

●●●●あの論争は…いま？ (10) ●●●●

## 球状星団の中心にはブラックホールがある？

### *Massive Black Holes at the Centers of Globular Clusters?*

牧野 淳一郎

〈国立天文台理論研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: makino@astron.s.u-tokyo.ac.jp

論争の種：球状星団中心に大質量ブラックホールがあるかどうか

論争のはじまり：1970年代

主な対立説：ある/ない

現在有力な説：あるかもと思っていた星団にはない/絶対ないと思っていたところは？

#### 1. ことの起こり

2002年9月18日にStSCI(宇宙望遠鏡科学研究所)は以下のようなプレスリリースをしました\*1。

Hubble Discovers Black Holes in Unexpected Places

Medium-size black holes actually do exist, according to the latest findings from NASA's Hubble Space Telescope, but scientists had to look in some unexpected places to find them.

(中略)

Van Der Marel led a team that uncovered a black hole in the center of the globular star cluster M15, 32,000 light-years away in the constellation Pegasus. His collaborator Joris Gerssen, also of the Space Telescope Science Institute, pinned down the black hole's mass at 4,000 times that of our Sun.

(後略)

著者による和訳

ハッブル、予期しないところにブラックホールを発見

NASAのハッブル宇宙望遠鏡の最新の発見によれば、中間サイズのブラックホールは本当に存在する。しかし、その発見のためには、科学者たちは予想外の場所に目を向ける必要があった。

van der Marelはペガサス座の中にあり3万2千光年離れた球状星団M15の中心にブラックホールを発見したチームのリーダーだ。彼の協力者で同じく宇宙望遠鏡科学研究所所属のJoris Gerssenは、ブラックホールの質量を太陽質量の4,000倍と決定した。

予想外と書かれていますが、実は球状星団の中心にブラックホールがあるのではないかという説には長い歴史があります。元々、1970年中頃にX線源が球状星団に見つかった時に、最初は空間分解能が低くて場所がよくわかりませんでした。そ

\*1 <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2002/18>

ここで、中心に大質量（数千太陽質量程度）のブラックホールがあるというモデルが例えば Bahcall and Ostriker<sup>1)</sup> によって提案されたようです。その後、Einstein や Rosat といった、空間分解能の高い X 線衛星での観測が進むと、球状星団には複数の点源があり、その中には中心にないものもたくさんある、ということが明らかになりました。その結果、これらは普通の低質量 X 線連星であろうということになり、球状星団の X 線源が大質量のブラックホールである（ここでは大質量というのは太陽質量の数倍以上をさすことにします）という考えはかえりみられなくなりました。

他方、ブラックホールがあっても X 線で明るく光っているとは限らないわけで、X 線源が中心になくてもブラックホールはあるかもしれません。1970 年代後半に、中心にブラックホールがある恒星系の進化の研究が上の Bahcall や S. Shapiro といった人々を中心に進みました。それらの研究の重要な結果は、ブラックホールがあって、2 体緩和で星の分布が進化すると、ブラックホールに十分近いところでは星の分布は数密度が半径の  $-7/4$  乗に比例するカスプになるということです。これは Bahcall-Wolf カスプとして知られており、ブラックホールをもつ恒星系の進化の理解の基本の一つです。

2 体緩和とは、要するに球状星団や銀河のような恒星系で、星の数が有限であることによる星の分布関数のゆらぎによって一つ一つの星のエネルギーや角運動量がランダムウォークする効果です。基本的には熱平衡に向かう効果なのですが、重力が効く系では実効的な比熱が負になるために 2 体緩和によって構造ができる場合が多く、ブラックホール周りの密度カスプもその一つです。2 体緩和の効果の大きさは星の数密度、質量、速度分散などによりますが、基本的に球状星団では必ず大きな効果があります。

