

大規模重力レンズシミュレーション プロジェクト

浜名崇（国立天文台）

白崎正人（東京大）、高橋龍一（弘前大）、吉田直紀（東京大）

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1.背景説明2.従来の重力レンズシミュレーションの解説と成果3.全天重力レンズシミュレーション4.まとめ |
|---|

科研費基盤C：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



2012/12/12 CfCA UM @三鷹



なぜ重力レンズ数値シミュレーション？

✓重力レンズ現象

- 宇宙論、構造形成研究の強力な手段

✓準～強非線形構造形成

- ハローの構造
- 非軸対称性
- サブストラクチャー

✓非Gaussian性

- 高次統計量による宇宙論
- 共分散行列の評価

✓視線方向の複数の天体による

レンズ効果

- lens-lensカップリング
- 強いレンズ現象のモデル

✓疑似観測データ

- サーベイシミュレーション

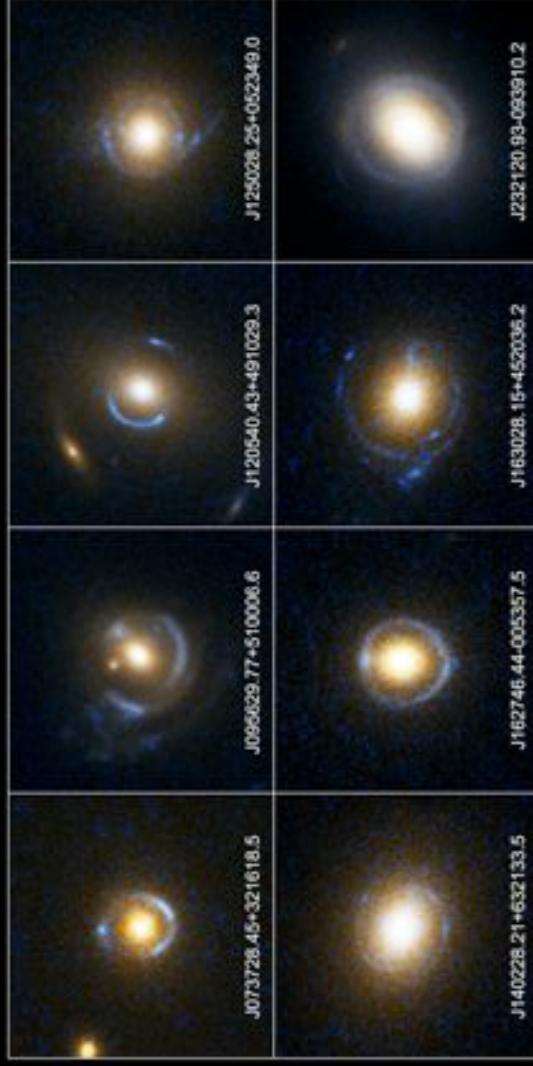
研究における重要なツール



Galaxy Cluster Abell 2218

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

HST • WFPC2



Einstein Ring Gravitational Lenses
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

