

スイッチングから変調へ：
相関雑音除去に基づくミリ波
サブミリ波分光観測手法の開発と展望

谷口暁星 - Akio Taniguchi (東京大D3→名古屋大PD)

FMLO: 田村 陽一 (PI), 河野 孝太郎, et al. / **DESHIMA:** 遠藤 光 (PI), 田村
陽一, 石田 剛, 鈴木 向陽, 上田 哲太郎 (software team), et al.

2018.03.19 @ 宇電懇シンポジウム FY2017 / 国立天文台三鷹



Contents



イントロダクション - 相関雑音除去とは

- 単一鏡分光観測装置における観測手法の問題点
- 大気・装置由来の相関変動成分の推定・除去



天体信号の変調による相関雑音除去 - FMLOの例

- 周波数変調によるOFF点不要の分光観測手法
- 相関雑音除去の要素技術とデータを用いた実証



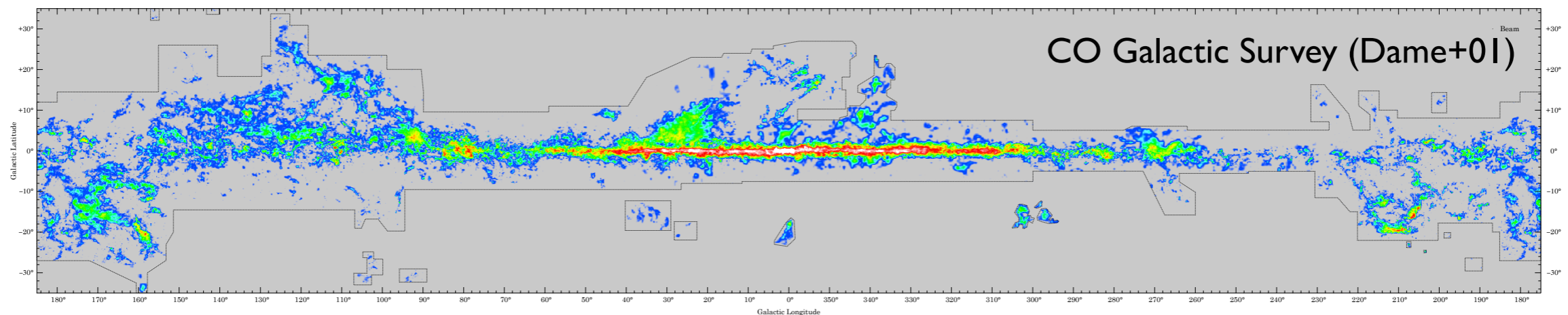
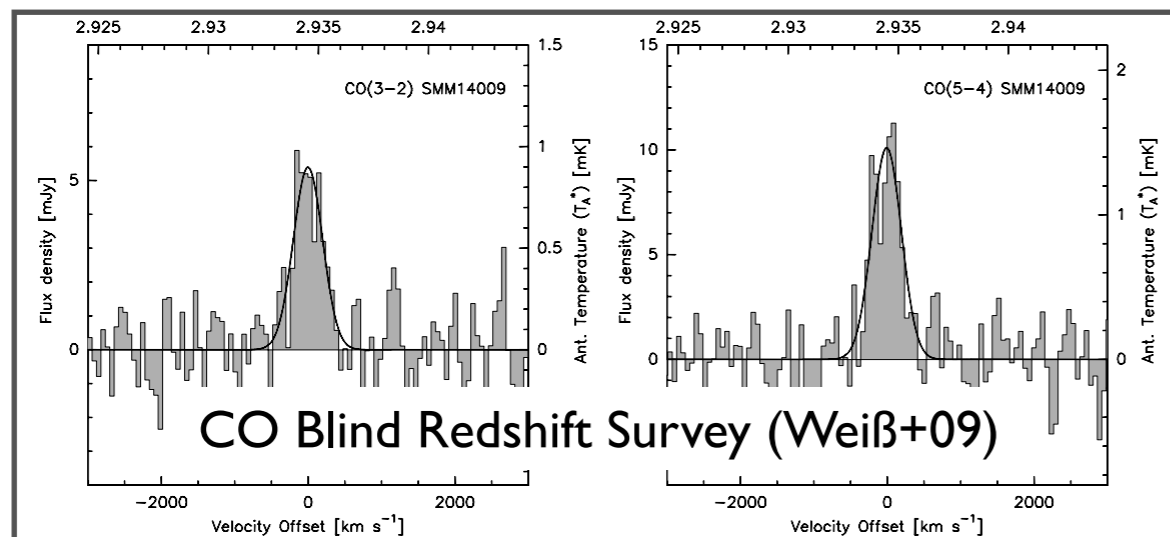
相関雑音除去手法の将来展望 + α

- 周波数変調できない観測装置での相関雑音除去
- 観測・解析手法の包括的な開発研究の必要性

Introduction

ミリ波サブミリ波単一鏡分光観測の効率・高感度化の要求

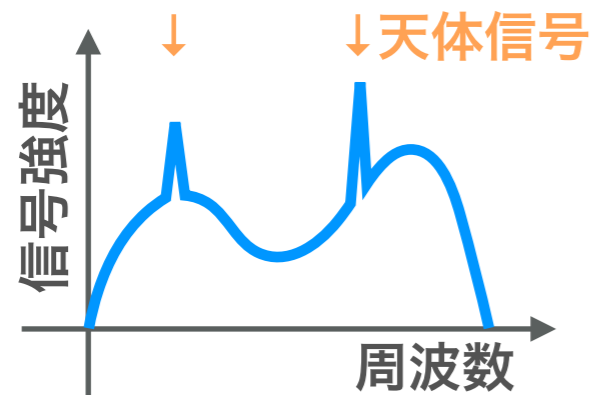
- **ALMA時代を迎えてますます重要となる効率・高感度の分光観測手法**
 - 単一鏡多素子カメラサーベイで見つかったサブミリ波銀河(SMG)候補天体の、分光フォローアップ観測による**赤方偏移, 物理量の決定**
 - 広視野を活かした銀河面分子雲サーベイなどの**分光マッピング観測**
 - トータルパワーの取得による、**干渉計画像の忠実性 (fidelity)** の向上



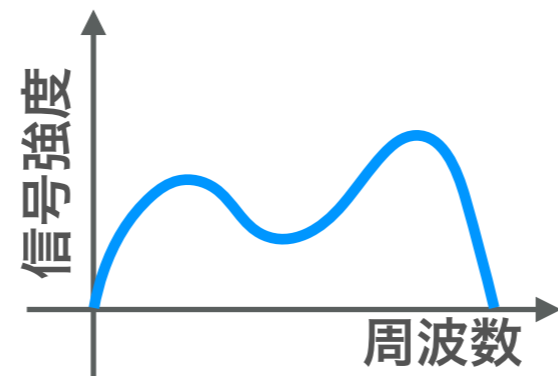
Introduction

次世代の単一鏡分光観測装置における観測手法の課題点

大気+装置の雑音を除去するための分光スイッチング観測

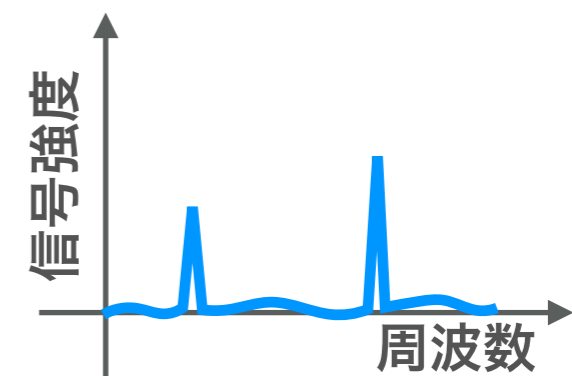


装置+大気+天体 (ON点)



装置+大気 (OFF点)

強度
校正



天体信号

- **OFF点観測による観測効率 η_{obs} ($=t_{\text{on}}/t_{\text{total}}$)の低下**
 - 頻繁にOFF点を取る必要がある **high-z観測**で不利
 - 近くのOFF点を探すのが難しい **銀河面観測**で不利
- **ON-OFF (ON_1 - ON_2)によるベースラインうねり**
 - 線幅が広く, 強度の弱い **high-z観測**で不利
- **ON-OFF (ON_1 - ON_2)によるノイズレベルの悪化**
 - ON点と同じOFF点の観測時間でも **$\sqrt{2}$ 倍悪化**



Introduction

次世代の単一鏡分光観測装置における観測手法の課題点

DESHIMAにおける超広帯域分光でのスイッチング観測の難しさ

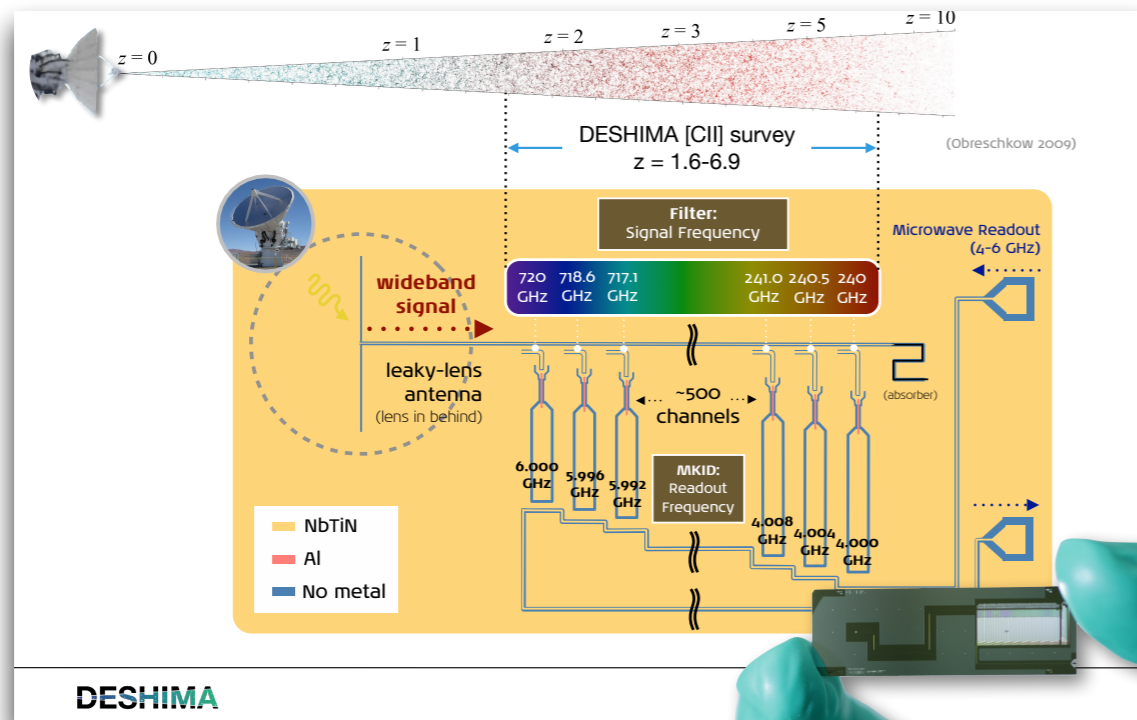


Figure from A. Endo's talk (2018)

