

100 nm 未満の空間分解能を発揮する低速中性子用原子核乾板



長縄 直崇
Naganawa Naotaka

1 はじめに

素粒子等の荷電粒子の飛跡を写し出す写真フィルム（原子核乾板）の技術を用いて、100 nm 未満という極めて高い空間分解能で低速の中性子の到来位置を測定できる検出器を開発した。この分解能は従来の検出器^{1,2)}を1~2桁上回るものである。この検出器は、ダークマターの探索のために開発された原子核乾板の感光材料、超微粒子原子核乳剤を応用して開発した。この乳剤を、中性子吸収断面積の大きなホウ素の同位体、¹⁰Bを含む、専用に開発された薄膜に塗布したものである。この検出器は、例えば、超冷中性子（速度約7 m/s以下で飛行する超低速の中性子）の量子力学的な位置分布を利用した重力及び未知の短距離力の研究³⁻⁵⁾や、中性子の電荷の精密測定^{6,7)}等の基礎物理学実験、そして、物体の微小な内部構造の中性子による透視等において威力を発揮するであろう。

2 原子核乾板

原子核乾板は写真フィルム的一种であり、通常ハロゲン化銀結晶をゼラチン中に密に分散した写真感光乳剤（原子核乳剤）を透明なプラスチックやガラス等の支持体に塗布したものである（図1a）。通常の写真乳剤の場合、ハロゲン化銀結晶は直径数 μm の平板結晶であるのに対して、原子核乳剤の場合、

直径約200 nmの8面体に近い形状をしている（図3左）。荷電粒子が乳剤層中の臭化銀結晶を貫通すると（図1b）、結晶内に潜像を残す。現像すると、潜像が成長してサブミクロンの大きさの銀粒子が生成する。この銀粒子の列が飛跡であり（図1c）、光学顕微鏡下で認識される（図1d）。それゆえ原子核乾板は極めて高分解能な3次元飛跡検出器として機能する。

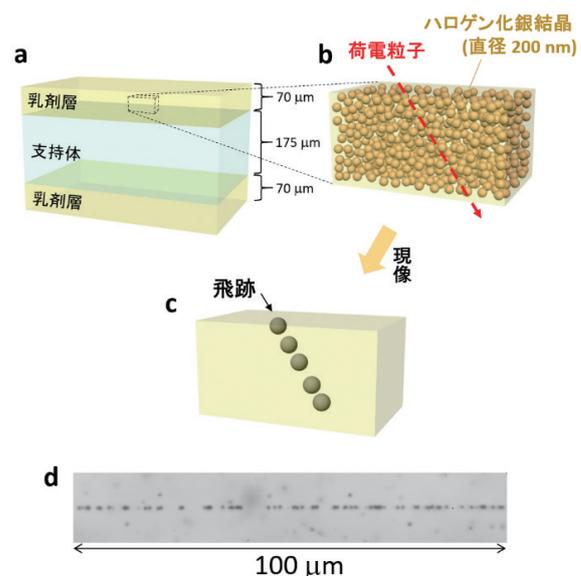


図1 a：典型的な原子核乾板の構造。b：直径約200 nmの臭化銀結晶がゼラチン中に分散された乳剤層の模式図。c：現像後の乳剤層中の飛跡の模式図。d：光速に近い速度で飛行する電荷1の荷電粒子の飛跡の光学顕微鏡写真

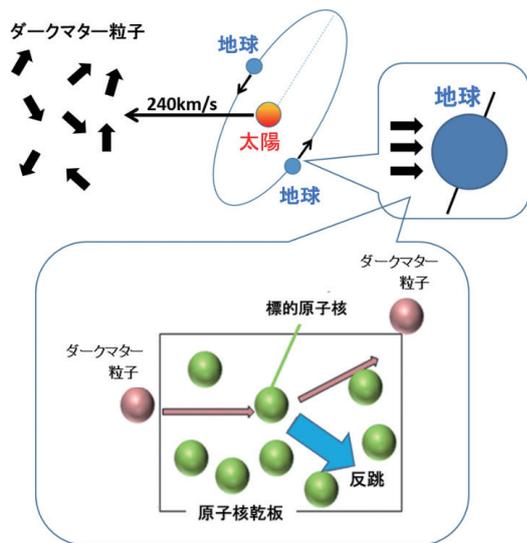


図2 ダークマター検出の模式図。太陽系が銀河系内に束縛されたダークマター粒子の集団の中を240 km/sで公転している。その時、地球上に置いた原子核乾板の内部では、一部の原子核が同程度の速度で飛来するダークマター粒子の衝突を受けて反跳する。その反跳原子核の微小な飛跡をとらえる

