

Toward an independent test of cosmic birefringence

～ 宇宙複屈折の独立検証へ向けて ～

arXiv 2504.06709



I'm at Max Planck Institute for
Astrophysics in Garching, Germany
MPAに滞在中です

Fumihiko Naokawa, 直川史寛

Ph.D student, Yokoyama group, RESCEU, UTokyo

東京大学理学系研究科物理学専攻 ビッグバン宇宙国際研究センター

横山順一研究室 博士3年

❖ Cosmic Birefringence (宇宙複屈折) Komatsu (2022)

- ◆ New signal from CMB Minami & Komatsu (2020)
Origin : Axion Like Particle (ALP)? アクシオンの兆候? 
e.g. Carroll et al. (1990)
Harari & Sikivie (1992)
Fujita et al. (2022)
- ◆ ALP can behave as Dark Matter or Dark Energy. 暗黒物質・エネルギーのヒント?
- ◆ Observational challenges CMBでの観測上の難点
 - ▶ Systematics 系統誤差
 - ▶ When did it happen? いつ宇宙複屈折が起こったか?

❖ Independent test using radio galaxies 電波銀河による独立検証 FN(2025)

- ◆ Radio galaxies can be probes to cosmic birefringence. e.g. Carroll et al. (1990)
- ◆ Not only independent but complementarily test 独立なだけでなく相補的
 - ▶ We can distinguish dark matter btw dark energy. 暗黒物質か暗黒エネルギーかを判別可
 - ▶ Now we are ready with great catalogues of polarized radio galaxies.
e.g. Mostert, Oei et al. (2024), O'Sullivan et al. (2023) 偏光電波銀河カタログは急増中!

Independent test 宇宙複屈折の独立検証



- If ALP really exists as the origin of cosmic birefringence...

not only CMB photons but also any photons can be rotated.

本当にアクシオンが宇宙複屈折を引き起こしているなら、CMBだけでなくあらゆる光の偏光面が回転する。

- However, we have to know the intrinsic angle of the sources' polarization, with enough accuracy.

しかし、その回転を測るためには光源の元の偏光角を知ることが必要, しかも0.3度の検出に足る精度で。

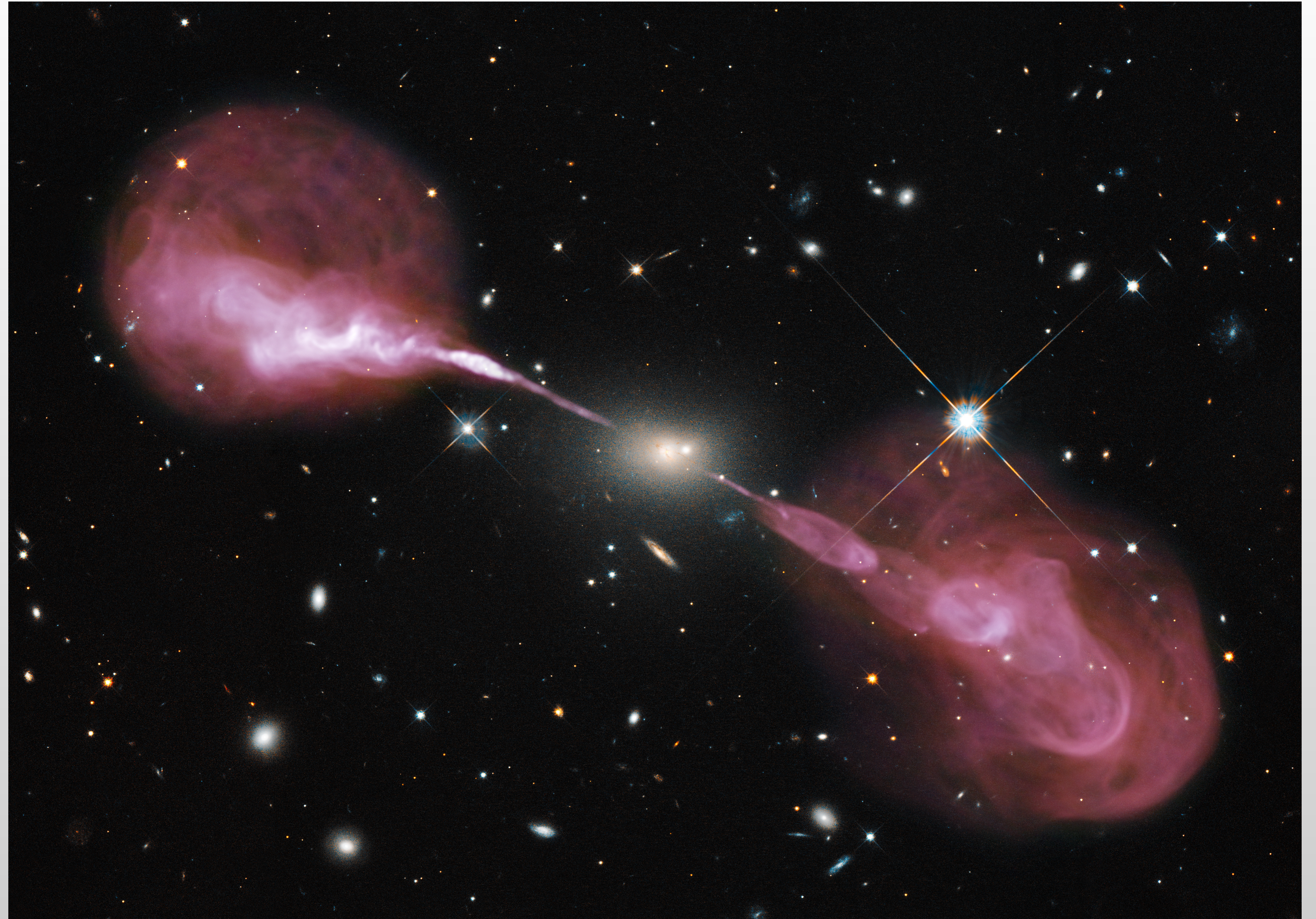
- Also, the sources should come from cosmological distance.

