On the "stellar dynamical" evidences for massive black holes

Junichiro Makino
Department of Astronomy, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo,
Bunkyo-ku,Tokyo 113-0033, Japan

May 13, 2003

Abstract

We critically examine recent claims that globular clusters M15 and G1 of M31 contains massive central black holes. For both clusters, we performed detailed *N*-body simulations with realistic effects like the stellar mass loss due to stellar evolution are taken into account. In the case of M15, we found neutron stars and massive white dwarfs concentrate to the center through mass segregation, resulting in a sharp increase in M/L toward the center. While consistent with the presence of a central black hole, the Hubble data can also be explained by this central concentration of neutron stars and massive white dwarfs. In the case of G1, the effect of the mass segregation is not significant, because the relaxation time of G1 is longer than the Hubble time. Even so, we found that our simulation model can perfectly reproduce the observed properties of G1 such as the luminosity profile, velocity dispersion profile, rotation profile and ellipticity profile. Though it's unclear why the existence of the black hole was concluded in the case of G1, simulation models clearly show that black holes are not necessary to explain observations.

1 初めに

Gerssen et al. (2002) は球状星団 M15 に 3,000 太陽質量程度のブラックホールを発見したと報告した。また、Gebhardt et al. (2002) は、M31 内に球状星団 G1 に、 2×10^4 太陽質量のブラックホールを発見したと報告した。これらはいずれもハッブル宇宙望遠鏡によって星団中心部の星の速度分布を求めて、それを説明するにはブラックホールが必要であると結論している。

もしもこれらの主張が本当であるなら、球状星団の中に、恒星質量よりもはるかに大きなブラックホールを発見した最初の例となる。これは球状星団の形成、進化という観点からも、また、銀河中心の巨大ブラックホールの形成過程の理解という観点からも極めて重要である (Ebisuzaki et al., 2001)。

しかし、これらの報告は、にわかには信じ難いものでもある。 M15 の中心密度は確かに高いが、これは従来典型的な post-collapse 球状星団として理解されてきていた。 G1 は有限サイズのコアを持つ、キングモデルで十分フィットできる星団であり (Meylan et al., 2001; Djorgovski et al., 1997)、その中心に巨大ブラックホールがあるというのは非常にありそうなことではない。

そこで、我々は、現実的な N 体計算の結果と観測で得られた密度、速度プロファイル等を比較することで、観測の説明にブラックホールが必要かどうかを検証することを試みた。

方法、結果の詳細は既に雑誌論文 (Baumgardt et al., 2003a,b) で報告したので、ここでは仮定と結論を簡単に紹介する。詳しくは元論文を参照して欲しい。以下、2 節で M15 の場合、3 節で G1 の場合の検証について説明し、最後に 4 節で我々の結果の意味するところについて議論する。

2 M15

2.1 観測「事実」と解釈

まず、観測からどのような論理でブラックホールの存在が結論されるかをまとめておく。

球状星団なので、分布は球対称であるとして、速度分布は等方的であると仮定する。表面測光 (実際には、 M15 の場合には巨星の star count) から、半径方向の投影された輝度分布が求められるので、球対称を仮定して空間的な輝度分布、すなわち星の数密度分布が求められる。

次に、速度分散プロファイルを求める。 M15 の場合には、個々の星がハッブルでは分解できるので、分光観測からそれぞれの視線速度を求め、星団全体の平均の視線速度からのずれの分散を計算して速度分散プロファイルを求めることができる。

さて、恒星系力学の初歩を学んだ人ならだれでも知っているように[1] 、ジーンズの定理を使うと、ある恒星のグループについて数密度分布と速度分散の分布が分かれば、星団全体の質量分布を決めることができる。 M15 の場合、速度分散が決められるのも、数密度が決められるのも巨星段階の明るい星だけだが、それから「全体の質量分布」がどうなっているか分かるのである。 従って、原理的には質量分布を直接求めて、中心にブラックホールがあるかないかが決められる。

「原理的には」と書いたのはもちろん実際にはそんなにうまくいかないからである。輝度分布はともかく、速度分散はノイズが極めて大きい。特に中心付近では、巨星の数自体が少なくなってくるのでどんなに精密な観測をしても small-N ゆらぎのために精度が上がらない。このため、ブラックホールがあるかないかという議論は、実際には以下のような手順でなされることになる。

