展　望・解　説

原子核乾板技術の進化と展開〜デジカメ時代を生き抜くアナログフィルム〜

名古屋大学
長縄 直崇*, 福田 努, 北川 暢子, 小松 雅宏, 森島 邦博, 中 竜大, 中野 敏行, 西尾 晃,
六條 宏紀, 佐藤 修
名古屋陽子線治療センター
木村 充宏, 歳藤 利行

Circumstances of nuclear emulsion are dramatically changing. Firstly, we particle physicists became able to develop and produce nuclear emulsion by ourselves in our laboratory. Secondly, speed of automatic readout system for tracks recorded in emulsion has been remarkably increasing. By those changes, contributions of emulsion technology to knowledges is increasing in fields not only as particle and cosmic ray physics where emulsions have been traditionally used, but also in new application fields including radiology and cosmic ray imaging of large-structures (e.g. pyramids), which require analyses with large statistics. Thirdly, a new type of emulsion, so-called "fine-grained nuclear emulsion", was developed successfully for particle dark matter search. The emulsion is stimulating related fields. Also a slow neutron detector with a high spatial resolution was successfully developed using the emulsion gel and is expected to be used in fundamental physics and applied science. In this article, those status and future prospects are described.

Keywords: nuclear emulsion, automatic readout system, astroparticle physics, cosmic ray imaging, radiology

Evolusion of nuclear emulsion technology and its applications –Survival of analog film through the era of degital cameras–
Naotaka Naganawa*, Tsutomu Fukuda, Nobuko Kitagawa, Masahiro Komatsu, Kunihiro Morishima, Tatsuhiro Naka, Toshiyuki Nakano, Akira Nishio, Hiroki Rokujo and Osamu Sato (*Nagoya University*), Mitsuhiro Kimura and Toshiyuki Toshito (*Nagoya Proton Therapy Center*),
〒464–8602 名古屋市千種区不老町
TEL: 052–789–3532, FAX: 052–789–2864,
E-mail: naganawa@flab.phys.nagoya-u.ac.jp

1　原子核乾板 高分解能三次元飛跡検出器

原子核乾板は，荷電粒子の飛跡の検出を目的とする写真乾板の一種である．これまでの典型的な原子核乾板は，ゼラチン中に直径約 200 nm のハロゲン化銀結晶を密に分散して調合した原子核乳剤をプラスチックやガラス等の透明な支持体に塗布したものである（Figs. 1a, 1b）．荷電粒子が乳剤層中を高速で飛行すると，それが貫通した結晶ひとつひとつの内部に，一定の確率で，3 個または 4 個以上の 0 価の銀（原子）からなる[1] 銀のクラスター（潜像）が生じる．現像により，この潜像を起点として金属銀が曲線（フィラメント）状に成長し，光学顕微鏡下で観測可能な大きさになる．そして顕微鏡の分解能の限界により，このフィラメントが直径 1 μm 未満の銀の粒子として観測される．この現像後の銀粒子が三次元的に連なったものが荷電粒子の飛跡として認識される（Figs. 1c, 1d）．飛跡はこのようにして生じるため，原子核乾板はサブミクロンという極めて高い空間分解能を持つ．そして，乳剤層中で起きた素粒子反応等の現象を全立体角（4π sr）に渡ってそのまま写し取り，記録する能力を持つ．そして，平方メートルの規模の大面積化も可能であり，三次元高分解能飛跡検出デバイスとして，未だデジタルデバイスの追随を許していない．

原子核乾板の高い分解能と優れた可視化能力は，パイ中間子[2]，チャームクォーク[3] を含む中間子，ダブルハイパー核[4–7] などの数々の発見およびその後の理解の精密化をもたらしてきた．一方で，原子核乾板は解析に膨大な時間を要し，それを短縮することが大きな課題であったが，丹羽等が飛跡自動読取装置を提唱[8]，開発し，その高速化[9–11] およびデータの自動解析技術の高度化[12–14] により解決され，タウ型ニュートリノの発見[15]，ミュー型ニュートリノからタウ型ニュート

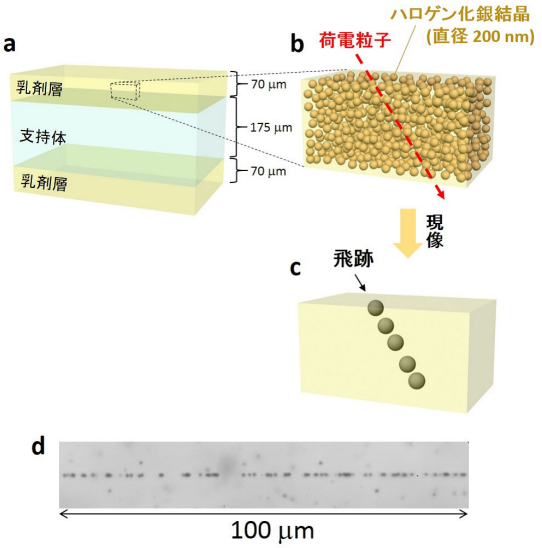

Figure 1. a: A schematic view of a typical structure of nuclear emulsion. Layers of nuclear emulsion gel (emulsion layers) are formed on both sides of a transparent substrate. b: A schematic view of an emulsion layer which consists of gelatin and silver halide crystals densely dispersed in gelatin. c: A schematic view of a track in an emulsion layer after development. d: An optical microscope view of a track of a minimum ionizing particle detected by nuclear emulsion.

Figure 2. Our machine for the production of nuclear emulsion gel. It is produced by adding aqueous solutions of silver nitrate and alkali metal halides, which are distributed into four cylinders, and added accurately and precisely into an aqueous solution of gelatin contained in the pot at the front.

リノへの振動の発見[26] 等をもたらした．それと共に，放射線医学[44] や宇宙線による大規模構造物の透視イメージング[39–41] 等への応用が始まった．そして現在，読み取り装置の更なる高速化[22] と共に，後述のニュートリノ実験[30,31,33–35]，γ 線による天体の観測[36]，宇宙線イメージング等において使用量が大きく増大している．その一方で，暗黒物質探索[47] のために新たな超微粒子原子核乳剤[48] を開発し，周辺の研究分野が刺激されている．さらにそれを用いた超高分解能低速中性子検出器[63] なども誕生した．

2 研究室で始まった原子核乾板の製造

2.1 経緯

2008 年頃より，暗黒物質探索実験とその基礎研究のための安定な超微粒子原子核乳剤の開発および製造が必要になった．また，後述する宇宙線イメージング，γ 線天文学など，大量の原子核乾板を必要とし，使用法や要求性能が異なる複数の実験を可能にする体制作りの必要性に迫られていた．一方でデジタルカメラ全盛の時代となり，写真フィルムメーカーにおける新しい原子核乾板の開発が困難な状況が訪れていた．そして，従来型の原子核乾板についても安定な供給体制を確保する必要があった．この状況に対応すべく，フィルムメーカー OB の協力の下，2010 年より名古屋大学物理学教室 F 研究室において原子核乳剤の開発・製造が可能な体制を整えた．これにより，自らによる供給が可能になっただけでなく，ユーザーである素粒子研究者が乳剤の中身を知った上で，より合目的的に，個々の実験に特化した性能を持つ乳剤を設計，開発することが可能になった．支持体についても，実験毎に最適なものを選択・開発できる自由度が増し，個別の目的に対して，より最適化した乾板を作ることができるようになった．また，写真技術の一部を継承するという使命も帯びることとなった．

2.2 原子核乳剤の製造

原子核乳剤の製造は，ゼラチン水溶液中に硝酸銀水溶液とハロゲン化物の水溶液を添加，混合して行っている．ゼラチンの保護コロイド性を利用してゼラチン中にハロゲン化銀結晶が分散した乳剤を調合する．次に，不要なイオンを除去した後に，硫黄化合物と金化

合物を用いて化学的に増感する．その後，プラスチックのフィルム等に塗布することで原子核乾板となる．実際には，Fig. 2 のような乳剤製造装置を用いて液の温度，添加速度と時間，攪拌速度等を精密に制御し，製造を行っている．それらの条件および薬品の添加により，用途に応じて，ハロゲン化粒子径約 20 nm から約 800 nm の乳剤の製造が可能である（Fig. 3 参照）．最小電離粒子の飛跡を主な解析の対象とする実験には，通常，直径 200 nm 以上の結晶からなる乳剤を用いている．後述する暗黒物質探索実験には結晶の直径が約 40 nm のものを用いており，この乳剤を超微粒子原子核乳剤と呼ぶ．