光源が宇宙論的距離にあることも必要

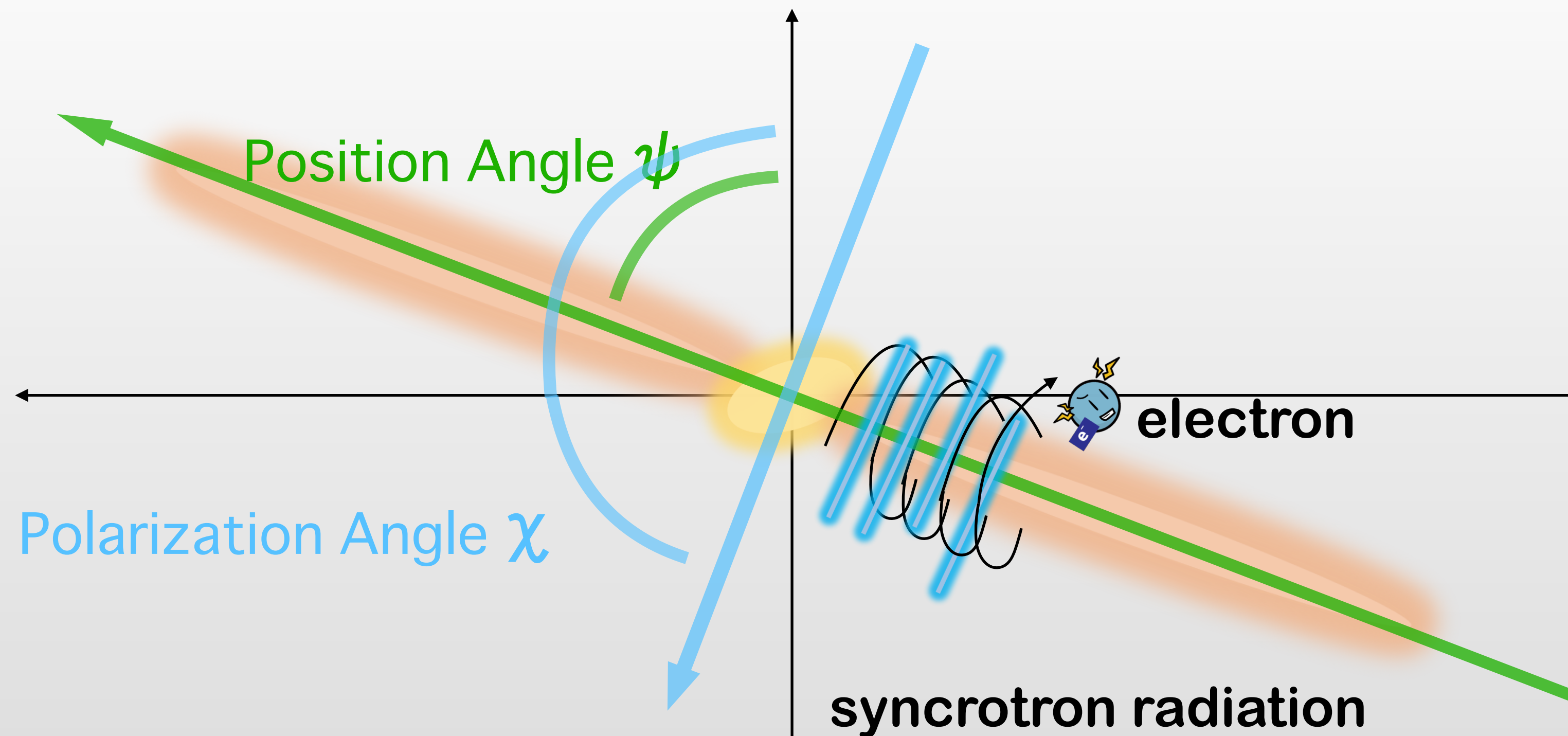
Is there any astrophysical sources available as “Standard Cross” ?

「標準交差」として利用可能な天体はあるか？

Radio Galaxy



A Multi-Wavelength View of Radio Galaxy Hercules A
Credit: NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT), R. Perley and
W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team
(STScI/AURA) [https://www.flickr.com/photos/gsfcr/8230235118/
in/photostream/](https://www.flickr.com/photos/gsfcr/8230235118/in/photostream/) CC BY 2.0 Generic [https://
creativecommons.org/licenses/by/2.0/](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/)



- Radio Galaxy ・ ・ ・ Active Galactic Nuclei (AGN) with strong radio emission
電波銀河 structure (core, jet, robe) 強い電波放射を伴うAGN

