

[IP24] 重力レンズによる、銀河のsubstructure検出法

米原厚憲 (筑波大学計算物理学研究センター)
(日本学術振興会特別研究員 PhD)

近年、宇宙論的なN体シミュレーションを通じて、CDMシナリオに基づく構造形成の理論は、銀河団スケールでは、非常に良く観測を再現するが、銀河スケールにおいては、その周りに(我々の銀河周辺で)観測されているよりも遥かに多くのsubstructureを作ってしまうという問題点を抱えている

(Moore et al. 1999, Klypin et al. 1999)。この解釈として、

(1) シナリオそのものが間違っている

(2) substructureは存在しているが、観測できないほど暗いか、そもそも光っていない

という二つの可能性が考えられる。ここでは(2)の立場をとり、質量をトレースできる現象である重力レンズ効果を用いて、substructureの検出法について考える。

銀河全体の見かけのサイズは距離に反比例するが、レンズ天体の重力レンズとしての見かけサイズは大まかに距離の平方根に反比例する。つまり、できる限り遠くの天体を見るほうが、今考えているような重力レンズ現象が起こり易いことになる。そこで、前方の銀河によって既に多重像に見えているクェーサーの像に、前方の銀河のsubstructureが重なっているような状況を考える。この場合、substructureによる重力レンズ効果によって、クェーサーの像が更に多重像になることが予想される。仮にその更なる多重像が空間分解できなくても、クェーサー自身の光度変動が、多重像間のtime delayにおいて繰り返す、あたかもエコーのような光度変動が期待される。

では、どの程度の間隔の多重像ができるのか？また、どんなtime delayのエコーが生じるのか？そこで、substructureの重力レンズモデルとして、point massとsingular isothermal sphere (SIS)を考えた。加えて、それに銀河自身の効果を取り入れる代わりに、適当な大きさのexternal convergence ()とshear ()を考慮した、いわゆる"Chang & Refsdal" レンズ的な取り扱いで期待される諸量の値を見積もった。

図1：像の間隔のcumulativeな分布

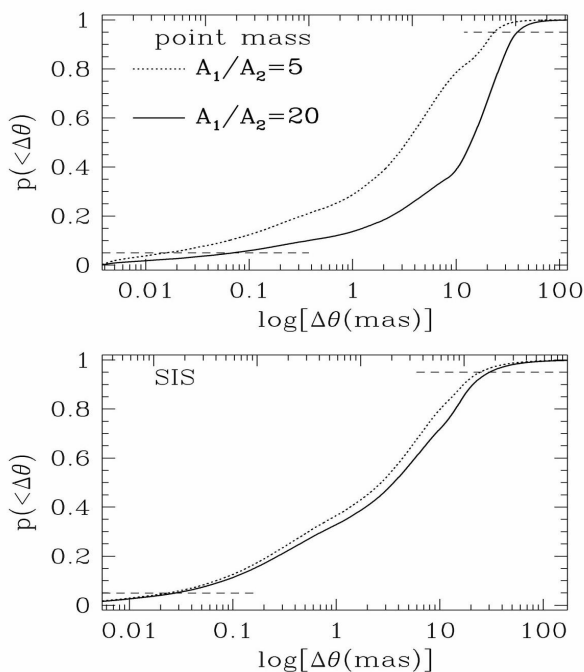


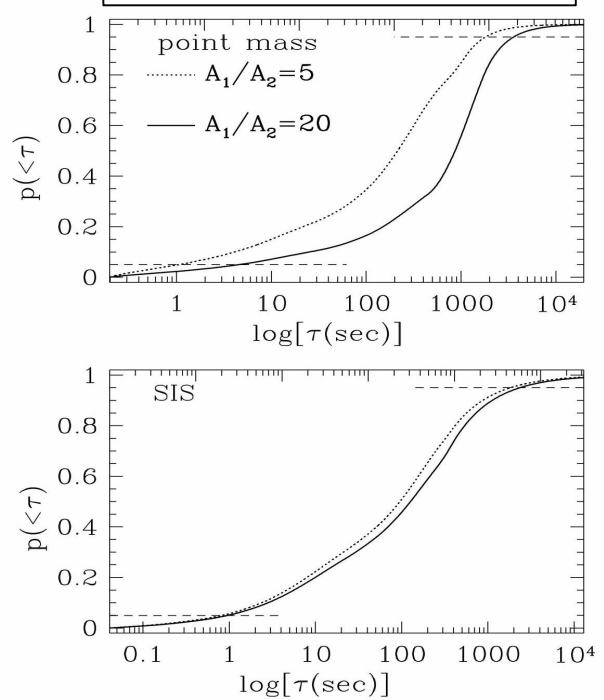
図1に像の間隔の値の、図2にtime delayの値の、それぞれcumulativeな確率分布を示した。上段がpoint massレンズの場合、下段がSISレンズの場合に対応する。なお今の取り扱いでは、2つ以上像ができる場合もあるので、最も明るい像を2

つを選ぶことにした。更に、1番明るい像(増光率: A_1)に比べ、2番目に明るい像(増光率: A_2)があまりに暗すぎると、期待しているような現象をそもそも観測できなくなると予想されるので、二つの像の明るさの比(A_1 / A_2)の下限値を20にした場合(実線)と、5にした場合(点線)を計算している。Substructureの質量としては、 $10^7 \sim 10^{10} M_\odot$ の範囲を考えており、その質量分布に関しては、銀河の中心から100(kpc)以内に存在する、ある質量(M)以上のsubstructureの個数($n(>M)$)については、Klypin et al. (1999)の結果を用いて、

$$n(>M) = 5591 \frac{\rho_c}{\rho} \frac{M}{10^7 M_\odot} \left(\frac{R}{10 \text{ kpc}}\right)^{-0.92}$$

であるとしている。とに関しては、どのようなレンズ銀河においても、1のオーダーであることが知られているので、ひとまず、 $\rho_c / \rho = 0.4$ の場合についての計算結果を示している。広い質量範囲を反映して、期待される値は広い範囲を持つが、どちらのレンズモデルを用いた場合でも、ほぼ同じような値をとることが分かり、更なる多重像の間隔については0.1 ~ 10 (mas)程度、その多重像間のtime delayについては1 ~ 1000 (秒)程度であることが分かった。つまりこのような現象を見つければ、substructureを検出したことになるのである。

図2：time delayのcumulativeな分布



さて、ではこのような現象は、一体どのくらいの確率で起きるか？今考えているような重力レンズのcross sectionが、レンズ天体の典型的なレンズとしてのサイズと同程度であること、そのサイズが $10^7 M_\odot$ の質量のものに関しては4(mas)程度であること、銀河自体の見かけのサイズが10(arcsec)程度であること、レンズ銀河自身の重力レンズ効果でsource planeが既に $[(1 - \rho_c / \rho)^2 - \gamma^2]^{-1/2}$ 倍拡大されていることを考え、先ほど示したsubstructureの質量分布を用いると、数%のオーダーであることが見積もられた。この値は、レンズ天体や光源の赤方偏移などにも依存するが、大きくは変わらない。

[References]

- Klypin, A. et al. 1999, ApJ 522, 82
- Moore, B. et al. 1999, ApJ 524, L19