

令和 元年 8 月 1 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成29年度

受付番号 603

氏名 浅田貴志

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： ナポリ大学 （国名： イタリア ）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
方向感度を持つ暗黒物質探索実験 NEWS における大規模地下実験の実現
3. 派遣期間：平成 29 年 6 月 1 日 ~ 平成 31 年 5 月 31 日
4. 受入機関名及び部局名
ナポリ大学 物理学科
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意(A4判相当3ページ以上、英語で記入も可)**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注)「6. 研究発表」以降については様式10-別紙1~4に記入の上、併せて提出すること。

5. 所期の目的の遂行状況及び成果

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

暗黒物質は銀河系領域に局在する未発見素粒子で、特有の速度分布をもつと期待されている。近年は特にその方向分布の直接検出実験が注目されており、原子核乾板を標的・検出器として用いる NEWSdm 実験が計画されている。本計画の目的は、新規に開発した微粒子原子核乾板を用い、NEWSdm 実験を実現し、DAMA が示すシグナル領域を探索しうる大規模地下実験を実現することにある。

本計画では主に、①地下実験施設のコンストラクション、②1 g・year 規模実験での実証テスト(初の物理的成果と問題点の洗い出し)、③1 kg・year 規模での DAMA 領域の探索開始、を目標としていた。

当初の年次計画は以下の通りであった。

1年目

実験サイトのコンストラクション及び1 g・year 規模実験を実施する

- 新実験サイト内でクリーンルーム及びシールドのコンストラクションを行う。
- 運用環境(塗布・乾燥設備、温湿度管理、クリーンルームの管理、廃液管理体制)を整備する。
- 共同研究者と地下における赤道儀のセットアップを行い、暗黒物質探索実験の基本環境を完成させる。
- 塗布を行い10 g 規模・1ヶ月の照射(~1 g・year)を行う。回収後は地下現像を行う。
- 問題に応じてアップデートし、同規模照射を繰り返す。また、読み出しに2-3ヶ月を要するので、共同研究者らと共に解析のシフトワークをする必要がある。

2年目

1年目の結果を元に大規模実験環境のセットアップを行い、1 kg・year 規模の DAMA 領域の検証を開始する。

- スケールアップに伴い要求される、より低バックグラウンド環境を実現する。具体的には部材 RI 除去、遮蔽材の最適化、感度コントロールのための100 K 低温環境を統合してデザインする。
- クリーンルームやラドンフラッシング等の設備アップデートを行う。
- 1 kg の検出器を製造するため、シフト体制を確立し、共同研究者らを指揮してフィルム製作を行う。
- 2年目の終わりまでに製造を完了し1 kg・year 規模実験を実施する。

しかし、本計画の基礎となる実験サイトの構築について、グランサッソ研究所における2016年-2017年にかけての化学物質の水源への混入事件への対応のため、追加の嚴重な床の防水加工工事が実施される事によって大幅な遅れが生じてしまった。また同年の同地域での異常降雪・地震等の影響もあり、計画では着任時にほぼ完成する予定であった新サイトが、最低限使用可能になったのが2018年秋頃、さらに期間終了後の2019年7月末からは再度換気配管等の工事のため一時閉鎖されている。

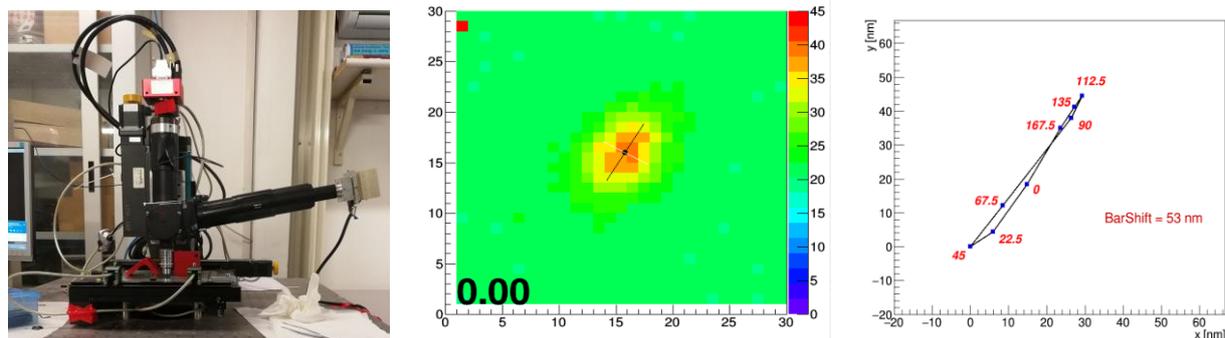
このため当初の計画の順序を変更し、2017年6月から2018年9月頃までは主に2年目の計画で必要としていた低バックグラウンド化をめざす上での、解析面での手法の構築と検証を行い、後に2018年10月より新実験サイトが最低限使用可能となった後に当初の計画に沿った活動を開始した。