- Synchrotron radiation

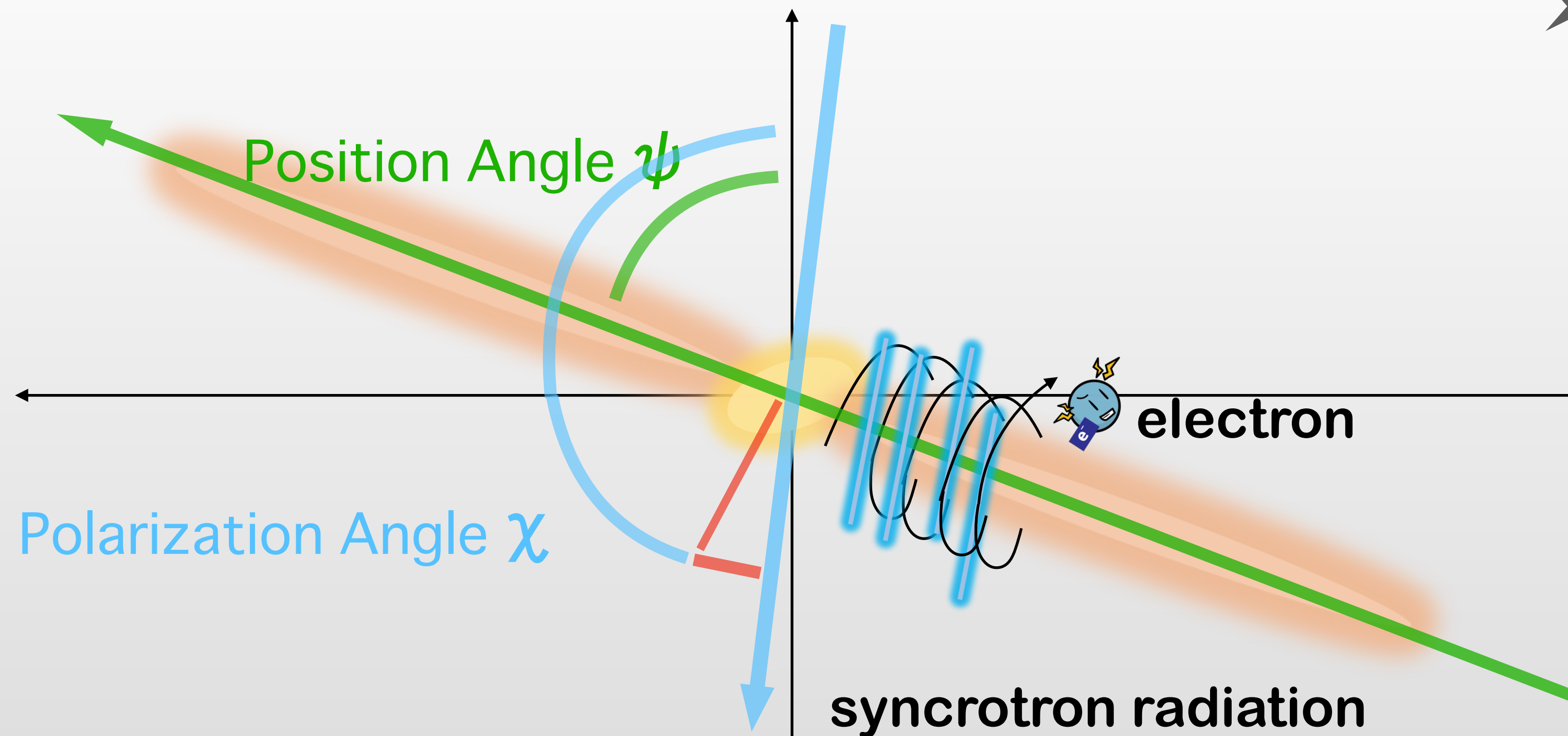
Electrons moves around the magnetic field along jets.

→ emits synchrotron radiation in a direction perpendicular to jets.

→ $\chi - \psi$ should be distributed around 90°

ジェットに沿った磁場の周りをクルクルと電子が運動
→ジェットと垂直に直線偏光したシンクロトロン放射

→ $\chi - \psi$ は大体 90° を中心に分布するはず



- If ALP exists...
Polarization angle can be rotated

- Radio Galaxy ・ ・ ・ Active Galactic Nuclei (AGN) with strong radio emission
電波銀河 structure (core, jet, robe) 強い電波放射を伴うAGN

- Synchrotron radiation

Electrons moves around the magnetic field along jets.

→ emits synchrotron radiation in a direction perpendicular to jets.