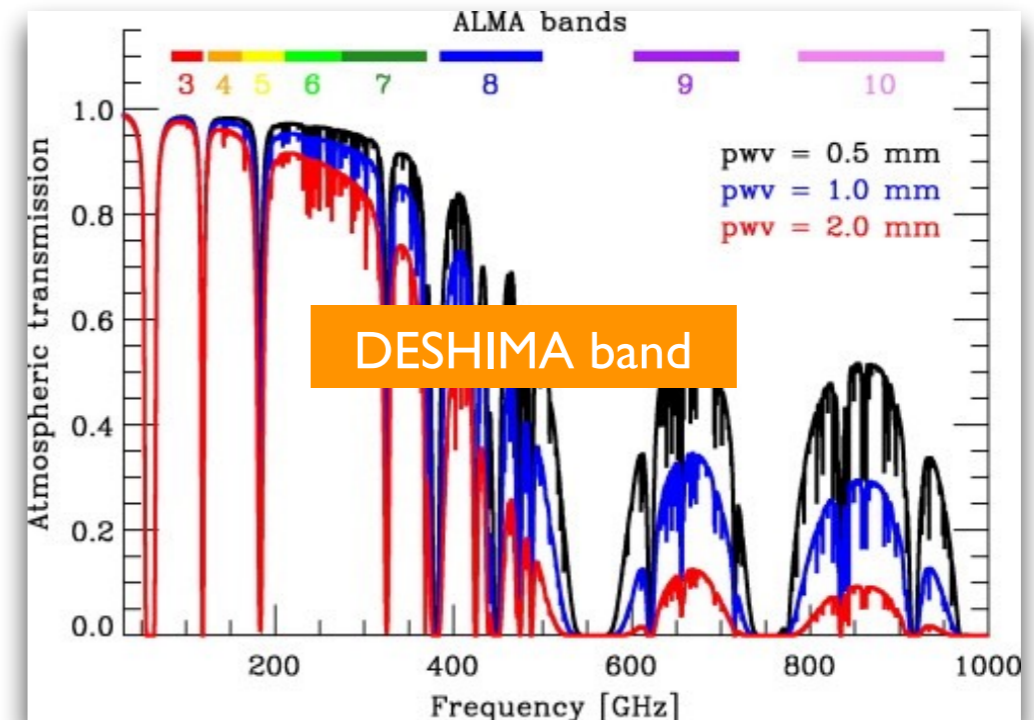


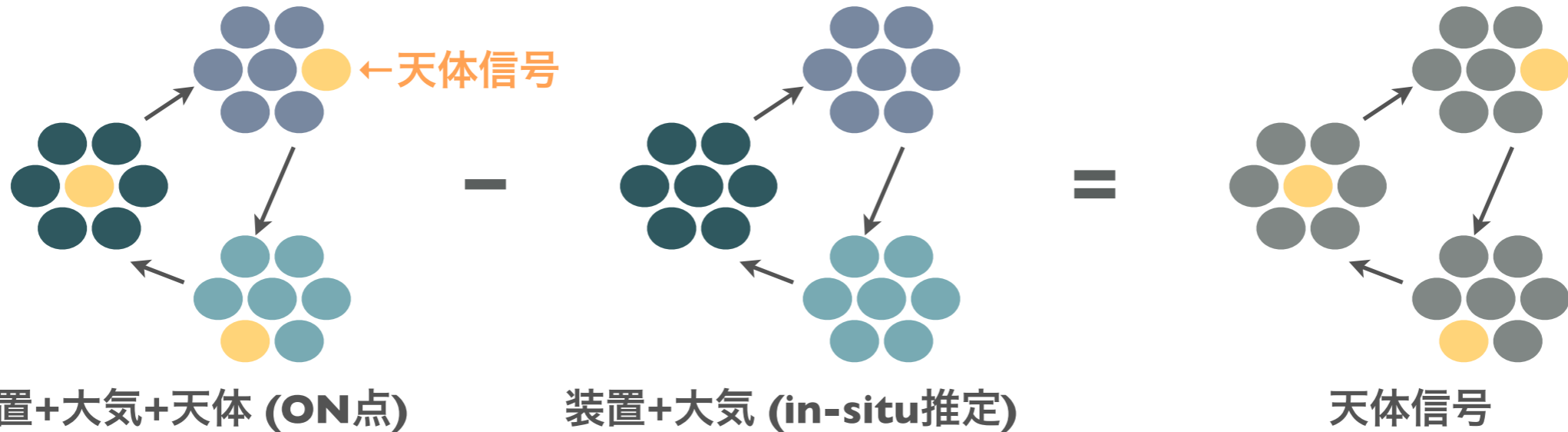
Figure from R. Maiolino (2008)

- 超広帯域 (240-720 GHz) で従来の強度較正・ON-OFFが成り立つか？
 - ON-OFFの周期よりも短い大気・装置の変動も捉える必要がある
- 時系列データのON・OFF点 (160 Hz) 上でON-OFFをどう定義する？
 - 積分スペクトル同士の差し引きはベースラインうねりを生む可能性
- スwitching時間・空間に対する大気の安定性がもはや担保できない
 - OFF点を観測しない、または時系列のON-OFFを実現する方法が必要

Introduction

スイッチングから変調へ：大気・装置由来の相関雑音の推定・除去

大気+装置の相関雑音を除去するためのカメラ視野変調観測



- **OFF点成分の持つ別の性質を利用する**

- ~~スイッチング時間・空間において大気が安定~~
- 空間または周波数方向に相関しながら変動

→相関雑音

- 天体信号は時系列データ上で変調させる→無相関

- 相関成分と無相関成分は信号処理で分離可能
- 瞬間瞬間のベースラインを推定することに相当



Contents



イントロダクション - 相関雑音除去とは

- 単一鏡分光観測装置における観測手法の問題点
- 大気・装置由来の相関変動成分の推定・除去



天体信号の変調による相関雑音除去 - FMLOの例

- 周波数変調によるOFF点不要の分光観測手法
- 相関雑音除去の要素技術とデータを用いた実証



相関雑音除去手法の将来展望 + α

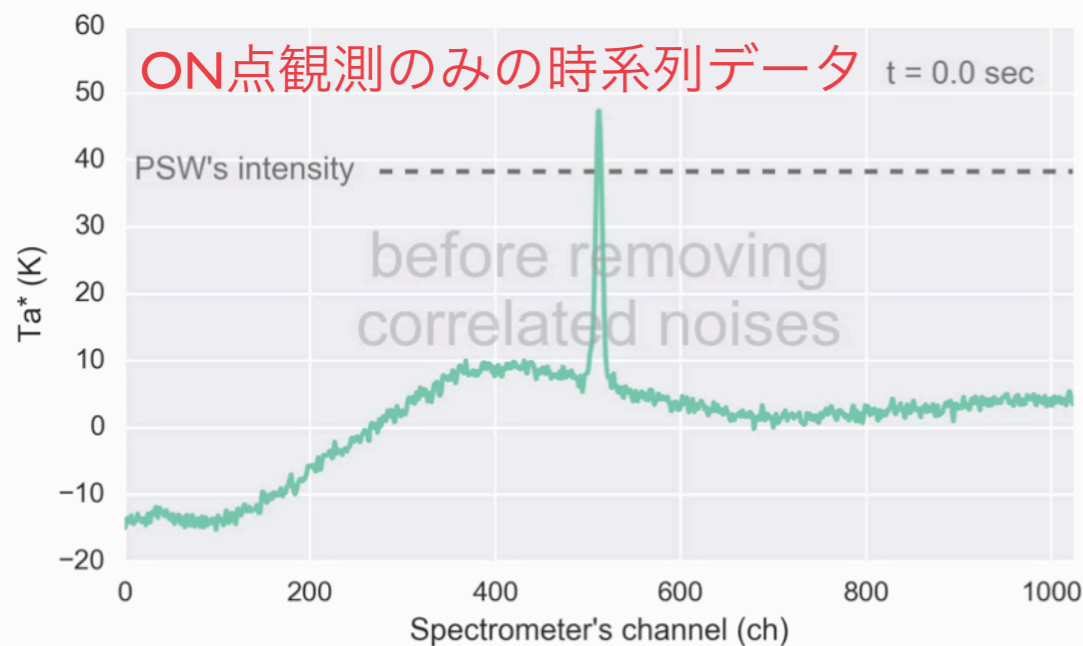
- 周波数変調できない観測装置での相関雑音除去
- 観測・解析手法の包括的な開発研究の必要性

OFF-point-less spectroscopy with FMLO

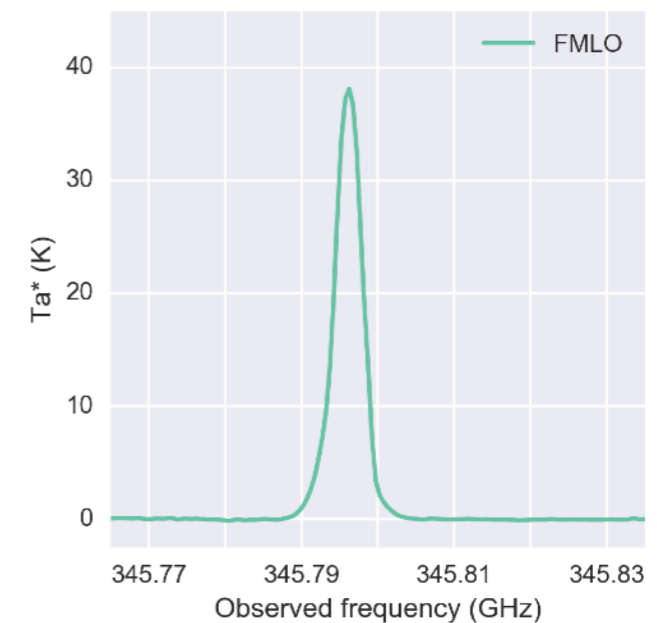
周波数変調観測による相関雑音除去 (Tamura, Taniguchi et al.)



局部発振器 (LO) の周波数を変調 (FM) させ天体信号が入射する分光計チャンネルを次々と変化させながら, 分光計出力を高頻度 (10Hz) に取得することで, チャンネル間に共通の相関雑音を分離する観測手法



復調・積分



FMLO観測の利点

- 観測効率向上: 実効的な感度が向上
- OFF点不要: 銀河面観測にご利益
- サイドバンド分離: ソフトウェアベース
- 低コスト: 大きな装置改修が不要

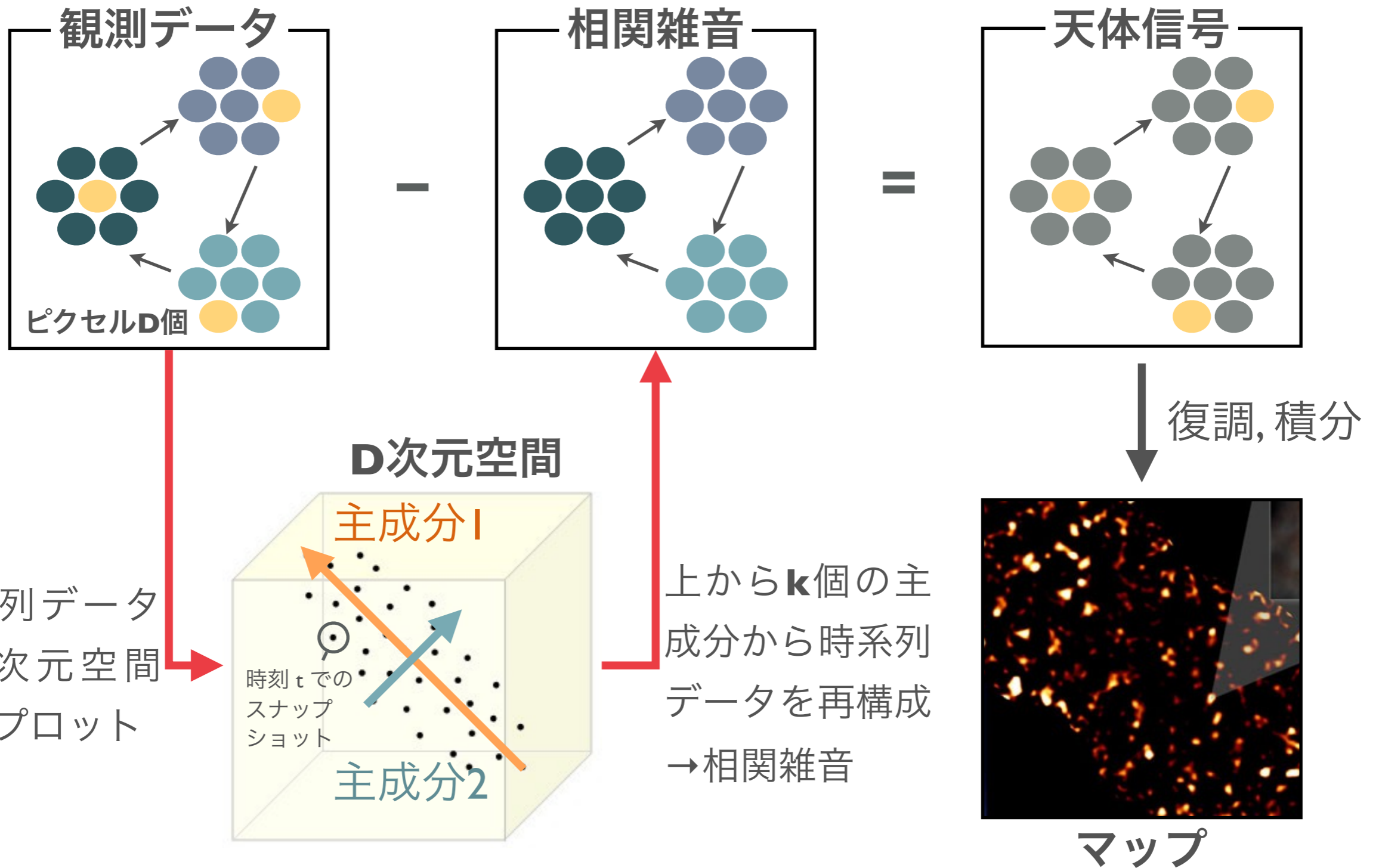
FMLO観測の制限事項

- 連続波観測: 相関雑音と区別できない
- 地球大気分子: 輝線が混入する可能性 (大気モデル + 重み付けPCAで除去)

