

東京大学宇宙線研究所将来計画検討委員会 報告書

平成 25 年 9 月 26 日

委員会設立の経緯と主旨

宇宙線研究所では 1987 年以降、現在までに 3 回将来計画検討（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、研究所としてはそれを実行するように努めてきた。第 2 回（1993）、第 3 回（2007）の委員会で推薦された重力波プロジェクト（KAGRA）は 2010 年に最先端研究事業に選ばれた後、検出器建設のための空洞掘削の予算も認められ、建設段階に移行した。宇宙線研究所では、スーパーカミオカンデ、KAGRA に続く、新たな将来計画を検討する時期に来たと判断し、将来の宇宙線研究の方向性や所内プロジェクトに対して助言を行うため、2012 年 1 月に本委員会を設立した。

また宇宙線研究所では、CANGAROO 実験や SDSS 実験の終了、およびチェレンコフ宇宙ガンマ線グループ、観測的宇宙論グループ、高エネルギー天体グループなどの新たな研究グループの立ち上げと再編成を行ってきた。また一次宇宙線の研究（宇宙線強度変化や気候との関係など）や Ashra などの比較的小規模の研究も行っている。これらの研究の方向性について、科学的意義、人材の分配などについての検討と助言も本委員会の役割とされた。

委員会では各将来計画を推進する関係者を招聘し、計画の詳細についてヒアリングを行った。2012 年度は宇宙線研究者会議（CRC）でもタウンミーティングが開催され宇宙線分野の将来計画が議論されており、本委員会で参考となる各実験の将来計画について効率的に情報を得るため、第 3 回 CRC タウンミーティング（平成 24 年 6 月 30 日）から本委員会と共催を行うことになった。（第 2 回の CRC タウンミーティング（平成 24 年 1 月 22 日）についても各委員は申し合わせて出席することにしたが、共催の形はとっていない。）ただしタウンミーティングでは宇宙線研究所以外の将来計画も含め、主にそれらの科学的意義が検討されたのに対し、本委員会は宇宙線研究所が実行することを想定した将来計画を検討するという点で、CRC の将来計画検討とは主旨が異なることを付記しておく。

委員の構成

佐藤勝彦（委員長）

自然科学研究機構長

相原博昭

東京大学大学院理学系研究科 教授

伊藤好孝

名古屋大学太陽地球環境研究所 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
神田展行	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
杉山直	名古屋大学大学院理学研究科 教授
水本好彦	国立天文台 教授
寺澤敏夫 (幹事)	東京大学宇宙線研究所 教授
奥村公宏 (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

- ・ 第一回 (2012年1月25日)
 - － 委員会設立の経緯の説明および検討依頼事項について
 - － 今後の方針について意見交換
- ・ 第二回 (2012年2月21日)
 - － Cherenkov Telescope Array (CTA) 実験について関係者2名よりヒアリング
 - － ヒアリングについて委員内での意見交換
 - [後日、委員からの質問を幹事より関係者へ送付]
- ・ 第三回 (2012年4月10日)
 - － 前回に引き続き CTA 実験について別の関係者2名よりヒアリング
 - － ヒアリングについて委員内での意見交換
- ・ 第四回 (2012年5月29日)
 - － CRC タウンミーティングとの共催について
 - － CTA グループからの回答にもとづき議論
- ・ 第五回 (2012年7月17日)
 - － Telescope Array (TA) 実験について関係者1名よりヒアリング
 - － 高エネルギー天体グループ人事についての議論
 - [後日、委員からの質問を幹事より TA グループへ送付]
- ・ 第六回 (2012年8月7日)
 - － チベット実験について関係者1名よりヒアリング
 - － チベット実験について委員内での意見交換
 - － TA グループからの回答について議論
- ・ 第七回 (2012年11月1日)
 - － ハイパーカミオカンデ計画について関係者1名よりヒアリング
 - － XMASS 実験について関係者1名よりヒアリング

- － Ashra 実験について関係者 1 名よりヒアリング
- ・ 第八回 (2012 年 12 月 21 日)
 - － ハイパーカミオカンデ、XMASS、Ashra について意見交換
 - － 中間報告書について議論
- ・ 第九回 (2013 年 2 月 26 日)
 - － 中間報告書について議論
- ・ 第十回 (2013 年 4 月 19 日)
 - － TA グループの EUSO 参加及び TA×4 計画について関係者 1 名よりヒアリング
 - － 中間報告書について議論

Cherenkov Telescope Array (CTA) 実験について

計画の概要

宇宙線の起源についての過去 10 年の急速な理解の進展は、Whipple、HEGRA、CANGAROO などによる先駆的な地上高エネルギーガンマ線観測を経て、HESS、MAGIC、VERITAS による数 10 GeV～数 TeV 領域の観測が展開されたことによるものが大きい。次期地上高エネルギーガンマ線実験である Cherenkov Telescope Array (CTA) はこの研究の流れを継続し、一層の進展を図ろうとしている。すなわち、CTA では、従来の地上高エネルギーガンマ線実験に対しその感度の約 10 倍の向上と、また対象エネルギー範囲を上端、下端とも約 1 桁近くの拡大を目指す。それにより解明が期待される天文学・天体物理学上のテーマは以下のように挙げられる：

1. 銀河宇宙線の起源・加速・伝搬。
2. 銀河内高エネルギー天体（パルサー、マグネター、パルサー星雲、超新星残骸 (SNR)、X 線バイナリー、球状星団）。
3. 銀河系外からの高エネルギー宇宙線の起源・加速・伝搬。
4. 銀河系外高エネルギー天体（活動銀河核 (AGN)、ガンマ線バースト (GRB)、近傍銀河団、近傍スターバースト銀河等）。
5. 活動銀河核 (AGN)、ガンマ線バースト (GRB) からのガンマ線を使った宇宙論的研究。
6. 銀河中心、矮小銀河、銀河ハロー、銀河団などからの暗黒物質の対消滅、崩壊ガンマ線の探索。
7. プランクスケールでのローレンツ不変性のテスト。

