

CERN Online Summer Student Programme 2021 参加報告

岡山大学大学院自然科学研究科 素粒子物理学研究室

北川 芙西音

kitagawa0913@s.okayama-u.ac.jp

2021年(令和3年)11月1日

1 はじめに

2021年6月28日から8月20日までの8週間にわたり、「CERN Online Summer Student Programme 2021」に参加した。世界各国から集まった学生がCERN(欧州原子核研究機構)で行われている実験・研究のグループに分かれ、各グループのsupervisorのもとでそれぞれの研究プロジェクトに取り組んだ。2021年は新型コロナウイルス感染症の拡大の影響を受けて、完全オンラインでの開催となった。ここではプログラムや活動内容について報告する。

2 活動内容

2.1 講義

プログラム前半の5週間は、原子核や統計解析、加速器、宇宙論など様々な視点から最先端の素粒子宇宙物理学の基礎を学んだ。粒子の衝突反応や再構成の仕組みなど、素朴な疑問から発展的な内容まで解説され、理解を深めることができた。また、印象に残った講義として、Future High-Energy Collider Projectsがある。LHCのエネルギーを大きく凌ぐ重心系エネルギー100 TeV、円周100 kmの陽子-陽子衝突型加速器(FCC)をはじめとする次期加速器の実現に向けた取り組みが議論されており、大変興味深かった。

2.2 研究内容

私はATLAS実験において前方陽子検出器(AFP)を用いた物理解析を行っている研究グループに配属された。SupervisorであるAndré Sopczakさんの指導のもと、陽子衝突における2光子共鳴探索の解析を行い、Axion-Like Particles (ALPs)探索の感度評価に取り組んだ。

2.2.1 ALPs探索

Axionは標準模型における強い相互作用のCP対称性の不自然さから導入された粒子であり、その拡張であるALPsとともに理論的に存在が期待されている。ALPsは暗黒物質の有力候補の一つと考えられ、ATLAS実験をはじめ、現在多くの実験で探索が進められている[1]。標準模型を構成する粒子はALPsと極めて弱い相互作用をすることが知られており、その重要な性質の一つに電磁場中における光子2個との相互作用がある。図1は陽子ビームの衝突過程において、陽子同士が互いに漸近し、陽子周辺の電場を構成する等価光子の散乱を介してALPが生成され、再び光子対へ崩壊する一連のプロセスを示している。この2光子散乱の反応過程で生成されるALPの信号事象は、終状態にある陽子の状態に応じて3通りの過程が考えられる(図1)。

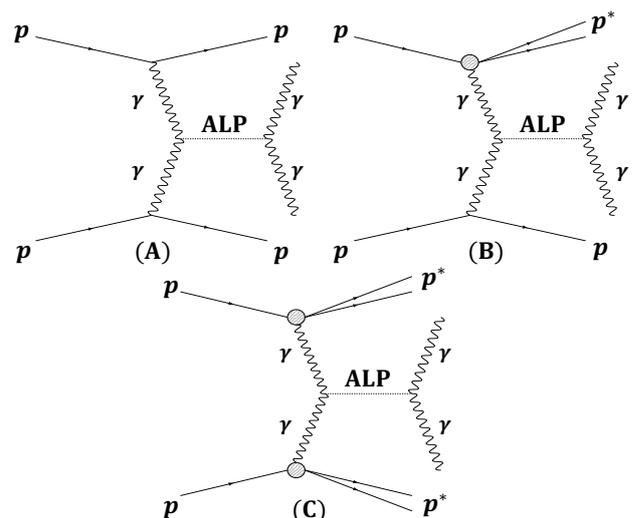


図1: 陽子ビーム衝突における2光子散乱過程で生成されるALPの信号事象。それぞれ、(A)陽子が壊れない排他的な事象、(B)陽子1つが壊れる事象、(C)陽子2つが壊れる事象を示す。

2.2.2 前方陽子検出器 (AFP)

