

高輝度大型ハドロン衝突型加速器 (HL-LHC) による素粒子実験

① 計画の概要

欧州合同原子核研究機関 (CERN) に建設された大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) を使った ATLAS および CMS 実験において、2012 年にヒッグス粒子が発見され、これが翌 2013 年のノーベル物理学賞に繋がった。LHC は 2024 年頃に高輝度化 (HL-LHC) される。ルミノシティ (衝突輝度) をあげることで、LHC よりも広い質量領域で新粒子の探索が可能になる。また、高統計での測定が可能になり、LHC で発見したヒッグス粒子の性質などを詳細に調査できる。

加速器の改造では、陽子・陽子衝突地点近傍でのビーム分離のために、高磁場の超伝導磁石の新規導入が必要である。超伝導磁石は日本の得意分野であること、高磁場磁石は将来のビームエネルギーを上げる計画 (HE-LHC や FCC) への道を拓く重要な開発要素であることから、このビーム分離用電磁石開発に積極的に関与していく。

加速器の増強に伴い、検出器には微細化と放射線耐性の強化が要求される。本計画では、ATLAS 検出器のアップグレード計画として、荷電粒子飛跡測定用シリコン検出器、ミュオントリガー用検出器の電子回路の開発と製造などを主導していく。

加速器アップグレードは CERN が主体となって行うが、日本も高エネルギー加速器研究機構が中心となってその一端を担う。実験のアップグレードは、ATLAS 実験に参画する研究機関による分担で行い、日本からは高エネルギー加速器研究機構を含む 17 の研究機関が関与する。

② 目的と実施内容

日本グループは現行 LHC の加速器と ATLAS 実験双方に対して深く関与してきた。本計画は LHC 計画の発展版であり、その目的は、未知の重粒子探索やヒッグス粒子等の精査を通して、標準模型を超える物理現象の兆候を掴み、ポストヒッグス時代の素粒子物理学を方向付け、発展させることである。

新粒子探索では、ルミノシティの増大により、陽子中で大きな運動量を持つパートンの衝突が利用可能になることから、重い粒子の探索範囲を大きく広げられる。新物理の代表格である超対称性をはじめ、複合粒子模型や、未知のゲージ粒子の導入など、無数の模型が予言する新粒子を大幅に発見感度をあげて探索する。

ヒッグス研究においては、結合定数の精密測定、第 2 世代粒子とヒッグス場との結合測定、自己結合定数測定、等の測定を通して、存在理由が理論的には不明確なヒッグス場についての根源的な理解を深め、新物理の兆候がないか探る。ヒッグス場の超高エネルギーでの振る舞いにより宇宙の安定性が決まる。その振る舞いに関与するトップクォークの研究も発展させる。

本計画では以下を行うことで、実験の性能向上を主導的に推進する。

1. 陽子・陽子衝突地点近傍に設置するビーム分離用超伝導電磁石の開発と製造
2. 荷電粒子の飛跡測定用シリコン検出器の開発と製造
3. ミュオントリガー用電子回路の開発と製造

これら製造した装置を CERN 現地に搬入設置し、実験開始後は、開発・製造した検出器群の運用保守を主体的に行い、検出器の較正・調整作業の後、得られたデータを逐次解析していく。

③ 学術的な意義

現代の素粒子物理学には、力の統一、階層性問題、世代の謎、物質優勢宇宙、暗黒物質や暗黒エネルギーの存在、などの大きな謎が存在する。エネルギーフロンティア実験はこれらの謎に迫る有効な手段であり、LHC 実験のアップグレードは、ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学を進展させ、上記の謎を解くためには不可欠である。

本計画によって得られる結果は、他の学問分野に大きなインパクトを与える。超対称性を発見すれば、4 次元時空とゲージ場という内部空間が結びつくことが実験的に示され、4 次元時空の力学である重力と、その他の 3 つの力を統合する学問分野が創生される。同時に、暗黒物質の理解が進み、宇宙物理学の飛躍的な発展が期待できる。ヒッグス粒子やトップクォーク質量の詳細研究からヒッグス場の相転移の理解を深めることにより、宇宙論における初期宇宙研究を大きく前進させる。また、強磁場電磁石開発により、さらなる高エネルギー加速器 (HE-LHC, FCC) への道が拓ける。

一方で、加速器および検出器開発によるスピノフも様々な分野で期待できる。強磁場超伝導電磁石の技術開発は、超伝導技術の発展を促し、産業界との融和性が高い。他にも、HL-LHC では加速器トンネルと地上との間の超伝導送電を行う予定で、このための技術開発は、省エネルギー技術として幅広い分野で注目されているものである。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

LHC は世界で唯一稼働中のエネルギーフロンティア加速器であり、ATLAS 実験と CMS 実験でのみ、未知重粒子の直接探索、ヒッグス粒子やトップクォークの研究が可能である。日本グループは、加速器と ATLAS 実験双方に対して大きな貢献をしてきた。その寄与は大きく、実験の推進に不可欠となっている。

日本国内の SuperKEKB や、ミュオンを使った実験、長基線ニュートリノ実験などは、フレーバーに関する物理研究が目的で、本計画とは、素粒子物理学を進展させる上で相補的な関係にある。ILC 計画は HL-LHC よりもさらに高精度でヒッグス粒子の精密測定を行えるが、HL-LHC は ILC よりも重粒子の直接探索が得意なので、精密測定から間接的に新物理を探索する ILC とは相補的な関係にある。

⑤ 実施機関と実施体制

LHC 加速器のアップグレードは CERN で実施する。CERN 加盟国は欧州を中心に 21 カ国であるが、HL-LHC は加盟国に加えて、日本、米国、ロシアなどの非加盟国を含む国際共同プロジェクトである。ATLAS 実験は、世界中から集まった約 3000 人の研究者と大学院生からなる国際共同実験である。

加速器への日本からの寄与は高エネルギー加速器研究機構が中心となり、高エネルギー加速器研究機構超伝導低温工学センターが、ビーム分離用超伝導電磁石の開発と製造を担当する。ATLAS 実験遂行の国内組織は、花垣和則（高エネルギー加速器研究機構・教授）と浅井祥仁（東京大学・教授）を代表とする、ATLAS 日本グループである。両機関を含む 17 の研究機関からなる。本計画の遂行はこの組織が行い、取りまとめを高エネルギー加速器研究機構が行う。

⑥ 所要経費

日本の負担額は以下である。

加速器アップグレード：合計 58 億円

ビーム分離用超伝導双極子電磁石の開発と製造 33 億円

HL-LHC 建設経費分担 25 億円

ATLAS 検出器アップグレード：合計 46 億円

シリコン荷電粒子飛跡検出器の開発と製造 24 億円

ミュオントリガー回路開発と製造 14 億円

その他データ収集システムの入れ替え等 8 億円

加速器運転経費の分担はなし。ATLAS 検出器運転経費は年 2 億円程度。

加速器の全体経費は人件費や開発費等も含め約 1000 億円程度。ATLAS 検出器部分は、開発費や人件費を含まない建設費だけで約 320 億円である。

⑦ 年次計画

2016-2018 年

- ・ビーム分離用電磁石の試作機製造と建設に向けた準備
- ・シリコン検出器技術開発
- ・ミュオントリガー回路概念設計

2019-2023 年

- ・ビーム分離用電磁石の製造と最終試験
- ・シリコン検出器の製造と構造体への組み込み
- ・ミュオントリガー回路試作品開発と製造

2024-2025 年

- ・ビーム分離用電磁石、シリコン検出器、
ミュオントリガーの ATLAS への設置搬入と動作試験

2026 年

- ・HL-LHC 運転開始。検出器の調整、較正作業

2027 年以降

- ・年間 300fb⁻¹ 程度のデータを収集

2023 年以前の加速器および検出器要素の開発製造は、主に日本で行う。2024 年以降、特に 2024-25 年の設置搬入のタイミングでは、多くの研究者を CERN に派遣し、日本担当の検出器群については、その設置、運用、調整作業で日本グループが主導権を握る。HL-LHC の運転開始後は、検出器の調整較正作業から物理解析へ、その研究内容を速やかに移行させ、物理データ解析においても日本グループの存在感を示す。

⑧ 社会的価値

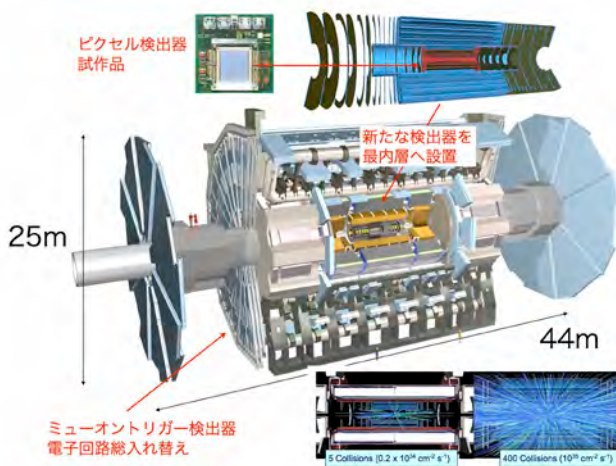
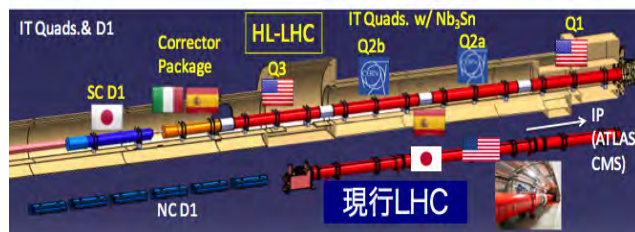
2012 年のヒッグス粒子発見前後は、「ヒッグスフィーバー」と呼んでいいくらい、純粋基礎科学である素粒子物理学のことが大きくマスコミで取り上げられた。基礎研究が多くの人々の興味を惹き、その結果、科学や工学を目指す若者が現れる。これこそが、基礎科学の最も重要な社会的価値であり、その意味で、本計画は非常に高い社会的価値を有する。また、基礎科学の推進が人類の知の蓄積に貢献する。

ヒッグス粒子発見により素粒子物理学の教科書は修正が必要になった。本計画で得られる結果次第では、ヒッグス粒子発見以上の大幅な変更が教科書レベルで必要となる。本計画は、それくらいの学問的、知的価値を有する。

本計画における経済的・産業的価値については、「学術的意義」のところで述べた通り、強磁場電磁石開発や、超伝導電送、そして最先端シリコン検出器開発のスピノフによる効果が大きく期待できる。

⑨ 本計画に関する連絡先

岡田 安弘（大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構）



J-PARC 実験施設の高度化による物質の起源の解明

① 計画の概要

物質の起源の解明を目指し、J-PARC ハドロン実験施設の拡張とビームラインの整備・高度化によって大強度陽子ビームを最大限に活用して研究成果を創出するとともに、加えて物質生命科学実験施設(MLF)においても新しい素粒子実験を展開する。世界的にユニークで特徴ある二次ビームラインを新設して K 中間子、反陽子、ミュオンなどのビームを用いた素粒子原子核実験を世界最高水準で行う。それによって、宇宙開闢初期に創成された素粒子とその後に創られたハドロン・原子核・原子が織りなす階層構造、すなわち物質の起源を解明することが出来る。本計画では、ハドロン実験施設を約3倍の面積に拡張し、二次粒子生成標的を一カ所から三カ所に増強して、上記の重要な実験を時間的に並行して効率良く行えるようにし、MLF には $g-2/\mu$ EDM 実験設備を新たに建設する。必要となる冷却水、電力などの関連設備の増強等を併せて行い、研究用大型スペクトロメータなど、実験研究用装置・設備を大幅に増強する。

多様な実験を一カ所で行えるという J-PARC の独自性を生かして、物質の起源を多面的に明らかにして世界をリードする研究基盤を構築する。素粒子物理と原子核物理のコミュニティからは強いサポートを受けている。遺跡調査と実施設計から実験開始まで五年間の計画で、そのための準備を進めている。国際共同実験として、国外の研究者にも開かれた形で進める。

② 目的と実施内容

ビッグバンでの素粒子の生成からハドロンの生成、恒星での原子核の生成と中性子星内部の高密度物質の生成にいたる、宇宙における物質の起源と物質生成史の全体像の解明をめざす。「物質・反物質の非対称性の謎」「素粒子の世代起源の謎」「ハドロンの生成と構造の謎」「核力と原子核生成の謎」「高密度物質の謎」を解き明かす。最初の二つの課題には、(1) K 中間子の稀崩壊における CP 対称性を破る過程の世界最高感度での測定(KOTO-II)、(2) 荷電レプトンフレーバー非保存であるミュオンの電子変換過程の世界最高感度での探索(COMET)、(3) ミュオン異常磁気能率の世界最高感度での測定とミュオン電気双極子能率の測定($g-2/\mu$ EDM)、で挑む。後の三つの課題には、それぞれ、(4) チャームクォークや複数のストレンジクォークをもつハドロンの分光、(5) ストレンジクォークをもつバリオン(ハイペロン)の核力の研究、(6) ハイペロンを含む原子核(ハイパー核)の精密分光による高密度物質の研究、で挑む。



そのために、世界的にユニークで特徴ある二次ビームライン: KL, K10, K1.1, HIHR とそのための測定器を新設して、研究(1), (4), (5), (6)のそれぞれを実施する。(2)はハドロン施設の現有ビームラインに大強度対応の実験装置を新設し、(3)は物質生命科学実験施設に実験設備を新たに建設して、それぞれ行う。

