

2014 年 11月 3-4日

「超巨大ブラックホール研究推
進連絡会」第2回ワークショップ

位置天文観測衛星小型JASMINE に よるブラックホール合体痕跡の観測

矢野太平(国立天文台)

梅村 雅之(筑波大)谷川衝(理研)、JASMINE-WG

SMBH形成

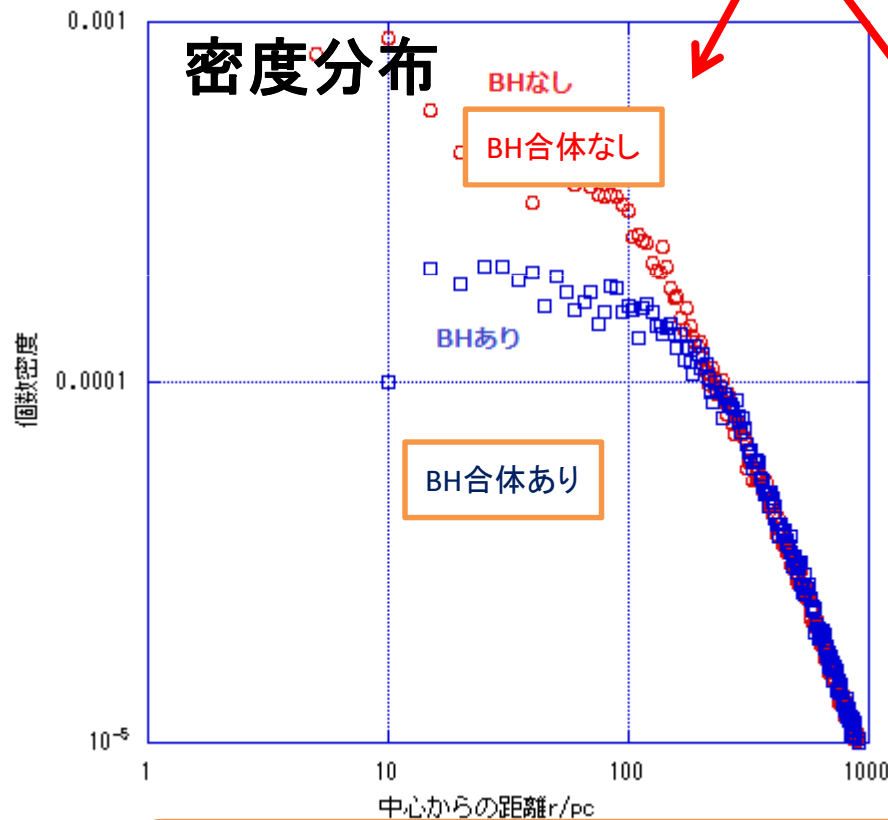
- 超巨大ブラックホールの形成
 - ・ガス降着、
 - ・多体粒子系の近接相互作用)
- 銀河形成標準理論のもとでは、何らかのブラックホール合体過程が起こったと考えるのが自然。しかし、巨大BHの合体は、困難とされてきた (Begelman、Blandford、& Rees 1980)。
- 近年、一般相対論効果を入れた高精度N体計算により、BHと銀河内の星との力学的摩擦により、BH多体系が連続的な合体を起こせることが示された (Tanikawa & Umemura 2011、2014)。

BH合体が起こると、星の分布にその痕跡

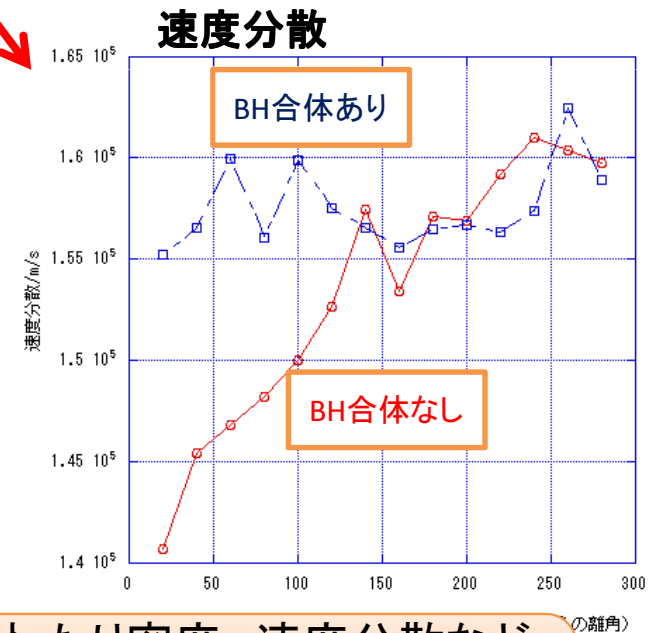
⇒バルジの星分布からBH合体の観測的証拠を得ることができれば、超巨大ブラックホールの形成過程が明らかになるとともに、
「銀河形成標準理論の検証」になる。
もしその証拠がなければ「標準理論の見直し」という新たな問題提起になる。

銀河中心領域の星の位置運動の変化

BH合体プロセスで銀河中心領域
の星の位置運動は変化する！



- Tanikawa&Umemura2014のシミュレーションデータより。
- 銀河中心からの距離と個数密度の関係
- 赤: BH合体プロセスなし。
- 青: BH合体プロセスあり。



