

記 録

文書番号	SCJ第25期 050801-25512000-093
委員会等名	日本学術会議 物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会
表題	天文学・宇宙物理学の長期計画 -2030-2040年代のビジョン-
作成日	令和5年（2023年）8月1日

※本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

この記録は、日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会での審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議 物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会			
委員長	林 正彦	(連携会員)	日本学術振興会ポシ研究連絡センター長
副委員長	山崎 典子	(第三部会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授
幹事	浅井 歩	(連携会員)	京都大学大学院理学研究科附属天文台准教授
幹事	深川 美里	(連携会員)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台教授
幹事	藤澤 健太	(連携会員)	山口大学時間学研究所長・教授
	梶田 隆章	(第三部会員)	東京大学宇宙線研究所教授
	田近 英一	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
	相川 祐理	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科天文学専攻教授
	生田ちさと	(連携会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所学際科学研究系准教授(宇宙科学広報・普及主幹付)
	今田 晋亮	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻教授
	奥村 幸子	(連携会員)	日本女子大学理学部数物情報科学科教授
	坂井 南美	(連携会員)	国立研究開発法人理化学研究所主任研究員
	佐々木 晶	(連携会員)	大阪大学大学院理学研究科教授
	新永 浩子	(連携会員)	鹿児島大学理工学域理学系理工学研究科(理学系)理学専攻物理・宇宙プログラム准教授
	須藤 靖	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科物理学専攻教授
	住 貴宏	(連携会員)	大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻教授
	田代 信	(連携会員)	埼玉大学大学院理工学研究科教授
	千葉 柁司	(連携会員)	東北大学大学院理学研究科天文学専攻教授
	常田 佐久	(連携会員)	大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台台長
	中畑 雅行	(連携会員)	東京大学宇宙線研究所教授
	藤井 良一	(連携会員)	情報・システム研究機構国立極地研究所特任研究員
	観山 正見	(連携会員)	岐阜聖徳学園大学学長
	村山 齊	(連携会員)	東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構教授・主任研究者、カリフォルニア大学バークレー校教授
	山田 亨	(連携会員)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授

渡部 潤一 (連携会員) 大学共同利用機関法人自然科学研究機構
国立天文台教授

本記録の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	佐々木 亨	参事官 (審議第二担当)
	高橋 直也	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐 (令和5年3月まで)
	柳原 情子	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐 (令和5年4月から)
	近藤 慈恩	参事官 (審議第二担当) 付審議専門職付

目 次

1	はじめに	1
(1)	この「記録」策定の背景と意図	1
(2)	天文学・宇宙物理学の果たす役割	2
(3)	我が国の天文学・宇宙物理学の発展と大型研究基盤の役割	5
(4)	研究者コミュニティによる大型計画の提案	6
(5)	私たちの学術と社会	7
2	2010年代の成果と2030-2040年代の展望	12
(1)	宇宙論	12
(2)	銀河	16
(3)	活動銀河核と巨大質量ブラックホール	17
(4)	星・高密度星・元素合成	20
(5)	星・惑星系形成と星間化学	22
(6)	太陽系外惑星	24
(7)	太陽	28
(8)	粒子線・ニュートリノ・ダークマター	30
(9)	重力波	32
(10)	コンピュータ・シミュレーション	34
2	推奨する大型・中型長期計画	36
(1)	電波天文学分野の計画	39
(2)	光学・赤外線天文学分野の計画	47
(3)	宇宙線分野の計画	58
(4)	高エネルギー天文学分野の計画	64
(5)	太陽物理学分野の計画	69
	<用語集>	75
	<執筆者一覧>	81
	<提案されている大型・中型の長期計画一覧>	82

1 はじめに

(1) この「記録」策定の背景と意図

日本学術会議の天文学・宇宙物理学分野では、これまでも研究者コミュニティの意向を反映した大型研究基盤計画を取りまとめ、その実現に向けた提言を定期的に行ってきた。例えば、第15期日本学術会議天文学研究連絡委員会は、1994年に、「21世紀に向けた天文学長期計画について¹」と題する報告書をまとめている。そこでは、地上から観測を行う大型装置として大型ミリ波サブミリ波干渉計LMSA（アルマ望遠鏡：ALMA）と大型重力波望遠鏡（KAGRA）が、スペース観測衛星装置として、赤外線天文衛星IRIS（Astro-F/あかり）^[※]²、X線天文衛星（Astro-E/すざく、Astro-H/ひとみ）、太陽観測衛星（Solar-B/ひので）、VSOP II（はるかの後継機）が挙げられている。これらは、VSOP IIを除いて現在までにすべて実現し、数多くの科学的成果が生まれている。

直近では、2010年に第21期日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会が「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」³（以下、「2010年報告」とする。）を、2014年には第22期日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会がそこではカバーしきれなかった相補的な計画を取り上げた「天文学・宇宙物理学中規模計画の展望」⁴（以下、「2014年報告」とする。）を、それぞれ学術会議の「記録」として公表している。これらの発出からほぼ10年が経過したが、この間、重力波の地上直接検出、ブラックホールシャドウの撮像を始めとして、天文学・宇宙物理学分野では大きな学術的進展が相次いでいる。また、以前の報告書で提案された大型研究基盤の一部は既に実現あるいは建設中である一方、いくつかの計画はそれらの進展を受けて再検討が必要となっている。

そのため、第25期日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会は、広く研究者に呼びかけ、2030年から2040年代にかけて実現すべき大型・中型研究基盤の提案を募り、これらの長期計画を取りまとめることとした。提案されたすべての計画は、分野別の研究者コミュニティに検討を依頼し、学術的価値、実現可能性、など様々な観点から評価した上で推薦に値する計画の提案を受けた。このような過程を経て推薦された長期計画を日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会で再度慎重に議論を行った結果を、それらの学術的意義とともにここに記録として残すこととした。この記録が

¹ <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/13/15-49.pdf>

² 後の文中で^[※]を付記した語については、用語集（75ページ）に説明を掲載した。

³ 日本学術会議記録SCJ第21期-220319-21510500-020 (<https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/kiroku/3-0319.pdf>)

⁴ 日本学術会議記録SCJ第22期-260912-22610500-050 (<https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/kiroku/3-140912.pdf>)

今後10年スケールにわたる日本の天文学・宇宙物理学の長期計画実現のための有益な資料となることを期待する。

(2) 天文学・宇宙物理学の果たす役割

歴史上最古の学問の一つである天文学は、我々が住む世界とは何かを知るための営みである。そしてそれは、哲学的思索と実際の観測事実に基づく定量的な検証の積み重ねを経て進歩し続けてきた。その結果、暦計算や航海術に不可欠な実学としての役割をも担ってきた。例えば、ガリレオ・ガリレイは望遠鏡が開発されたという情報を受けて、直ちに天体観測のための望遠鏡を自作し、月、金星、木星とその惑星、土星の輪、太陽の黒点などを詳細に観測した。その結果は、アリストテレス的世界観を覆し、観測に基づいた現代的宇宙観への変革を迫るものとなった。この例は、実証と合理的推論を通して真実を明らかにするという近代科学の方法論の先駆けであり、その後百科に分岐して発展する近現代科学の源泉となった。以来、宇宙を知る営みである天文学は、宇宙を支配する法則を探求する物理学とともに、人類の知の創造に本質的な寄与を行い続けている。

宇宙に始まりがあったことを示す宇宙膨張と、遺伝のメカニズムを解明した二重らせんのふたつは、20世紀の大きな科学的発見であろう。宇宙と生命という全く異なるスケールにおける最も基本的な存在に関する革新的理解をもたらした発見であるためだ。そして、21世紀になり、今やこの宇宙と生命が一つの大きな研究分野を創成しつつある。

20世紀の天文学・宇宙物理学の到達点については、2010年報告に詳しい。ここでは、その中から特に知の創造に寄与する5つの観点、(i)宇宙と物質の起源、(ii)宇宙における天体と生命の共進化、(iii)宇宙の新たな謎の発見、(iv)宇宙への展開、(v)宇宙と人間・文明、を概観しておこう。

(i) 宇宙と物質の起源

この宇宙を構成する物質をどこまでも分割し、その基本構成要素が従う基本法則を明らかにする、このいわゆる要素還元的方法論は20世紀の物理学において大きな成功を収め、その結果は、クォークとレプトンと呼ばれる素粒子が従う標準素粒子モデルを確立させた。しかしながら、この微視的世界とは対局にある巨視的宇宙は、この標準素粒子モデルだけでは記述できない。

宇宙を占める物質の大半が、標準素粒子モデルから構成される元素だけでは説明できない可能性は、20世紀後半の天文学観測によって示唆されていた。そして、20世紀末から21世紀初頭にかけての宇宙マイクロ波背景輻射全天地図の精密な解析により、

現在の宇宙を特徴付けるパラメータ（宇宙の膨張率、宇宙年齢、宇宙の密度）が極めて高い精度で推定できるようになった結果、宇宙を構成する物質の95%は、標準素粒子モデルでは記述されないダークマターとダークエネルギーによって占められていることが明らかとなった。この事実は、地上実験だけでは知ることのできない標準素粒子モデルを超えた物理学を天文学観測を通じて探求できることを証明した。

つまり、素粒子物理学が記述する微視的世界は巨視的宇宙と密接に関係しており、両者の相補的研究の進展なしには、宇宙と物質の起源は解明できないのである。重力波を用いた一般相対論の精密検証と重力波天文学の開拓、宇宙背景重力波検出を用いた宇宙のインフレーション理論の検証、遠方天体からの高エネルギーニュートリノの検出など、素粒子物理学・原子核物理学・相対論・高エネルギー宇宙物理学の垣根を超えた学際的研究は、既存の物理学では説明できないダークマター、ダークエネルギー、インフレーションを解明し、新たな世界観を確立する上で不可欠である。

(ii) 宇宙における天体と生命の共進化

宇宙には、惑星、恒星、星団、銀河、銀河団などに代表される様々な天体種族が存在する。それらは、質量にして約20桁もの範囲にわたり、下位の天体が重力的に集団化して上位の構造を形成するという階層構造をなしている。一般相対論的宇宙論の枠組みに沿ってそれらの誕生と進化を解明するのが天文学の主たる目的の一つである。

そのような天文学的知見の飛躍的拡大を支えるのは、伝統的な可視光にとどまらず、電波、赤外線、紫外線、X線、ガンマ線、さらにはニュートリノ、宇宙線、重力波に至る様々な手法を用いた極限観測技術である。

1990年代に初めて発見された太陽系外惑星の研究は、21世紀に入って飛躍的進展を遂げている。これは宇宙における地球の占める位置のさらなる相対化にとどまらず、我々人類の存在にも重要な示唆を与えつつある。今や、天文学者の大多数は、生命は地球に限らず、宇宙において普遍的な存在であるとまで考えるようになっていく。太陽系内天体に生命の起源を探るサンプルリターン、さらには、太陽系外惑星に生命存在の指標たるバイオシグニチャーを観測する試みは、惑星科学と天文学の最前線となっている。

少なくとも、地球の生命の原材料は、宇宙誕生初期から存在する水素に加えて、その後誕生した恒星の内部で合成された炭素、酸素、窒素である。宇宙における天体の進化の帰結である元素合成と循環は、生命の誕生と不可分である。このように、宇宙とは天体と生命が共進化する舞台にほかならない。

地球のみならず、宇宙における生命の普遍性の探求は、惑星科学や天文学にとどまらず、物理学、化学、生物学を含む自然科学における最も根源的な問いである。21世紀は、すべての自然科学の最新の知見を駆使して、宇宙における生命の起源の解明を目指す時期である。

(iii) 宇宙の新たな謎の発見

20世紀後半には、観測・理論・実験を支える観測装置やコンピュータ技術が大きく発展し、宇宙に関する理解が著しく進展した。天文観測衛星と惑星探査機は、身近な月や太陽にも数々の発見をもたらし、この地球を取り巻く世界についての人間の理解はより総合的・統一的なものへと進んでいる。しかしながら、それらの研究の進展が必然的に新たな謎の発見につながることは、科学の歴史が示してきたとおりである。

既に(i)で述べたように、ダークマターとダークエネルギーの存在、さらには広く認められているインフレーション仮説は、21世紀に残された重要な未解明の謎である。それらの解決には、宇宙の極限観測技術の発展が不可欠である。その結果がどのような形の解決を見るかは現時点では予想できないものの、その先にさらに深いレベルでの新たな謎が待ち受けていることは確実である。宇宙の果てにある第一世代天体の発見、太陽系内天体の生命始原物質の発見、太陽系外惑星における生命の兆候の発見、ダークマター粒子の同定、原始背景重力波の発見など、天文学・宇宙物理学の最先端研究は、いずれも新たな謎の発見の可能性を秘めている。そして、それらが将来のさらなる世界観の革命をもたらすであろう。

(iv) 宇宙への展開と地球文明の未来

陸から海・空へ営々と生存圏を拡大してきた人間にとって、20世紀は広大な宇宙へステップを踏み出した世紀でもあった。宇宙は新たな活動の場となり、新たな知の宝庫となる。とりわけ宇宙空間（スペース）からの宇宙観測を進めている多彩な天文観測衛星、惑星や衛星の驚くべき世界の姿をもたらした無人探査機の活躍は目覚ましく、太陽系の認識は大きく書き換えられつつある。宇宙の探査は今、かつての大航海時代に続いた18世紀から19世紀の地球の科学探査の時代にも匹敵する時代にある。また、月面や宇宙環境でのその場分析や物質開発研究など、工学分野や物質科学分野との連携研究も大きく進むと期待される。人間が宇宙空間での活動を拡大し、宇宙空間を利用して宇宙・自然をさらに理解しようと努め、科学の発展と宇宙へのさらなる展開に力を尽くすのは、21世紀の自然な流れであろう。

私たち人間は、このような営みの結果として自然・宇宙を理解することで、今生きていることの意味を知り、自分自身とはどういう存在かを理解してきた。20世紀に獲得した認識を基礎に、21世紀の人間は宇宙の中の存在としての自己認識をさらに深めていくだろう。

今、拡大する一途の人間活動が地球規模の環境変化を引き起こしている。確かに科学・技術・産業は、急激な拡大の結果として環境に看過できない変化をもたらした。一方で、そうした環境変化の認識も科学によって獲得された認識なのである。人間活動の環境への影響を認識しなかった時代に比べれば、私たちの環境認識は確実に前進を遂げている。文明自体の危機すら叫ばれ始めている現在、地球と人類持続の指針を提示することは、21世紀の科学の重大な責任であることを認識しなければならない。これからは、環境変化に留意した学術の推進が必要となるだろう。そこでは、科学がもたらす宇宙・自然・生物・人間の総合的な理解の前進が、人間活動それ自身へのより高い理解と、優れた指針をもたらすことを期待したい。天文学・宇宙物理学は、大きな自然と歴史的・科学的視点から、そうした活動に寄与していくことができるだろう。

(3) 我が国の天文学・宇宙物理学の発展と大型研究基盤の役割

我が国の天文学・宇宙物理学分野の研究者は、過去半世紀以上にわたって、高い国際競争力を持つ地上観測装置や宇宙望遠鏡などの大型研究基盤施設を建設してきた。これらの装置は、日本独自の共同利用という優れたシステムを通して、主として国内の大学・研究機関に所属する研究者に広く利用され、天文学・宇宙物理学研究の発展に本質的な貢献を行ってきた。

人材育成という観点からも、このような共同利用システムが我が国の天文学・宇宙物理学の発展に与えた影響は絶大である。すなわち、共同利用システムによって、大学院生やポストクなどの若い世代の研究者に、あるいは必ずしも研究環境が整っていない比較的小さな大学の研究者にも、第一線の研究機会が提供されてきた。その結果、過去40年間に国内で天文学・宇宙物理学に携わる研究者数は数倍に増大し、年齢や所属を問わず、多数の研究者が成果を挙げることで、日本の研究レベルは世界の第一線に並ぶに至った。そして、多くの大学と共同利用を担う機関との共同研究によって、大型装置を補完する独創的な研究装置・施設が実現され、研究の裾野は大きく広がってきた。

この分野における観測施設の大型化の流れは必然であり、日本にとどまらず世界的な潮流である。その結果として、建設予算の増大に伴い、税金によって建設される大型計画の推進にあたっては国民の理解は不可欠であるとともに、国際協力も当然の前提とな

りつつある。このような状況の中、純粋に基礎科学の発展を目指すボトムアップの大型計画の中でどれが最も重要な計画かについて、当事者である研究者集団(コミュニティ)が真剣な議論を通じて合意を形成した上で、広く国民に提案して理解を得るとともに、その結果については責任を負うことを明確に示すべきである。

(4) 研究者コミュニティによる大型計画の提案

研究者コミュニティが中心となって大型計画を推奨する手続きは、例えばアメリカ合衆国のディケイダル・サーベイ⁵がよく知られている。その最初の報告書は1964年に提出され、直近では2021年に第7期の報告書が発出されている。この間、ディケイダル・サーベイはアメリカ合衆国における天文学・宇宙物理学分野の大型研究基盤の実現に向けた指針を与えると同時に、その発展に必要不可欠の役割を果たしてきた。

ヨーロッパでは、基礎科学の大型研究基盤を担う国際機関として、1954年に欧州原子核研究機構(CERN)が、1964年にヨーロッパ南天天文台(ESO)が発足している。これらは、第二次世界大戦で荒廃したヨーロッパを前に、どのようにしてヨーロッパの基礎科学研究を再生すべきかという研究者による議論を受けて設立に至っている。また最近では、ヨーロッパにおける大型研究基盤のロードマップを作成するためにESFRI[※]などのシステムも整備された。

日本においても、研究者コミュニティの議論による合意形成を経て大型地上望遠鏡や科学衛星を実現していくシステムは、1970年代⁶には始まっていた。特に、1982年に完成した東京天文台(当時)野辺山宇宙電波観測所は、ミリ波帯の電波望遠鏡としては世界最大口径の45m望遠鏡を有し、「共同利用」を通して広く全国の大学等研究者による利用を促進した。その成果は、日本の電波天文学の水準を世界の第一線に押し上げたと同時に、天文学・宇宙物理学の研究者が日本の多くの大学に広がる端緒となった。

1980年代に入ると、光学・赤外線天文学分野の研究者コミュニティである光学赤外線天文学連絡会が発足し、世界最大口径の地上大型光学赤外線望遠鏡を建設する機運が高まった。この望遠鏡は1991年に予算措置がなされ、1999年に完成し、すばる望遠鏡として現在に至っている。

⁵ Astronomy and Astrophysics Decadal Survey: 全米科学アカデミーが中心となって、ほぼ10年ごとに取りまとめる天文学・宇宙物理学分野の大型長期計画の推薦書

⁶ 電波天文学研究者のコミュニティである宇宙電波懇談会は1970年に発足した。なお、素粒子物理学の研究者を中心とした宇宙線研究者連絡会議は1953年に発足している。

これらの大型計画は、コミュニティでの議論の開始から早くても10年以上、場合によっては20年以上の歳月をかけて実現されていく。天文学・宇宙物理学分野の学術的課題は、素粒子物理学分野などと並んで根源的かつ深淵であり、十分長い年月をかけて多数の研究者が検討の上に検討を重ね、国民に是非を問いつつ進めていく仕組みが築かれている。

(5) 私たちの学術と社会

ここまでは、純粋に学術という立場から天文学・宇宙物理学の重要性を述べてきた。しかし、この分野は社会活動からは距離のある基礎科学という側面のみならず、実はほかの様々な学術分野とも影響を与え合い、さらには我々の生活と密接に関係する実学的な性格をも併せ持つ。ここでは、そのような観点から天文学の意義を述べてみたい。

天文学が実用的な知見を提供して、社会を築く一助となってきた代表的な例は暦である。暦の決定は、社会に共通の時間軸を与えると同時に、農耕や漁業など、第一次産業でのタイミングを測るためには必須であった。さらに、海を渡るための航海術に用いられるなど社会の交流にも役立ってきた。

また、近代になると天文学は物理学や化学の発展にも多大な影響を及ぼし、我々の世界を形作るものの理解も進めた。太陽の光を分光したことで分光学が発達し、化学の一大分野となったばかりか、星やその周りのガスや塵に含まれる元素が、私たちの体を構成する元素と同じであることが分かってきた。これらの元素が恒星の中における核融合で生み出されることも分かると、宇宙と我々の繋がりが明確になった。分光学は、光を通して物質を「観る」学問である。そのため、20世紀に入って分光学が独自の発展を遂げると、今度は逆に天文学に大きな発展をもたらされた。光の波長ごとの特性を利用することで、天体や宇宙にある物質の組成を詳細に調べられるようになったからである。その結果、核融合で生み出された様々な元素が材料となり、星間空間でも複雑な分子が生成されていることが分かってきた。現在では300種近くもの数の様々な星間分子の存在が明らかとなり、隕石・小惑星などで検出される先太陽系有機物質との関連で、それらの星間分子の存在の普遍性や生成過程の解明に注目が集まっている。

一方、1990年代に入り太陽系外惑星が次々に発見され始めると、直接的に宇宙生命を探すための研究も本格的になった。20世紀に発展を遂げた極限環境生物学の研究に影響される形で、太陽系外惑星や木星・土星の衛星などにおける原始的生物の存在可能性などが真剣に議論され始めたからである。地球惑星科学分野における太陽系内の探査研究と並行して、生命活動の兆候であるバイオシグニチャーを太陽系外惑星で探す研究など、現在本格的な研究が進みつつある。

このように、核融合で生み出された元素から私たち生命が誕生するまでの化学的な歴史を探求すること、そして地球以外の惑星や衛星に生命の痕跡を探すことは、この宇宙における生命の普遍性を探る上で不可欠であるとともに、天文学のみならず化学や生物学分野の研究にも深く関わる重要な課題となりつつある。

また、空間の概念、いわゆる宇宙観も天文学の発展によって変遷していった。地球が宇宙の中心であるという天動説は17世紀頃から次第に地動説へと変化し、星座をつくる恒星たちが、実は極めて遠方にある太陽のような恒星であることが明らかになり、20世紀には太陽さえも銀河系のかなり端にあることも分かってきた。我々が特別な存在ではないという視点を与えてくれつつある。地球が環境的に生命にとってバランスの取れた惑星である一方、そのバランスの危うさを明らかにすることで、気候変動やカーボンニュートラルに対する認識を深める一助に、天文学・宇宙物理学・惑星科学は大きく寄与している。

天文学は、長い時間軸で、かつ広い視点で物事を捉え、考察するために格好の基礎科学分野である。将来の社会を担う若手がこうした視点を獲得することは、未来の日本や世界にとって極めて重要であろう。この考えは、天文学分野が人材教育や広報、普及活動を積極的に行う原動力となっている。得られたデータは画像化され、積極的に公開されているが、そこで見られる多くのアート作品のような美しい天体画像は、多くの人を魅了し、最近では美術館でこれらの天体写真展が開催されるなど人気を博しており、国民のQOL（生活の質）の向上に貢献している。一方、日本は学校教育の中で本分野を学ぶようになっているだけでなく、生涯学習施設として科学館やプラネタリウム、公開天文台等の施設が多く存在し、教育に大きな貢献をしている。子供の頃に、こうした施設に通い続けて、世界的な学者になった例は少なくない。ちなみに、日本のプラネタリウム観客数は年間約600万人で、これはJリーグの観客動員数に匹敵している。

天文学は、もともと国際協力が必須であった。天文学の地上観測の場合、天球上の座標系や星座などを世界共通で決めておかないと、適切な情報交換ができないからである。突発的な天体现象が起こった場合、それを発見した後に継続的に観測する必要がある。発見地域が昼になると当然ながら見えなくなることが多いため、地球上の別の地域で観測を依頼する時には座標が必要であった。そのため、この種の国際学術団体としては極めて早期の1919年に国際天文学連合が日本を含む7か国で創立され、天球の座標系決定とともに88星座が制定されたのである。20世紀になると、天体観測手法が多様化していくと同時に、望遠鏡などの装置が大型化し、国際協力の必要性は別の意味で大きくなっていった。一国ではなかなか実現不可能な巨額のプロジェクトになるケースが生まれてきたからである。現在、多くの国際協力によるプロジェクトがあり、地上の大型望遠鏡

や宇宙の探査などが実現している。実際、本分野での研究論文の半数近くは国際共著論文である。こうした研究者の国際交流を通じて、社会全体の異文化への相互理解へ貢献していることは確かである。

天文学の社会への貢献は、これだけにとどまらない。天文学の観測には最先端の技術が必要であり、イノベーションを起こしている側面があるからである。天文学における研究開発によって発展した技術は、社会へ応用され、医療から空港のセキュリティまで、私たちの日常生活に不可欠なものを産んでいる。

電波天文学で開発された干渉計技術は、もともと広範囲に配置した多数の小型の電波望遠鏡で同時に同一の天体を観測し、その信号を電氣的に合成することで、非常に大きな望遠鏡で観測するのと同じ解像度を得る方法である。最近では地球上のいくつかの電波望遠鏡を組み合わせ、銀河中心のブラックホール・シャドウの画像化に成功したイベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトが有名である。この手法は「開口合成」とも呼ばれ、ノーベル賞を受賞した電波天文学者マーティン・ライルによって開発されたものだが、現在は核磁気共鳴画像法 (MRI) の医療診断における画像の解像度の向上やスキャン時間の短縮に貢献している。また、宇宙から飛来する高エネルギー放射線を観測する技術は、コンピュータ断層撮影 (CTスキャン) という医用画像診断技術の発展に寄与した。

電波天文学によって発見された星間分子HC₃Nを実験室で再現生成させようとする過程では、フラレンC₆₀が発見された。フラレンは、現在では医薬品開発や電子材料への応用にも使われ始めており、天文学者を含む発見者らは、1996年にノーベル化学賞を受賞している。そしてまた逆に、吸収分光研究の発展により、2015年にはフラレンが星間空間に存在することが証明され、長年の謎であったDIB [※] と呼ばれる宇宙から届く光に見られる吸収線群の原因の一つがこのフラレンであることも示された。これは、宇宙という極限環境下での現象の研究が、新たな化学分野の研究や実学に発展しただけではなく、フィードバックとして天文学にも影響を与えた良い例とも言える。

また、オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) の研究チームは、ブラックホールから放射される電波を解析するために開発した技術を用いて、無線で情報を伝送する新しい技術を開発した。電波信号は周囲の物体の表面で反射するために情報の伝達に乱れが生じるが、そのような環境でも電波を利用できるマイクロチップを開発したのである。この特許によって、現在のWi-Fiが生まれ、現代の我々の生活を支える技術の一つとなっている。

計算機分野では、膨大なデータを処理するための計算資源の確保の方法として、共通のネットワークを介したグリッドコンピューティング技術がある。その先駆的な例が19

99年に始まった代表電波天文学者による地球外知的生命体探査 SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) であった。一般家庭の膨大なPCを繋ぎ、アレシボ天文台で受信した信号のデータ解析を行うとともに、科学の重要課題の解明に市民が参加する市民科学プロジェクトとして、2020年3月で終了するまで、170万人以上が参加し、広報普及事業として成功を収めた。天文学分野では、その後、欧州を中心に「ギャラクシー・ズー」や日本の「ギャラクシー・クルーズ」などの市民科学プロジェクトに引き継がれ、成果を収めている。

また、現在、正確な時刻を維持するために天文学者は尽力している。世界中の様々な機関に数百個の原子時計を高精度で運用し、世界の時刻のベースとなる国際原子時 (TAI) を国際度量衡局 (BIPM) が管理している。一方、日常生活に合わせて使うのは地球の自転と公転を基にした世界時 (UT) で、BIPMと国際地球回転・基準系事業 (IERS) は、国際原子時を基に、天文観測から決まるUTとのずれが±0.9秒を超えないよう「うるう秒」による調整を加えた協定世界時 (UTC) を維持している。UTCは、我々の日常生活で用いる時刻であり、暦の基本となっていると言っても過言ではない。カーナビなどでお馴染みの全地球測位システム (GPS) にも、正確な時刻保時が必須であり、日常生活に欠かせないものとなっている。

最後に、学術と社会との関係において必ず考慮しなければならない問題として、天文学・宇宙物理学分野におけるジェンダー問題について触れておきたい。

天文学・宇宙物理学分野に関連の深い学協会として日本天文学会がある。同学会では、1999年に国内学協会ですべて初めて年会期間中の一時保育所を設置するなど、男女共同参画において先進的な取組を続けてきた。同学会の正会員数は、1980年代の約500名から現在の2000名以上へと大きく増加したが、正会員に占める女性比率は過去20年間にわたって13%前後でほぼ一定であり、有意な増加は見られていない。

2019年に同学会の男女共同参画委員会が実施した調査⁷では、天文学・宇宙物理学分野において女性比率が増加しない原因として、研究生活初期における影響が考察されている。その内容は、大学院進学から博士号取得くらいまでの期間において、進学にあたって女性は家族に反対される比率が男性より高いこと、女性は家庭や育児と仕事との両立を男性以上に強く意識する (させられている) こと、女性が担うことが多い改姓に伴う煩雑さなど、多岐にわたっている。

⁷ 馬場、浅井、石川、佐藤、信川、野村、古澤、町田、2021、天文月報、114、688
(https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/item/114-11_688.pdf)

なお、博士号取得後のキャリア形成については、女性だからという理由で就職において不利な扱いを受けたと感じる女性会員の割合は多くはないようだ。これは、例えば、第24期の日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会が行った博士号取得後の就職率に関する調査⁸で、2010年以前に博士号を取得した世代では任期なし職への就職率に男女差があるのに対して、それより若い世代ではこの差が解消されている傾向が示されていることとも整合している。

以上は、天文学・宇宙物理学の分野に限らず、研究者を目指す若手に共通の問題と言えよう。学术界全体で、さらなる積極的な取組が必要なところであろう。こうした取組の一環として、日本天文学会男女共同参画委員会では、他の学会とも協力しつつ「女子中高生の理系進路選択支援事業」などを通じて、積極的な女性研究者支援モデルの育成に取り組んできている。国立天文台では2015年4月に本部のある三鷹キャンパス内に職員及び研究会での一時保育が可能な保育施設「保育ルーム・星の子」を開設し、受け入れ人数を徐々に増やししながら運営を続けている。さらに、本分野での国際組織である国際天文学連合主催の国際シンポジウム358 “Astronomy for Equity, Diversity and Inclusion - a roadmap to action within the framework of the IAU centennial anniversary” を、日本学術会議物理学委員会IAU分科会の協力の下、あえて日本で開催したことを記しておきたい。国際天文学連合設立以来100年余の歴史で初めて正面からジェンダーを含む包括的なテーマでの歴史的な会合である。これらの取組が日本の現状を国際社会に恥じることのない、良い方向へと変える一助となったと信じたいところである。

⁸ 奥村、生田、2021、天文月報、114、289
(https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/item/114-4_289.pdf)

2 2010年代の成果と2030-2040年代の展望

20世紀の天文学・宇宙物理学の発展については、国内における当該分野の歴史的概観も含めて、2010年報告に詳しい記述がある。これを受けて、2010年報告の第2章では「21世紀の天文学・宇宙物理学の展望」が述べられている。ここでは、宇宙論、銀河、活動銀河核とブラックホール、星・高密度星・元素合成、星・惑星系形成、太陽系外惑星、太陽、粒子線・ニュートリノ・ダークマター、重力波、およびコンピュータシミュレーションの各項目について、天文学・宇宙物理学が今後目指すべき科学的目標と意義が俯瞰的に展望される。ここでは、これらの課題について、2010年代から現在に至る10年余りの進展を振り返り、2030-2040年代を展望する。

(1) 宇宙論

「進化する宇宙」という概念は、最も根源的な意味において人類の自然観、さらには哲学観にまで深い影響を与えたものとして、20世紀の科学が成し遂げた偉大な成果の一つである。自然科学としての宇宙論研究は、アインシュタインの一般相対性理論の構築（1916年）から始まり、ハッブル及びルメートルによる宇宙膨張の発見（1929年）、ガモフによるビッグバン理論の提案（1946年）、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の発見（1965年）、CMB角度異方性（温度ゆらぎ）の発見（1992年）、超新星観測による宇宙加速膨張の発見（1998年）などの革新的な成果を通じて、理論と観測の双方から進展してきた。天文学と素粒子物理学に基づき、宇宙の創生から現在に至る進化を統一的に理解することが宇宙論の目標である。

現在の宇宙の標準シナリオは、宇宙の始まりに起こったとされる急激な加速膨張（インフレーション）の中で生成された量子ゆらぎが種となり、宇宙の質量密度の大部分を占めるダークマターの重力の作用でゆらぎ（物質の空間分布の非一様性）が増幅され、現宇宙のあらゆる構造（銀河、銀河団、及び宇宙の大規模構造）を形成してきたというものである。一方、約138億年の宇宙史の後期にあたる約70億年前から宇宙は再び加速膨張期に入ったことが分かっている。重力の万有引力に打ち勝ち、加速膨張を引き起こしている謎のエネルギーとして、その場しのぎの説明としてダークエネルギーが「理論」に導入された。加速膨張はゆらぎをならず方向に働くため、宇宙の大規模構造はダークマターとダークエネルギーの競争によって進化してきた。つまり、宇宙膨張と宇宙構造の進化の研究は、表裏一体の問題として互いに深く関わっている。超新星の観測、CMB角度異方性の観測、銀河の3次元地図など、積年の様々な宇宙観測により、現宇宙の全エネルギー密度の組成は、約70%がダークエネルギー、約25%がダークマター、残りの約5%が通常物質、ということが分かっている。インフレーションが予言する原始ゆら

ぎの特性と合わせて、このエネルギー組成を仮定した宇宙の進化史のモデルが、 Λ CDMモデル[※]と呼ばれ、現在では宇宙の標準模型として確立している。しかし、この Λ CDMモデルでは宇宙の約95%が正体不明のダークエネルギー、ダークマターによって占められており、これらダーク成分の正体は、天文学にとどまらず21世紀科学の根幹を揺るがす問題になっている。

上述の急激な宇宙論の理論的、観測的研究に呼応して、2010年代から今まで日本においても宇宙論研究が大きく進展してきた。

CMBの研究では、かつては欧米がリードしていたが、2010年頃から、高エネルギー加速器研究機構（KEK）、東京大学、京都大学、JAXA宇宙科学研究所（ISAS）など国内にCMBの研究グループが組織され、戦略的にPOLARBEAR[※]などのCMB地上実験に国際パートナーとして参加し、装置開発、データ解析のノウハウ、経験を積み、また技術を習得してきた。これらの研究グループが中心となり、次世代の大型CMB地上実験（Simons Observatory及びCMB-S4）に参画しており、また日本主導のLiteBIRD衛星計画[26]を推進している。特に、LiteBIRDは、インフレーションの証拠となる原始重力波を起源とするCMBのBモード偏光の検出を第一目的とした独創的な計画である。実施体制も整いつつあり、また技術成熟度も高まっており、JAXAの戦略的中型2号機として採択され、2020年代後半の打ち上げを目指し、その検討が進んでいる。このように2010年以降の国内におけるCMBの実験的研究の進展は特筆すべき成果と言える。

一方、広い天域にわたる、多数の銀河の観測（以下、「銀河サーベイ」とする。）による宇宙論研究も大きく進展した。日本が主導し、プリンストン大学、台湾の研究者が参加する国際共同研究チームは、すばる望遠鏡の主焦点広視野カメラHyper Suprime-Cam (HSC) [※]を開発した。HSC国際チームは、2014年からすばる望遠鏡の計330夜数を費やし、これまでにない広い天域、また遠方宇宙にある暗い銀河まで見渡す、大規模な銀河イメージングサーベイを行った。すばるHSCの集光力、広視野、また高い結像性能（シャープなイメージ）により、すばるHSCのデータは宇宙構造が及ぼす背景銀河像への弱重力レンズ効果の精密測定を実現することに成功した。その結果、国際HSCチームは、HSCサーベイの約10%の初期データの弱重力レンズ効果の測定と、宇宙の標準模型である Λ CDMモデルの予言を詳細に比較し、宇宙論パラメータを高精度に測定した。例えば、現在の宇宙構造の成長度合いを特徴付ける物理パラメータである $S8$ [※]を約5%の精度で測定することに成功した。このすばるHSCの研究成果は、装置の開発、大規模サーベイの立案・実行、データ取得・解析、また物理解析の各々のステップについて、日本が主導して行った「観測的」精密宇宙論の初めての研究であり、特筆すべき進展と言える。

HSCサーベイを始めとし、2010年代には欧米で広天域銀河サーベイによる精密宇宙論が進展した。現在では、銀河サーベイは、宇宙背景放射（CMB）に並び、宇宙論パラメータを精密に測定する強力な手段になっている。さらに、ビッグバン後約38万年後の宇宙のスナップショットを測定するCMBと、宇宙構造が成長した後期宇宙を調べる銀河サーベイは相補的であり、二つを組み合わせることで約138億年の宇宙構造の進化史を調べることが可能になる。

Λ CDMモデルは、これら最新の宇宙論データの宇宙論観測量を基本的に良く説明できているが、宇宙論パラメータの測定精度を向上させた結果、 Λ CDMの綻びの示唆が見つかっている。一つは、CMBおよび銀河サーベイが支持するハッブル定数 H_0 の値と、近傍宇宙を直接観測して得られるハッブル定数 H_0 の値が一致しない問題、いわゆるハッブル定数の不一致（ H_0 不一致）問題である。もう一つは、CMBが支持する Λ CDMが予言する現宇宙の S_8 の値と、様々な銀河サーベイの観測量が示す S_8 の値に 2σ 程度の不一致、いわゆる S_8 問題である。これらは、 Λ CDMモデルの綻び、つまり新しい物理の兆候を示唆している可能性があり、活発に議論されている。例えば、ダークエネルギーが、アインシュタインの宇宙定数ではなく、初期宇宙で構造形成に影響を及ぼすシナリオ（early dark energyと呼ばれる）が、 H_0 不一致、 S_8 矛盾問題のどちらも解決できる可能性などが指摘されている。

HSCサーベイの弱重力レンズ効果は、電磁波では直接観測できないダークマターの空間分布を復元することができるため、上記の研究以外にも様々な研究成果が実現した。宇宙の大規模構造におけるダークマターと銀河の分布の比較、あるいは個々の銀河におけるダークマターと星の空間分布を統計的に比較する研究が行われた。つまり、宇宙の構造形成のなかで、ダークマターの重力の影響下でいかに星・銀河が形成され、銀河の空間分布が進化してきたのか、という問題が観測的かつ定量的に研究できるようになってきた。さらに、HSCデータを用いたアンドロメダ銀河の重力マイクロレンズ効果の探査から、ダークマターの有力候補の一つである原始ブラックホール（PBH）について、これまでにない精度で月質量程度のPBHの存在量を制限することに成功した。このように、HSCデータは、天の川銀河空間から銀河、さらに宇宙の大規模構造にわたる幅広いスケールに及ぶダークマターの「観測的」研究を可能にし、これらの天文学分野に飛躍的進展をもたらしたと言える。

今後の宇宙論が目指すべき方向性は、以下のものが考えられる。

- i) インフレーション宇宙の観測的検証、また現宇宙の構造の種である原始ゆらぎの特性（物理）の解明
- ii) 宇宙の標準模型 Λ CDMの徹底的検証および標準模型を超える新しい物理の探究
- iii) ダークマター、ダークエネルギーの正体の解明

iv) 膨張する宇宙における、ダークマターの空間集積、星形成史、多様な銀河の形成・進化に至る宇宙進化の観測的研究および統合的理論モデルの構築

各科学目標に対して、ターゲットになる観測量を定義し、物理的に意義がある制限、測定結果を出すための観測精度を達成することが、実験・観測のゴールになる。

日本が主導し、世界をリードする研究成果が期待できるのは、LiteBIRD及びすばるHSC・PFS[※]サーベイ計画である。日本が主導するLiteBIRD衛星計画はユニークであり、インフレーション起源のBモード偏光の探査に特化したデザインになっており、欧米では同様の計画がない、独創的な研究計画である。2024年から観測開始を予定しているすばる望遠鏡超広視野多天体分光器Prime Focus Spectrograph (PFS) も、8m級望遠鏡ではほかの計画がない、圧倒的な多天体の分光観測の能力を有し、ユニークな計画である。すばるHSC・PFSによる撮像・分光サーベイにより、暗い天体まで見渡す宇宙の3次元地図の作成が実現し、上述の科学目標のそれぞれについて相乗的な研究成果が期待できる。

欧米でも広天域銀河撮像・分光サーベイが計画されている。実質口径6.5mの専用望遠鏡を建設し、撮像サーベイを行うルービン天文台[※]、撮像及び低い波長分解能の分光サーベイを行うユークリッド (Euclid) 衛星[※]、撮像及び低い波長分解能の分光サーベイを行うNASAのローマン宇宙望遠鏡計画[※][19]、原始非ガウス性の検出を目標とし、全天の多バンド撮像サーベイを行うNASAの衛星計画SPHEREx (口径20cm、2025年打ち上げ予定) などである。これらの究極的な大型計画により、宇宙論の研究は2020-2030年代に大きく進展することは間違いない。

