

パネル討論

■ 2026年7月10日(金) 14:10 ~ 16:10 | ⅢA(未来館ホール)

パネル討論「次の量子検出技術はなんだ？」

座長:黒澤 俊介(名大・院工)

14:10 ~ 14:30

[3A05] 原子核乾板技術を例にした量子計測技術の基礎研究から社会応用

○中 竜大¹ (1. 東邦大・理)

14:30 ~ 14:50

[3A06] 次世代量子計測に向けたトリウム 229 原子核時計の開発

○高取 沙悠理¹ (1. 岡山大学 異分野基礎科学研究所 量子宇宙研究コア)

14:50 ~ 15:10

[3A08] 高エネルギー原子核実験における次世代量子計測技術とは？
—半導体光検出デバイスと高速データ収集系—○永尾 翔¹ (1. 東大・院理)

15:10 ~ 15:30

[3A07] 見えない粒子を測る技術は、社会にいかに応用されるか：原子核実験からの視点

○古野 達也¹ (1. 福井大・工)

15:30 ~ 16:10

討論

原子核乾板技術を例にした量子計測技術の基礎研究から社会応用
From Basic Research to Social Applications of Quantum Measurement Technology:
A Case Study of Nuclear Emulsions

東邦大学理学部^{*1}

○中 竜大^{*1}

(Tatsuhiko NAKA^{*1})

1. はじめに

これまでの歴史をみても、基礎研究と応用研究は、両輪として相互に連携をしながら学問と科学技術の発展、そして社会の発展に寄与してきた。量子計測技術において、19世紀後半の放射線の発見依頼、原子核物理学、量子力学、相対性理論そして素粒子物理学への発展とそれに伴う計測技術の発達、そして、その計測技術はさまざまな社会実装として結びつき、生命科学、医療科学、材料科学等さまざまな分野へと波及していった。その中で、本講演の題材として挙げる「原子核乾板」は、1910年、木下季吉が写真乾板が放射線（ α 線）の飛跡を記録できることを発見したことを皮切りに、その後、原子核物理や素粒子物理へ広く使われるようになった。その後、写真フィルムの市場拡大と技術開発に大きく助けられ、湯川秀樹が日本人として最初のノーベル賞を受賞する「 π 中間子」の発見に重要な貢献をなすことになった。今現在、原子核乾板はさらなる高度化を果たし、基礎科学のみならず社会実装においても注目されるようになってきている。特に、近年、最も注目をされたのがミューオンラジオグラフィによる大型構造物の内部透視であろう。ここでは、量子計測技術が基礎科学からどのように社会実装にいきついたかについて、原子核乾板の事例を紹介し、その後のパネルディスカッションへの話題提供とする。

2. 原子核乾板とその応用

原子核乾板は、銀塩写真フィルム的一种であり、微細なハロゲン銀(AgBr(I))結晶がポリマー中に分散された構造を持つ。AgBr(I)結晶のサイズは、典型的な原子核乾板で200nm程度であり、ここに放射線（荷電粒子）が通過すると、その電離作用によって内部で化学反応が生じ、最終的に放射線の飛跡を銀粒子の形で光学顕微鏡を用いて可視化することができる（図1参照）。原子核乾板は、この微細なAgBr(I)結晶がセンサーとして機能することから、極めて高い空間分解能を持つ放射線飛跡検出器として機能する。この記録された飛跡を読み出す技術は、光学顕微鏡が基本となるが、それを高速に読み出す技術開発が半世紀近く継続して進められ、それに伴い、原子核乾板実験を用いた実験の大型化が可能となった。

