

(様式第7号) (要綱第12第1項関係)

## サイエンス・アソシエーション・プロジェクト事業実績報告書

平成 28年 9月 28日

長野県教育委員会教育長 様

学校名 長野県松本深志高等学校  
学校長名 小口 俊幸 印

平成28年 6月23日付け長野県指令 第279号で補助金の交付決定のあった28年度サイエンス・アソシエーション・プロジェクト事業を以下のとおり実施しました。

- 1 企画名 物理最前線～ニュートリノ・重力波～に触れてみよう
- 2 企画の分類 (該当するものに○をしてください)  国内研修  海外研修
- 3 事業実施対象者  
長野県松本深志高等学校 1～3年生徒 希望者
- 4 実施主担当者職氏名  
教諭 春日 隆史
- 5 実施内容と成果  
別紙添付

サイエンス・アソシエーション・プロジェクト  
物理最前線～ニュートリノ・重力波～に触れてみよう

1 経緯

2015年のノーベル物理学賞「ニュートリノ質量を示す、ニュートリノ振動の発見」に関する講演会が、2016年1月9日に、まつもと市民芸術館で行われました。中畑 雅行 先生(東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設長教授)、佐藤 丈 先生(埼玉大学理工学研究科准教授)の講演が開催されました。講演者の中畑先生は、現在神岡の施設長であり、梶田さんと長年一緒に研究を積み重ねて居られる方です。多数の本校の生徒が、その講演会を聴講しました。物理研究会と地学研究会の生徒が、4月24日に東京大学 安田講堂で行われた東京大学理学部公開講演会 梶田隆章教授ノーベル賞受賞記念連続講演会「カミオカから宇宙をみる」に参加し、神岡での実験が捉えたニュートリノ 中畑 雅行 氏、ニュートリノ研究の発展と展望 横山 将志 氏 物理学専攻 准教授、重力波でさぐる宇宙 安東 正樹 物理学専攻 准教授 の公演を聴きました。それがきっかけとなり、物理学の最先端の研究施設を見学できることになりました。

2 期 日 2016年8月17日(水)

3 目 的 梶田隆章東京大学特別荣誉教授のノーベル賞受賞を生み出した神岡は、世界でもまれにみる物理学の最先端研究の現場です。「スーパーカミオカンデ」と「重力波望遠鏡 KAGRA」の研究施設の見学、並びに二人の研究者の講演を聴きニュートリノ研究の進展と、重力波を用いた天文学の可能性を学習します。

4 場 所 東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設 スーパーカミオカンデ  
岐阜県飛騨市神岡町東茂住 456  
東京大学宇宙線研究所・重力波推進室 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA  
岐阜県飛騨市神岡町東茂住 238

5 参加者 生徒 物理研究会 2名 地学会 14名 その他生徒 4名  
引率 教諭 3名 計 23名

6 内 容 講演「神岡での実験が捉えたニュートリノ」  
講演者 中畑 雅行 教授 東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設長  
スーパーカミオカンデ見学  
講演「宇宙を観測する新しい窓 重力波」  
講演者 三代木 伸二 准教授 東京大学宇宙線研究所・重力波推進室  
大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 見学

7 行 程 7:00 松本駅アルプス口 集合・出発  
9:30 東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設 正面駐車場 着  
9:30～10:30 中畑 雅行 教授 講演「神岡での実験が捉えたニュートリノ」  
10:30～10:40 研究施設発 徒歩で 東茂住除雪センターへ移動  
10:40 東茂住除雪センター 低公害バス乗車  
スーパーカミオカンデ見学  
12:00 低公害バス乗車で重力波施設 下車  
12:10～13:00 昼食  
13:00～14:00 三代木 伸二 准教授講演 「宇宙を観測する新しい窓 重力波」  
14:00～14:10 トイレ休息  
14:10～14:30 KAGRA 坑口へ移動  
14:30～14:45 坑内へ移動  
14:45～15:35 KAGRA 見学  
15:30～15:45 坑外へ移動  
15:45～16:00 KAGRA 坑口から重力波施設へ移動  
16:00 東京大学宇宙線研究所・重力波推進室 発  
18:30 松本駅アルプス口着