このように、CTA の科学的視野は、高エネルギー天体物理学の各分野ばかりでなく、宇宙論、素粒子的宇宙物理学にまで及んでおり、計画への参加者は全世界の高エネルギーガンマ線天文学関係者をほぼ網羅している。日本における高エネルギーガンマ線天文学のコミュニティでは、こうした世界の情勢に呼応するため、CTA-Japan コンソーシアムを組織し、今後の計画についての検討を進めてきた。以下はその計画内容についてのヒアリングの内容である。

望遠鏡は LST (Large Size Telescope)、MST、SST の三種類あり、それぞれ口径が 23 メートル、12 メートル、6 メートルである。サイトは北天と南天を検討しており、それぞれのサイトに LST を 4 台、MST を 23 台、SST を 32 台設置予定である（ただし北天は SST を省く）。日本の担当の中核は LST であり、鏡および撮像カメラモジュール（光電子増倍管およびエレクトロニクス部分）を担当し、架台などの構造物はドイツ (MPI、Munich) が担う。宇宙線研究所の手嶋氏が LST のマネージメントを務めている。LST はフェルミ観

測エネルギーとのギャップを埋める重要な望遠鏡であり、低エネルギー閾値は 10 GeV を目標としている。また LST の要求仕様は 3 つの望遠鏡の中で最も厳しく、世界の実験グループより日本の技術的貢献が求められている。日本が LST に大きく貢献できれば、コア・プログラムでの大幅な観測時間の獲得を期待できる。日本の LST への寄与の中心課題である鏡の開発については、多層膜コーティング（スパッタリング）による長寿命化と 95% 以上の高反射率の実現を目標としている。また GRB の迅速な追観測のため望遠鏡の高速駆動が必要であり鏡の軽量化を図っている。撮像カメラモジュールについて、光電子増倍管は浜松ホトニクス製であり、エレクトロニクスは 2 ゲインによる 3 桁のダイナミックレンジを確保し、2 ギガヘルツでの波高サンプリング、高速読み出しを実現している。モジュール間でのトリガーシステム、エレクトロニクスから発生する熱をカメラボックスで冷却するシステムなどが課題である。今後は科研費によるカメラ試作機製作、ドイツにおける MST 試作機の実験を予定している。技術的に大きな開発要素はなく、残りの開発要素は日本の技術で十分遂行可能と考えられる。鏡の総生産数は 1,600 枚、光電子増倍管は 16,000 本、エレクトロニクスは 16,000 チャンネルの予定である。

上記の宇宙線研究所を中核とした LST 担当に加え、名古屋大学 STE 研究所に所属する CTA-Japan メンバーにより、MST および SST 担当が予定されている。その財源確保のため、LST 計画に対するものとは別に競争的資金の獲得が図られている。

CTA 実験のタイムスケジュールでは、2010 年までにデザイン設計（LOI、デザインコンセプトの資料を作成）を終了しており、2010 年から 2014 年までは準備研究が進行中である。その後、2015 年に建設開始、2017 年に部分的な観測開始を予定している。総予算は南北サイト合わせて 1 億 9 千万ユーロ（2012 年の時点でおおよそ 200 億円）であり、日本はその約 20% である 40 億円の分担を目標にしている。その内訳は、鏡に約 13 億円、光電子増倍管に約 9 億円、エレクトロニクスに約 14 億円、カメラボックスに約 3 億円、人件費約 1 億円である。宇宙線研究所が CTA-Japan のホストとして観測時間の獲得、実験の運用、観測データや解析ツールの提供の窓口となる必要がある。その約 40 億円の建設費に加え、年間約 2 億円の維持費を獲得するため研究所から概算要求提出が必要である。

CTA-Japan のメンバー総数は 84 名（2012 年 10 月現在）である。装置開発担当と並び、サイエンスグループが約 35 名で構成され、AGN、GRB、SNR を研究分野の中心として位置付けを行っている（35 名の内訳は理論研究者約 20 名、実験研究者約 15 名であり、それぞれの研究対象別には、重複を含め、AGN 10 名、GRB 12 名、SNR 20 名である）。一方、Task-B の論文（各テーマの科学的達成目標の定量化を調査した論文）の著者リストから CTA-Japan の世界的な貢献度を測ると、GRB、AGN、SNR それぞれで、11 / 20（20 名中 CTA-Japan が 11 名）、5 / 28、1 / 14 である。今後の研究テーマを主導する戦略として、観測プロポーサル論文の作成、全体ミーティングでの発表、フェルミ・バブルなどの新

しいテーマへの取り組みを予定している。また CTA グループから X 線及び電波観測との連携、特に X 線観測とのリンクを取り持って欲しいということが要望されており、2013 年に X 線との共同会議を企画する予定である。

CTA-Japan のデータ解析準備として、モンテカルロ (MC) シミュレーションコードの習得、MC サマリーデータ解析、それを用いた CTA 感度曲線の再現などを行ってきた。現在 CTA-Japan MC チームは 13 名であり、すべての物理を精査するにはメンバー数が少なく、活動規模の拡大が必要である。今後の解析グループの方針として、CTA 稼働開始に備え解析環境の準備、MC チームの活動規模の向上、サイエンスグループとの連携を挙げている。また宇宙線研究所をデータセンターとしてストレージの確保、ヨーロッパグループのグリッドシステム参加、などを検討する。また解析手法の開発項目は、ステレオ観測の手法改良による GRB 追観測の視野拡大および GRB 検出確率の向上である。加えて、データをヨーロッパから宇宙線研究所に転送するネットワークスピードに問題があり (3 テラバイトの転送に約 1 カ月必要)、今後ネットワーク増強や別のデータ転送手段の確保などの対策が必要である。

委員会の評価

CTA 計画について、科学的達成目標、研究対象の広さ、CTA-Japan の望遠鏡及び撮像カメラなど検出器製作の技術力の高さや経験など、委員会では高く評価され、宇宙線研究所の次期大型計画の候補になり得ると判断された。CTA 計画は宇宙線研究の重要な課題である宇宙線の起源の解明に大きく貢献すると期待され、日本では宇宙線研究所が中心となって計画を推進していくべきである。スーパーカミオカンデや KAGRA と異なり、日本以外の国がホストとして行う実験が宇宙線研究所の柱となることについても議論されたが、全世界でコラボレーションを行っている現在の国際化の流れではそれも当然であると意見が一致した。

