

N 体シミュレーションで探る弱重力レンズ効果に対するバリオンの影響

大里 健 (東京大学大学院理学系研究科)

Abstract

弱重力レンズ効果は直接観測が困難なダークマター、ダークエネルギーに関わる情報を引き出すことを可能にする。将来観測において、さらなる広視野、深さでの撮像観測を基にした重力レンズ効果観測が予定されており、宇宙論のさらなる精密化が期待される。そこで、我々はダークマターに加えバリオンによる物理を考慮した宇宙論的 N 体シミュレーションを実行し、模擬観測から求めた重力レンズ統計量に対する影響を評価した。バリオンによる効果 (特に feedback や冷却) は小スケール ($l \gtrsim 7000$) で強く現れることを確かめた。また収束場のピークの数密度についても考察する。

1 Introduction

宇宙背景放射 (CMB) 観測を始めとした様々な観測によって、ダークマター、ダークエネルギー、バリオンを宇宙の構成要素とする Λ CDM 模型は宇宙の進化を記述するモデルとして確固たる地位を獲得した。しかしながら、これで宇宙の謎が全て解けたわけではない。特にダークマター、ダークエネルギーの正体は未だ解明されておらず、宇宙論が抱えている大きな課題の一つである。弱重力レンズ効果観測はこれらの問題を解決できる可能性を秘めている。先述の CMB 観測と比較して、重力レンズ効果はダークエネルギーの性質に対して鋭敏であり、重力場の影響を直接観測できるのでダークマターの性質にも迫ることが出来る。来る将来観測においても、重力レンズ効果を利用した宇宙論のさらなる拡張が期待されている。

これまで重力レンズ効果による理論的研究 (Hu & Tegmark 1999; Takada et al. 2004) とその実践的観測 (例えば CFHTLenS: Kilbinger et al. (2013)) は大きな成功を取ってきた。一方で、これらの研究からさらに踏み込んで、将来観測がもたらす高い統計精度を最大限活かし、宇宙論を構成するためには標準の冷たいダークマター (CDM) に加え、バリオンによる効果といった副次的効果をも考慮に入れて議論する必要がある。

一口にバリオンの物理と言っても種類は様々であり、効果の及ぶスケールや大きさにも開きがある。例えばバリオンの物理として、adiabatic pressure、輻

射冷却、星形成や Feedback などが挙げられる。これらの効果はハロー単体や銀河形成においてダークマターによる重力の作用に加えて影響を及ぼすことが研究されてきた。(Martizzi et al. 2012, 2013; Duffy et al. 2010; Okamoto et al. 2008) これら比較的小スケールの議論は活発になされてきたが、重力レンズ観測の想定する大規模な宇宙に対する影響の評価は困難であった。ただし、ハローを全て NFW profile に従うと見做し、concentration parameter を人為的に上げることでバリオンの効果を擬似的に取り入れた研究 (Yang et al. 2013)、限定的にバリオンの効果を入れてシミュレーションに基づく研究 (Jing et al. 2006; Semboloni et al. 2011) は行われてきた。そこで本研究ではバリオンの物理を考慮した大規模 N 体シミュレーションを実行し、その重力レンズ効果に対する影響を多様な統計量で比較することを目的とした。

重力レンズの観測で実際に得られる情報は光の非等方な歪みに関わる物理量である shear γ_1, γ_2 である。さらに、この二つから等方な拡大・縮小を表す convergence κ が得られる。特に convergence は質量のゆらぎと強い相関があり、convergence がピークとして現れる場所には一定の割合でハローが存在することが知られている。(Hamana, Takada & Yoshida 2004) 本研究ではより精密に、バリオン物理を考慮した N 体シミュレーションのデータを用いて、模擬観測によって得られた convergence からその統計量を議論する。

2 Numerical simulations

この章では、重力レンズで用いられるシミュレーション手法について解説する。

2.1 N-body simulations

N 体シミュレーションは宇宙の物質分布を多数の点に置き換えて、その時間発展を追うことで各時刻における物質分布を得る手法である。広い領域の宇宙の物質分布を一挙に得られる上、非線形な構造成長を追跡することが可能のため、大規模構造を詳細に調べることが出来る。十分初期の宇宙であれば、ゆらぎはほぼ線形領域にあるので、初期条件としてべき則に従うマターのパワースペクトル $P_{\text{init}}(k) \propto k^{n_s}$ を与えればよい。また同じパワースペクトルを再現する初期粒子の配位を変えてシミュレーションを何度も行えば、統計誤差を減らすことが出来る。N 体シミュレーションを利用する大きな利点の一つである。

