

■ 研究紹介

Penetrating particle ANalyzer (PAN)

オックスフォード大学

飯澤 知弥

Tomoya.Iizawa@cern.ch

2023年(令和5年)5月3日

1 はじめに

Penetrating particle ANalyzer (PAN) [1] は地磁気の影響が及ばない深宇宙で 100 MeV/n から 20 GeV/n の宇宙線フラックスやその組成, 到来方向を 1 太陽周期 (11 年) 以上にわたって精密に測定することを目的とした衛星実験である。AMS [2] や DAMPE [3] のように, 衛星実験も大型化の傾向をたどる中, 非常に小型の検出器で戦いに打って出ている。スイスのジュネーブ大学 (筆者の以前の所属), イタリアのペルージャ大学, チェコのチェコ技術大学・実験及び応用物理学研究所による共同での研究開発が進められている。小さな実験, 小さなグループなのでご存じの方はほとんどいらっしゃらないであろう。本稿では PAN の概要, 研究開発・実機試験の状況と今後の展望についてご紹介したい。世界にはこんな実験もあるのかと少しでも興味を持っていただけたら幸いである。

2 PAN の概要と目的

前節でも述べたように PAN は深宇宙で 100 MeV/n から 20 GeV/n 領域の宇宙線フラックスを精密に測定する。陽子や電子・陽電子から鉄原子核 ($Z = 26$) までをターゲットとしており, その目的は宇宙線物理, 太陽物理, さらには宇宙天気や宇宙旅行への応用と多岐にわたる。以下ではそれぞれ詳細をご紹介する。

2.1 宇宙線物理

宇宙線の精密な測定は宇宙線の生成・伝搬のプロセスの解明や未知粒子の探索を行うために非常に重要であり, 様々な検出器によって様々な粒子種, 様々なエネルギーの宇宙線フラックス測定が行われている。図 1 にこれまでに測定された各 Rigidity¹ における陽子とヘリ

ウム原子核のフラックスの比の分布を示す。Rigidity が 1 GV 以下の領域は Voyager [4] 等によって測定されており, 2 GV 以上の領域は AMS 等によって測定されている。しかし, その間の 1 GV から 2 GV までは現在に至るまで精密に測定されていない。

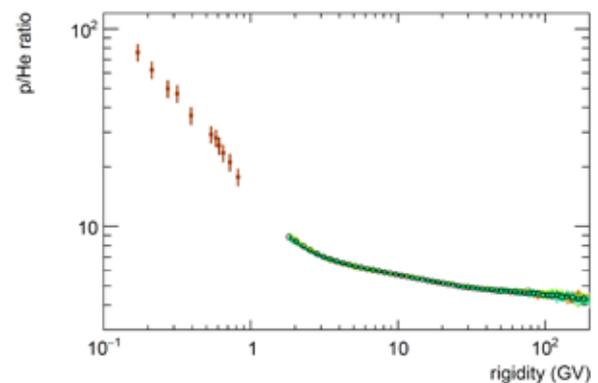


図 1: これまでに測定された各 Rigidity における陽子とヘリウム原子核のフラックス比。1 GV 以下の領域は Voyager [5], 2 GV 以上の領域は AMS [6, 7] をもとに作成 [8]。2 GV 以上の色の違う線は, 測定時期による変動を考慮に入れたもの。1 GV から 2 GV に精密に測定されていない領域が存在しており, PAN はこのギャップ領域を深宇宙で精密に測定する。

Voyager は測定に dE/dx v.s. E 法を用いており, 粒子が検出器に入射した際の dE/dx と検出器内で止まる間に落とした総エネルギーの情報から質量や粒子種を再構成する。つまり検出器中で粒子が止まり全エネルギーを落とすことが要求されるのだが, 1 GV 以上の粒子だと検出器を突き抜けてしまい (Penetrating Particles), 全エネルギーの測定が不可能になる。一方で, AMS では検出器の性能的に測定自体は可能だが, 測定場所が地球から近いので 2 GV 以下の粒子に対して地磁気の影響による不定性が大きい。PAN は非常に軽量・小型なマ

¹p を運動量, c を光速, Z_e を電荷として $R = \frac{pc}{Z_e}$ で表される。運動量の単位が GeV/c なら Rigidity の単位は GV となる。陽子とヘ

リウム原子核のように電荷が異なる場合でも, 同じ Rigidity を持つならば同一磁場で同じ軌道を描く。

グネット及びシリコンストリップ検出器を採用することで地磁気の影響を無視できる深宇宙まで飛ばすことができ、かつターゲットとするエネルギー帯である“突き抜け粒子”の測定も可能となる。PANはこのコンセプトのもと、図1のギャップ領域の精密な測定を目指す。

また、陽子とヘリウム原子核に限らず鉄原子核までの測定が可能であるため、深宇宙での各原子核の組成も解明する。さらには電荷の正負を識別できることを利用して、例えば電子と陽電子のフラックスを比較し、粒子と反粒子による分布の違いも詳細に検証する。