OFF-point-less spectroscopy with FMLO

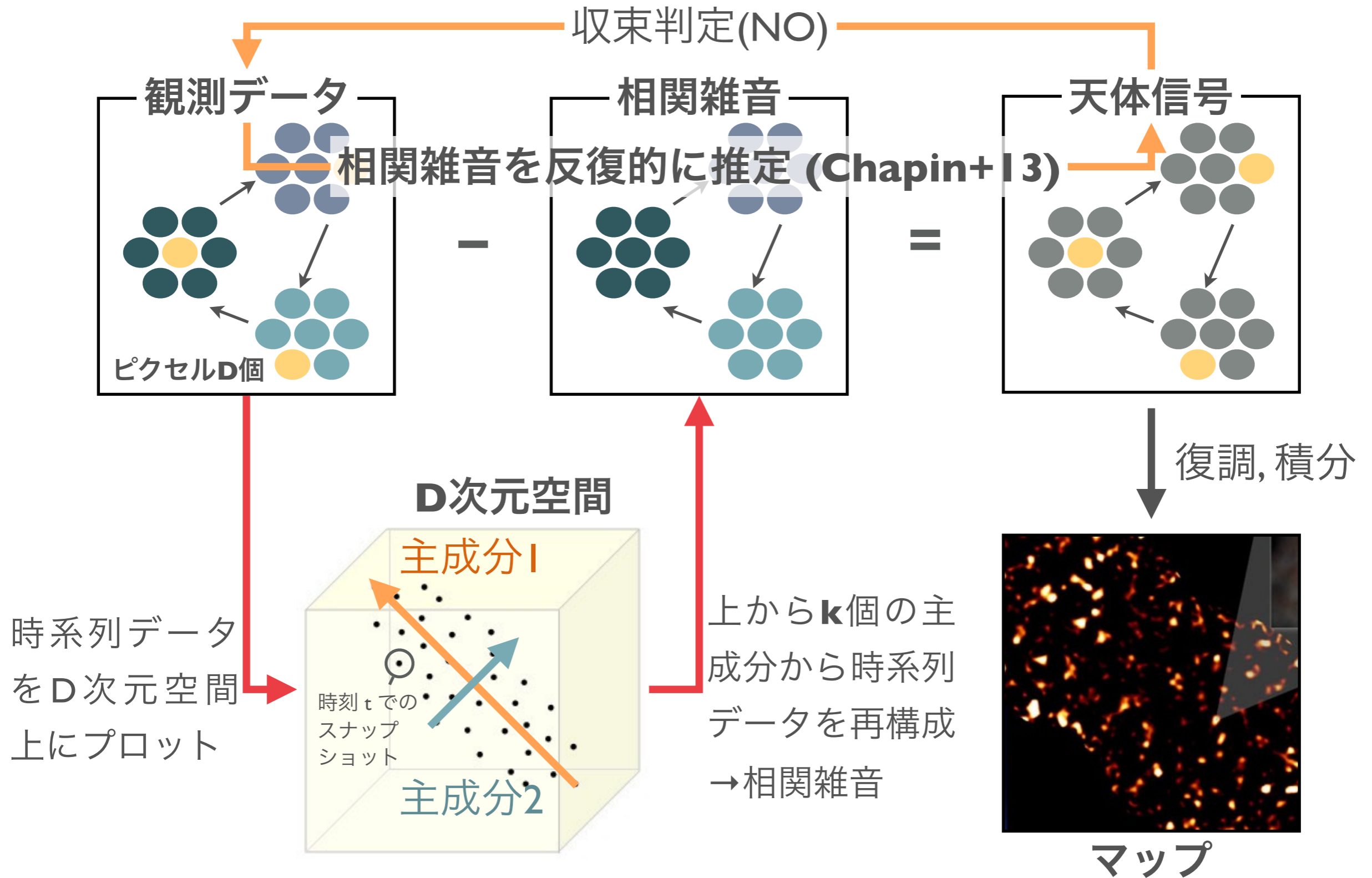
要素技術: 主成分分析 (PCA) による相関雑音の推定・除去

D (=カメラピクセル数)次元空間上で分散が大きい成分 (主成分) → 相関雑音



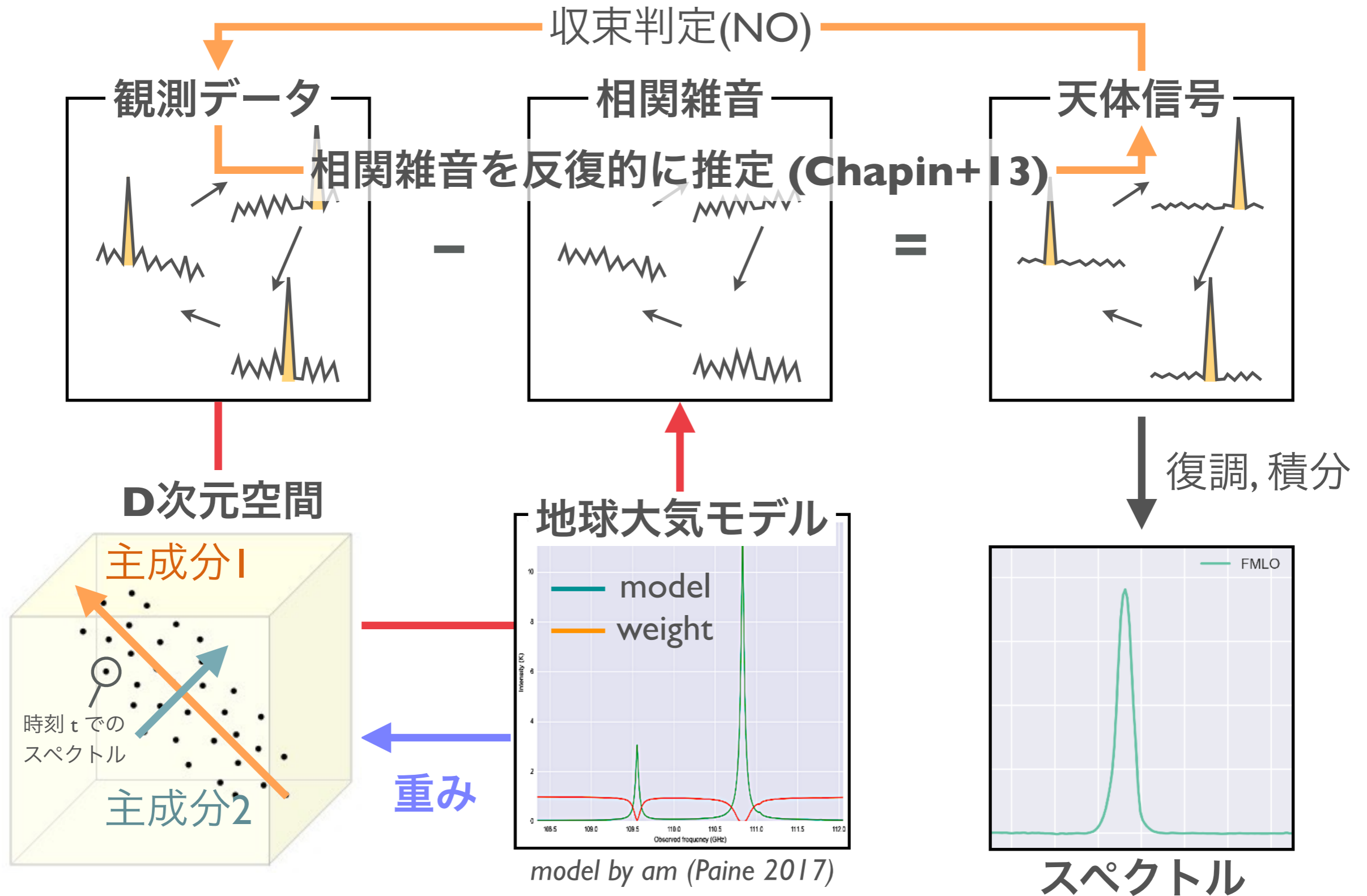
OFF-point-less spectroscopy with FMLO

要素技術: 主成分分析 (PCA) による相関雑音の推定・除去



OFF-point-less spectroscopy with FMLO

重み付きPCAの導入による地球大気輝線・相関雑音の推定・除去



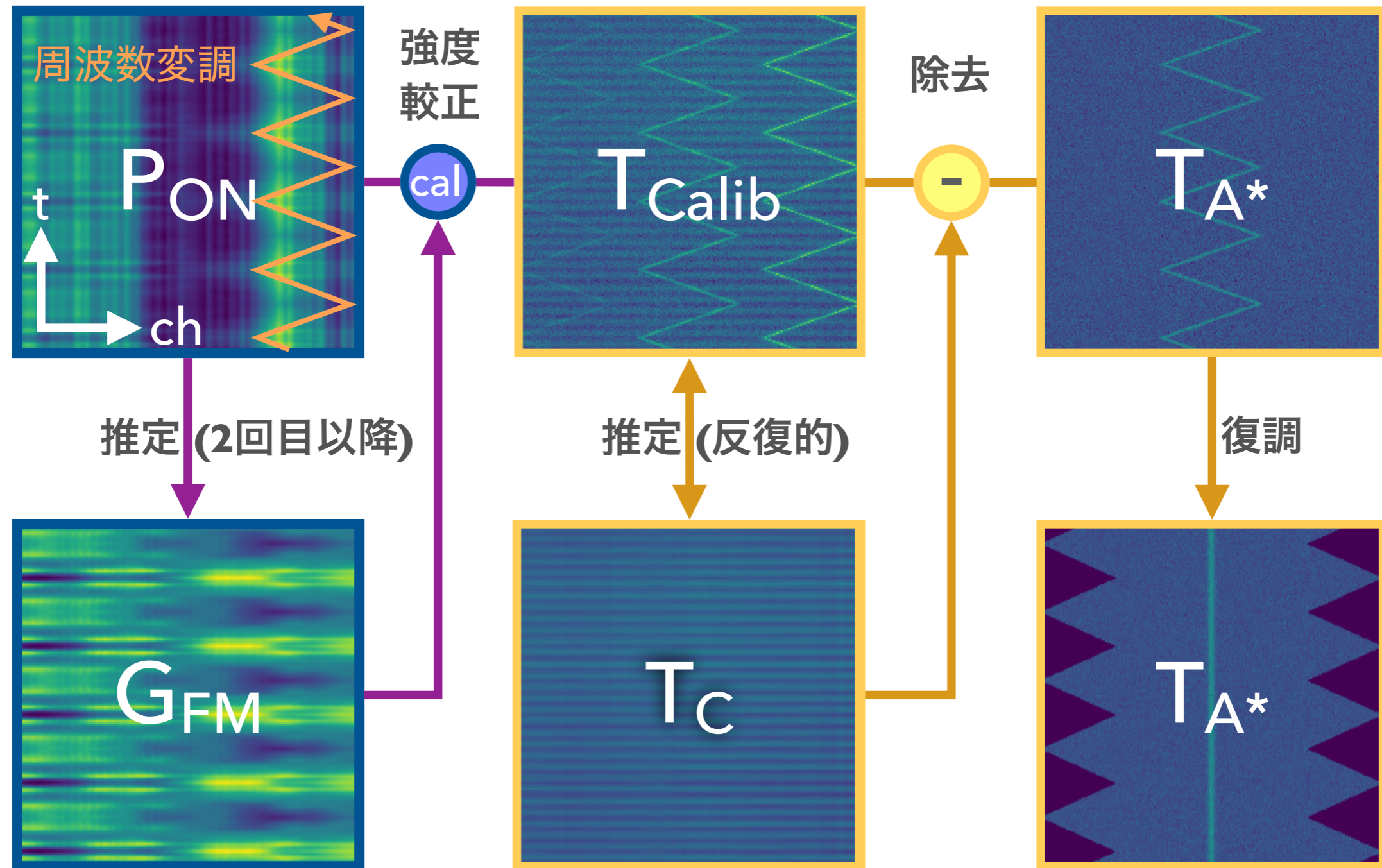
OFF-point-less spectroscopy with FMLO

FMLO観測データ解析のフローチャート

ON点時系列データ

強度校正済時系列データ

天体信号+ホワイトノイズ



周波数変調ゲインの推定量

相関雑音の推定量

復調済時系列データ

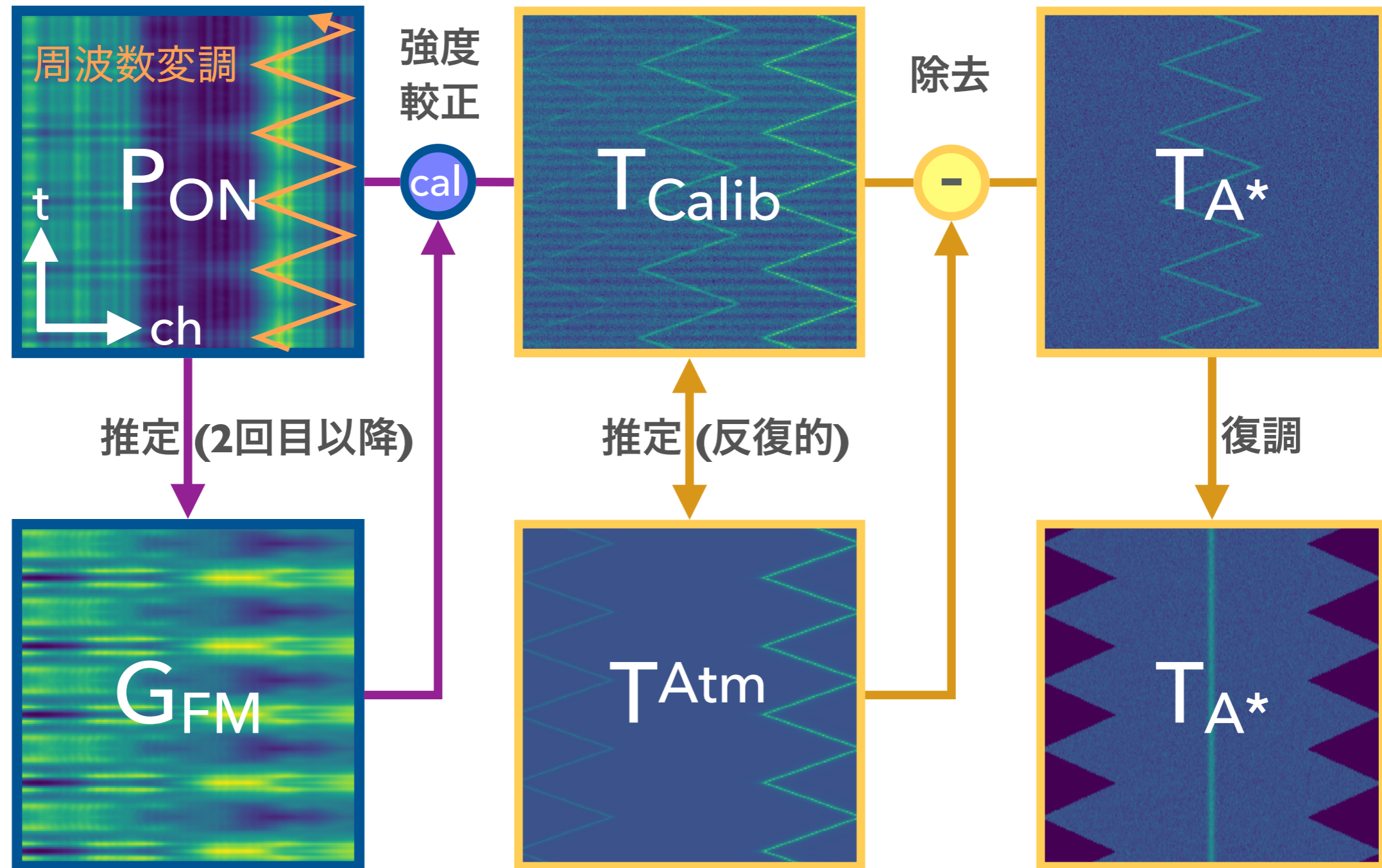
OFF-point-less spectroscopy with FMLO

FMLO観測データ解析のフローチャート

ON点時系列データ

強度校正済時系列データ

天体信号+ホワイトノイズ



