

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2014

課題番号：22340050

研究課題名(和文)SDSS大規模分光探査による銀河形成史の解明と宇宙論の精密化

研究課題名(英文)Study of galaxy formation history and precise cosmology by SDSS massive spectroscopic survey

研究代表者

安田 直樹 (Yasuda, Naoki)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授

研究者番号：80333277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：銀河の宇宙の中での分布には、宇宙がどのように始まり、進化してきたかの情報が含まれている。Sloan Digital Sky Survey III に参加し、10,000平方度の広領域サーベイにより赤方偏移0.7までの銀河のスペクトル150万個を取得した。バリオン音響振動(宇宙の晴れ上がりの時の音波)スケールから赤方偏移0.57(約60億光年)までの距離を1%の精度で決定した。この測定により、宇宙は平坦で宇宙定数が必要であることが確認された。銀河の分布だけでなく、弱重力レンズも同時に利用することにより、銀河とダークマターハローの質量の関係と宇宙論パラメータを分離して求めることができた。

研究成果の概要(英文)：The origin of the universe and how the universe has evolved are imprinted in the distribution of the galaxies. We have joined Sloan Digital Sky Survey III and taken spectrum of 1.5 million galaxies up to redshift of 0.7 distributed over 10,000 square degrees on the sky. The measurement of Baryon Acoustic Oscillation (sound wave scale at cosmic recombination) scale based on this dataset determined the distance to redshift 0.57 (~6 billion light-years) with 1% accuracy. This measurement confirms the universe is a flat universe with cosmological constant. The simultaneous analysis of the weak lensing signal together with galaxy clustering information give us the galaxy and dark matter halo relation and the cosmological parameters without degeneracy.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙物理 光学赤外線天文学

1. 研究開始当初の背景

広領域撮像分光サーベイである Sloan Digital Sky Survey (SDSS) が 2000 年から 2008 年にかけて日本の研究グループも参加して実行された。このサーベイにより得られた撮像、分光データはこれまでに得られたデータを大きく凌駕し、宇宙の進化の理解において決定的に重要な役割を果たした。また、天文学、天体物理学に対する広域探査(サーベイ)観測の重要性を実証するものであった。SDSS で得られた成果には銀河、クエーサーの性質と進化、また、それらをプローブとした宇宙論が代表的なものとして挙げられる。

2. 研究の目的

SDSS を引き継ぎ、さらなる高精度化・大規模化を目指した銀河・恒星の大規模分光サーベイ探査 SDSS-III の実施とデータ解析を行う。SDSS で発見された物理現象を精密化するとともに、宇宙の構成要素である各種天体の進化と、それらの現在での様相の探求、そして、それらを支配する物理の理解を目的とし、銀河形成史の解明と宇宙論の精密化を図る。

SDSS は銀河の空間分布中に、初期宇宙プラズマ状態の粗密波(音波)を起源とする特徴的な銀河間相関(密度ピーク)があること(Baryon Acoustic Oscillation, BAO)を発見した。この粗密波による物質分布の揺らぎが、後の宇宙構造を形作る。BAO の発見が、特に重要なのは、この密度ピークがプラズマ中を伝わる音波の伝達距離に対応するために、その長さを正確に予測することができる物理的距離(標準距離指標)として使えることである。その結果、SDSS の $z \sim 0.3$ (z は赤方偏移)での BAO の観測より宇宙空間は 3% の誤差以内で平坦($\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1.01 \pm 0.03$)であることが導かれた。本研究ではこの SDSS で発見された BAO の測定をより精密化すると共に、より高い赤方偏移 $z=0.7$ および $z=2.5$ (クエーサーの吸収線を用いる)で測定し、宇宙論パラメータの決定制度を上げ、現在の宇宙のエネルギーの 72% を占めている暗黒エネルギーの正体への理解の手がかりとする。

3. 研究の方法

SDSS-III は米国を中心とする約 20 の大学、研究機関が参加して国際共同研究として進める観測プロジェクトであり、その 1 メンバーとして参加する。SDSS-III のプログラムのうち、BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey) のデータを主に使って、宇宙論の研究を行う。BOSS では、BAO による宇宙論パラメータの決定を主目的として、SDSS-I/II で観測した撮像データに基づ

