



SKA アstrometry・時空計測の検討状況 (国際・国内)

1. SKA VLBI Working Group 報告
2. SKA-JP Astrometry sub-WG 報告

今井 裕

鹿児島大学学術研究院理工学域理学系

SKA-JP Astrometry sub-WG

国内におけるSKA VLBI/アストロメトリに向けた取り組み

- 2008年 SKA-JP発足
- 2009年 SKA-JP Astrometry sub-WG発足
 - GASKAP (Galactic ASKAP Pathfinder) チーム形成、参加
- 2010年 Sub-WG wiki 立ち上げ、国内研究会で提案開始
- 2011年 SKA&VLBIの会合で活動報告@Perth
- **2012年**
 - JSPS頭脳循環事業・特定国派遣事業：豪州派遣
 - Automatic source finding simulation 実施 (for GASKAP)
 - sub-WG初回会合**
- 2013年
 - マゼラン銀河固有運動観測(H_2O masers with LBA)へ参加
 - SKA関係初の科研費課題採択**
- 2014年 星周OHメーザー源アストロメトリに着手
- 2015年
 - 日本版SKA Science Book 第7章執筆英語版執筆へ
 - 星周OHメーザー源年周視差検出 (preliminary)**

海外におけるSKA VLBI/アストロメトリに向けた動き

- 2003年 SKA Office 発足 (R. Schilizzi)@Dwingeloo
- 2009年 ICRAR (UWA/Curtin)発足, GASKAPチーム発足
- 2010年 EVN Symposium: **EVN = SKA-VLBI pathfinder**
- 2011年 SKA機構@マンチェスター発足
SKA Memo No. 135 (Godfrey et al.) **パースでSKA/VLBI研究会**
- 2012年 マゼラン銀河研究会
(Lisa Harvey-Smith氏がASKAP Project Scientistに)
- 2013年 Transformational Science with the SKA @南ア
(Jimi Green氏がSKAO PSの一人に)
- 2014年 SPLASH (Southern Parkes Large Area Survey for Hydroxyl)初期成果
VLBIと天の川銀河を主題とした討論会@Leiden
Focal Group発足(VLBI & Milky Way)
SKA Science Book 研究会開催@Sicily
- 2015年
SKA1 re-baselining: SKA1-SUR中止、SKA1-MID&LOW 縮小(70%)
JIVE-ERIC発足、**SKA VLBI Working Group 発足**(Chair: Z. Paragi, C. Reynolds)
SKA Key Science Workshop @Strockholm

SKA-VLBI Working Group members in the SKA KSW2015 (in Stockholm)

Z. Paragi, C. Reynolds (co-chair), ..., H. Imai (core member)



参考：VERA予算化・科学運用まで —10年以上の歳月—

- 1988年： 国立天文台発足
 - VERA (VLBI for Earth Rotation and Radio Astrometry)起想
- (1994年：今井M1で天文台受託研究員へ)
- **1996年： 国内地上VLBI統一計画**
 - VSOP の後にVERAの実現
- 1997年：「はるか」打ち上げ、VSOP科学運用開始
- 1998年：「VERA推進室」@三鷹発足
- 2000年：VERA概算要求予算化(3局分)
- 2001年：VERA概算要求予算化(石垣局分)
- 2003年：VERA科学運用開始

SKA-JP 2008年 ➡ SKA Phase 1: 2020年、Phase 2: 2025年

「若者が参加しなければプロジェクトは動かない」(2011年 竹内峯 談)

SKA Science Book (2015)等に見られる関連記述

- SKA Science Book
 - VLBI with the SKA (Paragi et al.)
 - Maser astrometry with VLBI and the SKA (Green et al.)
→ **Galactic maser sources**
 - SKA tomography of Galactic star-forming regions and spiral arms
(Loinard et al.) → **YSO non-thermal sources**
 - **OH masers** in the Milky Way and the Local Group of galaxies
(Etoka et al.)
 - Three-dimensional tomography of the Galactic and extragalactic
magneto-ionic medium with the SKA (Han et al.) → **pulsars**
 - 他AGN、YSO関係複数
- 関連重要文献
 - Secular Galactic aberration (Titov et al. 2011)
 - Annual parallaxes in pulsar timing (Smits et al. 2011)

SKA Science Use Cases

SKA仕様要求はScience Use Case の事例に基づく

Science Use Case → Engineering Change Request?

Feedback, cost cap (re-baselining) → 希望通りに行かない

次回提案提出期限は9月25日

- **Parallax measurement of Southern Hemisphere pulsars**
(Ptolemy et al.)
- **A Deep Multi-Frequency VLBI Polarimetric Survey of AGN**
(Agudo et al.)
- **Resolving ultra-relativistic outflows in Gamma Ray Bursts:
SKA-VLBI observations of GRBxxxxxx** (Paragi et al.)
- **Galactic Structure using maser parallax measurements**
(Ellingsen et al.) → **SKA1-MID Band-5**
- **Exploration of the dynamics of the Galactic Bulge using OH
maser parallax measurements** (Imai et al.)
→ **SKA1-MID Band-2, will be submitted**

日本版SKA Science Book (2015)

第7章「近傍宇宙時空計測」

著者(アルファベット順)

- Burns, Ross Alexander (鹿児島大学)
- 戸次賢治 (ICRAR/西オーストラリア大学)
- 郷田直輝 (NAOJ JASMINE推進室)
- 今井 裕 (鹿児島大学)
- Orosz, Gabor (鹿児島大学)
- 亀谷 收 (NAOJ 水沢VLBI観測所)
- 新沼浩太郎 (山口大学)
- 辻本拓司 (NAOJ JASMINE推進室)
- 矢野太平 (NAOJ JASMINE推進室)
- 山田良透 (京都大学)

SKA-JP

Astrometry

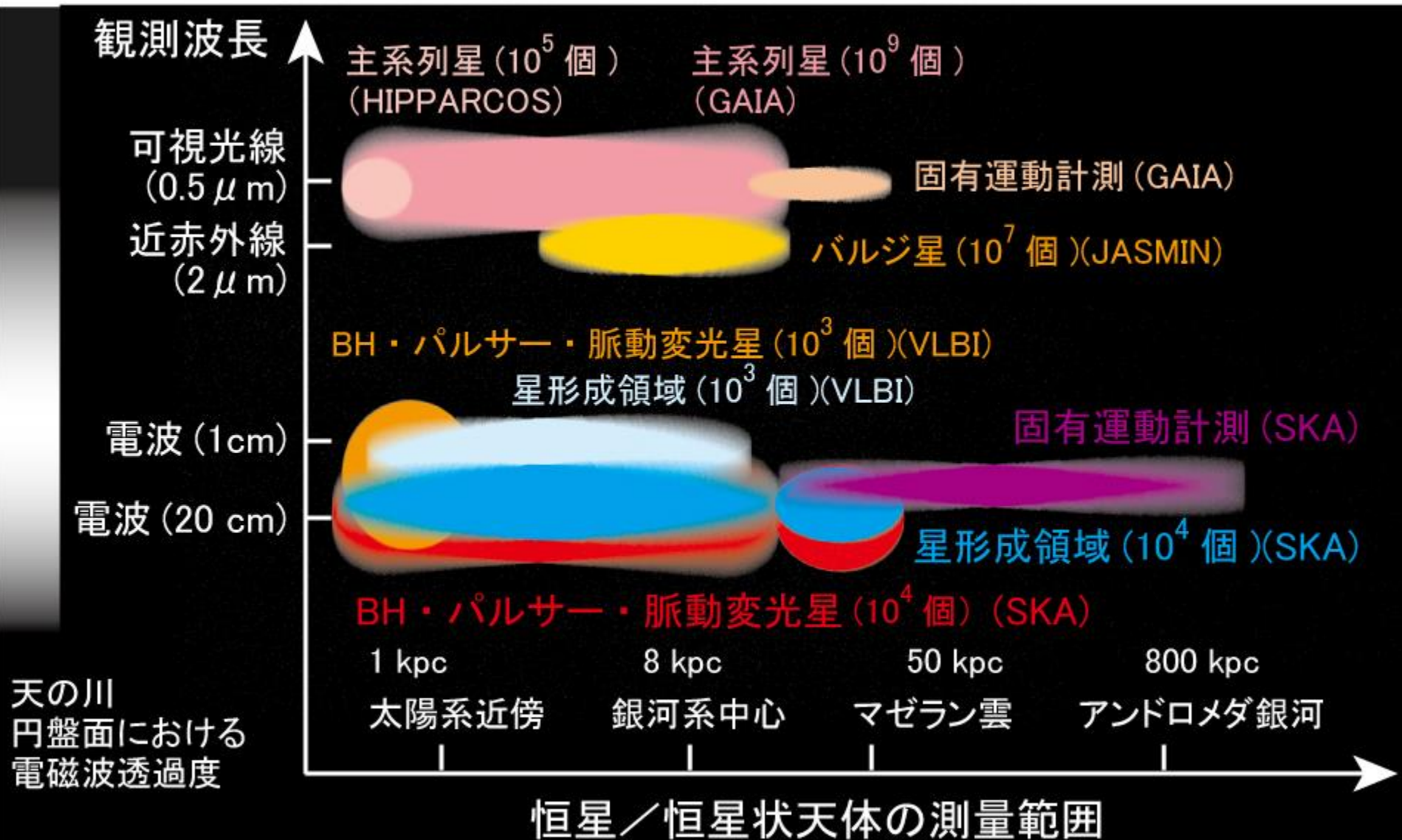
sub-WG

17名

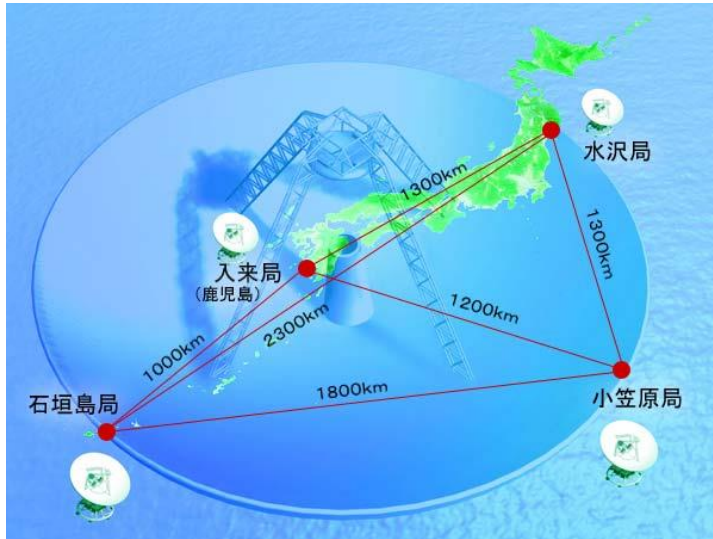
(2015年3月現在)

Scientific scope in SKA astrometry

https://mwg.sci.kagoshima-u.ac.jp/wiki/pages/29D1_3A3/SKA-JP_Astrometry_Sub_Working_Group.html



Radio astrometry from present to future



Present (~2030?)

- **VERA(4 x 20m)**
- VLBA(10 x 25m)
- EVN(~15 antennas)
- **HSA(VLBA+GBT+Ef)**
- LBA(5-6 antennas)

<2000 annual parallaxes

Near future (2020?~)

- **SKA1 (~90 x 15m)** (70% of Full)
- + global VLBI (~10 x ~20m)
- **SKA2 core (~700 x 15m)**+
SKA2 remote stations (??)
(~40 sta. x 25 ant. x 15m)
- + global VLBI (~10 x ~20m)

>>10 000 annual parallaxes

Not only number but also diversity of astrometric targets

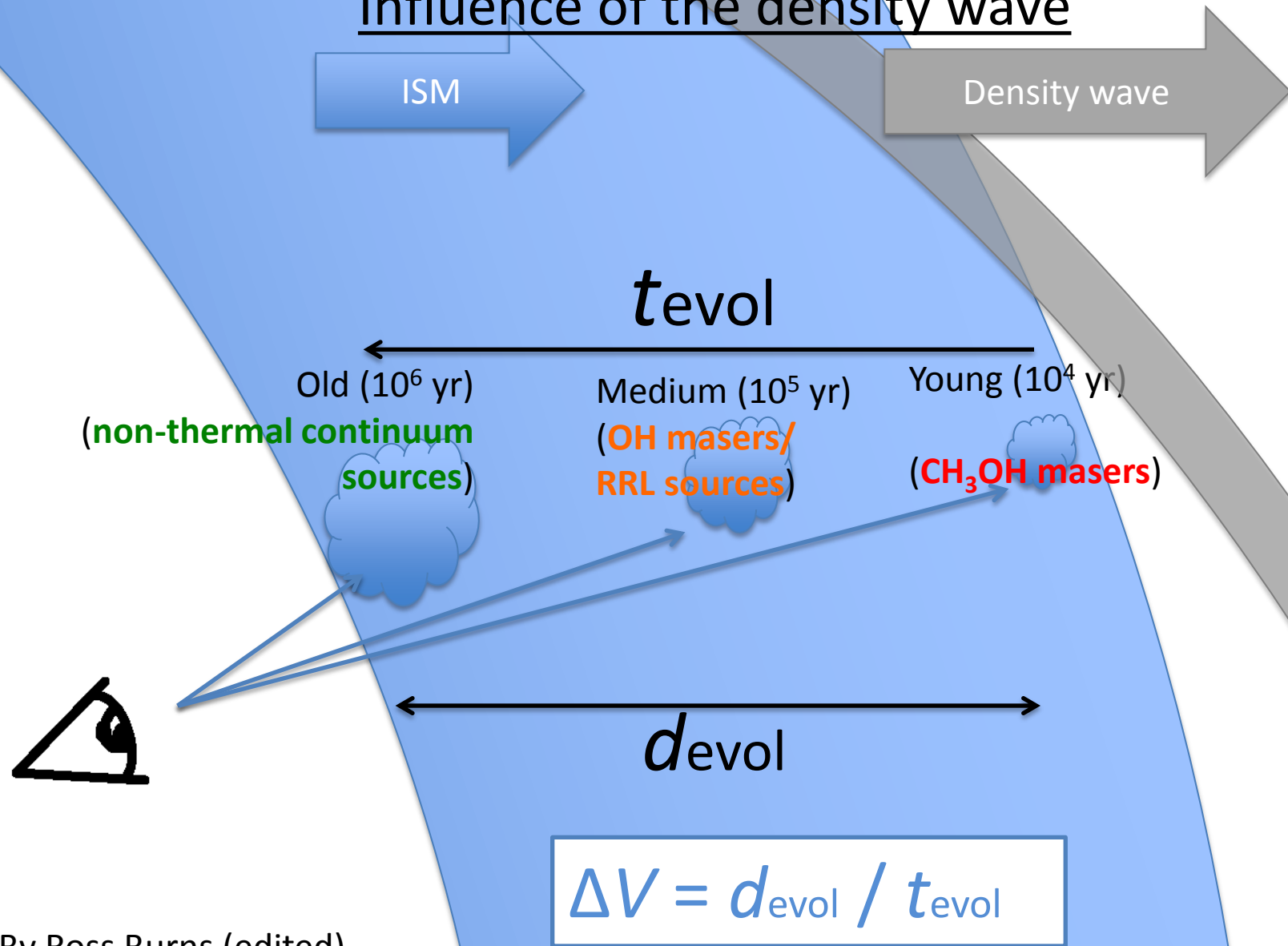
However, feasible, realistic, and transformational?

