

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じ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 NSO の大型地上太陽望遠鏡 Daniel K. Inouye Solar Telescope (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 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 (磁力線のつながりかえ) 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、「星表層で両極域にむ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他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、Kepler 衛星や TESS 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、太陽において他にない。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。

第7章 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ためにとる戦略としては、i) 最優先事項として、SOLAR-Cミッションを実現、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4m級大型地上太陽望遠鏡（DKIST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ついて、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

宇宙に如何に高温プラズマが作られ、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。太陽大気全体に亘り、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。従って、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. 太陽大気の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。そのため、A. 彩層からコロナに亘る太陽大気の全温度層を同時に切れ目なく観測する、B. 太陽大気の基本構造とその変化を高空間・時間分解能で追跡する、C. 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、以上3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) 2km/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

(相互関係、相補性、タイムスケールなどを踏まえて)

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。IRIS衛星(NASA、2013年)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。Hi-Cロケット実験（NASA, 2012年）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。ハワイに建設中の大型太陽望遠鏡（DKIST）は、光球彩層観測の超高解像観測を2020年に開始する。2025年前後にParker Solar Probe（NASA）と Solar Orbiter（ESA）が太陽に約9 Rs（太陽半径）～水星軌道まで接近し、外部コロナ～内部惑星間空間（内部太陽圏）の探査を実施する。本計画はこれらと同時期に遷移層・コロナの高解像度分光撮像観測をおこなう唯一の計画であり、DKISTが観測する太陽表面と、Parker Solar Probe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。

7.4 他の分野コミュニティの推薦計画との関係（相補性）

本計画には太陽物理学の科学的優先度を反映した2つの側面がある。一つは、太陽で起きている多くの物理現象が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ついている。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るだろう。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つながる。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。

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-GUNDAM)
- 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 (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)

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)