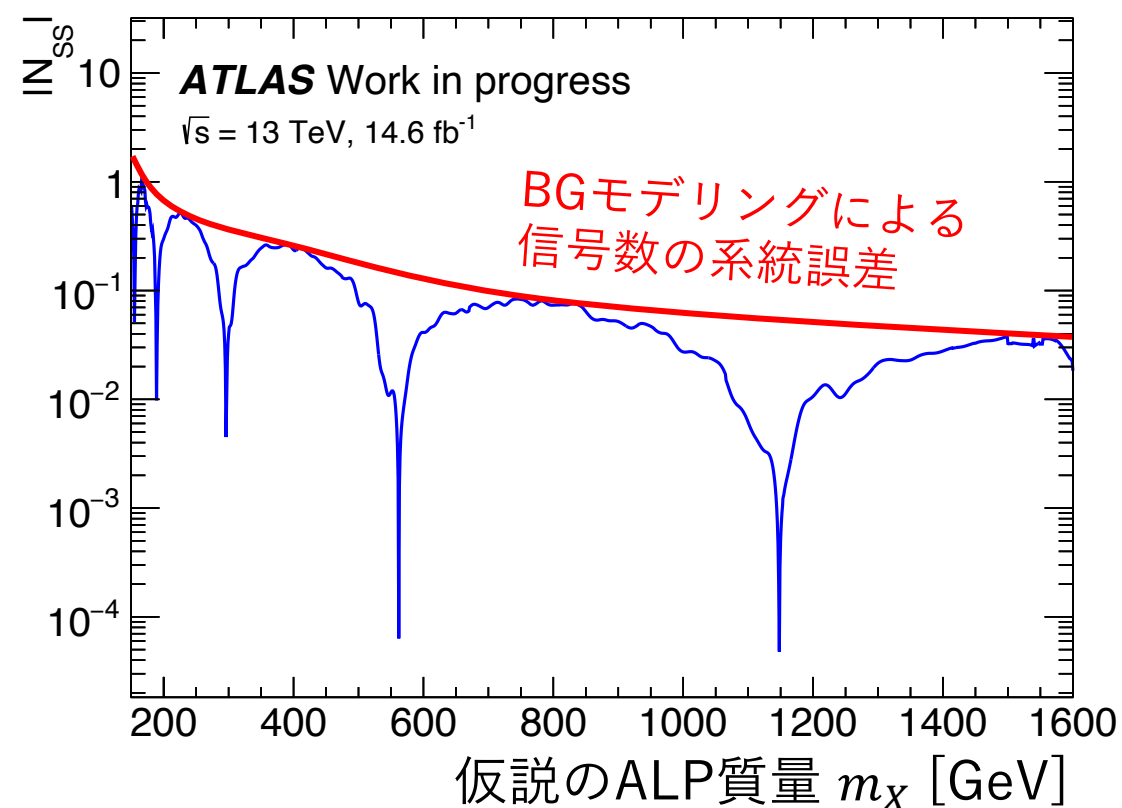
arXiv:1805.04536



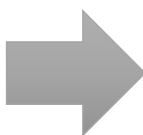
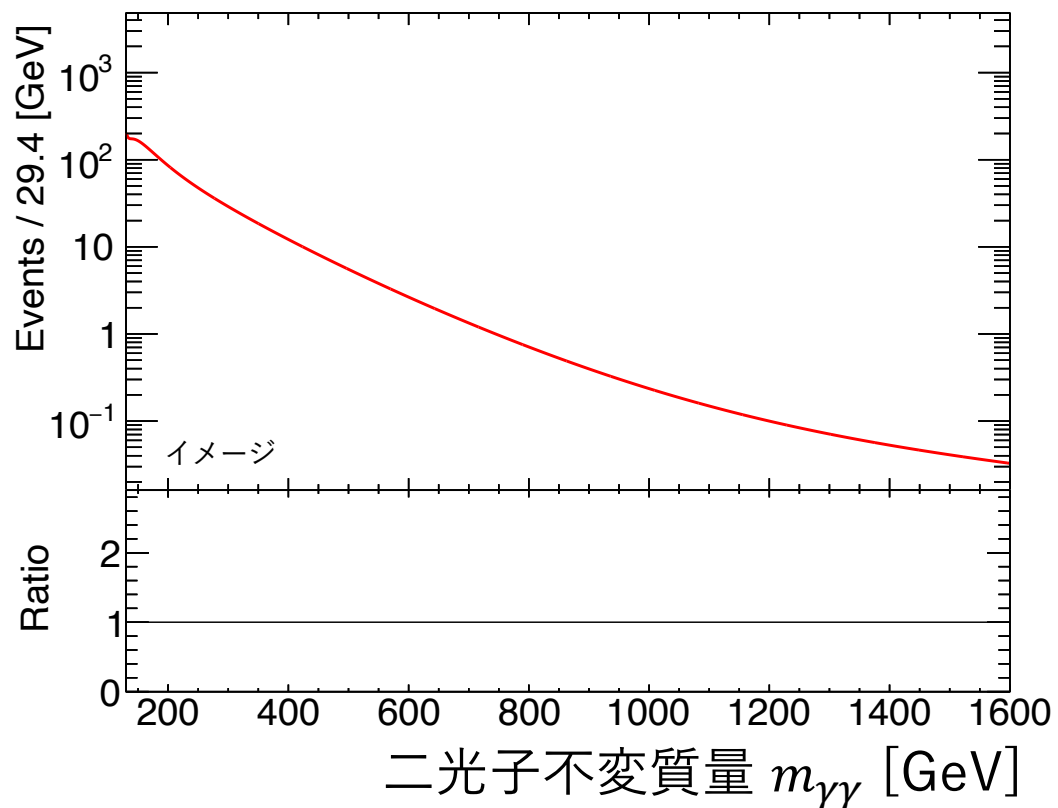
スムーズなBG分布に従う
高統計の擬データを作成