8 持ち物 昼食、水筒、メモ帳、筆記用具、デジタルカメラ、汚れても良い履きなれた靴、冬用上着  
(坑内は平均気温 13 度程度 東京の冬の気温)、懐中電灯

## 9 報告

### (1)文化祭発表 7月17日・18日 物理教室

物理研究会の生徒が、宇宙線を見るために霧箱の実験を行いました。一般公開を行い、多数の子供や、親、地域住民の方々が見学に見えられました。模造紙に、霧箱の実験の仕組みをまとめて、説明するとともに、放射線源を使って放射線の飛跡を観察しました。

### (2)事前学習会 7月22日(金) 16:00~17:00 第1理科講義室

サイエンス・アソシエーション・プロジェクトに参加する生徒が、素粒子、重力波の学習を行いました。(写真1)

クォーク、レプトンの電荷や、クォークの複合粒子、ニュートリノ、重力波について理解を深めました。「電子型ニュートリノとタウ型ニュートリノの振動は、どのくらいの距離飛ばせば起こるのか」、「チェレンコフ光は、水中における粒子の速度が、水中における光速を超えると起こるという事であるが、真空中に直した時には、光を超える速度を持つ粒子があるということにならないのか」など、素朴な疑問を持ち、ニュートリノ、重力波について興味・関心をさらに深めました。



写真1

### (3) 物理最前線～ニュートリノ・重力波～に触れてみよう 8月17日(水) 東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設、東京大学宇宙線研究所・重力波推進室

#### (a) 講演「神岡での実験が捉えたニュートリノ」中畑 雅行 教授 東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設長

ニュートリノとはどのような粒子か、ニュートリノによって宇宙や素粒子をどのようにして探ることができるのか、ニュートリノの観測、ニュートリノ振動の観測についてご講演いただきました。(写真2)  
<講演内容>

- ・スーパーカミオカンデ施設の説明
  - ・梶田隆章先生がニュートリノ振動の観測からニュートリノに質量があること
  - ・今後は、ハイパーカミオカンデを建設し、ニュートリノに関して研究を進めていくこと
- など話していただく。



写真2

#### (生徒の感想) 抜粋

- ・ニュートリノの不思議やスーパーカミオカンデについての話、スーパーカミオカンデが作られる前までの話が聞くことができ、貴重な体験ができてよかったです。
- ・自分にできることなどなにもないけれど、宇宙がどのようにして生まれたのか自分なりに考えてみようと思いました。
- ・1秒間に数百兆個のニュートリノが体を通り抜けているらしい。しかし、ほぼ全てが反応することなく通り抜けていくので、人体に影響が出ないと聞いて、ニュートリノの小ささと多さに非常に驚きました。

#### (b) スーパーカミオカンデ見学

a. 神岡鉱業保安員の方からスーパーカミオカンデ見学に際しての注意事項の説明を受けました。

跡津坑口は20年前にできました。その坑口からカミオカンデまでは2000mあります。歩くと結構な時間がかかります。バスでは10分くらいかかります。坑内は寒いですが、スーパーカミオカンデの実験施設内は、研究施設なので暖かいです。奈良時代から富山県と岐阜県の境にある神岡鉱山は、銅を産出していました。今から140年前に三井財閥が鉱業権を取得しました。今は、銅は採れず、鉛・亜鉛などを掘っています。茂住坑、栃ボラ坑、丸山坑があります。採掘すると地下に空洞ができるので、小柴先生がカミオカンデという実験施設を作りました。

実験の成果からノーベル物理学賞をもらいました。ノーベル賞をもらったことを契機にもっと大きな施設を作ろうとスーパーカミオカンデを造りました。スーパーカミオカンデは縦41.4m横39.3mの大きな水槽であります。穴を掘る技術を持っている神岡鉱業が施設建設のお手伝いをしました。

- b. 「スーパーカミオカンデ 素粒子と宇宙の秘密を探る」というビデオを施設内で見ました。(写真3)

<学習内容>

- ・ニュートリノや陽子崩壊の研究を通して素粒子の秘密を探る。
- ・ニュートリノによって広大な宇宙を観測する
- ・今までに見つかっている素粒子について
- ・ニュートリノには、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノがあること
- ・太陽ニュートリノ, 超新星爆発, ビッグバンでニュートリノ放出しており、私たちの体を1秒間に1000兆個以上のニュートリノが通過している。

- c. 中畑雅行教授による光電子増倍管の見学・説明 (写真4)

実物を見ながら説明を受けました。

光電子増倍管は、光電効果によって飛び出してくる光電子を増幅して、ニュートリノを捕えます。

- d. スーパーカミオカンデの見学 (写真5)

