

## FASER 実験の建設開始と今後の展望

九州大学先端素粒子物理研究センター

音野 瑛俊

otono@phys.kyushu-u.ac.jp

KEK 素粒子原子核研究所

田窪 洋介

yosuke.takubo@kek.jp

2019 年 (令和元年) 11 月 15 日

### 1 はじめに

MeV から GeV 程度の軽い質量を持ち、素粒子の標準模型粒子と非常に弱く相互作用する新粒子は、標準模型を超える新物理の候補として、近年世界的に注目を集めている [1]。FASER(ForwArD Search ExpeRiment) 実験 [2, 3] は、CERN に設置されている LHC(Large Hadron Collider) 加速器を用いた ATLAS 実験のビーム衝突点から 480 m 下流に測定器を設置し、軽い新粒子を探索するプロジェクトである。LHC は 2018 年 12 月から長期シャットダウンに入っているが、2021 年に再稼働することになっている (Run3)。FASER 実験は Run3 当初の実験開始を目指しており、現在、検出器の開発が急ピッチで進んでいる。本稿では、軽い新粒子探索の意義と、FASER 実験の準備状況について紹介する。

### 2 軽い新粒子探索の意義

弱い相互作用程度の強さで標準模型粒子と相互作用し、 $\mathcal{O}(100 \text{ GeV})$  の質量を持つ暗黒物質粒子を WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) と呼ぶ。もし、暗黒物質が WIMPs であれば、宇宙観測で得られた暗黒物質密度をその熱残存量で上手く再現できる (「WIMP ミラクル」と呼ばれる)。

一方、暗黒物質の質量が  $\mathcal{O}(100 \text{ GeV})$  以下でも、MeV から GeV 程度の軽い新粒子が暗黒物質の媒介粒子として存在し、 $\gamma$  などの標準模型粒子と混合パラメータ ( $\epsilon$ ) で弱く混じり合っていれば (図 1 左)、観測されている暗黒物質密度を作り出すことができる (「WIMP なしミラクル」と呼ばれる)。さらに、新粒子の質量が  $\mathcal{O}(\text{eV})$  程度に軽く、 $\epsilon$  が非常に小さければ長寿命となり、この新粒子自体が暗黒物質の候補となり得る。とはいえ、FASER 実験はそのような新粒子に感度を持たないので、ここでは暗黒物質と標準模型粒子の相互作用を媒介する新粒子のみを探索対象とする。なお、WIMP なしミラクル以外にも、SIMP(Strongly Interacting Massive Particle)[4] や

SWIMPs(Super WIMPs)[5] など、暗黒物質密度の観測値を再現できる物理モデルは存在する。しかし、本稿では WIMP なしミラクルに基づいて話を進める。

WIMP なしミラクルの他の物理的意義として、「Core-Cusp 問題」を解決できるというものがある [6]。宇宙観測によって、銀河の内側と外側の回転速度が一定していることが分かっているが、それを実現するためには銀河中の暗黒物質の密度は一様でなければならない。しかし、WIMPs を暗黒物質と仮定すると、暗黒物質の密度は銀河中心にピークを持つような分布になり、観測事実と合わない。これを Core-Cusp 問題という。暗黒物質間の相互作用があれば、Core-Cusp 問題が解決できることが分かっており、WIMP なしミラクルのように暗黒物質間の相互作用を媒介する新粒子があれば、そのような状態を実現できる (図 1 右)。

WIMP なしミラクルを実現できる新粒子にはいくつかの候補がある。まず、FASER 実験のベンチマーク探索になっているのは、新たな  $U(1)$  ゲージ対称性を導入することによって予言される暗黒フォトンである [7]。暗黒フォトンは  $\gamma$  と混合することによって、標準模型粒子に崩壊することができる (図 1 左)。

暗黒フォトン以外の新粒子の候補としては、対称性の破れに伴う擬南部・ゴールドストーンボソンである ALP(Axion Like Particle)[8] や、暗黒ヒッグス [9] などがある。その他、FASER 実験ではステライル・ニュートリノのような中性レプトン [10] の探索も目指している。

LHC を用いた実験では、WIMP ミラクルを仮定した重い新粒子の探索を行ってきたが、これまでにいかなる兆候も見つかっていない。一方、WIMP なしミラクルに基づく軽い新粒子探索では、生成反応である陽子・陽子非弾性散乱の断面積が Bjorken スケーリングに従うため、超前方の粒子を捕らえる必要がある。そのような粒子は現状の LHC 実験では探索できない。LHC の高い生成断面積を新粒子探索に活用するためには、これから紹介する FASER 実験が唯一の解決策となる。

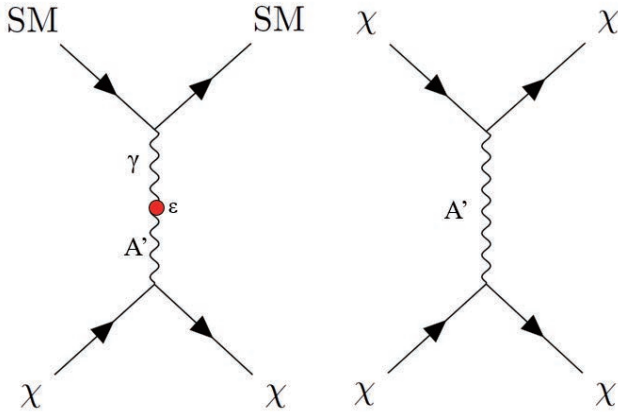


図 1: 軽い新粒子 ( $A'$ ) が、暗黒物質と標準模型粒子 (SM) との相互作用を  $\gamma$  との混合を介して実現する場合 (左) と、暗黒物質 ( $\chi$ ) の相互作用を媒介する場合 (右) のファインマン・ダイアグラム。 $\epsilon$  は  $A'$  と  $\gamma$  の混合の度合いを表す。