1年目

低バックグラウンド化を目指す解析手法の構築・検証

主な計画とはしていなかったが、副次目的として言及していたとおり、ナポリ大では次期光学解析システム(a)の原理実証を行っていた。これは光学顕微鏡に液晶と偏光板を組み合わせた連続的な偏光選択機能を搭載したシステムで、信号の偏光応答情報の解析を目的としている。原子核乾板の信号は、粒子が通過した箇所を現像処理により銀フィラメント群で浮かび上がらせた飛跡であり、通常光学顕微鏡で解析される。しかし、暗黒物質の場合は飛跡長さが数100 nm となってしまう、光学分解能を超えてしまうため、光学顕微鏡解析には限界があった。このブレイクスルーとして期待されるのが偏光情報であり、銀フィラメント個々の位置を偏光選択で個別に取り出すことによ

り、接近点光源の分解能を超えて、フィラメント毎の位置精度を取得する超解像技術である。同システムでは、特に一つの飛跡イベントに対し偏光を変えたときに輝度重心が移動する最大距離を **barycenter-shift** と定義し、飛跡イベント内の複数銀粒子間の距離に依存する量として解析する (b)(c)。

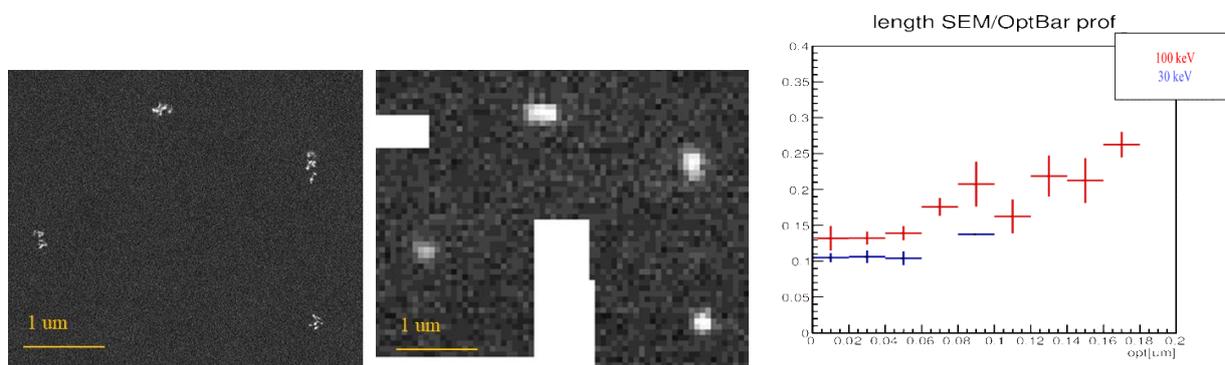


(a)左図：ナポリ大で開発している偏光を用いた光学読み取りシステム
 (b)中図：炭素イオン飛跡の撮像データ。単位はピクセル（1ピクセル約27nm）
 (c)右図：(b)のイベントにおける偏光角度毎の輝度重心の軌跡

基礎となる解析システム自体は着任時までナポリ大で開発されていたが、ナポリ大の共同研究者らとともに2019年6月より同システムの調整及び較正を行った。

まず解析の基礎となる位置精度に関して検証した。点光源とみなせる銀の60 nm微粒子を用いて、環境起因やシステムの動作による振動を評価し、動作スピードや振動伝達源となるケーブル等の改善を行った。また撮像素子に起因する画像ノイズの評価を行い、アベレーシングによる最適なノイズ除去パラメータの調整を行った。これらの研究によって、位置精度を10 nmから6 nm程度、かつXY面で等方的になるように改善した。またターゲットとなる炭素イオン飛跡等に対しての較正を行い、緑、青、紫のLED光源より、短波長化による分解能と銀フィラメントに対するコントラストの観点から青色LEDを選択した。加えて飛跡を目視確認により種別分類し、解析結果の評価も行った。

また、過去に研究経験のある、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡でのイベント対応付けによる解析手法を応用し、偏光を用いた解析での主パラメータである「偏光による輝度重心の移動量」に対し、SEM画像より手動で測定した実際の銀フィラメントベースでの飛跡長さと比較を行った (d)(e)。これにより飛跡長さ100-250 nmに対して輝度重心移動と良い相関を得られ(f)、偏光を利用した解析技術を実証できた。



(d)左図：電子顕微鏡で撮像した炭素イオン飛跡の銀フィラメント画像
 (e)中図：対応付けされた(d)の4イベントの光学顕微鏡画像
 (f)右図：光学顕微鏡での **barycenter-shift** 量(x軸)と電子顕微鏡画像上での飛跡長さ(y軸)の相関

これらの開発により、通常の光学顕微鏡では得られない光学分解能以下の飛跡候補に対し、**barycenter-shift** を用いて複数銀フィラメントからなる飛跡と識別するためのパラメータを確立でき、低バックグラウンド化を目指す上での背景事象との切り分けの基礎を確立できた。