2.3　ハロゲン化銀粒子径 200 nm の原子核乾板

ハロゲン化銀粒子径 200 nm の原子核乳剤は，ほぼ光の速度で飛行する電子等の最小電離粒子にも感度を持つように設計している．十四面体型のヨウ臭化銀結晶を採用しており，その結晶には組成の異なるコア部とシェル部からなる二重構造を持たせている．そして，結晶の表面を金化合物および硫黄化合物によって化学的に処理することにより増感している．また，乳剤層中に含まれる放射性同位体に由来する β 線や γ 線による背景事象を低減させるために，乳剤中のカリウムの放射性同位体 ^{40}K を除去するべく，通常の写真乳剤の製造に用いられているカリウム化合物を全てナトリウム化合物に置き換えて製造を行っている[16]．結晶はゼラチンの保護コロイド性により均一に分散されており，通常は飛跡の角度精度を高めるためにプラスチックなどの支持体の両面に塗布して使用する．乳剤層の厚みは約 50 μm–1000 μm と実験によって異なる．乳剤層における結晶の体積充填率は 30 %–55 % の間で用いることが多い．原子核乾板の性能は通常，荷電粒子に対して飛跡が生じる感度の指標として，飛跡を構成する銀粒子の個数の，飛跡に沿った線密度（grain density，以下「GD」と略す），ノイズの量の指標として，荷電粒子の通過と無関係に化学的にランダムに生じる銀粒子（フォグ）の体積あたりの個数（fog density，以下「FD」と略す）を用いて表す．一般に，GD が高いほど，そして，FD が低いほど良い．現在到達している性能を以下のように調べた．製造したヨウ臭化銀結晶径 200 nm の乳剤（乾燥時の結晶の体積充填率 35 % 相当）を支持体に塗布し，分子科学研究所の極端紫外光研究施設（UVSOR）にて 10 MeV–100 MeV の電子線を乾板の表面に対して平行に照射した．現像液（XAA）により 20 °C の下 25 分間現像した後，光学顕微鏡画像を CMOS カメラで取り込み，その画像上で GD および FD を目視により測定したところ，GD~37/100 μm，FD~1/1000 μm^3 であった．これらの指標において，ニュートリノ振動実験 OPERA に用いた富士フィルム社製の原子核乾板 OPERA FILM[18,19] に遜色の無い性能に到達している．さらに，GD の上昇を目的として，ヨウ臭化銀結晶の体積充填率を 55 % にまで増加させた高感度原子核乳剤を開発した．この乳剤に電子線を照射し，現像液（XAA）により 20 °C の下 40 分間現像し，光学顕微鏡下で目視により GD および FD を測定したところ，GD~86/100 μm，FD~3/1000 μm^3 という結果を得ることができ[17]，OPERA FILM の 2 倍以上の高い GD と十分に低い FD を達成した．一方で，原子核乾板には潜像退行と呼ばれる問題が存在する．潜像退行とは，荷電粒子の通過による飛跡の記録（潜像の形成）から現像までの期間に潜像が破壊され，GD が減少してしまう現象である．潜像退行は水分や酸素によって促進されることが知られており，$4Ag + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Ag^+ + 4OH^-$ の反応式により説明される．長期間の照射をともなう物理実験や応用実験において，記録された GD が減少し，認識が困難になることは致命的な問題である．我々は原子核乾板を低湿度環境下で保管して含水量を調節した後に密封し

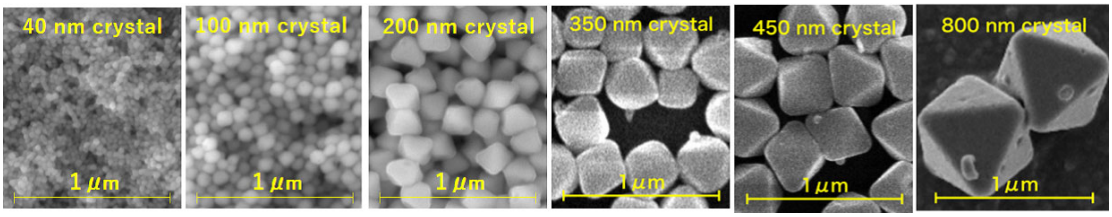

Figure 3.　Emulsion gels with various sizes of silver halide crystals are successfully produced. Among them, images are shown for the ones with crystals sizes of 40 nm–800 nm in diameter. Images were taken with an electron microscope after their gelatin was removed with treatments using actinase.

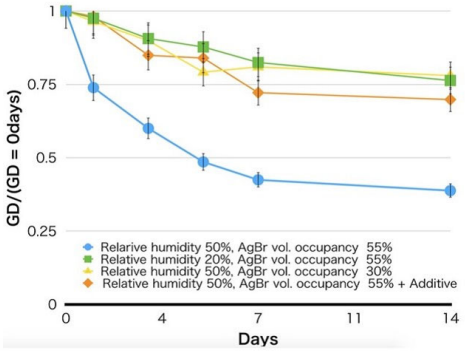

Figure 4. A comparison of behaviors of latent image fading of nuclear emulsion at 35°C for different storage conditions and compositions of emulsions. Relative humidity, volume fraction of AgBr·I crystals, and addition of an addidive were varied.

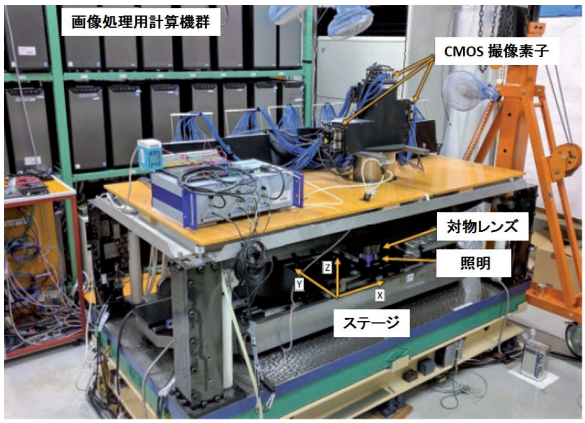

Figure 5. The current fastest automatic read-out system, HTS.

て使用することで，潜像退行の抑制に成功している．潜像退行は高温でも加速される．厳しい使用条件の例として，宇宙線イメージングをエジプトのピラミッドで行う際には，時には 30 °C 近い環境下で 3 ヶ月近く観測を続けなければならない．我々はこのような要求に対応するべく研究・開発を行い，ゼラチンとヨウ臭化銀結晶の量の比（すなわち結晶の体積充填率）[20] や種々の添加薬品[21] が潜像退行に影響していることを突き止め，潜像退行を大幅に抑制することが可能となった（Fig. 4）．これにより，様々な実験において長期間の観測や高温環境下での観測が可能になり，原子核乾板活用の幅がひろがった．

2.4 製造の大規模化

近年，特に後述するニュートリノ実験，γ 線天文学，宇宙線イメージング等において必要とする乳剤の量が大きく増大しつつあり，2021 年に現在の約 10 倍の，年間数千 m^2 分の乳剤の製造を可能にするべく準備を進めている．

3 飛跡の自動読み取り装置の進化

3.1 自動飛跡読み取り装置

原子核乾板に記録された飛跡の自動読み取りは，1974 年，丹羽らによってその概念が提唱された[8]．飛跡の読み取り装置とは，原子核乾板に記録され，現像によって生じた直径 1 μm 弱の現像後の銀粒子の並びから，入射した荷電粒子の飛跡位置および角度を読み取り，出力するものである．両面に原子核乳剤が塗布された原子核乾板の片面の乳剤層において，読み取りに用いる厚みは多くの場合，60 μm 程度である．GD が 40/100 μm であれば，荷電粒子が垂直に入射した場合には平均 24 個の銀粒子が飛跡に沿って並ぶことになる．名古屋大学 F 研究室では，高分解能な原子核乾板でのみ成しえる素粒子物理学研究を推進するため，1980 年代から継続的に自動飛跡読み取りの開発を行ってきた[9–11]．我々の開発した「自動飛跡読み取り装置」は顕微鏡下での断層画像を厚さ方向に撮影することで，原子核乾板の三次元情報をデジタル情報に変換し，主には自然放射能に起因する MeV 程度のエネルギーの成分を除外し，数十 MeV/c 以上の運動量をもつ飛跡のみを三次元画像処理によって抽出する．原子核乾板の適用範囲を広げる上で，飛跡読み取りの高スループット化が常に鍵となってきた．最新世代の自動飛跡読み取り装置，Hyper Track Selector（HTS）[22]（Fig. 5）は，理論分解能 410 nm を持ちながらも 5 mm × 5 mm という広い視野を持った光学顕微鏡である．この視野を，72 個の CMOS 型撮像素子を用いて，およそ 1 億 5 千万画素でデジタル化する．読み取りに用いる乳剤層の厚みが約 60 μm であれば，焦点深度方向に 4 μm 間隔で撮影することで，ほぼすべての銀粒子の情報を得ることができる．これらを 72 個の GPU と 36 個の CPU によって撮像と同時進行で飛跡認識・測定を行うことで，5 視野/秒，すなわち 4500 cm^2/時間（片面の乳剤層換算）に相当するスループットを達成した．これは 5 台の装置を使用して数十 m^2/年の読み取りを行っ