衝突後の陽子の一部は、ビームライン上から LHC 磁石によって軌道が曲げられ、AFP で検出される (図 2)。AFP では、LHC 磁石を用いて衝突後の陽子の運動量を測定し、陽子のエネルギー損失率 ξ_{AFP} を見積もっている。軌道が大きく逸れるほどエネルギー損失率が大きくなる。 ξ_{AFP} は以下で表される。

$$\xi_{AFP} = 1 - \frac{E}{E_{beam}}$$

ここで、 E は AFP で測定される陽子のエネルギー、 E_{beam} は入射陽子ビームのエネルギー 6.5 TeV である。 ξ_{AFP} は、2 光子系の運動学情報からも算出することができ、以下の関係式から得られる。

$$\xi_{\gamma\gamma} = m_{\gamma\gamma} \cdot \frac{e^{\pm\eta}}{2E_{beam}}$$

ここで、 $\xi_{\gamma\gamma}$ は 2 光子系から求めた陽子のエネルギー損失率、 $m_{\gamma\gamma}$ は 2 光子不変質量、 η は 2 光子の擬ラピディティであり、 \pm の符号は検出された粒子の検出器サイド (A-side を +, C-side を -) での位置を表す。

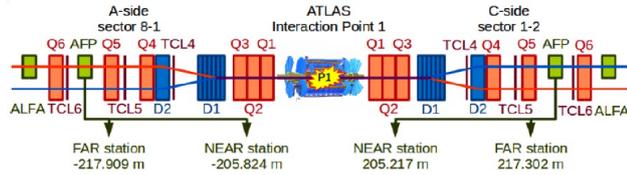


図 2: ATLAS 検出器と前方陽子検出器 (ATLAS Forward Proton detector (AFP)) の概観図。陽子ビームは四極磁石 (Q1-Q6) で絞込まれ、偏向磁石 (D1, D2) によりその軌道が曲げられる。陽子ビームの一部は、衝突点 (P1) から両サイド (A-side, C-side) に 200 m 程の位置に設置されている AFP (シリコントラッカー) で検出され、LHC 磁石の情報と組み合わせてエネルギー損失率が見積もられる [1]。

2.2.3 シミュレーションおよびデータの事象解析

シミュレーション解析では SuperChic 3 [2] と呼ばれるシミュレーションジェネレーターを用いて、質量 $M_{\gamma\gamma} = 1000$ GeV、光子との結合定数 $f^{-1} = 0.2$ TeV $^{-1}$ の ALP 信号および偽信号となるレプトン対・光子対 ($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$, $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$) を含む複数の反応過程から、信号事象の検出効率の評価を行った。ま

た、データ解析では、2017 年に取得された重心系エネルギー 13 TeV のデータ (32 fb $^{-1}$ および 14.6 fb $^{-1}$) から 2 光子散乱に寄与する事象を選び出すための事象選別を行った (選別条件は以下の箇条書き)。2 光子共鳴探索において、Drell-Yan 過程で生成されるレプトン対や異なるバーテックス由来の陽子 (パイルアップ) は 2 光子および陽子と相関のない主な背景事象となる。

- 光子の横方向運動量: $p_T \geq 40$ GeV
- 2 光子のアコプラナリティ: $A_{\phi}^{\gamma\gamma} = 1 - \frac{|\Delta\phi_{\gamma\gamma}|}{\pi} > 0.01$

- 2 光子と陽子のエネルギー損失率:

$$\Delta\xi = |\xi_{AFP}^{\pm} - \xi_{\gamma\gamma}^{\pm}| < 2(\sigma_{\xi_{AFP}} + \sigma_{\xi_{\gamma\gamma}})$$