BH合体が起こると、BH周り数10～100pcにわたり密度、速度分散などにその痕跡を残す。

⇒こうした星の位置や運動の変化を観測したい。

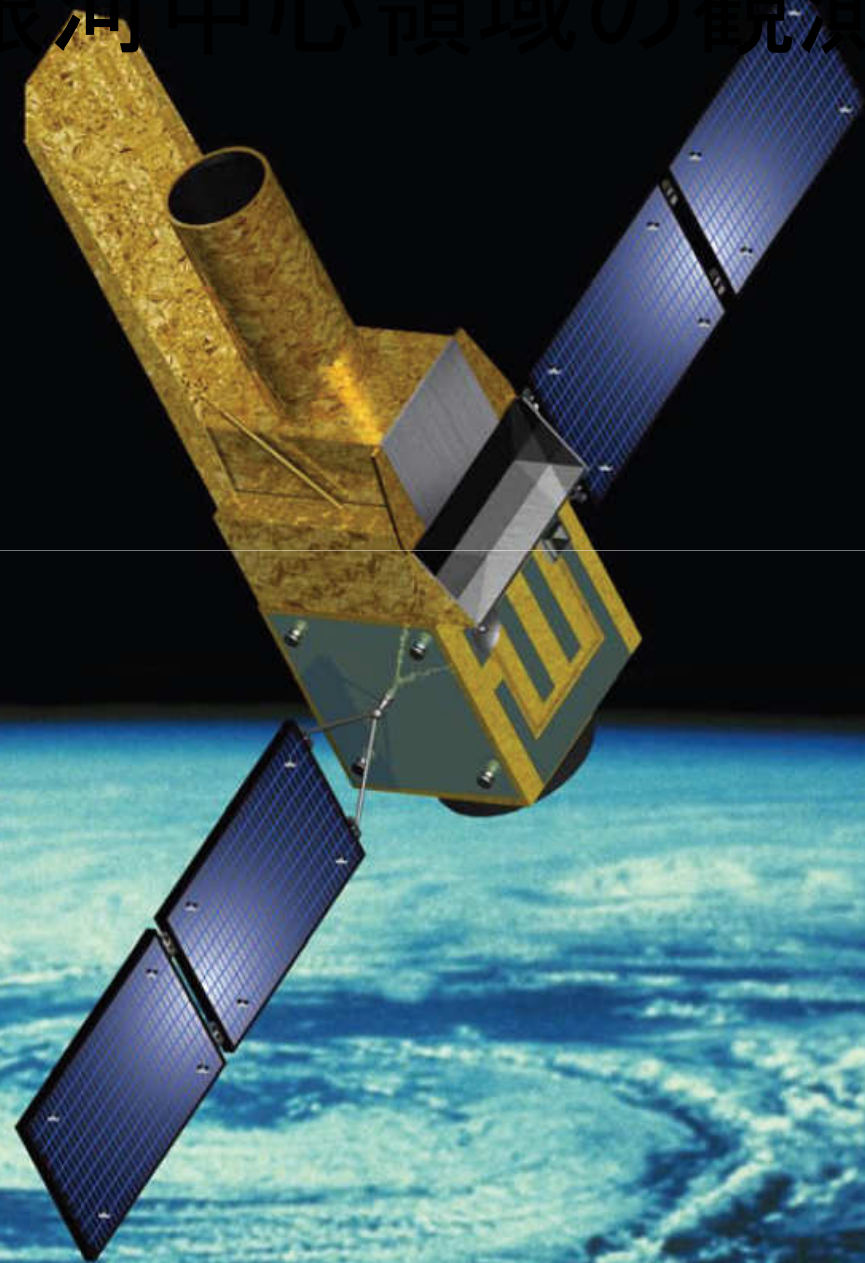
Small JASMINE

National
Institute of
Advanced Industrial
Science and Technology

Japan

小型JASMINE

赤外線位置天文観測衛星



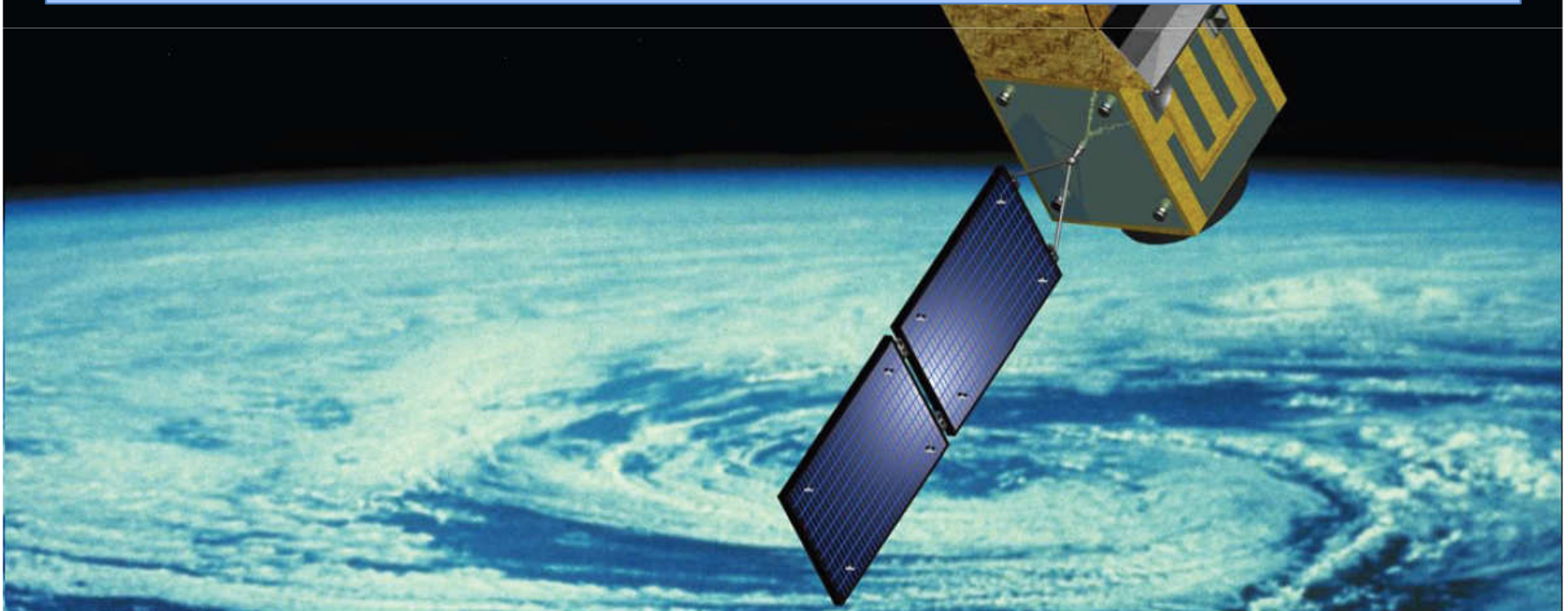
Small JASMINE

Na
JA

小型JASMINE

赤外線位置天文観測衛星

銀河系中心領域の星を $H_w=11.5\text{mag}$ において、年周視差 $15\mu\text{as}$ 程度以上、固有運動 $50\mu\text{as/yr}$ 程度以上の精度で測定し星の位置や距離、運動を調べる。