アルゴリズム

- 基本方程式

- null測地線方程式

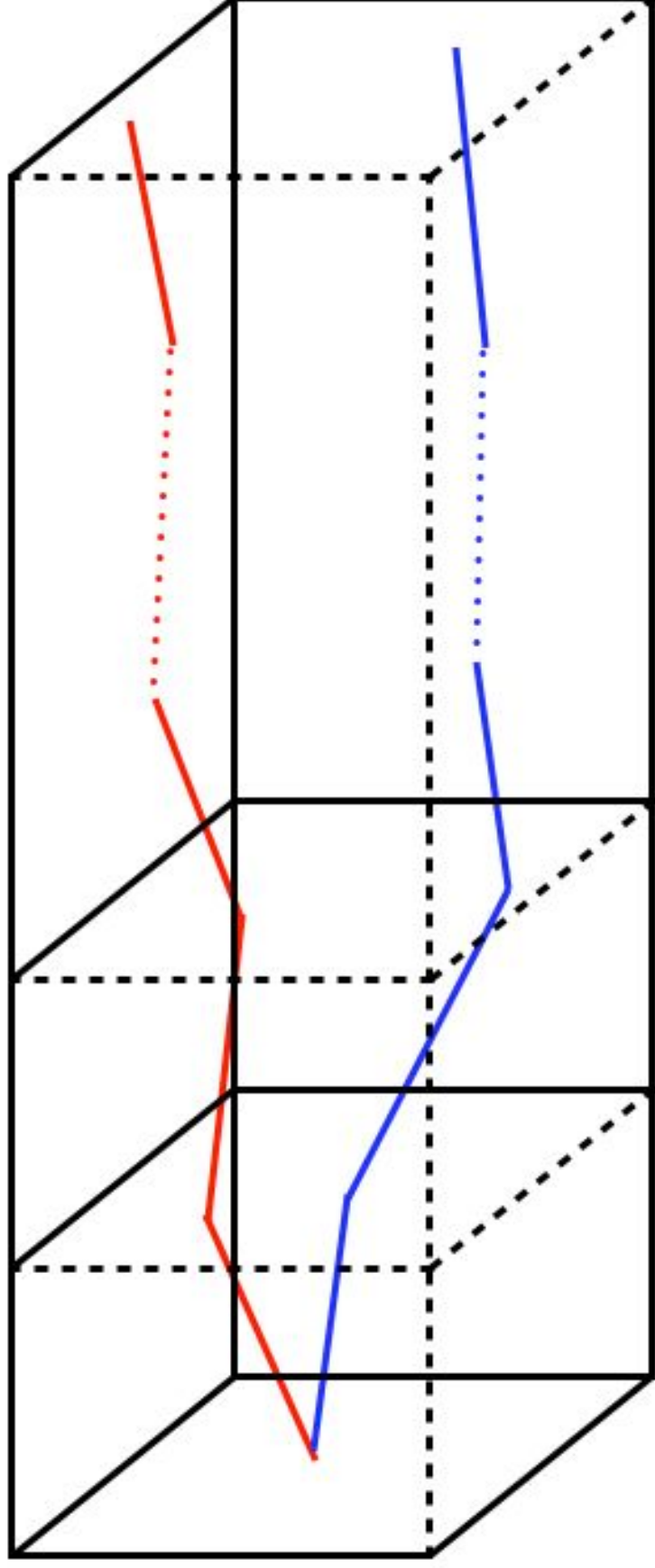
- 測地線偏差方程式

3次元→2.5次元

- 近似

- multiple lens-plane法

- 球面を平面近似



ダークマター密度分布はN体計算を用いて作成

- N体データとの親和性

- FFTを用いた密度場ポテンシャルの高速計算

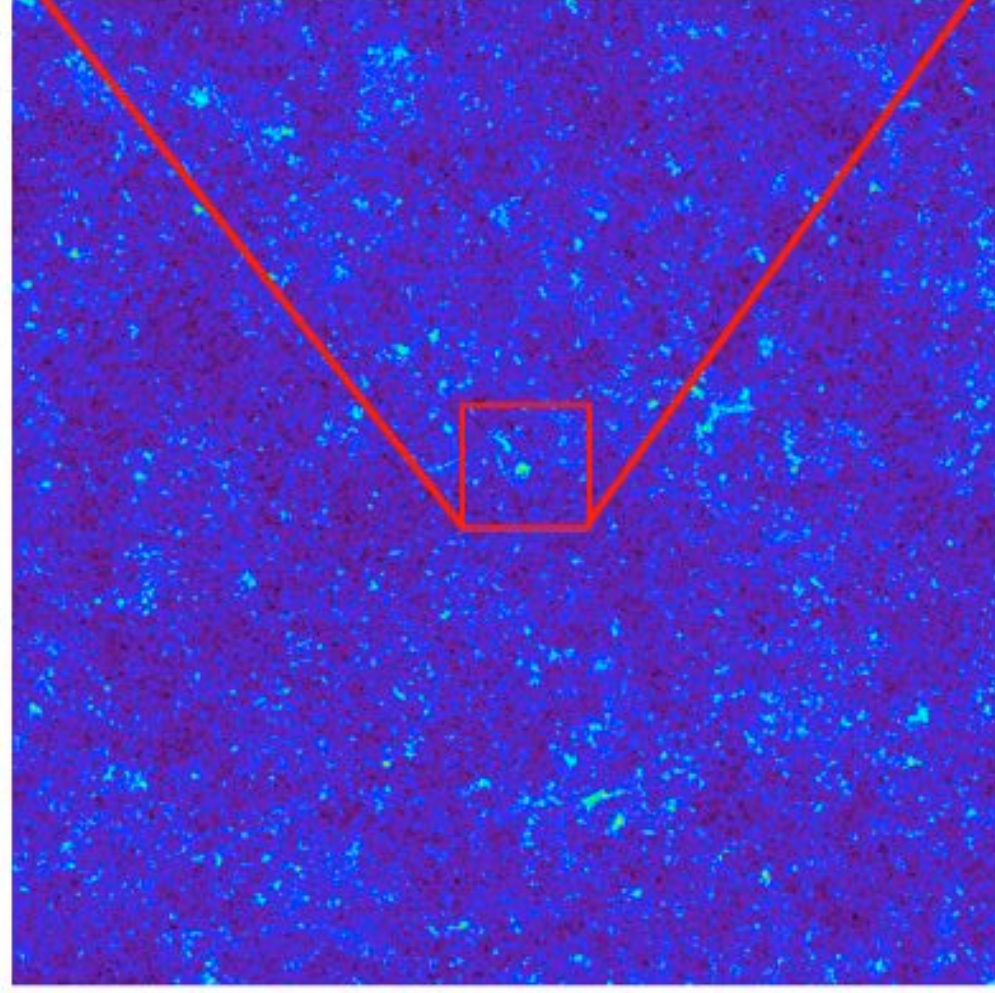
RAYTRIX

アウトプット

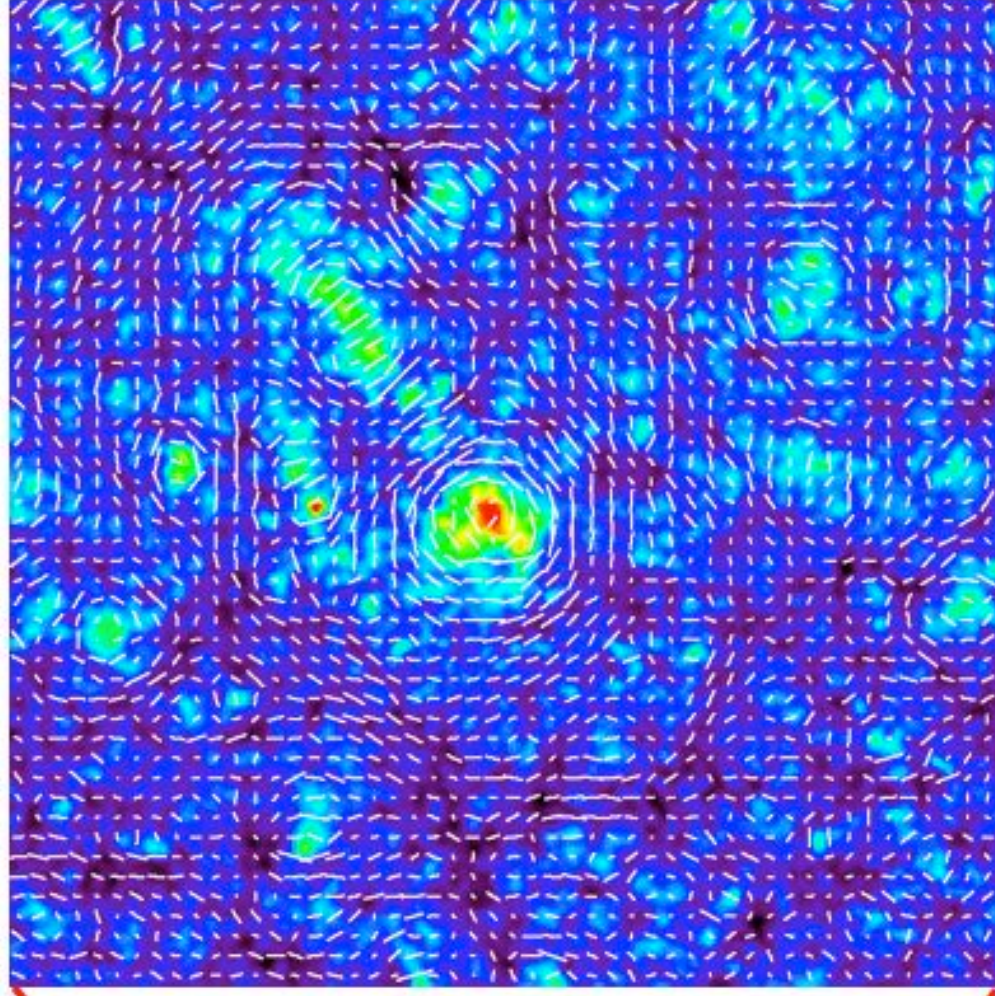
- 計算可能領域 = $\sim 5^\circ \times 5^\circ$ 以下（平面近似による限界）
- 角度分解能 = ~ 0.2 分角（N体計算の空間分解能による）
- 出力データ
 - 光の軌跡
 - 微小光束の変形
 - lensing convergence
 - shear
 - net rotation
 - flexion
- ダークマターハローの
 - 空間分布
 - 質量
 - 形状パラメータ

