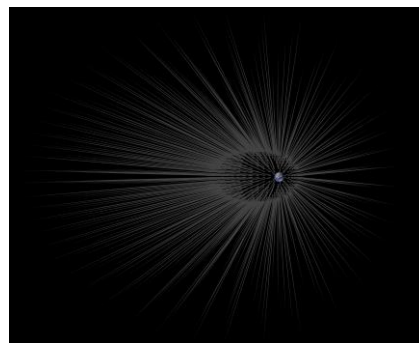


高分解能デジタイザがダークマターの探索に貢献

Spectrum 製 PC カードにより、アクシオン粒子の IBS での高効率検索が暗黒物質を証明しました

銀河などの宇宙における大規模構造の形成、進化、および挙動を説明するために、科学者は暗黒物質の存在を予測してきました。実際理論上は、宇宙には通常の物質の最大 5 倍の暗黒物質（ダークマター）が含まれている可能性があります。暗黒物質を実際に構成するものは何かという疑問は解決されていませんが、科学者たちは多くの候補粒子を特定しています。より有望なものいくつかは、電子の質量のわずか 10 兆分の 1 のアクシオンです。韓国では、基礎科学研究所 (IBS) で専門家チームを編成して研究し、アクシオンを見つけようとしています。最新かつ最先端の実験には、Spectrum Instrumentation 製 高速 PCIe デジタイザが選択されました。



アクシオンは、強い磁場の存在下で光子に変換されると予測されています。そのため、韓国のチームは、超強力な磁石を使用してその正確なシナリオを作成する新しい実験室を建設しました。現象のイメージングはハロースコープを使用して行われ、高速データ収集システム (DAQ) を使用して結果を取得、分析、保存します。

IBS のアクシオンおよび精密物理学研究センターである CAPP では、アクシオンの存在を確認し、最終的にその特性を決定するために、今後 10 年間にわたってさまざまな実験を実施する予定です。最初の実験結果はすでに出ています。CAPP のチームは、1.6~1.65 GHz の周波数に対応する質量が 6.62~6.82 μeV のアクシオンを探しました。検索は、図 1 に示す CAPP 装置を使用して行われました。研究者は、現在までの質量範囲で最も感度の高い結果である 90% の信頼レベルで、アクシオン暗黒物質またはアクシオン様粒子がその範囲に存在しないことを実験的に示しました。

ラボで最近導入されたデータ収集システムの重要なコンポーネントは、Spectrum Instrumentation 製 PCIe デジタイザカード M4i.4470-x8 です。科学者は、最大 180 MS/s の速度と 16 ビットの垂直分解能で 2 つのチャネルで同時に信号をサンプリングできるためこのユニットを選択しました。重要なことは、収集されたデータが PCIe バスを介して 3 GB/s を超える転送速度でコンピュータにストリーミングできることです。つまり、データが失われることなくす

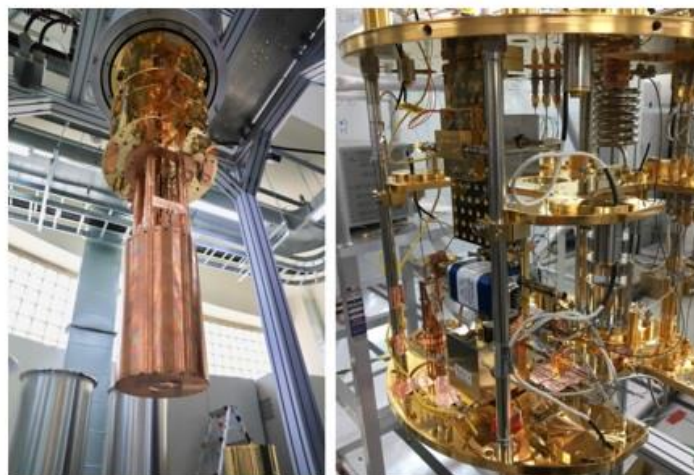


Figure 1: この CAPP 装置には 8 T の超伝導マグネットが搭載されています。キャビティからの微弱な信号 (10-24 W) は増幅され、取得、分析、および保存のために送信される前に、HEMT 増幅器を備えた RF 受信チェーンを介して送信されます。