たニュートリノ振動実験 OPERA で活躍した前世代の装置（S-UTS）[11] と比較して，およそ 60 倍となっている．現在にいたるまでの読み取り装置のスループットの変遷を Fig. 6 に示す．

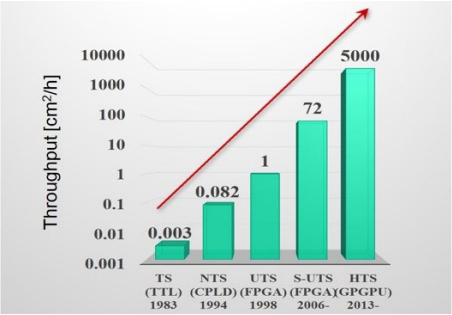

Figure 6.　Changes of throughputs of automatic nuclear emulsion readout systems. A name of image processor for each system is written in a bracket.

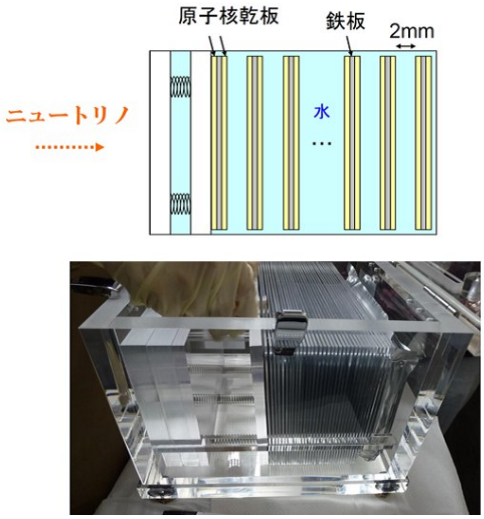

Figure 7.　Upper：A water-target neutrino detector based on nuclear emulsion. Light-tight packages of single iron plates put between pairs of nuclear emulsion films are interleved by water of fixed thickness. Lower：A picture taken during the assembling of the detector. The thickness of water was fixed by spacers with a structure similar to a frame made of acrylic plastic interleaving packages. A pressure for fixing the whole structure was given by springs. Water was poured finally.

また飛跡の認識（検出）効率は，1 枚の乾板の両面の乳剤層で認識できた飛跡について概ね 97 %，原子核乾板 1 枚によって得られる角度分解能は，支持体の両面の飛跡を接続することで，荷電粒子が乾板の表面に対して垂直に入射した場合でおよそ 2.4 mrad，45 度入射時で 6.8 mrad を達成している．

4　ハロゲン化銀結晶径 200 nm の乳剤を用いた素粒子・宇宙線物理学への展開

4.1　ニュートリノ実験

ニュートリノには電子型，ミュー型，タウ型の 3 つのタイプ（フレーバー）が存在する．タウ型は原子核乾板を用いた DONuT 実験によって初めてその存在を確認（発見）した[15]．そして，当初，素粒子標準理論においてニュートリノの質量はゼロとされていたが，それでは起きないはずの，ニュートリノがそのフレーバーを変化させるというニュートリノ振動が発見された[23–26]．ミュー型からタウ型への変化は，原子核乾板を用いた OPERA 実験が，変化後のタウ型ニュートリノの出現を直接検出することで最終決着した[26]．これにより，素粒子標準理論が不完全であることが示された．近年のニュートリノの実験研究はニュートリノ振動の「発見」を超えて，その「精密測定」の時代へと移行した．そして次の 1–3 が主要なテーマとなってきている．

1. ニュートリノとその反物質である反ニュートリノの振る舞いの違い（「CP 対称性の破れ」）を調べ，宇宙の反物質の量が異常に少ない理由に迫ること．
2. 三種類のニュートリノの質量の大きさの順序（「質量階層性」）の決定．
3. 既知の三種類以外に，ステライル（反応しない）ニュートリノが存在する，という仮説の検証．

これらを通じて不完全な素粒子標準理論を超えた究極の理論の構築の手がかりが得られることが期待されている．ニュートリノ振動の精密測定のためには，ニュートリノと原子核内物質との反応の種類とその起こりやすさ（反応断面積）の精密測定が決定的に重要であり，原子核乾板技術はこれを可能にする．原子核乾板のサブミクロンの位置分解能と全立体角に渡って飛跡を記録する能力，それを引き出す大角度飛跡の高速自動解析技術[27,28] を活かし，他のニュートリノ検出器では観測が難しい，飛程がミリメートル程度の短い飛跡を高い効率で検出し，従来と質的に異なる反応断

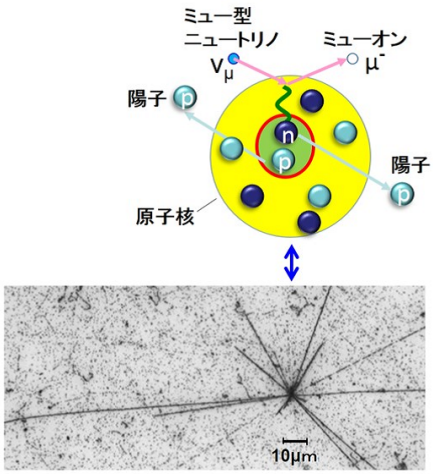

Figure 8. Upper: A schematic view of a type of neutrino interaction which is thought to be a source of an ambiguity of interaction cross section and whose first observation is expected. A muon neutrino interacts with a quark in a nucleus, and a muon and two protons are emitted. The protons are emitted back to back. Lower: A microscopic image of a neutrino interaction detected by a nuclear emulsion film. Tracks of more than ten secondary particles which were radially emitted were observed. All of the charged particles from interactions are possible to be investigated.

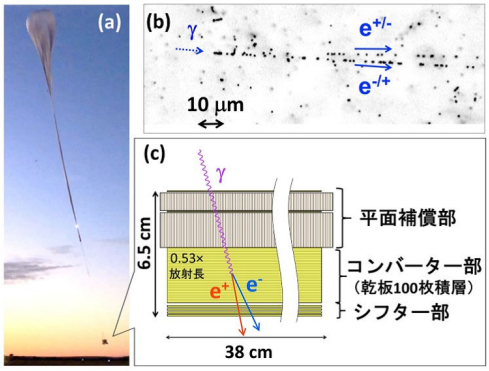

Figure 9. (a): A Gondola borne by a balloon (2018, Alice Springs). (b): A general example of a production of an electron pair in nuclear emulsion. The pair was produced by 40 MeV γ-ray. Tracks of the pair just after the production was visualized by the high spatial resolution of nuclear emulsion. (c): A schematic view of an emulsion detector in the Gondola. It consists of a part for compensation for unevenness of emulsion films (flatness compensation part), a part for conversion of γ-ray to electron pairs (converter part), and a part for giving time information to tracks (shifter part).