1. 適当な M/L (質量-輝度比) プロファイルを仮定して、輝度分布から質量分布を求め、求まった質量分布から速度分散の分布を求める。
2. この時に、中心に適当な質量のブラックホールを仮定する。
3. M/L 全体に掛ける係数とブラックホールの質量をふってみて、χ^2 値がもっとも良いモデルが「観測結果」であると信じる。

つまり、観測事実とブラックホールの間には、以下のような仮定やモデルがはいっているのである。

[1] 知らない人は牧野の講義ノート
http://grape.astron.s.u-tokyo.ac.jp/pub/people/makino/kougi/stellar_dynamics/kougi.html
でも見て下さい

1. 空間分布は球対称である

2. 速度分散は等方的である

3. モデルとして使った M/L のプロファイルは正しい (誤差をもたない)

実際にはこれらの仮定が本当かどうかはわからないわけだが、それによる不確定性は χ^2 値、つまりは結果のエラーバーには全くはいってこないことに注意して欲しい。こんなことは実際に観測をしている人にはいうまでもないことかもしれないが、理論家には観測からなされる主張の何が仮定で何が事実であるかを見極めるのは必ずしも容易なことではない。

さて、理論家の側から見ると、上の 3 つの仮定のうち最初の 2 つは、熱力学的な緩和時間が短い球状星団の中心部に対しては極めて妥当なものである。これに対し、 M/L のプロファイルには注意が必要である。

M15 の場合、星団全体の緩和時間が宇宙年齢よりもかなり短い。もちろんこのために中心部が重力熱力学的崩壊 (core collapse) しているわけである。緩和時間が短いので、重い星は mass segregation により中心部に沈む。年齢がほぼ宇宙年齢である球状星団では、もっとも重い星は初期に出来た中性子星や重い白色矮星である。現在巨星である星は生まれた時の質量が 0.8 太陽質量程度であり、光っている星の中ではもっとも重いが 1.4 太陽質量の中性子星や、それに近いところまで分布する白色矮星に比べると軽い。

このことは、もちろん Gerssen 他にも理解されていて、彼らは M/L について 2 通りの仮定を置いている。一つはもっとも単純だが現実的とはいいがたい M/L が一定という仮定である。もうひとつは、Indiana 大学の Haldan Cohn のグループが軌道平均 Fokker-Plank 方程式を数値的に解いて、 M15 の 1997 年当時の観測データを再現したモデルで求まった M/L プロファイルである (Dull et al., 1997)。これは適当な初期質量関数から、星団全体で中性子星、白色矮星の割合を仮定し、見える星は 0.8 太陽質量から下であると仮定して、つまり、球状星団ができた時から「現在の」質量関数であったとして進化計算させたモデルであり、中心にブラックホールは存在しない。

Gerssen 他はこの両方のモデルで、ブラックホールの質量の推定値についてほぼ同じ結果を得た。非常に違う仮定で同じ結果を得たので、彼らはブラックホールがあるのは確実であると判断したのであろう。

しかし、良く考えてみると、 M/L について非常に違う仮定をしたにもかかわらずブラックホールの質量が同じになるというのは奇妙なことである。実際、Dull 他は 1997 年当時の輝度分布と速度分散分布を両方再現するようにモデルを構成したのだから、 1997 年に求まっていた速度分散分布とハッブルを使って改善したものの違い程度しかブラックホールはでてこないはずである。

では、速度分散の違いはどの程度かというと、確かにハッブルによって今までよりも中心近くの星が観測できて、速度分散のグラフが中心まで延びたが、実は比べてみるとその延び方は Dull 他の Fokker-Planck 計算の結果とほとんどずれないものだった[2] 。

さて、なにが問題だったのだろう？

[2] なお、こう書いてしまうともう Gerssen 他の計算は何か間違っているに決まっていて、N 体計算で何かする必要などなかったのではないかと思うかもしれない。後から考えるとそういう面もなくはないが、我々がこの辺の事情を完全に理解したのは論文を投稿してからであった。

