

# 多段シフターによる時間軸をもつ原子核乾板検出器の開発



高橋 覚

神戸大学大学院人間発達環境学研究所  
satoru@radix.h.kobe-u.ac.jp



青木 茂樹

神戸大学大学院人間発達環境学研究所  
aoki@kobe-u.ac.jp

原子核乾板は、荷電粒子の軌跡を三次元的に  $1\ \mu\text{m}$  以下の空間分解能で記録する強力な飛跡検出器である。その特徴をもとに、宇宙ガンマ線精密観測実験 GRAINE を推し進めている。一方で原子核乾板は本来時間情報を持たず、製造してから現像するまでの間に蓄積する飛跡は、数ヶ月から数年スケール（およそ  $10^7$  秒）の時間的な不定性を持つ。GRAINE 実験を実現するためには、原子核乾板に秒以下の時間分解能を持たせる必要がある。

原子核乾板に秒以下の時間分解能を持たせるために、多段シフターと呼ぶ手法を考案した。多段シフターは複数の原子核乾板から構成され、それぞれを固有の周期で動かすことで時刻に応じた独立な位置関係を創り出し、解析時に飛跡の位置関係を再現することにより入射時刻を秒以下で再構成できる。原子核乾板から構成される多段シフターは、高い効率かつ高い信頼性での時間情報付与、低いエネルギー閾値（運動エネルギーにして、陽子で  $\sim 10\ \text{MeV}$ 、電子で  $< \sim 10\ \text{MeV}$ ）、大面積化が実現可能である。また、シンプルな構成、コンパクト、軽量、トリガー系不要、高電圧不要、低消費電力、不感時間無しが実現可能である。このように多段シフターは、原子核乾板が本来持つ特徴を最大限活かした時間情報付与機構を実現する。これらに基づき、三鷹光器社と実機を共同開発し、気球実験に実戦投入した。

GRAINE 実験の実現を目指して、2011年に、原子核乾板ガンマ線望遠鏡の初めての気球実験を JAXA と共同でおこなった。その中で、ガンマ線電子対生成事象を捉え、0.2 秒の時間分解能を付与し、天球上の到

来方向を決定する一連の流れを確立し、気球搭載原子核乾板ガンマ線望遠鏡の実現可能性を実証した。2015年には、望遠鏡の総合的な性能実証を目指した気球実験を JAXA と共同でおこなった。その中でミリ秒オーダーに迫る時間分解能を実現し、将来的なパルサー位相ごとの偏光測定の見込みを拓いた。今後は口径面積やフライト時間の拡大を図り、科学観測の開始を目指す。

2014年には、原子核乾板の特徴を活かして、ニュートリノ反応精密測定やニュートリノ振動の精密検証を目指し、多段シフターを導入した J-PARC T60 実験を開始した。2014-2015年にかけて2ヶ月近くにわたるニュートリノビーム照射実験をおこない、46.9日に対して時間分解能 7.9 秒を実現するとともに、ニュートリノ振動実験 T2K のニュートリノビーム測定器である INGRID とのハイブリッド解析を確立した。2016年にはスケールアップした照射実験をおこない、126.7日にわたり秒レベルの時間分解能を実現しつつある。今後スケールアップなどを図り、物理実験を計画している。

多段シフターによって、時間分解能は従来手法に対して5桁の改善を果たすなど飛躍的な向上を成し遂げた。将来的なスケールアップを図った実験では、さらにこれらの一桁から二桁程度の向上を目指す。それを実現するための新型多段シフターの開発も進んでおり、その実現見通しが得られつつある。多段シフターによって原子核乾板は有意な時間軸を持つ新しい検出器へと発展し、新しい宇宙線観測や加速器ニュートリノ実験を切り拓く。

## —Keywords—

### 原子核乾板：

荷電粒子の飛跡を捉えることに特化させた特殊な写真乾板。感材である原子核乳剤は、サブ  $\mu\text{m}$  程度の大きさの臭化銀結晶がゼラチン中に分散したものである。この原子核乳剤をプラスチックフィルムの支持体の両面に塗布して実験では使う。原子核乾板は、荷電粒子の軌跡を三次元的に  $< \sim 1\ \mu\text{m}$  の空間分解能で記録する強力な飛跡検出器である。

### GRAINE 計画：

宇宙高エネルギーガンマ線観測は、宇宙における高エネルギー現象に対して直接的な知見をもたらす。現在、2008年に打ち上げられたシリコン飛跡検出器から構成されるフェルミガンマ線宇宙望遠鏡 (LAT 検出器) が活躍しており、これまでに3,000以上のガンマ線源が検出されている。一方で、角度分解能が十分でないことなどに起因する新たな課題も浮かび上がってきており、観測の質的な改善も求められる。GRAINE (Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion) 計画では、高い角度分解能 ( $0.08^\circ$  at 1-2 GeV) および偏光感度を持つ大口径 ( $\sim 10\ \text{m}^2$ ) 原子核乾板ガンマ線望遠鏡による長時間気球フライトを繰り返すことでの宇宙高エネルギーガンマ線 (10 MeV-100 GeV) 観測を計画している。偏光観測では、その観測の困難さから、これまでに有意な観測は成されていない。その開拓を目指し、放射機構に迫る。また、プランクスケールを超えて CPT 対称性の精密検証を狙う。