RAYTRIX

アウトプット



密度場

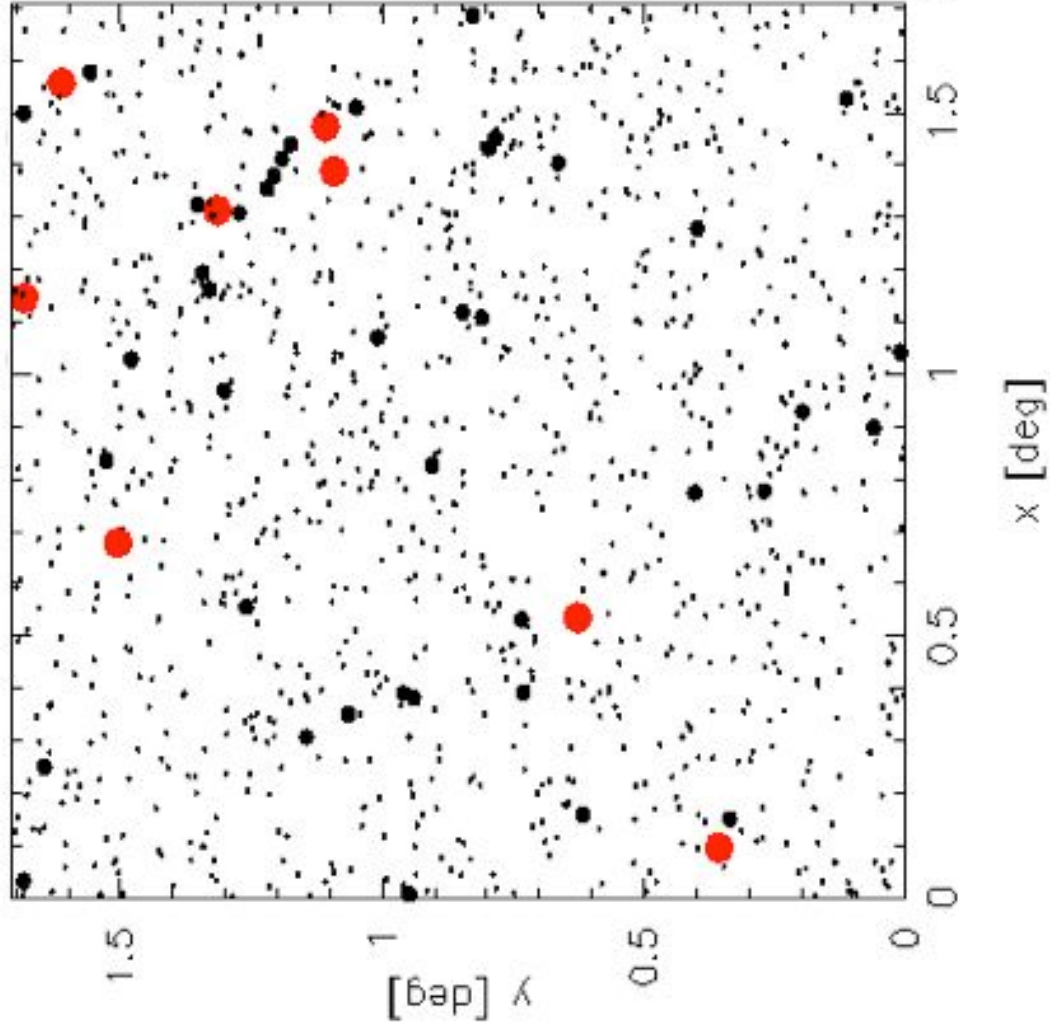


shear場

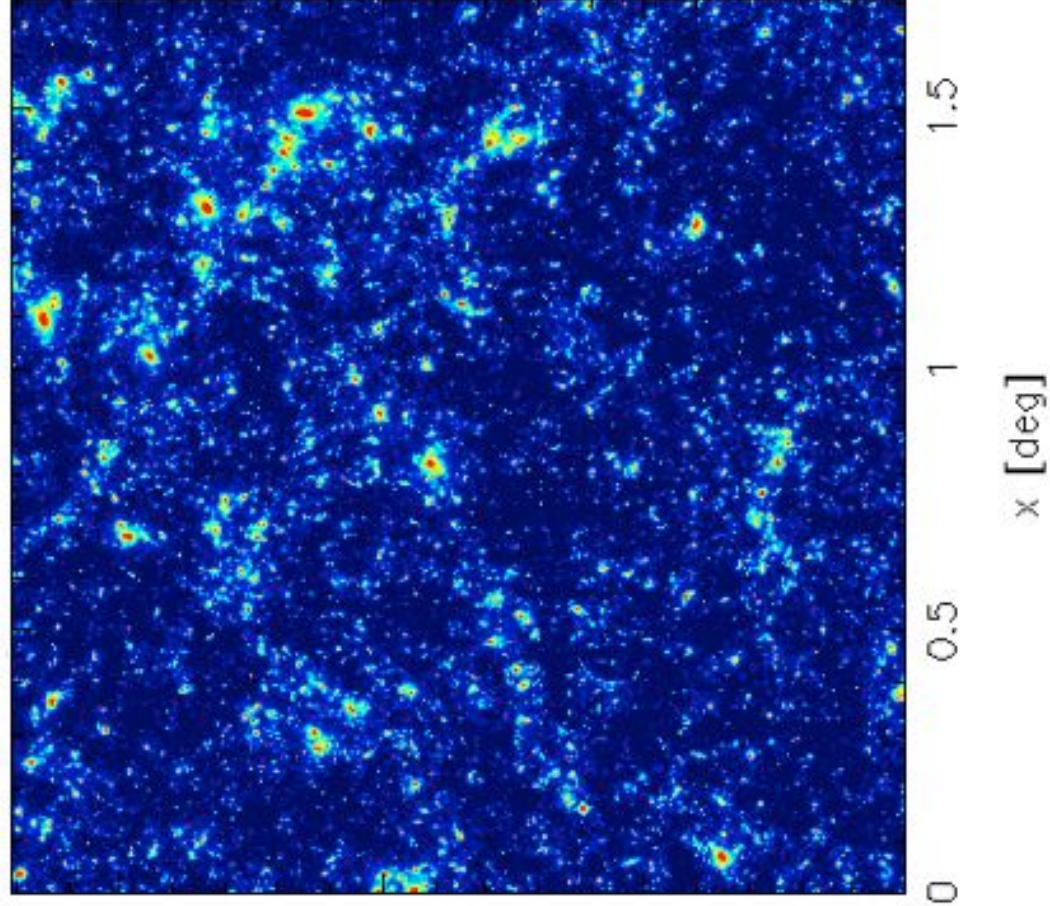


アウトプット

dark matter haloes



lensing mass



RAYTRIX

開発の歴史

2000

Paris : 256³ PM

面積=7x7deg²

分解能=～2分角

Virgo VLS : 512³ P³M

面積=4x4deg²

分解能=～0.5分角

nuG : 512³ AMR

面積=1.7x1.7deg²

分解能=～0.2分角

2010

Gadget : 256³ TreePM

1) 面積=5x5deg²

分解能=～0.5分角

2) 面積=1x1deg²

分解能=～0.1分角

Jain+2000

Virgo GIF : 256³ P³M

面積=1 x 1 deg²

分解能=～0.3分角

White&Hu 2000

256³ PM

面積=6 x 6 deg²

分解能=～2分角

Hilbert+2007

Millennium: 2k³

面積=10x10deg²

分解能=～0.1分角

Vale&White 2003

512³ TreePM

面積=2 x 2 deg²

分解能=～0.5分角

全天simulation

Das&Bode 2008

Teyssier+2009

Becker 2012

RAYTRIX

代表的成果

2000

2010

