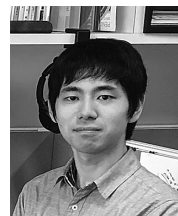


電波分光撮像観測へのデータ科学の応用

谷口 暁星

〈名古屋大学大学院理学研究科 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町〉

e-mail: taniguchi@a.phys.nagoya-u.ac.jp



ミリ波・サブミリ波望遠鏡の観測データは、観測装置の大規模化によってこれまでにないペースで増加しており、次世代の大口徑電波望遠鏡の登場によってこの流れは今後も続くことが予想される。天体信号に対して数千–数万倍の大气放射が支配する同波長帯の観測においては、膨大な観測データの中から信号の劣化なしに、いかに効率良く天体を検出できるかが今後の鍵となる。本稿では、主に画像処理で使われている統計的手法を応用することで、高感度かつ高効率な電波分光（撮像）観測を実現する新しい観測手法を紹介し、次世代観測への応用可能性を述べる。

1. はじめに

分光観測と掃天観測を組み合わせた分光撮像による星間物質の探査は、2次元の天球面に時間を加えた宇宙の3次元的な情報を得ることで、星形成史や銀河進化史を統計から明らかにするために重要な役割を果たすと考えられている。分光撮像は、CCDカメラによる広視野観測と多天体分光が早期に実現した可視光望遠鏡（例えばスローンデジタルスカイサーベイ）で先行し、これまでに百万個以上の天体が分光されてきた。一方、同波長帯の放射は宇宙空間の固体微粒子（ダスト）によって減光することが知られており、正確な星形成史の理解、すなわち星形成率密度の測定には、多波長の分光撮像探査との連携が重要である。

ミリ波（波長1–10 mm）やサブミリ波（波長0.1–1 mm）と呼ばれる電波では、星形成の母体となる気相の分子や原子が放射する線スペクトル（輝線）が多数観測され、ダストによる減光も受けにくい。このことから、分光撮像はLarge Submillimeter Telescope (LST [1]) や Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope (AtLAST [2]) などの、次世代大型サブミリ波望遠鏡計画の主要

な観測モードの一つに位置づけられている。

可視光に比肩する広視野と天体の個別検出に必要な数秒角の分解能を両立させるため、これらの望遠鏡はアルマ望遠鏡のような複数アンテナから成る干渉計ではなく、野辺山45 m電波望遠鏡のような単一の大口徑アンテナ（単一鏡：図1）として計画されている。直径50 m級の口径が検討されているので、アンテナは当然地上に設置される。ここで問題となるのが、地球の大气が放射するノイズ（雑音）の存在である。これは例えば、プールの底から水面の外側の景色を見ることをイ



図1 ミリ波で世界最大の口径50 mを持つ単一鏡である、メキシコ・大型ミリ波望遠鏡 (LMT)。車との対比でその巨大さがわかる（著者による撮影）。

メージするとわかりやすい。特にサブミリ波帯の地上観測では、大気が数千-数万倍明るく「光って」見え、かつ風によって明るさが常に揺らいで見える。微弱な天体信号を検出するためには、大気放射の時間的・空間的な影響をこれまで以上に高精度に補正する必要がある。

加えて、広視野かつ広帯域（一度に分光可能な波長範囲）を観測するという事は、観測装置の素子数（空間方向のピクセル数と波長方向の分光点数の積）が大幅に増えることを意味する。例えば、LSTやAtLASTで検討されている超広帯域分光撮像装置では素子数が $\approx 10^6$ に達する [2, 3]。年単位のデータサイズにおいては、2020年時点のアルマ望遠鏡（200テラバイト [4]）のおよそ10倍（数ペタバイト）となることが予想される。こうした膨大なデータを、個々の天文学者が手元で一から解析したり保存したりすることはもはや困難であろう。

以上の課題は、アンテナや受信装置などのハードウェアに加えて、観測手法や解析手法といったソフトウェアが解決を得意とする課題と言える。実際、小口径単一鏡による宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の広域観測や連続波カメラによる観測では、高速スキャン観測による大気放射の補正がすでに行われている。本稿では、大型サブミリ波望遠鏡を見据えて我々が開発してきた、統計的手法に基づく新しい観測・解析方法について紹介し、こうしたソフトウェア的研究の次世代観測への応用と課題を述べる。