すべてのデータを取得してホストコンピュータに送信することができます。典型的な実験セットアップのブロック図を Figure 2 に示します。

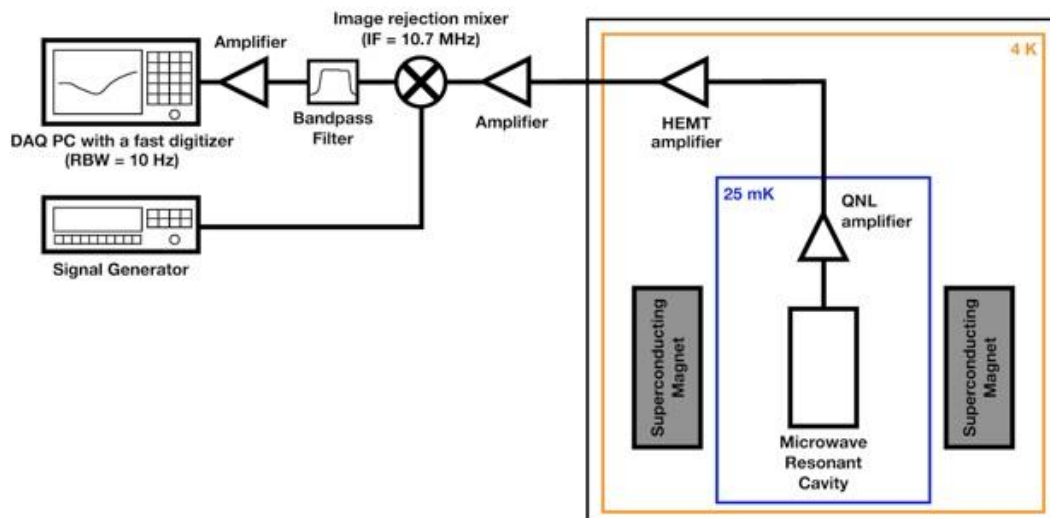


Figure 2: アクシオン検索では、ホロスコープからの信号は DAQ で取得される前に増幅されます

CAPP の研究員である ByeongRok Ko 博士は、次のように説明しています。「私たちの目的は、アクシオンハロースコープ検索の性能指数、つまりスキャンレートを改善することでした。まず、DAQ プロセスにオンラインの高速フーリエ変換 (FFT) が含まれている場合、1つのチャンネルで 99% を超える実用的な DAQ 効率を実現しました。次に、IQ ミキサーと 2つの並列 DAQ チャンネルを使用して、DAQ の効率を損なうことなく、ソフトウェアベースのイメージ除去を実装しました。これは、従来のスペクトラムアナライザの使用に基づいていた以前のセットアップの 2 倍以上の効率です。」

アクシオンハロースコープ検索では一般に、不要な画像背景を導入するヘテロダイン受信機が使用されるため、画像除去は重要です。そのため、高いスキャン速度を維持するためにはイメージ除去が不可欠になります。この場合、高速 DAQ システムは、600~2200 MHz の周波数範囲で約 35dB のイメージ除去を提供します。

「Spectrum デジタイザカードには、これを可能にする 2つの重要な機能があり、それがこのボードを選んだ理由です。」と、ByeongRok Ko 博士は言います。「1つ目は、バッファとして使用できる 2 GSample のオンボードメモリ、2つ目は、3 GB/s を超える速度で連続データストリーミングを可能にする PCI Express x8 Gen2 インターフェイスを介した FIFO 転送モードです。」

DAQ システムのもう 1つの課題は、データの後処理です。これには、単位変換、オンライン FFT、平均化、パワー スペクトルのディスクストレージへの書き込みが含まれます。オンライン FFT は、後処理時間の大部分を占めます。ほとんどの場合、アクシオンハロースコープの実験では、アクシオンの質量が不明であるため、異なる共振周波数でのデータが必要です。

また、さまざまな理由から、各共振周波数のデータは異なるタイムスタンプでいくつかのサブセットに分割できます。このような場合、次のデータを取得している間に後処理を並行して実行できます。幸いなことに、Spectrum 製デジタイザには、幅広いプログラミング言語をサポートするドライバが付属しており、そのうちの 1つが Python です。

Python のマルチプロセッシングモジュールは、このタイプのアプリケーションに最適であり、上記のシナリオを示すために使用されました。



Figure 3: CAPP 実験ホールでは、複数の暗黒物質探索実験を設置して同時に操作することができます。実験室には、並列実験セットアップ用の7つの低振動パッドといくつかの冷凍機と超伝導磁石が含まれています。

CAPP のディレクターであり、KAIST (韓国科学技術院) の教授でもあるヤニス K. セメルツィディス氏は、次のように説明しています。

「この実験は 100 メートル走ではなく、マラソンの最初のゴールです。私たちはそれを行うことで学び、将来的により高いレベルのシステムで使用される新しい概念をテストしました。」 チームは、ターゲット周波数範囲で以前に行われた他のすべての実験よりもはるかに優れた感度に到達できることを証明しました。現在の計画は、より大きなシステムで実験をスケールアップすることです。

検索プロセスを加速するために、CAPP のチームは現在、さまざまなシステム設計を使用して複数の実験を行っています。これにより、異なるアクション質量範囲を同時にターゲットにすることができます。Figure 3 は、複数の実験セットアップを備えた CAPP 実験ホールのパノラマビューを示しています。

これは、https://capp.ibs.re.kr/html/capp_en/ の CAPP Web サイトで実験の進行状況を確認できます。

DAQ システムの開発、さまざまな取得モードおよびテスト結果について説明している研究論文は、次の場所から入手できます。

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/05/P05025/meta>



Spectrum Instrumentation 社について

Spectrum 社は、Spectrum Systementwicklung Microelectronic GmbH として 1989 年に設立され、2017 年に Spectrum Instrumentation GmbH に改名されました。最も一般的な業界標準 (PCIe、LXI、PXIe) で 500 を超える デジタイザおよびジェネレータ製品を作成するモジュール設計のパイオニアです。これら高性能の PC ベースのテスト & メジャーメントデザインは、電子信号の取得・生成および解析に使用されます。同社はドイツの Grosshansdorf に本社を置き、幅広い販売ネットワークを通じて世界中に製品を販売し、設計エンジニアによる優れたサポートを提供しています。Spectrum 社の詳細については、www.spectrum-instrumentation.com を参照してください。