

# 平成25年度 特定領域研究 事後評価結果（所見）

## 研究領域名

広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究

## 研究期間

平成18年度～平成23年度

## 領域代表者

唐牛 宏（東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授）

## 研究領域の概要

我々の宇宙は約23%のダークマターと73%のダークエネルギーによって占められている。20世紀の素粒子物理学が解明した物質階層であるバリオンは宇宙ではわずか4%を占めるのみである。ダークエネルギーという存在自体も、宇宙論スケールにおける一般相対論の限界を示している可能性もある。バリオンでもダークマターでもない宇宙の新たな構成要素であれ、一般相対論の修正という新たな物理法則の示唆であれ、現代科学に与える意義は計り知れない。本研究は、すばる望遠鏡という、8-10m級望遠鏡の中では群を抜く機械的堅牢さと精密制御性能の特長を十二分に生かし、すばる以外の既存の巨大望遠鏡では実現不可能な広視野3.1平方度の主焦点カメラ（HyperSuprime）を製作する。そして、この新装置を用いて最低1000平方度超広域撮像探査を行う。探査天域に含まれる銀河の数は1.5億個程度と推定され、これらの銀河の形状解析から弱い重力レンズ効果による系統的形状歪みを検出することにより、遠方銀河と我々の間に介在する（ダークマターを含めた）全質量の分布を求めて「3次元質量分布地図」を作成する。また、探査天域の全データをカタログ化して学術領域全体に公開することにより、宇宙大規模構造の形成と進化、銀河の個数分布と形状進化、等々の多様な観測的宇宙論の研究によって、ダークエネルギーの正体に迫る。

## 領域代表者からの報告

### 1. 研究領域の目的及び意義

近年の宇宙論研究、とりわけ観測的宇宙論と呼ばれる分野の研究の進展にはめざましく、その顕著な成果が1998年の「宇宙膨張の加速」の発見であり、また加速させるための斥力としてそこから導き出された未知の存在、ダークエネルギー（Dark Energy）である。これまでも宇宙には目に見えない物質、ダークマター（Dark Matter）が大量に存在していることがわかっていたが、ダークエネルギーはダークマターのエネルギー密度の2倍以上もの真空のエネルギーであることが次第に明らかになってきたのである。

真空のエネルギーとしては素粒子物理学において議論されるスカラー場が宇宙において重要な役割を果たしている可能性が示唆されているが、未だ基本粒子としてのスカラー場を発見するには至っていない。すなわち、ダークエネルギーの解明は天文学、宇宙論、素粒子論にまたがり、さらに広く一般的にも非常に関心の高い21世紀基礎科学における最重要課題となっている。このため現在すでに多くの（主に欧米の）研究者達が、分野を問わず様々な手段に基づく研究プロポーザルを提出し、その実現に向けた熾烈な競争を開始している。その中であって天文学が「直接検出が困難なダークエネルギーの性質を観測によって知る」ということは、重力場方程式における宇宙項( $w$ )の値がいくつであるのか、そしてその値は時間とともに変化しているのか否かを調べることに他ならない。 $w$ の値と時間発展が明らかになれば、ダークエネルギーを作り出しているであろうスカラー場のポテンシャルを構築することが可能になり、その正体に迫ることができる。

本領域研究はこのダークエネルギー研究に、我が国が世界に誇る大口径望遠鏡「すばる」に新たな観測装置、超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を搭載することによって取り組み、世界をリードする画

期的成果を挙げるための研究である。すなわち HSC による広域宇宙撮像探査を行い、取得したデータからバリオン振動及び重力レンズ効果を用いた研究手法によって  $w$  の値とその時間発展を詳細に解明し  $w$  を決定することを目的とする。そしてその遂行のために「超広視野カメラの製作とサーベイ観測」を旨とする研究項目 A と、「超広視野サーベイの理論的研究」を行う研究項目 B の二つの研究項目を設置することとする。

#### 研究項目 A 超広視野カメラの製作とサーベイ観測

HSC を搭載するすばる望遠鏡は他にはない焦点距離の短い「主焦点」を有している。短い焦点距離はすなわち広視野を意味し、一度の撮像で広い領域をカバーすることができる。すばるの主焦点は直径 0.5 度角でほぼ満月の大きさに達し、現在搭載されている Suprime-Cam はこの広視野を活かしてすでに多くの研究成果をあげており、例えばダークエネルギー研究においては  $w$  が不明な宇宙モデルを棄却することができた。しかしながら宇宙全体を議論するには統計量が圧倒的に足りず、より「広い」(1,000 平方度程度) 観測の重要性から Suprime-Cam の大幅なサーベイ能力向上が不可欠となった。研究項目 A では計画研究 A01, A02 が共同で Suprime-Cam の 10 倍の視野を持つ HSC の製造とそれによる広視野探査の実現をその目的とする。