周波数変調ゲインの推定量

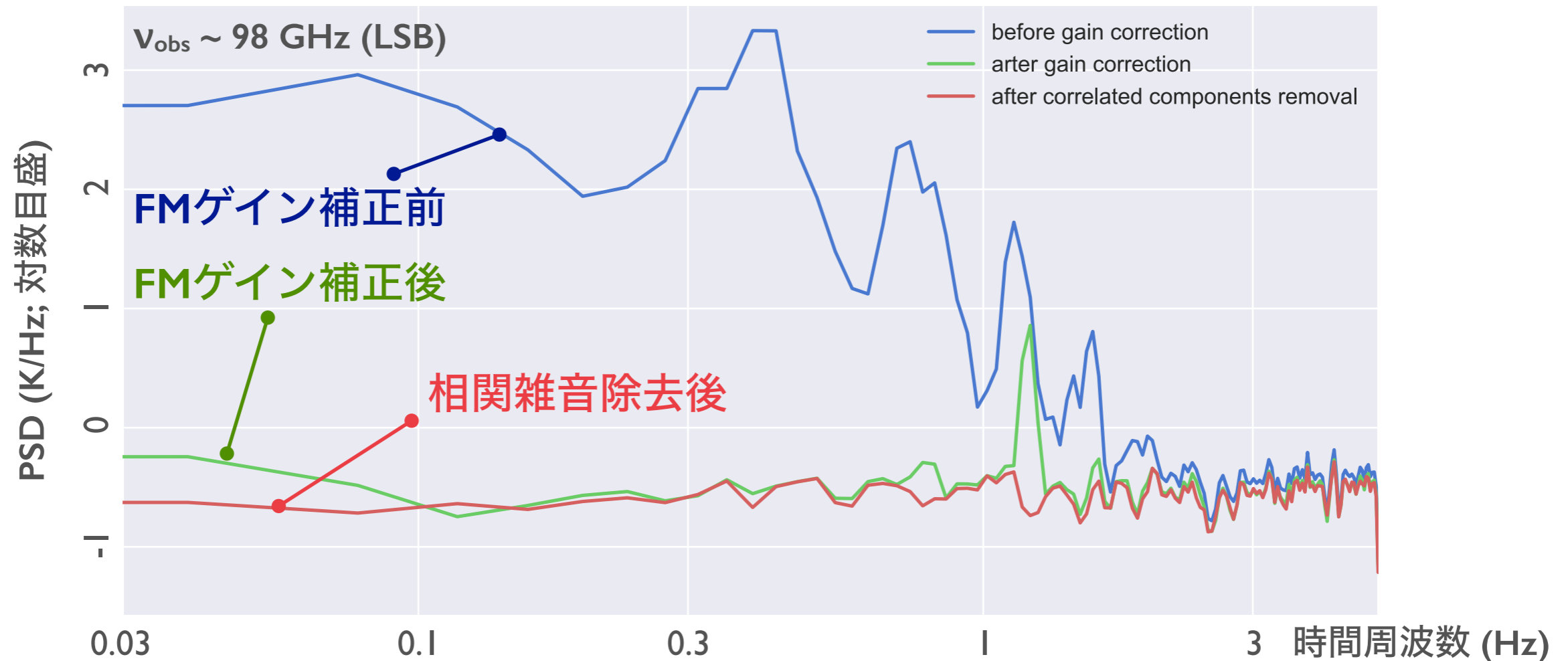
地球大気輝線の推定量

復調済時系列データ

OFF-point-less spectroscopy with FMLO

重み付きPCAによる地球大気輝線・相関雑音成分の推定・除去

分光計中心チャンネルでの時系列データのパワースペクトル密度

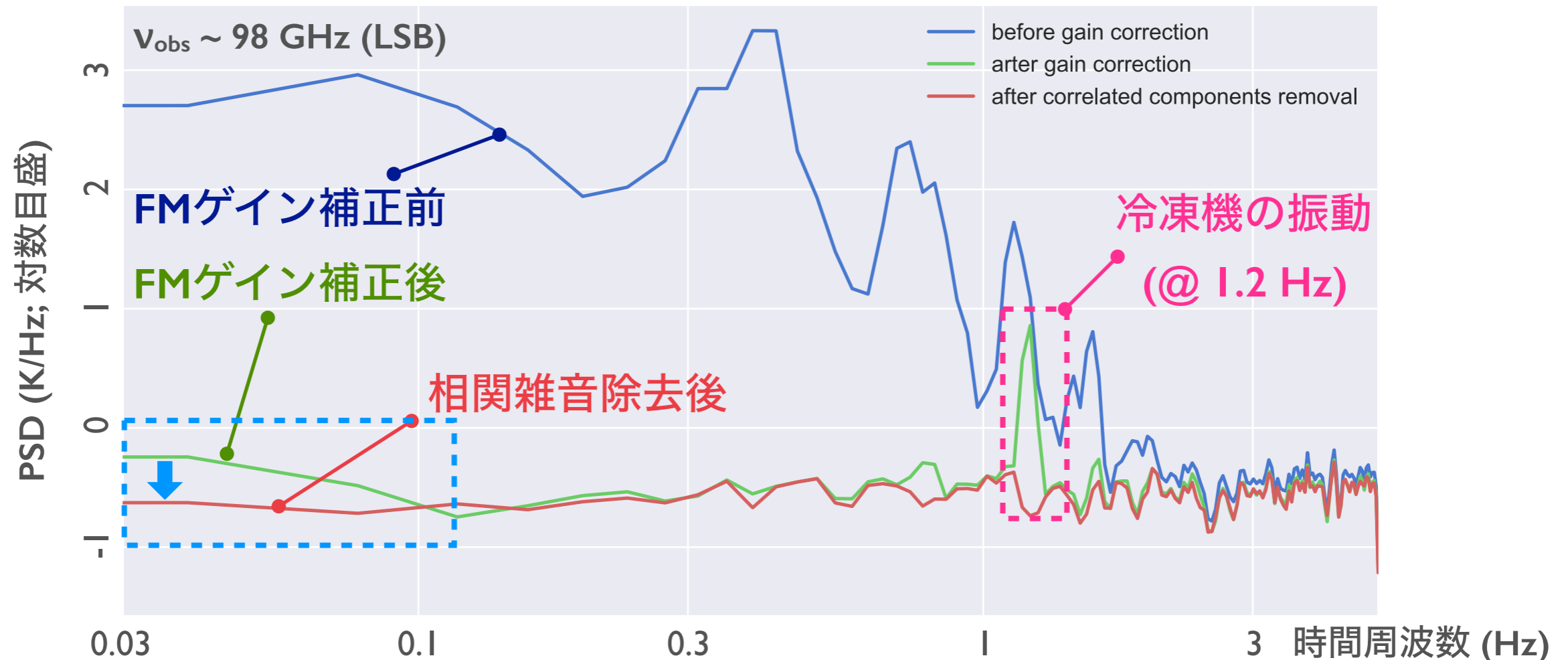


- 低周波成分で卓越する大部分は周波数変調依存ゲインに起因する
 - FMゲイン補正後は0.1 Hz以上ではほぼフラットなPSDを得る
- 相関雑音は**0.1 Hz**以下の低周波成分・機械的な振動成分などで卓越
 - 主成分分析によってこれらも除去された全域でフラットなPSDを得る

OFF-point-less spectroscopy with FMLO

重み付きPCAによる地球大気輝線・相関雑音成分の推定・除去

分光計中心チャンネルでの時系列データのパワースペクトル密度

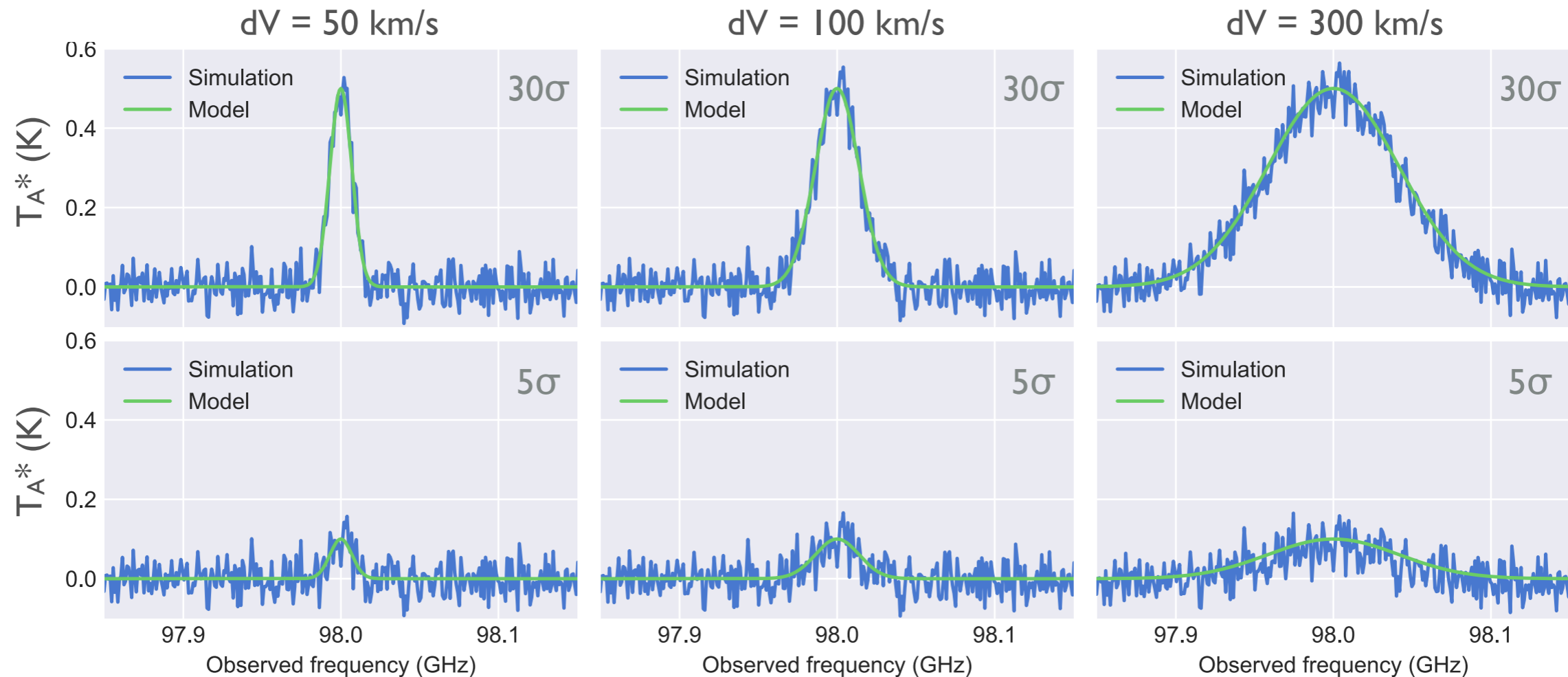


- 低周波成分で卓越する大部分は周波数変調依存ゲインに起因する
 - FMゲイン補正後は0.1 Hz以上ではほぼフラットなPSDを得る
- 相関雑音は**0.1 Hz**以下の低周波成分・機械的な振動成分などで卓越
 - 主成分分析によってこれらも除去された全域でフラットなPSDを得る

