

Subaru Prime Focus Spectrograph

高田 昌広 たかだ・まさひろ

Kavli IPMU 主任研究員

田村 直之 たむら・なおゆき

Kavli IPMU 准教授

矢部 清人 やべ・きよと

Kavli IPMU 博士研究員

森谷 友由希 もりたに・ゆうき

Kavli IPMU 博士研究員

1. イントロダクション

「宇宙はどのようにして始まったか?」「宇宙に終わりはあるのか?」「どのようにして我々は存在するに至ったのか?」これらは人類誕生以来、我々が持ち続ける宇宙に関する最も基本的な問いである。驚くことに、宇宙の大部分は、未だ直接発見されていない「ダークマター」と、宇宙の膨張を加速させる謎のエネルギーである「ダークエネルギー」で占められることが分かっている。しかしながら、我々はどちらのダーク成分の物理的起源も理解していない。同様に、階層的ダーク

マターの集積過程に基づく銀河形成の理解も十分ではない。例えば、銀河の質量の集積過程、現在観測される銀河の形状の多様性、さらに我々の住む天の川銀河の矮小銀河の分布などの統一的描像が得られていない。

すばるの主焦点超広視野多天体分光器 (Prime Focus Spectrograph = PFS, <http://pfs.ipmu.jp/ja/index.html>; <http://pfs.ipmu.jp/blog/>) プロジェクトは、上述の人類の基本的な疑問を真っ向から調べることを目的としている。現在建設中のこの装置は、面積でいうと満月の5倍程度にも及ぶ広い空の領域にわたる2394個の天体を同時に分光観測することができる。これは、観測する星、銀河の各々についてその光を分散し、近紫外線

表1 PFS性能と同様のタイムラインの他の競合する分光装置の比較

	PFS	DESI	WEAVE	MOONS
望遠鏡	すばる (8.2m)	Kitt Peak Mayall (4m)	WHT (4.2m)	VLT (8.2m)
視野	1.2 sq. deg.	7 sq. deg.	~3 sq. deg.	0.14 sq. deg.
一度に分光できる天体の数	2394	5000	800	1024
波長分解能	~2000-4000	3000-5000	5000, 20000	~5000, 9000, 20000
サイエンス稼働年	2021	2019	2019	2020



図1 2017年11月にカブリIPMUで開催されたPFS共同研究会議の集合写真。

から、可視光、近赤外線に渡る幅広い波長帯（380 – 1260 nm）を一度にカバーするスペクトルを取得できることを意味する。表1は、他の競合する、同じようなタイムスケールの分光器プロジェクトとの比較を示しているが、PFSが極めてユニークな装置であることを示している。このエキサイティングなPFSプロジェクトは、カブリIPMU主導の下、国際共同研究で進められている。国際パートナーは、国立天文台、台湾の中央研究院天文及天体物理研究所（ASIAA）、米国のカリフォルニア工科大学（Caltech）、NASAジェット推進研究所（JPL）、ジョンズホプキンス大学、プリンストン大学、フランスのマルセイユ天体物理研究所（LAM）、ブラジルの大学連合研究者グループ、ドイツのマックスプランク天体物理研究所（MPA）および地球外物理学研究所（MPE）、また中国の研究者グループ、という世界各地の研究者を含む。図1は、2017年11月にカブ

リIPMUで開催されたPFS共同研究会議の集合写真である。130名を超える参加者があり、写真からPFSプロジェクトが真に国際共同研究であることが分かるだろう。研究責任者（PI）は村山斉、プロジェクトマネージャーは田村直之、またプロジェクト研究者リーダーは高田昌広である。また、カブリIPMUの研究者である矢部清人と森谷友由希もプロジェクトで活躍している。カブリIPMUの研究者が国際共同研究をまとめ、プロジェクトを効率的に推進させるために精力的に活動している。

