

Faraday tomographyを用いた宇宙磁場観測

出口 真輔 (熊本大学 D1)

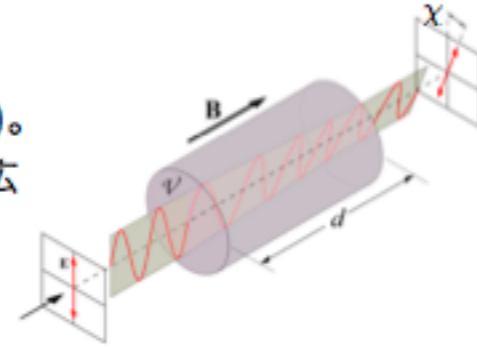
▶ イントロダクション

宇宙の様々な天体はそれ固有の磁場を持っており、磁場と天体の活動の間には密接な関係があるが、磁場の起源はいまだに謎である。磁場の起源として、宇宙進化のある段階で種磁場ができ、それが天体活動によって増幅・維持されているとするモデルがあり、それらは宇宙の様々な段階において様々な過程で種磁場ができたとしている。天体に取り込まれなかった種磁場は天体の活動で乱されることなく、初期の情報を保っていると考えられ、銀河間磁場 (intergalactic magnetic field, IGMF) はその良い対象となる。初期磁場の情報が得られれば、磁場生成モデルを区別でき、宇宙進化の情報を引き出せる。

このように、宇宙磁場の理解は宇宙論の重要な課題の一つである。ここでは、非常に弱いと考えられているIGMFを観測する手段として、Faraday tomographyについて述べる。

▶ Faraday tomography

偏光が磁場の中を通過すると、その偏光面が回転する(Faraday rotation)。Faraday tomographyはFaraday rotationの効果を受けた電磁波(電波)を帯域で観測することで、磁場の分布を断層的に引き出す方法である。



● Faraday rotation measure(RM)

$$\chi = (RM)\lambda^2 + \chi_0 \quad \left(\chi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{U}{Q}\right) \Rightarrow \text{偏光面の回転角度}(\chi) \text{は波長の2乗に比例}$$

$$RM \simeq 0.81 \frac{\text{rad}}{m^2} \int_0^l \left(\frac{n_e}{\text{cm}^{-3}}\right) \left(\frac{B_{\parallel}}{\mu\text{G}}\right) \left(\frac{dl}{\text{Mpc}}\right) \Rightarrow \text{電子密度} \times \text{磁場の強さを視線方向に足したものに比例}$$

RMを測ることで、視線方向の磁場の情報 (ソースまで全て積分したもの) が引き出せる。

● Faraday tomography

観測されるpolarized intensity $P(\lambda^2)$ は、放射が起こった場所でのpolarized intensity $F(\phi)$ を使って以下のように表される。

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

どれだけFaraday rotationされたか

Faraday tomography

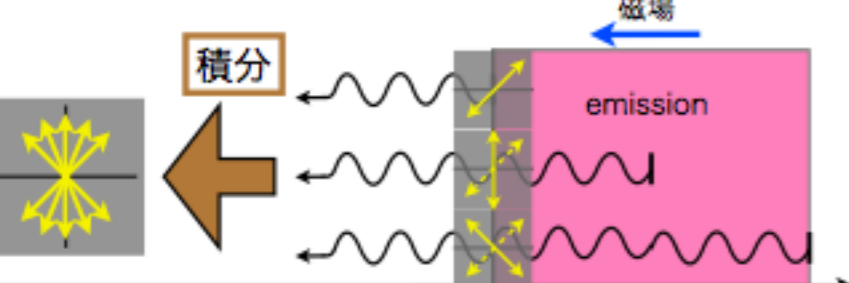
フーリエ変換

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

F(φ)が磁場の情報を持っている

● Depolarization

放射する天体の中に磁場があると、天体内でFaraday rotationが起こる。



天体の奥から出てくる光ほど回転を受ける。観測するのはその積分なので、偏光強度が小さくなる、もしくは無偏光になる。これをDepolarizationという。

Depolarizationは天体内の磁場の強さに依存し、天体の物理的な広がりには関係ない。⇒別の指標(Faraday depth)