一方で、望遠鏡及び検出器の建設、検出器部品のマスマンプロダクション、およびデータ解析全般にマンパワー不足を懸念する。建設に専念可能な人材が不足しており、通常のポストドク研究員より任期の長い特任助教などのポストで、プロジェクトに専任できる人材を用意する必要がある。特に、国際プロジェクトの中でいち早く成果を挙げるためには、データおよびシミュレーション解析にもさらなる人材の投入や活動規模の向上が必要である。また較正やリダクション済みのサマリーデータのみをヨーロッパから転送するのでは観測データの全てを用いた詳細な解析は不可能になってしまう。データ転送の問題も含め較正等の解析プロセスが宇宙線研究所で行える体制を用意することも必要との意見もあった。観測シフトや解

析に活動・活躍できる大学院生については、京都大学、名古屋大学、茨城大学など CTA 実験を行う大学研究室との協力が必要であり、これらの研究室と大学間連携で予算を獲得するなどの方法も検討することを期待する。

特に、宇宙線研究所のスタッフ体制構築も早急に行う必要があると思われる。CTA 実験は 10 年以上の長期にわたって行われる予定であり、その間の実験運用、データ配信、観測シフトなどを安定して提供できる体制が必要である。また最新の研究成果が常に宇宙線研究所から出せるよう、実験に精通し、関連理論にも明るい人材を配置する必要がある。特に、実験開始直後の科学的成果など実験結果をタイムリーに出せるよう、各実験段階における研究戦略や期待される成果をまとめた計画を用意しておく必要がある。

Telescope Array (TA) 実験について

これまでの研究成果と将来計画の概要

TA 実験は、 10^{18} eV 以上のエネルギーを持つ最高エネルギー宇宙線 (UHECR) のエネルギースペクトル、到来方向、質量組成などを測定し、宇宙の極限現象の解明を目指した実験である。実験サイトは米国ユタ州 (標高 1,400 メートル) で、地表検出器 (Surface Detector、SD) 507 台と大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector、FD) 3 ステーションが、約 700 平方キロメートルの範囲に設置されている。

SD で観測された宇宙線のエネルギースペクトルにはそれぞれ $10^{18.7}$ eV、 $10^{19.7}$ eV で折れ曲がり観測された。エネルギーが $10^{19.7}$ eV 以上でのカットオフの有意度は 3.9 シグマである。エネルギー決定の系統誤差を考慮すると、TA と他の全ての実験から得られたスペクトルの形が $10^{19.5}$ eV 以下で良く一致することが確認された。観測されたシャワー最大到達高度 (Xmax) 分布から調べた宇宙線の質量組成の解析では、 $10^{18.2}$ eV 以上のエネルギー領域で陽子を支持する結果が得られた。一方で Pierre Auger Observatory (PAO) での結果は高エネルギー側で鉄への遷移が観測されており、両実験の実験結果は異なっている。

宇宙線の到来方向の自己相関、それと活動銀河核 (AGN) 天体や大規模構造 (LSS) との相関の解析が行われている。それらが LSS で発生した極高エネルギーの陽子であるとする仮定と矛盾はない。一方、等方的な分布を仮定した場合、観測された相関が実現される確率は 2% で、低いとその仮定を完全に排除するほどではない。また、自己相関解析では AGASA で見られたクラスターは再現されなかった。

TA 実験の次期計画として、現在 TA の低エネルギー側への拡張 (TA Low Energy Extension、TALE) が進められている。この実験では、SD の高密度化、HiRes 実験で使用した FD 移設・増強などを行い、低エネルギー側 ($10^{16.5}$ eV 程度) での観測によって TA 本体と合わせて $10^{20.5}$ eV までの広いエネルギー領域で、銀河系内起源宇宙線から銀河系外起源宇宙線への変化の指標となるべき質量組成の精密測定などを行う計画である。米国担当の FD は建設を開始しており、日本側担当の SD の予算の規模は約 1 億円を予定している。2013 年度に SD 建設を行い、観測の開始を予定している。PAO と TA の間の宇宙線エネルギースケールや質量組成での結果の差異を検証するために、実験グループ間で光量校正データや大気データの交換、解析プログラムの公開や共同解析、FD や SD の交換などを計画している。光量校正データの交換は、既に 2012 年に始まっており、2018 年まで実施する予定である。

TA×4 は SD500 台を 3 カ所のサイトに間隔 2km に広げて並べる計画である。それによ

り、現在の TA と合わせ総面積を 4 倍化するとともに、FD を 1 ケ所追加する予定である。建設期間 2 年+観測期間 3 年の 5 カ年が終了するまでに、合計して現行 TA の 20 年分のデータの取得が可能である。これにより、十分な統計精度を得て、最高エネルギー宇宙線の異方性の問題に決着を付けようとしている。

また、理化学研究所が中心となって推進している国際宇宙ステーション搭載の最高エネルギー宇宙線観測計画 JEM-EUSO には、宇宙線研究所の TA グループなど、日本国内で TA 実験の核となっているグループが参加している。さらに、TA のサイトにおける JEM-EUSO の試験観測を TA 実験としてサポートしている。

TA2 は検出器面積を TA の 60 倍に拡張して、UHECR 起源の解明、宇宙線ソース天体密度への制限、宇宙線化学組成の同定などを目指した次世代空気シャワー実験計画である。約 1 万台の SD を 2 キロメートル間隔に配置し、総面積は 39,200 平方キロメートル (TA の約 60 倍) である。予算は約 1 億ドル (SD 1 台あたり約 1 万ドルを 1 万台) と見積もっているが、計画の詳細は PAO と TA との比較結果、TA×4、JEM-EUSO の結果を踏まえつつ将来に確定されることになるだろう。