主焦点において広い視野にわたって高像質を得るためにはレンズ群で構成される補正光学系が必要であり、またその収差による像ぼけがシーイングより十分小さいことが求められるが、すでに検討を重ねた結果、硝材製造の制約から第一レンズの直径を 1.2m とした場合、特に重力レンズ解析に重要な波長 650~800nm 付近において科学要件を満たすことが確認されている。

カメラの要である CCD はこれまでその薄さのために赤外線領域で感度が急激に減少するという難点があったが、中性子法と呼ばれる半導体素材技術の進展により 300 $\mu$ m 厚のウェハを完全に空乏層にし、波長 1 $\mu$ m で 50%以上の量子効率を得ることが可能となった。また、天文用として一般的な 2048 $\times$ 4096 ピクセル CCD の価格は裏面照射工程を要するため非常に高価格であるが、完全空乏型はこれを省略することで生産性を向上させることができる。

また HSC の観測では一晩で 576 Gbytes、さらに時間領域 (time domain) の観測を行うためにはその 10 倍程度の 5.76 TBytes のデータを取り込む事になりその処理は大きな課題となる。当領域研究では、高エネルギー物理学実験によって培われた大容量高速データ転送技術 Silicon TCP/IP (SiTCP/IP)を用いることでこのデータ処理を高速で行う事を実現する。

#### 研究項目 B 超広視野サーベイの理論的研究

計画研究 B01 では、HSC によって行われる銀河広域探査で得られる銀河の空間分布から、宇宙のエネルギー密度の大部分を占めているダークエネルギーのどのような情報を得ることが可能であるかを調べ、実際の観測に向けた理論的準備を行うことを目的とする。その手法として、バリオン振動を用いてバリオン密度揺らぎの存在している時間・場所から観測者までの空間の構造、すなわちハッブルパラメータを測定しそこからダークエネルギーの時間進化を得ることを目指す。この目的の達成には測光観測による推定が有効であることが示されているが、莫大な数の銀河の赤方偏移分布を  $z \sim 2$  程度まで測定することが必須であり、HSC の完成が待たれる。またいったん銀河分布の赤方偏移依存性が広視野探査によって得られればバリオン振動以外にも、銀河などの構造の時間進化が重力場に影響を及ぼし、そこを通過する宇宙マイクロ波背景放射フォトンのエネルギーを変化させる効果 (ISW 効果) からもダークエネルギーに対する重要な手がかりが得られることも期待されており、世界に先駆けて最先端の成果を出すための重要な研究と位置付けられる。

計画研究 B02 では、本研究領域が提案する HSC による大規模深宇宙探査サーベイを念頭に、遠方銀河像への重力レンズ歪み効果の観測量から大規模構造の質量分布を復元する方法を開発する。特に、その多色

データから推定される銀河の測光的赤方偏移の情報と重力レンズ効果を組み合わせることで、擬3次元空間（赤方偏移空間+天球上の2次元位置）における宇宙の質量地図（宇宙の質量トモグラフィ）を復元する方法を開発することを目指す。この方法を深宇宙サーベイに適用することで、宇宙構造の形成過程の赤方偏移進化が観測的に得られる。また、復元された質量地図で特に質量が密集した領域（重力レンズ効果が強い領域）は銀河団に対応するので、赤方偏移の関数としての質量で選択された銀河団カタログを構築できる。銀河団の質量関数は構造形成モデルのみならず宇宙の膨張則を通して暗黒エネルギーの性質に敏感であるので、それらを制限する方法を開発する。さらに、発見された銀河団領域の詳細な研究から銀河団の質量分布の統計的性質が得られる。Cold Dark Matter モデルの重要な予言の一つとして、冷たい暗黒物質が重力以外の相互作用を持たなければ、銀河団の質量分布に特徴的な質量プロファイルが出現することが示されているので、本計画研究から暗黒物質の素粒子的性質に観測的な制限を導出できると考えている。

## 2. 研究の進展状況及び成果の概要

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ン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 年すばるユーザーミーティングにおいては、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ー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。

## 審査部会における所見

A- (研究領域の設定目的に照らして、概ね期待どおりの成果があったが、一部に遅れが認められた)