OFF-point-less spectroscopy with FMLO

シミュレーションによるFMLOの妥当性の検証・観測効率向上の実証

ブランクスカイ観測データへの輝線モデル埋め込み解析の結果

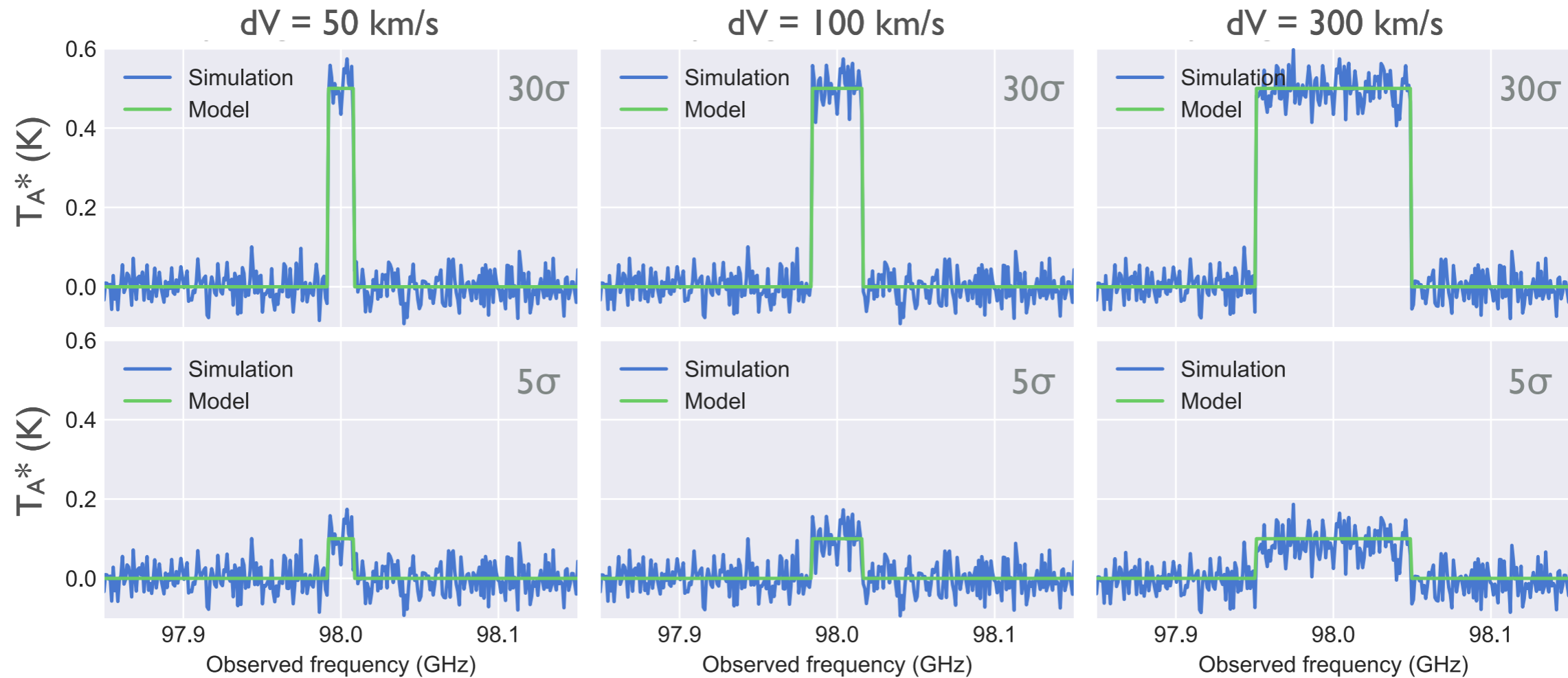


- **輝線幅 (FWHM) より広い変調幅のパターン**で観測すれば輝線は受かる
 - (モデル) - (解析後のスペクトル) の reduced χ^2 が 1 に十分近いことを確認
- **PSW** に対して **1.7倍の感度**・**3.0倍の観測効率** (下限値) の向上を実証
 - 最適なパターンの観測データのノイズレベルと T_{sys} との比較から確認

OFF-point-less spectroscopy with FMLO

シミュレーションによるFMLOの妥当性の検証・観測効率向上の実証

ブランクスカイ観測データへの輝線モデル埋め込み解析の結果

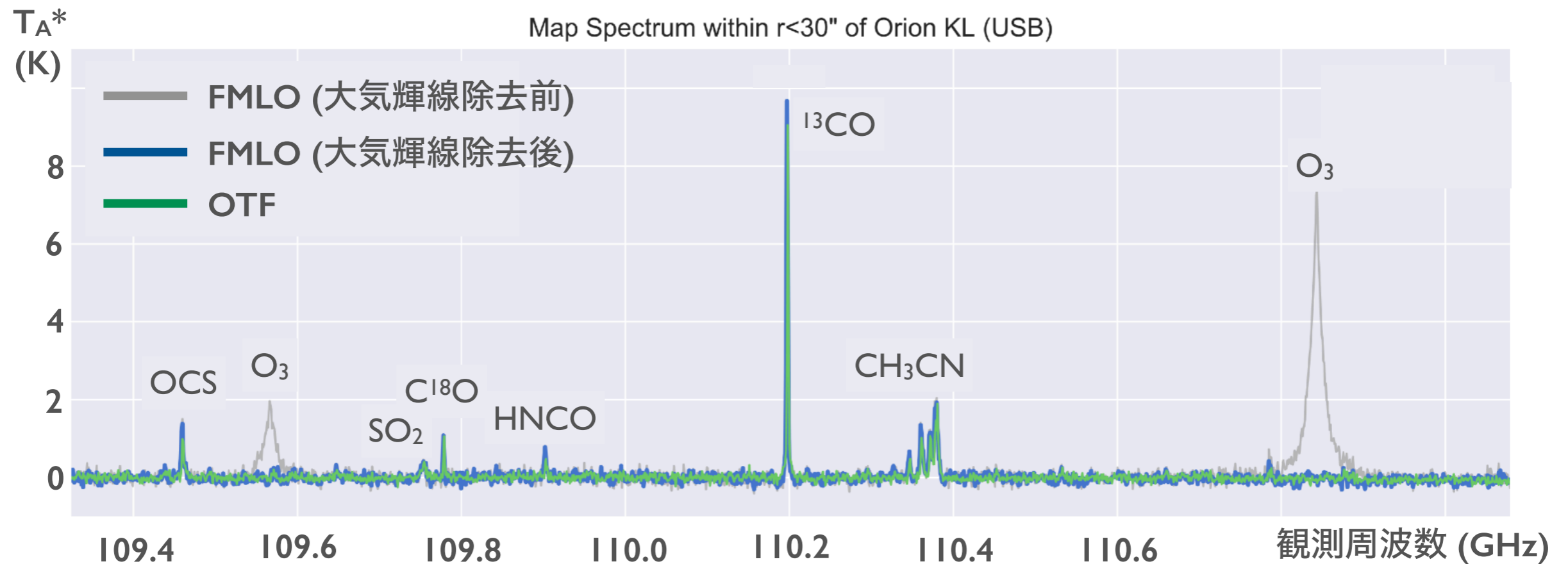


- **輝線幅 (FWHM) より広い変調幅のパターン**で観測すれば輝線は受かる
 - (モデル) - (解析後のスペクトル) の reduced χ^2 が 1 に十分近いことを確認
- **PSW** に対して **1.7倍の感度**・**3.0倍の観測効率** (下限値) の向上を実証
 - 最適なパターンの観測データのノイズレベルと T_{sys} との比較から確認

OFF-point-less spectroscopy with FMLO

実天体観測によるFMLOの妥当性の検証・観測効率向上の実証

Orion KLを中心とする半径30 arcsecの領域のスペクトル (USB)

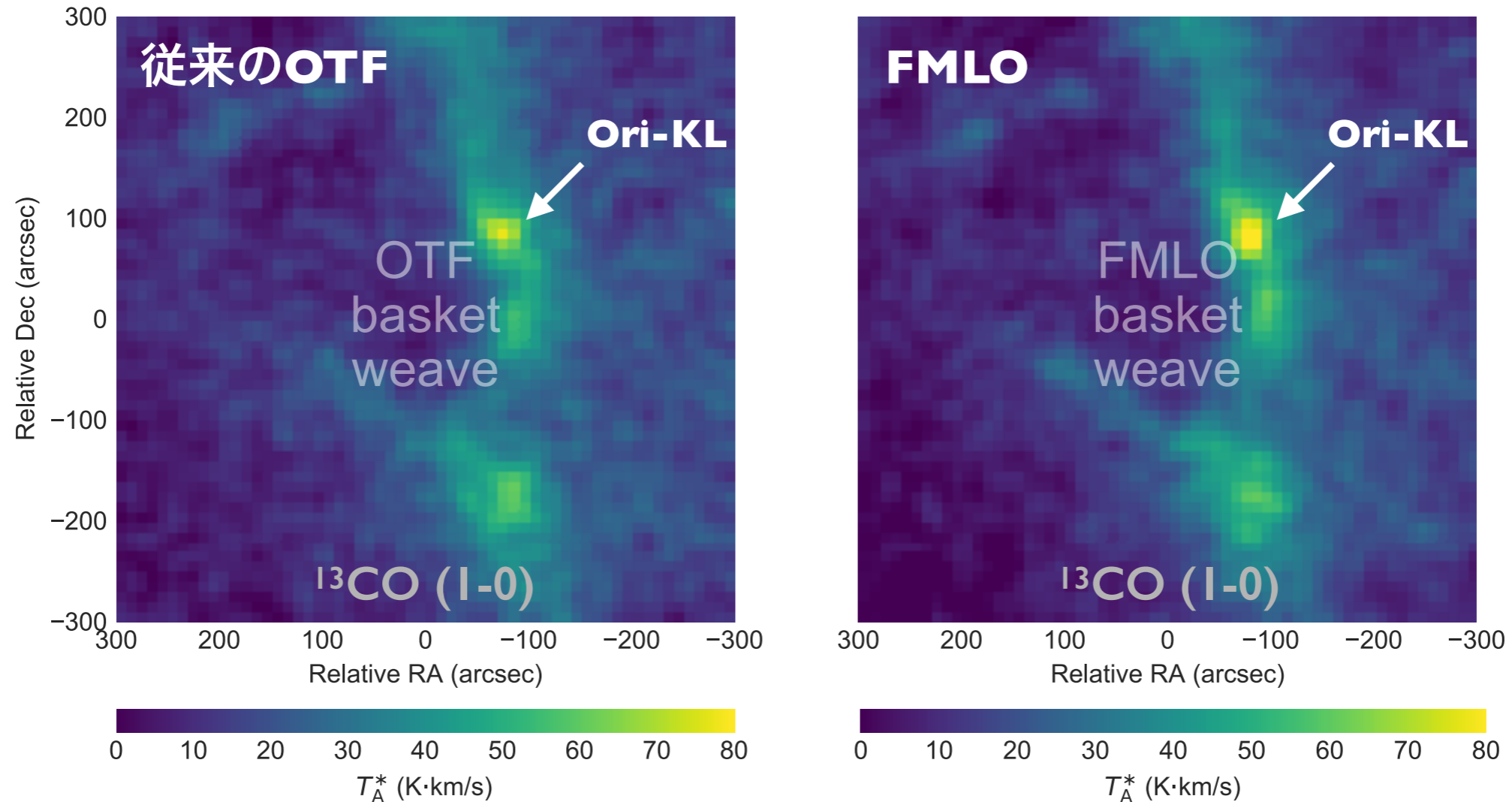


- 98 GHz帯・110 GHz帯ともにOTF観測と無矛盾なスペクトル・マップ
- 110 GHz帯 (USB) ではオゾン輝線が推定・除去される様子も確認できる
- OTFに対して1.1倍の感度・1.2倍の観測効率 (下限値) の向上を実証した

