

なぜ、宇宙研は Roman 宇宙望遠鏡計画に参加しなければならないのか

2022 年 4 月 4 日

宇宙物理学研究系 研究主幹 山田 亨

1. Nancy Grace Roman 宇宙望遠鏡

20 世紀後半の宇宙物理学での最大の発見は、宇宙の加速膨張と系外惑星の発見と言われています。

まず、Ia 型超新星観測による宇宙の加速膨張の発見ですが、この現象はアインシュタインの宇宙項に相当する、未知の全く新しい物理の存在を示唆しており、これを説明するためにダークエネルギーの存在や、重力理論の修正が提案されています。ビッグバンで始まった宇宙の膨張は、質量を持つ物質が存在することによって、その重力により減速されるはずですが、ところが、約 50 億年前頃から、宇宙の膨張はふたたび加速に転じているというのです（図 1）。正体不明の「ダークエネルギー」（天文学者は、わからないものに「ダーク」とか「ブラック」とかつけるくせがあります・・・）が、重力と反対に、宇宙の膨張をより加速させているのか、あるいは、重力についての理論がさらに未知の側面を持っているのか。現在の宇宙に存在するエネルギー密度を考えると（アインシュタインの有名な式 $E=mc^2$ によれば、質量を持つ物質はエネルギーと等価であり、ここでは、物質も宇宙に含まれるエネルギーとして換算します）、ダークエネルギーと呼ばれる未知の存在が宇宙を構成するエネルギーの約 7 割を占め、ダークマター（その正体もよくわかっていませんが、こちらは質量を持つ物質であることは間違いないと考えられています）と我々のよく知る原子からなる通常の物質は 3 割にすぎません。加速膨張やダークエネルギーの存在について、あるいはダークエネルギーの量や性質が宇宙論的な時間で変化しているのかどうかを検証するための様々な観測的手法が提案され、また、多くの大規模サーベイ観測が行われるなど、活発な天文学の挑戦が行われてきました。

