

東京大学宇宙線研究所将来計画検討委員会 最終報告書

2017年10月26日

委員会設立の経緯と趣旨

東京大学宇宙線研究所（ICRR）は1987年以降4回、（共同利用）運営委員会のもとに将来計画検討（小）委員会を組織してきた。それらの委員会では研究所の将来計画、特に研究所の将来の研究の柱となるような大型計画の検討及び推薦がなされ、研究所はそれを実行するように努めてきた。第1回の委員会（1987）ではスーパーカミオカンデ（Super-K）が推薦されて実現し顕著な成果を生み出し、第2回（1993）に推薦された最高エネルギー宇宙線研究はテレスコープアレイ（TA）実験として実現し、第2回及び第3回（2007）の委員会により推薦された重力波望遠鏡 KAGRA は、検出器建設が進行中である。第4回（2013）の委員会では、Super-KとKAGRAに続く新たな将来計画を検討し、すみやかに実現をめざすべき次期計画としてチェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）実験に重点を置くことが勧告され、2016年度概算要求ではCTAの建設が認められた。そのため、KAGRA、CTAに続く研究所の将来計画を検討する時期を迎えている。

2012年-2013年の将来計画検討委員会では、大型計画であるハイパーカミオカンデ（Hyper-K）についても議論され、「チャンスが巡ってきたときにいつでも実現が可能となるよう、ハイパーカミオカンデの開発研究を大いに進めることを期待する。その一方で、予算規模が約800億円と見積もられていることから、関係者に対し、国ごとの分担の見通しをたて、予算の見積もりをより正確にし、予算の獲得に向けて詳細に検討するよう要請する。」と勧告されている[1]。

その後、ICRRと高エネルギー加速器研究機構（KEK）素粒子原子核研究所（IPNS）は、Hyper-Kに関する協力の協定を締結し、外部国際諮問委員会を設置し、計画の具体化に向けた検討を進めてきた。

そこで、ICRR運営委員会は、2013年の将来計画委員会報告書[1]以降これまでにどのようなことがなされてきたのかという点について精査し、研究の意義や実現可能性などの点についても再度検討し、次期主要プロジェクトとして適切かどうかの判断をするために今回将来計画検討委員会を立ち上げ、あらためて Hyper-K 計画を中心課題として検討することとなった。また、前回の将来計画検討委員会後に新たに構想された計画案などがあれば、それらもあわせて議論することとなった。

本委員会立ち上げ時、学術会議では第23期学術の大型施設計画・大規模研究計画に関するマスタープラン策定が進められており、文部科学省では2017年の早い時期にロードマップ

の改訂が議論されることとなっていた。それらの中でHyper-K計画も議論の俎上にあげられることが予想されたため、こうした動きに迅速に対応するため本将来計画検討委員会ではHyper-K 計画についてのみ先行して議論し、2017年3月24日付で中間報告をまとめた。

新たな研究計画については、2016年10月8日から11月1日にかけて宇宙線研究所教授会メンバーに対して公募され、「ALPACA実験計画」、「地上における超高エネルギー宇宙線観測将来計画」、「宇宙素粒子の複合的撮像観測」の3プロジェクトの提案があった。また、2017年5月1日付でXMASS実験グループの研究代表者から現計画の変更に関する議論の依頼があり、第8回委員会（2017年5月10日開催）においてそれも新規提案として議論に含めることとした。これら4つの新規提案について議論を進め、それらに対する計画の概要と委員会の評価を加えて最終報告書を作成した。

委員の構成

岡田 安弘(委員長)	高エネルギー加速器研究機構 理事
相原 博昭	東京大学大学院理学系研究科 教授
伊藤 好孝	名古屋大学宇宙地球環境研究所 教授
井上 邦雄	東北大学ニュートリノ科学研究センター 教授
荻尾 彰一	大阪市立大学大学院理学研究科 教授
岸本 忠史	大阪大学大学院理学研究科 教授
久野 純治	名古屋大学基礎理論研究センター 教授
森 正樹	立命館大学理工学部 教授
中畑 雅行(幹事)	東京大学宇宙線研究所 教授
伊部 昌宏(副幹事、書記)	東京大学宇宙線研究所 准教授
梶田 隆章(オブザーバー)	東京大学宇宙線研究所 所長

委員会の経緯

- 第1回 (2016年10月4日)
 - 趣旨説明
 - Hyper-K Advisory Committee 報告
 - Hyper-K 計画について
 - コミュニティの検討状況について
 - 今後の進め方について
 - Hyper-K の議論の進め方
 - その他の計画の提案募集とレビュー時期
- 第2回 (2016年11月14日)
 - Hyper-K 計画のヒアリング

