

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540324

研究課題名(和文)次世代大規模宇宙探査に向けた広域重力レンズ光伝搬数値実験技法の開発

研究課題名(英文)Development of a wide field gravitational lensing ray-tracing numerical simulation technique for next generation surveys

研究代表者

浜名 崇(Hamana, Takashi)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：70399301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、広域重力レンズray-tracing技法を開発した。広域に渡るray-tracingを可能にするために、球面レンズ面近似を導入した。これにより全天に渡る重力レンズray-tracingが可能となり、本研究計画の目的の一つである全天重力レンズray-tracing技法の開発が達成できた。広域重力レンズray-tracingのための宇宙論的N体計算を実施した。計算には、筑波大学と国立天文台の共同利用大型計算機を利用した。宇宙論的N体計算によって作成した宇宙の密度分布に対し、全天重力レンズray-tracingを実施し、全天重力レンズデータを作成した。

研究成果の概要(英文)：In this research project, I have developed a wide field gravitational lensing ray-tracing numerical simulation technique. We introduced a spherical thin shell lens plane approximation, which enable us to perform a full sky ray-tracing. Thus the primary purpose of this project was achieved successfully. I made a computer program of the full sky ray-tracing simulation in which the new technique was implemented. Using open-use super-computer facilities at Tsukuba University and National Astronomical Observatory Japan, we performed a series of cosmological N-body simulations. And then using the matter distribution in the universe generated by the N-body simulations, we performed the full-sky gravitational lensing ray-tracing simulations. I generated two sets of full-sky gravitational lensing simulation data.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：観測的宇宙論

1. 研究開始当初の背景

宇宙の進化史の解明を目的とした大規模深銀河可視撮像サーベイ(例えば、すばる望遠鏡次期主焦点カメラ Hyper SuprimeCam による1,500平方度サーベイや、Large Synoptic Survey Telescope による20,000平方度サーベイ)や宇宙背景放射偏光観測が計画されている。前者の主要科学目的の一つは、大規模構造による重力レンズ効果を用いた宇宙進化史の解明である。一方後者のそれは、宇宙背景放射のBモード偏光のスペクトラムからインフレーションの物理機構を探るものであるが、そのさい宇宙背景放射が手前の構造から重力レンズ効果を受ける事により引き起こされるBモード偏光(これは従ってインフレーション起源ではない)を正確に補正する技術が重要となる。

一方理論サイドでは、それら観測データを適切に解析し理解するため、理論モデルの精密化や数値実験手法の開発といった理論研究基盤の整備が精力的に行われている。その中で本研究計画に特に関係するのは、(1)大規模構造による重力レンズ効果の高精度理論モデルの構築、(2)疑似観測データの作成、の2点である。(1)については現在までにかなりの進展があったが不十分な点も多い。主な未解決分野は、計算に膨大なシミュレーションデータを必要とするもの(重力レンズ効果の統計量の共分散行列など)と、ダークマター構造と銀河分布の関係(いわゆる銀河バイアス)の情報を必要とするものである。(2)は、理論モデルの検証、観測計画(観測領域や積分時間)の最適化、解析ソフトの開発や較正などに必要とされる。こういった研究には観測計画のサーベイサイズに応じたシミュレーションデータが要求されるので、千平方度以上に渡る疑似データが必要とされるようになってきた。こういった状況の中で、広域に渡る重力レンズ ray-tracing シミュレーション技法の開発が急務となっている。以上が本研究計画開始当初の背景の概要である。

2. 研究の目的

本研究の達成目標は以下の2項目である。第一は、計算可能領域に限界のない(全天シミュレーションまで可能な)重力レンズ ray-tracing 技法の開発とその数値シミュレーションへの実装である。開発した技法とその実装プログラムは公開する計画である。重力レンズ ray-tracing は、別に行われた大規模N体計算の結果として得られた物質分布(実際にはN体粒子分布)が作る重力ポテンシャル中での光の伝搬を計算するわけであるが、出来るだけ様々なN体計算結果(従って多数の研究者)に適用できるような ray-tracing 技法を開発する。従って、出来るだけN体計算