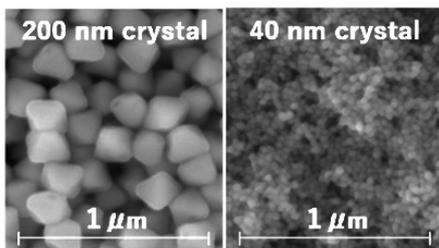


図3 左：ハロゲン化銀結晶の直径が約200nmの従来の原子核乾板。右：ダークマター探索用に開発されたハロゲン化銀結晶の直径が約40 nmの超微粒子原子核乳剤。ダークマター粒子の衝突を受けて反跳する原子核の、サブミクロンの長さの飛跡を捉えることができる。この乳剤を応用して高分解能中性子検出器を開発した

原子核乾板の高い分解能はパイ中間子⁸⁾、チャームクォークを含むハドロン⁹⁾、ダブルハイパー核¹⁰⁻¹³⁾、タウニュートリノ¹⁴⁾等の発見及び理解の精密化、ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動の直接検出¹⁵⁾等、数々の自然の理解をもたらした。2010年より、名古屋大学では原子核乾板の製造・開発を開始した。製造した乾板は現在、エジプトのピラミッドや古墳、原子炉や溶鉱炉のミューオンによる透視¹⁶⁻¹⁸⁾やγ線天文学¹⁹⁾等にも用いられている。自らが原子核乳剤を製造・開発できるようになったことにより、特定の用途に合わせた極めて特殊な乳剤の開発も可能になっている。ダークマター探索のための乳剤²⁰⁾もその1つである。

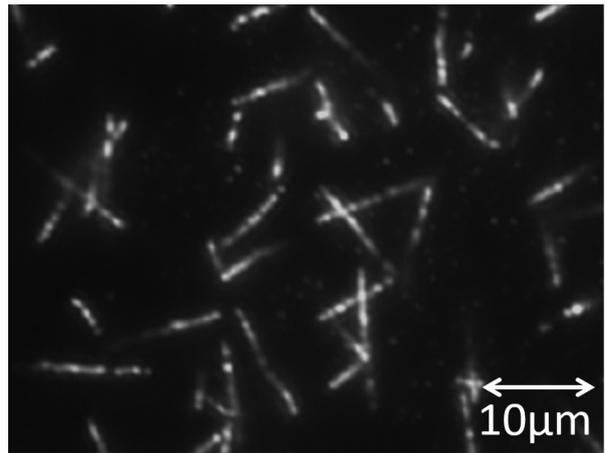


図4 超微粒子原子核乾板でとらえたα線源(²⁴¹Am)からのα粒子の飛跡の落射光学顕微鏡写真。白く輝いているものが飛跡及びそれを構成する銀粒子である

3 ダークマター探索用に開発された超微粒子原子核乳剤

ダークマターは宇宙の銀河の回転速度や重力レンズ効果による銀河の形状の歪みの観測からその存在が強く示唆されている、光を發せず質量を持つ未知の物質である。ダークマターを素粒子的なものであると考える場合、電荷を持たず微弱な相互作用しか行わない質量の大きな粒子(Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs)だと仮定することができる。その場合、銀河系に束縛されたダークマター粒子の集団の中を我々の太陽系が通り抜ける際に、ダークマター粒子が太陽系の公転速度と同程度の速度で我々に向かってくることになる(図2上部)。すると我々の周囲の物質中の原子核が稀にダークマター粒子と衝突して跳ね飛ばされる(図2下部)。ダークマター粒子の質量を陽子質量の10倍程度と仮定すると、反跳原子核は固体中でおおよそ1 μm未満という極めて短い飛程を持つ。この飛跡の検出を可能にすべく、ハロゲン化銀結晶の直径を40 nmにまで小さくした超微粒子原子核乳剤(図3右)を名古屋大学で開発・製造しており、ダークマター探索プロジェクトNEWSdm実験が進行中である²¹⁾。

この乳剤を塗布して作った乾板でとらえたα粒子の光学顕微鏡写真を図4に示す。写真からも極めて高い分解能を持つことが分かる。この乳剤を応用して超高分解能な中性子検出器を開発した。

