

## 特定領域研究 領域代表者からの報告

### 2. 研究の進展状況及び成果の概要

【領域番号】 4 6 7

【領域略称名】 ダークエネルギー

【領域代表者（所属）】 唐牛 宏（東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授）

本領域は超広視野カメラの製作及びそれにより銀河の大規模サーベイを行う開発・観測研究（計画研究 A01、A02）と、得られたデータからダークエネルギー、ダークマターの銀河への影響を解析してその正体にせまる理論研究（B01、B02）を二本の柱とし、公募研究ではこれらの計画研究でカバーされていない、例えば超新星による宇宙加速膨張の研究、などの広がり期待した。

カメラ製作においては、計画研究A01、A02が連携して平成18年度の実現可能性検討から始まり、カメラの重要な構成部品である補正光学系・主焦点ユニットの設計・製造、CCDの開発、さらに取得した膨大なデータを解析するためのソフトウェア開発までを企業、各機関の研究協力者を交えて推進した。またその間、平成20年にプリンストン大学（米）、台湾中央研究院とカメラ製作とそれによる観測研究のための共同開発協定を締結し、国際共同開発研究の道筋も確立して完成に向けて着実に歩を進めてきた。

新型CCD 素子は2048 x 4096 ピクセルの完全空乏型裏面照射式で、波長1000nm の量子効率が従来の4倍になるものを新たに開発し、現行のSuprime-Cam に搭載してその性能を確認した後、116 個を受光面に搭載するための調達計画を具体化して進めた。またこのCCD の制御と読み出しを担うエレクトロニクスを開発し、微弱な星の光を高精度、高速で読み出すことに成功した。CCD 素子をコールドプレート上に配置しパルスチューブ冷凍機にて-100° に冷却して運用するためのデュワーはHSCの要となる構成部品であり、真空を保持しつつ望遠鏡の姿勢変化に対して変位が極めて少ないことが要求される高い工作精度を実現した。

補正光学系においては、重量、サイズの制約の中で技術革新によって最大限の視野角を達成すること、光の屈折による大気分散を高精度で補正する大気分散補正技術を開発し高い分解能を実現すること、またそのレンズ群用の特殊硝材を製造、研磨することなどに取り組んだ。これらレンズ群を収めるレンズ筒には軽量且つ剛性が高いことが求められ、最適な素材としてファイナセラミックス新素材を採用することとし、技術的に難しい大型部品の加工への挑戦となったがこれを完成させた。

小型軽量化フォーカルプレーンシャッターには高い露出精度と耐久性が求められることから、他の構成部品に先立ちすばる望遠鏡での駆動試験を行うことでその安定性を確認することができた。

しかしながら、全体工程の進捗に関しては、領域発足初年度のハワイ地震による望遠鏡の破損の影響を大きく受け、本装置の主焦点ユニット及び望遠鏡改修の基本設計作業に着手出来ずに補助金初年度の繰越を余儀なくされたことをはじめ、東日本大震災などの天災に起因する遅れに加え、本カメラの設置先であるすばる望遠鏡の主焦点ユニットで発生した冷却水の漏洩事故、さらには本装置の搭載のために改良の必要に迫られていた主焦点観測装置交換機構が、改修の検討を始める矢先に故障すると云う不運なトラブルの影響も受け、A01、A02 はともに最終年度も含めてほぼ毎年の補助金繰越しを続けながら、鋭意、可及的迅速な望遠鏡搭載の可能性を追求した。その結果、2012 年 8 月には『ファーストライト』にこぎ着けることが出来、この成功は Nature をはじめとする国内外の報道にも多数取り上げられた。

ファーストライト後、HSC の性能評価のための試験観測が平成 25 年 1 月に行われ、ここで初めてカメラの視野全面を用いた画像が取得され、詳細な解析で画像の質を検証した。結果は、要求仕様を完全に満足するものであり、8-10m 級の世界第一線望遠鏡では他に例を見ない 1.5 度角という広視野の全面にわたって、結像性能 0.48 秒角という世界最高レベルのシャープさが立証されている。

一方、開発と並行して、本研究チームによる、HSC を使った広視野大規模サーベイ観測の意義と重要性についてすばる利用者コミュニティの理解と賛同を得る努力がなされてきた。2007 年すばるユーザズミーティング

グにおいては、HSC とそのもたらすサイエンスについて広く議論され、開発の重要性についてコミュニティと認識を同じくするに至った。合わせて HSC の目指す広視野大規模サーベイを可能とする「すばる望遠鏡戦略枠」の新設がこれにおいて承認された。HSC が平成 25 年 1 月の試験観測を進めるなか、本プロジェクトの最終目標であり、開始時点から数年にわたって努力を重ねてきた「他者の追随を許さない規模の宇宙物理学の基礎データを構築するための大規模イメージング観測」の提案書作りが、国内外 166 名の研究者が参画して平成 24 年 10 月に完了・提出され、すばるコミュニティの代表から構成される国立天文台の委員会がその後慎重に審議を重ねた結果、提案通り受け入れて本プロジェクトに総数 300 夜のすばる望遠鏡観測時間を供与することを決定した。これは、コミュニティの非常に高い評価と期待値を表している（戦略枠以前は 1 プログラムあたり最高で 20 夜）。これにより 2014 年 2 月から科学観測が開始されることで本特定領域が目的とする広視野宇宙探査が実現するところとなり、ダークエネルギー・ダークマターの解明は言うに及ばず、様々な分野の研究で世界をリードすることになる高精度の観測データを今後発信していくことになる。