宇宙論研究に必要な宇宙地図のデータはビッグデータであり、そのデータ処理、データ解析はチャレンジングな問題になっている。データ解析を高精度に行うソフトウェアが重要であることは言うまでもないが、データから隈なく宇宙論情報を引き出すために、機械学習・AIを用いた手法が今後ますます威力を発揮するだろう。ビッグデータ、データサイエンスを行う手法・技術の開発、また人材育成は必要であり、宇宙論研究はその研究の開拓には絶好の分野と言える。

さらに、近年進展が著しい重力波観測に基づく宇宙論研究も大きく進展するだろう。重力波観測とほかの宇宙観測を組み合わせること、いわゆるマルチメッセンジャー天文学により、例えばハッブル定数を正確に測定できる新たな手段になり、 H_0 不一致問題をこれまでの手法とは独立に調べることができる。また、CMBの波長スケール (Gpc) から、数km (さらには短波長まで) の背景重力波の存在を探査することで、インフレーションの物理に迫ることができる。短波長の背景重力波は、原始ブラックホールの生成過程にも関連している可能性がある。

(2) 銀河

銀河は宇宙における物質分布の基本的なユニットであるがゆえに、その研究は本質的に多様である。その多様なテーマの中から、2010年報告では、当時から10年の銀河研究の方向性として以下の二つを挙げている。

(i) 究極の銀河観測フロンティア

宇宙最遠方、すなわち最古と考えられる第1世代の銀河の探査は、すばる望遠鏡で到達した赤方偏移6～7の輝線銀河探査（水素原子の出す輝線で輝いている銀河）を拡張し、宇宙再電離がどの時代にどのように完了したかを解明し、また、アルマ望遠鏡を用いて第1世代の銀河がいつの時代からどのように誕生したのかを明らかにする。

(ii) 俯瞰から理解へ

銀河宇宙の歴史・進化を、銀河系（天の川銀河）を始めとする現在の銀河の姿と統一的に結び付ける。すなわち、宇宙年齢にわたり、銀河のたどる物理的な進化の筋道を系統的に分類し、それによって現在の宇宙で観測される銀河の姿を矛盾なく説明できることが「俯瞰から理解へ」の本質である。そのための観測には、地上超大型望遠鏡、次世代宇宙望遠鏡が主導的かつ大きな役割を果たす。

最遠方天体の探査はこの10年間で大きく進展した。例えば、アルマ望遠鏡により「前」宇宙再電離期と言える赤方偏移9の銀河の酸素輝線が確認された。ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST[※]）は最遠方銀河探査を大きく加速した。初期観測データの公開からわずか1か月で、赤方偏移12から17の銀河候補が多数報告され、3か月後には赤方偏移13.20の連続光ライマンブレイクの分光確認にも成功した。JWSTが発見した明るい大質量銀河候補の個数密度は非常に多く、標準宇宙モデルによる構造形成理論へのクリティカルな制限となる。特に、赤方偏移10を超える時代の大質量銀河の分光確認と、その個数密度測定が焦点である。また、初代キューサー探査も超大質量ブラックホール形成理論を非常に強く制限する。2020年代後半には、欧州のユークリッド衛星[※]や米国のローマン宇宙望遠鏡[※][19]による超広視野近赤外線探査がこの観点で大きな役割を果たすだろう。日本でも、2030年代の超広視野近赤外線探査衛星GREX-PLUS[30]の検討が進んでいる。

宇宙再電離過程の研究では、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラHyper Suprime-Cam（HSC）[※]に搭載された狭帯域フィルターによる、赤方偏移5から7の輝線銀河の撮像探査が本質的な貢献を続けている。Prime Focus Spectrograph（PFS）[※]が登場する2020年代後半には分光的な研究へ質的に深化することが期待できる。しかし、再電離の光源

や再電離トポロジーの解明はいまだ道半ばである。より大規模化、精密化した宇宙再電離数値シミュレーションの助けを借りて観測結果の解釈を進めることが必要であろう。

宇宙の星形成史の研究において、すばる望遠鏡HSC[※]による赤方偏移4から7の星形成銀河の超大統計サンプル構築は、遠方銀河研究の一つの集大成と言える。これにより、銀河クラスタリング解析に基づくダークマターハロー質量の測定に成功し、ハロー質量と恒星質量の比「星形成効率」が推定できた。それを標準構造形成論に基づくハロー形成史と組み合わせることで、赤方偏移7（宇宙年齢10億年弱）から0（宇宙年齢138億年、現在）にわたる宇宙の星形成史の概形の物理を理解することができた。

銀河星形成活動の終焉「クエンチング」は、大質量ブラックホールを擁する活動銀河核からのフィードバックなのか、銀河数密度に応じた環境効果なのか、あるいは別の過程なのか、その解明は長年の課題である。数億年以上星形成をしていない「パッシブ銀河」は赤方偏移4まで分光的に確認されている。より高赤方偏移でのパッシブ銀河探査には広視野近赤外線観測が必要となり、すばる望遠鏡ULTIMATE[※]の貢献が期待される。

アルマ望遠鏡は、遠方銀河の星間ガスやダスト（ケイ酸塩や炭素物質の固体微粒子、宇宙塵）の観測を大きく開拓した。例えば、赤方偏移8を超える銀河のダストの検出に成功している。また、可視光や近赤外線では全く見えず、サブミリ波の連続光や輝線でのみ見える遠方銀河種族が発見されている。今後もアルマ2として機能強化し、この分野を牽引するだろう。星間ガスの観測は次世代長基線電波干渉計（ngVLA）[32]によっても拡充されるだろう。

銀河観測研究の新しい潮流として、地上8-10m級望遠鏡による可視光分光観測で、銀河間中性水素ガスの分布を明らかにするトモグラフィや、銀河周囲のガスとそこでの元素汚染の理解が進展した。銀河は宇宙空間に孤立しているのではなく、銀河間空間に存在するガスと相互作用しながら進化する描像が確立しつつある。今後もPFSや、30m望遠鏡（TMT）[23]を始めとする地上超大型望遠鏡により大きな発展が見込まれる。理論的には、銀河を、銀河間ガス、銀河周囲ガス、星間ガス、恒星系が物質とエネルギーを交換しながら進化する非平衡開放系として改めて捉え直す視点も興味深いだろう。

銀河形態学は、エドウィン・ハッブルの分類以来、銀河研究の主要な一翼を担ってきた。すばる望遠鏡HSCの可視光での高画質を活用した遠方銀河の形態学も進んでいる。機械学習との親和性が高く、分野連携の好例と言えよう。さらに、JWSTの近中間赤外線での高画質を活用すれば、ほぼ全宇宙史にわたる銀河形態学も可能となろう。

(3) 活動銀河核と巨大質量ブラックホール

銀河中心核の巨大質量ブラックホールは、母銀河の進化に深く関わり（共進化）、銀

河団の構造にも大きな影響を与えるなど、宇宙の重要な基本構成要素であることが分かってきた。その起源、及び環境との相互作用を解明することは、宇宙史の理解において不可欠で本質的な天文学的課題である。2010年報告では、電磁波を用いた巨大質量ブラックホールの研究として、以下の三つの方向性を述べている。

(i) ブラックホールと環境の共通化

巨大質量ブラックホールは、成長期間の大部分で激しい星生成を伴って母銀河と共に進化するはずだが、巨大質量ブラックホールと銀河のどちらが先に質量成長を遂げたか、あるいは両者が常に協調して質量を増加させたのか、といった共進化の描像は不明である。そこで、大面積のX線望遠鏡と多波長大型望遠鏡との密接な連携によりこの過程を観測する。

(ii) ブラックホール降着流とジェットの物理

広い範囲のブラックホール質量及び質量降着率下での降着流の物理を統一的に理解する。特に、非常に高い質量降着率下での降着流の振舞、相対論的宇宙ジェットの起源の理解が重要。そのために、銀河系内X線連星・超強度X線源・活動銀河核の多波長観測と、多次元シミュレーションを含めた理論的研究との連携を行う。

(iii) ミリ波・サブミリ波領域でのブラックホール撮像観測

ミリ波・サブミリ波VLBIにより、いて座A* (Sgr A*^[※]) やM87中心核のブラックホールシャドウを撮像し、ブラックホール存在の直接的な証拠を与える。また、強重力場中での一般相対性理論効果の検証を行う。

巨大質量ブラックホール進化の研究に関する過去10年における大きな進展として、すばるHSC^[※]、Pan-STARRS^[※]、DES^[※]等の可視光高感度広域サーベイ、そしてUKIDSS^[※]、VIKING^[※]等の近赤外線広域サーベイが精力的に行われた結果、赤方偏移6程度から約7.6までの初期宇宙に多くのクェーサー（明るい活動銀河核）が発見されたことが挙げられる。これらのクェーサーのブラックホール質量は太陽の10億倍程度に達するものもあり、ビッグバンから10億年未満という短期間のうちにこのような巨大質量をブラックホールが獲得するための物理について精力的な理論研究が展開されている。また、アルマ望遠鏡によりこれらの高赤方偏移クェーサーの母銀河の力学質量も見積もられ、初期宇宙から現在に至る巨大質量ブラックホールと銀河の共進化についても観測的に議論できるようになってきた。今後は、東大アタカマ望遠鏡^[※]、ユークリッド衛星^[※]、ローマン宇宙望遠鏡^[※] [19]、GREX-PLUS衛星 [30]等による近赤外線高感度広域サーベイで赤方偏移8を超すクェーサーも多く見つかる予想され、それらの母銀河についてもアルマ望遠鏡やJWST^[※]により調査が進むはずである。更にTMT [23]等の地上超大型光学望遠

鏡やngVLA[32]による高空間分解観測により、高赤方偏移クェーサーにおける巨大質量ブラックホールの周囲からの電離ガス・分子ガスアウトフローが母銀河の進化に及ぼす影響を直接捉えられると期待される。

巨大質量ブラックホールへの降着流、及び巨大質量ブラックホール近傍から吹き出す相対論的ジェットや高速アウトフローの理解に向けて、スーパーコンピュータが果たした役割は大きい。具体的には、「京」や「富岳」などを駆使した詳細な輻射磁気流体シミュレーションにより、ガス降着率に応じて質的に異なる降着モードが生じる様子や、輻射圧や磁気圧によりガスが外向きに加速する様子が分かってきた。

一方、東アジアVLBI観測網 (EAVN) のような長基線センチ波VLBIを用いて高角度分解能を実現することで、ジェットの根元部分の撮像観測や、ジェット加速を示すモニタ観測が可能になってきた。今後は、降着流とジェットの加速を統一的に理解することや、母銀河スケールからブラックホールスケールにガスが降着する物理、ブラックホールスケールからのジェットやアウトフローが母銀河スケールに及ぼす影響を解明することが課題となる。特に高速アウトフローの実態解明の観点で、XRISM衛星[※]に搭載されるX線マイクロカロリメータが可能にするX線高分散分光観測への期待は大きい。XRISM衛星で得られる質的に新しい理解や新たに生じる謎は、その後のアテナ衛星 (Athena) [14]による更に高感度なX線高分散分光観測に向けた布石となるであろう。

巨大質量ブラックホール存在の確固たる証拠を得るための観測についても、大きな進展があった。銀河系中心部の恒星運動の継続的な精密観測により、太陽の約400万倍の質量が銀河系中心のコンパクトな領域内に偏在することが確定的になり、その成果に対しては2020年にノーベル物理学賞が授与された。そして、さらに直接的な観測により巨大質量ブラックホールを捉えたのがイベント・ホライズン・テレスコープ (Event Horizon Telescope; EHT) [※]である。地球規模のミリ波VLBIであるEHTは、2019年にはM87について、そして2022年には銀河系について、それぞれの中心核にある巨大質量ブラックホールのシャドー(穴)と考えられる構造を画像として取得することに史上初めて成功した。この成功の背景に、スパースモデリングの手法による超解像技術といった新しいデータ解析方法が活用されていることは、特筆すべきである。今後は、参加アンテナを増加させたEHT観測を通して、さらに像質の高い画像でシャドーの検出を確固たるものにするとともに、時間分解を行った動画の取得を狙うことになるだろう。より将来には、宇宙空間で超長基線重力波干渉計を運用し、巨大質量ブラックホール同士の合体现象を重力波で直接的に調査できる時代が来ると期待される。

(4) 星・高密度星・元素合成

星の進化は天文学・宇宙物理学における最も基礎的な物理過程として、宇宙の化学進化や諸現象を統一的に理解する上で必要不可欠である。2010年報告では、以下の方向性が述べられている。

(i) ガンマ線バースト：起源の解明

ガンマ線バーストを引き起こす爆発現象が、どういう星のどういう条件の下で起きるのか、通常の超新星爆発と何が異なるのか、の解明が次の重要な課題となっている（重力崩壊型超新星の多様性の理解）。

また、継続時間の短いガンマ線バーストの起源についてはいまだ解明されていない。（連星中性子星の合体ではないかとも言われている。その場合、究極的な証明は重力波検出を待たねばならないだろう。）

(ii) Ia型超新星モデル：宇宙の加速膨張と鉄の起源

Ia型超新星は標準光源として遠方宇宙における距離測定の主役であり、宇宙の加速膨張の発見に本質的な役割を果たした。そのメカニズムは、連星白色矮星の核燃焼の暴走だと考えられているが、どのような連星がどのような進化を経てこの現象を起こすのかについては論争が続いており、解明が待たれる。

(iii) 中性子星とブラックホール：形成・進化モデルの確立

星質量ブラックホールと巨大質量ブラックホールの起源と、相互の関係、進化系列は、ブラックホール形成過程の解明に残された課題の一つである。

パルサーの放射機構はまだ不明な点も多く、また中性子星内部の物質状態は物性物理学とも関連しており、基礎物理学の観点からも大きな意義を持つ研究対象である。

(iv) 銀河考古学：宇宙の元素循環

鉄よりも重い原子核の起源や、我々の銀河系の形成初期の姿の再構築（銀河考古学）など、銀河進化の研究と相補的にさらなる発展が期待されている。

星・高密度星・元素合成の研究は、過去約10年で重力波や高エネルギーニュートリノという新たなメッセンジャーの直接観測が実現したことで、飛躍的な進歩を遂げている。また、ガイア衛星（Gaia[※]）による恒星の距離・運動の網羅的な測定や、近年大きく発展している様々な波長における時間領域観測など、質的に新しい観測データによって大きく理解が進むとともに、新たな謎も明らかになっている。

2015年にLIGO（Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory）[※]によって初めて観測された重力波は、太陽質量の約30倍のブラックホールの合体によるもので、それまでX線連星などの観測では知られていなかった質量のブラックホールが宇宙に存在

することが明らかになった。2022年時点で、重力波で観測されたブラックホール合体の数は既に80例を超えており、合体後の質量が100太陽質量を超える中間質量ブラックホールの存在が明らかになるなど、宇宙における(連星)ブラックホールの質量分布が測定できるまでに研究が急速に進んでいる。

2017年には、中性子星合体からの重力波が観測され、あらゆる波長の電磁波でもその対応天体が同定された。特に、重力波検出直後にガンマ線バーストが観測されたことから、中性子星合体がショートガンマ線バーストの起源であるという「究極的な証明」(2010年報告)が実現している。また、中性子星合体からの可視光・赤外線対応天体も発見されたことで、中性子星合体で速い中性子星捕獲反応(r-process[※])が起きていることが確認され、50年以上明らかにならなかったr-process元素合成のサイトの直接検証が実現した。さらに、重力波観測からは中性子星の潮汐変形に関する情報も得られており、X線による中性子星半径の測定と併せて、中性子星内部の高密度状態方程式の研究も新たな展開を迎えている。

元素合成サイトの研究の進展とあいまって、銀河系・矮小銀河の恒星の観測による宇宙の元素循環の研究も大きく進んでいる。特に、ガイア衛星による恒星の6次元位相空間情報の測定から、銀河系内の恒星の降着史を辿ることができるようになったことで、運動学的に分解した恒星種族ごとの化学進化の研究が可能となった。さらに、矮小銀河の恒星の元素組成の測定によって、中性子星合体のような頻度の低い爆発現象における元素合成も検証されている。

時間領域天文学の発展によって、これまで知られていなかった天体現象が次々と明らかになったことも、この10年の研究の進歩を語る上では欠かせない。特に、電波領域では高速電波バースト(Fast Radio Burst; FRB)[※]というミリ秒程度の突発的な放射が発見されている。近年、銀河系内のマグネター[※]からも同様の現象が観測されたことで、マグネターが少なくとも一部のFRBの起源であると考えられており、FRBの理解を通してマグネター、さらには一般的なパルサーの放射機構の理解が進むことも期待されている。

主に可視光から始まった時間領域天文学は、全波長に広がっており、様々な時間領域をカバーするように発展している。また、このような時間領域観測は、重力波・ニュートリノとのマルチメッセンジャー観測とも親和性が高い。例えば、IceCube実験[※][10]で観測されている高エネルギーニュートリノはまだその起源が解明されておらず、マルチメッセンジャー観測によって天体を同定することができれば、宇宙の高エネルギー宇宙線・ニュートリノの起源を明らかにすることができるだろう。また、重力波観測は「多波長」化が進むことが期待される。宇宙重力波望遠鏡LISA[34]では、銀河系内の連星白

色矮星からの重力波が観測されることが期待されており、Ia型超新星に至る連星系の多様性が明らかになるだろう。このように、2030-2040年代には未開の時間領域の開拓、新しいメッセンジャーの獲得が進むことで、恒星進化・連星進化の理解、そしてその最終段階である高密度星や爆発現象の物理や元素合成の理解が進むことが期待される。

(5) 星・惑星系形成と星間化学

星の形成は、宇宙における最も基本的な構造形成過程であるとともに、星間物質から惑星系物質への物質進化の場でもある。「我々が住む地球のこの素晴らしい環境が宇宙の中でどのように生まれてきたのか」という根源的な問いに答えるために、我々は、「構造形成」という観点のみならず物質（化学）進化という観点からもその進化を捉えることが必要である。一方で、そのような物理・化学進化史を明らかにするには、非常に大きなダイナミックスケールで関係する物理・化学過程を調べるが必要不可欠であり、観測装置や計算機能力などの制約から研究が立ち後れていた。しかし、2010年以降、アルマ望遠鏡やVLA[※]、NOEMA[※]、IRAM 30m望遠鏡[※]、Yebes 40m望遠鏡[※]など様々な電波望遠鏡が運用開始あるいは高感度化・高観測効率化され、この10年余りで研究は大きく進展した。星の誕生の大まかなあらすじが明らかになってきた一方、様々な未解決問題が残されているのみならず、惑星形成に至っては、これまでの太陽系形成理論の常識（「京都モデル」などに代表される）を覆すような新たな発見もあった。また、星や惑星が形成される場の物質組成が詳細に観測できるようになったことから、宇宙における様々な化学反応のプロセスや、それらが化学進化に与える影響、さらには星・惑星形成そのものへの影響など、次々に解明すべき新たな謎が生まれている。観測的研究により、星・惑星形成の多様性、そしてそれに伴う物質進化の多様性が見えてきた結果とも言える。以下に、新たに出てきた謎を含め、今後解明されるべき重要な課題をまとめる。

(i) 物質循環のダイナミクス

分子雲やフィラメント構造の形成過程、星間・銀河間プラズマを含むガスダイナミクス、元素合成史が与える構造形成過程への影響、星間空間への重元素の放出、ダストの生成・破壊過程、磁場や乱流の起源、宇宙線の起源とその物質進化・星形成への影響など、様々な事象をより大きなスケールでの現象と繋げ、総合的に物質循環を理解することが重要となっている。

(ii) 星形成の多様性とその起源

誕生する星の質量分布（初期質量関数）は、銀河と宇宙の進化に密接に結び付いた星形成研究の究極の課題である。星の初期質量関数と分子雲コアの質量関数の関係、

磁場や乱流の効果など星形成効率を決める要素の解明、銀河スケールでの現象が与える影響の解明、大質量星形成過程の解明、さらには星の誕生が初期宇宙そのものへ与えた影響など、数多くの未解決課題がある。

(iii) 惑星・惑星系の多様性とその起源

アルマ望遠鏡、すばる、VLAなどによる観測で、原始惑星系円盤内には形成途上の惑星が刻んだ痕跡と見られるリング状構造が普遍的に存在し、かつ、惑星形成のタイミングが想定よりもかなり早い進化段階で進んでいる可能性が分かってきた。このため、惑星形成の舞台である原始惑星系円盤の形成と進化の解明は、惑星系の多様性の理解という観点のみならず、発見されている太陽系外惑星との関係や太陽系の起源といった観点からもますます重要な研究課題となっている。さらには、円盤内でのダストの成長過程の解明も、地球のような岩石惑星の起源解明に向け、重要な課題として注目されている。

(iv) 星間化学

近年の星間化学は、二つの方向性で目覚ましい進展を見せている。第一は、惑星形成の舞台である原始惑星系円盤の化学組成の研究である。観測の感度・分解能の向上に伴い、物質が円盤へ持ち込まれる際の降着衝撃波領域など小スケールでの組成変化を捉えることの重要性や、原始惑星系円盤における様々な分子の「雪線（スノーライン）」の同定の重要性などが、化学進化の視点のみならず惑星形成の物理過程の理解においても重要であることが見えてきた。第二の方向性は、アミノ酸の前駆体となる分子や、生体を構成する物質の材料となるような大型の有機分子、炭素を五つ以上含むような環状の大型分子などがミリ波・センチ波帯望遠鏡の高感度化で次々に発見されたことである。これらの分子の生成過程の解明が、生命の起源の解明とも繋がり得る極めて重要な課題として注目されている。

項目(iii)、(iv)は特にこの10年で大きく研究が進展した分野と言えるだろう。今後、もし地球軌道に迫る高空間分解能で惑星形成の現場を観測することができるようになれば、地球のような岩石惑星の起源やその存在の普遍性の理解のみならず、そこで起こる様々な化学プロセスの理解を通して、我々がどこからきたのか、という根源的問いに直接迫り得る極めて大きなステップとなるだろう。その意味で、宇宙生物学研究にも基盤的知見を与えると期待される。チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星やリュウグウなど地球外の太陽系始原物質探査研究も「ロゼッタ探査機」[*]や「はやぶさ2」などにより大きく進みつつあり、それらの結果と惑星系形成に伴う化学進化の研究を繋げることも可能となると期待される。また、項目(i)(ii)の研究の進展により銀河スケールでの現象

と星形成の多様性を結び付ける大局的な星形成論を確立することができれば、宇宙における太陽系の存在価値の理解にも繋がるだろう。この分野の研究は、天文学が物理学のみならず化学や鉱物学、環境学、分子科学などの関連分野との垣根を越えて大きく発展する将来へと繋がる。

(6) 太陽系外惑星

1995年の太陽型恒星ペガサス座51番星を周回する惑星の発見（2019年ノーベル物理学賞）を契機に、太陽系外惑星の観測は運任せのプラネットハンティングではなくなっただけでなく、今や分野を超えた多数の研究者が参加する現代天文学の最重要分野の一つとなった。実際、いくつかの将来大型ミッションのサイエンスドライバーを担うまでに至っている。わずか四半世紀の間に、視線速度法やトランジット法など、独立した様々な手法で数千個の系外惑星が検出された。現在は、惑星のサイズ（質量）と軌道の多様性を発見する「惑星探索」の時代から、多種多様な太陽系外惑星の密度（内部構造）や大気の高多様性に迫る「惑星評価（キャラクタリゼーション）」の時代になりつつある。さらに、観測手法や解析手法の高精度化に伴い、巨大惑星だけでなく地球型惑星の開拓に拍車がかかっている。また、これまでの太陽型星における惑星探査から、M型星[※]などの低質量星や若い恒星における惑星探査も進みつつある。太陽近傍の恒星周りの地球型惑星は、将来の生命兆候探査の重要な観測対象になる。過去10年間の進展と今後10-20年の展望としては、具体的には以下のものが挙げられる。日本でもこの10年間で、すばる望遠鏡による直接撮像、赤外線視線速度法、トランジット法ネットワークの構築などで大きな進展があった。

(i) 惑星統計

2009年に打ち上げられたNASA/ケプラー衛星 (Kepler) は、太陽型恒星を周回する比較的短周期（85日未満）の惑星の統計を解明し、海王星より小さな惑星（スーパーアースやミニネプチューンなど）の頻度が多いこと、及び巨大惑星（ホットジュピター）の頻度が数%と少ないことを示した。この結果は、地上視線速度法の結果とほぼ一致している。ケプラー衛星はハビタブルゾーンにある地球型惑星の頻度についても、誤差は大きいながらも初めて10%程度であると言及した。また、M型星の惑星頻度についても、太陽型星よりも大きいことを示唆した。

日本も貢献している2027年打ち上げ予定のNASA/ローマン宇宙望遠鏡[※][19]は、ケプラー衛星ではカバーできなかった、より長周期の惑星の頻度について、重力マイクロレンズ法によって解明することを目指す。両望遠鏡の結果を併せることにより、様々

な軌道にある地球質量程度までの惑星の統計が完成すると期待される（ただし、主に検出される主星のタイプは異なる）。一方、ケプラー衛星や重力マイクロレンズ法で検出された惑星は追観測に向かないため、キャラクターゼーションはテス衛星（TESS）[※]や地上望遠鏡で発見された近傍の恒星周りの惑星が中心となる。

（ii） 惑星内部構造・惑星大気

視線速度法による惑星質量下限値とトランジット法による惑星半径・軌道傾斜角のデータから惑星の平均密度が決定される。これらを惑星内部構造及び大気モデルと比較することによって、ガス惑星・岩石惑星の区別だけでなく、惑星内部・大気の様々な組成が推定された。その結果、太陽系外惑星は惑星内部構造・惑星大気も多様であることが示された。2026年打ち上げ予定のESA[※]/プラトン衛星（PLATO）は、近傍の恒星の惑星半径をトランジット測光により精密に決定し、とりわけ地球型惑星の惑星評価を狙う。

一方、トランジット分光は惑星大気上層を通過する光を分析し、惑星大気中の様々な原子・分子を検出する。巨大惑星からスーパーアースについてはハッブル宇宙望遠鏡などにより水蒸気を含むいくつかの大気中の分子・原子が検出されている。2029年打ち上げ予定のESA/アリエル衛星（ARIEL）は、1000個以上の系外惑星の精密トランジット分光を行う計画である。2030年代のTMT[23]などの地上30m級望遠鏡においても多数の系外惑星のトランジット分光が進む。これらの膨大なデータに基づく汎用的な惑星内部構造・惑星大気モデルの構築が期待される。

さらに、地上高分散分光器を用いて、惑星の位相変化に伴う惑星大気中の分子・原子を相関によって検出する手法は2010年以降急速に進展している。実験室における分子分光の進展とともに、地上30m級望遠鏡において最も発展する分野と期待される。

（iii） 直接撮像・分光

惑星の直接撮像と分光は究極のゴールである。巨大ガス惑星に関しては、すばる望遠鏡など8m級地上望遠鏡により直接撮像・分光が実現された。また、JWST宇宙望遠鏡[※]では、地上では難しい $5\ \mu\text{m}$ 以上の波長での直接撮像も実現された。これらにより、主星から離れた巨大ガス惑星の大気組成が解明される。また直接撮像はトランジット法では困難な若い惑星や原始惑星の検出が可能であり、惑星進化の始状態を理解する上で重要となる。一方、高コントラスト性能を必要としない孤立した褐色矮星や浮遊惑星の直接撮像と分光は、それら自身がユニークな中間的天体であるだけでなく、恒星を周回する惑星との比較研究上重要である。

TMTなどの地上30m級望遠鏡における直接撮像と分光への期待は極めて大きい。とりわけ、太陽近傍のM型星周りの地球型惑星の直接撮像（近赤外線）、数は限られるが太陽近傍のG型星[※]周りの地球型惑星（中間赤外線）が重要である。すばる望遠鏡は、超補償光学系などの技術開発のためのテストベッドとしても重要である。また、多数の浮遊惑星の赤外線分光観測が可能となり、伴星型惑星との比較研究が進む。

2040年代の6 m級高コントラスト宇宙望遠鏡においては、様々な種類の恒星周りの地球型惑星の直接撮像と分光がサイエンスドライバーとなっている（iv参照）。ローマン宇宙望遠鏡[※][19]による直接撮像は、宇宙望遠鏡における高コントラスト技術実証でもある。

(iv) ハビタブル地球型惑星とアストロバイオロジー

近年の高精度視線速度観測によって、プロキシマケンタウリ[※]やティーガーデン星[※]などの近傍恒星周りの地球サイズ惑星やスーパーアースのうち、ハビタブルゾーンに位置する惑星（適温惑星）の存在が明らかになった。また、2018年に打ち上げられたテス衛星（TESS）によるトランジット観測によって、5000個を超える系外惑星候補が検出されており、地球サイズに迫る惑星も含まれる。多数の惑星候補をいち早く確認するための三色同時撮像カメラMuSCATを用いた地上望遠鏡トランジットネットワークは重要な貢献をしている。テス衛星で発見された惑星の多くは、赤外線ですく可視光で暗いM型星周りの惑星であり、すばるIRD[※]のような高精度赤外線分光器による観測も重要である。

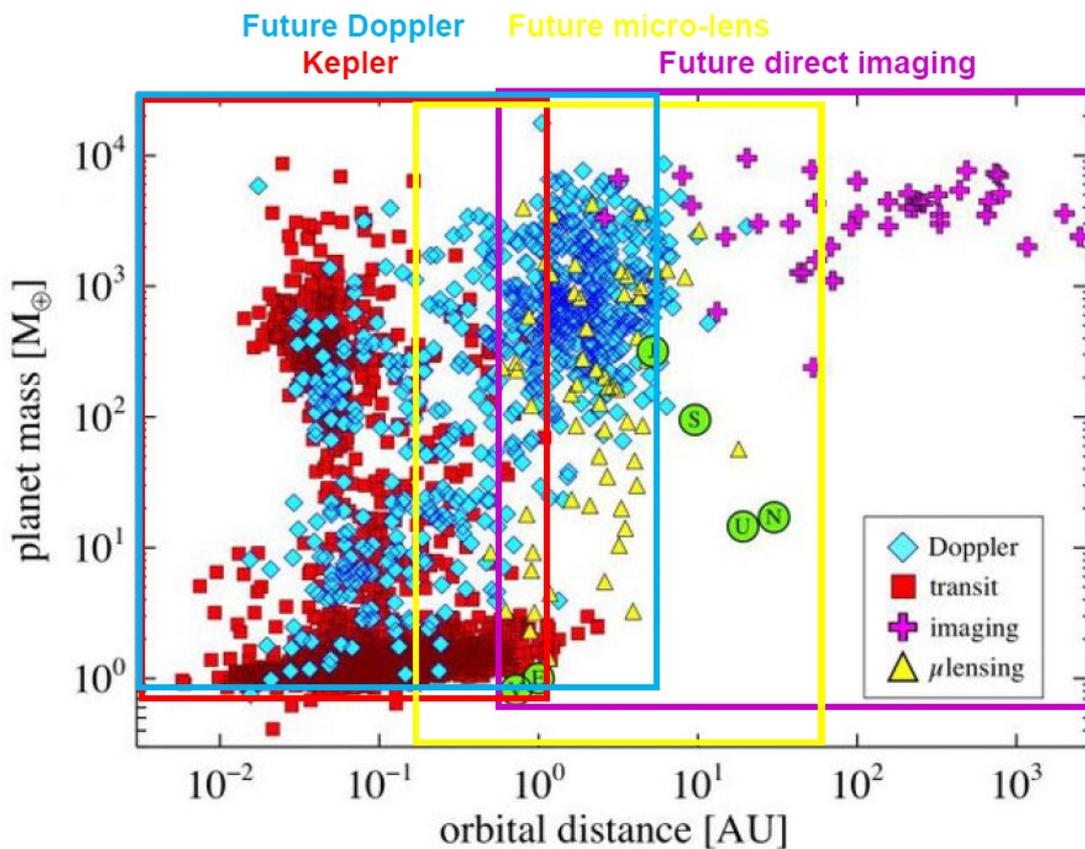
2022年にファーストライトを迎えたJWSTは巨大惑星からトラピスト1惑星系[※]のような地球型惑星までのさまざまなトランジット観測により惑星大気分子、とりわけ、水の検出を目指す。TMTなどの地上30m級望遠鏡に搭載される赤外線分光器IRIS[※]や高分散分光器MODHIS[※]はスーパーアースのトランジット分光を展開し、その大気組成を解明する。

2040年代の6 m級高コントラスト宇宙望遠鏡（Habitable Worlds Observatory）[20]は、人類の根源的な問いである「宇宙で我々は唯一の存在なのか？」に答えるミッションである。そのために、近傍の太陽型恒星を含む地球型惑星系を直接に検出し、分析する。一方、それ以外の多彩な天文学にも応用可能な、紫外線・可視光・近赤外線望遠鏡となっている。

これらの観測データと生命の議論を結ぶためには、惑星大気における生命兆候のリモートセンシング研究が不可欠である。様々なバイオシグナチャーの提案とその地球上での実験・理論の進展が必要である。

(v) 汎惑星系形成・進化モデル

多様な系外惑星の発見を契機として、太陽系及び系外の太陽型星周りの惑星系の形成や進化モデルの再構築が進行中である。また、M型星や褐色矮星を含む様々な質量の天体の周りの惑星系を制約する上では、多様な惑星系の発見だけではなく、データ数を増やした統計的議論が必要である。また、惑星系の進化の解明には、年齢の大きな惑星系だけでなく数多くの若い惑星と原始惑星系円盤の観測を展開する必要がある。これらのデータ数が今後増加するに伴い、惑星系一般に適用可能な統一的な「汎惑星系形成・進化モデル」の構築が可能となるだろう。さらに、太陽系外衛星の確実な観測例が増加すれば、地球型惑星形成の最終段階である巨大衝突過程の理解、そして衛星系形成を含めた巨大惑星形成の統一的理解の進展も期待できる。



図：系外惑星及び系内惑星の軌道（地球・太陽の距離単位）と惑星質量（地球質量単位）の分布図

(出典) Winn & Fabrycky (2015 の図 1 をもとに分科会にて作成)

ケプラー衛星のデータとローマン宇宙望遠鏡によるマイクロレンズ法で地球質量までの統計がほぼ完成するほか、ドップラー法、直接法でも地球質量の惑星の検出と特徴付けが可能となる。

(7) 太陽

太陽は、我々に最も近い恒星であるという点で、天文学における最も基礎的な観測対象である。その詳細な観測を通じて、より普遍的に恒星の性質を理解することができる。また、太陽は地球上の生命や気象現象のエネルギー源であるという意味において、地球科学や地球環境科学の基礎でもある。

太陽物理学分野の基本課題と、それぞれの近年の進展と今後10–20年の展望は、以下に要約される。

(i) 外層大気加熱・恒星風の形成とダイナミクス (コロナ加熱・太陽風・彩層ダイナミクス)

太陽の表面 (光球) 温度はおよそ6000度であるのに対し、その上空には恒常的に1万度の彩層、100万度のコロナ、さらには太陽風領域が広がる。外層大気がいかに加熱され、恒星風がいかに加速されるのかという謎に取り組むためには、光球底での熱対流乱流による擾乱発生から、その輸送を経て、彩層・コロナや恒星風へのエネルギー注入までを全て理解する必要がある。「ひので」衛星[※]は、エネルギー輸送を担うAlfvén波の同定などの貢献を行った。NASAのHi-Cロケット実験では、ナノフレア時の磁気ループの捻れを示唆する高解像度画像が得られている。また、NASAのIRISミッション[※]、米国国立太陽観測所 (NSO) の大型地上太陽望遠鏡 (ダニエル K. イノウエ望遠鏡; DKIST) [※]も彩層ダイナミクスの解明が主要なターゲットとなっている。さらにSOLAR-C[2]は、 10^4 から 10^7 Kまでの、彩層からコロナを繋ぐ磁気プラズマ診断を行い、コロナ加熱機構との関連を発生・伝播・散逸まで結合した形で包括的・定量的に理解することを目指す。

(ii) プラズマ爆発現象 (フレア・コロナ質量放出・粒子加速)

太陽面爆発 (フレア) は、電磁波、放射線粒子、太陽風磁気プラズマ雲などを介して、地球生命、大気、磁気圏に甚大な影響を及ぼす。宇宙天気の社会的重要性は今後さらに高まると考えられ、宇宙天気の予測の範囲拡大と精度向上に向けた研究開発、

さらにそのための基礎研究は、太陽物理学の重要な課題の一つであるとともに、地球物理学などとの学際的分野である。「ようこう」衛星などにより、エネルギー解放機構としての磁気リコネクション（磁力線のつなぎかえ）という描像が得られた。現在は「爆発現象の発生機構の解明とその予測」へと研究の方向が進んでおり、精密な観測とシミュレーション、統計的機械学習のような新技術による太陽活動の予測が重要な手段となりつつある。SOLAR-Cでは、コロナ・遷移層・彩層で磁気リコネクション領域を高空間・高時間分解能で観測することにより、エネルギー解放の物理機構の理解に迫る。またDKISTをはじめとする光球・彩層磁場観測により、活動領域のエネルギー蓄積やフレアトリガの問題の進展が期待される。さらに現在、Solar Orbiter[※]とParker Solar Probe[※]など、複数の惑星間探査機が運用中であり、軌道上・地上望遠鏡の連携により、フレアやコロナ質量放出（CME）の太陽圏擾乱を捉えることで、宇宙天気現象との関連が今後大きく展開すると予想される。

(iii) 磁場の起源（ダイナモ）

黒点の起源は依然として太陽の究極の謎として残っており、(i)(ii)を理解するための基礎となる。ダイナモの現場となるのは星の内部であるが、その探索には地上（NSOのGONG[※]）や宇宙望遠鏡（SOHO衛星[※]のMDIやSDO衛星[※]のHMI）による継続的均質な観測に基づいた、日震学的手法が威力を発揮してきた。これにより、例えば、太陽差動回転角速度の分布は、対流層全域にわたって精度よく求められている。一方で、「星表層で両極域に向かって流れる子午面還流が星内部でどのような構造をしているか」や、「星内部乱流」などの重要な課題が残っている。

また、上記(i)～(iii)が進展することにより、太陽物理学の知見をほかの恒星系へ適応する「星としての太陽」も発展的な課題として進展が見込まれる。系外惑星観測は、ケプラー衛星やテス衛星等により大きな展開を示し、今後TMTなどにより、惑星環境、特に大気についての理解が進むと期待される。一方、火星・水星・木星などの太陽系惑星探査ミッションにより、それらの惑星環境、ひいては太陽系の起源に迫ることを目指している。太陽系惑星環境、特にその大気環境の進化を理解するためには、太陽系の歴史を通した太陽からの長期的な影響を評価する必要がある。これには太陽風や太陽からの突発的なCME、さらには太陽輻射の短期・長期的変動の理解が欠かせない。そして、恒星観測とも比較することで、これらの現象が宇宙においてどれほど普遍的であるのか検証することができるのは、太陽をにおいてほかにない。加えて、太陽活動の長期的（活動周

期~100-1000年) 変動は、地球の気候やひいては地球上の文明への影響を及ぼすことから、社会的な関心も高い。

「核融合反応とニュートリノ問題」については、一定の解決を見た。しかし、太陽表面の化学組成比のアップデートに伴う、日震学から推定される音速構造と太陽標準モデルとのずれが顕在化した。この問題を検証するには、精度の良い太陽ニュートリノ強度観測などが必要である。これは依然、素粒子物理学との重要な接点である。

(8) 粒子線・ニュートリノ・ダークマター

宇宙線の研究は発見以来100年以上の歴史を持ち、電磁波だけでは解明できない天体現象・物理過程の解明を進めてきた。2010年報告では、課題として以下が挙げられている。

(i) 宇宙線の起源：組成と加速機構

どのような宇宙線がどのような天体でどのエネルギーまで加速されているかは長年の未解決問題である。近い将来、GZKカットオフ（超高エネルギー宇宙線と宇宙マイクロ波背景放射の光子との相互作用に起因するカットオフ）が見え始め、また組成の同定に向けた実験などが進むであろう。また高エネルギーのガンマ線の起源（電子起源か陽子起源か）などの解明も期待される。

(ii) 超高エネルギーニュートリノと超新星背景ニュートリノ

ニュートリノ研究は、素粒子物理学として出発し加速器実験等でその性質が調べられてきた。一方、ニュートリノは星の中心で起こる核融合反応に伴って大量に生成され、さらに、超新星爆発の際に放出されるなど、天体現象とも極めて深く関わっている。太陽ニュートリノの観測や超新星1987Aからのニュートリノの検出を経て、ニュートリノ天文学が確立しつつある。日本はこの分野で圧倒的に世界をリードしており、大気ニュートリノの観測によりニュートリノに質量があることを発見（2015年ノーベル賞）し、素粒子の標準モデルを超える物理の必要性を明らかにするなど、基礎物理学にも大きなインパクトを与えた。

今後は、超新星ニュートリノの観測を通じた超新星爆発機構、超高エネルギーニュートリノの発見による高エネルギー天体現象の解明が期待される。一方、超新星残骸等、宇宙線加速が行われていると考えられる現場では超高エネルギーニュートリノが生成される。その検出は高エネルギー天体現象と宇宙線加速機構双方の解明にとって本質的である。また超新星背景ニュートリノの観測は、宇宙の星形成史を明らかにするための重要な情報となる。

