

宇宙磁場解析における RM CLEAN の評価

宮下 恭光 (熊本大学大学院 自然科学研究科)

Abstract

RM CLEAN は、RM synthesis において得られた dirty FDF のサイドローブを除去するもので、宇宙磁場を解析する上で重要な手法である。今回は、reduced chi-square という指標を用いて RM CLEAN の結果を評価できるかどうか解析を行った。解析においては、 δ 関数のように表される銀河が視線上に二つ存在するというモデルを仮定し、 ϕ (ファラデー深度) 空間における二つの source 間の距離 $\Delta\phi$ や初期偏波角差 $\Delta\chi_0$ を変化させてシミュレーションを行った。解析の結果、source の数が見積もれていない状況では reduced chi-square の値が大きくなり、source の数が見積もれている状況では reduced chi-square の値が小さくなっているというごく自然な結果に加えて、source の数が見積もれていない状況においても reduced chi-square の値が小さくなるという結果や、source の数が見積もれている状況においても reduced chi-square の値が大きくなるという結果が生じることが分かった。

1 Introduction

宇宙には恒星、銀河、銀河団など様々なスケールで磁場が存在している。そして、その宇宙磁場の起源に関しては、宇宙における未解決問題の一つである。我々と銀河の間に存在する磁場を調べる方法としてファラデー回転という現象を用いた手法がある。ファラデー回転とは、偏波が磁気流体中を通過すると偏波面が回転する現象で、回転角は波長の二乗に比例し、比例係数 ϕ (または Rotation Measure) は視線方向の電子密度と磁場の情報を含んだ積分値として表される。

$$\chi = \chi_0 + \phi\lambda^2 \quad (1)$$

χ_0 は初期偏波角である。ただし、この比例関係は視線方向に source が一つしか存在しない場合にのみ成り立つ関係である。実際の宇宙は視線方向にいくつも source が存在していると考えられるため、より洗練された新しい手法が必要になってくる。より洗練された手法を RM synthesis と言い、観測量である偏波強度をフーリエ逆変換し、ファラデー分散関数 (Faraday dispersion function = FDF) と呼ばれる関数を得る。この得られた FDF は、観測帯域の制限等の理由からサイドローブを持つ不完全なものとなっている (dirty FDF)。この dirty FDF のサイドローブを取り除き、きれいなものを得るための手法が RM

CLEAN である。今回は簡単なモデルにおいて、RM CLEAN が reduced chi-square という指標を用いてどのように評価できるか解析を行う。2 節では、RM synthesis、RM CLEAN の導入、設定したモデルの説明を行い、3 節では、評価の結果、4 節でまとめを行っている。

2 Model and Calculation

(2.1) RM synthesis

この節では RM synthesis の導入を行う。観測される複素偏波強度は、波長の二乗の関数で (2) のように表現される。

$$P(\lambda^2) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\phi) e^{2i\phi\lambda^2} d\phi \quad (2)$$

$F(\phi)$ は、 ϕ 空間における source の偏波強度の分布や磁場の情報を含んでおり、ファラデー深度 ϕ の関数である。ファラデー深度は (3) のように定義される。

$$\phi = 0.81 \int_C n_e B_{\parallel} dx \quad (3)$$

n_e は視線方向に存在する電子密度 (cm^{-3})、 $B_{\parallel}$ は視線に平行な磁場 (μG)、 x は視線方向の積分 (pc) を表す。FDF は (2) をフーリエ逆変換することによって

得られる。

$$F(\phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2 \quad (4)$$

しかし、フーリエ逆変換による FDF の推定は波長の二乗のすべてを観測することができないため不完全である。観測可能な波長の帯域だけで再構築される FDF は窓関数 W を用いて式 (5) のように書ける。

$$\tilde{F}(\phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2 \quad (5)$$

この式は畳み込みの定理を用いて式 (6) ~ (8) のように書ける。

$$\tilde{F}(\phi) = K^{-1} F(\phi) * R(\phi) \quad (6)$$

$$R(\phi) = K \int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2 \quad (7)$$

$$K^{-1} = \int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) d\lambda^2 \quad (8)$$