委員会の評価

TA 実験について、実験装置の建設遂行および観測、そしてエネルギースペクトル測定、宇宙線化学組成、宇宙線到来方向の相関解析などの研究成果は委員会が高く評価された。しかしながら、エネルギースケールや化学組成での PAO との違いについて、それらが較正などの系統誤差から来るのか、シミュレーションによるものなのかが明確でなく、次期計画に進む前に原因を特定し問題を解決するのが重要であると認識された。そのため LINAC を用いたエネルギー較正や、PAO との比較検証などを行い、観測データの理解を深めることが必要不可欠である。

TALE 実験については、宇宙線のスペクトルや化学組成についてさらに広いエネルギー領域にわたって理解を深めることが期待され、また低エネルギー側への拡張によってチベット実験の観測エネルギー領域とのギャップを埋めることにより、宇宙線の生成・伝搬などについてより包括的な理解が期待できると考えられる。

TA×4 計画は、今後 5 年間の短期間で、総量として現行 TA の 20 年分のデータ蓄積を目指すものであり、省資源化が図られた現実的な計画であると評価できる。しかしながら TA×4 については、計画が本委員会の審議の途中で提出されたものであり、その具体的検討については他の計画より後発との印象がある。今後、検討を進めて速やかに実現することを期待する。

宇宙線研究所ほかの TA グループが JEM-EUSO に参加し、応分の貢献を目指すことについて、本委員会としては、最高エネルギー宇宙線観測に関連する様々な経験が JEM-EUSO に反映されると期待され、適当であると判断する。

TA2 計画については、TA グループの現在の方針の通り、PAO と TA との比較結果、TA ×4、JEM-EUSO の結果を踏まえつつ検討を続けることが望ましい。

チベット実験次期計画について

これまでの研究成果と今後の計画の概要

チベット実験は、標高 4,300 メートルの高地において、数 TeV から knee 領域 (10^{15} – 10^{16} eV) の宇宙線粒子 (核子) のエネルギースペクトル・化学組成・異方性観測と、数 TeV から 100 TeV を越える高エネルギー天体ガンマ線観測を目指している。チベット実験でこれまでに得られた成果として、いくつかの事象の初検出が挙げられる。すなわち、太陽・月の掩蔽による宇宙線強度の低下、地球公転に伴うコンプトンゲッティング効果、太陽活動度に依存した太陽近傍の磁場構造の変化、太陽系近傍の星間空間の磁場構造の情報を与える数 TeV 領域での宇宙線異方性である。

チベット実験における現在進行中の拡張工事と次期計画について次に述べる。従来用いていた AS アレイ (プラスチックシンチレータと光電子増倍管からなるカウンターアレイで有効面積は約 37,000 平方メートル) では、ガンマ線と核子の識別が困難であった。そこで、現在、AS アレイの地下にミューオン検出器 (MD) を増設する計画が進んでいる。MD は地下 2.5 メートルに設置する水槽で、宇宙線粒子事象によるミューオンのチェレンコフ光をとらえ、anti-coincidence によりガンマ線観測に対する S/N の大幅な改善を図る。それにより、10TeV 以上、100 TeV を越えるエネルギー領域まで、有意義なガンマ線観測が期待できる。MD のプロトタイプは 2007 年に建設され、ほぼシミュレーションから期待されるパフォーマンスを得た。現在 5 台を建設中である (最終目標は 12 台)。さらに、AS アレイ中心部の 160 平方メートルの領域には、鉛、鉄、プラスチックシンチレータで構成される 100 台のカウンター (1.5 メートル間隔) を建設中である (YAC-II)。これにより、Knee 領域の陽子・ヘリウムのエネルギースペクトル、組成比の確定が期待される。

チベット実験の次期計画として残りの MD の建設 (7 台)、AS アレイの拡張 (37,000 平方メートル→83,000 平方メートル)、YAC-III の建設を検討している。YAC-III では 400 台の検出器を AS アレイ中心部の 5,000 平方メートルに配置し、Knee 領域の鉄成分のエネルギースペクトル、組成比の確定を目指す。予算は MD が 4 億円、AS 拡張が 1.5 億円、YAC-III が 2.5 億円で、合計 8 億円である。これらの建設が約 3 年、残り 3 年で観測、合計 6 年間の予定である。科研費による予算獲得を検討しており、2012 年度は基盤研究 (A) が採択された。日本：中国で約 3 : 1 の予算分担を予定している。

委員会の評価

Knee 領域の宇宙線化学組成を知ることは、銀河宇宙線の起源・加速・伝搬の問題を考える上で重要である。現在、標準的とされている組成モデルは KASCADE 観測に基づいたものであるが、KASCADE (1 気圧高度) での空気シャワーの主要成分であるミューオンは、その発達がハドロン相互作用モデルに強く依存している。一方、Knee 領域の宇宙線粒子の作る空気シャワーの最大発達高度はほぼチベット高度 (X=600 グラム) に等しい。この高度で観測される空気シャワーは電磁成分が主体であり、その発達のモデル依存性が小さいので組成決定に有利である。

一方、国際的なガンマ線観測プロジェクトとしてチェレンコフ光観測を手段とする HESS、MAGIC、VERITAS が成果を激しく競っており、また、次期計画としての CTA が立ち上がりつつある。ただし、前回 2007 年の将来計画検討委員会でも指摘されたように、CTA は観測視野が狭く、予算規模が大きく実現までに年月を要する。これに対し、広視野・小規模予算を特色とするチベット観測は相補的であるといえ、すみやかな計画実現により応分の科学的成果を期待することができるだろう。同様な科学的目的を持って進められている北米の HAWC 実験の建設が進みつつあることを考えても、チベット MD 計画で先駆的成果をあげするためにはすみやかな計画実現が極めて重要である。

最後にチベット実験グループと TA グループとの関係について述べておく。観測高度は異なるが、今後 TALE 実験が開始されることにより、チベット実験と TALE 実験で Knee 領域より高いエネルギー領域が広くかつ連続的に測定されることになる。ともに宇宙線研究所内のグループであり、

- 宇宙線エネルギースペクトル・化学組成の統一な研究、

- テクノロジーの類似点 (検出器、シミュレーションなど) を生かした人的資源の効率的活用、学生・ポスドクの育成、外部資金獲得を容易化、などの可能性を生かし、お互いの連携を深めて研究を進めることを検討すべきである。