1980 年代になって望遠鏡の空間分解能が上

がってくると、球状星団には中心付近の恒星の分布がカスプ的に中心までどんどん上がっているものかなりの数あるということがわかってきました。これは分類としては PCC (Post-Core-Collapse) 星団と呼ばれていて、ブラックホールがあるわけではなく重力熱力学のカスタロフの後の状態であると考えられる人が多いのですが、ブラックホールがあるという解釈も可能です。さらに、1990 年代中頃になってハッブル宇宙望遠鏡が上がり、修理も終わると M15 のような球状星団について明るい星は星団の中心まで分解して数を数えることが可能になりました。その結果、表面輝度分布がほぼ半径の  $-0.8$  乗で中心に向かって上がっていくということが確実にになりました。これは、上の  $-7/4$  より 1 小さくなっていて、表面輝度なので 1 小さくなるはずですからちょうどあっているわけです。

しかし、ブラックホールなしで重力熱力学のカスタロフの後であるというモデルでも、恒星の質量関数にもっともらしいモデルをもってくるとやはり観測される明るい星の密度分布のべきは  $-1.8$  程度になり、観測とぴったりあう、ということもわかっていました。単純な、すべての星の質量が同じとするモデルではべき指数が  $-2.2$  程度になるのですが、質量分布があると軽い星のスロープは浅くなります。球状星団でもっとも重い星は中性子星や重い白色矮星であり、質量は太陽の 1.2-1.4 倍です。見える星でもっとも明るいのはターンオフ付近の赤色巨星で質量は太陽の 0.7 倍前後になります。この質量の違いはちょうどべきの違いを説明します。

では、van der Marel たちはどうやって中心にブラックホールがあると主張したのかというと、これは恒星の速度分散の観測によっています。ハッブル STIS による分光観測で中心付近の何個かの星の視線速度を求めて、それらと地上からの観測で求まっているもっと外側の速度分散をつないだものをブラックホールありのモデルのほうが

なしのモデルより良く説明できる、というのが主張の根拠でした。

特に、彼らは重力熱力学のカタストロフの後であるというモデルについても理論計算の論文から質量分布を入れて観測へのフィットをしていて、やはりブラックホールがないとあわない、という結論を出していました。これは、かなり信憑性が高い結果のようにみえます。また、van der Marelは銀河の研究者として良く知られており、非常に精密な仕事をする人として高く評価されていました。

## 2. 攻撃開始

しかし、彼らの発表と、同時にでた Gerssen らの論文<sup>2)</sup>を見た時の私の印象は、

「これ絶対どっか間違ってる」

というものでした。そう思ったのは私だけではなく、この日にはヨーロッパ、アメリカ、日本の球状星団の力学進化の研究者の間で「これ見た?」「おかしくない?」といったメールが飛び交いました。理論的には、この結果はおかしいというのはかなりはっきりしていました。というのは、観測結果の速度分散プロファイルが、重力熱力学のカタストロフから予想されるものと定性的にはあっていただけからです。プロファイルは中心に向かって非常にゆっくり上がっていくものでした。上がっていく理由は、重い星の密度のべきは  $-2.2$  程度で等温の  $-2$  より深いからです。まあ、この説明はちょっと因果が逆転していて、そもそも中心のほうが速度分散が大きいので重力熱力学のカタストロフが進むのです。

なので、何かが間違っているはずですが。しかし、論文だけをいくら見ても、結果はおかしいのですが解析手順のどこが間違ってるのかはわかりません。しかし、この結果はもしも本当なら重要なものですから、放置しておくわけにもいきません。