→ $\chi - \psi$ should be distributed around 90°

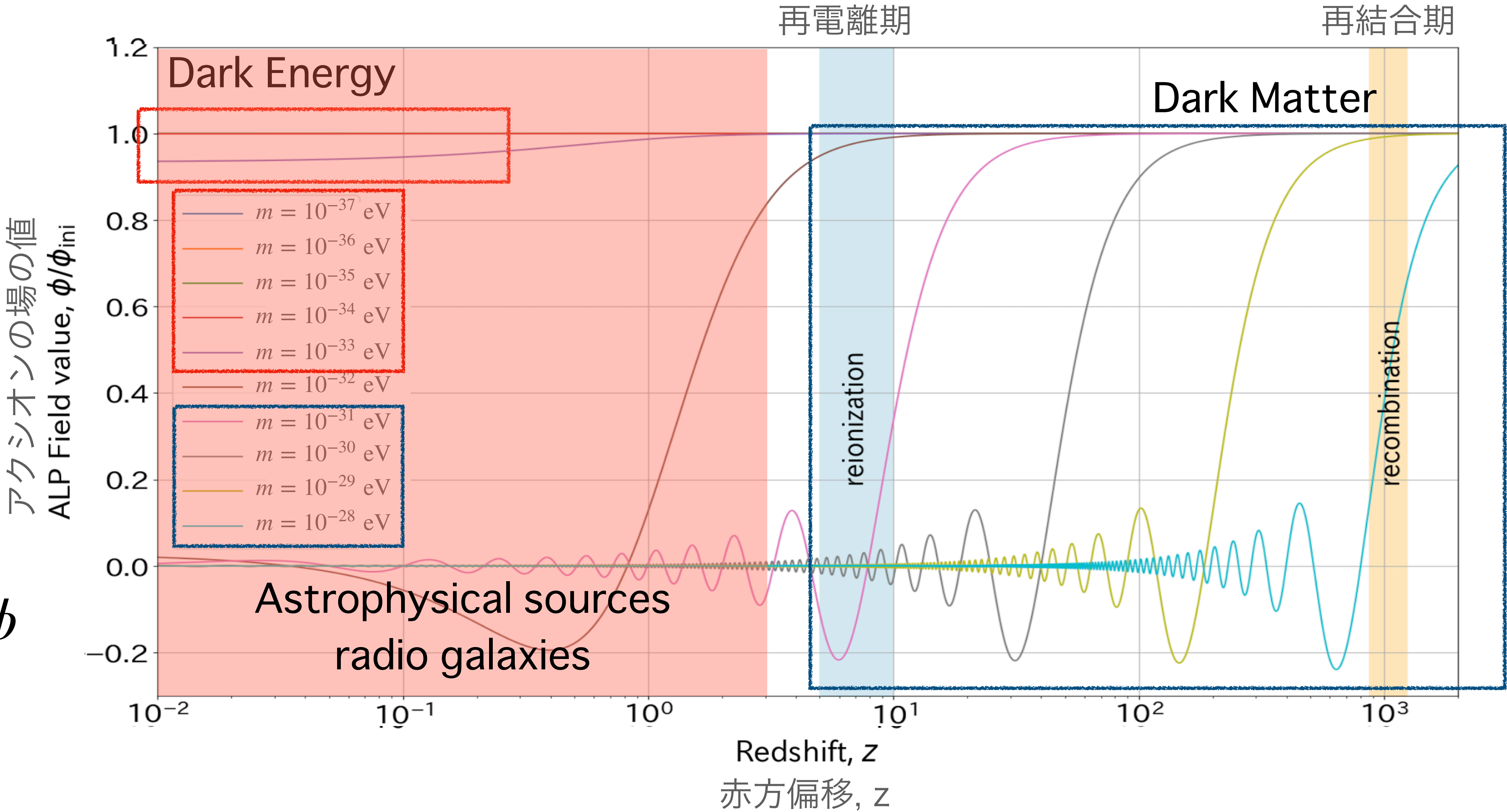
ジェットに沿った磁場の周りをクルクルと電子が運動
→ジェットと垂直に直線偏光したシンクロトロン放射