面積測定ができる．現在，3 つのフレーバーのニュートリノのいずれも反応断面積の不定性が大きく，精密測定の障害となっている．我々はこれを解決すべく複数の実験を立ち上げた．ミュー型・電子型ニュートリノのついては，世界中の水標的ニュートリノ検出器（スーパーカミオカンデなど）の中で起こる反応について断面積の不定性を減らすべく，実際に水と原子核乾板を交互に配置した水標的原子核乾板ニュートリノ検出器[29]（Fig. 7）を開発し，それを用いた NINJA 実験[30] を J-PARC にて行い，ニュートリノが起こす反応を詳細に調べている．特に，不定性の源となる Fig. 8 上図のようなタイプの未確認の反応様式の測定を考えている．この実験中に，ミュー型ニュートリノが乳剤層中で起こした反応の顕微鏡写真が Fig. 8 下図である．また，タウ型ニュートリノの反応断面積については，欧州の CERN 研究所にて SHiP 実験[31] を計画中である．この実験では磁場中に検出器を置くことで，反応により生成したタウ粒子の電荷の正負を判定し，タウ型ニュートリノと反タウ型ニュートリノを識別した測定を目指している．そのために磁石と組み合わせた新しい原子核乾板ニュートリノ検出器[32] の開発を進めている．これらの実験と，それを支える補完実験（EMPHATIC 実験[33,34]，DsTau 実験[35]）を通して世界最高精度のニュートリノ反応断面積の測定を行う．

4.2 γ 線天文学

宇宙からの γ 線は，宇宙で起こる荷電粒子の加速現象に関する情報を運ぶ．そのような天体現象を詳細に調べるには，検出器の高い角度分解能と大統計が必要である．原子核乾板は極めて高い位置分解能を持ち，大面積化が容易であるため，この用途に最適である．GRAINE 計画[36] では，気球に原子核乾板を搭載し (Fig. 9 (a))，観測を行っている．γ 線の検出は，電子対生成によって生じる電子と陽電子の飛跡 (Fig. 9 (b)) の検出によって行う．原子核乾板の極めて高い空間分解能により，対生成点直下の飛跡を精密に測定できる．それにより，γ 線の到来角度の分解能は，1 GeV の γ 線に対して 0.1 度に到達している．さらに，対生成した電子対の放出面の角度を測定することで，天体か

らのγ線の偏光の測定も行える．GRAINE では，観測中に検出器が向いていた方向を知るために，CCD カメラで恒星を撮影し続ける．この情報と電子対の飛跡が記録されたタイミングの対応付けが必要となる．それには，それ自体では時間分解能を持たない原子核乾板に，高い分解能力で時間情報を持たせることが必要となる．そこで GRAINE グループは，Fig. 10 に示す，ステッピングモーター駆動の原子核乾板「多段シフター」[38] を用いる独自の手法を開発した．実験で用いる原子核乾板検出器の主要な部分は Fig. 9 (c) のように，「コンバーター」部とシフター部からなる．γ線が検出器に到来すると，コンバーター内で電子対に変換され，その電子対はコンバーターと複数層のシフターを同時に貫通する．各シフターには観測時間と共にその位置に微小な変化が与えられる（Fig. 10 上）．すると，コンバーターと複数層のシフター間で再構成される飛跡の間には時間に応じた位置ずれが生じ，ずれ量から飛跡が通過した時刻を特定できる．シフターという手法自体は，原子核乾板を搭載した気球実験（通称「MSC 実験」）[37] において考案され，エアバッグを利用した単層のシフターとして用いられ，原理実証がなされたものである．GRAINE では多段化したシフターを考案，開発し，1 週間におよぶ長時間フライトにおいて秒以下の時間分解を可能にした．GRAINE 計画ではこれまで 3 度の気球実験を行い，性能の実証と観測規模の拡大を進めてきた．さらに口径を拡大し，2021 年には世界最大の口径（10 m^2），最高角度分解能，初の偏光に感度を有する科学観測の開始を目指している．

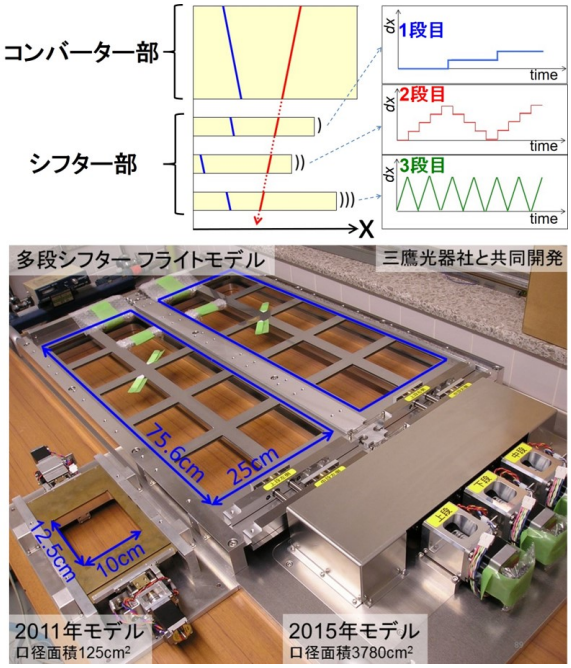

Figure 10. Upper：Information of an arrival time of an electron pair is given by position deviation between segments of recorded tracks in the converter part and the shifter part. Lower：Multi-stage shifters co-developed by Kobe University and Mitaka Kohki Co., Ltd. for GRAINE. The left one is for the flight in 2011, the right one is for that from 2015.

5　原子核乾板技術の応用展開

原子核乾板の極めて高い空間分解能と飛跡の読み取り技術は，従来の素粒子・宇宙線物理学のみならず，工学，考古学，地球科学，放射線医学などの分野にもその貢献の幅を拡げている．

5.1　宇宙線イメージングへの応用[41]

地球上に降り注ぐ宇宙線中には，ミューオンという素粒子が含まれ，高い透過力と直進性を持つ．エネルギーが高いものは厚さ数 km の岩盤さえも貫通する．この特徴を利用して，観測対象の周辺または内部に設置した検出器を用い，対象を貫通してきた宇宙線の方向と数を観測することで，X 線検査では観察できないような厚く巨大な物体内部の密度コントラストを可視化する技術を「宇宙線イメージング」と呼ぶ．その解像度は，観測した宇宙線の方向決定精度とイメージングに用いる宇宙線飛跡の総数により決まる．飛来する宇宙線の量はほぼ一定のため，短時間で高精度のイメージを得るには大面積による検出が必要である．また，複数地点での観測により，X 線 CT のような三次元イメージングも可能となる．原子核乾板は，十分な方向決定精度を持ち，電源不要・軽量・コンパクトであり，様々な環境で用いることが出来る．さらに，大面積化や複数設置も容易であり，宇宙線イメージングに非常に適する．

2015 年には，東日本大震災により炉心溶融が疑われていた福島第一原子力発電所 2 号機の炉内イメージングを行い，70 % 以上の炉心が溶融している事を明らかにした[42]（Fig. 11 左図）．2015 年より，エジプトのピラミッド群を対象とした世界初の宇宙線イメージングによる考古学遺跡調査プロジェクト “ScanPyramids” を進めており，2016 年に屈折ピラミッド内の玄室のイメージングに初めて成功，2017 年には世界最大であるクフ王のピラミッドの内部に未知の巨大な空間を発

見した[43]（Fig. 12 右図）．他にも，原子核乾板を用いた宇宙線イメージングは，火山[39–41]や溶鉱炉，コンクリート橋梁などの対象に適用されて様々な分野にひろがりつつある．火山観測では，山体浅部の火道形状の可視化による噴火モデルの構築等，溶鉱炉の観測では，耐火レンガの厚さの測定による炉の老朽化評価等に役立つ．また，ダム，盛土，橋梁などの社会インフラの点検技術としての活用や地質調査，資源探査などの新技術となる事も期待される．このように，新しい学術領域の開拓のみならず応用から社会実装まで一貫した宇宙線イメージング技術の開発を進めている．

5.2　医療への応用

がんは生涯で 2 人に 1 人がかかる国民病である．近年陽子や炭素を用いた粒子線がん治療が普及しつつある．ブラッグピークの性質を利用した粒子線治療は正常組織の線量を最小限にしながら腫瘍に対する高い線量集中性を可能にし，高い治療効果と少ない副作用の両立を実現する．一方，切れ味鋭い粒子線治療では治療計画で計算した患者体内の線量分布と実際に生じる線量分布の間にずれが生じた場合，治療効果の減少と正常臓器への過大な線量付与を引き起こしうる．これを防ぐために “5.2.1 線量分布計算の高精度化” と “5.2.2 体内の線量分布の可視化” が重要な技術開発になる．以下では原子核乾板を用いた技術開発の取り組