や計算機環境に依存しない汎用的な技法の開発を目指す。

第二は、広域重力レンズ ray-tracing シミュレーションを実施し、広域重力レンズ ray-tracing シミュレーションデータベースを作成し、公開することである。

3. 研究の方法

本研究では、光の伝搬の基礎方程式である null 測地線方程式(光の運動方程式)と、微小光束断面積の伝搬に伴う発展方程式である測地線偏差方程式を出来るだけ直接的に解く技法を開発することを目指す。さらに光の波長に生じる重力レンズ効果も取り込む事も目指す。これらの方程式を解くために必要な情報は、重力ポテンシャルの1階微分(重力)と2階微分(潮汐力)それと光の初期方向(これは任意に与える)である。これら基礎方程式を数値計算プログラムに書き換える際に検討しなければならない重要点は以下の2つである。第一は重力ポテンシャルをどのように計算するかという事である。方法としては、N体計算で使われている重力ポテンシャル情報を利用する(各粒子の位置で重力ポテンシャルが与えられる)、あるいは適当に設置した格子点でN体粒子の分布情報から計算する、という2つの方法が考えられる。これは、第2の検討点である運動方程式(微分方程式)をいかなる形式の差分方程式で解くか、という問題とも関連する。これらを慎重に検討して広域重力レンズ ray-tracing 技法の開発を進める。

数値計算技法の開発が完成したら、その実装とテストを行う(実際には技法の細部についてはテスト結果を参照しつつ開発を進めることになる)。テスト計算には、比較的小規模なN体計算データを用いる。

広域重力レンズ ray-tracing シミュレーション実施のためには、大規模N体シミュレーションによる宇宙論的体積(数十立方ギガパーセク)のダークマター分布データを準備する必要がある。この大規模N体シミュレーションは、国立天文台等で共同利用に提供している大型計算機資源を利用して実施する。

N体シミュレーションのデータが出来次第、広域重力レンズ ray-tracing シミュレーションを実施する。広域シミュレーションになったことにより生成されるデータセット

のサイズも膨大になるので、その後の利用に便利なデータフォーマットを策定し、データ読み込み及び可視化のソフトウェアを整備する。

4. 研究成果

本研究では、まず広域重力レンズray-tracing技法を開発した。広域に渡るray-tracingを可能にするために、従来の天空面を平面として近似する方法から球面のまま扱う球面レンズ面近似を導入した。また密度場から重力ポテンシャルを計算する手法に球面調和展開を用いることで、全天に渡る重力レンズray-tracingが可能となり、本研究計画の目的の一つである全天重力レンズray-tracing技法の開発が達成できた。

広域重力レンズray-tracingのための宇宙論的N体計算を実施した。宇宙論的N体計算には、従来より用いているGadget-2と、筑波大学の石山氏が開発したGreeMを用いた。GreeMは、Gadget-2より計算速度が2倍以上早く計算効率の向上につながった。計算には、筑波大学と国立天文台の共同利用大型計算機を利用した。

宇宙論的N体計算によって作成した宇宙の密度分布に対し、全天重力レンズray-tracingを実施し、全天重力レンズデータを作成した。作成したデータセットは2種類あり、一つは、同一の宇宙モデルについて角度分解能約1分角のデータを異なる初期条件について10セット作成した。もう一つは、二種類の異なる宇宙モデルについて角度分解能約0.3分角の高分解能のデータである。この成果は、「国立天文台ニュース」2013年11月号においても報告している。前者は、大規模サーベイ観測の疑似データ作成への応用を主目的としており、後者は重力レンズを用いた宇宙論研究への応用を主目的としている。

計算精度のチェックのためにシミュレーションデータから重力レンズ密度場のパワースペクトラムを測定し、理論モデルとの比較を行った。その結果、計算が正しく行われると予想されているスケールにおいて、非線形構造形成効果を取り入れた理論モデルとの良い一致が確認された。このことより、開発した全天重力レンズray-tracingコードが予定通りの性能を出している事が確認できた。