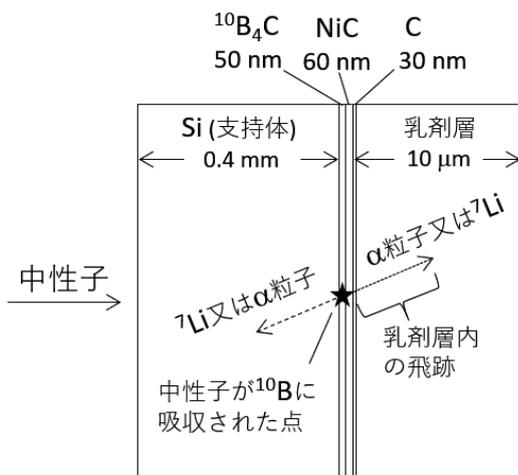
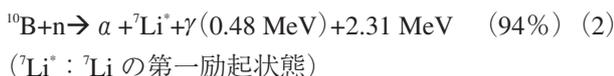


図5 開発した検出器の構造と検出原理。中性子が $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 層中の ^{10}B によって吸収され、 ^7Li 原子核及び α 粒子が生じて互いに反対方向に飛行し、その一方が乳剤層中に飛跡を形成する。その飛跡を $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 層まで外挿することで、 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 層中の中性子吸収の起きた場所を特定できる

4 開発した超高分解能中性子検出用原子核乾板

低速中性子は中性子吸収断面積の大きな核種による吸収反応によって検出することができる。吸収後に生成される荷電粒子を原子核乳剤で捉えることで検出が可能となる。今回は以下のホウ素の同位体(^{10}B)による中性子吸収反応を利用した。



検出器の構造は、図5に示すように、低速中性子の散乱・吸収の少ないシリコン板(厚さ0.4 mm)を支持体として用い、その片面に ^{10}B を96%にまで濃縮したホウ素によって作られた炭化ホウ素($^{10}\text{B}_4\text{C}$)を50 nm、その上に炭化ニッケル(NiC)を60 nm、炭素(C)を30 nmの厚さでスパッタし、その上に超微粒子原子核乳剤を10 μm の厚さで直接塗布したものである。 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 層に低速中性子が到来すると、層内の ^{10}B によって中性子が吸収され、 α 粒子と ^7Li 原子核が互いに反対方向に放出される。そのどちらかが原子核乳剤の層に入り、飛跡潜像として記録される。現像後に落射光学顕微鏡によって飛跡を認識する。飛跡の長さ、大勢を占める(2)の反応の場合、 α 粒子が約5.1 μm 、 ^7Li 原子核が約

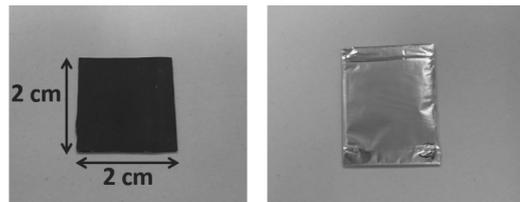


図6 左：試作した検出器の乳剤層側から見た外観。単なる四角い板に見えるが、実際にはSi板上に形成されたスパッタ膜の上に超微粒子原子核乳剤を10 μm の厚さで塗布してある。右：この検出器は写真フィルム的一种であるため、用いる際に遮光する必要がある。光を通さず中性子を通しやすいアルミ箱で二重に包んで遮光した状態の写真

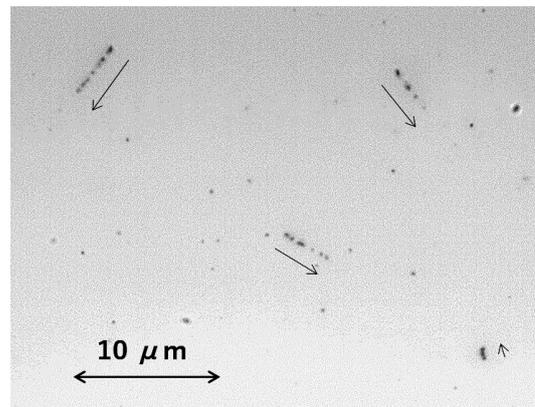


図7 ^{10}B による中性子の吸収により生じた α 粒子又は ^7Li 原子核の飛跡の落射光学顕微鏡写真。各飛跡の隣に矢印を付した。矢印の始点側で吸収が起き、終点側に向かって各粒子が飛行した様子が記録されている