③ 学術的な意義

物質の起源を求めて宇宙の歴史を遡行し現在の物質に満ちた宇宙を説明するには、大強度ビームを用いたインテンシティブロンティアでの研究が必要不可欠である。本計画は、J-PARC ハドロン実験施設の高度化を軸に、素粒子物理および原子核物理にまたがる研究を総動員して、物質の起源に迫る研究を展開する。研究(1)により、現在の物質優勢宇宙の起源の解明を行う。(2)や(3)により、素粒子標準模型を超える事象を捉え、素粒子の世代の根源的な起源の理解を試みる。(4)により、クォークがどのように組み合わせられてハドロンが作られているか、それが核物質の中でどのように変化するか、すなわちハドロンの生成と構造の謎を理解する。また、(5)では、ストレンジ粒子と原子核の相互作用を明らかにすることで原子核生成の謎に挑み、(6)では、高密度核物質中でのストレンジネス自由度の役割を解明し、中性子星に存在していると考えられるストレンジ核物質の成り立ちを理解する。最近初めて直接観測された重力波を用いて、中性子星どうしの合体からの重力波の観測が期待されており(重力波天文学)、本研究で目指す高密度核物質の研究と深い関わりを持っている。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

米国フェルミ国立加速器研究所での陽子加速器の高度化計画、米国トマスジェファソン国立加速器研究所での電子加速器施設のアップグレード計画、ドイツ GSI での FAIR 計画が進められている。フェルミ研究所の計画は本計画の一部であるミュオン電子転換過程の探索やミュオン異常磁気能率の測定において競争関係にあるので、本計画の速やかな実施が望まれる。ジェファソン研究所の計画では、主として電子や光子を用いてハイパー核の分光や核子のクォーク構造を研究する。本計画での研究とは方法が異なり、双方を進めることが核物質の理解に本質的に重要である。FAIR 計画の一部である反陽子を使ったチャームクォークを含む粒子の分光なども本計画の一部と競争関係にある。

国内では、SuperKEKB での B 中間子やタウ粒子の実験とハドロン実験、RIBF での核子多体系の実験と相補的な関係にある。

⑤ 実施機関と実施体制

主となる実施機関は高エネルギー加速器研究機構(KEK)の素粒子原子核研究所(素核研)である。素核研で既設の J-PARC ハドロン実験施設を建設し運用を行っているグループを中心として関連各グループを包括して実行組織を設ける。素核研は J-PARC センターおよび KEK 内各部署(物質構造科学研究所、加速器研究施設、共通基盤研究施設、管理局)と連携をとりつつ計画を進める。また、連携協定を結んでいる理化学研究所仁科加速器センターや大阪大学核物理研究センターなどと協力しつつ、本計画を推進する。ビームライン等基幹装置の建設および運用は大学共同利用機関である素核研が責任をもって行うが、二次ビームラインの下流部や、実験用測定器等の建設や運用については、実験に参加する共同利用研究者やその所属する各大学・各研究機関(東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、大阪大学、九州大学、他)と協力してこれを進める。

⑥ 所要経費

本計画の所要経費(運営費を除く初期投資分)は総額 304 億円である。その内訳は次の通りである。

- ・J-PARC ハドロン実験施設の拡張：178 億円(建屋の拡張、新たな二つの二次粒子生成標的の設置、二次ビームラインの設置)
- ・測定器整備：34 億円(新設二次ビームラインにおける多様な素粒子物理、原子核物理実験のための測定器整備)
- ・ミュオン電子転換過程探索実験：46 億円
- ・ミュオン異常磁気能率とミュオン電気双極子能率の測定実験：46 億円

加えて、施設完成後には電気代や施設・機器のメンテナンスのために運営費が必要となる。既存部分の運営費に対する運営費の増分は総額年間 15.2 億円である。その内訳は次の通りである。

- ・電気代の増分：5.2 億円/年(ハドロン実験施設拡張部分のみ必要で 17.5MW)
- ・メンテナンス等の運営費の増分：10 億円/年

(ハドロン実験施設拡張部分について 7 億円/年、それ以外について 3 億円/年)

なお、ここでは年間 4 サイクル=88 日間の運転を仮定している。

⑦ 年次計画

本計画は J-PARC ハドロン実験施設の拡張を中核とするため、土木・建築工事およびその準備が先行する。建築地は既存のハドロン実験施設に隣接した場所で、この場所には中世から近世にかけての製塩遺跡があることが判明しており、工事の実施に先立ち遺跡調査が必要となる。計画の一年目は並行して工事の実施設計と装置の製作を行うことになる。二年目から四年目は工事と装置製作・設置を並行して行う。この間、既存のハドロン実験施設での実験研究は可能な限り継続するが、二年目半ばから四年目半ばの内約一年半の間はハドロン実験施設の既設第一生成標的を使用した実験は行うことができない。しかし、高運動量ビームラインおよび COMET ビームラインでのビーム実験は引き続き実施することが可能である。五年目には新設ビームラインが完成し、調整運転が行われ、実験が開始される。以上をまとめると年次計画は次のとおりである。一年目：遺跡調査、建築・土木の実施設計、装置製作、二～四年目：建屋増設、ビームダンプ移設、装置製作・設置、五年目：施設運転開始、調整、実験開始。

$g-2/\mu$ EDM 実験に関しては、MLF での実験設備の建設をこれと並行して行う。なお、この実験と競争関係にある米国フェルミ研究所の実験は平成 28 年度には測定を開始する予定である。J-PARC での実験は全くの新技术なので多少の遅れは許容可能であるが、可及的速やかに新設備建設が MLF において開始出来ることが望ましい。

⑧ 社会的価値

宇宙の歴史や物質の成り立ちに対する深い理解は、人類全体が共有する新たな英知の創造としての社会的・文化的意義を持つ。本計画で得られた知見は、人類共通の知的資産として、国家・社会のあらゆる分野の発展の重要な基盤となり、原動力となる。本計画で開発される最先端のビーム制御技術、放射線測定技術、大容量データ処理技術などの最先端基盤技術は、医療、材料科学、情報工学等の分野で応用され、国民の日常生活を支える。ミュオンビームに関する技術は、火山・原子炉内部構造の監視やミュオン顕微鏡に応用され、我が国の安心・安全社会の構築に役立つ。

また、本計画によって、J-PARC はハドロン関係研究において世界を確固としてリードする立場に立つことになる。本計画で展開される国際共同実験は普遍的、国際的な性格を有するため、本計画によって J-PARC をハドロン関係研究のメッカかつ国際的頭脳循環のハブとして機能させることは、我が国が国際社会の中で信頼と尊敬を得ることに大いに資する。さらに、最先端基礎科学が日本で発展していく現状を子供達や若者に示し、日本の科学水準の一層の向上と社会の活力の向上に大きな効果を与える。

⑨ 本計画に関する連絡先

岡田 安弘(大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構)

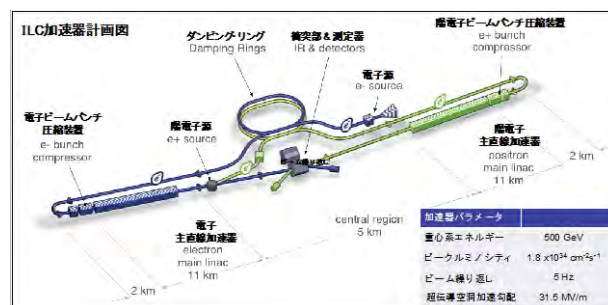


国際リニアコライダー計画

① 計画の概要

国際リニアコライダー (ILC) は、アジア・欧州・北米の素粒子物理及び加速器研究者の国際協力により実現を目指しているエネルギーフロンティアの電子・陽電子衝突型加速器である。これを国際的な合意と参加に基づいて日本に建設し、国際共同実験を行う。

衝突エネルギー250 GeV から 500 GeV を網羅し、将来は 1000 GeV 領域への拡張の可能性も視野に入れる。当初、全長約 30 km の地下トンネルに超伝導直線型加速器を配置し、逆方向から加速した電子と陽電子を正面衝突させ、LHC 実験に比べて圧倒的に背景 (ノイズ) 事象が少ないクリーンな実験を実現する。LHC で発見されたヒッグス粒子の詳細研究を行い素粒子の質量生成の背後の物理を解明するとともに、トップクォークの詳細研究、宇宙の暗黒物質等 TeV スケールで期待される新粒子・新現象の探索や研究を進める。これにより、宇宙の真空の構造、力の大統一、自然界の新しい対称性、宇宙初期の物理法則の知見が得られ、宇宙の進化を解明することが期待される。



2012 年末には国際将来加速器委員会 (ICFA) が設立した国際設計チーム (GDE) による技術設計書 (TDR) が完成しており、現在 GDE を引き継いだリニアコライダーコラボレーション (LCC) によって、国内候補地を念頭においた設計・検討が行われている。また、文部科学省の有識者会議において実施に関わる諸課題の検討が進んでいる。今後国際的な準備組織を立ち上げ、加速器・実験装置、施設 (土木・建築・設備)、研究所組織などの詳細設計を行い、次いで国際合意に基づいて国際研究所を設立し、建設・運転・運営を行う。現在は予備準備期間にあるが、続く本準備に 4 年、建設に 9 年を要し、実験期間は 20 年以上に及ぶ。将来の衝突エネルギー増強を含めると実施期間が四半世紀を超える大型の世界プロジェクトである。

② 目的と実施内容

ILC 計画は、衝突エネルギー250~500GeV を網羅する電子・陽電子リニアコライダーを建設し、ヒッグス粒子、トップクォークの精密測定、新粒子探索により、自然の統一的理解と宇宙進化の解明に向け新たな道を切り拓くための国際エネルギーフロンティア加速器計画である。将来的には 1000GeV 領域への拡張の可能性も視野に入れる。構造を持たない素粒子 (電子・陽電子) 同士の衝突による背景事象が圧倒的に少ないクリーンな環境、そして偏極ビームという特長を最大活用し、到達エネルギー内にある全ての新粒子、新現象を隈なく探索発見する。全長約 30km のトンネル内に超伝導加速空洞を用いた線形加速器を配置して、入射加速器系によりナノビーム技術を駆使して生成した電子と陽電子の高品質ビームを逆方向に加速し、ビーム収束系を通してナノメータサイズに絞り中央部で衝突させる。地下実験ホール内に衝突点を取り囲むように設置した最先端測定器で素粒子反応を記録する。今後国際的な準備組織を立ち上げ、詳細設計を行い、次いで国際合意に基づいて国際研究所を設立し、ILC 加速器実験のための施設・設備の全体を国際的な合意と参加に基づいて日本に建設し、国際共同実験を行う。

③ 学術的な意義

最高エネルギーの電子・陽電子衝突により新粒子・新現象を探究する。背景事象が少ない電子・陽電子衝突実験の特長を活かした高精度の測定を行い、新粒子・新現象の背後にある物理の基本法則を解明する。従来のリング型コライダーより高いエネルギーが可能な「リニア」コライダーは、長く将来にわたり最先端の研究基盤となる新しい加速器技術である。

LHC で発見されたヒッグス粒子は、素粒子の質量を生み出す、全く新しい種類の粒子である。素粒子の標準理論を超える様々な理論が提唱されているが、それらは異なる真空の構造に立脚しており、性質の異なる「ヒッグス粒子」を予言する。ILC では、ヒッグス粒子と種々の他の粒子との結合定数、ヒッグスポテンシャル等を決定し、新しい物理の方向性を定める。

トップクォークは標準理論で最も重い素粒子で、その精密測定は、ヒッグス場を真空に充満させた物理解明の鍵となる。一方、ILC によるトップクォーク質量の精密測定は、標準理論の真空の安定性問題に決着をつけると期待されている。またクォーク対やゲージボソン生成を高精度で測定し、量子的高次効果を通して、LHC を越える高いエネルギースケールの現象を探索する。

ILC は、LHC での発見が難しい強い相互作用をもたない新粒子の発見能力が高い。また、エネルギー欠損の測定はダークマターの候補である弱い相互作用しかもたない重い粒子 (WIMP) を探る最も有効な手法である。

このように ILC は、真空の構造、力の大統一、自然界の新しい対称性を探求して、宇宙の進化を解明する。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

電子・陽電子リニアコライダー (LC) の卓越した能力、エネルギーフロンティア加速器としての LHC との相補性の共通認識の基に、LC 加速器・測定器に必要な技術開発が 1980 年代から世界規模で展開された。2005 年、日米欧の研究開発が統合され超伝導加速器技術に基づく ILC の設計・開発が GDE の下で進み 2012 年末の TDR 完成に至った。2013 年には新体制 LCC が発足し日本候補地を想定した設計・検討が進んでいる。欧州の XFEL 計画での超伝導加速装置建設成功は ILC 加速技術の技術実証と位置付けられる。日本の高エネルギー物理学研究者会議 (JAHEP、正会員約 600 名) は、2012 年 10 月、国際合意と参加に基づ

く ILC の国内建設を提案した。翌年 9 月末の日本学術会議による「国際リニアコライダー計画に関する所見」に続き 2014 年 5 月より国内誘致の可否判断に向け文科省有識者会議による検討が続いている。ヒッグス粒子の詳細研究の重要性が国際的に広く認識され、CERN 理事会の下で策定された欧州戦略、米国 HEPAP で採択された P5 レポートには、日本がホストする ILC 計画に対し強い期待と参加の意思が示されている。

⑤ 実施機関と実施体制

ILC 加速器の建設とプロジェクト運営は参加政府間の合意に基づく国際研究組織（仮称 ILC 研究所）が行うと想定される。それ以前の準備段階では、KEK、CERN、DESY、Fermilab 等の世界の主要加速器研究所が連携して立ち上げる国際準備組織（仮称 ILC Pre-lab）が実施母体となる。現在は、LCC の ILC 部門が加速器の詳細設計、建設計画の策定、ビーム加速試験、更なる性能向上とコスト削減を目指した技術開発等の本部組織の役割を担っている。日本での建設を想定した詳細設計及び建設計画策定においては、KEK が LCC との連携を図りつつ中心的な役割を果たしている。また LCC の活動は、アジア・欧州・北米の 3 極から選ばれた各 5 名に議長を加えた 16 名で構成されるリニアコライダーボード（LCB）により監督されている。

測定器の開発・設計と物理研究は、国内外の研究所・大学が協力し、約 300 機関から 1000 人を超える研究者が参加して開発・研究を進めている。国内では東北大・東大・名古屋大・信州大・京大・神戸大・広島大・九大・佐賀大等、約 50 機関が設計・開発段階から参加している。