### 3 FASER 実験

#### 3.1 FASER 検出器

図 2 に FASER 検出器と ATLAS 実験のビーム衝突点の位置関係を示す。FASER 検出器は、ATLAS 実験のビーム衝突点から 480 m 離れた TI12 という場所に設置される。この場所は、LHC と SPS (Super Proton Synchrotron) の接続トンネルで、LHC の前身である LEP (Large Electron Positron collider) の時代にビーム入射に使用されていた。LHC は新たに入射用トンネルを作ったため、現在 TI12 は使われていない。軽い新粒子は弱く標準模型粒子と相互作用するので、長寿命となる。そのため、新粒子の崩壊過程を捕らえるためには、検出器はビーム衝突点から数百メートル以上離れた場所に設置しなければならない。TI12 はまさに軽い新粒子の探索にうってつけの場所で、たまたまこのような空き空間があったのは幸いだった (これを「FASER ミラクル」と名付ける)。

FASER 検出器は、直径約 20 cm、全長 5 m の大きさである。検出器要素としては、飛跡検出器、カロリメータ、シンチレータ検出器と、0.5 T の永久ダイポール磁石で構成される (図 3)。検出器の上流に 150 cm 長の 0.5 T 永久ダイポール磁石があり、これが新粒子の崩壊ボリュームの役割を果たす。その後ろに、さらに 2 台の 100 cm 長の 0.5 T 永久ダイポール磁石を設置し、スペクトロメータとして使用する。各磁石の間に 3 つの飛跡検出器ステーションがあり、新粒子が崩壊してでてきた荷電粒子を捕らえる。最下流のカロリメータを用いて、電子の同定、エネルギー測定、トリガー発行を行う。また、FASER 検出器の最上流に設置するシンチレーション検

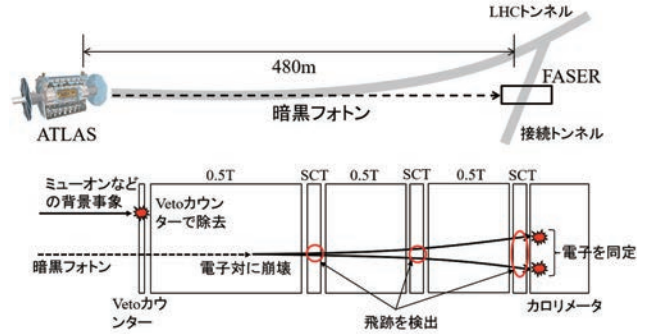


図 2: FASER 検出器と ATLAS 実験のビーム衝突点の位置関係 (上) と、FASER 実験で暗黒光子を捕らえる概念図 (下)。図中の SCT は飛跡検出器を表している。

出器によって、FASER 検出器上流からやってくる標準模型粒子を veto する。それ以外のシンチレーション検出器はカロリメータの情報と合わせてトリガー発行に使用する。

FASER 実験のコンセプトは、「安く」「早く」「優れた探索感度」を実現することである。まず、「安く」と「早く」については、FASER 実験では、超前方方向にコリメートされてやってくる新粒子を捕らえることによって、検出器サイズをコンパクトにできる。さらに、飛跡検出器には ATLAS-SCT のシリコン・ストリップ検出器を、カロリメータには LHCb のスペア・モジュールを使用する。これにより、建設コストは約 1 億円に押さえられる。さらに、既に性能が保証されている検出器を使用することにより、R&D に掛かる時間を大幅に短縮でき、早期に実験を実現できる。

「優れた探索感度」については、LHC の陽子・陽子衝突で超前方方向に生成される新粒子を対象とすることで、LHC の高い生成断面積を活用できる。さらに、新粒子が FASER 検出器にやってくるまでに、ほとんどの標準模型粒子は岩石や LHC の構成要素によって吸収され、背景事象がほとんどないクリーンな実験を実現できる。これによって、FASER 検出器はコンパクトであるにも関わらず、他の計画中の実験と同程度の探索感度を実現することができる。これについては次章で詳しく述べる。

#### 3.2 探索感度の見積もり

ベンチマークとして、暗黒光子 ( $A'$ ) が FASER 検出器内で電子対に崩壊する過程 ( $A' \rightarrow e^+e^-$ ) を捕らえることを考える。図 4 は、暗黒光子に対する FASER 実験の感度領域と、これまでに探索された排除領域を示している。横軸は暗黒光子の質量になっていて、縦軸は暗黒光子と  $\gamma$  の混合パラメータ ( $\epsilon$ ) である。グレーの領域がこれまでに排除されており、300 MeV 以下

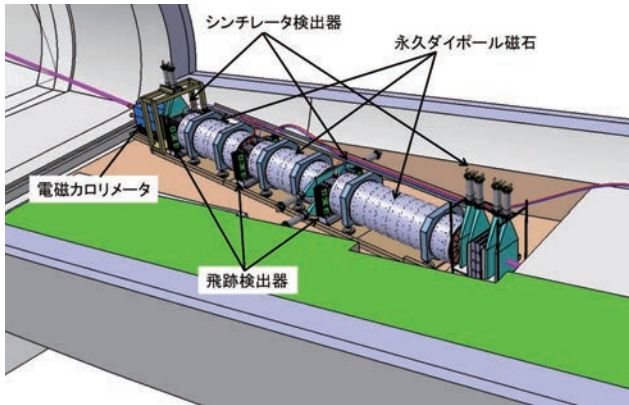


図 3: FASER 検出器の概念図。右手が ATLAS 実験のビーム衝突点の方向。

の暗黒光子については、概ね  $\epsilon = 10^{-6} \sim 10^{-3}$  が探索すべき領域であることがわかる。ここでは、100 MeV の暗黒光子が  $\epsilon = 10^{-5}$  で  $\gamma$  と混合すると仮定して、FASER 実験で得られる信号事象数を見積もってみる。

LHC の Run3 で想定されている 14 TeV の陽子・陽子衝突で  $150 \text{ fb}^{-1}$  の積分ミノシティが得られると仮定すると、約  $2.3 \times 10^{17}$  の  $\pi^0$  が生成される。なお、Run3 における LHC のエネルギーが仮に 13 TeV のままでも、陽子・陽子非弾性散乱の断面積はほぼ同じなので、 $\pi^0$  収量は大きく変わらない。生成された  $\pi^0$  のうち、0.6% が FASER 検出器のアクセプタンスに収まる。 $\pi^0 \rightarrow A'\gamma$  の崩壊分岐比は  $\epsilon^2 = 10^{-10}$  で、 $A'$  が検出器内で電子対に崩壊する確率が  $10^{-3}$  である。