ハイパーカミオカンデ (Hyper-K) 計画について

計画の概要

ハイパーカミオカンデ (Hyper-K) はカミオカンデ、スーパーカミオカンデ (Super-K) に続く、第3世代の水チェレンコフ検出器による陽子崩壊・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を始め、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、太陽フレアニュートリノなど幅広い。

水チェレンコフ検出器は既にカミオカンデおよびスーパーカミオカンデで性能を実証された検出器であり、また検出器の拡張性に優れている。Hyper-K 検出器は、高さ 54 メートル、長さ 250 メートルの構成が 2 セットあり、総体積 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 万本を予定している。検出器サイトの候補地は岐阜県飛騨市神岡町の柗洞鉦 (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) を検討している。検出器構造の空洞解析や設計はほぼ終了し、検出器デザインは固まりつつある。光センサーは 20 インチサイズの光電子増倍管 (PMT)、または性能およびコストの向上を目指した新型ハイブリッドフォト検出器 (HPD) を検討している。2013 年に 20 インチ HPD の試作品が完成し、神岡で 200 トンのガドリニウム水を入れた水槽で実証試験を予定している。その他、水槽の外壁で水をシールドするプラスチックライナーのデザイン、DAQ の開発などを進める予定である。

国際協力によるコラボレーションを形成するために、2012 年 8 月に東京大学柏キャンパスのカブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) にてオープンミーティングが開催され、9 カ国、35 の研究施設、100 名程度のコラボレーションを結成した。ミーティングでは検出器の R&D を加速させるために、プロジェクトのレビュー、ワーキンググループの結成、コンビナーの割り当てなどを行った。

建設費は概算で約 800 億 (ただし 25% の誤差あり)、その内、空洞掘削に 300 億、水槽建設に 300 億、センサー 200 億 (高光電効率-HPD の場合) を見込んでいるが、さらなるコストダウンを課題としている。予算獲得時期に依るが、建設スケジュールは 2016 年建設開始として、2023 年に実験開始を予定している。

加速器ニュートリノで期待される物理は主にレプトンの CP 非対称性の探索であり、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの出現確率をニュートリノと反ニュートリノビームについて測定し、それぞれの出現確率の違いを観測することにより測定可能である。ニュートリノビーム強度を 750kW、実験期間を 10 年と仮定して、電子ニュートリノ事象は約 4000 事象、反電子ニュートリノ事象は約 2000 事象観測され、系統誤差が 5% 以下と仮定すると 3 シグマ以上の信頼度で CP 非対称性の破れを検出することが可能である。系統誤差は

現在進行中の T2K 実験における研究の進展によりさらに縮小されると期待される。また大気ニュートリノでは地球内部におけるニュートリノ振動の物質効果を測定することで、ニュートリノの質量階層性を決定することが期待できる。数 GeV 領域のニュートリノが地球を通過することによりミューニュートリノと電子ニュートリノ間の振動が増幅されるが、その増幅度が質量階層性によって異なり、Hyper-K 検出器では 10 年の観測で、振動パラメータの不定性を考慮しても 3 シグマ以上で階層性が決定可能と評価されている。超新星爆発ニュートリノは、フラックス、エネルギー、ニュートリノの種類について時間依存性を測定することによって、超新星における崩壊理論モデルの検証、およびニュートリノ質量階層性について測定することが期待されている。また陽子崩壊は、 $p \rightarrow e\pi^0$ 崩壊モードで 1.3×10^{35} 年 (90%信頼度) まで探索可能、またその他の多くのモードで Super-K の感度から約 1 桁向上し、核子崩壊の発見も期待できる。

競合する他の実験は、アメリカの LBNE、ヨーロッパの LBNO であり、それぞれ液体アルゴン検出器を用いた実験計画である。LBNE は 2022 年実験スタート予定で主に長基線ニュートリノ実験による CP 非対称性の測定、LBNO は 2,300 キロメートルの長基線により質量階層性の特定に大きな感度を持つ。ただしこれらの大型液体アルゴン検出器は、水チェレンコフ検出器と異なり大型検出器運転の経験が限られ、今後の技術実証が必要であろう。

委員会の評価

Hyper-K 計画はカミオカンデ、スーパーカミオカンデに続く大型水チェレンコフ検出器計画で、上で述べられたように、そのテクノロジーや解析手法は十分良く実証されている。予算規模は大きいですが、それ以外には特に大きな懸念材料はない。人的規模についてはスーパーカミオカンデ以上に多く必要と思われ、その拠出を宇宙線研究所のみに求めるのでは明らかに不足であり、国際協力などでより多くの人材確保を進める必要があると思われる。

予算について、800 億円という大規模な概算要求は今まで宇宙線研究所から提出したことがなく、KEK、J-PARC と協力して予算要求を行うことも検討すべきである。予算要求及び獲得の実現には日本のニュートリノグループが一致して Hyper-K 計画を推進する体制が必要である。その点で KEK グループとの将来計画についての方向性を共にすることが重要である (2012 年 11 月時点での記述。その後、KEK グループとの間で Hyper-K プロジェクトを日本のニュートリノ将来計画とすることの合意がなされた)。

加速器ニュートリノ、大気ニュートリノで科学研究の意義と技術的面は問題ないが、太陽ニュートリノ観測において宇宙線ミューオン起源のバックグラウンドレベルが高く、研究の進展に障害となると思われるので、実験計画の方針をさらに検討する必要があると思われる。

また、建設開始が 2016 年、実験開始が 2023 年のスケジュールに対して予算獲得が間に合うのが懸念される。予算獲得プランを詳細に検討し、その実現に努める必要がある。更

に、現状では 800 億円の建設費に誤差がまだ 25%あるとのことであるが、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。