● Faraday depth (φ)

$$\phi(\mathbf{r}) = 0.81 \int_{\text{there}}^{\text{here}} n_e \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} \text{ rad m}^{-2}$$

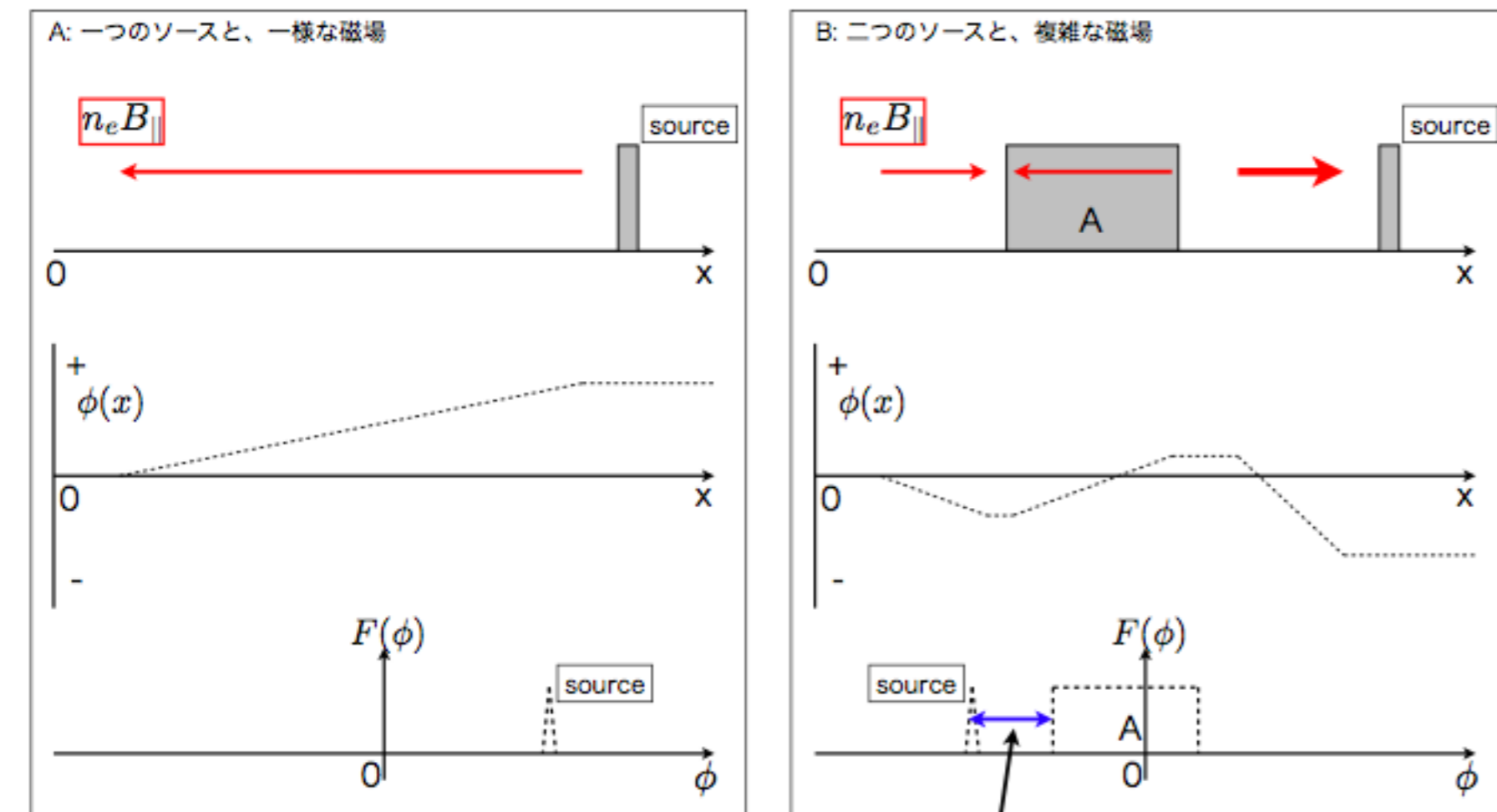
「磁場で測った距離」のようなもの

Depolarization

起こらない... $\lambda^2 \Delta\phi \ll 1$: Faraday thin
起こる... $\gg 1$: Faraday thick

