宇宙磁場解析における QU-fitting

中川 晶太 (熊本大学大学院 自然科学研究科)

Abstract

銀河、銀河団などのあらゆる天体は磁場で満たされている。その磁場のスケール、構造は多様で、このような磁場は宇宙磁場と呼ばれる。宇宙磁場を観測する上で欠かせない現象に、ファラデー回転がある。直線偏光した光が磁場中を通過するとその偏光面が回転するのである。この現象を応用して、偏波面の回転量に関するスペクトルである FDF を導入する。この FDF を、我々が得ることのできる観測結果から如何に導き出すか、この問題にアプローチするひとつの方法として、QU-fitting を紹介する。また、QU-fitting をシンプルな銀河モデルに適用した結果を示す。

1 Introduction

宇宙磁場とは、星や銀河、銀河団などの天体を取り巻く磁場のことで、その構造やスケールは 様々である。宇宙磁場は天体現象と密接に関わっており、その構造を探ることは極めて重要である。

宇宙磁場の構造を探る上で 2 つの重要な現象、シンクロトロン放射とファラデー回転がある。シンクロトロン放射とは、相対論的電子が磁場の影響を受けてらせん運動するときに放射される電磁波のことである。電子が磁力線に対して垂直に運動する場合、電子は磁場方向と電子の進む向きに対して垂直にローレンツ力を受ける。光に近い速度を持った電子が受けるローレンツ力は非常に大きく、ローレンツ力を受けて加速度運動する電子は電磁波を放射する。これがシンクロトロン放射である。シンクロトロン放射が観測されれば、その天体に磁場があることが確認できるわけである。また、シンクロトロン放射は放射されるとき、磁場の向きに対して垂直に偏光している。シンクロトロン放射の偏光面を観測できれば、視線に対して垂直成分に関する磁場の方向も確認することができる。もうひとつ、磁場の構造の特定を可能にする有用な現象として、ファラデー回転がある。直線偏光した光が磁場中を通過すると、その偏光面が回転するのである。回転の度合いは、光の進む向きに平行な磁場の強さとその光の波長の二乗に比例する。

$$\chi = \chi_0 + RM\lambda^2 \tag{1}$$

χ は観測で得られる偏光角、χ_0 は回転を受ける前の初期偏光角である。比例定数を RM(Rotation Measure) で置くことにし、次の積分量で表される。

$$RM = 0.81 \int_l^0 \left(\frac{n_e}{cm^{-3}}\right)\left(\frac{B_\parallel}{\mu G}\right)\left(\frac{dr}{pc}\right) \tag{2}$$

n_e は電子密度、$B_\parallel$ は磁場の視線方向に平行な成分、dr は視線上の線素である。この積分は天体から観測者に向かって行われ、磁場が観測者の方を向いていると正になる。非常にシンプルな状況（例えば、視線方向上にある一様な磁場、その奥に薄い銀河が一つ）においては、電波の偏光角を複数の波長に渡って観測し、それらをグラフにプロット、線形近似すれば、その傾きが RM の値となり同時に初期偏光角を得られる。これにより、磁場の 3 次元構造が分かる。

しかし、一般的な状況では先の方法で RM、初期偏光角を求めることはできない。ほとんどの場合、観測データをグラフにプロットしても線形にはならずに複雑な形になり、そこから RM を推定することはできなくなる。そこで、RM 観測を応用し、新しい方法として注目を集めたのが、Burn の提唱したファラデートモグラフィー（直線偏波磁場断層解析法）である。ファラデートモグラフィーは観測量である複素偏光強度の視線上分布を与える。複素偏光強度は観測量となるストークスパラメータ Q、U から自動的に決まる。

$$P = Q + iU \tag{3}$$

さらに、観測者から位置 r までの RM を $\phi(r)$ で置き、新たにファラデー深度と呼ぶことにする。すると、ϕ は $-\infty$ から ∞ まで取れるので、複素偏光強度を ϕ 空間で分解することができる。

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

上式の $F(\phi)$ をファラデー分散関数 (Faraday dispersion function) と呼ぶことにし、今後は FDF と書くことにする。FDF は ϕ 空間上の複素偏光強度の分布を表している。