2. PFS装置

PFSプロジェクトは口径8.2 mすばる望遠鏡のユニークな特性である、集光力、広視野、また高い結像性能（シャープな画像の取得）の威力を最大限活用している。

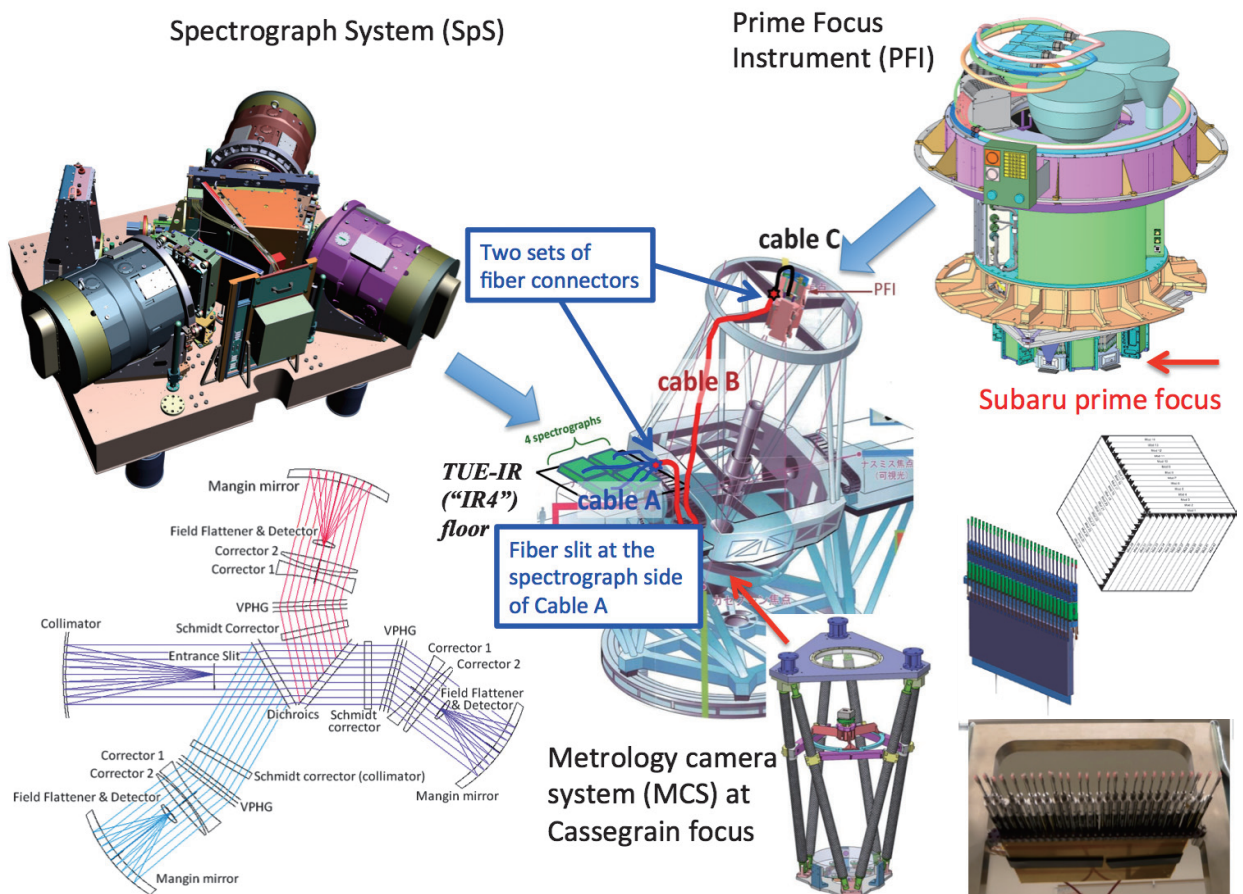


図2(a) PFS装置の概要図。中央にはすばる望遠鏡に示し、主焦点面からPFSファイバーで分光器装置へ天体からの光を転送する様子を示す。右上には主焦点装置 (PFI)、右中央には焦点面の概念図を、右下には天体からの光を捕らえる“Cobra” ポジショナーの写真を示す。左上は一つの分光器モジュールの概念図、左下は分光器の設計図を示す。