Possible science cases in SKA era

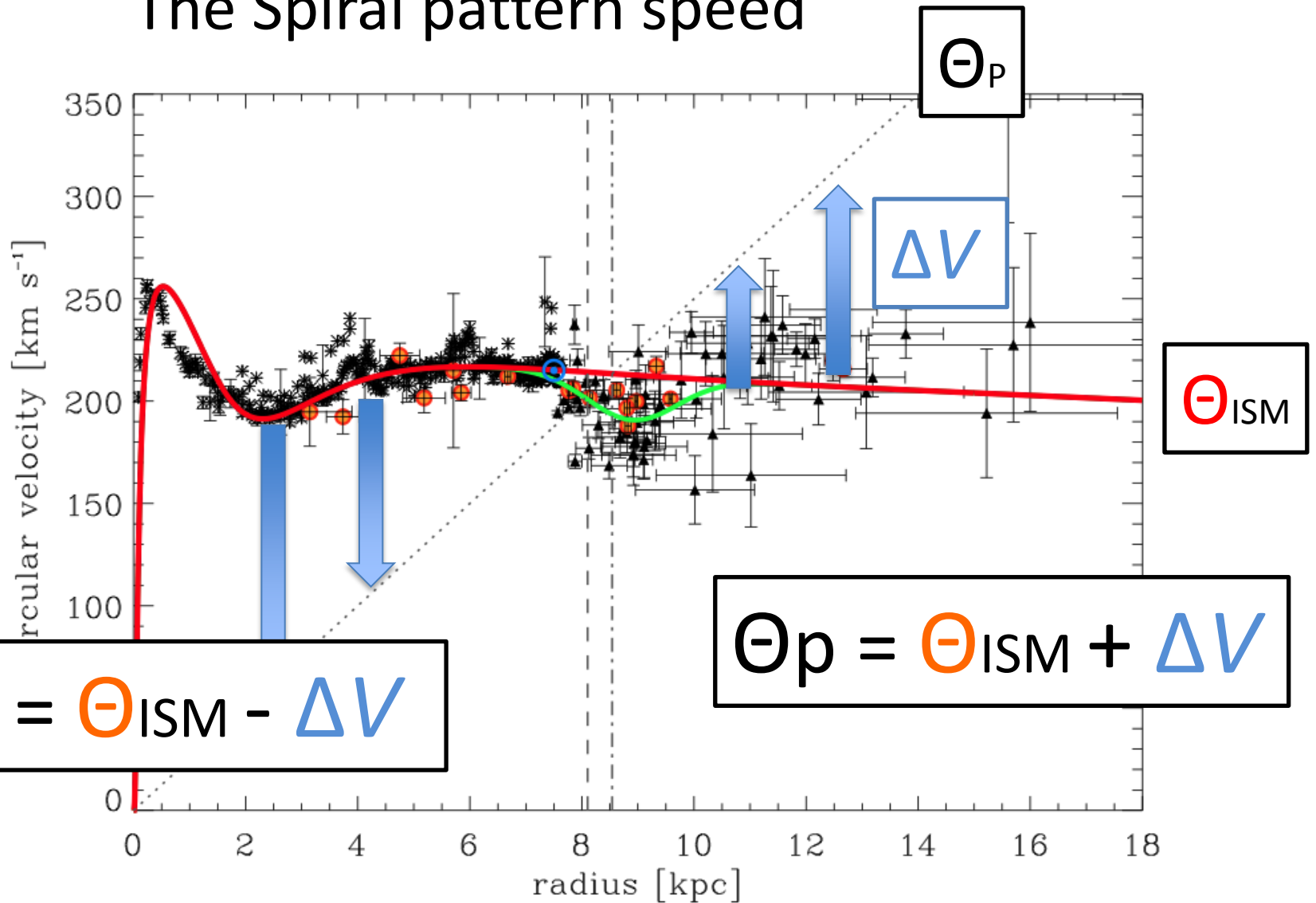
- “Spiral arm tomography” in the Milky Way
 - finding chronological sequence of star forming regions across the spiral arms : $>1\ 000$ stars/arm
 - including southern Sky where SKA is operated
- Mapping the *whole* Milky Way System
 - Galactic center, bulge, and halo (including pulsars)
 - Magellanic System (LMC & SMC proper motions)
- 3D dynamics of the Local Group of galaxies
 - dynamical history of the LG and the MW
- Science with the radio reference frame
 - $\sim 30\ 000$ reference sources ($S_{\nu} > 0.5$ mJy)
 - “Galactic aberration” ($50\ \mu\text{as}/\text{century}$)
 - astrometric micro-lensing events
- Synergy with pulsar and transient science cases
 - gravitational waves,

Milky Way Spiral Arm Tomography

Influence of the density wave

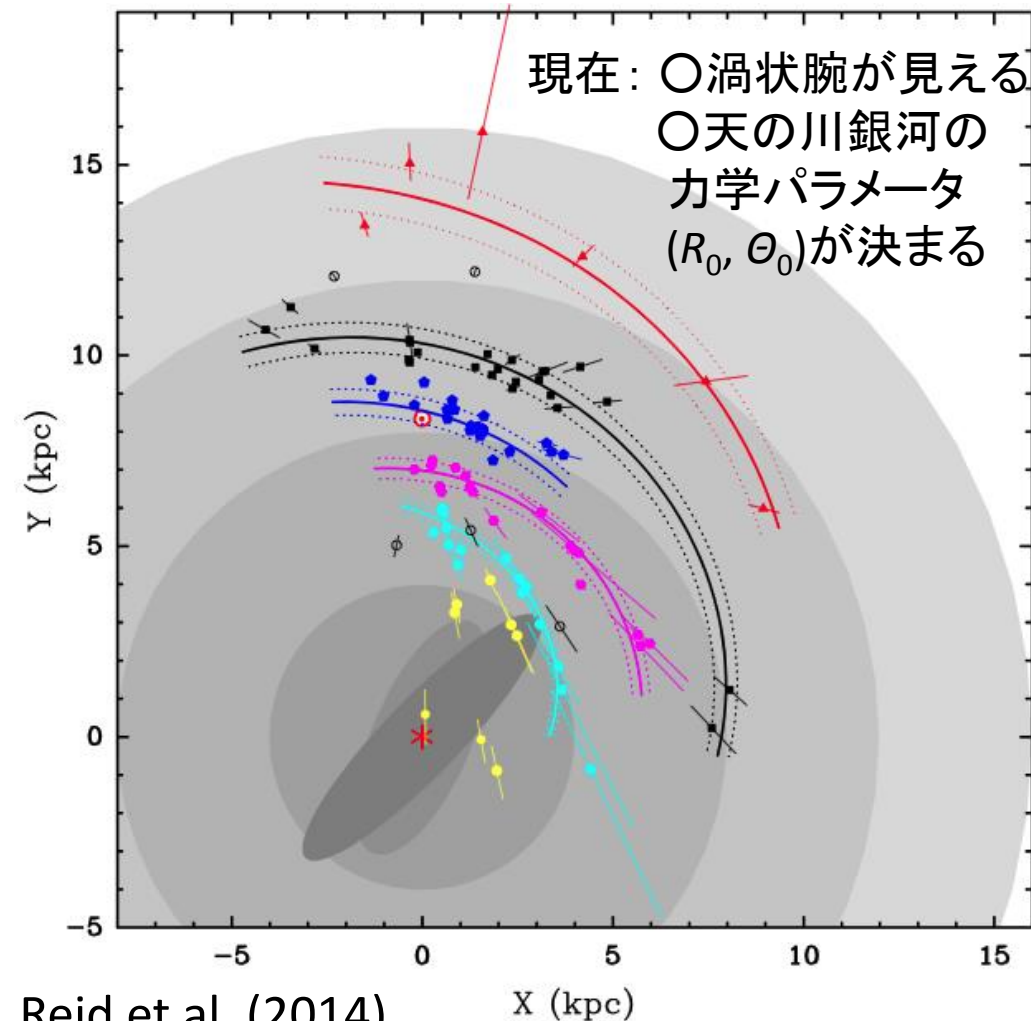


Influence of the density wave: The Spiral pattern speed



Feasibility of the Spiral Arm Tomography

Lorentz Center Workshop —
Galactic Science with the SKA & Its Pathfinders on 2014 May 19—23
(Green et al. 2015)



