

## 銀河磁場の FDF

田代 雄一 (熊本大学大学院 自然科学研究科)

### Abstract

宇宙での磁場観測の一つに Faraday rotation を用いるものがある。これを応用して、FDF (Faraday dispersion function) という概念が Burn によって導入された。これと Faraday depth を用いると、磁場や放射領域に関する情報を得ることが出来る。従来、Faraday depth 空間における銀河の FDF を簡単のため正規分布としてきたが、我々はここに着目し Faraday depth 空間での銀河の FDF の形を探っていく。

## 1 Introduction

電子が磁力線に垂直に運動する場合、電子は進行方向と磁力線とで作る平面に対して垂直にローレンツ力を受けるため、磁力線に垂直な面内で旋回運動を行う。一方、磁力線に平行に運動する場合には、ローレンツ力が働かないため、電子は磁力線に沿った直線運動を行う。その結果、電子は一般に磁力線からみついたらせん運動を行う。

電子の速度が光速に近い相対論的電子の場合には、ローレンツ力による加速度は非常に大きくなる。そのため、相対論的電子は、磁力線に垂直な速度ベクトルの方向に非常に狭い領域に絶えず電磁波を放射しながら、次第に運動エネルギーを失っていく。このとき放射される電波がシンクロトロン放射である。このシンクロトロン放射は、磁場に垂直な向きに強く直線偏波するという性質を持っている。従って、磁力線はシンクロトロン放射が発せられた場所に対して垂直となる。このことから、シンクロトロン放射の偏波面が分かれば、磁力線の形を知ることが出来る。

一方、シンクロトロン放射などの直線偏波の電波が、磁場と自由電子（通常の星間ガスが電離して生じたもので、シンクロトロン放射を出す相対論的電子とは別なもの）を含む空間を伝わっていく間に、偏波面が回転する現象が起こる。直線偏波は、同じ強度と同じ位相速度を持つ 2 つの円偏波（電波の進行方向に対して左回りを L 波、右回りを R 波）の電波が合成されたものである。円偏波が磁場と自由電子を含む星間ガス中を伝わっていくとき、自由電子は

電波の電波ベクトルの変化に応じて運動するが、その運動はローレンツ力による旋回運動となる。電子は磁力線の方向に対して常に右回りに旋回するので、磁場が電波の進行方向に向いている場合は、R 波の電場ベクトルの回転方向が電子の旋回方向と一致する。従って、自由電子は L 波よりも R 波に強く反応し、R 波と自由電子の相互作用が大きくなるため、R 波の伝搬速度が L 波よりも少し遅くなる。その結果、電波源から放射された直線偏波が観測者に到達したときは、ゆっくりと進む R 波の方が、速く進む L 波より沢山回転していることになる。つまり、L 波と R 波の合成である直線偏波の偏波面は、自由電子と磁場の存在する空間を伝搬する間に R 波の回転方向に回転する。これを Faraday rotation と呼ぶ。

Faraday rotation による偏波面の回転角  $\chi$  は電波の波長を  $\lambda$  とすれば、

$$\chi(\lambda^2) = RM \times \lambda^2 \quad (1)$$

となる。RM は Faraday rotation の回転度量と呼ばれる量で、

$$RM = 810 \text{ rad m}^{-2} \int n_e B_{\parallel} dr \quad (2)$$

によって与えられる。ここで、 $n_e$  は電子密度、 $B_{\parallel}$  は磁場の視線方向成分で積分は源から観測者まで行われる。 $n_e$ 、 $B_{\parallel}$ 、 $dr$  の単位はそれぞれ  $[\text{cm}^{-3}]$ 、 $[\mu\text{G}]$ 、 $[\text{kpc}]$  である。磁場が観測者に向いているとき  $RM > 0$  となる。電波源から偏波角  $\chi_0$  で放射されたシンクロトロン放射は、

$$\chi(\lambda^2) = \chi_0 + RM\lambda^2 \quad (3)$$

の偏波角で観測される。よって、ある天体からの電波の偏波角  $\chi$  を複数の波長で観測すれば、RM の値とシンクロトロン放射が発せられた位置での偏波角  $\chi_0$  を求めることが出来る。これらの RM と  $\chi_0$  の値を組み合わせれば、磁場の 3 次元的情報を知ることが出来る。