以上の数字を掛け合わせると、約 100 事象の  $A' \rightarrow e^+e^-$  過程が検出器内で発生し、FASER 実験で十分に観測できることが分かる。検出器のサイズが小さくても、高い探索感度を持つことができるのは、ひとえに超前方方向の陽子・陽子非弾性散乱の断面積が高いことによる。

LHC Run3 の最初の年である 2021 年は、瞬間ミノシティが低く、約  $20 \text{ fb}^{-1}$  のデータを取得する予定になっている。図 4 を見てみると、最初の年のデータだけでも、FASER 実験で未探索領域を開拓できることが分かる。さらに、Run3 の全期間で取得予定の約  $200 \text{ fb}^{-1}$  のデータを用いると、暗黒光子についての探索領域を大幅に拡大できる。

ここで注目したいのは、Belle II と LHCb は FASER 実験よりも大きな結合領域に感度を持ち、FASER 実験とよい相補関係にあることである。これらの実験と組み合わせると、100 MeV 以下の暗黒光子について、ほぼ全ての結合領域を探索できる。

なお、図 4 中にある SHiP[11]、SeaQuest[12]、NA62[13] が FASER 実験と同じ領域に感度を持っている。しかし、SHiP は計画中的の実験で、建設予算の目途が立っていない。SeaQuest と NA62 は稼働中の実験であるが、主眼

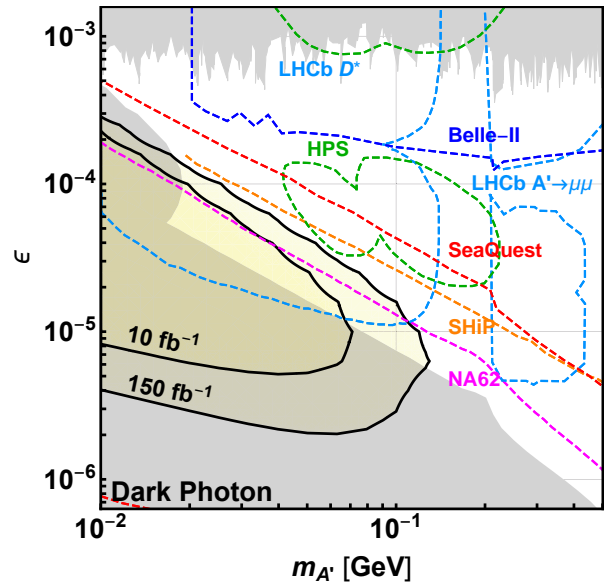


図 4: FASER 実験における暗黒光子に対する感度の見積もり。横軸は新粒子の質量、縦軸は暗黒光子と  $\gamma$  の混合パラメータを表す。グレーの領域は、電子・陽電子衝突型実験やビームダンプ実験などによって排除されている [14]。10  $\text{fb}^{-1}$  は 2021 年で、150  $\text{fb}^{-1}$  は LHC の Run3 の全期間で取得可能な積分ミノシティ。

としている物理測定が異なる。そのため、新粒子探索のためには検出器の改良が必要となるが、まだ具体的な実施計画はない。以上の状況を踏まえると、この探索領域について、圧倒的に早く探索を実現できるのが FASER 実験である。

### 3.3 背景事象の見積もり

陽子・陽子衝突起源の標準模型粒子は、FASER 実験ホールにやってくるまでに岩盤や LHC の加速器要素によってほとんど吸収される。そのため、主な背景事象は高エネルギーのミューオン事象である。なお、ニュートリノ事象は、FASER 実験では無視できるほど少ない。

図 5 は、FLUKA シミュレーションを用いた FASER 実験ホールにおけるミューオン・フラックスの見積もりである。少し見えにくいだが、黒の線で FASER 検出器が設置されるトンネルが示されている。さらに、トンネル内側の右端に小さく扇型の線が描かれていて、これが FASER 検出器が設置される場所に対応する。LHC 加速器の磁場によって、 $\mu^-$  は図の左側に、 $\mu^+$  は右側に曲げられる。この図を見ると、ミューオンは丁度 FASER 検出器をよけるように分布していることが分かる。従って、FASER 検出器を設置する場所では、奇跡的に背景事象が最小限に抑えられていることが分かる（これも FASER ミラクル）。

暗黒光子の場合、検出器内での崩壊による電子と



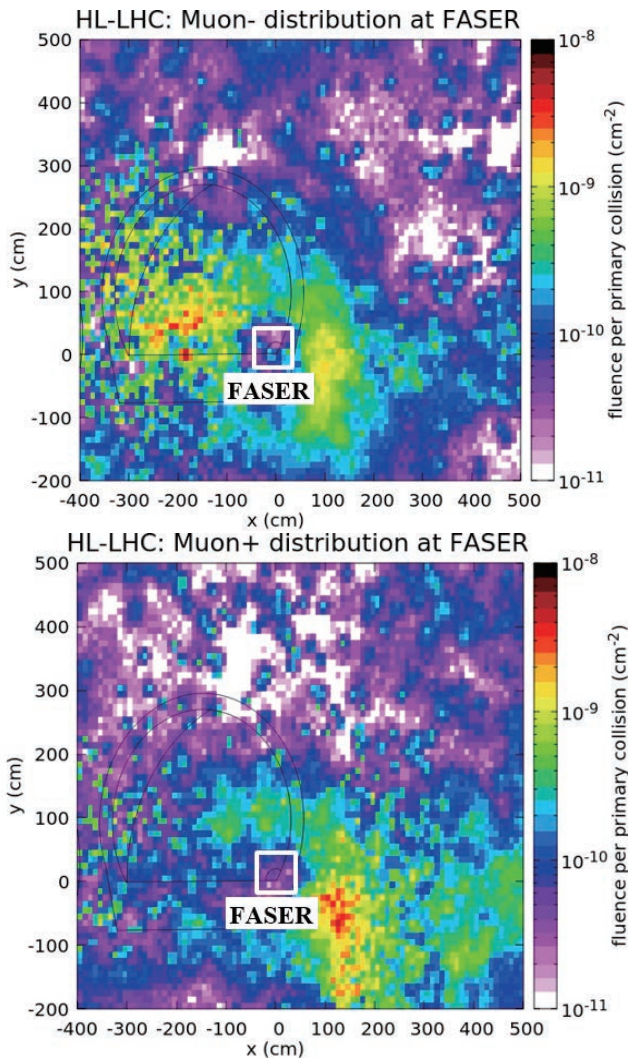


図 5: FASER 実験ホールにおける  $\mu^-$  (上) と  $\mu^+$  (下) のフラックスの見積もり。トンネルの右下に小さく描かれている扇型が FASER 検出器の位置。