- Hyper-K を推進する体制について
- Hyper-K の物理 I (太陽、超新星爆発ニュートリノ)
- Hyper-K の物理 II (CPV、陽子崩壊)
- Hyper-K 計画の議論
- 新規提案について
 - 教授会メンバーへの公募
 - 提案書
 - 新規提案に対する議論の進め方
- 第3回 (2016年12月13日)
 - 中間報告とりまとめのための議論
 - 新規計画ヒアリングについて
- 第4回 (2017年2月2日)
 - 中間報告とりまとめのための議論
- 第5回 (2017年2月21日)
 - 中間報告(案)を教授会と運営委員会へ提出の報告
 - 新規提案に対するヒアリング
- 2017年3月6日-3月24日
 - 教授会(2月23日、3月23日開催)、運営委員会(3月6日開催)でのコメントを踏まえ、改訂をメール議論
- 2017年3月24日
 - 東京大学宇宙線研究所将来計画検討委員会 中間報告(最終版)を決定
- 第6回 (2017年4月10日)
 - 新規提案「ALPACA実験計画」の議論
 - 新規提案「地上における超高エネルギー宇宙線観測将来計画」の議論
 - 新規提案「宇宙素粒子の複合的撮像観測」の議論
 - 最終報告書についての議論
- 第7回 (2017年4月27日)
 - 最終報告書(案)を議論
- 第8回 (2017年5月10日)
 - 最終報告書(案)を議論
 - あらたな新規/変更提案に対する対応について
- 第9回 (2017年6月12日)
 - 暗黒物質直接探索のレビュー
 - 新規提案「液体キセノンを用いた暗黒物質直接探索実験の新たな展開の提案」のヒアリングと議論
- 第10回 (2017年7月3日)
 - 新規提案「液体キセノンを用いた暗黒物質直接探索実験の新たな展開の提案」の追加ヒアリングと議論

- 第11回 (2017年8月18日)
 - 新規提案「液体キセノンを用いた暗黒物質直接探索実験の新たな展開の提案」の議論
 - 最終報告書についての議論
- 2017年9月19-22日
 - 運営委員会(9月19日開催)でのコメントを踏まえ、改訂をメール議論
- 第12回 (2017年10月16日)
 - 教授会(9月26日開催)からのコメントに対して、最終報告書(案)について議論
- 2017年10月26日
 - 東京大学宇宙線研究所将来計画検討委員会 最終報告書を決定

ハイパーカミオカンデ計画

計画の概要と前将来計画検討委員会以降の変更点

Hyper-Kはカミオカンデ、Super-Kに続く、第3世代の水チェレンコフ検出器による核子崩壊・ニュートリノ実験計画である。この計画で期待される物理は、加速器ニュートリノによるレプトンでの荷電パリティ(CP)非対称性の測定、大気ニュートリノでのニュートリノ質量階層性の決定、核子崩壊探索、太陽ニュートリノ、超新星爆発ニュートリノ、超新星背景ニュートリノなど幅広い。検出器サイトの候補地は岐阜県飛騨市神岡町の柘洞鉱(Super-Kから約10キロメートル離れた、深さ約650メートルの地下)である。

前将来計画検討委員会において検討された検出器のデザインは、高さ54メートル、長さ250メートルの円筒形タンク2セットで構成され、総質量100万トン(うち有効体積は56万トン、Super-Kの約25倍)、20%の受光面積、光センサーの総数量は約10万本であった。その後検出器サイズの最適化が行われ、本将来計画検討委員会に提出された検出器デザインは、高さ60メートル、直径74メートルの円柱型タンク(総質量26万トン、有効体積19万トン)に超高感度光センサー(従来の2倍の感度)を内水槽に4万本取り付けるといったものになった。総質量の縮小によって建設経費の削減が図られている。従来のデザインに比べて有効体積は縮小しているが、J-PARCのビーム強度が以前見込んでいた0.75MWから1.3MWに増強される計画があり、それが実現されればCP非対称性測定に関する感度は変わらない。また、従来のデザインでは通常感度の光検出器を20%の光電面被覆率で配置することが計画されていたが、新たなデザインでは2倍の感度を持つ光検出器を40%の光電面被覆率で配置することに変更した。これにより、中性子のタグ(陽子の中性子捕獲にともなう2.2MeVガンマ線の同時計測)による核子崩壊に対するバックグラウンドの低減が可能となり、核子崩壊に対する実験感度(発見能力)を維持している。なお、Hyper-Kグループでは将来的にタンクを2基にする可能性も検討している。

タンク1基分の建設費見積もりは総額で675億円であり、その内訳は空洞掘削163億円、ズリ・排水処理92億円、地質調査・実施設計24億円、ライナー・構造体125億円、光センサー(内水槽)196億円、光センサー(外水槽)18億円、電子回路12億円、純水システム33億円、計測計算機1億円、校正装置1億円、建設マネジメント10億円となっている。このうち、光センサー(内水槽)の半分、光センサー(外水槽)、電子回路、計測計算機、校正装置に当たる124億円相当は海外からの寄与を想定している。

2015年1月に国際共同研究グループが正式発足し、現時点では15か国から約300名が参加する国際共同実験となっている。研究組織としては、プロジェクトリーダーの下にある10のワーキンググループが各実験コンポーネントを担当し、また、実験全体の大きな方針を決めるInternational Steering Committee (ISC)と各国からの代表からなるInternational

