

# 銀河のFaraday dispersion function

田代雄一（熊本大学）、出口真輔（熊本大学）、赤堀卓也（シドニー大学）、熊崎亘平（名古屋大学）、高橋慶太郎（熊本大学）

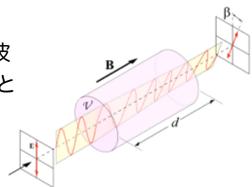
## 1, はじめに

観測された偏光スペクトルから、偏波源の分布を再現するのに強力な手段として、Faraday rotation measure synthesis がある。この手段の中にFDFという概念がある。今回、観測データや乱流の数値シミュレーションをもとにした銀河モデルを用いて、銀河のFDFの計算を行った。従来、銀河のFDFは矩形関数やガウス関数などを用いて簡単に表現していたが、本研究では、銀河のFDFは複雑であることを示し、銀河モデルによってFDFの形状に特徴が現れることを見ていく。

## 2, Faraday rotation

天体と観測者の間に磁場が走っていると、伝搬途中で偏波面が回転するという現象が生じる。これをFaraday rotationと呼ぶ。偏波面の向きは、

$$\theta = \theta_0 + RM\lambda^2$$



のように観測される。ここで $\theta_0$ は放射源での偏波の向きで、磁場の向きに直角である。RMを観測で求めるには、2つ以上の異なる波長で偏波角 $\theta$ を測定して $\lambda^2$  ( $\lambda$ :波長)を横軸にとってプロットし、その勾配を最小二乗法で求める。この方法で、 $\theta_0$ も同時に求められる。

## 3, Faraday rotation measure synthesis

複素偏光強度Pについて次式が成り立つ。

$$P(\lambda^2) = pI(\lambda^2) = Q(\lambda^2) + iU(\lambda^2) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\phi)e^{2i\phi\lambda^2} d\phi$$

ここで、 $\lambda$ は波長、 $p$ は複素微小偏光、 $I, Q, U$ はストークスパラメーターである。 $F(\phi)$ は、Faraday dispersion function (FDF)のことで、これはFaraday depth  $\phi$ 当たりの複素偏光強度のことである。また、Faraday depthは、

$$\phi(x) = 810 \int_x^0 \left( \frac{n_e(x')}{1\text{cm}^{-3}} \right) \left( \frac{B_{||}(x')}{1\mu\text{G}} \right) \left( \frac{dx'}{1\text{kpc}} \right) [\text{rad/m}^2]$$

ここで、 $x$ はソースまでの距離、 $n_e$ は電子密度[ $\text{cm}^{-3}$ ]、 $B_{||}$ は磁場の視線方向成分[ $\mu\text{G}$ ]、 $x'$ は物理的距離[kpc]を表している。また、FDFは、

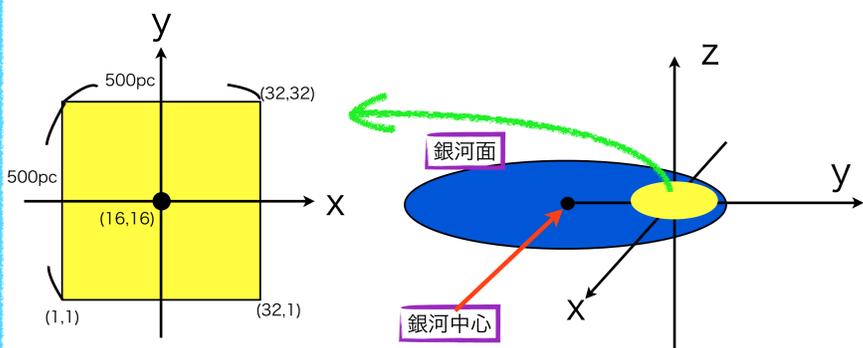
$$F(\phi) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda^2)e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$

この式を使って、観測される偏光スペクトル $P(\lambda^2)$ からFDFを得ることが出来る。この一連の手順をFaraday rotation measure synthesisと呼ぶ。