XMASS 実験について

これまでの研究の状況と将来計画の概要

XMASS 実験は液体キセノンをターゲット物質に用いた 1 相型検出器であり、暗黒物質（ダークマター、DM）の直接検出を始め、太陽ニュートリノ、二重ベータ崩壊等の観測を目指した多目的宇宙素粒子実験である。現在は実験のフェーズ 1 として XMASS-I（有効質量 100 キログラム、全質量 835 キログラム）が開始されており、次の段階として XMASS-1.5（有効質量 1 トン、全質量 5 トン）が計画され、最終的には XMASS-II（有効質量 10 トン、全質量 25 トン）を目指している。XMASS 検出器はキセノンの自己遮蔽によりガンマ線や中性子などの外部バックグラウンド除去が可能であり、また検出器拡張が比較的容易という点では Xenon-100 などの競合する気体-液体 2 相型検出器よりも有利である。

XMASS-I 検出器は 2 インチ光電子増倍管（PMT）を 630 本配置し、検出器内壁の 62% を光電面で占めている。外部バックグラウンド対策として 800 トンの水槽中に検出器全体を配置することによりガンマ線や中性子の遮蔽を図っている。低放射線バックグラウンドの PMT 開発を行った。またキセノン内部バックグラウンドはクリプトン（Kr）、ラドン（Rn）の除去について目標値をほぼ達成した。2010 年 9 月に建設が終了、2012 年 5 月までにコミッショニングを終了した。発生光量は 1keV あたり約 14.7 p.e. であり、Xenon100 と比較して 6 倍以上大きい。コバルト 57 を用いた 122keV ガンマ線による較正によりエネルギー分解能を 4% と評価した。検出器中心での位置分解能は RMS で 1.4cm である。

コミッショニングで得られたデータから予想以上のバックグラウンドが観測され、その起源の特定を行った。バックグラウンドの一つは PMT のクォーツ窓とメタル管を圧着しているアルミニウムに含まれていたウラニウム 238 と鉛 210 からのガンマ線であった。ゲルマニウム検出器を用いた放射線測定とシミュレーションにより、エネルギーが 5 keV 以上のバックグラウンドの量が説明される。5 keV 以下は PMT とホルダー間に埋めていた Gore-Tex に含まれる炭素からのバックグラウンドだと推測される。これらの理由からバックグラウンドレートが目標値よりおよそ 2 桁高い。しかしながら XMASS-I の 6.7 日観測したデータを用いて、DM、アクシオンの探索を行った。DM 探索は fiducial volume カットを用いた解析により散乱断面積で 2.2×10^{-41} から 10^{-43} cm^2 、さらにパターン解析により 4.7×10^{-43} から $1.1 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ の範囲で制限を設けることが可能と見込んでいる。

現在、検出器改修を進めており、PMT のアルミニウムシーリング部分を銅プレートで覆い、さらに Gore-Tex の除去を行い、現在のバックグラウンドレートの 100 分の 1 に低減させることを計画している。また抜本的な改良と感度向上、そして海外での新たな計画である Xenon-1ton との競争のため、XMASS-1.5 実験を計画している。表面バックグラウンド同定の向上のため round shape 型受光面にした PMT を開発、Gore-Tex の除去、さらに検出器表面の鉛によるバックグラウンドも低減させる。期待される物理結果は、DM 探索で断面

積 10^{-46} cm^2 以下 (5 keV 以上のエネルギー領域)、低エネルギー側では 散乱断面積で数 10^{-42} cm^2 までの感度向上、またアクシオン探索では現在より 2 桁の改善を見込んでいる。建設は 2014 年、実験開始は 2015 年開始を予定している。

海外の競合する主な計画は Xenon-1ton (Gran Sasso、2015 年実験開始予定) であり、XMASS-1.5 と同様に 10^{-46} cm^2 以下の感度が期待されるが、高電圧などの技術的な開発要素が残されている。その他、LUX (Xe 300kg、Homestake)、LZ (Xe 7ton)、Super-CDMS などが計画されている。これらの実験計画の内、XMASS は 反跳核子および 電子/ガンマ線の両方に感度がある点が特徴の一つである。

マンパワーは、較正源の開発で韓国からの貢献以外は、国内の研究機関で占め、コラボレーターの総数は 41 名である。XMASS-1.5 の予算は総額約 13 億円を予定している。

委員会の評価

XMASS 実験は、暗黒物質探索に関して海外の実験と競争出来る、日本グループが主導して行ってきた実験である。期待される科学的成果も暗黒物質を始め、アクシオン、太陽ニュートリノと多岐に渡っている。検出器のバックグラウンド除去、エネルギー閾値などにおいて優れており、実験のポテンシャルは高い。実験グループもキセノンの不純物除去などの高度な技術力を持ち、これまでの経緯から検出器製作における技術も特に問題ないように思われる。また実験体制や実験規模も現状で問題ない。神岡研究施設においては、およそ 10 年先の計画であるハイパーカミオカンデまでに遂行可能な実験と考えられる。

残るはバックグラウンドと予算の問題であるが、競合相手である Xenon-1ton は実現性に不確定要素がありつつも予算は承認されており、現在の XMASS-I の表面バックグラウンドの問題を検出器改修で早急に解決し、様々な可能性を探って XMASS-1.5 の予算を獲得し、計画を遂行することが望まれる。

Ashra 実験について

これまでの研究成果と今後の計画の概要

Ashra 実験はこの 10 年間、イメージインテンシファイアを用いた空気シャワーの撮像などの観測機器を開発し、マウナロア山において観測を継続してきた。高エネルギー天体やガンマ線バースト (GRB) 起源のタウニュートリノ観測、可視光領域における GRB から閃光観測などを目指してきた。

また本委員会におけるヒアリングでは、Ashra に加えて Neutrino Telescope Array (NTA) 計画について報告があった。NTA 計画は、Ashra 実験で開発された空気シャワー撮像技術を継承して 10^6 から 10^9 GeV 領域の高エネルギー天体起源のニュートリノ観測を行うことを目的とした計画である。実験はアメリカ・ハワイ島の 3 山で囲まれた領域で、山を通過して生成されたタウニュートリノの空気シャワーによる高エネルギー事象を観測する。観測可能な立体角は約 π ステラジアン、角度分解能は約 0.2° と評価している。共同研究者は現在日本、台湾、アメリカで 30 名程度、将来 10 カ国 100 名以上を目指している。スケジュールは 2013 年から 2014 年に R&D 及び予算請求、2015 年に建設開始、2018 年に観測開始を計画している。