Board of Representative (IBR) とを持つ。

2018 年度から建設予算が措置されれば、アクセストンネルの掘削に約 2 年、実験空洞掘削に約 3 年、タンク建設に約 2 年、光検出器取り付けに約 1 年を経て 2025 年度までに建設を終え、2026 年度から観測開始する年次計画である。

取り巻く状況の進展

現在までに Hyper-K プロジェクトの推進に関連して以下のような進展があった。

- (1) KEK の研究実施計画 (KEK-PIP) では、新規予算要求により実現を目指すべき 4 つの優先度の高い研究計画のうち、Hyper-K のための J-PARC 高強度化を最優先課題に位置付けた [2]。
- (2) 高エネルギー物理学研究者会議は将来計画において、大型ニュートリノ測定器を基幹となる大規模将来計画の一つとして提言した [3]。
- (3) 宇宙線研究者会議 (CRC) は将来計画において、Hyper-K を最重要課題の一つと位置付けた [4]。また、CRC 実行委員会は、「ハイパーカミオカンデ計画の早期実現へ向けて CRC からのお願い」を日本学術会議物理学委員会素粒子物理学原子核物理学分科会委員長宛に提出し (2016 年 3 月 31 日)、KAGRA 建設完了以降の宇宙線分野における超大型将来計画の最重要課題として位置付けた。
- (4) 研究者コミュニティの議論をもとに Hyper-K 計画が「大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験」という計画タイトルで日本学術会議に提出され、マスタープラン 2017 として採択された。また、重点大型研究計画の一つとして認められた。
- (5) ホスト機関 (ICRR と KEK-IPNS) 間での協力についての覚書が交わされ、国際諮問委員会の設置がされ議論が進んでいる。国際諮問委員会では Hyper-K は国際的に競争力が高く今後推進すべきプロジェクトであると結論付けた。

委員会の評価

ニュートリノ振動の精密測定と核子崩壊の探索は、素粒子標準理論を超える物理を解明し、さらに初期宇宙を探る手段として重要な位置を占めている。また、ニュートリノ天文学は星の内部構造を探るユニークな手段として他の観測では得られない情報をもたらす。Hyper-K は多目的検出器であり、ニュートリノ振動の精密測定、ニュートリノ天文学、大統一理論の直接検証などの多様なサイエンスの進展に貢献することを高く評価する。ニュートリノにおける CP 対称性の破れの発見という喫緊の課題の解決に加え、ニュートリノ天文学の観測所としての長期的役割も兼ね備えた優れた検出器である。本委員会では日本学術会議マスタープラン 2017 に提出された総質量 26 万トン 1 基の計画について評価する。

近年、ニュートリノ混合角 θ_{13} が十分大きい値を持つことが分かり、CP 対称性の破れの早

期発見の可能性があることが分かってきた。右巻きニュートリノを導入したシーソー機構によるレプトジェネシス（宇宙のレプトン数生成）は、宇宙のバリオン数の起源の有力候補である。レプトンセクターに CP 対称性の破れが存在することがわかれば、レプトジェネシス解明に向けての重要な一步となる。ニュートリノ振動における CP 対称性の破れを最も確実に成熟した技術により世界で最初に見つけるということに関して Hyper-K は有利な立場にある。Hyper-K は広い範囲の CP 対称性の破れのパラメータを探ることができ、T2K 実験の結果が示唆するように CP 対称性が最大限に破れている場合には、5 シグマを超える感度を持つ。系統誤差を着実に改善する道筋が示されており、達成可能性の高さが伺える。また、Hyper-K は大気ニュートリノの高統計観測によって質量階層性について決定できる点も評価に値する。

核子崩壊は大統一理論（GUT）を検証する直接的な手段である。Hyper-K は $e^+\pi^0$ モードの探索寿命感度を 10^{35} 年まで伸ばすことができる唯一の将来計画である。 $e^+\pi^0$ モードは大統一理論で新たに導入されるゲージボゾン（X ボゾン）によって生じる。標準模型の 3 つのゲージ結合定数の測定から超対称大統一理論が 10^{16}GeV で実現されていることが期待されており、X ボゾンの質量が 10^{16}GeV 近傍にあれば、Hyper-K で核子崩壊が見つかる可能性は高い。また、超対称大統一理論のモデルを強く制限する νK^+ モードは、新しいデザインによって 2-3 倍感度が改善される。本委員会は Hyper-K を次世代核子崩壊探索の適切な計画であると評価する。

超新星の爆発機構の解明や太陽ニュートリノの精密観測はニュートリノ天文学の重要な課題である。Hyper-K は我々の銀河系内での超新星爆発に対して総数 10 万ものニュートリノ事象数が期待でき、爆発の初段階である中性子化バーストや、爆発過程でのショック不安定性やコアの回転などから生じる短周期での時間変動を捉えるなど、詳細なデータを取得することができる。これによって爆発機構の解明が期待でき、Hyper-K はニュートリノ天文学推進のための重要な計画であると評価する。

