重力多体衝突系の物理

牧野淳一郎

東京大学理学系研究科天文学専攻

2006/6/1から: 国立天文台理論研究部

天文シミュレーションプロジェクトプロジェクト長

平成 18 年 5 月 17 日

発表の構成

- 重力多体衝突系とはどんなものか
- 最近どんなことが面白いか

20分でそんなにいろんな話はできないので適当に。

重力多体問題とは?

多体系の運動方程式:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} f_{ij} \tag{1}$$

 x_i と m_i は粒子 i の位置と質量、 f_{ij} は粒子 j が粒子 i に及ぼす力。

重力多体系なら f_{ij} はニュートン重力

$$f_{ij} = Gm_i m_j \frac{x_j - x_i}{|x_i - x_i|^3}, \qquad (2)$$

G は重力定数。

が、この式をじっとみていてもほとんど何もわからない。

(解けない)

重力多体系

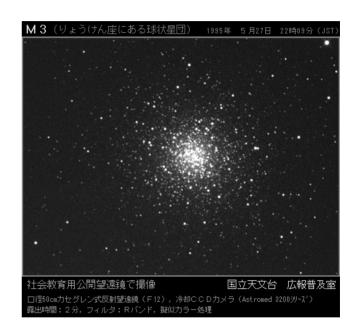
- そもそもどんなもの?
- 基礎方程式
- 無衝突系としての扱い
- 熱力学的な進化

そもそもどんなもの?

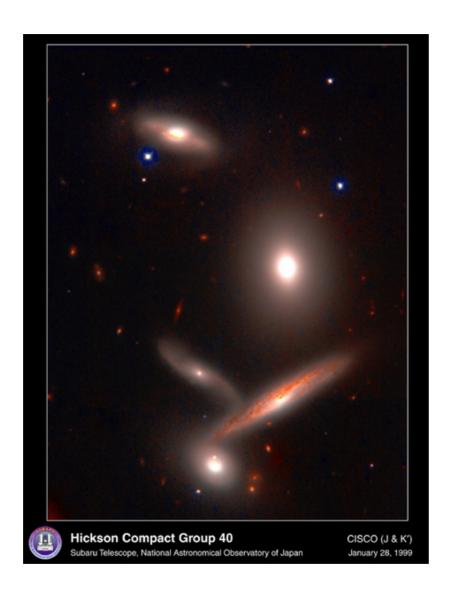
銀河



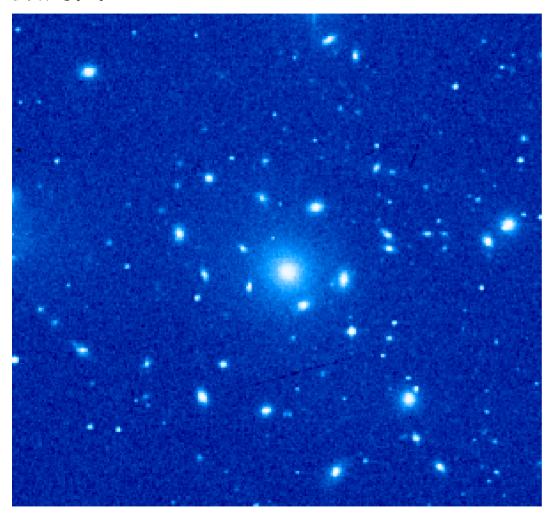
球状星団



銀河群

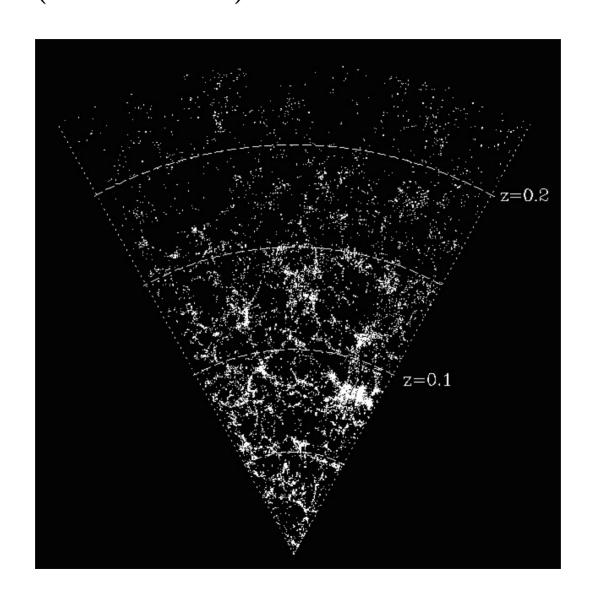


銀河団



http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap950917.html

大規模構造 (距離情報あり) — SDSS スライス



(無衝突)ボルツマン方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla f - \nabla \Phi \cdot \frac{\partial f}{\partial v} = 0, \tag{3}$$