25 pc メッシュで天の川銀河面の
星形成領域の配置を把握する

測量電波源の前後にある
星形成領域の距離推定
再結合線・分子スペクトル線
の輝線・吸収線利用

SKA1アストロメトリ:
100 pc メッシュでの測量
南天もカバー

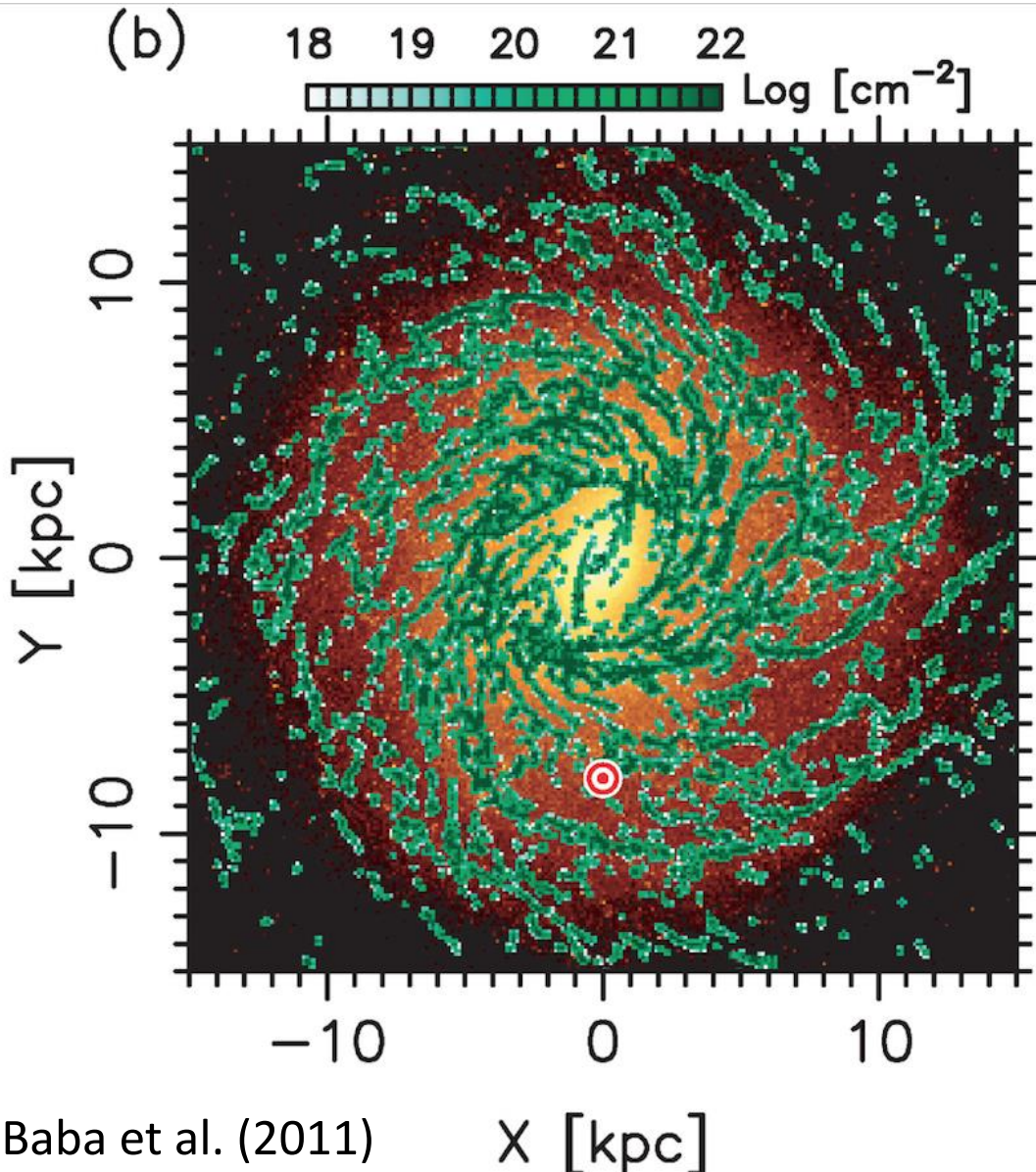
現測量事業の到達点: 1 kpc四方に数個

自発的な腕形成？

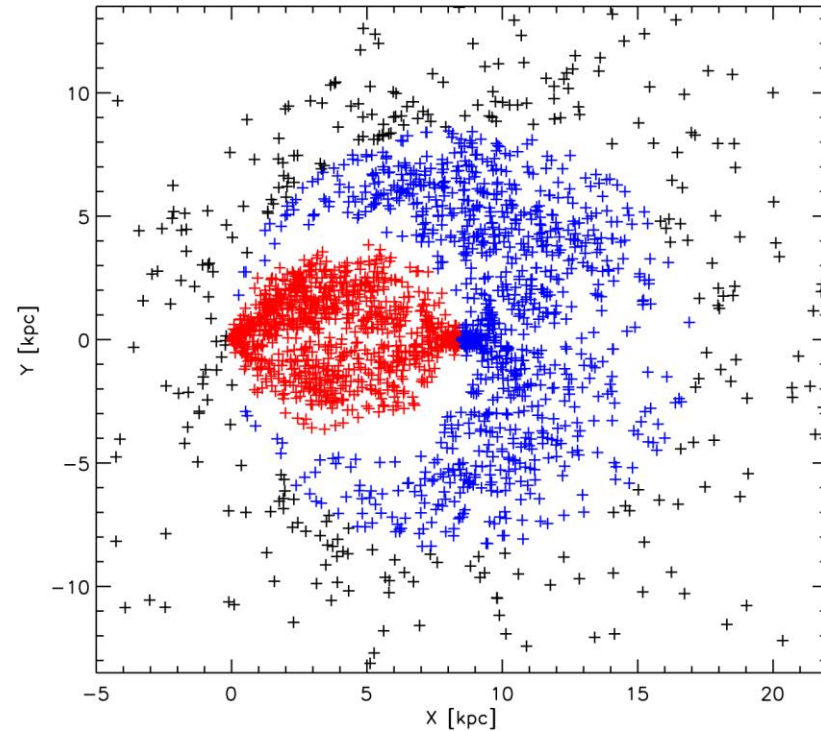
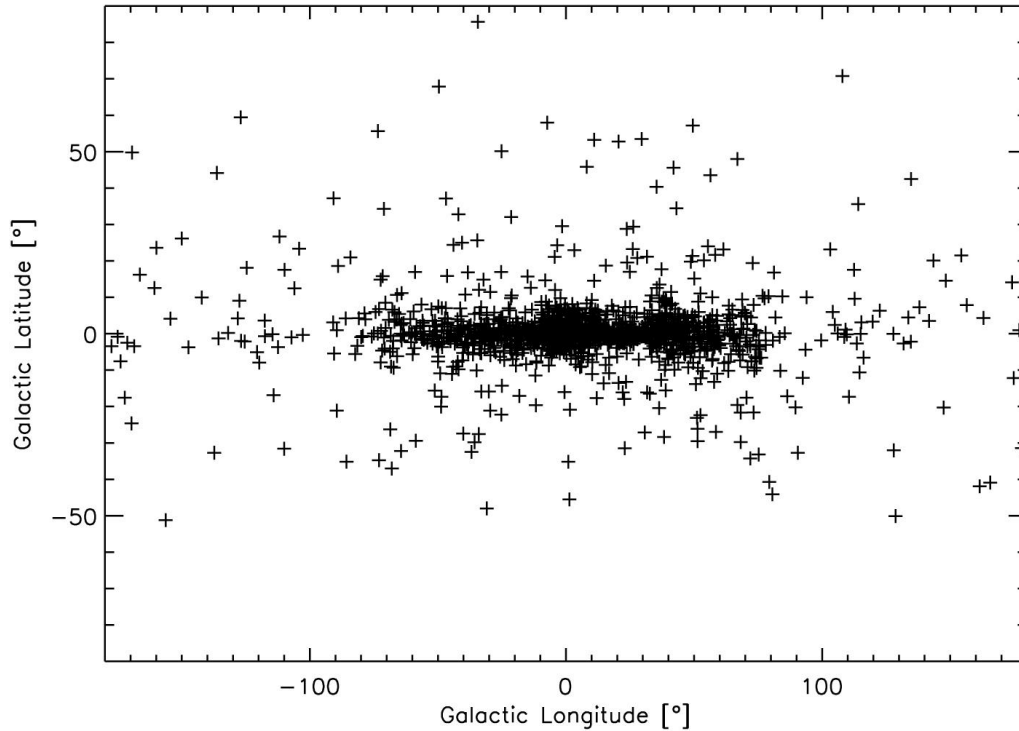
密度波理論 v.s. 自発的な腕形成

あらゆる角度での検証を進める時代へ

- より細かい測量メッシュ
 - 1 kpc \rightarrow 50 pc
- メーザー源以外の測量対象 (熱的・非熱的連続波源)
 - パルサー
 - YSO
 - OHメーザー、HII領域



Why astrometry of OH masers with the SKA?



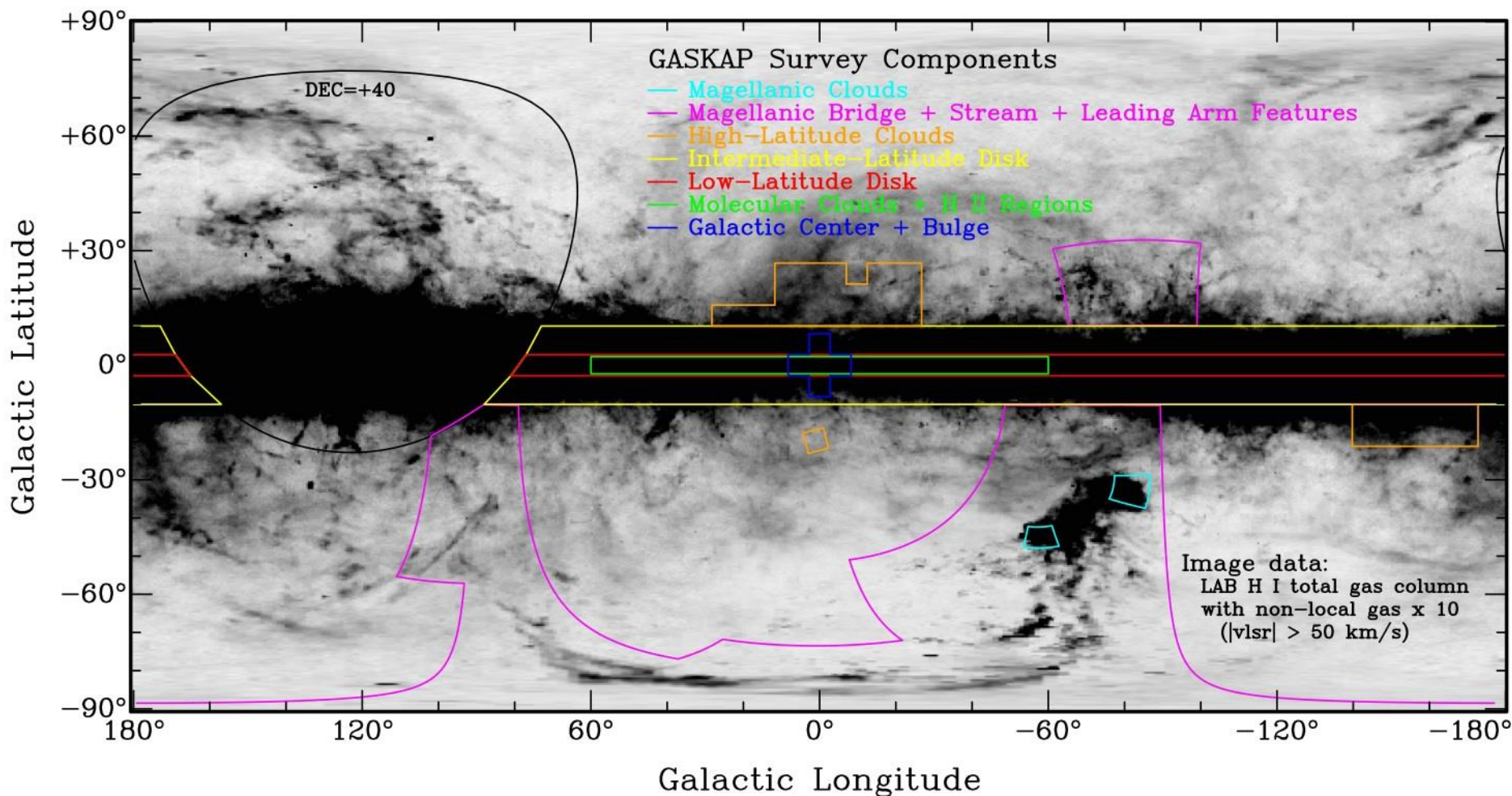
2245 1612-MHz OH masers (<http://www.hs.uni-hamburg.de/~st2b102/maserdb>)

From VERA/VLBA/EVN/LBA (1,000 sources) to the SKA (~10,000)

- From young population (supergiants) to old population (Mira variables, OH/IR stars, post-AGB stars)
- Any location: Galactic thick disk, bulge, halo (globular clusters)
- ~10 000 Galactic OH masers promising
- ~200 OH masers promising in the Large Magellanic Clouds

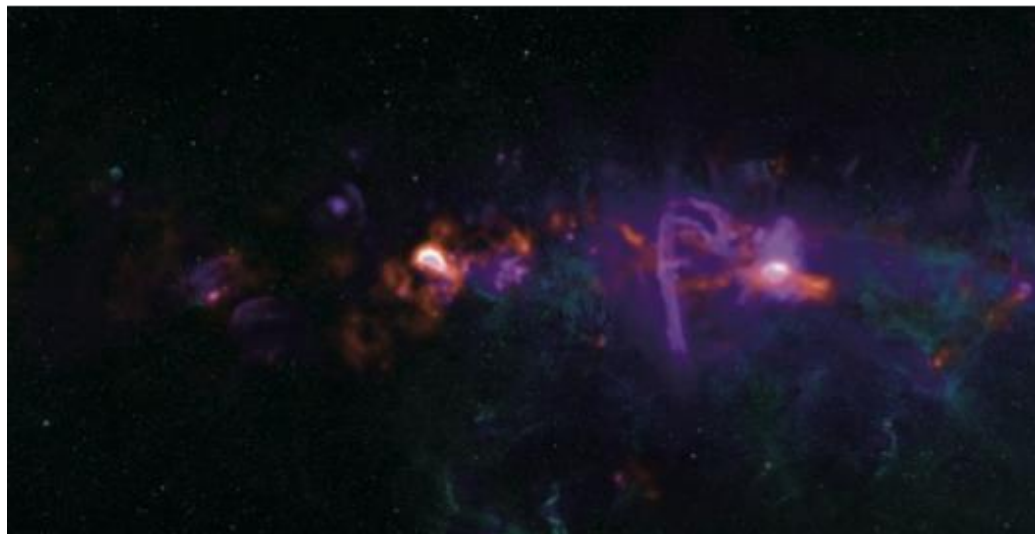
広域HI放射撮像との協調

- HIマップ解像度: 10''(GASKAP); 1''(SKA1-MID); **10 mas** (SKA1-MID-VLBI)
- OHメーザー源を取り巻くHIガス縁の探査→**物質循環経路の把握**



GASKAP (Galactic ASKAP Spectral Line Survey, Dickey et al. 2013) **2016年から開始予定**

天の川銀河中心域の本格的な測量



Central
Molecular Zone

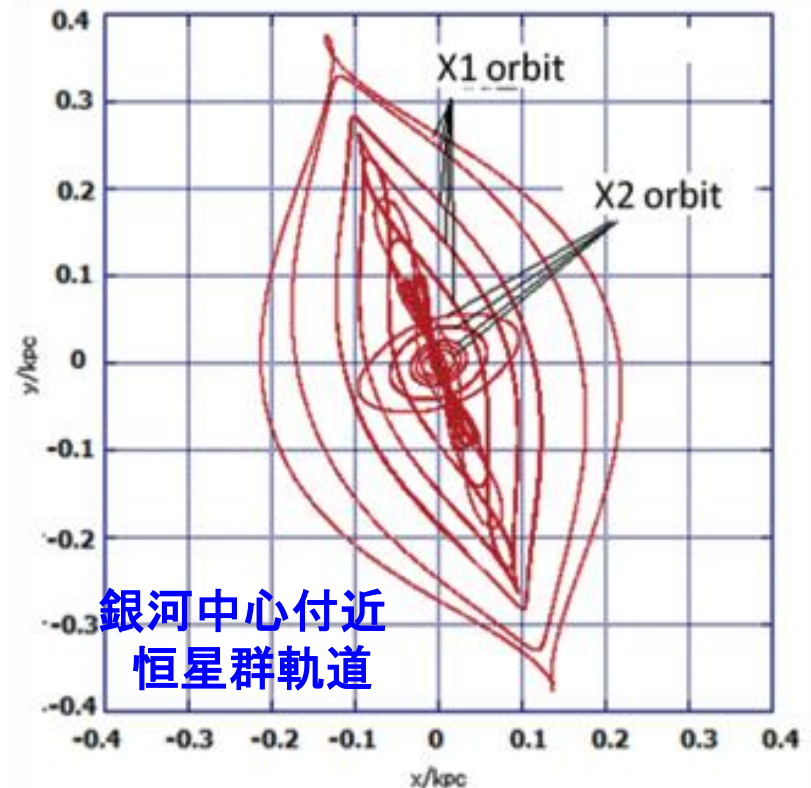
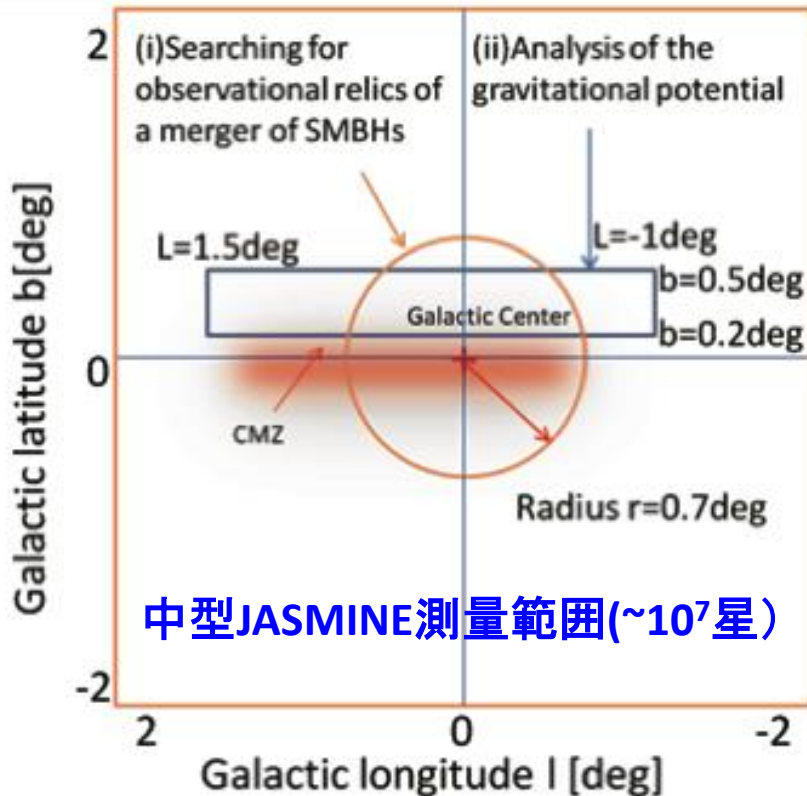
銀河中心ブラックホールとバルジの共進化