### 1. 総合所見

本研究領域の研究によりすばる望遠鏡搭載の超広視野カメラ HSC が完成し、その初期性能は極めて高いものであった。これにより、我が国の観測的宇宙論分野における国際的優位が確保されたものと思われる。一方で、不可抗力の外的要因（日本とハワイにおける地震、すばる望遠鏡の不具合など）によって、完成したカメラを用いた観測及びこのデータを用いたダークエネルギーの研究には至っていない。これに関しては、すばる戦略枠観測で 300 夜の観測計画が採択され、2014 年 2 月から観測開始の予定となっており、今後の進展に期待したい。本装置に対する国際的評価は Nature 誌に取り上げられるなど極めて高く、今後、観測データの解析によって、ダークエネルギーの性質と起源の解明を目指した大きな成果が期待される。

以上のことから、研究領域の設定目的に照らして概ね期待どおりの成果が得られているものの、不可抗力の外的要因により「一部に遅れ」が認められる。

### 2. 評価に当たっての着目点ごとの所見

#### (a) 研究領域の設定目的の達成度

本研究領域の最終目的とするダークエネルギーの性質と起源の天文学的解明は、他分野への影響も大きく、物理に新しい理解をもらすような重要なテーマである。特に、他のグループによって進められている超新星を用いた手法とは相補的な情報を得られることが期待されるため、まさに今推進することが重要である。こうした状況のもと、すばる望遠鏡搭載の超広視野カメラ HSC が完成し、試験観測により高解像度画像を得られ、極めて高い初期性能を確認したことは意義深い。

計画研究 A 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新宇宙探査サーベイ観測を行う」という設定目的の前半は達成されている。目的の後半については不可抗力の外的要因（日本とハワイにお

ける地震、すばる望遠鏡の不具合など)によって、観測が行われていないために達成されていない。これに関しては、すばる戦略枠観測で300夜の観測計画が採択されたということで、今後の進展に期待したい。計画研究Bの「計画研究Aで得られるデータの定量的な解析を行い、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」については、研究期間内にデータの取得ができず未完であったが、当初の設置目的を超えて多岐にわたった成果をあげている点は評価に値する。

#### **(b) 研究成果**

すばる搭載広視野カメラにより、当該領域として高いレベルの研究が行われることが期待できたが、本研究により超広視野カメラHSCが成功裏に完成したことで、当該分野の格段の発展が確実に期待できる状況となった。HSCの初期性能は高く、今後、この装置による観測結果の解析により、ダークエネルギーの性質と起源の理解が天文学の手法により深まり、大きな成果が期待できる。研究領域の設定目的に照らして、研究成果の積極的な公表、普及は記者会見やWEBサイトで図られており、適切である。

ダークエネルギーの性質と起源の解明については、世界中で熾烈な観測的・理論的研究が行われている。そのための手法として素粒子物理学的手法より、天文学手法による解明が期待されており、研究の発展段階の発展の観点からみて成長期にあるこの分野がさらに発展する基礎が築かれた。

研究開始時においては、「学術の整合性ある発展の観点からみて重要であるが立ち遅れており、その進展に特別の配慮を必要とする研究領域」であったがHSCの完成により、世界を大きくリードする状況になっており、その意味で領域の設定目標を達成したと言える。

今後、HSCの観測により、ダークエネルギーの性質に新たな知見が得られると予想され、その場合、天文学的宇宙論だけでなく素粒子理論への影響も大きい。すなわち、本領域の研究の発展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすという点で、本研究成果は、学術研究における先導的または基盤的意義を有すると言える。

#### **(c) 研究組織**

領域発足時に16人であった研究組織が、日本天文学会最大の166名の共同研究者を擁する分野へと発展したことは、本研究領域の大きな成果である。

国際共同研究も広がり、理論と観測のグループで相補的な役割分担が行われていることも評価できる。

#### **(d) 研究費の使用**

外的要因によって計画変更が必要となったが、適切に対応し装置の完成に至った。研究費の使途等に問題はなかった。

#### **(e) 当該学問分野、関連学問分野への貢献度**

観測結果が得られていないため、素粒子・宇宙理論分野への具体的な貢献には至っていないが、完成した装置の高い性能が確認され、観測時間も確保できたということで、今後の大きな貢献が期待される。

#### **(f) 若手研究者育成への貢献度**

多くの研究者を巻き込んだ観測体制を構築し、その中で若手研究者の育成がなされた。