OFF-point-less spectroscopy with FMLO

実天体観測によるFMLOの妥当性の検証・観測効率向上の実証

Orion KL領域の ^{13}CO 分子輝線の積分強度図 (USB)



- 98 GHz帯・110 GHz帯ともにOTF観測と無矛盾なスペクトル・マップ
- 110 GHz帯 (USB) ではオゾン輝線が推定・除去される様子も確認できる
- OTFに対して1.1倍の感度・1.2倍の観測効率 (下限値) の向上を実証した

Contents



イントロダクション - 相関雑音除去とは

- 単一鏡分光観測装置における観測手法の問題点
- 大気・装置由来の相関変動成分の推定・除去



天体信号の変調による相関雑音除去 - FMLOの例

- 周波数変調によるOFF点不要の分光観測手法
- 相関雑音除去の要素技術とデータを用いた実証

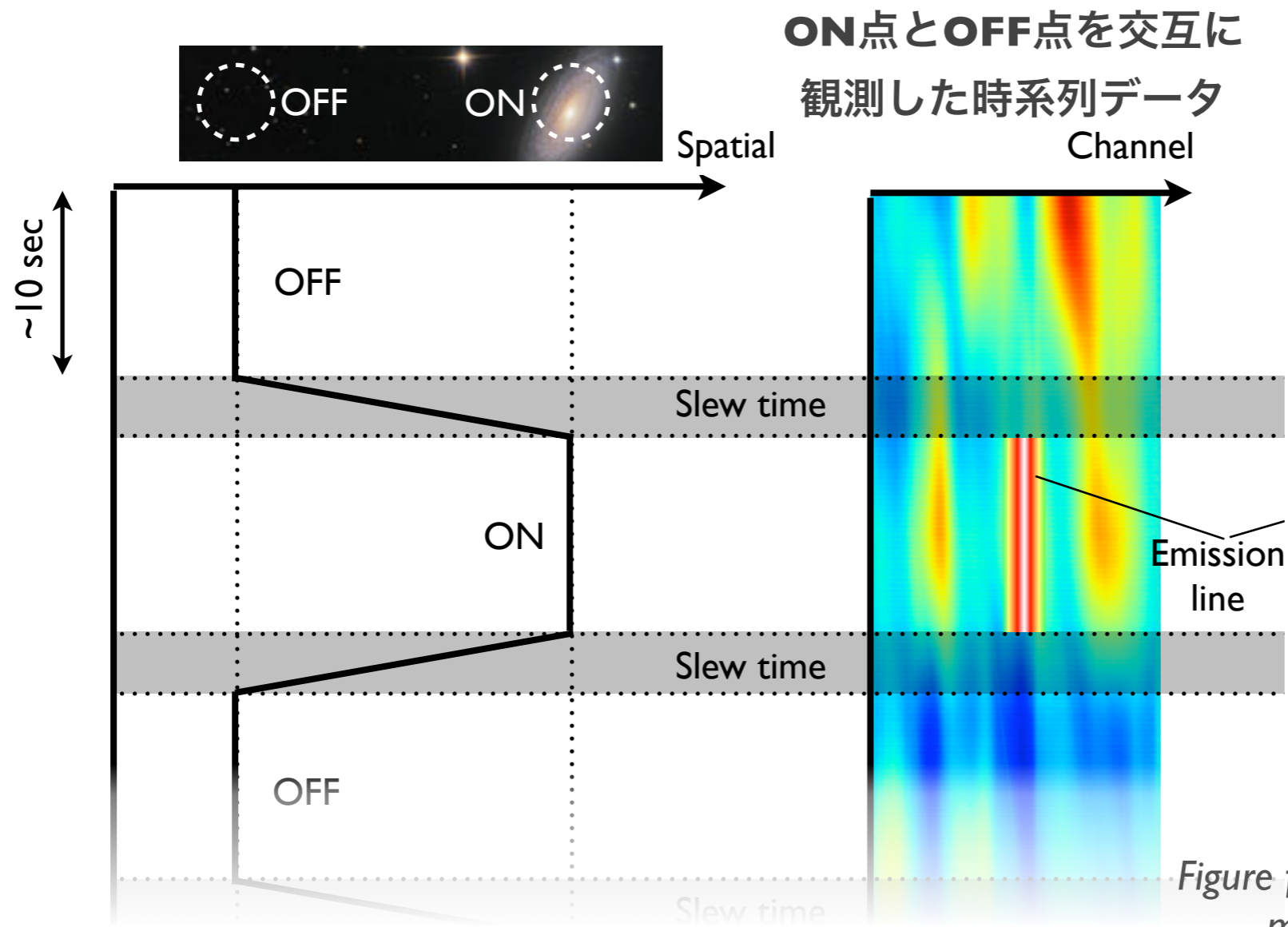


相関雑音除去手法の将来展望 + α

- 周波数変調できない観測装置での相関雑音除去
- 観測・解析手法の包括的な開発研究の必要性

Future (on-going) applications

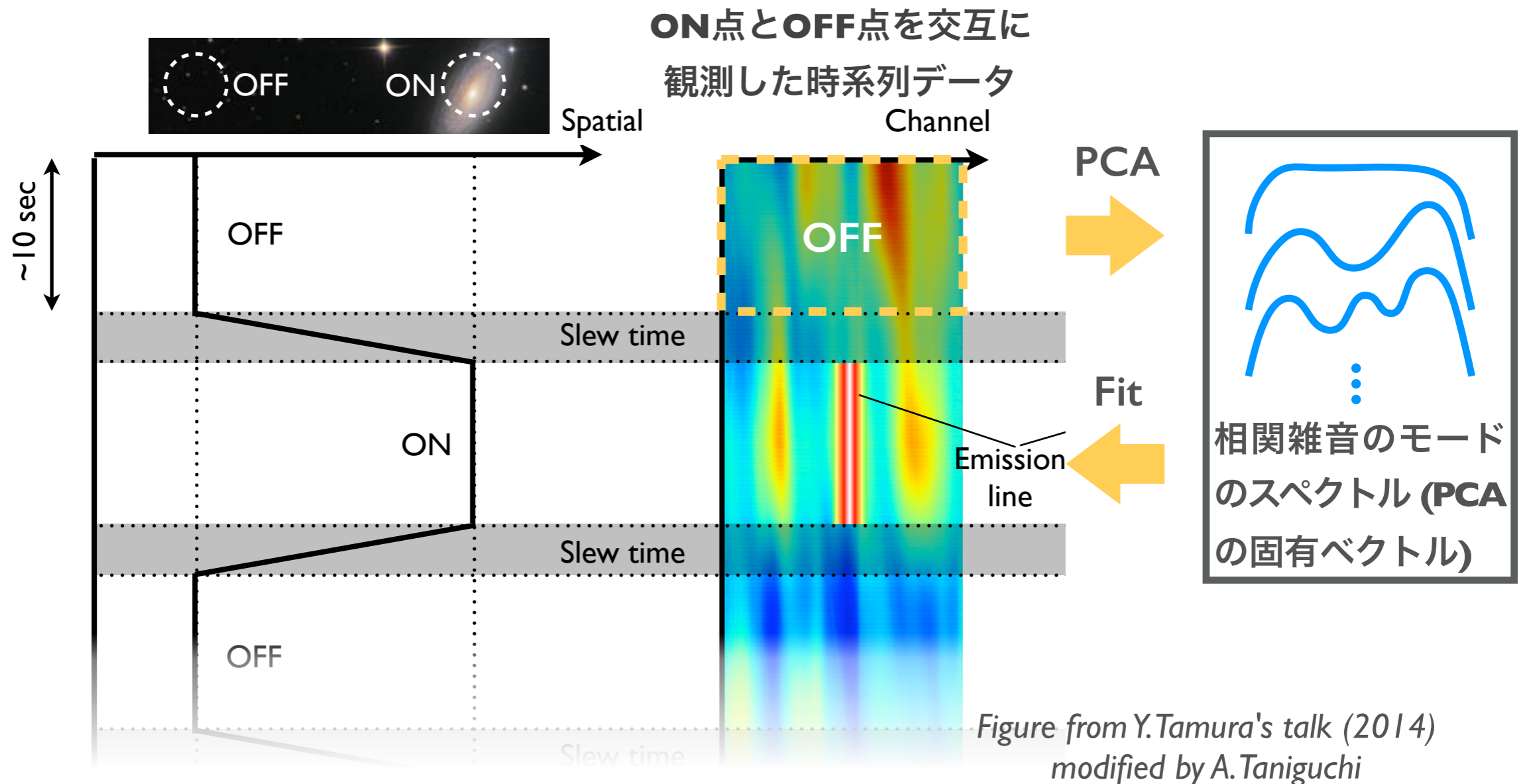