2. 観測・解析手法の潜在的な問題

本題に進む前に、まず現在主流の観測手法・解析手法を改めて見てみることにしよう。前節では単一鏡による地上観測の課題を紹介した。すなわち、時間的・空間的に変化する大気放射に支配された膨大な観測データの中から、いかに天体信号を検出するかである。これは、言い換えれば、大気放射を何らかの手法で推定し、いかに観測デー

タから除去できるかということである。

簡単のため、ここでは空間方向のピクセルが一つだけの分光装置で、観測者から見たら点源とみなせる天体を分光観測することを考える。大気放射は、分光することで波長方向に連続的なパワーを持つスペクトルとして観測される。この場合、大気放射を除去する最も簡単な手法は、図2のように天体座標と天体から少し離れた座標を交互に素早く観測し、得られたスペクトルの差分を取る「スイッチング観測」である。この際、天体座標をON点、もう一方をOFF点と呼ぶ。広がった天体の分光撮像観測の場合も同様で、観測領域の外側にOFF点を取り、観測領域（ON領域）のスキャン観測とOFF点観測を交互に繰り返す。

スイッチング観測は、電波天文学のテキスト [6, 7] にも載る標準的な手法として、多くの単一鏡で現在も使われている。ところが、大型サブミリ波望遠鏡にとってこの観測手法は厄介である。スイッチング観測の前提条件は、なるべく同じ条件の大気で差分を取ることである。そのため、少なくとも数秒ごとに観測点を切り替える必要がある [8] が、数百トン級の望遠鏡をこの頻度で動かすことは難しい。ミリ波電波天文学研究所（IRAM）30 m望遠鏡のように、アンテナ全体を動かす代わりに副鏡のみを動かす手法 [9] も考えられるが、広視野を確保するために必要な直径10 m級の副鏡では現実的でないだろう。

もし、前提条件が崩れた状態で観測するとどう

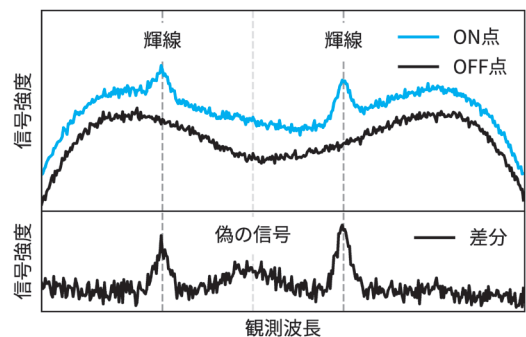


図2 スwitchング観測による大気放射の除去。

なるだろうか。このアンバランス [10] は、図2でも見えているようにスペクトルの形状を変え、本来天体信号がゼロであるはずの波長にも偽の信号を生み出してしまっている。もちろん、天体信号が観測される波長の事前知識があれば、偽の信号を見分けることは原理的には可能だ。しかし、分光撮像探査がターゲットとするような天体は、正確な赤方偏移、すなわち輝線の波長がわかっていない場合がほとんどであり難しい。

スイッチング観測のもう一つの問題点は、差分を取ることでそのものである。ON点とOFF点、どちらのスペクトルも観測から得られた測定データなので、図2でも見えているように波長方向にランダムなノイズが乗ることがわかる。スペクトルの差分を取ったとき、ノイズ同士の差分は新たなノイズとなり、かつ大きさが $\sqrt{2}$ 倍となる。すなわち約40%の感度悪化である。40%と聞くと大したことはないように感じるかもしれない。しかし、一般に n 倍の感度悪化を元に戻すためには n^2 倍の観測時間が必要になるので、この場合、本来の2倍の観測時間が必要ということだ。例えば、1年で終わるはずのサーベイが2年になるわけだから、この損失は大きいだろう。加えてデータサイズも2倍になるという点も忘れてはいけない。

3. 統計的手法に基づく大気-信号分離

大型サブミリ波望遠鏡では現在主流のスイッチング観測が潜在的な問題となりうるということがわかった。そこで我々は、統計的手法を応用することで観測手法と解析手法を改善し、高感度かつ高効率な電波分光（撮像）観測を実現したいと考えている。