スーパーカミオカンデのタンクの上で、中畑雅行教授によるスーパーカミオカンデが出来るまで説明を受けました。

各自で施設・設備の写真を撮影しました。

- e. コントロール室の見学 (写真6)

研究員間の通信の会話は英語を使っていました。

1時間ごとに研究員が交代で、24時間体制でスーパーカミオカンデの中を常に監視していました。

円筒形のステンレス容器の内側に光電子増倍管が配置されており、円筒形の展開図をコンピュータに表示し、そこにおける光電子増倍管が受けた光電子の様子が映し出されていました。

(見学しての生徒からの質問および回答)

Q1 さっき、ちらちら映っていた卵型の光とニュートリノが入ってきた時の光り方が違うのですか。

A1 ニュートリノは1日、数十個しか観測されません。以前に取ったニュートリノのデータをお見せしましょう。ニュートリノがどこで水分子と反応し粒子を出したか場所を考えます。どこで反応したか場所がわかります。タンクの中で粒子を出したか、タンクの外で粒子を出したかがわかります。

Q2 チェレンコフ光は、ふつう可視光の領域に出る光を考えるが、赤外領域の光はでないのですか。

A2 チェレンコフ光は、あらゆる波長の光がでます。

Q3 ニュートリノを観測すると、どうしてリング状の光が見えるのですか



写真 3



写真 4



写真 5



写真 6

A3 粒子は四方八方に光を出します。粒子が運動すると衝撃波の様に波の山が重なり合って強め合う場所が円錐形を描きます。それが光電子増倍管で検出するとリング状に見えます。ちょうどアヒルが水面を泳いでいくとき、水面波の速度よりも速く泳げます。その波は、波面が三角形を描きます。空間で考えると円錐になります。

Q4 ニュートリノには質量があるということは、重さがあるということですが、重力で地球に引かれないのですか。

A4 実際は引かれるのですが、ほかの粒子よりは、非常に軽いので地球の影響を受けません。質量があるのでニュートリノ振動は起こるのです。

Q5 ニュートリノ振動は、温度には影響を受けないのですか。

A5 温度には影響を受けません。物質の密度には関係します。密度の大きいところでは、振動の波は、きれいな正弦波の形は取らなくなります。太陽の中心は密度が高いです。太陽の中心では、ニュートリノ運動は影響を受けます。私たちの日常生活の中では、影響を受けません。

(生徒の感想) 抜粋

- ・施設の中では、外国人の研究員がたくさんいて、まさに仕事をしているところを目の当たりにして、世界の研究の先端を担う施設であることを強く実感した。
- ・本当に岩の中で、日本の最先端に行く研究を行っているんだなあと思うと、感銘を受けました。
- ・タンクの上に乗った時、下にスーパーカミオカンデの巨大な水槽があると思うと、緊張した。

(c) 講演 「宇宙を観測する新しい窓 重力波」

東京大学宇宙線研究所・重力波推進室 三代木 伸二 准教授

重力波とは何かについて学習しました。(写真7)

- ・身の回りには、音、水面波、粗密波、電磁波、地震波などいろいろな波があること
- ・光も波であり、速度をもっていること
- ・重力は、潮汐的な変化を起こす時空のゆがみであること
- ・重力波は、質量をもった2つの物体がお互いに回転すると生じること
- ・2つの中性子星が回転したり、連星ブラックホールが回転すると重力波が生じること
- ・重力波望遠鏡は、レーザー干渉計でできていて、
- ・世界には、アメリカのワシントン州とルイジアナ州のリビングストーン(LIGO)、イタリアのピサの郊外、ドイツのハノーバー、日本の神岡(KAGRA)に重力波望遠鏡があること
- ・2016年2月11日アメリカのLIGOが人類史上初めて重力波を捕えたこと
- ・LIGOと同じような構造を持ったKAGRAはマイケルソン干渉計を使いその感度を上げることを行っていること
- ・世界の重力波望遠鏡がネットワークを使って協力して重力波を観察していくことが大切であること

などを学びました。

(生徒の感想) 抜粋

- ・とても、おもしろく、分かりやすかった。138億光年前が見たければ、138億光年遠くを見ればいいという考えは、新鮮だったし、面白いと思った。
- ・これから重力派を使った観測ができるようになれば、今までわからなかったことも解明されるかもしれないと思うとこれからはとても楽しみです。
- ・今日の講演を聞いて、仕組みが少しずつ理解できると、重力波の観測成功のすごさを身に染みて感じる事ができた。