本研究では Okamoto, Shimizu & Yoshida (2014) に基づいたバリオン物理の入った N 体シミュレーションを行った。上で述べたダークマターのみ重力進化を追う標準の N 体シミュレーションに加え、バリオン粒子を加え圧力の効果を再現する。さらに高密度の領域ではバリオン粒子が星に変換され、星形成の効果も取り入れる。ただし、生成された星は一定時間で超新星として爆発を起こすが、その熱エネルギーをまわりの粒子に与えるという事は行わない。最後に、バリオン粒子と星粒子に対しては金属量に応じて輻射冷却によってエネルギーを失う。高密度の部分は冷却によってさらに密度コントラストが強まることになる。妥当性を検討するため stellar mass function を求め、観測値 (Baldry et al. 2012) と比較する。これは行ったシミュレーションの解像度が低いため、質量の小さいところでは観測値と相違が大きい。一定以上の質量 ($M \gtrsim 10^{10} M_{\odot}$) ではある程度一致する。これ以上の一致を実現するためには、AGN feedback など不定性の高い feedback 機構を入れる必要がある。本研究では CDM のみ、CDM+Baryon (圧力のみ)、CDM+Baryon の三種類のシミュレーションを行った。

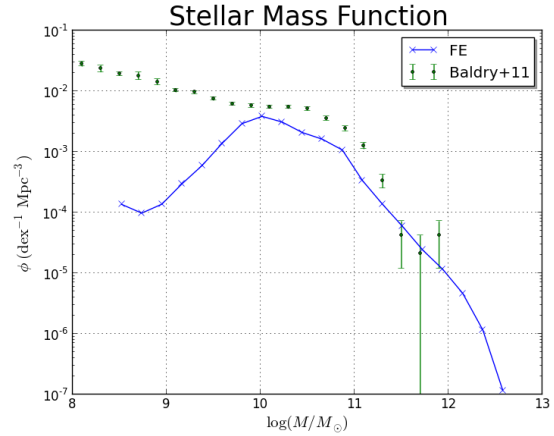


図 1: stellar mass function 青の実線が今回行った N 体シミュレーションによるデータを表す。

2.2 Ray-tracing simulations

弱重力レンズ効果とは、遠方銀河などの光が大規模構造の重力によって軌道が歪められる現象である。この軌道を記述する方程式は一般相対論で導かれる測地線方程式である。しかし、弱い重力レンズ効果においては、宇宙全体に分布するハローの重力場をもとに測地線方程式を直接解くことはほぼ不可能である。ここで、光線の湾曲があまり大きくないことを利用して近似を用いる。ここで用いる近似法は Ray-tracing 法 (Hamana & Mellier 2001) と呼ばれるものである。この手法は光の伝播する領域を何個かに区切り、一つ一つに含まれる質量を一つの面に射影する。光はその有限の面密度をもった面を通過するときのみ光線が湾曲するものとする。ここで具体的に定式化を行う。シミュレーション領域を n 分割し n 枚の面を作る。視線方向を y として i 番目の面の射影された質量ゆらぎを δ_i^{proj} を次のように定義する。

$$\delta_i^{\text{proj}}(x_1, x_2) = \int_{y_{i-1}}^{y_i} dy \delta(x_1, x_2, y) dy \quad (1)$$

$\delta = \rho/\bar{\rho} - 1$ は三次元の質量ゆらぎである。 n 番目の面における光線の位置 θ^n は

$$\theta^n = \theta^1 - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{f(\chi_n - \chi_i)}{a(\chi_i) f(\chi_n)} \nabla_{\perp} \Psi^i \quad (2)$$

χ_i は i 番目の面の共動距離であり、 $f(\chi)$ は角径距離である。平坦宇宙 ($K = 0$) の場合、 $f(\chi) = \chi$ であ

る。レンズポテンシャル Ψ^i は次式で定義される。

$$\begin{aligned}\nabla^2 \Psi^i(x_1, x_2) &= \frac{8\pi G \bar{\rho}}{3c^2} \delta_i^{\text{proj}}(x_1, x_2) \\ &= 3\Omega_m \left(\frac{H_0}{c}\right)^2 \delta_i^{\text{proj}}(x_1, x_2) \quad (3)\end{aligned}$$