宇宙膨張の歴史（Ia 型超新星による観測）

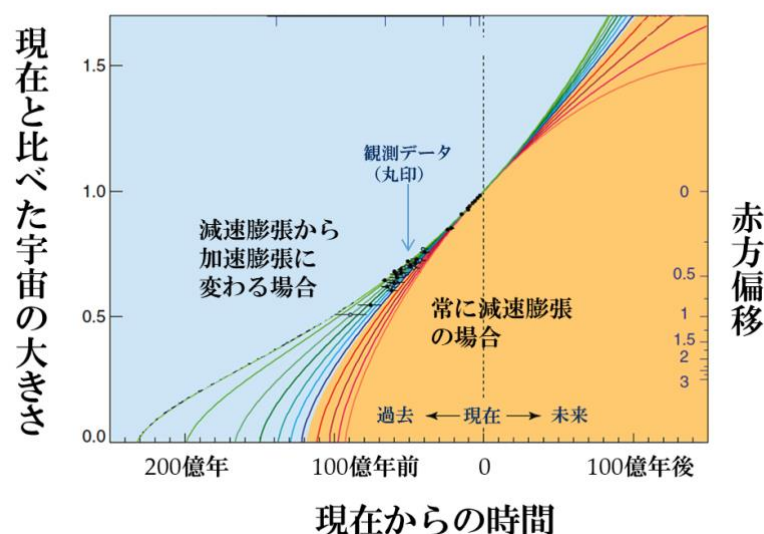


図 1 宇宙の加速膨張。黒点が観測データの一部。

<http://snap.lbl.gov/multimedia/images/universeExpansion.gif> に基に作成。

次に、太陽系外惑星についてですが、1995 年の太陽以外の恒星を周回する惑星(系外惑星)の発見は、系外惑星研究を天文学・惑星科学における最重要分野の一つに位置付けただけでなく、太陽系を唯一の手本として発展してきた惑星科学に無限の研究対象を開きました。また、近い将来、宇宙に生命を天文学的手法で探査するという全く新しい領域も開拓してゆく推進力を秘めています。わずか 20 年あまりの研究において既に数千個を超える系外惑星が発見されていますが、私たちの太陽系とは大きく異なる多様な惑星系の存在が想像の世界ではなく観測事実として明らかになってきたことは、人類の世界観に大きな変革を迫っているとも言えます。一方で、現時点では、我々は、銀河系の系外惑星の全体像を観測できているわけではありません。図 2 に示すように、これまで見つかった系外惑星の多くは、実は、主星(中心の恒星)から比較的近い軌道のものばかりなのです。これは、これまで使われている惑星を見つける手法の多くが、とくに主星に近い惑星を見つけやすいような手法であるためです。火星、木星、土星など、太陽系の惑星のような質量と軌道半径をもつ惑星は、ほとんど観測できていません。

また、一方で、系外惑星の研究は「見つける」ことから「その特徴を理解する」研究にも発展しつつあります。系外惑星が木星のような分厚い大気の巨大ガス惑星なのか？それとも地球のような岩石惑星なのか？そこにはどのような大気が存在するのか？その表層はどのような姿をしているのか？そして、大気中に生命の可能性を示す兆候を検出することができるのか？このような疑問に答えようとする研究が進みつつあります。

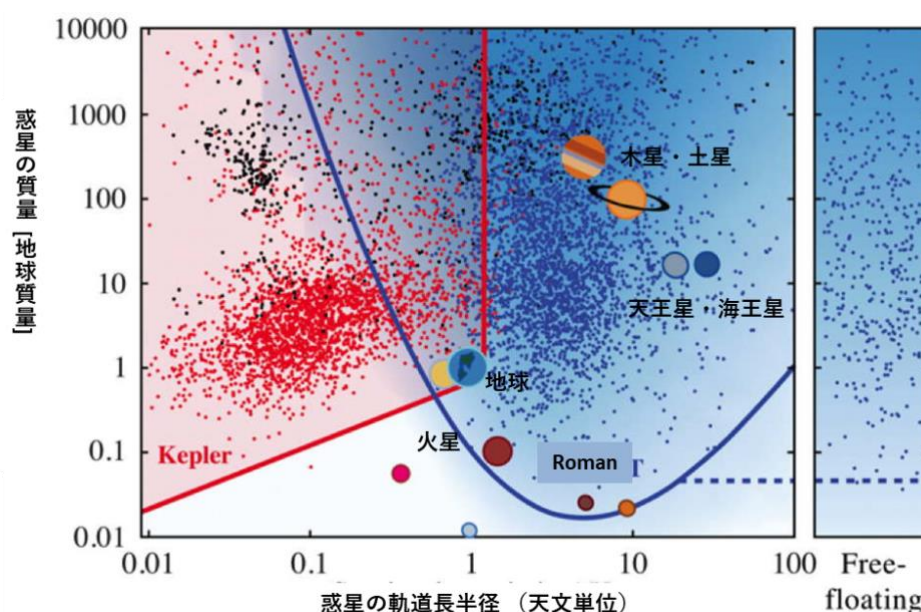


図 2 赤点 (ケプラー衛星)、黒点がこれまで観測されている系外惑星を示している。青点の分布と青曲線の上側は Roman に重力マイクロレンズ法によって検出が期待される惑星の分布。Roman Roman-CGI-Reference (NASA)を元に作成。



図3 Nancy Grace Roman 宇宙望遠鏡のイメージ (NASA)。

NASA が 2026 年頃の打上を目指す Nancy Grace Roman 宇宙望遠鏡(以下、Roman 望遠鏡)は、「宇宙の加速膨張研究」、そして「太陽系外惑星研究」という、まさに「人類視点でも重要な課題」に挑む宇宙望遠鏡計画で、その主要な課題は以下のようになっています。

- 宇宙の加速膨張を精密に測定してダークエネルギーの手がかりに挑む精密宇宙論観測
- 系外惑星の分布の全体像をとらえる重力マイクロレンズ法による系外惑星観測
- 系外惑星の「特徴を知る」ための直接観測（主星と惑星の像を分離して直接惑星の姿を観測する）を可能にする高コントラスト観測の実現とその発展のための技術実証
- 広視野の近赤外線観測で行う多様な天文学研究