Small JASMINE

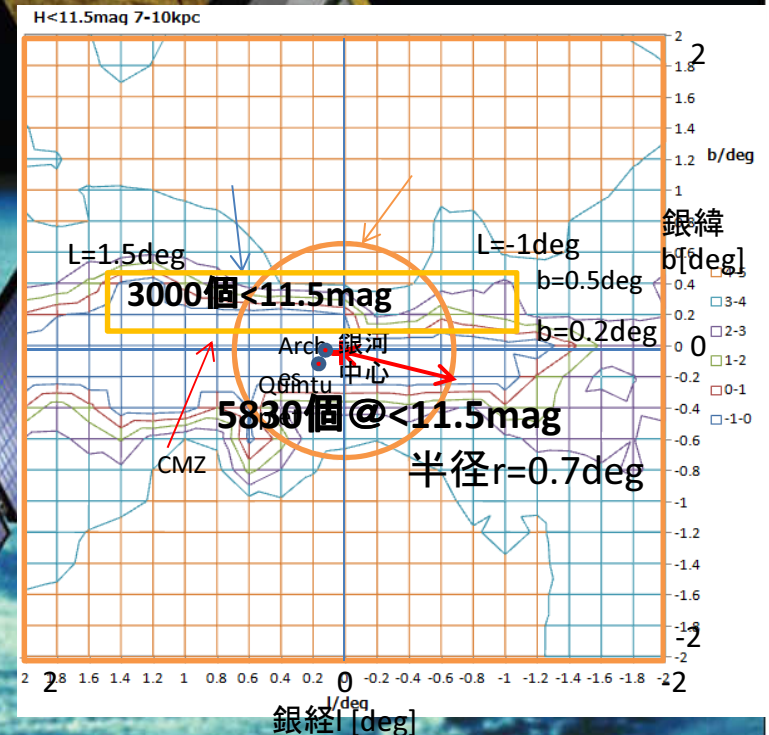
小型JASMINE

赤外線位置天文観測衛星

銀河系中心領域の星を $H=11.5\text{mag}$ において、年周視差 $15\mu\text{as}$ 程度以上、固有運動 $50\mu\text{as/yr}$ 程度以上の精度で測定し星の位置や距離、運動を調べる。

3年観測
年周視差@11.5mag

光学系	コルシュ系(3枚鏡)
主鏡口径	30cm
焦点距離	3.9m
検出器	HgCdTe(1.7 μm カットオフ)
ピクセル数	4K × 4K
ピクセルサイズ	10 μm
検出器サイズ	受光面4cm四方
視野角	0.6° × 0.6°
鏡材	合成石英、CFRP
構体	CFRP



Small JASMINE

小型JASMINE

赤外線位置天文観測衛星

銀河系中心領域の星を $H_w=11.5\text{mag}$ において、年周視差 $15\mu\text{as}$ 程度以上、固有運動 $50\mu\text{as/yr}$ 程度以上の精度で測定し星の位置や距離、運動を調べる。

主要ターゲット

銀河系中心領域

サイエンス目標

- (i) 銀河形成標準理論の検証につながる巨大ブラックホール(BH)の合体形成説の観測的検証
- (ii) 巨大ブラックホールへの物質供給機構を決定づける銀河系中心核バルジの重力場解析