(iii) ダークマター：直接検出へ

ダークマター粒子が超対称粒子のニュートラリーノである場合、理論的に予言される断面積は現行の実験の検出感度と同程度であり、近い将来、直接検出が期待できる。また、銀河ハローや星の中心におけるダークマター粒子の対消滅によって生成されるガンマ線・陽電子・ニュートリノ・反陽子等を観測する間接検出についても、進展が見込まれる。

これらの課題について、過去10年の進展、今後の展望について述べる。

宇宙線の起源においては、超高エネルギーガンマ線の観測により電子起源に加えて陽子起源と考えられる放射天体が見つかり、拡散ガンマ線の発見により銀河系内PeVatron [※]の存在が明らかになった。宇宙線のエネルギースペクトルと化学組成の観測的研究が進み、エネルギースペクトルには、これまで知られていた「knee」と呼ばれる $10^{15.5}$ eVにおける折れ曲がり以外にも様々な微細構造が明らかになった。特に、TeVまでのエネルギーでは直接観測によって粒子種、原子核種ごとのエネルギースペクトルが描かれ、それらの起源、伝播について詳細な議論が始まっている。一方、最高エネルギー端でのカットオフの存在も確定したが、その起源が高エネルギー宇宙線と宇宙マイクロ波背景放射の光子との相互作用によるものかについては、化学組成の精密測定が待たれる。また、様々なエネルギー領域で宇宙線の到来方向異方性が見つかっており、特におよそ 10^{19} eV以上の最高エネルギー領域では全天でいくつかの宇宙線源の兆候が見えている。

超高エネルギーニュートリノにおいては、南極点深氷河に設置されたIceCube実験 [※]によって、TeV から PeV (1000 TeV)のエネルギー領域で宇宙ニュートリノが2013年に発見され、高エネルギーニュートリノ天文学が始まった。観測の積み重ねによって、超高エネルギーニュートリノの流量は超高エネルギー宇宙線のフラックスから期待される量と無矛盾であることを明らかにしたほか、ブレーザー [※] TXS 0506+056 及び、セイファート銀河 [※] NGC1068が高エネルギーニュートリノ放射天体候補として同定されるに至っている。ニュートリノ観測による高エネルギー宇宙の研究は急速に進展しており、より高統計・高精度の観測により、宇宙線起源の解明及びニュートリノ放射天体の統計的研究は確実に実現されるであろう。さらに、フレーバー比や突発天体からのニュートリノ放射の時間情報の測定により、素粒子標準模型を超える新物理現象の探索が可能となり、非加速器素粒子物理学分野に貴重な貢献をすることが期待されている。超新星背景ニュートリノの観測においては、2020年にスーパーカミオカンデにガドリニウム (Gd) が0.01%の濃度で導入され、50%の捕獲効率で中性子を捉えることができるようになった(2022年には0.03%Gd濃度で75%中性子捕獲効率へ向上)。これにより、超新星背景ニュートリノの反電子ニュートリノの反応を中性子の同時遅延計測により捉えることができるように

なり、年間数事象程度と予想されている超新星背景ニュートリノの観測が可能となった。今後、5年程度の観測によりモデルが予想する強度領域まで踏み込むことが予想される。

ダークマターの直接検出においては、過去10年の間にほぼ3桁の感度向上を果たしてきた。直接検出の原理は、原子核散乱を通じた太陽ニュートリノ等の観測原理を転用したものであったが、近くついにそのオリジナルな目標を実現できる高い感度に到達する。また、より軽いダークマターや重いダークマター、さらにはニュートラリーノ以外の可能性も広く探られており、そのための異分野の研究者との連携が進んでいる。間接検出においては、近年観測された過剰な陽電子・電子数比がダークマター起源か天体起源かの結論は出ておらず、ガンマ線観測により一部の粒子質量範囲で断面積の強い上限を得た。より重い質量に対するガンマ線観測感度は、近い将来、理論で予言される断面積に達し検出が期待される。さらに、広い質量範囲で探索できるニュートリノ観測も高感度化が進んでいる。直接・間接検出いずれの方法でも、信号が得られれば、ダークマターの背景物理の解明や、宇宙の発展の筋書きの証拠を得る研究を進めることが可能となり、天文学及び素粒子物理学に跨る研究分野の著しい発展が期待される。

(9) 重力波

重力波を直接検出する重要性は、単に一般相対論の検証にとどまらない。電磁波やニュートリノとは相補的に宇宙を見る新たな天文学の窓、すなわち重力波天文学へと繋がる大きな可能性を秘めている。特に、電磁波では観測不可能な創生時の宇宙や、ブラックホールや中性子星の衝突の現場などの情報を伝えてくれる唯一の手段となり得る。このため、重力波の直接検出は、宇宙物理学のみならず物理学における21世紀最大のフロンティアの一つと言える。

2010年報告では、この分野の「21世紀の天文学・宇宙物理学の展望」が以下のように述べられている。

(i) 地上直接検出実験

21世紀に入ってから順調に感度を上げ続けており、2010年代後半には重力波の直接検出が成功し、その後の本格的定常観測によって重力波天文学が始まるものと予想される。多数の中性子星やブラックホールの連星が観測されれば、それらの質量や角運動量の分布が決まり、その性質や起源の解明が飛躍的に進むはずである。

(ii) 人工衛星による次世代検出計画

周波数1 mHzから100mHzの重力波を捉える検出器の打ち上げが検討されている。これは、巨大質量ブラックホールの合体現象を捉えることが期待されており、実現時には銀河形成史に関する有力な情報が得られるであろう。

これらの課題について、過去10年の進展と今後の展望を以下に記す。

(i) 地上直接検出実験

2015年9月に開始されたアドバンスドLIGO[※]としての第1回観測運転にて、連星ブラックホール合体時の重力波が2台のLIGO検出器によって直接検出され、さらに2017年には、連星中性子星合体による重力波も直接観測されるなど、この分野は過去10年の間に劇的な発展を遂げた。特に2017年の連星中性子星合体重力波の観測は、2台のLIGOに加えてVirgo[※]も観測に加わっていたため、重力波により比較的精度良く到来方向が決定され、それを基にして光学観測によってホスト銀河が特定され、その後あらゆる波長の電磁波観測によって追観測が行われた。これはフェルミ衛星 (Fermi) [※]によるショートガンマ線バーストとほぼ同時に観測されたものであり、ショートガンマ線バーストと連星中性子星合体を繋ぐ初めての事例となったとともに、未解明の r 過程[※]元素合成の証拠となるキロノバ[※]と考えられる放射が観測された。これは、重力波を含むマルチメッセンジャー天文学の大きな成果と言える。これまでに、連星中性子星合体が2例、ブラックホール中性子星連星合体が1例、連星ブラックホール合体が87例観測された。2023年開始予定のLIGO-Virgo-KAGRAの第4回国際共同観測や、その後に予定されている長期観測では、さらに多数のコンパクト連星合体が観測されると期待され、本格的に重力波天文学が始まると予想される。連星ブラックホールの質量、スピン、距離分布などによりその起源の解明が飛躍的に進み、KAGRAが国際観測ネットワークに加わって重力波源の方向特定精度が高まることで、連星中性子星の観測ではガンマ線バーストのメカニズムやキロノバと r 過程元素合成の理解が大きく進むものと期待される。地上検出器の将来計画としては、第3世代レーザー干渉計である欧州のアインシュタイン望遠鏡 (ET) と米国コスミック・エクスプローラー (Cosmic Explorer : CE) があり、どちらも低温ミラーと長基線の特徴としている。特に、ETは地下に基線長10kmの低温レーザー干渉計を建設する計画であり、このコンセプトがKAGRAにより実現される。したがって、KAGRAは重力波国際観測ネットワークの拠点の一つであるだけでなく、将来計画への重要な架け橋となっている。

(ii) 人工衛星による次世代検出計画

ヨーロッパのESAが主導するLISA[34]は、2030年代半ばの打ち上げを目指して計画が進行している。LISAは、銀河中心の超巨大ブラックホール連星の合体や、超巨大ブラックホールへコンパクト天体が落下する際の重力波などを捉えることを目標としており、実現すれば銀河形成史に関する重要な情報が得られるものと期待されている。20

15年12月にはLISAの技術実証衛星であるLISA Pathfinderが打ち上げられ、2016年から2017年まで、衛星内の二つのテスト質量を重力以外の外乱を排除した自由落下運動させる実験が行われた。その結果、テスト質量間の加速度擾乱をLISAで要求される値よりもさらに小さく押さえることに成功し、LISA計画実現へ向けた大きな成果となった。

また、国内においてもDECIGO計画[33]が検討されており、地上検出器とLISAを繋ぐ周波数帯でのサイエンスを目指している。DECIGOは宇宙空間に置かれた三機の衛星間でファブリ・ペロー干渉計を実現するという野心的な計画である。それが最終期待感度を達成した暁には、初期宇宙のインフレーション時に生成した量子的重力波を検出し、そのスペクトルの形状によってビッグバンがいつ起こったかを同定する可能性があるなど、大きな科学的成果が期待される。現在ではその前哨計画とも言うべきB-DECIGO[33]の検討が進められているが、DECIGOのみならず、B-DECIGOの実現も極めてチャレンジングなものであり、その技術的実現可能性の検討や国際協力の下での研究体制の構築が必須となっている。

(10) コンピュータ・シミュレーション

現代天文学・宇宙物理学においてコンピュータシミュレーションは、観測、理論に次ぐ第3の手法として必要不可欠なものになっている。その目的は、理論の検証や実験的探索を通して、天体现象の物理を解明することにある。さらに現実的なモデルを用いたシミュレーションによって、天体现象の観測的予測を与えることも可能である。実際、最先端の望遠鏡と観測装置によって観測される天体を理解するためには現実的な物理を考慮した高精度シミュレーションとの比較が必須となってきている。

シミュレーションには様々な種類があるが、ここでは第一原理的シミュレーションについて取り上げる。近年のコンピュータハードウェアとソフトウェアの発展のおかげで、これまで不可能だった観測との比較に耐えうる現実的なシミュレーションが可能になってきている。シミュレーションの高度化には大きく二つの方向性がある。一つは粒子数や格子数の増大による高解像度化、そしてもう一つはより現実的な物理を導入することである。現在、各分野で様々な公開コードが開発されており、それらを用いた成果が増えてきている。

以下では、大規模第一原理的シミュレーションを用いた研究が行われている主な分野について、過去10年の進展と今後の展望について述べる。

(i) 大規模構造

現在、1兆体規模のダークマター粒子を用いた構造形成の宇宙論的重力多体シミュレーションが可能になっている。今後はさらに粒子を10-100兆体に増やし、銀河スケールを解像しながら、銀河群、銀河団の構造形成を調べる。

(ii) 恒星系

恒星系では、100万体の恒星を用いた球状星団の多体シミュレーションが可能になった。また、個々の恒星を分解した銀河の多体シミュレーションも可能になりつつある。これからは星形成・恒星進化・連星進化・化学進化等を考慮したより現実的なガス-恒星系モデルを用いた大規模流体多体シミュレーションによって銀河や星団の形成・進化の解明を目指す。

(iii) 星形成

近年、磁場や自己重力だけでなく、輻射輸送や化学進化・ダスト進化など現実的な素過程を考慮した星形成・星周円盤形成シミュレーションが可能になりつつある。今後は、より精緻な素過程を考慮した星形成・星周円盤形成シミュレーションにより、原始惑星系円盤の初期条件が明らかになるだろう。太陽では高解像度の計算で自転プロファイルの詳細が観測と調和的になった。今後、表面から深層まで一貫した高解像度シミュレーションを実行し、11年周期の磁場の变化を解明する。

(iv) 惑星系

近年、ハミルトニアン分割に基づく高効率コードが開発されており、これまで現実的な合体条件を考慮した、10万體規模の微惑星を用いた惑星集積の重力多体シミュレーションが可能になった。今後は、ガス円盤の進化を考慮し、惑星の移動も含めた1000万-1億體規模の微惑星を用いた数十auスケールの広域シミュレーションによる多様な惑星系の形成が重要になるだろう。

(v) 高エネルギー現象

重力波が検出された中性子星連星の合体に関して、シミュレーションを用いて光学観測結果を解釈できた。超新星爆発に関しては、以前のシミュレーションではニュートリノ加熱により爆発を起こすことができなかったが、現在では爆発させることが可能になってきている。これらの分野では、重力、強い相互作用、電弱相互作用のより良い取扱を目指し、重力波、ニュートリノ、電磁波のマルチメッセンジャー天文学を推進する。降着円盤ではイベント・ホライズン・テレスコープの観測の解釈に不可欠なシミュレーションが行われており、今後さらに一般相対性理論に基づく高解像度計算を実行し、ジェットや円盤状態を解明する。

2 推奨する大型・中型長期計画

天文学・宇宙物理学分科会（以下「分科会」と言う）では、2021年の前半期において、2030年から2040年代にかけて実現を図る長期計画をリストアップするため、主として日本天文学会に所属する研究者に向けて、大型・中型将来計画の提案（意志表明）を募った。その結果、以下の34件の計画が提案された。各計画名末尾のかっこ内は略称を示す。

1. Square Kilometre Array Phase 1 (SKA1)
2. 高感度太陽紫外線分光観測衛星Solar-C EUVST (Solar-C)
3. ガス飛跡検出器による暗黒物質の正体解明 (CYGNUS)
4. 極低放射能環境でのニュートリノ研究 (カムランド2)
5. Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments 3 (SMILE-3)
6. 赤外線位置天文観測衛星 小型JASMINE (JASMINE)
7. 50トン級液体キセノン宇宙暗黒物質直接探索計画 (DARWIN)
8. 南極10mテラヘルツ望遠鏡計画 (ATT10)
9. 広帯域X線高感度撮像分光衛星FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) (FORCE)
10. IceCube Gen2 国際ニュートリノ天文台 (IceCube-Gen2)
11. CTA国際宇宙ガンマ線天文台 (CTA)
12. 惑星間宇宙望遠鏡 (Inter-Planetary Space Telescope) (IPST)
13. Habitable Exoplanet Observatory (HabEx)
14. 大型国際X線天文台 Athena (Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics) への日本の参加 (Athena)
15. 次世代太陽風観測装置 (次世代太陽風)
16. Origins Space Telescope の科学推進と中間赤外観測装置(MISC)開発の分担(Origins)
17. Mega ALPACA: 南天におけるPeV領域ガンマ線 広視野連続観測 (Mega ALPACA)
18. ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 (HiZ-GUNDAM)
19. Roman 近赤外広視野サーベイ宇宙望遠鏡への参加 (Roman)
20. NASA 大型紫外可視近赤外線宇宙望遠鏡LUVOIRへの参加 (LUVOIR)
21. Gamma-Ray and AntiMatter Survey計画 (GRAMS)
22. 最高エネルギー宇宙線の起源解明のための大型地上空気シャワー観測 (UHECR-TA2)

23. 30m光学赤外線望遠鏡計画 (TMT)
24. 太陽観測次世代国際ネットワーク計画ngGONGへの参画 (ngGONG)
25. 太陽X線ガンマ線観測衛星 (PhoENiX)
26. LiteBIRD — 熱いビッグバン以前の宇宙を探索する宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星 (LiteBIRD)
27. 大口径太陽望遠鏡に搭載する赤外線偏光分光撮像装置 (大口径太陽望遠鏡焦点面装置)
28. Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics (POEMMA)
29. 惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly (LAPYUTA)
30. Galaxy Reionization Explorer and Planetary Universe Spectrometer (GREX-PLUS)
31. 大型サブミリ波望遠鏡 (LST)
32. 次世代大型電波干渉計 (ngVLA)
33. 宇宙重力波望遠鏡 (B-DECIGO)
34. 宇宙重力波干渉計LISAへの参加 (LISA)

これらの計画について、分科会では以下の五つの分野別コミュニティーに、検討と優先順位付けを依頼した。

- (i) 宇宙電波懇談会：電波天文学の研究者コミュニティー。1970年設立。会員数約400名。
- (ii) 光学赤外線天文連絡会：光学・赤外線天文学の研究者コミュニティー。1980年設立。会員数約300名。
- (iii) 宇宙線研究者会議：宇宙線物理学者（重力波研究を含む）のコミュニティー。1953年設立。会員数約400名。
- (iv) 高エネルギー宇宙物理学連絡会：X線・ガンマ線天文学分野の研究者コミュニティー。1999年設立。会員数約200名。
- (v) 太陽研究者連絡会：太陽物理学分野の研究者コミュニティー。1994年設立。会員数約200名。

次の第3章以降では、以上の34件の将来計画をこれら五つの分野別コミュニティーが検討した結果と、現時点で将来計画として推薦された優先順位を示す。

各分野が最も優先する計画として推薦したのは、電波分野がSKA1とngVLA、光学赤外線分野がTMT、宇宙線分野がカムランド2とIceCube-Gen2、高エネルギー分野がAthenaとFORCE、太陽分野がSolar-Cとなっている。

以上の34件の計画の概要説明を「提案されている大型・中型の長期計画一覧」として、この記録の末尾に添付した。また現時点で建設中であり、2030年代に大きな成果が出ると期待されるハイパーカミオカンデ (Hyper-K) についても、35件目として概要説明を添付した。

なお、建設中または既に完成して観測を実施中の大型計画 (KAGRA, CTA, Hyper-K, XRISM, LiteBIRD, ローマン宇宙望遠鏡, アルマ望遠鏡, すばる等) については、今回の優先順位には含まれていないが、これらの装置が安定に稼働して継続的に成果を創出すると同時に、装置が将来にわたって発展・拡張されていくことも極めて重要であることを付言しておく。

(1) 電波天文学分野の計画

① コミュニティでの議論の経緯

宇宙電波懇談会（宇電懇）は、天文学・宇宙物理学の長期計画の推薦に際して、コミュニティの意見を集約しかつ綿密な議論の下で推薦書を作成する方針とした。長期計画への掲載を希望する意思表示を提出した電波天文分野の大型・中型将来計画は、以下の5計画である。

- Square Kilometre Array Phase 1 (SKA1) [1]
- 南極 10mテラヘルツ望遠鏡 (ATT10) [8]
- LiteBIRD — 熱いビッグバン以前の宇宙を探索する宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星[26]
- 大型サブミリ波望遠鏡 LST[31]
- 次世代大型電波干渉計 ngVLA[32]

これらの計画の推薦のために、2021年3月18日に行われた宇電懇総会における合意に基づき、以下の(i)-(iv)の手順を踏むことを決定した。最終的な推薦は、宇電懇運営委員会の責任の下での結果を総合的に判断して行うこととした。

(i) 電波天文分野将来計画検討シンポジウム

2021年7月31日に標記シンポジウムをオンラインで開催した。参加人数は約100名であった。上記5計画の代表者に講演して頂き、各計画内容について電波天文コミュニティの理解と共有を図った。

(ii) 宇電懇会員による将来計画に関する意向調査

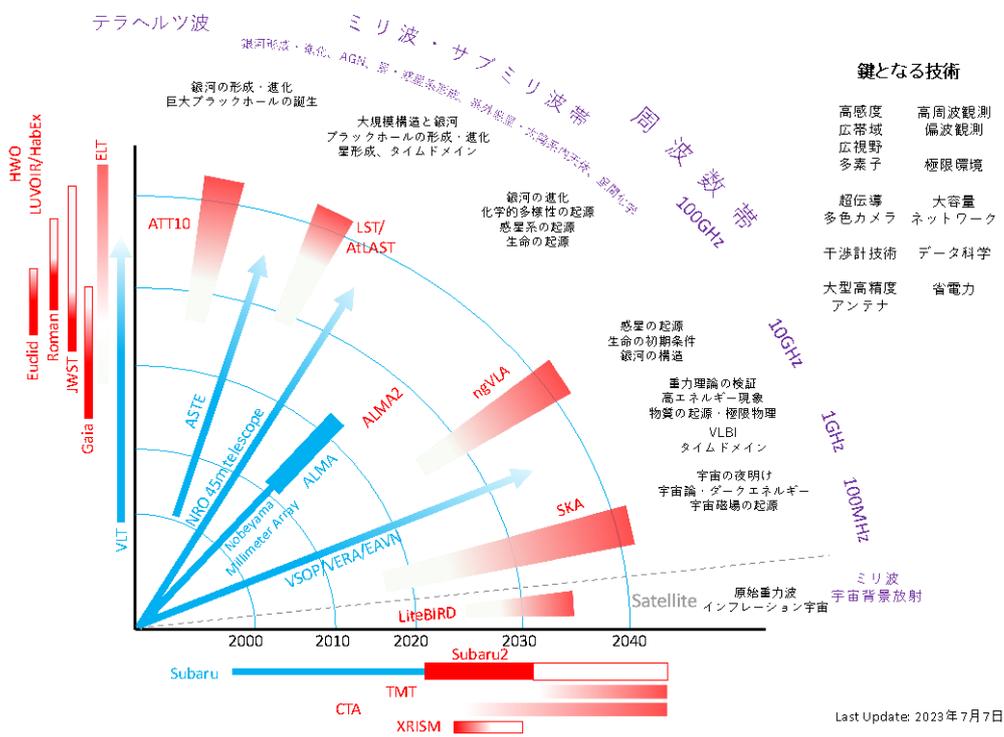
天文学・宇宙物理学の長期計画の推薦に対して意向表明が提出された将来計画の推薦順位付けについて、宇電懇会員の意向を直接問う目的でオンライン投票を実施した。投票は2021年8月9日から31日の期間に、3件の大型将来計画（SKA1, LST, ngVLA）のうち各会員が今後最も必要と考える計画を選択する形式で行われた。

(iii) 電波天文分野将来計画検討ワーキング・グループにおける集中的議論

2021年6月18日より、宇電懇運営委員会の諮問機関として、「電波天文分野将来計画検討ワーキング・グループ(WG)」を設置した。当WGは15名の委員で構成され、構成員は会員の投票から選ばれた候補者の中から、様々なバランスを考慮して運営委員会が選定した。当WGでは、五つの将来計画に対して各々数名から成る評価班を割り当て、運営委員会から示された評価基準及び学術会議天文学・宇宙物理学分科会から示された評価基準に従って綿密な評価を行った。その後、各評価班が作成した詳細な評価結果に基づき、WG全体で慎重かつ厳しく議論を重ね、WGとしての答申を作成した。

(iv) 将来計画検討ワーキング・グループの答申に基づいた宇電懇運営委員会の議論

上記(i)-(iii)の結果を踏まえて、運営委員会で最終的な議論を行った結果、「大型計画として、長波長電波干渉計としてのSKA1とngVLAの2計画を同率一位で推薦し、LSTを三位で推薦する」という結論を得た。同率一位で推薦する2計画は互いに相補的で、いずれも非常に強いサイエンスケースを有するものと判断された。また、LiteBIRDを継続中の計画として引き続き強く推薦、ATT10を中型A計画として推薦することとした。併せて、宇電懇としてはアルマ望遠鏡計画へ日本が継続して参画することは最優先事項と捉えており、それを引き続き強く望むことも表明することとした。



図：電波天文学分野の将来計画ロードマップ

(出典) 物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会にて作成

② 最優先する長期計画

【SKA1】

SKA1は既存の望遠鏡を圧倒する高感度と解像度を達成する国際共同利用の望遠鏡計画である。豪州に観測周波数50-350MHzを網羅する開口アンテナ(LOW)13万基と、南アに0.35-15GHzを網羅するパラボラ鏡(MID)197台を最大150kmの範囲に展開し、英国にある本部から一体的に遠隔運用される。低周波数の観測を開拓する点に特徴がある。

SKA1は高感度・広視野に加えて観測モードの複数同時実行能力を有し、かつてない広域探査能力を実現する。この圧倒的な性能で、宇宙で最初の星やブラックホール、磁場が生まれる時代のほぼ唯一の徹底探査、パルサーの精密観測による重力理論の検証、宇宙論の超精密化や、突発天体現象の徹底究明を目指す。低周波数で宇宙再電離期(EoR)の観測を行う能力では他を圧倒するため、標語的には「星が生まれる前の宇宙を見る」望遠鏡であると言える。

【ngVLA】

次世代大型電波干渉計ngVLAは、米国国立電波天文台が計画を主導し、初期運用を経て2040年代に本格稼働する大型共同利用施設である。北米大陸を中心とする約9,000kmの範囲に口径18mと6mのアンテナを合計263台設置し、約20cm(約1GHz)から3mm(100GHz)の波長帯において、他を圧倒する感度と角度分解能を実現する。

ngVLAは宇宙物理学の広範な領域にわたる研究対象を想定している。中でも惑星系形成の観測と、それを通じて我々人類のような生命が存在する条件が宇宙史の中でいかに整えられてきたのかという疑問に対し、一貫した視座を提供することを重視する。特に、生命関連物質が星間物質を起点にどの段階で用意されるのかの探求においては、分子科学分野や地球惑星科学分野との連携が期待される。

例えば、炭素を5個以上含む環状分子やアミノ酸のように鏡像異性体を有する大型の有機分子は、分子の特性上100GHz以下の低い周波数帯での高感度観測が最も効率的である。生命を育むに至った化学的歴史を探るには、原始地球のような惑星が誕生する場でのそれらの分子の検出や生成過程の解明が重要であるが、これには岩石惑星の材料として集まっている塵を透過して見通す事が可能なセンチ波帯での高感度高分解能観測が必要不可欠である。このため、ngVLAは「地球のでき方がわかる」望遠鏡、そして「生命関連物質の化学進化史を探ることができる」望遠鏡とも言える。

③ 当該分野の他の長期計画の紹介と相互関係

【LST】

ミリ波・サブミリ波帯において広い視野（0.5度角以上）を持つ、大口径（口径50 m級）高精度単一望遠鏡LSTを建設する計画である。これによりアルマ望遠鏡・JWS T・TMTをはじめとする大型天文観測施設が稼働する時代に、サブミリ波帯において、それらと相補的で新しいディスカバリー・スペースを切り拓く多次元（空間・宇宙論的奥行き・周波数・時間軸・偏波）掃天観測を推進する。

大口径（高感度）・広視野・広帯域のコンセプトの下、宇宙再電離期の銀河から、銀河団・大規模構造、ブラックホール形成、星・惑星系形成、太陽系内惑星大気まで、多様な階層における研究を格段に進展させるとともに、サブミリ波帯時間領域天文学を本格的に開拓することを目指している。「宇宙の構造形成史を観る」望遠鏡と言える。

【LiteBIRD】

インフレーション宇宙理論が予言する原始重力波を世界に先駆けて観測し、代表的インフレーション宇宙理論を検証することを目的とする計画である。原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射の偏光度分布に渦状のパターン（原始Bモード）を刻印する。この原始Bモード発見のために、34-448 GHzという広帯域の望遠鏡、極低温冷却系、多色高密度超伝導検出器を搭載したLiteBIRD衛星を開発し、観測を行う。

インフレーション宇宙仮説は、ビッグバン以前の宇宙を記述する最有力仮説であり、この検証は、現代宇宙論の最大の課題である。インフレーション仮説が予言する原始重力波の痕跡を捉えることが、仮説の最も直接的な検証であり、発見に成功すれば科学史上最大の成果の一つとなる。「宇宙開闢の瞬間を観る」衛星である。

【ATT10】

地球上で大気透過率が圧倒的に優れた南極内陸部新ドームふじ基地に、超広視野10m級テラヘルツ望遠鏡を建設する計画である。

テラヘルツ帯には、銀河の赤方偏移、ダスト温度、星形成率などを推定するために重要なダスト熱放射が含まれ、その短波長側まで観測することでスペクトルエネルギー分布[※]（SED; Spectral Energy Distribution）のピークを抑えることができる。また、星間物質の性質を探る上で重要な輝線が多数存在するため、宇宙史における銀河・巨大ブラックホールの形成・進化を探る上で極めて重要な波長帯である。本計画では、銀河の誕生・進化の解明と宇宙論パラメータの矛盾に迫る。観測

周波数・観測手法・宇宙の構造形成史を目標とする点でLSTと共通点がある一方、「地球上最良の観測地点」に設置することで未開拓の領域であるテラヘルツ天文学を推進することを目標とする望遠鏡である。

③ 他の分野コミュニティの推薦計画との関係

現代の天文学・宇宙物理学では、多波長観測および理論と観測の連携による研究の推進が当然のこととされている。また、その研究は、地球惑星科学はもちろんのこと、物理学・化学・工学、さらには生物学にも波及する極めて高いポテンシャルを有するものである。ここで5つのテーマについて、他の分野コミュニティとの関係を紹介する。

- 宇宙論：宇宙開闢の瞬間を電波の観測で観るのがLiteBIRDであり、これは素粒子物理学分野との関係が深い。ビッグバンから現在に至る宇宙史の研究は宇宙物理学の活発なフロンティアであり、電波分野ではSKA1、ngVLA、LST、ATT10がこれに取り組む。他分野では光・赤外線分野においてTMT、ローマン宇宙望遠鏡、GREX-PLUSなど、またX線分野ではAthenaがこの領域を主な対象としている。
- 生命の起源：私たち生命を育むに至った太陽系の化学史を探るには、元素合成史の理解だけでなく、分子進化史を理解し、その中に太陽系の化学環境を位置付けることが必要である。はやぶさ2に代表される太陽系始原物質探査など、考古学的に太陽系の過去を探る研究、すなわち地球惑星科学的アプローチが重要であるのは言うまでもなく、星や惑星が誕生する過程に沿ってガスや塵・塵に凍り付いた氷などの組成を探る星間化学的アプローチが必須となる。波長によって観える物質や透過度が異なるため、氷の観測や熱い領域での基本的分子・原子の観測には赤外線望遠鏡のJWSTやTMT、星間雲から星や惑星系が誕生する過程での分子進化を探るにはアルマ望遠鏡のようなミリ波サブミリ波の高分解能高感度望遠鏡、岩石惑星誕生領域での大型分子の観測にはセンチ波帯の高分解能高感度望遠鏡ngVLAが必要となる。他方、極低温低密度下での化学反応プロセスの研究や精密な分光学など、最先端の原子分子物理学研究や分子科学研究といった天文学以外の分野との協働も極めて重要である。これは、フラーレンの発見などに代表されるように、新たな学問分野の開拓にも繋がる可能性を有するとともに、宇宙生物学研究の基盤にもなるであろう。
- 太陽系の価値：私たちの宇宙の中での存在価値を知るには、生命の起源の探求と同時に、星・惑星系の誕生過程と多様性の全貌を理解する構造形成史の研究が必要不可欠である。これには、大きなスケールでの物質循環のダイナミクスや星形

成の多様性の理解が重要で、銀河、星間雲、惑星と、極めて高いダイナミックスケールかつ電波から赤外線、可視光、紫外まで様々な波長帯での観測研究が重要となる。アルマ、ngVLA、TMTなどは前述の通り惑星系の誕生や進化を探るのに必須であるが、大口径ミリ波サブミリ波望遠鏡計画であるLSTなども寄与するであろう。太陽系外惑星の多様性の解明、ハビタビリティの研究、バイオマーカー探査など、既に誕生した系外惑星の観測研究も相補的かつ重要である。それには、TMTはもちろんのこと、HSOやLAPYUTAなど赤外から紫外にわたる広い波長帯での観測研究が大きな役割を果たすと期待される。

- マルチメッセンジャー天文学：電磁波に加え、重力波や粒子線の検出も新たな手法として加わる「マルチメッセンジャー天文学」が本格化しつつある。たとえば重力波イベントやγ線バーストが研究対象の代表例であり、これには高感度・高空間分解能を有するSKA1とngVLAが大きく寄与する。他分野では高エネルギー宇宙物理学、宇宙線物理学分野のほぼすべての計画がこれに関与する。
- 工学・技術開発：優れた観測システムを構築するための技術開発は、宇宙物理学の分野にとどまらず、社会への応用を目指す分野にも深い関連がある。例えば、高感度観測装置を構成する超伝導検出器や量子デバイスの研究は、量子コンピュータに応用する可能性が示されている。また観測装置が生み出す大量のデータを操作・伝送・処理する情報技術の開発や、天文画像データの処理技術が数理学分野に寄与する例などもある。

表 1 電波天文学分野の諸計画のまとめ

名称	目的	計画概要	提案・推進主体 (代表者)	予算規模	進捗状況
SKA1 (Square Kilometer Array Phase 1) [添付資料1]	宇宙初期（暗黒時代）の中性水素ガスを直接撮像することにより、宇宙最初の星やブラックホール、磁場が生まれる時代の広域探査を実施。またパルサーの精密観測による重力理論の検証、宇宙論の超精密化、突発天体現象の究明など	従来の10倍近い感度と解像度を達成する国際共同の電波望遠鏡。オーストラリアに50-350MHzを観測するアンテナ (LOW) 13万基と、南アフリカに0.35-15GHzを網羅するパラボラ鏡 (MID) 197台を設置。最大150kmの範囲に展開し、英国の本部から遠隔運用	SKA条約に基づく政府間機構SKA天文台が実施。SKA評議会が統治。日本は条約には加わらない参加形態を想定。国立天文台にSKA1プロジェクトを組織して実施予定 (杉山直)	総予算EUR1987M (建設費EUR1282M、当初10年の運用費EUR705M)。日本負担分JPY72.4億 (建設費JPY57.5億、運用費JPY15.2億)	2021年7月から建設中、2029年完成予定。日本は2025年ごろを目処に正式参加を希望
ngVLA (Next Generation Very Large Array) [添付資料32]	地球型惑星の形成の観測、星間物質から生命関連物質への化学進化の探求などを中心に、宇宙物理学の広範な領域にわたる研究を推進	2040年代の本格稼働を目指す大型研究基盤 (共同利用施設)。北米大陸を中心とする約9000kmの範囲に口径18mと6mのアンテナを合計263台設置。約1 GHzから100 GHzの波長帯において、他を圧倒する感度と角度分解能を実現	米国国立電波天文台が主導し、日本は国立天文台による参加を想定 (百瀬宗武)	国際計画の総建設予算額は約USD23億。日本は約20%の貢献を想定し、建設予算分担額はUSD4.6億。運用費年額は計画全体で約USD0.93億。日本分担分はUSD0.19億	米国の天文学分野の大型将来計画を検討するDecadal Survey (Astro2020)で、地上望遠鏡として第2位の推薦を受け、準備が進んでいる
大型サブミリ波望遠鏡 (LST; Large Submillimeter Telescope) [添付資料31]	可視光・近赤外線と相補的なサブミリ波による観測を通して、宇宙再電離期の銀河、銀河団・大規模構造、ブラックホール形成、星・惑星系形成、太陽系内惑星大気まで、多様な階層における研究を推進。サブミリ波帯時間領域の天文学を開拓	アルマ望遠鏡、JWST、TMTをはじめとする大型天文観測施設が稼働する時代に、それらと相補的なサブミリ波帯において大口径 (高感度)、広視野、広帯域を実現。多次元 (空間・宇宙論的奥行き、周波数、時間	国立天文台において実施する可能性を検討中 (河野孝太郎)	総建設経費は約JPY450億 (欧州のAtLAST計画と統合を想定)	検討中。2030年代半ばまでに建設を開始し初期科学運用開始を目指す

		軸、偏波)のディスカバリー・スペースにおける観測を実施			
LiteBIRD 熱いビッグバン 以前の宇宙を探 索する宇宙マイ クロ波背景放射 偏光観測衛星 [添付資料26]	インフレーション宇宙理論が予言する原始重力波を世界に先駆けて観測し、代表的インフレーション宇宙理論を検証する	3台の小型望遠鏡と超伝導検出器を搭載した人工衛星LiteBIRDを開発し、第2ラグランジュ点(L2)にて34-448GHzの帯域を15バンドに分けて3年間の精密観測を行う。これにより、原始重力波がCMBの偏光度分布に残す渦状のパターン(原始Bモード)の検出をめざす	中心実施機関はJAXA。国内ではKEK、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、岡山大学など。海外では、フランス国立宇宙研究センターなど欧州の研究機関とカナダ宇宙庁(羽澄昌史)	総額は約JPY430億。うち日本負担分は約JPY320億	2023-24年度で概念設計。2025-28年度にかけて衛星完成、環境試験等で検証、H3ロケットで打ち上げ。2029年度以降にL2で3年間の全天サーベイ観測を実施予定
南極10mテラヘルツ望遠鏡 [添付資料31]	テラヘルツ帯でダスト熱放射の短波長側を観測し、赤方偏移した銀河のスペクトルエネルギー分布を決定する。これによって宇宙初期における銀河・巨大ブラックホールの形成・進化を究明する	大気透過率が圧倒的に優れた南極内陸部の新ドームふじ基地に、超広視野の10m級テラヘルツ望遠鏡を建設する	筑波大学を中心とする南極天文コンソーシアム(関西学院大学他)が建設・運用を実施。南極新ドームふじ基地の建設、輸送などは、国立極地研究所と協力(久野成夫・中井直正)	テラヘルツ望遠鏡がJPY27.9億。新ドームふじ基地での建設・運営費(10年間)はJPY66.4億	2026-2027年度: アンテナの詳細設計・製造。2028-2030年度: 望遠鏡の仮組と性能評価。2031年度: 新ドームふじ基地の建設を開始。2032年度: 望遠鏡の建設開始。2033年度: 望遠鏡建設完了、観測開始

(出典) 物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会にて作成

(2) 光学・赤外線天文学分野の計画

① コミュニティでの議論の経緯

光学・赤外線天文学の分野では、天文学研究の進捗を踏まえて、将来にわたり研究分野の裾野を拡大し、また組織的な研究を発展させるための議論が行われてきた。光学・赤外線分野の研究者によって組織された「光学赤外線天文学連絡会」（光赤天連と略称。1980年に光学天文学連絡会として設立、2004年より光学赤外線天文学連絡会）は、設立当初よりすばる望遠鏡実現に繋がる将来計画を議論するプラットフォームとしての役割を果たしており、それ以降も将来計画の策定についても積極的な活動を行ってきた。これまで、「2010年代の光赤外天文学」（2005年）、「2020年代の光赤外天文学」（2016年）など地上望遠鏡、衛星計画を含む将来計画の提案に繋がる策定結果を報告してきた。これらの土台に立って、2030年代を含む将来の光赤外天文学についての議論が行われているところである。2018年には「2030年代将来計画検討WG」が組織されてその検討が始められ、2020年には計画ホワイトペーパーの募集、ピアレビュー方式での相互評価などによる検討、シンポジウムでの議論を踏まえて、将来計画への意識を高めた。2021年には、「将来計画専門委員会」を設置し、光赤天連としてさらに将来に向けての議論の活性化を進めている。

学術会議・天文学宇宙物理学分科会の呼びかけに応じては、光赤外分野の長期計画には以下の10件が提案された。

- 赤外線位置天文観測衛星 小型JASMINE (JASMINE) [6]
- 惑星間宇宙望遠鏡 (Inter-Planetary Space Telescope) (IPST) [12]
- Habitable Exoplanet Observatory (HabEx) [13]
- Origins Space Telescope の科学推進と中間赤外観測装置(MISC)開発の分担 (Origins) [16]
- ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 (HiZ-GUNDAM) [18]
- Roman 近赤外広視野サーベイ宇宙望遠鏡への参加 (Roman) [19]
- NASA 大型紫外可視近赤外線宇宙望遠鏡LUVOIRへの参加 (LUVOIR) (注: HabEx、Origins、LUVOIRの3計画は、Habitable Worlds Observatoryに統合された。) [20]
- 30m光学赤外線望遠鏡計画 (TMT) [23]

- 惑星科学、生命圏科学、及び天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly (LAPYUTA) [29]
- Galaxy Reionization EXplorer and Planetary Universe Spectrometer (GREX-PLUS) [30]

光赤天連では、2021年6月に、運営委員長のイニシアチブのもと、運営委員会、将来計画専門委員会、提案者からなる推薦ワーキンググループ (WG) を組織し、推薦についての議論を行った。なお、この活動にあたっては、あらかじめ、光赤天連会員にその方針の提示及び意見募集が行われた。推薦WGでは、主査・副査を指定し、以下の観点を中心に書面審査、ヒアリングを実施した上で審議を行った。

- 計画が定める目的・目標の学術的な価値。他分野への波及性も含む
- 国内外の研究の動向に対して時宜を得た計画内容かどうかという緊急性
- 国内外の研究者コミュニティ、特に光赤外線天文コミュニティと計画提案側との連携
- 資金計画・技術的課題・人的資源を考慮した上で実行可能な計画内容となっているかという実現性。スペース計画の場合は宇宙航空研究開発機構における計画の状態（フェーズ）も考慮

審議に基づいて推薦順位案が作成され、光赤天連会員に開示されるとともに、「パブリックコメント」を求めるプロセスが行われた。推薦WGでは、会員からのコメント、シンポジウムなどの議論を経た上で、最終的な推薦結果を取りまとめた。

なお、2018年度から将来計画検討については、以下の光赤天連シンポジウムなどで広く議論を行っているものである。

- 2018年度シンポジウム「2030年代の光学赤外線天文学を考える」
- 2019年度シンポジウム「2030年代を見据えて光赤天連のあり方考える」
- 2020年度シンポジウム「データ解析の新展開2020」（将来計画セッション）
- 2021年度シンポジウム「国際大型計画との関わり方考える」
- 2021年度シンポジウム2「2030年代の戦略的中型をどうするのか」
- 2022年度シンポジウム「2030年代にどのような戦略的中型計画を推進するのか」