Faraday thin か thick かが、Depolarizationが起こるかどうかの目安になる。

● F(φ)のイメージ



二つのソースが銀河と考えると、ここがIGMFの成分

磁場の情報を断層的に得ることができる。

実際には、観測できる帯域に限界があるため $F(\phi)$ の再現性が悪くなる。

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

・ $\lambda^2 < 0$... 存在しない
・ $\lambda^2 > 0$... 望遠鏡のスペックによる

望遠鏡の観測帯域を考慮

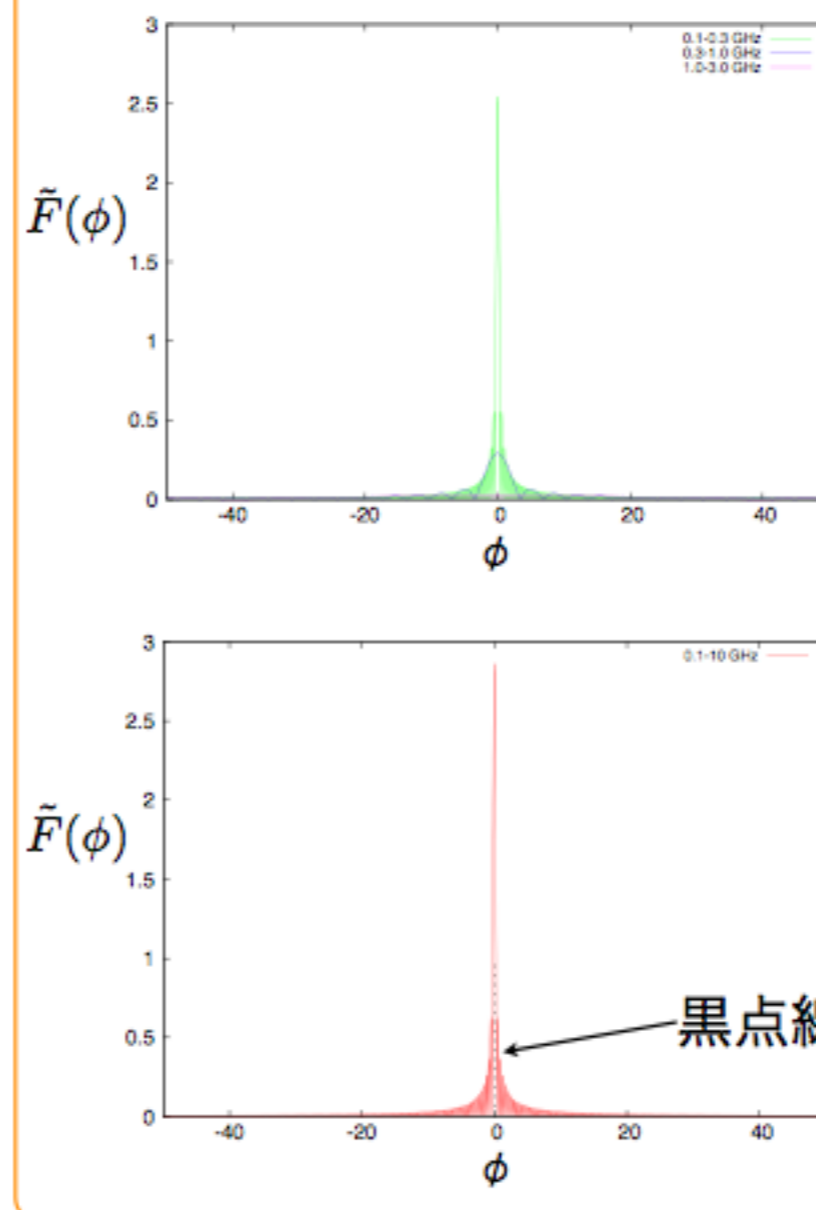
$$\tilde{F}(\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\lambda^2) P(\lambda^2) e^{-2i\phi\lambda^2} d\lambda^2$$