Small JASMINE

Na
JA

小型JASMINE

赤外線位置天文観測衛星
銀河系中心領域の星を
50 μ as/yr程度以上の精

巨大BH合体のプロセスがあったのかを小型JAS
MINEの観測情報からどこまで探れるのか？

- ・解析方法の検討
- ・定量評価

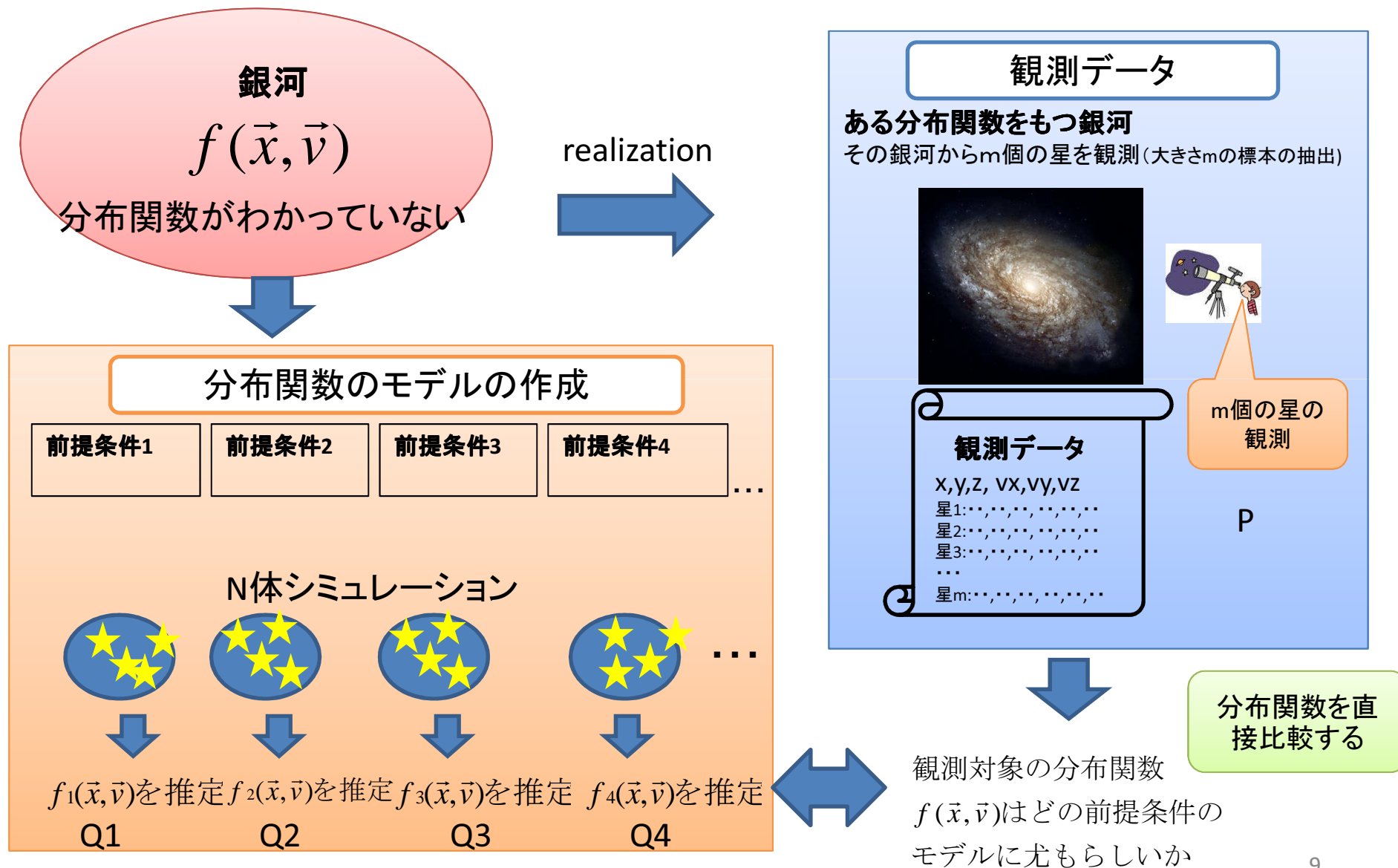
主要ターゲット

銀河系中心領域

サイエンス目標

- 銀河形成標準理論の検証につながる巨大ブラックホール(BH)の合体形成説の観測的検証
- 巨大ブラックホールへの物質供給機構を決定づける銀河系中心核バルジの重力場解析

解析手法



数値実験

分布関数のモデルの作成

谷川氏シミュレーションデータ

N=52万個

ケース	
BH合体なし	
BH合体あり(質量 1×10 個)	
BH合体あり(質量 2×5 個)	
BH合体あり(質量6:1:1:1:1)	

観測データ

BH合体なしシミュレーションより観測天体数を抽出

m=400個 (小型JASMINEでは6000個程度観測予定)

観測領域

銀河中心から天球面上半径 $0.014 - 0.7 \text{ deg}$ ($20 - 100 \text{ pc}$ @ 銀河中心)、視線方向距離 $8 \text{ kpc} \pm 1 \text{ kpc}$ の天体

観測誤差

抽出した天体に対し、以下誤差を付加

観測誤差	値
年周視差	$\sigma_x \sim 15 \mu\text{as}$
位置誤差	$\sigma_y = \sigma_z \sim 15 \mu\text{as}$ ($\sim 6 \times 10^{-7} \text{ pc}$) ($1 \text{ 秒角} = 0.04 \text{ pc}$)
視線速度誤差	$\sigma_{v_x} \sim 2 \text{ km/s}$
固有運動誤差	$\sigma_{v_y} = \sigma_{v_z} \sim 50 \mu\text{as/yr}$ (速度誤差 $\sim 2 \text{ km/s}$)

判定の道具

カルバック・ライブラーdivergence

- 2つの確率分布間の距離を表す尺度(Qに対するPの距離)
注意: 距離の公理は見たさない。

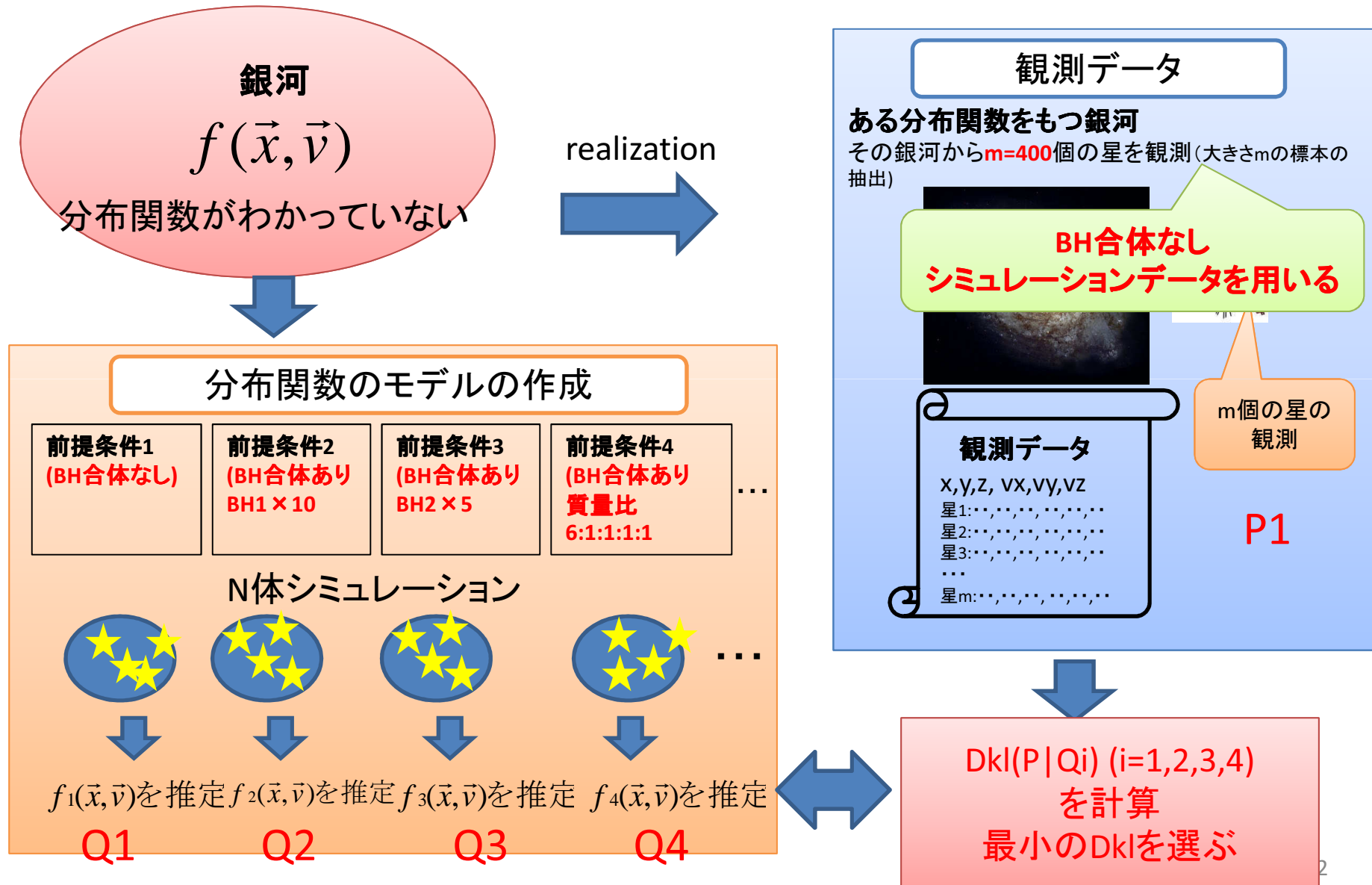
$$D_{KL}(P | Q) = \sum_i P(i) \log \frac{P(i)}{Q_{\theta}(i)}$$