- 2022年度シンポジウム2「2030年代の天文学と光赤外地上・スペース計画：日本の戦略」

② 最優先する長期計画

【特に重点的に進める計画：TMT】

特に重点的に進める計画として、「30m光学赤外線望遠鏡計画 TMT」計画を選択した。その理由は、1) 我が国の天文学のほぼ全研究分野で極めて大きな科学的インパクトが期待できること、2) 選考対象の全計画の中で圧倒的な重要性が認められたこと、3) 光赤天連がこれまで推薦してきた緊急性が極めて高い計画であり既に開始され継続が必要であること、が挙げられる。

TMTは国際協力で建設に向けた努力が進められている地上大型望遠鏡計画である。従来地上大型望遠鏡より10倍以上の集光力と3倍以上の解像度を持ち、点光源に対しては100倍以上の感度向上を達成するものである。すばるの特徴である広視野観測によって発見される天体のTMTによる観測は、新しい宇宙像を切り開くことが期待される。高い解像度と超高コントラスト直接撮像は、地球型系外惑星におけるバイオマーカーの探査が期待され、大集光力を生かした超遠方銀河の分光観測は初代銀河の物理状態を知ることができ、宇宙再電離についても解明が期待される。また、超精密な視線速度計測による宇宙膨張の直接測定はダークエネルギーの性質やその正体の解明に迫るものである。加えて、現在急速に進展している重力波やニュートリノなど電磁波以外での信号検出を加えたマルチメッセンジャー天文学の発展には、TMTによる短時間での可視赤外フォローアップ観測が欠かせない。同様の地上大型望遠鏡計画はほかにも計画されているが、いずれも南半球に設置されるため、北半球に設置されるTMTとの連携が全天の観測には必須である。このように、人類の宇宙探究のフロンティアを広げるためにTMTは必須でありその学術的価値は非常に高い。

③ 当該分野の他の長期計画の紹介と相互関係

上記TMT計画以外の計画についても、積極的な検討が進められている。

TMT以外の9計画は、すべて宇宙から観測を行う衛星計画である。このうち、JASMINE計画については、JAXA 公募型小型計画として提案され、宇宙科学研究所によって小型計画3号機候補として選定され、現在2020年代にお

ける実現を目指して「ミッション定義段階」の検討が進められている。また、HiZ-GUNDAM計画については、同公募型小型計画5号機の候補に提案され、2030年代早期の実現を目指す検討が進められている。さらに、LAPYUTA計画は、続く公募型小型計画6号機の候補として提案されている。ローマン宇宙望遠鏡計画は米国NASAが2026年の打上を目指して進める広視野宇宙望遠鏡計画で、日本はJAXA 戦略的海外共同計画としてこれに参画し協力する。計画は既に実行段階である。

【JASMINE計画】

JASMINEは、世界初の赤外線位置天文観測衛星ミッションである。銀河系中心領域等のガスや塵による吸収が大きい領域では、精密な位置測定が難しい。これらの減光の影響を小さくするため、宇宙望遠鏡を用いた近赤外線による位置天文観測を行なう。銀河系中心核バルジの内部構造の形成進化過程を解明するため、銀河系中心領域（約8キロパーセク）方向の約10万個の恒星に対して3年間のモニター観測を行い、最高精度25マイクロ秒角で位置を決定する。銀河系の内部円盤、及び、バー構造の形成時期に制限を与えることで、中心核バルジの起源と進化や、太陽系の誕生時からの力学的進化等を明らかにすることを目標としている。さらにJASMINEの高頻度かつ高精度の測光を活かし、トランジット法による系外惑星探査を行い、赤色矮星周りのハビタブルゾーン内の地球型惑星の検出を目指す。

【ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM計画】

遠方で起きるGRBの観測をX線と赤外波長域で連携して衛星上で行い、Reionization Epochでの星形成及び宇宙の状態を探る計画である。さらに、重力波や高エネルギーニュートリノの観測にも貢献できる分野横断型の観測提案であり、広いコミュニティから支持される計画である。広視野のX線モニターで発見したGRBを即座に赤外線望遠鏡(口径30cm)で追跡観測する。衛星に搭載する超高感度の広視野X線モニターで発見したGRBに対して、同時に搭載する近赤外領域の4バンドの撮像専用赤外線望遠鏡でほぼ100%の追跡観測を実現することで、より確度の高い赤方偏移情報と共に、アラートを出すことができる。GRB観測の柱としているReionization Epoch ($z > 6$)の探査は、JWST、ローマン宇宙望遠鏡、すばる2をはじめとする大型赤外望遠鏡時

代に研究が加速度的に進むことが期待される。東大アタカマ望遠鏡[※]とは既に連携観測計画が進行中であり、時宜を得た計画である。また、重力波観測時代においても、X線と赤外のスペースからの同時観測は世界にも類を見ない重要なデータを取得することが期待される。

【惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画
Life- environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly (LAPYUTA) 計画】

LAPYUTAは、2020年代末から30年代において、世界最高レベルの感度と空間分解能を持つ紫外線宇宙望遠鏡を実現する計画である。その科学目標は、(1) 太陽系内天体での生命存在可能環境の理解、(2) 温暖な気候を持つハビタブル惑星の発見と惑星大気の進化の解明、(3) 近傍宇宙のガス分布地図の取得による冷たい暗黒物質モデルの観測的検証、(4) 中性子星合体による重元素合成の検証、という、系内外の惑星科学から宇宙論まで、幅広い分野に跨ったものである。いずれの目標に対しても、紫外線という地上観測では得難いデータにより一定の学術的貢献が見込まれ、さらに日本が戦略的に運用する望遠鏡として、特に科学目標(1)(2)についてはモニター観測を活かしたユニークな成果の創出も期待できる。

【ローマン (Roman) 宇宙望遠鏡計画】

ローマン近赤外広視野サーベイ宇宙望遠鏡は、ダークエネルギー・修正重力理論(宇宙膨張・構造成長の起源)の精密な検証と、太陽系類似の惑星系を含めた系外惑星の質量・軌道分布の解明を実現する。宇宙論分野では、構造形成の標準モデルを超えるモデルの精査が、ローマン宇宙望遠鏡によって可能となる。系外惑星分野では、惑星系の力学的性質(物理的環境)に関する統計的議論が、太陽系に類似の惑星系を含めて、初めて本格的に可能となる。惑星系形成過程の普遍的理解へ向けた顕著な前進である。これら科学目的の学術的価値の高さは明白である。加えて、近赤外広視野サーベイを活かした広範な天文学研究が展開される。さらに、系外惑星キャラクタリゼーション用コロナグラフの搭載は、将来ミッションへ繋がる技術の獲得・人材育成等の点でも意義が高い。ローマン宇宙望遠鏡に科学・技術両面で積極的に参加することは、日本の天文学の発展を見据えた際、決定的に重要である。日本の貢献については、(1) シナジー観測のためのすばる望遠鏡100晩の提供、

(2) 地上重力マイクロレンズデータの提供及び地上赤外マイクロレンズ協調観測等、(3) JAXA地上局によるK帯での大規模科学データ受信貢献、(4) コロナグラフ装置の偏光撮像機能やコロナグラフマスク基板の提供、がある。現在、JAXA宇宙科学研究所でローマン宇宙望遠鏡プロジェクトが組織され、日本の研究機関・大学との協力の下、その活動が進められている。

Habitable Exoplanet Observatory (HabEx)、Origins Space Telescopeの科学推進と中間赤外観測装置 MISC 開発の分担、NASA大型紫外可視近赤外線宇宙望遠鏡LUV0IRへの参加の3計画は、米国科学アカデミーの Decadal Survey Astro2020 における検討のため NASA においてその概念検討が行われた四つの計画に含まれるものである。日本の研究者が Science and Technology Definition Team の活動に参加し、その概念検討に寄与するとともに、日本としての協力案を提案した。Decadal Survey Astro2020 の検討結果は、2021年11月に発表され、超大型計画の実現に向け成熟度を高める技術実証を行うこと、また、最優先で進める計画として、ハビタブル惑星の直接観測による系外生命探査と革新的天文観測を目的として、口径6 m程度の紫外線・可視光・近赤外線ミッションの検討を行い、2030年までに見極めて、2040年代前半に打ち上げを目指すことが提言された。これは主としてLUV0IR計画とHabEx計画がその検討の母体となっており、Habitable Worlds Observatory (HWO)として検討を開始している。国内においてもこれらDecadal 3計画への参加提案を以下のように一つに統合し、学術会議に提案した。

【NASA6m紫外線可視近赤外線望遠鏡Habitable Worlds Observatoryへの参加】

本計画は、NASAの次世代旗艦計画である、口径6 mの紫外線可視光近赤外線超大型宇宙望遠鏡 (Habitable Worlds Observatory : HWO)に、日本が装置開発、科学検討の貢献を持って参加する。主要科学目標は、1) 太陽型星周りの系外惑星の大気において、生命居住環境及び生命の痕跡の探査、2) 広範囲な一般宇宙物理学研究、である。この波長域で、これまでにない高空間分解能・高感度を生かして約25個の地球型惑星の大気を直接分光し成分を調べる。これにより、地球以外で初めて生命居住環境及び生命の痕跡を発見し、その頻度を見積もる。また、あらゆる分野で観測能力が飛躍的に向上し、宇宙創生以来の構造形成史を解き明かす。

Galaxy Reionization EXplorer and Planetary Universe Spectrometer (GREX-PLUS) 計画 については、JAXA宇宙科学研究所が検討を進める宇宙物理分野の2030年代に実現する「戦略的中型計画」の立案においてその具体的な対象となる計画案の一つとして検討が進められている。

【GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and Planetary Universe Spectrometer) 計画】

口径1.2m級の近・中間赤外線宇宙望遠鏡計画で、波長3-10ミクロン帯の広視野カメラと10-20ミクロン帯の高分散分光器(波長分解能30,000)を搭載する。いずれの観測装置も過去から同時代の他の計画でカバーされない、あるいは達成されない波長域、視野の広さ、深さ、波長分解能というユニークな特徴を持つ。赤方偏移15以上の初代銀河や、塵に埋もれた大質量ブラックホール、初代星の超新星爆発など、銀河形成進化論における重要な天体についての知見や、分子分光学に基づいた原始惑星系円盤スノーラインの同定、系外惑星大気の物理化学状態の解明、太陽系天体のD/H比の測定など惑星系形成論における知見などで、革新的な学術的発展を目指す。これらの主要な目的以外にも、特徴的かつ基礎的なデータが公開されることで、分野・波長を超えて広範囲な宇宙物理学での波及効果も十分に期待できる。

惑星間宇宙望遠鏡 (Inter-Planetary Space Telescope) (IPST) については、さらに将来の宇宙科学ミッション計画、またそれに繋がる段階的な計画案としてここに提案されている。

【惑星間宇宙望遠鏡 (Inter-Planetary Space Telescope)】

まず、IPST pathfinder として、赤外線宇宙背景放射の絶対強度の測定を目指す。これは宇宙史全体に渡る、星、ガス、塵などからの放射の積分値を与えるものであり、マイクロ波宇宙背景放射やX線宇宙背景放射と同じく、新しい宇宙物理現象や天体種族の発見にも繋がる重要な測定である。JWSTなどの深宇宙探査で捉えられる点源を除いた後に残る背景光の強度を定量的に測定し、その起源を評価する意義は高い。特に中間赤外域は黄道光が極めて強く、近地球軌道からの背景放射の検出が困難であり未開拓である。そのために、黄道光の影響を受けない観測環境において、赤外線宇宙背景放射の絶

対強度を測定する学術的価値は高い。さらに将来は太陽系深宇宙観測環境での観測を開拓し、IPSTとして赤外線ですらなる深宇宙を見通す計画を進める。

④ 他の分野コミュニティの推薦計画との関係

【最優先課題 TMT計画について】

TMT計画の現状と今後について広く研究者コミュニティとの意見交換を行っており、天文学研究者のみならず惑星科学や物理学等、多くの分野からも次期大型計画として期待されている。とりわけ光学赤外線天文学連絡会では、コミュニティの総意としてTMT計画を2006年以降常に最優先で推進すべき計画として評価し、推進してきた。すばる望遠鏡のコミュニティの広がりを受け継承し、新たな研究分野の創成を図るべく、幅広い分野の執筆者によるサイエンスブックを刊行するなど計画側と研究者コミュニティの連携は非常に高い。

表2 光学赤外線天文学分野の諸計画のまとめ

名称	目的	計画概要	提案・推進主体 (代表者)	予算規模	進捗状況
TMT (30m光学赤外線望遠鏡計画; Thirty Meter Telescope) [添付資料23]	高解像度(0.01秒角)と高感度(約30等級)により、(1)生命を育む第2の地球の探査、(2)初代星が放つ光の直接検出、(3)ダークエネルギーの性質の解明を推進する	ハワイ島マウナケアに日・米・加・印・中の協力で口径30mの光学赤外線望遠鏡を建設。従来の大型望遠鏡を解像度で3倍、感度で100倍上回る性能を実現。すばる望遠鏡の超広視野探査と連携して、地球型系外惑星や宇宙の初代星、宇宙膨張史等の理解を一新する	自然科学研究機構(国立天文台)、カリフォルニア大学・カリフォルニア工科大学、カナダ国立研究機関、中国国家天文台、インド科学技術庁である。NSFが参加予定 (臼田知史)	総建設費USD36億。うち日本分担分JPY375億、共同利用整備費JPY40億。日本負担分の年間運用経費JPY30億(分担金JPY12億、共同利用経費JPY18億)	米国天文学分野の大型将来計画を検討するDecadal Survey (Astro2020)で、地上望遠鏡として1位の推薦を受け、NSFの参加に向けて準備中。マウナケア統治をハワイ州が担うための手続きが進行中
JASMINE (赤外線位置天文観測衛星 小型JASMINE) [添付資料06]	銀河系中心核領域にある恒星の距離と運動を高精度で測定し、その領域の構造と進化を解明する。天の川銀河系誕生時の様子や棒状構造の形成された時期、中心核の超大質量ブラックホールの成り立ちなどの研究を推進。高精度測光でM型星周囲の生命可能領域に存在する地球型惑星を多数検出し、生命探査につなげる	太陽同期軌道の衛星に搭載した口径36cmの光学望遠鏡を用いて銀河系の中心核領域を近赤外線(1.0~1.6 μ m)で観測し、10万個以上の恒星の距離と運動速度を精密測定する	JAXA宇宙科学研究所と国立天文台が推進。ESAや米国の地上通信局による支援を想定 (郷田直輝)	JPY150億程度(衛星開発準備、衛星開発、打上げロケット、運用、データ解析に関する経費を含む)	2023年度JAXAミッション定義審査。その後も審査を経ながら衛星開発を進め、2028年に打上げ予定。約3年間の科学運用。2033年度ころデータカタログを世界の研究者コミュニティに公開予定
HiZ-GUNDAM	表4参照	表4参照	表4参照	表4参照	表4参照

<p>LAPYUTA (Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly) [添付資料29]</p>	<p>太陽系内外の惑星科学から宇宙論まで幅広い分野。(1) 太陽系内天体での生命存在可能環境の理解、(2) 温暖な気候を持つハビタブル惑星の発見と惑星大気の進化の解明、(3) 近傍宇宙のガス分布地図の取得による冷たい暗黒物質モデルの観測的検証、(4) 中性子星合体による重元素合成の検証</p>	<p>口径60cmの衛星搭載紫外線宇宙望遠鏡(波長110-190nm、波長分解能0.01nm)。世界最高レベルの感度(有効面積350cm²)と空間分解能(0.1秒角)をもつ。</p>	<p>JAXA宇宙科学研究所、東北大学(土屋史紀)</p>	<p>JPY176億</p>	<p>JAXA公募型小型衛星として2032年打上げを目指す</p>
<p>Roman (近赤外広視野サーベイ宇宙望遠鏡への参加) [添付資料19]</p>	<p>主要な科学目的として、(1) バリオン音響振動、弱重力レンズ、Ia型超新星などの観測によるダークエネルギー理論および修正重力理論の検証、(2) 重力マイクロレンズ系外惑星探査による系外惑星の研究、(3) 系外惑星用コロナグラフ装置の技術実証、(4) スペースからの高感度・高解像度を活かした、これまでにない広視野サーベイ</p>	<p>NASAでJWSTの次となるミッションRoman宇宙望遠鏡計画に参画する。ハッブル宇宙望遠鏡(HST)と同じ口径2.4mの望遠鏡に、近赤外波長域でHSTの200倍の0.28平方度という圧倒的な広視野を持つカメラを搭載し、これまでにない深さと広さの大規模撮像・分光サーベイ観測を遂行する</p>	<p>NASAが主体となり各国が参加。日本の貢献は、(A) すばる望遠鏡によるシナジー観測、(B) 地上重力マイクロレンズ観測との協調、(C) 地上局によるデータ受信支援、(D) コロナグラフ装置等の提供(住貴宏)</p>	<p>USD3.9B(日本の貢献分JPY39.1億)</p>	<p>2021-2027年: マイクロレンズ事前観測、コロナグラフ装置開発、地上局改修 2027年: 打上げ 2027年から: Roman観測。すばる、マイクロレンズ協調観測。地上局運用</p>
<p>Habitable Worlds Observatory (NASA 6m紫外線可視近赤外線望遠鏡への参加) [添付資料20]</p>	<p>(1) 太陽型星を周る系外惑星の大気を観測し、生命居住環境および生命痕跡の探査を行う。(2) 広範囲な一般宇宙物理学の研究を実施</p>	<p>NASAの次世代旗艦天文衛星。口径6mの紫外線可視光近赤外線超大型宇宙望遠鏡。日本は装置開発と科学検討の貢献をもって参画</p>	<p>NASA、JAXA宇宙科学研究所、大阪大学など(住貴宏)</p>	<p>総額USD11B、日本貢献分JPY215億</p>	<p>米国Decadal Survey(Astro2020)を受けて3計画が統合され、スペース計画として1位で推薦された。2040年打上げ予定</p>

GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and Planetary Universe Spectrometer) [添付資料30]	赤方偏移15以上の初代銀河や、塵に埋もれた大質量ブラックホール、初代星の超新星爆発など、銀河形成進化論における重要な天体を観測。分光学による原始惑星系円盤のスペクトル線の同定など、惑星系形成に関しても革新的な学術的発展を目指す	近・中間赤外線(2-8 μ m)の超広視野撮像機能と中間赤外線帯(10-18 μ m)の高分散分光機能(波長分解能30,000; 速度分解能10km/s)を持つ口径1メートル級の宇宙望遠鏡	JAXA宇宙科学研究所 (井上昭雄)	JPY395億	2024年 戦略的中型計画ミッション提案、2030年代前半打ち上げ、運用期間5年および延長運用期間5年程度を目指す
惑星間宇宙望遠鏡 (IPST; Inter-Planetary Space Telescope) [添付資料12]	原初天体や宇宙背景ニュートリノの崩壊光子など、初期宇宙の未発見の痕跡を可視光・赤外線(0.3-300 μ m)の宇宙背景放射として検出することにより、宇宙最初期の天体形成の謎に迫る	黄道光(近赤外線背景放射)が弱い遠方の惑星間空間に、当初(Pathfinder)口径20cm、その後口径1mの宇宙望遠鏡を送り、可視光・赤外線で宇宙背景放射を観測する	JAXA宇宙科学研究所、 関西学院大学 (松浦周口)	技術実証JPY20億、IPST SAS中型計画JPY400億	2040年までにIPST Pathfinderとして、赤外線宇宙背景放射の絶対強度の測定を目指す

(出典) 物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会にて作成

(3) 宇宙線分野の計画

① コミュニティでの議論の経緯

宇宙線研究者会議(CRC)では、長期計画の策定に向けて天文学・宇宙物理学分科会に意志表明書が提出された宇宙線研究に関わる大型将来計画について、CRC実行委員会から諮問を受けたCRC将来計画検討小委員会が開催するタウンミーティングにおいて、オープンな形で議論と検討を行ってきた。それらの議論を基にCRC将来計画検討小委員会でさらに検討を重ね、2021年10月にCRC実行委員会の責任でCRCからの大型将来計画について推薦順位を決定し、天文学・宇宙物理学分科会に提出した。その後、未来の学術振興構想が開始されたことを受けてタウンミーティングを開催して議論し、現行計画や新たに意志表明書を提出する意思を示した宇宙線研究に関わる研究計画を追加して、以下の通り優先順位を決定した。

② 最優先する長期計画

CRCでは、カムランド2[4]、IceCube-Gen2[10]、B-DECIGO[33]の新規計画3件とKAGRA、CTA[11]、Hyper-K[35]の現行計画3件を最優先すべき研究計画として推薦する。

新規計画のうち、カムランド2は国際的な競争相手もアップグレードを予定しており、早期の計画実現が不可欠である。同様にIceCube-Gen2も米国での予算獲得のプロセスが進行中であり、日本でもそれに合わせて予算を獲得する必要がある。以上のことから、CRCでは、カムランド2とIceCube-Gen2を1位で推薦する。カムランド2は分野を跨る計画であるため、天文学・宇宙物理学分科会のみならず、より広い範囲を対象とした部会での検討も希望する。B-DECIGOは、斬新な計画として準備が進められている。今回は3位とする。

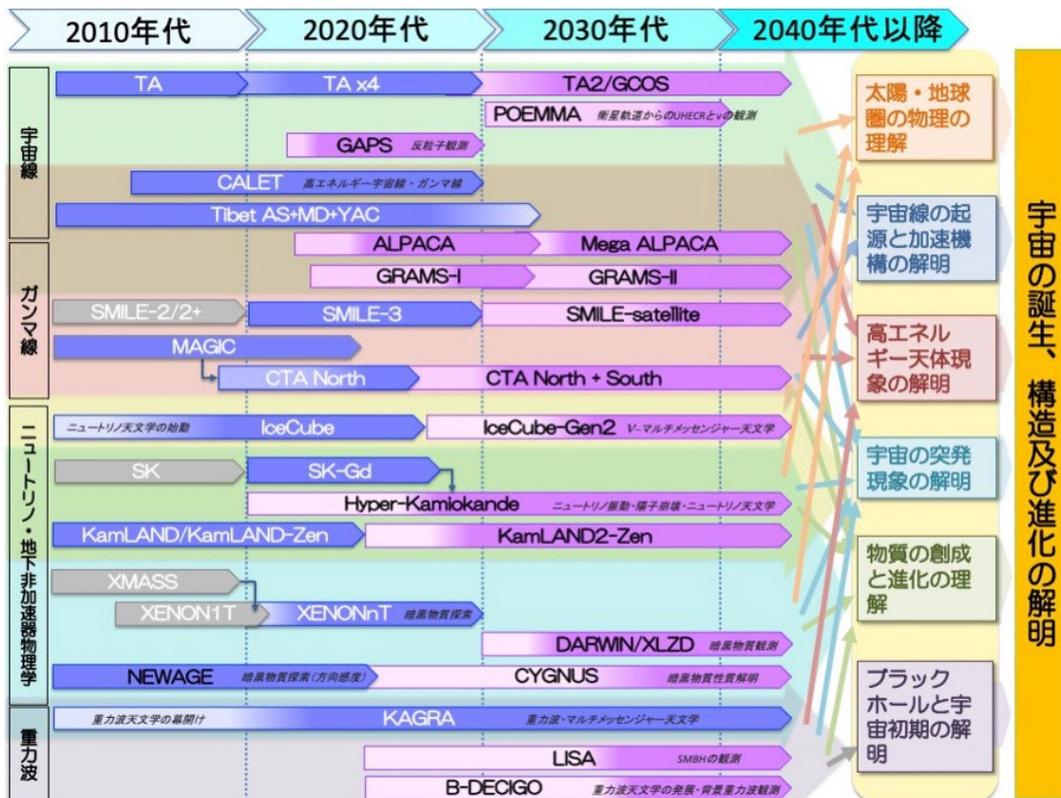
なお、現行計画の3件については既に建設が進んでおり、今回の推薦順位の検討対象とはしなかった。しかし、現行計画のビジョンに基づいた今後の拡張や性能向上は宇宙線分野の進展に不可欠であり、宇宙線分野の最優先すべき基幹計画として推薦する。

DARWIN[7]は暗黒物質の正体を、Mega ALPACA[17]は銀河系内の宇宙線加速天体とその加速限界を、UHECR-TA2[22]とPOEMMA[28]は最高エネルギー宇宙線起源天体といった宇宙線分野の最重要課題解明を目指す基幹計画として推薦する。

③ 当該分野の他の長期計画の紹介と相互関係

【CRC ロードマップ】

CRCでは、「未来の学術振興構想」及び「天文学・宇宙物理学の長期計画」に対応するため、CRCロードマップを改訂した。CRCが取り扱う分野を宇宙線、ガンマ線、ニュートリノ・地下非加速器物理学、重力波の4カテゴリーに大別し、各プロジェクトの2010年代から2040年代以降までのタイムラインとそれぞれの目指すサイエンスをまとめた。以下に、大別した分野ごとの計画概要を記述する。



図：宇宙線分野の長期計画ロードマップ

(出典) 物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会にて作成

【宇宙線】

宇宙線直接測定では国際宇宙ステーションでのCALET[*]が安定してデータ取得を継続するほか、GAPS[*]による反粒子高精度直接測定が計画されている。超高エネルギー宇宙線では Auger[*]/TA[*]での観測によって到来方向分布が一様ではない証拠が集まり始めている。地上実験ではAuger/TAの一桁上の規模によるUHECR-TA2[22]が、宇宙からの観測ではPOEMMAが構想されており、起源天体同定を目指す。

【ガンマ線】

始動したCTAが20GeVから100TeVの高感度観測によって銀河系内外の宇宙線加速や暗黒物質探査で世界をリードし、TibetAS γ [※]が開拓したsub-PeV観測をALPACAが南半球で実現する。新たなエネルギーフロンティアであるMeV・PeV領域でそれぞれGRAMS・SMILE-3[5]とMega ALPACAが提案されている。MeVは天体原子核種組成の解明に新たな窓を開く。気球観測による新技術の実証を進めながら将来の人工衛星化を目指す。PeVは銀河系内の粒子加速限界の解明を目指す。既存技術の大面积化で実現を目指す。

【ニュートリノ・ダークマター】

ニュートリノ天文学を主導してきたIceCube実験は後継実験IceCube-Gen2でマルチメッセンジャー天文学の重要な一角を担う。スーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウムを添加したSK-Gd実験が本格稼働して超新星背景ニュートリノの初観測を目指し、その後ハイパーカミオカンデが2020年代後半から稼働し、ニュートリノ実験、陽子崩壊実験を先導する。

カムランドはカムランド2実験へと発展してニュートリノ観測・ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の世界最高感度を目指す。暗黒物質探索実験としては、XENONnT [※] 実験による探索、その後DARWIN/XLZD [※] で観測を進める。さらに方向感度を有するNEWAGE/CYGNUSによって暗黒物質の正体解明を目指す。

【重力波】

最優先であるKAGRA (10-1000Hz帯) 及びB-DECIGO (0.1-10Hz帯) に加え、超大質量ブラックホール連星合体などからの重力波を狙う宇宙望遠鏡LISA (mHz帯) が提案されている。LISAはESAのCosmic Vision Programに選定されており、2035年頃の打ち上げを目指している。日本チームはLISAのフォトレシーバー開発の一部を担っている。この他、米国、欧州それぞれで第3世代超大型地上望遠鏡計画も提案されており、日本からの寄与が期待されている。

④ 他の分野コミュニティの推薦計画との関係

ここで提案されている計画は、狭い意味での宇宙線分野に閉じてはおらず、ほぼ全ての計画が分野横断的・学際的なものになっていると言って過言ではない。非加速器による素粒子実験を兼ねているものとして、カムランド2、ハイパーカミオカンデ、DARWINが挙げられ、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊、陽子崩壊、ニュートリノ振動、暗黒物質、アクシオン探査など幅広い研究テーマと関わっている。ガンマ線観測を担うCTAやMega ALPACA、超高エネルギー宇宙線を観測するPOEMMAは、全天から暗黒物質崩壊起源のシグナルを探索することが期待され、さらにローレンツ不変性の破れに対する知見も得られる。

本格的なマルチメッセンジャー天文学の時代に突入した今、ガンマ線 (CTA、Mega ALPACA)、ニュートリノ (ハイパーカミオカンデ、IceCube-Gen2、DARWIN)、重力波 (KAGRA、B-DECIGO) による観測は、電波や可視、X線による観測と協調し、今後の天文学を強力に牽引することが期待される。UHECR-TA2やPOEMMAは最高エネルギー宇宙線の到来頻度や組成の異方性を検出し、電磁波源カタログとの相関解析によりその線源の特定を狙う。こうした多角的な視点を持った研究は、高エネルギー天体現象に限らず、宇宙の星形成史、太陽物理などの研究にも大きなインパクトを与えるポテンシャルがある。

表3 宇宙線分野の諸計画のまとめ

名称	目的	計画概要	提案・推進主体 (代表者)	予算規模	進捗状況
カムランド2 [添付資料4]	ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊($0\nu 2\beta$)の探索を行う。 $0\nu 2\beta$ はニュートリノのマヨラナ性検証の唯一の方法。宇宙素粒子・原子核分野の最重要課題。その他に、超新星前兆ニュートリノ観測などの低エネルギーニュートリノ天文学・ニュートリノ地球科学の推進	世界をリードするカムランドを大幅高度化し、複数の理論予想をカバーすることで、ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊($0\nu 2\beta$)の探索などを行う	東北大学を中心とした多数の大学の国際共同 (井上邦雄)	総経費JPY78億(建設および観測10年) (うち国内負担71億円)、建設経費JPY40億(うち国外負担分JPY4億)、運用経費年額JPY3.8億	2024-26年建設、2027-36年観測
IceCube-Gen2 [添付資料10]	高エネルギーニュートリノ天文学を確立したIceCube観測所の次世代プロジェクト。ニュートリノ観測により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の起源を同定する。他波長での観測、重力波観測と協調し、マルチメッセンジャー天文学研究の中核として、天文学研究に新しい方向性を加える	IceCube実験を約10倍に拡張するIceCube-Gen2観測所を建設。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、ニュートリノ放射天体の同定、電磁波・重力波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東探索による超高エネルギー宇宙線起源などの研究を行う	米国等14か国、約50の研究機関が参加する国際共同機関、日本では千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターが中核(吉田滋)	総経費USD360M(約JPY490億)、うち国内負担分JPY52億、運転・維持経費国内負担分年額JPY1億	2024年度検出器製作開始、2027年度から2033年度までの7年間で南極に建設、2028年度より観測データを順次公開、データセンター立ち上げ
B-DECIGO [添付資料33]	0.1-10Hz帯の重力波を検出することで、中性子星やブラックホールの連星合体を事前に予想する。これにより、連星合体の瞬間を他の望遠鏡で観測できるようになり、連星合体現	宇宙機3機の編隊飛行によって構成されるレーザー干渉計重力波望遠鏡によって、地上の重力波望遠鏡では観測が困難な10Hz以下の重力波を検出する	JAXA宇宙科学研究所、東京大学など(安東正樹)	JPY500億	2023-26年ミッション検討・根幹技術開発、2027-30年プロジェクト開始、基本設計・詳細設計、2031-33年実

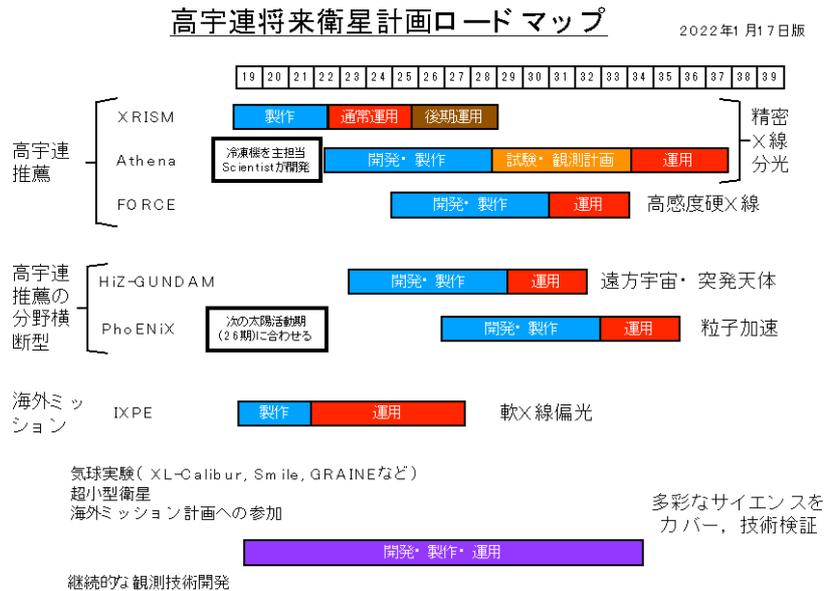
	象のマルチメッセンジャー天文学を格段に進歩させる				機製作、2034年打上げを想定
CTA (Cherenkov Telescope Array) [添付資料11]	従来よりも1桁高い感度とエネルギー範囲(20GeVから300TeV)で全天からガンマ線を検出し、現在よりも1桁多い数(数千個)の天体を観測する。これによって極限宇宙の姿を捉え、ブラックホール、宇宙線起源、ダークマターなどの解明を目指す	超高エネルギーガンマ線によって生じるチェレンコフ光を、南北両半球に合計73台設置した3種の口径(23m, 12m, 4m)の望遠鏡で観測する	25か国約1500名の研究者からなるCTAコンソーシアムを中心とした大型国際共同計画。2023年にはERIC機関としてCTA天文台を設立予定。日本では東京大学宇宙線研究所が中心機関(窪秀利)	総建設費EUR430M、運営費年額EUR20M。日本分担分建設費JPY62億、運営費年額JPY4億	CTA北サイトは2028年に完成予定。CTA南サイトは2024年から建設開始、2028年に完成予定。その後南北両サイトを統合したCTA天文台による科学観測開始。20年間運用予定
大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験 (Hyper-K; Hyper-Kamiokande) [添付資料35]	素粒子実験を行う他に、超新星爆発に伴うニュートリノを観測、マルチメッセンジャー天文学の一翼を担い、超新星爆発の歴史を解明する。また太陽ニュートリノや大気ニュートリノを観測して、ニュートリノ振動の研究を進める	スーパーカミオカンデの約8倍の有効質量19万トン(総質量26万トン)の大型先端検出器(ハイパーカミオカンデ)を建設	東京大学宇宙線研究所、高エネルギー加速器研究機構	総経費約JPY1545億(建設+20年間の運転経費)。うち日本分担分は約JPY1391億	2020年建設開始、2027年観測開始予定、20年以上の運用

(出典) 物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会にて作成

(4) 高エネルギー天文学分野の計画

① コミュニティでの議論の経緯

高エネルギー宇宙物理連絡会（以下、高宇連）では将来計画検討委員会を2013年から常設とし、隔年で「日本が関与する飛翔体を用いた高エネルギー天体物理学のロードマップ検討まとめ」を発行してきた。その中で、高宇連が関与するミッションについてロードマップを制定しているが、ミッションごとに目的や科学目標が違うので、それらをカテゴリー分けし、優先順位を付けずに併記する形を取ってきた。今回は、日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会（以下、分科会）から各コミュニティに対して、関連大型ミッションを優先順位を付けて2021年9月末までに推薦することが求められた。これを受けて高宇連では、意志表明書（第2章参照）が提出され、大型研究計画として推薦を希望する4ミッションAthena[14]、FORCE[9]、HiZ-GUNDAM[18]、PhoENiX[25]に対し、順位を付けて推薦することとした。この目的のため、高宇連では「高宇連マスタープラン2023タスクフォース（以下、TF）」を2021年4月に立ち上げ、コミュニティの意見を取りまとめた上で優先順位を決定し、2021年10月に分科会に推薦した。その後、日本学術会議で未来の学術振興構想が開始されたことに伴い、追加情報を分科会に提供した。



図：高エネルギー天文学分野の長期計画ロードマップ

(出典) 日本が関与する飛翔体を用いた高エネルギー天体物理学のロードマップ検討まとめ (2023年) より図7.1

② 最優先する長期計画

高エネルギー天文分野の最優先する長期計画として、同率1位AthenaとFORCE、3位でHiZ-GUNDAMを推薦する。PhoENiXは大型研究計画として推薦する。

【Athena】

「The Hot and Energetic Universe」を科学目標として掲げるESAのL2大型ミッションである。撮像分光によって発展してきたX線天文学を、大有効面積・広視野・高エネルギー分解能によってさらに発展させる、2030年代の大型天文台衛星である。

【FORCE】

「ミッシングブラックホールの探査を通じて、現在の宇宙を構成する天体の形成史を紐解く」、「超新星残骸や銀河団の観測を通じて、相対論的粒子の起源と総量を測定する」、及び「若い超新星残骸の観測を通じて、超新星爆発における爆発メカニズムと元素合成を理解する」を目的とする、JAXAの公募型小型衛星計画である。

【HiZ-GUNDAM】

ガンマ線バースト（GRB）に代表される突発天体现象を観測することで、初期宇宙と極限時空の探査を革新的に開拓することを目的としたJAXAの公募型小型衛星計画である。現在、ダウンセクションに向けた活動が進められている。光学・赤外線天文学分野との連携プロジェクトである。

【PhoENiX】

磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解を科学目的とした、JAXAの公募型小型衛星計画である。磁気リコネクションが引き起こす太陽フレアを主たる観測対象とし、粒子加速場所の特定、加速の時間発展の調査、加速の特徴の把握を目指す。太陽物理学分野との連携プロジェクトである。

FORCEとAthenaの順位付けについては、TF内で最後まで大きな議論となった。これら二つの計画の重要性と緊急性の基準は大きく異なることから、高宇連からは同率1位で推すこととした。これらの計画は、いずれもコミュニ

ティの総力を挙げて、参加・実現すべき重要なものであり、どちらか一方が欠けても高宇連コミュニティが目指すサイエンスが成り立たない。

HiZ-GUNDAMとPhoENiXは、それぞれ高宇連と他の分野が連携し、サイエンスを絞り込んで目的を特化した計画である。これらは高宇連内部での位置付けにおいて、FORCEやAthenaとはカテゴリが違い、同じ土俵で比較することは困難であった。HiZ-GUNDAMとPhoENiXの順位については、HiZ-GUNDAMの方が公募型小型衛星の選定段階として先行していること、高宇連の関与がより大きいことから、上位で推すこととした。

③ 当該分野の他の長期計画の紹介と相互関係

X線天体物理学分野では、日本のXRISMが、この先10年の分野を代表するミッションとして進められている。またAthenaは、日米欧の中で唯一認められた、将来の大型X線天文台ミッションである。一方で、精密分光観測を主軸とするXRISMやAthenaでは実現することができない重要な科学テーマが存在しており、世界的に見ると、そのようなテーマを追求する相補的な衛星ミッションが積極的に立案されつつある。NASA主導のX線衛星プロジェクトでは、2032年打ち上げを目指すProbeクラスとしてHEX-P, AXIS, LEM, Strobe-Xなどが候補として挙がっている。2027年打ち上げ予定の小型衛星(SMEX)としてMeV全天観測衛星COSIの開発が進んでいる。2021年度公募の中型衛星(MIDEX)ではStar-Xが選出され、他計画とのダウンセクションに向けた活動が続いている。また、インドならびに中国が、X線天体物理学分野に急速な勢いで参入してきており、多くの将来計画が検討・立案され始めている。

④ 他の分野コミュニティの推薦計画との関係

今回推薦したHiZ-GUNDAMとPhoENiXは、いずれも分野横断型の将来計画である。HiZ-GUNDAMは、GRB観測のみならず、近年の天文学で話題となっている、Fast Radio Burst、超高エネルギーニュートリノ源、恒星スーパーフレア、超新星ショックブレークアウトなどの発見・追観測など、あらゆる時間領域天文学及びマルチメッセンジャー天文学へ貢献できるミッションである。また、PhoENiXは、粒子加速の理解を目指す研究者が、既存分野(高エネルギー)