f:6 次元位相空間での分布関数 $\Phi:$ 重力ポテンシャル,以下のポアソン方程式の解

$$\nabla^2 \phi = -4\pi G \rho. \tag{4}$$

ここで、G は重力定数であり、 ρ は空間での質量密度

$$\rho = m \int dv f, \tag{5}$$

無衝突ボルツマン方程式と熱平衡

力学平衡ではないところからの無衝突ボルツマン方程式に従った時間発展を考える。

これは流れにそって f を保存するので、系のエントロピー $(f \log f)$ の積分)は一定、つまり、少なくとも形式的にはエントロピーは保存される。

衝突系

粒子数無限大なら衝突項は無視できる

実際の系、数値実験:粒子数小さい

(大抵は数値実験では実際より小さい)

この場合、「衝突項」 $\partial f/\partial t|_{\mathrm{coll}}$ の効果が無視できない。 以下、その話。

基本的に衝突項は「2体散乱」の効果(多体の効果は無視できる)、つまりいわゆる2体緩和を考えればいい(らしい)。

普通の流体

- ガス:粒子の平均自由行程はシステムサイズよりもはるか に小さい
- 従って、普通に局所熱平衡。
- 温度とか圧力とか定義できる。

自己重力系の状況

自己重力質点系では状況が全くことなる。

- 粒子数が無限大の極限:平均自由行程も無限大
- 熱平衡に向かう(すなわちエントロピーを生成する)よう なメカニズムがない。
- 粒子数が有限の場合も、依然として平均自由行程は長い
- 粒子数無限大の時の軌道からずれる典型的なタイムスケール: 粒子数に比例

Dynamical Friction 等

とはいえ、ミクロには運動エネルギー等分配に向かう

- 重いものはエネルギーを失って、ポテンシャルの底の沈む
- さら、ポテンシャルの底で運動エネルギー等分配になる

Dynamical friction

mass segregation

熱平衡状態の非存在

重力多体系に統計力学/熱力学を適用する際の基本的な問題:

「重力多体系には熱平衡状態がない」ということ

「熱平衡状態がない」というのはそもそもどういうことか?

示し方はいろいろ、、、以下は1例

熱平衡状態の非存在(続き)

古典統計である

したがって、速度分布関数はマックスウェル・ボルツマンでな ければならない

これは不可能

自己重力系にある粒子のエネルギーは、定義からして無限遠で の重力ポテンシャルの値を超えない

したがって、ある空間のある点での速度分布には必ず上限が ある。

言い換えると、上限を超えた粒子は逃げていってしまう、、、

重力多体系の最終状態

粒子同士の散乱の結果、高エネルギーの粒子が作られるとそれ は系から逃げていってしまう

というわけで、統計力学からいえること:

重力多体系は、十分長い時間が立てば蒸発してしまう

しかし、これは間違いではないけど、でも、現実に存在している重力多体系の理解には役に立たない。

熱平衡分布の熱力学的安定性

以下、熱平衡分布が安定かどうかを考える。このために、断熱 壁をつける。

で、とりあえず流体の場合を考える。流体だと普通に温度や圧力、エントロピーとか考えられて、熱力学的な取り扱いができるから。

何に対して安定か:熱(エネルギー)の再分配を与えるような 摂動に対して。

普通のものは安定(でないと第二法則に反する)

自己重力系の熱力学的安定性

重力が働くと、そうとは限らない:

ここまでで求めた等温平衡状態:中心では重力をささえるために密度が高い。外側にいくほど密度が下がる。

熱を奪われると、圧力が下がって少し収縮する

重力が強くなるので、もうちょっと収縮する

回りより温度が上がる

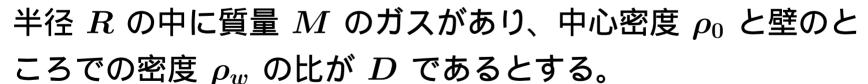
ということが起こり得る。(第二法則に反しないことに注意)

熱力学的安定性(続き)

熱をとられて温度が下がる =「見かけの」比熱が負である

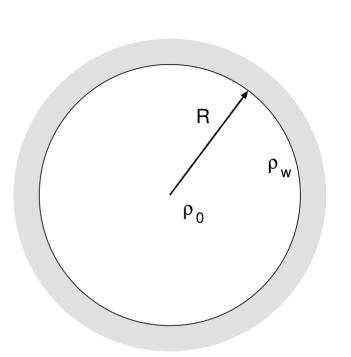
以下、線形安定性解析の結果を 見ていくことにする。

改めて、絵を書いておく。



D=1: 重力なし(温度無限大)

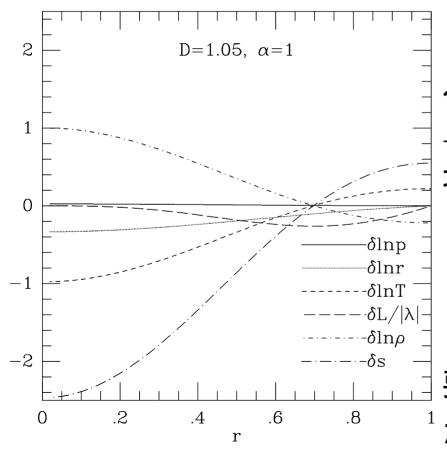
 $D=\infty$:特異解 $ho \propto r^{-2}$



解析結果 1

以下、結果だけ

安定な場合



λ: 固有値

D=1.05: 重力が無視できる

場合。

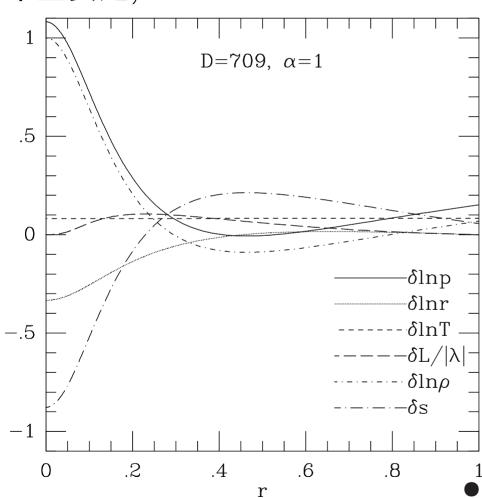
● 圧力は変化しない

● エントロピーと温度が比例

要するに、普通の断熱容器のなかのガス。

解析結果 2

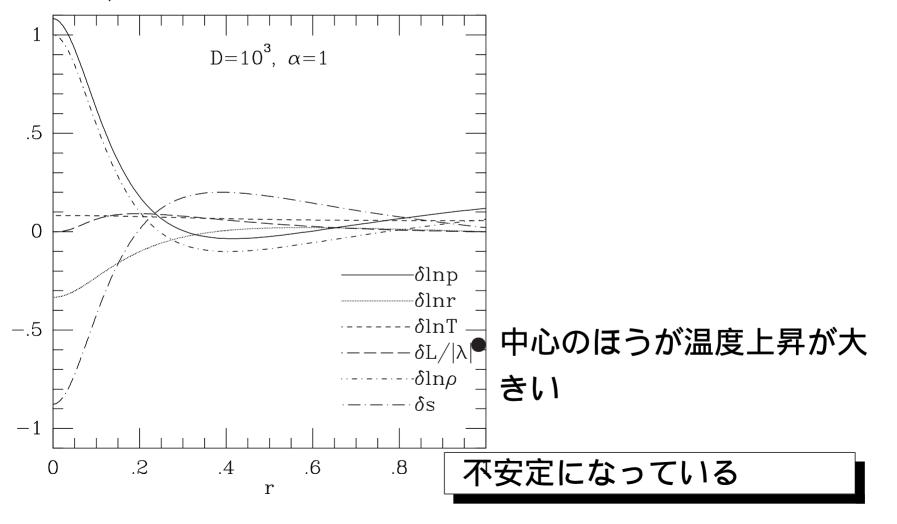
中立安定,D=709



●温度勾配ができない

解析結果 3

不安定, D = 1000



結果のまとめ

というわけで、線形解析の結果:

断熱壁をつけて等温の平衡状態を作っても、重力が効いていると熱力学的に不安定

一応、「重力熱力学的不安定性」 gravothermal instavility という名前がついている。

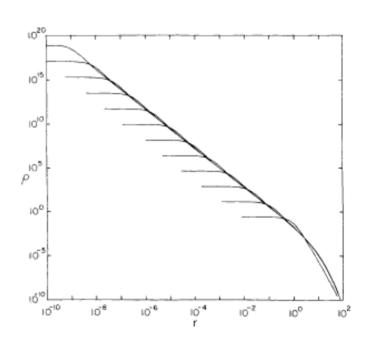
有限振幅の進化

摂動が有限振幅まで成長したあとの進化:数値計算で調べる。

Hachisu et al. (1978): 自己重力流体について数値計算した。

Lynden-Bell & Eggleton (1980): 流体の自己相似解を 求めた

Cohn (1980): 流体近似を使わない軌道平均フォッカー・プランク方程式の数値積分から、自己相似解が実現していることを示した。



自己相似解の後の進化

自己相似解:有限時間で中心密度が発散

「その後」どうなるか?が問題

- 球状星団
- 矮小銀河の中心部
- 普通の銀河の中心部(?)

今までに密度が発散しているはずのものもある。

- 途中でブラックホールに、、、(普通の球状星団では難しい)
- 連星によるエネルギー供給で反転

連星

連星: 3 体散乱で確率的にできる(3つ粒子があれば、そのうち2つを連星にして重力エネルギーをとり出した方がエントロピー的には得なので)。

普通の星の中心での核融合と同様にエネルギー供給として働く

→ 収縮を止めて、安定な定常状態になる?

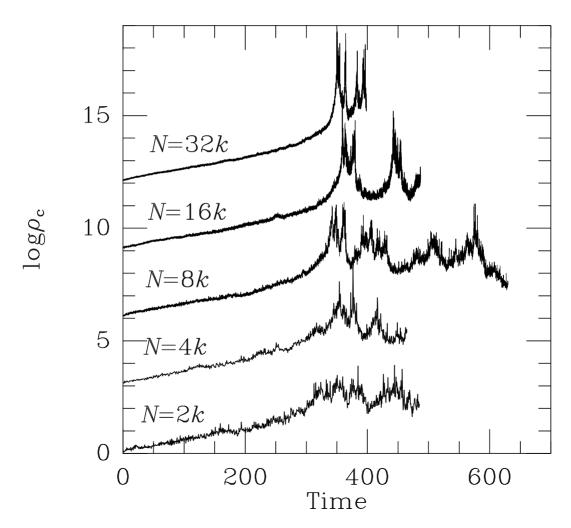
数值計算

Henon (エノン・ハイレスのエノンと同一人物) (1975): モンテカルロ法(といっても、メトロポリス法みたいなのとは全然違う、、、詳しくは後述)での計算にエネルギー供給を人為的に入れて、ホモロガスに膨張する解を得た。

- Heggie 1984, Goodman 1984: 同様な結果
- Sugimoto and Bettwiser 1983: ホモロガスに膨張が実は不安定であることを、流体近似の数値計算から「発見」
- 1985年には他のグループも確認、 1986 年にはフォッカープランクでも確認。

N体計算

1996 年: N 体計算でも確認

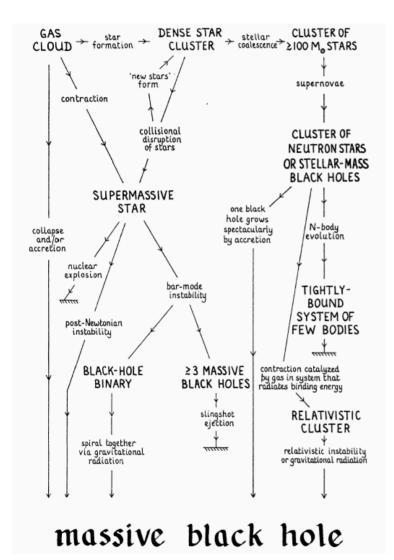


最近の話題

色々ありますが、ここではブラックホール関係の話題を。

- 1. はじめに:大質量ブラックホールの作り方
- 2. M82 の IMBH 候補
- 3. 合体シナリオ
- 4. 最近の発展
- 5. まとめ

はじめに:大質量ブラックホールの作り方



Classic View (Rees 1984)

本質的には 2通り

- 単一の超大質量星
- コンパクト星の高密度クラスターの熱的な進化

どちらも簡単ではない...