このような課題に挑むため、Roman 望遠鏡は、波長 0.6-2.3 ミクロン帯の主に近赤外線の光を捉える「広視野観測装置」と可視光波長帯の「コロナグラフ装置」を搭載します(図4, 5)。「広視野観測装置」は、Roman 望遠鏡の宇宙論観測、すなわち「高緯度広域サーベイ」観測と「超新星サーベイ」観測、そして、系外惑星の全体像をしるための「マイクロレンズ系外惑星サーベイ」観測に用いられるほか、広視野の近赤外線観測を用いた様々な天文学研究に活用されます。「コロナグラフ装置」は技術実証装置として位置づけられていますが、主星から約 0.2 秒角しか離れていないところで、主星の 10 億分の 1 の明るさの天体を捉えることを目指すという、「高コントラスト」観測装置です。

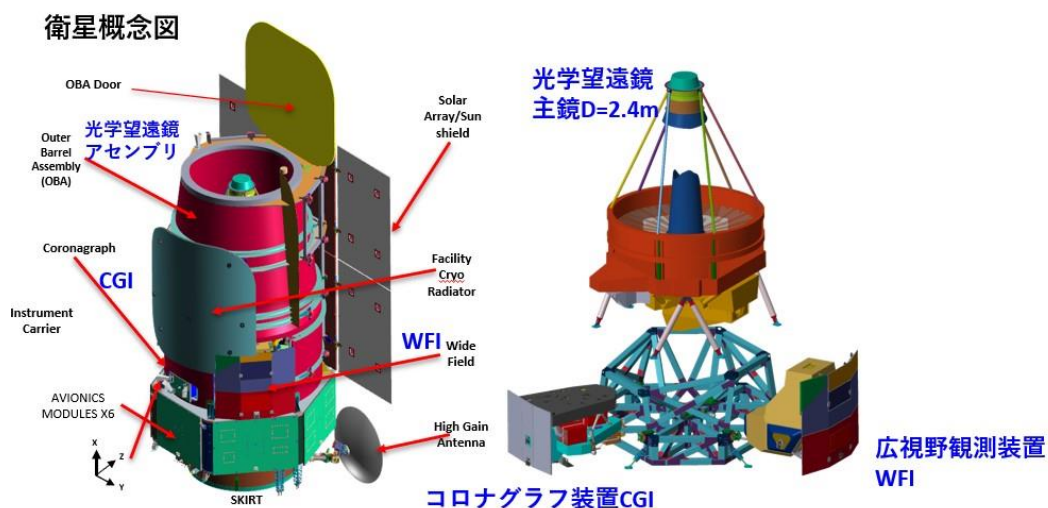


図4 Roman 宇宙望遠鏡衛星の概念図。NASA 資料に基づき作成。

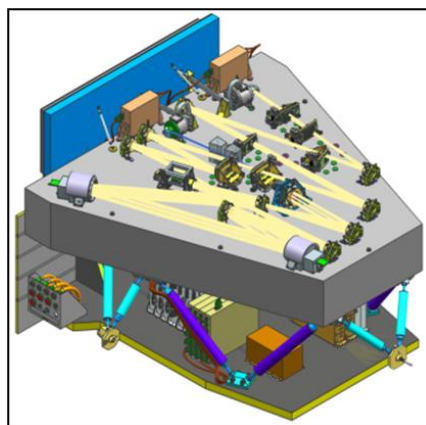
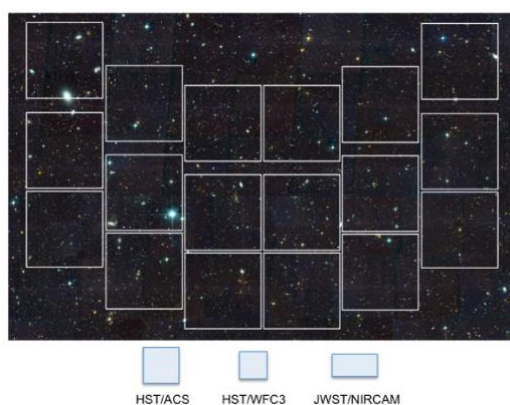