2.2 シミュレーションモデル

人の観測結果 (とその解釈) と、それとは別の人の理論計算を比べていても今一つ要領を得ないので、理論計算のほうは自前で準備してみることにした。 M15 は典型的な PCC (Post-core-collapse) 球状星団なので、我々が、というか Holger Baumgardt が計算した現実的な球状星団の進化のサーベイ計算 (Baumgardt and Makino, 2003) の中から、銀河中心からの距離が類似でやはり PCC の状態、正確には現在まさに collapse した瞬間であるものを持ってきた。初期質量関数等は業界標準なものであり、特に M15 に合わせたパラメータチューニング等は行っていない。

星団の質量や速度分散などは完全に同じではない (粒子数がそもそも少ないため) ので、我々が目的としたのは精密な定量的比較というよりは、シミュレーションで作った星団を、Gerssen 他と可能な限り「同じように」観測したらどう見えるかということである。なお、とりあえず中心にブラックホールができない進化モデルを考えた。これは、人工的にブラックホールができなくしたという意味ではなく、現在ちょうど最初の collapse にあるような進化シナリオではブラックホールはできないことがわかっている。最初から非常に中心密度が高く、数百万年で collapse するようなシナリオではブラックホールができる可能性がある (Ebisuzaki et al., 2001) が、今回はとりあえず通常のシナリオを採用した。

2.3 モデルと観測の比較

シミュレーションで出来た星団の「観測」結果を図 1 に示す。

エラーバーつきの点は、巨星の速度分散の観測結果である。 1 パーセクから内側で、中心にむかってゆっくりと上がっていることがわかる。 Gerssen 他の観測結果と定性的な特徴は非常に良く合っている。破線は、 M/L 一定として輝度分布から速度分散を求めた結果である。 下から順に、中心ブラックホールとして 0, 40, 80 および 120 太陽質量を仮定した。これでは 80 太陽質量程度がもっとも良くあっていることがわかる。我々のモデル星団の質量は M15 の 1/40 程度なので、 M15 に換算すると 3,000 太陽質量となり Gerssen 他の結果と妙に良くあっている。

いうまでもないが、我々のシミュレーションモデルでは中心にブラックホールはない。 80 太陽質量のブラックホールがでてきたのは、純粋に M/L 一定の仮定のためである。実線で示したのが、 M/L 一定の仮定をおかず、実際の質量分布から求めたジーンズ方程式を使って求めた速度分散である。当然の結果であるが、これは速度分散の「観測」結果と極めて良く一致しており、ブラックホールは必要ではない。

2.4 解釈

シミュレーションからはっきり確認できたことは、標準的なシナリオに従って進化した、collapse した球状星団を持ってきて、 M/L 一定として解析するとブラックホールの存在が結論されるということである。もうひとつ、ある意味もっと重要なことは、シミュレーション結果は M15 の定性的な特徴を極めて良く再現した、特に速度分散や輝度密度のべき等をほぼ完璧に再現したということで、これは標準的な球状星団のシナリオに対する強力なサポートになっている。