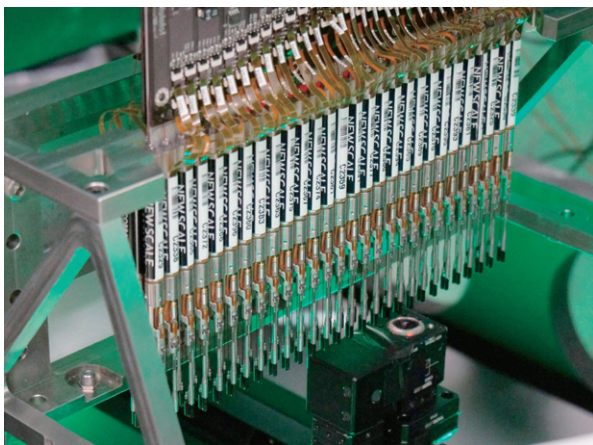


図2(b) Cobraモジュール。

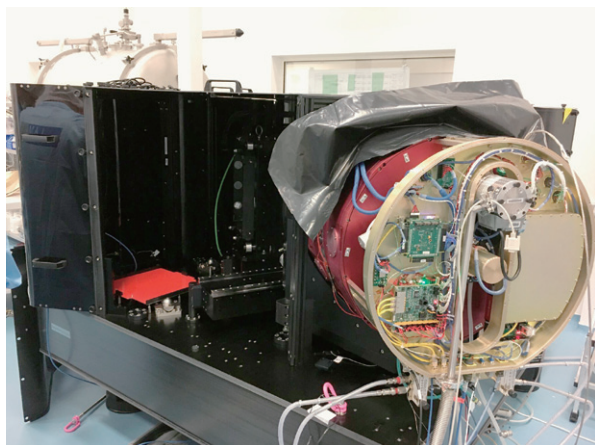


図2(c) 分光器の赤カメラ。

PFS装置は、図2(a)に示されるように、望遠鏡やドーム棟の各所に設置される、主に4つのサブシステムから構成される。天体あるいは夜空からの光を、まず主焦点面に配置されるファイバーで集光し、ファイバケーブルにより望遠鏡ドーム内に収納されている分光器まで送信し、そして分光器の検出器でその分光データを取得する。PFSは、すばる望遠鏡の主焦点広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) のために開発された広視野補正光学系と主焦点ユニットを用いる。カプリIPMUはHSCの開発およびマネジメントについても主要な役割を果たしてきている。主焦点面は対角長1.3度の六角形の視野内に2394個のファイバーが敷きつめられ、各ファイバーは焦点面にある各自のパトロール領域(直径9.5 mmの円)を自由に動き天体からの光を捕らえることができる。ターゲット天体にファイバーを向けるためのポジショナーは2個のモーターで駆動されるアクチュエーターで、“Cobra”と呼ばれる。8 mm 間隔で搭載されるCobraポジショナー57個を含むCobraモジュール42台で主焦点面をカバーする。分光器モジュールは4台あり、各モジュールに青、赤、近赤外の3つのカメラが搭載され、一度の露出で380 - 1260 nmの広い波長帯を分光するように設計されている。図2(b)にCobraモジュールの写真を、図2(c)に分光器の赤カメラの写真を示す。図2(a)下方のメトロロジカメラはファイバーの配置に用いられる装置であり、逆から照らしたファイバー像を取得し、その位置を測る(メトロロジ(metrology)とは「計量」を意味する)。HSCおよびPFSは同じすばる望遠鏡を用い、同じ空の領域のイメージング(デジタルカメラ撮像)と分光観測を行う。このため、これらの相補的なデータは様々な系統誤差の理解、コントロールを可能にする。

3. 科学目標

すばる望遠鏡の集光力、PFSの広視野そして多天体分光能力の組み合わせにより、宇宙論および宇宙物理の幅広い分野のサイエンスが可能になる。PFS チーム

は、5年をかけてすばる望遠鏡の約300夜を費やし、系統的、大規模なPFS分光サーベイプロジェクトを実行することを計画している。その科学目標は3つの柱からなる。宇宙論、銀河進化および銀河考古学である。