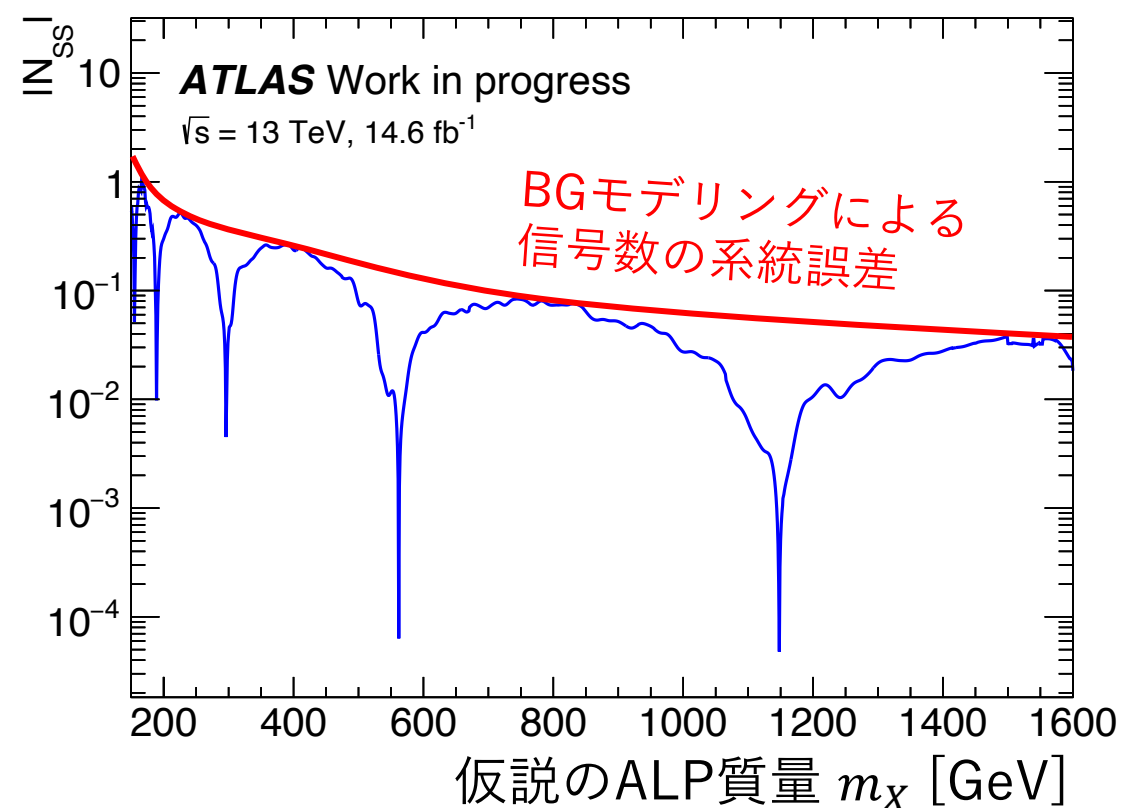
仮定するALP質量を変えながらs+bフィット
して信号数 (spurious signal) を測定