ギー宇宙物理学、太陽物理学、地球惑星磁気圏プラズマ物理学、実験室プラズマ物理学) の枠組みを超えて参加・推進する分野間連携計画である。

表4 高エネルギー天文学分野の諸計画のまとめ

名称	目的	計画概要	提案・推進主体 (代表者)	予算規模	進捗状況
Athena (大型国際X線天文台; Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics) [添付資料14]	約100億年前から現在までの銀河団をX線で観測し、大規模構造への物質の集積過程を解明。初期宇宙から現在までの巨大ブラックホールを検出し、その成長と銀河への影響を研究	欧州宇宙機構ESAのL2大型ミッション。撮像分光によって発展してきたX線天文学を、大有効面積・広視野・高エネルギー分解能によってさらに発展させる	ESA、JAXA宇宙科学研究所(松本浩典)	総経費EUR13億、日本負担分JPY50億	2027年以降に審査を経て実機製作。2030年代後半の仕上げを予定
FORCE (広帯域X線高感度撮像分光衛星; Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) [添付資料9]	これまで見えていなかった超新星残骸や銀河団からの非熱的X線の検出・測定による高エネルギー宇宙線の起源と総量の解明。これまで見えていなかったさまざまな質量階層におけるブラックホールの発見、それをプローブとした天体形成史の解明	低バックグラウンド広帯域X線検出器と、NASAゴダード宇宙飛行センターの高空間分解能シリコン望遠鏡を搭載する国際協同ミッション(中型衛星計画へと変更の予定)	宇宙科学研究所を想定、宮崎大学など(森浩二)	総額JPY260億。うち日本負担分はJPY180億(中型衛星計画へと変更の予定)	2023年5月時点において、小型衛星計画としてのFORCEを発展的に解消し、広帯域高感度撮像分光を手段とした中型衛星を立案中
HiZ-GUNDAM (ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画) [添付資料18]	高赤方偏移のGRB(ガンマ線バースト)を検出することで、(1)初期宇宙におけるGRB発生率・星形成率を明らかにする。(2)地上大型望遠鏡と協力して宇宙再電離期の歴史を紐解く。(3)明るいGRBの分光観測で微量金属元素量を測定、宇宙に重元素が増加する変遷を捉える	高感度・広視野X線モニターと、口径30cmの赤外線望遠鏡を搭載した衛星により、GRBを検出し、同時に専用赤外線望遠鏡で追観測することで、突発天体現象のマルチメッセンジャー天文学を推進	宇宙科学研究所を想定、金沢大学など。国内20大学・研究機関から68名の協力体制で開発・検討を実施中。国外12機関から14名の研究者が参画(米徳大輔)	JPY175億(ミッション機器総額の30%、その他総額10%の予備費を含む。打ち上げ経費を除く)	JAXA宇宙科学研究所の公募型小型計画の候補。プリプロジェクト候補チームを結成して検討や基礎開発を実施中
PhoENiX	表5参照	表5参照	表5参照	表5参照	表5参照

(出典) 物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会にて作成

(5) 太陽物理学分野の計画

① コミュニティでの議論の経緯

これまで日本の太陽物理学コミュニティでは、太陽研連シンポジウムなどを通じて我が国が重点的に狙うサイエンス課題、及びそのための将来観測計画を慎重に議論してきた。その結果、以下のような結論を得た。

日本の太陽物理学コミュニティが今後10-20年間、すなわち2020-30年代に重点的に狙うサイエンス課題は、(1) 彩層・コロナと太陽風の形成機構の究明(彩層・コロナダイナミクス)、(2) 太陽活動現象の発現機構の究明とその変動を予測するための知見の獲得(宇宙天気・宇宙気候基礎物理)である。これは、世界の動向と、課題の喫緊性、技術的成熟度などを踏まえて、コミュニティ内での議論を繰り返してコンセンサスを得た目標である。このようなサイエンス課題の解決のために取る戦略としては、(i) 最優先事項としてSOLAR-Cミッション[2]を実現、(ii) このミッションを支えるために、太陽・太陽圏研究領域における国内外機関との共同研究、特に4 m級大型地上太陽望遠鏡(ダニエル K. イノウエ望遠鏡[*])などを用いた共同観測を推進、(iii) 観測を支え、かつ新課題を切り開く理論シミュレーション研究を推進し、天体高エネルギー物理学・地球惑星科学など関連分野との交流の中核とすること、を取る。さらにはその先の2030年代に向けて、SOLAR-C実現後の次世代プロジェクトに関する科学計画立案・要素技術開発・実証観測実験について並行して議論を進める。

② 最優先する長期計画

【SOLAR-C】

宇宙にいかに高温プラズマが作られ、太陽がいかにして地球や惑星に影響を及ぼしているのかという命題を探求するため、SOLAR-C計画は、太陽表面から太陽コロナ・惑星間空間までのエネルギーと質量の輸送を理解し、宇宙プラズマ中で普遍的に起きている基礎物理過程を検証する。太陽の磁気活動は、基本となる微細な構造間で受け渡される磁気エネルギーを源泉とし、彩層やコロナという高温の大気を形成し、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ている。これらの成因を理解するため、基本となる磁気構造を広範な温度領域で追跡し、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。観測装置として極端紫外線域の高分散撮像分光器を用い、太陽を長

時間観測できる太陽同期極軌道から、太陽大気の彩層から太陽コロナに到る温度領域を隙間なく観測する。太陽大気全体にわたり、プラズマのダイナミックな現象に追従するため、観測装置は以前に飛翔したものに較べておよそ1桁以上の性能（空間・時間分解能、波長範囲）向上を見込む。本計画は、2020年代後半にJAXA公募型小型衛星として実現することを目指す計画である。日本の太陽研究者コミュニティが第一優先で取り組む計画であり、米国・欧州からの参加を得て実現する国際プロジェクトである。

本計画の使命は、太陽物理学の最も基本的な問題、磁場とプラズマの相互作用が、どのようにして太陽活動を引き起こすかという問いに、最終的な答えを出すことにある。相互作用の最も重要な帰結として、太陽外層大気の加熱と、太陽フレア及びコロナ質量放出（CME）といった爆発的エネルギー解放が挙げられる。したがって、本計画の科学目的は（i）太陽大気・太陽風を形成する基礎物理過程、（ii）太陽大気的不安定化と太陽フレア・プラズマ噴出を引き起こすエネルギー解放過程を解明することにある。これには、彩層からコロナにわたる太陽大気の全温度層を同時に切れ目なく観測し、かつ太陽大気の基本構造とその変化を高空間・時間分解能で追跡し、同時に太陽大気で起きている基礎物理過程の分光情報を獲得する必要がある。そのため、以上三つのことを同時に実施する極端紫外線撮像分光望遠鏡（EUVST）をJAXA公募型小型衛星SOLAR-Cに搭載する。

EUVSTは、(A) 17-128nmの波長域を、(B) 空間分解能0.4秒角、時間分解能0.5秒（最短）でデータ取得し、(C) 2 km/sの視線速度変化を検出することができる高性能分光観測を行う。17-128nmの波長域は、彩層から遷移層・コロナ、そしてフレアで生成される超高温プラズマまで広い温度帯（1万度から2000万度）を隙間なく分光観測できる輝線が存在する波長域である。コロナ観測における空間分解能0.4秒角は、今まで実現された分光観測に比べ約7倍（分解される面積では約50倍）高く、太陽観測衛星「ひので」が太陽表面（光球・彩層）の観測で実現した空間分解能とほぼ同じである。この空間分解能により、表面上空に広がる外層大気に存在する基本的な磁気構造を初めて識別できる。高い時間分解能は、従来の観測に比べEUVSTが10-30倍高い有効面積を持つことで実現される。以上、従来の観測では実現できていない高い性能で、様々な輝線のスペクトルを高分散分光計測して、太陽プラズマの視線速度や温度・密度などの物理診断を行う。

③ 当該分野の他の長期計画の紹介と相互関係

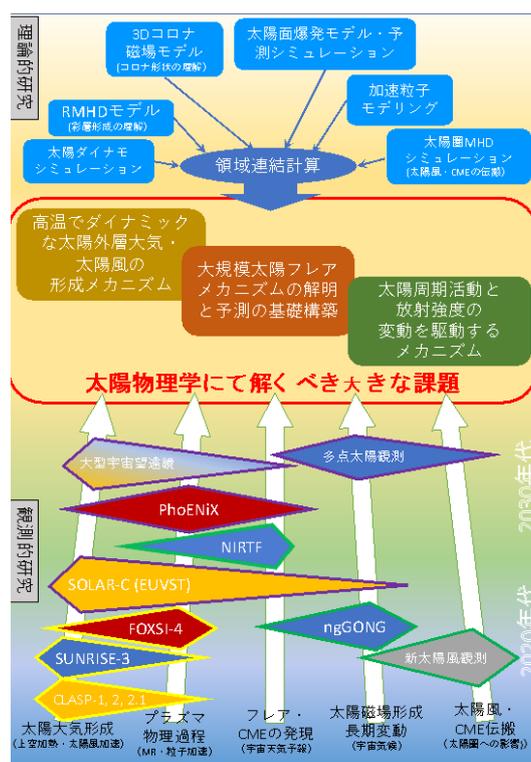
太陽観測衛星「ひので」は、太陽大気が無数の小さな磁気構造の集合体であり、それらが極めてダイナミックに変化していることを明らかにした。しかし、その中にはまだ解像されないより小スケールの構造が存在することもわかった。高温で活動的な太陽外層大気を発現させる機構は、その本質的な部分でまだ謎に満ちている。この解明に不可欠な観測は、光球からコロナの構造を空間・時間分解した精密な物理計測である。NASAが2013年に打ち上げたIRIS衛星は彩層の高解像紫外線分光撮像を実現したが、対象は狭い温度領域である。また、NASAが2012年に実施したHi-Cロケット実験は、高解像極端紫外線（EUV）画像からコロナ中にサブ秒角の構造が存在することを示したが、数分間の観測で時間発展を追跡できない。ハワイに建設された大型太陽望遠鏡（ダニエル K. イノウエ望遠鏡；DKIST）は、光球彩層観測の超高解像観測を2020年に開始した。大口径太陽望遠鏡焦点面装置はDKISTに搭載を目指している。一方、太陽の長期的活動や宇宙天気予報の観点ではngGONG [24]が目指す太陽全面をカバーする広視野連続観測も必要とされる。

2025年前後には、Solar Orbiter（ESA）が水星の軌道半径以内まで、Parker Solar Probe（NASA）が太陽半径の約9倍の距離まで接近し、水星軌道より内側の惑星間空間から外部コロナの探査を実施する。また2020年代後半には次世代太陽風計画[15]が内部太陽圏全体をカバーする太陽風のリモートセンシング観測を実現する。SOLAR-C計画は、これらと同時期に遷移層やコロナの高解像度分光撮像観測を行う唯一の計画であり、DKIST・ngGONGが観測する太陽表面と、Parker Solar Probe・次世代太陽風観測装置等が観測する内部太陽圏とのつながりを理解する上で必要不可欠なデータを提供する。

④ 他の分野コミュニティの推薦計画との関係

SOLAR-C計画には太陽物理学の科学的優先度を反映した二つの側面がある。一つ目は、太陽で起きている多くの物理現象を、宇宙で起きている物理現象に敷衍することができることである。太陽大気を構成する微細磁場構造を起因とする多様な太陽活動現象は、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。本計画では、天体プラズマで起きている物理現象を理解するために重要である基礎物理過程の洞察や知見が得られ、天体物理学の幅広い分野へ応用することができる。二つ目は、太陽の磁場構造やそこで起きる大規模な活動が、太陽系空間や地球磁気圏を介して地球周辺

の宇宙空間環境（宇宙天気）を支配している点である。先進的な人工衛星や測位技術（GPS）など宇宙に基盤をおく先進的な技術への依存度が増え続けている現在、この宇宙空間環境の変動が直接、我々の日常生活にも結び付いている。本計画は、地球環境、社会環境に直接影響を及ぼし得る、太陽からの大規模噴出や太陽風の起源と動力学に関する知見を大きく発展させるものである。太陽面における大規模な爆発現象やそれに伴う噴出物などが地球に到達した場合、地球周辺の宇宙環境を乱すことになるため、これらの突発現象の発生を物理的により確度をもって予測できるようになると、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、次世代太陽風観測計画を包含した地球惑星科学分野の推薦計画である太陽地球系結合過程の研究基盤形成計画との連携が期待される。さらに、宇宙プラズマの基礎物理及び太陽の地球環境への影響の理解は、35億年前に地球に生命が誕生した際の太陽地球環境の理解に発展させることができる。本計画はどのようにして地球に生命が誕生したかの理解にも繋がる。また、本衛星計画における開発によって獲得される解像度の高い宇宙望遠鏡の技術や、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、科学衛星のみならず、我が国の地球観測衛星の解像度向上、官需実用衛星等の高度化にも貢献することが見込まれる。



図：2020-2030年代における日本の太陽物理学分野のロードマップ

（出典）太陽・太陽圏研究領域の目標・戦略・工程表（2022年版）より図4

表5 太陽物理学分野の諸計画のまとめ

名称	目的	計画概要	提案・推進主体 (代表者)	予算規模	進捗状況
SOLAR-C 高感度太陽紫外線分光観測衛星 [添付資料2]	太陽地場の構造を広範な温度領域で追跡し、その運動や相互作用を観測して、磁気エネルギーの輸送過程や散逸過程を定量化する	日本が主導し、米国及び欧州諸国が協力する太陽観測衛星計画。極端紫外線域の高分散撮像分光器を搭載し、太陽を□時間観測できる太陽同期極軌道から、太陽大気のカラダ(2万度)からコロナ(100-2000万度)にわたる温度領域を隙間なく観測する	JAXA 宇宙科学研究所、国立天文台、名古屋大学、NASA、ESA (清水敏文)	総額約JPY260億、うち日本負担分約JPY180億	2028年度前半の打上げを目標
ngGONG (next generation Global Oscillation Network Group) [添付資料24]	十分な精度と分解能で太陽を連続観測し、太陽コロナと太陽風を駆動する大局的な磁場構造を把握。突発的現象から太陽周期活動まで幅広い時間スケールの磁気活動をとらえる。宇宙天気現象の予測研究にも貢献	太陽の全面観測を行う望遠鏡を世界6か所に配置することで、24時間切れ目なく太陽を観測。	米国NSOとHAO (HighAltitudeObservatory)が中心。ヨーロッパと日本(国立天文台及び京都大)が参加(勝川行雄)	2023-25年設計検討、2026-28年開発・建設、2029年以降観測開始	総予算規模は約JPY120億。国内における検討、設計などJPY1億、開発約JPY10億
PhoENiX (太陽X線ガンマ線観測衛星; Physics of Energetic and Non-thermal Plasmas in the X-ray region)	磁気リコネクションが引き起こす太陽フレアを主たる観測対象とし、粒子加速場所の特定、加速の時間発展の調査、加速の特徴の把握を目指す	人工衛星を用いて軟X線から硬X線にかけて高ダイナミックレンジの2次元集光撮像分光観測と、硬X線から軟ガンマ線にかけて高精度の偏光分光観測を実施	JAXA宇宙科学研究所を想定(成影典之)	約JPY180億	2033年頃(第26周期の太陽活動上昇期)を想定

[添付資料25]					
次世代太陽風観測装置 [添付資料15]	地上観測により太陽風の加速機構を解明する。また太陽風擾乱の到来予測精度を向上させ、宇宙天気予報を通じて宇宙社会に貢献	国内3か所(富士、木曾、豊川)に327MHz帯域に感度をもつフェーズドアレイアンテナ群(各4000m ² の有効面積)を建設し、太陽風の3次元構造を観測する	名古屋大学・宇宙地球環境研究所 (岩井一正)	総額JPY20億(建設費JPY16億、運営費JPY4億)	2023年試験アレイ。2026年富士で観測開始。2028年木曾・豊川の開発開始。2030年3局での観測開始

(出典) 物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会にて作成

<用語集>

以下の用語については本文中に[※]を付記して示した。

30m望遠鏡 (Thirty Meter Telescope; TMT)

ハワイ島マウナケア山頂に、口径30mの大型光学赤外線望遠鏡の建設を目指す国際共同プロジェクト[23]

6 m級高コントラスト宇宙望遠鏡 (Habitable Worlds Observatory)

口径6 mの紫外線可視光近赤外線超大型宇宙望遠鏡。NASA の次世代旗艦計画[20]

Auger (Pierre Auger Project)

アルゼンチンの草原地帯に国際協力で建設された超高エネルギー宇宙線観測装置群

CALET (CALorimetric Electron Telescope)

国際宇宙ステーションの「きぼう」日本実験棟に設置された高エネルギー電子・ガンマ線の観測装置。2015年にJAXAが打ち上げ

DES (Dark Energy Survey)

セロトロロ天文台の4m望遠鏡を用いた銀河サーベイ

ESA (European Space Agency)

欧州宇宙機関

ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures)

欧州各国の研究担当高官によって組織されるフォーラム。10年から20年のスケールで欧州の国際研究基盤（新規および大規模なアップグレード）のロードマップを策定し、これらの施設の実現を促進している

DIB (Diffuse Interstellar Bands)

広く天体のスペクトルに見られる星間物質による吸収バンド。紫外線、可視光、赤外線の間で約500のバンドが確認されている

GAPS (General Anti-Particle Spectrometer)

宇宙線中の反粒子探索を目的とする国際共同実験

GONG (Global Oscillation Network Group)

世界各地の同種の望遠鏡6台からなるネットワークで、連続的に太陽振動の観測を行う

G型星 (G-type Star)

表面温度が5300-6000 K程度で、太陽とほぼ同じ質量を持つ恒星

Λ CDMモデル (Lambda Cold Dark Matter Model)

ダークエネルギーと冷たいダークマターを含む加速膨張する宇宙モデル。現時点で、さまざまな観測事実と最も整合性が良い

IceCube実験

南極の氷の中に設置された高エネルギー宇宙ニュートリノ望遠鏡。2006年から一部の運転を開始し、2010年に完成。1 km³の検出体積を持つ。2013年に太陽系外からの初めての高エネルギーニュートリノ事象の検出を報告した

IRAM 30m望遠鏡 (Institut de Radioastronomie Millimétrique)

IRAM (フランス、ドイツ、スペイン国際ミリ波電波天文学研究所) が運用する口径30mのミリ波望遠鏡。スペインのピコベレタにある

IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph)

NASAが2013年に打ち上げた太陽観測衛星。太陽光球とコロナの間にある彩層および遷移層を紫外線で観測する

IRIS (Infrared Imaging Spectrograph)

TMTに搭載予定の近赤外線撮像分光器

IRIS (Infrared Imaging Surveyor)

JAXAが2006年に打ち上げた赤外線観測衛星「あかり」(ASTRO-F)の打ち上げ前の名称

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)

米国のレーザー干渉型重力波検出器。ルイジアナ州のリビングストンとワシントン州のハンフォードの2箇所(距離約3000km)に設置されている

MODHIS (Multi-Objective Diffraction-limited High-Resolution Infrared Spectrograph)

TMTに搭載予定の近赤外線高分散分光器

M型星 (M-type Star)

表面温度が2600-3800 K程度の低温で、質量が太陽の0.1-0.6倍程度の恒星
NOEMA (Northern Extended Millimeter Array)

ミリ波電波天文学研究所(IRAM)が運用している開口合成型のミリ波干渉計

Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System)

ハワイのハレアカラ天文台に口径1.8mの望遠鏡を4台設置し、全天をサーベイ観測して移動天体や突発天体を検出する計画

Parker Solar Probe

NASAが2018年に打ち上げた太陽観測衛星。外部コロナの直接観測を行う予定

PeVatron

陽子や原子核をPeV (10^{15} eV) を超えるエネルギーまで加速する天体の呼称。粒子エネルギーの単位「PeV」と加速器の名称の接尾辞「-tron」からつくられた造語

POLARBEAR実験

南米アタカマで実施中の宇宙マイクロ波背景放射Bモード偏光観測実験

r過程 (r-process)

速い(rapid)中性子捕獲とそれに続くベータ崩壊により、鉄属より重い中性子過剰元素を形成する過程

S8

宇宙の密度ゆらぎの大きさ (σ_8) と、宇宙の全エネルギーに占める物質エネルギーの割合 (Ω_m) から求められるパラメータ。宇宙モデルを制限する主要なパラメータの一つ

SDO衛星 (Solar Dynamics Observatory)

NASAが2010年に打ち上げた太陽観測衛星

Simons Observatory

POLARBEARの後継となる宇宙マイクロ波背景放射Bモード偏光観測実験

SOHO衛星 (Solar and Heliospheric Observatory)

ESAが1995年に打ち上げた太陽観測衛星

Solar Orbiter

ESAが2020年に打ち上げた太陽観測衛星。太陽の極地方を観測する

TA (Telescope Array)

アメリカ合衆国ユタ州にある超高エネルギー宇宙線検出装置群

TibetAS γ

日本と中国の共同研究として1990年に開始されたチベット高原での高エネルギー宇宙線観測実験。 10^{12} から 10^{16} eVのエネルギー域で宇宙線の化学組成などを研究

UKIDSS (UKIRT Infrared Deep Sky Survey)

マウナケア天文台のUKIRT 4m望遠鏡を用いた近赤外線サーベイ

VIKING (VISTA Kilo-degree Infrared Galaxy Survey)

チリ、パラナル天文台のVISTA 4.1m望遠鏡を用いた近赤外線サーベイ

Virgo

欧州6カ国共同によるレーザー干渉型重力波検出器。イタリアのピサにある

VLA (Very Large Array)

アメリカ国立電波天文台(NRAO)が運用している大型開口合成電波干渉計

XRISM衛星 (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission)

2023年にJAXAが打ち上げ予定のX線天文衛星。「ひとみ」の代替機

Yebes 40m望遠鏡

スペイン国立地理研究所が運用している口径40mの電波望遠鏡。スペインのイエベスにある

XENONnT

暗黒物質の直接検出を目指す日本・米国・欧州を中心としたXENON共同実験のうち最新のもの。8.5トンのキセノンを使用し、入射粒子との相互作用で生じた光や電子を検出する。イタリア・グランサッソ国立研究所 (INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso) の地下に設置されている

XLZD (XENON, LZ, and DARWIN collaborations)

暗黒物質の直接検出を目指す新たな国際コンソーシアム。XENON共同実験などのグループが統合されたもの。DARWINを推進

いて座A* (Sgr A*)

いて座方向の電波源 (Sgr A) 中に存在するコンパクトで比熱的な電波源。天の川銀河系の中心核に存在する超大質量ブラックホール周囲の降着円盤と考えられている

イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT)

多数のミリ波・サブミリ波望遠鏡による地球規模の超長基線電波干渉計(VLBI)を構成して、ブラックホールのごく近傍、事象の地平線(イベントホライズン)近くまでの画像を高い空間分解能で撮像し、ブラックホールの物理の解明を目指す国際研究プロジェクト

ガイア衛星 (Gaia Satellite)

2013年にESAが打ち上げた位置天文学測定専用の衛星。ヒッパルコス衛星の後継機

キロノバ (Kilonova)

新星の約1000倍の明るさに達する爆発現象。2017年に、NGC4993で二重中性子星連星が合体してキロノバが発生したことが、重力波と全ての波長の電磁波で観測された

高速電波バースト (Fast Radio Burst; FRB)

電波域(110 MHzから8 GHz)で観測され、継続時間が数ミリ秒ないしそれ以下のパルス状電磁波。フラックスは約10 mJyから100 Jy程度

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (James Webb Space Telescope; JWST)

NASA等による大型宇宙赤外線望遠鏡。ハッブル宇宙望遠鏡の後継機。2021年打ち上げ

すばる高精度赤外線分光器 (Infrared Doppler: IRD)

すばる望遠鏡に搭載されている太陽系外惑星観測用の分光器

すばる望遠鏡主焦点多天体分光器 (Prime Focus Spectrograph; PFS)

すばる望遠鏡の主焦点に搭載される多天体分光器

すばる望遠鏡主焦点広視野カメラ (Hyper Suprime Cam; HSC)

すばる望遠鏡の主焦点に搭載される超広視野カメラ

すばる望遠鏡ULTIMATE

すばる望遠鏡で計画されている次世代補償光学系システム。地表層ゆらぎを補正することで、既存の補償光学に比べて100倍以上の視野にわたって星像を改善する

スペクトルエネルギー分布 (SED; Spectral Energy Distribution)

スペクトルとほぼ同じ意味であるが、広い波長 (あるいは周波数やエネルギー) 範囲に及ぶ電磁波の強度分布をグラフで表現する場合に使われる

セイファート銀河 (Seyfer Galaxy)

1943年にセイファート (C. Seyfert) によって発見された活動銀河核 (超大質量ブラックホール) を持つ銀河。明るい核と、通常の銀河とは異なるスペクトルを持つ。渦巻銀河であることが多い

ダニエル K. イノウエ望遠鏡 (DKIST)

米国国立太陽観測所 (NSO) がハワイ州のハレアカラ天文台に建設した口径4mの太陽望遠鏡。2021年完成

ティーガーデン星 (Teegarden's star)

3.8 pcの距離に存在する赤色矮星。光度は太陽の約0.07%

テス衛星 (Transiting Exoplanet Survey Satellite: TESS)

トランジット法による太陽系外惑星探索衛星。2018年にNASAが打ち上げ

東大アタカマ望遠鏡 (TAO)

東京大学がチリ、アタカマのチャナントル山頂に建設中の赤外線望遠鏡 (口径6.5m)

トラピスト1 (TRAPPIST-1)

12.4 pcの距離に位置赤色矮星。周囲に7個の地球型惑星が存在していることが知られている

ひので衛星

2006年にJAXAが打ち上げた太陽観測衛星

フェルミ衛星 (Fermi Gamma-ray Space Telescope)

2008年にNASAが打ち上げたガンマ線観測衛星

ブレイザー (Blazar; Blazing Quasi-Stellar Object)

活動銀河核 (超大質量ブラックホール) から放出される超高速ジェットを、ほぼ正面から観測したもの。広い波長帯で非常に明るく、激しい時間変動を示す

プロキシマ・ケンタウリ (Proxima Centauri)

ケンタウルス座 α 星の三重連星系のうち最も暗い恒星。恒星としては、太陽系から最も距離が近い (約1.3 pc)

マグネター (Magnetar)

通常若い中性子星の100-1000倍程度の磁場強度を持ち、回転エネルギーの損失率で説明できないほど明るいX線やガンマ線を放射する中性子星。磁場をエネルギー源として光っているものと考えられる

ユークリッド衛星 (Euclid Satellite)

2023年にESAが打ち上げた可視光・近赤外線観測衛星計画。口径1.2m

ルービン天文台 (Vera C. Rubin Observatory; VRO; LSST)

南米チリで2024年に観測開始予定の米国の広視野望遠鏡

ロゼッタ探査機 (Rosetta)

2004年にESAが打ち上げた彗星探査機。2014年にチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星に到着し、着陸機のフィラエ (Philae) を投下した

ローマン宇宙望遠鏡 (Nancy Grace Roman Space Telescope)

2027年にNASAが打ち上げ予定の広視野赤外線望遠鏡衛星計画。口径2.4m

[19]

<執筆者一覧>

この文書は、物理学委員会 天文学・宇宙物理学分科会にて割り振られた以下の著者（順不同）によって執筆され、同委員会の承認を得たものである。

監修：

観山正見、須藤靖

執筆：

林正彦、渡部潤一、千葉柁司、高田昌広、井上昭雄、長尾透、田中雅臣、坂井南美、田村元秀、浅井歩、荻尾彰一、吉田滋、中畑雅行、森山茂栄、窪秀利、田越秀行、横山順一、大橋正健、小久保英一郎、滝脇知也、岩崎一成、藤沢健太、山田亨、住貴弘、大朝由美子、田島宏康、玉川徹、田代信、今田晋亮

<提案されている大型・中型の長期計画一覧>

以下の大型将来計画の説明資料を、これに続くページに添付する。

- 添付資料1: Square Kilometre Array Phase 1 (SKA1)
- 添付資料2: 高感度太陽紫外線分光観測衛星Solar-C EUVST (Solar-C)
- 添付資料3: ガス飛跡検出器による暗黒物質の正体解明 (CYGNUS)
- 添付資料4: 極低放射能環境でのニュートリノ研究 (カムランド2)
- 添付資料5: Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments 3 (SMILE-3)
- 添付資料6: 赤外線位置天文観測衛星 小型JASMINE (JASMINE)
- 添付資料7: 50トン級液体キセノン宇宙暗黒物質直接探索計画 (DARWIN)
- 添付資料8: 南極10mテラヘルツ望遠鏡計画 (ATT10)
- 添付資料9: 広帯域X線高感度撮像分光衛星FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) (FORCE)
- 添付資料10: IceCube Gen2 国際ニュートリノ天文台 (IceCube-Gen2)
- 添付資料11: CTA国際宇宙ガンマ線天文台 (CTA)
- 添付資料12: 惑星間宇宙望遠鏡 (Inter-Planetary Space Telescope) (IPST)
- 添付資料14: 大型国際X線天文台 Athena (Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics) への日本の参加 (Athena)
- 添付資料15: 次世代太陽風観測装置 (次世代太陽風)
- 添付資料17: Mega ALPACA: 南天 におけるPeV領域ガンマ線 広視野連続観測 (Mega ALPACA)
- 添付資料18: ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 (HiZ-GU NDAM)
- 添付資料19: Roman 近赤外広視野サーベイ宇宙望遠鏡への参加 (Roman)
- 添付資料20: NASA 6m 紫外線可視近赤外線望遠鏡 Habitable Worlds Observatory への参加 (HabWorlds)
- 添付資料21: Gamma-Ray and AntiMatter Survey計画 (GRAMS)
- 添付資料22: 最高エネルギー宇宙線の起源解明のための大型地上空気シャワー観測 (UHECR-TA2)

- 添付資料23: 30m光学赤外線望遠鏡計画 (TMT)
- 添付資料24: 太陽観測次世代国際ネットワーク計画ngGONGへの参画 (ngGONG)
- 添付資料25: 太陽X線ガンマ線観測衛星 (PhoENiX)
- 添付資料26: LiteBIRD — 熱いビッグバン以前の宇宙を探索する宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星 (LiteBIRD)
- 添付資料28: Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics (POEMMA)
- 添付資料29: 惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly (LAPYUTA)
- 添付資料30: Galaxy Reionization EXplorer and Planetary Universe Spectrometer (GREX-PLUS)
- 添付資料31: 大型サブミリ波望遠鏡 (LST)
- 添付資料32: 次世代大型電波干渉計 (ngVLA)
- 添付資料33: 宇宙重力波望遠鏡 (B-DECIGO)
- 添付資料34: 宇宙重力波干渉計LISAへの参加 (LISA)
- 添付資料35: ハイパーカミオカンデ (Hyper-K)

Square Kilometre Array Phase 1 (SKA1)

1. 計画の概要 SKA1 は従来の 10 倍近い感度と解像度を達成する国際共同利用の望遠鏡計画である。豪州に観測周波数 50-350 MHz を網羅する開口アンテナ (LOW) 13 万基(図 1 右)と、南アに 0.35-15 GHz を網羅するパラボラ鏡(MID) 197 台(図 1 左)を最大 150km の範囲に展開し、英国にある本部から一体的に遠隔運用される。光伝送されたデータは信号処理施設や科学データ処理施設を経て電波画像等に解析され、世界各地の SKA 地域センター(SRC)を経てユーザーに届けられる。世界 16 カ国が参加あるいは参加準備中であるが、電波天文学の経験と実績が高く評価される日本にも参加が強く求められており、日本は性能評価 (AIV/SC)や SRC の開発等で貢献する。日本では 2008 年に有志の研究者が活動を開始し、関連する研究者の所属機関は全国で 40 を超え、支持母体の日本 SKA 協会、VLBI 懇談会、そして宇宙電波懇談会だけでも 500 名規模にある。この波長の電波の観測は、これまでに数多くの天文学上の偉大な発見に貢献しノーベル賞を複数輩出してきたが、SKA1 では宇宙初期の天体形成の解明や重力理論の検証など、この波長でなければ達成できない科学目標に挑む。その科学的成果によって人類に夢と興奮を与え、学術を振興するだけでなく、国際協力や過疎地での建設を通じて社会問題(SDGs)の解決にまで貢献する。



(図 1) SKA1 の想像図。左側が南アのアンテナ群で、右側が豪州のアンテナ群が合成され描かれている。

2. 科学的意義 SKA1 は高感度・広視野に加えて観測モードの複数同時実行能力から、従来比 100 倍以上の広域探査能力を持つ。この圧倒的な性能で、宇宙で最初の星やブラックホール、磁場が生まれる時代のほぼ唯一の徹底探査、パルサーの精密観測による重力理論の検証、宇宙論の超精密化や、突発天体现象の徹底究明を目指す。特に観測周波数 1 GHz 以下で唯一の大型望遠鏡として多波長天文学の一翼を担う。日本は、世界の SKA 先行機による国際協力実績を有する、宇宙再電離、宇宙磁場、パルサーを 3 大科学目標に定める。光赤外線のスーパーステロ望遠鏡やミリ波電波のアルマ望遠鏡という我が国の天文学コミュニティが持つ強みとの親和性があり、X 線の XRISM や γ 線の CTA との相補性がある。従来なかったメートル波・センチメートル波電波望遠鏡での研究が新たに加わることで、協調かつ相乗的に日本のコミュニティの成果創出に貢献できる。全世界的 VLBI の感度向上にも寄与し、国内にある電波や光赤外の望遠鏡を用いた研究の新展開も期待できる。天文学にとどまらず、地球科学、惑星科学、統計数理など日本の多彩な科学を支えていく研究基盤となる。

3. 所要経費 SKA1 の総予算は 1987M€である。内訳はインフラ、アンテナ、信号処理施設などの建設費に 1282 M€と、2021 年から 2030 年までの本部や望遠鏡の運用費に 705 M€である。運用費は 2031 年からは年間 123M€を見込む。加えて、SRC の建設費が 250 M€、SRC の SKA1 運用期の運用費が年間 35.4 M€である。日本はこの国際経費の 2%前後の貢献を目標とし、2021 年から 2030 年までの建設費の日本負担分 57.5 億円と運用費の日本負担分を含む国内経費 15.2 億円を合わせた 72.4 億円が所要経費となる(1€=144.64¥で換算)。2031 年からは運用費の日本分 4.6 億円と国内経費 1.0 億円を合わせた年間 5.6 億円を見込む。

4. 年次計画 SKA1 は 2021 年 7 月から建設中であり 40 年以上の運用を想定する。部分共用の開始が 2025 年頃、条件付き全共用の開始が 2027 年頃、完成が 2029 年頃である。建設完了後に機器の性能向上を予定し、その開発を建設期に実施する。日本は 2025 年頃を目処に予算措置をもって正式に参加したい意向である。この時期を逃すと建設の分担の機会を失い、技術貢献および初期科学成果を逸する可能性が高いため緊急を要する。当初は AIV/SC を中心に参画し、VLBI 記録系や新受信機の開発、SRC の開発も担う予定。さらに国際共同研究事業として、将来的には SKA1 の規模を 10 倍にした SKA2 の建設の展望を有している。

5. 実施機関と実施体制 SKA 条約に基づいて政府間機構 SKA 天文台が実施し SKA 評議会が統治する。ピアレビューと評議会下の時間割当委員会の審査を経て、観測時間の約 7 割を大規模提案に、約 3 割を個別提案に、いずれも参加国の費用貢献に応じて所属する研究者に配分する見込み。データは観測の 1-2 年後に公開予定。観測運用は SKA 天文台が行う。日本はドイツなどと、条約に明文化された条約には加わらない参加形態を想定し、SKA 評議会から理解を得ている。日本は国立天文台内に SKA1 プロジェクトを組織し実施予定。SKA 天文台等にも出向等により人員を配置し、大学等所属の研究者にも協力を得るべく準備中。これらの体制によって国際プレゼンスを高めながら人的交流を促進し、競争力の強化および国際性のある若手の育成を図る。

添付資料 02

次期太陽観測衛星計画：SOLAR-C (高感度太陽紫外線分光観測衛星)

1. 計画の概要

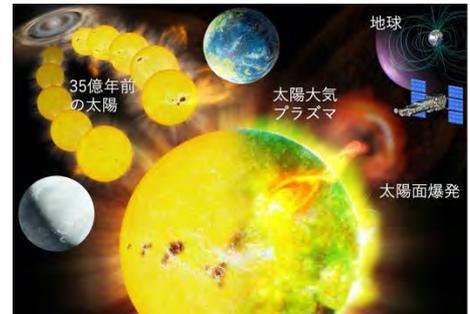
SOLAR-C(高感度太陽紫外線分光観測衛星)は、日本が主導し米国及び欧州諸国の協力のもと開発するミッションで、観測装置として極端紫外線域の高分散撮像分光器を用い、太陽を長時間観測できる太陽同期極軌道から、太陽大気の色層(2万度)からコロナ(100-2000万度)にわたる温度領域を隙間なく観測し、以前に飛翔したものに比べておよそ1桁以上の性能(空間・時間分解能、波長範囲)向上によりプラズマのダイナミックな現象に追従できる能力を世界で初めて実現する。

太陽表面から太陽コロナ・惑星間空間へのエネルギーと質量の輸送やエネルギー解放の現場を捉え、何が起きているかを診断する極端紫外線分光観測を実施することで、宇宙プラズマ中で普遍的に起きている基礎的な物理過程を検証し、宇宙を満たす高温プラズマが如何に作られ、太陽が如何にして地球や惑星に影響を及ぼしているのかという命題を探求する。

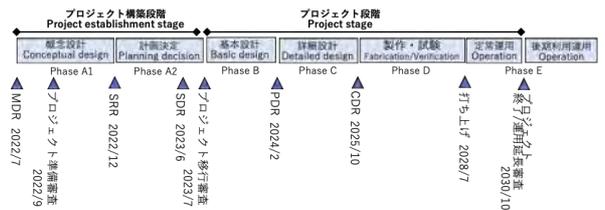
2. 科学的意義

太陽の磁気活動は、基本となる微細な構造間で受け渡される磁気エネルギーを源泉とし、色層やコロナという高温の大気を形成し、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ている。これらの成因を理解するため、基本となる磁気構造を広範な温度領域で追跡し、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。これによって、期待される効果は以下が挙げられる。

- ✓ 本ミッションで得られる知見や洞察は、天体プラズマの基礎物理過程の洞察や知見へと展開され、高温プラズマに満たされた宇宙や恒星大気についての理解につながる。
- ✓ 社会インフラに与える影響が大きい太陽面爆発(フレアとプラズマ噴出)の予測に必要なアルゴリズム構築や予測向上につながる。
- ✓ 宇宙プラズマの基礎物理及び太陽の地球環境への影響の理解は、35億年前に地球に生命が誕生した際の太陽地球環境の理解に発展させることができ、地球における生命誕生の理解にもつながる。
- ✓ 獲得される解像度の高い宇宙望遠鏡の技術や衛星を指向方向に高精度に安定化する技術などは、科学衛星のみならず、我が国の地球観測衛星の解像度向上、官需実用衛星等の高度化にも貢献する。



3. 所要経費(国際協力の場合は総額と日本の分担分) 日本負担 約180億円、総額約260億円(国際協力含)

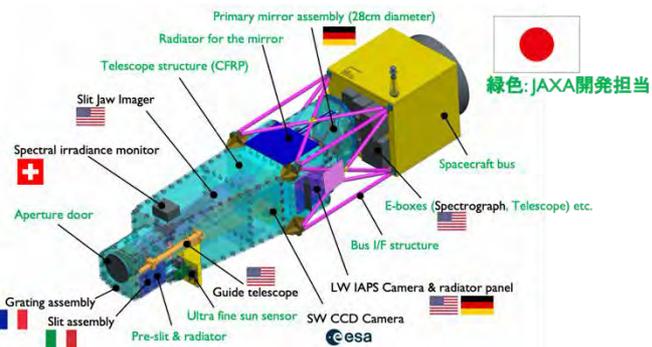


4. 年次計画

打上げ目標を2028年度前半に置き、JAXA ミッション定義に従い実施される(右図)。

5. 実施機関と実施体制 (国際協力の記述も含む)

実施主体はJAXA 宇宙科学研究所で、国立天文台がミッション機器開発を主導、名古屋大学宇宙地球環境研究所がサイエンスセンター運営を行う。JAXA 主導の国際協力ミッションとして米国(NASA)および欧州(ESA およびドイツ・フランス・イタリア・スイス各宇宙機関)が参加し搭載コンポ開発を行う。



添付資料 03

計画名 ガス飛跡検出器による暗黒物質の正体解明 (NEWAGE/CYGNUS)

(提案者 神戸大学大学院理学研究科物理学専攻 准教授 身内賢太郎)

計画の概要 いくつかの宇宙観測の結果は理論予測と一致せず、未発見物質である「暗黒物質」を導入することで解決される。そのため、暗黒物質の正体解明は、素粒子・宇宙物理などに理論の再構築などを含めた大きな進展を与える。いくつかの手法によって暗黒物質探索が進められているが、通常の物質との反応を探る「直接」探索は、我々近傍の暗黒物質を直接探ることを可能とする。直接探索の中でも、方向に感度をもつ手法は検出した事象が「明らかに暗

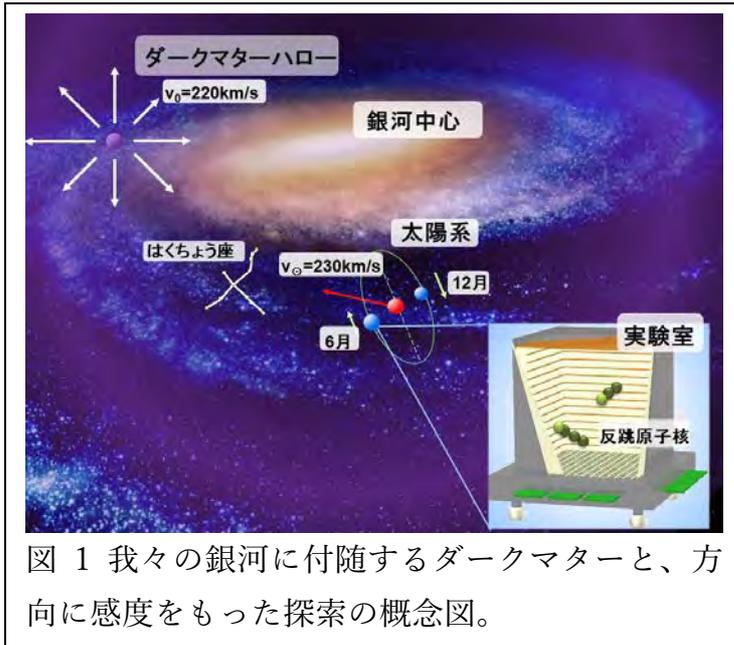


図 1 我々の銀河に付随するダークマターと、方向に感度をもった探索の概念図。

黒物質である」と強い証拠を提示でき、暗黒物質の性質解明に大きく寄与する (図 1)。国内で進めて来たガス検出器を用いた「NEWAGE」実験は当該分野をリードしている。数年前から、国際協力のフレームワーク