2.2 太陽物理

太陽活動は宇宙線の生成や伝搬に大きな影響を与える。例えば、太陽磁場の極性は太陽表面の黒点の数と連動して11年周期で変動するため、宇宙線の電荷に依存したフラックス分布の変調が見られる。それよりも短い周期のものだと27日周期の太陽の自転による変調や9日もしくは13.5日周期の太陽風由来の高圧領域による変調がある。その他にも不定期に起こる太陽フレアやコロナ質量放出といった太陽活動由来の衝撃波による高エネルギー粒子 (Solar Energetic Particles, SEP) の存在も知られている。

図2はAMSによって計測されたRigidity帯ごとの2011年から2019年までの1日ごとの陽子のフラックス分布である [9]。2016年前半に顕著な短い周期の変調、それ以外での27日周期の変調、もっと長いスケールでの変調と色々なタイムスケールの変調が起こっているのが見て取れる。PANは同様の測定を1天文単位 (AU) 地点で1太陽周期以上行い、太陽磁場と宇宙線の伝搬の関係の詳細解明に貢献する。また、SEPが発生した場合それを観測し、そのエネルギースペクトルや組成及び生成・伝搬のプロセスを明らかにする。

2.3 宇宙天気や宇宙旅行への応用

特定のエネルギー帯の宇宙線を長期に渡って観測できるという特性から、PANは宇宙空間の色々な地点での放射線量を長期間モニターできる装置としても有用である。取得されたデータは宇宙天気予報のための宇宙天気モデル開発の一助ともなりうる。

また、50 MeV/n以上の粒子は宇宙服や宇宙船のシールドを透過し、宇宙旅行をする人の健康に甚大な影響を与える。地球近辺では地磁気によって20 GV程度の粒子まではある程度自然にシールドされるが、深宇宙では20 GV以下の粒子でも旅行者に大きな害となる。PANが取得したフラックス情報によって深宇宙を航行中に人体に与える影響を見積もることができ、適切なシールド

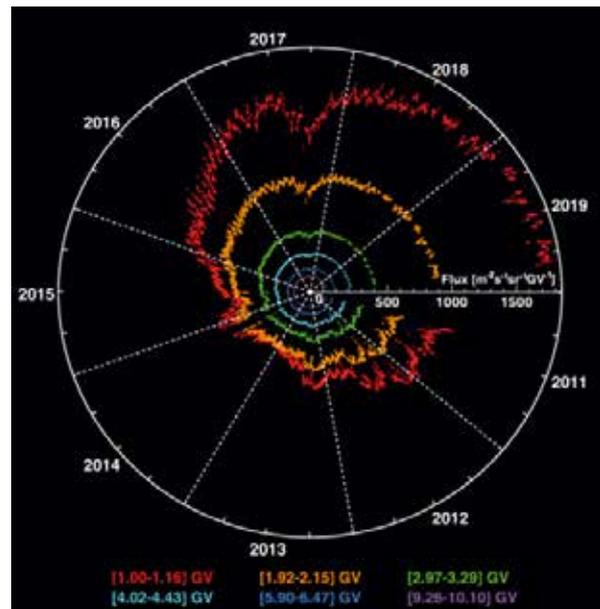


図2: 2011年から2019年までの陽子の1日ごとのフラックス分布 [9]。Rigidity帯ごとにまとめられていて、円の外側に行くほど低いRigidity帯となっている。色々なタイムスケールの変調が見て取れる。

を備えた宇宙服やロケットの開発にも役に立つ。PANは非常に小型であるため、宇宙旅行や宇宙探索の標準装備となり、宇宙旅行中にリアルタイムで宇宙線フラックスを測定することも可能になるかもしれない。

3 PAN検出器

PANは深宇宙での観測を行うため (= 深宇宙まで飛ばすための予算を削り、搭載してもらえる可能性を上げるため)、重量を極力抑え (< 20 kg) かつ省電力であること (< 20 W) が求められる。そのため、ある程度の物質質量が必要となるカロリメータではなく、小型のシリコンストリップ検出器を主たる検出器として採用している。また、検出器をなるべく小さく抑えつつ十分な事象レートが得られるように Geometric Factor (\approx 検出器のアクセプタンス) として $10 \text{ cm}^2\text{sr}$ を設計値とした。

図3(上)にPAN検出器の概観図を示す。ほぼ左右対称な構造をしており、図中の左右どちらから入射した粒子でも検出できる。PAN検出器はマグネット、2種類のシリコンストリップ検出器 (StripXとStripY)、ピクセル検出器、Time Of Flight (TOF) から構成される。マグネットとシリコンストリップ検出器はまとめて Magnetic Spectrometer (MS) と呼ばれ、PANは4つのMSセクターから成る。MSは荷電粒子の飛跡再構成、ピクセル検出器は粒子の位置と電荷の測定、TOFは粒子の飛行時間の測定とトリガー信号の発行が主な役割である。検出器各点での dE/dx と粒子の飛行時間から粒子の電荷