まず、PFS宇宙論プログラムは、1400平方度におよぶ広い天域に渡り、約400万個以上の銀河を分光することで、幅広い赤方偏移範囲 $0.6 < z < 2.4$ の3次元の宇宙地図を作成する。これは宇宙膨張が減速から加速に転じる時期をカバーする。この銀河地図の銀河分布に存在するバリオン振動のスケールを測ることで、これらの赤方偏移範囲で宇宙論距離と膨張則を測定し、加速膨張を支配するダークエネルギーの性質を探求することができる。さらに、銀河分布の非一様性を定量化するクラスタリング統計量をスケールと赤方偏移の関数として測定することで、宇宙の大規模構造形成の時間進化を測定し、宇宙構造形成におけるダークマターの性質を制限できる。図3は、4 m級の望遠鏡と比較して、高い銀河の個数密度で宇宙の大規模構造の地図を作成できることを示している。

2番目のプログラムは、合計で約15平方度の代表的な天域に渡り、数10万の銀河の詳細な分光スペクトルを測定し、宇宙史において如何に銀河が進化してきたか、また階層構造形成における星質量の集積過程を調べることを目的としたPFS銀河進化プログラムである。各銀河の深い分光スペクトルを取ることで、銀河の星形成、星とガスの力学的構造、星形成や銀河中心にあるブラックホールによるフィードバックの役割について、銀河の総星質量と環境の関数として調べ、銀河の形成・進化の物理を探ることができる。さらに、カプリIPMUの新しいメンバーであるKhee-Gan Lee氏は、新しい、エキサイティングな研究テーマを提案している。PFS銀河進化プログラム観測領域の高赤方偏移 $z \sim 3$ にある活発に星形成をしている明るい銀河を背景光源として使い、その分光スペクトルに吸収線系として現れる手前の中性水素を測定し、銀河間空間に存在する中性水素の3次元分布を復元するという方法である。これはIGMトモグラフィーと呼ばれる方法で、