## 2 Methods

Faraday rotation を利用すると、ターゲットとなる天体の背景にある偏光電波源を多数観測することによってターゲットの磁場の構造を知ることが出来る。しかし、Faraday rotation から磁場の情報を得るのは容易ではない。RM は源から観測者までの積分なので、その間にある銀河、源の磁場の寄与の差し引き方が問題になる。また、放射領域に磁場が存在してしかも広がりを持っている場合、depolarization(放射領域の手前と奥では Faraday rotation を受ける度合いが異なるため、偏光がキャンセルして偏光度が小さくなる現象)が起こる。放射領域が広がりを持っているかどうかの基準は、その領域での回転角  $RM\lambda^2$  が 1 より大きい小さいかである。 $RM\lambda^2 \gg 1$  のとき Faraday thick、 $RM\lambda^2 \ll 1$  のとき Faraday thin と呼ぶ。また、Faraday thin 源は  $\phi$  のディラックのデルタ関数によってよく近似される。図 1 は、Faraday thin な銀河系外の偏光電波源と銀河系を想定した faraday thick な放射領域がある場合の偏光度と偏光角を波長の関数としてグラフにしたものである。偏光角は複雑に変化していて、磁場を見積もることは出来ない。

Burn は、磁場や放射領域に関する情報を引き出す方法を示した。まず、Faraday depth  $\phi$  と RM を区別する。

$$\phi = \int n_e B_{\parallel} dx \quad (4)$$

$$RM = \frac{d\chi(\lambda^2)}{d\lambda^2} \quad (5)$$

ここで、

$$\chi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{U}{Q} \quad (6)$$

$Q, U$  はストークスパラメーター、 $x$  は観測者から源に向かう座標である。Faraday depth は磁場で測った距離を表している。

Burn はまた、complex Faraday dispersion function  $F(\phi)$  を次のように導入した。

$$P(\lambda^2) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\phi) e^{2i\phi\lambda^2} d\phi \quad (7)$$

$P(\lambda^2)$  は、complex polarized surface brightness で、放射を表している。また、 $F(\phi)$  は単位 Faraday depth 当たりの放射を表している。 $P$  は、

$$P = Q + iU \quad (8)$$

とも書くことが出来る。

我々が知りたいのは  $F(\phi)$  であり、 $P(\lambda^2)$  と  $F(\phi)$  はフーリエ変換で結びついているような形になっているので、 $F(\phi)$  は逆変換によって得られる。観測によって  $P(\lambda^2)$  を与えることによって、 $F(\phi)$  を再現することが出来る。これを Faraday rotation measure synthesis とよぶ。

これらを用いて、Faraday depth 空間での銀河の FDF (Faraday dispersion function) を求める。FDF は偏波の明るさなので、ストークスパラメーター  $Q, U$  のデータが必要となってくる。また、Faraday depth は磁場と電子密度のデータを与えることで、得ることが出来る。

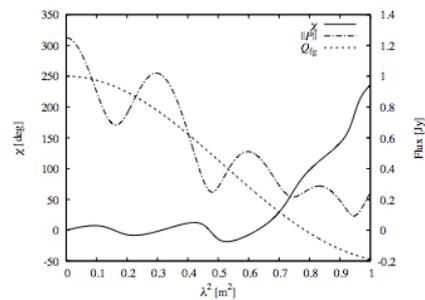


図 1: 銀河系外の高電波源と銀河系を想定したような放射領域がある場合の偏光度  $\|P\|$  と偏光角  $\chi$ 、ストークス  $Q$  パラメーター。(Reference[1] より引用)