$R(\phi)$ は回転測度波及関数 (RMSF) と呼ばれる。再構築される FDF (dirtyFDF) の品質は $R(\phi)$ によって決められることを表しており、RMSF の半幅 (FWHM) が分解能の目安となる。FWHM は、ASKAP 望遠鏡で $22.26(\text{rad } m^{-2})$ である。

(2.2)RM-CLEAN

FDF のメインピークを明瞭にするために、dirtyFDF のサイドローブを除去し、きれいなピーム関数で置き換える手法を RM CLEAN 法という。RM CLEAN 法は、電波望遠鏡における像合成に用いられる CLEAN アルゴリズムと同様の手法である。以下そのアルゴリズムを簡単に説明する。

まず、 $|\tilde{F}(\phi)|$ のピークを探し、そのピークのファラデー深度 ϕ_p とそのときの複素数値 $\tilde{F}(\phi_p)$ の情報を Faraday component として記憶する。次に、ピークの位置にシフトさせた $\gamma \tilde{F}(\phi_p) R(\phi - \phi_p)$ を $\tilde{F}(\phi)$ から引く。このとき FDF と RMSF は複素数であるので、複素数のままで演算を行う。 γ は 1 以下の定数で、今回は 0.1 に設定している。このステップを $|\tilde{F}(\phi)|$ がノイズレベル ξ 以下になるか、決められた回数 N_{Itr} に達するまで繰り返し行う。そして、Faraday component と同じ ϕ_p と $\tilde{F}(\phi)$ を持ち、サイドローブ

を持たないピーム関数を Faraday component の数だけ γ の定数を掛けながら足し上げる。このようにして得られた関数を CLEANed FDF(ϕ) と呼ぶ。図 1、図 2 がそれぞれ dirtyFDF、CLEANed FDF の絶対値の結果である。図より、dirtyFDF のサイドローブが RM CLEAN によって除去されていることが分かる。

(2.3)Model

今回の解析では、視線方向に δ 関数で表されるような銀河が二つ存在していると仮定する。その source の位置は ϕ 空間において、一つ目の source は $\phi_1 = 10$ と固定し、二つ目の source の位置 ϕ_2 は変化させる。各 source における偏波強度、すなわち、source の振幅は二つとも値 10 に設定する。初期偏波角に関しては $\chi_{0,2} = 0(\text{rad})$ とし、 $\chi_{0,1}$ を変化させる。従って二つの source のファラデー深度の差 $\Delta\phi$ と初期偏波角差 $\Delta\chi_0$ を変数として擬似観測データを作成する。 $\Delta\phi$ は $0.5\text{FWHM} \sim 2\text{FWHM}$ まで (FWHM は ASKAP 望遠鏡の 22.26 の値を用いる)、 $\Delta\chi_0$ は $-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}$ までの値をとる。擬似観測データには S/N 比 10 の分散 1、平均 0 のガウシアンノイズをのせる。このようなモデルによる観測データを用いて RM CLEAN を行う。

3 Results and Discussion

図 3 は、様々な $\Delta\phi$ 、 $\Delta\chi_0$ での reduced chi-square の計算結果を表している。横軸は ϕ 空間における二つの source の位置の差 $\Delta\phi$ 、縦軸は初期偏波角差 $\Delta\chi_0$ (度表記) を表している。reduced chi-square は (9) のように書ける。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(P_{est} - P_{obs})^2}{\sigma^2 \mu} \quad (9)$$

P_{est} は RM CLEAN から見積もられる複素偏波強度、 P_{obs} は擬似観測データ、 N はデータの総数、 σ^2 は分散、 μ は自由度を表している。現在 $N = 1100$ 、 $\sigma^2 = 1$ 、 $\mu = 2200$ の値を取っている。カラーバーの上限値は、この値より大きい reduced chi-square の値を取る確率は統計的に 1% であるということの意味している。従って、結果が白、青色の領域が理論