統計的手法を応用するためには、まず観測データが持つ統計的性質を正しく知ることが大切だ。ここで注目すべきは、大気放射が波長方向に相関を持ちながら、数秒程度のタイムスケールで変動するという性質である [8]。これは、大気放射の変動の主たる原因である水蒸気が望遠鏡の口径を横切るタイムスケールが典型的には数秒であり、水蒸気量が変動しても（強度は変わるが）スペクトル形状は大きく変わらない [11] ためである。もし、数秒よりも高い頻度でスペクトルを取得しこれを時間方向に並べると、これは波長×時間の行列であり、滑らかな2次元画像として可視化できるはずだ。統計学では、このような性質を低ランク性と呼ぶ。すなわち、画像がごく少数の基底ベクトルの線型結合として表現できるということだ。

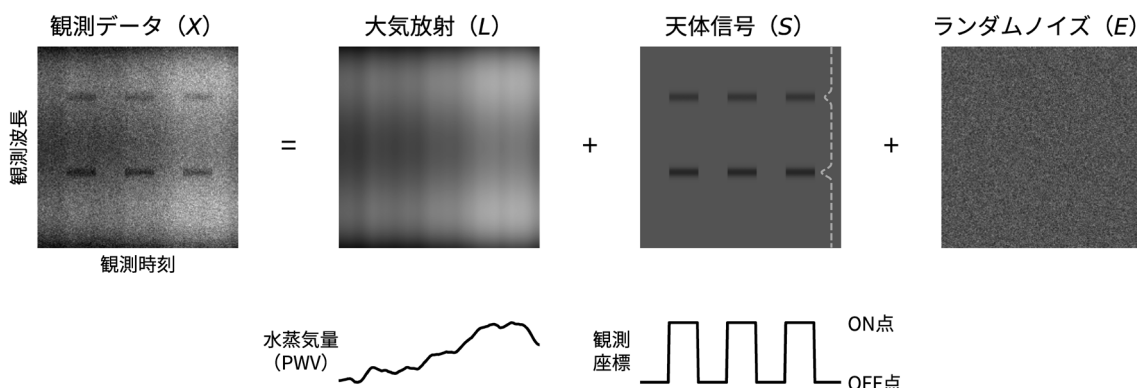


図3 高頻度でスペクトルを取得した際のスイッチング観測のデータ行列 (X) と、その構成要素 (大気放射 L, 天体信号 S, ランダムノイズ E) を可視化した2次元画像。データは観測シミュレーションから作成した。Sには天体信号スペクトルの形状が点線で付してある。また、Lの下には水蒸気量の時間変化が、Sの下にはON点・OFF点のどちらを観測しているかがそれぞれ示されている ([5]の図1を改変)。

図3では、スイッチング観測でスイッチング間隔よりも高頻度にスペクトルを取得した際に、画像としてどう見えるかを示している。観測データの行列を \mathbf{X} とすると、これは大気放射 \mathbf{L} 、天体信号 \mathbf{S} 、そしてランダムノイズ \mathbf{E} の和として表されることがわかる。

$$\mathbf{X} = \mathbf{L} + \mathbf{S} + \mathbf{E}$$

大気放射 \mathbf{L} は、水蒸気量の時間変化に合わせて滑らかに変化する様子が見える。一方、天体信号 \mathbf{S} はON点を観測している時のみ入射するので、大気放射 \mathbf{L} の変化と独立であるように見える。

低ランク行列とそうでない加法性の成分を独立に推定・分離する統計的手法は、行列分解として画像処理の分野で盛んに研究されている[12]。問題設定を式に落とし込むことさえできれば、天文学のデータに応用することも比較的簡単だ。これによって推定された成分を $\hat{\mathbf{L}}$ と $\hat{\mathbf{S}}$ と表すことにすると、大気放射が除去された観測データの行列 $\mathbf{X}_{\text{clean}}$ は以下のように計算できる。

$$\mathbf{X}_{\text{clean}} = \hat{\mathbf{S}} + \mathbf{E} = \mathbf{X} - \hat{\mathbf{L}}$$

あとは、 $\mathbf{X}_{\text{clean}}$ のON点観測の部分だけを取り出し、時間方向に平均を取ることで天体信号のスペクトルが得られるわけだ。

この手法のメリットは、スイッチング観測で差分を取るタイムスケールより速い大気的时间変動も捉えられ、かつノイズ同士の差分が発生しないことである。そのため、スイッチング観測で従来生じていた、アンバランスによるスペクトル形状の歪みや $\sqrt{2}$ 倍の感度悪化が原理的に起きないことが期待される。その一方、大気放射 \mathbf{L} と天体信号 \mathbf{S} の統計的性質がデータ上で異なる必要がある。大気放射だけでなく、天体信号の統計的性質を考慮した観測手法を選択する必要があるだろう。