いて 10,000 平方度に分布する $z=0.7$ までの LRG (Luminous Red Galaxies) 約 150 万個と $2.2 < z < 3$ のクエーサー約 16 万個の波長分解能 2000 のスペクトルを波長 360-1000nm の範囲で取得する。BOSS サーベイから得られる銀河の空間分布を精密に統計解析することで、観測的宇宙論最大の課題である、宇宙進化を記述する基本統計量「宇宙論パラメータ」をこれまでにない精度で測定する。具体的には、100 億光年にもおよぶ大領域内の銀河分布のパワースペクトル解析と空間相関関数の解析を行い、宇宙の物質密度、時空の曲率構造、暗黒エネルギーの状態方程式など重要なパラメータを現在の数倍から数十倍の精度で測定する。暗黒エネルギーの密度が時間不変か進化するかについても精度の高い制限を得る。銀河分布を用いた解析は重力レンズ観測や遠方超新星の観測など宇宙論パラメータを決定する他の観測手法とは相補的な役割を果たす。また、LRG は星が光って見えているものであるが、クエーサーを背景光源とした吸収線系としてクエーサーより観測者側の宇宙空間に存在する水素ガス雲の分布を調べることが可能である。十万個以上ものクエーサー吸収線系の解析から宇宙空間を満たす銀河間物質の物理状態やその進化を解明し、水素ガス雲の空間分布のパワースペクトルを測定することでインフレーションモデルやニュートリノ質量に対する新たな制限を与える。

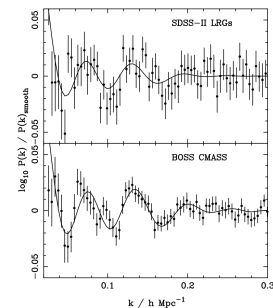
4. 研究成果

(1) 観測の完了とデータの公開

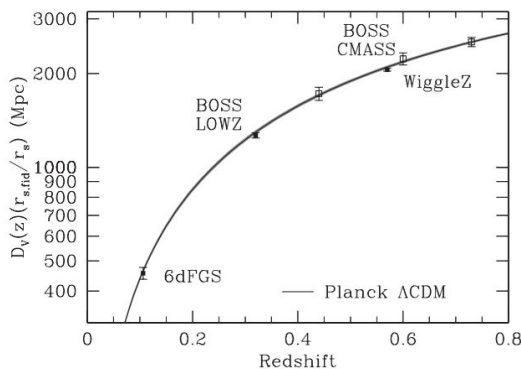
SDSS-III の観測は 2014 年 7 月に完了し、全天の約 4 分の 1 にあたる、9,376 平方度の範囲に分布する銀河約 140 万個、クエーサー約 16 万個のスペクトルを得た。SDSS-I/II で得られたスペクトルも合わせると、銀河約 240 万個、クエーサー約 48 万個、星約 85 万個のスペクトルが得られたことになる。これらのデータは Data Release 12 として <http://www.sdss.org/dr12> で公開されている。

(2) BAO による宇宙論パラメータの制限

右の図は SDSS-III の一部のデータだけを使ったものであるが、銀河のパワースペクトルを計算したものである。上のパネルが SDSS-I/II で得られたデータを使った場合、下のパネルが BOSS のデータを使った場合である。見て分かるように BOSS の結果は以前の結果に比べて、誤



差が非常に小さくなっている。これは以前のデータは近傍の銀河 ($z \sim 0.35$) を観測しているのに対して、BOSS はより遠方の銀河 ($z \sim 0.57$) を観測しており、サンプルしている体積が増えていることとより暗い銀河までして銀河の総数が増えていることによる。この図のピークの位置から BAO のスケールが決まり、それを距離指標として、この redshift までの距離を測定することができる。BOSS のデータでは、 $z=0.57$ での距離が $2056 \pm 20\text{Mpc}$ と 1% の精度で決めることができた。これは、銀河サーベイでの距離測定としては最高精度の測定である。



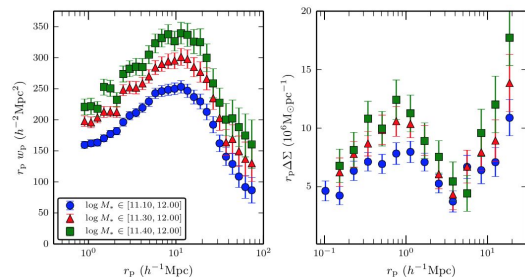
上の図はこのようにして BAO の測定で求めた距離を redshift についてプロットしたもので、BOSS での結果はこれまでの他の観測結果と矛盾なく、実線で示された Planck 衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測による平坦な Λ CDM (宇宙定数のある冷たいダークマター) モデルとよく一致することが確認された。