「CYGNUS」の議論がすすめられている。本計画はこうした成果及び準備の発展として、大型ガス飛跡検出器を神岡地下に設置、方向に感度を持つ暗黒物質直接探索を行う。

科学的意義 本計画は、方向に感度を持つ手法で暗黒物質の直接探索実験を行い、暗黒物質の発見および性質解明を目的とする。

所要経費

総経費 20 億円

フェーズ 1: 検出器製作 2 億円 運転経費 0.5 億円/年

フェーズ 2: 検出器製作 10 億円 運転経費 1 億円/年

年次計画

フェーズ 1 (2023-2028) 1m³ 検出器 (NEWAGE/CYGNUS) による研究

フェーズ 2 (2028-2033) 10m³ 検出器 (CYGNUS) による研究

実施機関・実施体制

- 国内機関：神戸大学 (主導) ・東京大学宇宙線研究所 (地下実験) ・京都大学 (検出器開発) ・東北大学 (低バックグラウンド技術) ・日本大学 (低バックグラウンド技術) ・東京理科大学 (低バックグラウンド技術) ・高エネルギー加速器研究機構 (回路開発)

- 海外機関：シェフィールド大学・グランサッソ Science Institute・ハワイ大学・オーストラリア国立大学

添付資料 04

極低放射能環境でのニュートリノ研究（略称：カムランド2）

1. 計画の概要

ニュートリノは粒子・反粒子が同一の可能性があり、そのようなマヨラナ性を持つと「宇宙物質創生の謎」「軽いニュートリノの謎」など宇宙素粒子の大問題を説明できる。マヨラナ性検証の唯一の方法がニュートリノを伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu 2\beta$) 探索であり、 $0\nu 2\beta$ 探索は宇宙素粒子・原子核分野の最重要課題である。① $0\nu 2\beta$ 探索で世界をリードするカムランドを大幅高度化し、複数の理論予想をカバーすることで大発見を目指す。また、②超新星前兆ニュートリノ観測などの特徴的な低エネルギーニュートリノ天文学の推進や、③カムランドが開拓したニュートリノ地球科学において、「地球始源隕石」「マンテル対流」といった地球組成・ダイナミクスに関する新たな知見をもたらす。④カムランドを支える極低放射能設備は、スーパークリーン環境を追加することでさらに発展させ、共同利用に供する極低放射能宇宙素粒子研究施設として世界に冠たる施設に発展させる。

2. 科学的意義

$0\nu 2\beta$ 発見はニュートリノのマヨラナ性の証明であり、質量絶対値の初測定となる。これらはニュートリノ研究の最重要課題である。マヨラナ性を持つと重い右巻きニュートリノが自然に導入され、それは「宇宙物質創生」「軽いニュートリノ」を説明するとともに、大統一理論構築のミッシングピースであり、暗黒物質との関係も議論され、科学的意義は計り知れない。 $0\nu 2\beta$ 探索の目標感度は、逆階層領域や複数の理論モデルをカバーし、大発見を期待できるとともに、未発見であっても他の観測と合わせ、マヨラナ性の否定や、順階層の特定につながる重要なマイルストーンである。

宇宙・天体現象の解明には、多波長観測に加え多プローブでのマルチメッセンジャー天文学が重要である。カムランドは低エネルギーニュートリノ天文学において特徴的なかつ重要な貢献ができる。さらに、カムランドが開拓した地球ニュートリノ観測は、既に地球モデルの選別を始めており、地球ダイナミクスに関する知見も得られている。大多数の国内原子炉が停止している好条件で新しいプローブである地球ニュートリノ観測を進めることで、地球科学に新たな知見をもたらす、地球内部組成やエネルギー収支も記述する地球ダイナミクスモデルの構築に大きく貢献する。

カムランドを中核に形成された地下宇宙素粒子研究コミュニティのさらなる発展には、優れた極低放射能環境での技術開発が不可欠であり、コミュニティが運営する極低放射能施設の充実が待望されている。カムランドの極低放射能施設を充実させ、コミュニティのノウハウを結集して共同利用とすることで相乗効果を生み出す。これにより広く宇宙素粒子研究を進展させ、超高感度微量分析や超高集積半導体や量子センサーの放射線耐性などの応用研究にも展開する。

3. 所要経費

○建設期間(2024-26年)40億円(うち国外4億円)(濃縮キセノン200kg 4億円、高量子効率PMT 10億円、高性能電子回路 3億円、クリーンルーム整備 3億円、純空気製造装置 1億円、純化装置高度化 5億円、集光ミラー 1億円、バルーン 1億円、工事 1億円、高光収率液体シンチレータ 11億円)

○観測期間(2027-2036)3.8億円/年(うち自己資金3億円、国外0.3億円)(人件費、運転経費等)

●総経費(建設および観測10年)78億円(うち国内負担71億円)

4. 年次計画

2024-2025(準備期間):極低放射能研究施設(クリーンルーム)の整備、カムランド高度化準備

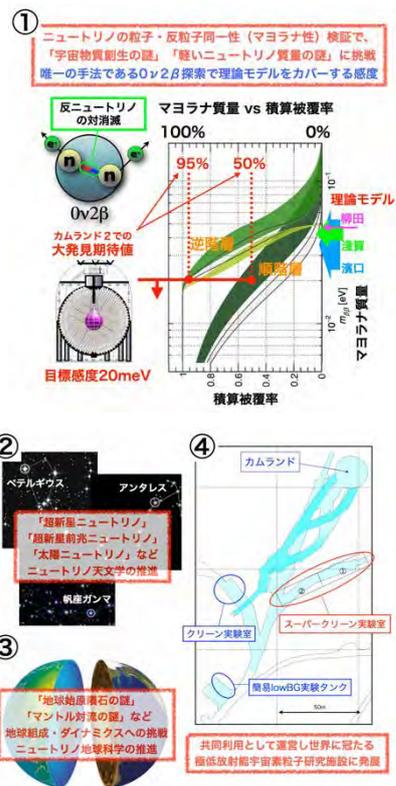
2025-2026(観測停止期間):カムランド高度化のための改修

2027-2036(観測期間):地球ニュートリノ等の観測、カムランド2禅での $0\nu 2\beta$ 探索(5~10年で感度20meV)

5. 実施機関と実施体制

カムランド2:東北大学(プロジェクトの統括)、マサチューセッツ工科大学(新型電子回路、トリガーロジック)、カリフォルニア大学バークレー校(装置の較正)、ワシントン大学(地球モデル、DAQソフトウェア)、ボストン大学(中性子放射化測定、人工知能)、ノースカロライナ大学、ノースカロライナ中央大学、デューク大学、テネシー大学、ハワイ大学、バージニア工科大学、デラウェア大学(アナログ電子回路)、アムステルダム大学、大阪大学(低温検出器)、徳島大学(NaI結晶の高純度化)、帯広畜産大学(シンチレーションフィルム)

極低放射能宇宙素粒子研究施設:東北大学(スーパークリーンルームを核とするインフラ)・大阪大学(極低放射能装置)で整備を開始し、KEK-QUP(極低温開発環境)や地下宇宙素粒子研究コミュニティの各機関が合流する。将来的にコンソーシアム形式での運営に移行する。



添付資料 05

Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments 3 (SMILE-3)

1. 計画の概要

本計画は電子飛跡型コンプトン望遠鏡 (electron-tracking Compton camera; ETCC) を、ISAS/JAXA または米国 NASA が提供する長時間気球に搭載する科学観測実験を複数回実施し、20 年以上停滞する MeV ガンマ線天文学を飛躍的に進展させる。我々はこれまでに、コンプトン散乱を完全に再構成することで MeV ガンマ線放射源の検出感度を根本的に向上する ETCC を開発した(図 1)。気球を用いた天体観測実証実験により、宇宙環境下で雑音放射線事象を背景ガンマ線強度以下に低減し、信号雑音比を SPI/INTEGRAL に比べて 10 倍以上改善したことを実証した。この結果、銀河中心領域の拡散ガンマ線放射を、世界で初めて観測事象数の時間変化から検出するなどの実績を持つ[1]。さらに ETCC の視野は全天の 1/4 にもなる為、一か月間の長時間気球による深い掃天観測から COMPTEL/CGRO の約 5 倍の検出感度を実現 (図2)、科学的意義で述べる成果を達成する。

2. 科学的意義

0.1~100 MeV にかけての MeV ガンマ線領域は、超新星爆発や中性子星合体に伴う元素合成・ガンマ線バーストや活動銀河核における粒子加速・宇宙線加速現場の探索・暗黒物質の間接探査等、多様な宇宙物理現象の解明へのプロブとして期待されている。特に放射性同位体の核ガンマ線や励起原子核からの脱励起線といった寿命を持つライン放射は他波長には無いユニークな情報であり、マルチメッセンジャー天文学の重要性が増している現在、特徴的な役割を担うことが期待されている。さらに、宇宙の重要な構成要素である暗黒物質の有力な候補である原始ブラックホールや WIMP (weakly interacting massive particle) は、どちらも MeV ガンマ線帯域において放射を持つことが期待され、その発見は宇宙論や素粒子物理学の標準モデルに制限や変更を迫る可能性といった大きな意義を持つ。加えて、天文学に必須なイメージング分光の困難さや雑音放射線事象の多さから 2000 年に観測を終えた COMPTEL が数十天体を検出して以降、MeV ガンマ線観測は停滞している。天の川銀河の中心領域から連続的な MeV ガンマ線放射や電子陽電子対消滅線・ ^{26}Al からの核ガンマ線が検出されているが、不完全な画像化法に基づく従来の観測は雑音優位かつ低感度なため不定性が大きく、連続成分の放射機構や陽電子・ ^{26}Al の起源の議論は不十分である。ETCC の持つ、低雑音・高空間分解能の特徴を活かすことで、定量的な議論が可能になる。

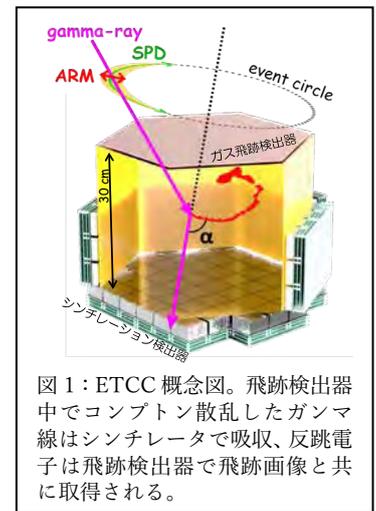


図 1: ETCC 概念図。飛跡検出器中でコンプトン散乱したガンマ線はシンチレータで吸収、反跳電子は飛跡検出器で飛跡画像と共に取得される。

3. 所要経費

準備~1 回目フライト	300 百万円
2 回目以降のフライト	数億円/フライト

4. 年次計画

~2025 年 SMILE-3 ETCC の構築・環境/電波試験
2026 年 気球実験 ⇒ 回収後、改修
以後数年に一度の気球実験を計画

5. 実施機関と実施体制

[総括・飛跡検出器] 高田, 谷森 (京都大学); [シンチレータ] 黒澤 (東北大学); [データ収集系] 中森 (山形大学), 櫛田 (東海大学), [アンタイカウンタ] 澤野 (金沢大学); [熱・電源設計] 水村 (ISAS/JAXA); [データ通信] 濱口, Hunter (GSFC/NASA); [理論研究] 郡 (KEK)

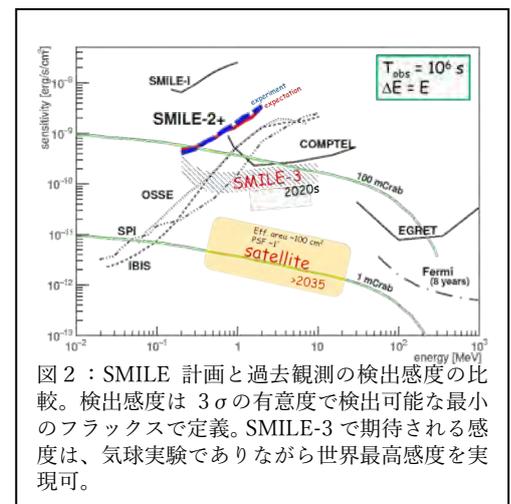


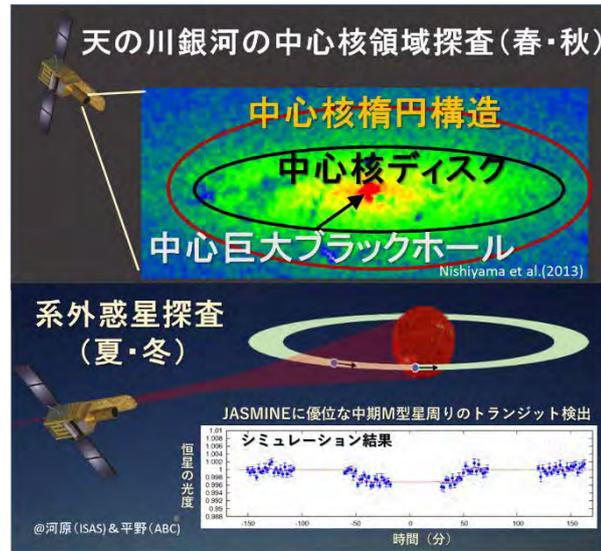
図 2: SMILE 計画と過去観測の検出感度の比較。検出感度は 3σ の有意度で検出可能な最小のフラックスで定義。SMILE-3 で期待される感度は、気球実験でありながら世界最高感度を実現可。

[1] A. Takda+, Astrophysical Journal, 930 (2022), 6.

添付資料 06

JASMINE（赤外線位置・測光天文観測衛星）計画

1. 計画の概要：JASMINE（ジャスミン）は、我々の住む天の川銀河（以下、銀河系）の形成と進化を探究するとともに、地球に似た系外惑星の探査も行うことによって、「人類はなぜ宇宙にいるのか」「我々は宇宙で孤独なのか」という我々の存在自体を問う人類が抱く最も根源的な疑問の解明に貢献することを目的とする。JASMINEは、可視光では星間塵による吸収の影響を受けて観測が困難な銀河系の中心核領域を口径約 36cm の光学望遠鏡を



用いて近赤外線 ($1.0\sim 1.6\mu\text{m}$) で観測することで、10 万個以上の恒星の距離や運動速度を世界で初めて高精度に求める位置天文観測衛星計画である。JAXA 宇宙科学研究所（以下、宇宙研）の公募型小型計画 3 号機に選定されており、打上げ目標は現時点では 2028 年、衛星軌道は高度 550km 以上の太陽同期軌道である。また JASMINE の高い測光能力を活かし、太陽より小さく低温の恒星（中期 M 型星）周りの生命居住可能領域にある地球型惑星の探査もトランジット観測によって行う。

2. 科学的意義：JASMINE によって世界で初めて銀河系中心核領域の恒星の高精度な距離と運動を測定し、中心核領域の構造とその進化の解明を目指す。これによって銀河系誕生時の様子や銀河系にある棒状構造の形成時期、中心巨大ブラックホールの成長などの研究の進展が期待できる。また、高い測光能力で中期 M 型星を生命居住領域の公転周期まで連続して安定に探査できるミッションは他になく、生命探査に向けて他に類を見ない地球型惑星サーベイとなる。

3. 所要経費：150 億円程度（衛星開発準備、衛星開発、打上げロケット、運用、データ解析に関する経費を含む）。

4. 年次計画：2023 年度には JAXA でのミッション定義審査を受け、その後も多段階的に審査を受けつつ衛星開発を進めていき、2028 年に打上げ予定である。約 3 年間の科学運用を経て、位置天文の最終データカタログは、2033 年度頃に世界の研究者コミュニティに公開予定である。

5. 実施機関と実施体制：実施する中心機関は、宇宙研と国立天文台である。さらに、国内外の大学等の教育・研究機関からの研究者の協力によりチーム体制が取られている。データ解析システムの開発に関しては、ハイデルベルグ大学等との国際協力が進んでいる。さらに、ESA(ヨーロッパ宇宙機関)や米国による地上通信局支援の検討が開始している。

添付資料 07

大型液体キセノンを用いた宇宙暗黒物質直接検出実験 (DARWIN/XLZD 実験計画の推進)

1. 計画の概要

本研究は、液体キセノンを用いた WIMP 暗黒物質直接探索を主な目的としている。本提案の DARWIN 実験では、検出器標的として有効質量 50-100 トンのキセノンを使用し、検出器は直接探索で実績のある気体と液体からなる二相型キセノン検出器を用いる。検出感度は核子との散乱断面積 10^{-49} cm² に到達する(図 1)。また、DARWIN 実験では、超新星や太陽ニュートリノについて、ハイパーカミオカンデやカムランドでカバーされていない低エネルギーニュートリノの相補的な観測が可能であり、これに加え、自然同位体 ¹³⁶Xe 含むためニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索も行うことができる。その他、暗黒光子、アクシオン、原子核稀崩壊の探索などが可能であり、様々な物理を切り開くことが期待される。

2. 科学的意義

暗黒物質の候補はアクシオン、原始ブラックホール、未知の素粒子などがあるが、その中でも注目される候補の一つに WIMP がある。WIMP 暗黒物質は GUT スケールにおける力の統一を予想する超対称性理論など標準理論を超えたモデルにおいて GeV-TeV 質量の新粒子として自然に導入される。WIMP 暗黒物質は大きく分けると加速器、間接探索、直接探索の 3 つの手法で相補的に探索が行われている。本研究である直接探索ではこの暗黒物質粒子と原子核（この場合検出器媒体）が稀に反応した時に落とす 100keV 以下の僅かなエネルギーを捉えることで探索を行う。これは我々の身の回りに暗黒物質が存在することを”知る”唯一の方法であると同時に暗黒物質粒子の質量や通常の物質との散乱断面積を測定する。暗黒物質が発見されれば暗黒物質による天文学の創成、標準理論を超えた素粒子モデルの発展が期待される。

また、DARWIN 検出器はニュートリノ観測も可能であり、水チェレンコフ、液体シンチ、液体アルゴン検出器では困難である keV 領域の観測を行う最も高感度な検出器となる。

3. 所要経費 (国際協力の場合は総額と日本の分担分)

総予算約 200 億円, 日本分担 15 億円。

4. 年次計画

2020-2026: R&D, Conceptual Design Report
Technical Design Report
2027-2029: 建設
2030-2040 コミッショニング及び観測
(5年以上の大統計データの取得)

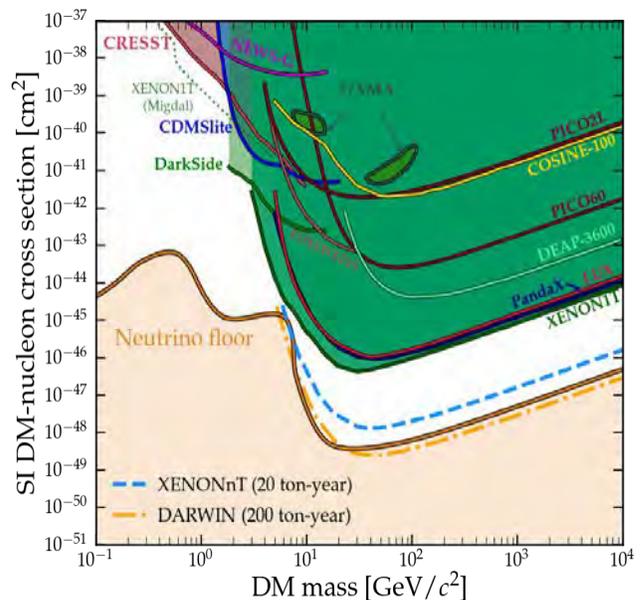
5. 実施機関と実施体制 (国際協力の記述も含む)

・実施機関

DARWIN: 日米欧からなる約 200 名 38 機関
国内: 神戸大学, 名古屋大学, 東京大学が参加
・2022 年より LZ 実験グループを含めた XLZD コンソーシアムを立ち上げ, 国際協力を強化している。

・実施体制

日本グループはキセノン純化(東京大学, 名古屋大学), 中性子反同時計数検出器(東京大学, 名古屋大学, 神戸大学), 極低放射能光センサー(東京大学, 名古屋大学)を主導する。



DARWIN 実験の期待される WIMP 暗黒物質に対する感度。オレンジ色破線は太陽及び大気ニュートリノが支配的なバックグラウンドになる領域。(O. Ciaran PRL 127 25 2021)

添付資料 08

南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡計画

1. 計画の概要

地球上で大気透過率が圧倒的に優れた南極内陸部新ドームふじ基地に超広視野 10m 級テラヘルツ望遠鏡 (ATT) を建設し、銀河の誕生・進化の解明と宇宙論パラメータの矛盾にせまる (図 1)。もって、いまだ未開拓の領域であるテラヘルツ天文学を推進する。

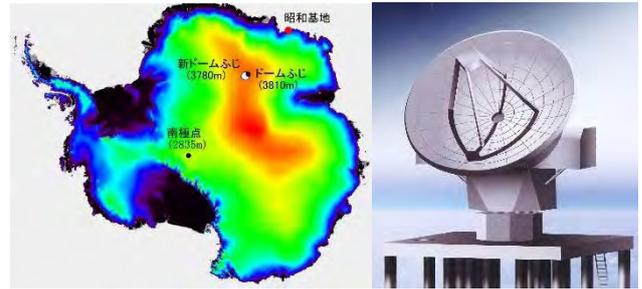


図 1. (左) 南極内陸部新ドームふじの位置。(右) 南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡完成予想図

2. 科学的意義

テラヘルツ帯には、銀河の赤方偏移、ダスト温度、星形成率などを推定するために重要なダスト熱放射が含まれ、その短波長側まで観測することで SED のピークを抑えることができる。また、星間物質の性質を探るうえで重要な輝線が多数存在するため、銀河・巨大ブラックホールの形成・進化を探るうえで極めて重要な波長帯である。本計画では、超広視野 10m 級テラヘルツ望遠鏡によって、かつてない高感度かつ広域の南天全域掃天観測を行い、赤外線光度 $L_{IR} \sim 10^{12} L_{\odot}$ の銀河ならば最も星形成が活発であった時代 (Cosmic noon) ($z = 1-3$) の前後をカバーできる赤方偏移 $z = 5-7$ まで、 $L_{IR} \sim 10^{13} L_{\odot}$ の銀河ならば $z > 10$ までの宇宙の星形成史を明らかにする (図 2)。また、遠方宇宙における銀河と AGN (巨大ブラックホール) の形成・進化史を明らかにする。さらに、南天全域掃天観測によって、ハッブル定数などの宇宙論パラメータの決定に有用な重力レンズ天体が多数検出されると期待される。分光観測用にヘテロダイン受信機も搭載し、テラヘルツ帯での輝線観測によるダストに覆われた銀河の星間物質とその時間進化の研究も可能となる。

3. 所要経費

- ・ 10m 級テラヘルツ望遠鏡 (高床式台、アンテナ、観測装置) : 27.9 億円
- ・ 新ドームふじ基地建設・運営費 (10 年間) : 66.4 億円

4. 年次計画

- 2026-2027 年度 : 10m 級アンテナ、高床式台の詳細設計・製造。
- 2028-2030 年度 : 10m 級テラヘルツ望遠鏡を筑波大学に仮組および性能評価
- 2031 年度 : 南極新ドームふじ基地の建設を開始
- 2032 年度 : 10m 級テラヘルツ望遠鏡の建設を開始
- 2033 年度 : 10m 級テラヘルツ望遠鏡の建設を完了し、観測を開始

5. 実施機関と実施体制

南極 10m 級テラヘルツ望遠鏡の建設・運用は、筑波大学を中心とする大学連合を軸に、南極天文コンソーシアム (関西学院大学、北海道大学、JAXA、国立天文台、情報通信研究機構ほか) が実施する。南極新ドームふじ基地の建設、輸送などは、南極内陸部での経験が豊富な国立極地研究所と協力して実施する。

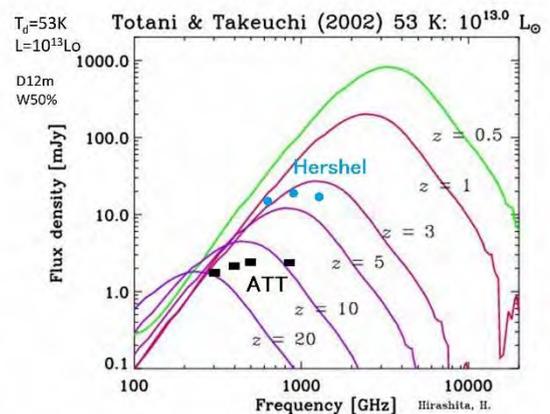


図 2. 口径 12m、南極新ドームふじで冬季 50% の条件での ATT の感度。スペクトルは $L_{IR} = 10^{13} L_{\odot}$ の天体を仮定している。南極では口径を大きくできるため Confusion limit が下がり、Herschel よりはるかに高い感度を達成できる。

計画の概要

- FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) は、「宇宙における高エネルギー現象にかかわる根源的な物理プロセスを理解し、それが宇宙の進化にどのように影響を与えてきたのかを理解すること」を目的とした科学衛星計画である。
- これまでに見逃されていた高エネルギー宇宙線やブラックホールから放射される非熱的X線を捉えるために、1-80keVという広帯域のX線を10秒角にせまる高い角度分解能で撮像分光する。これにより、10keV以上の硬X線においては、既存のX線天文衛星より1桁よい感度を達成する。「見えているものをよりよく見る」のではなく、「見えていなかったものを見る」ミッションである。
- 日本独自の技術による低バックグラウンド広帯域X線検出器と、NASAゴダード宇宙飛行センター(NASA/GSFC)の高空間分解能シリコン望遠鏡を搭載する。世界一同士を組合せた国際協同ミッションであり、我が国単独、あるいは米国単独では得られない科学成果を獲得する。



FORCE 概念図

(Image courtesy: ESO/M. Kornmesser, NASA, Ute Kraus, CXC/SAO)

科学的意義

- これまで見えていなかった超新星残骸や銀河団からの非熱的X線の検出・測定による高エネルギー宇宙線の起源と総量の解明
- これまで見えていなかった様々な質量階層におけるブラックホールの発見とそれをプローブとした天体形成史の解明
- 次世代巨大国際X線天文衛星の鍵となる観測機器・技術の成熟化
- 電波からガンマ線、さらにニュートリノや重力波も含むマルチメッセンジャー天文学を世界全体で実現する時代において、広帯域X線天文衛星は2030年代には米国・欧州ですら実現の目途がない。唯一の広帯域X線天文台として日本のFORCEが活躍することで、国際社会に貢献し、科学先進国としての責務を果たすことができる。

所要経費

- 総額260億円相当。日本負担分は、マージンを含めて180億円。

年次計画

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 2022: 公募型小型計画へ提案 | 2028: フライトモデル開発着手 |
| 2023: 概念設計/予備設計段階 | 2031: 衛星試験 |
| 2027: 基本設計段階 | 2032: 打上げ・観測開始 |

実施機関と実施体制

- 日本は、低バックグラウンド広帯域X線検出器、衛星システム全般、打上げ、運用を担当
- 宮崎大、京都大、名古屋大、甲南大、大阪大、ISASを中心に、国内の25機関で科学検討、キー技術開発、衛星システムの概念設計を推進
- 米国(NASA/GSFC)は、高空間分解能シリコン望遠鏡を日本側へ提供。XRISM衛星を含め過去の日本の衛星でも、NASA/GSFCとは国際協力の実績がある。

添付資料 10

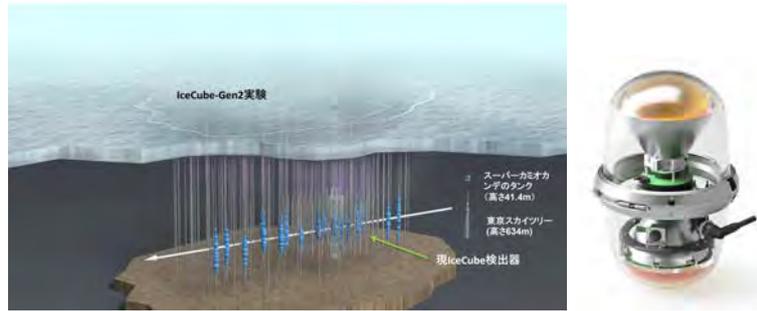


図 1: (左図) IceCube-Gen2 実験の概観。氷河に縦穴を切削し光検出器モジュールを埋設する。(右図) IceCube-Gen2 フェーズワン用検出器として開発・製作した D-Egg 検出器モジュール。

1 計画の概要

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、ニュートリノ放射天体の同定、電磁波・重力波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、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。

2 科学的意義

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高エネルギー物質(バリオン)の衝突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。IceCube-Gen2 観測所は、高エネルギーニュートリノ天文学を確立した IceCube 観測所の次世代プロジェクトとして、ニュートリノ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、マルチメッセンジャー天文学研究の中核として、天文学研究に新しい方向性を加える。

3 年次計画

2024 年度より検出器製作開始、2027 年度から 2033 年度までの 7 年間で南極現地に建設、2028 年度より、建設が終わった装置からの観測データを順次公開、データセンター立ち上げ。

既存の IceCube 実験をアップグレードする IceCube-Gen2 Phase 1 はすでに予算化され検出器の製作が進行中である。検出アレイ本体の建設である Phase 2 は、2024 年度から開始予定。

4 実施機関と実施体制

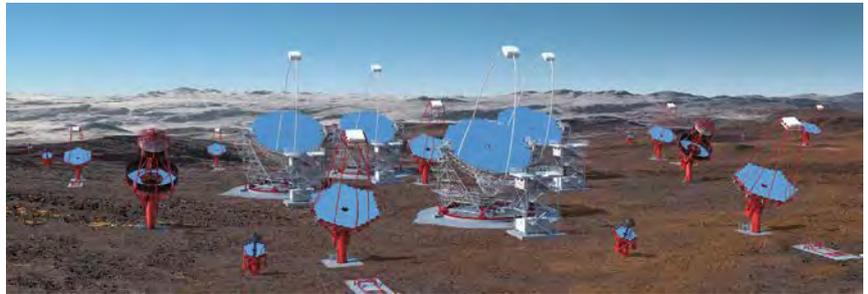
IceCube-Gen2 collaboration は、日本、アメリカ、ドイツ、スウェーデン等、12 カ国から約 50 の研究機関が参加する国際共同機関である。日本からは千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターと、大阪公立大学が参加する。実施の中心機関となる千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターは現在運営中の IceCube 国際共同実験でも中核研究機関として、光検出器の開発・キャリブレーションと PeV 以上の超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索を主導している。日本を含むアジア・パシフィック領域では高エネルギーニュートリノ天文学の最大規模の研究センターであり、アジア・オセアニア地域における中核研究機関として域内の共同研究を促進する役割も担う。

CTA 国際宇宙ガンマ線天文台

1. 計画の概要

超高エネルギーガンマ線による宇宙の研究は、現在稼働中の地上望遠鏡により、多様な天体が銀河系内外に発見され、ここ 20 年で大きく進展し、天文学の新たな一分野を形成した。この分野を飛躍的に発展すべく、従来の望遠鏡よりも 1 桁高い感度と広いエネルギー範囲(20 ギガから 300 テラ電子ボルト)で観測する、次世代の国際宇宙ガンマ線天文台 CTA の建設が進められている。現在よりも 1 桁多い数(数千個)の天体が観測可能となり、極限宇宙の姿を捉え、ブラックホール、

宇宙線起源、ダークマターなどの解明を目指す。CTA では、全天観測を可能とするために北半球と南半球に、3 種の口径(23m, 12m, 4m)の望遠鏡が計 73 台設置される。北サイト(スペイン領カナリア諸島)は 2016 年から建設中で、すでに大口径望遠鏡の初号機が稼働中である。一方、南サイト(チリ)は 2022 年に建設を開始した。実施機関の中心である CTA コンソーシアムは、25 か国の研究者が参加し、日本グループは、CTA 天文台の中で低エネルギー側を観測し最も遠くの宇宙を見通せる 23m 口径の大口径望遠鏡(LST)の計



CTA 国際宇宙ガンマ線天文台(南半球サイト完成予想図)。アレイ中央部に日本グループが主導している大口径望遠鏡 4 台が配置される。

画全体運営、分割鏡および焦点面カメラの開発・量産・運用、さらに、高エネルギー側を観測する小口径望遠鏡(SST)のカメラの開発において、中心的役割を担っている。天文台の運営開始後は、CTA コンソーシアムのみならず、世界の研究者に開かれた初めての地上ガンマ線天文台となり、全望遠鏡設置後 20 年間の運営を予定している。

2. 科学的意義

CTA 天文台で挑む謎は、天文学・宇宙物理学のみならず、素粒子物理学や基礎物理学にまで広くわたり、宇宙の進化や基本法則に関する研究を大きく発展できる。人工の粒子加速器の最大エネルギーを遥かに超える、10 の 20 乗電子ボルトに達する荷電粒子(宇宙線)が宇宙から地球に飛来しているが、その発見から 100 年経った今でも、その起源・生成機構が解明されていない。人工で作り出せない極限環境を持つ、ブラックホールや中性子星、超新星残骸などのガンマ線放射天体が宇宙線の有力候補であると考えられている。CTA では、現在の望遠鏡よりも 1 桁多い数(数千個)の高エネルギー天体の観測が可能となり、宇宙線の起源解明が期待される。多波長、重力波やニュートリノを含むマルチメッセンジャー観測においても、CTA は、電磁波観測のエネルギーフロンティアとしての重要な役割を果たすだけでなく、従来のガンマ線衛星と比べ 1 万以上の高精度で強度変化を観測でき、激動する高エネルギー天体の新たな物理現象が発見できる。さらに、CTA では、123 億光年先の天体まで観測可能となり、宇宙の構造形成史を明らかにできる。また、人工の粒子加速器で届かない高エネルギー領域を観測できる CTA の特徴を活かし、現代科学の大きな謎の一つであるダークマターを、CTA で世界最高感度で探索し、正体の解明を目指す。さらに、物理基本法則である光速不変原理の検証や時空間の量子的な振る舞いを高精度で研究できる。テラ電子ボルトガンマ線領域で世界唯一の大型施設となる CTA の設置・運用の重要性は極めて高い。

3. 所要経費

CTA 天文台全体で、建設費 430 MEuro、運営費 20 MEuro/年と推定されている。日本の分担は、建設費 62 億円、運営費 4 億円/年、計 152 億円を計画している。内訳は、(1)準備期間(開発研究)：4 億円、(2)北サイト建設期間(LST 4 台)：24 億円、(3)南サイト建設期間(LST 4 台、SST カメラ)：34 億円、(4)観測運用(北 30 年間、南 20 年間)：90 億円である。

4. 年次計画

2008 年に準備研究を開始し、2016 年から北サイトの CTA 大口径望遠鏡 4 台の建設を進めている。初号機は 2018 年に完成し 2020 年に科学観測を開始した。続く大口径望遠鏡 2 号機から 4 号機の完成予定は 2025 年であり、初号機と合わせた 4 台アレイによる科学観測を開始し、20 年間以上にわたり運用する予定である。中間エネルギー帯を観測する中口径望遠鏡は、外国グループが担当し、CTA 北サイトでの 9 台の建設が 2024 年から始まり 2028 年に完成予定である。これにより大口径望遠鏡と中口径望遠鏡を合わせた CTA 天文台北サイトが完成する。一方、CTA 南サイトは、2022 年にインフラ整備を開始し、2024 年から、大口径望遠鏡 4 台、中口径望遠鏡 14 台および高エネルギー側を観測する小口径望遠鏡 42 台の現地建設が始まり、2028 年に全数完成予定である。2028 年から、南・北両方のサイトを統合した CTA 天文台による科学観測が行われ、20 年間運用される予定である。

5. 実施機関と実施体制

大型国際共同で 25 か国 約 1500 名の研究者からなる CTA コンソーシアムが実施機関の中心であり、欧州連合(EU)全体の法人格を持つ研究基盤機構(略称 ERIC)としての CTA 天文台が 2023 年に設立予定である。主要国は、ドイツ、イタリア、フランス、スペイン、日本の 5 か国である。日本グループ CTA-Japan は、国際共同利用・共同研究拠点である東京大学宇宙線研究所を中心とし、21 機関 125 名の研究者・大学院生からなり、東京大:51 名(共同利用研究者含む)、理研:9、京都大:8、名古屋大:8、広島大:7、甲南大:6、東海大:5、青山学院大:5、茨城大:4、山形大:4、大阪大:3、埼玉大:3、高エネルギー加速器研究機構:2、山梨学院大:2、立教大:2、北里大:1、熊本大:1、東北大:1、徳島大:1、宮崎大:1、早稲田大:1 が参加し、望遠鏡開発・建設・運用、観測データ解析・シミュレーション、物理検討のグループが活動している。

添付資料 12

計画名： 惑星間宇宙望遠鏡 (Interplanetary Space Telescope - IPST)

1. 計画の概要

本計画は、原初天体や宇宙背景ニュートリノの崩壊光子など、初期宇宙の未発見の痕跡を可視光および赤外線(光赤外域:波長 0.3-300 μm)の宇宙背景放射として検出することを目的とする。地球近傍での観測では、手前にある惑星間ダストの放射により著しく感度が制限され科学目的の達成は困難である(図1)。我々はこの限界を突破するため、探査機を用いてダストが希薄な遠方の惑星間空間へ脱出する新たなコンセプトの望遠鏡「惑星間宇宙望遠鏡 (Interplanetary Space Telescope - IPST)」を提案する。超小型機による技術実証, JAXA 中型計画相当の IPST pathfinder, 最終的には大型 IPST, と発展的に実現することで、近地球ではなしえない究極的な高感度に裏付けられた新時代の光赤外天文学を創成する。

2. 科学的意義

本計画グループが世界に先駆け観測した近赤外域(波長 1-5 μm)の宇宙背景放射は、その起源とされる遠方銀河の積算光より数倍明るく、その原因は初代星や原始ブラックホールなどの原初天体かもしれない(図1)。IPSTでは、観測が困難であった可視光や中赤外域(5-30 μm)を含むスペクトルに基づく原初天体成分の分離検出、および遠赤外域(30-300 μm)での原始水素分子探査では、個別の銀河観測では見逃されるような小天体やガスまで網羅した銀河形成の解明が期待できる。また、ビッグバン理論が预言する宇宙背景ニュートリノの直接検出は困難であるが、素粒子の非標準理論によれば、その崩壊光子は遠赤外域に特有のスペクトルを生じる。IPSTによりその検出に成功すれば素粒子物理と宇宙論で史上最大級の成果になる。さらに、

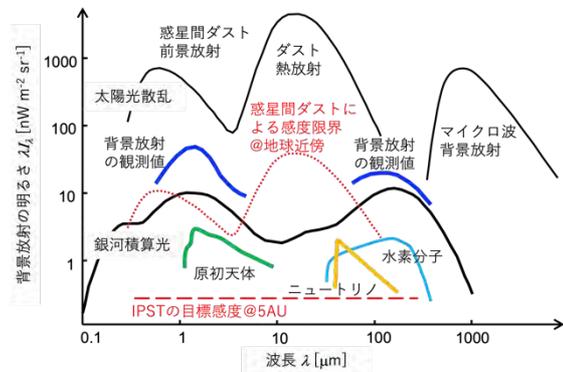


図1 可視光・赤外線宇宙背景放射の科学対象

IPST は他国にない独創的な計画であるが、日本が未踏である外惑星の探査技術を必要とするため(図2)、その開発を通して国内の宇宙工学や惑星科学を振興する意義もある。