周波数変調が原理的にできない観測装置における相関雑音除去？



1. ON点とOFF点の時系列データ (> 10 Hz) を取得する
2. OFF点の時系列データから相関雑音スペクトル (複数モード) を推定
3. 相関雑音スペクトルをON点データに線形フィットしてベースラインを除去

Future (on-going) applications

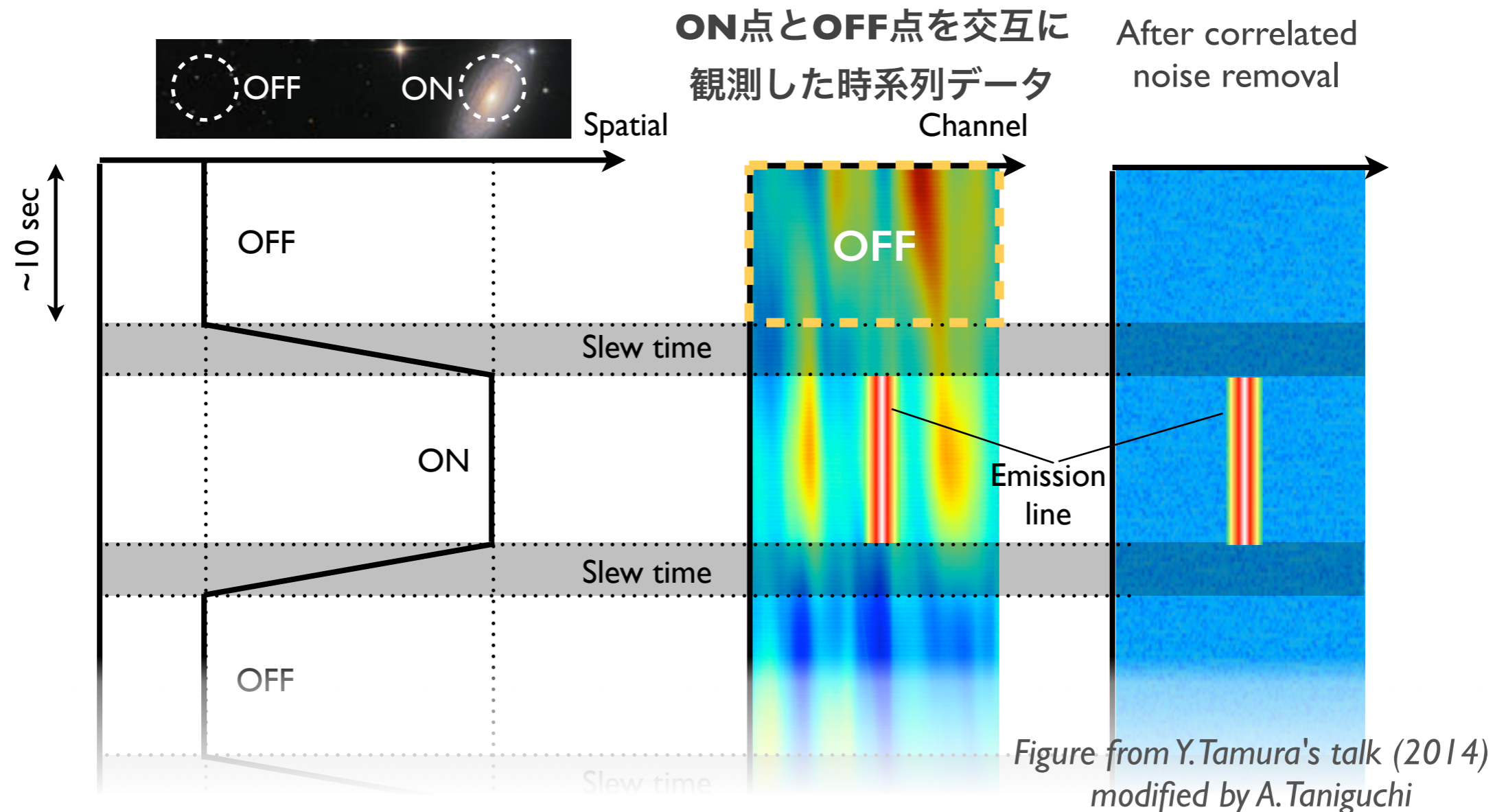
周波数変調が原理的にできない観測装置における相関雑音除去？



1. ON点とOFF点の時系列データ (> 10 Hz) を取得する
2. OFF点の時系列データから相関雑音スペクトル (複数モード) を推定
3. 相関雑音スペクトルをON点データに線形フィットしてベースラインを除去

Future (on-going) applications

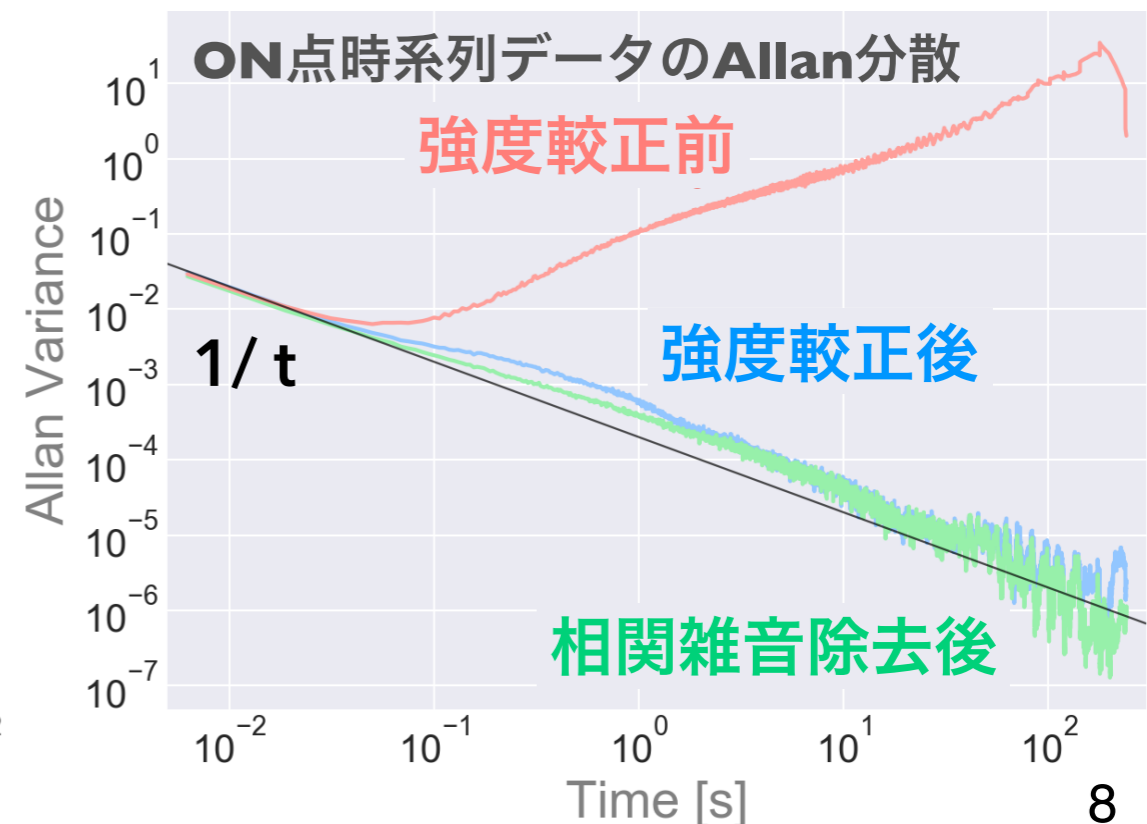
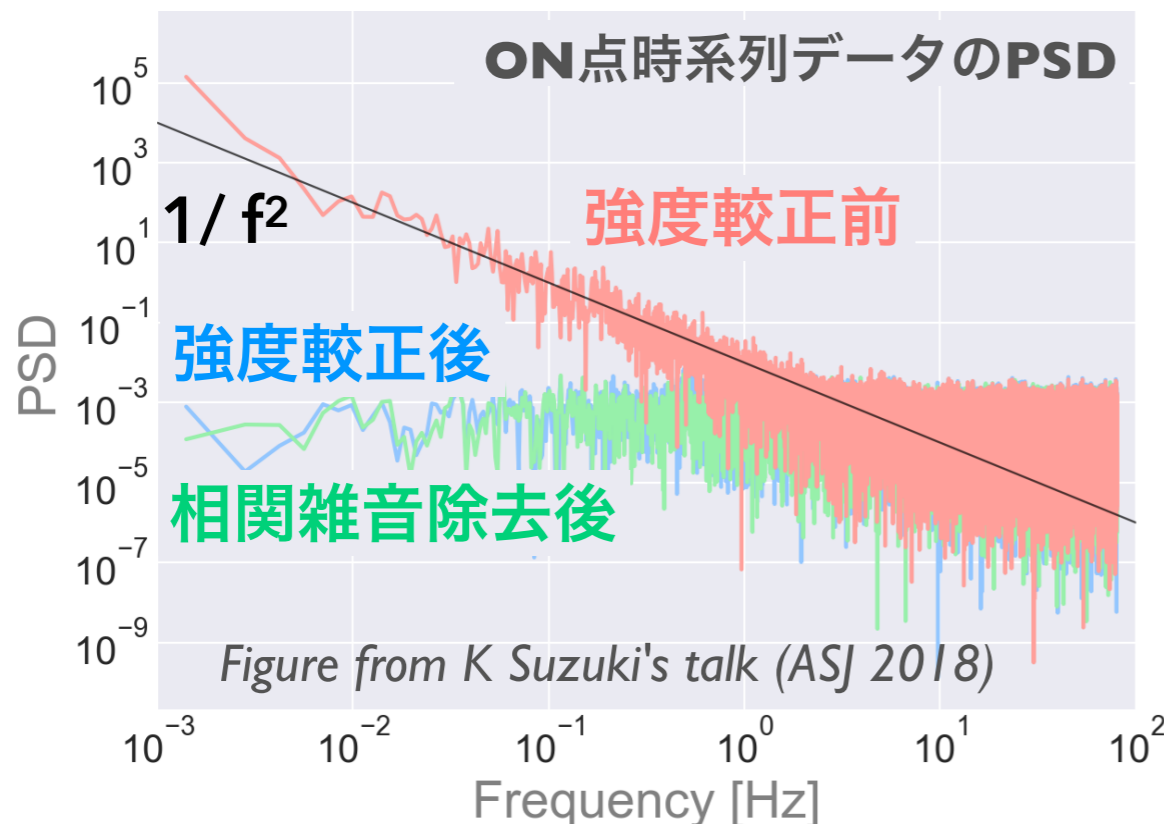
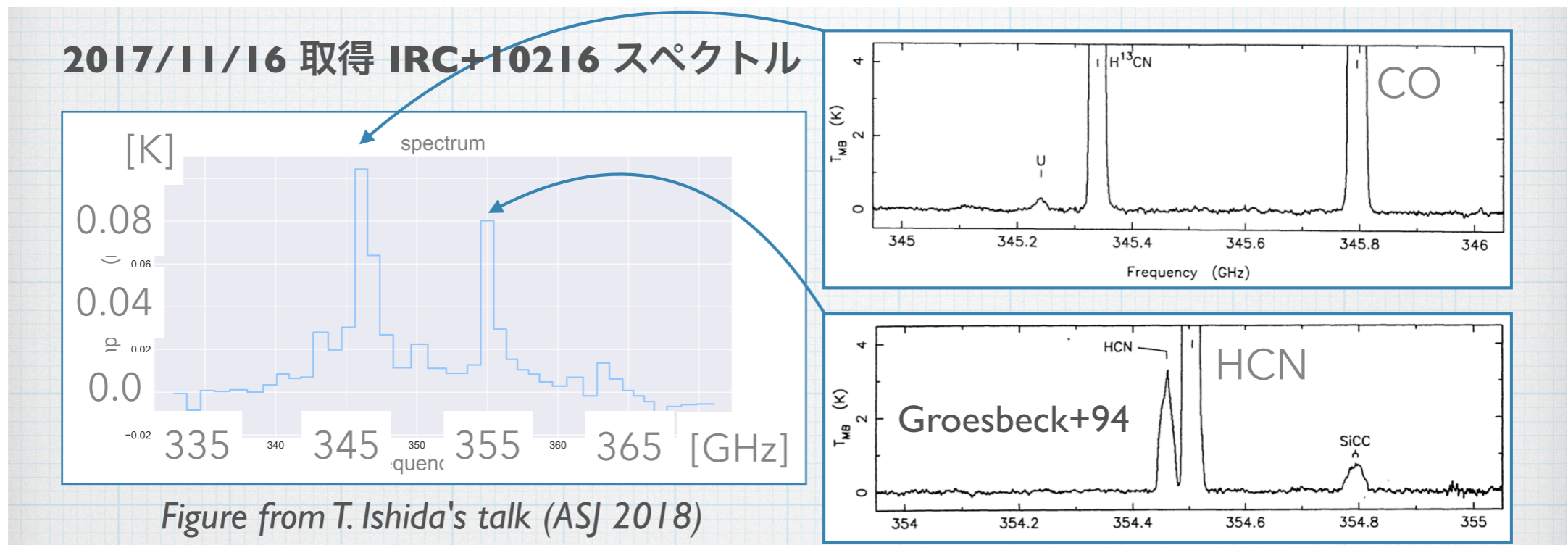
周波数変調が原理的にできない観測装置における相関雑音除去？



