

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 3 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340057

研究課題名（和文） 超広視野顕微鏡による原子核乾板読み出しの開発研究

研究課題名（英文） Study of ultra-fast nuclear emulsion readout  
with ultra-wide field microscope

研究代表者

中野 敏行 (NAKANO TOSHIYUKI)

名古屋大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：50345849

研究成果の概要（和文）：3次元高分解能飛跡検出器である原子核乾板の読み出し速度を従来比で100倍に向上させる方法を開発研究した。その方法は従来比600倍の視野面積5mm×5mmの顕微鏡光学系を用い、GPUによる画像処理と高速な送り機構を持つ載台によるものである。これによって、大面積の原子核乾板を短時間に読み取ることが可能になることから、次世代の素粒子実験や革新的な放射線計測可能になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Nuclear Emulsion is a three-dimensional radiation detector, which can record high energy charged particles and ions at sub-micron resolutions. We have developed an ultra-fast readout system, which consists of ultra-wide field objective, GPU based computing and quick microscope stage, to analyze large amount of nuclear emulsion plates in the field of particle physics and radiography. This allows a hundred times faster analysis speed compares to a current system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：飛跡検出器・原子核乾板・暗黒物質・ニュートリノ・非破壊検査

## 1. 研究開始当初の背景

原子核乾板とは、荷電粒子の飛跡を厚さ50 $\mu\text{m}$ ～数100 $\mu\text{m}$ 乳剤層中に直径1 $\mu\text{m}$ 以下の銀粒子列として3次元的に記録することができる写真乳剤を用いた放射線検出器である。記録された飛跡の位置や角度の測定は、焦点深度の薄い高NAの対物レンズ使い、数百倍の合成倍率で行う。空間分解能の高さから短寿命素粒子の研究に最適であるが、従来は人による顕微鏡の観察が膨大になるため、

解析対象事象が少数のものに限られていた。

研究代表者は、原子核乾板の読み出しの自動化を実用化し、世界初のタウニュートリノの直接検出に貢献してきた。長基線ニュートリノ振動の最終検証を行う OPERA 実験においては、流し撮りによる超高速な3次元顕微鏡画像の取得方法を考案し、毎時72cm<sup>2</sup>の原子核乾板の読み取り解析を可能にした。

一方で、ダブルベータ崩壊の検出や宇宙暗黒物質探索等の新世代の素粒子研究には1ト

ン以上の原子核乳剤を読み取る必要があり、現状の到達速度では30年以上を必要とする。

## 2. 研究の目的

本研究では超広視野・低収差の対物光学系を用い、一視野の面積を600倍以上に広げ、原子核乾板の3次元画像取得時間を100分の1に向上させることを目標とした手法を確立し以下のような研究に展開することを目的とする。

### (1)素粒子研究

銀河回転運動から期待される宇宙暗黒物質探索においても原子核乾板は有望であると考えられる。WIMPSによる反跳原子核に期待される運動エネルギーをもったイオンを超微粒子原子核乾板(NIT)に照射すると、そのイオンの方向が測定できることが判明している。これはWIMPの飛来方向性が測定できることを意味し、中性子等の等方的な背景事象に極めて強い。本研究で到達できる読み取り速度はDAMA実験が報告する領域を探索するのに必要な数十kgの標的乳剤(乾板300m<sup>2</sup>相当)を1桁上回ることが期待できる。またニュートリノがマヨラナ粒子かディラック粒子かを検証するダブルベータ崩壊の検出実験を原子核乾板によるベータ線飛跡追跡により可能になることが期待できる。これは1トン級の原子核乳剤に10 wt%のソースを箔ないし微粒子で混入し、ニュートリノレスダブルベータ崩壊によるベータ線のエネルギー和のモノクロなスペクトルを測定するものである。また、前述のOPERA実験の提案時点では、乾板の読み取り時間から困難であると予想されていた、低エネルギーなニュートリノ反応の解析効率の向上も見込める。

### (2)放射線計測一般への応用

宇宙線ミュオン貫通フラックスを測定することは、火山や大型建造物の内部構造の測定に利用できる。原子核乾板は電源不要、現場での較正が不要である等の簡便さや、大面積の素粒子飛跡測定を高精度かつ安価(1m<sup>2</sup>~1万円)にできるという特徴があり、他の飛跡検出器に比較して圧倒的に有利である。また、高速中性子に対しては、乳剤中の陽子の反跳を飛跡として捉えることができ、エネルギーと角度を同時に測定することが可能で3次元中性子イメージングへの利用が期待できる。フィルムバッチは、従来は黒化度のみの測定で概ね被爆量のみの検出であったが、原子核乾板を使うことで放射線飛跡の検出が可能になり、重イオンによる被爆であるか電子線等の被爆であるかを判別できることから、高高度もしくは宇宙空間での被爆量の推定の高精度化に利用できる。

