

次世代電波望遠鏡を用いた 宇宙磁場研究

酒見はる香 (山口大学)

共同研究者：Viral Parekh (NRAO), 町田真美 (国立天文台), James O. Chibueze (North-West University), 大村匠 (国立天文台), 赤松弘規 (QUP/KEK), 赤堀卓也 (国立天文台), 中西裕之 (鹿児島大学), Ruby van Rooyen (SARAO), 竹内努 (名古屋大学/統計数理研究所), 五十嵐太一 (NAOJ/立教大学)

自己紹介

酒見 はる香 (Haruka Sakemi):

2021.03: 博士号取得 (九州大学)

2021.04-2021.09: 学振研究員 (NAOJ)

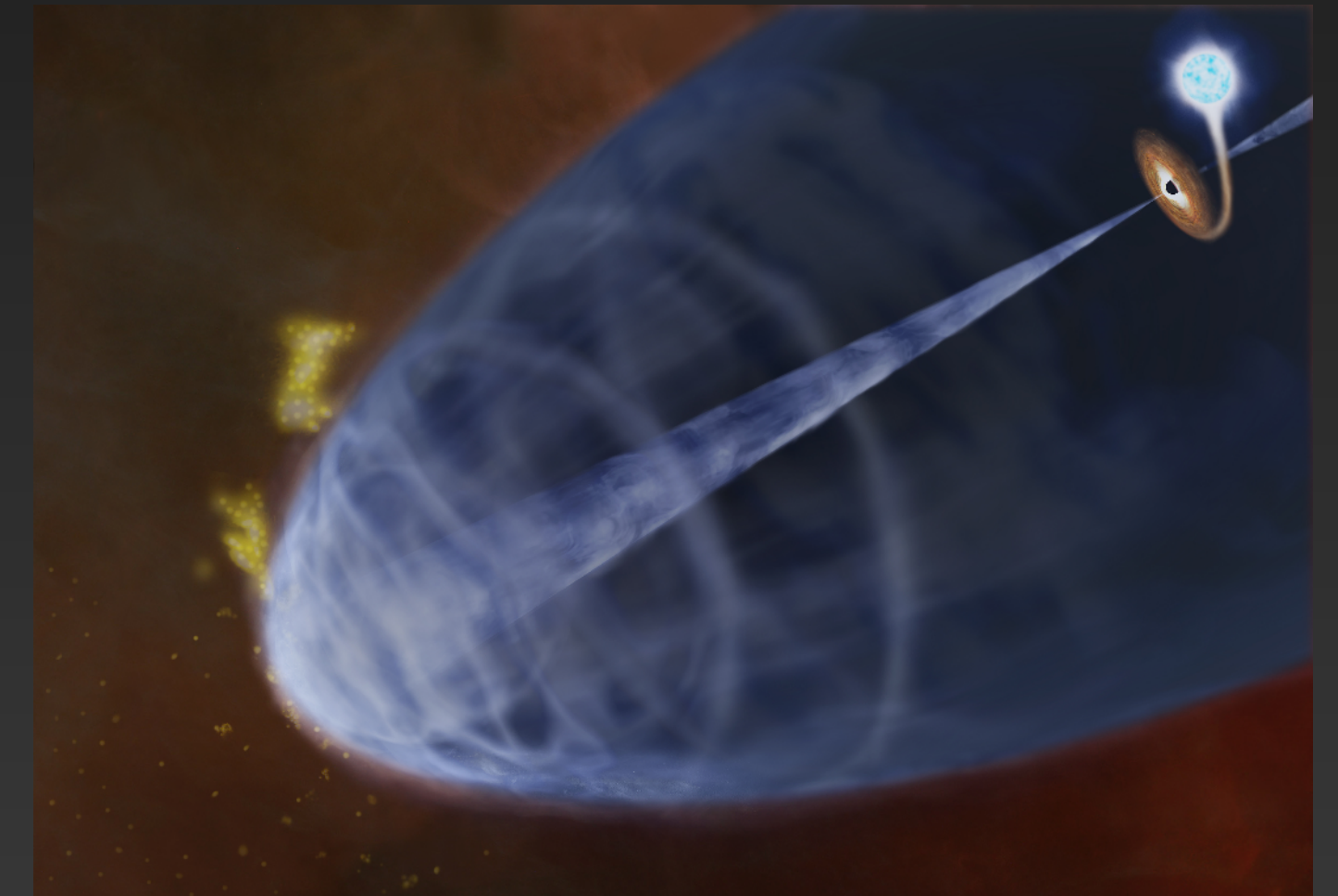
2021.10-2024.03: プロジェクト研究員 (鹿児島大学)

2024.04-現在: 助教 (山口大学)



研究テーマ:

- 電波天文学
- 宇宙ジェット (X-ray binary, AGN, ...)
- 宇宙磁場



目次

1. 宇宙磁場とは？
2. 宇宙磁場の観測
3. 次世代大型電波干渉計計画SKA
4. MeerKATで迫る折れ曲がった宇宙ジェット之谜
5. 折れ曲がった宇宙ジェットの偏波解析

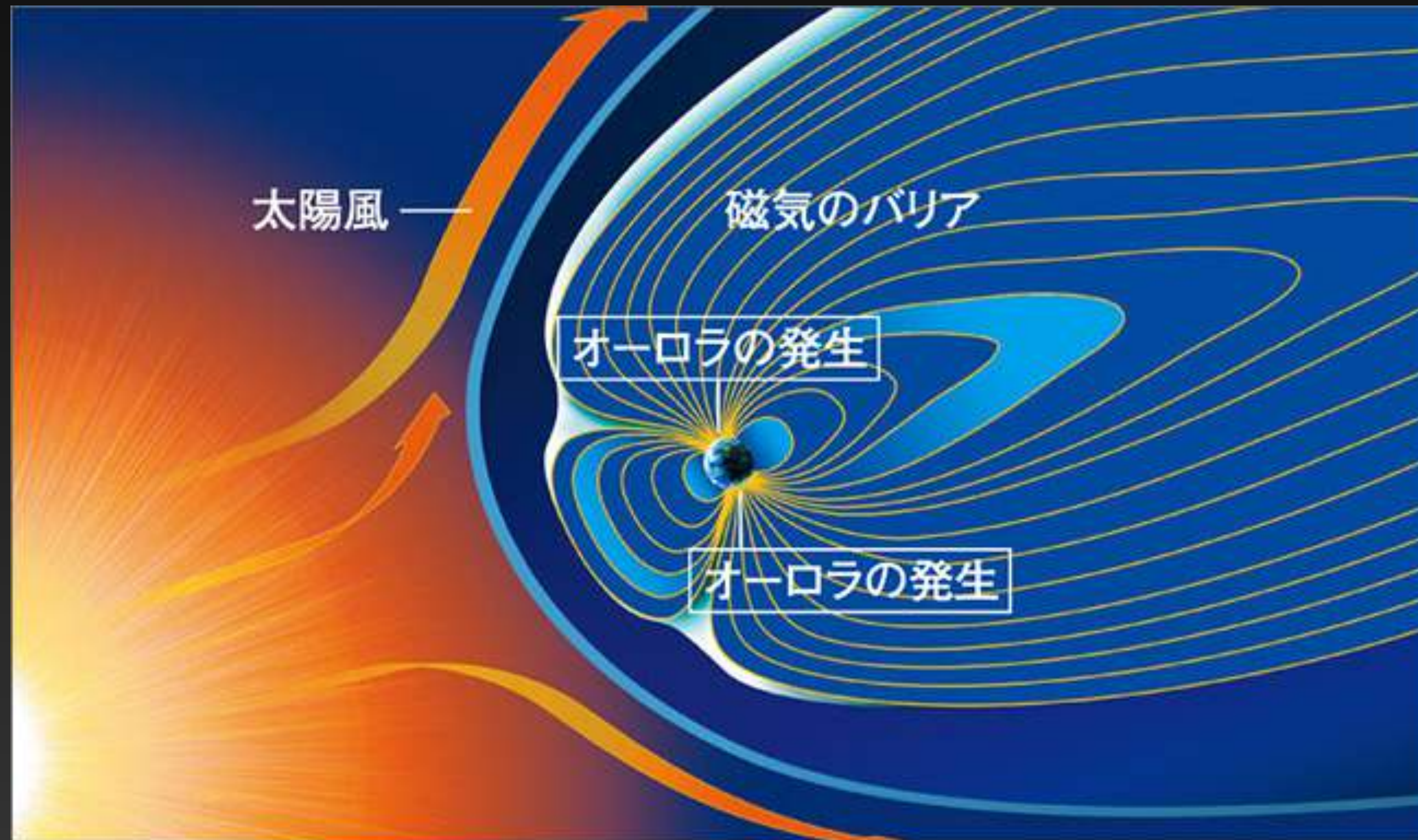
関連論文：

“Jets from MRC 0600-399 bent by magnetic fields in the cluster Abell 3376”, Chibueze J.-O., Sakemi H., Ohmura T., Machida M., Akamatsu H., Akahori T., Nakanishi H., et al., 2021, *Natur*, 593, 47. doi:10.1038/s41586-021-03434-1

宇宙磁場とは？

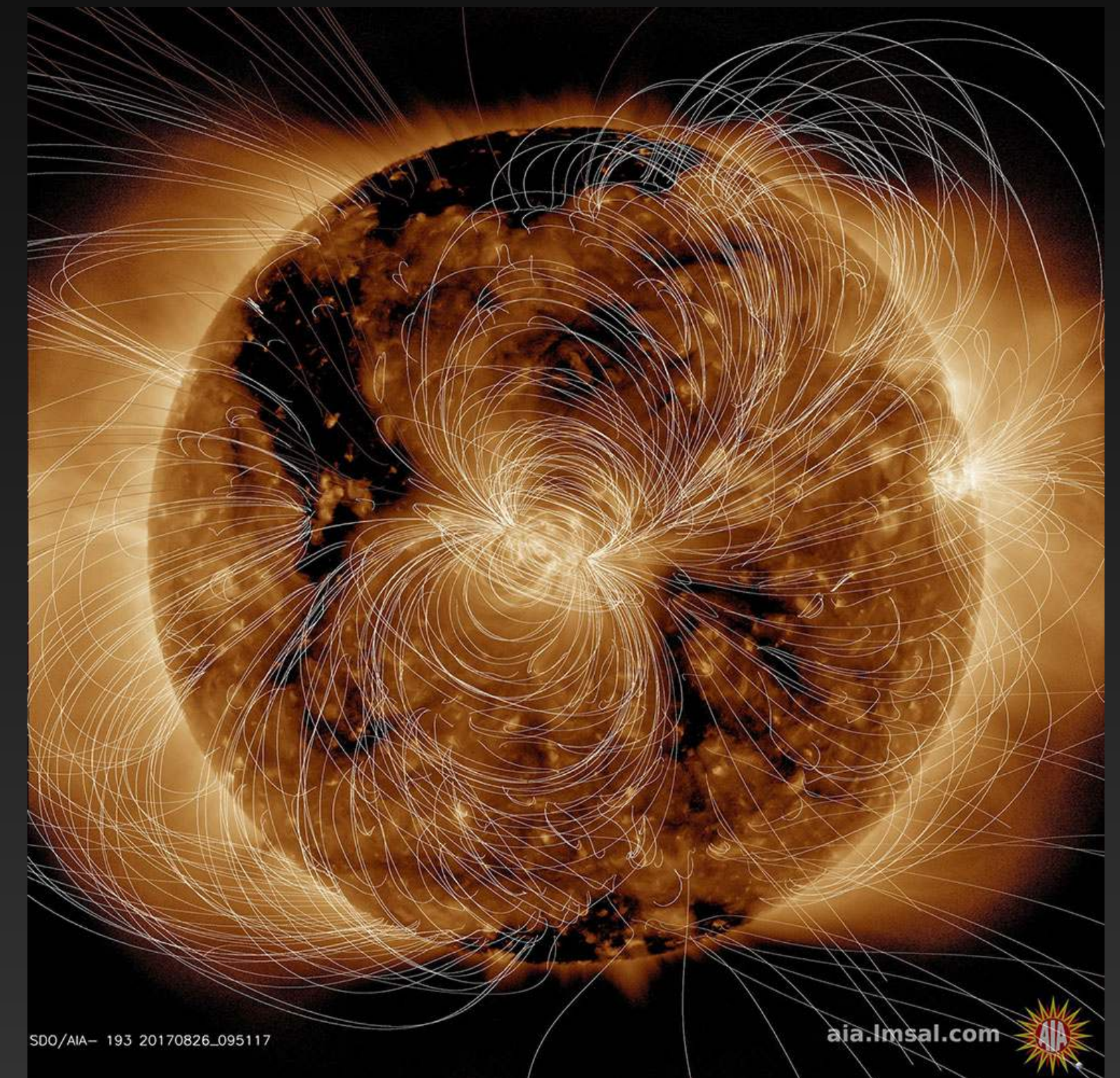
宇宙にはあまねく磁場が存在する

地磁気 (地球の周りの磁場)



