

ニュートリノを識別するための国際プロジェクトで超高速デジタイザを採用

[Spectrum Instrumentation の ADC カードが人類最大の液体ニュートリノ検出器に使用されます](#)

最近まで、ニュートリノ粒子には質量がないと考えられていましたが、現在では理論上、実際には非常に小さな値の質量があり、3つの異なる「フレーバー」があり、それらが入れ替わるようになるとされています。ゴースト粒子と呼ばれることが多いニュートリノ粒子は、通常、ほとんどの物質を妨げられることなく検出されずに通過するため、研究が非常に困難であり、それを捉えるには特別な検出器を構築する必要があります。最新の検出器は JUNO と呼ばれ、中国江門市の地下 750 メートルに設置されており、17 か国 74 の大学や国立研究所で働く 730 名の科学者が協力して、この 4 億ユーロのプロジェクトを実現しています。検出器のコア部分である液体シンチレータの開発には、Spectrum 社の超高速デジタイザカードが使用されています。

JUNO は、研究用のニュートリノ源となる既存の原子炉 8 基の間に正確に配置されています。その中心には、内径 34.5 メートルの巨大で透明度の高いアクリル球があり、特別に開発された 20,000 トンの油状物質が充填されています。この液体シンチレータは、ニュートリノが反応すると光子を生成し、35,000 トンの巨大な水プールに収められています。光子は、球を取り囲む約 45,000 個の光電子増倍管 (PMT) の配列によって検出されます。ミュンヘン工科大学 (TUM) とマインツのヨハネス・ゲーテンベルク大学のチームは、高度なデータ取得を必要とする液体シンチレータの特性を調べる高精度のラボ規模の実験で、Spectrum 製の M4i.2212 デジタイザ



地下 750 メートルの専用実験室にある JUNO のメイン検出器。写真は、中央の足場がある検出器の (まだ空の) 水プールです。この球体の中には、直径 34.5 メートルのアクリル球が置かれ、液体シンチレータが入っています。白いカバーは、取り付け中に敏感な部品を保護するためのものです。

カードを使用しています。JUNO 検出器が 2024 年末に稼働を開始すると、人類が建造した最大の液体ニュートリノ検出器となります。この検出器により、捉えにくいゴースト粒子の相互作用と特性に関する知識が大幅に向上します。

ニュートリノの検出

中央のアクリル球には、水の層に囲まれた液体シンチレータが入っています。どちらも超高純度でなければなりません。わずかな汚染でも放射性物質が含まれている可能性があるからです。建設中、作業員は 2 組の手袋を着用しなければなりません。指紋の汗でさえ汚染され、プロジェクト全体が台無しになる可能性があるからです。検出器は、周囲の放射線から保護するために、地下 750 メートルに特別に掘られた空間に設置されています。

ニュートリノが液体シンチレータ (LS) と相互作用すると、この物質の分子との相互作用のエネルギーが蓄積されます。LS の膨大な光出力 (通常、10,000 光子/MeV 以上) により、蓄積されたエネルギーを正確に測定できます。入射ニュートリノの方向も再現できれば非常に有益です。ここでは、ニュートリノが最初に水を通過するときに発する微弱だが方向性のあるチェレンコフ光がペアになって、物理学者にこの情報を提供します。

ミュンヘンとマインツで現在行われている液体シンチレータの開発の目的は、高速だが微弱なチェレンコフ光を支配的なシンチレーション光から分離し、エネルギーと方向の同時再構成を可能にすることです。そのため、ハンス・シュタイガー博士率いるチームは、集光機能と時間分解能を強化した精密な卓上実験装置をいくつか構築しました。

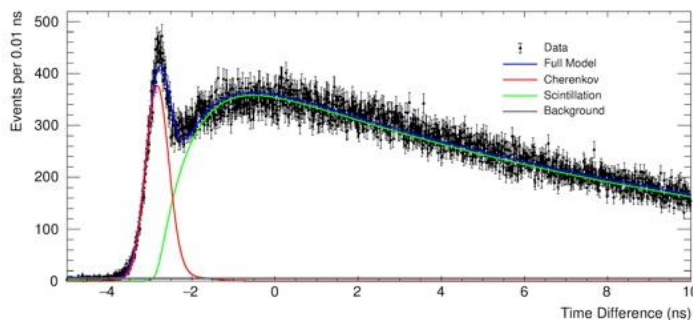
「私たちは、最先端のパフォーマンスを提供してくれるスペクトラムのデジタイザカードを選択

しましたが、他社製品とは異なり高価でも特注品でもありません」と、プロジェクトを率いるハンス・シュタイガー博士は述べています。「スペクトラムのモジュール式アプローチにより、カードに必要な機能を正確に指定できるため、妥協したり、不要な機能にお金を無駄にしたりすることはありませんでした。標準の PCIe 製品であるため、資金が増えたら標準のコンピューターシャーシでシステムを拡張できるのが気に入っています。大規模な長期国際プロジェクトに参加する大学として、私たちは信頼できる部品を必要としており、Spectrum 社の 5 年間保証は私たちに安心感を与えてくれます。」

JUNO の結果は天文学研究も後押し

イベント再構成の作業以外にも、チームは JUNO のキャリブレーションプロジェクトに貢献しています。これは、エネルギーと入射方向が事前に決定されている放射性ガンマ線と中性子線源を使用して検出器材料の特性評価を行うものです。「液体シンチレータの特性評価は、ピコ秒単位で測定される時間枠で作業できる超高速デジタイザカードがあってこそ可能になります。また、5V のダイナミックレンジは、通常 1V である他社製品よりもはるかに優れているため、PMT で発生する 3V パルスを簡単に管理できます」と、TUM グループの博士課程学生 Meishu Lu 氏は指摘しました。マインツで勤務する Manuel Böhlés 氏は、「Spectrum 社は、プロジェクトに最適なソリューションを考案するうえで非常に協力的で、エンジニアの 1 人と直接電話で連絡を取り、問題解決を支援してくれました。私たちの大学のような多くの大学の基礎研究をサポートすることに尽力しているのは素晴らしいことです」と付け加えました。

この図は、チェレンコフ放射からの最初のパルスと、それに続くエネルギー情報を与えるシンチレーション信号を示しています。これは 2 ナノ秒未満で発生します。この情報を組み合わせることで、粒子の種類と発生源を特定できます。発生源は、中国の原子炉の 1 つ、太陽、地球の中心部、または深宇宙である可能性があります。「これまで、シンチレーション検出器でニュートリノがどこから来たのかを正確に知ることはできませんでした。そのため、これによりまったく新しい研究分野が開かれます」とシュタイガー博士は説明します。「たとえば、死にゆく星、いわゆる超新星



低速液体シンチレーション混合物の典型的な光放出運動学。チェレンコフ光 (赤線) は時間的に鋭いピークを形成し、その後低速シンチレーション光の減衰 (緑線) が続きます。

が大量のニュートリノを空に放出した場合、ニュートリノを観察できるだけでなく、爆発が起こった空の点を高精度で再構築することもできます。実質的に、これらのさまざまなニュートリノ源を調べてプロセスをよりよく理解するための望遠鏡ができました。スペクトル全体にわたって光を検出することにより、高い統計、エネルギー分解能、方向性を備えた重力波、そしてニュートリノも検出し、マルチメッセンジャー天文学の新しい時代が始まります。」



Spectrum Instrumentation の M4i.2212-x8 PCIe デジタイザー。4 チャンネルで 1.25 GS/s のサンプリング速度を実現。



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。