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9件)

(1) Hamana, T., Miyazaki, S., Okura, Y., Okamura, T., Futamase, T., Toward Understanding the Anisotropic Point Spread Function of Suprime-Cam and Its Impact on Cosmic Shear Measurement, Publications of the Astronomical

Society of Japan, Vol.65, 104, 2013, DOI: 10.1093/pasj/65.5.104, 査読有り
(2) Shirasaki, M., Yoshida, N., Hamana, T., Effect of Masked Regions on Weak-lensing Statistics, The Astrophysical Journal, Vol.774, 111, 2013, DOI: 10.1088/0004-637X/774/2/111, 査読有り
(3) Higuchi, Y., Oguri, M., Hamana, T., Measuring the mass distribution of voids with stacked weak lensing, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.432, 1021-1031, 2013, DOI: 10.1093/mnras/stt521, 査読有り
(4) Shirasaki, M., Yoshida, N., Hamana, T., Nishimichi, T., Probing Primordial Non-Gaussianity with Weak-lensing Minkowski Functionals, The Astrophysical Journal, Vol.760, 45, 2012, DOI: 10.1088/0004-637X/760/1/45, 査読有り
(5) Hamana, T., Oguri, M., Shirasaki, M., Sato, M., Scatter and bias in weak lensing selected clusters, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.425, 2287-2298, 2012, DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21582.x, 査読有り
(6) Takahashi, R., Oguri, M., Sato, M., Hamana, T., Probability Distribution Functions of Cosmological Lensing: Convergence, Shear, and Magnification, The Astrophysical Journal, Vol.742, 15- 2011, DOI: 10.1088/0004-637X/742/1/15, 査読有り
(7) Oguri, M., Hamana, T., Detailed cluster lensing profiles at large radii and the impact on cluster weak lensing studies, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.414, 1851-1861, 2011, DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.18481.x, 査読有り
(8) Sato, M., Takada, M., Hamana, T., Matsubara, T., Simulations of Wide-field Weak-lensing Surveys. II. Covariance Matrix of Real-space Correlation Functions, The Astrophysical Journal, Vol.734, 76- 2011, DOI: 10.1088/0004-637X/734/2/76, 査読有り
(9) Bellagamba, F., Maturi, M., Hamana, T., Meneghetti, M., Miyazaki, S., Moscardini, L., Optimal filtering of optical and weak lensing data to search for galaxy clusters: application to the COSMOS field, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.413, 1145-1157, 2011, DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.18202.x, 査読有り

〔学会発表〕 (計7件)

(1) 浜名崇、弱い重力レンズ効果で検出された銀河団のX線放射の性質、日本天文学会2

- 014年春季年会、2014年3月20日、国際基督教大学（東京都）
- (2) 浜名崇、大規模重力レンズシミュレーションプロジェクト、日本天文学会2013年春季年会、2013年3月23日、埼玉大学（埼玉県）
- (3) 浜名崇、大規模重力レンズシミュレーションプロジェクト、第25回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」、2011年12月22日、つくば国際会議場（茨城県）
- (4) 浜名崇、重力レンズ現象と宇宙物理における応用例、画像逆問題の数値解析研究会、2012年10月15日、電気通信大学（東京都）
- (5) 浜名崇、重力レンズ効果による銀河団探査における形状バイアスの影響、日本天文学会2012年秋季年会、2012年9月21日、大分大学（大分県）
- (6) 浜名崇、SuprimeCamデータによるcosmic shear解析、日本天文学会2012年春季年会、2012年3月22日、龍谷大学（京都府）
- (7) 浜名崇、大気乱流によるPSF歪みが重力レンズ解析に及ぼす影響、日本天文学会2011年秋季年会、2011年9月20日、鹿児島大学（鹿児島県）

〔その他〕

ホームページ等

<http://th.nao.ac.jp/MEMBER/hamanatk/RAYTRIX/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜名 崇 (HAMANA, Takashi)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：70399301