高エネルギー委員会（JAHEP を母体として選出されたコミュニティの代表）は ILC 計画を推進するための司令塔として 2012 年に LC 戦略会議を立ち上げた。全国の大学の研究者が参加して日本全体での推進体制が構築されている。また、KEK には ILC 推進準備室が設置され、LCC、国内外の研究機関と連携し、国際的コンセンサスの形成、国際協力体制の構築、国際研究組織に関する検討、アウトリーチ活動等において中心的役割を果たしている。

⑥ 所要経費

TDR 記載の加速器建設経費は、2012 年 1 月の 1 ドルを 1 ILCU と定義して、OECD と欧州連合統計局が各国物価を調査し算出した購買力平価（PPP）に基づいて算出されており、その算出結果は文科省有識者会議の TDR 検証作業部会で検討されている。ILCU 単位の評価額を 1 ドル=100 円、1Euro=115 円として換算した経費は、加速器本体建設費として土木建築工事費 1,600 億円、加速器本体（超伝導加速空洞、設備等）6,709 億円を加えた 8,309 億円で、これに含まれない必要労働力は 22,892 千人時である。これらは政府間合意に基づき国際的に分担されることが想定されている。ただし、ここには建設開始までの準備段階の経費、土地取得経費、研究所周辺インフラ整備費等は含まれない。測定器関係経費（2 台の建設を想定）は測定器本体 766 億円、労働力 3,651 千人時であり、実験参加各国で広く分担されることが想定されている。また、これら建設経費見積もりには 25% の不定性を想定している。研究所運営費についても国際分担が想定されており、光熱水費、維持保守費に 390 億円／年、労働力 850 人／年と見積もられている。

⑦ 年次計画

(a) 予備準備期間、(b) 本準備期間、(c) 本建設期間の 3 段階を経て、2020 年代後半から 2030 年代初頭の稼働開始を目指す。現状は(a)に相当し、LCC が活動の中核として、文科省有識者会議の提言で示された課題への取り組み、加速器及び測定器の詳細設計、建設計画の策定、ビーム加速試験、更なる性能向上とコスト削減を目指した技術開発等を推進しているが、候補地の地形に合わせた施設の詳細設計、環境アセスメント、輸送計画の策定等、日本での建設を前提とした準備作業を引き続き進めるとともに、加速器建設とプロジェクト運営の母体となる国際組織（仮称 ILC 研究所）の制度設計と国際準備組織からの移行計画策定等を行う。これらを 2017 年あるいは 2018 年までに完了させる。続く(b)は、ILC 準備のための相当額の予算措置が行われることを前提とする 4 年間の準備期間で、KEK、CERN、DESY、Fermilab 等の世界の主要加速器研究所が連携して研究機関間の覚書に基づき ILC Pre-lab（仮称）を立ち上げ、加速器の工学設計、建設に向けた最終的な技術開発、調達及び量産体制整備等の準備、建設合意に向けた政府間交渉の補佐及び ILC プロジェクト承認への活動に責任を持つ。政府間合意が得られ ILC 計画が正式承認された時点で(c)の本建設期間に入り、ILC 研究所（仮称）を発足させプロジェクトを開始する。施設及び装置の建設を行う本建設期間には 9 年が必要。本格的な衝突実験を開始できるのは 2020 年代後半から 2030 年代初頭になる。第 1 期の約 10 年間は重心系エネルギーを 250 GeV から 500 GeV までの間で変化させ、ヒッグス粒子、トップクォーク等の精密測定、ならびに新粒子・新現象の探索を行う。その後は、それまでの研究結果を踏まえてアップグレード計画を進める。

⑧ 社会的価値

国内マスメディア（ネットニュース）への掲載数は 2013 年から現在までで 900 件にのぼり、NHK のクローズアップ現代、Science View（国際放送）、TV シンポジウムでも特集された。KEK、大学等により一般向講演会を年 10 回以上開催し、「ILC 通信」を 2006 年から配信している。2015 年からは子供向けケーブル TV 番組「ILC 科学少年団」を全国 378 局で放送中である。

2009 年、産学連携の中心となる「先端加速器科学技術推進協議会」が発足し、民間企業と研究機関の研究者・技術者が会合を重ねている。ILC の超伝導加速技術やナノビーム技術は、将来の大強度中性子源や次世代放射光施設の基盤技術であり、先端測定器技術と共に物性研究、医療応用を始め多様な分野に貢献する。世界の研究者やその家族が集う ILC を中核とした国際都市を実現し、次世代リーダーや加速器産業イノベーションの世界的な発信地、今後の国際科学イノベーション拠点を形成する。このように、ILC 国内誘致は学術コミュニティ内の国際貢献に留まらず、広く社会的、産業的な波及効果をもたらす。

⑨ 本計画に関する連絡先

岡田 安弘（大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構）

大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験

① 計画の概要

ハイパーカミオカンデ計画は、スーパーカミオカンデの約 10 倍（有効質量約 19 万トン）の水槽に超高感度光センサーを約 5 万本備えた、超大型地下水チェレンコフ実験装置を神岡町に 2 基建設する、核子崩壊・ニュートリノ実験計画である。1 基目の検出器の早期建設・運転開始により CP 対称性研究の早期実現を目指し、また段階的な 2 基目の建設により総有効質量 38 万トンを実現し、素粒子の大統一理論に迫る陽子崩壊の探索やニュートリノ天文学の展開を行う。大強度陽子加速器 J-PARC では加速器・ビームラインの大強度化を行い、安定して長期に 1.3MW 程度の強度で運転する。本計画は、ブラジル、カナダ、フランス、イタリア、日本、韓国、ポーランド、ロシア、スペイン、スイス、イギリス、アメリカの 12 ヶ国による共同事業計画であり、東京大学宇宙線研究所と高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所を実施中心機関とする。ハイパーカミオカンデの第一期建設経費は約 675 億円と見積もられており、日本はそのうちの約 551 億円を負担することを計画している。それとは別に J-PARC の改良と前置検出器建設費用に約 72 億円が必要であり、日本はそのうち約 42 億円を分担することを予定している。これまで推進体制構築や準備研究を進めてきており、検出器設計と国際役割分担、建設スケジュールがほぼ固まり、概算要求の検討をしている。2018 年 4 月からの建設開始を目指している。運転開始は 2026 年 4 月を予定している。

② 目的と実施内容

本研究計画は、スーパーカミオカンデを検出器質量と光感度の双方で凌駕する超大型水チェレンコフ検出器ハイパーカミオカンデを建設し、J-PARC からの大強度・高品質ニュートリノビームを用い、ニュートリノにおける CP 対称性（粒子・反粒子対称性）の破れを探索する。さらに、ハイパーカミオカンデを活用し、素粒子の大統一理論に迫る陽子崩壊の発見を目指す。また、ニュートリノ反応の研究、大気ニュートリノ観測、宇宙ニュートリノ観測、ニュートリノ天文学を総合的に展開する。素粒子物理学の新たな展開と、原子核物理学、宇宙物理学、天文学に新たな知見をもたらすことを目指す。ハイパーカミオカンデは岐阜県飛騨市神岡町の地下に大空洞を掘削して約 5 万本の光センサーを内部に設置した水槽を 2 基建設し、超純水を満たすことにより、ニュートリノ反応や核子崩壊から生じる荷電粒子のチェレンコフ光イメージを検出する。第一期建設でスーパーカミオカンデの約 10 倍（有効質量 19 万トン）の検出器 1 基の早期建設・運転開始を行い、CP 対称性研究の早期実現を目指す。第一期建設の予算措置などを鑑みて第二期建設の設計を決定し、最終的に総有効質量 38 万トンを実現する。J-PARC では加速器・ビームラインの大強度化を行い、安定して長期に 1.3MW 程度の強度で運転する。

③ 学術的な意義

なぜニュートリノ研究？

- **その性質は標準理論を超える物理の証拠**
 - 極端に軽い質量、大きな世代間混合
- **振動全容の解明へ（世界共通の認識）、ニュートリノ振動を発見した日本が世界を主導できる分野**
 - CP 非保存 δ_{CP} → 自然界の粒子と反粒子のアンバランスの理解の鍵
 - 三世代質量の順番の決定
- **ニュートリノは天体を見るブローブ**
 - 光では見えない太陽内部、超新星爆発内部等
- **大統一理論の検証**
 - 核子崩壊探索 + ニュートリノ研究



図 2、科学的動機

を発見してもおかしくないところまで来たことを示す。ハイパーカミオカンデの実現により、さらなる長寿命領域が探索可能となり、代表的な崩壊モードである陽子から陽電子と中性パイ中間子への崩壊モードに関して 10 の 35 乗年以上の感度に至る。この探索により「素粒子と力の大統一」の証拠の発見と素粒子理論の新たなパラダイムの確立を目指す。超新星爆発に際して

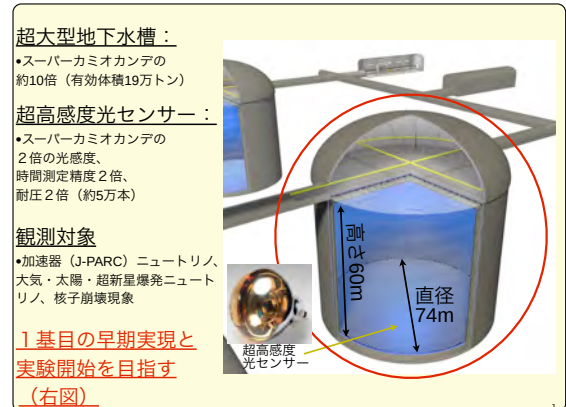


図 1、計画の概要

は、例えば我々の銀河中心での爆発においては約 10 万個ものニュートリノ事象の観測が期待される。これにより光では捉えることができない中心核爆発の時々刻々の変化を捉えることができ、中性子星／ブラックホール誕生の瞬間を捉えることができる。また、超新星背景ニュートリノ（宇宙初めからの超新星爆発ニュートリノ）が年間 10 事象程度観測されることが期待され、多くの超新星爆発事象を用いた爆発機構の解明や、重元素合成の歴史の理解を目指す。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

現在日本と米国で CP 対称性の破れの測定実験の実現可能性が追求されている。日本では、スーパーカミオカンデを凌駕するハイパーカミオカンデを建設し、J-PARC ニュートリノビームの増強とあわせて、ニュートリノ研究の確実な展開を目指している。我が国は過去 30 年に渡り水チェレンコフ検出器を用いて世界のニュートリノ研究を主導してきており、また J-PARC 加速器施設を保有するため、本研究は国際協力の中で日本が主導すべき必然性がある。一方米国では日本の実験の 5 倍程度の基線長とニュートリノエネルギー、検出器質量が 1/10 程度の液体アルゴン検出器を用いたニュートリノ実験を計画している。ニュートリノ研究の発展には両方のアプローチが必要で、相互に情報を共有し協力して研究計画を進めている反面、厳しい発見競争に勝つためにはハイパーカミオカンデの一刻も早い建設開始が必要となっている。また代表的な陽子崩壊モードである陽子から陽電子と中性パイ中間子への崩壊モードに関しては、その大検出器質量のためにハイパーカミオカンデのみが 10 の 35 乗年以上の感度に至る。

⑤ 実施機関と実施体制

東京大学宇宙線研究所が中心となりハイパーカミオカンデの建設と運転を推進する。東京大学はスーパーカミオカンデの建設と運転の実績を持ち、実験装置の各要素の開発・運転技術を持つ研究者を擁しており、神岡宇宙素粒子研究施設の総力を動員して実施中心機関としての責任を果たす。J-PARC 加速器の大強度運転、ニュートリノビーム生成、前置ニュートリノ測定器の建設と運転は、もう一つの実施中心機関である高エネルギー加速器研究機構が中心となり推進する。両機関はハイパーカミオカンデに関する協力の協定を締結し、常設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ている。これに加え、次の国内の研究機関が本研究計画に参加する。東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、東京大学、京都大学、東北大学、名古屋大学、神戸大学、大阪市立大学、東京工業大学、宮城教育大学、岡山大学であり、要素開発・建設・運転に参加する。また海外（ブラジル、カナダ、フランス、イタリア、韓国、ポーランド、ロシア、スペイン、スイス、イギリス、米国）からの参加も予定されており、光検出システムの半分や前置検出器を主に分担する。

⑥ 所要経費

総経費は約 1547 億円、そのうち日本分担分は約 1393 億円と見積もられている。ハイパーカミオカンデの建設経費は約 675 億円と見積もられており、日本はそのうちの約 551 億円を 2018 年から 2025 年度の 8 年間に負担することを計画している。その内訳として、(1) 地下空洞掘削（約 284 億円）、(2) 水槽ライナーと構造体（約 123 億円）、(3) 内側水槽の光検出システムの半分（約 102 億円）、および(4) 純水製造装置（約 32 億円）となる。またハイパーカミオカンデ装置の運転と大学共同利用体制整備などに 20 年間で約 400 億円（2026 年から 2045 年度）必要となる。J-PARC の 750kW から 1.3MW への改良に約 32 億円、その運転経費として 10 年間で約 400 億円（2026 年から 2035 年度）が必要となる。ただしこの運転経費は、高エネルギー加速器研究機構分（後段加速器）のみであり、日本原子力機構分の運転経費（前段加速器）は計上していない。前置検出器の建設経費は約 40 億円と見積もられており、日本はそのうちの約 10 億円を分担することを計画している。

⑦ 年次計画

- 2018 年 4 月 建設地地質調査開始
アクセストンネル掘削開始
- 2020 年 4 月 ハイパーカミオカンデ地下空洞掘削開始
J-PARC の 1.3MW への改良開始
前置検出器建設開始
- 2023 年 4 月 水槽建設開始
- 2024 年 10 月 光検出システム取り付け開始
- 2025 年 10 月 純水供給開始
- 2026 年 4 月 ハイパーカミオカンデ運転開始（2045 年度まで）
J-PARC1.3MW 運転開始（2035 年度まで）