Paris : 256³ PM

面積=7x7deg²

分解能=～2分角

Virgo VLS : 512³ P³M

面積=4x4deg²

分解能=～0.5分角

nuG : 512³ AMR

面積=1.7x1.7deg²

分解能=～0.2分角

Gadget : 256³ TreePM

1) 面積=5x5deg²

分解能=～0.5分角

2) 面積=1x1deg²

分解能=～0.1分角

弱い重力レンズ効果の
低次統計量に対する
非線形構造形成の影響

弱い重力レンズ効果の歪
度や3点相関関数に対す
る非線形構造形成の影響

疑似重力レンズサーベイデータ

弱い重力レンズ効果の
非Gaussian共分散行列

弱い重力レンズ効果の
バイスペクトラムの
非Gaussian共分散行列

CMBのレンズ効果に対す
る非線形構造形成の影響

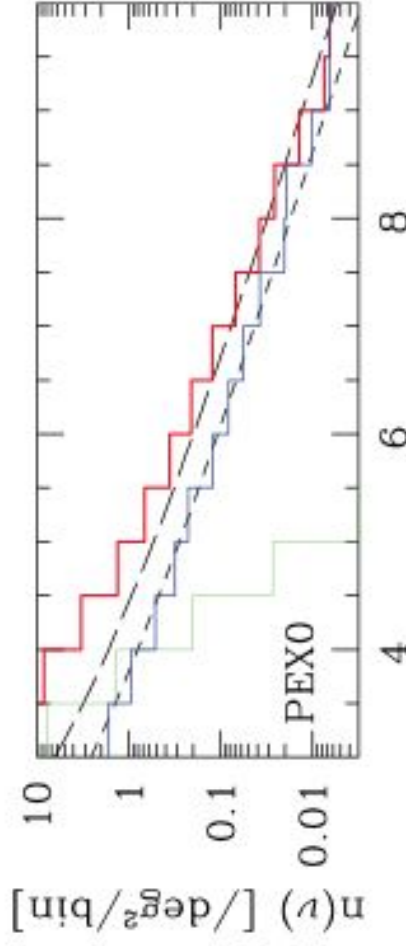
弱い重力レンズ効果を
用いた銀河団の研究

強い重力レンズ効果も考慮
した重力レンズ統計の研究
→高橋さん講演

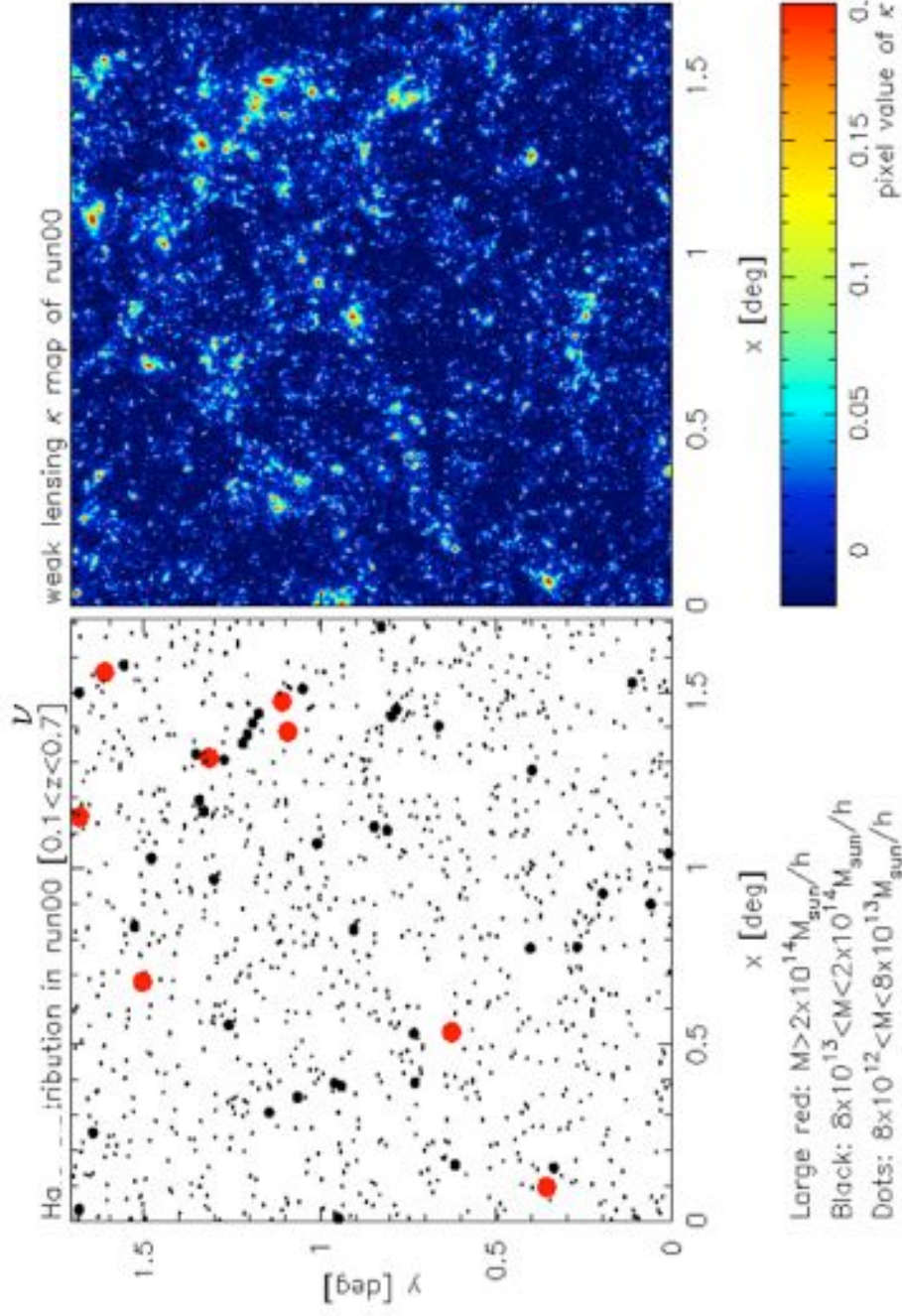
RAYTRIX

代表的成果

重力レンズによって検出された銀河団による宇宙論研究



重力レンズ効果によって検出され
る銀河団number counts精密モデル
→宇宙論パラメータ、非ガウス性

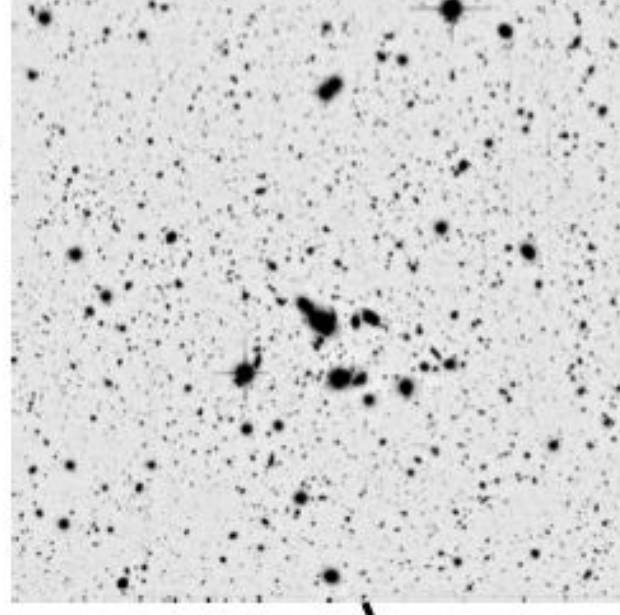
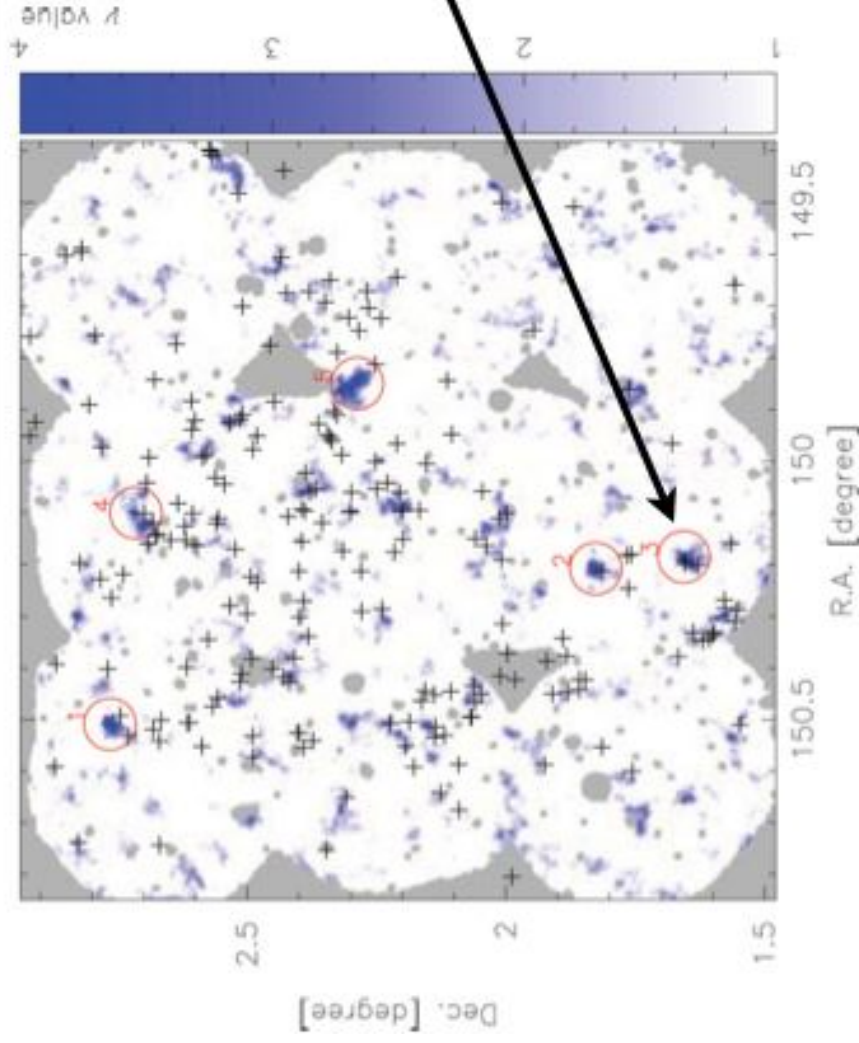