理論はともかく

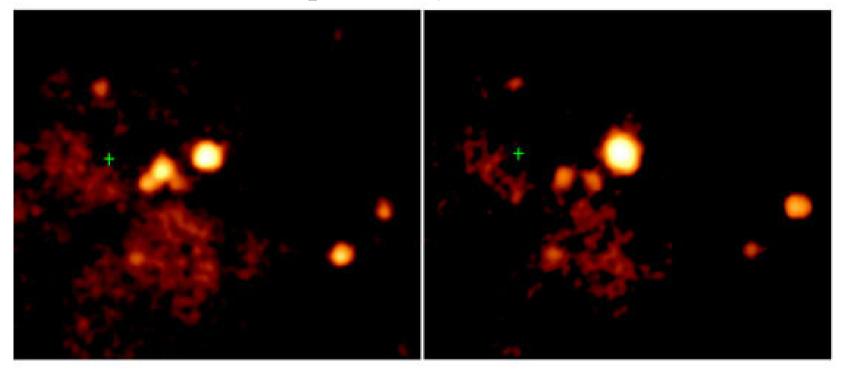
観測的なギャップ

- ullet 恒星質量 ${
 m BH} \sim 10 M_{\odot}$
- ullet 超大質量 ${
 m BH}>10^6 M_{\odot}$

中間は???

M82 の中間質量 BH 候補

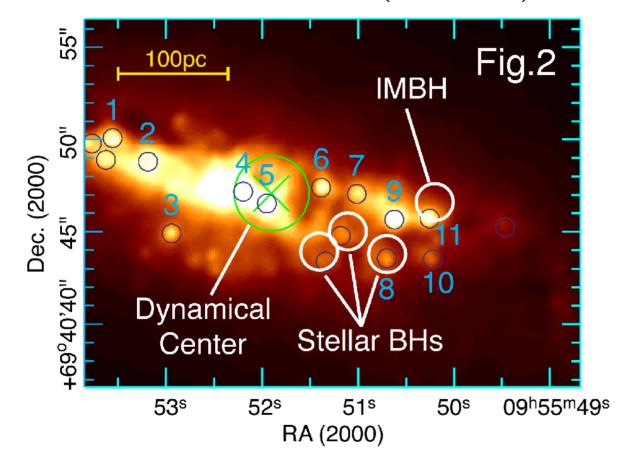
Matsumoto et al. ApJL 547, L25



大きな時間変動を示す複数のソース

赤外 カウンターパート

M82 のすばるによる観測 (K' band)



これは論文になってない。 HST の論文が先にでた。

IMBH は星団の中にある?

(理論家の目には) IMBH は若くてコンパクトな星団の中にあるというのは「明らか」。

では、 IMBH はどうやってできたか?

How IMBHs were formed?

- 星団と同時に出来た?(あんまりありそうにない)
- 星団の中で作られた。

一つの可能なシナリオ

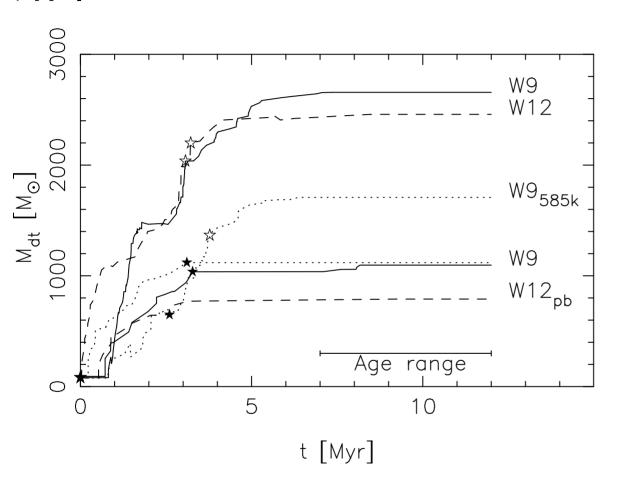
- 1. 星団の中心で星の暴走的な合体で大質量星ができる
- 2. この星のコラプスで IMBH (の種) ができる
- 3. この IMBH (の種) がさらに他の星と合体して成長