写真7

#### (d) KAGRAコントロール室の見学

KAGRAの重力波望遠鏡をすべて制御しているコントロール室の見学をしました。このコントロール室KAGRAの中が光ファイバーで繋がれていて、KAGRAの設定を変えることができます。KAGRAの調子が悪い時は、ここで調整をして直します。どうしようもない場合のみ、研究者がKAGRAの中に入って直します。海外からの研究者も研究を行っていました。

#### (e) KAGRA見学

ひんやり冷たいトンネルを500m徒歩で移動し、重力派望遠鏡中央実験室に到着しました。

中央実験室には、レーザー干渉計にとって大切なレーザー光源があります。光を直行した2軸に分けるビームスプリッターとか感度を上げるために様々な鏡の入った真空タンクが入っています。普通、研究者は坑道を電気自動車に乗ってここまできます。ガソリン車は入れません。施設内は、青いシートが敷いてあるところを歩きます。

##### 1). KAGRAコントロールセンター

KAGRAをコントロールするためのコンピュータとか、データをためるためのハードディスク、制御するための特別なコンピュータとか、GPSアンテナから持ってきた信号から時刻を計算するコンピュータなど、KAGRAにとって最も大切なものが集まっているところです。こことKAGRAの中、ここと先ほど見た制御室が光ファイバーで繋がれていて、外から全てKAGRAを制御することが出来るようになっていきます。

KAGRAで大切な施設は3つあって、中央実験室、エンド鏡2か所です。3つの施設は2階構造になっています。鏡を冷やす特別な真空タンク（クライオスタッド）の上の部分にこの階段は繋がっています。

##### 2). 中央実験室

地上から200m程もぐった場所で、地上の振動が1/100まで軽減されます。中央実験室の高さは9~10mあります。レーザー光源とレーザープリッター、3kmの間を何度も光を反射させる大切な鏡が両腕にあります。

クリーンルームの奥にレーザー光源を格納する部屋があります。今は低出力の1064nmの赤外線レーザーを使っていますが、将来は出力200W程度の強いエネルギーのレーザーを使います。(写真8)

強いレーザーを使いますので、ほこりがあると焼けてしまって、光学素子をだめにしてしまうので、非常にク

リーンな環境で使われます。私たちの立っているこの場所は、1m<sup>3</sup>あたり直径が0.1マイクロメートルのほこりが1千万個あります。クリーンルームの中はそれが0個になるようになっています。真空タンクの中には鏡が入っていて、反射した光は、ビームスプリッターに入っていきます。今は、改造中のため、真空タンクとビームスプリッターを繋ぐ管は外しています。

##### 3). ビームスプリッター

直径30cm、厚みが8cmあるガラスの鏡が格納されています。鏡の表面には特殊な膜が作られて、直交方向に50%、直進方向に50%光が分かれます。今、作業をしています、非常にクリーンな環境で行わなければならないので、すべての真空タンクはクリーンルームの中に入っています。今、研究者が、ビームスプリッターを振り子のように吊るための装置にビームスプリッターを入れる準備をしています。

##### 4). ゲートバルブ

左の真空と右の真空を仕切るバルブです。今は、閉ざされていて向こうが開放で、こちら側が真空になっています。

##### 5). クライオスタット

真空タンクには、中の鏡を-253度まで冷やすための冷凍機が4つついています。この冷凍機の性能は、冷えるところが2段あって一番冷えるところは-269度です。2段目に冷えるところは40Kぐらいです。



写真 8

## 6). マリオネット

サファイア鏡を7段の振り子でつるしています。振り子の一番上は、2階の防振室に繋がっています。地面の振動から鏡を守っています。鏡を冷やすため、真空容器は2重になっています。

普通、我々が使っている鏡は光が1回反射すると、光の量の90%が戻ってきますが、KAGRAのサファイア鏡は1回の反射で100万分の50しか光の損失がない膜が鏡についています。石英は20Kまで冷えないので、サファイアの単結晶を鏡に使っています。直径が、将来的には22cm、厚みが15cmの鏡を使いたいと考えています。この鏡を作れるのは、今は、アメリカの会社ですが、日本の会社が