P: データ、観測値、真の確率分布など

Q: 理論値、モデル値など

- 確率分布(分布関数)Pがモデル(分布関数)Qに対してどのくらい違っているかを表す尺度になっている。一致すると0であり、**違いの程度に応じて正の値**をとる。

解析手法の案



解析結果

各種モデル(Q1～Q4)に対する、合体なしのシミュレーションデータからの観測データP1の距離 (divergence) を求めた。

モデル	KL divergence
合体なし	$D_{kl}(P1 Q1)=1.668$
合体1×10	$D_{kl}(P1 Q2)=1.703$
合体2×5	$D_{kl}(P1 Q3)=1.713$
合体6:1:1:1:1	$D_{kl}(P1 Q4)=1.705$

最小
(尤もらしい)

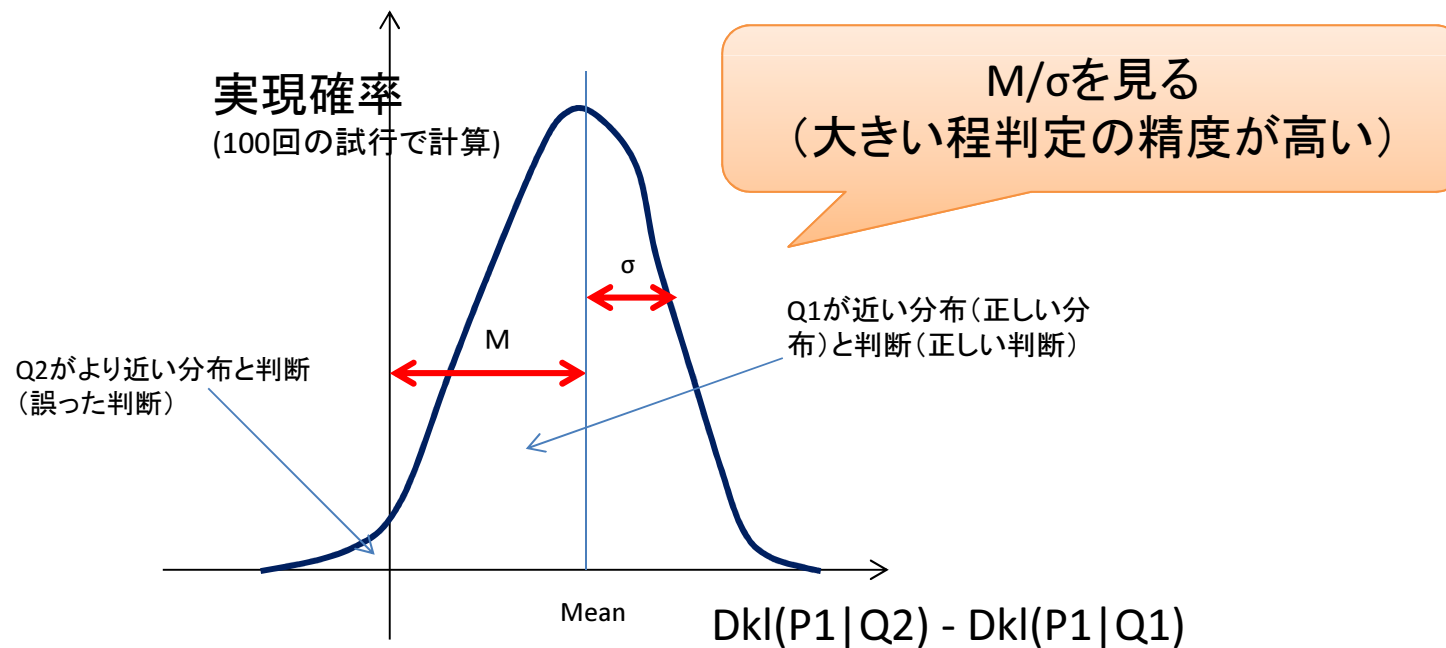
$m=400$ 、100回リアライゼーションの平均

確かに合体なしのモデルでのdivergenceが小さい事が確認された。
次に判定の精度を求める。

判定の精度(方法)

Dklの値が小さいものが尤もらしいと判断したが、その判断の精度はどの程度なのか？

- $Dkl(P1|Q2) - Dkl(P1|Q1)$ が正なら正しく判断されたとされる。
- 多数の試行で $Dkl(Q2) - Dkl(Q1)$ を計算すると、平均 M と標準偏差 σ が計算される。
- 例えば M が σ の3倍あれば 3σ の精度で判定出来る事になる。

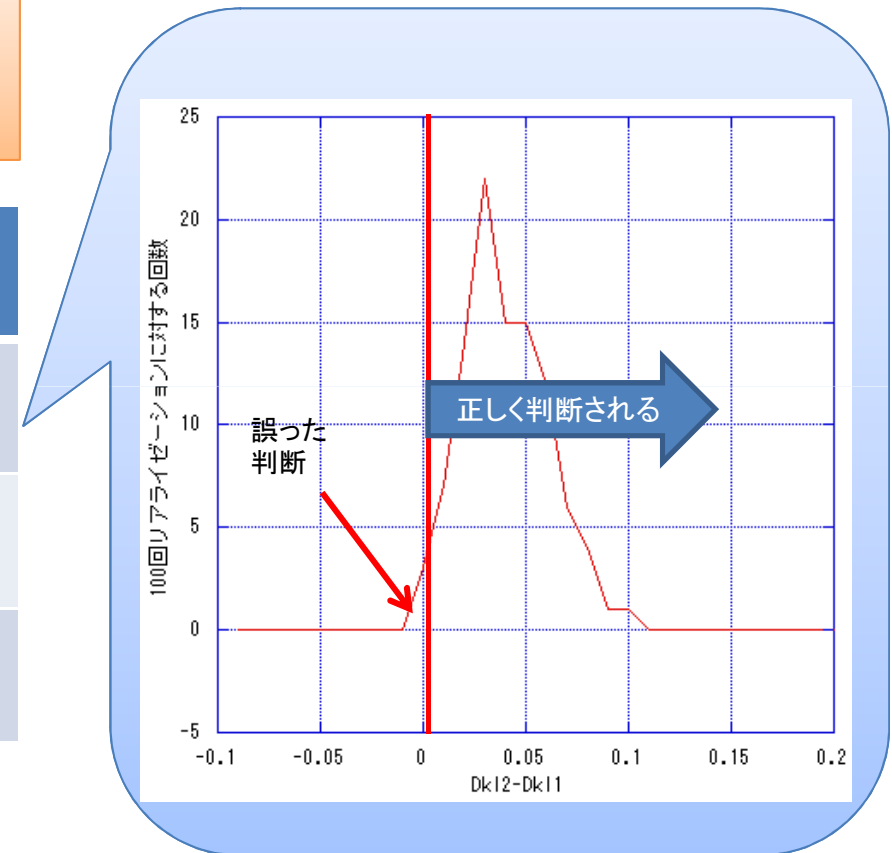


判定の精度(結果)