もう一つのメリットは、天体信号が観測される波長の情報を使わずに大気放射を分離できる点である。これは、解析時に正確な赤方偏移を知らな

くても良いという点で、膨大なデータに対して解析を自動化したり並列化したりできるため、分光撮像探査に向いていると言えるだろう。

4. スパースモデリングの応用によるスイッチング観測の高感度化

ここからは、実際の電波望遠鏡の分光（撮像）観測データを使った、新しい解析手法の応用例を紹介していく。まず、図3のようなスイッチング観測自体の高感度化である。大型サブミリ波望遠鏡を使ったスイッチング観測は、宇宙初期の銀河のような点源とみなせる天体の微弱な輝線を効率的に検出し、天体の年代測定と星形成の様相を理解することが主な目標の一つである。このような観測では、図3の天体信号 \mathbf{S} のように観測データに占める天体信号の割合がごく少数であるという性質（スパース性・疎性）が期待される。スパース性に基づく統計的手法はスパースモデリングとも呼ばれ、天文学のデータ解析でも近年応用が進みつつある[14, 15]。

我々は、低ランクスパース行列分解の一つであるGoDec[16]を採用し、スイッチング観測のデータ行列から大気放射を分離・除去する手法を開発した[5]。GoDecは、可視光望遠鏡の動画データのデータ圧縮と突発天体の検出[17]ですでに天文学への応用がある手法である（池田氏・森井氏による解説記事[18]も参考にされたい）。動画データを分光データ、突発天体を輝線に置き換えることで、観測波長は違えど本質的に同じ問題ということがわかる。ただし、観測対象の輝線は数時間から数十時間観測してようやく検出されるような微弱な信号であるという点は大きく異なる。そこで、実際はGoDecを改良し、ON点の観測時刻などの事前情報を最大限活用するようなアルゴリズムを提案している。

図4は、大型ミリ波望遠鏡（LMT）で観測された、赤方偏移 $z=2.55$ の銀河の輝線観測データを、提案手法と従来の差分に基づく手法でそれぞ

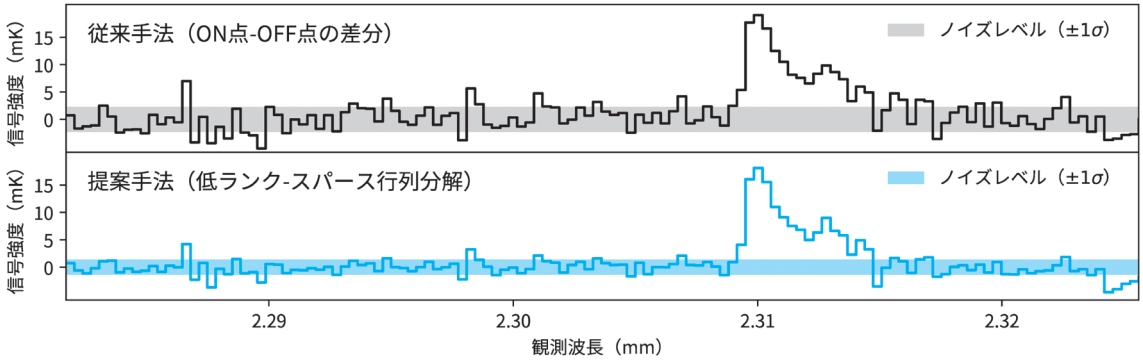


図4 大型ミリ波望遠鏡 (LMT: 図1) に搭載した波長2 mm 帯受信機で観測された、赤方偏移 $z=2.55$ の銀河 PJ020941.3の一酸化炭素分子 ($J=4-3$) のスペクトル。黒線が従来の差分に基づく手法、青線が提案手法 (低ランク-スパース行列分解) による解析結果をそれぞれ示している ([5]の図4を改変)。

れ解析したものである。提案手法の方がノイズが軽減されており、この観測では約1.7倍の感度改善がなされることがわかった。

この観測では、ON点とOFF点を10秒ごとに切り替えて観測し、その間1秒ごとにスペクトルを取得している。これは、現在の電波望遠鏡の観測モードやデータレートとしてはごく普通のものであるので、現在運用されている多くの望遠鏡に应用可能である。さらに、条件が許せば過去に観測されたデータの感度を改善できるかもしれない。