<http://www.kagayastudio.com/symphony/introduce.html>

太陽磁場

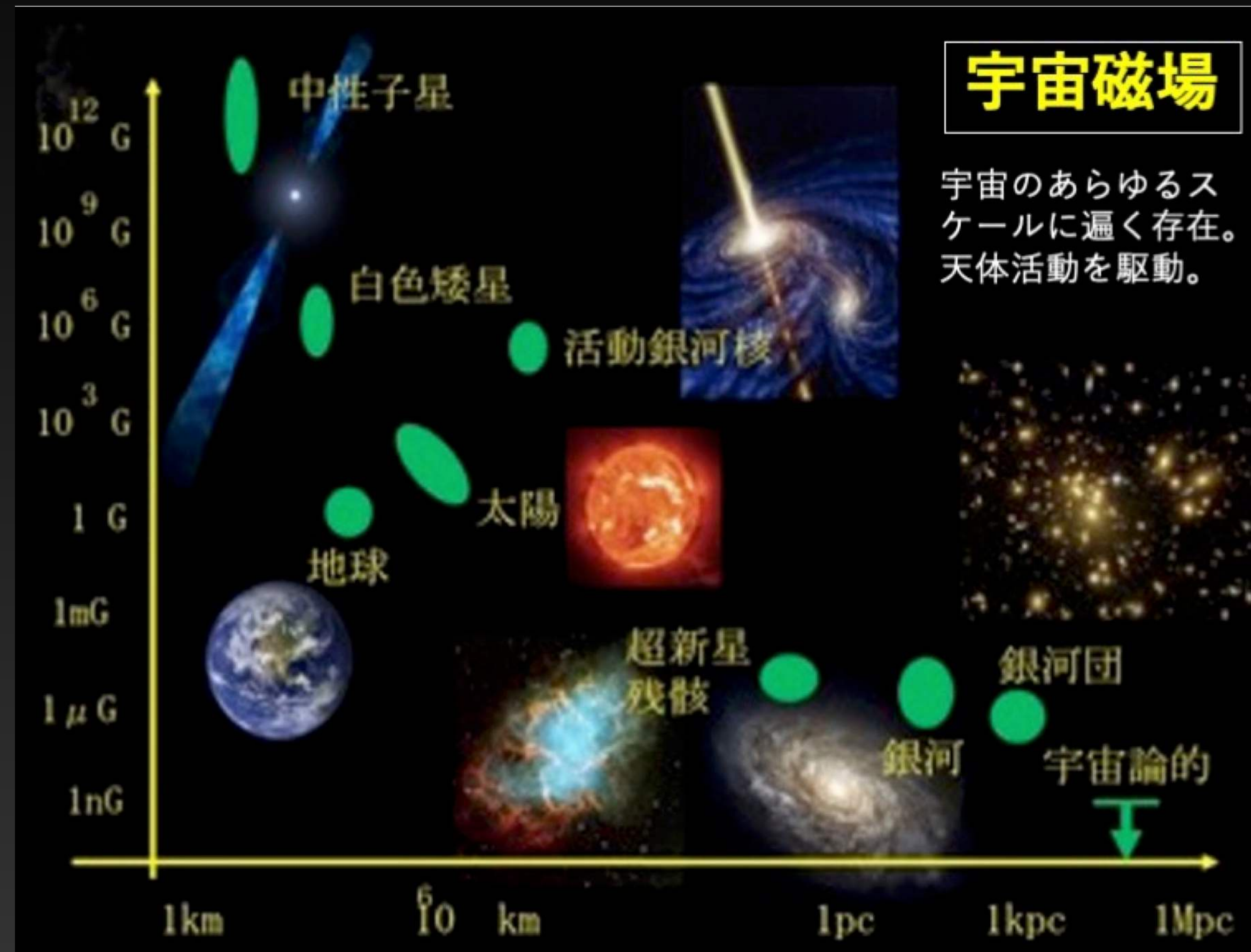


SDO/AIA- 193 20170826_095117

aia.lmsal.com

<https://www.natureasia.com/ja-jp/nature/highlights/126589>

宇宙にはあまねく磁場が存在する

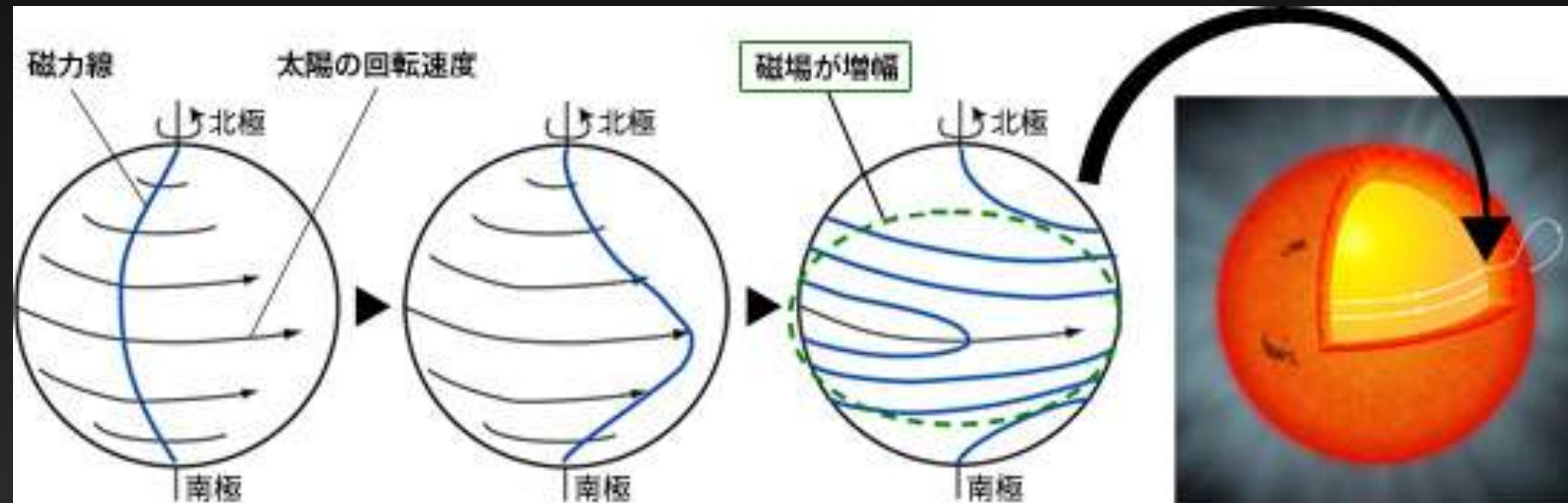


宇宙磁場はいつ？どこで？どのように？

→ **未解明の謎の1つ！**

磁場の増幅・・・ダイナモ機構

(例) 太陽磁場の増幅



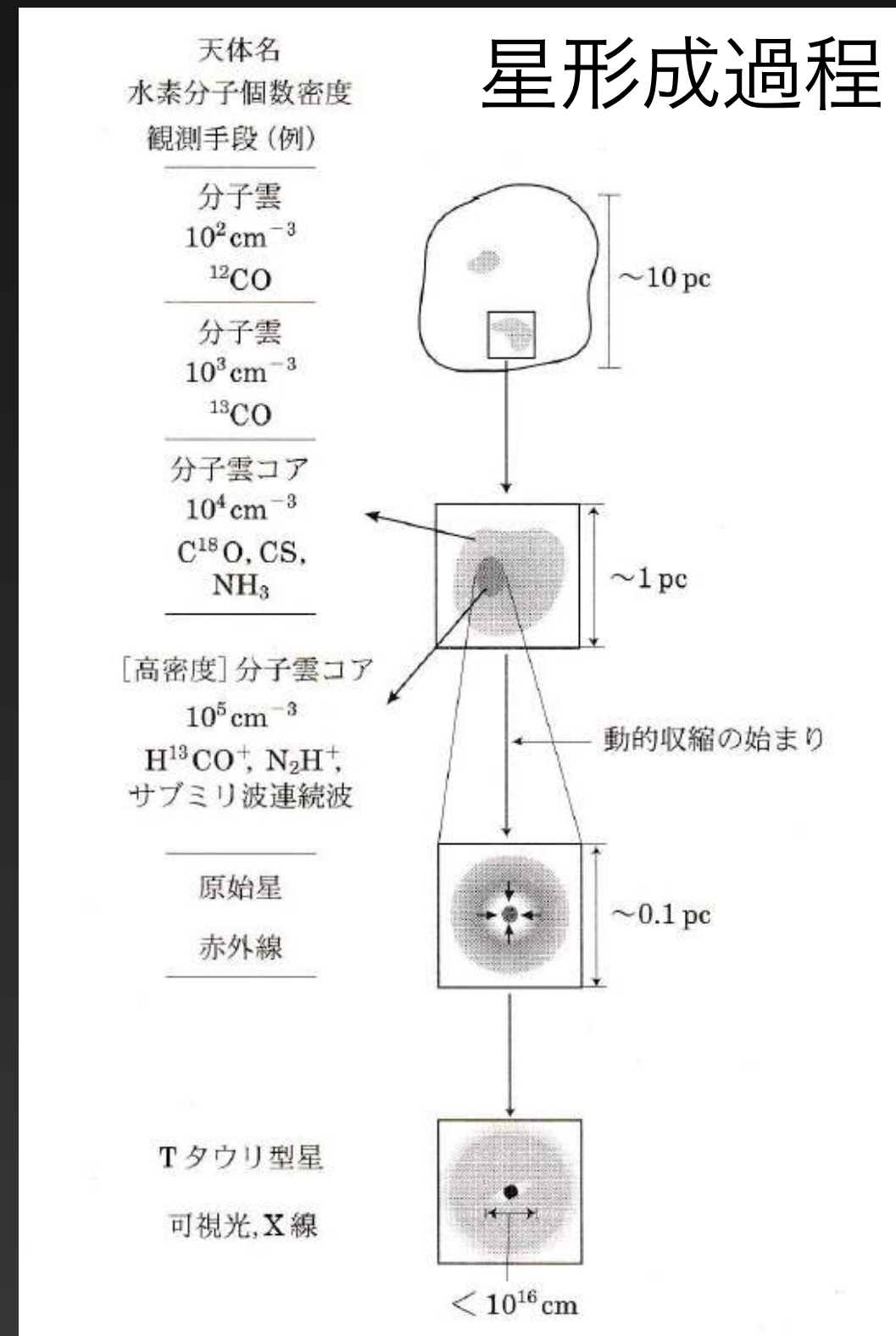
ただし**種磁場** ($10^{-29} \sim 10^{-23}$ G)の誕生についてはよくわかっていない

「天体起源説」？ and/or 「宇宙論 (密度ゆらぎ)起源説」？

宇宙磁場の役割

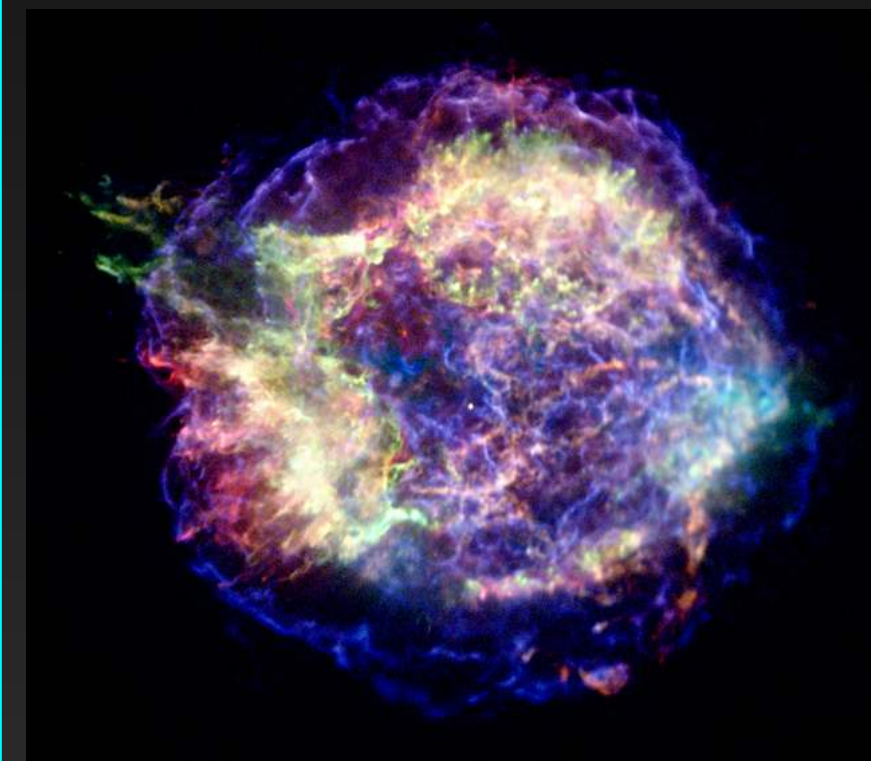
→ 宇宙の階層的構造形成

重力の場合：重力収縮による構造形成
(ex. 星, 球状星団)



磁場の場合：高エネルギー現象駆動に伴う構造形成 (SN, 宇宙ジェット)

超新星残骸



Credit: NASA/CXC/MIT/UMass Amherst/M.D.Stage et al.

宇宙ジェット



ESO/M. Kornmesser

宇宙磁場の役割

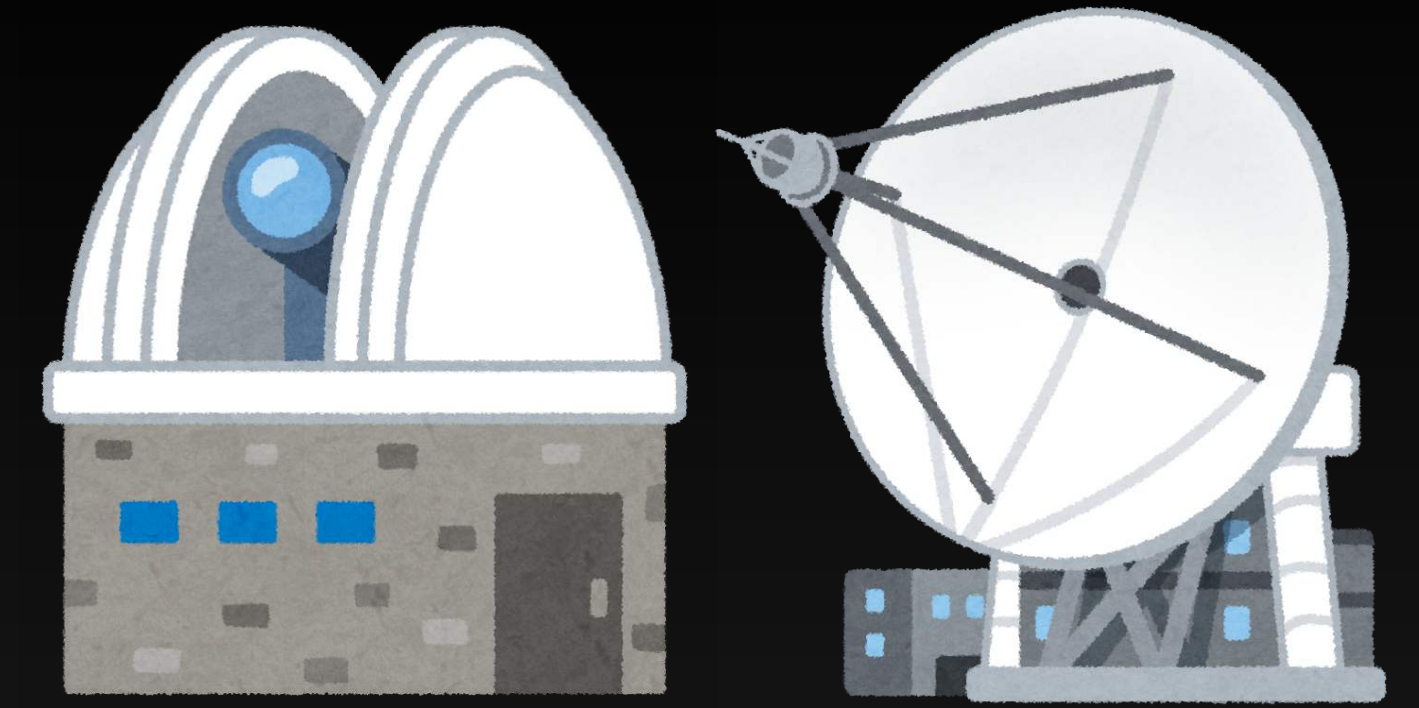
中心エンジンの数桁大きいスケールに物質・エネルギーを伝搬させるような
高エネルギー天体現象の駆動 (天体のダイナミクスに関係)