陽電子の 2 つのトラックが信号となる。そのため、ミュオンの制動放射による  $\gamma$  が、検出器内で電子・陽電子対生成を起こし、さらにミュオンを検出できなかった場合は、誤って信号事象として認識される。シミュレーションによると、100 GeV 以上の  $\gamma$  もしくはハドロンシャワーを伴うミュオン事象は、Run3 の全期間で約 80k 事象である。これは 5.2 節で紹介する veto ステーションによって、十分に落とすことができるレベルである。

FULKA のシミュレーション結果を確認するため、LHC Run2 運転中の 2018 年にエマルジョンを FASER 実験の場所に設置した。測定結果は FULKA の予想とよく一致していることが確認できた。

### 3.4 建設開始までの道のり

FASER 実験は 2017 年に提案を行い、2018 年 7 月に Letter Of Intent を、2018 年 11 月に Technical Proposal

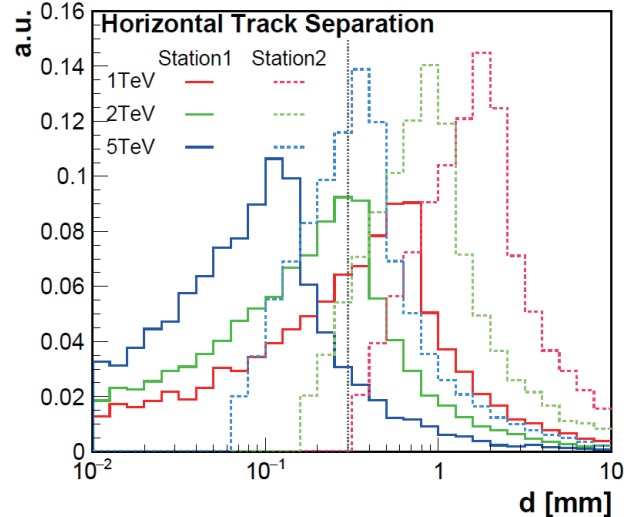


図 6: 飛跡検出器の第 2 と第 3 ステーションにおける、暗黒光子からの運動量ごとの電子と陽電子トラックの距離。暗黒光子の質量は 100 MeV を仮定している。

を提出した。そして、ついに 2019 年 3 月に CERN から LHC 実験としての承認を受け、本格的に建設に向けた準備を開始した。FASER 実験の建設と運転のための予算は、アメリカの財団である Heising-Simons 財団と Simons 財団から全額補助されることになった。

2019 年 11 月現在、FASER コラボレーションは 8 か国、18 研究機関、47 名で構成されている。そのうち、実験屋は約半数で、検出器だけでなく人員もコンパクトである。実験屋は ATLAS 実験に参加している人が大半で、そのほとんどが何らかのエキスパートである。というよりも、各方面のエキスパートを一本釣りしてきた方が正しい。そのため、少数精鋭でスピード感を持って実験の準備が進んでいる。4 節で我々が携わっている飛跡検出器の開発について、5 節で飛跡検出器以外の準備状況について述べる。

## 4 飛跡検出器

### 4.1 概要

FASER 検出器で最も重要な役割を担うのが、飛跡検出器である。図 6 は、100 MeV の質量をもった暗黒光子が電子対に崩壊した場合の、飛跡検出器における電子・陽電子の距離を表している。これを見ると、第 2 ステーションで 300  $\mu\text{m}$  程度の飛跡分離能力があれば、ほぼ全ての暗黒光子を捕らえることができることが分かる。そのため、飛跡検出器には 300  $\mu\text{m}$  より優れた位置分解能が求められる。この要求を満たすため、FASER 実験ではシリコン・ストリップ検出器を使用することにした。

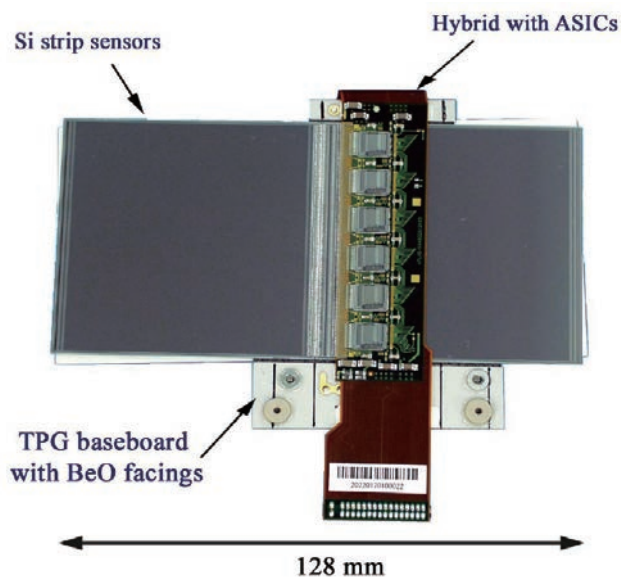


図 7: ATLAS SCT バレル・モジュール。センサー上面に配置されているのがハイブリッドで, ASIC は表面に 6 個, 裏面に 6 個搭載されている。ハイブリッドの下端にあるコネクタから信号を読み出す。