大域的な物質降着及び噴出流の検出

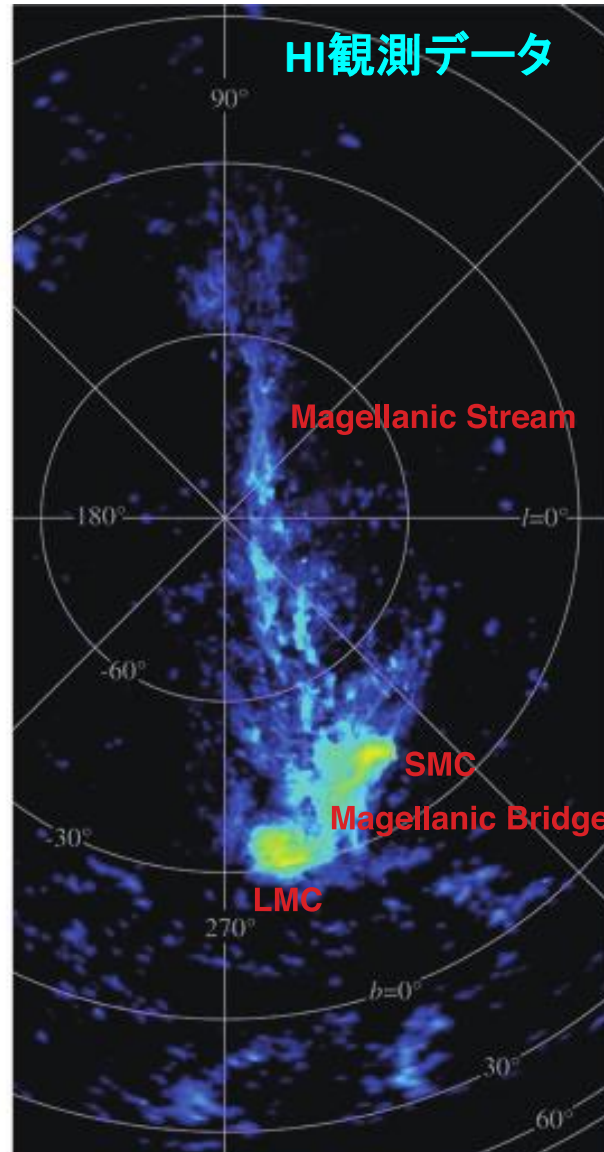
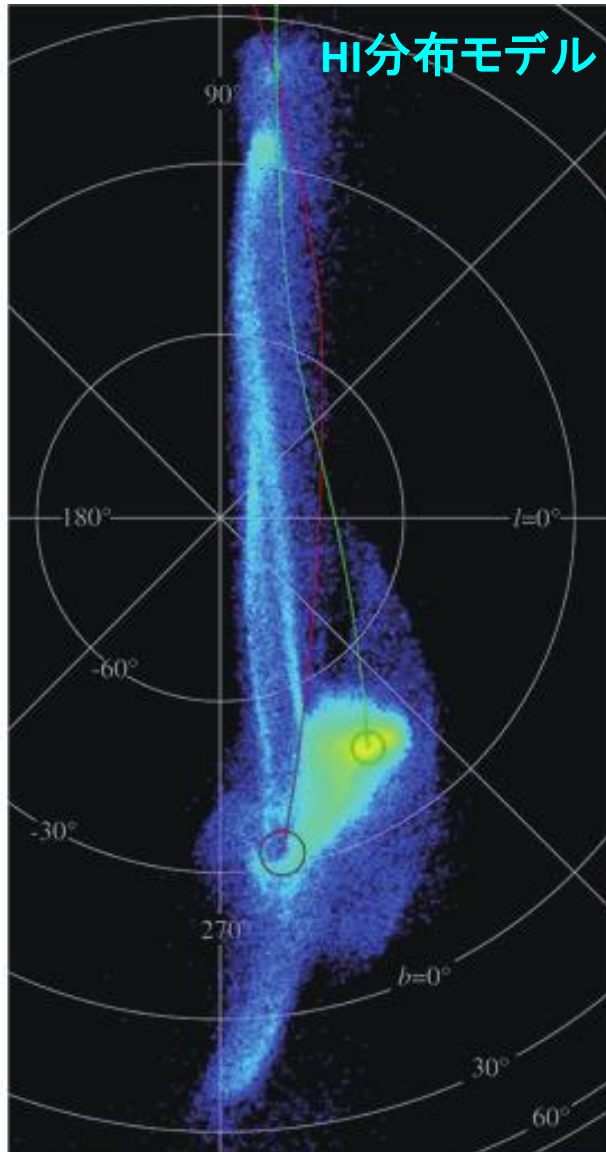
- Sgr A*から2 pc以内: VLT/Keck; **SKA (パルサー)**
 - Sgr A*から2 pc以遠
 - ALMA: 多数天体が混在、分離が困難
 - **SKA (OH, CH₃OH); JASMINE**
- 多数点源(赤色巨星・OB型星、パルサー、BH)**

天の川銀河バルジの本格的測量

リンドブラッド共鳴半径前後の恒星群軌道
(位相空間, $[x, y, z, v_x, v_y, v_z]$)の把握・統計的分析
**SKA測量対象(OHメーザー源)結果との
比較(~5000星)と補間**



天の川－マゼラン銀河系の動力学構造



マゼラン銀河の
軌道

(HST, LBA, **SKA**)

銀河の軌道と回転の
分離が課題

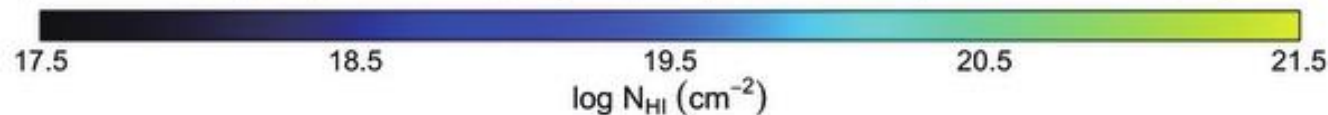


潮汐力による
HIガスの拡散＋集積



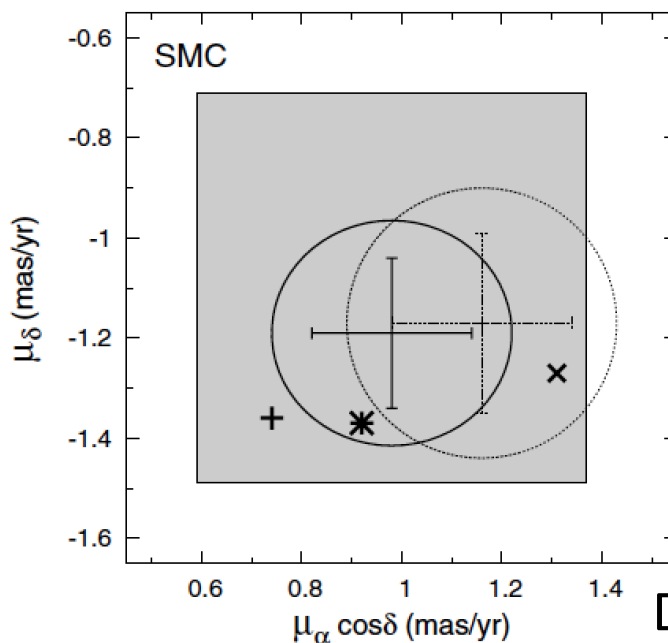
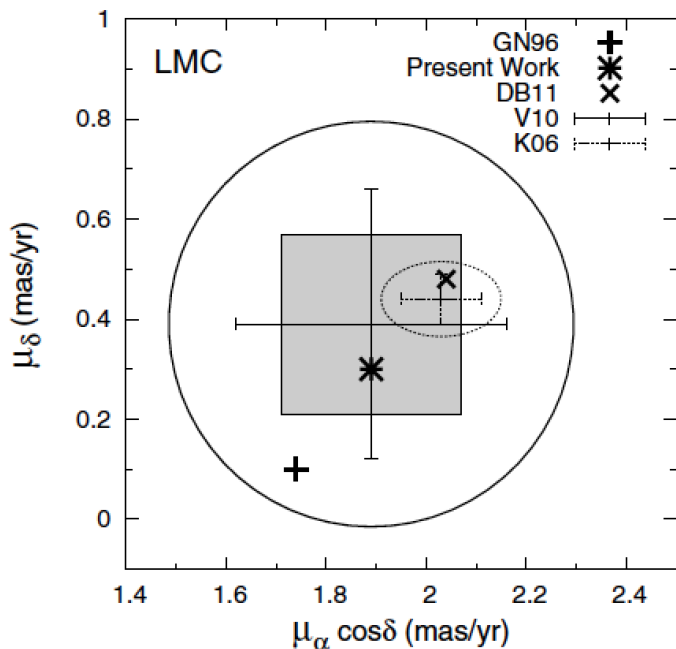
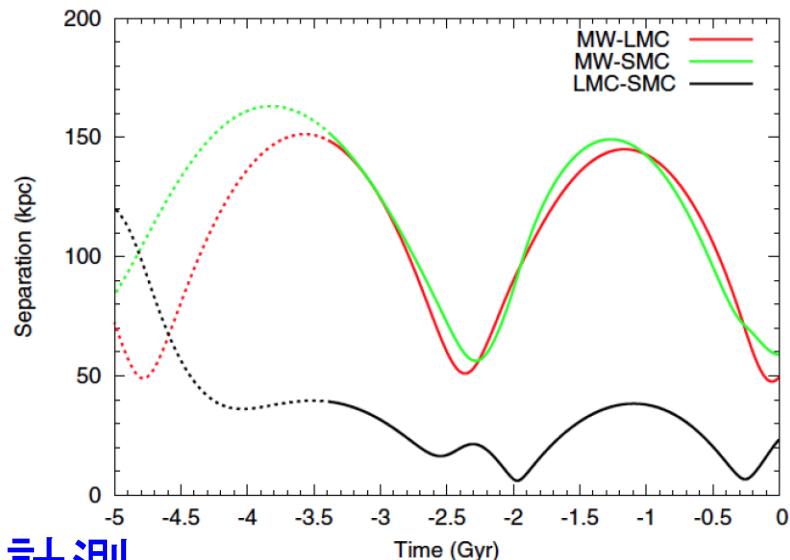
天の川銀河及び
大小マゼラン銀河の
力学的履歴の解明

Bekki et al. (2012)



大小マゼラン銀河の軌道決定へ($\sigma \sim 10 \mu\text{as yr}^{-1}$)

- 収束しないHST計測結果
(e.g., Kallivayalil et al. 2013)
- 銀河回転と測定対象天体の運動の差分が問題
- LBAによるH₂Oメーザー源固有運動計測→天体数不十分
- SKAによる~200個の星間・星周OHメーザー源固有運動計測