シミュレーション

Portegies Zwart et al., Nature 2004 初期条件

- King model with $W_0 = 7-12$
- Salpeter IMF (as suggested by McCrady et al)
- Star-by-star simulation for MGG-11 (MGG-9 is scaled)

結果



 $W_0 \geq 8$ なら暴走的合体 (MGG-11では). MGG-9 (緩和時間長い)では暴走的合体はおきない

暴走的合体

基本的には、力学的摩擦の時間スケールが大質量星の寿命より短いなら暴走的合体はほぼ必然的に起きる。

暴走的合体を起こした星は(多分)そこそこ大きな BH、例えば $100-1000~M_{\odot}$ になるであろう。

定量的な結果は主系列での質量放出やブラックホールになる質量の割合による。

IMBH 形成についてのまとめ

- 暴走的な合体による IMBH の形成は、理論/数値実験の 結果を見る限りありそう。
- 暴走的な合体が起きる条件は星団の緩和時間が短く高密度 なコアを持つこと

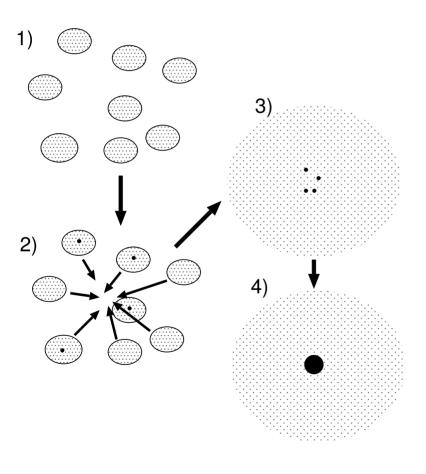
少なくとも、M82 の星団の中にある IMBH 候補を説明 する極めてもっともらしくモデルではある。(他になんかあ るわけでもない)

IMBH と SMBH の関係

- 1. 無関係?
- 2. 同じようにできた?
 - SMBH の成長時間長すぎるGrowth timescale would be too large
- 3. SMBH を IMBH から作る?
 - タイムスケールの問題を解決できる(かも)

Merger シナリオ

Ebisuzaki et al. 2001 Ap
J $562,\,19\mathrm{L}$



- スターバーストで大量に星 団を作る
- 1. いくつかの星団では IMBH ができる。多くの星団はダイナミカルフリクションで中心に沈む。
- 3. 星団は潮汐破壊。 IMBH は中心に残る。
- 4. 複数の IMBH は星や他の IMBH との相互作用で連星 になり、重力波で合体すると ころまでハードになる。

理論的問題

- IMBH はできる? 「問題なし」
- 球状星団に IMBH がないのは何故?(本当にない?) Baumgardt et al., Portegies Zwart et al.
- 親星団は IMBH を銀河中心に持ち込めるか?
- IMBH 同士は合体できるか?

時間が足りないので最初の話だけ。

球状星団に IMBH がないのは何故?

教科書的回答:

- 1. 球状星団の緩和時間は長い $\sim 10^9~{
 m yrs}.$
- 2. コアも多分初期に小さくない

本当に? M15 と G1 に見つけたという論文があるけど?