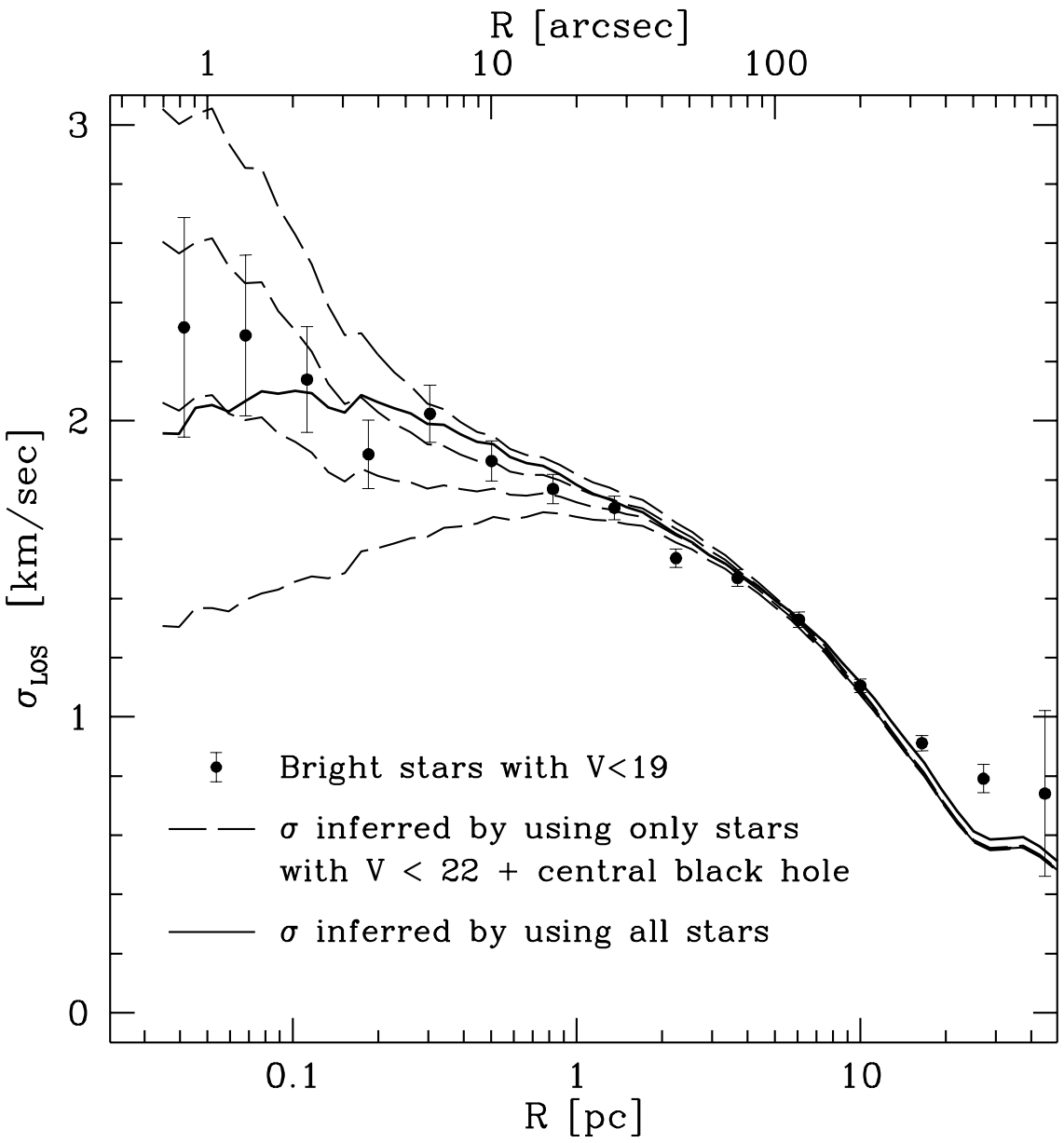

Figure 1: Line-of-sight velocity dispersion of the $V < 19$ stars in the N-body simulations (filled circles), and inferred from the stellar number density and cluster potential (solid and dashed curves). The solid curve shows the inferred velocity dispersion of stars with $V < 22$, using the potential calculated from all stars. Dashed curves are calculated using the potential determined from stars with $V < 22$, assuming a constant M/L, together with central point masses of (bottom to top) 0, 40, 80 and 120 $M_\odot$. The value of M/L is chosen to fit the measured velocity dispersion between 1 and 10 pc from the cluster center. For constant assumed M/L, the best fit has $M_{\rm BH} \sim 80 M_\odot$.

ともかく、 M/L 一定の解析ではそこにはないブラックホールがあることになってしまうので、これは駄目である。既に述べたように Gerssen 他は M/L にモデル計算の結果をいれた解析もやっているわけだが、これはどう考えても正しく計算できていれば M/L 一定の時よりもブラックホールの質量が小さくならないといけないので、あまり変わらないという結果になったのは、おそらく彼らの計算が間違っているからと考えるべきであろう。

我々は上のように考えて論文を投稿し (Baumgardt et al., 2003a)、Gerssen と共著者にはプレプリントを送った。すると、数時間のうちに「M/L モデルをいれた計算には間違いがあって、現在再計算中だ」と返事があり、さらにその数時間後にはその再計算の結果が投稿され、プレプリントサーバーにも登録されていた (Gerssen et al., 2003)。

間違いは一体どういうものであったかというと、Dull 他の論文の M/L のグラフの横軸の目盛りが約 3 倍間違っていて、そのグラフを信用したので M/L が大きい領域の半径をそれだけ小さく見積もっていた、つまりは中心部で M/L が大きくなるのがほとんど計算に入っていなかったというものである。なるほど、 M/L が一定の計算と同じ結果になったはずである。

