

中性水素及び水酸基分子輝線の広視野電波 干渉計探査に向けた像合成／像分析手法の開発

Development of image synthesis/analysis techniques in radio interferometry for the wide-field neutral hydrogen and hydroxyl emission survey

(日本天文学会推薦)

代表研究者	鹿児島大学	今井 裕	Kagoshima University	Hiroshi IMAI
協同研究者	鹿児島大学	中西裕之	Kagoshima University	Hiroyuki NAKANISHI
	鹿児島大学	荘 思寧	Kagoshima University	Sze Ning CHONG
	香港大学	中島淳一	The University of Hong Kong	Jun-ichi NAKASHIMA
	メキシコ自治大学	ダニエル・タフォヤ	Universidad Nacional Autónoma de México	Daniel TAFOYA

The emission line of neutral hydrogen (HI) and thermal and maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation) ones of hydroxyl (OH) molecules at wavelengths of 21 and 18 cm, respectively (corresponding to radio frequencies of 1.4 and 1.6 GHz) are important probes for exploration of the whole Milky Way Galaxy. The HI line traces the comprehensive distribution of interstellar medium. On the other hand, the OH maser sources indicate the sites of stars that are newly formed from the interstellar medium and those of the final evolutionary phase of stars when most of the composing matter is released into the interstellar space. The Australia Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP) and one of the large survey science programs GASKAP will observe these lines simultaneously in the fastest sky survey speed ever made using the wide field phased-array feeds covering a sufficiently large frequency band width. Our present research aims to find out the most efficient and reliable scheme of radio source finding and identification. We have performed a large number of simulations of OH maser source finding on the simulated image cubes. We suggest that, in order to identify OH maser sources as faint as that expected from the thermal noise level ($5\sigma \sim 30$ mJy), CLEAN deconvolution in the image cube synthesis is indispensable during the first stage of the GASKAP survey even if ASKAP will yield a high dynamic range on image cubes.

研究目的

Square Kilometre Array (SKA)は、低い周波数帯(100 MHz–10 GHz、波長では3cm–3 m)における世界最大の電波天文観測装置で、2020年頃からの初期科学運用を経て2024年頃に完成・定常的科学運用が計画されている。宇宙創成直後に形成される最初の星や銀河の形成現場の直接観測、宇宙初期から現在に至るまで銀河の進化の解明、宇宙磁場の起源の解明、重力波検出による一般相対性理論の精密検証、生命誕生の起源となるアミノ酸など重分子の星間空間での検出など、根源的な疑問に迫る科学テーマをSKAで

は扱う。

我々はその中で特に、銀河の進化につながる中性水素(原子)からの電波輝線(HI)、及び、重力波検出を可能とする超高精度時空計測の技法を利用する水酸基(OH)メーザー放射に注目する。HI輝線(波長21cm、周波数1.4GHz)は、宇宙に存在する星間ガスの大半の分布を把握するために観測される。一方OHメーザー輝線(18cm、1.6GHz)は、星間ガスを集積し星を形成する現場と進化末期星からのガス放出の現場を捉える。これら2種輝線を観測することにより、天の川銀河とその周辺にわたる空間における星間空

間-恒星群の間のガスの流れ=物質輸廻の全体像が明らかにできるものと期待される。

現在、SKA 建設予定地の一つである西オーストラリアに SKA の 1%規模の Australian SKA Pathfinder (ASKAP)が科学運用を行っている。我々は ASKAP が実行予定の大型掃天観測計画の一つである GASKAP(Galactic ASKAP Spectral Survey)に参加しており、2014 年からの探査観測開始に向けて様々な準備に関わっている。特にその中で、ASKAP が観測直後に出力する電波像（二次元天球面マップが分光チャンネル毎に数 1000 枚得られるので“電波像キューブ”と呼ばれる）の中から高い完全度と信頼度をもって電波源の検出・同定を行う手法の開発を共同担当することになった。

本研究では、上記担当の中から OH メーザー源の検出・同定に絞ったシミュレーションを系統的に行い、電波源検出・同定法において最も高い完全性と信頼度を実現する手法の探査を行った。また、幾つかの観測・電波像合成の条件に対して同様のシミュレーションを行い、どのような場合でその手法が最も有効かについて調べた。以降本報告は、天の川銀河系内の OH メーザー源に話を絞る。