太陽ニュートリノの観測精度を上げ、特にニュートリノの質量差 Δm_{21}^2 の測定精度を上げることは意義があると評価する。現在、太陽ニュートリノ観測から得られた Δm_{21}^2 と KamLAND の原子炉ニュートリノ観測から得られた Δm_{21}^2 との間には 2 シグマレベルの違いがあり、これが統計/系統誤差によるのか、新しい物理が潜んでいるのか見極めることが重要である。ただし、宇宙線バックグラウンドの見積もりが進められているが、シミュレーションベースのより詳細な検討が必要である。また岩盤からのラドンの影響、水の流れによるラドン低減などについても検討を進めるべきである。

競合する計画として、CP 対称性の破れの測定や核子崩壊の探索に関して、4 万トン液体アルゴン TPC 検出器を用いた LBNF/DUNE 計画が、米国にて 2026 年からの実験開始を目指して建設が進行中である。同計画は CP 対称性の破れの測定では同等の感度を持ち、Hyper-K と

国際競争となっている。技術開発を伴う液体アルゴン TPC 検出器に対し、既存の技術により実現可能でこれまでの実績を持つ Hyper-K は実現可能性において有利な立場にある。Hyper-K は予定している 2026 年実験開始から質の良いデータ蓄積が可能であり、DUNE 実験よりも早く CP 対称性の破れを発見できると予測される。なお、LBNF/DUNE 実験は建設がすでに開始されており、Hyper-K をいち早くスタートすることが重要である。

陽子崩壊探索に関して、 $e^+\pi^0$ モードの感度は有効体積の大きさが本質的である。また、 νK^+ モードは 4 万トン DUNE に迫る感度を Hyper-K は持つ。陽子崩壊探索においても、既存の技術と検出器の大型化により着実な進展が期待できる。

ニュートリノ天文学・大気ニュートリノ観測に関しては、南極氷床を用いた IceCube/DeepCore 実験や地中海を用いた ANTARES 実験があり、20GeV 以上のニュートリノを対象に観測が行われている。また、IceCube の感度を 10GeV 以下の低エネルギーに拡張する PINGU 計画が計画されている。Hyper-K は、これらの実験が観測できない太陽ニュートリノや超新星ニュートリノの観測が可能であり、相補的な計画である。

以上のように、Hyper-K は競合計画には無い独自性を持つと共に、国際競争となっている CP 対称性の破れの測定などでは緊急性が高く、一刻も早いスタートが望まれると判断する。

これまでの計画案と比べ、デザインの見直しにより、CP 対称性の破れや核子崩壊に対する検出器感度を損なわずに経費削減を行ったことは評価できる。さらに、前回の将来計画検討委員会において指摘された経費の不定性について、その低減が認められる。例えば、これまで見積もられていなかったズリ・排水処理にかかる経費が具体的に見積もられている。また、経費の大きな部分を占める空洞掘削について、ボーリング調査を基に慎重な見積もりを行っている。タンクの構造(防水シート、ポリエチレンライナーなどの表面処理を含めて)の具体的な設計、衝撃波防止ケースの設計・試験で進展が認められる。このように経費を含め技術的な実現性が十分に高まっていると判断できる。

前回の将来計画検討委員会後 2015 年 1 月に国際共同研究グループが正式に発足しコラボレーションとしての体制を整えてきていることは評価できる。特に、日本以外の国からの建設費分担及び運転経費分担に関し、各国代表者の間との合意書が 2017 年 3 月中に締結されるとのことであり、高く評価できる。今後は、それをより具体化する作業が必要である。

ホスト機関(ICRR と KEK-IPNS)間での協力についての覚書が交わされ、国際諮問委員会が設置され、議論が進んでいることを評価する。ICRR は Hyper-K 建設・運転の中心、KEK は J-PARC ビームと前置検出器の建設・運転の中心と、責任分担がより明確になったことは前回の将来計画検討委員会以降の大きな進展といえる。ICRR が Hyper-K の建設・運転に責任を

持つということは宇宙線研究分野の将来計画であるという大きなメッセージである。実際、Hyper-K は長基線実験の後置検出器というだけでなく総合的な宇宙線研究施設になっているということは特筆すべき点である。ただし、ICRR 内部の体制としては Super-K のスタッフ数の2倍に当たる約20名が必要であると見積もられており、現状に比べて6名程度の増員が必要である。常勤ポストの確保が難しい場合は特任教員を雇用するなどして補い、プロジェクト推進と同時に若手研究者の育成に努めることを勧める。大きな予算規模に対応するため組織体制づくりの提案があったことは評価に値する。さらなる体制の強化が必要であり、例えば、建設遂行に責任を持つプロジェクトマネージャーを中心とした推進チームを設けるなどがあげられる。ICRR と国際コラボレーションが連携して建設と遂行に適切なマネジメント体制を構築することを要望する。必要に応じて大型計画の遂行に経験をもつ専門家を含む第三者委員会の助言をえることも重要だと考える。