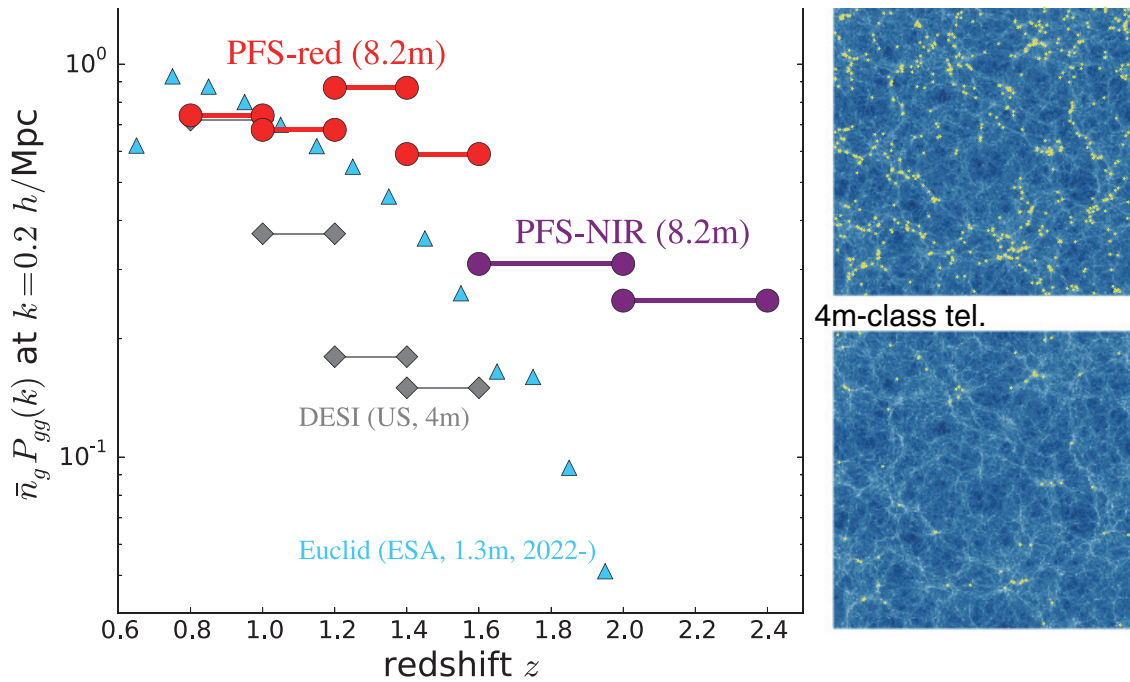


図3 PFS 宇宙論サーベイのイラスト図。PFS の分光観測から各銀河までの距離を測定することで、銀河の3次元地図を作ることができる。右上の図は、赤方偏移 $z \sim 1.5$ の宇宙の観測から予想される3次元地図のシミュレーション。黄色の点は銀河、青色のカラーマップはダークマターの分布。右下の図は、口径8.2 mのすばるではなく、4 m級の望遠鏡が使われた場合の銀河の地図。左の図は各赤方偏移におけるPFS 銀河の数密度の予想図。y軸の値が大きいほど数密度が高い銀河地図に対応する。この結果は米国の4 m望遠鏡のDESIあるいは欧州宇宙機関（ESA）の衛星計画Euclidなど、他の競合するプロジェクトと比較できる。

この手法以外では直接見るできない（光を発しない）銀河間ガスの大部分を占める中性水素の分布と銀河の関係性を調べる事ができる。図4は、PFS 銀河進化プログラムの威力を示す概念図である。 $z > 1$ の高赤方偏移の宇宙のフィラメント状、網目状構造などの複雑な大規模構造における、銀河、銀河間物質の3次元地図を作ることを目的としている。このデータはPFS 宇宙論サーベイと相補的である。なぜなら、銀河サーベイのデータから銀河進化の物理、特に宇宙論サーベイがターゲットとして観測する輝線銀河の性質についての詳細な情報を得ることができるからである。

3番目のプログラムはPFS 銀河考古学である。天の川銀河、アンドロメダ銀河、また矮小銀河の個々の星について分光サーベイデータから視線速度と化学組成

を調べる事により、これら銀河の形成史を復元し、またダークマターの分布を推定することができる。特に、矮小銀河はその力学的構造にダークマターが支配的な役割を果たしているが、ダークマターの分布は未だ正確には理解されていない現状に対し、すばるPFSで矮小銀河の全体にわたり星の速度構造を調べることで、ダークマターの空間分布を観測的に明らかにすることができる。このPFSの制限とフェルミガンマ線衛星のデータと組み合わせることで、より詳しくダークマターの対消滅信号が探査できる、あるいは、測定されなければ、対消滅断面積の制限を改善できると期待されている。この研究テーマは、素粒子物理学、天文学、宇宙物理学に跨る協奏的な研究である。図5は、PFS 銀河考古学プログラムの威力を示す概念