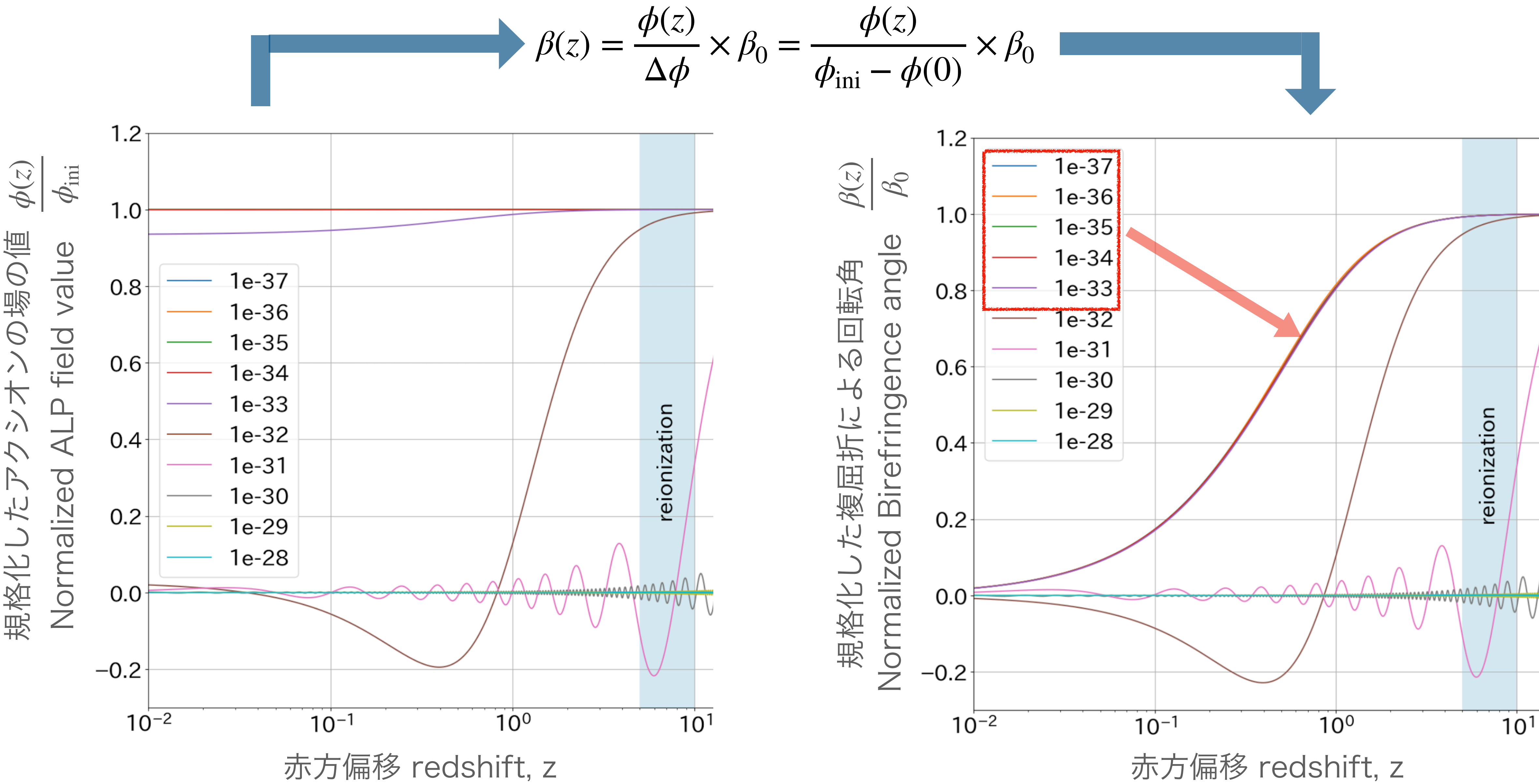
→ $\chi - \psi$ は大体 90° を中心に分布するはず

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + \frac{dV(\phi)}{d\phi} = 0 \quad , \quad V(\Phi) = \frac{1}{2}m^2\phi^2$$

低赤方偏移の
天体光源で
宇宙複屈折を
検出するには、
回転が後期宇宙
で生じている
必要がある！

$$\beta = \frac{1}{2}g\Delta\phi$$





Under the slow-roll, $\beta(z)$ shows a unique profile, independent from ALP models.

スローロール条件下では、 $\beta(z)$ は一意になる。ALPのモデルやパラメータに非依存。

‘Dark Energy Profile’

暗黒エネルギープロフィール

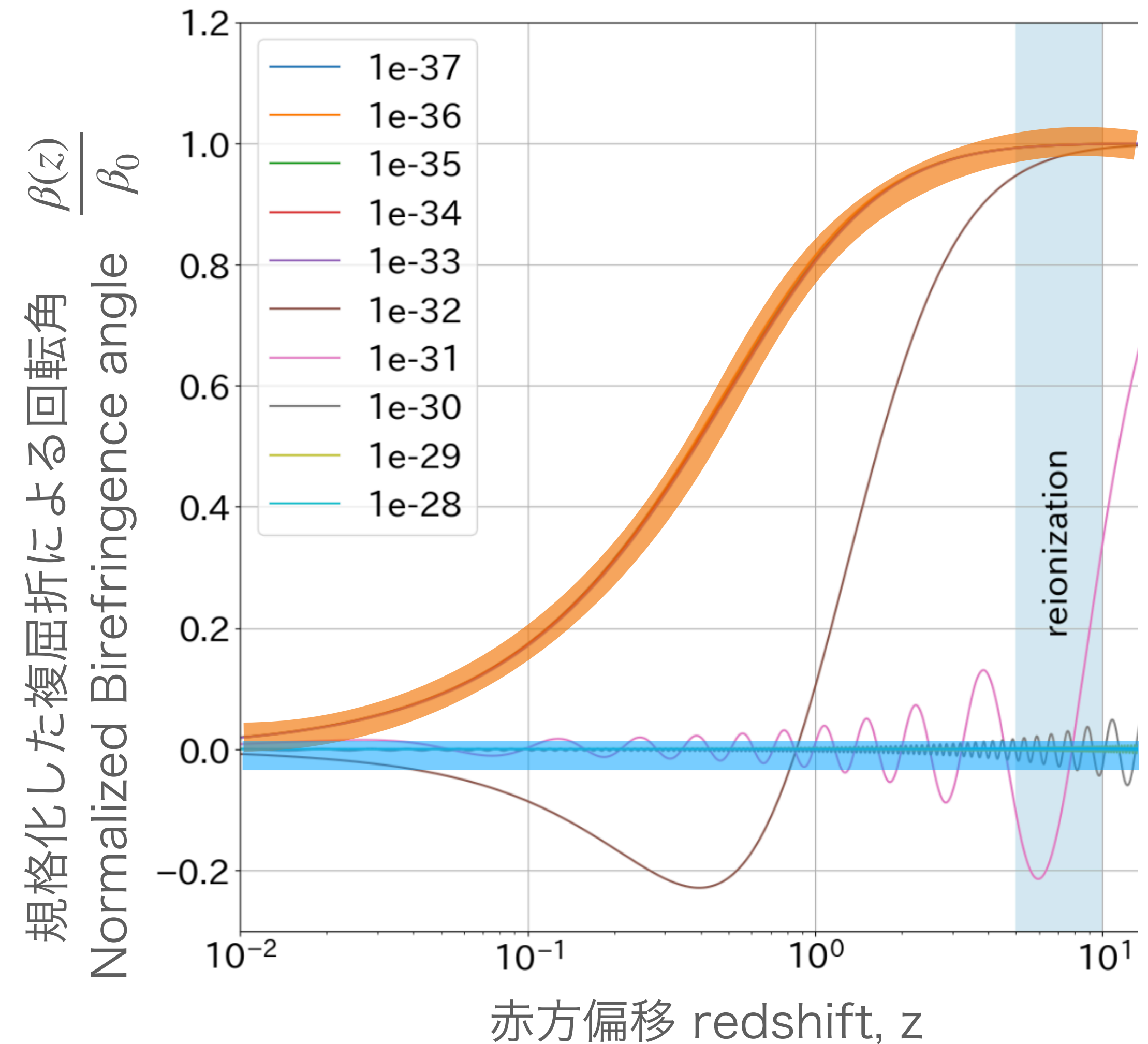
$$\frac{\beta_{\text{DE}}(z)}{\beta_0} = 1.77 \int_0^z \frac{dz}{(1+z)^4(1-\Omega_{\Lambda 0}) + (1+z)\Omega_{\Lambda 0}}$$