実際のシミュレーションから作った δ_i^{proj} から Fourier 変換を施してレンズポテンシャルを求める。optical-tidal matrix U_i と distortion tensor A_n を次のように定義して

$$U_i = \begin{pmatrix} \Psi_{,11}^i & \Psi_{,12}^i \\ \Psi_{,21}^i & \Psi_{,22}^i \end{pmatrix}$$

$$A_n = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix}$$

これらは通常積分を通して結びつくが、今の近似では面における和に置き換えられて

$$A_n = I - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{f(\chi_i) f(\chi_n - \chi_i)}{a(\chi_i) \chi_n} U_i A_i \quad (4)$$

結果として、N 体シミュレーションのデータから convergence、shear そして曲がり角を得ることが出来る。弱い重力レンズ効果は文字通り、光線の曲がり角がそれほど大きくないため、良い近似法となる。以下に Ray-tracing 法を用いて N 体シミュレーションのデータから得られた convergence の図を示す。

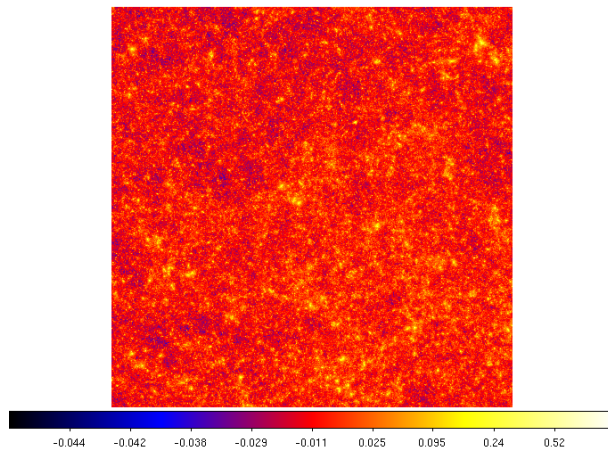


図 2: κ map 一边は 5 度の領域に対応する。

3 Results

ここではシミュレーションによって得られた convergence の統計量に関して議論する。

3.1 Power spectrum

重要な統計量である convergence のパワースペクトルを調べた。パワースペクトルとは Fourier mode の振幅であり、対応するスケールのゆらぎの大きさを示している。パワースペクトル $P_\kappa(l)$ の定義は次の式で与えられる。

$$\langle \tilde{\kappa}(\mathbf{l}) \tilde{\kappa}(\mathbf{l}') \rangle = (2\pi)^2 \delta(\mathbf{l} - \mathbf{l}') P_\kappa(l) \quad (5)$$

パワースペクトルは CDM のみの N 体シミュレーションから fitting formula がよく調べられている。以下の図に今回のシミュレーションで得られたパワースペクトルと Takahashi et al. (2012) による HALOFIT のパワースペクトルを示す。

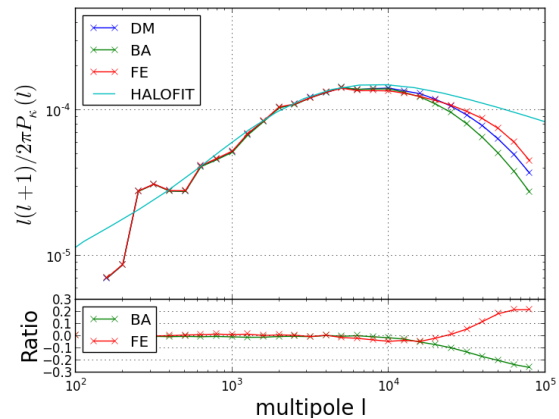


図 3: κ power spectrum

この図から $l \lesssim 7000$ の大スケールではほとんど変化は見られない。しかし $l \gtrsim 7000$ ではバリオンの効果が現れている。圧力みのシミュレーション (緑の実線) では $l \gtrsim 10000$ の領域で圧力によってゆらぎが抑えられているのが見て取れる。一方 feedback 入りのシミュレーション (赤の実線) では $l \lesssim 7000$ で feedback によってパワースペクトルの値は下がるが、 $l \gtrsim 20000$ の小スケールになると今度は冷却による効果でスペクトルの値は上がる。