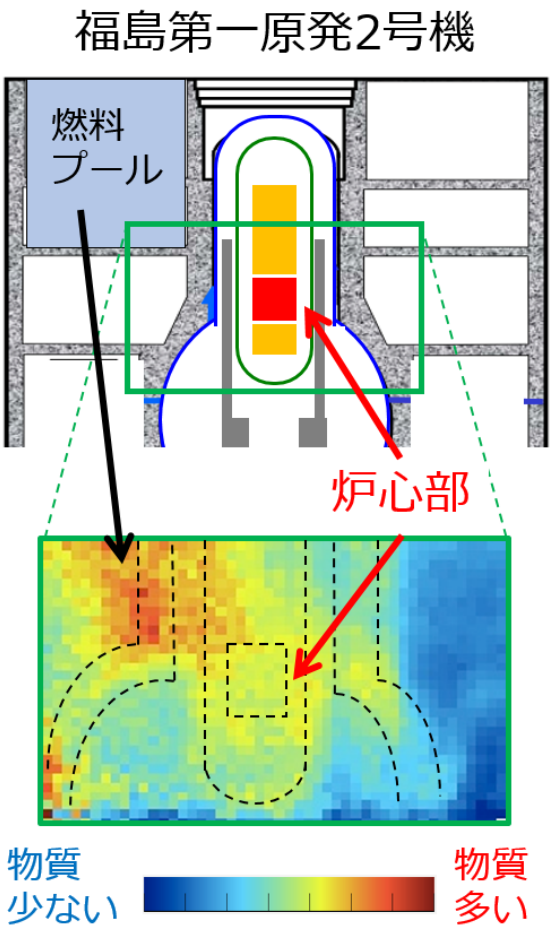

Figure 11.　Upper: A schematic cross section of Unit 2 of Fukushima Daiichi nuclear power plant. Lower: A cosmic-ray image of the plant. The expected amount of materials for the normal reactor core, corresponding to the existence of water and nuclear fuel, was not detected from the observation, which should have been at the similar level as the fuel pool’s (upper left in the figure).

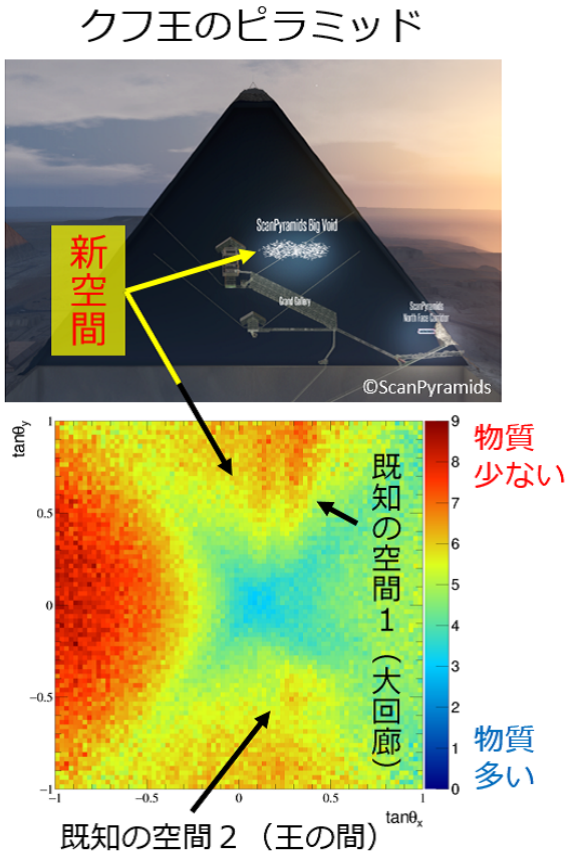

Figure 12.　Lower: A cosmic-ray image of Khufu’s Pyramid. Unknown structure, a big void, was detected with known ones such as Grand Gallery and King’s chamber. Upper: An imaginary picture of the detected big void.

みを紹介する．

5.2.1　線量分布計算の高精度化

粒子線の細胞殺傷能力は線質に依存するため，線量分布計算には線質に関する情報が要求される．炭素線治療では炭素と体内原子核の反応で生じる核破砕片が線量を付与するため，特に影響が大きい．2003 年には原子核乾板と水を交互に積層した検出器を用い，炭素線と水の反応により生じる核破砕片の測定を行った[44]．自動飛跡読み取り装置を用いて大統計のデータを取得した結果，核破砕反応モデルを高精度で検証することが可能になり，現在でも炭素線治療の線量計算精度を検証する基礎データの一つとして用いられている．

5.2.2　線量分布の可視化

計算した線量分布と実際の分布にずれが生じても体内の線量分布をモニタできれば，ビームの設定を変えて治療効果を維持できる．粒子線と体内原子核の反応で放出される即発 γ 線を利用し，線量分布を可視化する研究が行われている．原子核乾板の空間分解能を活かして電子陽電子対を検出し，即発 γ 線の到来方向とエネルギーを求める研究が進行している[45]（Fig. 13）．原子核乾板にリアルタイム性はないが，治療は数週間にわたって行われるため，翌日の治療からビームを修正すれば治療の精度を保つことができる．

6　新乳剤 超微粒子原子核乳剤の展開

6.1　暗黒物質探索と超微粒子原子核乾板

銀河の回転速度や，遠方の銀河の形状の重力レンズ効果による歪みの観測結果から，宇宙に未知の質量が膨大に存在することが強く示唆されている．この未知の質量を担う物質は「暗黒物質」と呼ばれている．暗黒物質の正体は未だ不明で，大きな問題になっており，その解明に向けた研究が世界で進行中である．暗黒物質が素粒子的なものである場合，質量が重く，電荷を持たず，微弱な相互作用のみを行う粒子ではないかと考えられている．銀河系に束縛された暗黒物質粒子の集団の中を太陽系が移動する際に，暗黒物質粒子が原子核乾板中の原子核に衝突すると，衝突された核は跳ね飛ばされ，低速の重イオンとなり，物質中を極めて短い距離だけ飛行して止まる．この低速重イオンの飛跡をとらえることができれば，暗黒物質粒子の到来方向をも検出できることになる．それにより，その到来方向および数の季節変動をとらえることができれば，その存在の強い証拠となる．仮に暗黒物質粒子の質量が 10 GeV/c^2 程度，平均的な入射速度が 230 km/s 程度と仮定すると，飛程は固体の物質中で 1 μm 未満である．このような極めて短い飛跡を，ハロゲン化銀結晶を直径数 10 nm にまで微細化した原子核乳剤（nano imaging tracker，以下「NIT」と略す）でとらえることを考案した[46]．このような乳剤として，直径 40 nm の結晶からなる乳剤が富士フイルム社により開発された．そして，実際にその乳剤を塗布した乾板が低速重イオンの潜像を記録し，高い解像度で可視化する能力を持つことを示した[46]．ところが，この乳剤を実際の実験およびその基礎研究に用いるには，ハロゲン化銀結晶の更なる安定化が必要であった．そこで，名古屋大学において高い安定性を持つ NIT を独自に開発し[48]，また，その安定的な供給を可能にした．現在，これを用いた暗黒物質探索実験，NEWSdm 実験[47] を推進中であり，技術開発および実験を進めている．現在，標準タイプとしてハロゲン化銀結晶径約 40 nm のもの（Fig. 3 左端）や，最も小さい結晶サイズでは約 20 nm のものも製造できており，用途に応じて約 10 nm 単位で制御可能である．結晶の微細化により，従来の原子核乾板に比べ格段に高い空間分解能で情報を記録できる．比較のために，Fig. 14 に従来の結晶サイズのものと NIT のそれぞれによってとらえた α 粒子の飛跡の電子顕微鏡画像を示した．また，Fig. 15 左の低速炭素イオン（暗黒物質の衝突を受けた原子核の疑似飛跡）の電子顕微鏡像が示すように，長さ 100 nm 以下の飛跡も記録可能であり，最も高い空間分解能を有する飛跡検出器である．飛跡の読み出しにおいても長さ 100 nm 以下の飛跡の情報を取得できるようにすることを目標に研究を行い，NIT の微小な現像後の銀粒子のプラズモン共鳴を利用して，10 nm 以下の超解像を実現した[49]．さらに，光学像の微細な形状の情報を利用した高速のサブミクロン飛跡解析[50,51] や機械学習による

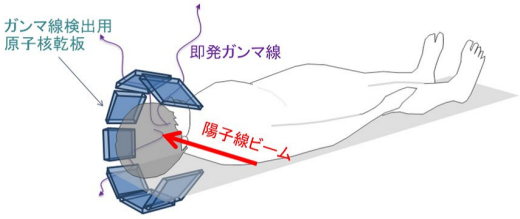

Figure 13.　A schematic view of visualization of dose distribution with prompt γ-ray.