飛跡検出器には ATLAS 検出器 SCT のバレル領域に使用されている, シリコン・ストリップ検出器のスペア・モジュールを使用する (図 7)[15]。センサーは p-in-n 型で,  $63.3 \times 64 \text{ mm}^2$  の大きさである。SCT モジュールは, 片面にセンサー 2 枚を使用し, それを裏表に 40 mrad のステレオ角をつけてペアとする。そして, ASIC(ABCD チップ [16]) を 12 個搭載したハイブリッドをセンサーとワイヤー・ボンドで接続することで, モジュールが出来上がる。ストリップ・ピッチは  $80 \mu\text{m}$  で, モジュール片面で 768 ストリップである。位置分解能は,  $80 \mu\text{m} / \sqrt{12} \sim 23 \mu\text{m}$  となり, 要求性能である  $300 \mu\text{m}$  の位置分解能よりも一桁以上良い。

FASER 飛跡検出器では, このモジュール 8 つを使って, 1 枚のレイヤーを作成する。そして, 3 レイヤーを 1 つのステーションにまとめたものを全部で 3 つ用いる (図 8)。各モジュールにはフレキシブル基板が接続され, 電気線をレイヤーの外部に引き出してくるのに使用される。パッチパネルはフレキシブル基板, DAQ システム, 電源システムのインターフェースの役割を担う。2 枚のパッチパネルをレイヤーの両端に設置し, それぞれ 4 つのフレキシブル基板と接続する。

ATLAS 実験のように放射線損傷が大きい実験環境では, シリコン・センサーはアニール効果を押さえるために,  $-20^\circ\text{C}$  程度の低温に冷やす必要がある。しかし, FASER 実験では放射線損傷は問題にならないので, 冷却は水冷で行う。レイヤーのアルミ・フレームには冷却管が埋め込まれていて一体構造となっている。

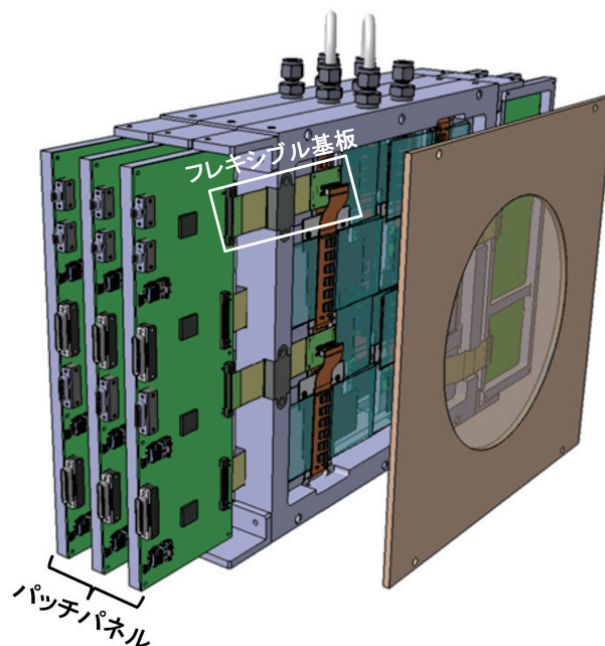


図 8: 飛跡検出器ステーションの概念図。3 レイヤーで 1 ステーションを構成している。それぞれのモジュールに接続されているフレキシブル基板は, レイヤーの両端に配置されているパッチパネルに接続される。

## 4.2 モジュール選別

飛跡検出器の開発のために, スペアを含めて全部で 10 レイヤーを作成する。そのためには, 80 個の SCT モジュールが必要となる。上記のとおり, ATLAS SCT グループの好意によって, 約 200 個あるスペア・モジュールから最良の 80 個を選んで使用して良いことになった。そこで, 我々が中心となって, 飛跡検出器に使用するモジュールを選別することになった。

まず, 試験システムを探さなくてはならない。FASER 実験は, 何もない状態から約 1 年間で実機を完成させなければならないプロジェクトである。さらに, 前述の通り, 人員が非常に限られている。従って, モジュール選別のために新たな試験システムを開発するゆとりはない。

そのような状況の中, ケンブリッジ大学が同じ SCT モジュールを用いた, ミューオン・トモグラフィーのための測定器を開発していることがわかった。交渉の末, 彼らの試験システム [17] を一式貸してもらうことになった。しかし, この試験システムを導入してみたところ, ノイズ測定などの基本的な測定項目が実装されていないことが判明した。そのため, 我々とケンブリッジ大学の学生が協力して, 新たな機能を組み込むという作業が必要だった。

必要最低限の測定項目が準備できたところで, モジュール試験のためのシフトを組織した (図 9)。モジュールの選択基準は, ノイズが予想程度の値 (約  $1,700 \text{ e}$ ) であ



ること、死亡ストリップとノイズなストリップが7ストリップ(全ストリップの約0.5%)以下であること、とした。そして、約2か月かけて2019年3月までに、最高性能を持つSCTモジュール80個を選別することができた。

### 4.3 フレキシブル基板とパッチパネル

フレキシブル基板とパッチパネル(図8)は、FASER実験の飛跡検出器のために独自開発しないといけない要素である。これらは、我々日本グループの担当になっている。

フレキシブル基板の最初の試作品は、2019年8月に完成した。しかし、回路図と見比べてみると、奇数ピンと偶数ピンが基板上で反転して接続されていることが判明した。そこで、急遽修正版を作成し、翌月には仕様通りのものを完成させることができた。

2019年9月に完成したパッチパネルの試作品でも単純ミスが発生した。1枚のパッチパネルに、1レイヤーの半分の4モジュールが接続される。レイヤー内でモジュールは、裏表が交互に配置されている。それにとまって、ハイブリッドのコネクタも同様に表裏の順に配置される。しかし、パッチパネルのコネクタは同じ面に配置されているので、2種類のフレキシブル基板を用意する必要がある(ここでは、タイプAとタイプBと呼ぶ)。

しかし、いざフレキシブル基板とパッチパネルを接続する段になって、レイヤー内でフレキシブル基板がタイプA・タイプBの順番で並んでいるのに、パッチパネルではタイプB・タイプAの順番でコネクタが配置されていることが判明した。そのため、同時に2つのモジュールしか接続できないということになってしまった。応急処置としてインターフェース・ケーブルを作成して、なんとか同時に4つのモジュールを接続できるようにした(図10)。なお、本稿を校正中の2019年11月に修正版の