生成される光子は高い p_T を持つため、 $p_T \geq 40$ GeV を要求することで背景事象を抑える。生成される光子は back-to-back な分布をとるため信号領域を blind する目的としてアコプラナリティカットを定めた。陽子のエネルギー損失率のマッチング条件では、それぞれ陽子と 2 光子系で得られたエネルギー損失率の整合性を要求することで背景事象の削減を行った。ここで、 $\sigma_{\xi_{AFP}}$ と $\sigma_{\xi_{\gamma\gamma}}$ はエネルギー分解能の誤差を表す。AFP 両サイドのうちどちらか一方でも条件を満たし場合は事象選択を行う。

2.2.4 背景事象と信号事象の推定

2 光子の不変質量分布から背景事象と信号事象を推定するにあたり、Functional Decomposition (FD) による推定手法を用いた [3]。FD ではデータを背景事象成分と信号事象成分から構成される任意の正規直交関数系 (E_n) の線形和 ($F(z)$) として表すことで、共鳴事象を含む不変質量分布の推定が行える。

$$F(z) = \sum_{n=0}^{N_{bkg}-1} b_n E_n(z) + \sum_{n=0}^{N_{sig}} s_n E_n(z)$$

ここで第 1 項は背景事象成分、第 2 項が信号事象成分を表し、 z は不変質量を無次元化した量である。背景事象には 2 光子と陽子に相関がない事象が多く含まれることから、取得されたデータを用いて見積もりを行った。一例として、FD を用いて行った背景事象 (図 3) と信号事象 (図 4) の推定結果を示す。

2.2.5 感度評価

ATLAS 検出器および AFP により取得されたデータを用いて FD による感度評価を行った。信号事象の分布はシミュレーションから得られた崩壊幅 0.1989 GeV を持つ Gaussian を仮定し、崩壊幅の大きさをそれぞれ 10.0%, 5.0%, 2.5%, detector resolution, と変化させた

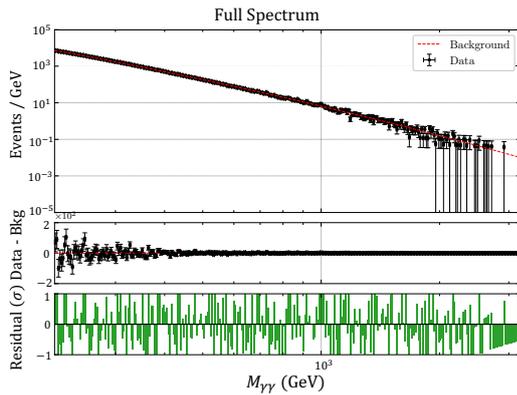


図 3: FD を用いた 2 光子不変質量の背景事象の推定 (2017 年取得データ, 32 fb^{-1})

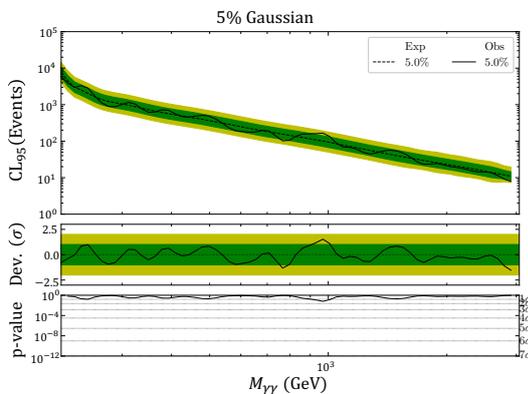


図 4: FD を用いた 2 光子不変質量の信号事象の推定 (2017 年取得データ, 32 fb^{-1})。信号分布は Gaussian を仮定。実線が観測結果で破線 (帯) が背景事象で予測される領域を示す。

場合について比較を行った。図 5, 図 6 は入力した ALP の事象数に対する信号の大きさを表しており、崩壊幅がより狭い (光子との結合定数が小さい) 信号事象で感度が高まるのが分かる。また、2 光子系と前方陽子のエネルギー損失率を考慮し 2 光子背景事象を削減することで、感度向上が期待できる結果が得られた。今回の研究では、質量 1000 GeV 領域での ALP 探索のみについて感度評価を行ったが、今後さらに複数の質量、結合定数を組み合わせた解析を行うことで、将来の HL-LHC での探索に向けた研究に発展できると期待される。