TH+2004, 2012

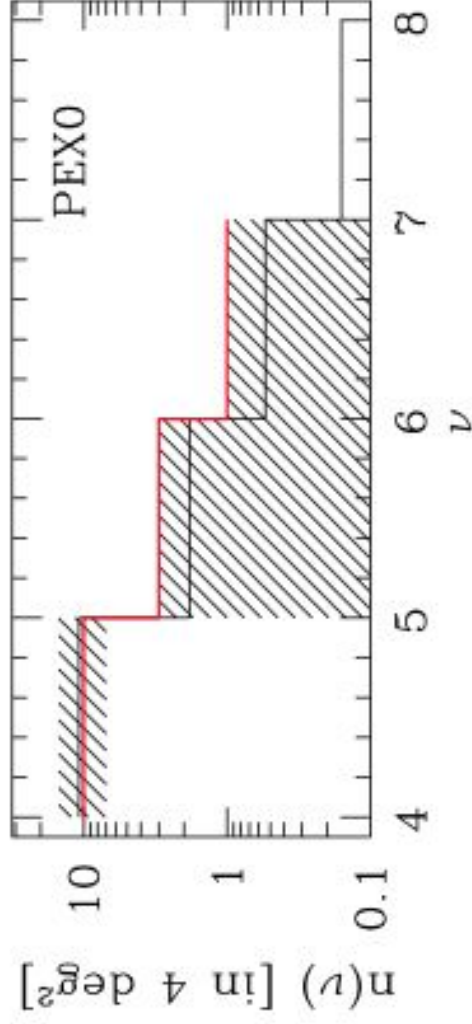


代表的成果

重力レンズによって検出された銀河団による宇宙論研究



重力レンズによって検出された
 $z=0.2$ の銀河団（可視画像）



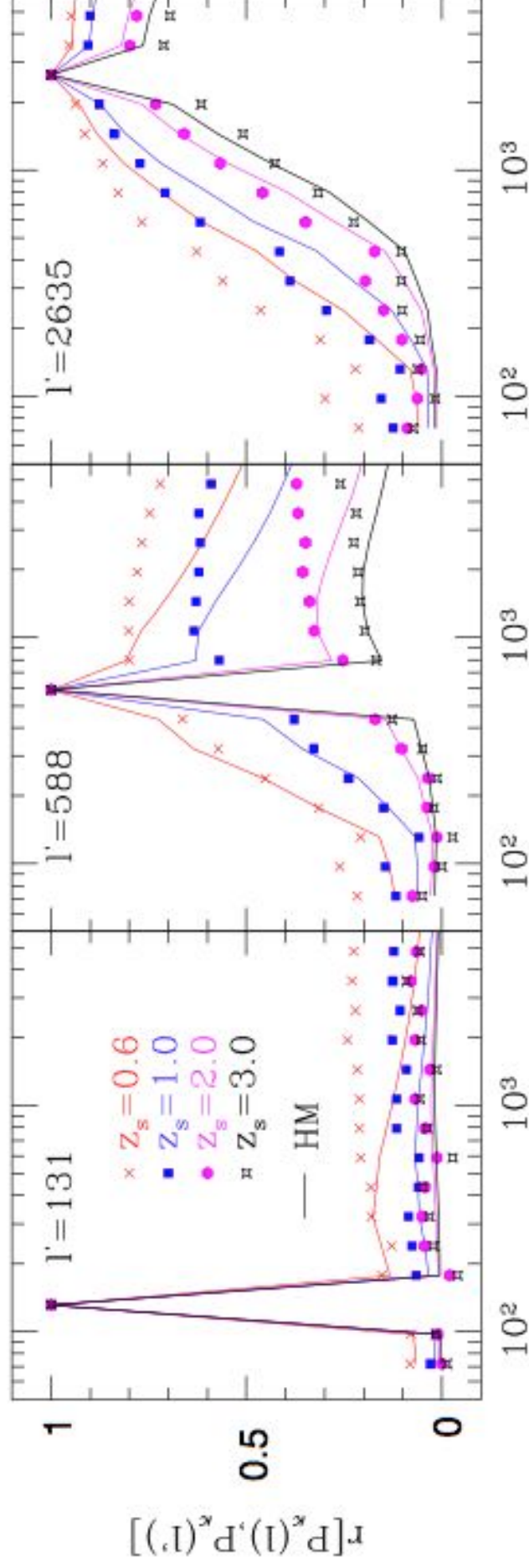
実際に重力レンズ効果によって
検出された銀河団number counts

RAYTRIX

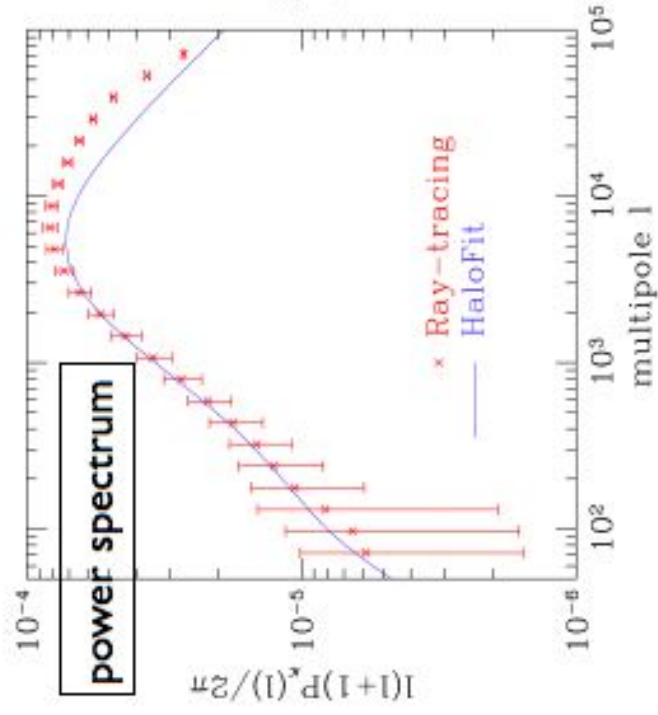
TH+2012

代表的成果

弱い重力レンズ効果の共分散行列



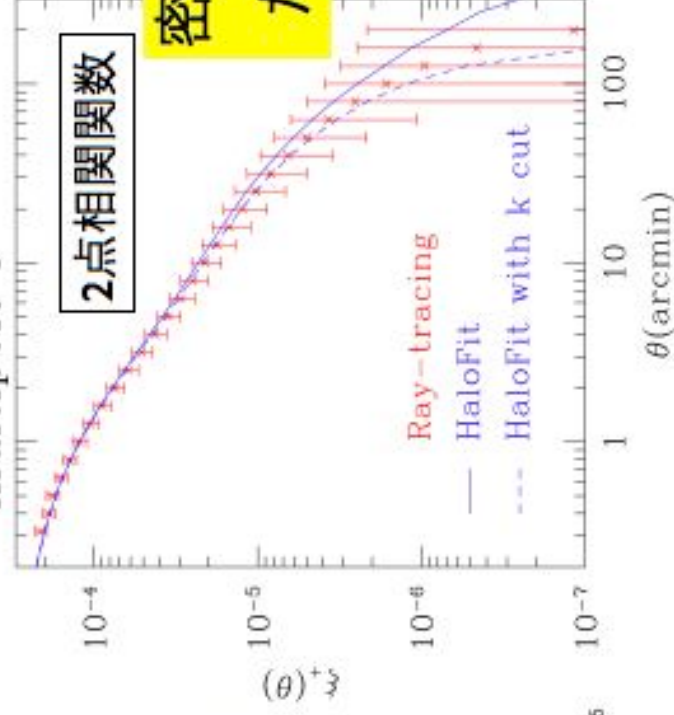
Sato+2009, 2011



multipole l

power spectrum

2点相関関数



密度場の非線形成長のため数値計算が必須

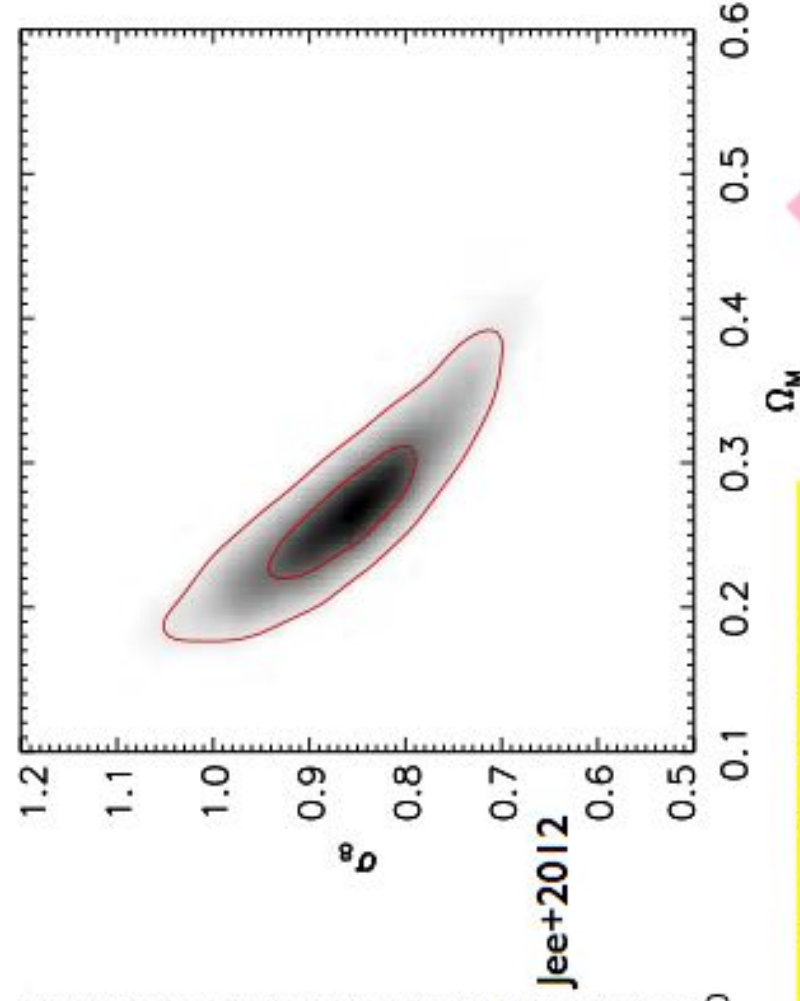
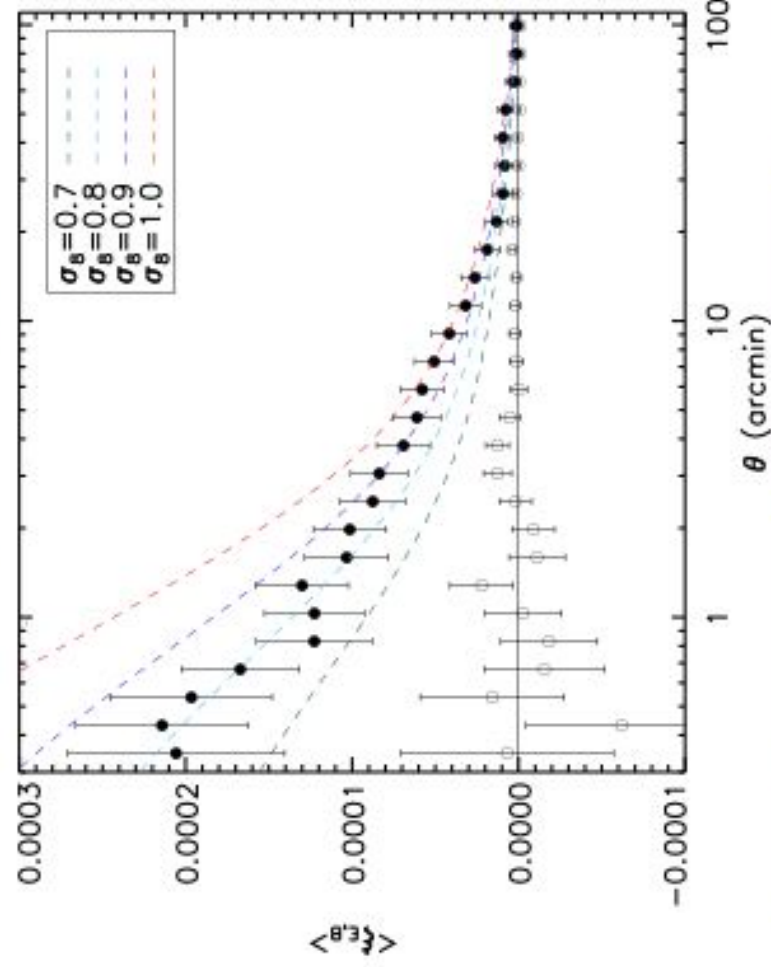
RAYTRIX

代表的成果

弱い重力レンズ効果の共分散行列

Deep Lens Survey (20平方度) の弱い重力レンズ相関関数の解析において佐藤らの共分散行列が用いられている