→ 物質の循環, 構造形成に影響

宇宙進化の解明のために磁場の理解は必要不可欠！

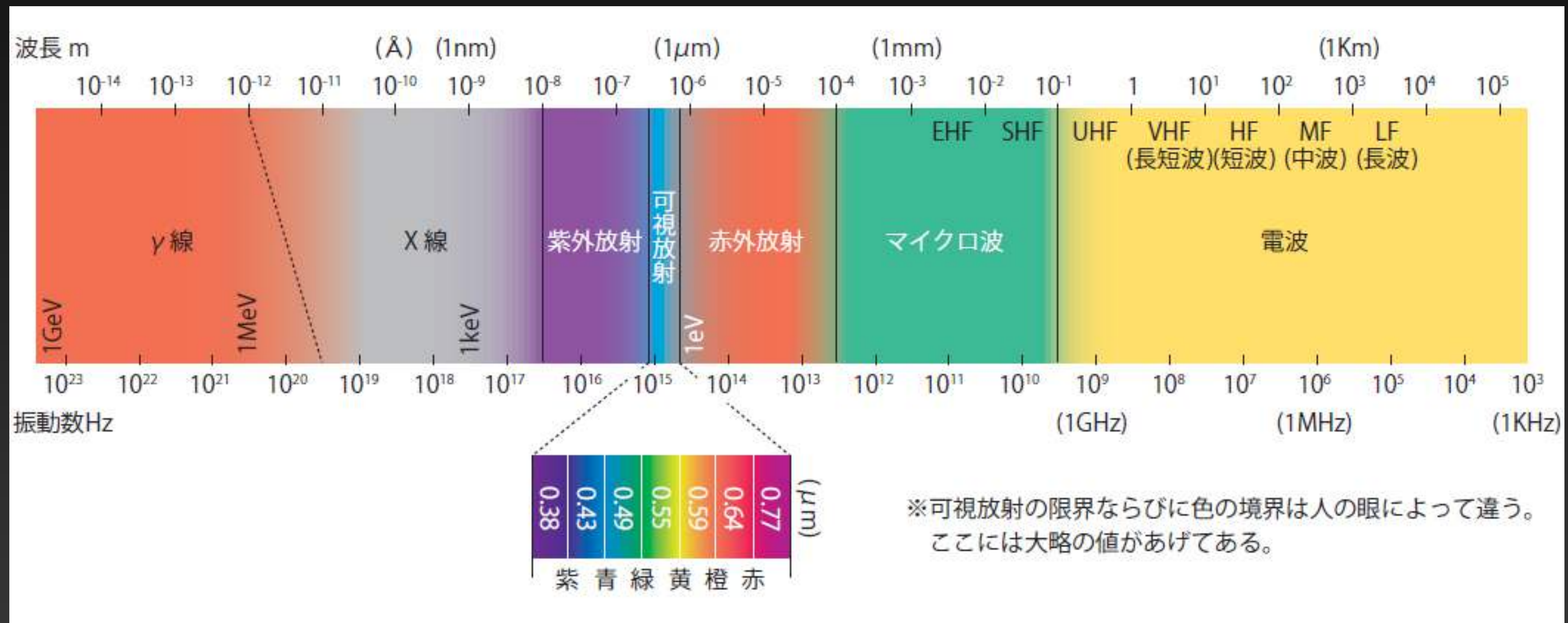
宇宙磁場の観測

天体観測



宇宙に存在する天体からの「**光 (=電磁波)**」を観測

→ 自ら光っていないものは直接観測できない



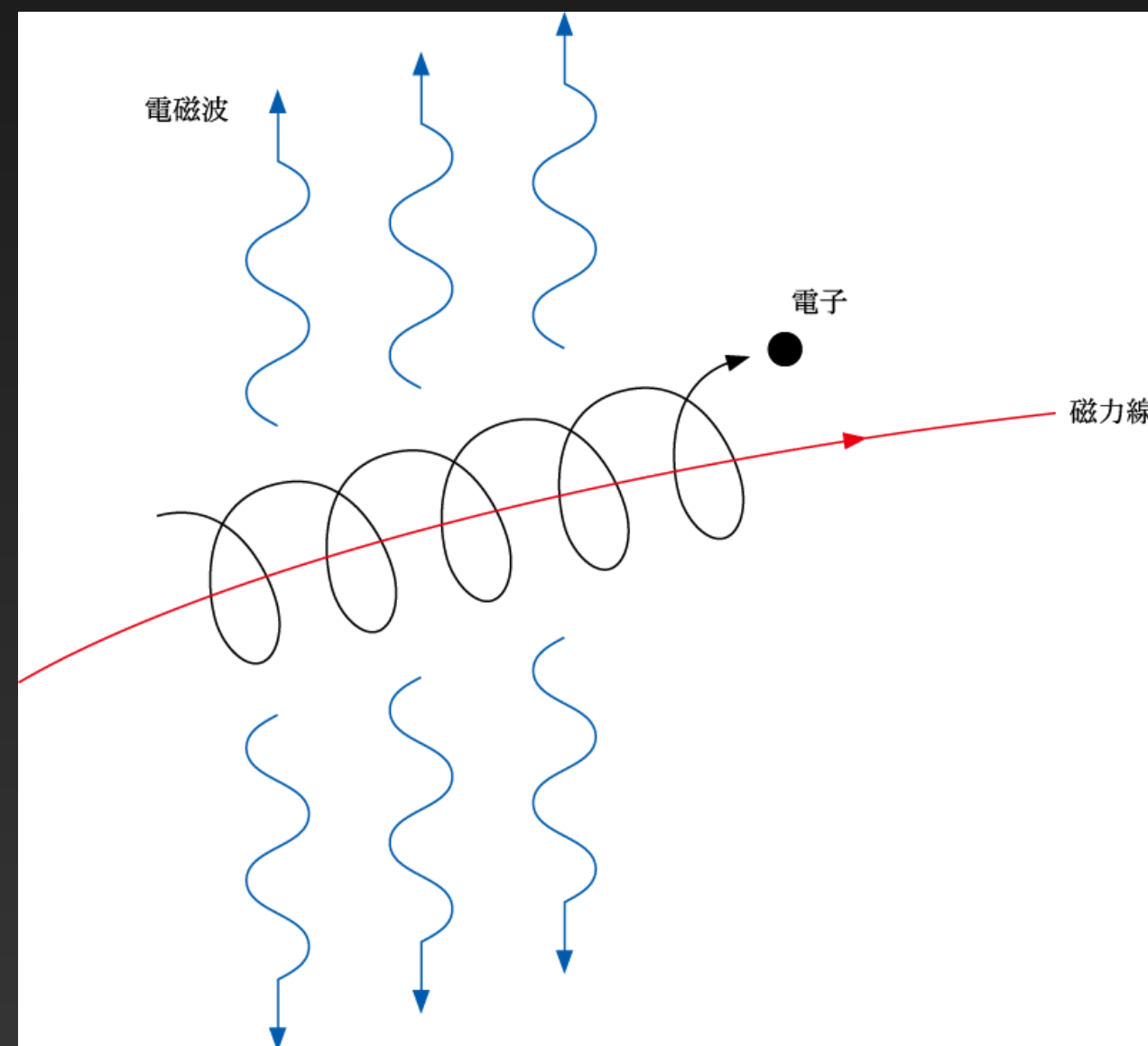
ウシオ電機株式会社HPより

宇宙磁場の観測

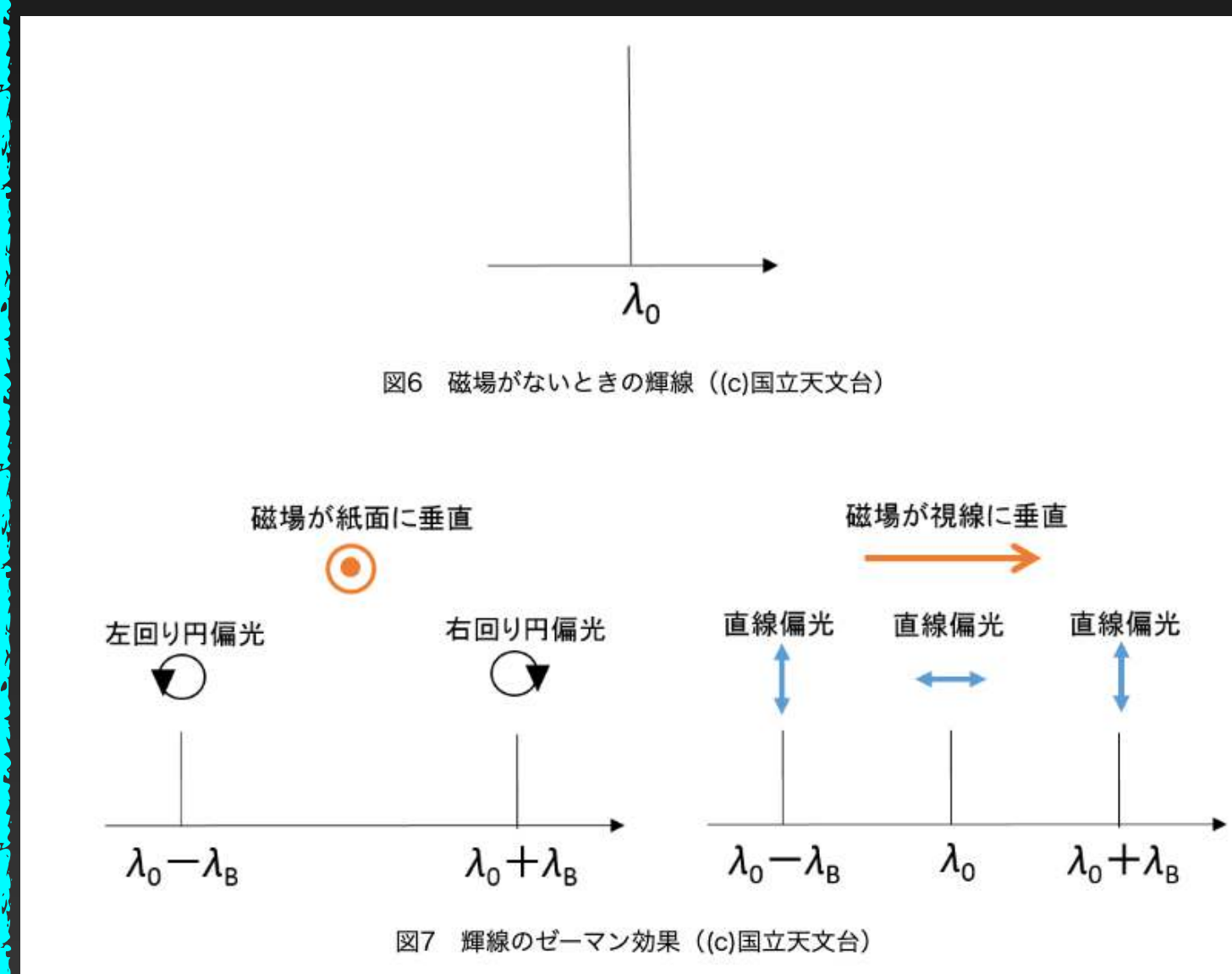
宇宙磁場自体は自ら光っていないので直接見えない。

→ **磁場に起因する電磁波 or 磁場の影響を受けた電磁波を観測する。**

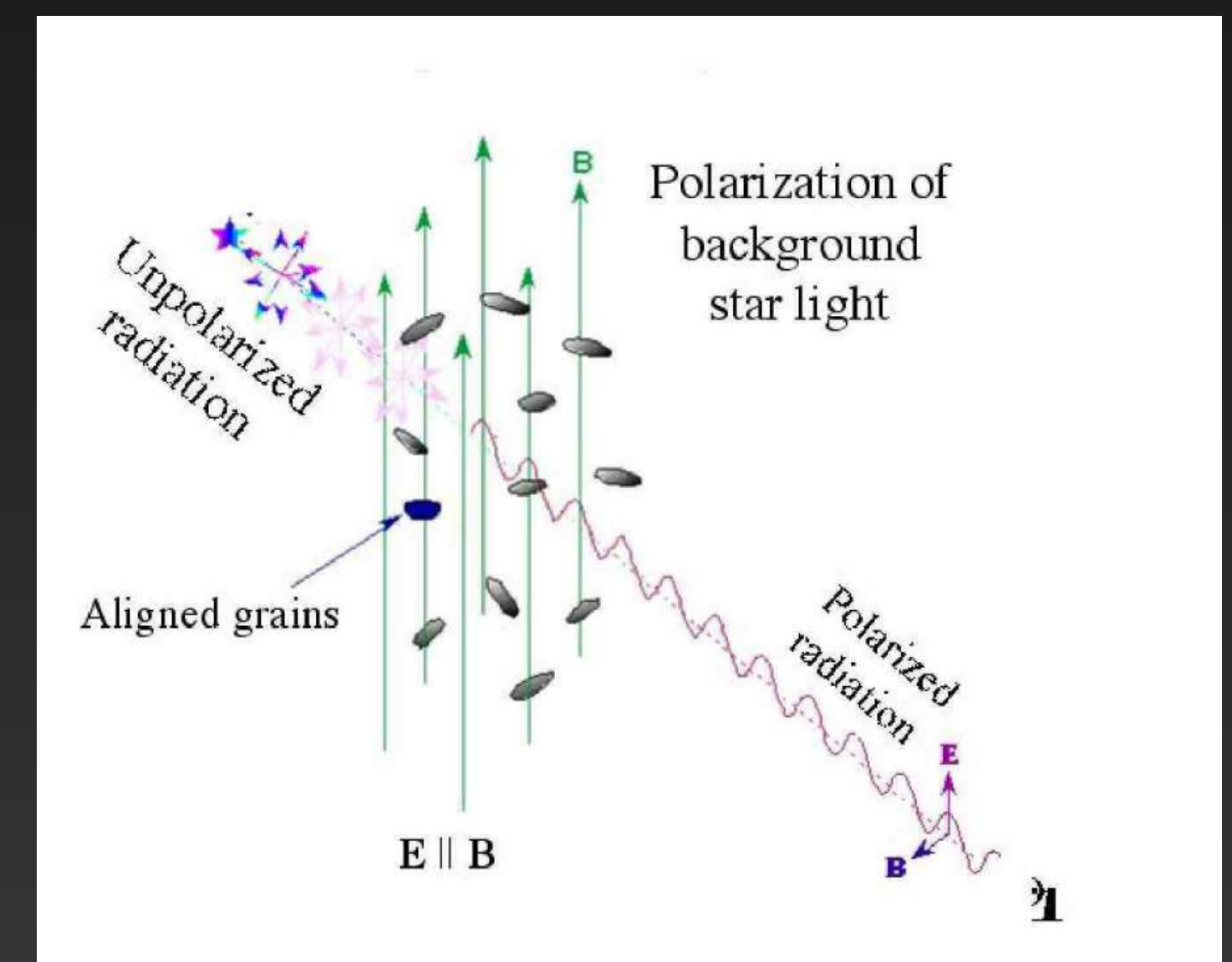