- $m=400$ の場合において、合体なしからの観測データと各種合体ありモデルとの判定精度(M/σ)がどれだけなのかを計算した。

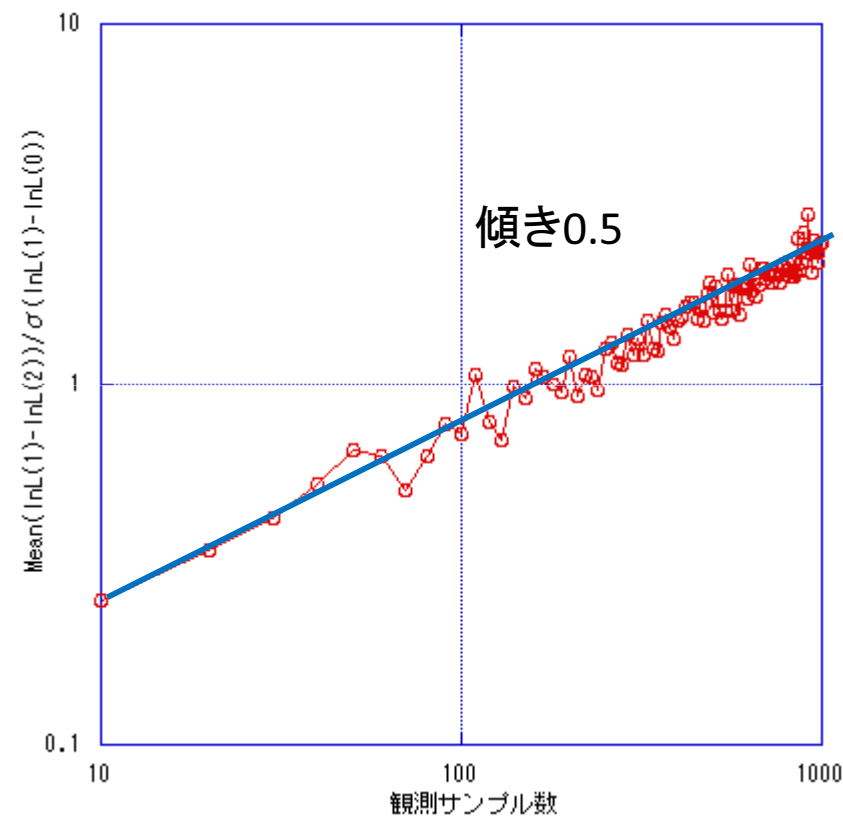
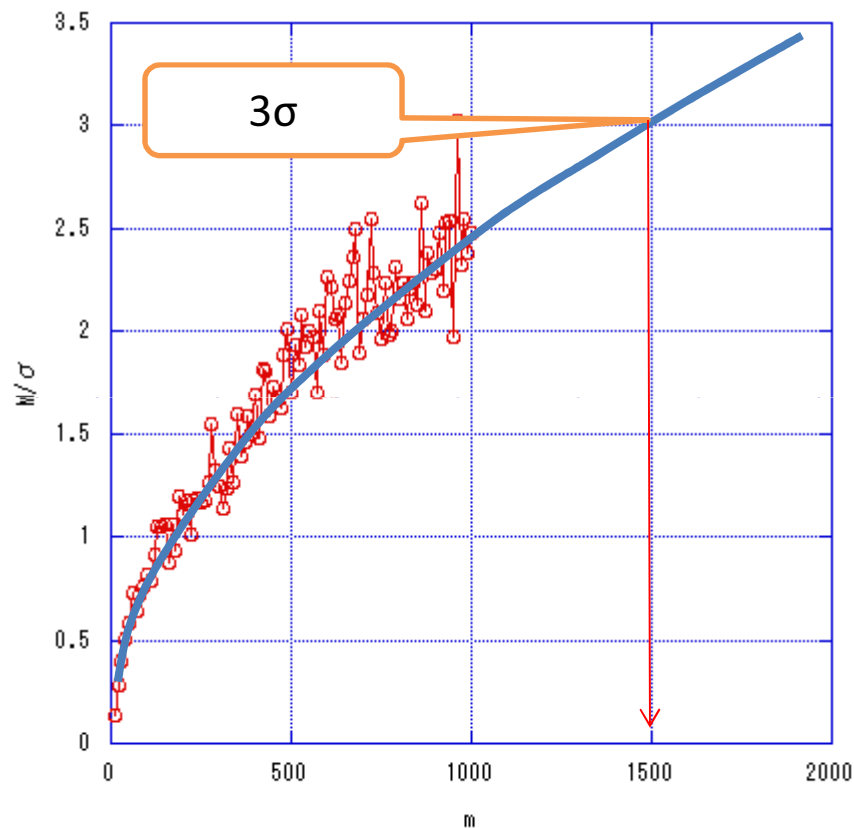
判定の対象	判定精度 M/σ @ $m=400$
合体あり(1×10 個) $D(Q2)-D(Q1)$	1.55
合体あり(2×5 個) $D(Q3)-D(Q1)$	2.14
合体あり($6:1:1:1:1$)Q $D(Q4)-D(Q1)$	1.67

