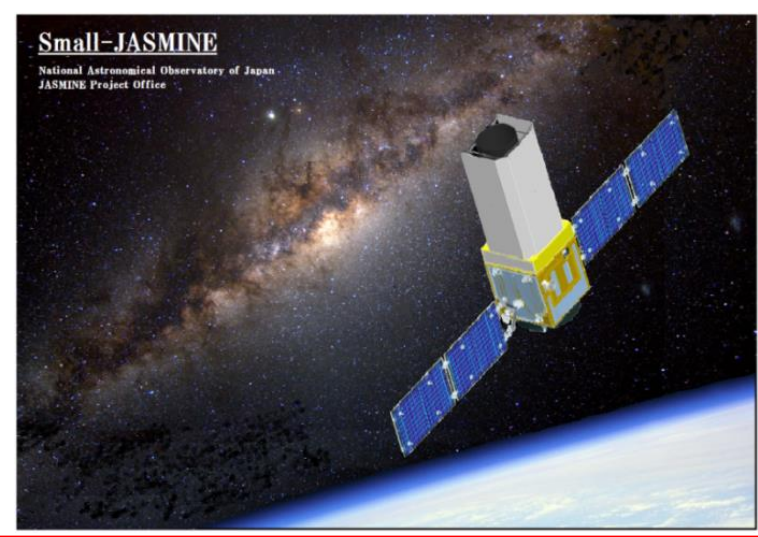


山口正輝、辻本拓司、郷田直輝、矢野太平、ほかJASMINEワーキンググループ

小型JASMINEは、銀河系バルジの形成・進化を解明することを最大の目的として掲げることができるが、それだけにとどまらず、巨大ブラックホール、コンパクト天体、系外惑星、恒星といった幅広い分野に大きなインパクトを与える成果が期待される。今回紹介する検討項目は、(1) 連星軌道決定とその応用、(2) 褐色矮星をターゲット天体とする惑星探査、(3) 恒星黒点の観測、(4) 巨大ブラックホールの合体成長とその痕跡、(5) 銀河中心領域の星団の起源解明である。特に連星軌道決定、褐色矮星惑星探査については具体的な検討結果を得ることができた。

0. 小型JASMINEの概要

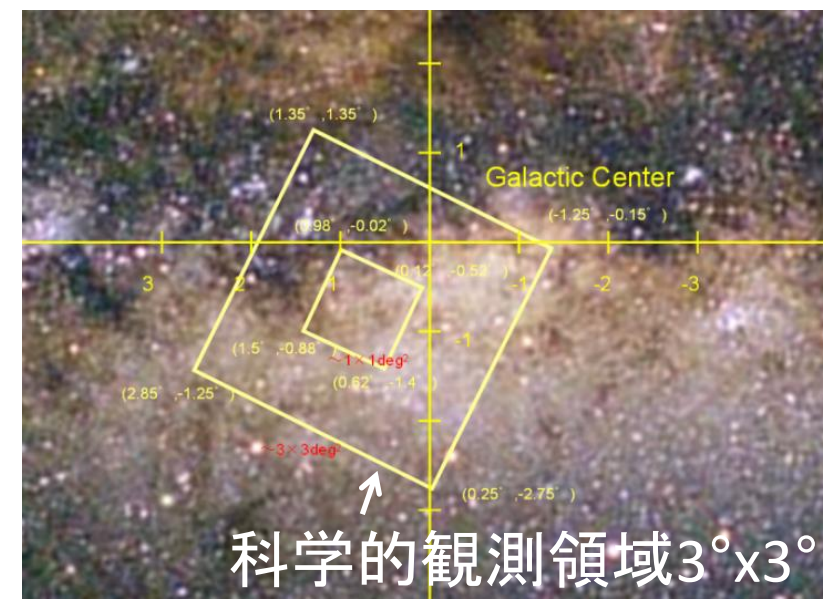


目的

- ① 銀河系中心方向の星、および
- ② 興味ある特定天体に対して、世界最高精度の位置天文情報を得る

主な仕様

- 主鏡口径: 30cm
- 視野: $0.6^\circ \times 0.6^\circ$
- 観測領域と観測時期:
 - ① 銀河系中心方向: $3^\circ \times 3^\circ$ (右図)、春・秋に観測
 - ② いくつかの特定天体方向、夏・冬に観測
- 観測波長: Hw-band ($1.1 \sim 1.7 \mu\text{m}$)