値と観測値のフィッティングがうまくできていることを示す。

また、図 4 は、CLEANed FDF の極値の数を様々な $\Delta\phi$, $\Delta\chi_0$ においてプロットしたもので、source の数の見積もりの結果を表している。図 4 では、極値の数が三つを示す $\Delta\phi$, $\Delta\chi_0$ においては、source の数を二つと見積もっていることを示し、極値の数が一つと示す $\Delta\phi$, $\Delta\chi_0$ においては、source の数を一つと見積もっていることを示す。今、source の数は二つに設定しているの、図 4 の黒い領域では source の数を見誤っていることが分かる。図 3、図 4 の結果より、source が一つに見えている領域、すなわち source の数の見積もりができていない領域は、reduced chi-square の値が大きいというごく自然な結果となっているが、中には、source が一つに見えている領域においても、reduced chi-square の値が小さいという結果や、source がきちんと二つに見えていても reduced chi-square の値が大きいという結果が生じていることが分かる。

4 Conclusion

ある観測データ P を得て、そこから RM CLEAN を行った結果、source が一つに見え、かつ、reduced chi-square の値が小さい場合、我々は視線方向に存在する source は一つであると断定することができない。それは解析結果から分かるように、実際は二つの source が存在しているが、reduced chi-square が小さいにもかかわらず、source が一つに見えるケースがあるからである。また、source が一つに見え、かつ、reduced chi-square の値が大きい場合に関しても、実際は source の数が二つであるが、RM CLEAN の結果 source 一つと認識してしまっている可能性と、実際は source の数は一つであるが、何らかの原因で reduced chi-square の値が大きくなってしまっている可能性の二つが考えられるため断定はできない。以上より、reduced chi-square の結果の良い、悪いで RM CLEAN の結果が単純に評価できるとは限らないことが分かった。

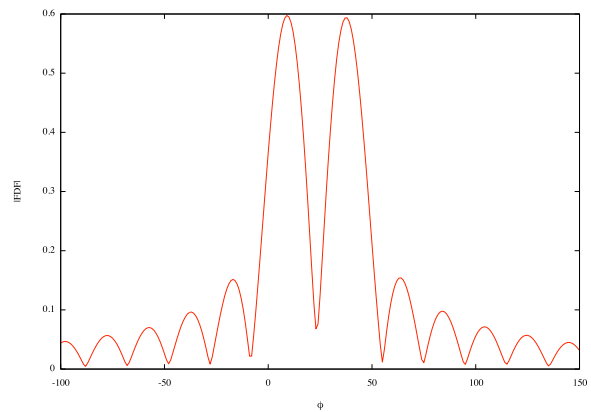


図 1: dirty FDF

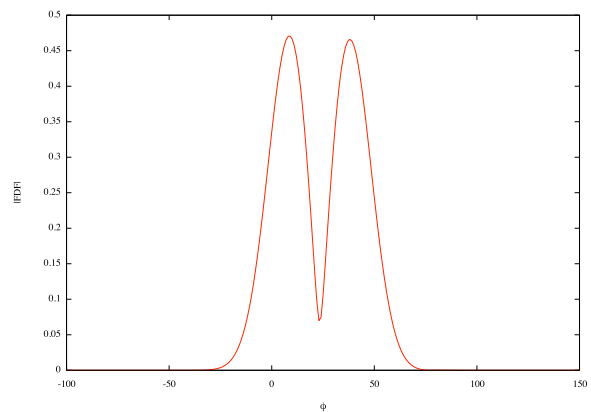


図 2: CLEANed FDF

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Brentjens, M.A. & de Bruyn, A.G. 2005, A&A 441, 1217-1228
- Heald, G., Braun, R., & Edmonds, R. 2009, A&A, 503, 409
- Kumazaki, K., Akahori, T., Ideguchi, S., Kurayama, T., & Takahashi, K. 2014, PASJ, 66, 61
- Ideguchi, S., Tashiro, Y., Akahori, T., Takahashi, K., & Ryu, D. 2014 ApJ 792 51