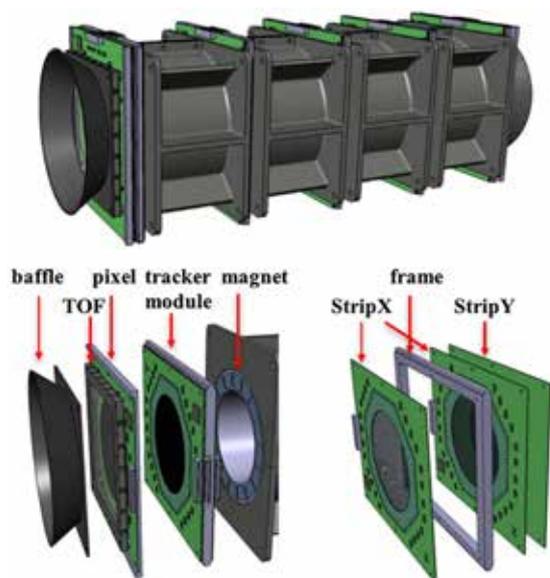


図 3: PAN 検出器全体の概念図 (上) と各モジュールに分解した図 (下)

の測定, 粒子識別を行う。分解能は落ちるが, 粒子が全てのセクターを通過していなくても飛跡を再構成することができるため, 一部のセクターだけ通過した事象も用いることで事象数を稼ぐことも可能である。現在, 各検出器はプロトタイプ生産が完了しており, 実機試験からのフィードバックをもとに設計に修正を加えた最終版の開発を進めている段階である。以下にそれぞれの性能や役割について詳細をご紹介します。

3.1 マグネット

図 4 左は PAN で使用されるマグネットの写真である。内径 5 cm, 長さ 5 cm の円筒型をした磁石が各 MS セクターに 1 台ずつ, 合計 4 台が配置される。ネオジム永久磁石 (NdFeB) を Halbach Array で組むことによりダイポール磁場を生成する (図 4 右)。0.4 T の磁場を生成できるように厚さが設計されており, 1 台あたりの重さは 0.8 kg となる。12 年間の深宇宙での運用で PAN 検出器が受ける放射線量は約 200 Gy と見積もられており, 運用期間中の磁石の劣化はほぼ無いと予測されている。

3.2 シリコンストリップ検出器

シリコンストリップ検出器は, 荷電粒子の通過位置を精密に測定し, 磁場中での軌道の曲がりから運動量を再構成する。PAN 検出器では磁場によって荷電粒子が曲がる方向を測定する位置分解能の良い StripX とそれに直交する方向を測定する StripY が用いられる (図 5)。StripX は長さ 10 cm, 厚さ 150 μm , 25 μm ピッチのシリコンストリップを 2048 本配置しており, 5 μm の

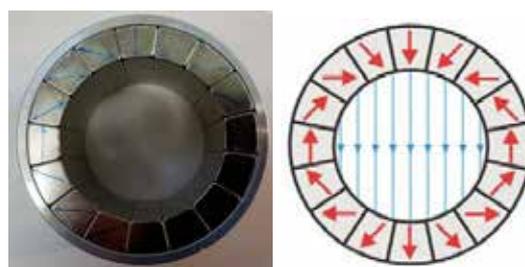


図 4: PAN で使用されるマグネットの写真 (左) と Halbach Array によって生成されるダイポール磁場の概念図 (右)

位置分解能で粒子の通過位置を測定する。一方, StripY の長さや厚さは StripX と同じだが 400 μm ピッチのシリコンストリップが 128 本配置されており, トリガー信号の発行や dE/dx を測定するのに用いる。PAN は 5 個のトラッカーモジュールから構成され, 各トラッカーモジュールは図 3 右下のように, それぞれ 2 個の StripX と 1 個の StripY から成る。(ちなみに, シリコンストリップ検出器の生産は浜松ホトニクスにお願いしている。)



図 5: StripX (左) と StripY (右)。StripX は横方向, StripY は縦方向に沿ってストリップが並んでいる。有感領域は StripX が 51.2 mm \times 51.2 mm, StripY は直径 51.2 mm の円形である。

3.3 ピクセル検出器

ピクセル検出器は dE/dx の測定や, 高レート事象の検出が主な役割である。Timepix シリーズの Timepix3 やその最新版である Timepix4 [10] をピクセル検出器のベース設計の候補としており, ピクセルサイズを変更するなどして性能や消費電力を PAN 用に最適化したものが使用される。ここでは標準仕様の Timepix4 について簡単にご紹介する (図 6)。Timepix4 は 65 nm CMOS テクノロジーを使用しており, 55 \times 55 μm^2 のサイズのピクセルが 512 \times 448 個並べられている。1.5 keV の分解能で Time Over Threshold が検出できる上, 時間分解能も 200 ps と優れており, 粒子の飛行時間の測定に

も用いることができる。また、強い太陽活動に由来して多数の宇宙線がほぼ同時に検出器アクセプタンスに入ってくる“パイルアップ事象”が起こることが予測されているが、Timepix4はGHz/cm²で動作するため、事象レートがMHz/cm²になると予測されているパイルアップ事象も十分に測定可能である。