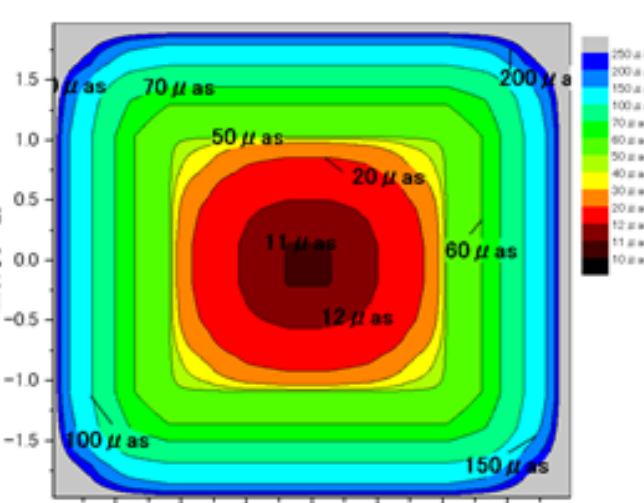


観測等級:

- ① $9 \sim 12 \text{ mag}$ ② $< 12 \text{ mag}$ (下限は個別に検討)

中心位置決定精度:

- ① $10 \sim 70 \mu\text{as}$ (領域中心ほど高精度) →
- ② $10 \mu\text{as}$ 程度 (Hw=9magなら1週間程度で精度達成)
- 観測機器保証期間: 1年間



年周視差の精度マップ

I. 連星軌道決定とその応用

I-1. 連星軌道決定

伴星が見えない連星系を対象とする
→ 主星の軌道要素を決める

- 小型JASMINEにより決定精度 $\sim 3 \text{ mas}$ の位置データ 10^5 個得る
- $10 \mu\text{as}$ の精度の位置データ (統計誤差のみと仮定)

最小二乗法

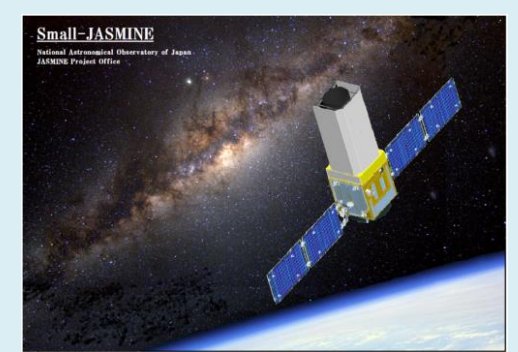
- 各軌道要素の最適値とその分散

軌道要素決定

- 全軌道要素を独立に決定可能
- 伴星の質量も決定できる

- 具体的な天体に対して、軌道半径と伴星質量の誤差を計算

位置天文観測



$N(\sim 10^5)$ 個の光学中心位置データ

軌道要素

I-2. ガンマ線連星、Cyg X-1への応用

- ガンマ線連星...ガンマ線を放射する大質量X線連星

大問題 高密度星がBHかNSか不明

→ アストロメトリによって判定可能!

- LS 5039

- $M_c < 2M_\odot \rightarrow$ non-detection

- $M_c = 5M_\odot \rightarrow 3-7M_\odot$

→ BHのときはそう判定できそう

- LS I + 61 303

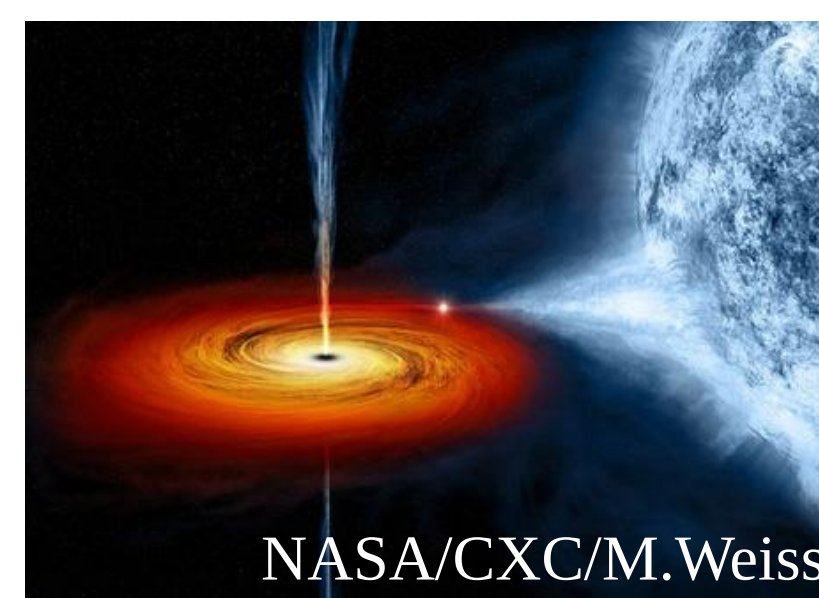
- $M_c = 2M_\odot \rightarrow 1.6-2.4M_\odot$