研究経過

本研究では、SKA/ASKAP に関連した研究を主体的に進めているオーストラリアの International Centre for Radio Astronomy Research (ICRAR)に代表研究者が 1 年近く滞在する機会を得た。その結果、当初の想定よりも遥かに大規模かつ系統的な電波源検出・同定シミュレーションを実行できた。

このシミュレーションではまず、実際の掃天観測の対象に近い天球面上・強度上での電波源分布を再現する必要がある。今回は、個々の電波源について輝度分布が単純であり、銀河系中心方向で密集している OH メーザー源の分布を再現した（図 1）。この段階で、OH メーザー源の光度関数を外挿して仮想的な微弱メーザー源も付け加え、1338 個の擬似メーザー源カタログを作成した。その上で、36 台の口径 12m ASKAP アンテナの配置を用いて 8 時間連続で上記天域を追尾観測することを想定し、電波合成像キューブ (x, y, ν) を合成した。ここで、 (x, y) は二次元に近似された天球面座標を示し、 ν はドップラー周

波数から換算される視線速度を示す。得られる合成像キューブには、積分時間に対応したガウス型度数頻度を持つ熱雑音(標準偏差 σ)、と ASKAP アンテナ配置とデータの重みから計算される電波干渉計合成ビームパターン（他分野では point spread function=点状放射源に対する応答関数と呼ばれる）、すなわち“サイドローブ”が付加される。こうして、 $N_x \times N_y \times N_\nu = 1532 \times 1532 \times 4000$ 個のセルから成る 36 GB のデータサイズに及ぶ合成像キューブが得られた。なおこれらは、本研究チームが参加する GASKAP 内のワーキンググループの作業によるものである。

本研究チームは、この合成像キューブを用いて電波源検出・同定シミュレーションを行った。電波源検出・同定には、既存のソフトウェア Duchamp を用いた。ここで、シミュレーションの具体的目的を整理しておく。

1. 実行時に入力する Duchamp パラメータの数値の組み合わせのうち、最も高い電波源検出達成度 (completeness) と信頼度 (reliability) の組み合わせを実現するものを探査する。
2. 天球面におけるメーザー源の密集度とその方向における合成像キューブ上の雑音レベルとの相関を明らかにする。それに伴い、実現し得る電波源検出達成度と信頼度がどのように変わるのか把握する。
3. 上記 1 と 2 を踏まえて、電波源同定法だけでなく、合成像キューブの合成法(特に、電波源輝度分布とサイドローブを分離する deconvolution について)や GASKAP における掃天観測の手順について、適切な方法について考察を行う。

今回の電波源検出・同定シミュレーションでは、合成像キューブ全体をさらに $16 \times 16 \times 22 = 5632$ セクションに分割して、セクション毎に Duchamp を実行した。こうすることにより、各セクションでの合成像キューブ上の雑音レベルを計算し、電波源密集度が低い所ではより微弱な電波源の検出が可能となる。

また、Duchamp パラメータの数値の組み合わせは 3000 通りにも達した。検出判定に採用するフラックスレベルだけでなく、人工的な放射と区別して自然界からの電波放射だけを同定するためのパラメータ（電波源の大きさや視線速度の広がり）も設定するから、これだけの数字になる。このように、Duchamp の実行回数は合計 2000 万回にも達した。

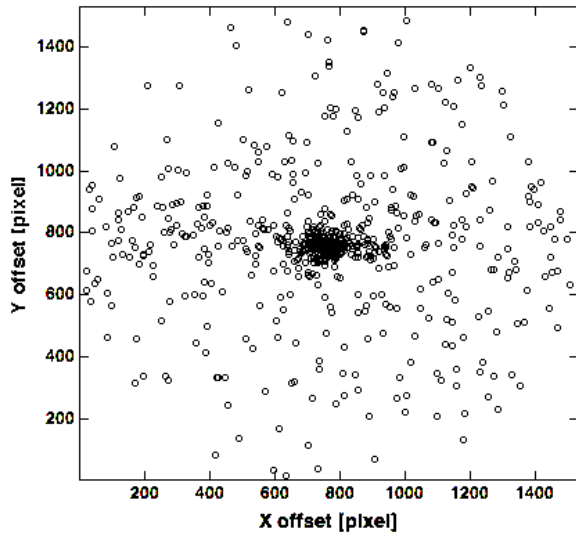


図 1: 電波源検出・同定シミュレーションで用いられた OH メーザー源の天球面分布。1 ピクセルは $10''$ に対応する。

Fig 1: Distribution of OH maser sources used in the simulations of radio source finding and identification. One pixel corresponds to $10''$.