スムーズなBG分布に従う
高統計の擬データを作成

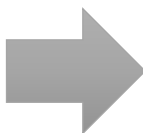
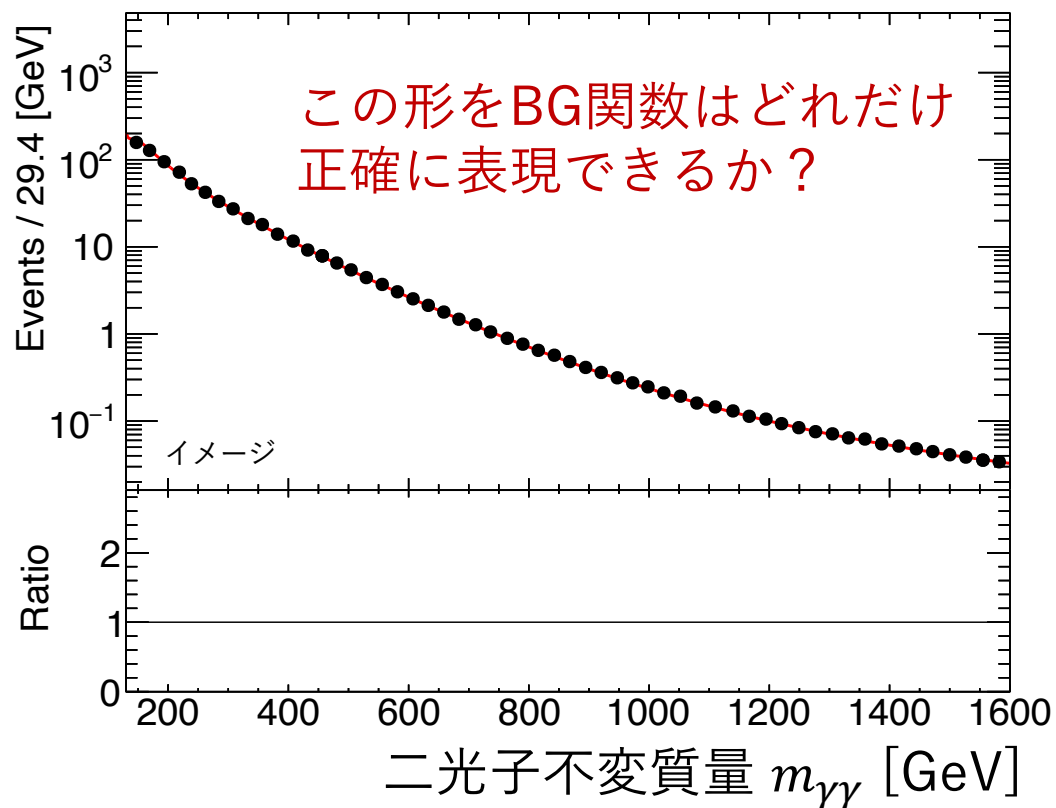


