

論文の内容の要旨

Development of a Frequency Modulation Observing Method for Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy Based on Correlated Noise Removal

(相関雑音除去に基づくミリ波サブミリ波 分光のための周波数変調観測手法の開発)

谷口 暁星

本論文は、ミリ波サブミリ波の従来の分光観測における問題の一つである、観測手法に起因する観測効率の低さや実質的な感度の低下に注目し、相関雑音除去という概念を分光観測に導入することで、新たな観測手法と信号処理手法の開発によって観測効率と感度の大幅な改善が可能であることを、原理と観測の双方から実証したことを述べるものである。

AzTECカメラやSPTなどの地上観測装置およびHerschel衛星などの登場で、ミリ波サブミリ波の連続波観測によって初期宇宙のダストに隠された爆発的星形成銀河の候補天体がこれまでにない感度と効率でサーベイされつつある今日、分子や原子の輝線観測によってこれらの赤方偏移を決定し、銀河の形成進化の知見を得るという点でミリ波サブミリ波分光観測は重要な意味を持つ。一般的に遠方銀河の輝線は線幅が広くかつ弱いため、高感度かつ高効率の分光観測が求められるが、ALMAの威力を持ってしてもなお一定の時間を要する上に、競争率の高いALMAで多数の銀河サンプル対して膨大な時間をかけた分光サーベイを行うことは必ずしも効率的とは言えない。そのため大口径単一鏡による分光観測が重要となるが、従来の（そして現在も一般的に使われる）ポジションスイッチ・周波数スイッチ法と呼ばれる観測手法では、ミリ波サブミリ波帯で天体信号より遥かに卓越する地球大気放射の差し引きのため、目標天体とこれとは別に参照スペクトルを交互に取得する必要がある。このため原理的に観測効率（総観測時間における天体観測時間の割合）が低く、これは実質的な感度の低下を意味する。また、大気放射強度は常に一定ではなく、 $1/f$ 状の揺らぎを持つことから、天体（いわゆるオン点）と参照スペクトル（いわゆるオフ点）との差し引きによってスペクトルのベースラインが不安定になる場合が多く、これもベースラインうねりとして実質的な感度の低下の大きな要因の一つとなる。そこで本論文では、連続波カメラ観測で実績のある相関雑音除去（correlated noise removal）という概念を分光観測に導入する。これは大気放射、つまりオフ点や観測装置の読み出しに起因するノイズが複数のカメラ素子に同時に変動しつつ降り注ぐ（相関する）という性質を利用し、時系列データ上で相関成分を除去することで各時間のオフ点を推定するという手法である。この際、カメラの視野を天体信号源に

対して変調する（高速に振り回す）ことで、時間空間上で低周波成分が卓越する大気放射に対して十分高周波に天体信号を変調することが可能であり、主成分分析などによる時系列データの低ランク近似によって大気放射等の相関雑音のみを各瞬間で推定、除去することが可能になる。さらに原理的に参照源（オフ点）の観測が不要なため、観測効率が90%を超える高効率な観測が連続波カメラ観測では実現されているのである。

そこで本論文では、相関雑音除去に基づくミリ波サブミリ波分光観測を提案する。分光観測における相関雑音とは、大気放射や分光観測装置に起因し、デジタル分光計の全てまたは複数の出力チャンネルで共通に変動するような成分、すなわちオフ点のスペクトルであると考えられるため（以下ではこれを相関雑音の定義とする）、これを各瞬間で推定、除去することが可能であれば、オフ点観測が不要な非常に高効率かつベースラインうねりが原理的に発生しない観測が実現されることが期待される。この際、カメラ観測と同様に天体信号スペクトルの変調が必要となる。同観測帯は非常に高周波数（数十 - 数百GHz）なため、局部発振器（local oscillator; LO）によるこれに近い周波数の人工信号と天体信号とを受信機で混合することで（ヘテロダイン受信）、差周波数を取り出した上でデジタル分光計によるスペクトル取得が一般的である。そこで、LO周波数を変調する（高速に変化させる）ことにより、天体信号が入射する分光計チャンネルを変調させるという、LO周波数の変調（FMLO）という新たな観測手法を開発することで、相関雑音除去に基づく分光観測が可能になるだろう（Tamura et al. 2013）。本論文では、先行研究で詳細に検討されていなかった、ヘテロダイン受信機の観測方程式と強度較正手法をFMLO法へと拡張した際の課題点を指摘し、これを解決するための信号処理手法を提案・開発することで、FMLO法による観測データの解析手法を初めて確立させた。さらに、これを用いたFMLO法による実観測データの解析によって、正しい強度較正を行った上で観測データに相関雑音成分が存在することを初めて示すとともに、相関雑音除去に基づく解析の結果のスペクトルが従来のポジションスイッチ法と矛盾なく、かつ高い観測効率（実効的な感度に相当）を達成できることを初めて実証した研究である。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、相関雑音除去という概念が周波数変調法（FMLO法）という新たな観測手法として分光観測に原理的に導入できることを示し（第1章、2章）、野辺山45m鏡と南米チリASTE10m鏡においてFMLO法の制御システムの開発と試験を行った（第3章）。さらにFMLO法が既存の分光観測における観測方程式を時系列データに拡張することで表現できることを示し、FMLO法に特有な周波数変調されたゲイン（いわゆるバンドパス）補正や地球大気由来の分子輝線を考慮した相関雑音除去などのための信号処理手法を開発し、FMLO法の観測データのための反復推定に基づく解析パイプラインを構築した（第4章）。以上より原理として確立されたFMLO法を実際の観測と解析で実証するため、野辺山45m鏡とASTE10m鏡による試験観測を行った。まず、試験観測データを用いてFMLO法の制御システムの性能評価を行い、解析パイプラインによってFMLO法のデータが正しく解析され、従来のポジションスイッチ法に対して観測効率と感度の両面で大幅な向上が達成されること、スペクトル形状等に矛盾ないことなどをブランクスカイの実データとシミュレーションデータの解析から示した（第5章）。続いて、実際の天体信号をFMLO法によって観測し、スペクトル観測とマッピング観測の両方でFMLO法が実際の観測でもポジションスイッチ法に対して観測結果が矛盾ないことを示した（第6章）。最後にこれまでの結果を議論するとともに、FMLO法や相関雑音除去の今後の展望についても触れた（第7章）。