3 今後の抱負

本プログラムを通して多くのことを経験することができた。今回取り組んだ ATLAS 実験でのプロジェクトはあまり馴染みのない新粒子探索に関する研究テーマであったが、所属グループのミーティングでの発表や議論を通じて解析手法について理解を深めることができた。ここで学んだ内容は、自身の研究の視野を広げる貴重な

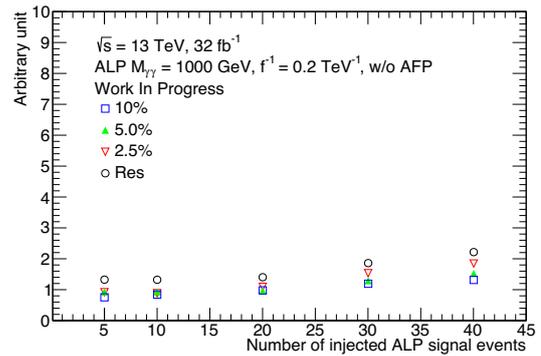


図 5: ATLAS 検出器を用いた ALP 探索の感度評価

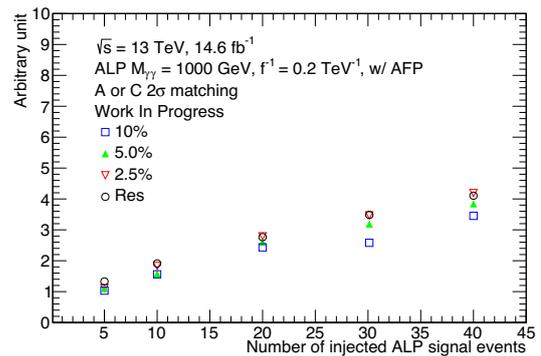


図 6: ATLAS 検出器と AFP を用いた ALP 探索の感度評価

機会になった。またプログラムでは、物理、数学、工学を専攻する海外の学生と議論する機会にも恵まれ、グローバルな環境の中で積極的に意見を主張する大切さも同時に学ぶことができた。これらの経験を活かして、さらに精進していきたい。

4 謝辞

本プログラムに参加するにあたり、多くの方からサポートをいただきました。まず、このような貴重な機会を与えてくださった花垣和則教授、甲木夢弥さまをはじめとする KEK の皆さまと、応募にあたり推薦状を書いていただいた岡山大学の小汐由介准教授にお礼申し上げます。素粒子物理学研究室の皆さまには、応募に際し、応募書類や面接について貴重な助言をいただきました。大変感謝しております。プログラム中には、所属グループの皆さまにも大変お世話になりました。特に、ALP 探索の物理解析に取り組んでいる東大の館野元さんには、研究について頻りに相談に乗っていただき助言をいただきました。心より感謝しております。また、CERN supervisor の André Sopczak さんには、研究プロジェクト全体を通してお世話になりました。プロジェクト内容の進め方や課題解決に向けて一から丁寧に指導していただきました。おかげで 8 週間という短期間に、物理解析の手法に

ついて多くのことを学ぶことができました。最後になりましたが、このような素晴らしいプログラムを開催してくださった CERN 関係者の皆さまに感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Sopczak, A. *et al.*, Search for an Axion-Like Particle in Light-by-Light scattering using the ATLAS central detector and the ATLAS Forward Proton detector. ATL-COM-PHYS-2020-238 (2020).
- [2] Harland-Lang, L. A. *et al.*, Exclusive LHC physics with heavy ions: SuperChic 3. Eur. Phys. J. C **79** (2019).
- [3] Edgar, R. *et al.*, Functional Decomposition: A new method for search and limit setting. arXiv: 1805.04536 (2018).