1. ON点とOFF点の時系列データ (> 10 Hz) を取得する
2. OFF点の時系列データから相関雑音スペクトル (複数モード) を推定
3. 相関雑音スペクトルをON点データに線形フィットしてベースラインを除去

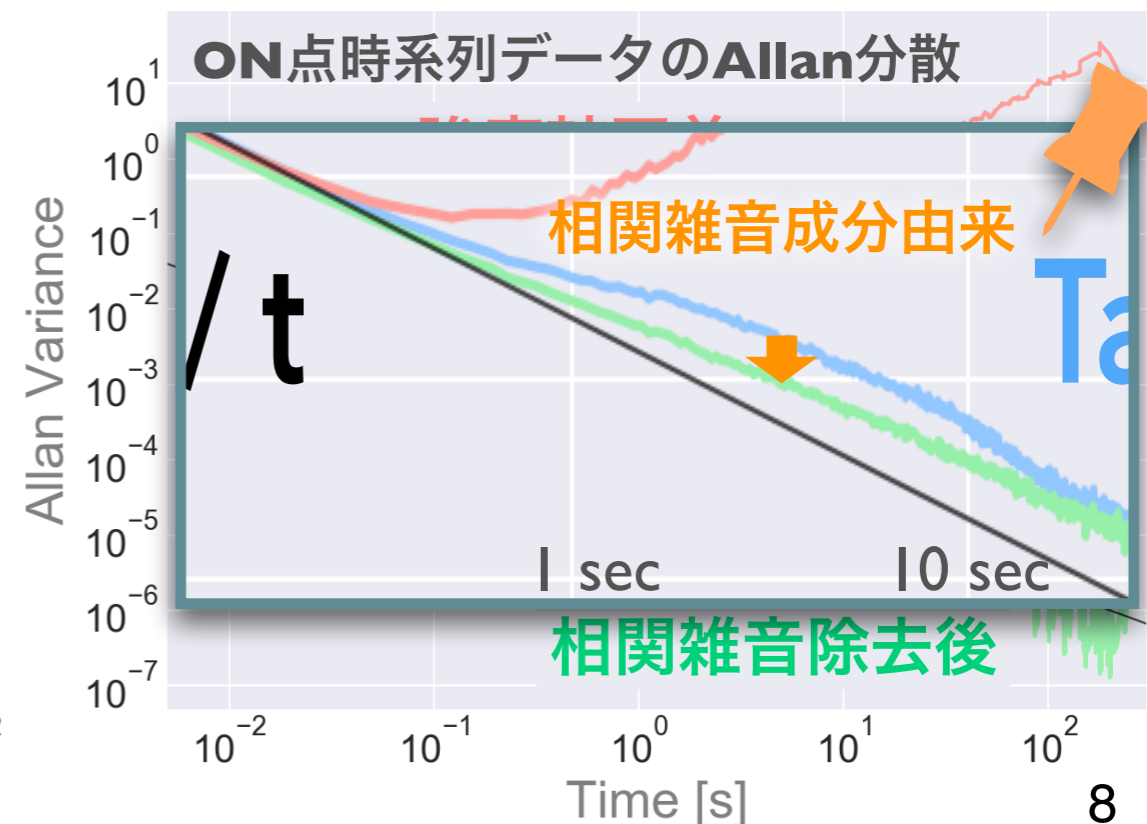
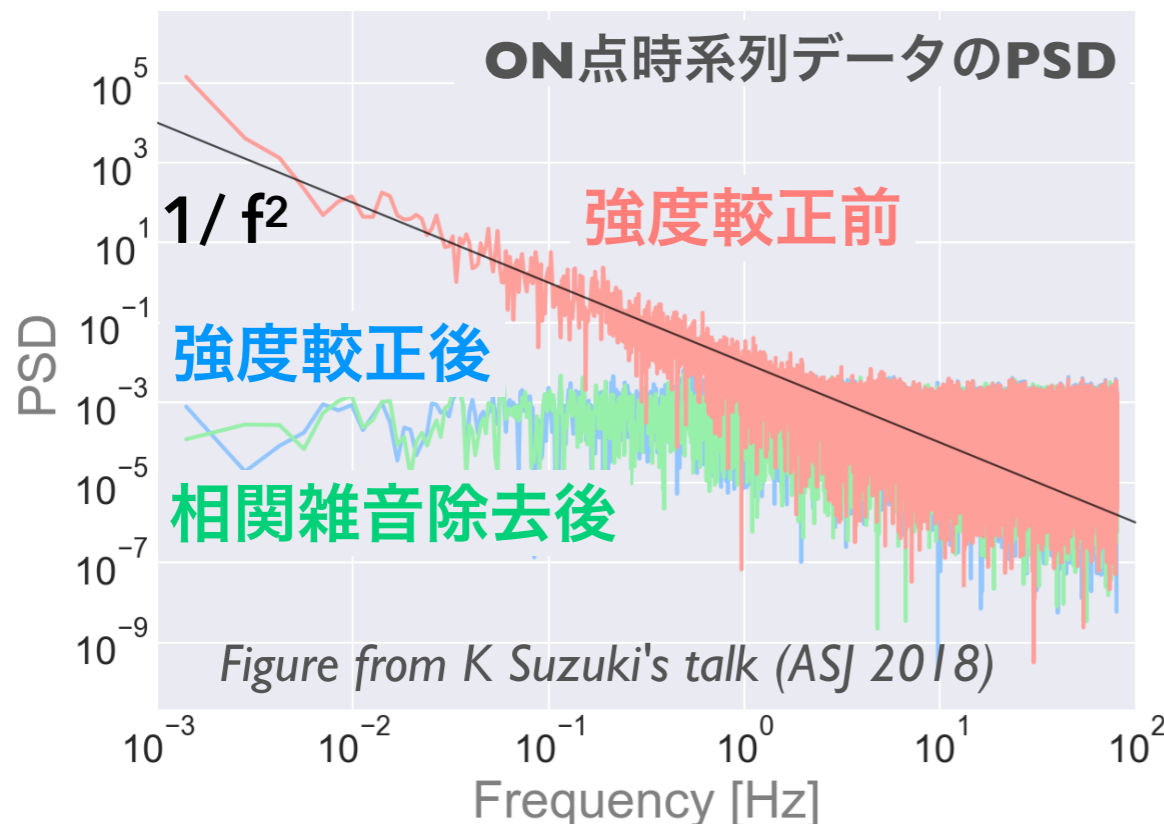
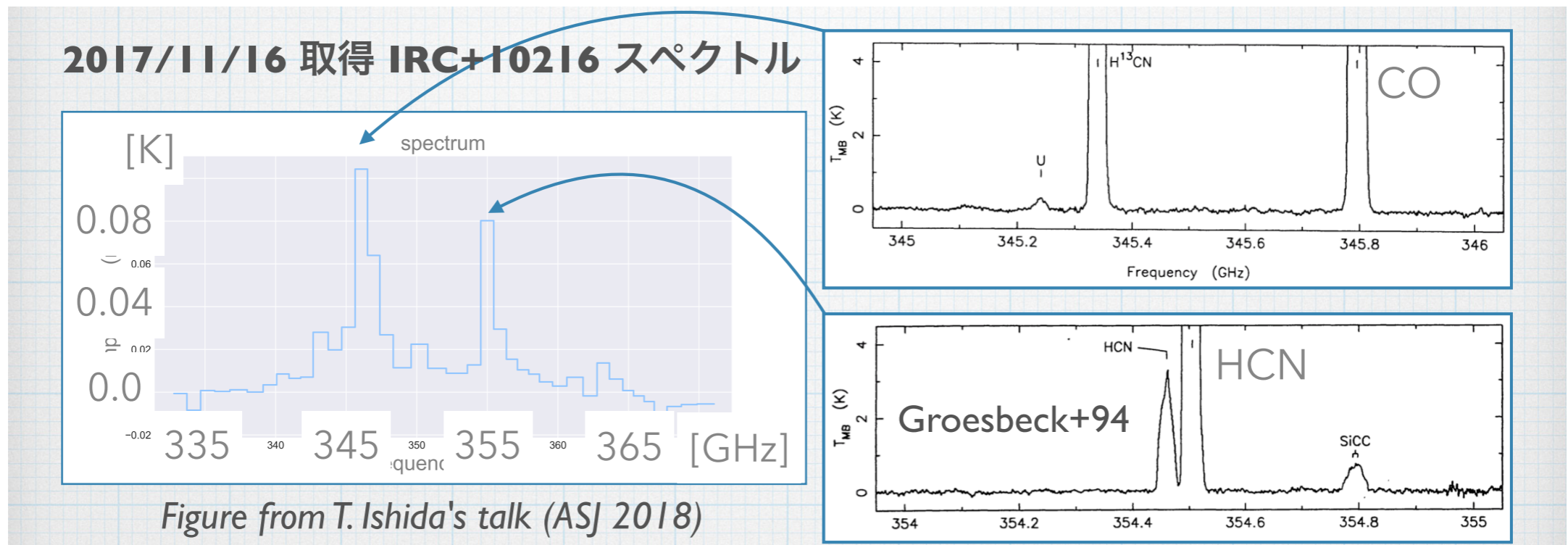
Future (on-going) applications

DESHIMA first light mission (2017) で取得したデータへの適用例



Future (on-going) applications

DESHIMA first light mission (2017) で取得したデータへの適用例



Future (on-going) applications

まとめ: 観測手法と解析手法の包括的な開発研究の重要性



観測手法

解析の流れ



科学的要求



欲しい情報
観測性能

Future (on-going) applications

まとめ: 観測手法と解析手法の包括的な開発研究の重要性



観測手法



解析手法



欲しい情報
観測性能

Future (on-going) applications

まとめ: 観測手法と解析手法の包括的な開発研究の重要性



観測手法

- 相関雑音除去のための周波数変調観測 (FMLO)



解析手法



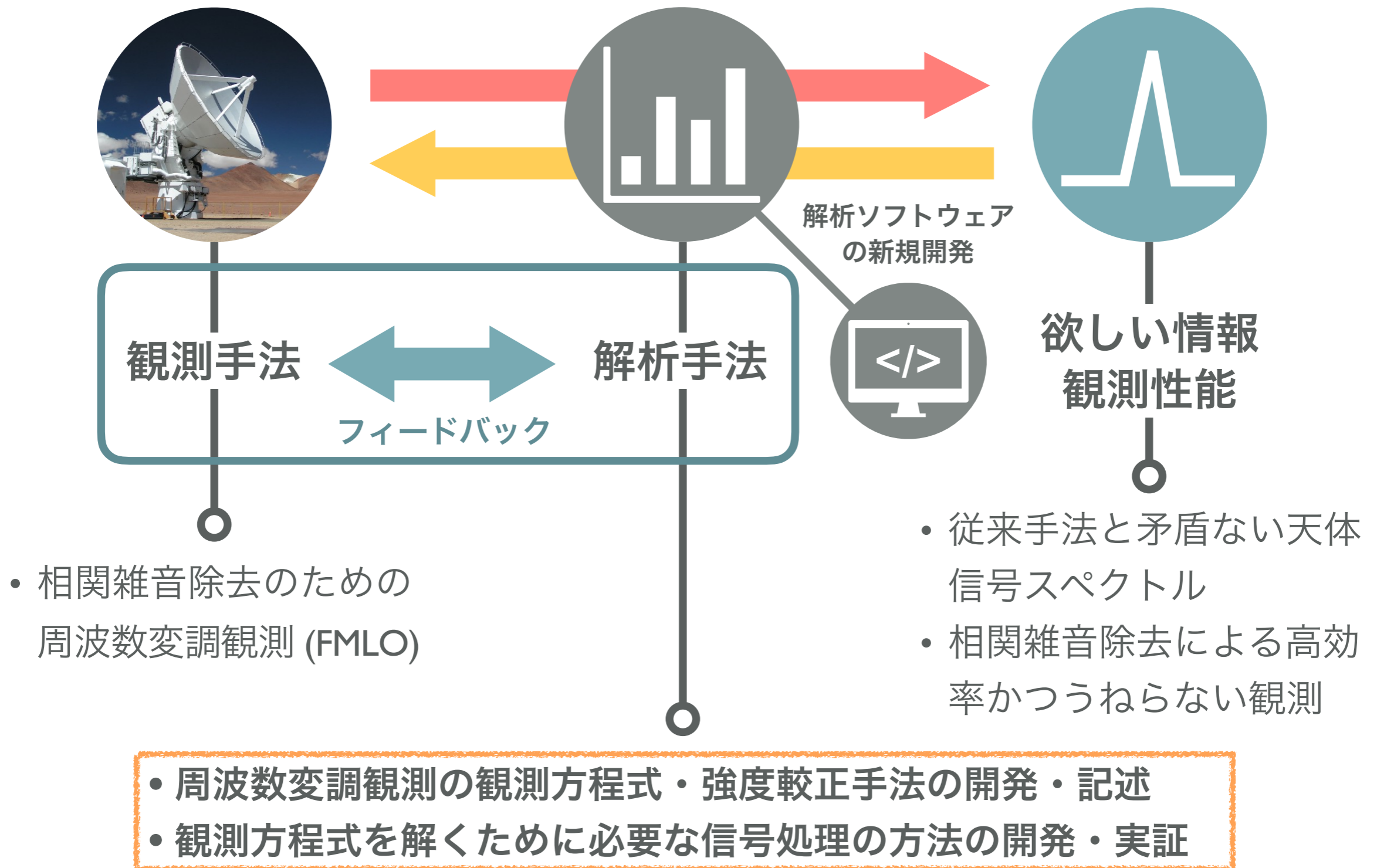
欲しい情報
観測性能

- 従来手法と矛盾ない天体信号スペクトル
- 相関雑音除去による高効率かつうねらない観測

- 周波数変調観測の観測方程式・強度較正手法の開発・記述
- 観測方程式を解くために必要な信号処理の方法の開発・実証

Future (on-going) applications

まとめ: 観測手法と解析手法の包括的な開発研究の重要性



Future (on-going) applications

まとめ: 解析手法 (ソフトウェア) 開発の重要性 / 面白さと将来展望

使う人と作る人がともに活躍するために - 業界標準の導入による情報の属人化の防止

Python 3 によるソフトウェア開発



xarray NumPy
IP[y]: python™
SciPy Numba
astroPy scikits learn
matplotlib

ソフトウェア・ドキュメント公開



python Package Index git GitHub
M↓ SPHINX
Python Documentation Generator

解析環境・コミュニケーション



Jupyter slack
S EVERNOTE Kibela

- 45m/ASTEへのFMLO搭載
- 相関雑音除去手法の開発

- DESHIMA first light 達成
- ON-OFFへの相関雑音除去

- 次期DESHIMA観測
- FMLO共同利用公開へ

~ 2016

2017

2018

2019 ~

- FMゲインの補正手法の開発
- 地球大気輝線除去手法の開発

- LMTへのFMLO搭載
- 45m/FORESTでの複数素子FMLO

Summary



イントロダクション - 相関雑音除去とは

- OFF点→空間・周波数方向に相関しながら変動
- 瞬間瞬間のベースライン推定を実現する手法



天体信号の変調による相関雑音除去 - FMLOの例

- 周波数変調によるOFF点不要の分光観測手法
- 相関雑音除去によって観測効率 (感度) を向上!



相関雑音除去手法の将来展望 + α

- DESHIMAにおける時系列ON-OFFの相関雑音除去
- 観測・解析手法の包括的な開発研究の重要性