5. 周波数変調観測によるOFF点不要の分光撮像観測の実現

もう一つの応用例として、スイッチング観測からも脱却し、OFF点を必要としない観測を実現する観測手法を紹介する。電波望遠鏡の分光装置、特にヘテロダインと呼ばれる受信方式の装置は、分光する波長範囲をある程度自由に変わることができる。もし、スペクトルの取得と同時に観測中心波長を時間変化させながらON点「だけ」を観測したらどうなるだろうか。図5に示した通

り、天体信号 S がデータ上をジグザグと大きく動き回っているように見える。その一方、大気放射 L は天体信号ほどの変化が見られない。これは、大気放射のスペクトル形状が分光する波長範囲の外側でも大きく変わらないためである。つまり、 L と S は統計的に性質が異なると言えるので、先に紹介した統計的手法による大気放射の分離・除去がON点観測だけで達成できるわけだ。

あたかもFMラジオのように周波数変調 (frequency modulation: FM) された信号を処理することから、この観測手法を周波数変調観測^{*1}と呼ぶ[13]。OFF点の観測時間をまるまるON点に置き換えることができるので、観測時間が2倍になったことと等しい。これは、先に述べた通り $\sqrt{2}$ 倍の感度改善に相当するので、解析手法の分と合わせて原理的に2倍の感度改善が見込まれる。また、周波数変調観測は、広がった天体に対する分光撮像観測にも応用可能だ。広がった天体では、天体の近くにOFF点を探すことができない場合が多いが、その場合でも周波数変調観測は効率的に撮像できる。図5では、野辺山45 m電

^{*1} 観測波長を切り替える観測方法として「周波数スイッチング観測」という方法も知られているが、こちらは異なる観測波長で観測したスペクトルの差分を取ることで大気放射を除去するという点で、スイッチング観測の一種である (ゆえにスイッチング観測と同様の問題が生じる) ことに注意されたい。

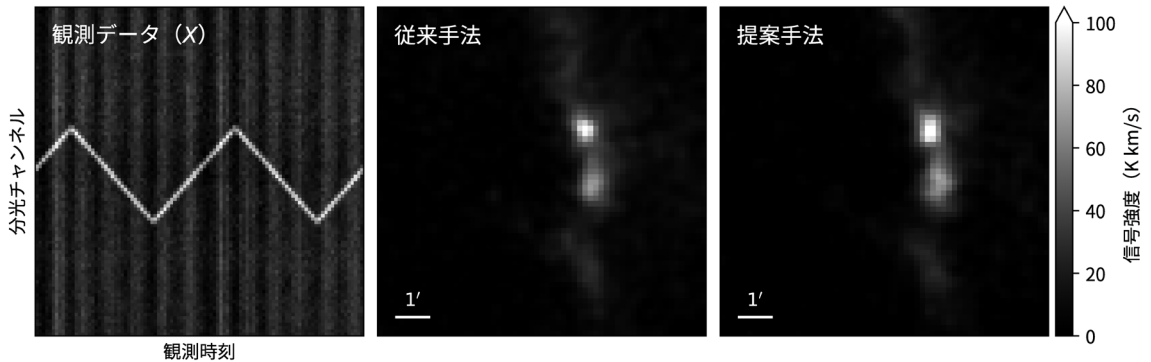


図5 (左) 周波数変調観測でスペクトルを取得した際のデータ行列 (X)。縦軸は波長ではなく、分光装置の分光チャンネルであることに注意されたい。観測中心波長が時間的にジグザグと変化するように制御しているため、天体信号が特定の分光チャンネルに入射することなくジグザグと動いているように見える。(中・右) 野辺山45 m望遠鏡に搭載された波長3 mm帯受信機で観測された、オリオンA分子雲の一硫化炭素分子の積分強度図。それぞれ、従来手法と提案手法による観測および解析結果を示している ([13]の図6, 14を改変)。