See F. Naokawa (2025) 2504.06709 for the proof.

For dark matter cases, $\beta(z)$ in low- z is negligible.

暗黒物質の場合、低赤方偏移では回転はほぼゼロ。

$$\beta_{\text{DM}}(z) = \beta_{\text{null}}(z) \equiv 0$$



Under the slow-roll, $\beta(z)$ shows a unique profile, independent from ALP models.

スローロール条件下では、 $\beta(z)$ は一意になる。ALPのモデルやパラメータに非依存。

What should be tested is these redshift profiles.
まず検証すべきはこの赤方偏移プロファイル。

‘Dark Energy Profile’

暗黒エネルギープロファイル

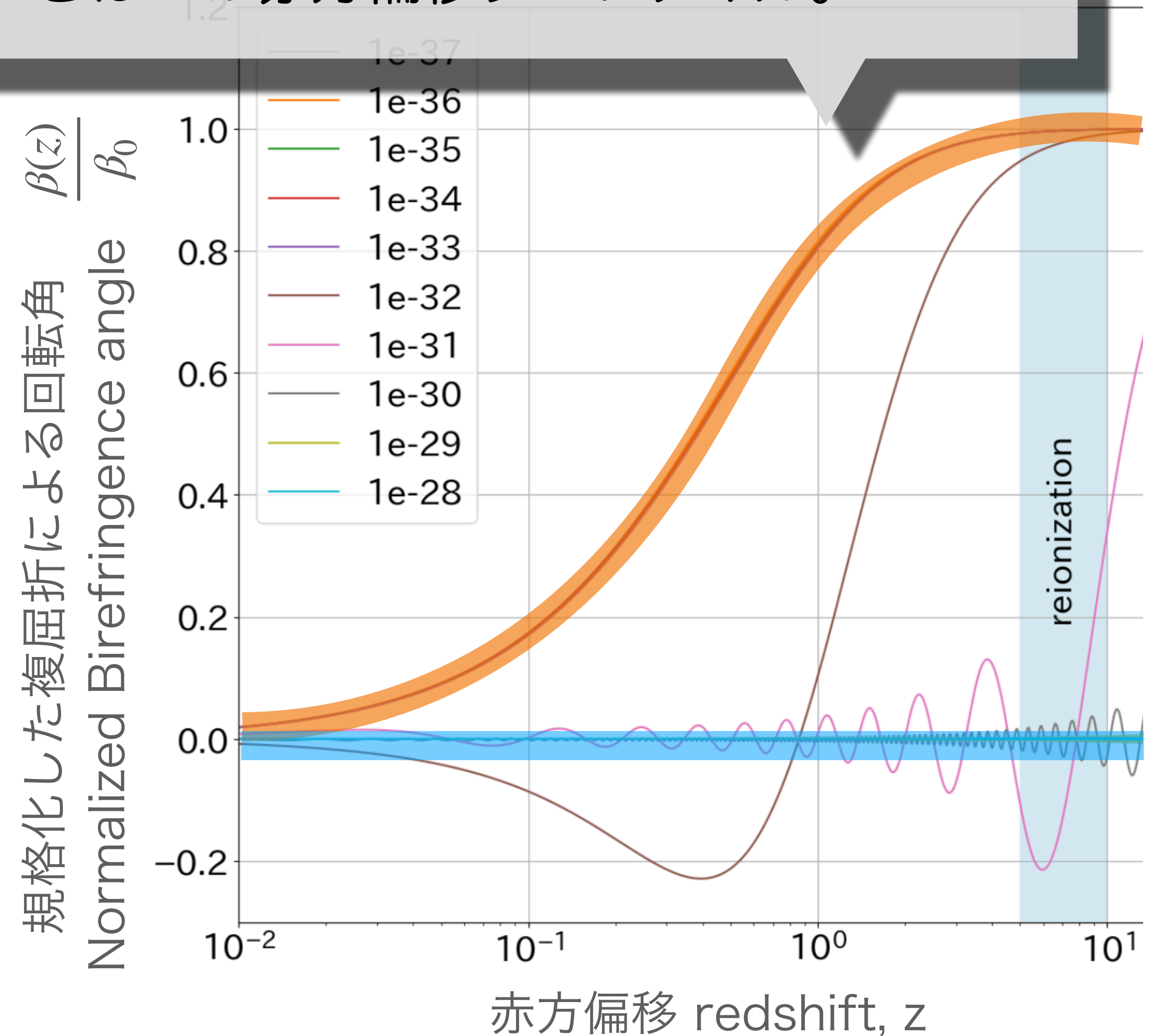
$$\frac{\beta_{\text{DE}}(z)}{\beta_0} = 1.77 \int_0^z \frac{dz}{(1+z)^4(1-\Omega_{\Lambda 0}) + (1+z)\Omega_{\Lambda 0}}$$

