



# Hunting Axion Dark Matter with Protoplanetary Disk Polarimetry

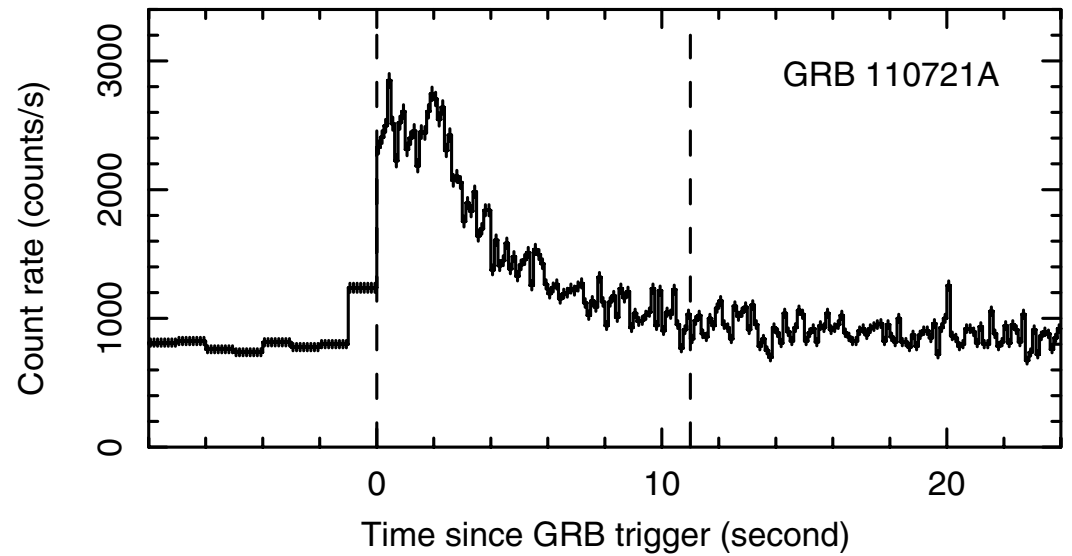
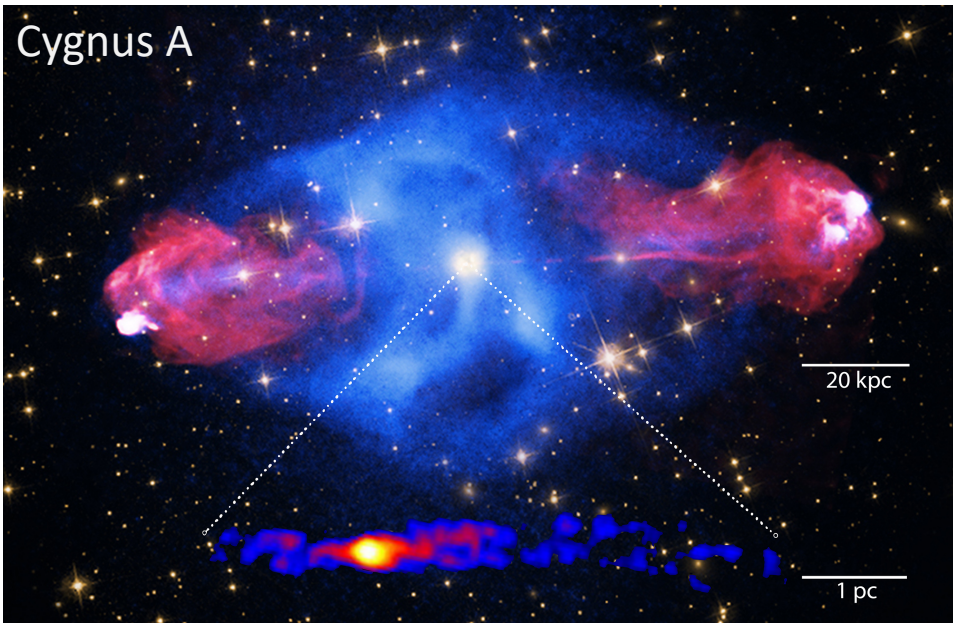
當真 賢二

(東北大 学際研 / 天文学教室兼務)

藤田 智弘、田崎 亮

(京大理) (東北大 天文学教室)