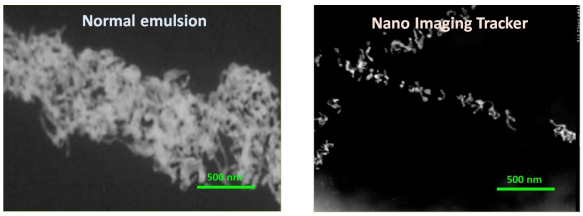

Figure 14. Images of tracks of α-particles recorded in a conventional nuclear emulsion (left) and an NIT (right) taken with an electron microscope.

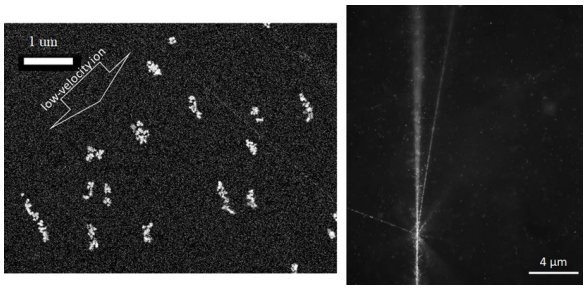

Figure 15. Left: Tracks of low velocity carbon ions (100 keV) recorded in NIT. The image was taken with an electron microscope. Right: A track of a high energy lead ion (150 GeV/n) and a fragmentation reaction induced by the ion. The image was taken with an epi-illumination optical microscope.

事象識別法の研究も進めている．硬 X 線顕微鏡による非破壊・高解像顕微法についても，高輝度光科学研究センター（SPring-8）と共同で開発を進めてきた[52]．一方で，NIT は暗黒物質以外の対象にも威力を発揮する．一つには，優れた飛跡分離能力（約 250 nm）と高い電荷識別能力を持ち，高エネルギー重粒子線用の検出器としても威力を発揮する．Fig. 15 右に高エネルギー（150 GeV/n）の鉛イオンの飛跡およびその核破砕反応の光学顕微鏡像を示した．この飛跡分離能力は，重粒子線におけるナノメートルスケールの線量分布の理解を可能にするであろう．さらに，未発見の電離能力の大きな粒子（磁気単極子や Q-ball 等）の検出に利用できる可能性もある．二つ目に，短い飛跡をとらえる能力が高く，高速中性子検出器として有用である．従来の中性子検出器では測定困難なサブ MeV–数 MeV の中性子による反跳陽子のマイクロメートルスケールの飛跡を，方向情報を含めて認識可能であり，さらに γ 線事象と完全に分離可能である．これらの特性を活かして環境中性子計測や核燃料等の高 γ 線環境での中性子モニター等に応用可能である．さらに興味深い現象として，原子核乾板を冷却することで荷電粒子の通過による蛍光発光を観察可能であることが明らかになっている[53]．この蛍光発光の研究はハロゲン化銀結晶内における高密度励起下での電子の挙動の理解にもつながる．そして NIT の場合，通常の結晶サイズの乾板に比べて発光効率が高く，シンチレーション検出器としても機能する可能性を持っている．この場合，発光と同時に飛跡潜像も形成されているため，両方を用いた解析が可能となる．例えば，大面積の NIT 内に特定のエネルギーを付与した荷電粒子の飛跡を探索する際に，発光の発生位置や時間の情報および，蛍光が持つ潜像形成以外の荷電粒子の情報を用いて効率的にその飛跡に到達することが可能になるであろう．また，発光の主体が 10 nm スケールの結晶であるため，発光の情報のみを用いた高解像イメージングも可能かも知れない．また，NIT の場合のような大きさのハロゲン化銀結晶の性質および潜像形成メカニズムは，写真化学においても新しいテーマであり，それらに関して，当該分野を牽引してきた研究者と共に新たな議論を開始した[54]．

6.2 超高分解能低速中性子検出器

NIT の極めて高い空間分解能を活かした，超高分解能低速中性子検出器の開発にも成功した．従来の検出器は 1 μm–2 μm の位置分解能[55,56] が限度であったのに対し，サブミクロン，さらには一桁以上高い 100 nm 未満の分解能を得ることができている．このような検出器を用いれば冷中性子（運動エネルギー約 10 meV）や超冷中性子（約 100 neV）などの低速中性子の到来位置分布を精度良く調べることができ，それらが作る干渉パターンなどの精密測定に威力を発揮する．それによって，中性子の周りの場および中性子自体の性質を調べることができる．興味深い実験の例として，地球重力場中での超冷中性子の位置分布を利用した重力の法則の検証[57–59] のような実験が存在する．また，産業分野への応用として，中性子を利用した，物体の内部構造の透視に使用することもできる．燃料電池やリチウムイオン電池などの電極付近の構造の評価などにも使用できるであろう．原子核乾板はアナログフィルムであるため，ピクセル検出器の場合のようにピクセルサイズに依存すること無しに高い分解能を発揮することができる．そして NIT を用いているため，通常の原

子核乾板を用いるよりも高い分解能が得られている．さらに，NIT は最小電離粒子に対して感度を持たないため，これを用いた中性子検出器は極めてγ線背景事象に強いものとなる．また，コンパクトであるため小型の中性子干渉計を組むことも可能である．これまでに二種類の検出器を開発した[60]．一つ目が，硝酸リチウムを NIT 中に溶解し，ガラスの支持体に塗布した検出器で，0.34 μm の分解能を得ている[61]．二つ目はホウ素を含む薄膜に NIT を塗布した検出器[60, 62, 63] で，100 nm 未満の分解能を得ることができている．ここでは後者について述べる．この検出器は，低速中性子の散乱および吸収が少ないシリコン板（厚さ 0.4 mm）を支持体とし，その片面に $^{10}B_4C$ (50 nm)–NiC (60 nm)–C (30 nm) という構造の変換薄膜をスパッタリングにより形成し，その上に NIT を 10 μm 厚で塗布したものである（Fig. 16 左）（ここで $^{10}B_4C$ とは，ホウ素の同位体，^{10}B を 96 % にまで濃縮した炭化ホウ素である．）．低速中性子が到来すると，変換膜中の ^{10}B によって吸収され，$^{10}B + n \rightarrow \alpha + {}^{7}Li$ の反応によって，中性子が荷電粒子であるα粒子と ^{7}Li 原子核に変換され，互いに反対方向に放出されて，一方が乳剤層中に潜像を残す（Fig. 16 左）．そして現像後に飛跡として検出可能となる（Fig. 16 右）．α粒子の飛跡は約 5.1 μm であり，^{7}Li 原子核の飛跡は約 2.6 μm である．それらを変換膜中に外挿し，中性子の吸収が起きた場所を，変換膜の厚み程度の不定性の下に推定することができる．実際に低速中性子を照射して検出効率を測定し，変換膜中の ^{10}B の量から期待された通りの検出効率を得られている[63]．さらに，実際の飛跡を用いて分解能を求めた．分解能は飛跡の角度により変化し，θ を検出器の面に対する法線からの角度とするとき，$\tan\theta < 1.9$ の飛跡を選んだ場合，11 nm–99 nm の位置分解能を得られること確認した[63]．今後この検出器を用いて，地球重力場中での超冷中性子の位置分布を世界最高精度で測定し，重力の逆二乗則の検証等を行う．

7　まとめ

近年，原子核乾板技術は大きく進化している．2010 年より研究室において原子核乳剤の開発および製造が始まり，ユーザーである素粒子研究者自らが原子核乳剤の中身を知り，目的に対して最適化した原子核乾板の開発が可能になった．さらに，飛跡の自動読み取りの高速化も進み，超高速自動飛跡読み取り装置 HTS が誕生した．合わせて自動解析手法の高速化も進行している．結果として，検出器の開発・製造から，読み取り，解析の最終段階にいたるまでの全ての工程がユーザーの掌中にあり，それぞれの間で影響を及ぼし合いながら開発を進められるという状況が生まれている．この状況を存分に活かし，原子核乾板技術はニュートリノ実験やγ線天文学をはじめとする素粒子・宇宙線物理学などの従来より対象としてきた分野にとどまらず，宇宙線イメージングや粒子線がん治療への応用をはじめとして，工学，考古学，地球科学，放射線医学などの分野にも展開している．一方で，暗黒物質探索のために全く新しいタイプの原子核乳剤，超微粒子原子核乳剤（NIT）の開発に成功した．この乳剤は超解像法，蛍光現象，感光メカニズムの研究など，周辺の領域を刺激している．また，この乳剤を利用した超高分解能低速中性子検出器の開発にも成功した．現在，増大する原子核乾板の使用量に対応すべく，原子核乾板の製造能力を現状の約 10 倍に高める準備を進めている．また，自動飛跡読取装置のさらなる高速化も計画している．進化を続ける原子核乾板技術は，基礎科学・応用科学をつなぎ，多分野での知の獲得および創造に貢献していく．

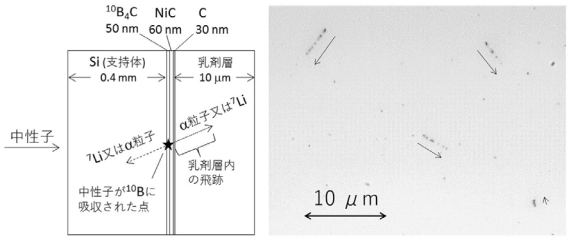

Figure 16.　Left: The structure of the detector (a crosss section) and the detection principle. Right: A microscopic image of the detector taken with an epi-illumination optical microscope when the focal plane is around the converter layer. Charged particles are emitted along arrows from absorption points of neutrons around starting points of arrows.