委員会の評価

Ashra 実験は、イメージインテンシファイアを用いた広視野撮像観測、また地球かすりによる高エネルギー天体起源のタウニュートリノ観測など、非常に意欲的に新しい方法での宇宙線観測の研究開発に取り組んできた。これらの検出器開発研究で得られた成果にはユニークなものもある。また、一連の開発研究を通して PeV 領域の宇宙線スペクトル測定やニュートリノ探査、GRB 起源の閃光探査などの物理結果も残している。

しかしながら、Ashra はその当初の計画から大幅に遅れていると判断せざるを得ない。Ashra の構想段階で競争相手と想定された他の計画などが成果を挙げつつある現在、今後長く Ashra の検証実験を続けることの意義は小さいと判断する。また、Ashra に続く将来計画として NTA が提案された。しかし現状では、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。

最後に、Ashra の検出器開発で得られた成果は将来何らかの形で有効利用されうるものであり、開発研究の技術的成果を詳細に論文などの形でまとめておくことを推奨する。

Gadzooks! 実験について

計画の概要

Gadzooks! はスーパーカミオカンデ装置内の純水に硫酸ガドリニウムを 0.1%溶解し、反電子ニュートリノ反応による中性子の捕獲効率を向上させ、超新星背景ニュートリノ、超新星爆発ニュートリノ等における物理向上を目指した計画である。

超新星背景ニュートリノの主なバックグラウンドは、エネルギーがチェレンコフ閾値以下のミュオン粒子が崩壊して生成された大気ニュートリノ起源の電子事象であり、ガドリニウムが中性子捕獲する際に放出される約 8 MeV 相当の遅延信号を検出することにより、これらのバックグラウンドをおよそ 5 分の 1 に減少させ、超新星背景ニュートリノの検出感度を向上させることが可能である。また超新星爆発ニュートリノでは電子事象がニュートリノ到来方向について感度を持つが、中性子同定により反電子事象を除いたサンプルで方向を計算することにより到来方向の分解能を 2 倍近く向上することが可能である。その他、中性子化バーストや Si 燃焼などの超新星爆発モデルの検証、近傍銀河での超新星爆発感度などの面でも物理の進展が期待できる。現在神岡坑内に 200 トンの試験用水槽を製作し、チェレンコフ光の透過率、装置の腐食性、水循環装置など、Gadzooks!に向けた実証試験 (EGADS) を行っている。

委員会の評価

Gadzooks! 実験について、委員会では関係者よりヒアリングを行うことはなかったが、宇宙線研究者会議主催タウンミーティングでの情報に基づいて委員間で意見交換を行った。委員会では Gadzooks! 実験はスーパーカミオカンデ実験における研究活動の自然な延長線上の研究計画と認識し、その物理の重要性を高く評価し、また現在まで着実に行われてきた R&D 等により実現可能性が大きいと判断した。スーパーカミオカンデ装置の Gadzooks! への移行決定はスーパーカミオカンデグループ内での議論に従うべきとの認識ではあるが、実験は大型科研費等でも実現可能と考えられ、早期に計画実現を目指すのが望ましいと考える。

その他の研究グループ（理論グループ、観測的宇宙論グループ、高エネルギー天体グループ）について

これまでの研究成果と今後の展望

理論グループ、観測的宇宙論グループ、高エネルギー天体グループからは、各グループにおける研究成果や今後の展望を記述した数ページの資料を作成・提出を求めた。以下はそれに基づいて委員会で行った議論および評価を記したものである。

理論グループは、素粒子論と宇宙論の様々な課題に関して理論的な研究を行っており、素粒子論分野では大統一理論や暗黒物質の候補の存在から期待されている超対称性標準模型など、宇宙論分野では素粒子宇宙論と呼ばれる分野を中心に、インフレーション宇宙モデル、バリオン数生成、超対称性理論に基づく宇宙論元素合成、暗黒物質、宇宙の密度揺らぎの生成と進化などの研究を行ってきた。過去5年間、年に20~40本程度の論文を査読付きジャーナルに発表している。最近の主な研究成果を挙げると、宇宙初期における元素合成とグラビティーノに対する制限、アクシオン宇宙論、インフレーションにおける等曲率揺らぎの制限、LHC実験におけるヒッグス粒子や超対称標準模型に対する研究などがある。今後は、最新のLHCやCMB観測などの結果に注目しつつ標準模型を超える物理の有力な候補を提案し、その宇宙論的帰納を探索することに努める。また、学生や研究員を受け入れ、アクティビティを維持して素粒子物理・宇宙論の分野に貢献する。

観測的宇宙論グループは、SDSSグループから組織変更され、2010年からすばる望遠鏡超広視野カメラ（Hyper Suprime-Cam : HSC）を用いた深宇宙探査プロジェクトの準備研究に着手している。HSCを用いて2013年から2017年の5年間に渡り深宇宙可視光撮像探査を行い、 $z=5\sim 7$ における約1万個のLy α 輝線銀河を検出し、その解析により宇宙再電離の統一的理解を目指す。2018年以降はすばるPrime Focus Spectrograph (PFS)による赤外線分光探査や超大型次世代望遠鏡Thirty Meter Telescope (TMT)プロジェクトへの参加を検討している。共同利用拠点における役割として、データ解析ツールおよびカタログのデータベースを国内外に提供すること、深撮像データ解析の講習や研究会を主催する、などを考えている。

高エネルギー天体グループは、2009年12月に高エネルギー宇宙線研究部門内に創成され、宇宙線の起源に関わる様々な高エネルギー天体现象について、理論的手段およびデータ解析的手段を用いた研究を行うことを目的としてきた。これまで、高エネルギー天体における爆発的エネルギー解放現象とそれに関連した粒子加速現象の研究に成果を挙げている。研究対象として、宇宙線研究所の他グループと多くの共通点を持っており、今後の発展が期待