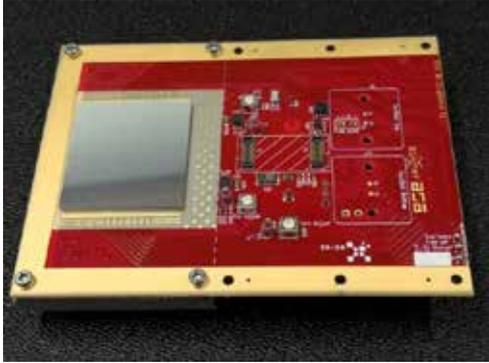


図 6: Timepix4

3.4 Time of Flight (TOF)

TOFはPAN検出器の最も外側に配置され、粒子の入射を検知して、トリガー信号の発行と、飛行時間やdE/dxの測定を行う(図7)。TOFは120×120mm²、厚さ3mmのプラスチックシンチレータ(EJ-230)から成り、3×3mm²のSilicon Photomultipliers (SiPMs) 12個が側面から信号を読み出す。(1太陽周期で1度起こるか起こらないかではあるが)とても強い太陽放射風が起こるとPANのアクセプタンスに10MeV以上の粒子が3.2MHzで入ってくることが予想されている。TOFは最大10MHzで動作するように設計されており、このような高レート事象の測定も可能である。また、100psの時間分解能を持つので、10GeV/n以上の粒子でもPANを通過するのに1ns以上かかるため、PANを通過する粒子の飛行時間を十分に測定できる。



図 7: TOF 検出器

PANの原理検証のために、まずは小型の試作機であるmini.PANの開発及び実機試験が進められている。mini.PANの基本的なコンポーネントはPANと全く同一のMS、ピクセル検出器、TOFであるが、MSセクター数が2個とPANの半分のサイズであり、総重量は10kgとなっている(図8)。PANと比べて実効的な磁場領域が短いため測定可能なエネルギーの範囲は狭まるが、十分に一定の測定に堪えうる性能を持っており、なおかつPANより軽量・小型であるためmini.PANやその応用種を利用した測定を行うことについても議論されている。Mini.PANは、欧州連合のHorizon 2020の研究およびイノベーションプログラム(助成契約番号: 862044)から資金提供を受けて研究開発が進められている。

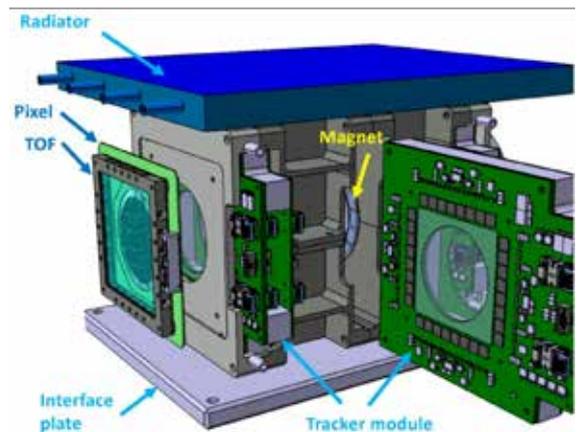


図 8: mini.PAN の概念図

4 シミュレーションと解析ソフトウェアの開発

検出器の開発と並行して、PANの性能を検証するためのシミュレーションや解析ソフトウェアの開発も行われている(筆者の主担当)。これらは個々の検出器の応答を検証し実機開発へとフィードバックをかけることや、dE/dx, Geometric Factor, Stopping Power, 運動量分解能といった検出器性能の検証、さらには運用期間中にPANが受ける総放射線量の見積もり等、PANの性能評価や運用プランの決定に欠かせない役割を果たす。PAN検出器中の粒子と物質の相互作用や粒子の輸送のシミュレーションにはGeant4 [11]を用いている。実機開発や検出器設計の担当者と密に議論を交わしながら正確に、かつ実機的设计に変更があった場合には即座にシミュレーションにも反映させる。

シミュレーションによる性能評価の例として、MSでの飛跡再構成についてご紹介する。PANでは飛跡の再構成にカルマンフィルタを用いており、磁場分布、フィッ

トの初期値, 検出器アライメントといった様々な要素が飛跡再構成の性能に影響を与える。それらを正しく理解し実装することが分解能の改善やより実機に近い(現実)に即した) 飛跡を再構成するうえで非常に重要である。また実機で取得したデータに対しても同一の飛跡再構成アルゴリズムを用いるため, ここでの改善は実機での飛跡再構成性能にも直結する。図 9 にシミュレーションによる mini.PAN 検出器での電子と陽子の運動量分解能を示す。ここで飛跡再構成に使用したシリコンストリップ検出器のヒット情報は $5 \mu\text{m}$ を RMS とするガウシアンでシミュレーションによるヒット位置をなまらせることで位置分解能を考慮している。また 0.4 T の一様磁場を用いている。運動量によっても変わるが全体として 30% より良い分解能で運動量が再構成できることがわかる。高い運動量の領域では磁場の強さの限界から, 低い運動量の領域では多重クーロン散乱の影響により分解能が悪化している。

陽子や電子以外にもヘリウム原子核, 酸素イオン, 鉄原子核等の PAN のターゲットである様々な粒子や原子核に対しても, 飛跡再構成アルゴリズムの最適化と性能評価が進められている。