仮定するALP質量を変えながらs+bフィット
して信号数 (spurious signal) を測定

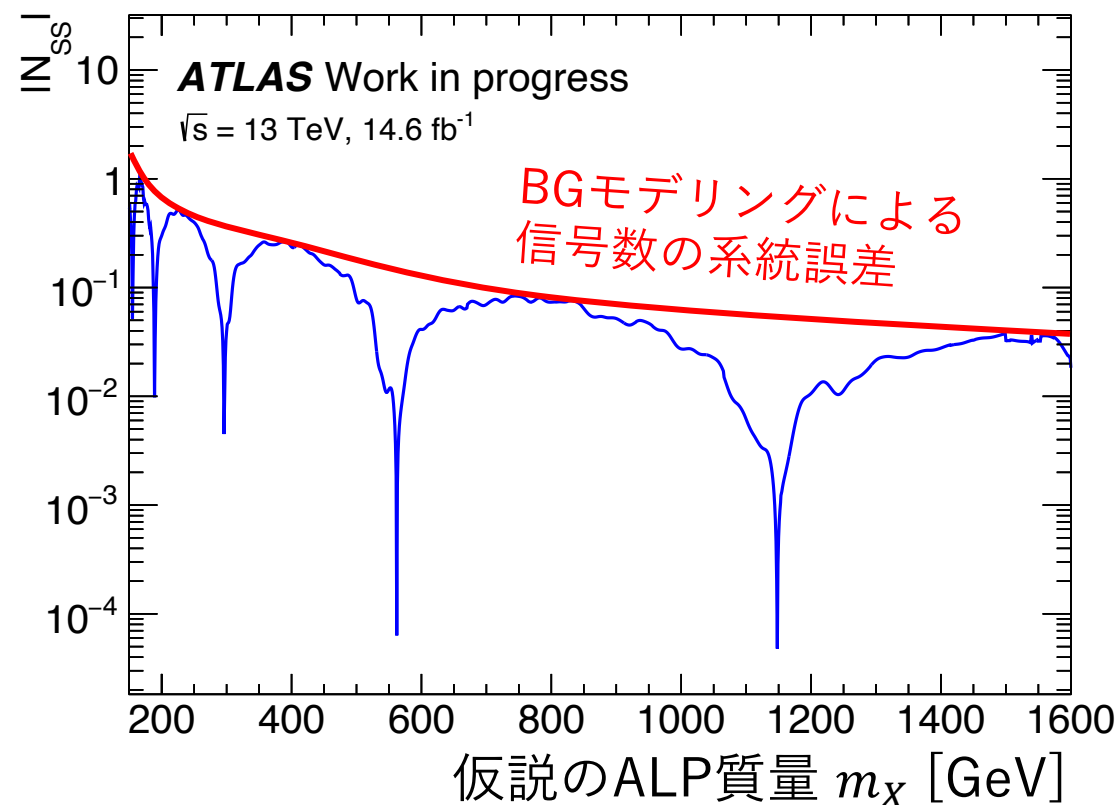


背景事象モデリングの系統誤差

スムーズなBG分布に従う
高統計の擬データを作成

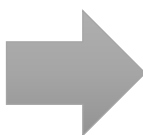
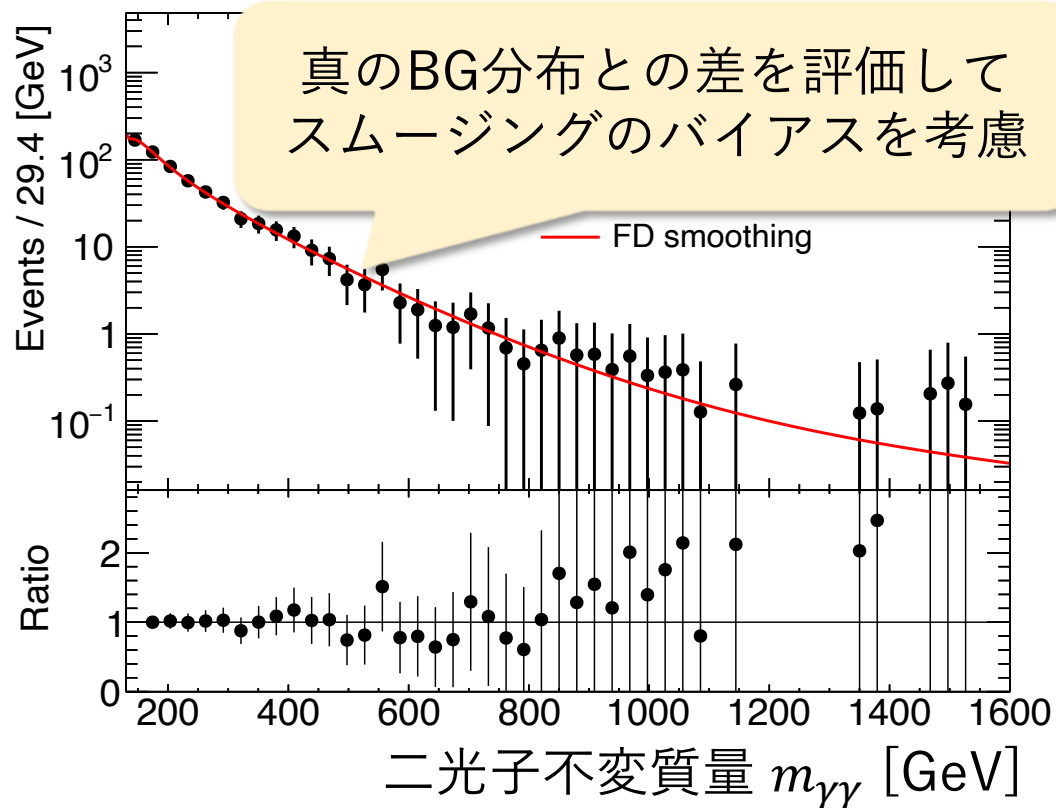