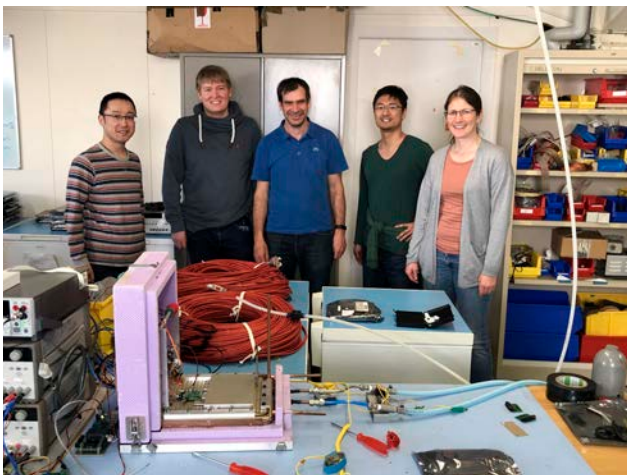


図9: SCTモジュールの試験システムを前に記念撮影。

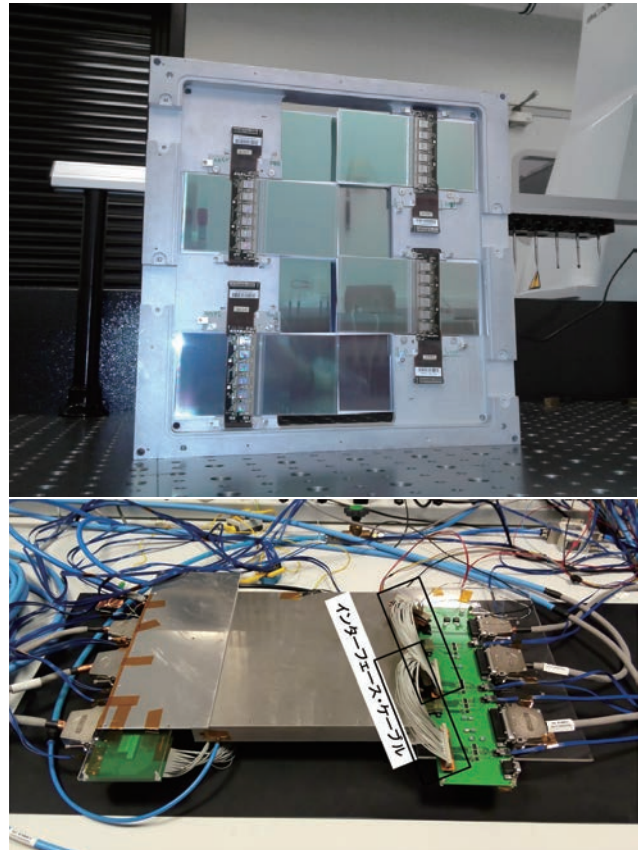


図10: 飛跡検出器のプロトタイプ・レイヤー(上)と、読み出し試験の様子(下)。パッチパネルの設計ミスを補うため、インターフェース・ケーブルを用いて、パッチパネルに4モジュールを接続している。

パッチパネルが完成し、インターフェース・ケーブルなしで4モジュールを接続できるようになった。

基板の設計をする上で、ピン配置の確認は基本中の基本である。しかし、「言うは易し、行うは難し」で、奥が深いということを身に染みて感じた。

### 4.4 DAQシステム

DAQシステムとしては、ジュネーブ大学が開発したGPIOボードと呼ばれる、汎用FPGAボードを使用する。GPIOボードはALTERA社のCyclone V A7というFPGAを搭載しており、コマンド出力やデータ取得は全てこのFPGAで制御されている。

ファームウェアの開発はジュネーブ大学が担当している。仕様書が2019年5月に完成し、8月には使用可能なファームウェアが仕上がっているという開発スピードである。さらに、GPIOボードとパッチパネルを接続するために必要となるアダプタ・カードも、ジュネーブ大学が開発を担当している。こちらも、ファームウェアと同様の速度で完成してしまった。ソフトウェアはレイヤーの試験に使用しながら徐々に開発を進め、2019年内に完

成させることを目指している。

#### 4.5 プロトタイプ・レイヤーを用いた試験

2019年10月に、プロトタイプ・レイヤーが完成した(図10)。これに、フレキシブル基板とパッチパネルの試作品を接続して、性能評価のための読み出し試験を行っている。

読み出し試験では、フレキシブル基板とパッチパネルに上記の問題があったものの、インターフェース・ケーブルを用いて、レイヤー内の8つのモジュールと接続できるようになった。そして、全モジュールをコンフィグし、データを読み出すことに成功した。これにより、フレキシブル基板とパッチパネル共に、量産のための準備が整った。

この試験では、DAQのフル・チェーンで8モジュールを読み出すことができるか、ということだけでなく、冷却効率を確認することも重要な課題である。飛跡検出器の冷却は15°Cの水冷で行う。運転時にモジュールの温度が30°C以下になるように、レイヤー・フレームを設計しなければならない。冷却装置の設定温度と流量を変えながら、モジュールの温度を測定し、冷却効率の確認を行った。その結果、十分な冷却能力が得られることが分かった。

## 5 その他の準備状況

### 5.1 電磁カロリメータ

電磁カロリメータにはLHCbのECALモジュールのスペアを使用する(図11)[18]。カロリメータ・モジュールは、 $121.2 \times 121.2 \text{ mm}^2$ の断面積で、PMTを入れて754 mmの長さである。そして、2 mm厚の鉛と4 mm厚のプラスチック・シンチレータのサンドイッチ層を66枚並べた構造になっている。長手方向に波長変換ファイバーが64本刺さっており、それを1つの束にまとめてPMTでまとめて読み出す。全体で25放射長を持ち、TeVのエネルギー損失に対して、約1%のエネルギー分解能を実現できる。FASER実験ではこのモジュールを4つ用いて、電磁カロリメータを構成する。

PMTにはLHCbで使用されているものと同じ浜松フォトニクス社製の光電子増倍管(PMT: PhotoMultiplier Tube)であるR7899-20を使用する。データ取得は16チャンネルCAENデジタイザー・ボード(VX1730)で行う。これは、シンチレーション検出器にも用いる。デジタイザーのサンプル速度は500 MHzで、14ビットのADCを使用している。