これらの応用における唯一の問題点は読み取り速度であり、本研究により改善され

ば、非破壊検査に革新をもたらすことが期待できる。

## 3. 研究の方法

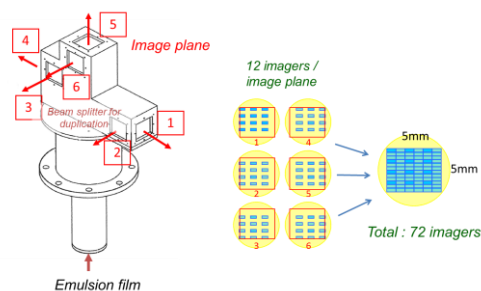
### (1)超広視野顕微鏡光学系用モザイクカメラの読み出し方法の開発

本研究では5.1mm×5.1mmの視野もつ大型超広視野顕微鏡光学系を使用し原子核乾板画像を取得する。開口数はNA=0.65であり、分解能は回折限界である0.4mmに達する。必要な画素数は1.3億画素に達し、目標を達成するためには300画像/秒以上の速度で撮像する必要がある。単一の素子でこれを実現することはできないため、複数の高速2次元撮像素子をモザイク上に並べたものを使用する。構成する一つ一つの撮像素子は、200万画素程度のものが適しており、72個の撮像素子を並べることで全視野を覆い、目標の撮像速度を達成することが可能となる見込みである。ただし、撮像素子には無効領域が存在するため、隙間無く埋めることはできない。従って当初は、1/8の素子数に間引いたカメラにより最適な撮像方法及び画像処理アルゴリズムを研究する。モザイクカメラは近年では天文学での利用例があるが、顕微鏡光学系で広視野を目的とした例はない。天体と異なり、人口照明であることから光量に自由度があるため、ビームスプリッタによる結像面の多数化を行い、撮像素子の隙間を別結像面に撮像素子を配置し補間することを試みる。

### (2)最適画像処理アルゴリズムの探求

画像処理アルゴリズムについては、より高い飛跡弁別性能を達するため、従来のアルゴリズムを改良しつつ、本光学系の特性に適合したものを開発する。特に従来はオフフォーカスな位置にある、飛跡銀粒子像を1次元FIRフィルターで除去していたが、本研究では最適化2次元デコンボリューションフィルターによる抽出を行う。ただし、1素子あたり600M画素の読み出しが行われるが、計算量を最適化し実時間で処理可能なものを想定し開発する。結像面の多数化により生じた、入射光量の低下をS/N比を向上により補うことを考慮する。

光路分割と6個のカメラによる5 x 5 mm<sup>2</sup>画像取得



### (3)原子核乾板載物台駆動方法の検討及び試作

光視野光学系では一回の走査で5mm×5mmの領域を読み取ることができるものの、モザイク撮像素子の隙間や隣接領域は、乾板を移動することで対応しなければならない。この移動速度は極めて重要でスループットを決定する可能性がある。特に隣接領域への移動は0.1秒以下で行いたい。一般的なステップモーターやサーボモーターによる実現を試み、加減速に伴う振動は、カウンターバランスによる打ち消しを行う。要求仕様が高度であるため、ピエゾ素子によるサブミクロン制御の経験を生かし、ピエゾ素子を組み合わせたハイブリッド機構の使用も検討する。

## 4. 研究成果

### (1)並列画像取得系の構築

12個の撮像素子を1つの撮像モジュールとし、広視野光学系の撮像面に設置した。2個の撮像素子のデジタル画像出力を1台の画像処理PCに入力し、計6台のPCで1つの撮像モジュールの画像を処理する。12並列撮像データの毎秒300フレームでの取り込みが可能であることを確認し、後述するGPUによる飛跡認識を研究・開発した。1台のPCには2つのGPUを実装し、各々が独立して1つの撮像素子を担当する。各PCはギガビットイーサネットによる通信で十分な同期精度を得られることを確認した。さらに撮像モジュールを追加し、36素子で視野カバー率50%を達成している。



システム全景写真

### 撮像素子間のキャリブレーション方法の研究・認識効率の評価

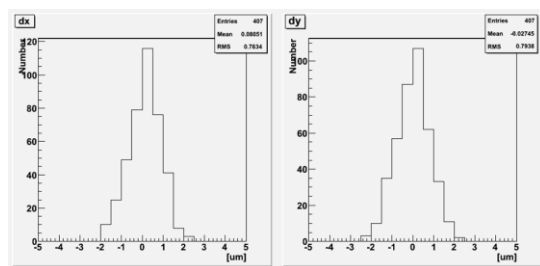
撮像素子間の相互キャリブレーション相互キャリブレーションの手法確立を行い、実際の撮像素子の回転や設計場所からのずれなどの評価を行った。まず相互の位置関係については、同じ飛跡/グレインをそれぞれの撮像素子で測定し、相互の位置関係がどのよ