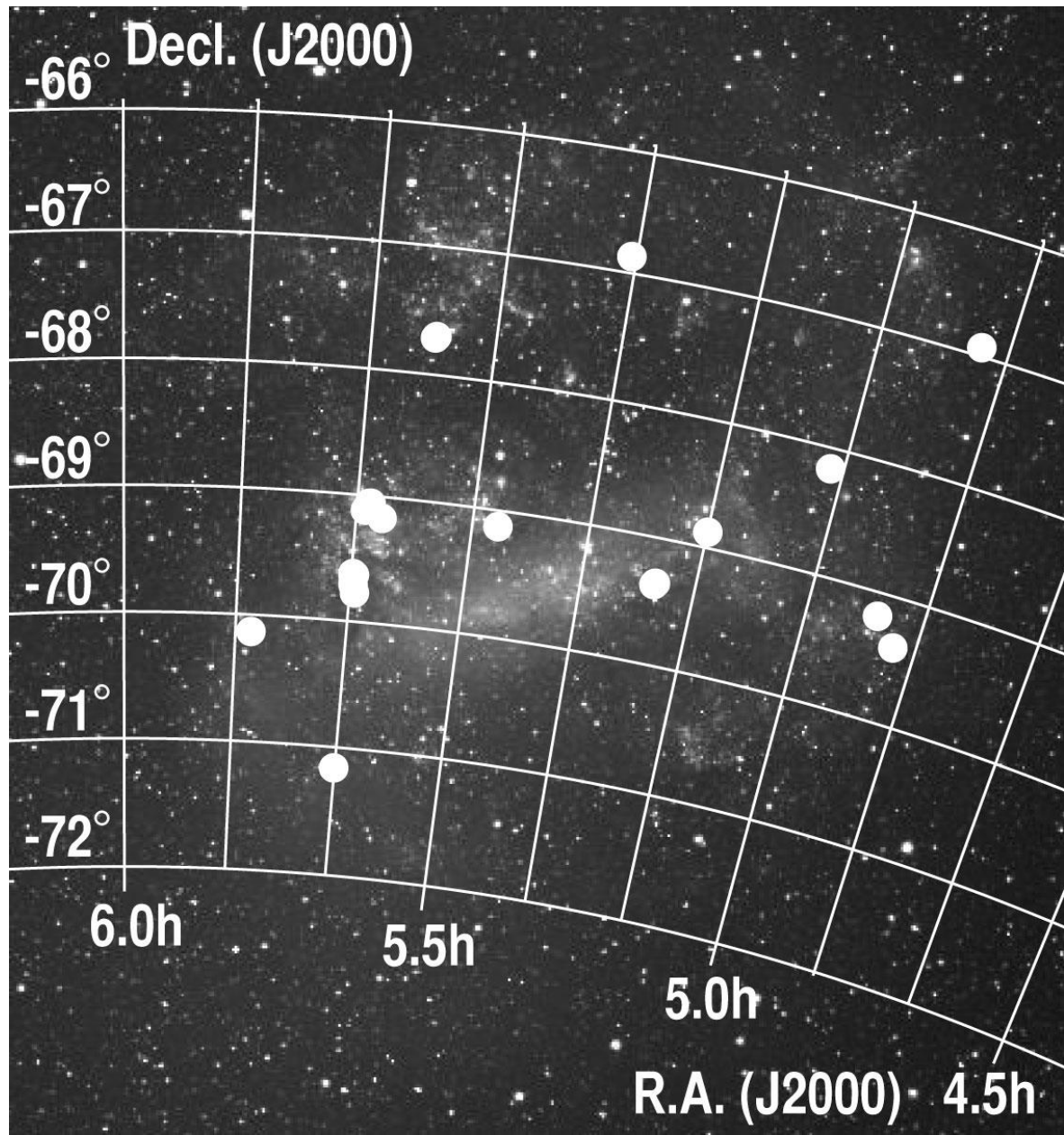
Diaz & Bekki (2012)

H₂O masers in LMC and SMC

LMC で20個程度

(Imai et al. 2013)

LBAで計測試行、苦戦中
(望遠鏡時間、局数...)



近傍銀河の 固有運動計測

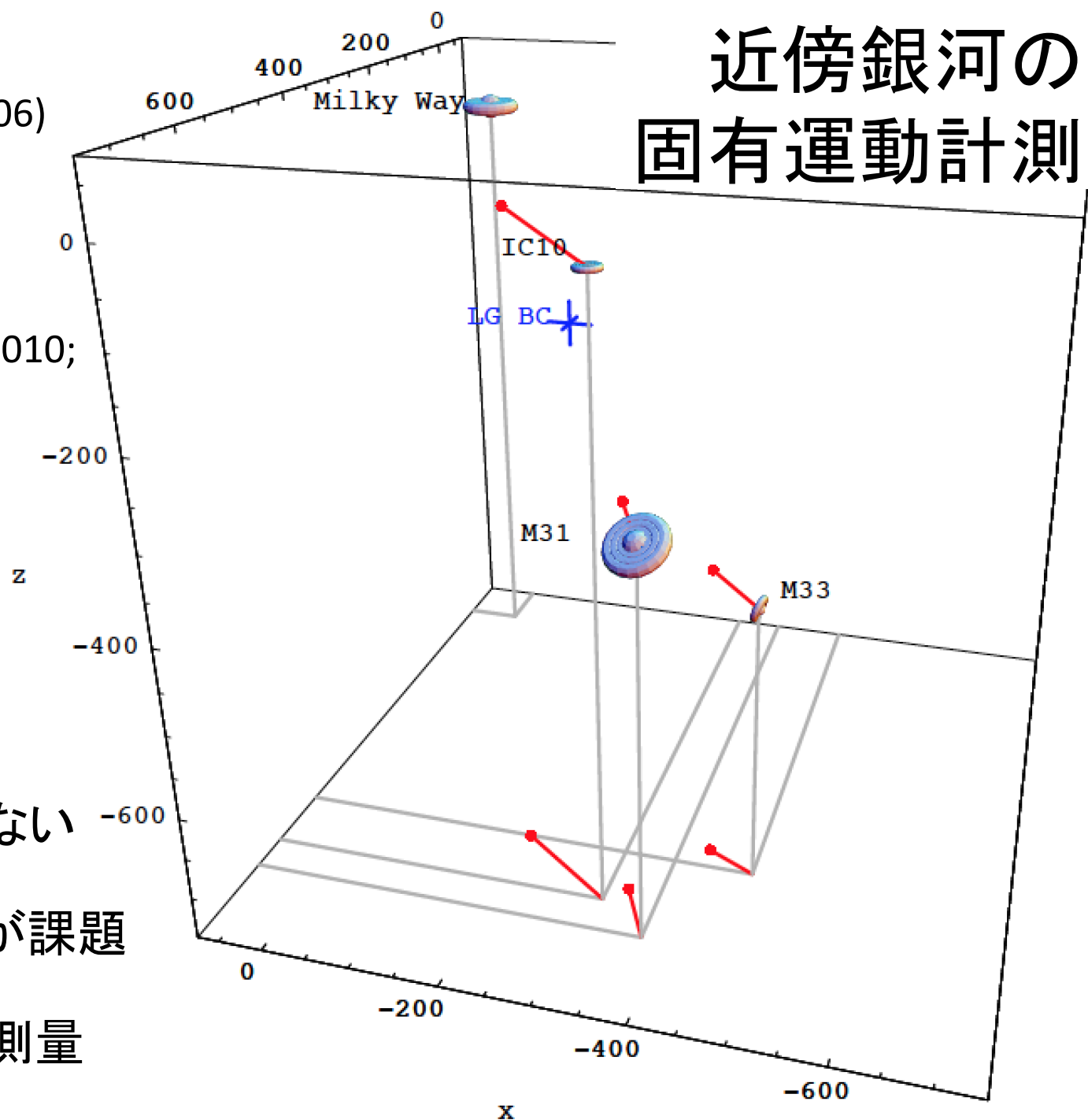
M33, IC10
(Brunthaler et al. 2006)
4- σ motions

M31
(Sjouwerman et al. 2010;
Daring 2011)
now ongoing
with HAS
(CH₃OH, H₂O)

~30 μ as/yr

銀河内の
メーザー源が少ない
→銀河回転分の
運動の除去が課題

感度的に厳しい測量



太陽系の永年 (銀河)光行差 (QSO相対固有運動)

$6.4 \pm 1.5 \mu\text{as yr}^{-1}$
(Titov et al. 2011)

測地VLBI観測

(大角度位置計測)

絶対座標誤差 $\sigma \sim 0.1 \text{ mas}$

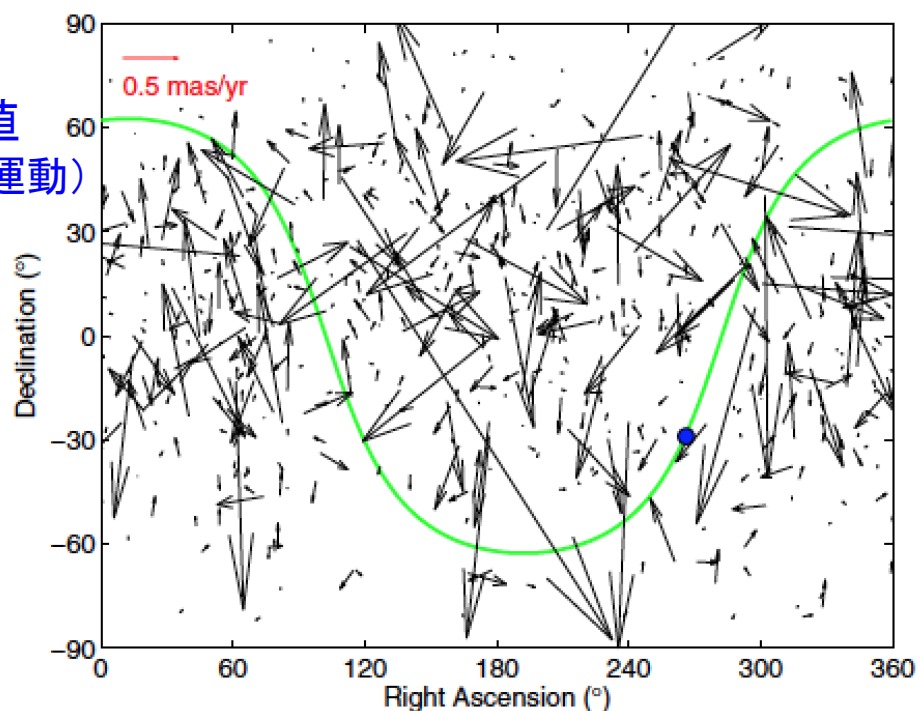
$\rightarrow 10 \mu\text{as} \sim (\text{VGOS})$

今後問題となる誤差要因

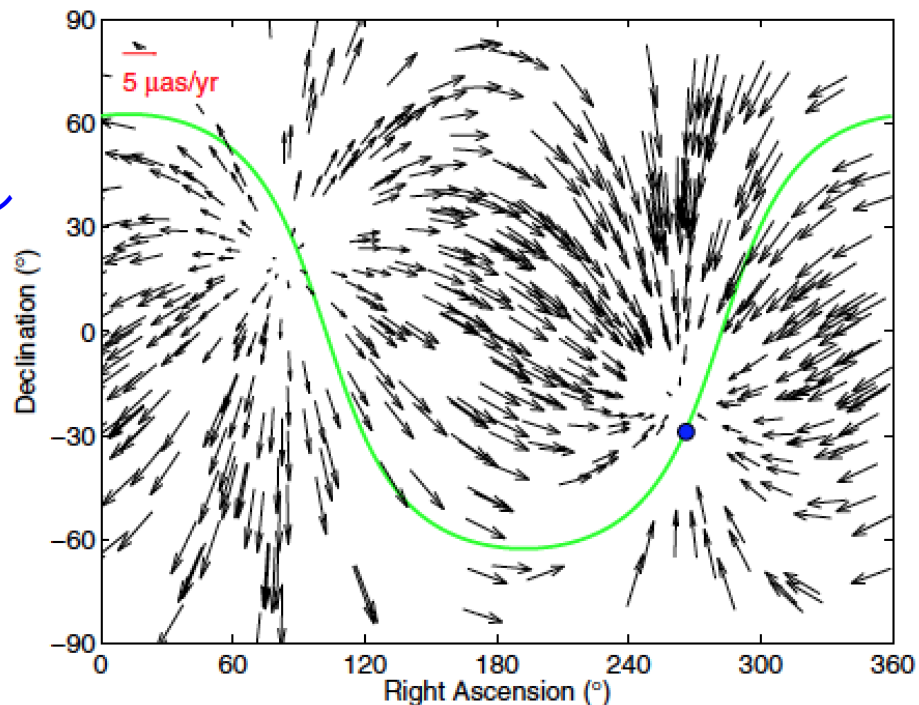
- 天体構造(QSO ジェット、等)
- マイクロレンズ効果

新しい研究分野として開拓

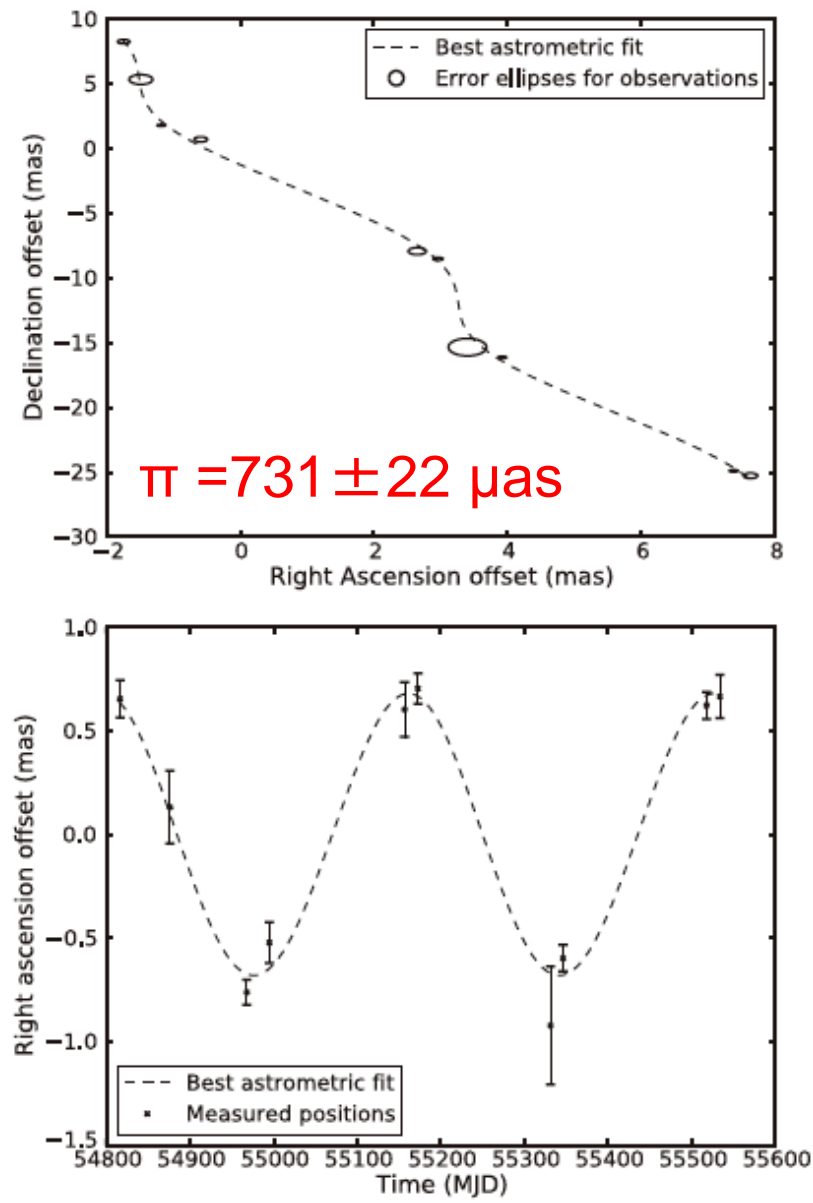
測定値
(相対運動)