ちょうどこの時、Holger Bamagardt が学振の外国人特別研究員で私のところにて、GRAPE-

6 を使って現実的な球状星団の進化のサーベイ的な計算をやったところでした。これは6月くらいに論文を投稿したところだったと思います。そこで、Holger に、M15の空間構造とうまく比べられるような計算結果はない? と聞いてみました。そうすると、ある、という返事です。これはもちろん普通に重力熱力学のカタストロフを起こしただけのもので、中心にブラックホールなんかありません。それで観測を説明できるかどうか調べて、上手くいきそうならシミュレーションで観測を説明できるという論文にしよう、ということで話がまとまりました。Gerssen らの解析のどこがおかしいかよくわからなかったのですが、同じやり方でシミュレーション結果を解析して、そこにはないブラックホールがあるという結論になれば、どっかがおかしいという主張にはなりません。

さて、問題は どうやって観測と比べてあっていると主張するかです。Gerssen らの論文では、他のグループがやはりハッブルで決めた表面輝度(星の数密度)プロファイルから、 $M/L$  が一定として速度分散を出し、それを彼らが決めた速度分散プロファイルと比較する、という方法をとっています。中心にブラックホールがあると仮定した速度プロファイルを作り、ブラックホールの質量をいろいろ変えてもっとも良く合うものでブラックホールの質量が求まったとしていました。これは、楕円銀河などで中心ブラックホールの質量を決めるごく普通の方法です。

ですから、われわれも全く同じようにシミュレーションの計算結果を  $M/L$  が一定と仮定して「観測」して、明るい星の密度分布から決まる速度分散と実際の速度分散があうような「ブラックホール質量」を決めてやろう、という相談をしました。Holger は早速、まずブラックホールなしの場合の速度プロファイルを作ってくれました。予想どおり、速度分散が中心で足りない結果になりました。これが9/20の話です。では論文を書こう、というので、この辺の話を一緒にしていたブ

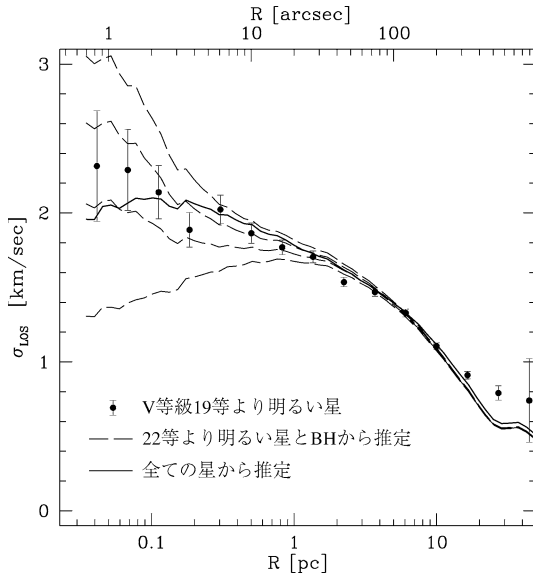


図1 シミュレーションで得られた星団の「観測結果」。エラーバーつきの点はV等級19以上の星の視線速度分散、実線はそれらの星の、星団のポテンシャルから計算した速度分散、破線はM/Lが一定として計算した速度分散で、仮定した中心ブラックホールの質量は星団の質量の0, 0.5, 1, 1.5% (下から順に)。文献3から転載。

リンストン高等研究所の Piet Hut, ドレクセル大学の Steve McMillan, アムステルダム大学の Simon Portegies Zwart とさっきの Holger の共著にすることにし、まず Piet がアブストラクト案を書き、Holger がブラックホールありの解析をしている間に私が論文の第一次稿を書くことにしました。

その頃のメールをひっくり返してみると、私は9/28に第一次稿を共著者に送っています。9/23から1カ月ほど私はケンブリッジの Aarseth のところにおいて、GRAPE-6 ライブラリのデバッグとかしていたのですが並行して論文草稿も書いていたようです。この時はまだ Holger のグラフはできていなかったのですが、草稿を見ると結果はこうに決まってると思ってグラフの説明まで書いてあります。Holger は9/30には結果を出してく