うになっているのか測定する事で求めた。各撮像素子のコーナーの座標の設計値からのずれを測定し、最もずれていた物でも原子核乾板上での位置換算で11ミクロンであり、撮像素子間のオーバーラップを保証する誤差30ミクロン以内という条件を満たすことができた。また回転はほとんど無いことが確認できた。

### (2)GPUによる並列画像処理による飛跡認識

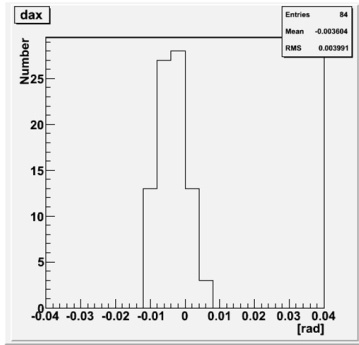
直線状の素粒子飛跡をリアルタイムで認識するためのGPGPUを用いたプログラムの開発を行い、要求される画像処理速度である100ミリ秒/視野を切る45ミリ秒/視野での処理を可能とした。さらに出力されてくる生の飛跡情報をクラスタリング処理するためのCPU処理プログラムの開発を行い、IntelのCorei7を用いたシングルスレッド処理であっても20ミリ秒/視野での処理が可能なアルゴリズムの開発に成功し、一台のPCで2つの撮像素子をホストする事を可能とした。このスピードは目標読み出し速度である5Hzでの読み出しに十分追従できる物となっており、今後のアルゴリズム自身の高度化にも対応できる。その一つとして、対物レンズのNAが小さいことから生じる被写界深度の深さを3次元フィルターにより再構成を行うことで補い、飛跡を構成するグレインをよりS/Nよく抽出することができたと考えられる。

また認識効率は、実際のビームが記録された原子核乾板を読み出すことで評価した。リファレンスとしては従来型の読み出し装置“SUTS”であり、SUTSで認識された飛跡の何%がHTSでも認識できたか、また認識した飛跡の位置ずれ、角度ずれなどを評価した。飛跡認識の再現率は93~94%であり、この値は、SUTSの再現率とほとんど同じで遜色ない物となっている。また位置、角度分解能も遜色ない実用に十分な物となっている事が確認できた。



認識に成功した飛跡の位置再現精度

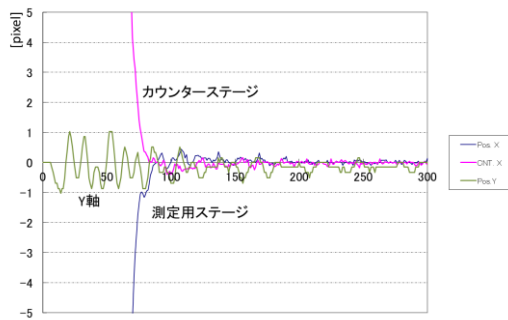
0 - 100  
[mrad]



同角度再現精度

### (3) 原子核乾板送り高速ステージの構築

当初の計画通り、振動補償用カウンター機構を組み込んだ高速ステージを構築した。視野サイズに相当する 5mm ステップの駆動試験を行った。駆動時間 60 ミリ秒、加速度により引き起こされる振動の減衰時間は 60 ミリ秒程度となっている。5mm×5mm×16 枚の 3 次元画像取得は 60 ミリ秒程度で行うことができることから、毎秒 5 視野の画像取得が可能になった。この時の振動は撮像素子の ±0.5 ピクセル内に抑えることができている。ステージ位置決め用エンコーダーによる測定では、駆動から 70 ミリ秒には ±0.5 ピクセル内に収まっており、光学画像による評価でも ±1.5 ピクセル内に収まっていることから、最終的には当初計画の 2 倍である毎秒 10 視野での画像取得が可能であると考えている。また GPU による画像処理で、振動の影響を受けた画像を補正する方法についても開発できたため、機械的・画像処理の両面で更なる高スループット化が可能であることが分かった。



フィードバックエンコーダーによる位置制御精度

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

① 宮下英治・吉本雅浩・駒谷良輔・中野敏行、超高速原子核乾板自動飛跡読取装置 (HTS) の開発、日本物理学会、2013 年 03 月 26 日～2013 年 03 月 29 日、東広島

② 吉本雅浩・宮下英治・駒谷良輔・中野敏行、原子核乾板技術 超高速飛跡読取装置 (HTS) の開発、日本物理学会、2012 年 09 月 11 日～2013 年 09 月 14 日、京都

③ T.Nakano、Development of Nuclear Emulsion Technology and an application to Muon tomography、International on Workshop on High Energy Geophysics 2011、27 Oct. 2011、Tokyo

④ 中野敏行、次世代超高速原子核乾板自動読み取り装置の開発、日本写真学会 2010 年度秋季研究発表会、2010 年 11 月 30 日、京都

[その他]

ホームページ等

<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中野 敏行 (NAKANO TOSHIYUKI)

名古屋大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：50345849