以上のことから、計画研究 A01-A02 の「世界に類を見ない新装置を開発し、それを用いて大規模深宇宙探査サーベイ観測を行う」という設定目的から見て、達成度は道半ばと云わざるを得ない。しかし、開発要素が極めて多くチャレンジングな装置製作が完成したことと、コミュニティが 300 夜の提供を承認したことで、設定目的の達成のための**全ての必要条件**を満たすまでに至ったことは特記したい。

もう一つの柱である理論研究（計画研究 B01、B02 および公募研究）においては、まず超広視野カメラ HSC による観測で得られるデータから最も効率よくダークエネルギーに関する情報を引き出すための理論研究を推進することとし、統計的、系統的誤差の評価を厳密に行って観測誤差を推定することなどを含め、最適な観測計画の立案を目指した。平成 18-19 年度以降、宇宙での線形密度ゆらぎの詳細な計算及び宇宙大規模構造の形成にダークエネルギーが及ぼす影響の詳細な調査を目的とする大規模数値シミュレーションを開始し、銀河分布の世界最大規模のサンプルを得て遠方の銀河に生じる重力レンズ効果を見積もる研究を推進した結果、将来の観測誤差を推定することが可能となった。合わせて最適な観測計画を立案できることを示し、その目標を達成することができた。

また、重力レンズ効果に基づいた宇宙の質量地図の作成とそのための理論的方法の開発を目的とした研究においては、新たな弱い重力レンズ解析法として楕円形の窓関数を導入して測定誤差の一部を無視できる程度に小さくすることに成功し、この方法を「E-HOLICs」と名付け現在もさらに改良を試みている。この方法は銀河団内のダークマターの部分構造を発見するなど、従来の理論予想に対し、直接的な全く新しい検証を与えるものであり、より正確な質量分布地図を作成することが可能となった。

一方、超新星を用いたダークエネルギーの研究は、計画研究とは全く異なる系統誤差と統計誤差を持つ相補的かつ有効な方法論であり、本研究によって得られるデータの活用の可能性は十分に検討されるべきであるため、公募研究で多数の応募・採択があり多くの成果をあげた。超新星を標準光源として使うためには、その絶対的明るさを高い精度で知ることが必要であるが、それが進化していないか、すなわち、宇宙の年齢の関数として変化していないか、という重要な疑問が残る。その意味で、標準的でない超新星の研究は重要であり、世界で初めてすばる望遠鏡による偏光分光観測から爆発する超新星の球対称性を測る研究が行われ、超新星の多様性を理解する大きな一歩となった。さらに、超新星とその母銀河との関連、とりわけその星生成史との関連を調べるための専用の多色カメラやグリズムの開発研究でも成果を上げた。

その他公募研究の中では、加速膨張をダークエネルギー以外で説明する理論的考察も展開された。例えば、加速膨張をダークエネルギーを導入すること無く、宇宙の非一様性の効果として説明しようとする試みも行われた。また、重力レンズ効果が、直接暗黒物質・宇宙背景ニュートリノ分布の検証になるだけでなく、その幾何学的な効果から暗黒エネルギーの影響を測る可能性の検討、新しい物理の探究の観点から、

重力理論の修正モデルの検証可能性についても考察された。

また、宇宙定数からのずれをダークエネルギーの状態方程式でパラメトライズする際の一般的な表式を基本理論に立ち返って導出する試みも行われた。その状態方程式を超新星の観測データに適用し、状態方程式のパラメターへの制限を与え、現在の観測データは宇宙定数と矛盾しない、ということが明らかになった。さらには、新しいパラメトリゼーションはより広いダークエネルギーモデルについても適用できることを示した。

さらに公募研究のねらいとして、本研究の目的と直接の関係はないが基礎的な要素技術の開発や、得られるデータを利用した他分野の研究の展開の可能性も追求した。その中には、大口径光学素子の反射防止膜を通常の誘電体多層構造ではなく、全く新しい、空気側から基板側に向かって徐々に屈折率が増加していく多孔屈折率勾配の薄膜の開発や、高精度の膜厚制御が可能なイオンビームスパッタ装置を利用した超多層 (>30 層) の広帯域反射防止の開発などがある。

また、大規模深宇宙探査サーベイ観測のデータを用いて二次利用の例として、他の方法では観測不可能な、銀河系の構造や化学的進化を調べる上で重要な準矮星などの銀河系ハローに存在する低質量で暗い星が高速で移動することを利用した探査の研究が追求された。

これらのことから、「計画研究 A01、A02 で開発した HSC を用いた大規模深宇宙探査サーベイ観測で得られるデータでダークマター・ダークエネルギーが銀河の分布や分布形状に与える効果を定量的に解析し、これを理論モデルと比較することでダークエネルギーの存在およびその時間変化」に迫る、という B01、B02 と公募分野の理論研究の設定目標は残念ながらデータ取得に至らなかった現実から見て未達成であるが、当初の設定目的を超えて、従来の理論・手法に対し新たな理論の提案と定式化に成功したこと、これまで不可能であった観測空間における銀河分布のパワースペクトルなどの求め方を平易にする定式化を行う、またダークマターの存在形態によって大きく作用される銀河系の形成過程について新しい知見を得る、など多岐にわたって成果をあげている。

これらのことから、本領域では最も効率のよい観測、データ解析、理論展開によりダークエネルギー・ダークマター探査を行う素地がすでに十二分に整っており、平成 25 年 2 月のすばる戦略枠の観測開始を待って現代科学における最大の謎に迫る世界トップレベルの成果を上げることが約束されていると確信する。