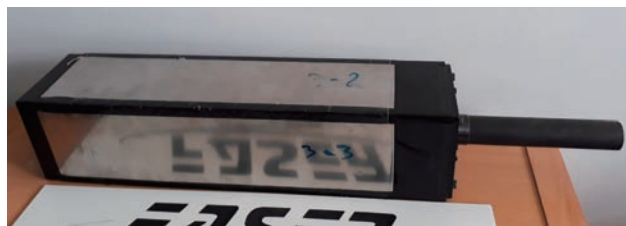


図11: FASERで使用するLHCbのECALモジュール。2 mm厚の鉛と4 mm厚のプラスチック・シンチレータのサンドイッチ層が66枚並べた構造になっていて、長手方向に波長変換ファイバーが64本刺さっている。

電磁カロリメータについては、既に全ての検出器要素の組み立てが完了している。現在は、CERNのテストベンチで動作試験が行われている。

### 5.2 シンチレータ検出器

シンチレータ検出器は、vetoステーション、トリガー・ステーション、プレシャワー・ステーション、の3ステーションからなる(図12)。vetoステーションはFASER検出器の最上流に設置され、陽子・陽子衝突起源のミュオンなど、FASER検出器の外からやってくる背景事象をvetoするために使用する。トリガー・ステーションは崩壊ボリュームと飛跡検出器の第1ステーションの直後に設置され、信号事象のトリガーに使用される。最後のプレシャワー・ステーションは、カロリメータの手前に設置され、カロリメータ前で発生した $\gamma$ とカロリメータ内で起こったニュートリノ事象と識別するために使用する。

vetoステーションとプレシャワー・ステーションはそれぞれ、2 cmの厚みで、 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ の大きさのプラスチック・シンチレータ(Bicron BC 408)を4レイヤー使用する。そして、シンチレータの片側にライト・ガイドを取り付け、浜松フォトニクス社製のPMT(H6410)に接続する。FASER検出器では、背景事象を除去するために、vetoステーションの1レイヤーには98%以上の検出効率が要求されるが、2 cmの厚みを確保することで99.99%以上の検出効率を持たせることができる。

FASER検出器外部からやってくる $\gamma$ を捕らえるために、vetoステーションには $15 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の鉛ブロックを置く。これにより、ミュオンの制動放射による $\gamma$ を吸収してしまうか、又はシャワーを起こさせてシンチレータで捕らえることができる。プレシャワー・ステーションには、 $\gamma$ シャワーを起こさせるために、1放射長に相当する約5 mm厚の鉛層を3枚設置する。

トリガー・ステーションは厚みが1 cm、面積が $20 \times 40 \text{ cm}^2$ のシンチレータを同じ面に2枚並べた1レイヤーを用いる。トリガー・ステーションは時間測定にも使用



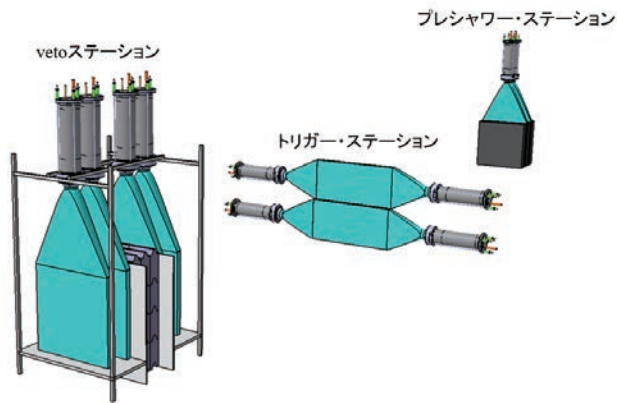


図 12: シンチレータ検出器の概念図。ビーム衝突点に向かって上流から、veto ステーション、トリガー・ステーション、プレシャワー・ステーションを設置する。

し、ビーム衝突由来でない事象を排除するために 1 ns の時間分解能を要求する。そのため、シンチレータの両端で読み出し、タイムウォーク補正ができるようにする。

カロリメータ同様にシンチレータ検出器についても、全ての検出器要素の組み立てが終わり、CERN のテストベンチで動作試験を行っている。

### 5.3 永久ダイポール磁石

FASER 実験で最重要な探索モードは、暗黒フォトンが電子対に崩壊する事象である。暗黒フォトンを捕らえるためには、崩壊ボリュームで暗黒フォトンが崩壊して出てきた電子と陽電子を分離し、運動量を測定するための磁石が必要となる。しかし、FASER 検出器の設置されるトンネル内はスペースが限られていることもあり、消費電力や冷却系を最小限に抑えたい。

以上を考慮して、FASER 実験では崩壊ボリュームとスペクトロメータのために、0.5 T の永久ダイポール磁石を用いることにした (図 13)。この磁石は、16 個のセクションに分かれており、各セクションの磁場の向きを調整することで (ハルバッハ配列)、ダイポール磁場を実現する。このタイプの磁石は既に CERN の NTOF (Neutron Time-Of-Flight) のために開発されており、FASER 実験でその複製に近いものを製作する。永久ダイポール磁石は CERN が製造を担当しており、2020 年 5 月に全ての磁石の完成を目指して、デザインの最適化が行われている。

### 5.4 土木工事

FASER 実験を現在予定されている場所で行うためには、土木工事が必要である。ビーム衝突軸に対して、FASER 実験の場所は傾いている。より多くの信号事象



図 13: 永久ダイポール磁石の概念図 (左) と磁場構造 (右)。左図で、矢印は各ハルバッハ配列の磁場の向きを表す。

を捕らえるためには、実験現場の床を最大で 50 cm 程度掘る必要がある (図 3)。また、電力の供給ラインやネットワーク設備を設けることも必要である。

現在 LHC のシャットダウン中で、様々な LHC のメンテナンス作業が行われている。FASER 実験のための土木工事はこれらに干渉しないようにしなければならない。また、床を掘る際にトンネルの地下に埋めてある排水系よりも深く掘ることができない。さらに、土木工事による塵の発生を抑えることも重要である。