シンクロトロン放射



ゼーマン効果



星間ダストによる偏光



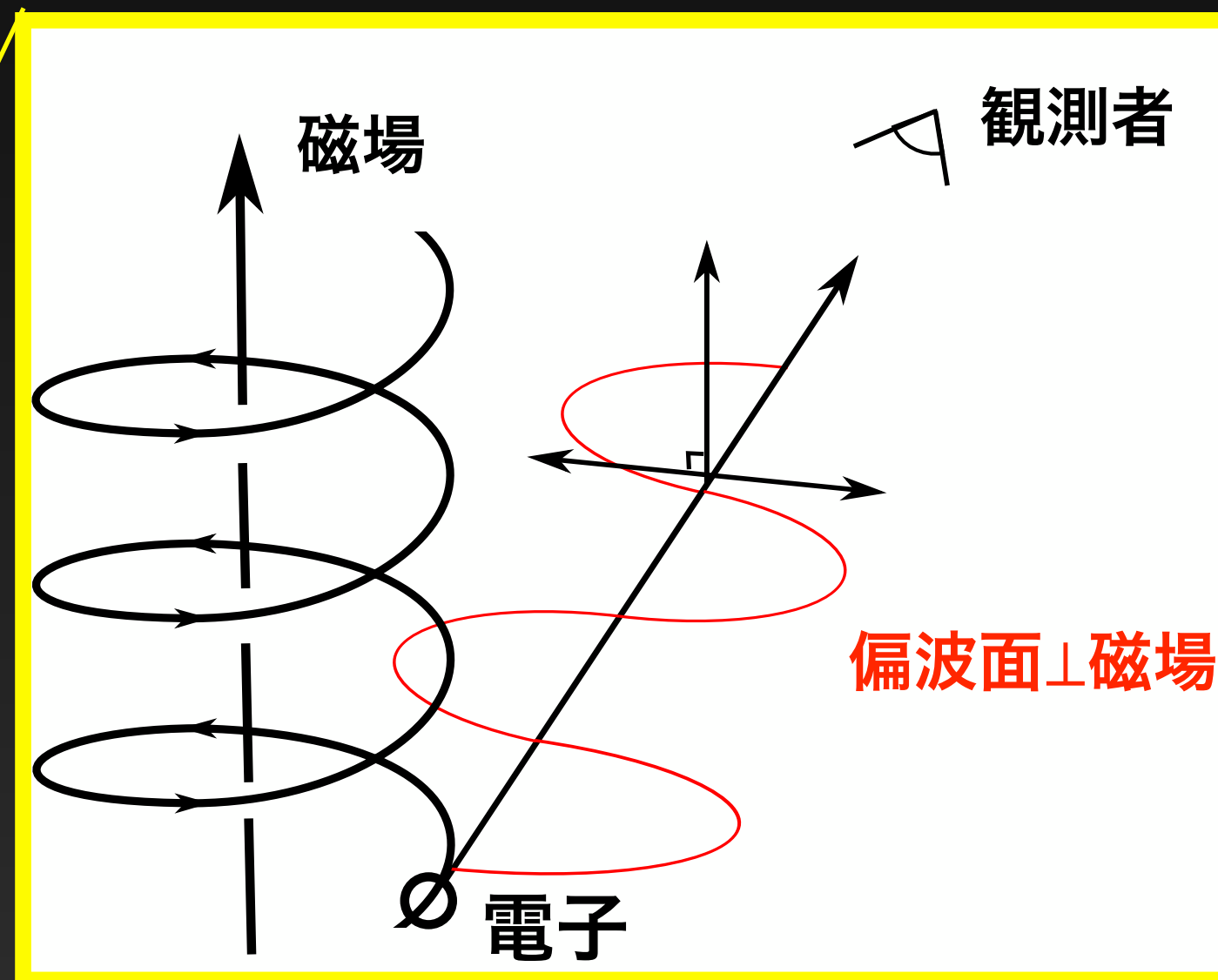
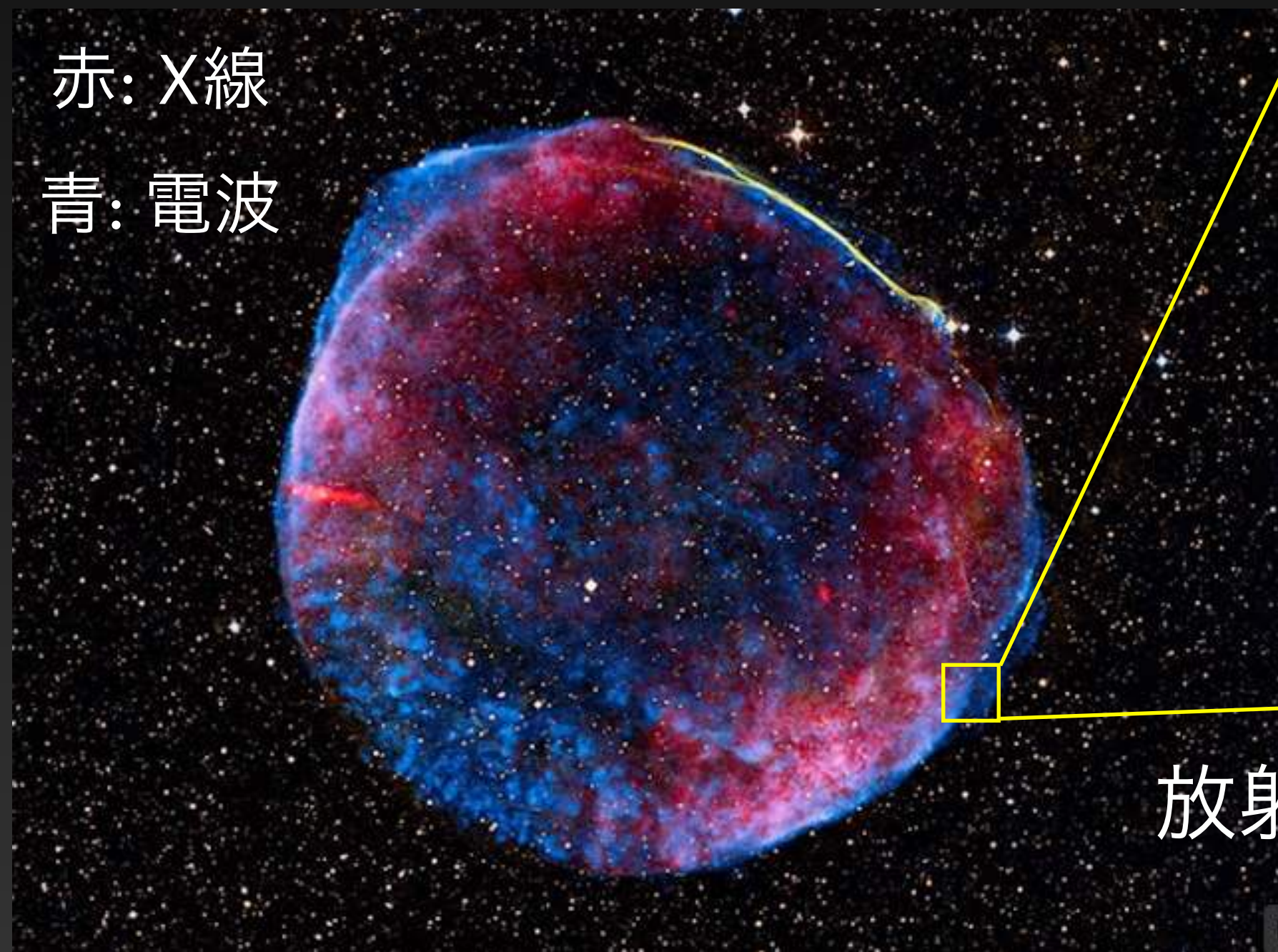
シンクロトロン放射

磁場の周りをらせん運動する宇宙線電子から放射される。

電場の振動方向が偏った電磁波→**偏波**

SN 1006 (超新星残骸)

赤: X線
青: 電波



電場の振動方向が観測でわかれば
視線に垂直な磁場の方向がわかる！
+
電子数密度がわかれば視線に垂直な
磁場の大きさがわかる！

$$\text{放射強度} : I(\nu) = \int A(p) n_e(r) B_{\perp}^{\frac{1+p}{2}}(r) \nu^{\frac{1-p}{2}} dr$$