・ $W(\lambda^2)$: Window function
観測した波長で1、それ以外は0

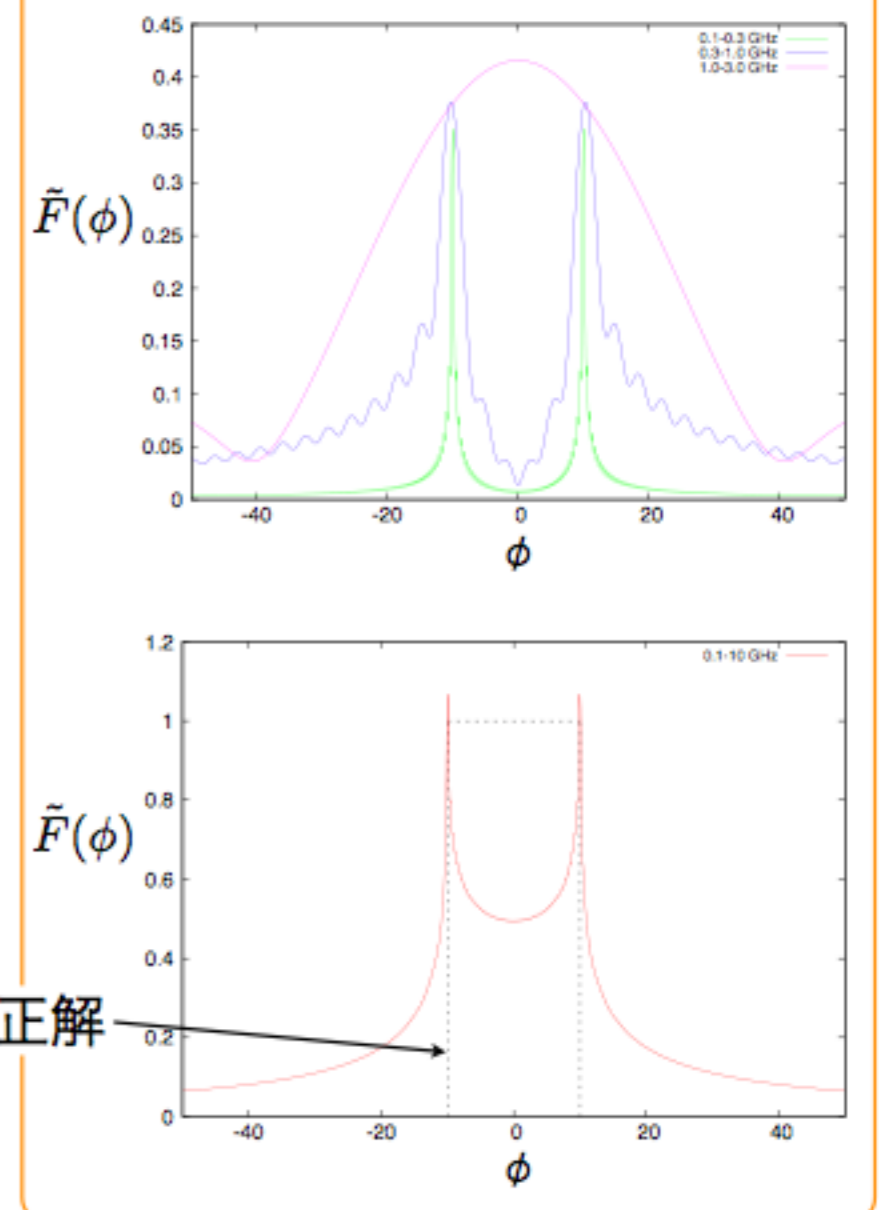
結局、積分範囲は観測できた帯域で決まるため、より良く $F(\phi)$ を再現するためには**なるべく広い帯域**で観測する必要がある。