仮定するALP質量を変えながらs+bフィット
して信号数 (spurious signal) を測定

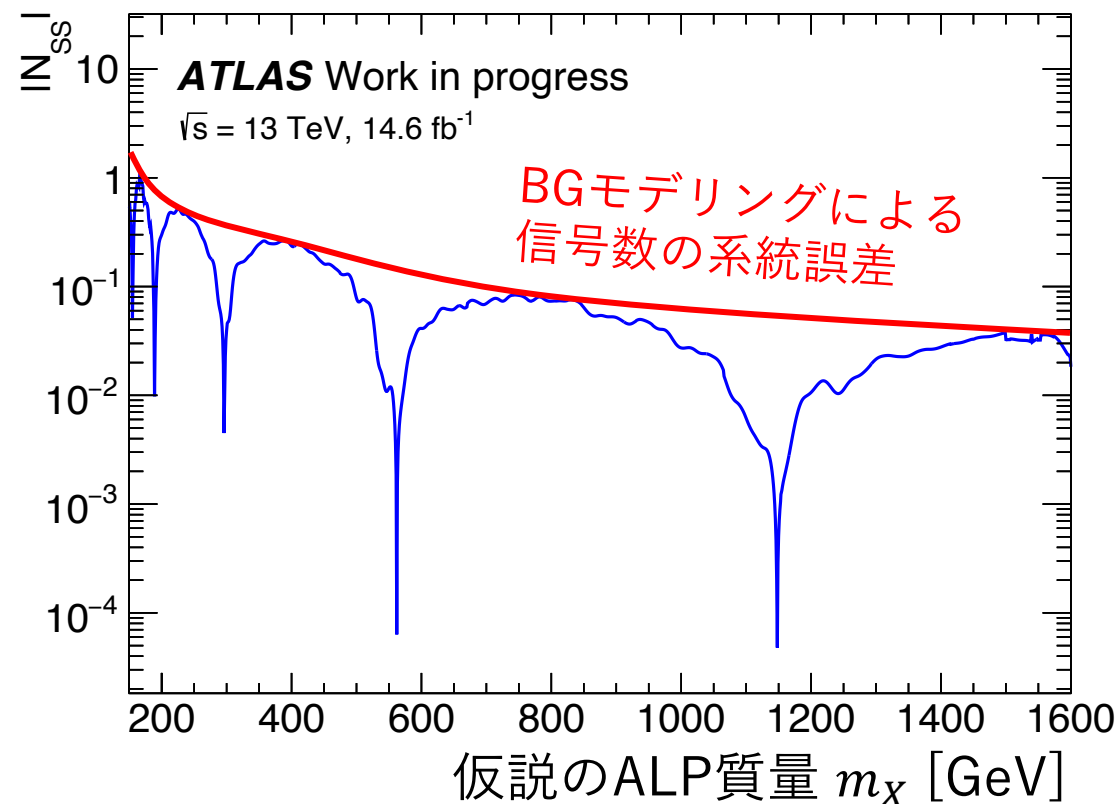


背景事象モデリングの系統誤差

スムーズなBG分布に従う
高統計の擬データを作成



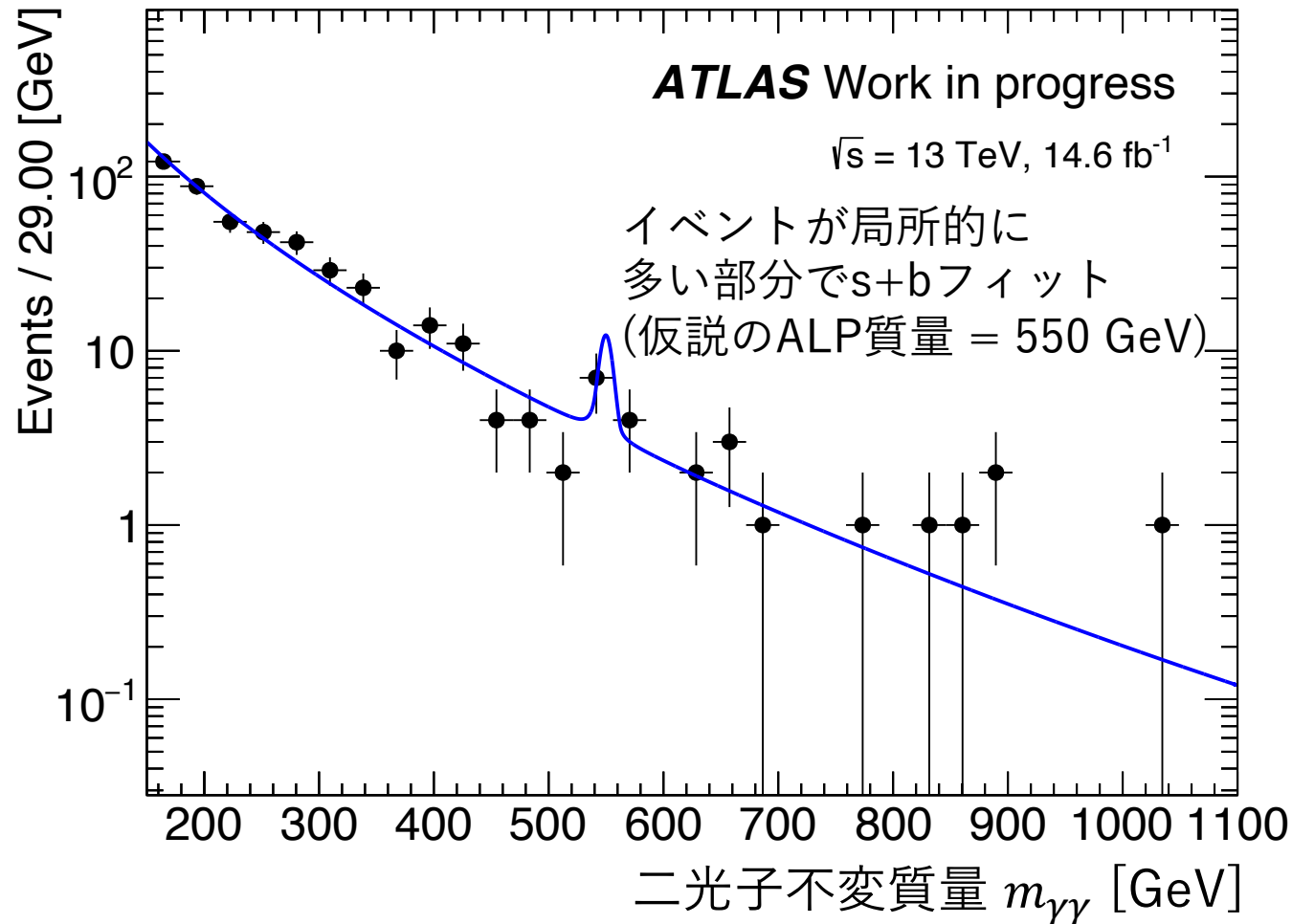
仮定するALP質量を変えながらs+bフィット
して信号数 (spurious signal) を測定