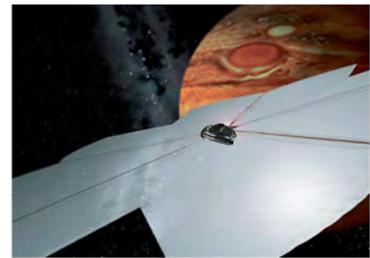


図2 ソーラーセイルによるIPSTの概念図

3. 所要経費

技術実証 20 億円, ISAS 中型計画 400 億円

4. 年次計画： 図3に示す。

5. 実施機関と実施体制

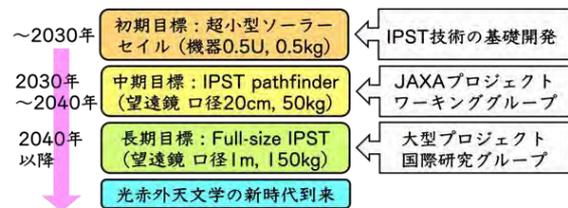


図3 年次計画

IPST pathfinder までの計画は関西学院大学

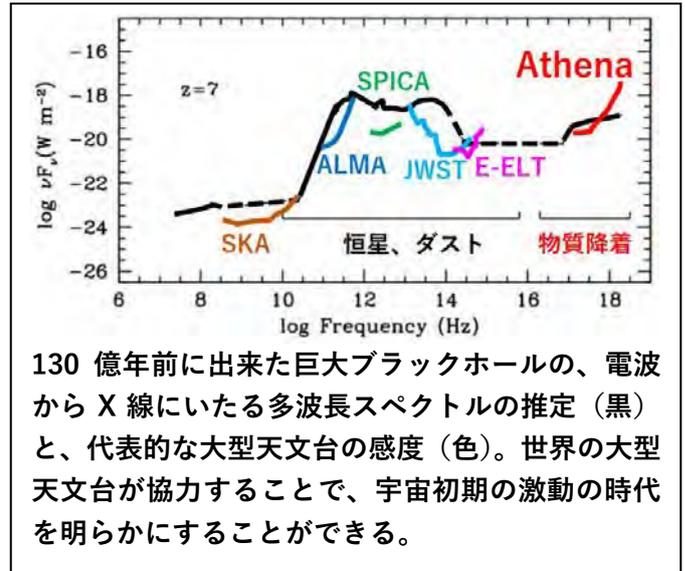
が代表として取りまとめ、国内大学(東工大, 関学大, 九工大, 筑波大ほか)と JAXA/ISAS が、超小型実証機や観測ロケットによる実験により人材育成を進めつつ、宇宙機や観測機器の開発を行う。さらに将来の大型 IPST は体制を改め国際協力で実施することを想定している。

添付資料 14

大型国際 X 線天文台 Athena への日本の参加

1. 計画の概要

Athena は、欧州宇宙機構が採択した大型 X 線天文衛星計画である。従来よりも 2 桁大きな集光力を持つ X 線望遠鏡、X 線光子のエネルギーを精密測定する X 線マイクロカロリメーター (X-IFU)、広い視野で X 線画像を取得する半導体検出器 (WFI) を搭載する。2030 年代後半以降の打ち上げを目指しており、その規模から開発には日米の国際協力が必須である。現代天文学では、様々な手法で天体を観測し、それらを統一的に解釈することが重視される。X 線観測は天体の高エネルギー現象をえぐり出す役割があり、Athena は 2030 年代の他の巨大観測装置と比肩する感度で宇宙 X 線を観測する (右図)。また、高い集光能力で遠方宇宙の X 線観測を可能にする。Athena は 2030 年代唯一の大型 X 線天文衛星であり、そのため 51 か国 2300 名以上の科学者が Athena をサポートしている。日本は、ひとみ衛星・XRISM 衛星で、X 線マイクロカロリメーターによる X 線観測を開拓した。また同時に、衛星用冷却系開発の経験・知識を蓄積してきた。これらを生かし、Athena を確実に実行するためにハードウェア開発に協力し、そして Athena の科学成果の創出・最大化に寄与する。



2. 科学的意義

ビッグバンで始まった膨張宇宙の中で、ダークマターの重力により物質が集積し、銀河団・銀河・恒星ができた。宇宙は誕生直後には水素やヘリウムしか存在しなかった。しかし、恒星内部の核融合によって、新たな元素が生み出され、それが超新星爆発で宇宙空間にまき散らされ、現在の豊かな宇宙となったとされている。したがって「宇宙の起源」を解明するには、物質集積過程を解明しなければならない。しかし、重力のみならず、超新星爆発や銀河中心ブラックホール(BH)からのアウトフローなどの影響を強く受けるため、物質集積は非常に複雑な過程であり、まだよくわかっていない。現在の宇宙で、物質が集積している最大の系は銀河団である。銀河団物質の主成分は温度数千万度の高温ガスであり、X 線で直接観測できる。Athena は大集光能力を生かし、約 100 億年前の生まれたての銀河団から現在の銀河団までを X 線で一挙に観測し、大規模構造への物質集積過程を観測で解明する。一方、各銀河の中心には巨大 BH が存在し、銀河質量と BH 質量は比例している。これは、BH と大規模構造成長がお互いに関連することを物語る。BH は周辺物質を吸い込み成長し、同時に解放された重力エネルギーを X 線として放つ。Athena は約 130 億年前の初期の巨大 BH から現在の巨大 BH までを X 線で観測し、巨大 BH の成長過程と、その銀河への影響を観測で明らかにする。もちろん、2030 年代以降の一般的な X 線観測天文台としての役割も果たす。

3. 所要経費 (国際協力の場合は総額と日本の分担分)

所要経費の大部分は X-IFU の冷凍機開発が占める。現在計画決定フェーズで供給モデルも含め調整を進めており、現状の見積もりは約 50 億円である。宇宙科学研究所・宇宙航空研究開発機構の戦略的海外共同計画の枠内で捻出する。参考までに欧州宇宙機構の経費は約 13 億ユーロである。

4. 年次計画

現在 Athena はミッション全体の見直しが行われており、2023 年初旬にそれが完了する。その後 Phase A/B1 がスタートする。X-IFU の冷却システムの概要がかたまり次第、基礎開発が始まる。2027 年以降に Mission Adoption が行われ、その後実機の製作が始まる。打ち上げは 2030 年代後半以降の予定である。

5. 実施機関と実施体制 (国際協力の記述も含む)

日本の活動母体は、宇宙科学研究所の Athena チームである。欧州宇宙機構により Athena Mission Redefinition Team、Athena Science Redefinition Team が結成され、両チームに日本から研究者が参加しており、今後の科学運用の議論を日本がリードする準備を整えている。

添付資料 15

次世代太陽風観測装置

1. 計画の概要

本計画では、太陽風が電波を散乱する特性を用いて地上電波観測から世界初の太陽風 3 次元構造の導出を行うための次世代太陽風観測装置を提案する。本計画では、国内 3 カ所にアレイアンテナ群を建設する。各基地局は、約 4000m²の平面に 327MHz 帯域に感度を持つダイポールアンテナを敷き詰めた 2 次元平面フェーズドアレイアンテナで構成され、受信信号をデジタル処理することで多方向に同時に指向できるデジタルビームフォーミングを実現する（図 1）。

2. 科学的意義

本計画の主目的は、太陽風の加速機構を解明することである。本装置では既存装置の 10 倍の太陽風観測を実現し、太陽風分布の流源における空間分解能を約 3 倍に向上させることで、初めて太陽風の流源における磁場・大気の特徴を明らかにし、加速過程の解明に迫る。

また、太陽風擾乱は地球周辺環境に大きな影響を及ぼす。本計画では、既存装置の 10 倍の稠密な太陽風データを太陽圏のグローバル磁気流体シミュレーションに同化することで、太陽風擾乱の到来予測精度を劇的に向上させ、宇宙天気予報を通じて宇宙社会に貢献する（図 2）。

3. 所要経費

総額 20 億円

（建設費：16 億円、運営費：4 億円）

4. 年次計画

2023 年現在 1 基地局の数%の規模の試験アレイを開発中。 2026 年：1 基地局（富士）で観測開始

2028 年：残り 2 基地局（木曾・豊川）の開発を開始。 2030 年：3 基地局での連続観測開始

5. 実施機関と実施体制

共同利用・共同研究拠点である名古屋大学・宇宙地球環境研究所の太陽風グループが主体的に運用を行う。観測は全自動で行われ、相関処理後の太陽風速度データは即日インターネット上に公開され、太陽圏研究に用いられるとともに、国内外の宇宙天気予報機関での現業の宇宙天気予報にも提供する。

未来の学術振興構想には「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」の一角として提案している。本構想は次世代太陽風観測装置に加えて地球の大気・超高層大気を観測する地上機器群（赤道 MU レーダー、EISCAT_3D レーダー、広域地上観測網）および観測データ統合解析システムの整備からなり、名古屋大学宇宙地球環境研究所に加え、京都大学生存圏研究所、国立極地研究所、九州大学国際宇宙惑星環境研究センターと国内外の関連研究機関らが連携し実施される。

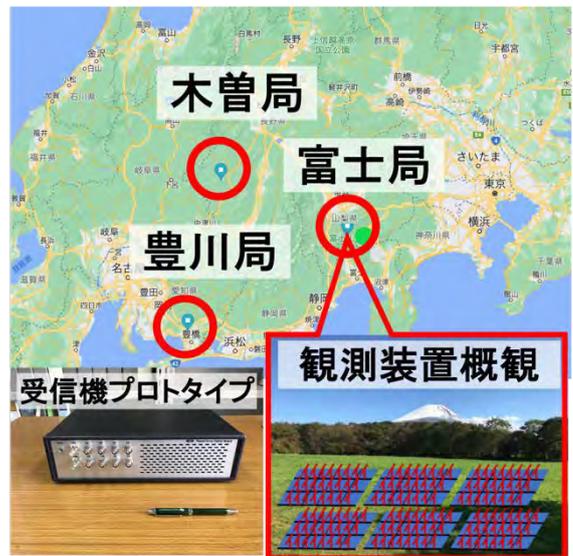


図 1：計画および装置概要

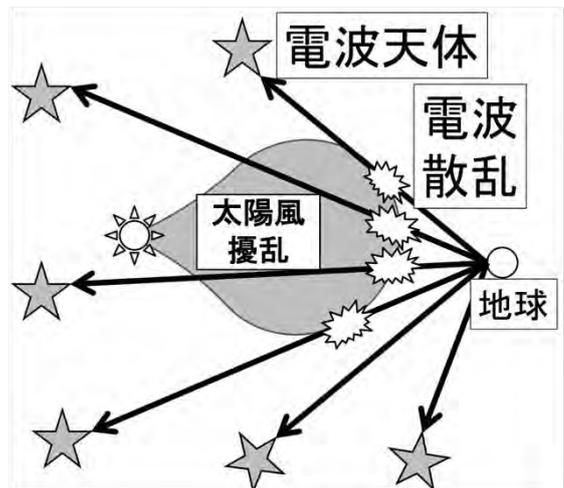
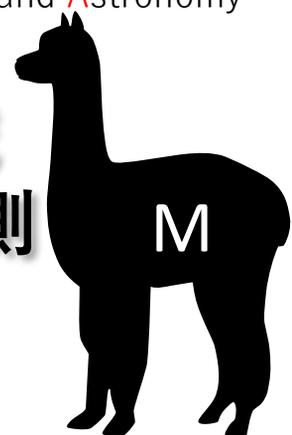


図 2：電波散乱から太陽風擾乱を検出する模式図

添付資料 17

南米
アンデス

南天におけるPeV領域 ガンマ線広視野連続観測 (Mega ALPACA)



参加機関



サン・アンドレス大学, グアダラハラ大学, 東京大学宇宙線研究所, 宇都宮大学, 日本原子力研究開発機構, 理化学研究所, 日本大学, 神奈川大学, 東京都立産業技術高専, 国立情報学研究所, 横浜国立大学, 信州大学, 中部大学, 愛知工業大学, 大阪公立大学, 大阪電気通信大学, 広島市立大学, 等

- 人類未踏の最高エネルギーガンマ線天文学の開拓 -

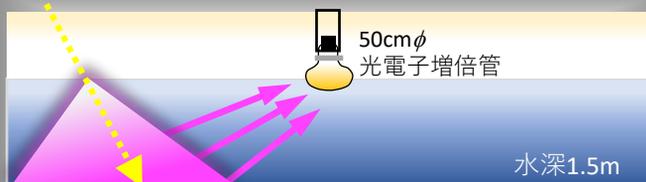
計画の概要：Mega ALPACA実験は日本・ポリビア・メキシコ等の国際共同による宇宙ガンマ線を観測するプロジェクトです。南半球で、これまでにない高いエネルギーのガンマ線 (PeV=ペタ電子ボルト[可視光の1000兆倍のエネルギー]以上)を用いた天文学を開拓します。

科学的意義：「銀河系内のどの天体が宇宙線を超高エネルギー領域 (1-100 PeV) にまで加速しているのか？」宇宙線の発見以来100年以上続くこの謎の解明を目指します。

所要経費：40億円 - 日本負担は約半分予定

年次計画：2027	建設準備
2028-2032	観測装置設置 + 部分観測
2033-2042	本観測

宇宙線が大気中で作る粒子カスケードと多数の粒子検出器(上図)：1500台を15~30m間隔に設置。地下の水チェレンコフプール(右図)：1ユニット58m²で、合計960ユニットを地下に建設予定。



添付資料 18

計画名: ガンマ線バーストを用いた初期宇宙・極限時空探査計画 HiZ-GUNDAM

1. 計画の概要:

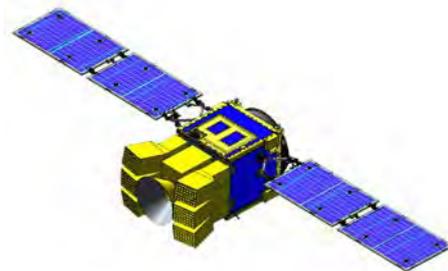
科学衛星 HiZ-GUNDAM は、突発天体現象を扱う「時間領域天文学」を強力に推進する計画であり、2つの主要課題を掲げている。1つ目は、宇宙年齢が7.7億年よりも若い（赤方偏移が $z>7$ の）初期宇宙において最も明るい光源であるガンマ線バースト（GRB）の観測を通じて、星形成率の測定や初代星を起源とする GRB の探査、宇宙再電離や重元素合成の歴史の解明など、初期宇宙観測のフロンティアを開拓することである。2つ目は、重力波やニュートリノと同期した突発天体の観測により「マルチメッセンジャー天文学」を強力に推進し、ブラックホールという極限時空環境における物理現象を探求することである。これらの観測を通じて、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」を深く理解する計画である。

2. 学術的意義:

本計画では年間30例程度の高赤方偏移GRBを検出し、(1)初期宇宙におけるGRB発生率・星形成率を初めて観測的に明らかにし、(2)地上大型望遠鏡の協力を得て宇宙再電離時期やその歴史の変遷を紐解く事が可能となる。さらに、(3)明るいGRBの分光観測で微量な金属元素量を測定し、宇宙に重元素が増加する変遷を捉える。宇宙の天体に多様性を生み出す原点となる宇宙再電離と重元素合成を明らかにすることで、初期宇宙の宇宙進化シナリオについて初めて観測的な検証を行う。さらに本計画では、初代星の発見という驚くべき成果に結び付く可能性がある。

連星中性子星の合体を代表とする重力波源の観測では、相対論的ジェットの放出、飛び散った物質とジェットの相互作用で形成するコクーンからの放射、そして早期の可視光・近赤外線キロノヴァといったエネルギーの変遷を捉え、新たに誕生したブラックホール極限時空の周辺で生じる物理現象を理解する。また、高エネルギーニュートリノ源の観測では、ブラックホールへの質量降着に伴う超高エネルギー粒子加速の現場の解明に寄与する。キロノヴァの観測から得られる希土類元素の生成量、ニュートリノ源から得られる宇宙線の生成量が宇宙の総量を説明できるかについて徹底的に探求する。

本計画は2030年頃の実現できるGRBを用いた初期宇宙探査・マルチメッセンジャー天文学衛星として世界唯一のコンセプトである。米国のNational Academy of Scienceが取りまとめる文書Astro2020 (Decadal Survey Report) では、「人工衛星によるマルチメッセンジャー天文学の展開」は最重要課題の一つとして位置付けられており、HiZ-GUNDAM は正にその王道路線を進むフロントランナーである。



HiZ-GUNDAM 衛星の外観図

3. 所要経費:

174.86 億円（ミッション機器総額の30%、その他総額10%の予備費を含む。打ち上げ経費を除く）

4. 年次計画:

2023-24年度：ミッション定義審査、プリプロジェクト化

2025-27年度：JAXAプロジェクト移行、詳細設計、エンジニアリングモデルの開発

2027-29年度：フライトモデルの製造開始

2029-32年度：イプシロンロケットによる衛星打ち上げ、観測開始、科学成果の創出

5. 実施機関と実施体制（国際協力の記述も含む）:

HiZ-GUNDAM は JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画の候補と位置づけられており、プリプロジェクト候補チームを結成して検討や基礎開発を行っている。

宇宙科学研究所およびPIである金沢大学が実施責任機関となり計画を遂行する。ミッション機器である広視野 X 線モニターおよび近赤外線望遠鏡の開発責任を、それぞれ青山学院大学と東京都市大学が担い、サイエンスチームは京都大学が主導する。国内20大学・研究機関から68名の協力体制で開発・検討を行っている。本計画には、国外12機関から14名の研究者が参画しているが、研究者間での技術情報の交換やサイエンス検討が主であり、経費の分担は想定していない。

添付資料 19

計画名: Roman 近赤外広視野サーベイ宇宙望遠鏡への参加

1.計画の概要:

本計画は、NASA の次期旗艦ミッション Roman 近赤外広視野サーベイ望遠鏡計画(図)に、日本の貢献計画をもって参画し、その主要な科学目的である、(1)バリオン音響振動実験、弱重力レンズ実験、Ia 型超新星の観測による暗黒エネルギー(ダークエネルギー)理論および修正重力理論の検証、(2)重力マイクロレンズ系外惑星探査による系外惑星の質量・軌道要素の分布および形成過程の解明、(3)系外惑星のキャラクタリゼーション用コロナグラフ装置の技術実証、(4)スペースからの高感度・高解像度を活かした、これまでにない近赤外線広視野サーベイによる様々な分野での天文学研究の推進、を遂行する。

2.学術的意義:

Romanは、米国・NASAがJames Webb Space Telescope (JWST) に続く旗艦計画として推進している大型の光学近赤外線天文衛星計画である。米国の宇宙物理学分野のDecadal Survey 2010の報告 (New Worlds New Horizons) において、大型スペース計画の最も優先度の高い計画と位置づけられ開発が始まり、2026年に打ち上げ予定である。ハッブル宇宙望遠鏡 (HST)と同じ口径

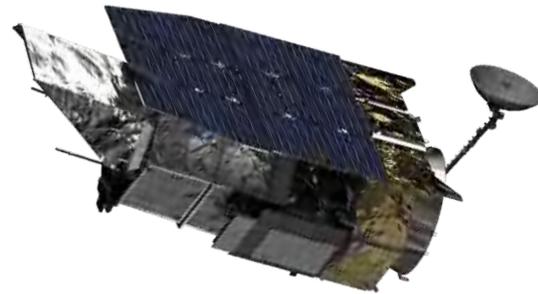


図:Roman 広視野宇宙望遠鏡

2.4mの望遠鏡に、近赤外波長域で、HSTの200倍の0.28平方度という圧倒的な広視野を持つ「広視野観測装置」を搭載し、これまでにない深さと広さの大規模撮像・分光サーベイ観測を遂行する。これにより、精密宇宙論(上記の科学目的1)、重力マイクロレンズ系外惑星研究(同2) および、広視野赤外線天文学(同4)を推進する。さらに、将来の本格的な地球型系外惑星探査および系外生命探査への技術実証とも位置づけられる、「コロナグラフ(高コントラスト観測)装置」の搭載により、これまでを大きく凌駕する恒星近傍での高コントラスト観測を実現すること(同3)を目指している。Romanは、2020年代における宇宙の加速膨張と系外惑星の精密観測の決定版と言えるスペースミッションとして位置づけられるが、この旗艦計画に日本が参加する事で、その科学成果の創出に貢献するとともに、日本としても、将来におけるより高度な国際大型旗艦ミッションに参加するためのステップとしても位置づけられる。

3.所要経費:\$3.9B (日本の貢献分:39.1億円)

4.年次計画:

2021-2026、マイクロレンズ事前観測、 コロナグラフ装置開発、地上局改修

2026-2031、Roman 観測。 すばる、マイクロレンズ協調観測。地上局運用

5.実施機関と実施体制(国際協力の記述も含む):

Roman は、NASA が主体となり、欧州、カナダ、日本が参加している。日本からは、(A)すばる望遠鏡による Roman とのシナジー観測(これに特化したすばる望遠鏡の観測時間の確保)(国立天文台、各大学)、(B)日本独自の地上重力マイクロレンズデータ(MOA 計画)の提供、および、日本の重力マイクロレンズ専用望遠鏡(PRIME 計画)による開発・観測支援・および協調観測(阪大)(C)地上局によるデータ受信の支援(JAXA)、(D) コロナグラフ装置の特に偏光機能を付与する増強デバイス、コロナグラフマスク基板の提供(東大、ABC、JAXA、北大)、による貢献を行い、Roman のキーサイエンス全般の成功に寄与すると共に、その特徴を利用した独自のサイエンスを追求する。また、各大学の研究者が NASA Roman のサイエンスチームでの科学検討や、国内での検討に参加している。これらの貢献を JAXA がまとめ、NASA に対する窓口となっている。これら日本の計画の推進は、JAXA/ISAS の Roman プロジェクトチームによって行われている。

添付資料 20

計画名: NASA 6m 紫外線可視近赤外線望遠鏡 Habitable Worlds Observatory への参加

1. 計画の概要: 本計画は、NASA の次世代旗艦計画、口径 6m の紫外線可視近赤外線超大型宇宙望遠鏡 (Habitable Worlds Observatory: HabWorlds) に、日本が装置開発、科学検討の貢献を持って参加する。主要科学目標は、1) 太陽型星周りの系外惑星の大気において、生命居住環境及び生命の痕跡の探査、2) 広範囲な一般宇宙物理学研究、である。この波長域で、これまでにない高空間分解能・高感度・高感度を生かして約 25 個の地球型惑星の大気を直接分光し成分を調べる。これにより、地球以外で初めて生命居住環境及び生命の痕跡を発見し、その頻度を見積もる。また、あらゆる分野で観測能力が飛躍的に向上し、宇宙創生以来の構造形成史を解き明かす。

2. 科学的意義: 遂に人類史上初めて、太陽系外生命探査が可能になる。現在、数千個の系外惑星が発見され、巨大ガス惑星の大気成分が観測されるようになった。惑星発見の時代から、個々の惑星の特徴づけの時代になりつ

つある。次のステップは、地球の様な岩石惑星の大気成分を観測し、生命居住環境及び生命の痕跡を探すことである。HabWorlds は、圧倒的な高解像度・高感度・高コントラストを生かして、太陽型星周りのハビタブルゾーンにある地球型惑星を直接撮像、直接分光し、その大気組成を調べることで、生命居住環境が一般的なのか希少なのか、また生命の痕跡があるかを探査する(図)。初の地球外生命発見と言う世界で唯一の歴史的計画に貢献することの重要性は言うまでもない。また、探査機なみの高解像度で太陽系内の氷衛星をモニターし、生命居住可能性を調べる。

3. 所要経費: 総額 \$11B (FY2020) (日本貢献分: 215 億円)

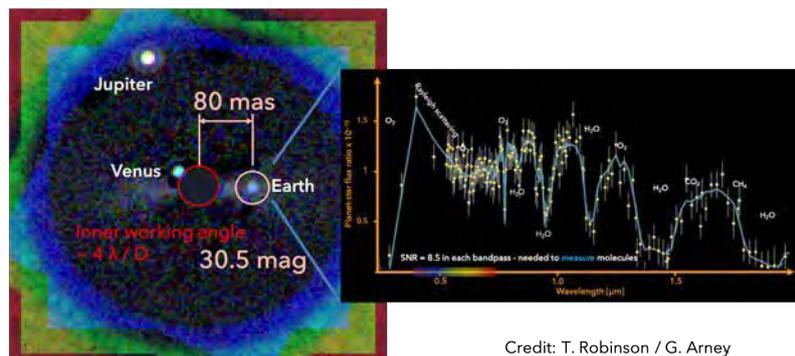
4. 年次計画:

2023-2029 GOMTMP (技術実証フェーズ)、2030-2033 Phase B Preliminary Design and Technology Completion、2033-2039 Phase C Final Design and Fabrication、2039-2040 Phase D System Assembly, Integration and Test, Launch

5. 実施機関と実施体制(国際協力の記述も含む)

NASA が計画全体を主導し、欧州、カナダなどが参加を検討している。国内では、約 20 名のチームで検討をしている。大阪大学が総括を行い、名古屋大学が、多天体高安定高分散分光器(NASA Ames Research Center と共同開発)、セグメント鏡回折限界コロナグラフの技術実証、開発を行う。東京大学、アストロバイオロジーセンター、国立天文台、北海道大学は、コロナグラフ素子、光学系および偏光素子のコンポーネントの開発を行う。

JAXA、立教大学は、紫外線検出機(Funnel MCP)、回折格子、鏡コーティングの技術実証、開発を行う。JAXA は、地上局の運用、NASA との交渉を行う。その他、東北大学、東京大学カブリ IPMU、早稲田大学、東京都市大学のメンバーが科学検討に参加する。



Credit: T. Robinson / G. Arney

図: 10pc の距離にある地球を HabWorlds で観測した場合の直接撮像、分光の概念図。太陽型星周りの地球型惑星を空間分解して、反射光を分光することで、大気組成を調べ、生命活動の痕跡を探る。

GRAMS

Gamma-Ray and AntiMatter Survey



1. 計画の概要

GRAMS計画は、大型の液体アルゴン放射線検出器を気球に搭載し、メガ電子ボルト (MeV) ガンマ線天文学の開拓と反粒子検出による暗黒物質の間接探索を同時に目指す日米国際協力実験である。液体検出器の採用により、高密度と大容量の両立が可能になり、従来の100倍を超えるかつてない大有効面積を低コストで実現する。南極大陸やニュージーランドでの1ヶ月以上の長時間気球フライトを複数回計画している。MeVガンマ線の観測により、ブラックホール最近傍のプラズマ流など、宇宙の極限環境における核反応や高エネルギー現象の物理が明らかになると期待される。GRAMSのコンセプトの優位性は長い観測時間の確保によりさらに拡大する。2020年代後半に実施される気球搭載実験によって科学的成果を創出し、技術的実現性が確立すれば、2030年代以降に人工衛星による本格的サーベイミッションへの展開が期待できる。

2. 科学的意義

ニュートリノや重力波による宇宙の観測が可能となり、天文学は黄金時代を迎えているように思える。しかし、宇宙観測の窓が未だ閉ざされた電磁波のエネルギー帯域が存在する。0.1–10MeVの中間エネルギーガンマ線帯域である。GRAMSはこの帯域を大面積液体コンプトン望遠鏡という全く新しい概念の検出器で開拓する。私たちの周りにある物質の基本構成要素である100種類余りの元素は138億年の宇宙史の中でどのように創られたのか？これは天文学のみならず現代科学の最重要問題のひとつであり、特に、鉄よりも重い元素の起源は未だ謎に包まれている。その最有力候補が重力波検出で一躍脚光を浴びた連星中性子星合体である。これを唯一、直接検証する手段が原子核から放出されるMeVガンマ線の測定である。さらに、GRAMSは反粒子を介した暗黒物質のバックグラウンドフリー間接探索も同時に行うことができる。観測的宇宙論の進展により暗黒物質の存在自体は疑いないと考えられているが、その正体は完全に不明である。この物理学最大の問題にGRAMSはあらたな角度から迫ることができる。このようにGRAMSは2つの究極的な目標を掲げ、宇宙・素粒子物理学融合の視点から、世界を構成する「もの」の起源と正体の解明を目指す。

3. 所要経費

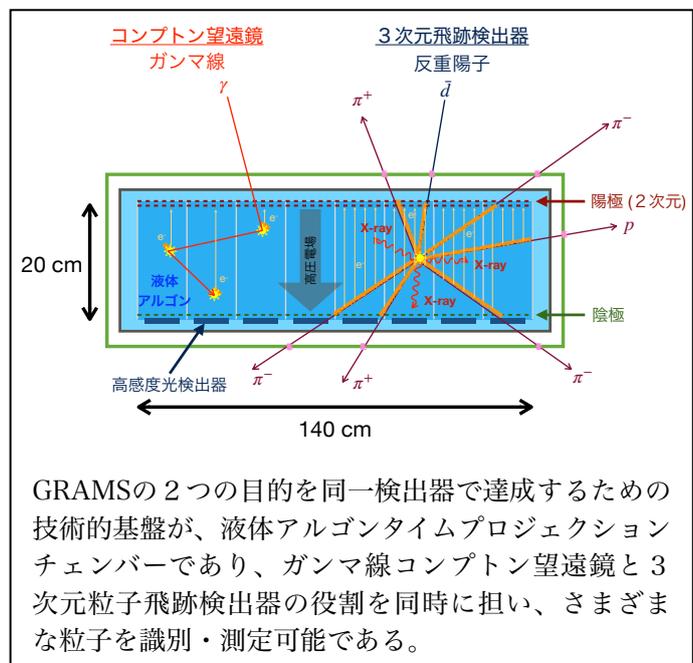
	全体額 (千円)	日本負担分 (千円)
準備期	100,000	50,000
建設期	500,000	150,000
運用期	330,000	120,000
総予算	930,000	320,000

4. 年次計画

2021–2023	計画準備・技術実証 工学気球実験を含む
2024–2025	科学実証・観測装置の建設 短時間サイエンスフライトを実施
2026–2030	長時間気球フライトによる観測 計3回のフライトを予定
2030年以降	衛星プロジェクトの推進

5. 実施機関と実施体制

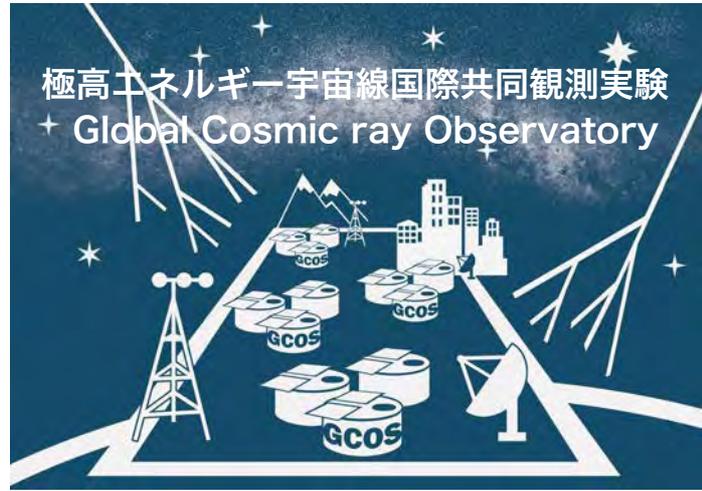
日米国際協力のもと実施する。日本の参加機関は、大阪大学、早稲田大学、東京大学、広島大学、神奈川大学、富山大学、立教大学、JAXA宇宙科学研究所である。米国からは、コロンビア大学、ノースイースタン大学、バーナードカレッジ、NASA/GSFCなどの機関が参加する。宇宙物理学・素粒子物理学の実験・理論の専門家を配置したバランスの良い共同研究体制で、計画発案者を含め日米双方が若手研究者を中心としたチーム構成となっているのが特色である。



藤井 俊博 大阪公立大学 理学研究科 Email: toshi@omu.ac.jp

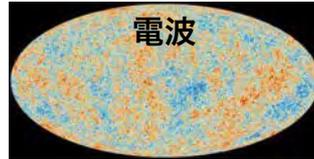
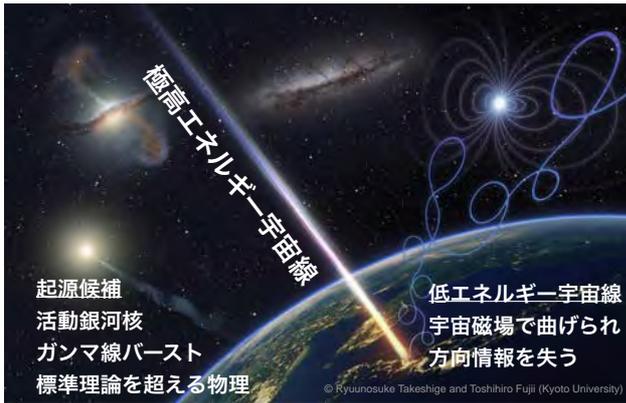
1. 計画の概要

- ✓ 現状の極高エネルギー宇宙線の統計量を一桁以上向上させる次世代の国際共同観測実験(Global Cosmic ray Observatory, GCOS)を建設し、本格始動へ
- ✓ 40,000平方キロメートルの有効検出面積に到来する10の20乗電子ボルトの宇宙線を検出する
- ✓ 宇宙線の粒子種識別能力の高精度化
- ✓ 現在の世界最高感度を誇るテレスコープアレイ実験とピエールオージェ観測所による新たな国際共同研究



2. 科学的意義

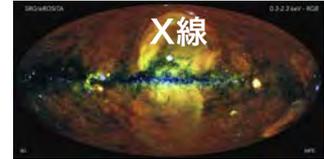
極高エネルギー宇宙線による次世代天文学の開拓



Planck Collaboration



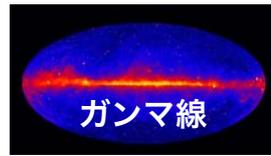
GAIA Collaboration



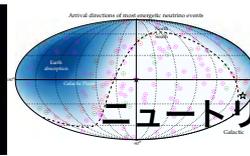
eROSITA Collaboration



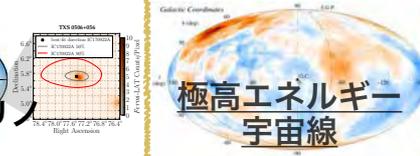
- ✓ 10の20乗電子ボルト以上の宇宙線は宇宙磁場は曲げられにくい
 - ✓ 到来方向は起源方向に集中
- 宇宙線起源・加速機構・伝搬を解明する『極高エネルギー宇宙線天文学』



Fermi Collaboration



IceCube Collaboration

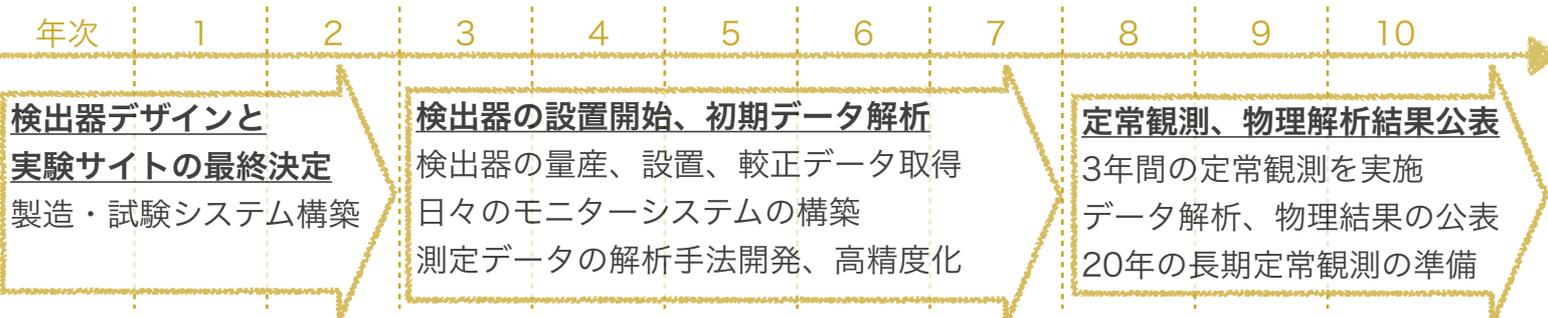


Pierre Auger and Telescope Array Collaborations

3. 所要経費

総経費250億円、うち日本国内負担額100億円 (検出器製作費200億円、運営費50億円)

4. 年次計画



5. 実施機関と研究体制

GCOSの創始メンバー：テレスコープアレイ実験とピエールオージェ観測所の責任ある立場の13名で構成 (日本、アメリカ、ドイツ、オランダ、スペイン、イタリア、ベルギーの研究機関)

国内の実施機関：大阪公立大学、東京大学宇宙線研究所、大阪電気通信大学、信州大学、神奈川大学

添付資料 23

30m光学赤外線望遠鏡 TMT による天文学・宇宙物理学の革新と太陽系外惑星における生命の探究

- 1. 計画の概要** ビッグバンで始まり膨張を続ける宇宙では、星、銀河、大規模構造が作られるとともに星の核融合等で多様な元素が生成されてきた。この全貌を理解し、惑星の形成と生命誕生を探ることは人類の究極の課題である。これに挑む基幹観測装置としてハワイ島マウナケアに日・米・加・印・中の協力で口径 30m の光学赤外線望遠鏡 TMT を建設する。従来の 10m 級望遠鏡を解像度で 3 倍、感度で 100 倍上回る圧倒的な解像度と感度性能が実現する TMT により、すばる望遠鏡の超広視野探査と連携して、地球型系外惑星や宇宙の初代星、宇宙膨張史等の理解を一新し、物理学・惑星科学・生物学等に波及する研究を強力に推進する。
- 2. 科学的意義** 高解像度 (0.01 秒角)・高感度 (約 30 等級)【図 1(a)】を実現する TMT は次のような挑戦的課題に挑む。**(1) 生命を育む第 2 の地球の探査。**地球型惑星の直接撮像【図 1(b)】、惑星の反射光の分光観測、惑星大気を透過してくる恒星の光の分析【図 1(c)】を行うことにより、地球型惑星大気の組成を調べ、酸素等の生命の存在を示す分子を探り、その割合を測定する。これにより地球上と異なる環境での生命誕生・進化の研究が画期的に進展する。**(2) 初代星が放つ光の直接検出。**初代星に期待されるヘリウム輝線等の特徴的な放射を捉えることにより、初代星の誕生時期や、その紫外線放射や超新星爆発が以後の銀河形成に与えた影響、宇宙再電離への寄与を明らかにする。**(3) ダークエネルギーの性質の解明。**様々な距離にある銀河間物質の速度の時間変化を調べ、宇宙膨張の速度を測定し、膨張の要因とされるダークエネルギーの性質を解明する。
- 3. 所要経費** 総建設費は約 36 億ドルである。日本の分担分は 375 億円であり、共同利用整備の国内経費 40 億円を必要とする。完成後の TMT 国際天文台 (TIO) 運用に必要な経費のうち、建設への貢献割合に応じた日本の分担金は約 12 億円であり、国立天文台がすばる望遠鏡と日本の TMT の観測を一体的に効率良く運用し共同利用に供するために必要な経費約 18 億円を合わせ、年間約 30 億円の運用経費が必要となる。
- 4. 年次計画** 2014 年に TIO を設立し、建設期に入った。現在、建設地ハワイにおいて地元住民の理解を得る取り組みを進めるとともに、国立科学財団(NSF)の大型施設予算審査プロセスを進めており、2024 年度に NSF の公式手続きを経て現地工事を再開する。その後、ドーム、望遠鏡本体、主鏡や観測装置を建設・搭載し、2033 年度に完成、翌年度に共同利用を開始する。
- 5. 実施機関と実施体制** 実施の責任機関は、日本の自然科学研究機構、米国カリフォルニア大学・カリフォルニア工科大学、カナダ国立研究機関、中国国家天文台、インド科学技術庁である。現在、NSF の参加に向けたプロセスが進んでいる。日本の分担箇所の実施統括には国立天文台があたり、望遠鏡本体構造と主鏡製作を国内企業と連携して実施する。また、国立天文台が中心となり、第一期観測装置の日本分担箇所的设计・製作を進めるとともに、国内の大学と協力して第二期観測装置の検討・要素技術開発を実施している。

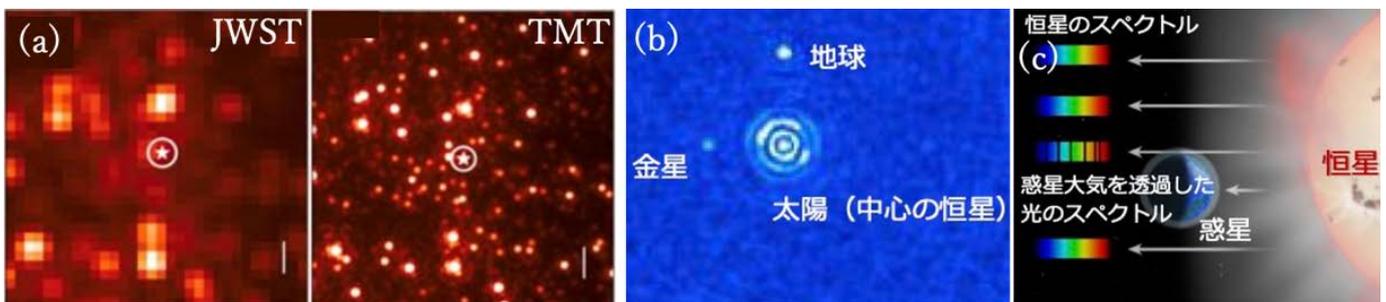


図 1: (a) 銀河中心部をジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) および TMT 第一期観測装置 IRIS で観測した場合のシミュレーション。TMT は JWST の約 5 倍の解像度を実現する。(b) 地球から最も近い恒星 (4 光年) に太陽系のような惑星系があった場合の TMT による直接観測のシミュレーション。(c) TMT の分光観測による惑星大気の探査模式図。惑星が恒星の前面を通過する場合、惑星大気を透過した光を分光観測し、惑星大気中に生命関連物質が存在する可能性を調べることができる。