(3) 弱重力レンズ効果の測定を組み合わせた解析

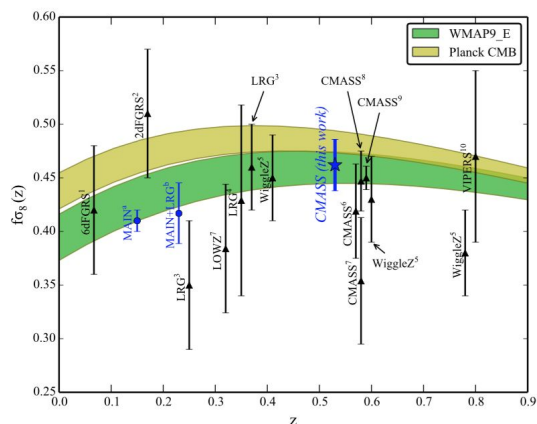
銀河の 2 体相関関数などの観測量から宇宙論パラメータを制限することができるが、銀河とダークマターが同じように分布しているわけではなく、銀河の性質や空間スケールによってその分布の仕方は違っていることが知られている。この問題を解決するためには、銀河の質量とダークマターハローの質量の関係を知る必要がある。重力的に平衡状態にある系であれば、力学的な性質からダークマターハローの質量を知ることができるが、すべての銀河が平衡状態にあるわけではない。弱重力レンズ効果を使うと多くの仮定をおくことなくダークマターハローの質量を決めることができる。つまり、弱重力レンズ効果と銀河の相関関数を同時にフィットすることで、銀河とダークマターハローとの関係と宇宙論パラメータを同時に解くことができる。

BOSS の銀河のうち、 $0.47 < z < 0.59$ のに存在し、星質量が $11.1 < \log M_* < 12.0$ の範囲の銀河を選択して、銀河の 2 対相関関数を求めた。また、CFHT 重力レンズサーベイ (CFHTLenS) のデータを使い、BOSS の銀河よりも遠いところにあ

るより暗い銀河の形の情報を使って弱重力レンズ効果を測定した。ただし、BOSS の銀河は約 8300 平方度の範囲に分布しているのに対して、CFHTLenS のデータはそのごく一部 105 平方度についてだけ利用することができた。測定結果は以下のようにになっている。色の違いは銀河の星質量の違うサンプルを表している。



これらの測定結果を同時に説明できるように、HOD (Halo Occupation Distribution: ある質量のダークマターハローに存在する銀河の個数の関係) パラメータと宇宙論パラメータをフィットする。下図は、宇宙論パラメータのひとつである宇宙の密度揺らぎの振幅 (σ_8) 示しているが、この結果は弱重力レンズ効果を組み合わせた測定 (青で表示) の中ではもっとも遠くの redshift の値を与えている。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 14 件)

Aihara, H. et al. (Yasuda, N.) The Eighth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Data from SDSS-III, The Astrophysical Journal Supplement, 193, 29-45, 2011, 査読あり

Bundy, K. et al. (Yasuda, N.) SYNMG Photometry: A Fast Tool for Catalog-level Matched Colors of Extended Sources, The Astronomical

Journal, 144, 188, 2012, 査読あり
Nishizawa, A., Oguri, M. and Takada, M.,
Baryon acoustic oscillations with the
cross-correlation of spectroscopic
and photometric samples, Monthly
Notice of the Royal Astronomical
Society, 433, 730-739, 2013, 査読あり
More, S. et al. (Takada, M.), The Weak
Lensing Signal and the Clustering of
BOSS Galaxies. II. Astrophysical and
Cosmological Constraints, The
Astrophysical Journal, 806, 2, 2015,
査読あり

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.sdss3.org>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 直樹 (YASUDA, Naoki)
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・
教授
研究者番号：80333277

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

相原 博昭 (AIHARA, Hiroaki)
東京大学・理学系研究科・教授
研究者番号：60167773

高田 昌広 (TAKADA, Masahiro)
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・
教授
研究者番号：40374889

吉田 直紀 (YOSHIDA, Naoki)
東京大学・理学系研究科・教授
研究者番号：90377961

嶋作 一大 (SHIMASAKU, Kazuhiro)
東京大学・理学系研究科・准教授
研究者番号：00251405

土居 守 (DOI, Mamoru)
東京大学・理学系研究科・教授
研究者番号：00242090