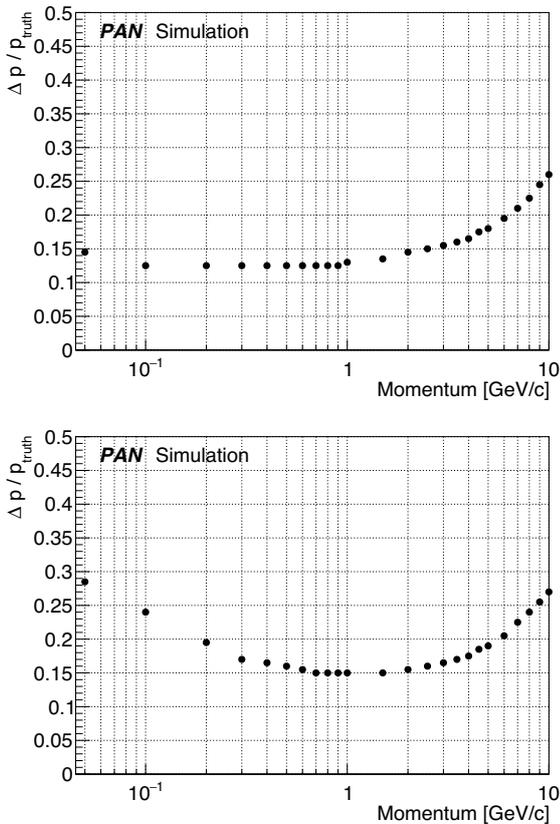


図 9: シミュレーションによる mini.PAN 検出器での電子(上)と陽子(下)に対する運動量分解能

5 Mini.PAN の開発と実機試験

5.1 StripX の設計開発と初期試験

ここでは Mini.PAN 検出器のうちジュネーブ大学が担当した StripX の開発について簡単にご説明する。StripX の設計はストリップや基板等に対する要件を定義したのち, ジュネーブ大学の検出器デザインのエキスパートが CAD に実装し, それをもとに細かい点を詰めていったり微調整したりして最適化を進めた。設計図が完成したら, 企業に依頼してストリップセンサーや基板等の各パーツを製作し, ペルージャ大学のラボで各パーツをはんだ付けして基板実装した。そうして PAN の開発開始から約 1 年半後, 最初の StripX が完成した。このプロトタイプ検出器を用いて初期動作試験が行われた。例えば, 主要な信号線が正しく接続されているかのチェック, 電源投入テスト, 信号読み出しテスト, 線源を用いての応答試験等を行い, 基本動作を検証した。これらのテストに加えて宇宙船に搭載されるために要求される振動試験をクリアしたものが後に述べるビームテストで使用された。

5.2 ビームテスト@CERN-SPS (2021 年 8 月)

2021 年 8 月に CERN の Super Proton Synchrotron (SPS) を利用したビームテストを行った。主な目的はビームを用いた検出器の設計コンセプトの動作検証, 運用時により近い環境での DAQ 及び制御ソフトウェアの整備や動作確認, PAN の検出器間での初の同期試験を行うことである。このビームテストでは SPS からの $120 \text{ GeV}/c$ のほぼ荷電パイオンから成るハドロンビームを使用した。これは PAN がターゲットとするエネルギー ($< 20 \text{ GeV}$) よりも高いが, この時の目的は飛跡を再構成して分解能を確認するといった検出器の性能検証ではなく検出器の基本動作検証なので, 少し高いエネルギーでも十分に目的を果たすことができる。プロトタイプの開発が他より進んでいた StripX とピクセル検出器 (Timepix3) を用いてビームテストが行われた。図 10 に StripX (上) とピクセル検出器 (下) が設置されている写真を示す。StripX はピクセル検出器の少し下流に設置されており, 布をかぶせて遮光されているものの布の下はピクセル検出器と同様にほぼむき出しであった。

図 11 上はピクセル検出器で測定された積分電荷分布を示す。広がりを持った電荷分布が見られるが, これは SPS のビームプロファイル情報と良く一致しており, ビーム粒子を正確に検出できていることが示された。また, ビームに対して検出器の角度を変えながら測定を行

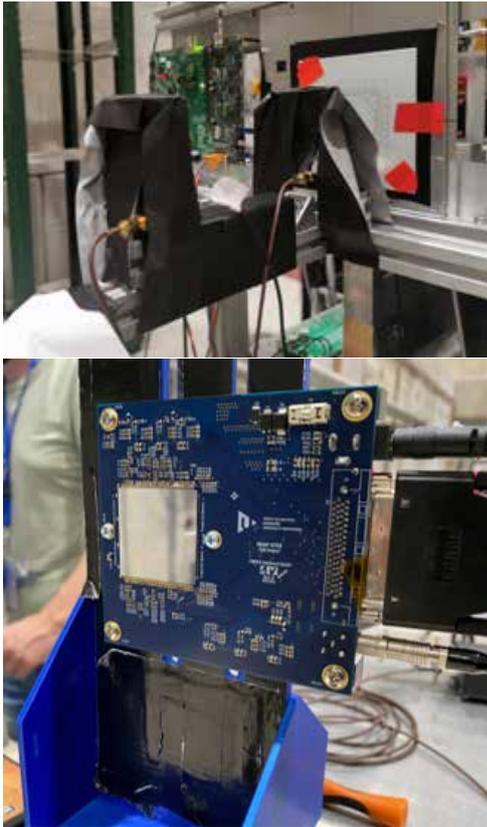


図 10: 2021 年 8 月の SPS でのビームテスト時, StripX (上) とピクセル検出器 (下) が設置されている様子。StripX 検出器は 2 台設置されており, 両方とも黒い布で覆われている。