図5 (左) 広視野装置の観測視野 (図中白い□) を示したもの。(右) コロナグラフ装置の概念図。NASA 資料による。

Roman 望遠鏡の宇宙論サーベイでは、宇宙の加速膨張の起源を探るために有効な観測量として、弱い重力レンズ効果と銀河団の計数による宇宙の構造形成の強さの測定、バリオン音響振動の測定、そして、Ia 型超新星による宇宙論的距離測定などを行います。これらの観測量は、ダークエネルギーの存在やその性質によって、わずかな違いを示します。Roman 望遠鏡広域サーベイでは数億個の銀河の明るさや位置の分布、形状のわずかなゆがみから、また超新星サーベイでは数千個の超新星の光度の測定から、その違いを検出します。それぞれの手法には、もしかしたら手法による誤差存在するかもしれないので、異なるいくつかの手法を組み合わせ、ダークエネルギーの謎に迫ります。ダークエネルギーの存在量と宇宙を加速膨張させる「斥力」との関係はどのような関係なのか、また、その関係は 100 億年の時間スケールで変化するのか、不変なのか？そのような性質を手がかりにダークエネルギーの存在や正体に迫ります。

Roman 望遠鏡の太陽系外惑星研究は、おもに二つの手法で行います。ひとつは、重力マイクロレンズ法と呼ばれる手法 (図6) で、手前にある、惑星を持つ恒星による重力レンズ効

果によって、たまたま背後を通りかかった恒星の明るさが特徴的に変化する様子を捉えて、惑星を検出します。この手法では、火星程度の質量の惑星を、「スノーライン」をこえてたとえば太陽系なら海王星などの軌道をもつものも、見つけることができます。この観測により、図2に示すように、はじめて、太陽系外惑星の質量や軌道分布の全体像を知ることが期待されます。ただ、「たまたま」起きる現象を捉える必要があるため、数億個の星の光度を何ヶ月も測定し続ける必要があります。Roman では、星がもっともたくさん観測できる天の川の中心に近い方向の天域を毎年約3ヶ月間、5年間にわたって観測します。

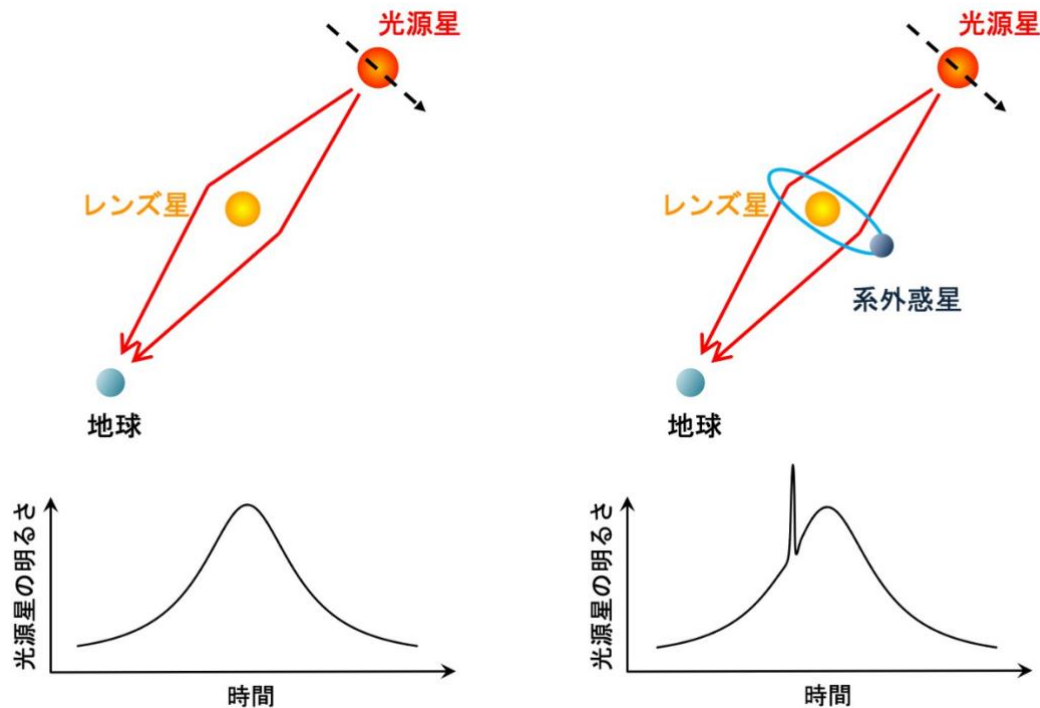


図6 (左) 恒星同士によるマイクロレンズ現象の光度変化(下段のグラフ)と(右)手前の恒星に惑星がある場合の特徴的な光度変化の一例。図は東京大学・福井らによる(<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2019/6605/>)。