れて、それは予想どおりのものでした(図1)。シミュレーション結果を Gerssen らのやり方で解析すると、ブラックホールがないとあいません。そのブラックホール質量も、星団の質量を M15 と同じにすると太陽質量の3,000倍と Gerssen が見つけたとっているものとはほぼ同じになりました。グラフの格好とかを共著者の中で議論しながらいろいろ調整し、さらに英語をネイティブの共著者が全面修正して、10/5には論文<sup>3)</sup>を投稿し、astro-phにもあげて、それから van der Marel に、「こんな論文投稿したから見てね」という連絡を(Piet Hut から)しました。10/5は土曜なので、astro-phにでるのはGMTで10/7月曜の夜です。

### 3. 逆襲と再逆襲

と、数時間後に返事がありました。その内容は驚くべきもので、なんと、彼らが解析に使った理論計算の論文のM/Lのグラフの横軸の単位が間違っていて、それを使って解析した結果M/Lの半径方向の変化の効果を小さく見積もっていた。その結果ブラックホールが必要になった、というのにちょっと前に気がついた、というものでした。その理論計算の論文を見ると確かに横軸が間違ってます。この論文を書いたのはフォッカープランク計算の権威の Haldan Cohn のグループで、Piet が早速そっちに問い合わせたところ、彼もそれには気がついてすでに van der Marel らと議論している、とのことでした。彼らの間でどうい議論があったのかわからないですが、われわれの論文が astro-ph にでると同じ日に Erratum を astro-ph に出すことにしたようで、月曜の夜まで両方の論文内容の調整をしました。

ところが、実際に彼らが astro-ph に出したもの<sup>4)</sup>を見ると話が全然違って、Erratumではなく Addendum と書いてあり、解析に間違いがあったことは認めるものの再解析の結果でも1,600太陽質量のブラックホールがあると確認された、とか書いてあります。正直、寝言は寝てい

えと思ったのですが、まあ、そうはいつでもグラフを見るとBHなしでも観測と十分合う、というのは明らかなので、われわれの論文ではそういうふうに彼らの「Addendum」を引用することにしました。この修正版をわれわれは10/8火曜にastro-phに上げています。

細かいことをいうと、彼らはいろいろわれわれの結果にけちをつけていて、例えばわれわれの論文では中性子星のいくらかの部分は星団に残るとしているけれど普通にII型超新星で中性子星を作るとキックがあるから星団に残ってるはずがなくて、そんな計算はおかしいとかそういう主張も書いてありました。この、キック速度の問題は確かに存在します。しかし、それは、それにもかかわらず球状星団の中には明らかに中性子星であるパルサーが一杯あり、その起源に説明がついていない、という問題です。球状星団に結構な数の中性子星があること自体は疑う余地はありません。さらには、実は中性子星が残らないとした計算をしても結果はたいして変わらない、ということも予想はついていました。投稿した論文の最終版にはこの結果も追加しました。

この経緯を見ると、van der Marelのグループはわれわれがメールを送るずっと以前に間違いに気がついていたことは確実です。おそらく、Haldan Cohnはもっと早く気がついていて、文句をいっていたのでしょう。でも、われわれが論文を出すまでそのことをオープンにしていなかったわけです。

この話はこれで終わりではなくて、同じ10/8に、PietにNASAヘッドクォーターのMichael Salamonから「電話くれ」というメールがあり、この件について、StSCIからではなくNASAから報道発表したいから相談させてくれ、とのことでした。これは、論文がアクセプトされてから、ということで2003/1/10にNASAから発表があり、一応東大やドレクセル大学からも発表しました。日本でも多少はニュースになったので憶えている

方もいらっしゃるかもしれませんが、論文を書いた人はともかく、NASAの偉い人を含めて大方の人はわれわれの解析のほうがまっとうであると考えた、ということです。

#### 4. 球状星団に本当にブラックホールがあったら？

ここで終わるとあんまり論争ではなくて単に間違い探しなのですが、この話には続きがあります。

Holgerはいくつかの研究会でこの話をして、反応は基本的に好意的だったのですが、元論文の著者のうち特にKarl Gephardtはなかなか納得しませんでした。Holgerは、それなら、というわけでもしも球状星団に本当にブラックホールがあったとしたらどういうふうに見えるかをシミュレーションで予言しよう、と計算を始めました。