$n_e(r)$: 天体の位置 r での電子数密度,

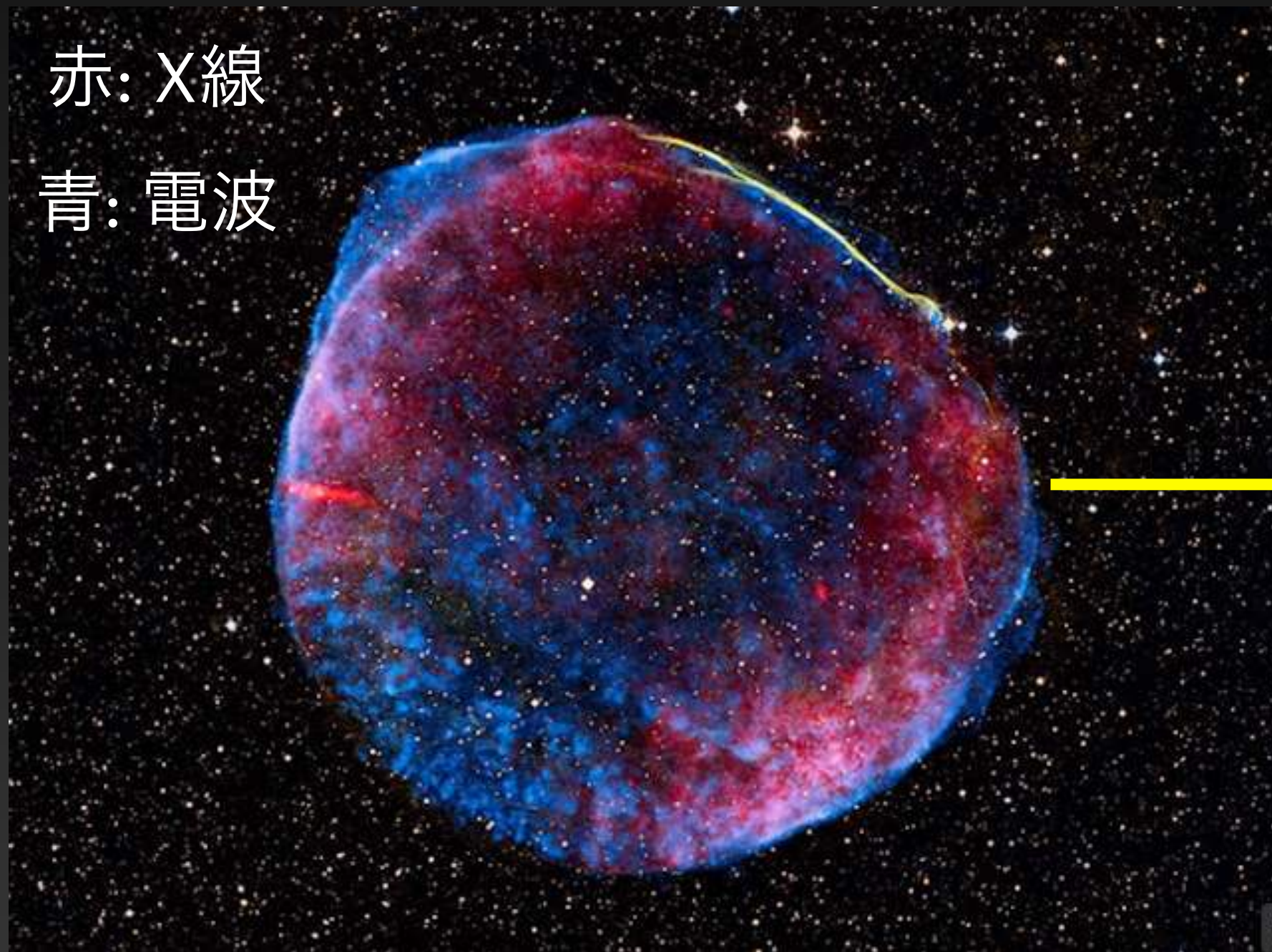
$B_{\perp}(r)$: 天体の位置 r での視線垂直磁場

ν : 観測周波数 [Hz] 13

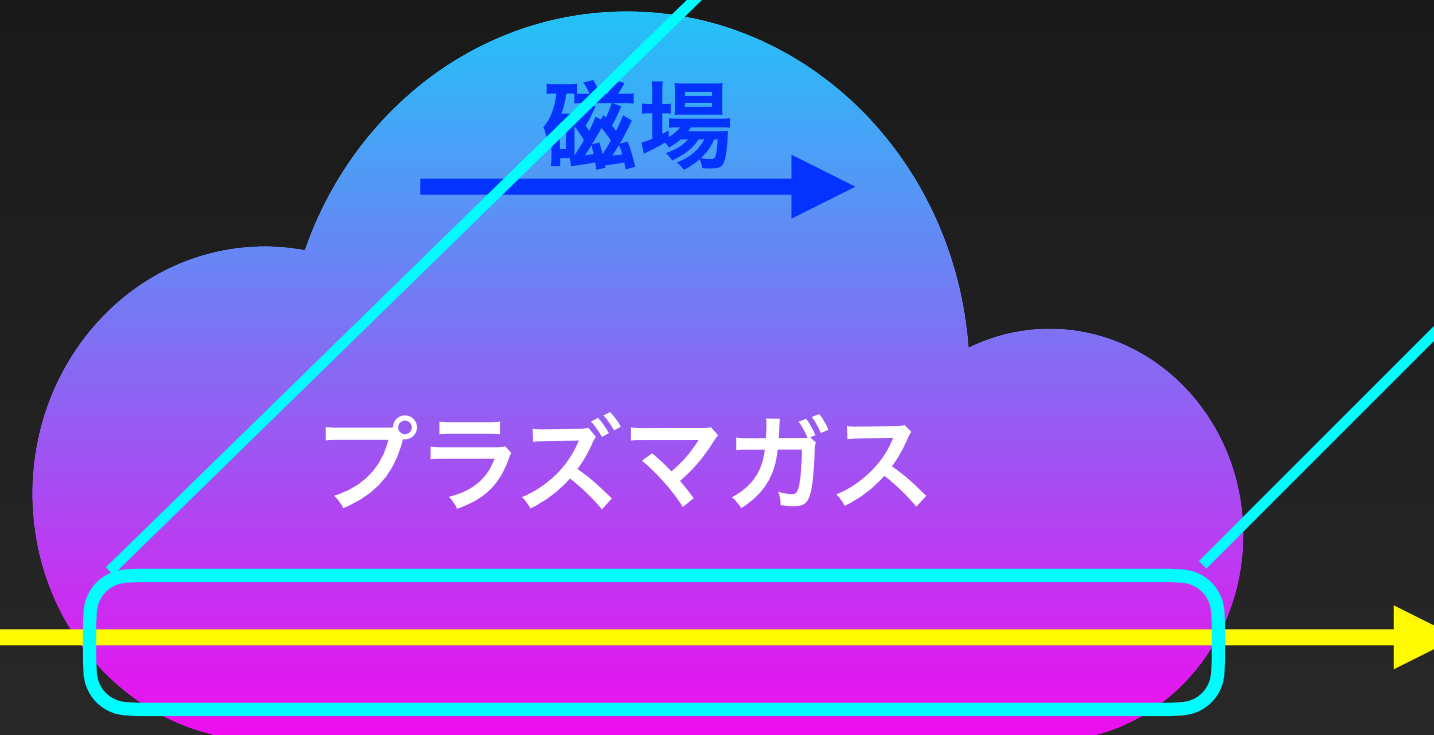
ファラデー回転

ただし実際はそれほど簡単ではない・・・

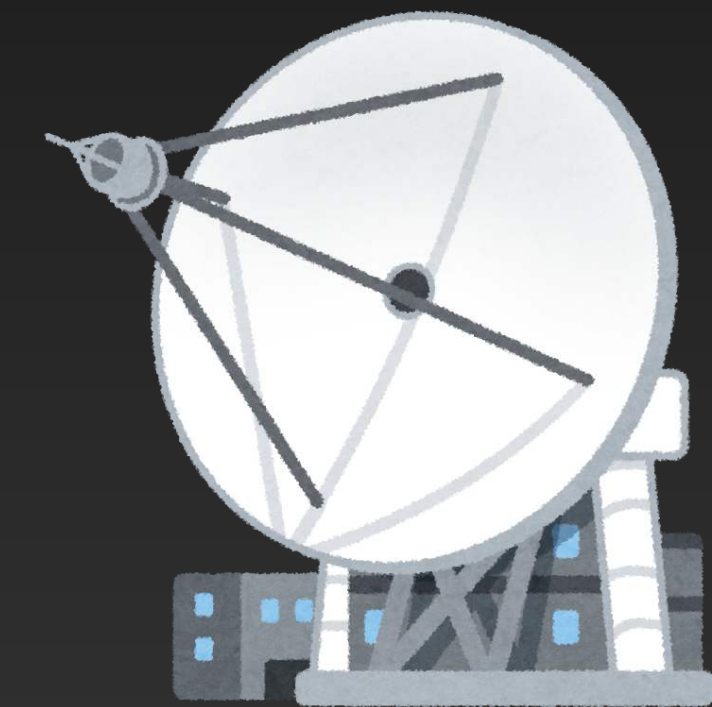
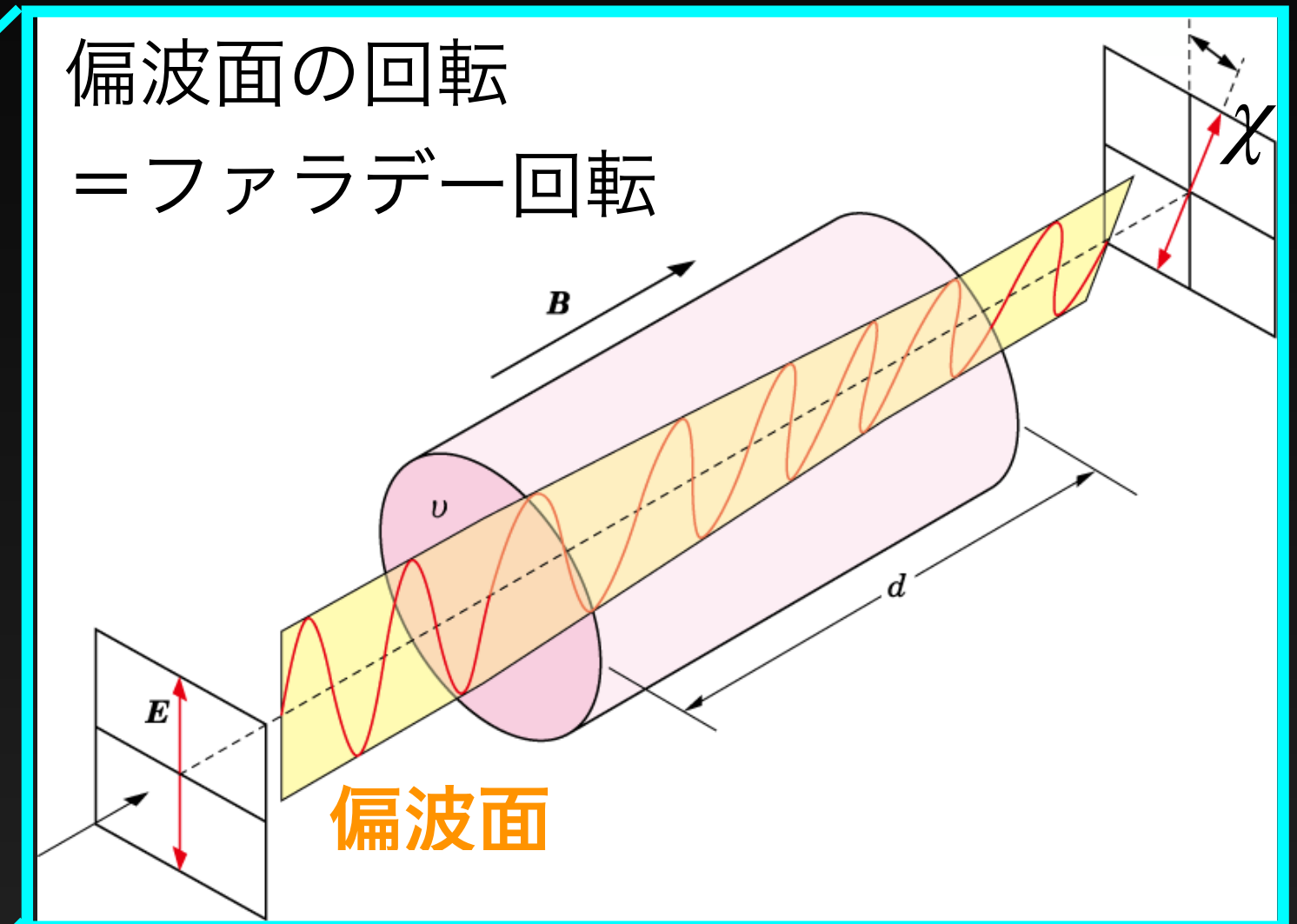
SN 1006 (超新星残骸)