- $M_c = 6M_\odot \rightarrow 5.6-6.4M_\odot$

→ BHのときは確実に判定可

- Cyg X-1

- 軌道面の向きとジェットの方角を比較可能



NASA/CXC/M.Weiss
大質量X線連星
(高密度星+大質量星)

計算結果

Object	a./dの誤差	Mc誤差
LS 5039	$\sim 30 \mu\text{as}$	$\sim 2M_\odot$
LS I + 61 303	$\sim 20 \mu\text{as}$	$\sim 0.4M_\odot$

I-3. 既知系外惑星への応用

- 系外惑星は見えない
→ 連星軌道決定を応用可能
- 観測予定のターゲット

- 星の予想軌道半径 $> 100 \mu\text{as}$
- 周期1年程度以内

→ 15個の惑星系

- 周期100-400日
- 質量2-20木星質量 (ただし $M_p \sin i$)

問題 惑星質量そのものは不明

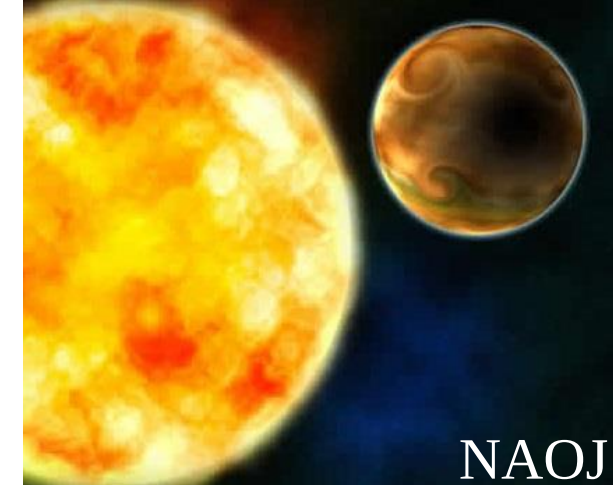
- 小型JASMINEによる測定

→ 誤差5-20%で質量決定可能

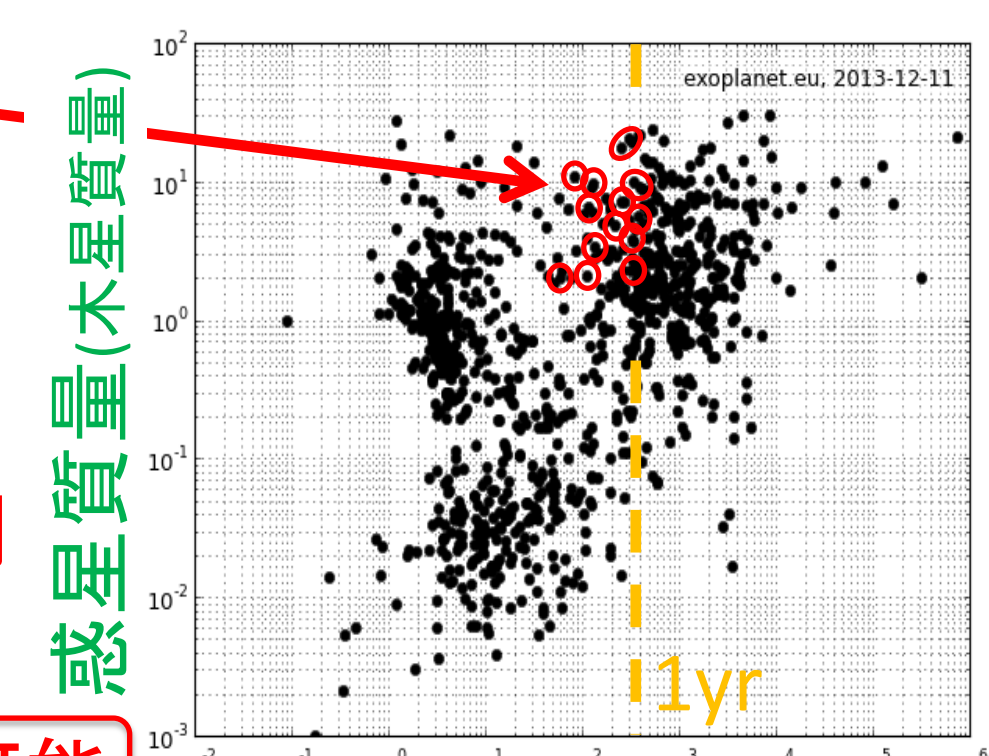
- 軌道傾斜角も同精度で決定可能

- Gaiaで観測できない明るい天体も含む → SJがユニーク

系外惑星想像図



系外惑星散布図



軌道周期(day)

その天体は SJがユニーク

II. 惑星探査(褐色矮星を対象に)

- 褐色矮星とは...木星程度の大きさで、太陽と違い水素燃焼しない天体(質量: 木星の50倍程度)

- なぜ褐色矮星?

- 赤外線で見える
- 軽い → 惑星があれば天球面上の動き大

→ 赤外アストロメトリ向き

- 近い褐色矮星はHバンドで10-12等級

→ 小型JASMINEで観測可

- どんな惑星が検出可能か?