⑧ 社会的価値

日本におけるニュートリノ研究は、2002 年（小柴昌俊東京大学特別栄誉教授）と 2015 年（本研究計画提案者梶田）のノーベル物理学賞受賞にも象徴されるように、超新星爆発ニュートリノ観測、ニュートリノ質量の発見、太陽ニュートリノ問題の解決、地球反ニュートリノの発見、3 世代間ニュートリノ混合の確立、と世界第一級の成果をあげてきており、国民による認知度は高い。本研究は未だ謎につつまれた素粒子の大統一理論の解明や、宇宙になぜ反物質がないのかという謎に迫ることを目的にしており、人類の知的好奇心に訴える問題に挑戦する。世界最大のニュートリノ検出器や大強度加速器の開発には、世界最先端の技術を必要とする。高感度光センサーや大規模地下空洞の開発・建設等、経済・産業界への波及も期待される。

⑨ 本計画に関する連絡先

塩澤 真人（東京大学・宇宙線研究所）

広帯域X線高感度撮像分光衛星 FORCE

① 計画の概要

FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) は、宇宙のあらゆる階層において未だ見つかっていない「ミッシングブラックホール」を探索することを科学目的とした小型衛星計画である。ブラックホールからの非熱的X線放射を高感度で捉えるために、1-80 keV という広帯域のX線を 10 秒角にせまる角度分解能で撮像分光する。高角度分解能を有し広帯域のX線を集光するスーパーミラーと軟X線から硬X線を 1 台でカバーする広帯域X線撮像検出器を搭載し、特に 10keV 以上の硬X線においては、既存のX線天文衛星より 5-10 倍よい角度分解能と 1 桁よい感度を達成する。ブラックホールの探索はX線観測が最も得意とするものであり、未知のブラックホールを手掛りに現在の宇宙を形作る天体の形成史を紐解く。天体形成史の解明は他波長での観測計画でも掲げられている天文学の究極の目的の一つであり、ブラックホールをプローブとする本計画は他計画と相補的な関係にある。衛星はイプシロンロケットによる打ち上げを計画しており、2020 年代の中頃での実現を目指している。FORCE はこの年代における世界の公共X線天文台の役割を果たし、マルチメッセンジャー天文学の一翼を担う。開発主体は先に打ち上げられた日本のX線天文衛星「ひとみ」の開発に携わった大学・研究機関からなり、スーパーミラーの開発については米国の NASA/GSFC との国際協力を進める。飛翔体を用いてX線・ガンマ線で天体観測をおこなう研究者のコミュニティにおいては、日本が主体的に進める最優先課題候補として位置付けられている。米国・欧州ではむこう 10 年間で、このような広帯域X線撮像衛星が実現する見込みはたっていない。

② 目的と実施内容

FORCE の科学目的は、宇宙のあらゆる階層において未だ見つかっていない「ミッシングブラックホール」を探索することである。ここでいうミッシングブラックホールは3つのカテゴリに分けられる。(1)塵やガスに深く埋もれて銀河と共に成長する「銀河中心巨大ブラックホール」(太陽質量の 1 万倍以上)、(2)その成長前の種と考えられる「中間質量ブラックホール」(太陽質量の 100 倍から 1 万倍の間)、(3)そして大きな星の残骸で我々の近くの星間空間に多数存在するはずの「単独の銀河系内恒星質量ブラックホール」(太陽質量の 100 倍以下)である。ブラックホールからの信号である非熱的X線放射は、軟X線帯域では吸収物質や熱的放射に隠されてしまう場合があるが、硬X線帯域ではそれらの影響を受けずに捉えることができる。一方で、時間変動するブラックホールのスペクトルにおいて非熱的X線放射を熱的放射から分離し、その放射を解釈することでミッシングブラックホールを同定するには、硬X線のみではなく軟X線も含めた広帯域X線撮像分光が本質的に重要である。これらミッシングブラックホールからの非熱的X線放射を高感度で捉えるために、FORCE では 1-80 keV という広帯域のX線を 10 秒角にせまる角度分解能で撮像分光する。観測機器は、高角度分解能を有し広帯域のX線を集光するスーパーミラーと軟X線から硬X線を 1 台でカバーする広帯域X線撮像検出器から構成され、これを複数ペア搭載する。これにより、特に 10keV 以上の硬X線においては、既存のX線天文衛星より 5-10 倍よい角度分解能と 1 桁よい感度を達成する。JAXA のイプシロンロケットでの打ち上げ可能な小型科学衛星として計画しており、2020 年代中頃での実現を目指している。運用は 3 年以上を予定している。

③ 学術的な意義

FORCE が探索するミッシングブラックホールの存在が明らかになれば、それを手掛りに現在の宇宙を形作る天体の形成史を紐解くことができる。銀河中心ブラックホール(SMBH)の質量は、その母銀河の質量と強い比例関係があり、両者は共進化してきたことがわかっている。つまり、SMBH の進化を探ることによって銀河の進化も探ることができ、その逆も真である。SMBH の進化は観測技術の制約から、軟X線で観測が可能な吸収の少ない種族を中心に議論されてきたが、近年、「すざく」等の観測から吸収の大きく「埋もれた種族」が大量に存在する示唆が得られてきた。このミッシングであった埋もれた種族を含めて SMBH の進化の全容が初めてわかる。この SMBH の種とされる中間質量ブラックホールの存在も未確立である。そして、最初の星が誕生し現在に至るまでに、銀河系内で大量に作られたはずの単独の恒星質量BH も未だミッシングである。本計画が様々な階層のミッシングBHを発見することで、X線でしか辿ることのできない天体の形成史が明らかになる。天体形成史の解明は、可視光や赤外などの他波長の大型計画でも主要テーマとして掲げられている。波長により見えるものが異なり、BH をプローブとする我々の手段と他計画は相補的である。さらに 2016 年には、BH の合体による重力波の検出が報告された。電磁波だけでなく宇宙線・ニュートリノ・重力波も含めた全てのツールの緊密な連携により、BH の、そして、宇宙の姿を明らかにするマルチメッセンジャー天文学の時代に入った。FORCE が稼働する 2020 年代中頃は、2020 年打ち上げを目指して検討が進んでいる日本の「ひとみ」に続くX線天文衛星代替機と 2028 年打ち上げ予定の欧州の Athena 衛星の端境期にあたる。よって、FORCE がこの年代における世界の公共X線天文台の役割を果たし、マルチメッセンジャー天文学の一翼を担う。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

本計画の最大の特徴は 1-80 keV の広帯域X線を 10 秒角にせまる高空間分解能で撮像分光することである。10keV 以上の硬X線の撮像分光は、2012 年 6 月に打ち上げられた米国の NuSTAR 衛星が初めて実現し、様々な成果を挙げている。2016 年 2 月打ち上げの日本のX線天文衛星「ひとみ」は、これに加えて軟X線にも感度を広げ、広帯域X線撮像分光でこの流れを加速しようとしていた。ただし、両衛星とも 1 分角程度の角度分解能に過ぎず、感度の観点から比較的明るい近傍の天体に観測が制

限される。今のところ打ち上げまで承認されているX線天文台は、2028年打ち上げ予定の欧州のAthena衛星のみである。Athena衛星はカロリメーターを用いた超精密X線分光に特徴があり、その望遠鏡は軟X線での広視野・大有効面積に狙いを絞ったので、硬X線を含む広帯域の感度は持たない。本計画では逆に広帯域のX線撮像分光に特化し、高感度化させる。すなわちFORCEは「ひとみ」から続く流れを継承し、さらに発展させる位置付けにある。むこう10年以上、日本がこの方面で世界をリードすることになる。

⑤ 実施機関と実施体制

現在FORCEチームでは、科学目標およびそれを実現する観測装置の開発や構成の検討を行うと共に、姿勢系など特にミッション成功の鍵を握る技術の検討を集中的に行い、衛星デザインを具体化しているところである。現在のチーム構成を補足説明資料の表1に示す。まずコアとなる「事務局」を定義し、課題を抽出してこれを重点的に議論し、計画の具体化を迅速に推進している。観測装置の2つの要素のうち、米国が主導する高精度スーパーミラーについては、国内での開発協力体制として愛媛大学・名古屋大学が積極的に参加しており、検出器開発については京都大学・東京大学、そしてISAS/JAXAが中心となる。計画のコアとなるサイエンス検討は京都大学がリードしている。ミッション全体は、それらに加えて宮崎大学・大阪大学・広島大学・東北学院大学およびISAS/JAXAとNASA/GSFCの機関で担当している。その他、全所属メンバーは、それぞれの専門を生かしミッション実現検討を行い、具体的な作業をおこなう。本計画は、開発主体は日本のX線天文衛星「ひとみ」の開発に携わった大学・研究機関が一体となり、極めて高度なミッションを斬新な工学技術を駆使して実現するものである。本計画の挑戦的な工学的課題に対する解を速やかに得るために、ISAS/JAXAの工学の研究者との共同検討体制をとる。実際、本計画には学術的に意義の高い工学的課題が多く含まれる。また、「ひとみ」で得た経験を生かし、本計画に要求される極めて高い精度の衛星指向・姿勢決定を実現するため、理工一体となった検討体制を構築する。

⑥ 所要経費

現時点で、総額135億円を見込んでいる。そのうち打ち上げ費用が50億である。まず、開発は、衛星全体のシステム設計、およびバス系を担当するメーカ（システムメーカ）と、ミッション系を担当するメーカに集約する。高感度な広帯域X線観測の実現には、10mに達する長い焦点距離が必要である。これを小型の衛星で実現するために、進展式光学ベンチ（EOB）を含む先進的な宇宙機構造が欠かせない。EOBは鍵を握る技術の一つであり、「ひとみ」衛星にも搭載されている。また、長大な衛星で一つの望遠鏡を構成し、10秒角を上回る高精度な姿勢決定を実現するには、EOBも取り込んだ、非常に注意深い衛星バス設計が必要である。このためEOBを含む衛星バスの開発・試験に55億円を見積もる。観測機器については、スーパーミラーはNASA/GSFCが開発経費を負担する。広帯域X線検出器は日本側で開発し、ここには15億円を見込んでいる。その他の運用などの諸々の経費は、これまでの実績ベースで15億円とした。解析ソフトウェアの整備・データ配布などをおこなうデータセンターについては、海外協力を想定している。

⑦ 年次計画

イプシロンロケットで打ち上げる公募型小型計画に、2020年頃に提案することを目標に作成している。提案が採択されれば、概念設計とISAS/JAXAでの準備審査を経て、1年後に予備設計段階に入る。さらにJAXAプロジェクト移行審査を経て、2年後から基本設計、3年後からフライトモデル製作・試験、4年後から衛星組み立て・試験を始め、5年後（2020年提案ならば2025年度末）が打ち上げとなる。稼働期間は打ち上げ後3年以上を予定している。2028年打ち上げ予定のAthena衛星の十分前に本計画を実現させることで、Athena衛星観測計画に十分なフィードバックをかけると同時に、その打ち上げ前後にくるであろうpost-Athena時代の議論をリードする戦略である。また、日本のX線天文衛星「ひとみ」が持っていた観測能力の二大特徴のうち、広帯域X線撮像分光に特化し先鋭化させたものが本計画である。その観点から軟X線精密分光に特化予定の「ひとみ」に続くX線天文衛星代替機打ち上げ後の5-6年後というのは、その開発・運用・サイエンスの結果を直ちに反映させ最先端の科学を一気に推進する上で最適な時期であると考ええる。開発のマンパワーと将来の人材育成の重要なポイントであり、その観点からも、X線天文衛星代替機とAthena衛星の中間の時期というのは好ましい。

⑧ 社会的価値

X線天文学は日本の御家芸として新聞紙上で紹介されるほど、その立ち上げの時代から日本が発展に寄与し、成果をあげてきた。基礎科学において世界最先端の成果を出し続けることは、多くの国民に夢や希望を与え、我が国が先進国として人類の知的共有財産の創出に貢献しているという自信をもたらす。特に宇宙開発・宇宙物理学は、若者たちに大いに刺激を与えており、有為な人材を育み、勇気付ける上で、重要な役割を果たしていると自負している。本計画は我が国のX線天文学の系譜の先にあるものであり、世界との競争力を持ち、このような価値観を継続して提供する。また、本計画は国際協力の下で進めるものである。我が国が主導する国際共同プロジェクトとして推進し、最終的には国際宇宙天文台として運用することによって、国際社会に貢献し求められている責務を果たすものである。さらに、本計画で開発する広帯域X線カメラに使用する技術は、医療や工業へ応用も期待できる。教育的観点からみれば、大学院生や若手研究者には、衛星開発に携わり最先端技術に触れる実践的教育の機会を供給する場となっている。

⑨ 本計画に関する連絡先

森 浩二（宮崎大学工学部）

次期太陽観測衛星 SOLAR-C 計画

① 計画の概要

SOLAR-C 計画は、「ひのとり」「ようこう」「ひので」に続くわが国 4 番目の太陽観測衛星として、日本、米国、欧州の国際協力のもと、2020 年代半ばの実現を目指しており、太陽関連の研究分野における最高優先度の将来計画である。

SOLAR-C 計画では、太陽表面から太陽コロナおよび惑星間空間に繋がるプラズマダイナミクスを一つのシステムとして理解するとともに、宇宙に普遍的に現れるプラズマ素過程を解明することを基本目的とし、太陽活動が地球と人間社会に与える影響の理解と予測に貢献するミッションである。

太陽の磁気活動は、微細な構造の間で受け渡される磁気エネルギーを源泉として、高温の外層大気を形成し、太陽面の大規模爆発現象から惑星間空間を乱す擾乱を生み出すと考えられる。これらの成因を理解するため、基本となる磁気構造のスケールを解像し、それらの運動や相互作用を通して、磁気エネルギーの輸送過程や散逸過程を定量化することを目的としている。