- 各領域に助教が5-10名
- 総括役

# 分野をまたぐ意義



「一人の研究者が、専門領域以上のものを十分把握することは、不可能に近くなった。（中略）この状況を打開するには、誰かが、諸々の事実や理論を総合する仕事に思い切って手を着ける以外ない。たとえその事実や理論の若干については、又聞きで不完全にしか知らなくとも、また物笑いになる危険を冒しても、そうする以外に方法はないだろう」  
（シュレディンガー『生命とは何か』1944、まえがき）

See also:

マルク・ブロック『歴史のための弁明』1997：歴史学

大嶋光昭『ひらめき力の育て方』2010：工学



---

# Essential next steps for gravity and cosmology

June 18-20, 2018  
Tohoku University, Sendai, Japan

---

## Organizers:



Atsushi Naruko (Tohoku U. : Chair), Rampei Kimura (WIAS, Waseda U. : Co-chair),  
Tetsuya Shiromizu (Nagoya U.), Kei-ichi Maeda (Waseda U.)

# ガンマ線バースト偏光とCPT対称性

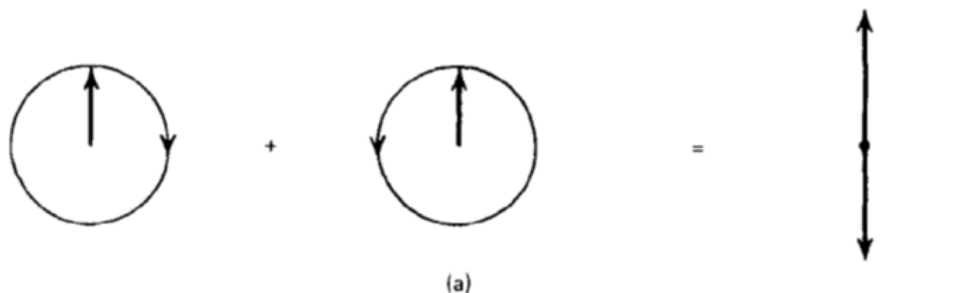


Figure 8.1a Decomposition of linear polarization into components of right and left circular polarization.

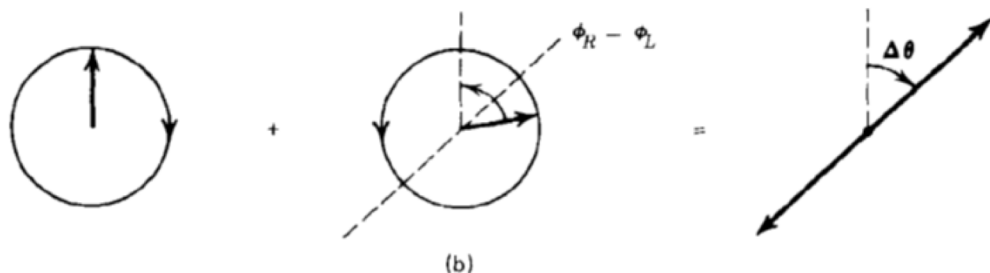


Figure 8.1b Faraday rotation of the plane of polarization.

$$\omega_{\pm} \simeq k \pm \frac{\xi}{M_{\text{pl}}} k^2$$

- 直線偏光面の回転
- **回転角はエネルギー依存**  
広いエネルギーバンドの積分で消偏光
- $\Pi(70\text{-}300\text{keV}) > 35\%$  ( $2\sigma$ )  
for GRB110721A ( $D > 2.5\text{Gpc}$ )

➡  $|\xi| < 2 \times 10^{-15},$

# Axion dark matter scenario

- Axion like particles (ALPs)

$$\phi(t) = \phi_0 \cos(mt + \delta)$$

$$\langle P \rangle = \left\langle \frac{1}{2} (\dot{\phi}^2 - m^2 \phi^2) \right\rangle \rightarrow 0 \quad m \gg H_{\text{rec}} \sim 10^{-27} \text{ eV}$$

- 構造形成の問題の解決案 (wave or “fuzzy” DM)

➤ Core-cusp problem, satellite problem etc.

$$r \sim \frac{GM}{v^2} > \frac{\hbar}{mv} \quad \rightarrow \quad r > \frac{\hbar^2}{GMm^2} \\ \simeq 0.1 \frac{10^9 M_{\odot}}{M} \left( \frac{10^{-22} \text{ eV}}{m} \right)^2 \text{ kpc}$$

# Axion-photon coupling

$$\mathcal{L}_{a\gamma} = -g_{a\gamma}\phi F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}/4.$$