〈参 考 文 献〉

1) T. Tani, §4 Mechanisms of Photographic Sensitivity, in: Photographic Science, 1st edition, Oxford University Press, New York, 2011, pp. 89–130.
2) C. M. G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Occhialini, C. F. Powell, Nature, 159 (1947) 694.
3) K. Niu, E. Mikumo, Y. Maeda, Prog. Theor. Phys., 46

(1971) 1644.
4) M. Danysz, K. Garbowska, J. Pniewski, T. Pniewski, J. Zakrezewski, E. R. Fletcher, J. Lemonne, P. Renard, J. Sacton, W. T. Toner, *et al*., Nucl. Phys., 49 (1963) 121.
5) D. Prowse, Phys. Rev. Lett., 17 (1966) 782.
6) S. Aoki, S. Y. Bahk, K. S. Chung, S. H. Chung, H. Funahashi, C. H. Hahn, T. Hara, S. Hirata, K. Hoshino, M. Ieiri, *et al*., Prog. Theor. Phys., 85 (1991) 1287.
7) H. Takahashi, J. K. Ahn, H. Akikawa, S. Aoki, K. Arai, S. Y. Bahk, K. M. Baik, B. Bassalleck, J. H. Chung, M. S. Chung, *et al*., Phys. Rev. Lett., 87 (2001) 212502.
8) K. Niwa, K. Hoshino, K. Niu, Proc. Int. Cosm.ray Symp. High Ener. Phenom., (1974) 149.
9) S. Aoki, K. Hoshino, M. Nakamura, K. Niu, K. Niwa, N. Torii, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms, 51 (1990) 466.
10) T. Nakano, Ph.D. Thesis, Nagoya University (1997).
11) K. Morishima, T. Nakano, J. Instrum., 5 (2010) P04011.
12) K. Kodama, M. Nakamura, N. Saoulidou, G. Tzanakos, B. Baller, B. Lundberg, R. Rameika, J.S. Song, C.S. Yoon, S.H. Chung, *et al*., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 493 (2002) 45.
13) S. Miyamoto, A. Ariga, T. Fukuda, M. Kazuyama, M. Komatsu, T. Nakano, K. Niwa, O. Sato, S. Takahashi, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 575 (2007) 466.
14) T. Fukuda, K. Kodama, M. Komatsu, S. Miyamoto, K. Morishima, T. Nakano, T. Omura, Y. Sakatani, O. Sato, J. Instrum., 5 (2010) P04009.
15) K. Kodama, N. Ushida, C. Andreopoulos, N. Saoulidou, G. Tzanakos, P. Yager, B. Baller, D. Boehnlein, W. Freeman, B. Lundberg, *et al*., Phys. Lett. B, 504 (2001) 218.
16) 長縄直崇, 桑原謙一, 2010 年度（社）日本写真学会秋季研究発表会講演要旨集, (2010) 10.
17) N. Naganawa, K. Kuwabara, T. Naka, T. Asada, J. Soc. Photograph. Sci. Technol. Jpn., 74 (2011) Suppl. 74.
18) T. Nakamura, A. Ariga, T. Ban, T. Fukuda, T. Fukuda, T. Fujioka, T. Furukawa, K. Hamada, H. Hayashi, S. Hiramatsu, *et al*., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 556 (2006) 80.
19) K. Kuwabara, S. Nishiyama, J. Soc. Photograph. Sci. Technol. Jpn., 67 (2004) 521.
20) A. Nishio, K. Morishima, M. Moto, N. Naganawa, K. Ohzeki, K. Kuwabara, M. Nakamura, Prog. Proc. 1st Int. Conf. Adv. Imag., (2015) 668.
21) N. Naganawa, K. Ohzeki, A. Nishio, Prog. Proc. 1st Int. Conf. Adv. Imag., (2015) 675.
22) M. Yoshimoto, T. Nakano, R. Komatani, H. Kawahara. Prog. Theor. Exp. Phys., (2017) 103H01.
23) Y. Fukuda, T. Hayakawa, E. Ichihara, K. Inoue, K. Ishihara, H. Ishino, Y. Itow, T. Kajita, J. Kameda, S. Kasuga, *et al*., Phys. Rev. Lett., 81 (1998) 1562.
24) Q. R. Ahmad, R. C. Allen, T. C. Andersen, J. D. Anglin, J. C. Barton, E. W. Beier, M. Bercovitch, J. Bigu, S. D. Biller, R. A. Black, *et al*., Phys. Rev. Lett., 89 (2002) 011301.
25) K. Abe, J. Adam, H. Aihara, T. Akiri, C. Andreopoulos, S. Aoki, A. Ariga, T. Ariga, S. Assylbekov, D. Autiero, *et al*., Phys. Rev. Lett., 112, (2014) 061802.
26) N. Agafonova, A. Aleksandrov, A. Anokhina, S. Aoki, A. Ariga, T. Ariga, D. Bender, A. Bertolin, I. Bodnarchuk, C. Bozza, *et al*., Phys. Rev. Lett., 115 (2015) 121802.
27) T. Fukuda S. Fukunaga, H. Ishida, K. Kodama, T. Matsuo, S. Mikado, S. Ogawa, H. Shibuya, J. Sudo, J. Instrum., 8 (2013) P01023.
28) T. Fukuda, S. Fukunaga, H. Ishida, T. Matsumoto, T. Matsuo, S. Mikado, S. Nishimura, S. Ogawa, H. Shibuya, J. Sudou, *et al*., J. Instrum., 9 (2014) P12017.
29) T. Fukuda, Pos. Proc. Sci. (KMI2017) (2017) 012.
30) T. Fukuda, S. Aoki, S. Cao, N. Chikuma, Y. Fukuzawa, M. Gonin, T. Hayashino, Y. Hayato, A. Hiramoto, F. Hosomi, *et al*., Prog. Theor. Exp. Phys., 2017 (2017) 063C02.
31) SHiP Collaboration: M. Anelli, S. Aoki, G. Arduini, J. J. Back, A. Bagulya, W. Baldini, A. Baranov, G. J. Barker, S. Barsuk, M. Battistin, *et al*., arXiv (2015) 1504.04956.
32) C. Fukushima, M. Kimura, S. Ogawa, H. Shibuya, G. Takahashi, K. Kodama, T. Hara, S. Mikado, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 592 (2008) 56.
33) 福田努, 画像関連学会連合会第 5 回秋季大会 proceedings 要旨集, (2018) 15.
34) 杉本太郎, 修士学位論文,