搭載観測装置として、光球と彩層の撮像・偏光観測を行う口径 $\sim 1\text{m}$ の光学望遠鏡、彩層・遷移層・コロナの撮像分光観測を行う紫外線分光望遠鏡、そしてコロナの撮像観測を行う極端紫外線望遠鏡を搭載し、光球からコロナにわたって広視野(~ 300 秒角)・高解像度($0.1 - 0.3$ 秒角)の観測を行う。衛星は傾斜角をもつ準天頂軌道におかれ、ほとんどの期間において夜の無い連続観測を行う。また衛星で取得されたデータは、国内外の受信局に送信され、データセンターからユーザーに提供する予定である【補足説明資料 1 参照】。

② 目的と実施内容

SOLAR-C 計画は、太陽表面から太陽コロナおよび惑星間空間に繋がるプラズマダイナミクスを一つのシステムとして理解するとともに、宇宙に普遍的に現れるプラズマ物理現象の素過程を解明することを基本目的とし、太陽活動が地球と人間社会に与える影響の理解と予測にも貢献する。この視点に立ち計画では(1)彩層・コロナと太陽風の形成機構の究明、(2)太陽面爆発現象の発現機構の究明とその発生を予測するための知見の獲得、(3)地球気候変動に影響を与える太陽放射スペクトルの変動機構の解明の 3 つの課題に挑戦する。

科学目的を達成するには、(1)光球・彩層磁場を測定するための偏光分光観測、(2)光球からコロナにわたる太陽大気の基本構造を解像するための高解像・高時間分解能観測、(3)光球からコロナまでの温度範囲全域を同時にカバーした観測、(4)大気中のダイナミクスをとらえるための高分散分光観測が必要である。このため、a. 口径 $\sim 1\text{m}$ の回折限界光学望遠鏡を用いる光球・彩層の撮像・分光・偏光観測 (SUVIT、焦点面観測装置: 偏光分光装置 (SP)、偏光撮像装置 (FG))、b. 紫外線望遠鏡による彩層・コロナの撮像・分光観測 (EUVST)、c. 極端紫外望遠鏡によるコロナ撮像観測 (HCI) という望遠鏡観測システムを搭載し、各システムが波長域・観測手法を国際分担し、全体として必要な観測を行うアプローチを採用する。取得されたデータは拠点データセンターより世界の研究者や更に幅広いユーザーに、データ解析等に必要なデータ整約手段と共に提供する。

③ 学術的な意義

SOLAR-C 計画における科学課題として、(1)彩層・コロナと太陽風の形成機構の解明、(2)太陽面爆発現象の発現機構の究明と発生予測のための知見獲得、並びに(3)太陽放射スペクトルの変動機構の解明の 3 つを挙げている。

活動領域を主とした彩層のダイナミクスと光球 $\sim$ コロナのカップリングを捉えることにより、微細磁気構造の浮上や対流による光球上での磁気構造の上空へのエネルギー伝播、その散逸・加熱後の構造とダイナミクスとの因果関係が明確になる。

大規模な太陽面爆発現象の発生以前に進行しているエネルギー蓄積過程を理解し、磁気圧が優勢となる彩層域の磁場と速度場の観測により爆発現象を引き起こす磁気構造を同定する。この大規模爆発の影響が地球に到達すると、地球周辺の宇宙環境(宇宙天気)を乱すことになるため、現象発生を物理的に確度をもって予測することにより、この現象が社会インフラへ与える影響についても軽減することができることになろう。

太陽磁気活動が停滞すると地球が寒冷化するなど太陽活動が地球の長期環境変動と関係すること(宇宙気候)が示唆されている。微細磁気構造とその放射スペクトルを測定することにより、長期環境変動の物理機構の解明に繋げることができる。

これらの太陽微細磁場構造を起因とする太陽活動現象は宇宙に普遍的に見られる磁気プラズマのダイナミクスのいわば雛形であるので、太陽の先端的な観測を通して得た知見を天体物理学の広い分野へ応用することができる。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

長年にわたる「ひので」高解像度観測の成果は、今後の太陽研究が進むべき方向を提示している。2019 年完成予定の DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope; ハワイ) は 4m の大口径に補償光学技術を駆使して、近赤外線域で視野角 ~ 10 秒程度の超微細構造の観測を目論むが、SOLAR-C では解像度が保証された環境で、広視野($>270''$)高精度の偏光分光観測を常時行い、同時に地上からは観測できない遷移層・コロナの高解像度観測を行うことができる。Solar Probe+ (NASA) と Solar Orbiter (ESA) は 2020 年前後に太陽に接近して、「その場」観測と、接近した軌道から太陽観測を実施し、内部惑星間空間と太陽表面とのつながりを調査するが、取得データの時間分解能や観測時間に厳しい制約がある。太陽のグローバルな対流構造や内部流速場の測定を目的とした計画は日本(通称 SOLAR-D)や欧州(SOLARIS 等)で検討されているが、実現は 2030 年台になると予想される。

⑤ 実施機関と実施体制

国立天文台においては、平成25年度よりSOLAR-C準備室(A-プロジェクト)を立ち上げ、京大・飛騨天文台と共同して、SOLAR-C計画の開発検討に当たっている。日本側が主担当となるSUVIT望遠鏡とSPの開発には「ひので」の技術的人的財産を活用し、その実現を図る体制を整備している。また名古屋大学宇宙地球環境研究所にはSOLAR-Cのサイエンスセンターを設置する予定で、搭載機器開発と平行して、データ解析ソフト開発、理論シミュレーション研究を推進する。

SUVIT望遠鏡の焦点面観測装置である偏光分光観測装置(SP)は、最終的に国立天文台で組み上げ、性能確認を実施することになるので、「ひので」のノウハウを活用し、次世代の人材育成も考慮しつつ、拠点大学の研究者と開発しきる体制を構築していく。既に観測ロケット実験を通じて育ちつつある人材が、さらに新たな飛翔実験を経験しながら、SOLAR-Cの実施体制を強化してゆく。

また海外担当のミッション機器についても、日本側PI・POCを配して、JAXA内プロジェクトとのコミュニケーションを密にし、その設計開発から科学成果創出まで、相互に理解を深めて推進を図る予定である。

計画全体のプロジェクトマネージングについては、宇宙科学研究所を中核にしたチームとしての取り組みが必要となると考えている【補足説明資料2参照】。

⑥ 所要経費

戦略的中型衛星および搭載観測装置開発費用：276億円(予備費込み)

総合設計・プログラム管理 10億円

バスシステム 113億円

ミッション部(光学望遠鏡部+SP) 94億円

試験・射場作業 25億円

開発経費(地上施設等) 5億円

運用経費(観測期間：3年) 9億円

予備費(システム：5%、ミッション部：15%) 20億円

打上げ費用：60億円(H3打上、地球同期軌道)

総費用：336億円(JAXA負担分のみ)

国際協力貢献分

NASA*：50—(60—150)億円(MoO/SMEX予算規模を想定)

ESA+欧州各国**：50—80億円(MoO予算規模を想定)

*HCIはオプション。SUVIT焦点面装置(FG・SP)を一体化

**EUVST：観測機能を簡素化し、観測波長域/輝線を厳選

Cf.

SOLAR-Cの計画概念の一部やオプション部については小型衛星を用いて早期に実施する可能性についても検討に加えている。

⑦ 年次計画

平成20年度(2008年度)よりSOLAR-C計画ワーキンググループ活動を開始しており、これまでの検討をまとめて平成26年度戦略的中型宇宙科学ミッションにミッション提案を行ったが、採択されるに到らなかった。

以下は平成29年度にミッション提案を行い、計画が予定に沿って進行した場合のものである。プロジェクト準備審査(PRR)から軌道投入までの期間は約6.5年、6ヶ月程度のマージンを含めて約7年と考えている。

2017年：概念設計・ミッション提案(Pre Phase-A)

2018年：予備設計(Phase-A)

2019年：基本設計(Phase-B) [国際協力の参入]

2020-2021年：詳細設計(Phase-C)

2022-2024年：フライトモデル製作・試験(Phase-D)

2025年：打上げ、科学運用(Phase-E)

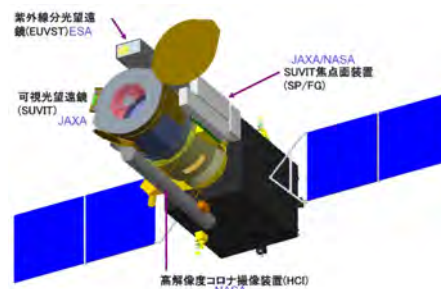
⑧ 社会的価値

太陽表面での爆発的磁気活動によって、既に社会インフラとなった気象・通信衛星や発電システム等が影響を受けるほか、太陽磁気活動が弱まった時期に地球が寒冷化したという事実があり、太陽の活動が実社会に与える影響は大きい。このため、これらの研究に大きく寄与するSOLAR-C計画は国民に理解されやすいものとなっていると考えられる。

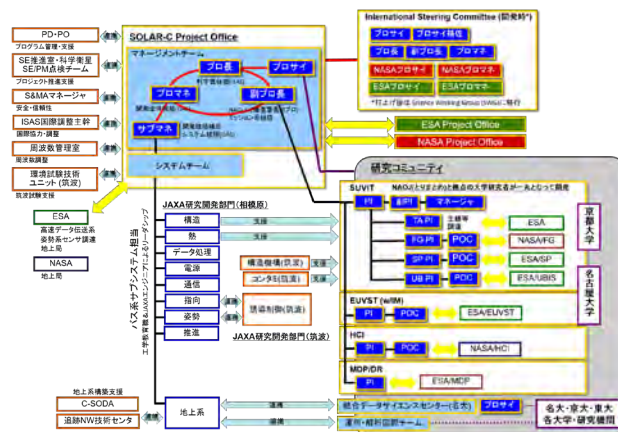
「ひので」の開発において獲得された解像度の高い宇宙望遠鏡を設計・製作・検証する技術や、衛星を指向方向に高精度に安定化する技術などについては、JAXAの設計標準等の基礎となり、科学ミッションのみならず我が国の実用衛星等の高度化にも大きく寄与した。SOLAR-Cでは、より挑戦的な技術開発が必要となることから、これらの実現を通して、技術の面でも我が国の宇宙開発への大きな貢献が見込まれる。

⑨ 本計画に関する連絡先

渡邊 鉄哉(自然科学研究機構国立天文台)



補足説明資料1：衛星外観図



補足説明資料2：組織および体制

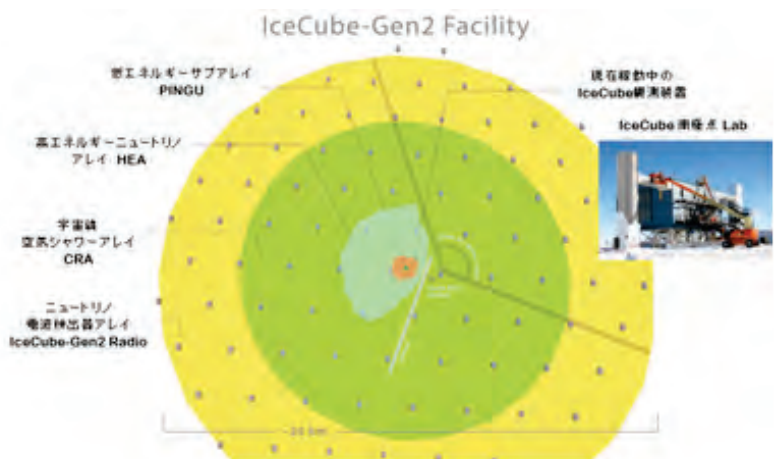
IceCube-Gen2 国際ニュートリノ天文台

① 計画の概要

高エネルギーニュートリノによる宇宙の研究は IceCube 実験により飛躍的に進展した。IceCube 日本グループによる PeV のエネルギーを持つ最高エネルギーニュートリノ検出を皮切りに、TeV-PeV 領域における宇宙ニュートリノの存在が明らかになり、その流量及び到来方向天球分布が描画されるまでに至った。この成果を加速度的に発展させ、ニュートリノ放射天体を同定し、宇宙物理学上最大の謎の一つである高エネルギー宇宙線の起源を明らかにするために、IceCube 実験を約 10 倍に拡張する IceCube-Gen2 観測所を建設する。TeV 以上の高エネルギー宇宙ニュートリノを年間 200 事象以上検出し、ニュートリノ放射点源の同定、ガンマ線バーストや AGN のフレアとの同時事象検出による宇宙線放射機構の研究、EeV (1000PeV) 領域のニュートリノ束探索による超高エネルギー宇宙線起源の研究を行う。また素粒子としてのニュートリノの特性を生かして、フレーバー比の解析による超長基線ニュートリノ振動の研究や、TeV-PeV 領域におけるニュートリノ・核子相互作用の研究、モノポールなど素粒子大統一理論由来の生成物の探索を進める。高エネルギーニュートリノ天文学を高統計データに基づいた観測的科学へと昇華させることにより、天文学研究に全く新しいインプットを提供し、高エネルギー極限宇宙の探査から非加速器素粒子物理まで多様な重要な科学を総合的に展開するのが本計画のアジェンダである。

② 目的と実施内容

南極点の米国アムンゼン・スコット基地に近接したエリアにニュートリノ観測装置を建設する。現在運用中の IceCube 観測装置に隣接したサイトが選定されている。IceCube-Gen2 観測所の装置は高エネルギーニュートリノアレイ (HEA)、GeV 領域に特化した低エネルギーサブアレイ (PINGU)、氷河表層に展開する宇宙線空気シャワーアレイ (CRA) の 3 要素から主として構成される。HEA がメイン検出器システムであり、日本グループも主として HEA の建設に関与する。HEA は 9600 個のチェレンコフ光検出器からなる南極点深氷河内の 3 次元検出器アレイであり、10 キロ立方のニュートリノ検出容量を持つ。実験データは実験サイト内にある IceCube 南極点ラボ施設内の高速電算機システムで圧縮された後、衛星回線を通じて北半球に伝送される。アメリカウイスコンシン大学にデータセンターが設置される。日本では千葉大学ハドロン宇宙国際研究センター内にサブデータセンターを設置し、このセンターを通じて共同研究者および観測パートナー研究者に解析データ・シミュレーションデータを提供する。