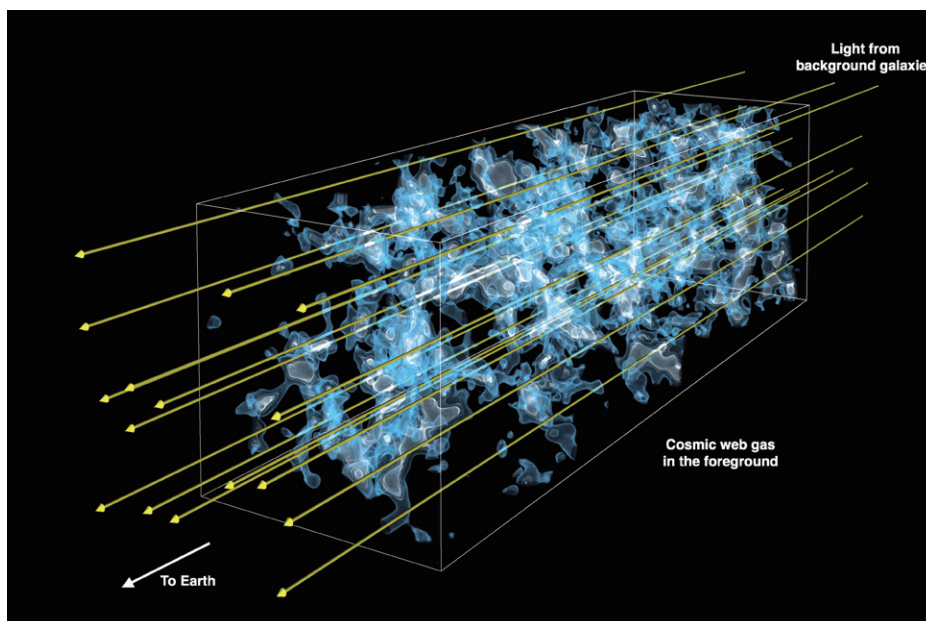
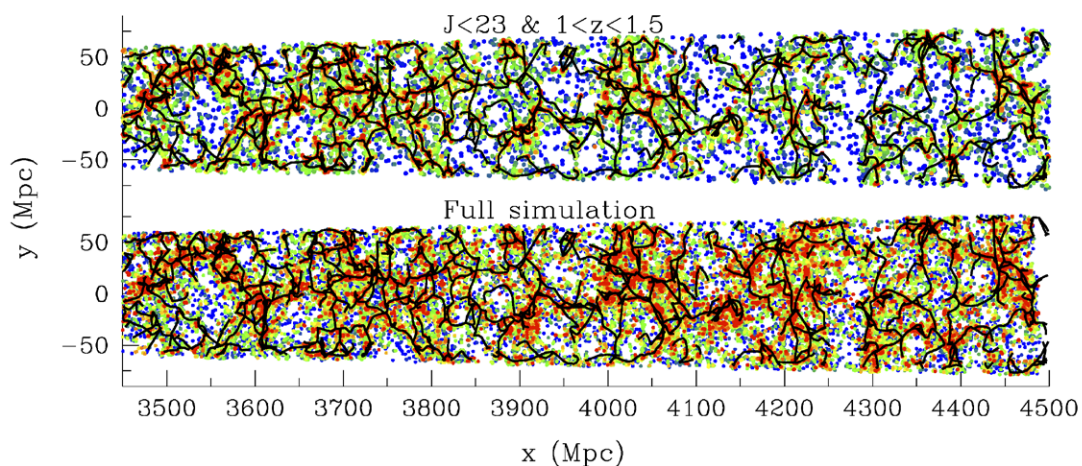


図4 (上図) 上のパネルはPFS 銀河進化プログラムで分光観測される、赤方偏移で $1 < z < 1.5$ の典型的な銀河の三次元地図のシミュレーション。青、緑、赤色の点は銀河を示し、それぞれ数密度が低い、中間、あるいは高い領域に存在する銀河を表す。黒い線は宇宙の大規模構造のフィラメント構造を示す。下のパネルは同じ領域の全ての銀河を表す。上下の比較からPFS 銀河サーベイは約70%の銀河をサーベイすることが分かる。(下図) PFS サーベイが行う銀河間ガストモグラフィー (IGM tomography) の概念図。星形成を行う明るい銀河を背景光源として使い、それぞれの分光スペクトルに現れる吸収線系を測定することで、宇宙の中性水素の三次元分布を復元することができる。

図である。すばるの集光力により、天の川銀河の星の分布を完全にカバーする距離で 30 kpc などの遠方の星についてもその視線方向速度、化学組成の測定を可能にする。この PFS サーベイは、現在進行中の欧州宇宙機関 (ESA) の GAIA 衛星のデータ (10 kpc までの星を測定) と相補的であり、また 4 m 級の望遠鏡では到