● 観測帯域ごとの再現性の違い

Faraday thinなソース (正解はdelta関数)



Faraday thickなソース (正解はtop hat)



黒点線が正解

低周波での観測で細かな構造がわかり、広周波での観測で全体の大まかな構造がわかる。 $\lambda^2 > 0$ を考慮すると、上にある程度の再現が限界だが、IGMFの情報は得られると考えられる。

▶ まとめと今後の課題

Faraday tomographyという手法について説明を行った。この手法により、視線方向の磁場分布を断層的に引き出すことができ、IGMFの情報を引き出すことができると期待されている。また、望遠鏡の観測帯域が広いほどFaraday tomographyによる再現性は良くなる。

Faraday tomographyを使ってIGMFの情報を引き出すという意味で、Square Kilometer Array(SKA)という電波望遠鏡が注目されている。SKAは広視野・高分解能・広帯域で観測ができ、とくに70MHz-10GHzという広い帯域はFaraday tomographyに非常に適している。

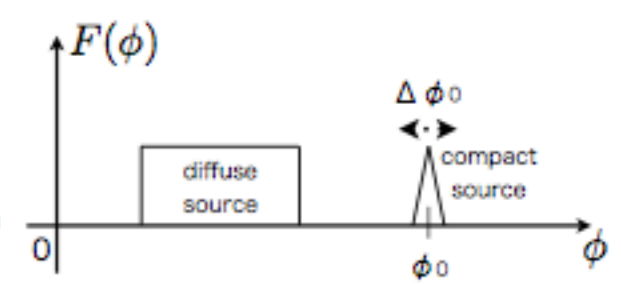
今後は、観測した $P(\lambda^2)$ を磁場分布のモデルでフィッティングすることで、誤差も含めてIGMFがどのくらい制限できるか見積もる。

● フィッティング

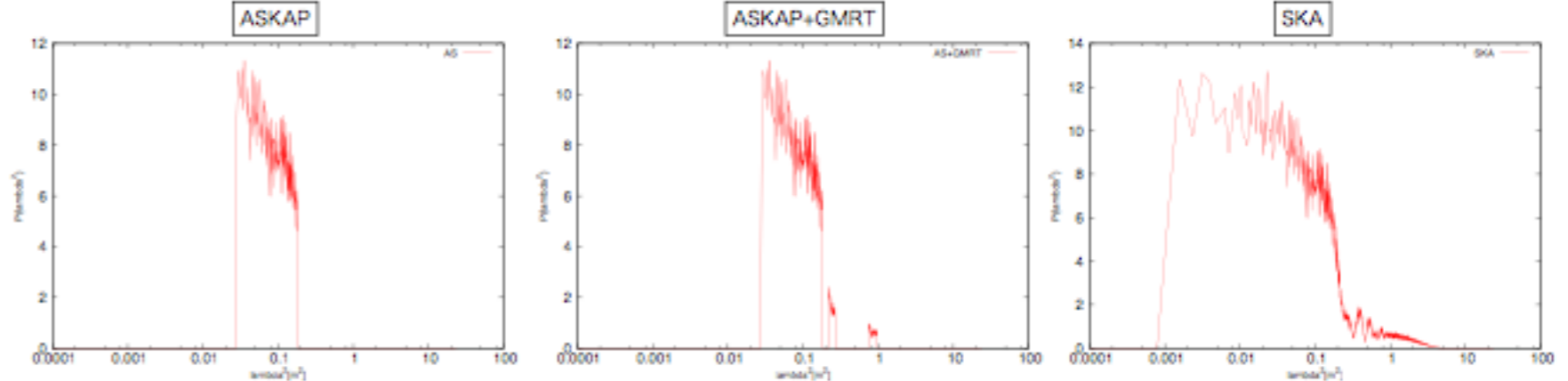
1. $F(\phi)$ を作り、 $P(\lambda^2)$ に変換。その $P(\lambda^2)$ に望遠鏡の帯域を当てはめ、エラーを乗せて仮の観測データ $P(\lambda^2)$ を作る。
2. モデル $F_M(\phi; \phi_0, \Delta\phi_0)$ を作り、フィッティング。(今回はcompact sourceの位置(ϕ_0)と幅($\Delta\phi_0$)をパラメータとした。右図参照)