本委員会は、前回の将来計画検討委員会において指摘されていた課題である予算の見積りへの正確性の向上、国際コラボレーションの形成、ICRR と KEK の役割分担の明確化について大きな進展を認める。以上の観点と科学的意義から判断して、本委員会は Hyper-K を ICRR の次期主要プロジェクトとして適切な計画と認め、速やかに実現を目指すべきであると判断する。

ALPACA 実験計画

計画の概要

ALPACA 実験計画は、東京大学宇宙線研究所とボリビア・サンアンドレス大学を中心に日本とボリビアの 14 研究機関が共同して、有効面積 83,000m²の空気シャワーアレイと、世界最大 5,400m²のミュオン観測装置をボリビアチャカルタヤ山山麓(標高 4740m)に設置し、2つの観測装置の連動によって 100TeV 領域 (10TeV-1000TeV) 超高エネルギー宇宙ガンマ線の広視野撮像を世界最高感度で行う計画である。本計画の主要な研究課題は以下の 2つである。

(1) 南天での超高エネルギーガンマ線点源の観測によって 100TeV を超える宇宙線の加速点源の探査を世界に先駆けて行う。

(2) 銀河中心近傍や Fermi bubbles の拡散ガンマ線源からの 100TeV 領域拡散ガンマ線放出を探査し、銀河系内 PeVatron の発見を目指す。

その他に、knee 領域宇宙線の一次原子核宇宙線の元素組成の解明、南天では未観測の TeV 領域宇宙線の恒星時異方性の精密測定、宇宙線フラックスに対する太陽の影の精密測定による太陽・地球間地場の大局構造の解明など、多様な研究課題に取り組む。

観測装置は、15m 間隔格子状に配置される 1m² シンチレーション検出器 401 台からなる 83,000m² 空気シャワーアレイと、56m² 地下水チェレンコフミュオン検出器 96 台からなるミュオン観測装置で構成される。この観測装置において、検出される一次ガンマ線の最頻エネルギーが 5TeV、角度分解能は 100TeV で 0.2°、エネルギー分解能は 100TeV で 25%と見込まれる。

本計画の鍵は空気シャワー中のミュオン数によるガンマ線の選別にある。計画の観測装置では、コアから 100m 以内のミュオン数による最適化された選別により、一次エネルギー 100TeV で一次原子核宇宙線の除去率が 99.9%であるのに対して、ガンマ線の生存率が 90%と見積もられている。これにより、40TeV 以上のガンマ線点源に対しては、CTA 実験を超える世界最高感度を達成できるという試算がなされている。さらに、広がった源に対して、より低いエネルギーでも CTA 実験を上回る感度を有すると期待され、0.1° 以上の広がりを持つ源に対しては 30 TeV 以上で、1.5° 以上の広がりを持つ源に対しては 10 TeV 以上で、CTA 実験を超えるものと期待されている。

建設に必要な費用は 5 億円程度と見積もられており、大型科研費による建設を想定している。建設準備から 4 年で完成し、5 年目から定常連続観測を開始し、10 年間は継続する計画としている。

ボリビアで実施する利点は、減衰前の空気シャワーを検出できる 4000m 以上の標高でアクセスが容易な平らな土地が確保できること、銀河中心という銀河宇宙線源最有力候補を観測できる南半球であること、1960 年代から続く日本との宇宙線観測研究の歴史と友好関係を有すること、さらに良好な社会設備（電気、水道、道路など）が得られることなどである。

委員会の評価

南天には、銀河中心、Fermi bubble をはじめ、超新星残骸、パルサー星雲など多数の興味深い天体が存在することから、銀河系内 PeVatron の発見が期待され、100TeV 領域でのガンマ線サーベイ観測を目指す本計画の科学的位置付けは非常に高い。技術的・予算的にも実現可能性が高く、是非とも推進すべき研究であると評価する。

本実験には Tibet AS γ と BASJE のメンバーが参画しており、Tibet AS γ の技術と BASJE との国際協力体制を活用できる。Tibet AS γ 実験の北天での成果を考慮すれば、ALPACA 実験において 10~20 個の超高エネルギーガンマ線点源の発見が期待できる。また、 0.2° という空気シャワーアレイとしては優れた角度分解能を有することから、広がりを持った拡散ガンマ線源の詳細な分析が可能である。また本委員会は、本実験では南天におけるダークマター起源の電子およびガンマ線探索も可能なのではないかと考える。