底不可能なプログラムである。

4. 現状

PFS の建設は順調に進んでいる。装置の各サブシステムは国際パートナー研究機関で開発されている。例

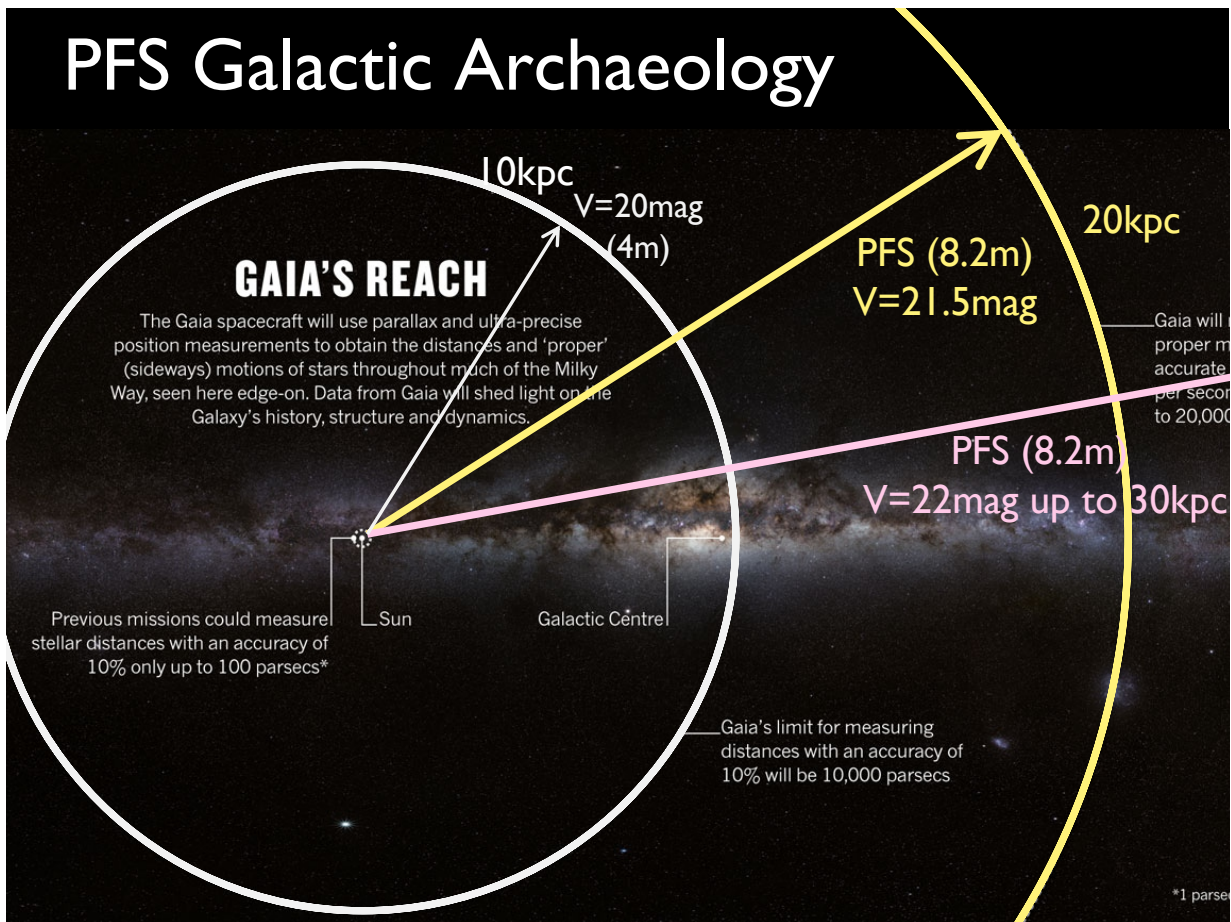


図5 PFS 銀河考古学プログラムの概念図。PFS が、我々の天の川銀河に存在する、距離で30 kpcにも及ぶ多数の星の視線方向速度および化学元素組成を測定できることを示している。この威力は、現在10 kpcまでの星をサーベイしている欧州宇宙機関 ESA の GAIA 衛星、あるいは10 kpc までの星を高波長分解能で分光観測する4 m 級の望遠鏡とは相補的である。(背景の図は ESA から参照。)