3.2 Peak statistics

ピーク密度も宇宙論パラメータに依存する。以下にそれぞれのシミュレーションについてピーク密度を示す。横軸は intrinsic noise で normalize した convergence の値であるが、率直にはピークの大きさである。それぞれのシミュレーションにおいて変化は見られるものの、後述のようにエラーバーに埋まれるので影響を観測から評価することは難しい。しかし、ピークのある場所にハローを探す cluster search の観点から見れば、バリオンが強く影響しないということを意味する。

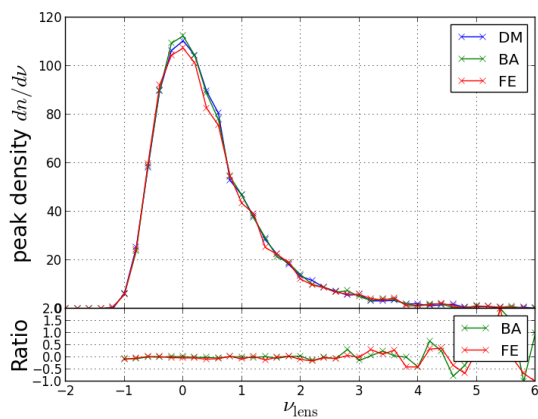


図 4: peak statistics

4 Conclusion

バリオンが弱重力レンズ効果に与える影響を定量的に評価するため、N 体シミュレーションと Ray-tracing シミュレーションを行った。バリオンによる効果は、大規模構造の質量分布を大きく変えるほどではないため大スケールにおいては影響は小さく、これまで考えられてきた Λ CDM 模型における構造形成に矛盾しない。しかしながら、バリオンは個々のハローの質量分布を変化させることは可能である。特に星形成や冷却による効果で中心部の密度が増大する。この描像はパワースペクトルの小スケールの挙動からも支持される。小スケールでの変化は将来観

測でも検証可能な値にあり、宇宙論パラメータの決定にも影響を与えることが考えられる。

convergence のピークに対してはピークの数密度は若干の変化があるものの、エラーバーに埋もれてしまう。これは convergence に smoothing をかけたことによる。上述の通り、バリオンの影響は小さいスケールに効くため、smoothing をかけると変化がならされてしまうためである。

現時点では power spectrum とピークに関する統計量に対してのみ考察した。高次統計量 (Minkowski functionals (Kratovich et al. 2012; Shirasaki & Yoshida 2014) など) を調べると、さらに宇宙論的な情報を引き出せる可能性がある。

Acknowledgement

本研究を行うにあたり、東京大学大学院物理学専攻の白崎正人氏、吉田直紀教授、また東京大学大学院天文学専攻の清水一紘博士研究員には、多くの助言と有益な議論をしていただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

Reference

- Hu, W., & Tegmark, M., 1999, *ApJL*, **514**, 65
 Takada, M., & Jain, B., 2004, *MNRAS*, **348**, 897
 Kilbinger, M. et al., 2013, *MNRAS*, **430**, 2200
 Martizzi, D. et al., 2012, *MNRAS*, **422**, 3081
 Martizzi, D. et al., 2013, *MNRAS*, **432**, 1947
 Duffy, A. et al., 2010, *MNRAS*, **405**, 2161
 Okamoto, T. et al., 2008, *MNRAS*, **385**, 161
 Yang, X. et al., 2013, *Phys. Rev. D*, **87**, 023511
 Jing, Y. et al., 2006, *ApJL*, **640**, L119
 Semboloni, E. et al., 2011, *MNRAS*, **417**, 2020
 Hamana, T. et al., *MNRAS*, **350**, 893
 Okamoto, T. et al., 2014, ArXiv:1404.7579
 Baldry, I., K. et al., 2012, *MNRAS*, **421**, 621
 Hamana, T., & Mellier, Y., 2001, *MNRAS*, **176**, 169
 Takahashi, R. et al., 2012, *ApJ*, **761**, 152
 Kratochvil, J. et al., 2012, *Phys. Rev. D*, **85**, 103513
 Shirasaki, M., & Yoshida, N., 2014, *ApJ*, **786**, 43