Q2からQ4のいずれのモデルに対しても高い精度でQ1が尤もらしいと識別出来ている。



判定精度の標本の大きさに対する依存性

無作為標本の大きさ m に応じて判定の精度の依存性を調べた。

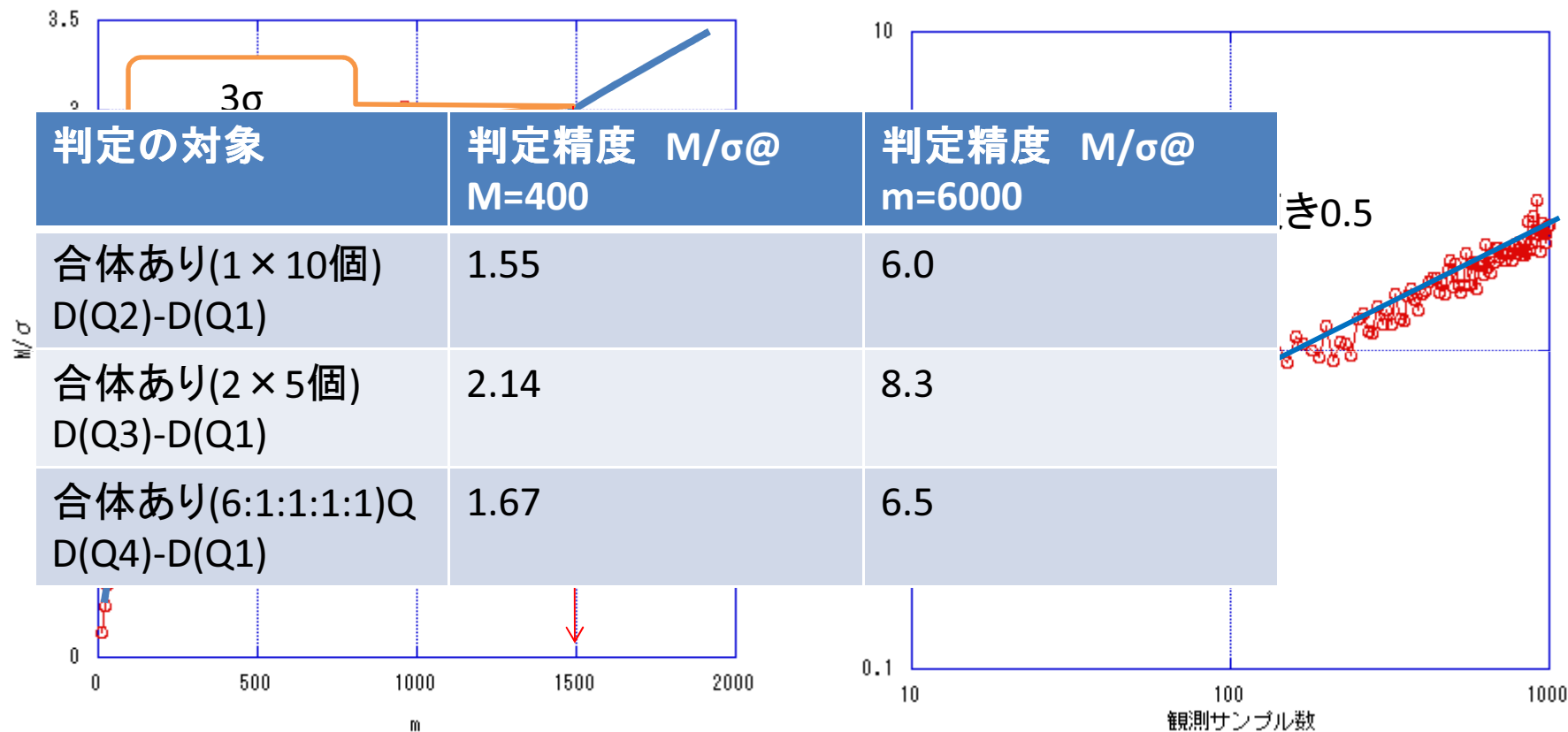


結果

- 無作為標本の大きさ m の値に応じて判定の精度向上
- $N \sim 1500$ 程度で 3σ となる

判定精度の標本の大きさに対する依存性

無作為標本の大きさ m に応じて判定の精度の依存性を調べた。

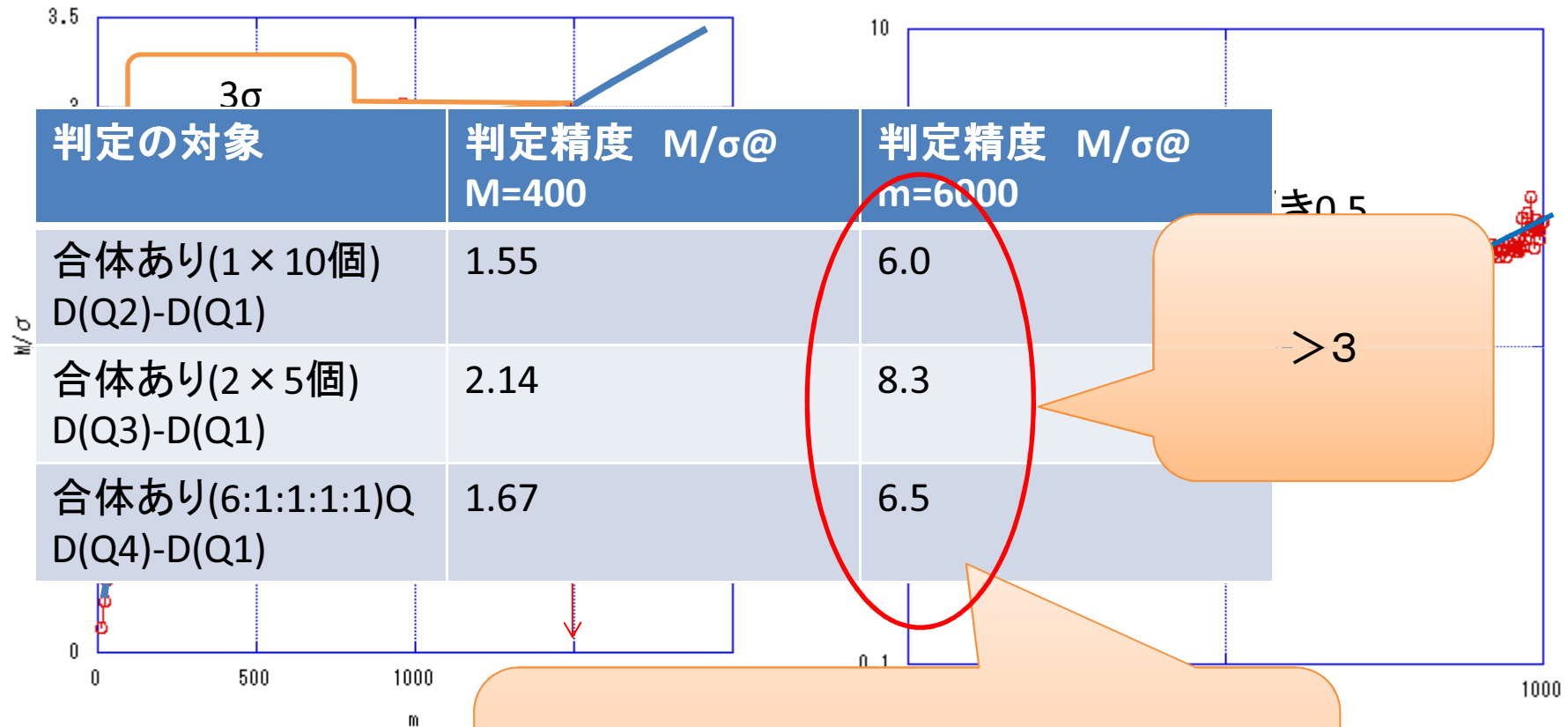


結果

- 無作為標本の大きさ m の値に応じて判定の精度向上
- $N \sim 1500$ 程度で 3σ となる

判定精度の標本の大きさに対する依存性

無作為標本の大きさ m に応じて判定の精度の依存性を調べた。



結果

- 無作為標本の大きさ m の値
- $N \sim 1500$ 程度で 3σ となる

BH合体がない観測データから十分な精度で合体があるモデルとの識別が出来ている。

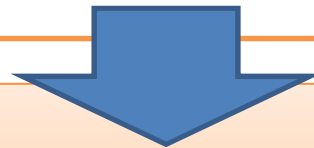
(ii) 巨大ブラックホールへの物質供給機構を決定づける銀河系中心核バルジの重力場解析

物質供給機構

角運動量の損失効果による**銀河系中心への物質の供給機構は、バルジの力学構造、つまり重力場に強く依存する。**

特に、バルジの棒状構造が**多重**になっていることが分かれば、非常に興味深い(中心部への物質供給が効率的)

JASMINEの観測で、位置と速度6次元(位相空間)情報が求まれば、これを初期条件としたシミュレーションによって、銀河中心領域での角運動量輸送を明らかにできる。



銀河中心領域のポテンシャルを決定するパラメータを定めたい。

数値実験

分布関数のモデルの作成

Self-consistent model

対数ポテンシャルを仮定

$$\varphi = \frac{1}{2} v^2 \log \left(R_c^2 + x^2 + \frac{y^2}{q^2} \right) - \frac{1}{2} \Omega^2 (x^2 + y^2)$$

$V=1$

$R_c=0.03$

$q=0.8$