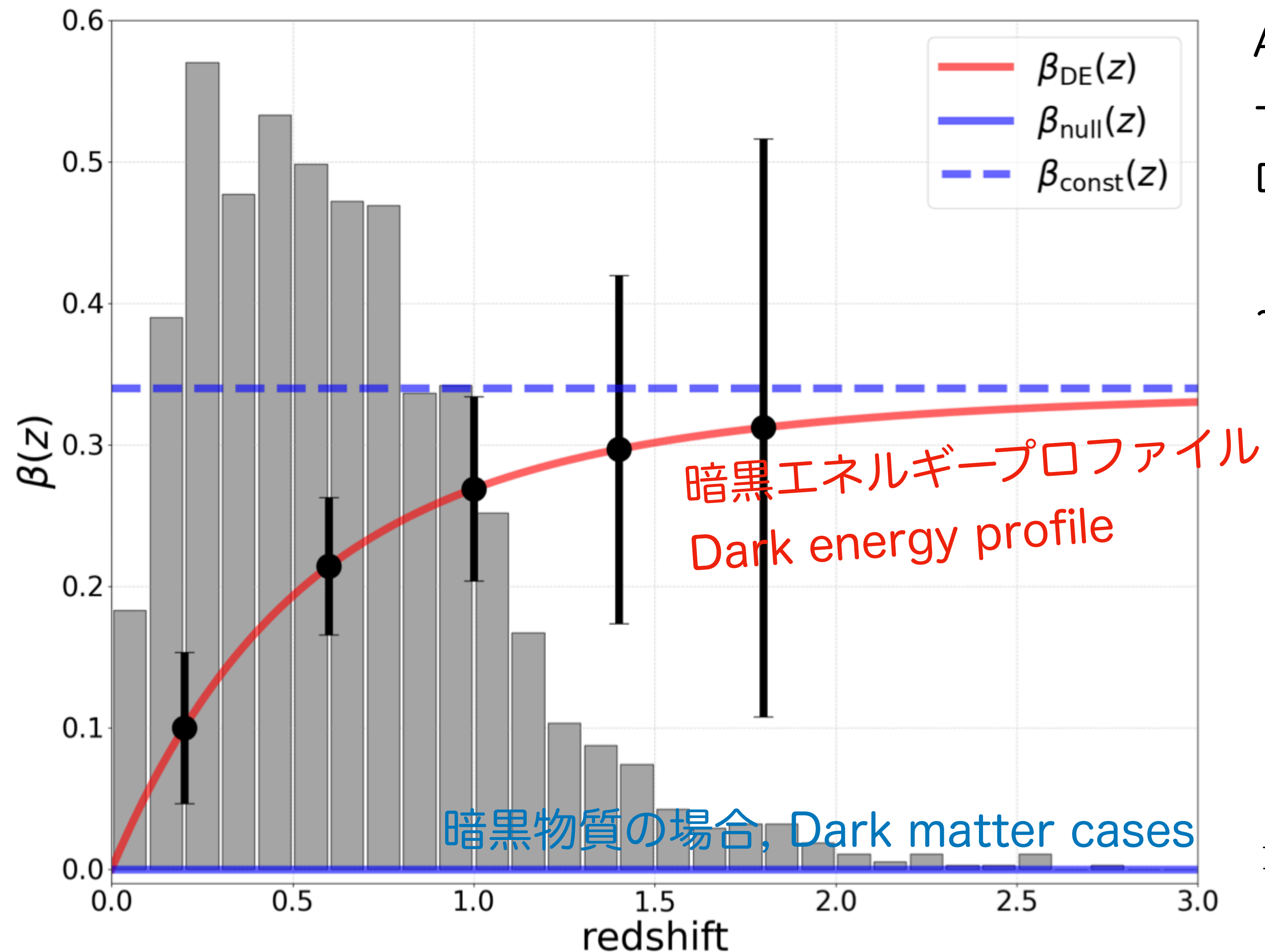
See F. Naokawa (2025) 2504.06709 for the proof.

For dark matter cases, $\beta(z)$ in low- z is negligible.

暗黒物質の場合、低赤方偏移では回転はほぼゼロ。

$$\beta_{\text{DM}}(z) = \beta_{\text{null}}(z) \equiv 0$$





Assuming $\beta_0 = 0.34$ deg

To distinguish

Dark energy profile vs null profile,
with 5σ

~ half million samples are required.