赤: X線
青: 電波



シンクロトロン放射

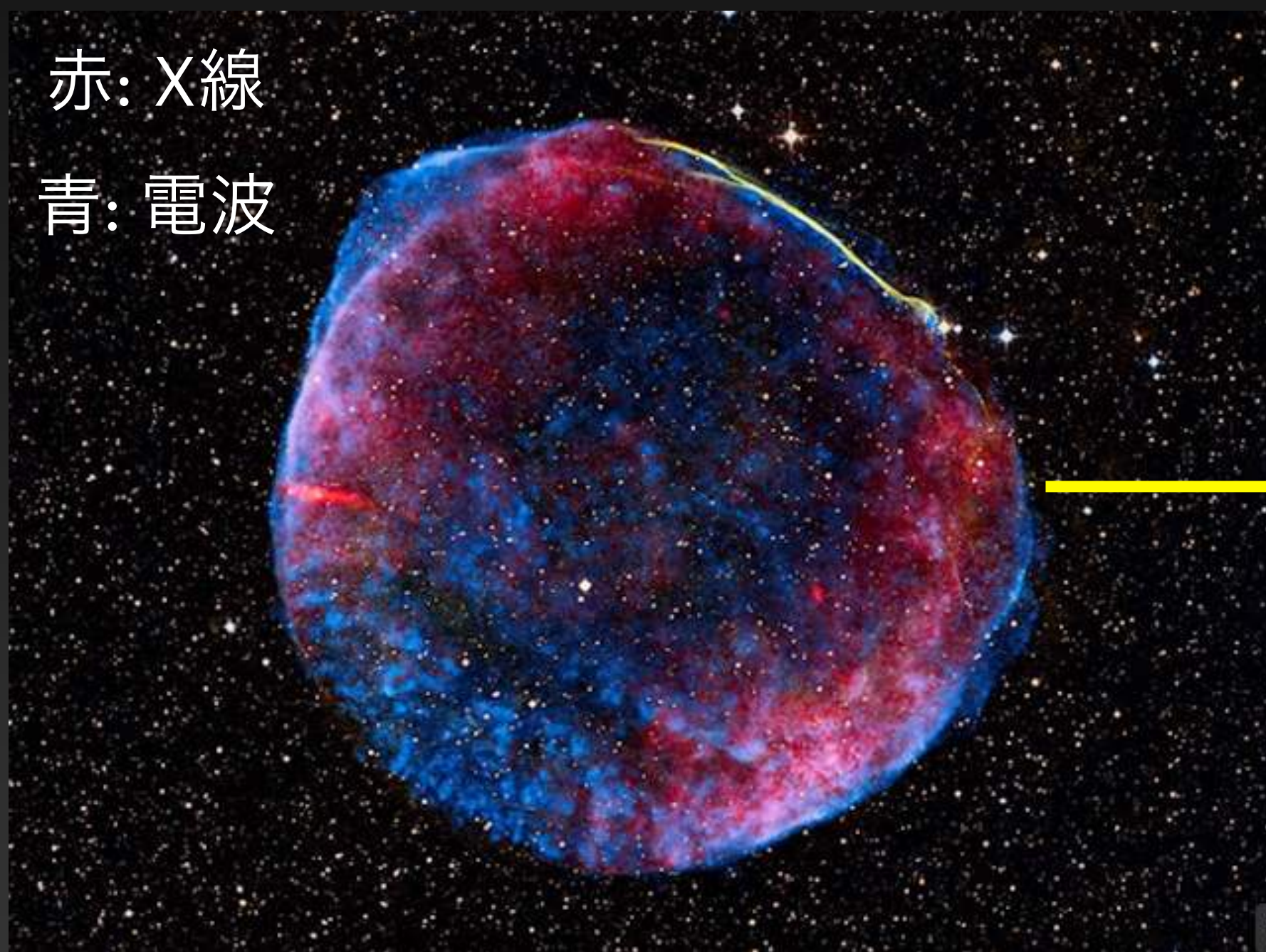


観測者

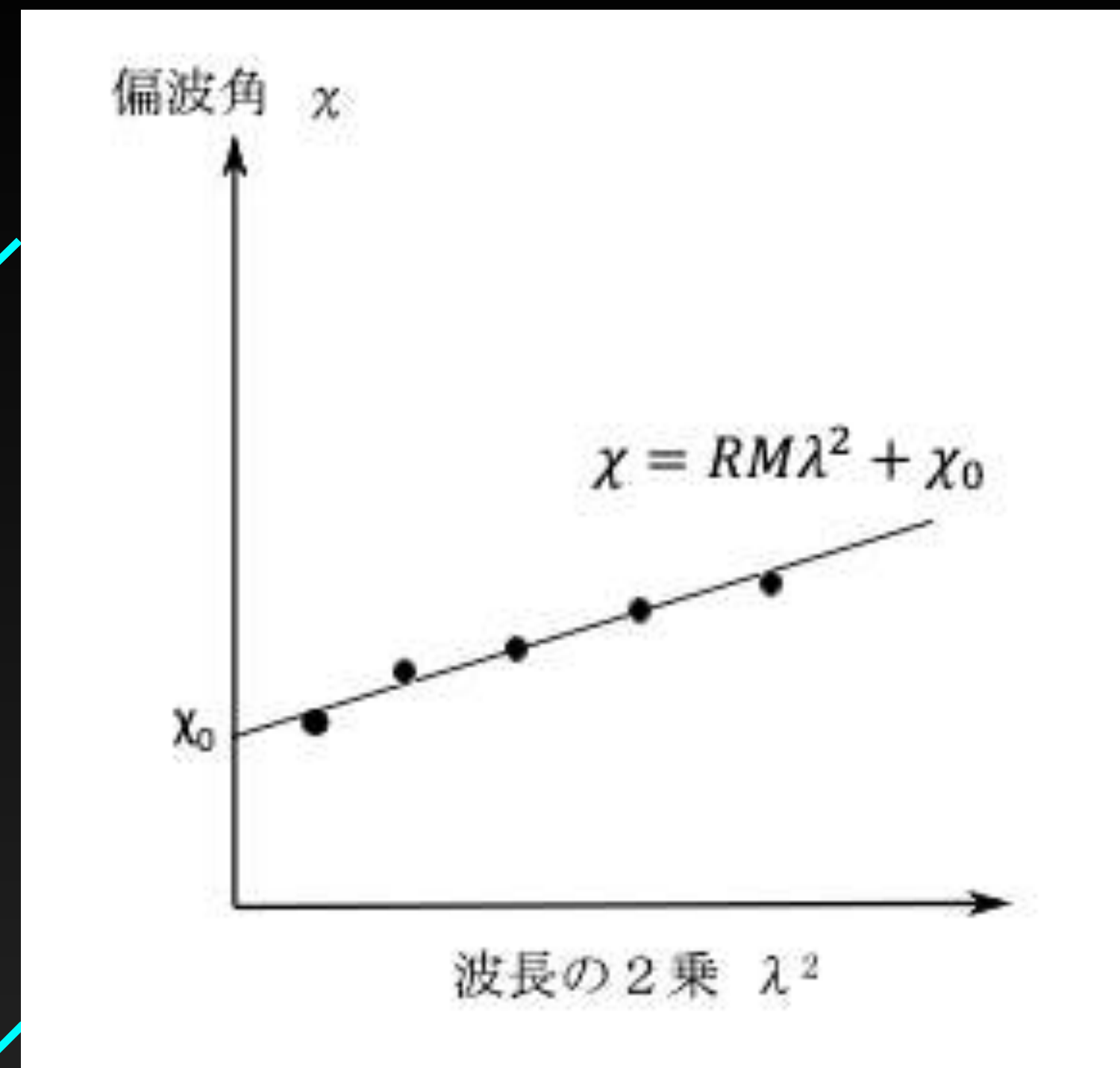
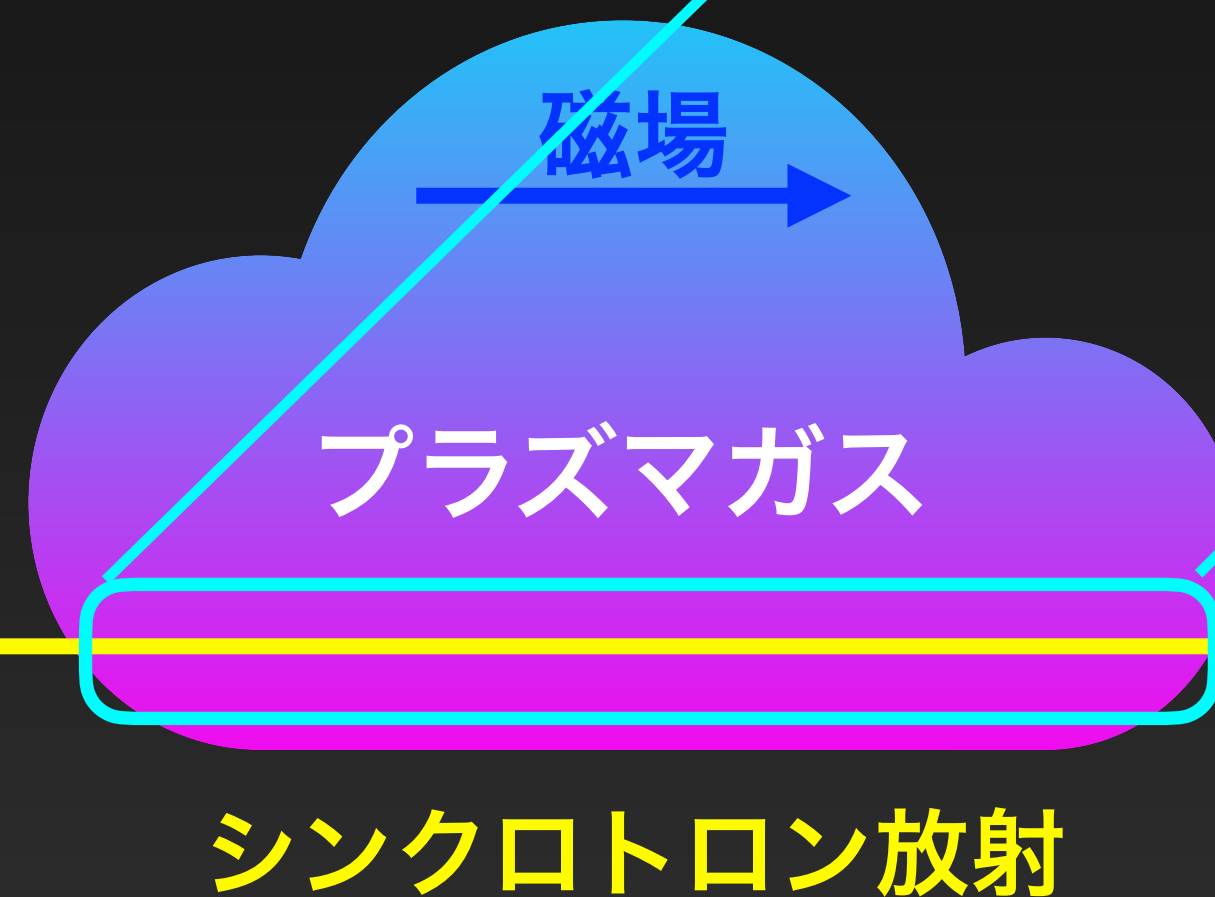
ファラデー回転

ただし実際はそれほど簡単ではない・・・

SN 1006 (超新星残骸)



赤: X線
青: 電波



観測される偏波角: **Rotation Measure**

$$\chi - \chi_0 = \int_{-\infty}^0 \frac{(k_- - k_+)}{2} dz = \boxed{RM} \lambda^2$$

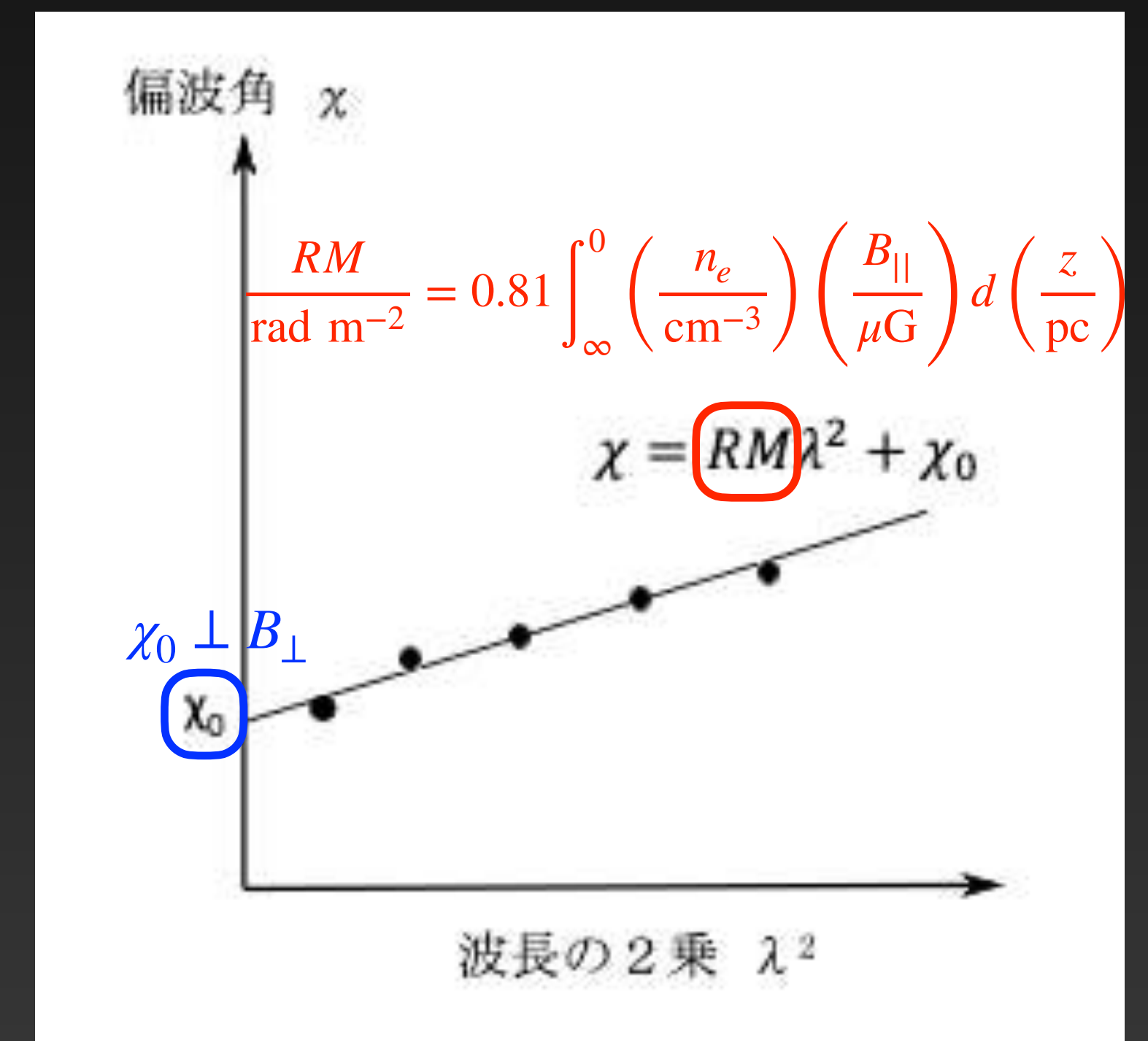
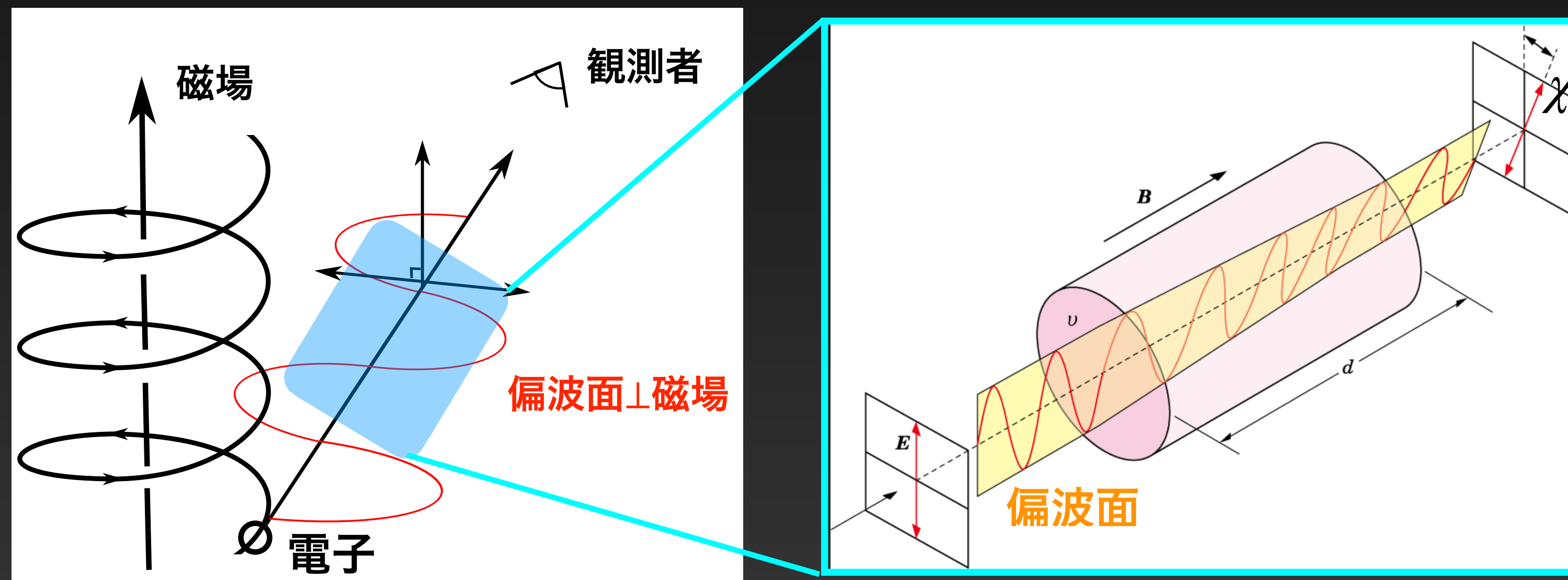
χ_0 : 回転を受けていない真の偏波角

$$\frac{RM}{\text{rad m}^{-2}} = 0.81 \int_{-\infty}^0 \left(\frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right) \left(\frac{B_{\parallel}}{\mu\text{G}} \right) d \left(\frac{z}{\text{pc}} \right)$$

宇宙磁場の観測のまとめ (シンクロトロン放射)

シンクロトロン放射の観測により、**視線に垂直&平行な磁場**の情報が得られる！

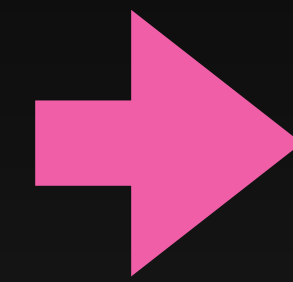
* ただし本当はもう少し複雑 (n_e をどう求める？複数のプラズマ領域がある場合は？)