これらの結果は ICNFP 2017 にて報告にて報告を行った。

2年目

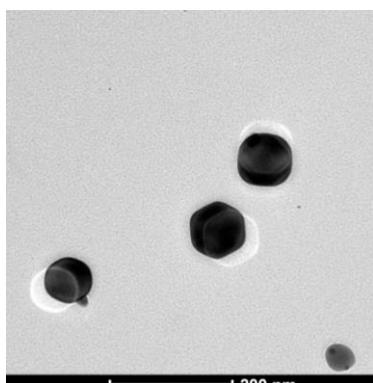
2018年までのNEWSdmグループでの研究の結果、背景事象として環境放射線等の蓄積や、ダスト等の混入、原子核乾板の原材料である原子核乾板乳剤輸送中のトラブルなどが問題となったため、計画で案として触れていた原子核乾板乳剤のグランサツ研究所地下実験サイトでの直接製造が重要となった。現地で検出器を直接製造できれば、輸送に伴うトラブルや経時劣化、また環境放射線の蓄積を除くことが可能である。さらに新サイトはクリーンルーム化が計画されており、素材中・製造過程で混入している可能性が高い物理的なダストを除去する狙いもあった。このような実際の利用先、特に地下の宇宙線フリーな環境で直接原子核乾板を製造する試みは世界初である。新実験サイトの外装・電源等の施工が終了するのに伴い製造装置をグランサツ研究所へ輸送し、2018年12月までにインストール(g)、及び水を用いて添加速度や温度を校正し、再現性と精度の確認を行った。



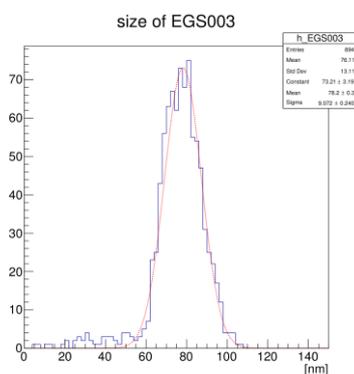
(g)左図：地下実験サイトへインストールされた原子核乾板乳剤製造装置

(h)中図：製造された原液、脱塩工程時、塗布後の原子核乾板（数字は各結晶サイズ）の写真

(i)右図：同システムを用いて初めて製造された原子核乾板で観測された Am-241 線源の α 線飛跡



(j)左図：電子顕微鏡で撮像された原子核乾板乳剤の結晶



(k)中図：(j)のサイズ測定結果。平均直径 73nm

2019年1月からは、グランサツ地下実験施設での原子核乾板乳剤の実液による製造テストを行った。インストールされた製造装置を用いた原子核乾板乳剤の粒子形成、脱塩、塗布、増感、照射、現像とすべての工程を通してテストを行った(h)。また、ナポリ大学で電子顕微鏡を用いて結晶サイズの確認も行った(j)(k)。光学顕微鏡での飛跡画像の確認も行い、実際に製造された飛跡で放射線が問題なく観測できることを確認した(i)。

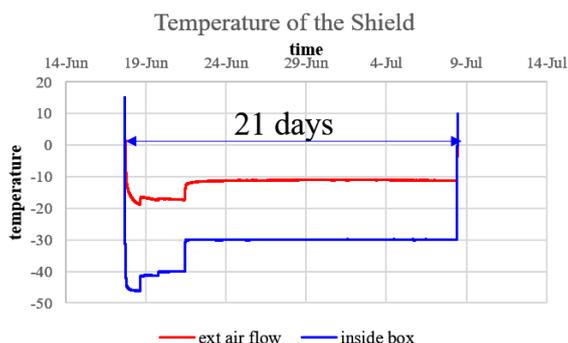
2019年4月に新ファシリティにエアフィルターがインストールされたことに伴い、部屋のクリーンルーム化とその検証を行った。ただし現時点で排気系の施工が完了しておらず、2019年7月から11月にかけてアップデートされる予定である。結果として、無人環境では0カウントレベル、Class 1 (<1 particle /feet³ for 0.5 μ m) であったが、有人の原子核乾板乳剤製造作業下では少なくとも Class 1,000 (1,000 particle /feet³ for 0.5 μ m) 程度まで悪化してしまうと判明した。これは排気の流れができていないことが原因と考えられ、実装後に再度テストを行う。また、同時に原料のフィルタリング工程も導入し、少なくとも主なダスト源であるゼラチンのダスト量は1/3程度に抑え

られたが、現時点で残留物が空気清浄度の影響を受けているかははっきりしておらず、排気系の実装をまって再度確認を行う。

2019年6月より実験サイトで直接製造された原子核乾板を用いたテストランを行った(l)(m)。赤道儀については新たにシールドと統合したデザインのものを作成する計画が進められているが、現時点では適用されていない。このテストランでは11.5gの原子核乾板により21日間-30°Cで照射され、0.67g・yearに相当する。このテストでは、検出器の現地製造、低温でのシールド運用、グループ間での解析チェーンの確立など基本的な実験の流れが確認される予定であり、現在解析が進められている。

以上、所期の計画と比して、サイト建設の遅れにより1年間の遅延が生じたが、2年目に計画していた低バックグラウンド化につながる研究成果を主に1年目に遂行し、1年目の計画内容は赤道儀の実装を除き2年目にほぼ完遂できた。

また、これらの結果をCYGNUS2019にて報告を行った。



(l)左図：シールドへの原子核乾板をインストール中の写真

(m)中図：21日間の照射時のシールド内部の温度履歴