これまでの長年の実績とプロトタイプ製作を通じて合理的な費用見積もりがなされており、大型科研費の獲得によって計画を実現することが可能であると思われる。

100GeV から 100TeV までのエネルギー領域での広視野連続ガンマ線観測を目指す South-HAWC 計画と本実験は 10TeV 領域でオーバーラップがあり、競合するため、本実験の先行実現がのぞまれる。HAWC 実験・LHAASO 実験に対して ALPACA 実験は、観測する視野が北天/南天と相補的である。高角度分解能ながら観測時間の限られる CTA 実験と広視野かつ長期連続観測の ALPACA 実験は互いに相補的であり、ALPACA が南天を、HAWC・LHAASO が北天を、広範囲にサーベイし、CTA が特定の領域を深く詳細に観測するという相乗効果が期待でき、CTA の観測時間を効率的に活用できる。このために CTA 実験の 2021 年の観測開始に合わせて ALPACA 実験は南天のサーベイ観測を開始しておくべきであり、この点からもすみやかな計画実現が極めて重要である。

Tibet AS γ 実験はミューオン観測装置の建設も完了し、定常観測モードに入ったことから、南天に超高エネルギーガンマ線観測装置を展開する機が熟したと言えるだろう。ただし、2つの実験を同時に遂行していくには人的資源が不足しているのではないかと懸念がある。プロジェクトが着実に遂行できるように人員配置を考慮してほしい。

地上における超高エネルギー宇宙線観測将来計画

計画の概要

TA2 計画は、40000 km² のエリアに地上検出器 10000 台を展開し、現行 TA 実験の 60 倍の検出面積を持つ空気シャワー観測計画である。57EeV 以上の最高エネルギー宇宙線を年間約 1000 イベント観測し、視野を 60 分割してエネルギースペクトルを領域ごとに測定し、TA 実験で明らかになりつつある最高エネルギー宇宙線の異方性の起源を高統計で調べる事を目指している。地上検出器についてはシンチレーターを基本とするが、粒子識別能力を必要とするため、水タンクや鉛サンドイッチ型検出器も検討されている。また、大幅にコストダウンした大気蛍光望遠鏡を展開し、化学組成測定を行うことも検討されている。総建設費は約 100 億円規模で、TA と Auger 実験の研究者を主軸としたさらに大型の国際共同実験により実現を目指すとしている。日本の負担分は総建設費の 2 割程度としており、2025 年に建設開始、2028 年からフルスケールの運用を目指している。

TA2 実験の提案に際して、最高エネルギー宇宙線の空気シャワー観測による研究の進展について、現行の TA 実験の成果から、現在建設中の TAx4 実験および TALE SD 実験で期待される成果とその時期が説明され、最高エネルギー宇宙線観測全体のロードマップが提示された。それによれば、現行 TA 実験の 4 倍の検出面積を持つ TAx4 実験は、現経費が終了する 2020 年以降も何らかの資金より観測を継続し、10 年間の測定で現行 TA 実験の約 6 倍の統計を獲得し、TA 実験がクレームしている最高エネルギー宇宙線到来方向の 3.4σ の超過 (HotSpot) を、 5σ で確認する他、HotSpot の構造や他の HotSpot の探索も行う事を目指している。今回提案の TA2 実験は、TAx4 実験の期待される成果の上に、10 年間の観測により TAx4 実験のさらに 16 倍の高統計で最高エネルギー宇宙線の起源天体解明を目指すというものである。

他の最高エネルギー宇宙線観測に関する将来計画としては、Auger 実験の拡張である Auger Prime 実験や、衛星軌道上からの宇宙線シャワー観測計画 JEM-EUSO 実験があり、双方とも協力体制が取られている。Auger 実験チームとの合同の議論は WG が設けられた段階ということである。JEM-EUSO 実験については、ロシア主導衛星実験である K-EUSO 計画に引き継がれるが、検出面積は TAx4 の 2 倍程度にとどまる。TA グループは、引き続き TA-EUSO 実験などでの協力体制を維持していくとしている。

委員会の評価

最高エネルギー宇宙線の観測は、 10^{20} eV を超える宇宙線加速機構の解明やその加速天体、伝搬の機構をめぐる宇宙線研究の重要な研究課題である。この 10 年の TA、Auger 両実験の進展により最高エネルギー宇宙線の理解は飛躍的に進展している。特に、TA 実験が発見し

た北天での HotSpot は、最高エネルギー宇宙線の起源を示す重要なヒントと評価する。また、TA 実験と Auger 実験間の化学組成などの観測結果の差異についても、両実験の連携によって理解が進んでおり、Auger Prime 実験など化学組成の理解を進める試みも進んでいる。最高エネルギー宇宙線観測に関する現在の TA 実験の成果と TAx4 実験への展開を委員会は評価すると共に、これらを一層発展させる TA2 計画が検討されていることを委員会は認識した。現在の TA2 計画の戦略は主に地上検出器の大面积化であり、TAx4 実験によって北天 HotSpot を統計的に確立した後、さらなる高統計を実現して、到来方向によるエネルギースペクトルの差異を探る事に主眼を置いている。これら TA2 実験の最適化については、進行中の TAx4 実験や Auger Prime 実験の結果に強く依存しており、また IceCube 実験による GZK ニュートリノ探索などとあわせて、マルチメッセンジャー観測としての整合性も問われ、これらの結果を取り入れたさらなる検討が必要と考える。