http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/seminar/pdf/Taro_thesis.pdf, 神戸大学大学院理学研究科 (2019).
35) S. Aoki, A. Ariga, T. Ariga, E. Firu, T. Fukuda, Y. Gornushkin, A. M. Guler, M. Haiduc, K Kodama, M. A. Korkmaz, *et al*., arXiv (2017) 1708.08700.
36) S. Aoki, T. Fukuda, K. Hamada, T. Hara, Atsushi I. J. Kawada, M. Kazuyama, K. Kodama, M. Komatsu, S. Koshiba, *et al*., arXiv (2012) 1202.2529.
37) K. Kodama, Y. Nonoyama, T. Kobayashi, K. Satoh, J. S. Song, J. Nishimura, Y. Saito, T. Yamagami, S. Aoki, M. Hara, *et al*., Adv. Space Res., 37 (2006) 2120.
38) S. Takahashi, S. Aoki, H. Rokujo, K. Hamada, M. Komatsu, K. Morishima, M. Nakamura, T. Nakano, K. Niwa, O. Sato, *et al*., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 620 (2010) 192.
39) H. K. M. Tanaka, T. Nakano, S. Takahashi, J. Yoshida, K. Niwa, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 575 (2007) 489.
40) H. K. M. Tanaka, T. Nakano, S. Takahashi, J. Yoshida, H. Ohshima, T. Maekawa, H. Watanabe, K. Niwa, Geophys. Res. Lett., 34 (2007) L22311.
41) 森島邦博, 日本写真学会誌 79 (2016) 48.
42) 森島邦博, 日本写真学会誌 79 (2016) 42.
43) K. Morishima, M. Kuno, A. Nishio, N. Kitagawa, Y. Manabe, M. Moto, F. Takasaki, H. Fujii, K. Satoh, H. Kodama, *et al*., Nature, 552 (2017) 386.
44) T. Toshito, K. Kodama, L. Sihver, K. Yusa, M. Ozaki, K. Amako, S. Kameoka, K. Murakami, T. Sasaki, S. Aoki, *et al*., Phys. Rev. C, 75 (2007) 054606.
45) T. Toshito, M. Kimura, H. Ogino, Y. Shibamoto, M. Nakamura, O. Sato, Proc. 2017 IEEE Nucl. Sci. Symp. Med. Imag., (2017) 237.
46) M. Natsume, K. Hoshino, K. Kuwabara, M. Nakamura, T. Nakano, K. Niwa, O. Sato, T. Tani, T. Toshito, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 575 (2007) 439.
47) A. Aleksandrov, T. Asada, A. Buonaura, L. Consiglio, N. D'Ambrosio, G. De Lellis, A. Di Crescenzo, N. Di Marco, M. L. Di Vacri, S. Furuya, *et al*., arXiv (2016) 1604.04199.
48) T. Asada, T. Naka, K. Kuwabara, M. Yoshimoto, Prog. Theor. Exp. Phys., 2017 (2017) 063H01.
49) 中竜大, 日本写真学会誌, 80 (2017) 311.
50) K. Kimura, T. Naka, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 680 (2012) 12.
51) T. Katsuragawa, A. Umemoto, M. Yoshimoto, T. Naka, T. Asada, J. Instrum., 12 (2017) T04002.
52) T. Naka, T. Asada, M. Yoshimoto, T. Katsuragawa, Y. Suzuki, Y. Terada, A. Takeuchi, K. Uesugi, Y. Tawara, A. Umemoto, *et al*., Rev. Sci. Instrum., 86 (2015) 073701.
53) T. Shiraihi, H. Ichiki, T. Naka, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 927 (2019) 202.
54) T. Tani, T. Naka, Radiat. Meas., 95 (2016) 31.
55) V. V. Nesvizhevsky, H. Börner, A. M. Gagarski, G. A. Petrov, A. K. Petukhov, H. Abele, S. Baeßler, T. Stöferle, S. M. Soloviev, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 440 (2000) 754.
56) T. Jenke, G. Cronenberg, H, Filter, P. Geltenbort, M. Klein, T. Lauer, K. Mitsch, H. Saul, D. Seiler, D. Stadler, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip., 732 (2013) 1.
57) V. V. Nesvizhevsky, H. G. Börner, A. K. Petukhov, H. Abele, S. Baeßler, F. J. Rueß, T. Stöferle, A. Westphal, A. M. Gagarski, G. A. Petrov, et al., Nature, 415 (2002) 297.
58) H. Abele, T. Jenke, D. Stadler, P. Geltenbort, Nucl. Phys. A, 827 (2009) 593.
59) G. Ichikawa, S. Komamiya, Y. Kamiya, Y. Minami, M. Tani, P. Geltenbort, K. Yamamura, M. Nagano, T. Sanuki, S. Kawasaki, M. Hino, M. Kitaguchi, Phys. Rev. Lett., 112 (2014) 071101.
60) N. Naganawa, S. Awano, M. Hino, M. Hirose, K. Hirota, H. Kawahara, M. Kitaguchi, Pos. Proc. Sci. (KMI2017) (2017) 077.
61) N. Naganawa, S. Awano, M. Hino, M. Hirose, K. Hirota, H. Kawahara, M. Kitaguchi, K. Mishima, T. Nagae, H. M. Shimizu, S. Tasaki, A. Umemoto, Phys. Procedia, 88 (2017) 224.
62) S. Tada, S. Awano, M. Hino, K. Hirota, H. Kawahara, M. Kitaguchi, K. Mishima, N. Naganawa, H. M. Shimizu, S. Tasaki, A. Umemoto, JPS Conf. Proc., 22 (2018) 011023.
63) N. Naganawa, T. Ariga, S. Awano, M. Hino, K. Hi-

rota, H. Kawahara, M. Kitaguchi, K. Mishima, H. M. Shimizu, S. Tada, S. Tasaki, A. Umemoto, Eur. Phys. J. C, 78 (2018) 959.

〈著 者 略 歴〉

長縄 直崇： 2001 年に原子核乾板に出会い，以来原子核乾板を用いたニュートリノ振動実験 OPERA，原子核乳剤の開発，超微粒子原子核乳剤を用いた高分解能低速中性子検出器の開発などを行ってきた．博士（理学）．2015 年より名古屋大学未来材料・システム研究所研究員．

福田 努： 2003 年度から OPERA 実験に参加．原子核乾板の新しい自動飛跡認識技術（高 S/N 化・大角度化）を開発し，タウニュートリノ出現の発見に貢献した．現在は，NINJA 実験を立ち上げ，実験代表者として，グループを主導している．2017 年度より名古屋大学高等研究院 YLC 特任助教．

北川 暢子： 2006 年より名古屋大学物理学教室研究室に所属し，原子核乾板を用いたニュートリノ実験 PEANUT や OPERA で電子ニュートリノ反応の解析を行ってきた．現在は，宇宙線ミューオンラジオグラフィの研究に従事している．

小松 雅宏： 名古屋大学理学部物理学科卒業，名古屋大学大学院理学研究科博士（理学）．主にニュートリノの研究を行ってきた．名古屋大学教養教育院准教授．

森島 邦博： 原子核乾板を用いたニュートリノ振動実験 OPERA のための自動解析システムの開発により博士（理学）の学位を取得．2011 年より宇宙線イメージングのための原子核乾板および解析技術の開発を進めている．2014 年より名古屋大学高等研究院特任助教．

中 竜大： 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻修了後，2011 年より名古屋大学高等研究院，2016 年より名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構を経て 2019 年より東邦大学理学部講師．超微粒子原子核乾板を軸とした方向感度を持つ暗黒物質の直接検出研究，超高分解能飛跡読み出し研究，中性子検出，荷電粒子検出におけるハロゲン化銀物性および粒子検出メカニズムにおける実験・現象論両面における研究などを推進している．

中野 敏行： CHORUS・DONUT・OPERA 実験において原子核乾板の自動読み出しの開発および構築を担当してきた．現在は名古屋大学大学院理学研究科 講師．

西尾 晃： 2016 年名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻博士課程前期課程修了．同年より名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻博士課程後期課程在籍，日本学術振興会特別研究員．原子核乾板の開発および宇宙線ラジオグラフィーの研究を行ってきた．

六條 宏紀： 2007 年より原子核乾板を用いたガンマ線望遠鏡の研究開発，および大気球による観測実験を行ってきた．日本学術振興会特別研究員 PD，名古屋大学未来材料・システム研究所機関研究員を経て，2018 年より同大学理学研究科研究員．

佐藤 修： 名古屋大学理学研究科物理学教室 F 研にてタウニュートリノが暗黒物質の正体かどうかの検証実験，CHORUS（1994 年–1997 年）のシンチレイションファイバートラッカー開発で博士（理学）号取得（1996 年）．F 研にて学振研究員，特任助教等を経て，2015 年より同大学，未来材料・システム研究所 助教．国際共同実験 OPERA（2008 年–2012 年）の副代表として「タウニュートリノ出現によるニュートリノ振動」の実証に貢献．

木村 充宏： 名古屋市病院局西部医療センター名古屋陽子線治療センター技師．医学物理士（医学物理士認定機構）．原子核乾板を位置検出器として使う研究を行ってきた．2012 年ベルン大学アルバートアインシュタインセンター研究員，2015 年名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構研究員を経て，2016 年より現職．

歳藤 利行： 2003 年頃から原子核乾板を粒子線治療に応用する研究を行ってきた．2009 年放射線医学総合研究所主任研究員，2010 年より名古屋市健康福祉局，2012 年より同病院局職員．現在，名古屋市立西部医療センター名古屋陽子線治療センターにおいて陽子線治療の医学物理士として勤務している．