2. なぜ日本が Roman 計画に参加するか？

上で述べたように、Roman が目指す研究は、まさに人類にとっての最先端の科学研究であり、したがって、JAXA リードのミッションとは相補的な計画に国際協力を通じて参加することは、日本にとっても有意義であると言えます。

これまでも、日本の天文学研究にとって、広視野観測を用いた宇宙論や銀河の形成と進化の観測研究、そして、重力マイクロレンズ現象を用いた太陽系外惑星観測研究はとても重要な分野として位置づけられ、発展してきました。例えば、ハワイ・マウナケア山頂にあるすば

る望遠鏡は、その広視野での観測能力で世界の研究をリードする役割を担っています。すばる望遠鏡で最も広視野の観測装置は、主に、「可視光線」の波長帯で活躍してきましたが、より高赤方偏移の天体の観測や、あるいは星間ダスト吸収の影響を避けるなどの目的には、このような広視野観測をより波長の長い近赤外線へと発展させることが重要です。ところが、地球の大気中では OH 夜光輝線や熱放射によって夜空の近赤外線背景光が強かったり、水蒸気など大気中の分子による吸収で観測できない波長帯があるなど、それによって高感度観測が難しいという制約があります。一方、Roman 望遠鏡は宇宙からの観測なので、近赤外線でも十分に暗い「夜空」を、しかも大気による波長帯の制約なしに観測することができます。すばる望遠鏡の第 1 世代の広視野カメラの視野が約 0.2 平方度、第 2 世代のカメラの視野が約 2 平方度ですが、Roman の近赤外線の広視野観測装置は 0.28 平方度の視野を持ちます。これまでのすばる望遠鏡のカメラと匹敵する視野ということができ、日本の研究者が繰り広げてきた研究を、これによって、可視光波長域から近赤外線波長域へと拡大することができます。重力マイクロレンズ研究でも日本では名古屋大学や大阪大学が中心となって、MOA 望遠鏡という専用の観測を行う望遠鏡を用いた系外惑星研究で世界の先端を走ってきました。また、大阪大学が中心となり、現在、PRIME 望遠鏡という、近赤外線におけるマイクロレンズ系外惑星に特化した専用と言える望遠鏡を南アフリカの観測所に建設中で、同じ近赤外線でマイクロレンズ観測を行う専用地上望遠鏡である PRIME 望遠鏡による観測と Roman 望遠鏡観測の相乗効果が期待されます。このように、「広視野での深宇宙観測」「広視野でのマイクロレンズ系外惑星観測」分野で世界的にもユニークな地上の望遠鏡と実績を持つ日本にとって、Roman 望遠鏡への協力は、たいへん自然な、また意味のある発展と位置づけられます。

高コントラスト観測でも、日本の研究者は地上望遠鏡での高い実績を持っています。とくに、すばる望遠鏡においては、大気による光の乱れを補正する補償光学装置に加え、コロナグラフ装置 CIAO、HiCIAO をはじめとする高コントラスト装置群を開発し、これまでも世界の第一線での研究を進めてきました。一方、宇宙望遠鏡では、そもそも大気の影響がなく、安定して光の波面を制御することが可能です。Roman 望遠鏡の技術実証装置であるコロナグラフ装置への協力は、これもまた、日本の研究者が進めてきた系外惑星研究のさらなる発展であると言えます。