1970年代に、星の質量がすべて同じという単純なモデルでは $-7/4$ の密度カスプができるとうわかっていました。しかし、現実的な質量分布を入れて見える星を観測したらどうなるか、というのはほとんど調べられていなかったのです。シミュレーションのほうは、フォッカープランクにしても $N$ 体にしても中心にブラックホールがあると計算が困難になる、ということもありましたし、また、最初に述べたような事情で1980年代になってブラックホールがあるモデルは球状星団のモデルとしてはすたれたので誰も手をつけなかったという事情もあるようです。それ以前に $N$ 体計算はGRAPE-4ができるまでは現実的な時間でできるものではありませんでした。

結果は大体予想がつきます。重い星である中性子星や重い白色矮星は $-7/4$ のカスプを作り、それより軽いターンオフ付近の主系列星や赤色巨星はもっと浅い、体積密度で半径の $-1.4$ 乗程度のカスプを作るでしょうから、観測すると $-0.4$ 前後の非常に浅いカスプとして観測されるはずで、そんな球状星団は知られてないので、この計



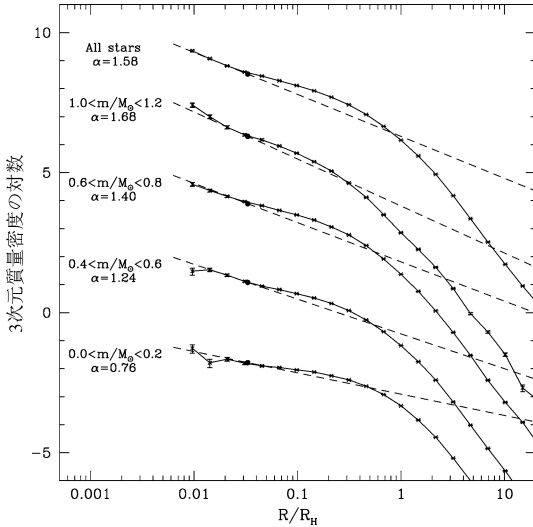


図2 中心ブラックホールがある球状星団のシミュレーションで得られた密度分布. 上から全部の星, 太陽質量の1-1.2倍, 0.6-0.8倍, 0.4-0.6倍, 0-0.2倍. 横軸の単位は半質量半径, 縦軸は任期. 文献6から転載.

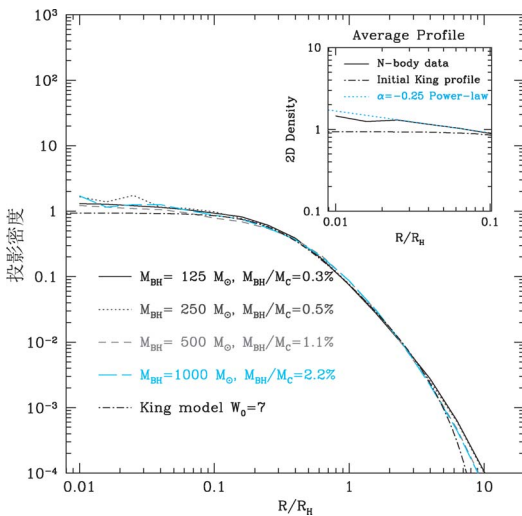


図3 中心ブラックホールがある球状星団のシミュレーションで得られた投影密度分布. 文献7から転載.

算で球状星団の中心にはブラックホールがないことが決定的に示せるだろう, というのが Holger の意図でした. 私もそうなるに決まってると思っ

ていました.