い, 検出器応答の角度依存性も検証された。図 11 下に見られるように, 予測通りビームに対する角度に応じてヒットのクラスタサイズが変化することが確認された。

StripX でもピクセル検出器と同様にビームプロファイルが再構成できることが確認された。このようにしてビームを用いて StripX, ピクセル検出器が設計コンセプト通りに動作することが確認されていた。ビームテスト終盤には StripX とピクセル検出器を同期してのデータ取得も試みられた。しかし, この時は検出器の完成からそれほど日が経っておらず DAQ システムの整備はほぼ進んでいなかったため, イベントの同期は両方の検出器で同時にスタートボタンを押してデータを取得したのちスタートからの経過時間が近いイベントをしらみつぶしに比較して同一と思われるイベントを探す, という状況であった。そのため, 残念ながらそれほど有用なデータは得られなかったが, DAQ システムの整備が急務であるという機運が高まり, その後 DAQ システムの開発は急ピッチで進められた。

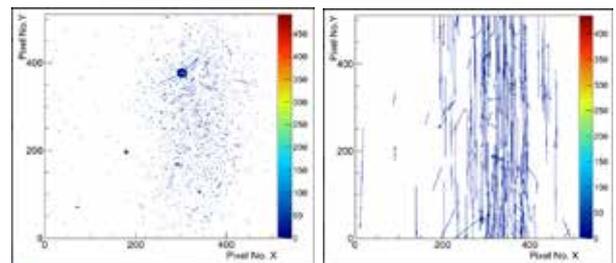
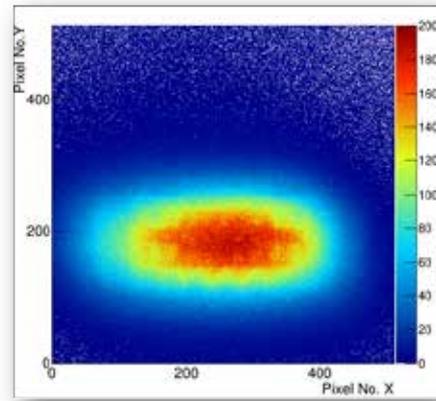


図 11: SPS でのビームテストにおいてピクセル検出器で測定された積分電荷分布 (上) とその角度依存性 (下図, 左 (右) はビームに対して 0 度 (85 度) 回転させた場合)。スケール軸は一定時間に各ピクセルを通過した荷電粒子の数 (一定の ADC 値を超えた事象数)。

5.3 ビームテスト@CERN-PS (2022年6月, 9月)

2021 年 8 月のビームテスト以降もラボでのテストやビームテストを繰り返し, そこで得たフィードバックをもとに, 検出器や DAQ, ソフトウェアの改良を進めていった。そして 2022 年 6 月と 9 月に CERN の Proton Synchrotron (PS) を利用したビームテストでは, いよいよ PAN のすべての検出器を統合して動作試験を行い, 実機で初めて飛跡を再構成することが目標とされた。図 12 にこのビームテストの時の全体のセットアップを示す。左手前の箱が PAN 検出器であり, ビームは手前から奥へと通過していく。1 年前のむき出しのセットアップに比べるとなかなか様になっているように思う。トリガーについても PS が発行するトリガー信号を使って全検出器で同期してデータを取得できるようになっている。

このビームテストでは 100 MeV/c, 250 MeV/c, 500 MeV/c, 1 GeV/c の電子ビームと 1 GeV/c のハドロンビームを使用した。まさに PAN がターゲットとするエネルギー帯である。せっかくのビームタイムを無駄にしないように 8 時間交代制のシフトが生まれ, データ取得が行われた (御年 60 歳になろうかという PAN のボスも「シフトこそ実験だ!」と息巻いてシフトに参加していた)。

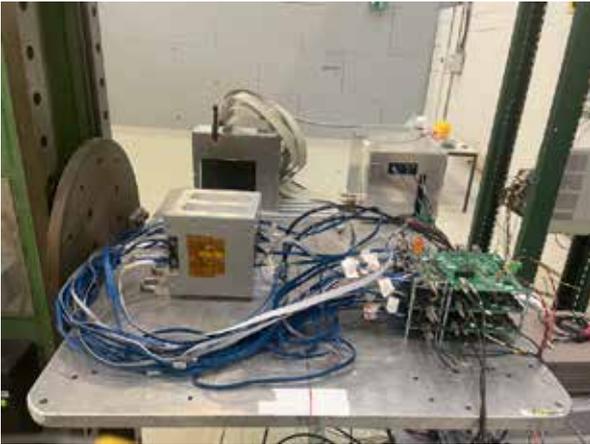


図 12: 2022 年の PS でのビームテストの全体セットアップの写真。左手前の箱が mini.PAN 検出器，右手前が 3 枚の GPIO とアダプターボードから成る PAN の DAQ システム。(それ以外と一緒にビームテストに参加した別実験の検出器。)