- 対象天体(小型で見えるL starを想定)
 - 質量: 50木星質量、距離: 10pc

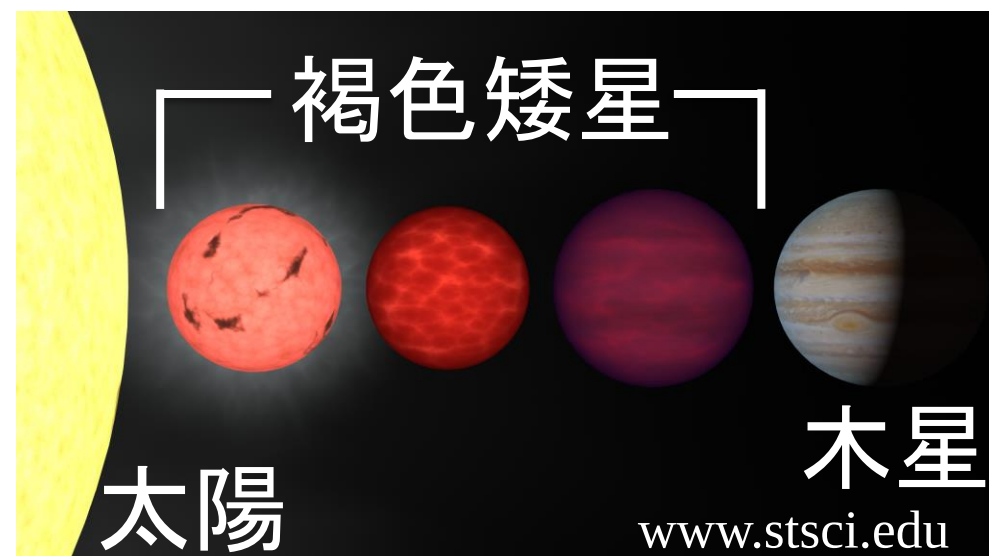
- 軌道半径視角 $> 10 \mu\text{as}$

- $0.01 \text{ day} < \text{軌道周期} < 1 \text{ yr}$

- 軌道半径 $>$ 星半径と観測期間の制限

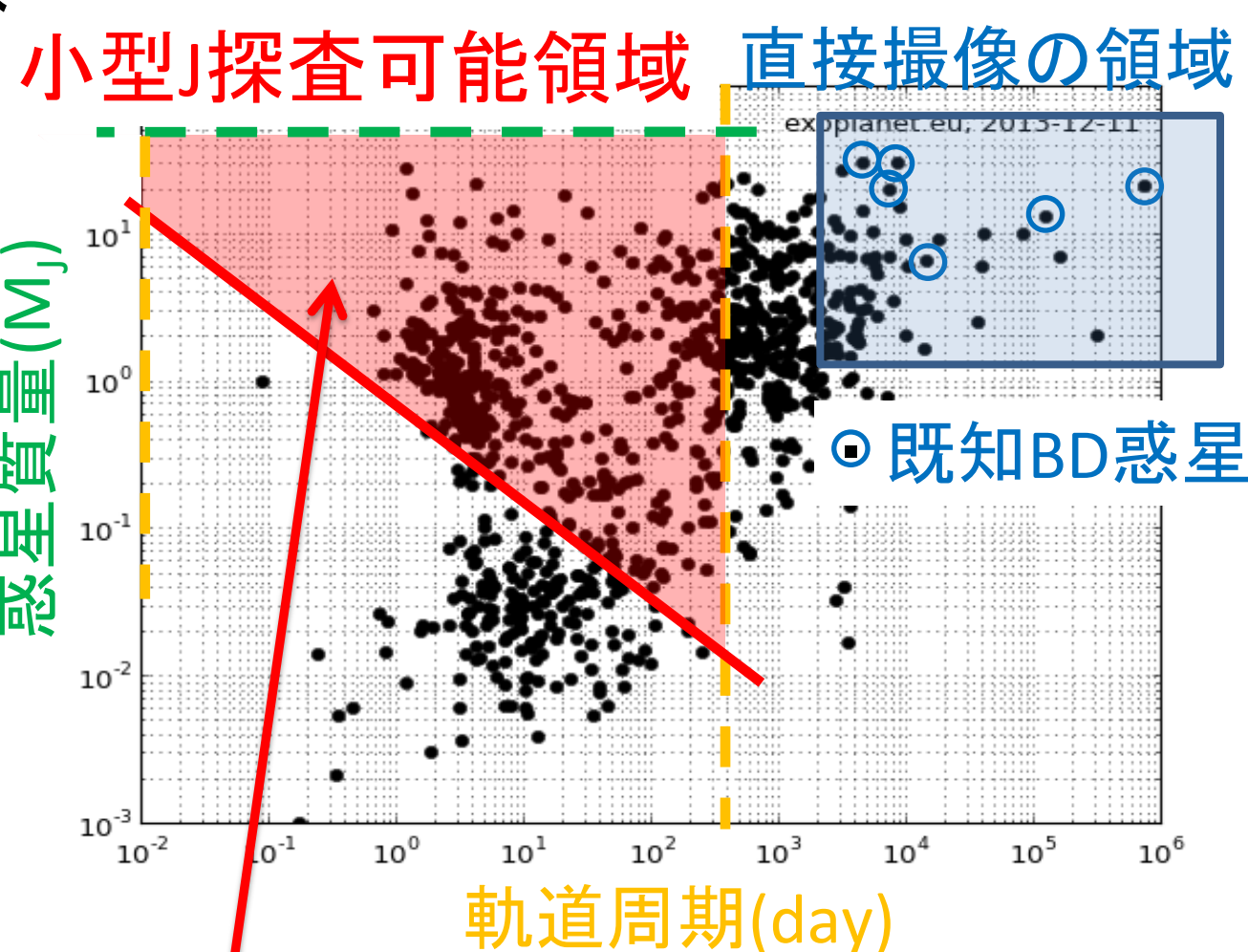
- 惑星質量 $<$ 褐色矮星質量

褐色矮星大きさ比較



太陽

木星



小型J探査可能領域

直接撮像の領域

軌道周期(day)

結論 直接撮像による惑星探査と相補的

小型JASMINEによって、かなり広い領域を新たに探査可能

- Gaia: 明るいBDは小型JASMINEと同程度、暗いBDは1桁ほど下限大

III. 恒星黒点の観測

- アストロメトリによる黒点観測

- 黒点(白斑)がある星が回転
→ 光学中心位置ずれる
→ 黒点の大きさ、位置の情報

- 利点: 回転軸=視線方向でも検出可能 (他の方法では不可能)