モデル

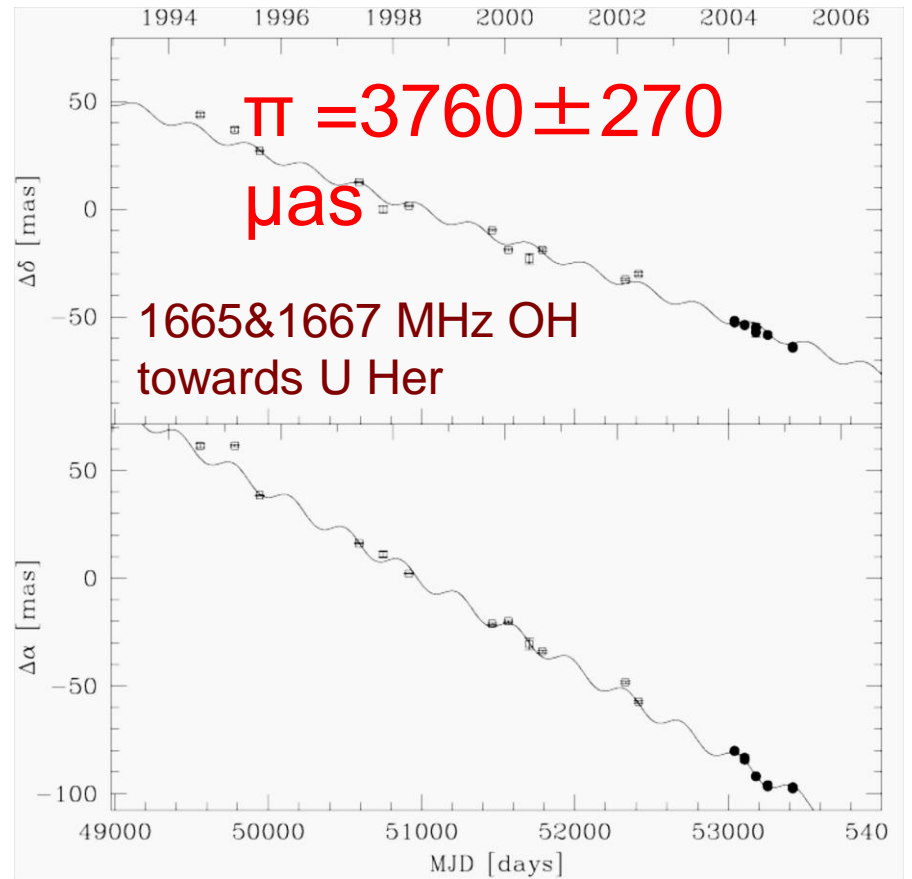


Pulsar astrometry at L-band:
J1023+0038 (Deller et al. 2012)



Trigonometry of OH masers

- Only three papers!
 - van Langevelde et al. 2000;
 - Vlemmings et al. 2003, 2007
 - Towards OHs around 6 Mira variables
- **Possible, but challenging!**

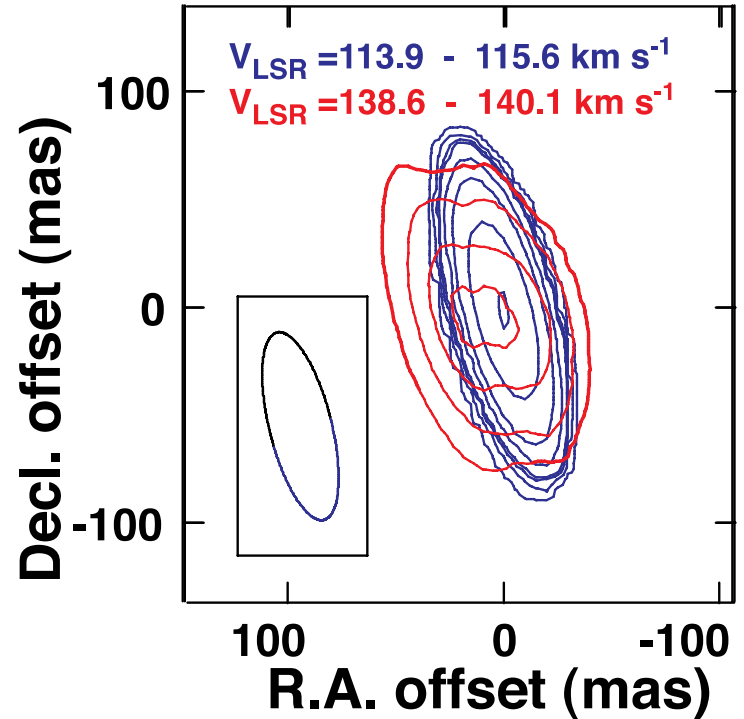


OHメーザー源のサイズ

大陸間基線では著しく
空間分解される

比較的長期安定

2000—3000 km程度の
高感度基線が必要



IRAS 18460-0151
(Imai et al. 2013)

e.g. W₄₃A
IRAS 18286-0959

SKAアストロメトリの実現性：感度

- データ校正に使える参照電波源の検出感度 (baseline sensitivity)

mJy-level continuum calibrators

$$S_{\min} = R_{\text{SN}} \frac{\sqrt{SEFD_i SEFD_j}}{\sqrt{2Dnt_{\text{int}}}} \approx 0.55 \frac{\sqrt{(SEFD_{\text{core}}/3\text{Jy})(SEFD_{\text{remote}}/100\text{Jy})}}{\sqrt{(Dn/0.5\text{GHz})(t_{\text{int}}/100\text{s})}} [\text{mJy}]$$

Here $R_{\text{SN}}=10$ c.f. $SEFD=42$ Jy @Parkes 64-m L-band

- 画像上の感度 (core-remote baselines only)

10 mJy-level OH maser detectable

$$S_{\text{line}} \approx S_{\min, Dt} \sqrt{\frac{Dt}{T_{\text{total}}}} \frac{1}{N_{\text{remote}}} \approx 16 \frac{\sqrt{[SEFD_{\text{core}}/3\text{Jy}][SEFD_{\text{remote}}/100\text{Jy}]}}{\sqrt{[Dn/10\text{kHz}][T_{\text{total}}/600\text{s}][N_{\text{station}}/10]}} [\text{mJy}]$$

実際に得られる信号雑音比(R_{SN})はリモート局配置で決まる合成ビームパターンによって制限されるdynamic range で決まる



像合成に依らない電波源位置推定の手法が必要？

SKAアストロメトリの実現性：位置決定精度

- 熱雑音で決まる統計的位置誤差 (Moran et al. 1993)

$$s_q \gg 0.5 \frac{q_{\text{beam}}}{R_{\text{SN}}} \gg 1000 \frac{[/ / 10 \text{cm}]}{[B_{\text{max}} / 1000 \text{km}] [R_{\text{SN}} / 10]} [\text{mas}]$$

3000 km の基線、波長18cm、信号雑音比300⇒ 誤差20 μs

SKA1の測量対象 (60分積分)

- 2000 mJy 以上のOHメーザー源
- 1500 mJy 以上のCH₃OHメーザー(6.7 GHz)源 (S/N~600)

c.f.

VERAアストロメトリ対象

($\sigma \lesssim 100 \mu\text{s}$)

(H₂Oメーザー源) >5000 mJy

SKA2の測量対象 (10分積分)

- 500 mJy 以上のOHメーザー源
- 370 mJy 以上のCH₃OHメーザー(6.7 GHz)源

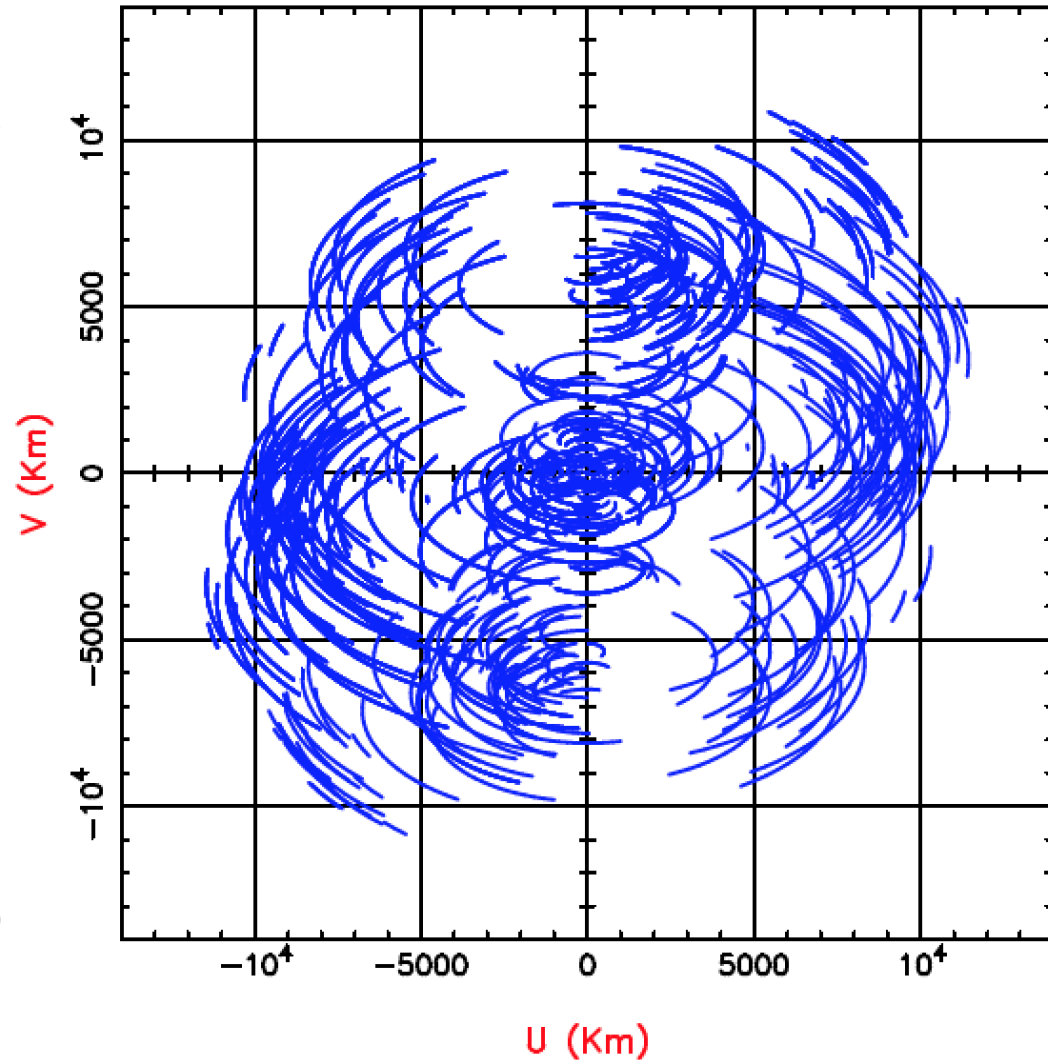
SKA1: 数倍増える測量対象

SKA2: 数10倍増える測量対象

熱的放射源のアストロメトリも視野へ (誤差1mas程度から)

VLBI with the SKA

- (u,v)-plane coverage
(Paragi et al. 2015)
 - For 12 hours
 - 24 telescopes
 - SKA1-mid
 - EVN, CVN, LBA
 - AVN(Africa)
 - $\delta = -20^\circ$
- 1 hr sensitivity (1σ)
 - $9 \mu\text{Jy}/\text{beam}$
(50% SKA1-mid)
 - $0.05 \mu\text{Jy}/\text{beam}$
(Full SKA)



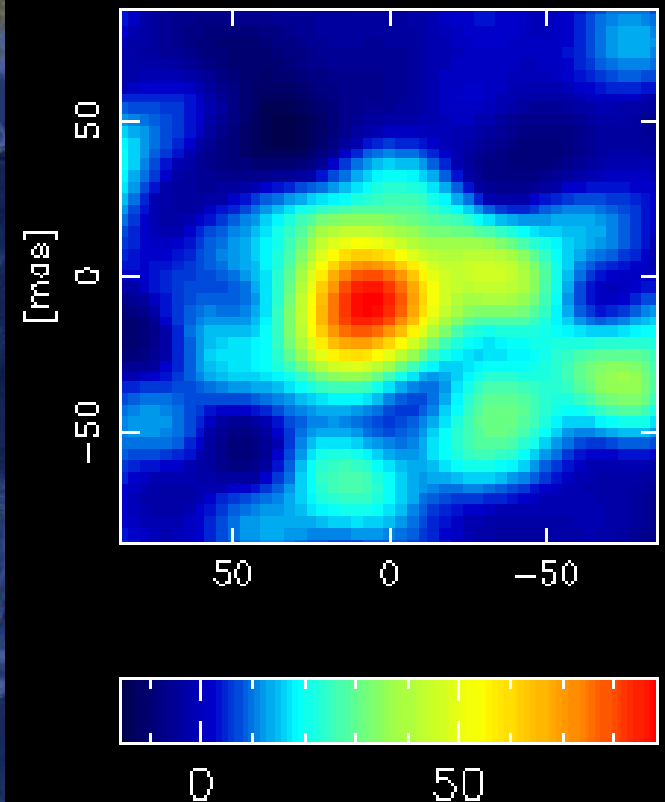
SKA2 astrometry simulations

ARIS (Asaki et al. 2007)+AIPS/ParselTongue (Y. Uchino)