される項目として、銀河系外超高エネルギー宇宙線・銀河宇宙線の加速機構・異方性・伝播の研究、超高エネルギー宇宙線の電波的検出法の研究、高エネルギー γ 線天体の研究、中性子星連星系合体イベントの研究などが挙げられる。

委員会の評価

理論グループにおいては、二人のスタッフが素粒子論および宇宙論に渡る広い研究分野を相補的に分担し、高いアクティビティを保ちつつ多くの研究成果を挙げていることは評価に値する。また、理論分野で活躍する優秀な研究者を多く輩出しており、教育面においても優れた実績を挙げていると言えるだろう。

宇宙線研究所には理論グループ、観測的宇宙論グループの他に、高エネルギー天体グループが創成され、上記の3研究グループによって、素粒子、宇宙線、宇宙論の非常に広い分野を網羅する研究者グループが形成されることになった。その特徴を生かし、新しい共同研究の可能性を検討すべきである。さらに、この3グループだけに閉じず、実験・観測グループとの交流も積極化を期待する。また、宇宙線研究所と建物が隣接するカブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）の研究者との、既に活発な共同研究を今後ともすすめるべきである。

全体のまとめ

宇宙線研究所では1980年代以降、本将来計画検討委員会以前に合計3回の将来計画検討(小)委員会を組織して、研究所の将来計画を検討してきた。第1回の委員会ではスーパーカミオカンデ計画が最上位で推薦された。この計画はその後実現され、大きな科学的成果を上げ、また現在も新たな成果を上げ続けている。第2回の委員会では最高エネルギー宇宙線と重力波の研究が強く推薦された。最高エネルギー宇宙線研究を進める Telescope Array 計画はその後実現され、現在その成果がまとまりつつあり、その結果は世界の宇宙線コミュニティから高く評価されている。第3回の委員会では重力波が再度強く推薦され、その後重力波観測を目指す KAGRA 計画の推進が認められ、現在建設中である。このように今まで宇宙線研究所の将来計画検討(小)委員会の推薦は研究所の研究計画の実行に大きな影響を及ぼし、またこれらの研究は多くの成果を上げてきた。このような歴史を振り返るならば、本委員会の結論は重いものとなろう。

本委員会は2012年の初めから約1年半の間に合計10回開催され、様々な将来計画の可能性について検討してきた。各将来計画についての本委員会としての検討結果の詳細はこれまでの章で述べてきた。これらの将来計画に順位付けを行うのは大変困難であるが、期待される科学的成果、科学的波及効果、実験遂行の技術的・予算的可能性を総合的に検討した結果を以下に記述する。

宇宙線研究所がすみやかに実現をめざすべき次期計画として、ガンマ線天文学の飛躍的発展を目指す CTA 実験に重点を置くことを勧める。CTA 計画は世界が協力して進める計画であり、日本のコミュニティの大きな貢献、主体的な研究遂行のためには装置・ソフトウェア開発の両面にわたって宇宙線研究所および日本の研究グループの体制の更なる強化を図ることが重要である。

ニュートリノ振動を初めとするニュートリノ物理の発展に関して、日本はこの10年以上もの間、世界をリードしてきた。ハイパーカミオカンデはその流れを引き継ぎ、さらに発展させる重要な計画であると考えられる。特に CP 非対称性の測定および質量階層性の解明は、素粒子物理学における最重要課題のひとつであり、また実現性も現行実験における経験から十分に高いと判断される。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。

本委員会で検討した他の多くの研究計画も、科学的な重要性が高く宇宙線研究所の将来計画として十分な科学的成果が期待される。XMASS 実験は、バックグラウンドの問題を解

決し実験手法の卓越性が示せれば、検出器のスケラビリティから XMASS-1.5 においてダークマターの検出感度を大きく向上させることが期待される実験計画である。

XMASS-1.5、100TeV 領域のガンマ線観測などを行うチベット次期計画、過去の超新星起源ニュートリノの探索を行う Gadzooks!、最高エネルギー宇宙線の観測面積を 4 倍に拡張する TA×4 計画については、その規模から考えて概算要求によるばかりでなく競争的資金などあらゆる可能性も視野に入れ、また宇宙線研究所としても支援をし、速やかな実現をめざすべきである。TA×4 についてはその科学的重要性は評価されるが、計画の具体的検討については他の計画より後発との印象がある。今後計画の具体的検討を進めて速やかに実現することを期待する。

また、XMASS-1.5 と TA×4 については、これらの計画が最終計画ではなく、将来的には更なる次期計画が具体的に検討されており、将来の更なる研究の発展に向けた一歩という観点からも早期の実現が望まれる。

今後、TALE 実験が開始されることにより、それとチベット実験とを合わせ、Knee 領域より高いエネルギー領域が広くかつ連続的に観測対象となるが、1つの研究機関における、このような広いエネルギー範囲の空気シャワー観測の包括的实施は世界的にみてもユニークである。その利点を生かすために、TA とチベットの連携、更には理論面に渡る連携強化が重要である。JEM-EUSO への参加についてはこれまでの TA グループの経験を生かした積極的な貢献を期待する。

理論、観測的宇宙論、高エネルギー天体の 3 グループについては、互いの共同研究の実現を通して成果を挙げるとともに、他の実験観測グループとの研究交流をすすめることを期待する。

なお、本委員会で検討した大型・中型の将来計画を全て実現するには、資金面での難しさばかりではなく、人的資源確保の難しさも大きな問題である。従って、本委員会で科学的に高く評価された計画においても、もしその計画の速やかな実現が困難になった場合には、計画順位の入れ替えや、研究所の研究組織体制の再検討など、ある程度柔軟に対応すべきであると付記する。

宇宙線研究所はこれまでも共同利用・共同研究拠点（旧全国共同利用研究所）として各大学の研究室における小規模な宇宙線研究をサポートするため、実験施設や計算機、研究会など様々なりソースを提供して来た。引き続き、宇宙線研究の拠点としてその役割を継続させることを期待する。最後に、本委員会は現在建設中の KAGRA がその建設を着実に進め、一刻も早く科学成果を出すことを期待する。