一方で、この規模の大型将来計画を進めるには国際協力が不可欠であり、これに向けて TA 実験と Auger 実験の間に協力体制が確立しつつあることを委員会は評価する。委員会は、将来の地上実験による高統計最高エネルギー宇宙線観測計画の実現に向けてさらなる検討を続けると共に、その受け皿となる大型国際共同実験の体制作りを具体的に進めていく事を推奨する。

宇宙素粒子の複合的撮像観測

計画の概要

Neutrino Telescope Array (NTA)計画は、光学撮像装置を備えた広視野観測ステーションをハワイ島マウナ・ロア山の高度 3000~3500m の 4 地点に設置し、地球をかすめる高エネルギータウニュートリノ、大角度の高エネルギー電子・タウニュートリノ、および高エネルギー宇宙線・ガンマ線の大気チェレンコフ光及び大気蛍光による観測を、米国・台湾の研究者を加えた国際共同実験として行う計画である。光学撮像装置は Ashra-1 で開発された集光器やイメージインテンシファイア、トリガーセンサー回路、CMOS センサー回路の技術を利用して高感度化し、0.1 度以下の高解像度と広視野を実現する。PeV 領域のニュートリノ観測が実現できれば IceCube 実験等と相補的なデータが得られることが期待できる。ガンマ線も PeV 領域まで広視野観測が可能である。2017 年度に Technical Design Report を発行し、順調に進めば 2022 年度から運用を開始するとしている。

委員会の評価

2012 年-2013 年の将来計画検討委員会は、NTA 計画を宇宙線研究所が主体となるような形で遂行することは推奨できないと報告している。IceCube により天体由来の高エネルギーニュートリノが検出されたことなどの情勢の変化を踏まえ、今回の委員会では、この判断を大きく変えるような進展があったかを中心に議論が行われた。

NTA を実現するための検出技術は、Ashra-1 に向けた技術開発に基づいた意欲的なものといふことができ、2014 年に Letter of Intent が出され、国際共同実験として推進するための部会が設置されるなどの研究体制の進展も見られる。

しかし、要素技術開発は当初の想定よりも大幅に時間を要する結果となっており、現時点で NTA を実現するための根拠となる検出技術の準備が前回の将来計画検討委員会以降大きく進んでいると判断できる材料は乏しい。また、大気蛍光を用いた方法で地球かすりニュートリノ観測が可能であるかどうかについて詳細な報告は論文として発表されていない。

2012 年-2013 年の将来計画検討委員会では、「その共同研究者組織の規模、特に宇宙線研究所内のマンパワーは提案された計画を遂行するには不足であり、今後 NTA 計画を宇宙線研究所が主体となるような形で遂行することは推奨できないと判断した。」としている。今回の将来計画検討委員会においても計画の推進体制について議論したが、日本国内には実験を主導するのに必要な実験チームが形成された状況にはなく、推進体制は不十分であると判断した。

以上のことから、委員会は前回の将来計画検討委員会の判断を覆すほどの進展があると

は認識できなかった。したがって本委員会は NTA 計画を宇宙線研究所の将来計画として推奨することはできないと判断した。

液体キセノンを用いた暗黒物質直接探索実験の新たな展開の提案

計画の概要

XMASS 実験の今後の進め方に関して現研究代表者から新たな提案があった。委員会は、提案者に2度のヒアリングを行い、その上で委員相互の意見交換をもとに、現状と今後の研究計画を以下の様に理解した。

XMASS 実験は、宇宙暗黒物質の有力候補である WIMP を世界最高の感度で探索することで、その発見を目指している。同時に低エネルギー太陽ニュートリノの観測や、ニュートリノの出ない二重 β 崩壊の発見も目標としている。液体キセノンを用いる1相式実験のパイオニアとして XMASS-I の建設と実験を進め、技術面で多くの開発を行うと共に、物理学上の新たな知見を与える等、重要な成果を挙げてきた。一方では WIMP 探索に関しては更なる高感度化が必要であった。これに基づき次世代の検出器として WIMP と核子の散乱断面積に対する感度が約 10^{-47}cm^2 の XMASS-1.5 (6 トンの液体キセノンを使用予定) の提案を行ってきた。しかし XMASS-1.5 は建設に至らず、他方世界では第2世代 (G2) と呼ばれる XENONnT 実験や LZ 実験 (2相式検出器でそれぞれ約10トンの液体キセノンを使用) が探索感度で約 10^{-48}cm^2 と、それを1桁超える感度を実現しようとしている。これらは2019年や2020年を目標に実験開始予定で、超対称性モデルの広いパラメーター領域を探索できる。さらに第3世代 (G3) と呼ばれる将来の実験も計画中である。このタイプの検出器においては、太陽・大気ニュートリノのバックグラウンドで制限される究極の感度が達成される。そこでは高い粒子識別能力が必須になっている。1相式の XMASS 実験は大型化が容易という強みを振り所にして来たが、粒子識別能力が乏しいので、現状のままではこの感度に到達できない。粒子識別能力の高い2相式が大型化の問題を解決するにつれて2相式の優位性が明確になり、XMASS 実験の次世代の方向性を再検討する時期に来た。