ところが, 計算結果は予想とは違っていました. 図2に示すように, 見える星は体積密度で半径の $-1.4$ 乗程度のカusp, というのは全く予想どおりだったのですが, それを投影して表面輝度にしてみると図3のように $-0.4$ のカuspなんてものは全く見えず, ほぼ完全にフラットなコアがあるように見えました. これは, 結果がでてみるとそれほど不思議な話ではありません. カusp領域がそのまま外側のもっとスロープがきついハローにつながるのではなく, いったんコア的な密度がフラットに近い構造になってからハローにつながっていたのです. 特にブラックホールの質量が小さいときにはこの傾向が強くなるとわかりました. この, コア領域がある理由も今では説明がついています.

これはなかなかたいへんな結果です. 30年前から, 球状星団にブラックホールがあるかも思っていた人は全部, M15のような中心に密度カuspが見える星団を詳しく観測してきました. しかし, そうではない, 普通にコアがある球状星団だと思っていたものに実はブラックホールがあるかもしれない, ということがわかったのです. この結果は2003年の秋頃にて, 2004年の春に2本の論文に分けて ApJ に投稿し<sup>5), 6)</sup>, さらに観測との比較に焦点をしばったレター<sup>7)</sup>も投稿しました.

理論的には, 普通のコアをもつ球状星団には実はブラックホールがあるという解釈は好ましいものです. というより, ブラックホールがないという通常の見方には大きな問題があります. これらのコアをもつ星団の多くは2体緩和の時間スケールが宇宙年齢に比べて短く, すでに重力熱力学的カストロフを起こして中心がカuspになってしまっているはずなのです. もちろん, 初期条件を微調整することによって現在の2体緩和時間は短いけれどまだカストロフに至っていないようなモデルを作ることには可能です. これは, 最初

に星団を大きくして緩和時間を長くしておき、それが親銀河の潮汐力によって小さくなって現在のサイズになっている、とするものです。しかし、球状星団の大半がそういう微調整の結果であるという考え方には無理があります。

## 5. ブラックホールの観測的証拠？

2004年夏に、Karl Gebhardt から論文草稿が Holger に送られてきました。これまで主に地上からの観測で密度プロファイルが書かれてきた普通の球状星団の密度プロファイルをハッブルのアーカイブデータを使って書き直すと、多くの球状星団のコアは今まで信じられていたよりも半径がかなり小さく、またその中の密度も完全にフラットではなく中心に向かってほんの少しだが上がっている、というのです。これが本当なら、それらの多くには中心ブラックホールがあるのかもしれない。この論文は2004年には草稿ができていたのですが、ApJに通った<sup>8)</sup>のは2006年になってからで、レフェリーとの長い闘いがあったようです。

Karl の結果はまだ広く受け入れられてはいません。大きな問題は、星の数を数える方法 (star count) ではなくて、積分した表面輝度分布でプロファイルを書いていることです。このため、例えば明るい超巨星の影響を受けて中心がずれたりしている可能性が否定できません。

## 6. 結 局？

理論的には、M15のような密度カuspがある球状星団の中心には大質量ブラックホールはない、ということのはっきりしていて疑う余地はなく、逆に「コアがある」と思っていた星団はブラックホールがあるかもしれない、というのが現状の理解です。