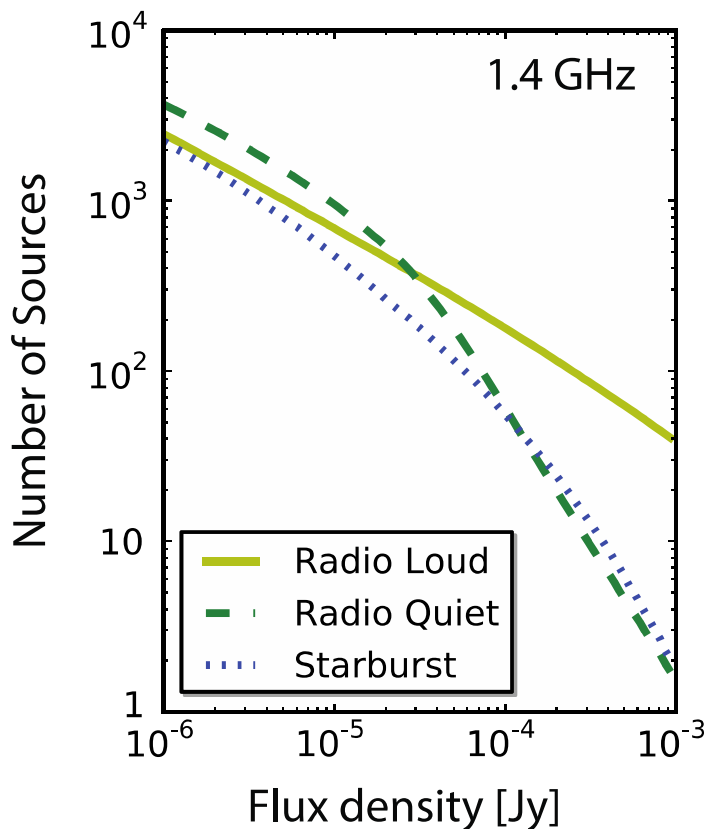


実現する角分解能と感度、天体位置測定精度についてはシミュレーションによる調査が必要

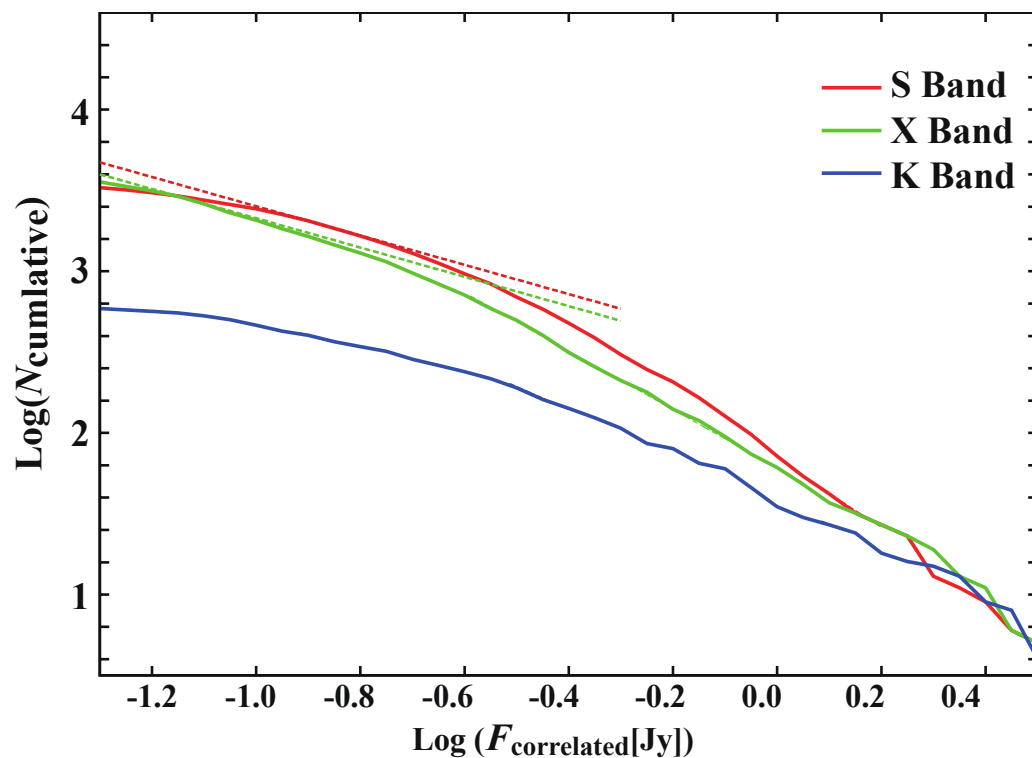
5-min snapshot @L-band



同一視野内で観測される参照電波源



Radio sources in FoV
(SKA Memo 135)



Total number of references sources on the Sky
(plot by Gabor Orosz)

160 000 calibrators at 2.2 GHz → 2.9 個/ビーム

→ for OH masers, pulsars

130 000 calibrators at 8.4 GHz → 0.05 個/ビーム

→ for CH₃OH masers

広視野・同時複数視野

$$q_{\text{FoV}} \gg 0.7 \frac{l}{D_{\text{single}}} \gg 0.48 \frac{[l/18\text{cm}]}{\left(\frac{D_{\text{single}}}{15\text{m}}\right)} [\text{deg}]$$

3 targets astrometry (lead by G. Orosz)

Multi-View calibration (R. Dodson & M. Rioja)

銀河面:

同一視野に複数のメーザー源

参照電波源: 同時に複数観測

→大気遅延残差(主に電離層)補正

データ較正・位置基準
電波源(クエーサー)

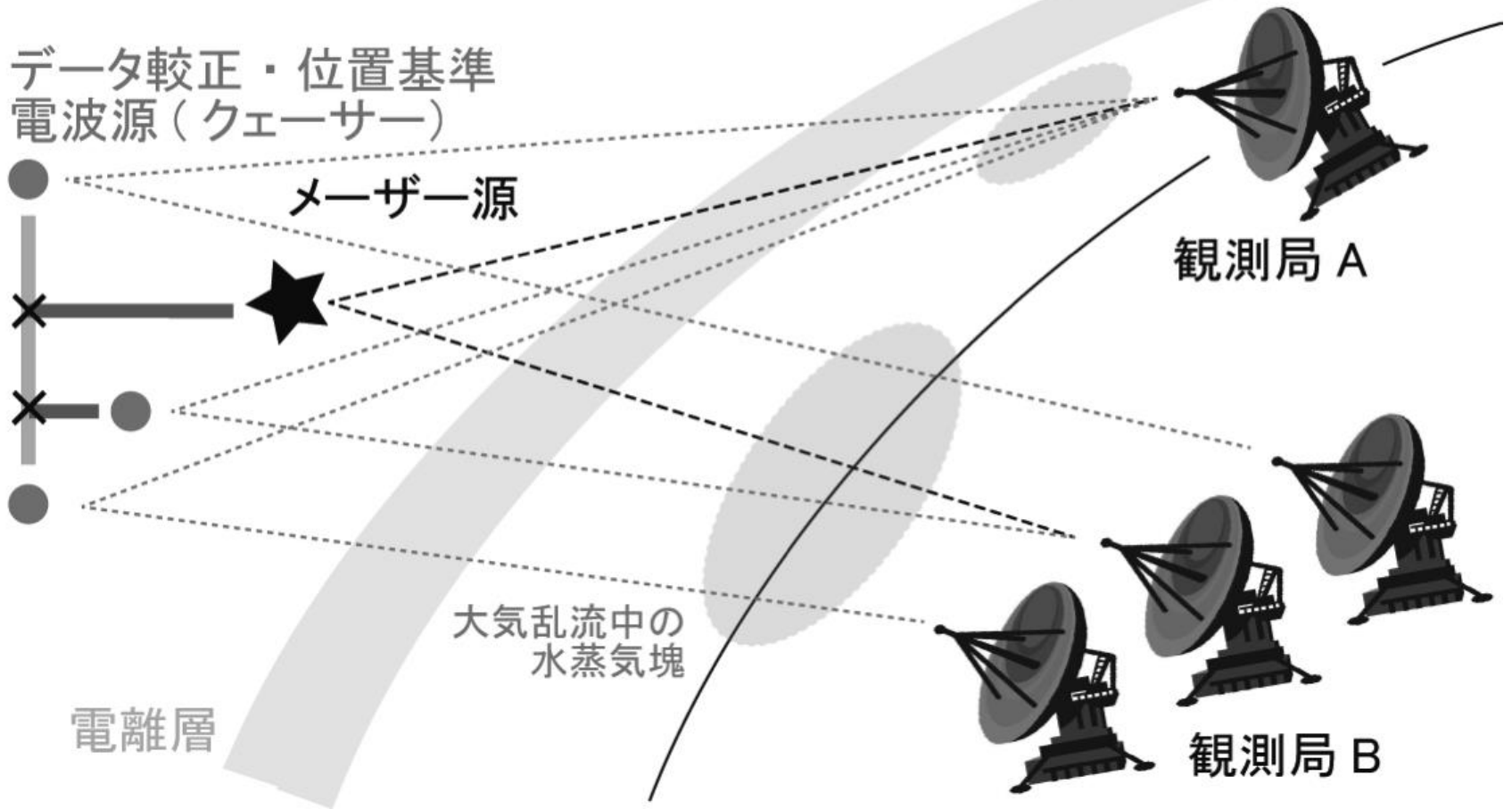
メーザー源

観測局 A

大気乱流中の
水蒸気塊

電離層

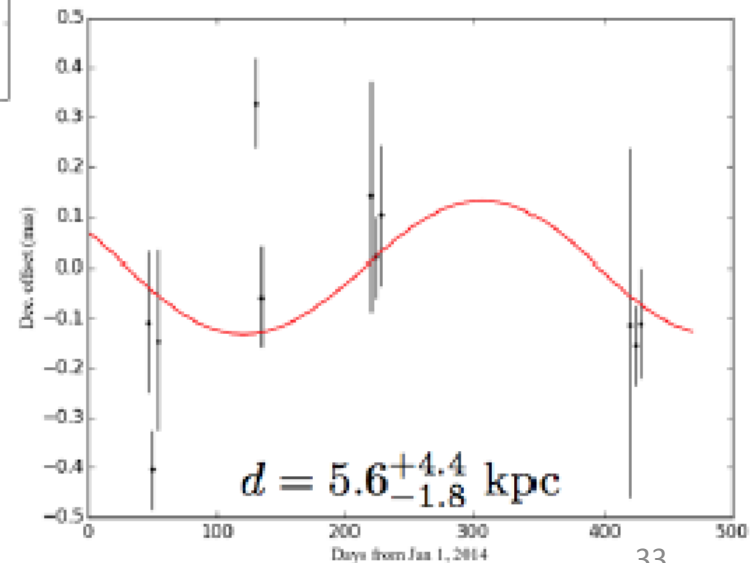
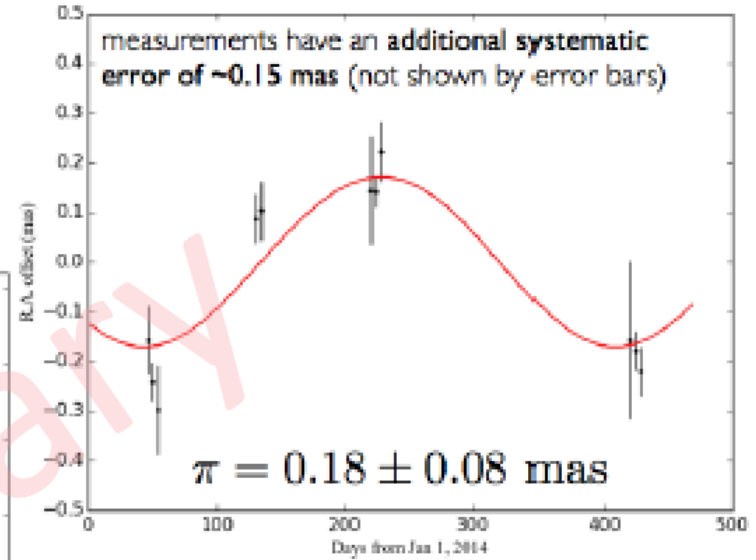
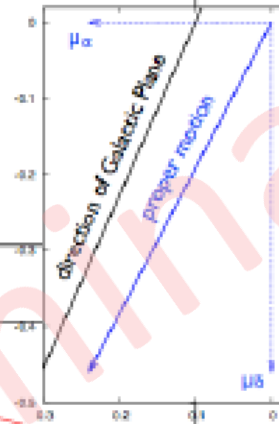
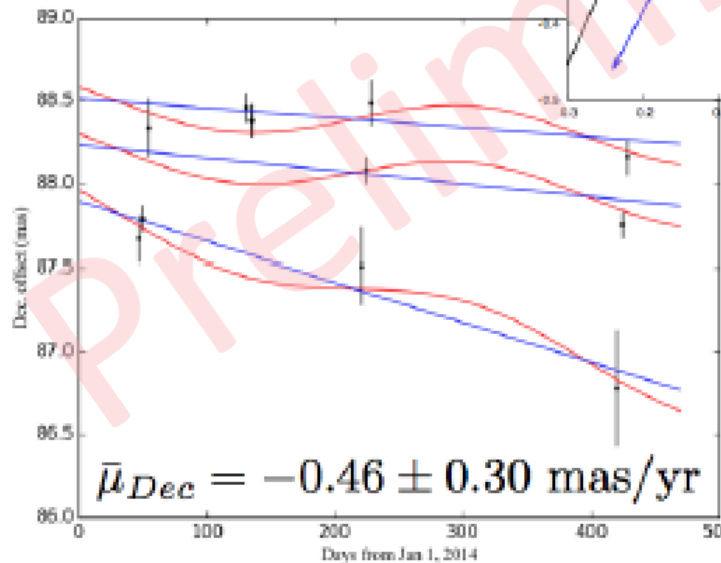
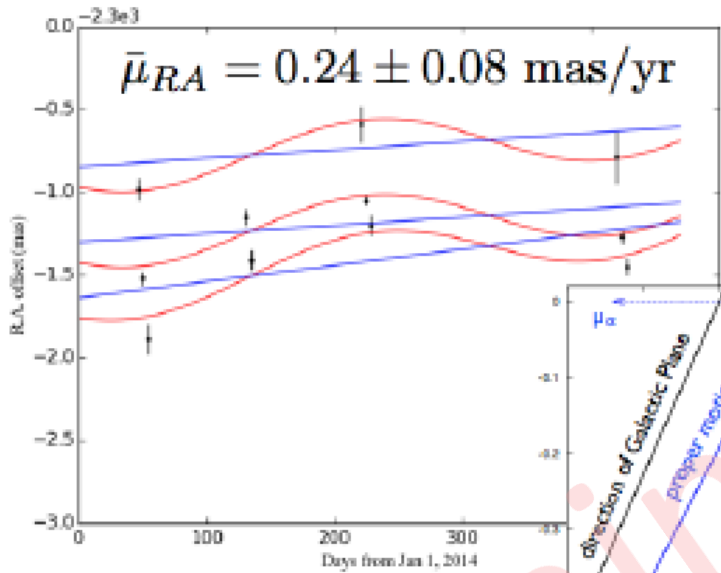
観測局 B