添付資料 24

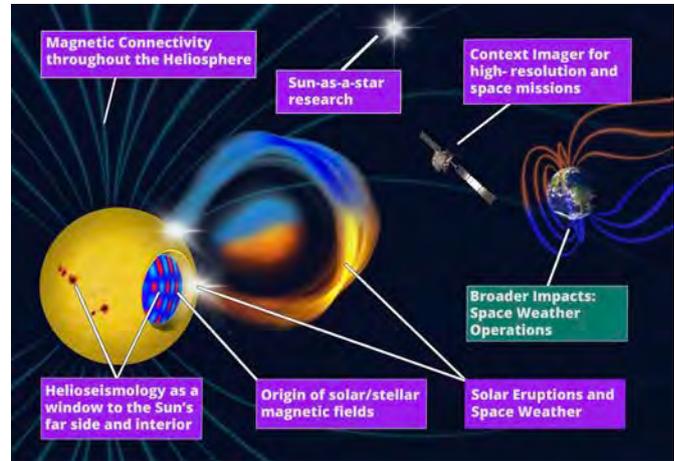
太陽観測次世代国際ネットワーク計画 ngGONG への参画

1. 計画の概要

太陽はその磁気活動によって地球を含む惑星間空間の電磁気的環境を左右する存在である。ngGONG (next generation Global Oscillation Network Group)の目的は太陽全体を視野に収めつつ太陽大気の磁場と運動を十分な精度と分解能で連続観測することで、太陽コロナと太陽風を駆動する大局的な磁場構造を把握するとともに、突発的現象から太陽周期活動まで幅広い時間スケールの磁気活動をとらえ、その物理プロセスの理解を進展させる。さらに、太陽大気における爆発や惑星間空間におけるプラズマ伝播の数値モデリングと組み合わせることで、宇宙天気現象の予測研究にも貢献する。ngGONG は、米国 National Solar Observatory (NSO)を中心に提案されている次世代の国際ネットワーク観測計画で、太陽の全面観測を行う望遠鏡を世界 6ヶ所に配置し、24 時間切れ目なく太陽を観測する。高精度偏光観測技術をもとに観測装置の一部を日本で担当する、データ駆動シミュレーションによる太陽圏変動予測、などの形でこれに参画することで、ngGONG を国際協力で実現することを目指す。

2. 科学的意義

太陽では光球下で磁場が生成され、それが表面に浮上し進化することで、その周囲に高温のコロナを形成し太陽風として流れ出すことで惑星間空間へと影響を及ぼす。さらに爆発現象フレアを生起しコロナプラズマが惑星間空間へ放出されると、時に地球への影響は文明社会における災害の原因ともなりうる。そのため、太陽全面の先進的観測に基づき、フレアを起こす巨大な活動領域の磁場構造の全容と惑星間空間へとつながる大局的な磁場構造を観測することで、太陽フレアの発生メカニズムとコロナから惑星間空間へいかに



伝播するか研究することが基本となる。そのような研究を基礎として宇宙天気現象の予測を行うことは、現代の太陽物理学、太陽圏物理学、地球惑星圏物理学の重要課題である。そのために、(1)太陽活動現象定量化の基盤となる光球・彩層磁場速度の観測、(2)光球・彩層磁場速度を境界条件に太陽活動現象が太陽圏へ及ぼす影響をモデル化、(3)日震学により太陽内部の短期・長期変動を観測、を ngGONG で行う。磁場が引き起こす爆発現象は、規模の違いはあれ、太陽に限らず多くの恒星で共通して発生するものであり、太陽-地球惑星圏における詳細な観測研究を起点として、主星の磁気活動が系外惑星の環境に及ぼす影響を理解することにも貢献する。

3. 実施機関と実施体制

ngGONG は米国 NSO と HAO (High Altitude Observatory)を中心に推進されており、ヨーロッパと日本(国立天文台及び京都大)のメンバーも参加して Astro 2020 Decadal Survey と Heliophysics 2024 Decadal Survey へ提案を行った。今後 3-4 年かけて国際チーム科学検討、装置設計を進め分担を決める。

4. 所要経費

ngGONG の全予算規模は約 120 億円。日本で観測装置の一部を担当する場合、国内における概念検討、設計、要素技術開発(2023-2025 年): ~1 億円、日本担当開発 (2026-2028 年): ~10 億円程度

5. 年次計画

(最速スケジュール) 設計検討: 2023-2025 年、開発・建設: 2026-2028 年、観測開始: 2029 年以降

添付資料 25

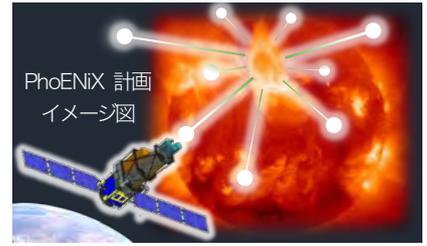
PhoENiX (Physics of Energetic and Non-thermal Plasmas in the X-region)

1. 計画の概要

PhoENiX 計画は、太陽フレアを観測・研究対象とし、人工衛星を用いて X 線とガンマ線を観測する計画である。その大目的は、「高いエネルギーにまで達するプラズマ加速現象の普遍性と、太陽や恒星におけるそのような現象が惑星の環境と居住可能性に与える影響を理解する。」ことである。

この大目的の実現に向け、PhoENiX 計画では、

- ・太陽フレアにおいて、プラズマはどのようにして超高温にまで加熱されるのか？
- ・太陽フレアにおいて、粒子はどのようにして加速・輸送されるのか？
- ・太陽フレアにおいて、粒子のエネルギーはどのように熱的・非熱的成分に分配されるのか？



という3つの科学目標を設定した。そのために、高いダイナミックレンジ（明るい場所も暗い場所も同時に観測できる能力）を確保した軟 X 線～硬 X 線の2次元集光撮像分光観測（空間、時間、エネルギー分解能を同時に有する観測）と、高精度の硬 X 線～軟ガンマ線の偏光分光観測（時間、エネルギー分解能と偏光診断能力を同時に有する観測）を行う。これらの観測手法を用いた太陽フレア観測は世界初の試みであり、高精度ミラーと高速度カメラ・高精度検出器といった日本が持つ最先端国産技術を用いて実現する。衛星の打ち上げは、第26太陽活動周期の前半から極大期付近にかけて（2033年頃以降）を目指している。

本計画は、理学分野（太陽物理学、地球惑星磁気圏プラズマ物理学、高エネルギー宇宙物理学、実験室プラズマ物理学）の研究者に加え、計画推進に必要な技術を持つ工学分野の研究者にも加わり分野間連携の体制で実施する。

2. 科学的意義

宇宙を満たす物質は、そのほとんど（99%以上）がプラズマ状態にあると考えられており、宇宙の至る所で超高温状態や加速状態になったプラズマが見つまっている。これはプラズマがエネルギーを獲得して加熱・加速されていることの査証であり、これらの現象の普遍性を理解することは、宇宙の活動を理解する上で不可欠である。そして、この普遍性の理解において鍵となるのが、磁気再結合と呼ばれるプラズマ中のプロセスである。磁気再結合は、磁場中に蓄えられた磁気エネルギーを爆発的に解放し、そのエネルギーを熱や運動エネルギーに変換することができるため、プラズマの効率的な加熱・加速機構として注目されている。さらにこのプロセスは、様々なプラズマ環境で発動することが可能で、宇宙における様々な規模の爆発現象に関係していることがわかってきている。

この様な中で、本 PhoENiX 計画が観測・研究対象とするのは、太陽系最大の爆発現象である太陽フレアである。その理由は、太陽は地球からの距離が近く、太陽フレアは磁気再結合が生み出す構造群を空間分解して観測できる唯一の宇宙プラズマ現象という極めてユニークな特徴を持つからである。しかしながら、この様に観測対象として恵まれた特徴を持つ太陽であっても、太陽フレアにおける高エネルギー現象、特に粒子の加速機構は、その理解に至っていない。その理由は、粒子の加速にはマイクロからマクロなスケールの物理が介在しているが、太陽フレアの場合、そこに1m～1万kmという7桁ものギャップが存在するためである。加えて、観測手法・技術の限界から、既存の高エネルギープラズマの観測は、グローバルスケール（約10万km）に留まっているのも理由である。本計画は、この状況を打ち破り、太陽フレア粒子の加熱・加速・輸送・エネルギー分配を理解することを目的とし、プラズモイドや衝撃波といったマクロスケールの加速源候補を空間・時間・エネルギー分解し、定量的な評価を行う。加えて数値計算も活用し、観測情報から物理（マクロスケール以下の物理を含む）を引き出す。このように本計画が実現すれば、観測と数値計算の連携により、粒子の加速機構解明のために埋めるべき7桁のスケール間ギャップのうち、2桁以上を埋めることが可能となり、粒子の加速を含めた太陽フレアの理解に大きなブレークスルーをもたらすことができる。

また、宇宙プラズマにおけるギャップはさらに大きく15桁以上に及ぶものもある。本計画によって太陽フレアにおける高エネルギー粒子の物理の理解を進めることは、その波及効果として、様々な宇宙プラズマ環境での高エネルギー現象の理解の足掛かりとなり、宇宙の活動を統一的に理解する上で極めて重要な第一歩となると期待される。

以上のように、太陽フレアは宇宙でおきる様々な現象の縮図と言えるが、この様な基礎学問的な価値に加えて、近年、太陽研究の実用面での重要性が増している。GPSや衛星通信といった人工衛星を用いたインフラが社会生活に不可欠となり、月への進出など人類の宇宙活動が今後益々盛んになる昨今、太陽フレアが生み出す膨大な量の X 線および高エネルギー粒子は人体および電子機器に甚大な影響を及ぼしかねないため、太陽フレアの発生およびその影響範囲を調査・予測することが急務となっている。これは宇宙天気予報と呼ばれ、一般にも報道される機会が増えている。太陽、特に太陽フレアの研究は、天文学としてだけでなく、人類活動の発展にも重要なものとなっている。太陽フレアが生み出す高エネルギー粒子の詳細な観測を行う本計画は、この観点からも極めて重要な役割を果たす。

3. 所要経費 約180億円（概算）

4. 年次計画 打ち上げと観測開始は、太陽活動第26周期の活動上昇期である2033年頃を想定。

5. 実施機関と実施体制

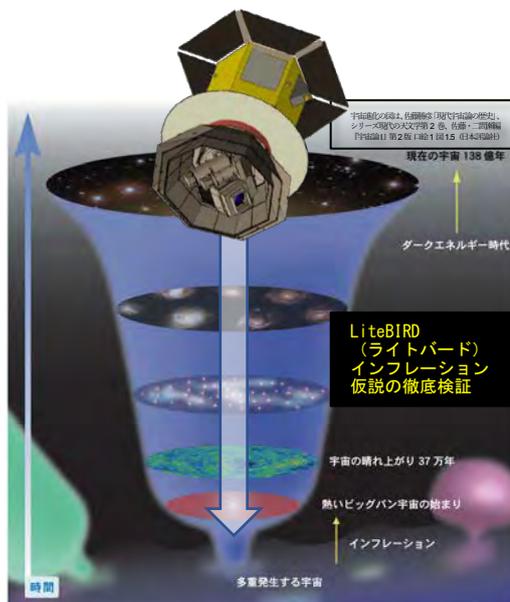
本計画は、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所（以下、ISAS/JAXA）の公募型小型計画の枠組みの中で構築する計画で、実施機関は、ISAS/JAXA を想定している。実施体制は、現在計画の検討を進めているワーキンググループをベースとする。国際協力は、予算的な協力は想定しておらず、学術面での協力体制を米国、欧州の研究グループと構築している。

添付資料 26

LiteBIRD – 熱いビッグバン以前の宇宙を探索する宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星

1、計画の概要

本計画は、インフレーション宇宙理論が予言する原始重力波を世界に先駆けて観測し、代表的インフレーション宇宙理論を検証することを目的とする。原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) の偏光度分布に渦状のパターン (原始 B モード) を刻印する。この原始 B モード発見のために、3台の小型望遠鏡、極低温冷却系、多色高密度超伝導検出器を搭載した LiteBIRD 衛星を開発し、銀河系からの前景放射を分離するため、34–448 GHz という広帯域を 15 バンドに分けて観測する。太陽-地球系の第2ラグランジュ点 (L2) で3年間精密観測を行うことで、原始 B モードの検出を目指す。



2、科学的意義

インフレーション宇宙仮説は、ビッグバン以前の宇宙を記述する最有力仮説であり、この検証は、現代宇宙論の最大の課題である。インフレーション仮説が予言する原始重力波の痕跡をとらえることが、仮説の最も直接的な検証であり、発見に成功すれば科学史上最大の成果の一つとなる。発見を超えて B モードパワースペクトルの形の精密測定が出来れば、正しいインフレーションモデルを選別し、インフレーションの証明を完成できる。

3、所要経費

総額は、概ね 430 億円。うち日本負担分は、概ね 320 億円 (宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 負担分の合計)

4、年次計画

科学衛星の標準的な開発手法を踏襲し、段階的に開発を進めていく。(1) ミッション定義段階 (2022 年度まで): 科学目標をもとに、観測装置および衛星システムの概念検討を実施。(2) プロジェクト準備段階 (概ね 2023-24 年度): 概念設計を進め、観測装置及び衛星システムの実現可能性に目処をつける。(3) プロジェクト実行段階前半 (概ね 2025-28 年度): 衛星を完成させ、環境試験等での検証の後、H3 ロケットで打ち上げる。(4) 同後半 (概ね 2029 年度以降): L2 で3年間の全天サーベイ観測を実施。成果発表、アーカイブ公開を実施。

5、実施機関と実施体制

中心となる実施機関は JAXA で、国内では、KEK (量子場計測システム国際拠点、素粒子原子核研究所)、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、岡山大学と協力し、海外では、フランス国立宇宙研究センターを取りまとめとする欧州の研究機関、カナダ宇宙庁と協力して計画を推進する。

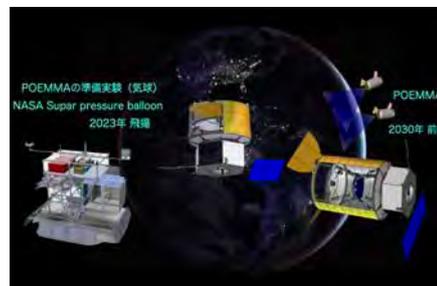
添付資料 28

POEMMA 超高エネルギー粒子 (ν ・宇宙線) の衛星軌道からのステレオ観測

担当者 滝澤慶之 (理化学研究所)

1. 計画の概要

POEMMA (Probe Of Extreme Multi-Messenger Astrophysics) ミッションは、シカゴ大学の Angela V. Olinto 教授が推進する次世代の宇宙線観測ミッションで、2030 年代初頭の打上げを目指している。Schmidt 光学系をベースにした望遠鏡の観測衛星 2 機によるステレオ観測を行い、超高エネルギー宇宙線・ニュートリノを観測し、その源を探索する。観測露出量は、地上で最大の Auger 観測装置の 20 倍以上で 10 個程度の点源検出を期待している。また、高エネルギー τ ニュートリノがつくる上向きに発達する空気シャワーの蛍光光やチェレンコフ光を観測し Cosmogenic なニュートリノの検出を行う。準備実験である気球実験 EUSO-SPB2 が 2023 年春に飛揚する。最長 3 ヶ月、宇宙線とニュートリノの観測を行う。この結果は POEMMA 計画に反映される。



観測露出量は、地上で最大の Auger 観測装置の 20 倍以上で 10 個程度の点源検出を期待している。また、高エネルギー τ ニュートリノがつくる上向きに発達する空気シャワーの蛍光光やチェレンコフ光を観測し Cosmogenic なニュートリノの検出を行う。準備実験である気球実験 EUSO-SPB2 が 2023 年春に飛揚する。最長 3 ヶ月、宇宙線とニュートリノの観測を行う。この結果は POEMMA 計画に反映される。

2. 科学的意義

地上の観測装置の Auger と Telescope Array の観測から宇宙線起源天体のヒントが見えてきたが未だ統計不足のため起源天体の特定には至っていない。これを解決するため、POEMMA は軌道上から全天観測し宇宙線到来方向異方性の研究を行う。さらに、広大な大気をターゲットとして用いるため地上の観測装置よりも高いエネルギー領域のニュートリノを検出する。マルチメッセンジャー天文学に新たなチャンネルを加え、高エネルギー宇宙の理解と解明を加速させる。

3. 所要経費 (国際協力の場合は総額と日本の分担分)

総経費は、1000 億円 (打上費用込) である。日本はレンズ製造と焦点面検出器製造を行う。焦点面検出器製造は国際 JEM-EUSO コラボレーション (16 カ国) で分担する。日本の経費は、総額 4.03 億円である。内訳は、レンズ製造 9,500 万円、レンズ製造の人員費 2,700 万円、焦点面検出器製造 16,000 万円、焦点面検出器評価の人員費 3,600 万円、データ管理の人員費 4,500 万円、旅費 4,000 万円である。

4. 年次計画

POEMMA は、2030 年初頭の打ち上げ・観測開始を目指している。2020 年代後半に、NASA に提案を行う。NASA より承認を得た年から 5 年間で望遠鏡および衛星の設計と製造を行う。衛星は 5 年間の運用を計画している。

5. 実施機関と実施体制 (国際協力の記述も含む)

POEMMA は次の機関で実施する。米国は、シカゴ大学、コロラドスクールオブマインズ州立大学、アラバマ大学ハンツビル校、NASA 等である。欧州は、JEM-EUSO コラボレーションの各国の大学・研究機関が参加する。日本は、理研、宇宙線研等が参加する。

添付資料 29

惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画 (LAPYUTA)

Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly

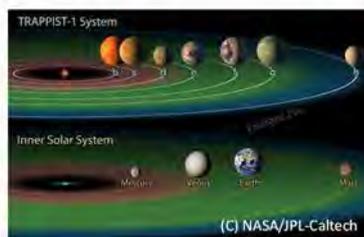
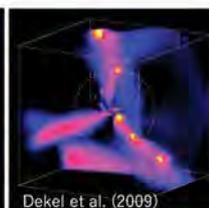
LAPYUTA は宇宙の「生命生存可能環境」と「構造と物質の起源」の理解を目標とし、4つの科学課題に取り組む紫外線宇宙望遠鏡である。

多くの太陽系外惑星が発見され、惑星系における生命生存可能環境の普遍的な理解が課題となっている。この観点から、詳細な観測が可能な太陽系の天体、特に巨大惑星の氷衛星と地球型惑星の探査が必要である。氷衛星には地下海が存在し、地球とは異なる生命生存可能環境を持つ天体として注目されている。火星と金星では、過去に大量に存在したと考えられる水や温室効果ガスが大気散逸を通して失われた可能性がある。惑星大気の変遷の解明は地球型惑星の生命生存可能環境の形成の理解につながる(課題1)。系外惑星では大気の特徴づけが今後の課題である。太陽系の知見を系外惑星大気の特徴づけに拡張する試みも必要となる。系外惑星環境の理解を進めるには、惑星環境に影響を与える恒星活動の探査も欠かせない(課題2)。惑星系形成の理解の背景には、宇宙の構造と物質の起源という根本的な興味がある。宇宙の構造形成に残る問題に銀河形成がある。銀河形成の根本である星形成に関わるバリオンの物理過程は宇宙史の中で最も大きな課題の1つである(課題3)。宇宙の物質進化においても基本的な課題が残されている。特に鉄より重い重元素の起源は十分に理解されていない(課題4)。

氷衛星の表層から噴き出す水や惑星大気から散逸するガスにより、天体には外圏大気・電離大気が形成される。課題1と2では、多様な太陽系天体・系外惑星の外圏・電離大気を観測し、生命生存可能環境の多様性・普遍性の理解を進める。課題3では銀河周辺物質の構造を調べ、宇宙構造形成の枠組みで予言されたガスの流入による星形成を検証する。課題4では中性子星合体直後の高温ガス中の重元素イオンの観測を通して重元素合成過程を解明する。

惑星科学、生命圏科学、および天文学 に向けた紫外線宇宙望遠鏡(LAPYUTA)計画

- **科学目標**
 - (1) 太陽系天体の生命存在可能環境：氷衛星と地球型惑星
 - (2) 系外惑星大気の特徴づけと表層環境の推定
 - (3) 銀河Ly α ハローの普遍性検証・Cold Streamの初検出
 - (4) 中性子星合体による重元素合成の検証
- **計画の内容**
 - 口径60cmの紫外線宇宙望遠鏡・分光及び撮像
 - 有効面積 350cm² (HSTに匹敵)、空間分解能0.1秒角
 - 波長110-190nm、波長分解能0.01nm
- **重要要素技術**
 - 姿勢擾乱補正機構【開発中】実機原理実証が完了
 - 紫外用大口徑ミラー【開発中】小口径ミラーの試作中
 - 大型検出器【開発中】試作品が完成/性能評価中
- **実施計画/予算規模**
 - JAXA宇宙科学研究所公募型小型計画/約176億円
- **タイムライン**
 - 2032年打ち上げ
- **国際競争力**
 - HST後の紫外線プラットフォーム
 - 惑星探査・他波長望遠鏡との協調観測による科学成果の最大化



観測候補となるハビタブルゾーン内の系外惑星

中性子星合体による重元素合成

連絡先 土屋史紀 (東北大学大学院理学研究科)

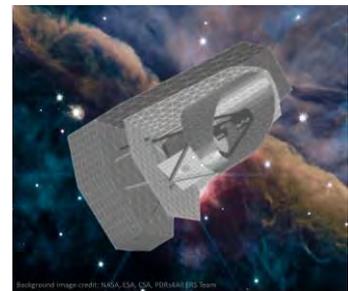
tsuchiya@pparc.gp.tohoku.ac.jp

添付資料 30

計画名：GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer)

1. 計画の概要

ビッグバン後 3 億年未満の宇宙の「初代銀河」探査と、惑星系形成現場の水蒸気と氷の境界線「スノーライン」の調査のため、近・中間赤外線帯(波長 2~8 ミクロン)の超広視野撮像機能と中間赤外線帯(波長 10~18 ミクロン)の高分散分光機能(波長分解能 30,000; 速度分解能 10 km/s)を持つ口径 1 メートル級の宇宙望遠鏡を開発する。他に類の無いユニークな観測機能のため、取得したデータは観測後数十年にわたって、世界中の天文学・宇宙物理学の幅広いコミュニティに活用されるレガシーとなる。



GREX-PLUS 完成予想図

2. 科学的意義

初期宇宙の大質量銀河は、存在すればそれを短い宇宙年齢以内に形成する必要が生じ、構造形成過程を非常に強く制限する。ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡の初期観測結果は、 Λ CDM シナリオに比べ、大質量の銀河がより多く存在することを示唆した。GREX-PLUS は、ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡に比べて 130 倍広視野のカメラで、より初期の宇宙の、より数密度の低い、より大質量の銀河を探査する。構造形成論を極めて強力に制限し、 Λ CDM シナリオに決定的な審判を下す。原始惑星系円盤における水と有機分子の分布は、惑星系形成過程や地球上の水(つまり海)の起源、そして、生命起源分子の生成過程解明に必須の情報である。地球型惑星の水や有機物は、スノーライン外側の氷ダストや氷微惑星、彗星などが惑星に飛来してもたらされた可能性がある。GREX-PLUS は、中心星質量や進化段階の異なる原始惑星系円盤約 100 天体のスノーラインを速度分解して位置を特定する。スノーラインの時間空間進化と惑星系形成過程や地球型惑星上の水の起源を議論する。

3. 所要経費 (国際協力の場合は総額と日本の分担分)：395 億円+国際協力

4. 年次計画

2022 年 12 月 「銀河進化・惑星系形成観測ミッション 時限 WG」設置

2024 年春 戦略的中型計画ミッション提案

2024 年冬 宇宙科学研究所としてミッション選定

2030 年代前半 打ち上げ

運用期間 5 年および延長運用期間 5 年程度を目指す

5. 実施機関と実施体制 (国際協力の記述も含む)

GREX-PLUS は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究所(ISAS)が戦略的に進める中型計画の候補である。検討に参加している研究者は、2022 年 11 月 1 日時点で、赤外線天文衛星「あかり」や、すばる望遠鏡などの装置開発に携わった研究者を含め、中核メンバーとして 14 名。また、科学検討を中心的に進めるメンバー 19 名、一般メンバー 64 名、総勢 97 名である。焦点面観測機器開発について小規模な国際協力も検討している。

添付資料 31

大型サブミリ波望遠鏡 LST 計画の実現に基づくサブミリ波多次元掃天天文学の創出

- **ビジョンの概要と実施内容**：アルマ・JWST・TMT をはじめとする大型天文観測施設が稼働する時代に、サブミリ波帯において、それらと相補的で新しいディスカバリー・スペースを切り拓く多次元（空間・宇宙論的奥行き・周波数・時間軸・偏波）掃天観測を推進する。その達成のため、ミリ波・サブミリ波帯において広い視野（0.5 度角以上）を持つ、大口径（口径 50m 級）高精度単一望遠鏡 LST を建設する。超伝導技術を駆使した広視野・広帯域観測装置を開発・搭載し、一挙に広い天域を観測できる超広域撮像能力（アルマと比較して 1 万倍以上）、また一挙に幅広い周波数範囲を分光できる超広帯域分光能力（アルマと比較して 10 倍以上）を実現する。高精度アンテナや超伝導検出器等の開発と、得られる膨大なデータの解析手法の開発は、工学・数理科学など分野連携・分野融合で行われ、量子コンピューターへの応用など幅広い波及効果が期待される。
- **科学目標**：(1) 宇宙史の最初期における星・銀河とブラックホールの形成・進化過程の解明。(2) 多様な環境における星団・星・太陽系を含む惑星系と星間物質の進化過程の解明。(3) ミリ波・サブミリ波帯における時間領域天文学の本格的な開拓。(4) 分子雲コアから銀河団を超える空間スケールでの構造形成物理学の確立。
- **学術的意義**：ミリ波・サブミリ波帯は、豊富な分子・原子スペクトル線、ダスト（固体微粒子）からの熱放射、またプラズマを捉えるスニヤエフ・ゼルドビッチ効果など、多様な「相」にある星間物質を捉えるユニークな特徴を有する。大口径（高感度）・広視野・広帯域のコンセプトのもと、宇宙再電離期の銀河から、銀河団・大規模構造、ブラックホール形成、星・惑星系形成、太陽系内惑星大気まで、多様な階層における研究を格段に進展させるとともに、サブミリ波帯時間領域天文学を本格的に開拓する。アルマに加え、光赤外線分野や低周波電波帯の大型計画とも高い相乗効果が期待される。アルマの一素子として干渉計に組み込むことで、アルマの感度向上にも資する。
- **所要経費**：欧州の AtLAST 計画と統合して国際共同での建設・運用を想定し、所要経費についても検討中であるが、現時点において日本側での技術検討に基づく総経費は約 450 億円である。
- **年次計画**：2030 年代半ばまでに建設を開始し初期科学運用開始を目指す。
- **実施機関と実施体制**：検討中。国内実施機関の候補としてはアルマの運用を担う国立天文台がまず挙げられるが、国際協力の枠組み・形態に応じて、適切な実施機関・体制の構築を進める必要がある。当面は、国立天文台内において、新規の萌芽的プロジェクト候補としての提案を行い、こうした枠組みのもとで国立天文台において実施する可能性の検討や合意形成を進める。
- **我が国の優位性・独自性・創造性**：野辺山からアルマへと発展してきた我が国のミリ波・サブミリ波天文学に根ざした日本発の計画。アルマ 2 に向けた国立天文台での超伝導受信機開発に加え、集積超伝導分光器やミリ波補償光学、データ科学と連携した新しいサブミリ波分光観測・解析法など、日本の若手研究者が世界に先駆け提唱・実証した、創造性の高い独自技術・成果に基づく構想。



添付資料 32

次世代大型電波干渉計 ngVLA

【計画の概要】次世代大型電波干渉計 ngVLA (next generation Very Large Array) は、米国国立電波天文台 (NRAO) が計画を主導し、初期運用を経て 2040 年代に本格稼働する大型共同利用施設である。北米大陸を中心とする約 9,000km の範囲に口径 18m と 6m のアンテナを合計 263 台設置し、約 20cm から 3mm の波長帯において、現在稼働中の ALMA 及び J-VLA の約 10 倍の集光力と、10 倍以上(高輝度な非熱的放射では 100 倍以上)の解像度を実現する(図1)。

【科学的意義】ngVLA の稼働する波長帯では、サブミリ波帯と比べダストの不透明度が低下する。このため、惑星系形成の初期段階を探る上で鍵となる早期段階の円盤に含まれる高面密度領域を見通したダスト連続波観測が可能となる。これにより、円盤内域 1 天文単位以内に踏み込んで、形成途上の岩石惑星が作る溝を捉える。さらに、惑星の公転運動に伴う円盤構造の時間変化にまで研究対象を拡張する。このような特徴を持つ ngVLA と円盤外域まで感度良く撮像可能な ALMA との連携は、あらゆる進化段階の円盤を「惑星系」の形成現場として捉え直し、その理解に質的転換をもたらす(図2)。また ngVLA が稼働する波長帯には、窒素を含む最も基本的な分子であるアンモニアの他、多様な大型有機分子からの輝線が存在する。これらを分子雲から若い星近傍に至る様々な空間スケールで観測し、生命誕生の初期化学条件の探究を可能とする。さらに遠方の銀河に対しては、CO 分子の低励起状態間遷移に伴う輝線が ngVLA によって詳細に捕捉され、星の材料となるガスの正確な定量が可能となる。この情報を、ALMA や次世代可視・赤外線望遠鏡によって捉えられる星形成活動の結果生じる高温ガス成分の情報と合わせ、宇宙物質の大循環を、個々の銀河の内部構造を分解しながら探究する。以上を総合し、我々人類のような生命が存在する条件が宇宙史の中で如何に整えられてきたのかという疑問に対し、一貫した視座を提供する。特に、生命関連物質が星間物質を起点にどの段階で用意されるのかの探求においては、分子科学分野や地球惑星科学分野との連携が期待される。

電磁波に加え、重力波や粒子線の検出も新たな手法として加わる「マルチメッセンジャー天文学」が本格化しつつある。これらの対象となる天体現象は重力波イベントや γ 線バーストに代表され、タイムドメイン観測の重要性が一層増すと考えられる。ngVLA ではあらゆる波長帯を通じて最高レベルの解像度を達成する VLBI 機能が稼働する予定であり、現象の核心部に対する超高解像度の撮像を、様々な装置と連携しながらタイムリーに実行できる。これらを通じて ngVLA は、高密度天体・ブラックホール周辺の天体現象の解明だけでなく、極限環境での物理学の理解にも大きく寄与する。

【所要経費】国際計画全体での総建設予算額は約 23 億米ドルである。日本は約 20% の貢献を想定し、分担する総建設予算額は 4.6 億米ドルとなる見込みである。建設終了後の年間運用費は国際計画全体で約 0.93 億米ドル、日本分担分として 0.19 億米ドル程度 (10 年間で 1.9 億米ドル) となる見込みである。

【年次計画】日本側の実施スケジュールは以下を想定する。設計・試作準備：2023–2025 年、試作機製造・試験、建設準備：2026–2032 年、建設・初期運用：2033–2040 年、本格運用：2041 年以降。

【実施機関と実施体制】国立天文台が国内の共同利用窓口となり、コミュニティからの観測提案を受け付け、評価委員会による審査を経て採択課題を決定する運用を想定する。米国国立科学アカデミーによる Decadal Survey (Astro2020) で ngVLA 計画は地上望遠鏡として第 2 位に評価され、NRAO では計画推進の活動が活発化している。ALMA で培った協力関係も基盤に、国立天文台は 2020 年 4 月に NRAO との間で科学および技術協力のための協定を締結し、技術開発検討や実証試験を本格化させている。

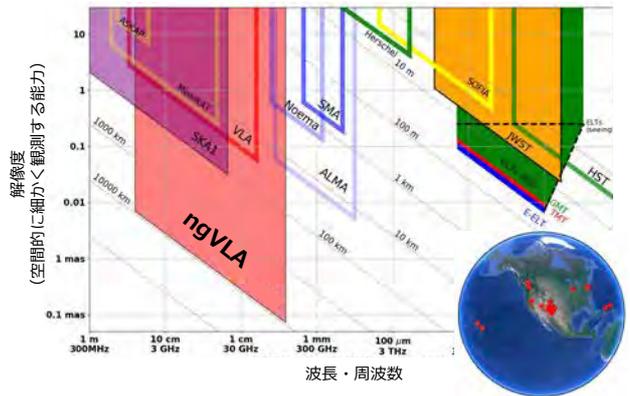


図1 稼働中・計画中の他の望遠鏡との解像度比較。縦軸で示した解像度が小さくなる(下方向に伸びている)ほど高い解像度であることを表す。



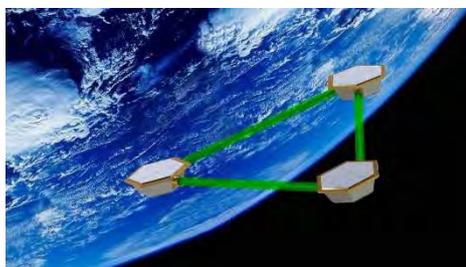
図2 最近傍(距離 140pc)にある太陽系と類似な惑星系が誕生しつつある円盤のダスト連続波観測シミュレーション。右下の 1au が太陽地球平均距離(1 天文単位)。ALMA 以上の高い解像度に加え、より低い周波数で円盤を見通し、ALMA が得る温度情報と合わせ、形成途上の岩石惑星の存在を 1au 以内に踏み込んで明らかにする。

添付資料 33

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

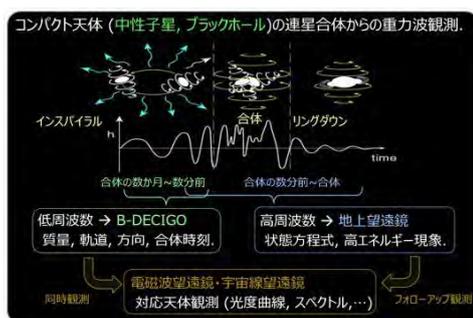
1. 計画の概要:

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO は、宇宙機 3 機の編隊飛行によって構成されたレーザー干渉計である。宇宙機内には、慣性基準となる鏡が非接触で保持されており、その間の距離変動をレーザー干渉計で精密に測定することで重力波をとらえる。宇宙空間での長基線長と地面振動が無いことを生かすとともに、鏡間で光共振器を構成することで光量子雑音による感度限界を向上させる。宇宙機の位置・姿勢は、鏡を基準に制御（ドラッグフリー制御）され、宇宙機擾乱の低減と精密な編隊飛行が実現される。これらによって地上の重力波望遠鏡では観測が困難な 10Hz 以下の周波数帯で観測を行う。宇宙航空研究開発機構(JAXA)の戦略的中型ミッションとして 2030 年代に実現し、5 年間の観測運用を行うことを目指す。



2. 科学的意義:

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO は、ブラックホールや中性子星に関連した高エネルギー天体物理学や原子核物理学、一般相対性理論や重力法則についての基礎物理学、宇宙の誕生・進化を解き明かす宇宙論など、幅広い科学的意義をもつとともに、「宇宙のはじまりを直接観測する」という人類の夢の 1 つの実現に



向けた大きな一歩となる。特に、連星合体の観測においては、連星系を合体の数か月前に発見し、いつどこで合体が起こるのかを事前予想する。事前に母銀河を特定することで、連星合体の瞬間の地上大型望遠鏡や宇宙望遠鏡での観測が可能になり、より遠方での暗いイベントや、より高分解能での撮像・分光観測が実現できる。次世代の地上重力波望遠鏡 ET, CE や宇宙重力波望遠鏡 LISA と同時期に観測を行う中で、重力波マルチメッセンジャー天文学の中心的な役割を担い、人類の宇宙に対する知のフロンティアを飛躍的に拡大させる。加えて、編隊飛行や衛星擾乱低減を通じて、衛星サイズの制約を取り払った、新たな宇宙利用の可能性を切り開く。

3. 所要経費: 500 億円

4. 年次計画: 最短で 2034 年の打ち上げを想定している。2023 年-2026 年: ミッション検討・根幹技術開発。2027 年-2030 年: プロジェクトを開始、基本設計および詳細設計。2031 年-2033 年: 実機製作。2034 年 打ち上げ、観測開始。

5. 実施機関と実施体制: JAXA が実施機関としてミッションを取りまとめ、ミッション機器・サイエンスチームとして、東京大学 (レーザー干渉計)、名古屋大学 (量子光学的手法)、法政大学 (衛星擾乱抑圧)、電気通信大学 (安定化レーザー光源)、国立天文台 (慣性センサ)、京都大学 (サイエンス検討)などが協力体制を構築する。

添付資料 34

宇宙重力波干渉計 LISA への参加

1.計画の概要

LISA(Laser Interferometer Space Antenna)ミッションは、mHz帯で振動する低い周波数の重力波をターゲットとした、レーザー干渉計型スペース重力波干渉計計画である。ESAの大型計画シリーズの1つとして、国際協力のもと開発が進められている。LISAでは、3機の人工衛星を1辺250万kmの正三角形に軌道配置し、その人工衛星間で交換し合うレーザー光の干渉信号から、到来する重力波を測定する(図1)。本計画では、LISAのレーザー干渉計の心臓部となる搭載機器「四象限フォトレシーバ」(図2)を日本から開発供給することで、その科学成果最大化に貢献する。

2.科学的意義

LISAは、地上の施設では観測の困難な超大質量ブラックホールの衝突合体や天の川銀河に分布するコンパクト連星系(特に白色矮星連星を含む系)などから放射される重力波を直接観測する。これにより、重力理論およびブラックホール周辺時空構造の詳細検証、重力波源を標準音源とした宇宙論パラメタの測定、ブラックホール進化過程の解明、電磁波観測との協働による連星系の周辺環境理解といった科学成果の創出が期待される。

地上の施設や、現在日本で考えられている宇宙重力波望遠鏡コンセプトB-DECIGO(100mHz帯に感度)とは異なる周波数帯を観測できるため、得られる天文・宇宙物理学的な知見は互いに相補的である。

3.所用経費

総経費12億ユーロ、うち日本負担分10億円程度

4.年次計画

2019-2022:機器の試作, 2023-2024:搭載機器エンジニアリングモデル製造・試験・納入, 2024-2027:搭載機器フライトモデル製造・試験・納入, 2034:打ち上げ, 2035-2039:観測(4年間), 2039-:後期観測(6年間)

5.実施機関と実施体制

JAXA戦略的海外共同ミッションとしての実施を想定し、JAXA宇宙科学研究所が活動管理・国際調整を担当する。国立天文台・東大・電通大の研究者(総計10名程度)が装置の開発・試験を担当する。

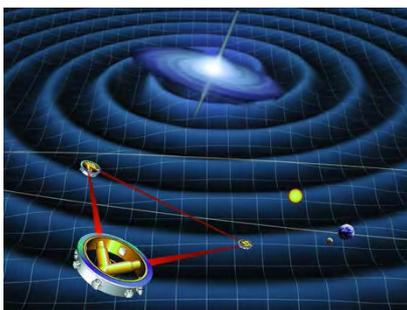


図1: LISA計画のイラスト(c) NASA

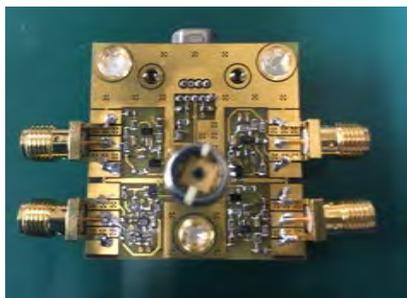


図2: 四象限フォトレシーバ試作機。雑音・帯域・消費電力要求を満たすことを確認した。

大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験 (ハイパーカミオカンデ計画の推進)

1. 計画の概要

- スーパーカミオカンデの約8倍の有効質量19万トン（総質量26万トン）の**大型先端検出器（ハイパーカミオカンデ）**を建設し、既存のJ-PARC大強度陽子加速器の**増強と近中距離検出器の高度化**を組み合わせる。
- 日本政府による予算措置により2020年建設開始、2027年観測開始予定、20年以上にわたる素粒子宇宙研究の基幹施設となる。

2. 科学的意義

- 超新星爆発に伴う大量のニュートリノを観測して、超新星爆発のメカニズムの解明を行う。重力波観測などと連携して、マルチメッセンジャー天文学の一翼を担う。
- 銀河宇宙形成以来起こっている超新星爆発に伴うニュートリノを観測し、超新星爆発の歴史を解明する。
- 太陽ニュートリノや大気ニュートリノを観測して、ニュートリノ振動の研究をさらに進める。
- J-PARCによるニュートリノ及び反ニュートリノビームを295km離れたハイパーカミオカンデで観測し、2つのニュートリノ振動が同じであるか否か（CP非保存）を検証して、宇宙の物質の起源にせまる。
- 陽子崩壊を発見し、物質素粒子（クォークとレプトン）の統一と3つの力の統一を実証する。

3. 所要経費（国際協力の場合は総額と日本の分担分）

- 総経費約1545億円（2020年度から7年間の建設費用と2046年度までの20年間の運転経費を含む）。そのうち日本分担分は約1391億円。

4. 年次計画

- 2020年建設開始、2027年ハイパーカミオカンデ運転開始（2046年度まで）とJ-PARC1.3MW運転開始（2036年度まで）

5. 実施機関と実施体制（国際協力の記述も含む）



- 事業実施主体は東京大学と高エネルギー加速器研究機構。ハイパーカミオカンデコラボレーションは、世界約20カ国約530名。実験が開始されれば1000人オーダーを見込む。