M15



古典的 "Core Collapse" 星団。

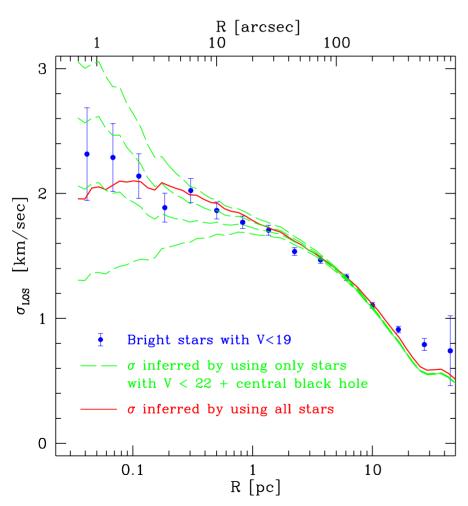
個々の星まで分解して star count で密度プロファイルが書ける。

コアはなく中心までカスプ。

カスプの傾き ~ -0.8 ,

中心 BH と 重力熱力学的崩壊のどちらとも矛盾しない。

BHなしのモデルに「ブラックホール発見」



BHなしのシミュレー ション結果を観測と同じ 方法で解析すると「ブ ラックホールがある」と いう結論になる

重いために中心に集まった中性子星と重い白色矮星が「ダークマス」として振舞う。

球状星団に IMBH はあるのか?

M15 には「極めてありそうにない」。標準的なモデルで完璧 に説明できる。

(詳しい話はしませんが)

G1 はもっとありそうにない (Baumgardt et al. ApJL, 2003, 589, L25)

球状星団に IMBH はあるのか?(続き)

探していた場所は間違ってないか?

そもそも BH のある球状星団はどんなふうに見えるのか?

理論 (Bahcall and Wolf 1976)

rate): $\rho \propto r^{-7/4}$.

表面輝度のカスプの傾きは -0.75 のはず。

注意:

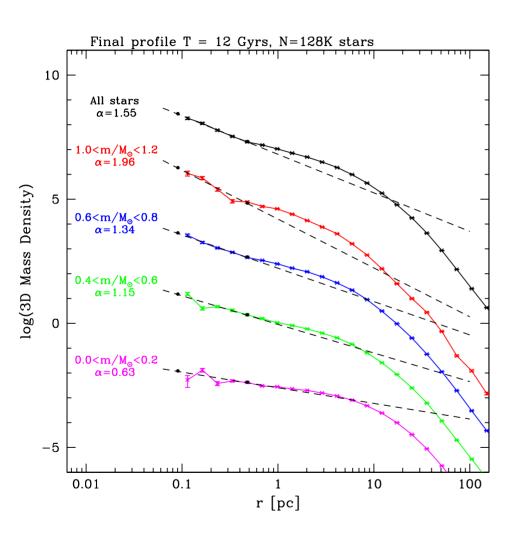
- -0.75 はあくまでも漸近的な傾き
- 全ての星が同じ質量と仮定

もっともらしい IMF と恒星進化モデルを入れて、 IMBH がある球状星団を進化させてみた。

 $(W_0 = 10 \text{ King model})$

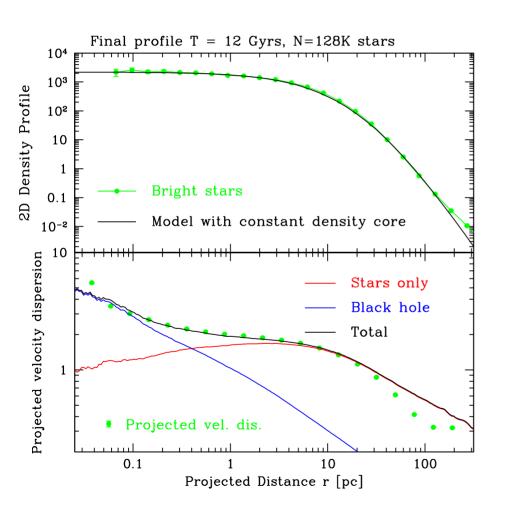
Baumgardt et al, 2005a,b,c

3D 密度分布



- 軽い星はスロープ浅い
- 最も重い星:~ -2 (-7/4 じゃない!)

投影



- どう見てもフラットなコアがある
- 速度分散は「コア」の中心近くで微妙に増加

IMIBH があるのは一見普通にコアがある球状星団のほうと思われる

まとめ

- 重力多体衝突系の進化は、局所熱平衡でもないしグローバルに熱平衡がない、という意味で理論的に面白い。
- 理論的に面白いだけでなく、ブラックホール形成といった 現在ホットな天文学の話題と直接かかわる。
- (この話はしませんでしたが)シミュレーションは、専用計算機 GRAPEや、計算法の進歩もあって結構色々できるようになってきた。