さて、(4) 式をよく見ると、フーリエ変換の形になっている。ゆえに逆変換を考えることができる。

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

$P(\lambda^2)$ は観測量であるから、(5) 式はそれを全波長で積分してあげれば FDF が求まることを表している。観測量から磁場の情報を、完全ではないものの引き出せることになる。

しかしながら、ファラデートモグラフィーの実用にはまだ問題がある。現実的に、スペクトルを全波長に渡って観測することは不可能である。観測できる 帯域のみを用いて積分を行うと、真の分布とは異なる不完全な FDF になる。この問題を解決するのが我々の研究目的である。

2 QU-fittng

前節で記したとおり、複素偏光強度を観測帯域中でフーリエ変換するだけでは真の分布は導けない。この問題を解決するべく、我々が本研究で取り組んでいるのが QU-fitting とよばれる手法である。QU-fiitng は、ファラデートモグラフィーを実行するためのソフトウェアである。これはマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) を応用したもので、予め FDF のモデルを仮定し、それらをフィッティングすることで真の分布を導こうとするのである。フィッティングするにあたって、モデルを複素偏光強度にフーリエ変換するのだがこの場合、モデルの ϕ に制限はなく完全なフーリエ変換を行うことができる。QU-Fittng は次の手順で行われる。

１）複数の FDF のモデルを仮定する。宇宙磁場解析において、デルタ関数や、ガウス関数、トップハット関数などがモデルに使われる。それぞれのモデルは、モデルを形成するパラメータを持つ。例としてガウス関数のパラメータは、平均、分散、振幅、偏光角である。

２）マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて、それぞれのモデルを観測データにフィッティングし、モデルの各パラメータに対して最尤推定値と信頼区間を得る。

３）最尤推定値を当てはめたモデルを情報量基準（AIC、BIC）によって比較し、最も真の分布に近いモデルを決定する。

3 Results and Discussion

ここに、シュミレーションによって作成した擬似観測データに対して実際に QU-fitting を行った結果を示す。状況としては、視線上に薄い銀河が 2 個離れて分布している構造を考える。この２つの銀河は、FDF 上では２個のデルタ関数となって現れる。この FDF を我々が QU-fitting を使って求めたい真の FDF とし、この FDF をフーリエ変換した後、正規乱数で生成されたノイズをかぶせてこれを擬似観測データとした。1 つ目のデルタ関数のパラメータはそれぞれ、$Amp_1 = 25.00$、$\phi_1 = -37.84$、$\chi_{01} = 0(^\circ)$ で、2 つ目のパラメータは $Amp_2 = 16.7$、$\phi_2 = 103.18$、$\chi_{02} = -36(^\circ)$ となっている。Amp は振幅、ϕ は平均、χ_0 は初期偏光角をそれぞれ表している。今回は QU-fitting するとき、モデルとしてデルタ関数が 2 個存在する分布を採用する。QU-fitting を用いて、各パラメータの値をどの程度特定出来るのかを見る。MCMC を 100,000 回動かして、パラメータがどのように推移しているか、次のページの図に表した。