sub-mas annual parallax of OH masers @1.6 GHz

1612 MHz OH
masers
towards
OH138.0+7.2

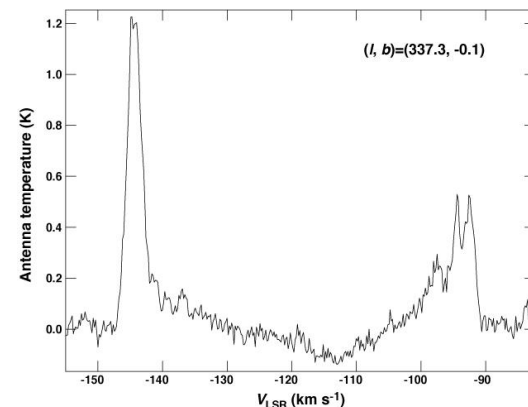
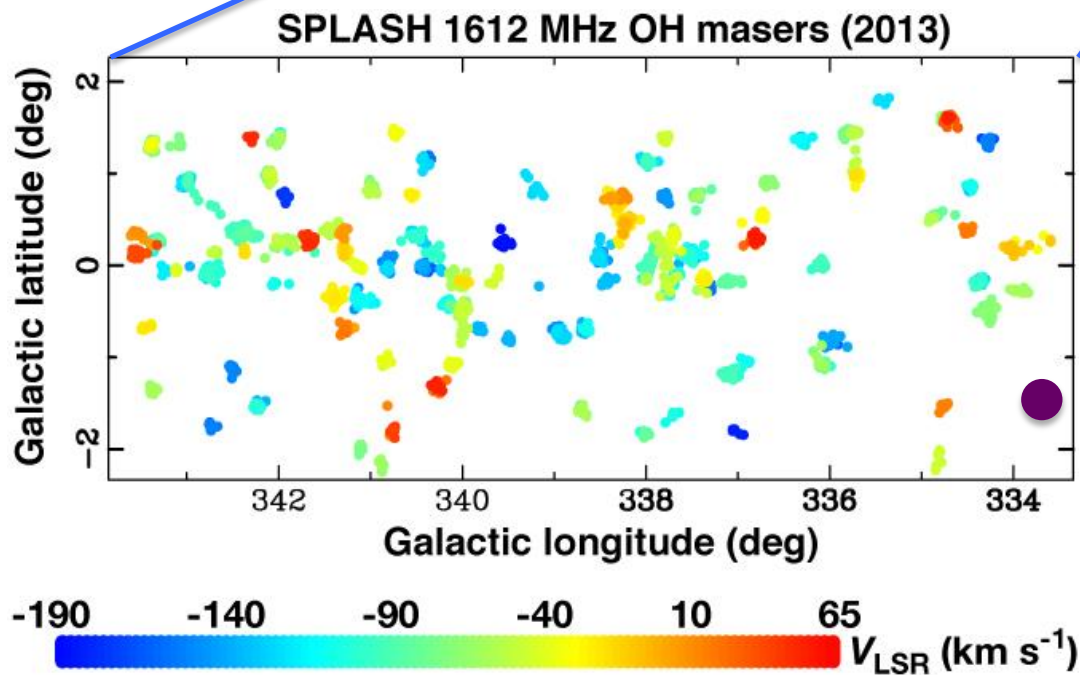
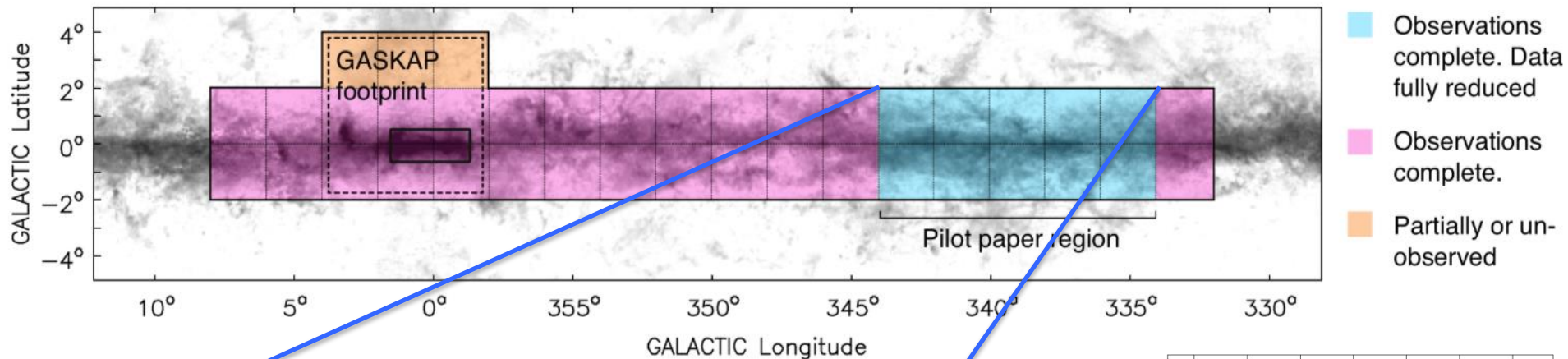
Orosz et al.
(2015 in prep.)



SPLASH (Southern Parkes Large Area Survey in Hydroxyl)

Dawson et al.

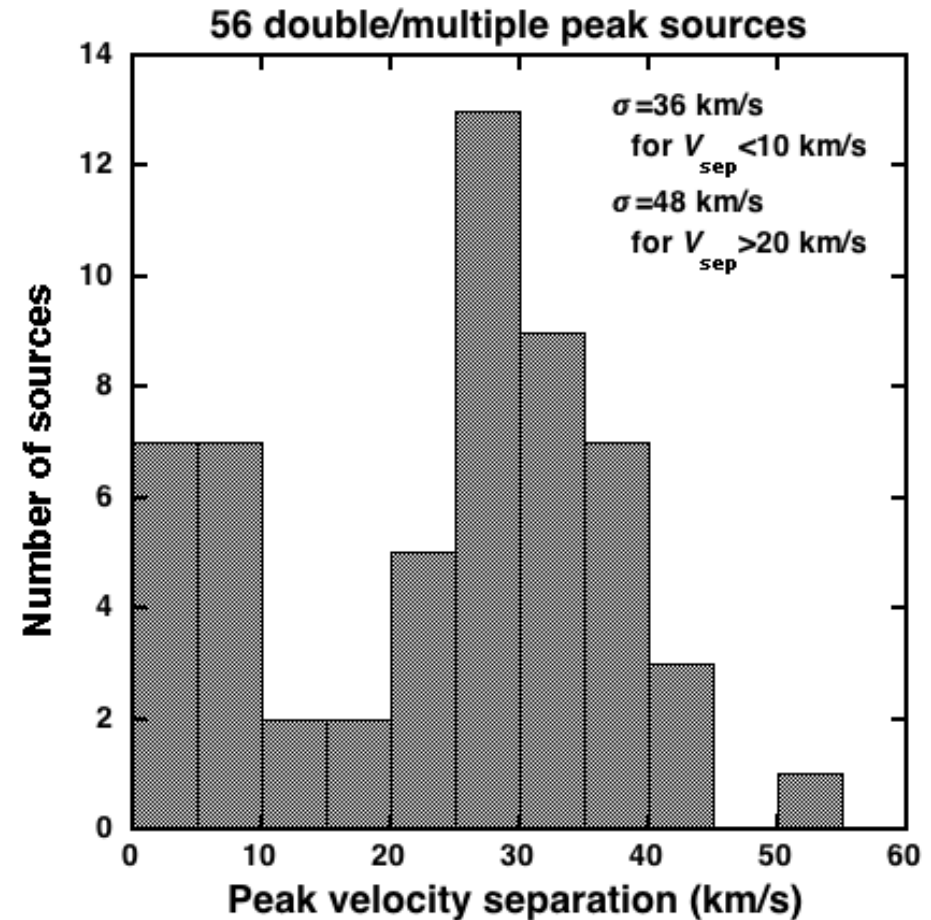
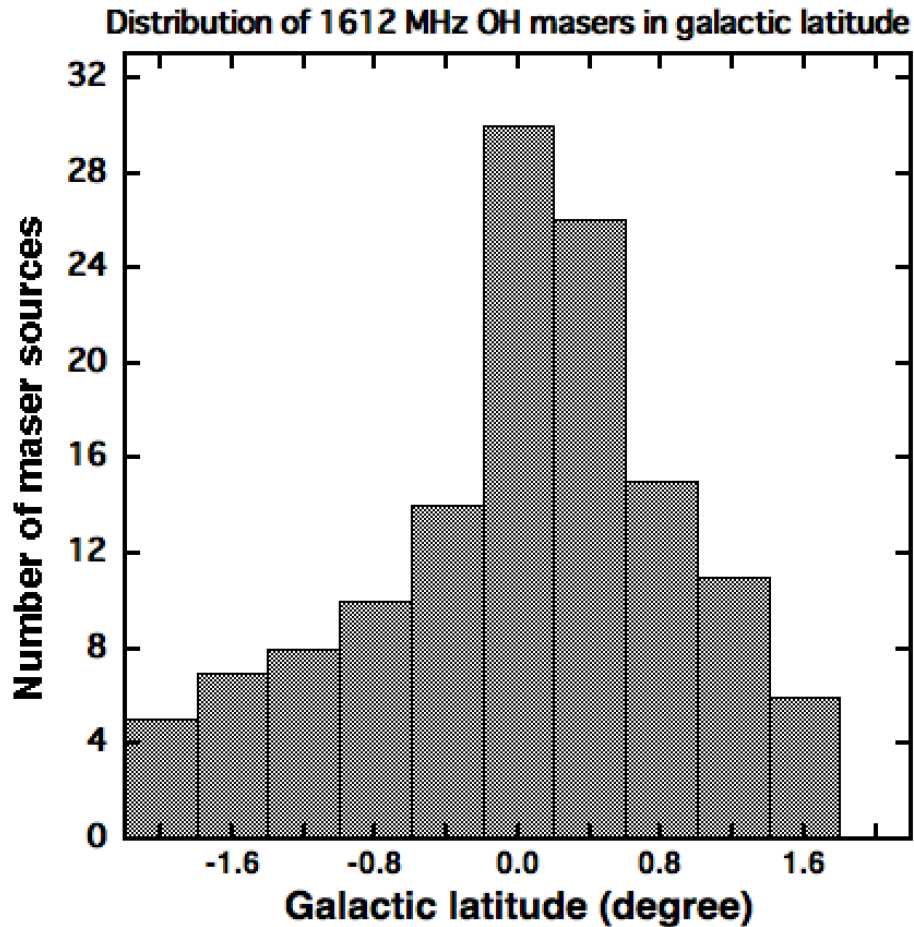
1612/1665/1667/1720 MHz thermal (emission, absorption) maser



SKA-mid
15-m dish beam

Reanalysis of
intensity image cube
(by K. Shinano & H. Imai)

Statistics of OH maser sources in the SPLASH area



- Possibly ~ 5000 1612-MHz OH maser sources brighter than 0.4 Jy.
- Constant expansion velocity ($V_{\text{exp}} \sim 15$ km/s) of the circumstellar envelopes, similar to those in the Galactic bulge and the outer Galaxy (Sjouwerman 2000)

V_{exp} dependent on only metallicity (heavy element abundance) of stars (?)

まとめ

- 日本からのSKA参加に向けた活動の本格化
 - 国際的な取り組みへの参加:
 - SKA Pulsar Working Group (associate member)
 - **SKA VLBI Working Group (core member)**
 - 日本版 SKA Science Book (**日本語版完成、英語版へ**)
 - 低周波バンドアストロメトリの実証
 - OHメーザー源年周視差計測 (Orosz et al.)
 - `Multi-view` technique (Dodson & Rioja)
- 今後の課題
 - SKA VLBI 仕様の正式決定: **まずScience Use Case 充実**
 - SKA Precursors (ASKAP, MeerKAT)への参加
 - **国内研究者コミュニティへの系統的情報発信**