$$\mathcal{L} = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\mathbf{C}|^{1/2}} \exp \left[-0.5 (\hat{\xi} - \xi)^T \mathbf{C}^{-1} (\hat{\xi} - \xi) \right],$$



重力レンズ効果の観測情報から有用な情報を

取り出すために重力レンズシミュレーションは必須

RAYTRIX

疑似世界 vs 実世界

RAYTRIX

GRayTriX

重力レンズシミュレーション

1~100deg² → 2000 2010 2020 全天シミュレーション

重力レンズサーベイ

<10deg²

～数10deg²

150deg²

数千deg²

～全天

CFHT

CTIO

Subaru

DLS

CFHTLS

Subaru-HSC

Euclid-HSC

DES KIDS

LSST

重力レンズ相関関数

銀河団レンズ

CMBレンズ

Subaru-PFS

銀河分光サーベイ

eROSITA

X線全天サーベイ

PLANCK CMB全天サーベイ

LiteBird CMB偏光

なぜ全天重力シミュレーション？

- 観測データから科学的情報を取り出すための必須ツール
 - 可視、X線、CMB等の全天サーベイ
 - CMB lensing、CMB-大規模構造相関
 - 弱い重力レンズ相関関数による精密宇宙論
 - 銀河団による精密宇宙論／銀河団物理
- 観測プロジェクトの推進
 - 疑似サーベイ
 - 観測データ解析ソフトの開発
- 得意分野の継続的発展
 - 知識、技術、人材