→  $\ddot{A}_i - \nabla^2 A_i = -g_{g\gamma}\dot{\phi}(t)\epsilon_{ijk}\partial_j A_k$

- Primakoff 効果 (axion-photon conversion)  
静磁場の下で $\phi$ がAのソースとなる
- Birefringence (複屈折)  
振動 $\phi$ 場の下でAの分散関係が真空と異なる

# Birefringence

$$\omega_{\pm} \simeq k \pm \underbrace{\frac{1}{2} g_{a\gamma} \dot{\phi}}_{\equiv \delta\omega}$$

$$\delta\omega \equiv \frac{1}{2} g_{a\gamma} \phi_0 m \sin(mt + \delta)$$

$$\theta(t, T) = - \int_t^{t+T} \delta\omega(t) dt,$$

$$\approx 2 \times 10^{-2} \sin\left(\frac{mT}{2}\right) \sin\left(mt + \frac{mT}{2} + \delta\right) \frac{g_{a\gamma}/10^{-12} \text{ GeV}^{-1}}{m/10^{-22} \text{ eV}}$$

- 回転角はエネルギーに依存しない

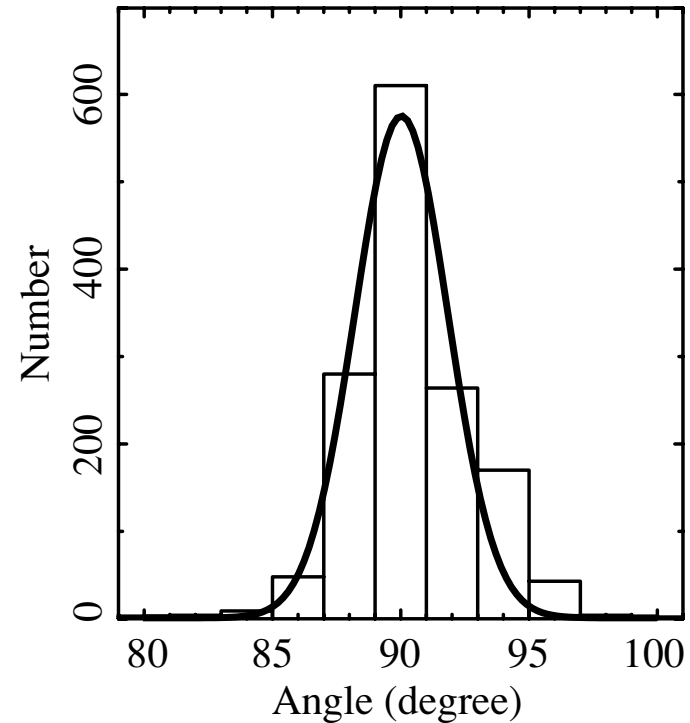
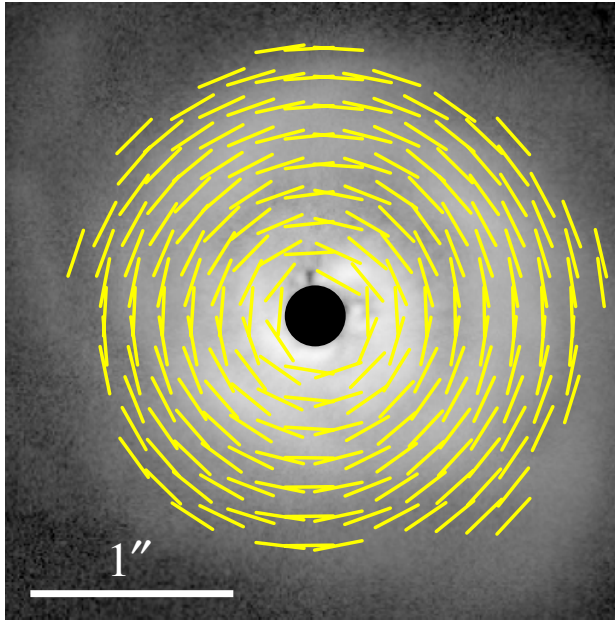
- 天体の偏光面を知っていなければこの効果を調べられない