このような電波源検出作業では、ICRAR が運営する数値計算用 social network である theSkyNet を利用した。一般会員が所有する約 2000 台のパソコンの CPU を利用することにより、上記のような処理を 3 日以内に完了できた。theSkyNet の利用は本研究の当初想定していなかったが、このお陰で本研究が飛躍的に進んだ。電波源検出・同定結果は theSkyNet 用データベースに格納されるので、独自に python/MySQL/matplotlib を用いた分析・作図スクリプトを作成し、目的の分析を行った。

シミュレーションではまず、OH メーザー源輝度分布にガウス熱雑音のみを付加した合成像キューブを用いた場合について調べた。8 時間積分では雑音レベルの標準偏差は $\sigma \sim 6 \text{ mJy}$ ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$) であり、 $5\sigma \sim 30 \text{ mJy}$ のメーザー源が高い信頼度で検出できるはずである。このレベルのフラックスを持つメーザー源のほぼ全部を高い信頼度(95%以上)をもって 検出・同定できる Duchamp 入力パラメータの組み合わせが存在することを確認した。

ところが次に、実際の観測では存在する電波源周辺のサイドローブを加えて同様なシミュレーションを行ったところ、前述の合成ビームパターン付加なしの場合で見つけた最適の Duchamp 入力パラメー

タの組み合わせやそれに類するものでは電波源検出・同定が全く適切には行われなかった。結局、8 kpc 離れた銀河系中心付近に存在する OH メーザー源はその手前に見えるずっと明るいメーザー源が作り出すサイドローブ (場所によって最大で $\sigma \sim 230 \text{ mJy}$) に邪魔されて全く同定できなかった。

本シミュレーション当初 GASKAP チームでは、ALMA に次ぐ電波望遠鏡台数(36)を有する ASKAP が作り出す電波合成像は充分高画質で、サイドローブを除去するための合成像キューブ上での処理 (CLEAN deconvolution) は不要だと考えられていた。今回の結果はこの考えを完全に否定するものである。

それならば、どれくらい深い deconvolution 処理が必要なのだろうか? このことを確認するために、電波合成像キューブの再現の段階に立ち戻り、deconvolution 処理の深さを変えて合成像キューブを幾つか再合成し、ずっと小規模のシミュレーションを実行した。その結果、1 Jy 程度以上の明るさを持つ OH メーザー源が作り出すサイドローブに対して deconvolution 処理を実行しなければ期待通りの電波源同定ができないことが判明した。

考察

OH メーザー源は、指向性の高いメーザー放射が作り出される領域を指し、ASKAP 合成ビーム(約 $30''$) では分解できない程度のコンパクトなスポットの集団から成る。従って、OH メーザー源は点源とみなせ、メーザー源フラックス以外では検出・未検出の結果は探査で使われる装置やデータ処理操作にのみ大きく依存するはずである。

しかし、銀河系中心方向では約 0.5° 四方の中に 1000 個近くのメーザー源が密集しているため、ASKAP 合成ビームの中に複数のメーザー源が混在する場合も見受けられる。この場合は、同一ビーム内でただ 1 つメーザー源が認識されその他のメーザー源の存在を見落とすことになる。また、合成像キューブ全体を多数のセクションに分割した影響もあるかもしれない。隣同士の複数セクションはお互いに重なる部分があるので、あるセクションの境界にあるメーザー源 (検出と判定されない) はもう 1 つのセクションではすっぽりカバーできているはずであるが、必ずしもそうはいかないこともあるらしい。これらの結果、電波源同定到達度が充分明るいメーザー源でも 100% にならないケースがある (図 2)。