日本版 Square Kilometre Array サイエンスブック

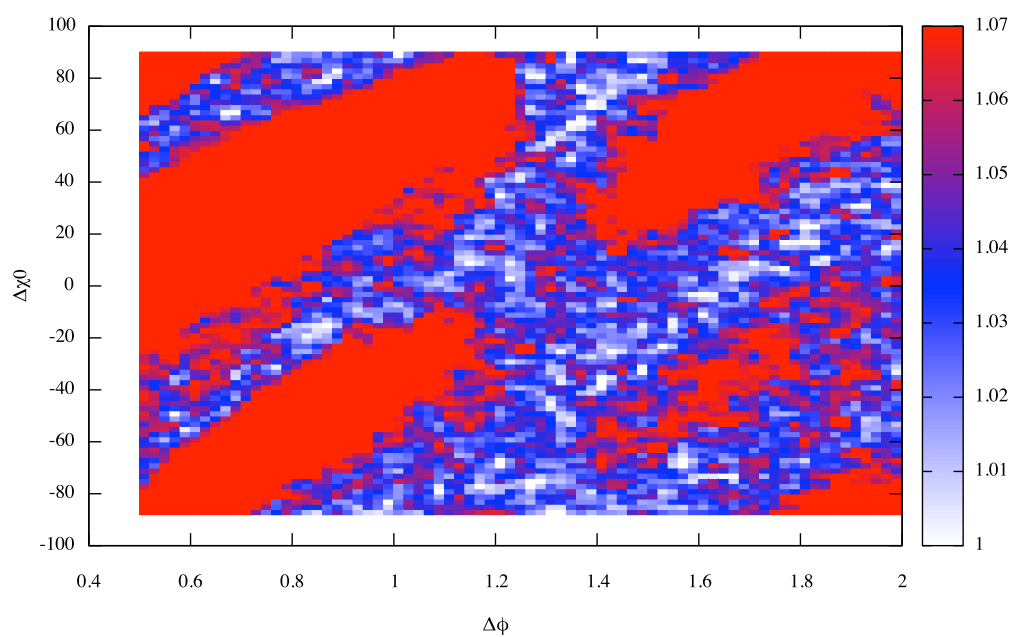


図 3: reduced chi-square

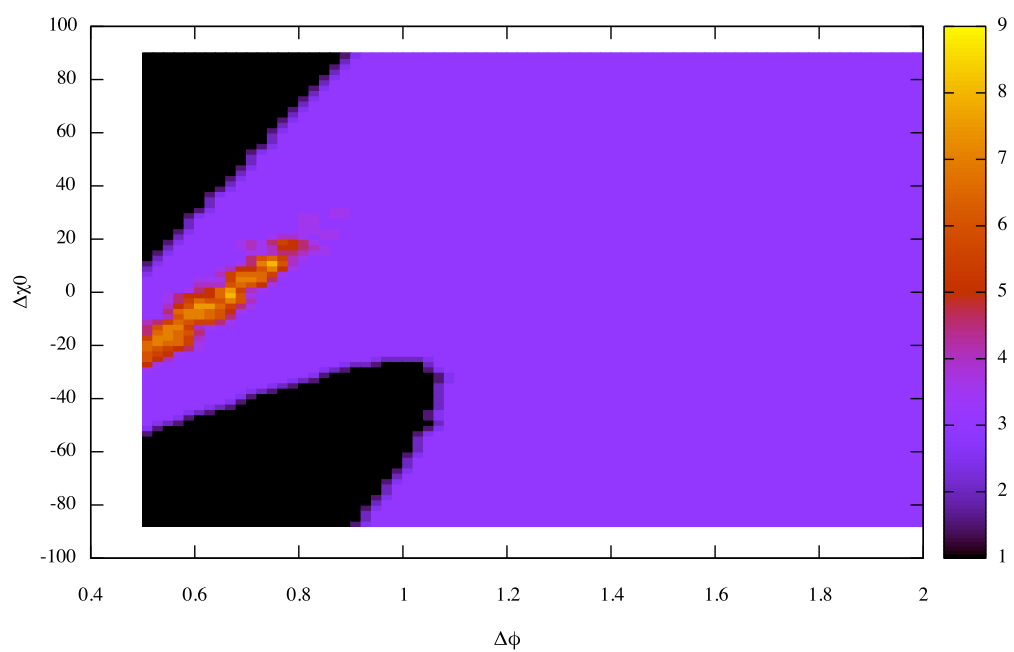


図 4: CLEANed FDF の極値の数