これら、原理と観測の双方の開発から、本論文では以下の結論が得られた。

- FMLO法による観測データから、分光観測における相関雑音が存在することを初めて示し、周波数変調観測と主成分分析による相関雑音除去によってこれらが各瞬間で推定、除去されることを実証した。これにより、オフ点における取得が不要となり、92%という高い観測効率が達成された。得られた一点観測のスペクトルをポジションスイッチ法と比較した結果、FMLO法は単位観測時間あたり約1.7倍の感度、または単位達成感度あたり約3倍もの観測効率であることを実証した。これは、FMLO法による高い観測効率に加え、ポジションスイッチ法のオン点とオフ点の差し引きによってノイズが加算される効果（ $\sqrt{2}$ 倍の感度の悪化）が、FMLO法では生じないことによる相対的な感度の向上による。また、同じくFMLO法によるマッピング観測では、オフ点を取得するが比較的高効率な従来のマッピング観測（on-the-fly; OTF観測）に対して約1.1倍の感度、または約1.2倍の観測効率であることを実証した。ただし、これらの結果は相関雑音除去そのものに時系列データのノイズが寄与してしまうという影響（上述のノイズの加算が、ポジションスイッチ法ほど大きくはないがFMLO法でも生じていることに相当）を受けているため、下限値を見ていると考えられる。主成分分析で得られる固有ベクトルをスムージングするなどノイズの影響を抑える信号処理手法を今後導入することで、さらなる観測効率の改善が期待できるだろう。
- 信号処理手法の観点では、FMLO法の観測方程式から、オン点観測ではLOの周波数変調にゲインの値が依存する（周波数変調ゲイン）可能性があることを指摘し、これを観測データの強度較正の前に推定、補正する信号処理手法を提案した。FMLO法による観測データから、周波数変調ゲインが存在することを初めて示し、各分光計チャンネルの時系列データを変調周波数順に並び替えた上で平滑化処理をすることで、周波数変調ゲインのみを推定、補正できることを実証した。また、FMLO法ではオフ点を観測しないため、地球大気に存在するオゾン分子などの周波数幅が広く強度が大きい分子輝線を考慮しつつ相関雑音除去を行う必要がある。そのため、データの重みを扱うことのできる主成分分析（EMPCA; Bailey et al. 2012）を導入し、各反復推定ごとに当該分子のスペクトルが存在するチャンネルの重みを小さくすることで、相関雑音成分と地球大気分子輝線を分離して推定が可能な信号処理手法を提案した。野辺山45m鏡で得られた地球大気の観測データの解析から、相関雑音除去が110GHz帯のオゾン分子に影響を受けず、かつオゾン分子輝線そのものがEMPCAによって分離、除去されることを実証した。
- 以上で述べた信号処理手法によってポジションスイッチ法と矛盾ないスペクトルが得られるかどうかは、野辺山45m鏡で得られたブラックスカイ（天体信号が存在しない空の領域、上記の地球大気の観測と同義）の観測データに様々な形状の人工スペクトルを埋め込み、解析パイプラインによって再現されるかどうかで検証した。また、連続波カメラの観測が天体信号の空間的形狀によって変調パターン（望遠鏡の天球面上の動き）を最適化すると同様に、FMLO法においても周波数の変調パターンの最適化（最適な変調周波数幅とステップ）も同時にシミュレーションした。これにより、最適な変調パターン下ではFMLO法とポジションスイッチ法の結果は無矛盾であることをシミュレーションと実際の天体観測の双方で実証した。また、輝線の線幅よりも広く周波数変調幅を確保すべきであるという、最適な変調パターンの指針を得た。
- 以上より、相関雑音除去に基づくミリ波サブミリ波分光を、FMLO法の開発によって実証した。