③ 学術的な意義

ニュートリノは電荷を持たず、かつ宇宙論的距離を他粒子と衝突せずに伝播するため、高エネルギー極限宇宙探査にとって理想的なメッセンジャーである。また高エネルギー宇宙ニュートリノはパイ・ケイ中間子の崩壊によってのみ生成されるため、ニュートリノ放射源は宇宙線核子・原子核の起源天体として確実に同定される。このため高エネルギーニュートリノ観測は、ニュートリノ事象の空間・時間・エネルギー・フレーバー情報を介して宇宙線加速の現場を捉え加速機構を研究する理想的手段である。現行 IceCube 実験により宇宙線起源天体由来のニュートリノが実際に存在することが確認され、その存在量から宇宙線起源天体クラスについての一定の洞察まで可能となった現在、ニュートリノ観測は天文学の新しい窓として確立した。IceCube-Gen2 観測所は、その窓を通じて高統計で高エネルギー極限宇宙の非熱的物理現象を解明し高エネルギー宇宙線起源を同定する確実な観測データを提供する。ニュートリノ観測は、可視光・X線・ガンマ線・重力波観測と連動して行い、それぞれの波長・メッセンジャー観測による天文学研究にとってユニークなプローベとなる。また IceCube-Gen2 は TeV 以上の高エネルギーニュートリノを高統計で測定する唯一の実験装置である。高エネルギーフロンティアにおけるニュートリノ特性、ニュートリノ・核子衝突の測定を通じて、素粒子物理分野・原子核物理分野における貴重な弱相互作用データを提供する。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

現在運用されている高エネルギーニュートリノ観測実験は、日米欧 12 ヶ国共同 IceCube 実験とヨーロッパによる共同実験 ANTARES である。IceCube 実験は高エネルギー宇宙ニュートリノを世界で始めて検出したギガトン容量を持つ世界最大のニュートリノ観測装置である。ANTARES は IceCube 実験の 10 分の 1 以下の大きさであり、現在までは宇宙ニュートリノ存在量の上限值に関する結果のみが得られている。ANTARES 実験の後継として KM3NET 計画がフランス・イタリアを中心に提案されており、コンセプト実証予算がついている。しかし KM3NET は提案通りに建設されたとしても IceCube 実験と同規模の観測感度を有するに過ぎない。IceCube-Gen2 は IceCube の一桁上の感度を持ってニュートリノ宇宙を描画し、次世代のニュートリノ天文台とし

てふさわしい性能を持つ。日本がホストしているスーパーカミオカンデと後継計画であるハイパーカミオカンデ計画の天文学観測は MeV 領域における太陽ニュートリノ・超新星ニュートリノであり、エネルギー域及び目的とするサイエンスともに大きく異なる。

⑤ 実施機関と実施体制

IceCube-Gen2 collaboration は、日本、アメリカ、カナダ、ドイツ、イギリス、スウェーデン、ベルギー、デンマーク、スイス、韓国、オーストラリア、ニュージーランドから約 50 の研究機関が参加する国際共同機関である。日本からは千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターと、東京大学地震研究所が参加する。千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターは現在運営中の IceCube 国際共同実験でも中核研究機関として、光検出器の開発・キャリブレーションと PeV 以上の超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索を主導してきた。最初の宇宙ニュートリノ信号同定は千葉大学グループによるものである。Collaboration 内で設置されている各種ワーキンググループの議長にも延べ 3 名が千葉大学グループから任命され、プロジェクトの成功に深く関わってきた。こうした実績を基に、千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターは日本における高エネルギーニュートリノ天文学分野の中核センターとして、千葉大学の「グローバルプロミネント研究基幹」の一翼を担い、千葉大学戦略的重点研究分野として優先的に強化されることになった。グローバルプロミネント研究基幹の概算要求は国立大学機能強化経費として平成 28 年度分から認められ、人員・研究スペースなど研究プロジェクト推進に不可欠なインフラの整備に充てられる。IceCube-Gen2 計画実施主体のニュートリノ天文学部門は、2016 年 4 月時点で承継教員 3 名(教授、准教授、助教)、研究員 4 名、広報職員 1 名を擁しており、国立大学機能強化促進に伴う措置により更なる増強を計画している。

⑥ 所要経費

IceCube-Gen2 は高エネルギーアレイ (HEA)、低エネルギーサブアレイ (PINGU)、地表空気シャワーアレイ (CRA) を主に構成される。日本グループは IceCube-Gen2 の要である HEA 検出器の建設を主導する。特に検出器の基幹検出器要素である光電子増倍管をすべて受け持つ。

総額 150 億円 (人件費、輸送費、埋設費を含めれば 約 200 億円)

日本分担 26 億円

内訳

8 インチ光電子増倍管 2 万本 20 億円

耐圧ガラス球 1 万個 3 億円

周辺部品(ゲル、回路) 1 万式 1 億円

輸送費・建設費 2 億円

運営費 年間 1 億円

⑦ 年次計画

現在アメリカ NSF(自然科学財団)のレビュープロセスが始まり、審査パネルの設置にむけた準備が進められている。アメリカ側では 2020 年にプロジェクト建設費の予算化を目指している。南極現地での検出器埋設は 2023 年から開始され 9 年間の期間を経て、2031 年に終了し完全観測に入る。

2017 検出器仕様決定

2018 検出器試作機によるテスト実験

2021 検出器量産開始

2023 南極における埋設開始

2024 埋設済み検出器による観測データ取得開始

2031 建設終了、フル観測開始

⑧ 社会的価値

高エネルギーニュートリノによる宇宙探査は宇宙観測の新しい窓であり、超新星爆発、ガンマ線バースト、ブラックホールに代表される活動的宇宙のダイナミクスを探るものである。その知見は人類の知的財産である。宇宙は静的で永遠のものであるという一般的なイメージに反するこれらの新しい知見は多くの人の好奇心をゆさぶるであろう。また南極氷河という厳しい環境下で使われる検出器の要求仕様は高く、様々な構成要素からなる複合モジュールは多くの応用技術のシーズとなる。実際に、耐圧性能を保ちながら紫外線を透過するという相反する要求に答えるための開発から新たな光検出器の開発の可能性につながる事例もでている。最先端技術は先端基礎科学プロジェクトの要求によって鍛え上げられ、実用化され、さらにその技術が次世代の科学プロジェクトに使われるという好循環を継続していくことは、技術大国日本の国益に直結する。

⑨ 本計画に関する連絡先

吉田 滋 (千葉大学大学院理学研究科)

南極望遠鏡計画

① 計画の概要

南極大陸の内陸部高原地帯に(1)口径 10m テラヘルツ望遠鏡（筑波大学中心）と(2)口径 2.5m 赤外線望遠鏡（東北大学中心）を設置してサブミリ波～テラヘルツ波～赤外線による南天の掃天観測を行い、可視光では見えない暗黒銀河の探査と銀河形成進化を明らかにする。

「ドームふじ」（標高 3800m）には当面、越冬できる基地の建設が困難となったので、ドームC（図1）にある仏伊のコンコルディア基地に国際協力で建設する。標高が 3233m（気圧換算 3700m）と少し低い、気温が -20°C ～ -80°C で大気中の水蒸気が極めて少なく、また大気の熱放射が極端に少ない。そのため地上で唯一最高の天文観測環境にあることには変わりはなく、テラヘルツ波の観測も可能である（図2）。南極では人工衛星搭載望遠鏡に比べて大型望遠鏡の設置が可能、経費が安価、最新の観測装置を搭載可能、装置の更新が容易、故障しても修理が可能などの長所がある。

耐寒仕様を施した高精度望遠鏡を建設し、大規模な高感度電波カメラと赤外線カメラを搭載して超広視野の観測を可能とする。観測は日本から遠隔操作で行うが、毎年2名が現地に滞在・越冬して望遠鏡の保守や運用を行う。

望遠鏡システムは日本側が担当し、資材の輸送や現地での建設環境および電力供給・居住環境等の提供は仏伊側が担当することになっている。観測時間は日本と仏伊で分配し、日本側時間は共同利用にも供される。

これによって可視光では見えない「暗黒銀河」からのダスト放射を観測し探査を行うとともにサブミリ波～赤外線のスペクトルから赤方偏移を決定し、距離（年代）の関数として銀河の誕生と進化を明らかにする。

（該当研究分野コミュニティに提案段階であるが）当該望遠鏡の耐寒技術と運用経験を元にさらに南極 30m 級テラヘルツ望遠鏡を新ドームふじ基地に建設する。これは日本が主導する国際南極天文台に発展する。

② 目的と実施内容

地上の究極的観測環境にある南極内陸部の高原地帯に(1)口径 10m テラヘルツ望遠鏡（筑波大学中心）と(2)口径 2.5m 赤外線望遠鏡（東北大学中心）を建設する。前者は主鏡に双曲面を採用（リッチー・クレッチアン）するとともに独自の光学系の設計を行い、従来の電波望遠鏡の 100 倍以上である 1 度四方の視野を実現する。これに超伝導検出器 MKID を用いた数 1000 素子の電波カメラを搭載し、サブミリ・テラヘルツ波において超広域掃天観測を可能とする。また後者にも 400 万画素×3 台の世界最大の赤外線カメラを搭載し超広域掃天観測を行う。

両望遠鏡ともに -80°C に耐えられる耐寒部材と可動部のケーブル耐寒被膜を用い、放射冷却による主鏡等の霜付着を防ぐため周囲空気温度よりも $+2\sim+5$ 度高くなるように主鏡等を温める。また雪上設置のためフランス側が作る特殊な圧雪地盤の上に建設し、テラヘルツ望遠鏡においては指向性補正のため高床式の基礎に高さ微調機構を付ける。赤外線望遠鏡は接地境界層が低い、ため高さ 10m 程度のタワーの上に望遠鏡を設置し、地上最高のシーイングを実現する。

重量物は観測船で、精密電子部品など軽量精密品は飛行機で輸送し、現地での建設にはフランス側が 130 トンクレーンを用意する。また望遠鏡そばには観測棟も設置する。

夏の建設時には 15～27 人が現地滞在し、完成後の冬季における運用には毎年 2 名が越冬し、望遠鏡の保守運用を行う。観測とデータ解析は日本国内から遠隔操作で行う。年間を通してサブミリ・テラヘルツ波の観測が可能であるが、夏は保守や装置の更新も行う。コンコルディア基地の居住環境は完備しており、人員の移動は豪州等から飛行機で行われる。

③ 学術的な意義

(1) 暗黒銀河の探査と銀河の形成進化の解明

赤方偏移 $z \sim 1$ までの銀河の 9 割は赤外線で見つけられ、可視光で見つけられているのは 1 割程度である。 $z > 1$ であっても赤外線（サブミリ波）で見つけられた銀河の方が圧倒的に多い。これはダストに覆われ可視光で暗くなっている銀河が high- z で圧倒的に多いことを示している。実際、サブミリ波銀河で可視光の対応物が全く見られないものがたくさんある。従って high- z 銀河の探

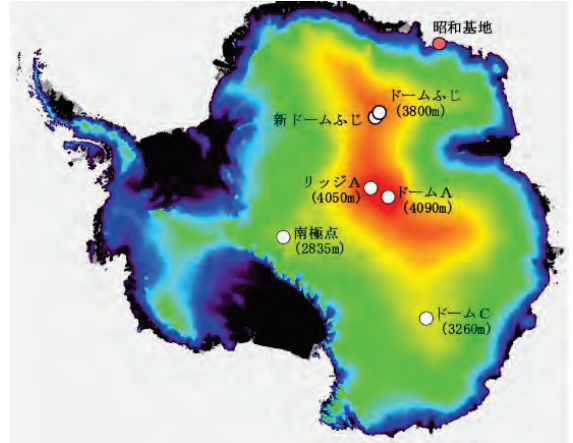


図1. 南極大陸の基地（色は標高を表す）

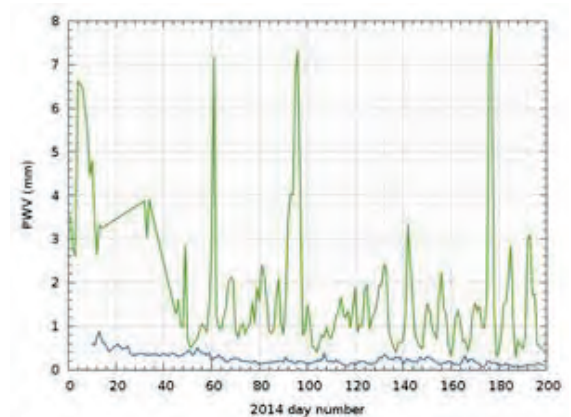


図2. リッジA(下)とチリ ALMA サイト(上)の水蒸気量の例 (Burton+2015; Credit C.Kulesa)

査にはダスト放射による赤外線が赤方偏移した電波の観測が必須であり、負のK補正により検出にも有利である。一方、high- z 銀河の線スペクトルの観測は容易ではないので赤方偏移 z の決定が困難であり、これが現在の大きな問題であるが、サブミリ〜テラヘルツ〜赤外線のスペクトル測定による測光距離の決定は非常に有効である。初代星誕生のあと重元素は急激に増加するので、現在天文学の大問題である銀河の形成時期と形成過程の解明に大きく貢献する。

(2) 星間化学、星形成、系外惑星、活動銀河核等への貢献

テラヘルツ波の観測は地上で唯一可能であり、サブミリ波も含めて年間を通して観測可能である。高励起分子輝線や原子輝線、AGNからの高温ダストの観測が可能であり、星間化学、星形成、AGNの識別等の研究にも極めて有用である。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

(1) 米国が南極点のアムンゼン・スコット基地に2007年から10mミリ波望遠鏡を設置して優れた観測成果を上げている。しかし、南極点の標高は2835mと低く、大気中の水蒸気が多いなどでテラヘルツ波〜赤外線の観測には向かない。