以上の制限の中で作業を行わなければならないので、土木工事のための作業計画が綿密に議論されている。これまでに、FASER 実験に不必要な物資が取り除かれ、新たにケーブル・トレイと乾燥空気の供給ラインが設置された。

## 6 インストールまでの今後の予定

LHC は 2020 年 5 月から、加速器の冷却を開始する。それ以降は、クレーンを使った大きな検出器要素の移動はできなくなる。そのため、それまでに可能な限りの検出器要素を実験場所に移動しておくことが望ましい。少なくとも、クレーン作業が必要となる永久ダイポール磁石は設置しておかねばならない。

FASER 検出器の要素開発で、最も時間を必要とするのが飛跡検出器である。2019 年中に第 1 レイヤーの作成と性能評価試験を終え、2020 年 3 月までにスペア 1 枚を含む、全 10 レイヤーの製造を行うことを目指している。

飛跡検出器が完成すると、2020 年 4 月から 5 月にかけて、地上で FASER 検出器の最終状態と同じように測定器を並べ、試運転を行う。そして、2020 年 5 月に全ての検出器要素を実験場所に設置することを目指す。以上の通り、現状のスケジュールは非常にタイトで、一見実現不可能のようにも思われる。しかし、飛跡検出器、カロリメータ、シンチレータ検出器は、クレーン作業が必要ない。そのため、もし開発が遅れた場合には、2021 年 5 月以降に実験場所に設置することも可能である。ここでも、FASER 検出器がコンパクトであるという利点が活きてくる。



新粒子探索以外にも、FASER 検出器の手前にエマルジョンとシリコン・ストリップを用いた飛跡検出器を設置し、TeV 付近のニュートリノ事象を測定するというプロジェクト (FASER $\nu$ ) が進行中である [19]。FASER $\nu$  実験で測定できるニュートリノのエネルギー領域は、加速器実験と IceCube で測定できるエネルギー領域の丁度中間に位置し、これまで測定結果がない。さらに、エマルジョンを用いることで、電子ニュートリノとミューニュートリノだけでなく、タウニュートリノまで測定できる。現在、CERN に提案中で、早ければ FASER 実験の始まる 2021 年からのデータ取得を目指している。このプロジェクトは九州大学、名古屋大学、ベルン大学の方々が中心となって準備が進んでおり、今後の進展に期待したい。

## 7 最後に

2019 年 1 月の段階で、FASER 実験は LHC 実験として認められておらず、Heising-Simons 財団と Simons 財団からの予算補助も確定していなかった。さらに、ATLAS SCT と LHCb 電磁カロリメータのスペア・モジュールについても、FASER 実験へ提供するという決定は出ていなかった。まさにどれが駄目でもプロジェクトが破綻するという状況だった。しばらく綱渡りのような状態が続いたが、ひとまず実験の建設開始に漕ぎつけたことは幸いである。まさに FASER ミラクルである。しかし、今後も物理データの取得までは波乱なことが続くに違いない。

FASER 実験はプロジェクトの発足から、色々なことが急ピッチで進み、実験の立ち上げに関わる全てのステップを目の当たりにする貴重な機会を得ることができた。これは、まだ若い我々にとっては非常に勉強になった。さらに、現在はすごい勢いで検出器の開発が進んでおり、当初は半信半疑だったが、本当に 2020 年 5 月までに全ての開発を完了してしまいそうである。我々自身も、FASER 実験の行く末が楽しみである。

## 8 謝辞

海野義信さん (KEK) には、ATLAS SCT のバレル・モジュールを開発した経験に基づき、フレキシブル基板の設計にご助言をいただきました。津村浩二さん (九大)、永田夏海さん (東大)、白井智さん (東大 IPMU) には、暗黒物質と軽い新粒子の物理的関連について、懇切丁寧にご教授いただきました。ハヤシレピック株式会社の青木厳さんと石塚雄二さんには、フレキシブル基板とパッチパネルなど、各種基板の設計と製造を依頼しました。我々の度重なる設計の修正依頼と基板の作り直し

に、嫌な顔せず気長にお付き合いしていただきました。以上のみなさま、大変ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] M. Battaglieri *et al.*, arXiv: 1707.04591.
- [2] A. Ariga *et al.*, arXiv: 1811.10243.
- [3] A. Ariga *et al.*, arXiv: 1811.12522.
- [4] Y. Hochberg *et al.*, Phys. Rev. Lett. **113** 171301 (2014).
- [5] J. L. Feng *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91** 011302 (2003).
- [6] Sean Tulin and Hai-Bo Yu, arXiv: 1705.02358.
- [7] J. L. Feng *et al.*, Phys. Rev. D **97** no. 3, 035001 (2018).
- [8] J. L. Feng *et al.*, Phys. Rev. D **98** no. 5, 055021 (2018).
- [9] J. L. Feng *et al.*, Phys. Rev. D **97** no. 5, 055034 (2018).
- [10] F. Kling and S. Trojanowski, Phys. Rev. D **97** no. 9, 095016 (2018).
- [11] S. Alekhin *et al.*, Rept. Prog. Phys. **79**, 124201 (2016), arXiv: 1504.04855.
- [12] A. Berlin *et al.*, Phys. Rev. D **98** no. 3, 035011 (2016), arXiv: 1804.00661.
- [13] The NA62 collaboration, JHEP05 (2019) 182, arXiv: 1903.08767.
- [14] M. Bauer *et al.*, arXiv:1803.05466.
- [15] 高力孝, 高エネルギーニュース **26-4**, 314 (2008).
- [16] Specification document on ABCD3T ASIC, [http://scipp.ucsc.edu/groups/atlas/elect-doc/abcd3t\\_spec.pdf](http://scipp.ucsc.edu/groups/atlas/elect-doc/abcd3t_spec.pdf).
- [17] F. Keizer *et al.*, JINST 13 no. 10, P10028 (2018), arXiv: 1810.12174.
- [18] LHCb Collaboration, LHCb calorimeters : Technical Design Report, <http://cds.cern.ch/record/494264>.
- [19] H. Abreu *et al.*, arXiv: 1908.02310.