アルゴリズム

- 基本方程式

- null測地線方程式

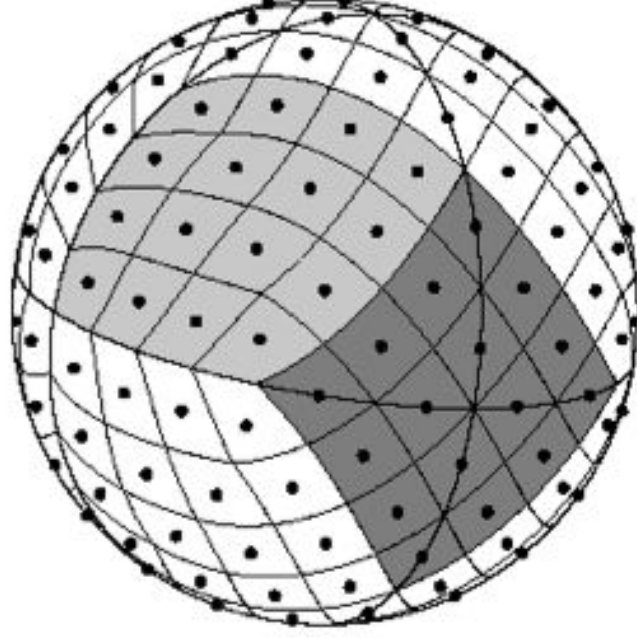
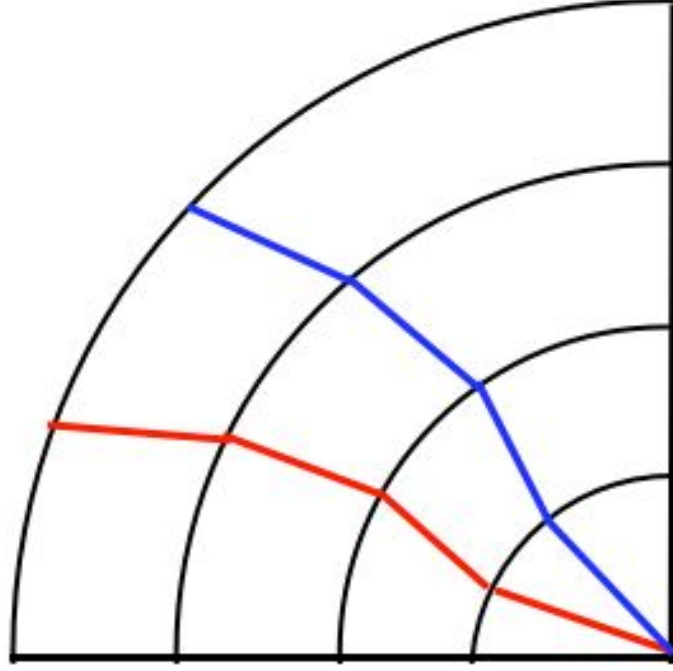
- 測地線偏差方程式

3次元 → 2.5次元

- 近似

- multiple lens-shell法

- Healpix分割



ダークマター密度分布はN対計算を用いて作成

- 球面調和関数展開を用いて密度場ポテン

シャルを計算

GrayTrix

アルゴリズム

＊必要とされるN体計算仕様

(A) 達成可能な角度分解能

要求される空間分解能=d

$$d \sim \theta_{res} \times r \sim \left(\frac{\theta_{res}}{1'} \right) \times \frac{L_{box}}{3500 \text{Mpc}/h}$$

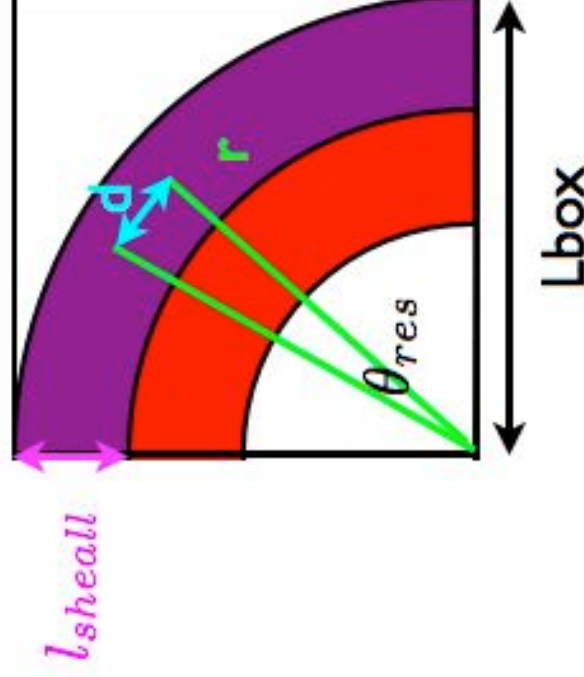
N体計算で得られる分解能

$$d \sim l_{mesh}/5 \sim L_{box}/N_p^{1/3}/5 \sim \frac{L_{box}}{10^4} \times \left(\frac{2048}{N_p^{1/3}} \right)$$

よって

$$\left(\frac{\theta_{res}}{1'} \right) \sim 0.3 \left(\frac{2048}{N_p^{1/3}} \right)$$

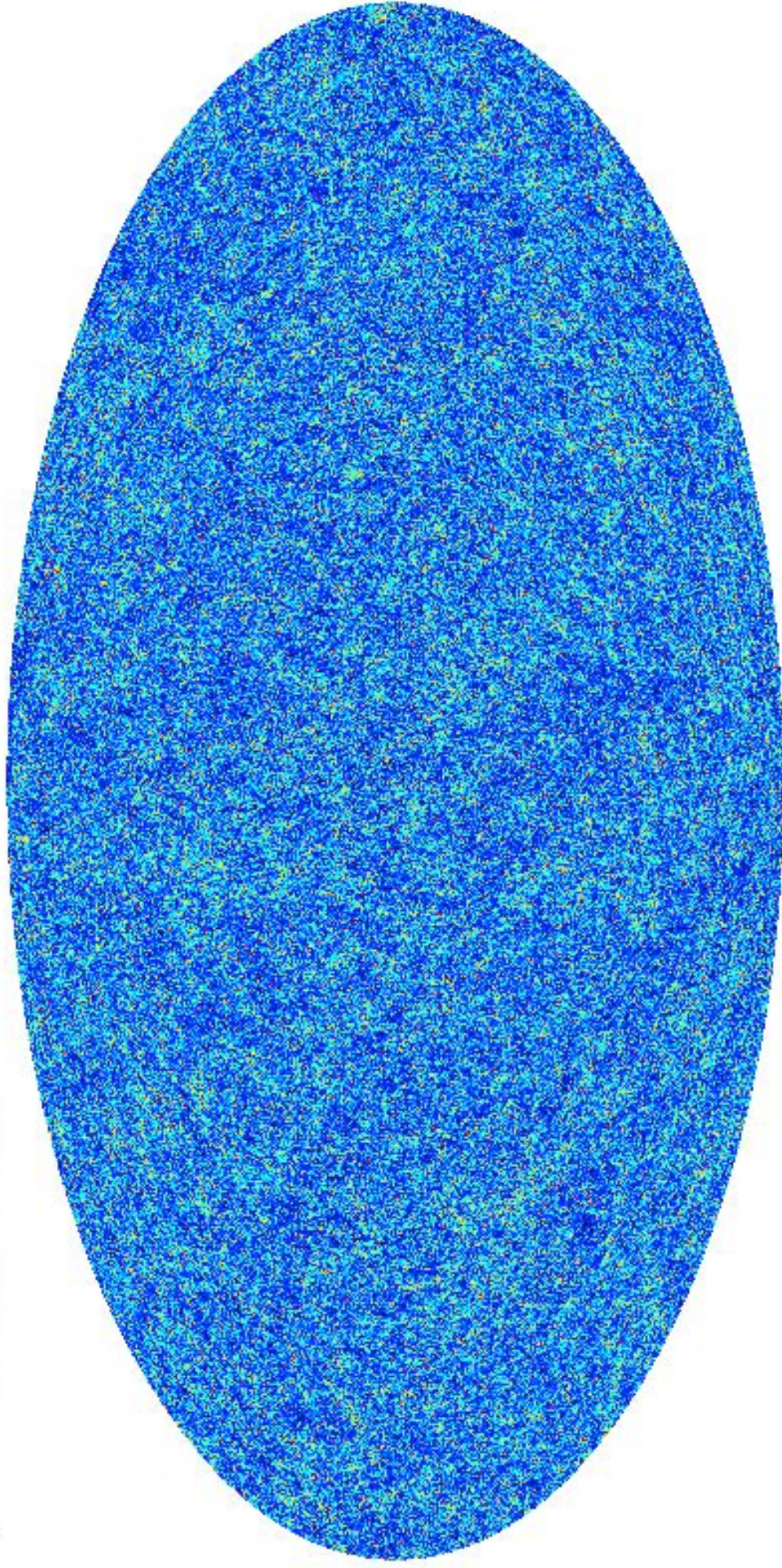
2048³のN体計算で分解能～0.3分角



プログラム開発状況

- 基本的な機能はほぼ実装完了
 - 極での問題回避法の開発
 - 重力ポテンシャルの内挿技法の選択
- テスト計算
 - 1024^3 N体計算
 - 並列化テスト
 - 分解能の検証