波望遠鏡によるオリオンA分子雲の分光撮像観測を提案手法と従来手法で行った結果を示しており、従来手法と矛盾ないことを実証している。

6. まとめ

サブミリ波天文学は、アルマ望遠鏡の比類なき感度と分解能によって劇的に飛躍し、大型サブミリ波望遠鏡の計画によって圧倒的なサーベイ能力を獲得しようとしている。機械学習が可視光望遠鏡の画像データの解析を劇的に変えたように、データ科学的な手法によって質・量ともに支えられた分光撮像探査が今後展開されるだろう。本稿で紹介した観測手法・解析手法は、いずれも現在の分光観測データに基づく提案と実証ではあるが、大型サブミリ波望遠鏡時代のデータに対する方針を示すことができたと考えている。実際、望遠鏡本体に先行する形で、広帯域受信装置 [19, 20] や広帯域デジタル分光計 [21] の開発が着々と進んでおり、膨大なデータの到来は時間の問題である。観測と解析の根本を、よいタイミングで再検討できたと感じている。

また、先に述べた通り、観測データを最大限活用するためには天体信号の統計的性質、すなわち背景にある物理的性質を積極的に利用するのが有

効である。その意味で、サイエンスと装置開発のような二分法で研究を捉えることなく議論することが、これまで以上に求められるだろう。データ科学的な研究は両者をつなぐ架橋であるが、まだまだ研究者は少ない印象だ。本稿で、こうした研究に興味を持ってもらえれば幸いである。

謝辞

本稿は、主に著者の投稿論文 [5, 13] の内容に基づいている。論文のための試験観測では、野辺山宇宙電波観測所、メキシコ大型ミリ波望遠鏡の関係者の皆様に変えお世話になった。観測や解析の新しいアイデアを試すことのできる望遠鏡は非常に限られており、貴重な望遠鏡時間を頂けたことに感謝申し上げたい。また、大学院生時代から現在に至るまで、様々な場面でお世話になっている田村陽一さん、河野孝太郎さんは特筆させていただきたい。最後に、日頃から研究生活を支えてくれた家族に心からの感謝を送りたい。

参考文献

- [1] Kawabe, R., et al., 2016, Proc. SPIE, 9906, 779
- [2] Klaassen, P. D., et al., 2020, Proc. SPIE, 11445, 544
- [3] Kohno, K., et al., 2020, Proc. SPIE, 11453, 128
- [4] Cortes, P., et al., 2021, ALMA Cycle 8 2021 Technical

Handbook

- [5] Taniguchi, A., et al., 2021, AJ, 162, 111
- [6] Wilson, T. L., et al., 2013, Tools of Radio Astronomy (Springer)
- [7] 中井直正他, 2020, 宇宙の観測II—電波天文学シリーズ現代の天文学 (日本評論社)
- [8] Chapin, E. L., et al., 2013, MNRAS, 430, 2545
- [9] Ungerechts, H., et al., 2000, Proc. SPIE, 4009, 327
- [10] Schieder, R., & Kramer, C., 2001, A&A, 373, 746
- [11] Cortés, F., et al., 2016, Radio Sci., 51, 1166
- [12] Bouwmans, T., et al., 2017, Comput. Sci. Rev., 23, 1
- [13] Taniguchi, A., et al., 2020, PASJ, 72, 2
- [14] Uemura, M., et al., 2015, PASJ, 67, 55
- [15] The EHT Collaboration, 2019, ApJ, 875, L4
- [16] Zhou, T., & Tao, D., 2011, Proc. 28th Int. Conf. on Machine Learning, 11, 33
- [17] Morii, M., et al., 2017, ApJ, 835, 1
- [18] 池田思朗, 森井幹雄, 2018, 天文月報, 111, 460
- [19] Endo, A., et al., 2019, Nat. Astron., 3, 989
- [20] Kojima, T., et al., 2020, A&A, 640, L9
- [21] Iwai, K., et al., 2017, Earth Planet. Space, 69, 95

Application of Data Science to Radio Spectroscopic Imaging Observations

Akio TANIGUCHI

*Graduate School of Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8602,
Japan*

Abstract: The amount of observation data from millimeter/submillimeter telescopes has been increasing at an unprecedented rate because of the emergence of large-scale observation instruments. This trend is expected to continue with the advent of next-generation large-aperture submillimeter telescopes. The key to future observations is how to detect astronomical signals efficiently without signal degradation from the huge amount of observation data. In this article, we introduce new observation and analysis methods that realize sensitive and efficient radio spectroscopic (imaging) observations by statistical methods, and discuss their potential applications to next-generation observations.