磁場観測の困難さ

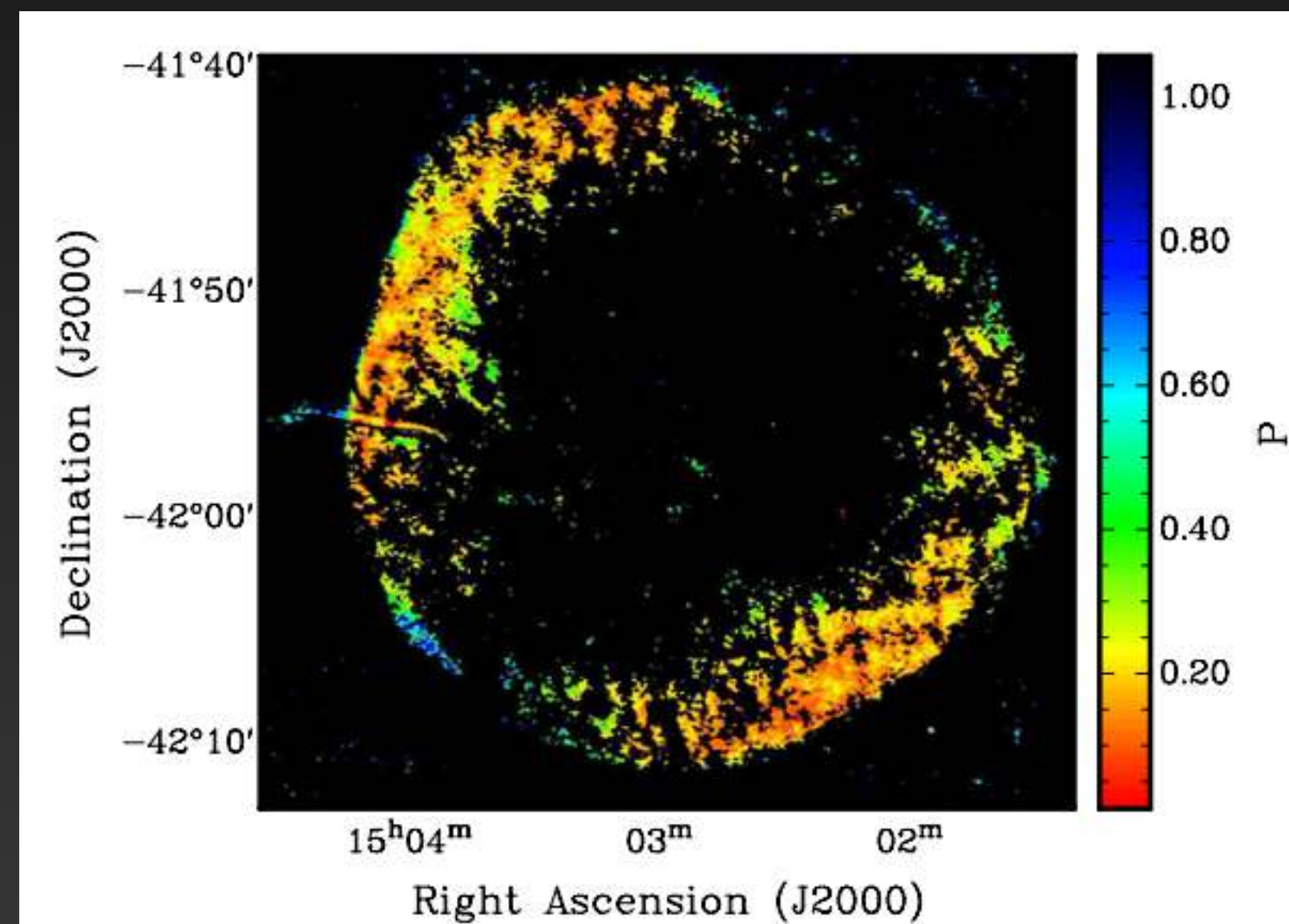
問題点：

- ① 偏波放射は弱い → 高感度
- ② 偏波解消を起こす → 高分解能

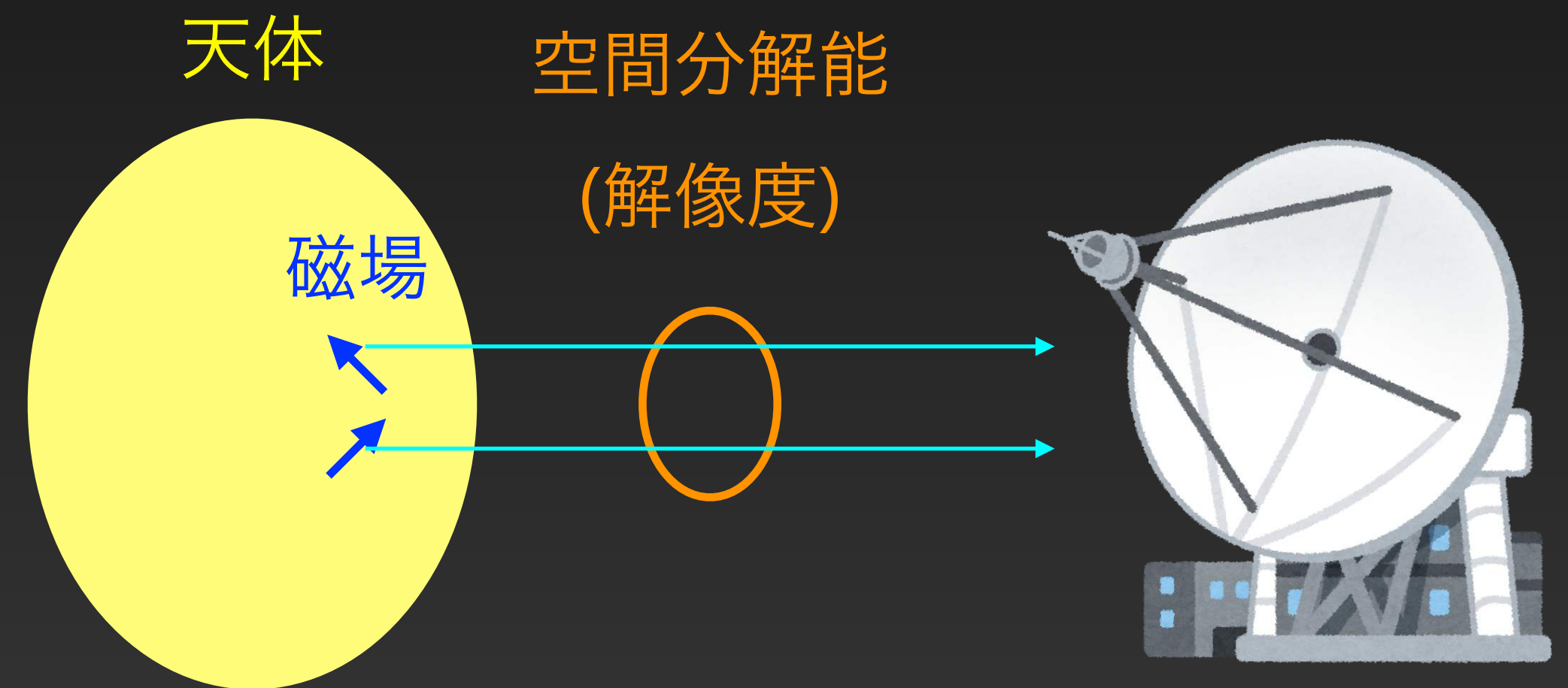


性能の良い観測装置が必要！

シンクロトロン放射 = 偏波成分 + 無偏波成分
偏波率：数%～数十%



Reynoso et al. (2013)



次世代大型電波干渉計計画 SKA

電波望遠鏡

電波望遠鏡には**単一鏡**と**干渉計**がある。

単一鏡：アンテナ1台で観測する

野辺山45m電波望遠鏡



- ・ 空間的に広い領域を観測可能
- ・ データ処理が比較的簡単
- ・ 空間分解能に限界がある
- ・ 感度にも限界がある

干渉計：複数台のアンテナで観測する



- ・ 空間分解能が高い
- ・ 感度も高い
- ・ 淡く広がった放射を見落とししやすい
- ・ データの処理が煩雑

Square Kilometre Array (SKA)

現在建設が進められている世界最大規模の電波干渉計。

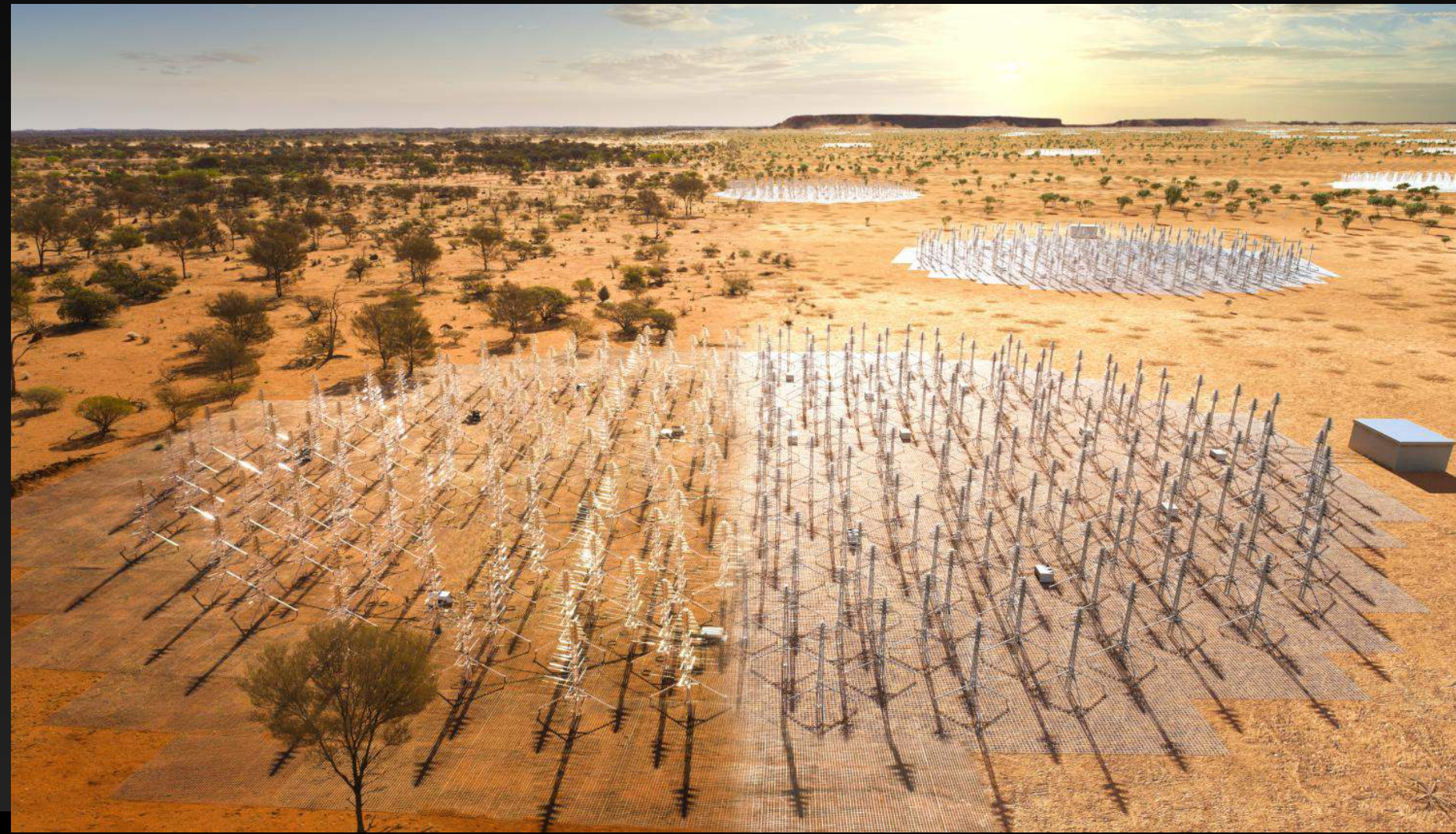
SKA-Low



SKA-Mid



Square Kilometre Array (SKA)