作れないか、検討をしています。サファイアガラスは、戦車の窓に使われるので、アメリカで単結晶を作る技術が発展しました。

Q どうして、鏡を冷やすのですか。

A 原子は熱振動しています。鏡の温度が高いと、鏡の表面で原子が激しく振動します。そこに光が反射すると、光に雑音が含まれてしまいます。なので、熱を取りたいのです。

## 7). KAGRA腕の部分の見学

ここがXアームの方になります。ここから立山の方に3kmアームが伸びています。直径80cm、長さが12mの真空ダクトを250本つないでKAGRAの腕3kmを形成しています。3km先に、さきほど見たクライオスタットがあり、その中に鏡があります。中央実験室にも鏡があって、光を1,000回反射して、光を3,000km走らせます。このトンネルは幅4m、高さ4mで、ダイナマイトを使って掘られました。トンネルを作ったのは、鹿島建設ですが、1ヶ月に259m掘る日本記録を作りました。その前までは、黒部ダム建設が日本記録を持っていました。

ここは温度が14~15℃ですが、エンドのところに行くと温度が4~5℃上がります。冷泉が湧き出していて、暖かい空気と冷たい空気の境に水滴ができます。蛍光灯は200mおきについていますが、この方向は曇って見えません。違うもう一方は、遠くまで見えます。また、天井から水滴が落ちたり、床に川ができたりしていますが、地下ですので、水から逃れることはできません。よって、中央に対してエンドは10mだけ高くなっており、傾斜をつけてあります。(写真10)

(見学しての生徒からの質問および回答)

Q この装置はなんですか。

A 真空ダクトです。地元の業者に牽引車でゴロゴロ運んできて、定位置において、そこで結合するという作業を行いました。KAGRA全体で真空ダクトは500本ほどあります。500本作るのに3年かかりました。3年の間にこのトンネルも掘っています。神岡鉄道が数年前に廃線になってトンネルが残っていたので、その中でできた真空ダクトを仮保管することができました。結合には半年の時間がかかりました。真空ダクトの中の真空度は大気圧の1兆分の1くらいです。それくらいの真空度がないと空気の流れができてそれが雑音になってしまいます。ちなみにこの湿度は100%です。水の中に入っているのと同じですね。

天井からつららが垂れ下がっています。セメントの成分が溶け出して鍾乳石のように固まったものです。触ってみるとすごくもろいです。鍾乳石は固いですけれども。ちなみにセメントが入って



写真 9



写真 10



写真 11

いる水は性質がアルカリ性です。中央実験室の出口で、みんなで写真を撮りました。(写真11)

(生徒の感想) 抜粋

・3kmにもなるKAGRAの腕の部分も見せていただいたのですが、3kmあるだけでも長い!と思ったのに、さらにこの区間で何回も光を往復させてやっと重力波がわかるというので、気が遠くなりそうでした。しかし、このKAGRAのしくみは、物理の授業でやった光の干渉を利用しているものなので、自分が、普段、勉強をしていることと少しだけけれど接点があって嬉しくなりました。

・「とても大きな施設であるのにどこまでも繊細だ」見学全体の中で特に思ったことだ。

・アームトンネルはとても長くて3kmあり、端まで見えませんでした。そのトンネルは、掘るスピードが日本記録になったそうです。日本の技術の最高峰が用いられており、すごいと思いました。

## 10 まとめ

二人の講師の先生による講義は、物理の最先端の実験の原理を分かりやすく説明していただき、学校で行われている物理の授業の理解を促すものでした。講義を聴くことで、新たな疑問が生じ、それを仲間同士で議論しながら解決していこうとする前向きな姿が見られました。

少しでも、自分の考えを相手に分かりやすく伝えたいと、紙に図を書いたり、身振り手振りを使ったりと工夫をしていました。グループによるディスカッションは、自分の考えを深めるために非常に有効であることが分かりました。アクティブラーニングの手法は、科学の探究学習に役に立つと考えられます。

スーパーカミオカンデ、KAGRAという日本の科学技術の粋を集めた施設・設備を見学できたことに、生徒は、喜びと、幸せを感じました。「百聞は一見にしかず」といいますが、正に、巨大な、最先端の施設を目の前にすると、感激で、言葉を失います。生徒も貴重な経験をすることができました。科学の研究が、いろいろな国の科学者が集まって共同で行われている現場を見ることで、チームで研究を進める上で、協調性も必要であること、議論を交わすことの重要性を生徒は感じるすることができました。

科学の最先端に触れることで、科学に対する興味・関心が一層高まりました。一人でも多くの科学者が、このプロジェクトに参加した生徒の中から生まれることを期待します。

長野県教育委員会が、今回のプロジェクトを企画していただき、生徒に、科学技術の最先端を学び、見て、触れて、考える機会を与えていただき、感謝いたします。