## 4, FDFの解釈

銀河モデルとしてAkahori et al. (2013)による計算結果を用いた。計算領域は太陽系を中心としている。

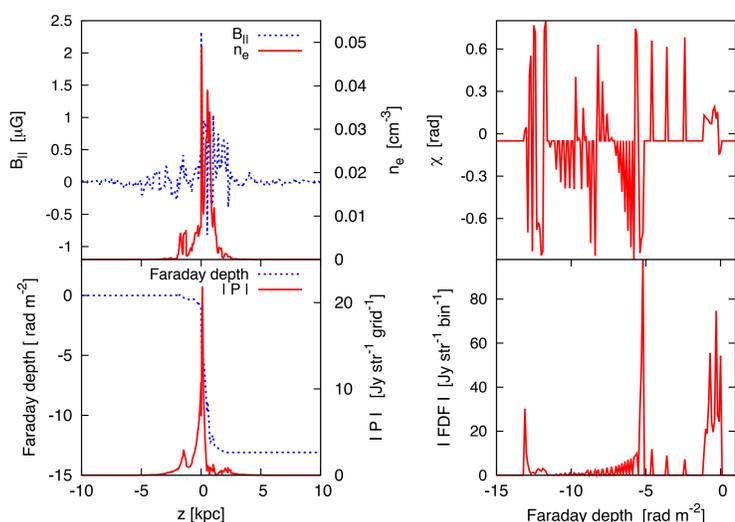
大局的な密度・磁場・宇宙線の分布…観測地に基づく  
乱流的な密度・磁場…MHD乱流の計算値に基づく



計算範囲

-0.25 kpc < x < 0.25 kpc (32等格子間隔)  
-0.25 kpc < y < 0.25 kpc (32等格子間隔)  
-10.0 kpc < z < 10.0 kpc (1280等格子間隔)

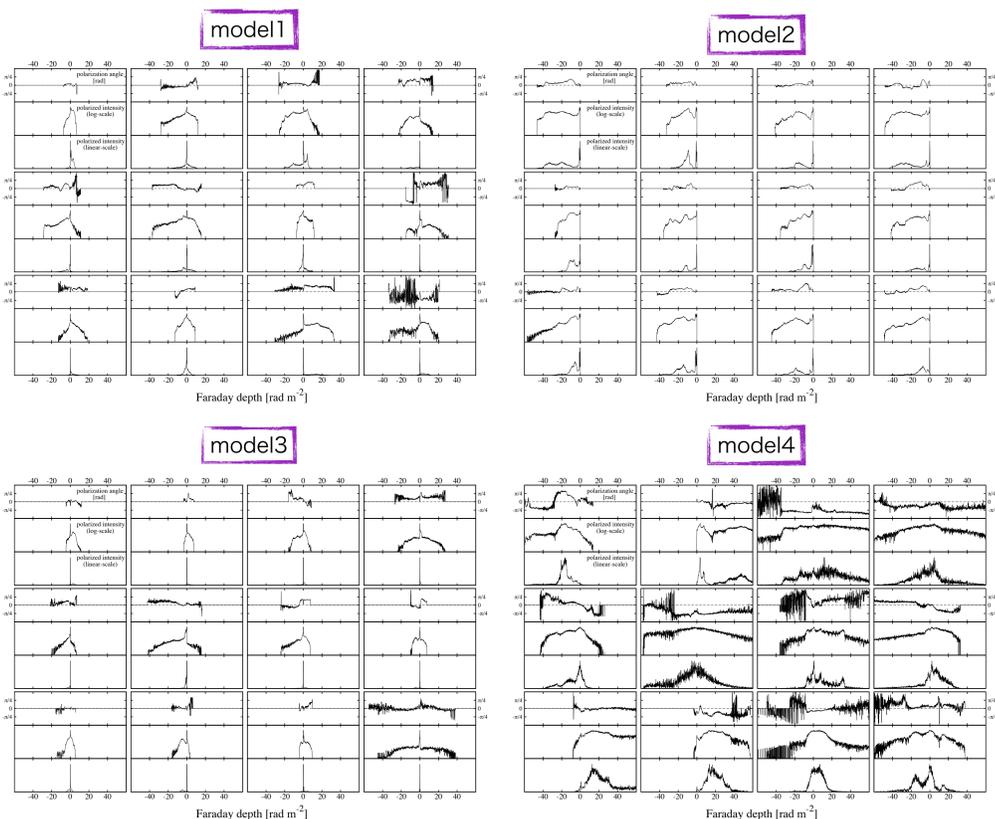
16x16pc (1グリッド)の領域をface-onで見たときのFDF



## 5, 銀河モデル

銀河のグローバルな性質は、FDFの形に反映される。そこで、我々の銀河のグローバルな性質の違いによって、モデル分けを行った。次の図は、上は偏光角、真ん中はlog-scaleのFDF,下は通常のスケールでのFDFをモデルごとに描いている。モデルの中で形が異なるのは、乱流の形状が異なるためである。