図 13 はこの時に実機で取得された $500 \text{ MeV}/c$ の電子の飛跡のイベントディスプレイの一例で，電子の飛跡がきれいに再構成されているのがわかる。PAN 検出器実機で初めて再構成された飛跡であり感慨もひとしおであった。また，それなりの分解能で運動量が再構成できることも確認されている。しかしシミュレーションの結果に比べるとまだまだ劣るため，精査や改善すべき点が多く，残念ながら今回は分解能等の詳細をお見せすることはできない。今後は検出器のアライメントや実際の磁場分布等の理解を更に進め，それを飛跡再構成や実機設計，試験セットアップに反映させることで設計デザインの性能に近づけていく。

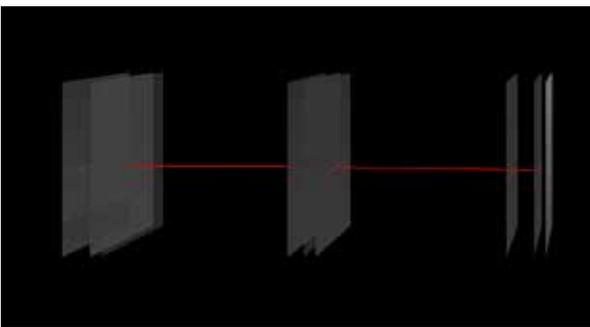


図 13: PS ビームテストでの $500 \text{ MeV}/c$ の電子ビームのイベントディスプレイの一例。StripX と StripY のセンサー部分のみ表示しており，左右に伸びている赤線が再構成された電子の軌道である。(見えづらいが，) 飛跡の再構成に使用されたストリップは黄色で示している。

6 PAN 検出器の応用

PAN 検出器は非常にコンパクトであり，モジュラーなデザインになっている。特に mini.PAN については，上方から見込んだ面積はタブレット端末程度，高さも 10 cm 程度であり，重さも 10 kg とその気になれば一人でも持ち運び可能なサイズである。そのコンパクトでモジュラーな点を生かして，様々な応用種が考案されている。例えば，高レート環境での測定（木星の放射線ベルトでの電子フラックスの測定等）を目的として，mini.PAN のすべてのシリコンストリップ検出器をピクセル検出器で置き換えた Pix.PAN，その Pix.PAN を二台直角に配置した Pix.PAN for REMEC (Radiation Environment Monitor for Energetic Cosmic rays) が考案されている。これらは mini.PAN と並行して開発が進められており，打ち上げ・運用に向けての議論も進められている。他にも，より軽量で省電力な検出器を目的としたシリコンストリップ検出器のみで構成される Thin.PAN，軽量な検出器でのエネルギー測定を目指してシリコンストリップ検出器を 20 層程度並べた Calo.PAN，mini.PAN に加えて新たにタングステンとシリコンストリップ検出器を交互に数層挿入することでカロリメータ的な機能も備えた PAN+Calo などが提案されてきた。これらはシミュレーションによって，オリジナルの PAN 検出器から大きな変更をせずに要求される性能を満たすかどうかを検証される。要求が満たされれば，更に議論して詳細の検討・開発へと進み，要求が満たされなければ，残念ながらお蔵入りとなる。このように柔軟に应用できる可能性を秘めていることも PAN 検出器の良さの一つである。

7 雑感

科学的な記述からは離れるが，ここで筆者が PAN に取り組んだ雑感について述べさせていただきたい。新規実験の始まりや大実験と小実験両方に参加してみてもの雑感であり，何かしらのご参考にでもなれば幸いである。

筆者は学生の頃から LHC-ATLAS 実験 [12] に参加していたが，2019 年末に当時 ATLAS 実験で取り組んでいた研究が一区切りした。そこで次に何に取り組むか考えていたところ，当時のジュネーブ大学のボス（PAN の代表）から新しい衛星実験の研究開発を始めるのだが一緒にやってみないかと誘われ，心機一転取り組み始めた次第である。後に聞いた話だが，PAN の構想自体は 2017 年中盤には既にヨーロッパ宇宙機構や NASA に提出しており，その後 1 年ほど開発予算獲得のために構想の詳細の練り直しや様々な資金提供機関への予算申請を繰り返して，2019 年初頭ようやく予算獲得にこぎつけたとのことである。新規実験開始にはアイデアや綿密

な研究計画と共に情熱や根性が必要なのだなど感じたものである。



図 14: 2020 年 1 月にジュネーブで開かれたキックオフワークショップの集合写真（上、前列の向かって左から 2 番目が筆者）と 2021 年 10 月にプラハで開かれた第 2 回 PAN ワークショップの集合写真（下、最前列の向かって左が筆者）。