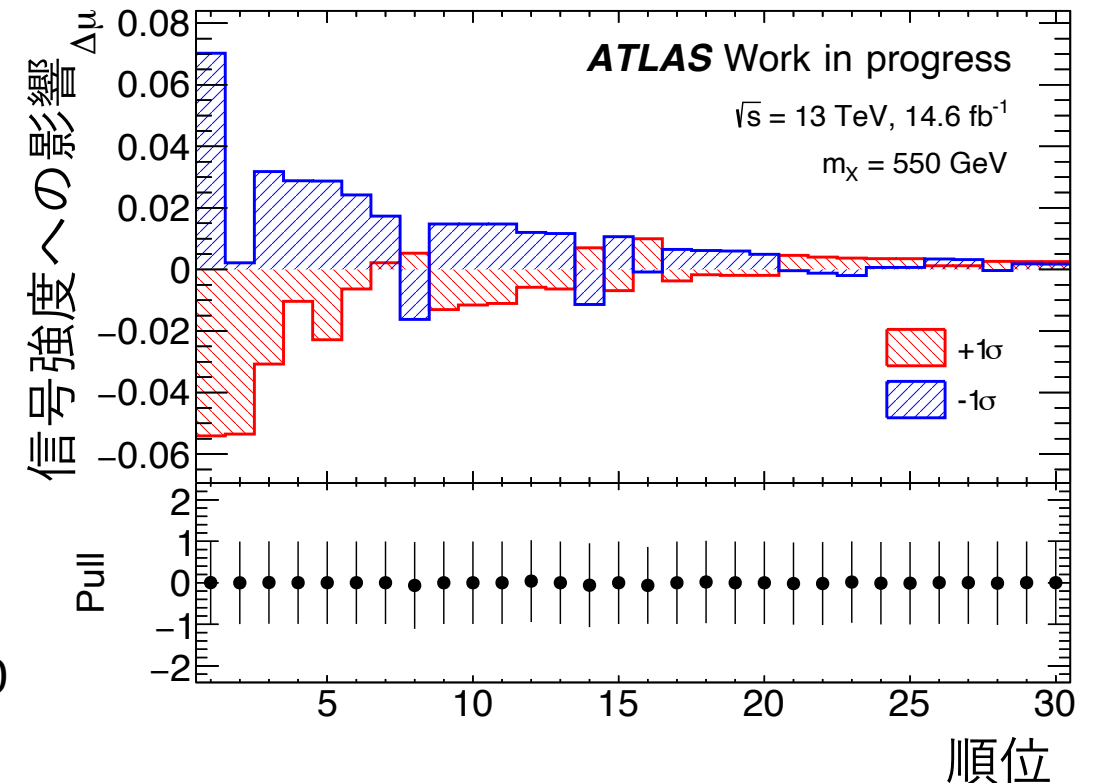
信号強度の誤差

データと同じサイズのBGサンプルを使って
 信号強度 μ に対する各系統誤差の影響をテスト

$$\left(\mu = \frac{\text{観測信号数}}{f^{-1} = 0.05 \text{ に対応する信号数}} \right)$$



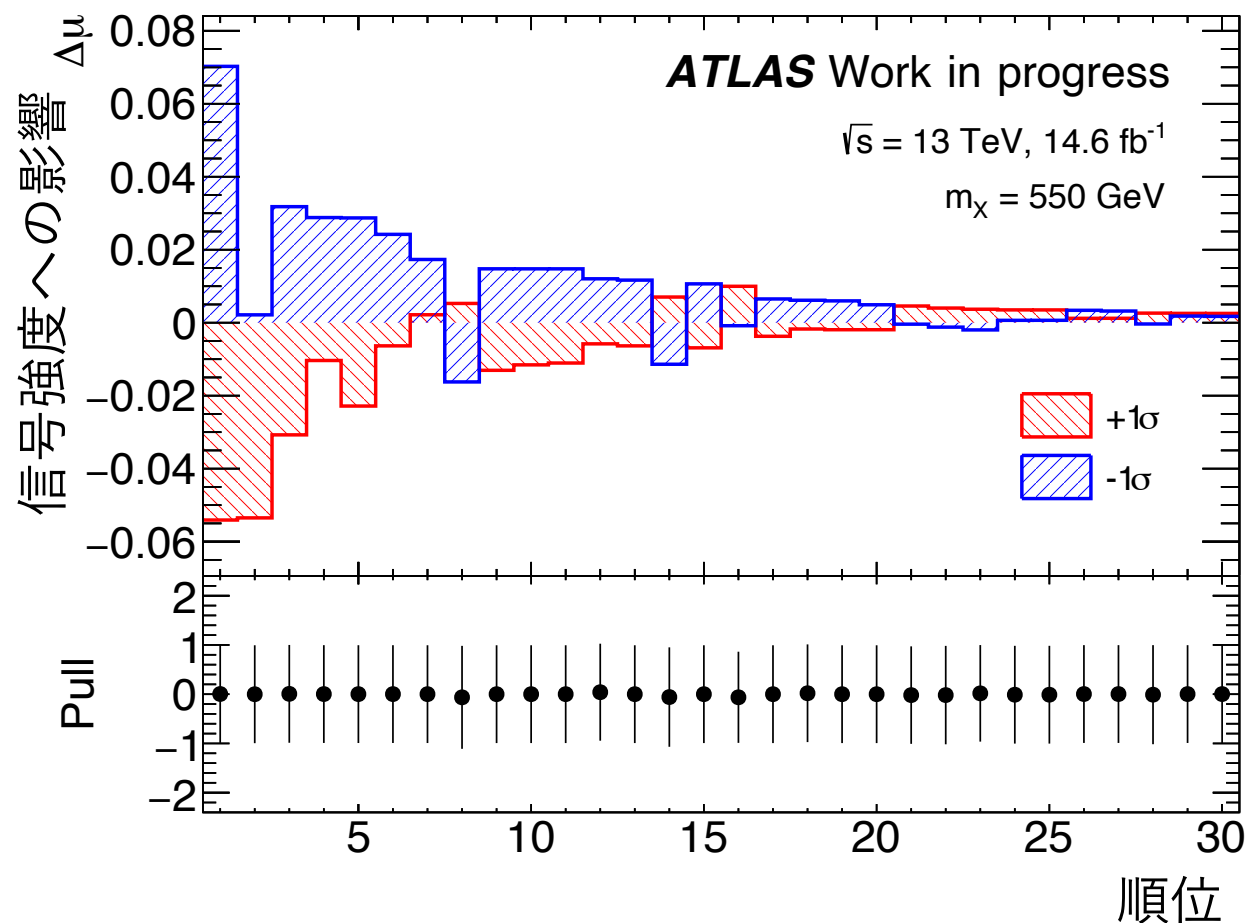
各系統誤差に対応するフィットパラメータを
 $\pm 1\sigma$ ずらして固定してフィットし直す



信号強度の誤差

データと同じサイズのBGサンプルを使って
 信号強度 μ に対する各系統誤差の影響をテスト

$$\left(\mu = \frac{\text{観測信号数}}{f^{-1} = 0.05 \text{ TeV}^{-1} \text{ に対応する信号数}} \right)$$



主要な誤差(ランキング)

1位	前方陽子検出器のアライメントの不定性に起因する信号検出効率の誤差
2位	s+bフィット操作の誤差
3位	BGモデリングの誤差
4位	信号効率モデリングの誤差
5位	信号シミュレーションの理論誤差

全系統誤差 = 0.09

一方、統計誤差 = 0.36



統計誤差が支配的

感度評価と棄却域推定

擬データを生成しs+bフィットして評価

- 感度評価 ($f^{-1} = 0.05 \text{ TeV}^{-1}$ の場合)

検定統計量:

$$q_0 = \begin{cases} -2 \ln \lambda(0) & \hat{\mu} \geq 0 \\ 0 & \hat{\mu} < 0 \end{cases} \quad \lambda(\mu) = \frac{L(\mu, \hat{\theta})}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})}$$