モデル	垂直磁場	宇宙線電子	熱的電子
model1	なし	1 kpc	1 kpc
model2	1 $\mu\text{G}$	1 kpc	1 kpc
model3	なし	3kpc	1 kpc
model4	なし	1 kpc	3kpc

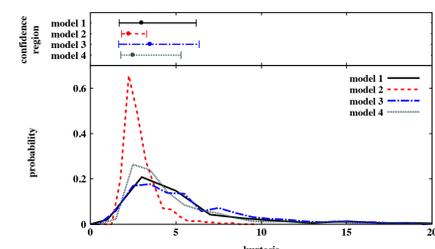
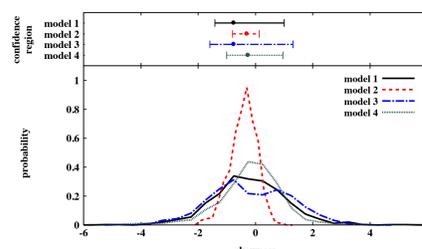
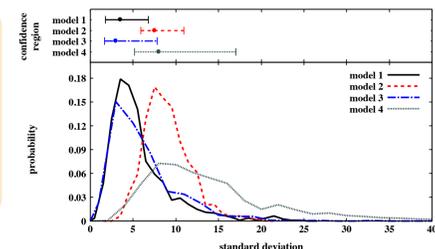


## 6, 統計的指標

ここで、 $F$ はFDF、 $\phi_i$ はi番目のbinのFaraday depthの値。また下の図は、標準偏差、歪度、尖度の確率密度関数とその $1\sigma$ の範囲を示している。

$$\text{標準偏差 } \sigma^2 = \frac{\sum_i F(\phi_i)(\phi_i - \mu)^2}{\sum_i F(\phi_i)} \quad \text{尖度 } \gamma_k = \frac{\sum_i F(\phi_i)(\phi_i - \mu)^4}{\sum_i F(\phi_i)}$$

$$\text{歪度 } \gamma_s = \frac{\sum_i F(\phi_i)(\phi_i - \mu)^3}{\sum_i F(\phi_i)} \quad \text{平均 } \mu = \frac{\sum_i F(\phi_i)\phi_i}{\sum_i F(\phi_i)}$$

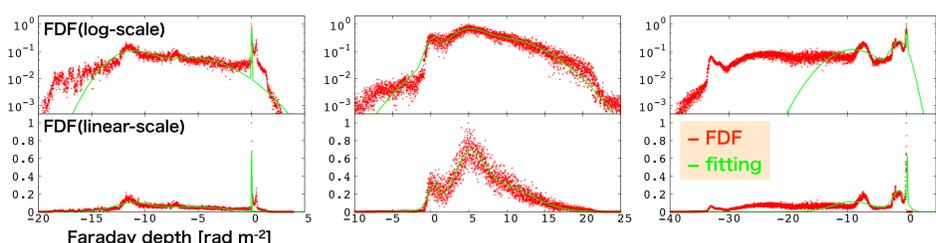


## 7, まとめ

一般にFDFは実空間の偏光強度の分布と1対1の対応をしていなく、また、FDFは複雑であるので、直接解釈を得るのは容易ではない。今回、現実的な銀河のモデルを用いて、銀河のFDFを求めた。FDFは、磁場、熱的・宇宙線電子の分布に反映されるので、それらの分布を変えて、銀河をモデル分けしてFDFを調べた。しかし、FDFの形はグローバルな性質が同じでも、乱流の形状によって様々な形をとる。そこで、FDFの形を特徴付ける為に、その標準偏差、歪度、尖度の確率密度関数を計算し、モデルごとに比較した。そして、垂直磁場があるとき、熱的電子のscale height が大きいとしたモデルでは、標準偏差が大きくなるのが分かった。対照的に、歪度と尖度の違いは顕著に現れなかった。

## Appendix ~ガウス関数によるFDFのフィッティング~

銀河をface-onで見ると放射領域は基本的に、視線方向に沿って“ハロー・銀河面・ハロー”である。ここでは銀河のFDFをガウス関数3つ(ハローと銀河面に対応)でどれほど再現できるかを見る。



## Reference

Akahori, T., Ryu, D., Kim, J., & Gaensler, B. M. 2013, ApJ, 767, 150  
Beck, R., Frick, P., Stepanov, R. & Sokoloff, D. 2012, A&A, 543, A113  
Brentjens, M. A., & de Bruyn, A. G. 2005, A&A, 441, 1217  
Burn, B. J. 1966, MNRAS, 133, 67  
Farnsworth, D., Rudnick, L., & Brown, S. AJ, 141, 28