2020 年初頭にキックオフワークショップが開かれ、PAN の開発がスタートすることとなった。その段階でのメンバーは 20 人程度であり、その中でも実働は半分程度であった。現在はその倍程度には拡大しているが、それでも 6000 人以上の参加者がいる ATLAS 実験と比べるまでもなく小さなグループである。図 14 上は 2020 年のキックオフワークショップ時の集合写真、下は 2021 年 10 月の第 2 回ワークショップ時の集合写真である。キックオフワークショップの写真に写っているのはその当時の PAN グループのメンバーほぼ全員である。実際、一人がひとつの検出器の開発をほぼすべて担当するという状況であり、筆者にとっては新鮮に感じることも多々あった。その中で感じた小さなグループの良い点として、担当の人物が担当の検出器について詳細を知っている上、担当でない検出器についてもだいたい開発状況や取り扱い方法を知っている（むしろそうでなければ開発が進められない）ということ、開発の進め方や論文出版・国際会議の参加に至るまで、基本的に担当者がきっちり検討・検証した上でボスからゴーサインが出れば OK なので、手続きが非常に少なく物事がスムーズに進むことがあるかと思う。逆に難点としては、担当の人物が病気等で活動できなくなったときその検出器の開発が完全にストップしてしまうこと、人員が必要な時に困りがちなこ

と（例えば、ビームテストの時には近隣他実験（AMS や DAMPE 等）の方に頼んで協力してもらったりする）、大実験と比べてチェックプロセスが少ないため（どちらにしても当たり前のことではあるが）すべてのことに対して一人一人が責任をもち、細心の注意を払う必要があること等があると思う。大きなグループも小さなグループも一長一短あり、それぞれ良さを生かして良い結果につなげていくことが肝要なのであろうと感じる。

PAN はそんな小さなグループながら、キックオフワークショップから 2 年半程度ですべての検出器のプロトタイプが完成し、統合テストから初飛跡の再構成まで達成できたのは色々なことがあった昨今の世界情勢の中で、なかなか悪くないのではないだろうかと思っている。

8 まとめと今後の展望

PAN は深宇宙で 100 MeV/n から 20 GeV/n の宇宙線フラックスを測定する。その目的は宇宙線測定、太陽物理、宇宙天気、宇宙旅行と多岐にわたる。現在、研究開発が進められており、プロトタイプ検出器での統合ビームテストを行い、取得したデータを用いて飛跡を再構成できることが確認された。今後は、細かな修正やビームテストからのフィードバックを加えた最終版の検出器の設計・開発を進めるとともに、ビームテストの結果をより詳細に解析・理解し、実機での性能を設計値に近づけていく。今後 2, 3 年以内での初フライト、深宇宙での宇宙線フラックス測定開始を目指し、実際に搭載する宇宙船の選定や申請、および打ち上げに向けた議論も開発と同時並行で進めている。

References

- [1] X. Wu *et al.* “Penetrating particle ANalyzer (PAN)”. In: *Advances in Space Research* **63** (2019), pp. 2672–2682.
- [2] K. Lübelmeyer *et al.* “Upgrade of the Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02) for long term operation on the International Space Station (ISS)”. In: *Nucl. Instr. Meth. A* **654** (2011), pp. 639–648.
- [3] J. Chang *et al.* “The DArk Matter Particle Explorer mission”. In: *Astroparticle Physics* **95** (2017), pp. 6–24.
- [4] E. C. Stone *et al.* “Voyager 1 Observes Low-Energy Galactic Cosmic Rays in a Region Depleted of Heliospheric Ions”. In: *Science* **341** (2013), pp. 150–153.

- [5] M. Aguilar *et al.* “Precision Measurement of the Helium Flux in Primary Cosmic Rays of Rigidities 1.9 GV to 3 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station”. In: *Phys. Rev. Lett.* **115** (2015), p. 211101.
- [6] M. Aguilar *et al.* “Observation of Fine Time Structures in the Cosmic Proton and Helium Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station”. In: *Phys. Rev. Lett.* **121** (2018), p. 051101.
- [7] A. C. Cummings *et al.* “Galactic Cosmic Rays in the Local Interstellar Medium: Voyager 1 Observations and Model Results”. In: *ApJ* **831** (2016), p. 18.
- [8] Nicola Tomassetti (Private Communication).
- [9] M. Aguilar *et al.* “Periodicities in the Daily Proton Fluxes from 2011 to 2019 Measured by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station from 1 to 100 GV”. In: *Phys. Rev. Lett.* **127** (2021), p. 271102.
- [10] X. Llopart *et al.* “Timepix4, a large area pixel detector readout chip which can be tiled on 4 sides providing sub-200 ps timestamp binning”. In: *Journal of Instrumentation* **17** (2022), p. C01044.
- [11] GEANT4 Collaboration, S. Agostinelli, et al. “GEANT4 – a simulation toolkit”. In: *Nucl. Instr. Meth. A* **506** (2003), pp. 250–303.
- [12] 寄田浩平, 飯澤知弥, 木村直樹. “ATLAS 実験における Fast TracKer (FTK) の開発・構築”. In: 高エネルギーニューズ **35** (2016), p. 146.