今後標的のサイズが決定的な要素となって、世界で一つしか作れないような大型検出器が必要となり、いずれ1つの国際共同実験が発展しそれに統合されることが想定される。このような状況に鑑み、XMASS 実験グループからは、従来の XMASS-1.5 の実現を目指すという方針を転換し、海外の G2 実験に参加する研究グループを形成するとともに、将来の G3 実験を実現する研究開発を進める提案がなされた。G2 実験としては LZ と XENONnT の2つがあるが、研究グループは XENONnT に参加の前提で相談を進めている。どちらも散乱断面積 10^{-48}cm^2 程度までの探索を行う計画で、目標はほぼ同じであるが、XENONnT のベースとなる XENON1T は LZ のベースとなる LUX を超える結果をすでに出しており、一步進んでいる。さらに XENONnT 実験はこれから検出器デザインを最終決定するので、XMASS 実験の知識と経験を含むリソースで大きな寄与が可能である。具体的な寄与としては、(1)液体キセノンの純化技術の研究開発、(2)低バックグラウンド技術、(3)現地に滞在して研究を進める人的寄与、(4)保有している光電子増倍管の活用、(5)最大1.9トンのキセノンガスの貸与、(6)神

岡の地下実験室Cにおいて、XMASS-I等をテストベンチとして、最先端の暗黒物質実験の開発研究に活用するとともに、それをサポートする拠点の形成、などを想定している。

委員会の評価

XMASS実験が現在の1相式をそのまま延長する形でXMASS-1.5を実現しても、世界の研究に追いつけないことは委員の共通の認識となった。研究グループが研究計画の変更を提案するのは妥当である。また、海外で進展中のG2実験、具体的にはXENONnTへの参加は、有力な計画である。委員会としては、研究グループがこの方向での可能性を速やかに調査し、実現に向けて努力するとともに、研究者コミュニティでの理解を得る努力を続けることを勧める。

なお、本計画の推進に当たっては以下の点を十分に検討することが望まれる。

1. 科学的合理性

提案の概要は、1) 現XMASSを今後2年程で運転を終了し、次期計画と位置付けていたXMASS1.5を取り下げる、2) 海外のG2実験に参加する、の二つからなる。現XMASS実験を停止してXMASS1.5を取り下げる点に関しては、海外で進行中の他の実験との競争力の点から妥当な判断である。今後、海外のG2実験に参加することは最先端の物理を引き出す有力な方針と認められる。一方ではG2に続くG3も計画中であることから、G2での経験と神岡でのアクティビティをG3へ繋げる配慮が望まれる。

2. 海外への発展

XMASS実験の目的は暗黒物質の探索で、サイエンスの目的から海外でより大規模な研究を目指すことは自然な発展と言える。現在のXMASS実験のリソースをベースとして参加することで海外でのG2実験に大きな寄与ができると考えられる。一方で、XMASS実験は、低バックグラウンド技術を基礎とする神岡宇宙素粒子実験施設での研究と位置付けられて、実験と研究員の経費は宇宙線研究所が支えており、XMASS実験を引き継いだとしても、海外での研究活動に制限がかかる可能性がある。例えば、XMASS実験で雇用された研究員は神岡での勤務を前提としているため、研究員の勤務地の問題が発生する。G2実験への参加要件を明確にした上で、神岡施設のプロジェクトとの整合性を保ちつつ、研究の推進に有効な研究グループを構成することが望まれる。

3. リソースの所属

XMASS実験のリソースは宇宙線研究所の経費で購入されたものの他に、科研費等の外部資金で購入されたものが含まれている。研究グループが海外に研究を展開するとの了解が得られた場合でも、特に外部資金で購入されたリソースの用途についてはその研究代表者の意向を考慮する必要がある。

4. 神岡での共同利用実験として

XMASS 実験は、神岡宇宙素粒子実験施設の実験室 C で推進される共同研究と位置付けられてきた。提案では実験室 C は G3 実験に向けた R&D を進める場所とされるが、海外の G2 実験に参加しても、分担部分の研究を進めるための実質的な研究の場所として使用されることが望ましい。

委員会は、上記の問題を解きながら、コミュニティでの議論を継続しつつ将来の G3 実験に繋がる計画に仕上げることを要望する。

参考資料

- [1] 東京大学宇宙線研究所将来計画検討委員会 報告書 (2013年9月26日)
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/report/futureplan/futureplan2013.pdf>
- [2] KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP) (2016年6月30日)
<https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/KEK-PIP.pdf>
- [3] 高エネルギー物理学将来計画検討小委員会 (2012年2月11日)
http://www.jahep.org/office/doc/201202_hecsubc_toushin.pdf
- [4] CRC 将来計画検討小委員会 2013-2014年度報告書
http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/CRC/townmeeting/doc/CRC_FPSC_report_2013-14-v3.pdf