2.6 μm である。各飛跡を構成する、一列に並んだ直径約100 nmの銀粒子を直線によって近似して $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 層に外挿することで、吸収の起きた場所を高い精度で特定することができる。NiC層は主に $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 層の安定化の役割を担っている。C層は、原子核乳剤の貼り付きを良くすると共に、Niによる化学的影響から原子核乾板を守る役割がある。このスパッタ膜は京都大学複合原子力科学研究所の日野正裕氏によって開発された。塗布時の水分を多分に含む乳剤を塗布しても安定であり、塗布・乾燥後の乳剤が剥がれにくく、更に乳剤にとって化学的に安全であるという、このような膜構成に至るまでに多くの試行錯誤が必要であった。検出器は図6のような外観をしている。

実際にJ-PARCの物質・生命科学実験施設のBL05にて低速中性子を照射した際に得られた飛跡の像が図7である。飛跡の発生点、すなわち中性子の吸収が起きた場所を高い分解能で特定できること

が分かる。

実際に吸収反応によって生じた α 粒子の飛跡を直線近似し、 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 層まで外挿した際に乗じる不定性を評価して分解能を求めた²²⁾。分解能は飛跡の角度に依存し、飛跡とスパッタ膜面の成す角が 62° 以下の時に、100 nm 未満という、既存の検出器の 1~2 桁良い分解能が得られることが判明した。そして、この角度が 0° の時に分解能が最も高くなり、11 nm となる。検出効率は 2,200 m/s の中性子に対して約 0.055%、7 m/s の中性子に対して約 17% である²²⁾。分解能を優先して設計したため、検出効率は高くはないが、検出の主な対象としている低速の中性子に対しては十分に使用可能である。また、これほどの高い分解能を必要としない用途に対しては、 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 層を厚くすることで検出効率を上げることも可能であり、最大で $2\ \mu\text{m}$ にまで厚くすることができている。

5 展望

開発した検出器は低速中性子の到来位置を高い分解能で測定する様々な実験で威力を発揮するであろう。我々は今後、この検出器を用いて、超冷中性子の量子力学的な位置分布を利用した重力及び未知の短距離力の実験で、過去のもの³⁻⁵⁾よりも感度の高い実験を行いたいと考えている。また、産業分野への応用として、中性子による物体の微小な内部構造

の透視に適用するための研究も開始した。

参考文献

- 1) V.V. Nesvizhevsky, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.*, **440**, 754-759 (2000)
- 2) T. Jenke, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.*, **732**, 1-8 (2013)
- 3) V. V. Nesvizhevsky, *et al.*, *Nature*, **415**, 297-299 (2002)
- 4) H. Abele, *et al.*, *Nucl. Phys. A*, **827**, 593c-595c (2009)
- 5) G. Ichikawa, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 071101 (2014)
- 6) J. Baumann, *et al.*, *Phys. Rev. D*, **37** (11), 3107 (1988)
- 7) C. Siemens, *et al.*, *Phys. Rev. D*, **97**, 052004 (2018)
- 8) C. M. G. Lattes, *et al.*, *Nature*, **159**, 694 (1947)
- 9) K. Niu, *et al.*, *Prog. Theor. Phys.*, **46**, 1644 (1971)
- 10) E. Danysz, *et al.*, *Nucl. Phys.*, **49**, 121 (1963)
- 11) D. Prowse, *Phys. Rev. Lett.*, **17**, 782 (1966)
- 12) S. Aoki, *et al.*, *Prog. Theor. Phys.*, **85**, 1287 (1991)
- 13) H. Takahashi, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 212502 (2001)
- 14) K. Kodama, *et al.*, *Phys. Lett. B*, **504**, 218 (2001)
- 15) N. Agafonova, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **115**, 121802 (2015)
- 16) K. Morishima, *et al.*, *Nature*, **552**, 386 (2017)
- 17) 森島邦博, 日本写真学会誌, **79**, 48 (2016)
- 18) 森島邦博, 日本写真学会誌, **79**, 42 (2016)
- 19) S. Aoki, *et al.*, arXiv, 1202.2529 (2012)
- 20) T. Asada, *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2017** 063H01 (2017)
- 21) A. Aleksandrov, *et al.*, arXiv, 1604.04199 (2016)
- 22) N. Naganawa, *et al.*, *Euro. Phys. J. C*, **78**, 959 (2018)

(名古屋大学未来材料・システム研究所)