多重重力レンズによる遠方の銀河像の変形とその宇宙論的意味について

牧野淳一郎、船渡陽子（東大教養）

アブストラクト

遠方の銀河などの天体の像が、多重重力レンズによってどのように変形し、明るさを変化させるかを数値計算で調べた。$z > 1$ では、重力レンズ効果がなかったときに比べて典型的な銀河の明るさは $(1+z)^{-1.4\sqrt{\Omega_s}}$ に比例して暗くなることがわかった。ここで、Ω_s は銀河等のレンズ効果がある比較的コンパクトな天体の密度パラメータである。なお、平均の明るさは変化しない、すなわち、小数の銀河は重力レンズによって非常に明るくなる。

1　イントロダクション

赤方変移 z が 1 を越える遠方の物体からの光は銀河等による複雑な多重重力散乱を受ける。このため、像が変形し、明るさも変化する。従来の重力レンズ効果の研究では、Gunn (1996) に代表されるように多重散乱の効果は単一の散乱の線形な重ね合わせで近似されていた。しかし、自己重力系のカオス的性質についての最近の研究の成果から、線形の重ね合わせは多重レンズの効果を過小評価するということがわかった。

ほんのわずか違う初期条件をもつ2つの自己重力系の間の距離が指数関数的に広がることは古くから知られている。最初に指摘したのは Miller (1964) である。彼は2つの系の Γ 空間での距離が指数関数的にひろがること、さらにそのタイムスケールが $N = 32$ までは粒子数が大きいほど短くなることを示した。このあといくつかの研究があるが、タイムスケールが何で決まるか、あるいはこの不安定性が緩和現象と関係があるのかどうかといった問題にははっきりした結論が出ていなかった。Goodman, Heggie Hut (1993) は、この不安定性の精密な理論的および数値的な研究を行ない、粒子数が大きい極限ではタイムスケールは粒子数に依存しないでクロッシングタイムの数分の1であることと、系全体の緩和には直接結び付くものではないということをあきらかにした。不安定性は、基本的には以下のように説明される。いま、空間に固定したたくさんの重力源のなかを運動する、初期には非常に近い分布をもった2つのテスト粒子の運動を考えよう（図1)。このテスト粒子の間の距離は重力源によって散乱されるたびに大きくなる。大きくなるのは、潮汐力によるので、大きくなるなりかたはその時のテスト粒子の間の距離に比例する。このために、距離が指数関数的に広がっていく。しかし、距離がある程度以上大きくなると、この図のようにコヒーレントに散乱されるのでなく、それぞれの粒子が独立に散乱されるようになる。こうなると、それぞれの粒子の軌道の変化は通常のチャンドラセカールの2体緩和で表現できるようになり、指数関数的ではなくなってしまう。

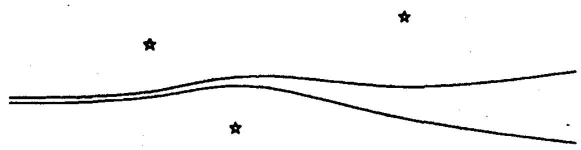

図 1: 2つのテスト粒子の軌道

この理論を遠方から来る光に適用すると、我々のところにある角度 θ_o で到達する2本の光線を逆にたどっていった、光源のところでの角度 θ_s はもっと大きいということになる。すなわち、遠方の物体は真の大きさよりも小さく、従って暗く見える。

当然のことであるが、天球面全体の明るさは変化するわけではない。拡大されて明るくなるものもあって、それにより平均の明るさは一定に保たれる。普通に重力レンズといった時には、この、非常に明るくなるという効果について議論することが多い。しかし、非常に明るくなるものがあるためにはそれ以外のものは暗くなっている必要があるわけである。

2　モデル計算とその解釈

多重重力レンズの効果を評価するために、銀河が分布した宇宙の中での光の軌跡を数値計算し、遠方の銀河の像がどの程度変形し、暗くなるかを調べた。運動方程式はポストニュートニアンである。議論を単純にするために、定常な宇宙の中に銀河が分布するとして計算を行なった。計算結果を z に対応させるためには、$\Omega=1$ のフラットな宇宙を仮定した。計算の詳細については、Funato et al. (1993) を参照されたい。

簡単な理論から、重力レンズの効果は $\beta=(1+z)^{\sqrt{\Omega_s}}$ の値だけで決まることがわかる。ここで Ω_s は」重力レンズとして働く程度にコンパクトな天体の質量の割合である。図 2 に、いくつかの β の値について、観測される明るさ $L_{\rm obs}$ とレンズがなかったとした時の明るさ $L_{\rm true}$ の比 R の累積分布関数を示す。距離が遠くなるにつれて全体的には暗くなること、明るくなるものもあることがわかる。

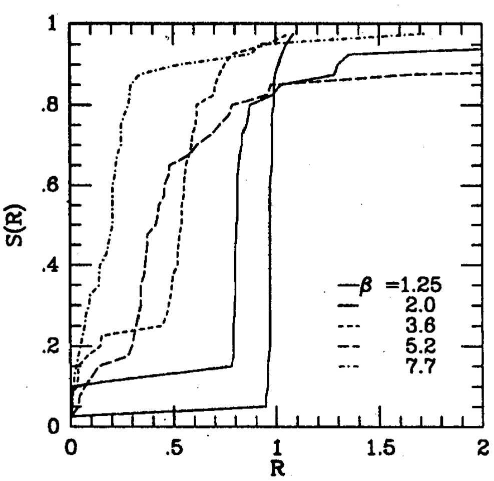

図 2:明るさの変化 R の累積分布。

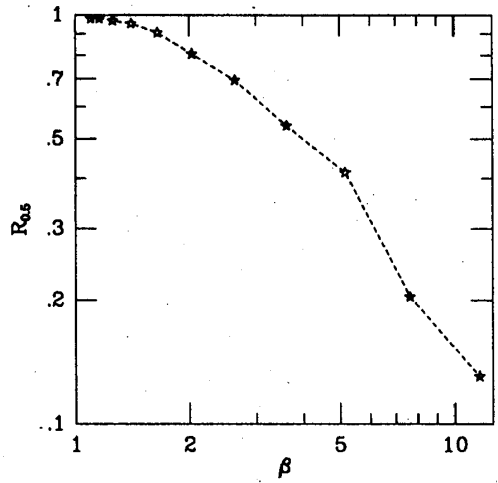

図 3:β と R の中央値の関係。

図 3 に示すように、明るさの変化 R は、中央値をとると $z>1$ では $(1+z)^{-1.4\sqrt{\Omega_s}}$ に比例する。

例えば $\Omega_s=1$ であれば、$z=2$ で $R=0.5$、すなわち典型的な銀河の明るさは半分になっていることになる。この効果の大きさは、ハッブル図や銀河のナンバーカウントで Ω などの宇宙論的パラメータをかなり大きく変えた時の効果と同等であり、これらの手法で Ω を推定するためには重力レンズによる光度変化を正しく補正する必要がある。さらに、多重レンズの効果の大きさは、重力レンズとして働く質量の割合 Ω_s に強く依存する。また、今回は検討していないが、もちろん Ω の値自体にも依存するであろう。

参考文献

Funato, Y., Makino, J., and Ebisuzaki, T., 1993, submitted to *Ap. J. Lett.* .

Goodman, J., Heggie, D. & Hut, P. 1993, *Ap. J.* , in press.

Miller, R. H., 1964, *Ap. J.* , 140, 250.