- 回転角は時間に依存して振動

$$t_p \sim \frac{\hbar}{mc^2} \sim 1.3 / (m/10^{-22} \text{ eV}) \text{ yr}$$



# Protoplanetary disk polarization

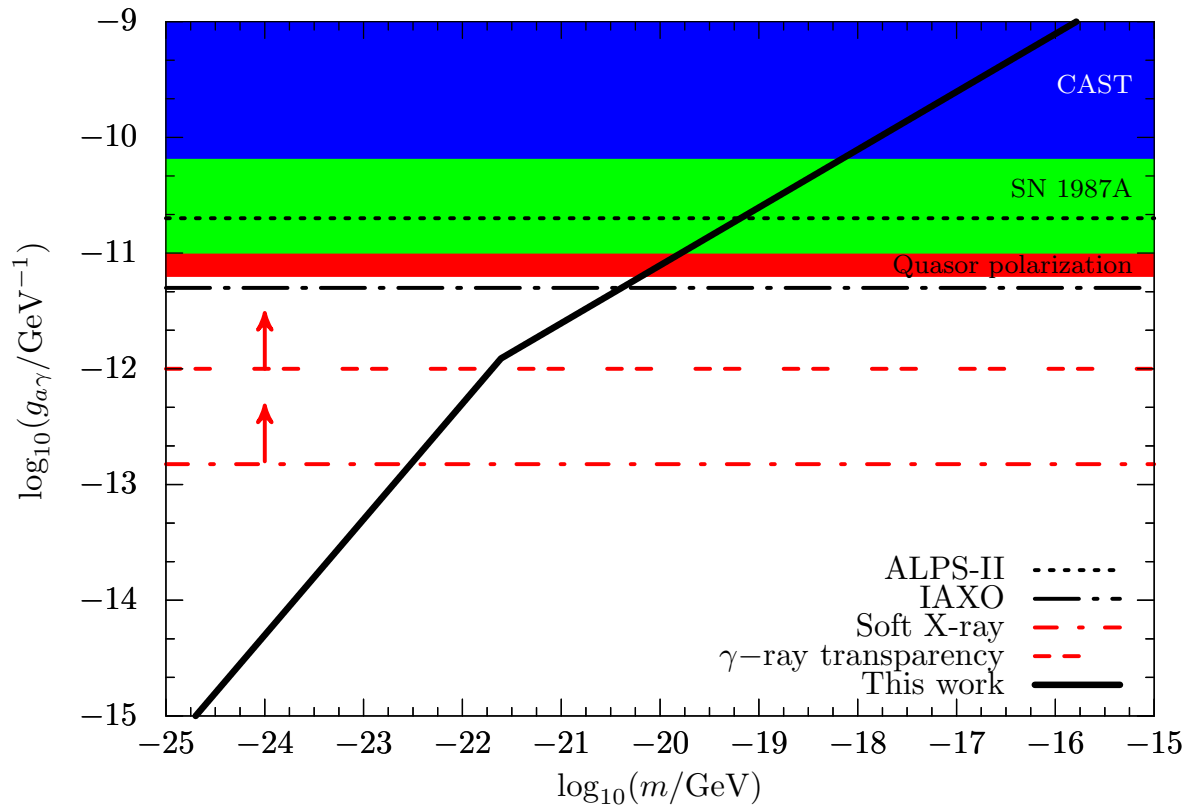


- AB Aurigae ( $cT = 162.9$  pc)  
 $mT/2 \sim 10^3 \gg 1$
- Subaru HiCHAO (near IR)

$$90^\circ.1 \pm 0^\circ.2$$

➔  $|\theta| < 5 \times 10^{-3},$

# Upper limit on $g_{a\gamma}$ from PPD pol.



- $m < 10^{-21}$  eVの結合定数にこれまでで最も厳しい上限を与える

# Summary & Discussion

- Axion dark matter
  - $m \sim 10^{-22}$  eV (for a solution of the structure formation problems)
  - Oscillating scalar field  $\phi(t)$
- 光子はaxionとカップルし、直線偏光面が回転する
- 原始惑星系円盤による中心星の散乱光は偏光面が同心円状である。そこからのズレとしてaxionの存在を捕らえられる
- 現在の観測結果から、 $m < 10^{-21}$  eVの $g_{a\gamma}$ に最も厳しい上限
- データの再解析、より高感度の偏光観測が求められる
  
- For more details, see Fujita, Tazaki & Toma, arXiv:1811.03525
- See also Ivanov+2018 for a constraint from AGN jet pol., and Sigl & Trivedi 2018 (and references therein) from CMB pol.