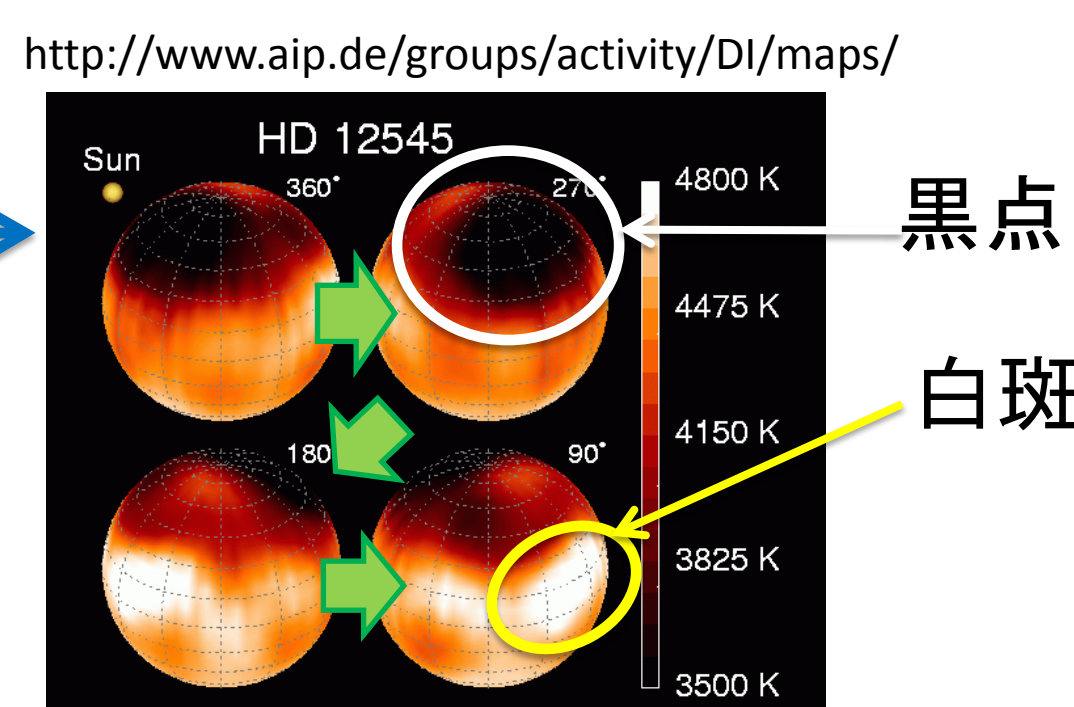
- 実際に検出できる?

- 光学中心のずれの振幅

$$\sim 75 \mu\text{as} \left(\frac{f}{0.1} \right) \left(\frac{R_*}{30R_\odot} \right) \left(\frac{d}{10^2 \text{ pc}} \right)^{-1}$$