今回は3つの望遠鏡の帯域で考えた。

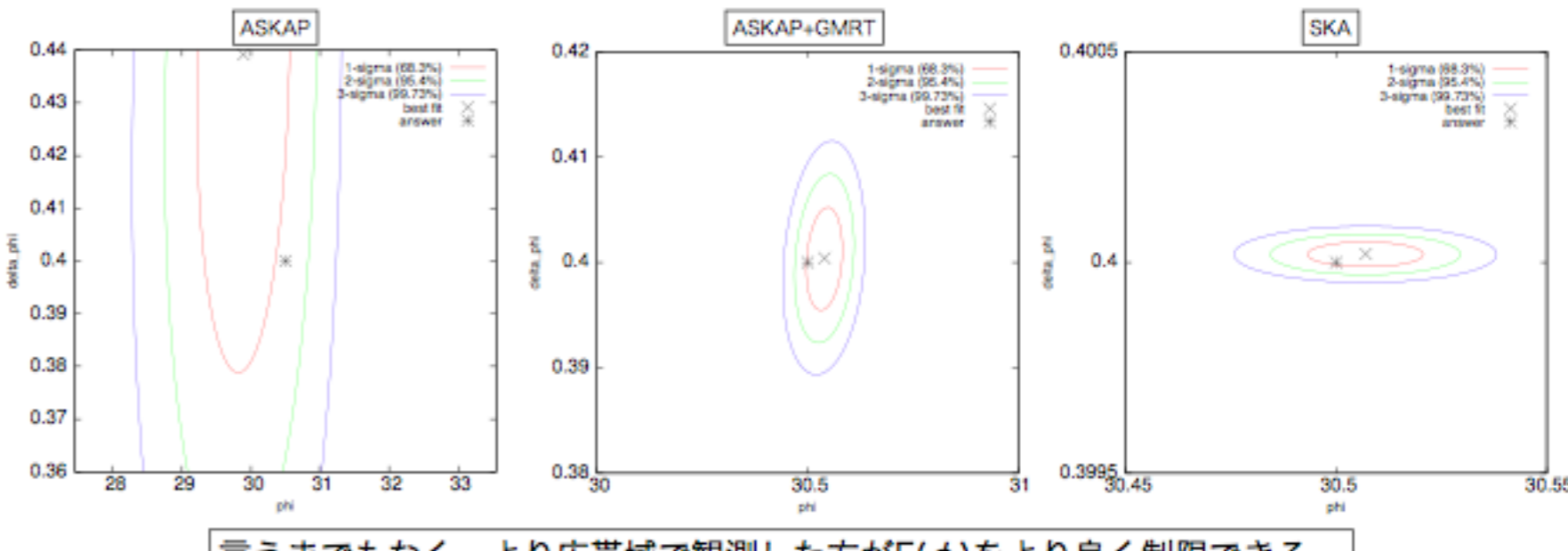
- ASKAP (ASKAP : 0.7-1.8 GHz)
- ASKAP+GMRT (GMRT : 0.58-0.64, 0.305-0.345 GHz)
- SKA (SKA : 0.07-10 GHz)



● P(λ²)



● フィッティング (縦軸がcompact sourceの幅(Δφ₀)、横軸が位置(φ₀))



言うまでもなく、より広帯域で観測した方が $F(\phi)$ をより良く制限できる。