理論はともかく、観測で決定的な証拠を見つけるには、ブラックホールがX線とか電波でも出してくれない限り周りの恒星の運動によるしかあ

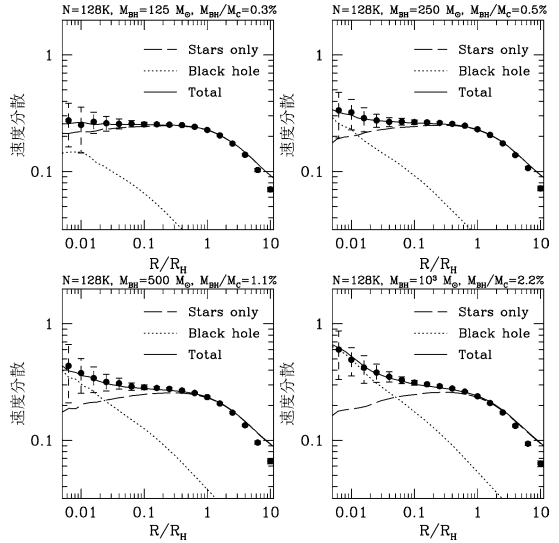


図4 中心ブラックホールがある球状星団のシミュレーションで得られた視線速度分布。文献7から転載。

りません。ブラックホールに十分近いところでは星はケプラー運動をし、星団内の普通の星よりずっと高い速度をもちます。したがって、そのような運動をしている星の集団が見つかり、その分布が理論モデルとあっていれば良いわけです。

とはいえ、これはあまり簡単な観測ではありません。というのは、中心部で星の密度があまり上がっていないということからわかるように、投影した中心部でも星の多くは星団の中心部ではなくあまり空間密度が高くない領域のものだからです。このため、かなりたくさんの星の速度を決める必要があります。もちろん、逆に数密度があまり高くないので、そんなに空間分解能がなくても良いということもあります。

運動を決める一つの方法は、固有運動を決めることです。これは1997年くらいからハッブルのデータを使ってAndersonとKingがやってきたことで、解析アルゴリズムを工夫することでピクセルサイズの数百分の1の精度で位置が決まるようになってきています。最近、この手法で47 Tucの中心部を解析した論文ができました<sup>9)</sup>。結果は、

コアの内側で速度分散が上がっていきそうで、ブラックホールがあってもおかしくはないのですが、決定的とは言えない、というものです。決定的でない理由は観測精度ではなく、星の数が足りない、ということにあります。ブラックホールがあったとしてその質量は太陽質量の1,000倍程度なので、速度がブラックホールの影響を受ける星の数は数百程度以下です。それが全部見えたとしても、速度分散からブラックホールの存在を統計的に有意な形で示すのは困難です。この事情は図4に示しました。シミュレーションで、すべての星の速度が可能な限り高い精度で観測できたとしても、得られた速度分散のプロファイルはブラックホールがない、中心でフラットなものと有意には変わりません。

しかし、ではもどうしてもないか、ということではなく、47 Tucの場合ブラックホールがあるなら軌道周期が1,000年以下の星が数十個はあるはずで、これらの星の速度の変化は、10年程度のベースラインで固有運動でも視線速度でも検出できるはずで、最近の惑星探査で実現されて

いるようなレベルの視線速度測定なら1カ月で違いが見えます。そのような観測は現在でも可能なので、誰かがやれば球状星団中心に大質量ブラックホールがあるかどうかという問題には決着がつくことになるでしょう。

## 引用文献

- 1) Bahcall J. N., Ostriker J. P., 1975, Nature 256, 23
- 2) Gerssen J., van der Marel R. P., Gebhardt K., Guhathakurta P., Peterson R. C., Pryor C., 2002, AJ 124, 3270
- 3) Baumgardt H., Hut P., Makino J., McMillan S., Portegies Zwart S., 2003, ApJ 582, 21L
- 4) Gerssen J., van der Marel R. P., Gebhardt K., Guhathakurta P., Peterson R. C., Pryor C., 2003, AJ 125, 376
- 5) Baumgardt H., Makino J., Ebisuzaki T., 2004a, ApJ 613, 1133
- 6) Baumgardt H., Makino J., Ebisuzaki T., 2004b, ApJ 613, 1143
- 7) Baumgardt H., Makino J., Hut P., 2005, ApJ 620, 238
- 8) Noyola E., Gebhardt K., 2006, AJ 132, 447
- 9) McLaughlin D. E., Anderson J., Meylan G., Gebhardt K., Pryor C., Minniti D., Phinney S., 2006, ApJS 166, 249