# Axion coherent patches

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mv} \approx 400\text{pc} m_{22}^{-1} v_3^{-1}, \quad N \simeq \frac{cT}{\lambda} \approx \left( \frac{cT}{400\text{pc}} \right) m_{22} v_3,$$

各パッチの位相  $\delta$  がランダムだとして

$$\begin{aligned} \theta(t, T) &= - \sum_{i=1}^N \int_{t+(i-1)T/N}^{t+iT/N} dt \delta\omega_i, \\ &\approx 2 \times 10^{-2} g_{12} m_{22}^{-1} \sin(\Xi/N) A_N(\tilde{\delta}_i) \sin(mt + \text{const.}), \end{aligned}$$

$$A_N = [(\sum_{i=1}^N \cos \tilde{\delta}_i)^2 + (\sum_{i=1}^N \sin \tilde{\delta}_i)^2]^{1/2}.$$

➡  $\theta(t, T) \simeq 1.4 \times 10^{-2} \sin(mt + \text{const.}) g_{12}$

$$\times \begin{cases} m_{22}^{-1} & (N < 1) \\ m_{22}^{-1/2} v_3^{1/2} \left( \frac{cT}{400\text{pc}} \right)^{1/2} & (N > 1) \end{cases}$$



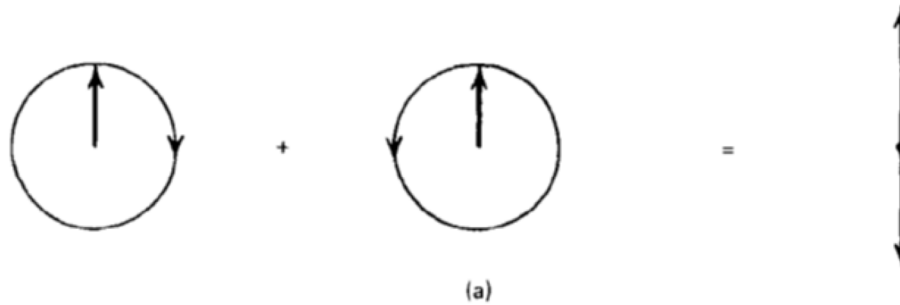
# 分野をまたぐ意義

「一人の研究者が、専門領域以上のものを十分把握することは、不可能に近くなった。（中略）この状況を打開するには、誰かが、諸々の事実や理論を総合する仕事に思い切って手を着ける以外ない。たとえその事実や理論の若干については、又聞きで不完全にしか知らなくとも、また物笑いになる危険を冒しても、そうする以外に方法はないだろう」  
（シュレディンガー『生命とは何か』まえがき1944）

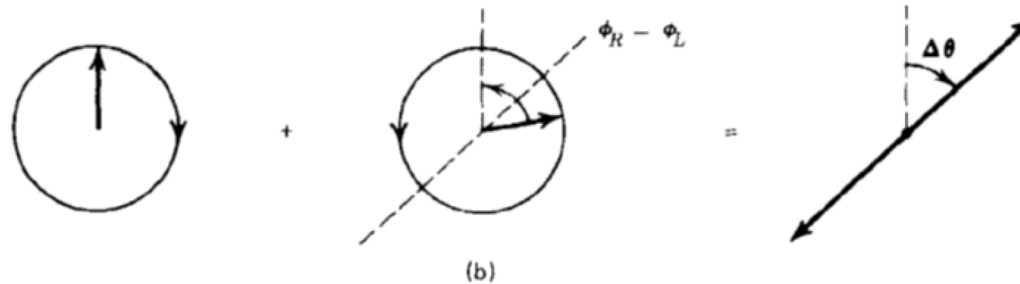
「研究者がどれほど多様な知識をもつと仮定しても、通常たちまちのうちにその知識は限界に達してしまうだろう。その場合、（中略）異なる学者の連合以外に解決策はないであろう。それはまた、いくつかの主要な大問題を皆の同意のもとで前もって定義しておくことも必要とする。」（マルク・ブロック『歴史のための弁明』1997）

「ひらめきとは、自分の脳の中にある、ある知識とそれとはまったく繋がりのない知識との間に、突然“リンク”が張られる現象であると解釈しています」（大嶋光昭『ひらめき力の育て方』2010）

# Faraday rotation



**Figure 8.1a** *Decomposition of linear polarization into components of right and left circular polarization.*



**Figure 8.1b** *Faraday rotation of the plane of polarization.*

$$\frac{k_{\pm}}{\omega} \simeq 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \pm \frac{\omega_p^2 \omega_B}{2\omega^3}$$