(2) 中国はドームA（標高4090m）に口径5mテラヘルツ望遠鏡と口径2.5m赤外線望遠鏡を建設する計画を進めている。しかし、内部事情によりまだ建設は始まっておらず、また夏隊だけの軍の基地なので、越冬できない。

(3) チリのALMAサイトに米国が口径25mサブミリ波望遠鏡（CCAT）計画を進めている。目的は我々の暗黒銀河の探査と類似しているが、大気条件は南極よりかなり悪いので、周波数の低いミリ波・サブミリ波で温度の低い銀河の観測をねらっている。一方、最近の観測から遠方銀河は高温の傾向があるのでその観測には南極でのサブミリ・テラヘルツ波観測の方が有利である。従って両者は相補的である。

⑤ 実施機関と実施体制

南極天文コンソーシアム（2005結成）が協力して望遠鏡を開発製作し、運用する。代表機関である筑波大学では、研究推進体制の強化のため「数理物質融合科学センター」を設置し、その中に「南極天文部門」を置き、人員体制・研究推進体制の充実をはかっている。仏伊との協力体制は築きつつあり、両国とも好意的、協力的、意欲的である。主たる実施担当機関は以下のとおりである。

○口径10m テラヘルツ望遠鏡

筑波大学（代表）、国立天文台、関西学院大学、北海道大学、東北大学、福島高専、新潟工科大学、金沢大学、JAXA宇宙研、埼玉大学、ほか南極天文コンソーシアム

○口径2.5m 赤外線望遠鏡

東北大学（代表）、筑波大学、京都大学、国立天文台、福島高専、新潟工科大学、金沢大学、ほか南極天文コンソーシアム

○フランス・イタリア

フランス国立極地研究所、イタリア国立南極プログラム

⑥ 所要経費

(1) 口径10m テラヘルツ望遠鏡

建設費 25.1億円、運営費 0.4億円（年間：国内）

(2) 口径2.5m 赤外線望遠鏡

建設費 6.8億円、運営費 0.2億円（年間：国内）

(3) 合計

建設費 31.9億円、運営費 0.6（年間：国内）（フランス・イタリア側の負担は含まず）

⑦ 年次計画

全建設期間＝2017～2023年度（7年）

最初の3年で国内に仮組し、次の2年で調整評価、6年目に南極に輸送し、7年目に現地で建設を行う。

⑧ 社会的価値

南極観測および天文観測はともに一般国民の関心が高く、知的探究心を刺激するものであり、天文や南極に関連するニュースは常に人々の耳目を集める。その両者を組み合わせた南極天文学の推進は極めて関心を持たれ、2007年以降10回以上の新聞記事となっている。またNHKの海外向け放送（ラジオジャパン）でもニュースとして放送されている。これまでに宇宙関係の講演会や社会的貢献のためのイベントを多く開催してきたが、常に多数の一般市民、小中学校の生徒の関心を集めてきた。

研究の主目的である暗黒銀河問題の解明は、宇宙の構造と歴史および人類の誕生の源である生命物質や星惑星系形成の解明に結びつき、我々人間や生命の起源に直結する根源的な問題であり人類にとっての意義は極めて大きい。また赤外線観測技術による生命生存の可能性のある太陽系外の惑星の研究は人類の存在理由を知る究極の課題として社会の関心を集めている。

望遠鏡を自ら独自開発することによって若手人材の育成をはかり、天文学分野のみならず一般企業や会社さらに学校教育における有用な人材の供給となる。

⑨ 本計画に関する連絡先

中井 直正（筑波大学数理物質系物理学域）

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画 HiZ-GUNDAM

① 計画の概要

科学衛星 HiZ-GUNDAM は、宇宙年齢が 7.7 億年よりも若い（赤方偏移が $z > 7$ の）初期宇宙において最も明るい光源であるガンマ線バースト (GRB) の観測を通して、初代星・ブラックホールの形成、宇宙再電離、重元素合成の歴史の解明など、初期宇宙観測のフロンティアを目指すミッションである。これまでに十分な観測が行われていない高赤方偏移 $z > 7$ で発生した GRB の候補を迅速に通報し、GRB を背景光とした効率の良い初期宇宙探査手法を大型望遠鏡に提供する。地上・宇宙の大型望遠鏡を用いて明るい高赤方偏移 GRB の分光追観測を実施することで、冒頭に示した宇宙形成史における未開拓分野の探査を実現する。

本計画は、高エネルギー宇宙物理連絡会と光学赤外線天文連絡会の両コミュニティにまたがる分野横断型の衛星計画であり、観測波長に捉われずに、初期宇宙探査や GRB などの突発天体観測に興味を持つ研究者で組織したグループが推進する。計画の実現時期は 2020 年代前半を想定しており、この時期に高赤方偏移探査を目的とした GRB 観測衛星は世界的に見て本計画が唯一である。現在の GRB 観測は NASA の Swift 衛星によって支えられているが、既に打ち上げから 11 年以上が経過しているため、その運用が停止すると GRB を利用した科学そのものが継続できなくなるため緊急性の高い課題である。

② 目的と実施内容

科学衛星 HiZ-GUNDAM は、初期宇宙において最も明るい光源であるガンマ線バースト (GRB) を発見し、発生時刻や発生方向、赤方偏移などの情報を迅速に通報することで、GRB を背景光とした効率の良い初期宇宙探査手法を大型望遠鏡に提供することを目的とする。大型望遠鏡で取得できる分光スペクトルは、暗い遠方銀河の観測と比較して圧倒的に高品質なデータとなるため、本質的に異なるレベルで初期宇宙の物理状態を議論できるようになる。具体的な科学目標として、

- (1) 宇宙再電離時期の同定と大規模構造形成の初期段階の探査
- (2) 高赤方偏移 GRB の発生率と初期宇宙の星・ブラックホール形成史の解明
- (3) 低金属環境と宇宙最初の重元素の探査

を掲げており、2020 年代の天文・宇宙物理学全体の最重要テーマである「宇宙の物質と空間の起源」について深く理解することを目的としている。

これらの科学目標を達成するために、科学衛星 HiZ-GUNDAM には 2 種類のミッション機器を搭載する。1 つめは、史上最高の感度で GRB を発見するための広視野 X 線撮像検出器で、2 つめは、4 色同時分光観測により高赤方偏移 GRB 候補天体を抽出する口径 30 cm の近赤外線望遠鏡である。GRB 発生から 30 分以内に測光赤方偏移の情報を含めたアラートを世界中に送信することで、GRB 残光の明るいうちに（約 1 時間後から）大型望遠鏡で分光観測ができるようになる。本提案はこれらのミッション機器を搭載した人工衛星の開発とイプシロンロケットによる打ち上げ、および衛星運用を実施するものである。

③ 学術的な意義

宇宙再電離がいつ始まり、どのような時間スケールで宇宙空間全体を電離してきたのかは、宇宙進化における最重要課題である。その起源が宇宙最初期の星からの紫外線放射に起因しているのであれば、大質量星の形成史と密接に関連しているはずである。また、その星の核融合で作られ出される重元素が、水素・ヘリウムばかりだった宇宙に新たな要素を付け加えたと考えられている。GRB は初期宇宙において最も明るい光源であり、その他の天体と比較して圧倒的に良質なデータを取得できる。科学衛星 HiZ-GUNDAM による迅速な GRB の観測を通じて、これらのシナリオについて初めての観測的検証が行えるようになる。

本計画では、ミッション期間中に 15~37 例の $z > 7$ の高赤方偏移 GRB を検出し、地上大型望遠鏡に分光観測の機会を提供できる。銀河間空間の中性水素の量を測定し、宇宙再電離の開始時期や大規模構造形成の初期段階および進化過程を探索できるようになる。さらに、高感度の広視野 X 線観測は、初代星からの GRB の発見という驚くべき成果に結びつく可能性がある。初代星を起源とする GRB を観測すれば、宇宙で最初の天体を発見するのみならず、それらが生まれた環境を調べられるようになる。また、GRB が形成するブラックホールは、銀河の中心に存在する超巨大ブラックホールの種になったと考えられていることから、その進化の過程も天文学的に大変興味深い課題であり、将来の銀河観測と合わせて解明が期待できる。

本計画により、宇宙の暗黒時代が終焉し、宇宙最初の天体が形成された頃の初期宇宙を探索することで、星から大規模構造に至る構造形成史や、宇宙再電離を通じた宇宙空間の進化に対して、新たな知見が得られるようになる。これにより、2020 年代の天文・宇宙物理学全体の最重要テーマである「宇宙の物質と空間の起源」についての理解が飛躍的に進むと考えられる。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

本計画は 2020 年代前半の実現を目指しており、この時期に GRB を用いた初期宇宙探査計画としては世界で唯一の計画である。2020 年代半ば以降の実現を目指して中国・フランスが SVOM 衛星を検討しているが、GRB の検出感度が Swift 衛星と同等であり、かつ、可視光望遠鏡しか搭載しないために赤方偏移 $z > 7$ の GRB を追観測することは原理的に不可能である。一方で、科学衛星 HiZ-GUNDAM は GRB による初期宇宙探査に最適化されたミッション機器構成であり、高赤方偏移 GRB に対する感度が Swift や SVOM よりも 1 桁程度高く、2.5 μm まで感度を持つ近赤外線望遠鏡は赤方偏移 $z = 12$ までの GRB を観測対象にできる。

⑤ 実施機関と実施体制

本計画は、2012 年 4 月に宇宙科学研究所・宇宙理学委員会の下に設置されたワーキンググループが主体となって実施するミッションであり、計画の主旨は金沢大学が担当している。科学衛星 HiZ-GUNDAM に搭載する 2 種類のミッション機器の開発実施体制および責任機関は以下になっている。各機関のスタッフの下、研究室の学生等の協力を得て開発を行う。

(1) 広視野 X 線撮像検出器：金沢大（責任機関）、理研（副責任機関）、東工大、宇宙研、京都大、広島大、東北大、山形大、青学大、埼玉大、宮崎大、名古屋大

(2) 近赤外線望遠鏡：広島大（責任機関）、関西学院大（副責任機関）、東北大、宇宙研、国立天文台、台湾中央大、東京大

(3) サイエンス班：宇宙線研、高エネ研、理研、コロンビア大、東京大、京都大、熊本大、東北大、国立天文台、ペンシルバニア州立大、青山学院大、スタンフォード大、雲南天文台、IPMU

ミッション機器開発を担当する(1)および(2)のグループは、これまでに様々な人工衛星計画に参加してきた実績のあるメンバーがほとんどである。さらに、独自にロケット実験や気球実験を行ってきたメンバーも多く、開発・運用の様々な面での経験を有している。近赤外線望遠鏡のグループには、地上望遠鏡を主に利用してきたメンバーも含まれるが、衛星開発経験者との連携の下で本計画を実施し、将来のスペースプロジェクトを支える人材育成にも貢献できる。

衛星バスはこれまでの小型衛星標準バス相当を利用することから、研究者側との綿密な調整の上で、衛星開発メーカーが開発を担当する。また、イプシロンロケットによる打ち上げについても宇宙科学研究所およびメーカーが担当する。

⑥ 所要経費

科学衛星 HiZ-GUNDAM の設計・開発・運用および衛星打ち上げ費用を含めた総予算は 131~141 億円（運用形態に依存する）であり、その内訳を以下に示す。

イプシロンロケット打ち上げ費（50 億円）、衛星バス開発費（45 億円）、広視野 X 線撮像検出器（9 億円）、近赤外線望遠鏡（11 億円）、地上試験費（1.5 億円）、衛星運用費（3~12 億円：アラート送信の運用形態に依存）、カスタマー（約 10%）

アラート送信方法に関して、商用衛星（イリジウム社やオーブコム社）の利用のほか、アマチュア無線の利用や、NASA のリレー衛星システム（TDRSS）の利用などいくつかの方針を検討しており、運用形態によって経費が変動する。

⑦ 年次計画

科学衛星 HiZ-GUNDAM は、公募型小型衛星 3 号機としての実現を目指しており、以下は最短でプロジェクトが実現することを想定した年次計画を示す。ノミナルのミッション期間を 3 年と設定し、衛星・検出器機能が健全であれば継続して運用を行う。

2012 年 4 月：宇宙科学研究所・宇宙理学委員会へワーキンググループ設置

2017 年度：公募型小型計画へミッション提案

2018 年度：概念設計およびシステム定義審査、アラート送信方法に関する国際調整

2019 年度：JAXA プロジェクト移行、ミッション機器・衛星システムの詳細設計および審査

2020 年度~2023 年度：フライトモデル製作・試験

2023 年度：イプシロンロケットによる打ち上げ、運用・観測

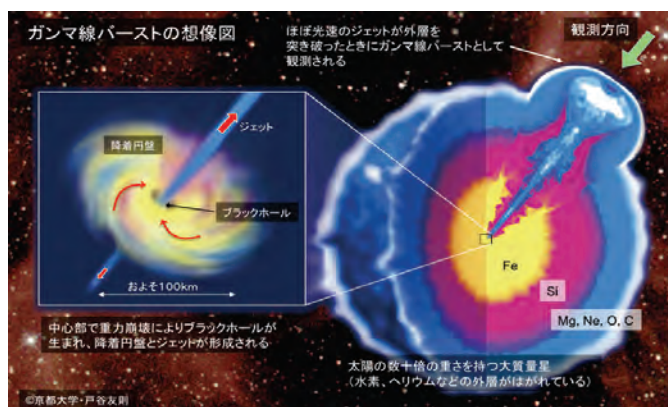
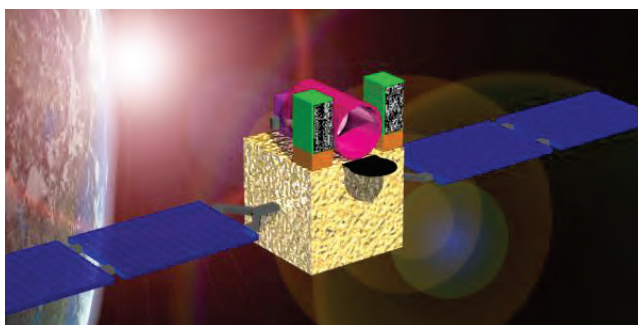
⑧ 社会的価値