$\beta_0 = 0.34$ deg と仮定した場合、

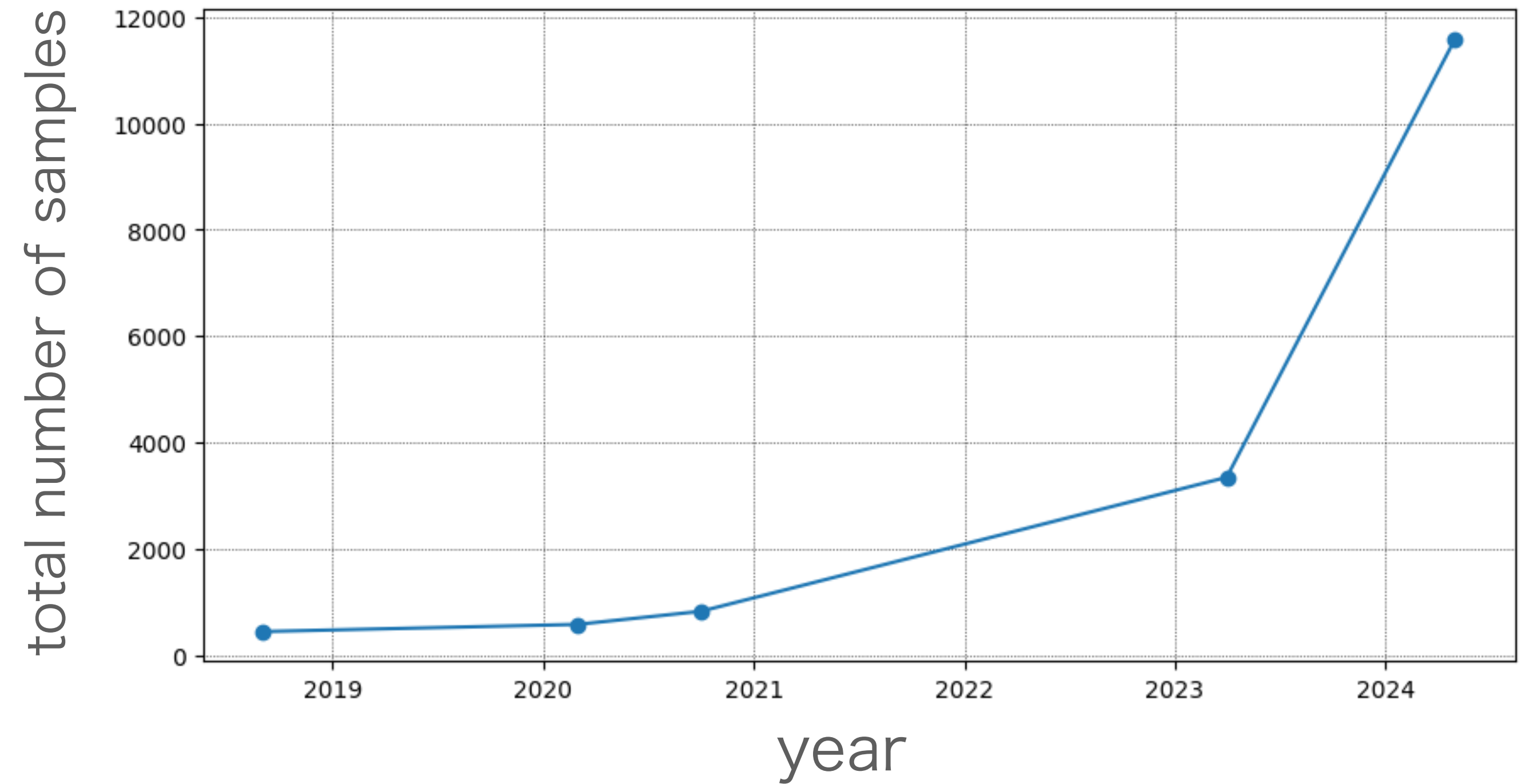
2つのプロファイルを 5σ 程度で
区別するには

数十万~百万程度のサンプルが必要

F. Naokawa (2025) 2504.06709

2020s is a breakthrough decade ? 2020年代に入り、電波銀河ジェットサンプルが激増

The total number of Giant Radio Sources



- Kuzmic et al. (2018)

Made a complete catalog. 349 samples.

- Dabhade et al. (2020)

225 new samples from LOFAR LoTSS DR1.

- Dabhade et al. (2020)

162 new samples from VLA SAGAN.

- Koziel-Wierzbowska et al. (2020)

55 new samples from VLA FIRST.

- Bruggen et al. (2020)

20 new samples by ASKAP/EMU from several galaxy clusters.

- Kuzmicz et al. (2021)

174 new samples from VLA FIRST.

- Andernach et al. (2021)

178 new samples from ASKAP/RACS.

- Oei et al. (2023)

2060 new samples from LOFAR LoTSS DR2.

- Mostert, Oei et al. (2024)

8244 new samples from LOFAR LoTSS DR2 with a machine learning assisted new pipeline.

Low frequency survey is important.

電波銀河ジェットの探索には低周波観測が有効

ex) LOFAR, ASKAP, SKA

Polarized sources is also skyrocketing !!

偏光源のサンプル数も現在急増中！

- VLA NVSS ($\sim$ a few 10^4 deg²)
4000 sources Hammond et al. (2012)
- LOFAR LoTSS DR2 ($\sim$ 5,000 deg²)
2500 sources O'Sullivan et al. (2023)
- ASKAP POSSUM Vanderwoude et al. (2024)
~ 800,000 sources (expected)
- SKA
will improve further

Summary まとめ



- Independent test of cosmic birefringence is important.
宇宙複屈折の独立検証の重要性が増している。
- Radio galaxies can be used as “standard cross”, probe to cosmic birefringence.
電波銀河は宇宙複屈折の検証に必要な「標準交差」として利用可能
- With radio galaxies, we can do not only independent but complementarily test.
CMB と独立なだけでなく相補的な検証が可能となる。
- The first step is to test the “Dark energy profile”.
「暗黒エネルギープロファイル」の検証が第一目標
- $10^5 - 10^6$ samples are required, which can be reached with ASKAP or SKA.
数十万～百万個程度のサンプルが必要と見積もられる。ASKAP や SKA で到達しうる。