例えば、PFS は4つの分光器モジュールを作るが、マルセイユのLAM 機関で1台目のモジュールを組み上げ中で、実験室で結像性能や熱的性能などの試験が行われている。Caltech や JPL では、予備を含め44台のCobraモジュールが組み上げられている。現在は1台目のCobraモジュールの組み上げ・試験が完了し、台湾のASIAAへ輸送された。今年中に必要な全てのモジュールの組み上げを目指している。台湾のASIAAでは主焦点装置を組み上げ中で、Cobraモジュールを受け入れる準備が間もなく整う。更に、ASIAAではメトロロジカメラの開発も行っている。このカメラは4月にASIAA からハワイに輸送された。ハワイで最終調整や

試験を経て夏には望遠鏡を使った試験が行われる予定である。このような、サブシステムの統合、開発、スケジュール、といったマネジメント全ては、プロジェクトマネージャーの田村やKavli IPMUのメンバーを中心とするプロジェクトオフィスが牽引している。

PFSは見るからに複雑な装置であり、実際にはハワイのマウナケア山頂のすばる望遠鏡に搭載し、その環境下での性能評価、実際の夜空の試験観測が必要不可欠である。森谷を中心にPFSのメンバーやハワイ観測所所員と相談しながら、試験観測の詳細な計画を企図している。現段階では2019年の試験観測開始を予定し、そこから約一年間をかけて、PFS装置の実際の性能、

特性を評価する予定である。その後、性能や運用の安定化を図りつつ、2021年に上述の大型サーベイプロジェクトを開始することを目指している。

先に述べた3つの主要なサイエンス（宇宙論、銀河進化、銀河考古学）では、各々のターゲット天体（星、銀河）がそれぞれ異なる観測領域にあり、必要とする観測要求（露出時間、測定する物理量）も異なる。このため、すばる望遠鏡の観測時間を最大限活用するために、これらの3つのプログラムの観測をうまく組み合わせ、最大限の効率でPFSサーベイプロジェクトを行う必要がある。装置開発と平行し、Exposure Time Calculator (ETC)、すなわち期待される装置効率（一部には実際の測定値を利用）をもとに、マウナケア山頂の天候の下、仮定した露出時間で期待される天体の分光スペクトルをシミュレーションするソフトウェアの開発を矢部が中心となって行っている。このETCやファイバー配置ソフトなどを用い、現時点で想定している観測領域、分光ターゲット天体、および5年間で300晩の観測を行うことを仮定してPFSサーベイ観測をシミュレーションし、最適なサーベイ戦略を求めることが当面の課題である。

5. 展望

これまで述べてきたことから明らかなように、PFSは極めて強力な装置であり、広い空の領域にわたり、約2400個もの多数の天体の同時分光観測を可能にする。米国で建設中の実質口径6.5 mのThe Large Synoptic Survey Telescope (LSST)は、撮像サーベイを占有的に行う究極的な広視野望遠鏡であるが、分光観測を行うことはできない。日本も参画している30 m級望遠鏡 (TMT) などの究極的な巨大望遠鏡は視野が狭く、むしろ面白い稀少な天体を詳細に分光観測することに適しており、PFSのサーベイ能力とは相補的である。PFSは2020年代にもすばるを世界第一線級の望遠鏡に留めておくことを可能にする。実際、2025年頃打ち上げ予定のNASAのWFIRST衛星とPFSを中心としたすばる

望遠鏡との国際共同研究も計画されている。このように、PFSは非常にエキサイティングなプロジェクトであり、宇宙の物理の理解を飛躍的に発展させることができるだろう。日本の天文学者、物理学者はこの絶好の機会を逃すべきではない！

最後にPFSプロジェクトは文部科学省科学研究費助成費事業の新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するか? — 徹底的究明と将来への挑戦」(No. 15H05887, 15H05893, and 15K21733)からの支援を受けていることを記します。