- 赤色巨星($R_* \sim 30R_\odot$)なら検出できそう

- 具体的なサイエンスは今後検討予定



距離dにある恒星

黒点

面積比f

幾何中心

光学中心

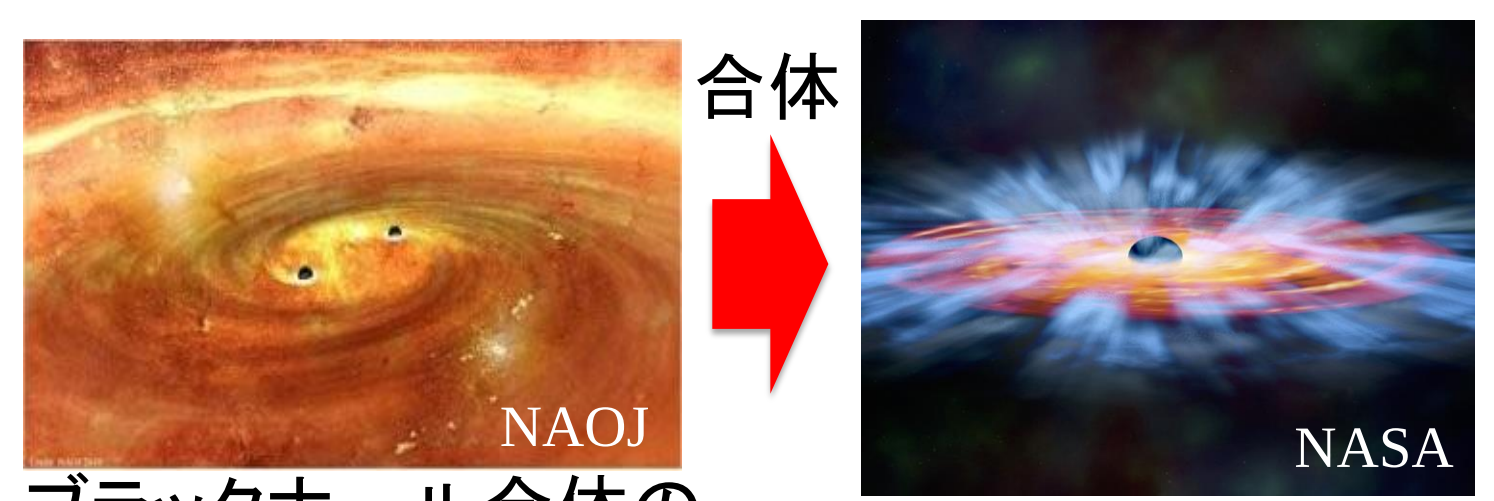
星半径 R_*

IV. 銀河中心ブラックホール・星団の起源解明

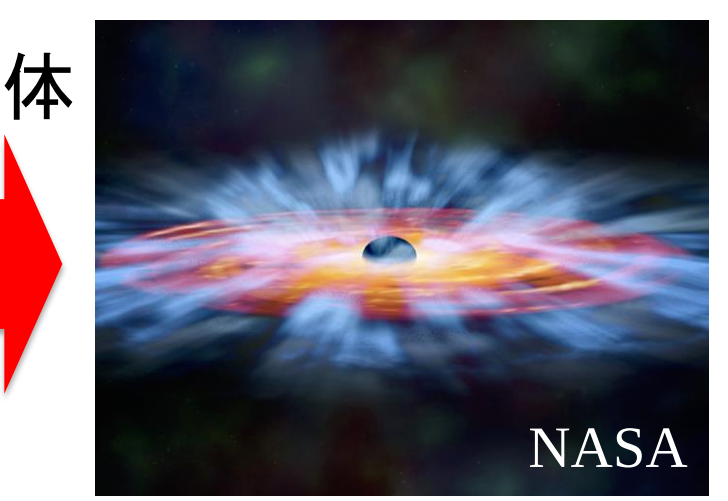
IV-1. 銀河中心巨大ブラックホールの合体成長とその痕跡

仮説

銀河系中心にある巨大ブラックホールが、より小さなブラックホールの合体によってできた



NAOJ
ブラックホール合体の前の銀河系



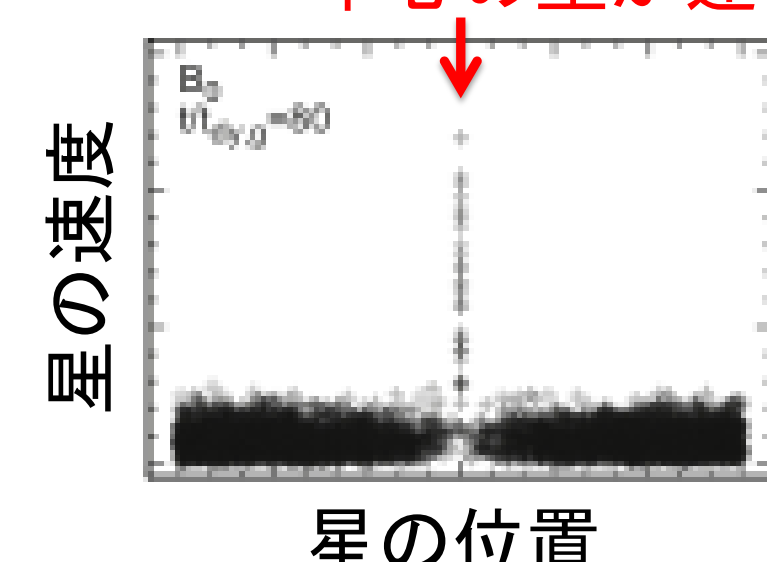
NASA
できたばかりの銀河系

予想される二つの痕跡

- ① 中心に向かって上昇が緩やかになる星数密度
- ② 中心近くの高速度星



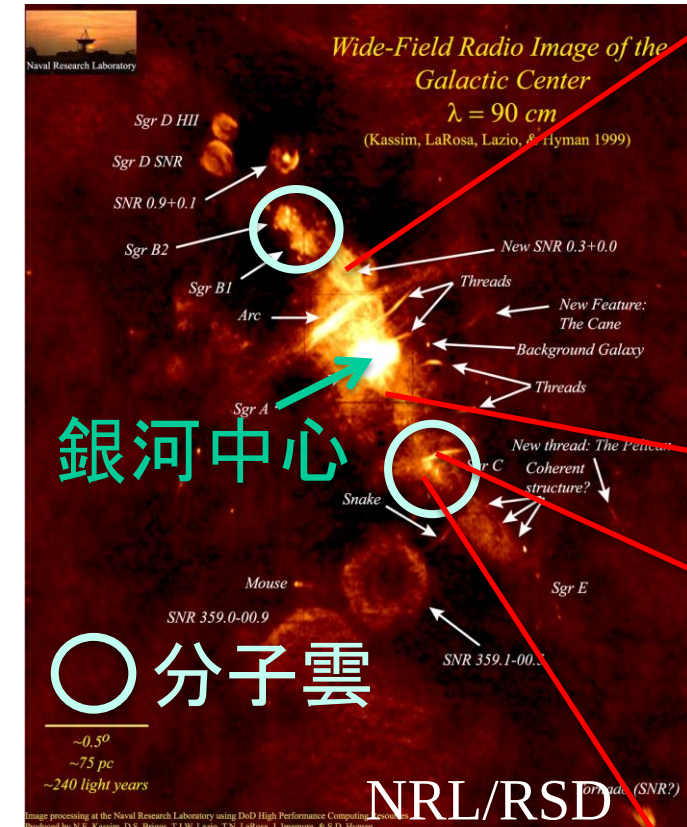
この違いを小型JASMINEで見極める



小型JASMINEで、中心付近の速度が速い星を検出

IV-2. 銀河中心領域の星団形成とその進化

銀河中心付近には分子雲がある



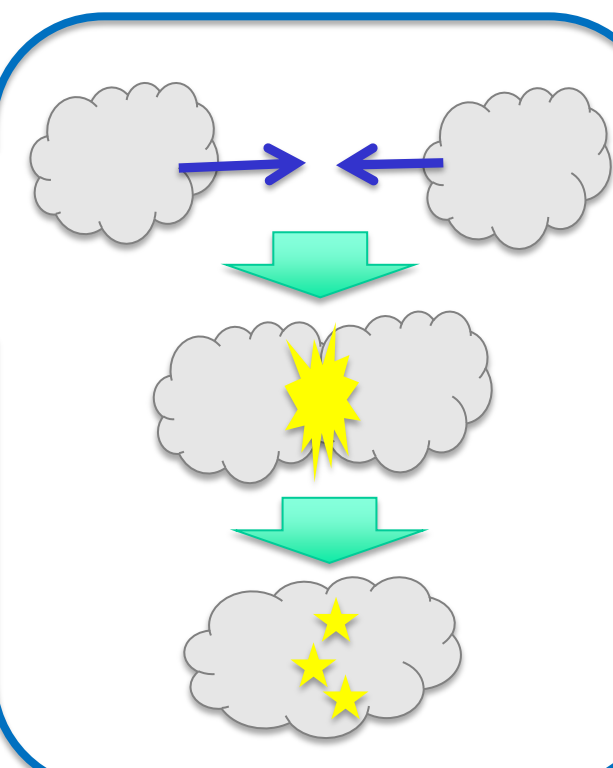