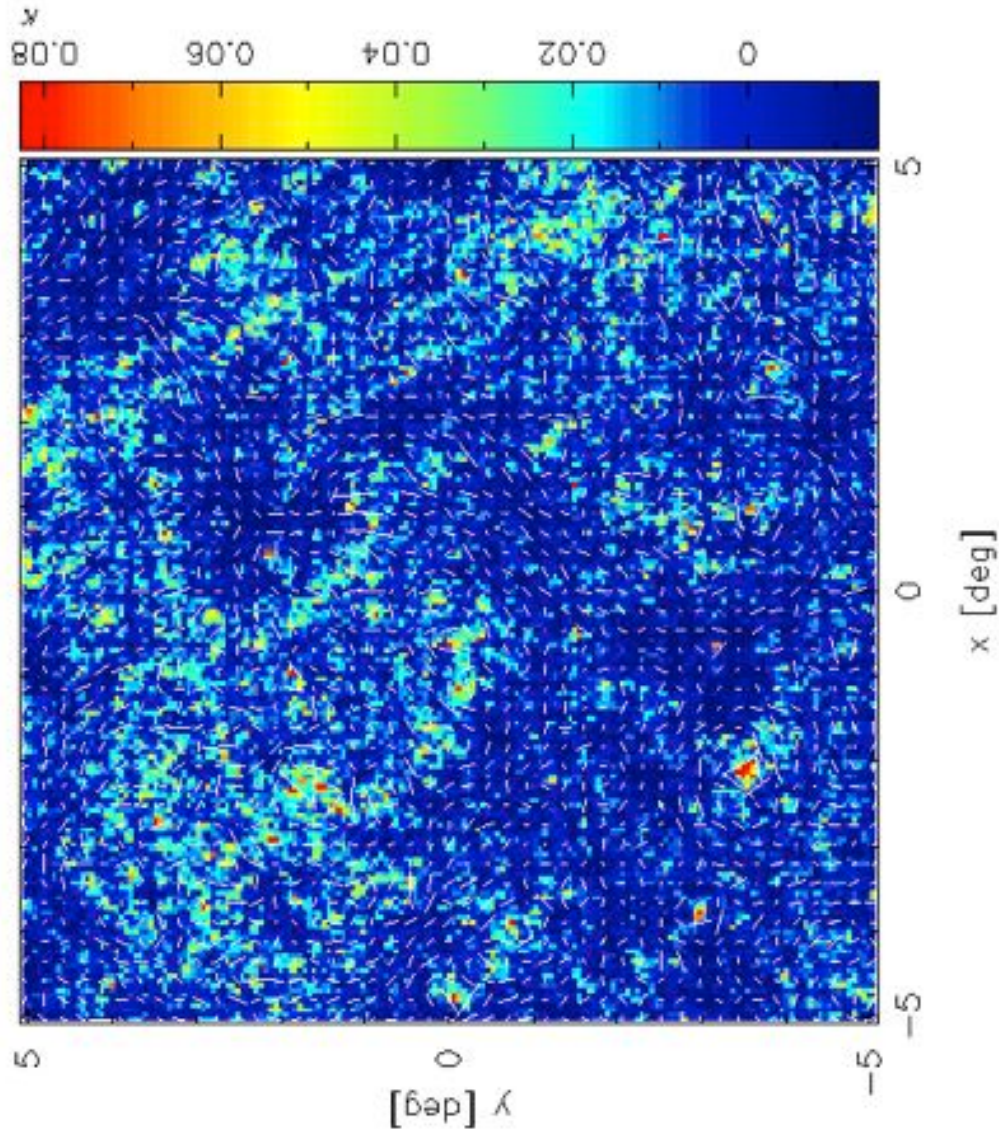
-2.000E-02

+5.000E-02



プログラム開発状況

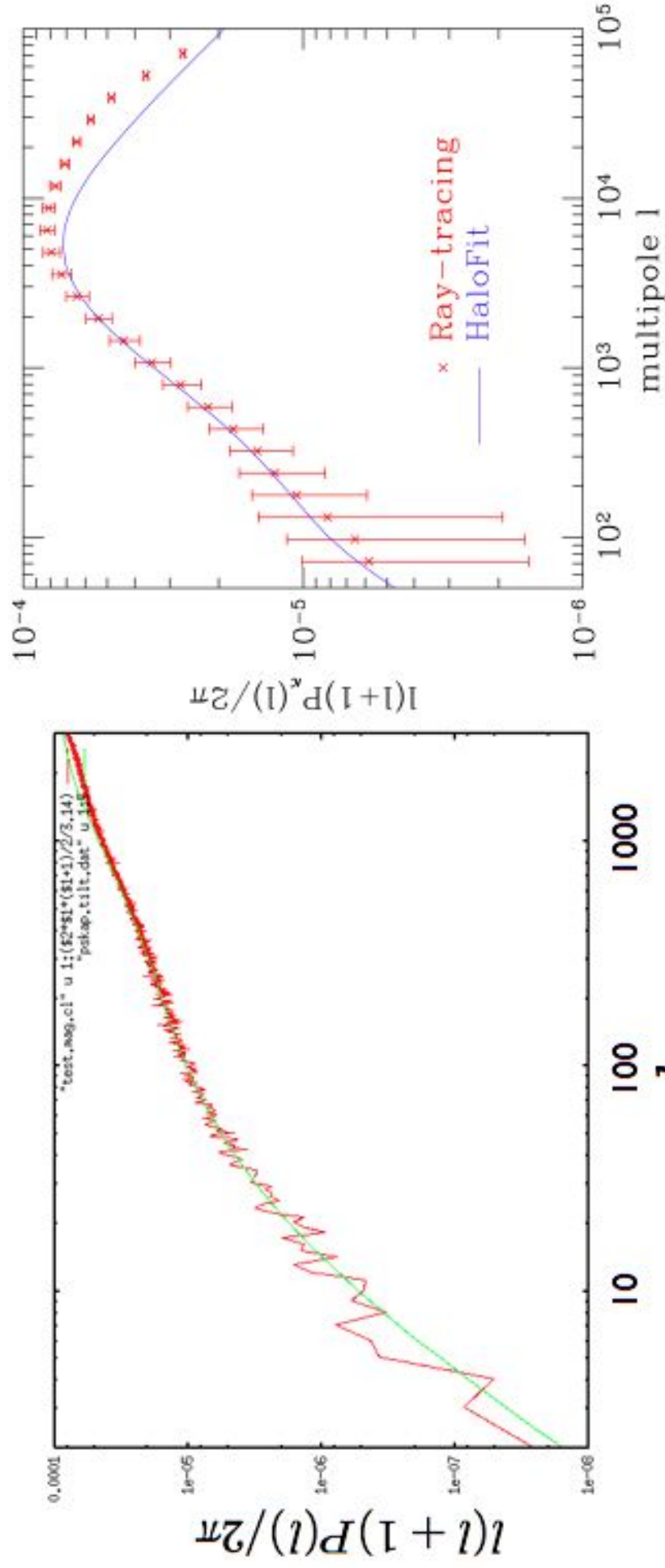
全天レンズ質量分布とlensing shear



GrayTriX

プログラム開発状況

lensing power spectrum



プログラム開発計画

- 2012/12：プログラム開発実装
テスト計算 with 1024³-N体
- 2013/4：本計算 with 1024³-N体
登録userへのデータ公開
- 2013/10：2048³-N体を用いた計算へ
登録userへのデータ公開
- 2014/?：データ一般公開



まとめ

重力レンズシミュレーションは宇宙論研究におけるインフラ

- 重力レンズ効果を用いた宇宙論研究における必須ツール
- 観測プロジェクト推進のためにも必須
- 得意分野の継続的发展

来年前半の本計算を目指し開発中

- 基本的な機能はほぼ実装完了
- 2013夏：1024³-N体
- 2013冬：2048³-N体 ~30 run

CfCA計算機資源にも応募予定ですのでよろしく願います

- データは一般公開しコミュニティへ還元します