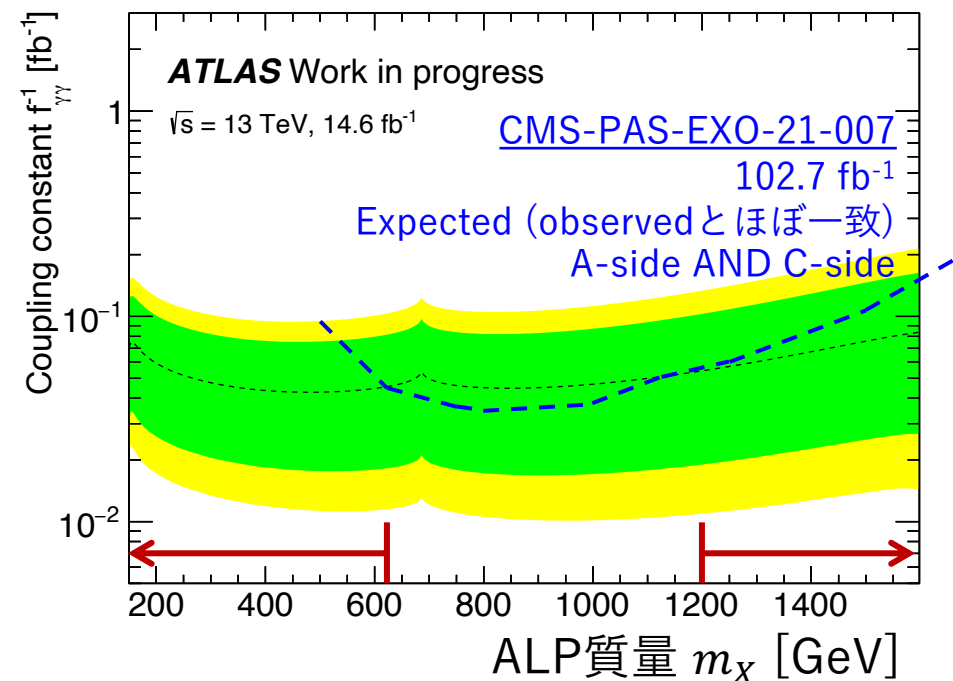
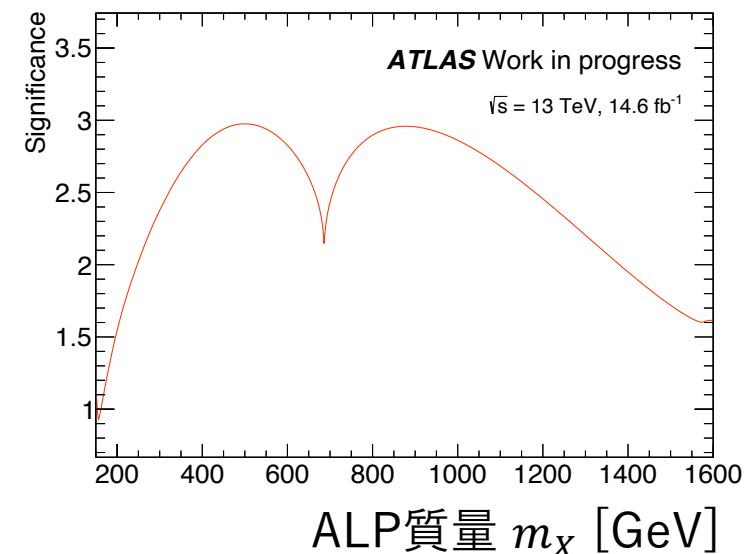
- 棄却域推定

検定統計量:

$$\tilde{q}_\mu = \begin{cases} -2 \ln \frac{L(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{L(0, \hat{\theta}(0))} & \hat{\mu} < 0 \\ -2 \ln \frac{L(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})} & 0 \leq \hat{\mu} \leq \mu \\ 0 & \hat{\mu} > \mu \end{cases}$$

7分の1のデータ量にも関わらず $< 600 \text{ GeV}$ と $> 1200 \text{ GeV}$ ではCMSよりも棄却できる

- 事象選択条件の違い
- 信号モデリング手法



まとめと展望

まとめ

- LHC-ATLAS実験におけるRun2データ(14.6 fb⁻¹)
- 二光子系と前方陽子の力学的変数の整合性を要求して二光子共鳴探索 (ALP)
- データのみを使って精度の良いBGモデリングを実現
- 統計誤差が支配的
- 感度評価と棄却域推定 → 独自の解析手法による結果

展望

- Unblindして結果を考察した後にリリース
- Run3データと新しい前方陽子検出器で結果を更新
- 前方陽子検出器を使った別の探索にも応用