NRL/RSD

A. 銀河中心近くの星団

仮説

分子雲同士の衝突によりできた

- この星団の速度を小型JASMINEで測定
- これらの星団の誕生場所を推定できる
- 銀河重力場に対し制限がつけられる



B. 分子雲内の星団(星団自体は未発見)

星団内部には、中質量ブラックホールがあると考えられており、銀河系中心の巨大ブラックホールの種となる可能性がある (Oka et al. 2012)

これらの星団の位置と固有速度を小型JASMINEで測定
→ 銀河中心巨大ブラックホールの起源を解明する手掛かり

V. まとめ

- 小型JASMINEを用いてできるバルジ以外のサイエンスを検討した

- 連星惑星系

- ガンマ線連星に対しては高密度星を判定可能
- 系外惑星に対しては質量($M \sin i$ ではなく)を1割程度の精度で決定
 - 小型JASMINEでユニークな天体含む

- 惑星探査(褐色矮星に対して)

- 直接撮像と相補的な探査が可能

- 恒星黒点

- 赤色巨星に対して回転軸=視線方向でも検出可能

- 銀河中心ブラックホール

- 合体によって形成したことを検証可能

- 銀河中心付近星団...形成機構を検証可能

謝辞

今回の検討に際し、田村元秀氏、渡邊鉄哉氏、関井隆氏、浅田秀樹氏には非常に有用なコメントをいただいた。諸氏のご協力には大変感謝している。