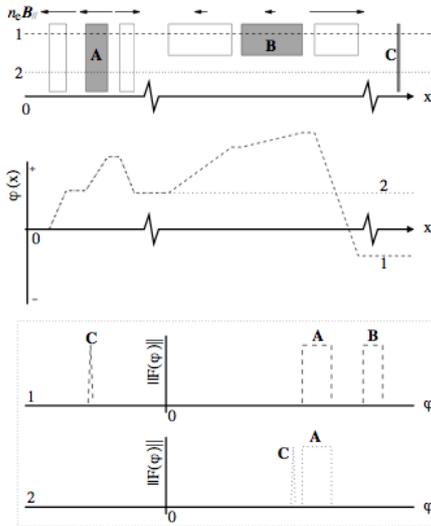


図 2: 一般的な状況での  $n_e B_{||}$ 、空間的位置  $x$ 、Faraday depth  $\phi(x)$ 、Faraday dispersion function  $F(\phi)$ 。一番上が実空間での配置で 3 つの放射領域 (A,B,C) がある。A と B は Faraday thick、つまり放射とともに faraday rotation にも寄与する領域である。1 と 2 の横線は 2 つの視線方向で 1 は A,B,C すべてを通るが 2 は A,C だけを通過する。2 番目の図は Faraday depth と実空間の関係を表している。1 番下の図は上、真ん中の図の情報をもとに得られる、Faraday depth 空間での Faraday dispersion function を表している。(Reference[1] より引用)

### 3 Results

Q,U パラメーター、磁場、電子密度のモデルデータを与え、得られた銀河の FDF の結果を以下に示す。モデルデータは、銀河を face-on で見た場合を想定していて、原点が銀河系における太陽の位置 (銀河中心からの距離 8.5kpc を仮定)、x 軸が銀河円盤平面で銀河中心から太陽に向かう方向と垂直の方向、y 軸が銀河円盤平面で銀河中心から太陽に向かう方向、z 軸が銀河円盤平面に垂直方向を座標系として設定されている。また、FDF を描く際の Faraday depth の bin の幅は、 $0.1 \text{ rad/m}^2$  とした。FDF、Faraday depth の単位はそれぞれ  $[\mu\text{Jy}]$ 、 $[\text{rad/m}^2]$  としている。

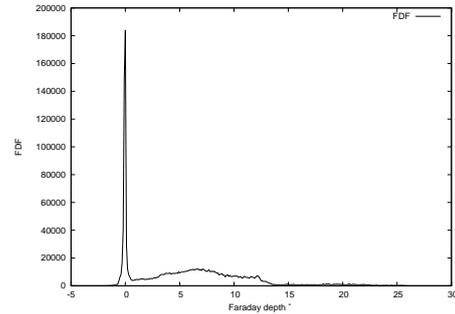


図 3: 垂直磁場なし、全グリッドで得られた FDF

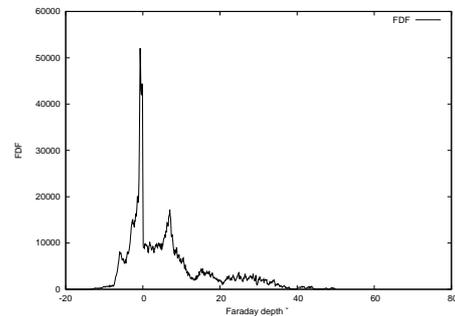


図 4: 垂直磁場あり、全グリッドで得られた FDF

### Reference

- [1] M. A. Brentjens (1,2), A. G. de Bruyn (2,1), ((1) Kapteyn Astronomical Institute, (2) ASTRON), arXiv:astro-ph/0507349v2
- [2] Takuya Akahori (1,2), Dongsu Ryu (3), Jongsoo Kim (1), B. M. Gaensler (2), arXiv:1303.1595 [astro-ph.GA]
- [3] Takuya Akahori (1,2), Dongsu Ryu (3), Jongsoo Kim (1), B. M. Gaensler (2), arXiv:1303.1595 [astro-ph.GA] Strassmeier, K. G., and J. E. Beckman. "The faraday rotation measure synthesis technique." (2009).
- [4] 「活動する宇宙」 柴田一成、福江純、松本亮治、嶺重慎 共編、裳華房、1999 年
- [5] 「宇宙磁場に関する最先端・未解決問題」、SKA-Japan sub-Science Working Group "Cosmic Magnetism"