遠方宇宙の探査は人類の根源的な欲求であり、天文学の発展を促した大きな推進力の 1 つでもある。近年、大型望遠鏡の活躍により赤方偏移 $z = 10$ （132 億光年）に達する銀河も発見されはじめたが、極めて暗く、初期宇宙の物理状態を調べるには程遠い。GRB の残光は銀河よりも 100~1000 倍も明るいことから、現時点では遠方宇宙を探査する究極の手法と言える。GRB を用いることで、ビッグバン以降、宇宙の晴れ上がり（宇宙マイクロ波背景放射）の時期を経て、宇宙最初天体（初代星）が形成された頃の宇宙についての物理的な知見が得られるようになる。

何故、我々の宇宙はこのような姿なのか？という疑問に対して、宇宙の進化を決定付けた(1)最初期の天体形成、(2)宇宙再電離、(3)宇宙最初期の重元素合成、そして、(4)宇宙最初のブラックホールの誕生について、GRB を利用することで観測的にアプローチできるようになる。ここから、「宇宙・物質・空間は何故できたのか」という 2020 年代の宇宙物理学の最重要課題に取り組むことで、我々の宇宙を深く理解することに貢献できる。

⑨ 本計画に関する連絡先

米徳 大輔（金沢大学・理工研究域）



（左図）科学衛星 HiZ-GUNDAM の概念図、（右図）ガンマ線バースト現象を模式的に示した図（提供：戸谷友則・京都大学）

大型国際 X 線天文台 Athena (Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics) への日本の参加

① 計画の概要

European Space Agency (ESA) の大型計画 2 号機である X 線天文衛星計画 Athena は、科学目的として「宇宙の物質は如何に集積し大規模構造になったか」、「巨大ブラックホール (BH) は如何に成長し宇宙に影響を与えたか」という 2 つの謎の解明を掲げる。Athena は生まれたての銀河団や巨大 BH を X 線でとらえ、その成長を解明するために、かつてない大面積、高空間分解能、高エネルギー分解能を兼ね備える。ALMA、SKA、TMT などの大型観測装置と並ぶ、2020 年代後半の主要ミッションである。欧州主導だが、日米の国際協力を加えて、2028 年の打ち上げを目指す。日本の Athena 計画参加の目標は、Athena の科学的価値を高めプロジェクトを成功させること、そして科学成果の最大化に日本の研究者が貢献することである。Athena 衛星は望遠鏡 SPO、撮像精密分光器 X-IFU、広視野撮像分光器 WFI を搭載する (図 1)。日本の貢献としては、(1) X-IFU の各種冷凍機および周辺装置を提供する、(2) WFI の最高性能を引き出すための最適化に関与し、較正に寄与する、(3) SPO の欧州での較正に相補的な、高エネルギー側での較正に寄与する、(4) 科学的成果創出に寄与するため、サイエンスワーキンググループ (SWG) 等の活動に日本から積極的に参加する、また地上運用局への貢献をする、などが考えられる。2016 年の検出器公募までに、日本のハードウェア貢献の大枠を決定する。Athena の最終形態は 2020 年頃のミッション採択で決まり、日本の貢献も最終的にはこの時点で決まる。

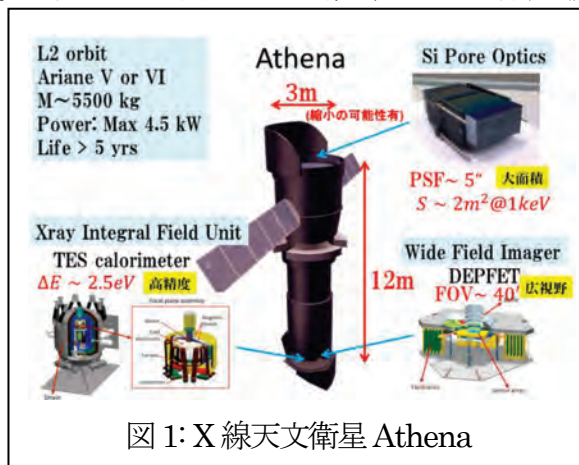


図 1: X 線天文衛星 Athena

② 目的と実施内容

日本の参加によって、Athena の科学的価値を高め、プロジェクトを成功へと導くために、(1) X-IFU へのハードウェア提供を行う。具体的には、4K の熱シールド、及び約 20K、約 100K の熱シールドを冷却する機械式冷凍機、その駆動回路、必要な周辺装置を査定/定義フェーズおよび実装フェーズの開発にあわせて供給する。次に、(2) X-IFU/WFI/SPO の設計、試験、較正への寄与を行う。X-IFU では、システムエンジニアリング活動への協力、レビューパネルへの参加、データ処理システムの開発、地上較正実験や軌道上較正への参加を行う。WFI ではデモンストレーションモデル (DM) の開発に参加し、DM と電気的に同等なブレッドボードモデル (BBM) を使って評価実験を行う。WFI の最高性能を引き出すためのセンサー部およびエレクトロニクス設計指針を得て、BBM モデルを認定モデル (QM) へとアップグレードする。軌道上での最高性能を維持するために、QM を用いて軌道上での性能変化を追跡する。SPO では、放射光施設 SPring-8 ビームライン BL20B2 に構築した汎用 X 線望遠鏡性能評価システムを利用して、軟 X 線中心の欧州での地上較正実験に相補的な、高エネルギー側の性能評価を行う。さらに、(3) 受信・サイエンスセンターなど地上システムへの寄与を検討する。突発天体発生時のデータ受信のための地上局、データアーカイブセンターなどの貢献をミッション採択までに具体化する。そして、Athena の科学成果の最大化に日本の研究者が貢献するために、(4) サイエンス活動への寄与、を行う。日本がより多くのデータシェアを獲得するためには、当初から Athena の観測方針の議論に深く関与することが重要である。そのために、計画立案に関わる活動に様々なチャネルで参加する。

③ 学術的な意義

「今日の宇宙がどのようにして出来たのか」という問いは、宇宙物理が解き明かすべき究極の課題である。この問いに答えるに当たり、宇宙初期の揺らぎを種として、膨張宇宙の中で暗黒物質の重力によって形成され、今なお進化を続ける宇宙の大規模構造は最も重要な観測対象である。そして宇宙の物質の大部分は、X 線を出す高温ガスという形で大規模構造に沿って分布する。従って大規模構造を最も直接的に観測する手段は X 線観測である。一方、現在の宇宙の物質分布は、星間物質から大規模構造まで多様性に富み、この多様性も重要な研究要素である。特に、銀河と巨大ブラックホールの共進化、銀河団ガス冷却と活動銀河核エネルギー注入の絶妙なバランス、などの観測事実は、宇宙の各階層間の相互作用 (フィードバック) が、今日の宇宙のバリオン世界の形成に本質的であることを物語る。その中でも、巨大ブラックホールと銀河・銀河団の間のフィードバックは最も重要なテーマであり、これも X 線天文学が答えるべき課題である。

Athena は「どのようにして物質が集積して、今日の大規模構造を形成したのか」、「どのようにして巨大ブラックホールは成長し、そして宇宙に影響を与えたのか」の解明を最優先としている。すなわち Athena は、「今日の宇宙がどのようにして出来たのか」という問いに、X 線天文学を通して真正面から答えようとするミッションである。

④ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

各波長での次世代天文台はいずれも大型化・国際化にむかっており、X 線も同様である。Athena は大面積と波長分解能を備えた王道 X 線ミッションとして、世界で唯一確定した存在である。主体は ESA だが、実現には日米の協力が必須であり、日米ともに協力が積極的である。従って世界的に Athena は実現すべき最優先のミッションとなっている。日本国内においては、ひとみ衛星以降の X 線天文ミッションとして、銀河間中高温物質 (Warm Hot Intergalactic Medium; WHIM) の検出を狙う Diffuse

Intergalactic Oxygen Surveyor (DIOS) 計画、宇宙背景 X 線を観測し、巨大ブラックホールの成長過程の解明を目指す Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution (FORCE) 計画など、特色のあるミッションが幾つか提案されている。しかしいずれも Athena と競争関係にはなく、Athena と相補的な関係にある。

⑤ 実施機関と実施体制

Athena に関する日本の活動の母体は、宇宙科学研究所宇宙理学委員会の Athena ワーキンググループ (WG) である。Athena WG から、宇宙科学研究所に国際協力活動を申請し、宇宙科学研究所の承認のもとで活動している。評価/定義フェーズの活動をリードする Athena Science Study Team (ASST) が ESA によって定義され、Athena WG 主査が日本代表として参加している。さらに ASST をサポートするために Sub WG (SWG) が設立されている。SWG はサイエンス目標別にさらに 5 つのグループに分かれる。日本からは、高エネルギー宇宙物理連絡会から選ばれた研究者 27 名が参加しており、各 SWG に日本の研究者が数名ずつ参加している。また、そのうち 7 名が SWG のチェアに選出されており、主なサイエンス目標に対して日本側の意志を主張出来る体制を整えている。SWG は総勢約 600 名であり、チェアは、ヨーロッパ 49 名、米国 8 名、日本 7 名である。日本と同様、国際協力として参加する米国に匹敵する数である。X-IFU に関するハードウェア開発は、ASTRO-E、すざく衛星、ひとみ衛星の X 線カロリメーター、冷凍機関係の開発を率いた、宇宙科学研究所と宇宙航空研究開発機構がリードする。X-IFU プロトコンソーシアムには、宇宙科学研究所 (2 名)、宇宙航空研究開発機構 (1 名) の研究者が参加し、さらに X-IFU サイエнтиストとして広島大学の研究者 (1 名) が参加している。WFI に関する活動は、すざく衛星、ひとみ衛星の X 線 CCD 開発を率いた大阪大学および京都大学がリードする。SP0 に関する活動は、あすか衛星、すざく衛星、ひとみ衛星の X 線望遠鏡の開発を行った名古屋大学、愛媛大学が中心となる。地上システムに関する活動は、宇宙科学研究所がリードする。

⑥ 所要経費

X-IFU に関しては、開発段階では、機械式冷凍機 の作成、フランスでの試験のために 5 億円程度必要である。また現状でのノミナル案では、ミッション採択後の試験モデルと実機に、2 段式スターリング冷凍機 10 台、4K 級ジュールトムソン冷凍機 4 台、駆動装置類を供給する。最大貢献案では、さらにスターリング冷凍機 6 台、1K 級ジュールトムソン冷凍機 4 台、3He 循環ポンプ 2 台、それらの駆動装置が追加となる。この開発費と旅費が 61 億円程度である。人件費 (基本は新規雇用は無し) は 10 年間で 13 億円程度である。SP0 に関しては、モジュール単位の地上性能評価を行う。半径方向に 15 列モジュールを並べるので、各半径で最低 1 つはモジュールを性能評価する。旅費、運送費、SPRing-8 使用料などで 3000 万円程度が必要である。WFI に関しては各開発段階のモデル (DM, EM, QM) と同等の性能を持つ装置を導入する経費として合計 1.7 億円、旅費と研究員派遣費で合計 2.0 億円が必要である。その他、サイエンス議論のための打合せ出張旅費などで 10 年間で 2000 万円程度が必要である。

⑦ 年次計画

Athena の打ちあげは 2028 年を予定しており、遡って年次計画がたてられている。大きな節目は 2020 年に予定されている、搭載機器を含む詳細計画を固定するミッション採択である。2016 年から 2020 年は、目標達成のための機器の開発が行われる。2020 年以降は、試験モデル、実機の製作・校正試験をそれぞれ 4 年かけて行い、2028 年に打ちあげ、その後ノミナル 5 年間の観測を行う。観測期間中は、科学目標を達成するためのキーサイエンスを主体としつつ、公募観測も行う。観測データの取扱は厳密には決まっていないが、一定期間後には公開・アーカイブ利用されるものと思われる。また 5 年間経過後も観測機器が健全である場合は、新たな審査を経て観測延長を行うだろう。

日本の貢献においては、まず X 線マイクロカロリメータ X-IFU の開発において、日本がこれまで開発してきた機械式冷凍機をより長寿命かつ低擾乱化して冷却システムに組み込む。またセンサー自身の開発にも協力する。これにより、ミッション採択時に日本の参加を必須とする計画を ESA に認めさせる。その後実機のための冷凍機、冷凍機駆動装置の製作・供給・試験に参加する。平行して科学観測のための計画立案のための議論に参加する。SP0 に関しては、各半径のモジュールを 2 つずつ性能評価すると仮定すると、約 30 モジュールを評価することになる。SPRing-8 は 1 年に 2 回程度実験の機会がある。1 回の実験で 2 モジュールを評価すると全部で 15 回、8 年程度かかる。これを評価/定義フェーズの後半、つまり 2018 年頃から行う。WFI イメージャーを 2017 年に導入し、放射線施設などで試験を行い、最高性能を引き出すための指針を得て、設計に反映させる。打ち上げ後の軌道上での性能変化を追跡し最高性能を維持する。以上の活動に平行して、地上系システムの議論を行う。

⑧ 社会的価値

Athena は、1. どのようにして物質が集積して、今日の大規模構造を形成したのか、2. どのようにして巨大ブラックホールは成長し、そして宇宙に影響を与えたのか、の解明を最優先するミッションである。これらのテーマは、「宇宙・物質・空間は何故できたのか」という人類の知的興味に深く関わっており、この課題に X 線天文学を通して真っ向から答えようとするミッションである。また、Athena は 2020 年代後半において、ALMA、SKA、TMT などの他の波長の大型観測装置と並んで、宇宙物理学の重要な課題に挑戦するミッションの一つとなる。

⑨ 本計画に関する連絡先

松本 浩典 (名古屋大学現象解析研究センター)