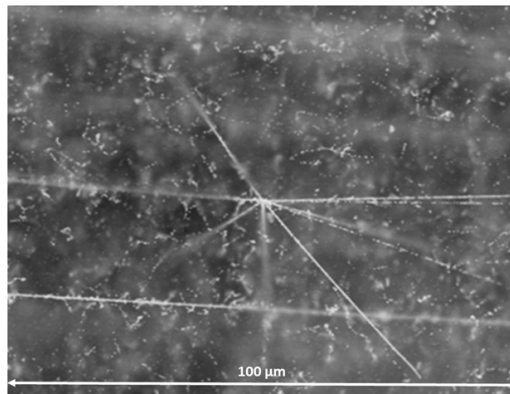


図1 原子核乾板に記録された重粒子線飛跡と核破砕反応の光学顕微鏡画像

原子核乾板を用いた最も大きな実験は2015年の梶田隆章博士がノーベル物理学賞を受賞した「ニュートリノ振動」の最終検証実験として行われたOPERA実験であり、産学連携での大規模な実験が行われ、大型化と効率化におけるさまざまな技術開発が行われた。これらの技術基盤と、原子核乾板が持つ高い空間分解能とそれに伴う放射線飛跡の高い角度分解能ならびに汎用性が、ミューオンを用いた非破壊イメージングに適していることが提案され、ミューオンを用いた非破壊イメージング（ミューオンラジオグラフィ）へと繋がり、基礎・応用科学両面において活用される量子計測技術として発展している。

^{*1} Faculty of Science, Toho University

^{*2} Kobayashi-Maskawa Institute for Origin of Particle and the Universe, Nagoya University

次世代量子計測に向けたトリウム 229 原子核時計の開発
Development of a Thorium-229 Nuclear Clock for Next-Generation Quantum Metrology

岡山大学異分野基礎科学研究所^{*1}

○高取沙悠理^{*1}

(TAKATORI, Sayuri ^{*1})

原子時計は、原子やイオンの量子準位間の遷移周波数を標準として時間を測定する技術であり、現代の量子計測を代表する技術の一つである。特に光格子時計や単一イオン時計では、極めて高い周波数精度が実現されており、重力ポテンシャル差の測定、基礎物理定数の時間変化探索等への応用も進んでいる。他方、トリウム 229 (^{229}Th) は約 8.4 eV という原子核としては特異的に低い第一励起準位（アイソマー準位）を持ち、レーザーによる直接制御が可能な、現在知られる唯一の原子核である。この原子核遷移を周波数標準として用いる原子核時計は、従来の原子時計より高い周波数精度を持つ可能性があり、その実現が期待されている。近年、 ^{229}Th アイソマー準位からの脱励起光の直接観測や、レーザーによる共鳴励起が相次いで報告され、原子核時計の実現に向けた研究が世界的に急速に進展している。

我々の研究グループも、放射光 X 線を用いた独自の励起手法により、 ^{229}Th アイソマー準位からの脱励起光の直接観測に成功し、レーザーでの直接励起に向けた長年の課題であったアイソマー準位のエネルギーおよび寿命の決定に貢献してきた。また、原子核時計の実現には、アイソマー準位の高精度レーザー分光が不可欠であるが、この遷移は波長約 148 nm の真空紫外（VUV）領域に対応するため、専用の狭線幅 VUV レーザー光源が必要となる。我々のグループでは、四光波混合法により、レーザー分光可能な狭線幅 VUV パルスレーザーを開発し、 ^{229}Th をドープしたフッ化カルシウム結晶を標的とした固体中での原子核レーザー分光を行った。実験の結果、固体結晶中における原子核遷移スペクトルの取得に成功した。

このように、我々の研究グループでは、 ^{229}Th 原子核時計の実現に向けて、アイソマー準位からの脱励起光直接観測、および VUV パルスレーザーによるレーザー分光を進めてきた。これらの成果は、原子核遷移を用いた新しい周波数標準および精密量子計測技術の実現に向けた重要なステップである。

本講演では、近年大きな進展があった ^{229}Th 原子核時計研究の現状や今後の展開について、我々の研究グループの成果とともに紹介する。

^{*1} Research Institute for Interdisciplinary Science (RIIS), Okayama University

高エネルギー原子核実験における次世代量子計測技術とは？

—半導体光検出デバイスと高速データ収集系—

Emerging Quantum Detection Technologies for High-Energy Nuclear Physics

—Semiconductor Photodetectors and Streaming Data Acquisition—

東京大学大学院理学系研究科^{*1}○永尾 翔^{*1}(NAGAO Sho ^{*1})1. はじめに

高エネルギー原子核実験では、電子・陽子など加速器から供給される高エネルギー粒子ビームを用い、原子核・ハドロンの構造や相互作用を実験的に解明してきた。その測定には、飛跡検出器、シンチレーション検出器、チェレンコフ検出器、カロリメータなど、多様な検出器が用いられ、粒子の位置、時間、エネルギー、識別情報を同時に取得する必要がある。検出器からの信号は、NIM/CAMAC/VMEなどのフロントエンド回路、さらに各研究所、実験グループ単位で開発されたトリガー型データ収集システムを組み合わせることで読み出されてきた。