今後その原因の追求が必要である。

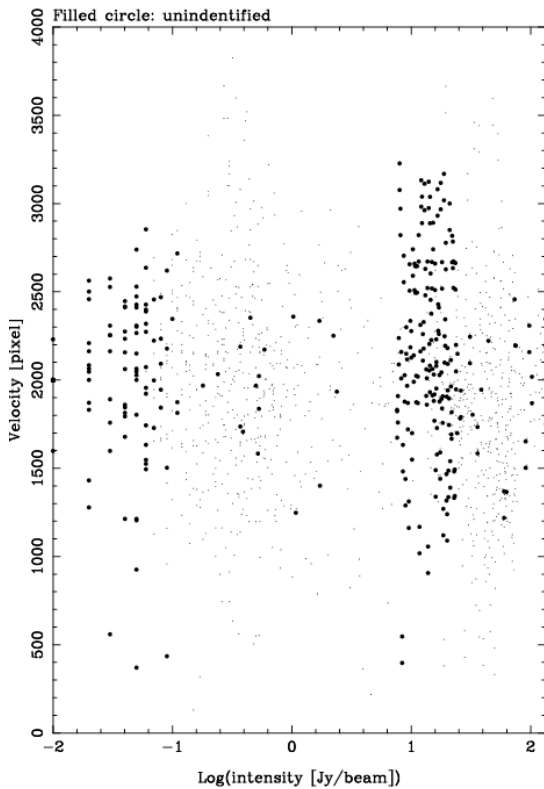


図 2: 1 Jy より明るいメーザー源に対して deconvolution 処理をした時のシミュレーションにおける同定 (点) 及び未同定 (丸) メーザー源の分布。
Fig 2: Distributions of identified (dot) and unidentified (circle) OH maser sources in the simulation with deconvolution for sources brighter than 1 Jy.

本シミュレーションにおける最重要の結論は、非常に撮像能力が高い ASKAP であっても、電波源が作り出すサイドローブの除去すなわち deconvolution をしなければ、本来の探査対象である微弱電波源の新検出が実現しないということである。しかしそれと同時に、数年掛かる掃天観測の中で随時この処理をすればそれが実現できることも示唆する。Deconvolution の対象となる 1 Jy 以上の OH メーザー源は、既存の大型電波望遠鏡を用いた掃天観測であれば短時間で検出可能なものである。実際本シミュレーション結果を前後して、オーストラリアのパークス口径 64m 望遠鏡を用いた OH メーザー源の銀河面探査(SPLASH)が開始された。日本でも臼田 64m 鏡を用いた同様な探査について検討を始めた。

このようにして、GASKAP 観測の前にこれらの掃

天観測から得られる明るい OH メーザー源のリストを作成しておく必要がある。それを元に、次々と得られる GASKAP データに対して deconvolution と同等の効果が得られる様にメーザー源輝度分布の寄与を差し引けば、差分データのさらなる積分を通してより微弱なメーザー源の検出ができるはずだ。

ただし、OH メーザー源のフラックスは時間変化しているので、数時間積分のデータ毎にメーザー源カタログを元に所定の座標でのフラックスを測定した上でこの作業が必要である。逆にメーザー源フラックス変動のデータは、メーザー源が付随する変光星の脈動変光周期や異なる視線速度成分のメーザー源間の変動時間差 (= 変光星周辺ガス縁サイズ ÷ 光速) の情報をもたらす。これらにより、後日の超長基線電波干渉計(VLBI)観測を通して測定されるガス縁の視直径と合わせれば、これらメーザー源までの距離を多数推定することができる。

GASKAP による OH メーザー源掃天観測では、約 10,000 個のメーザー源が検出されることが期待されている。現在日本の VERA(天文広域精測望遠鏡)をはじめとする VLBI プロジェクトでは、全部合わせて約 1000 個のメーザー源(水蒸気及びメタノール)の年周視差計測が 10 年掛かりで行われる。メーザー源の数だけ見ると、SKA による年周視差計測がこれらメーザー源に対して実現すれば、天の川銀河内で距離と三次元運動が把握できるメーザー源が一気に 10 倍に増えることになる。太陽系から見て天の川中心の向こう側に分布する遠方メーザー源の年周視差計測は容易ではないが、天の川銀河全体の立体構造を描き出すという、四半世紀にわたる目標が達成できるのではないかと期待される。

研究の発表

口頭発表

1. 今井 裕, 「GASKAP に向けたメーザー源同定シミュレーションその 1」, 日本天文学会春季年会, V52b (2013 年 3 月)

誌上発表

1. Dickey, J.M., McClure-Griffiths, N., Gibson, S.J., Gómez, J.F., Imai, H., Jones, P. Stanimirović, S., van Loon, J. Th, et al., “GASKAP-The Galactic ASKAP Survey”, Publications of the Astronomical Society of Australia, 30, e003 (20 pages) (2013)