日本は、これまで米国のハッブル望遠鏡、ジェームズウェブ宇宙望遠鏡、欧州のハーシェル衛星など、世界をリードする海外の大型ミッションへの直接の参加機会を持ってきませんでした。今回、初めて NASA の旗艦クラスミッションである Roman 望遠鏡計画へ参加することは、最先端の研究、人材育成を推進するとともに、今後の日本独自の科学ミッションのための技術的ステップや基盤充実の場とする機会としても重要です。

JAXA および日本の研究者は、Roman 計画に次のような貢献を進めています。

まずは、コロナグラフ装置に「偏光観測」の光学素子、および「コロナグラフマスク基板」を提供することです。

「コロナグラフ装置偏光観測のための光学素子」

日本は、Roman 望遠鏡のコロナグラフ装置のための高精度の偏光機能のアイデアを提供し、実際にその偏光光学素子を製作して装置の一部として提供します。コロナグラフ装置に偏光機能が追加できれば、系外惑星に対して更なる情報を得ることができると期待されます。一般的に、恒星の光はほぼ無偏光と考えられますが、可視光から近赤外線波長域での系外惑星光は、恒星光を惑星表面で反射、あるいは惑星大気により散乱したものであるため、部分偏光していると考えられています。したがって、恒星と惑星の偏光の違いを利用することにより、恒星光をさらに低減することができるという「検出」における利点と、偏光特性の解析により新たなサイエンスが可能という「系外惑星の特徴の研究」における利点を併せもちます。また、偏光観測により、恒星周囲のデブリ円盤や原始惑星系円盤の構造をより詳細に観測することができるようになります。すなわち、日本の寄与によって、Roman のコロナグラフ装置による系外惑星や惑星形成にかかわる円盤の直接観測を行う科学的成果をより高めることができます。

「コロナグラフマスク基板」

コロナグラフ装置では観測装置の焦点面や瞳の位置に、明るい主星の像やその回折光などを隠すための「コロナグラフマスク」を用います。Roman 望遠鏡では、「リオ方式」と「変形瞳方式」の2種類のコロナグラフマスク(図7)を用いますが、たとえば、リオ方式では、焦点面にできる主星の像をマスクで隠してしまいます。このようにコロナグラフマスクはコロナグラフ装置の心臓部といえますが、マスク作成には高精度の基板が必要です。日本の企業の技術力を活かして、これについても日本は Roman に貢献し同時に、将来の宇宙望遠鏡コロナグラフで必要な観測精度やその設計概念についても知見を得てゆくことができます。

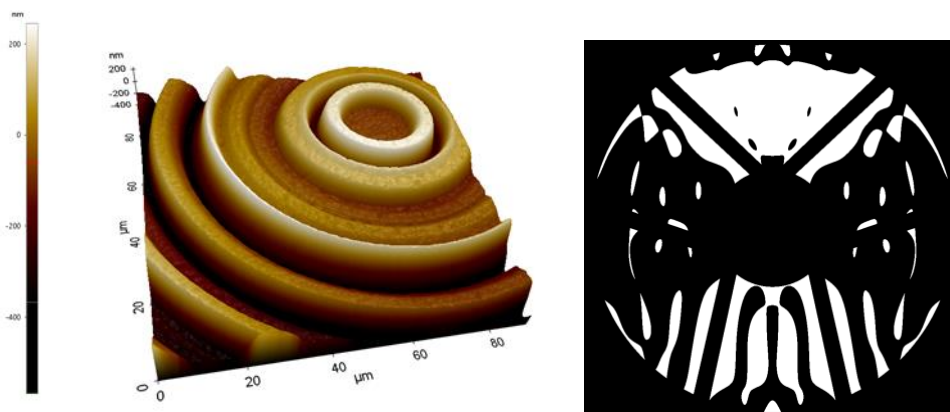


図7 (左)「リオ方式」の焦点面に置かれるマスクの原子間力顕微鏡像の例(開発時のもの)。溶融石英製のマスク基板上に金属と誘電体の微細構造をパターニングする。(右)「変形瞳方式」の瞳面におかれるマスクの例。シリコン製のマスク基板の上にこのようなパターンを作成するが黒いところは光を遮断(反射しない)する。NASA Roman CGI Reference より作成。