4 Conclusion

図から各パラメータの推移を見ると、振幅、ファラデー深度に関しては正解の値付近によく収束しているのが分かる。偏光角に関しては一見正解の値と

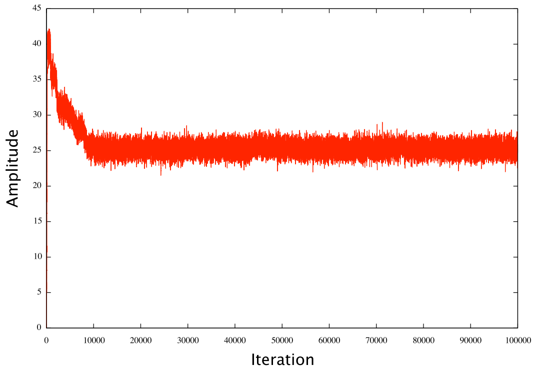

図 1: Amp_1 の推移

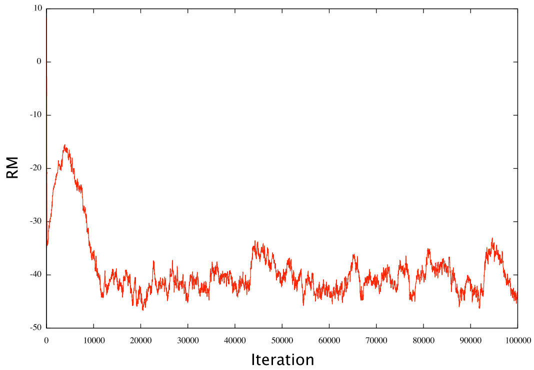

図 2: ϕ_1 の推移

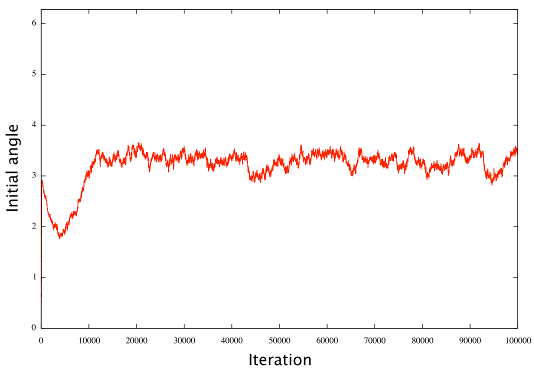

図 3: χ_{01} の推移

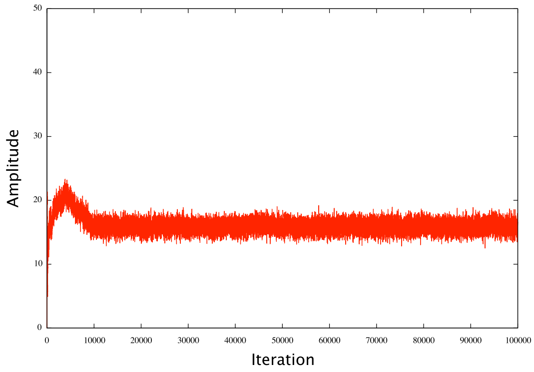

図 4: Amp_2 の推移

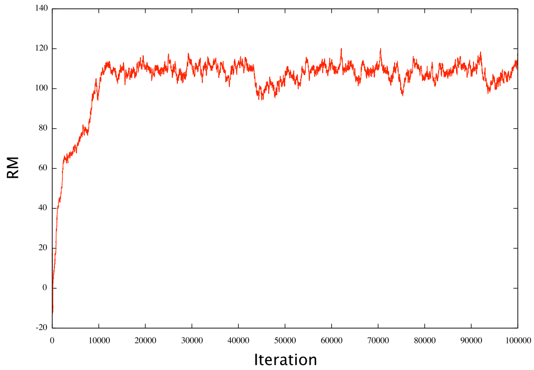

図 5: ϕ_2 の推移

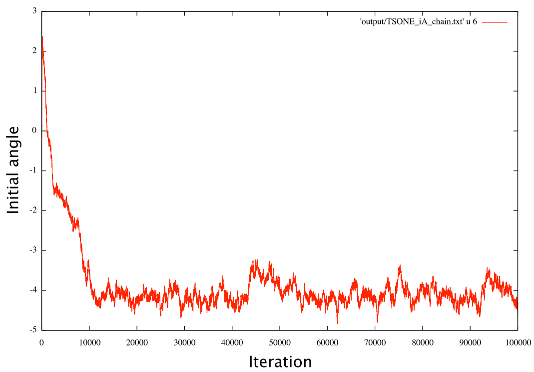

図 6: χ_{02} の推移

ずれているように見えるが、偏光角は $n\pi$ で縮退していることを考慮すれば、結局は正解の値に収束していることになる。このように、QU-fitting を用いることで、天体のパラメータを推測することができる。マルコフ連鎖モンテカルロ法の利点を活かして、比較的少ない計算量で効率的な数値計算を行える。しかし、QU-fitting にはまだ多くの課題を抱えている。より現実的な分布を調べたいとき、モデルのパラメータがより多く必要になってくると計算量が指数関数的に増大する。また、モデルとして、慣習的にデル

タ関数やガウス関数を用いているが、銀河の FDF がそれらの関数で表される信憑性はどの程度あるのか。最尤推定値が得られたモデルを比較するとき、AIC、BIC が果たして最も真の分布に近いモデルを選択できるのか。などである。

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

Ideguchi, S., Tashiro, Y.,Akahori, T., Takahashi, K., & Ryu, D. 2014 ApJ 792 51