Gerssen 他の修正版の論文には、ブラックホールの質量は小さいけど存在はしてると主張されているが、1σ エラーバーのほうが質量よりも大きく、これはブラックホールの質量に上限値をつけただけの結果と解釈するのが普通である。いいかえれば、現在の観測結果をもっとも普通に解釈すると、 M15 の中心に巨大ブラックホールは存在しない。

3 G1

では G1 についてはどうであろうか？細かいことは省略するが、 G1 についても我々のシミュレーションではブラックホールなしで密度、速度分散を再現できた。なお、 G1 は非常に緩和時間が長く、回転しておりかなり偏平である。回転速度、偏平度についても、初期に適当に角運動量を与える、具体的には同じ質量のキングモデルを off-center な放物軌道から合体させた初期条件から初めることで非常に良く再現できた。

Gebhardt の主張 (private communication) は、速度分散の 4 次のモーメントがブラックホールがないと説明できないというものである。もちろん、4 次のモーメントが信頼できる精度で決まっていれば、それはかなり有力な根拠になる。しかし、彼らのデータ (未発表) を見た限りでは、4 次のモーメントがブラックホールの影響がないはずのかなり外側でも有意に正の値を持っており、ベースラインの設定等の観測データの処理の段階で問題があったことを示唆する結果になっている。

4 考察

結局、 M15、G1 のどちらでも、ブラックホールがないシミュレーションモデルで観測結果を非常に良く説明できる。このことからブラックホールがないと結論できるわけではもちろんないが、少なくとも現在の観測データからブラックホールがあると結論できないということは間違いないであろう。

M15 のほうは間違いの原因もはっきりしていて他に影響するようなものではないので問題はないが、 G1 のほうは原因がはっきりしないだけに影響範囲がはっきりしない。 G1 でブラックホール質量の推定に使われたのは、いわゆる Nukers[3] が使ってきた彼らにとっては標準的なツールボックスである。そして、 G1 についての彼らの結果は 2σ レベルであり、多くの楕円銀河についての彼らの結果に比べて特に悪い結果ではない。ということは、逆にいえば例えば Magorrian et al. (1998) の結果の相当数は G1 と同様なものである可能性がある。これについては、理論、観測の両面から検証を行っていく必要があるだろう。

References

Baumgardt, H., and Makino, J. 2003, *MNRAS*, 341, 247.

Baumgardt, H., Hut, P., Makino, J., McMillan, S.L.W., and Portegies Zwart, S.F. 2003a, *ApJ*, 582, L21

Baumgardt, H., Makino, J., Hut, P., McMillan, S.L.W., and Portegies Zwart, S.F. 2003b, *ApJ*, 589, L25.

Djorgovski, S. G., et al. 1997, *ApJ*, 474, L19

Dull, J. D., Cohn, H. N., Lugger, P. M., Murphy, B. W., Seitzer, P. O., Callanan, P. J., Rutten, R. G. M., and Charles, P. A. 1997, *ApJ*, 481, 267

Ebisuzaki, T., Makino, J., Tsuru, T. G., Funato, Y., Portegies Zwart, S. F., Hut, P., McMillan, S. L. W., Matsushita, S., Matsumoto, H., and Kawabe, R. 2001, *ApJ*, 562, L19

Gebhardt, K., Rich, R. M., and Ho, L. C. 2002, *ApJ*, 578, L41

Gerssen, J., van der Marel, R. P., Gebhardt, K., Guhathakurta, P., Peterson, R., and Pryor, C. 2002, *AJ*, 124, 3270.

Gerssen, J., van der Marel, R. P., Gebhardt, K., Guhathakurta, P., Peterson, R., and Pryor, C. 2003, *AJ*, 125, 376.

Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Gebhardt, K., Green, R., Grillmair, C., Kormendy, J., and Lauer, T., *AJ*, 115, 2285.

Meylan, G., Sarajedini, A., Jablonka, P., Djorgovski, S. G., Bridges, T., and Rich, R. M. 2001, *AJ*, 123, 830

[3] Gebhardt, Faber, Magorrian, Richston ら、 ハッブルでの光学観測から楕円銀河の中心ブラックホールを研究しているグループ