Ω (求めるパラメータ)

パラメータ Ω の関数として分布関数のモデル $f(E, L | \Omega)$ を作成

観測データ

$f(E, L | \Omega=0.9)$ のmodelより観測天体数を抽出
 $m=3000$ 個を抽出

観測領域

銀河中心から天球面上半径 $0.014 - 0.7 \text{ deg}$ ($20 - 100 \text{ pc}$ @ 銀河中心)、視線方向距離 $8 \text{ kpc} \pm 1 \text{ kpc}$ の天体

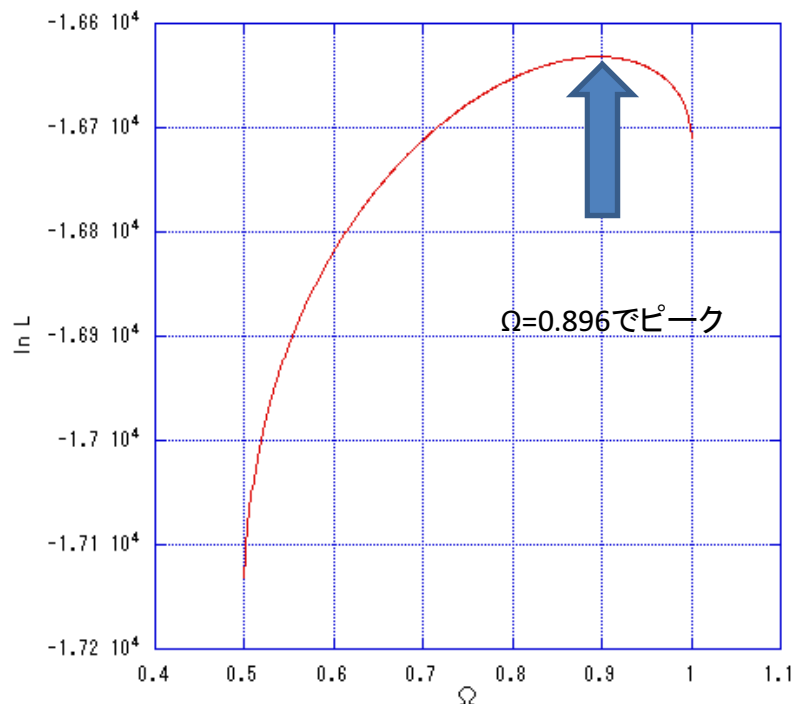
観測誤差

抽出した天体に対し、以下誤差を付加

観測誤差	値
年周視差	$\sigma_x \sim 15 \mu\text{as}$
位置誤差	$\sigma_y = \sigma_z \sim 15 \mu\text{as}$ ($\sim 6 \cdot 10^{-7} \text{ pc}$) ($1 \text{ 秒角} = 0.04 \text{ pc}$)
視線速度誤差	$\sigma_{v_x} \sim 2 \text{ km/s}$
固有運動誤差	$\sigma_{v_y} = \sigma_{v_z} \sim 50 \mu\text{as/yr}$ (速度誤差 $\sim 2 \text{ km/s}$)

軌道解析における Ω の導出

- 最尤法による判断
- 尤度関数 $\mathcal{L}=f(E_1, L_1 | \Omega)f(E_2, L_2 | \Omega) \dots f(E_N, L_N | \Omega)$ を計算
- 対数尤度の Ω 依存性を計算
- 以上作業を100回行い、 Ω のバラつき標準偏差を見る。



結果

$$\Omega_{\text{mean}}=0.899$$

$$\sigma_{\Omega}=0.012$$

$$3\sigma_{\Omega}=0.036 < 0.1$$

より、 Ω を10%の精度で導出するのに 3σ を上回る精度で導出。

まとめ

小型JASMINEを用いて星の位置、運動情報である位相空間情報を最大限利用する事により

- ①BHの合体過程の有無の判断が高い精度で判断できる。
- ②またガス供給機構を特徴づける重力ポテンシャルのパラメータが高い精度で判断できる