「JAXA 地上局によるデータ受信」

もうひとつが、JAXA の地上受信局を用いた Roman への貢献です。Roman 望遠鏡は、広視野観測装置を持ち、多量の観測データを取得します。たとえば、地球周回軌道を離れた科学衛星としては、これまでの衛星の 100 倍にも匹敵するデータ量です。NASA は Roman 専用と言える受信局を用意しますが、それでも発生する最大のデータ量と比べると、その 30-50% のデータの受信しかできません。そこで、国際協力が必要になります。JAXA 局の参加は、単にデータ受信を融通し合う協力ではなく、Roman 計画を成立させるのに必要な協力です。JAXA 局の他に、ESA 局も参加し、Roman 科学データ受信は、米・日・欧の三者の協力で成り立つことになります。この地上局の受信協力は、日本の研究者にとっても重要な意味を持ちます。観測データの生成率が最も高くなるのは、マイクロレンズ系外惑星観測です。より多くのデータを取得できれば、天体の測光の精度が向上し、より信頼度の高い検出や物理量の測定が可能になります。地上局の協力は、科学成果を高めるために必須のものでもあります。また、Roman 望遠鏡の軌道は太陽―地球 L2 軌道ですが、この領域からの電波の受信は、K 帯と呼ばれる 26.5GHz 付近の振動数になります。JAXA は 2021 年に美笹深宇宙探査用地上局の運用をはじめており、54m アンテナによる K 帯の電波の受信が可能です。受信系としては、これまで、X 帯、それから太陽系内の「深宇宙」との通信に割り当てられている Ka 帯と呼ばれる 32GHz の振動数帯での受信が可能だったのですが、新たに 26.5GHz 付近の振動数の受信系を加えることで、Roman 望遠鏡のデータ受信協力を実施することができると同時に、将来 JAXA において近地球や太陽―地球 L2 軌道における K 帯の受信機能を整備できることになります。Roman への協力は JAXA 基盤整備としても有用な機会です。



図 7 JAXA 美笹深宇宙探査用地上局の 54m アンテナ

「日本の独自性の高い地上望遠鏡による協調観測」

これらに加えて、上にも述べた日本の Roman 望遠鏡と大きな相乗効果が期待できる世界的にもユニークな地上望遠鏡を用いた協調観測を進めます。国立天文台が運用するすばる

望遠鏡や、大阪大学が運用する PRIME 望遠鏡を用いて、Roman 望遠鏡の観測の成果自体をさらに向上させる研究、Roman 望遠鏡の観測と相補的で相乗効果が見込める研究、そして、Roman 望遠鏡と共に新しい価値を生み出すような協調観測を計画しています。すばる望遠鏡は、可視光の高感度広視野撮像観測にすぐれますが、さらに新たな広視野多天体分光観測装置 PFS が稼働をはじめており、これらはいずれも Roman 望遠鏡と相補的な能力を持ちます。他の望遠鏡では難しい暗い天体について、すばる望遠鏡で多数分光観測を行うことで、Roman 望遠鏡の弱い重力レンズ観測に用いる平均的な銀河の赤方偏移分布の詳しい情報を得て精密宇宙論観測の精度をあげることや、Roman 望遠鏡で多数観測される超新星の赤方偏移を測定することから宇宙の加速膨張測定の精度をあげることが可能です。また、PRIME 望遠鏡の観測と Roman の観測を上手く組み合わせると、マイクロレンズ現象を地上と L2 軌道の 2 カ所の離れた点ですこしだけ異なる時刻と位置関係で観測することから、「マイクロレンズ視差」という現象を用いて惑星の質量をより正確に求めることができます。そのほか、Roman 打上前の観測から Roman の観測視野の最適化のための微調整を行うことなども有意義な協力になります。

これらの日本の参加・貢献を通じて Roman 望遠鏡の観測成果を最大限活かし発展させると共に、世界の一線での研究に日本の天文学研究者が積極的に参加し成果を獲得する機会をつくってゆくことが期待されます。

関連リンク：

- ・ ナンシー・グレイス・ローマン宇宙望遠鏡

<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/future/roman.html>

- ・ Nancy Grace Roman Space Telescope (NASA)

<https://roman.gsfc.nasa.gov/index.html>