一方で、近年の原子核実験では、希少事象の高精度測定に向けたビームの大強度化が進展しており、多チャンネル、精密時間・位置測定、高計数率環境、耐放射線、汎用化などをキーワードとして検出器・読み出し系の高度化が求められている。

2. 注目される技術的要素

このような要求に応えるため、半導体光検出デバイス、高集積フロントエンド回路、ストリーミング型高速データ収集系などを組み合わせた次世代量子計測技術の導入が進みつつある。

浜松ホトニクス社の Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) に代表される SiPM は、小型で高い光子検出効率を有し、磁場中での動作が可能であることから、従来の光電子増倍管に代わる光読み出しデバイスとして注目されており、多数のシンチレーションファイバーやセグメント化されたシンチレータと組み合わせる導入事例がある。

また、多チャンネル・高計数率環境に対応するためには、検出器信号を低雑音かつ高速に処理するフロントエンド回路が不可欠である。近年の原子核実験では、従来型の低速な電荷積分型 ADC といったフロントエンド回路から、サンプリング ADC モジュールや Time-Over-Threshold (TOT) 法、キャリアチェーン型 FPGA-TDC への移行が急速に進んでいる。さらにこれらフロントエンド回路モジュールに入力された全チャンネルの信号を連続的かつ高速に読み出すストリーミング型データ収集系の導入も進んでいる。

3. 導入事例の紹介

このような新世代の量子計測技術の導入により、高レート環境における効率的なデータ収集、複雑な事象選別条件への柔軟な対応が可能となった。また、この技術は小規模から大規模実験までを同じフレームワークで計測可能な汎用システムとなっている。前述の技術要素を取り入れた事例として、宇宙線・密封線源を用いたテスト実験、東北大学や J-PARC の加速器を利用した原子核実験の例を紹介する。これら事例では、従来の技術では回路規模が大きい、または計測困難であった実験を前述の新技术導入によりテーブルサイズのセットアップで実現している。

4. 結論

原子核実験では、多チャンネル化・高精度化・高計数率化に対応する新しい計測基盤が求められており、近年、新技术の発展と導入が進んでいる。本講演では、MPPC、高集積フロントエンド回路、ストリーミング DAQ の導入事例を通じ、その現状と展望を述べる。

見えない粒子を測る技術は、社会にいかに応用されるか：原子核実験からの視点
How can technologies for measuring invisible particles be applied to society?
Perspectives from nuclear physics experiments

福井大学学術研究院物理工学講座^{*1}

古野 達也^{*1}

(FURUNO, Tatsuya^{*1})

原子核物理実験では、原子核、ガンマ線、中性子に代表されるような、目に見えず、直接触れることのできない粒子や反応を測定対象としてきた。そのため、シンチレータ、半導体検出器、ガス飛跡検出器、カロリメータ、高速波形読み出しなど、多様な検出技術が発展してきた。これらの技術の本質は、単に放射線を検出することではなく、その粒子の種類、エネルギー、到来方向、反応位置、時間相関を再構成し、「見えない現象」を物理量として可視化する点にある。

このような原子核実験の計測技術は、基礎科学にとどまらず、医療、環境、産業、宇宙開発など幅広い分野に応用されている。たとえば医療分野では、PET や SPECT などの核医学イメージング、陽子線・重粒子線治療における線量分布や飛程の検証、放射性同位体の製造・品質管理などに放射線計測技術が用いられている。また、環境放射能の監視、非破壊検査、宇宙放射線計測などにも、基礎科学実験で培われた高感度・高分解能な検出技術が活かされている。

本講演では、原子核物理実験で用いられる粒子検出器とデータ解析の考え方を紹介し、それらが社会の中でどのように利用され得るかを議論する。「見えない粒子を捉える」技術は、次世代の医療画像、粒子線治療モニタリング、線量評価において重要な役割を果たす可能性がある。原子核実験を起点として、基礎研究と社会応用をつなぐ量子検出技術の展望を考えたい。

^{*1} Department of Applied Physics, University of Fukui