SKA-Low in numbers

Size: 131,072 log-periodic antennas spread between 512 stations

Collecting area: 419,000m²

Maximum distance between antenna stations: 74km

Frequency range: 50 MHz - 350 MHz



SKA-Mid in numbers

Size: 197 fully steerable dishes, including the existing MeerKAT radio telescope

Collecting area: 33,000m²

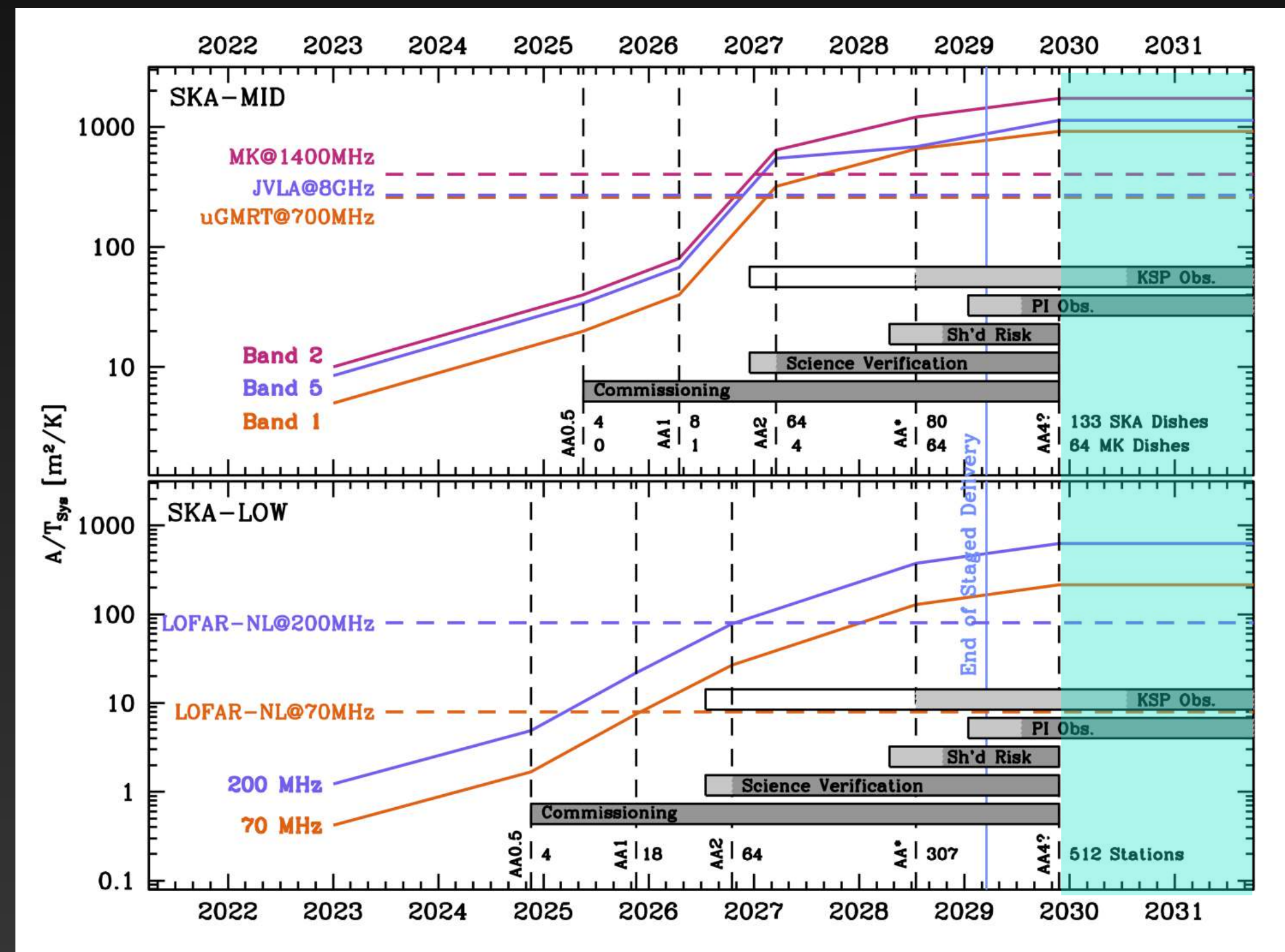
Maximum distance between dishes: 150km

Frequency range: 350 MHz - 15.4 GHz, with a goal of 24 GHz

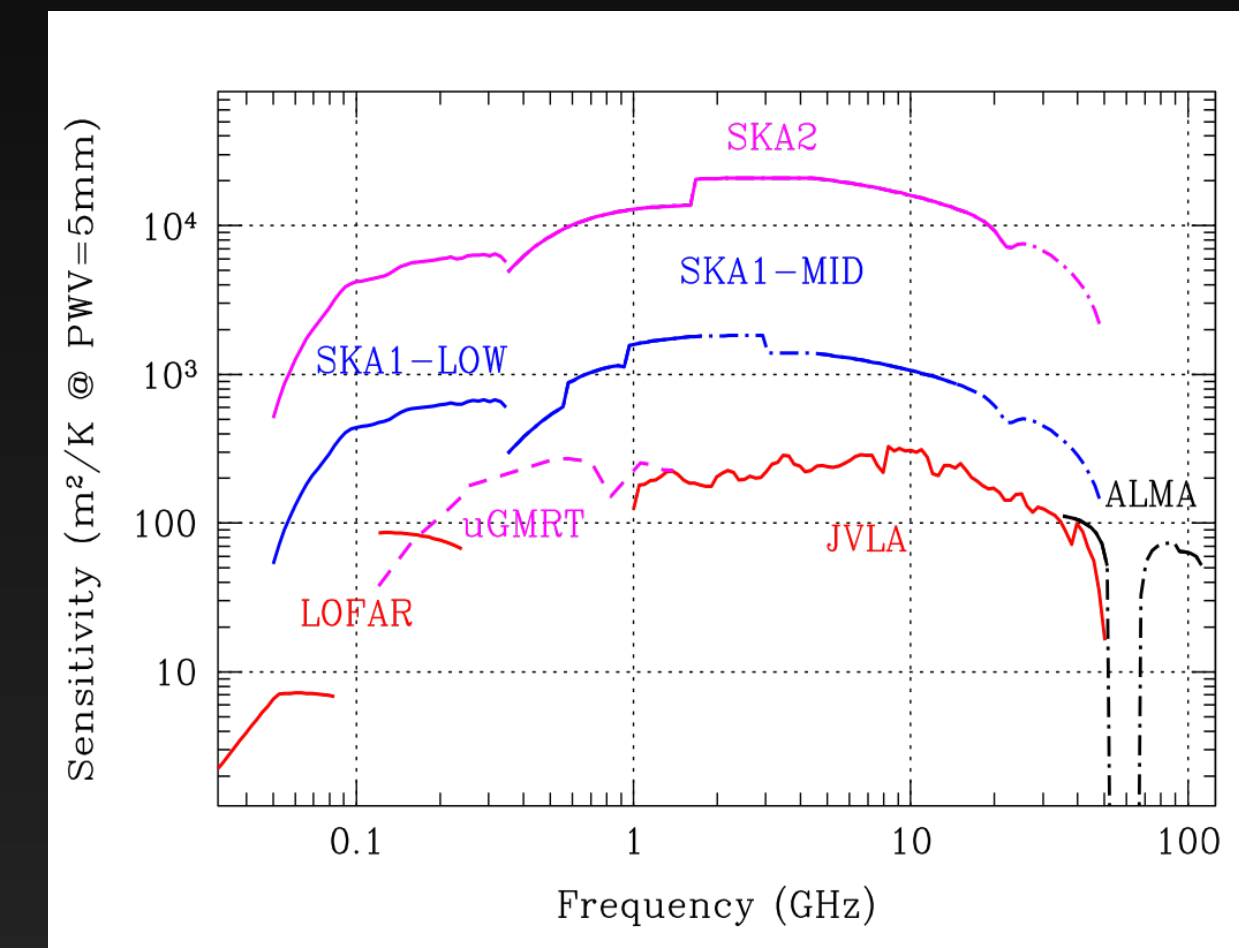
SKAタイムライン

SKA1は2030年, SKA2は2035年頃に
本格運用開始予定!

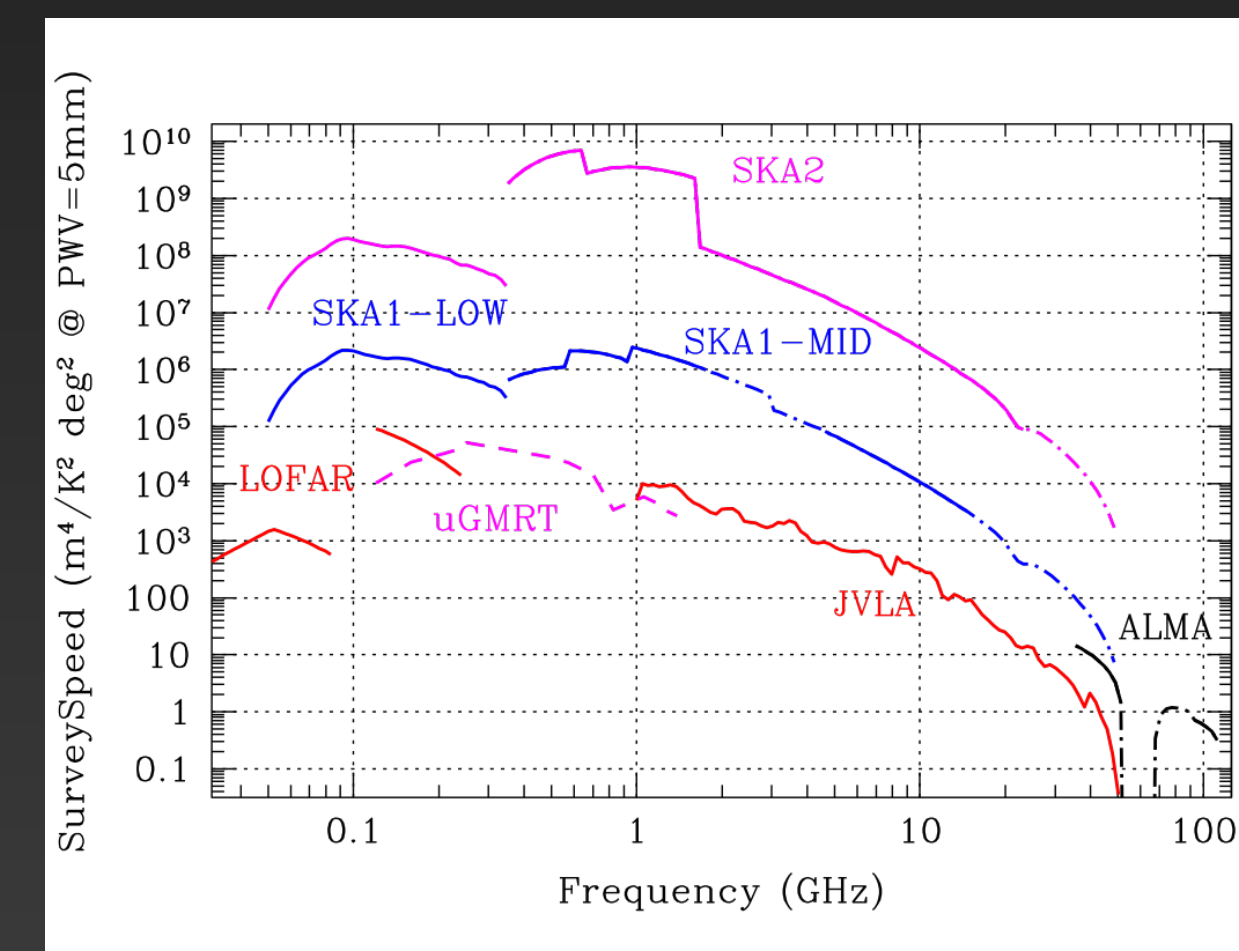
SKA1



Comparison of Telescopes (Sensitivity)



Comparison of Telescopes (Survey Speed)



SKA先行機

SKAのテストのための電波望遠鏡. **多くの優れた成果を報告.**

MeerKAT

- South Africa
- 580 - 3500 MHz



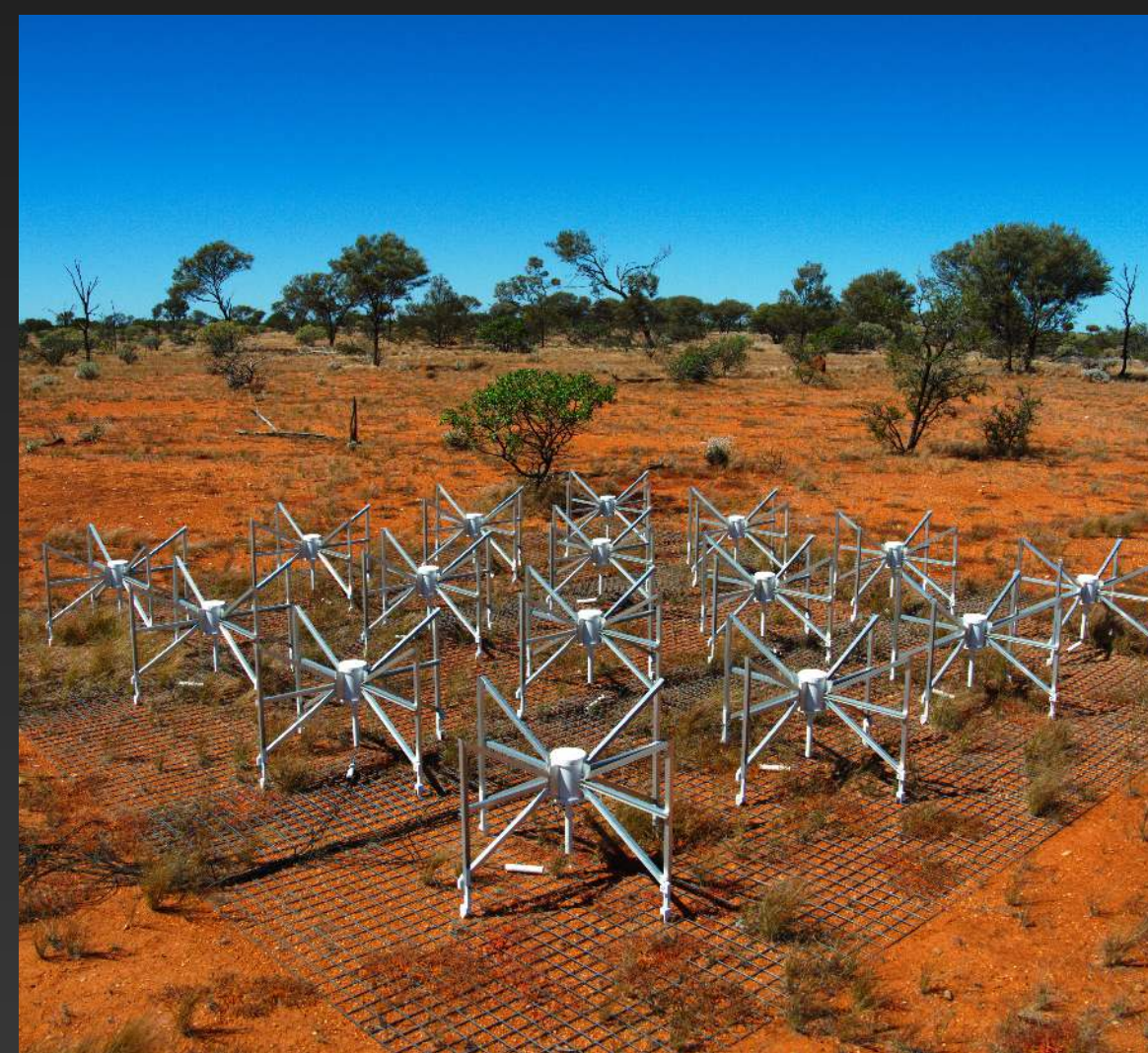
ASKAP

- Australia
- 700 - 1800 MHz



MWA

- Australia
- 70 - 300 MHz



HERA

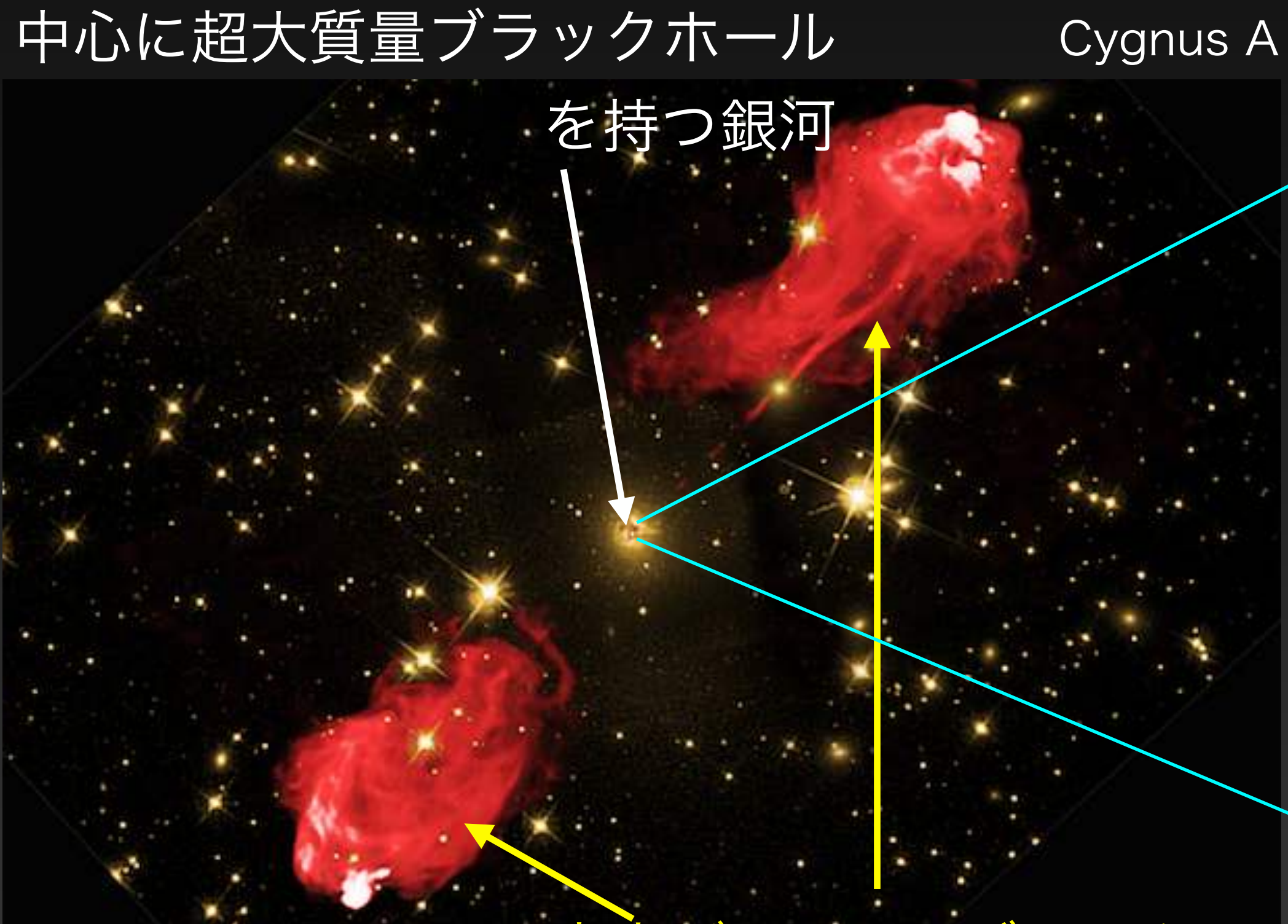
- South Africa
- 50 - 250 MHz



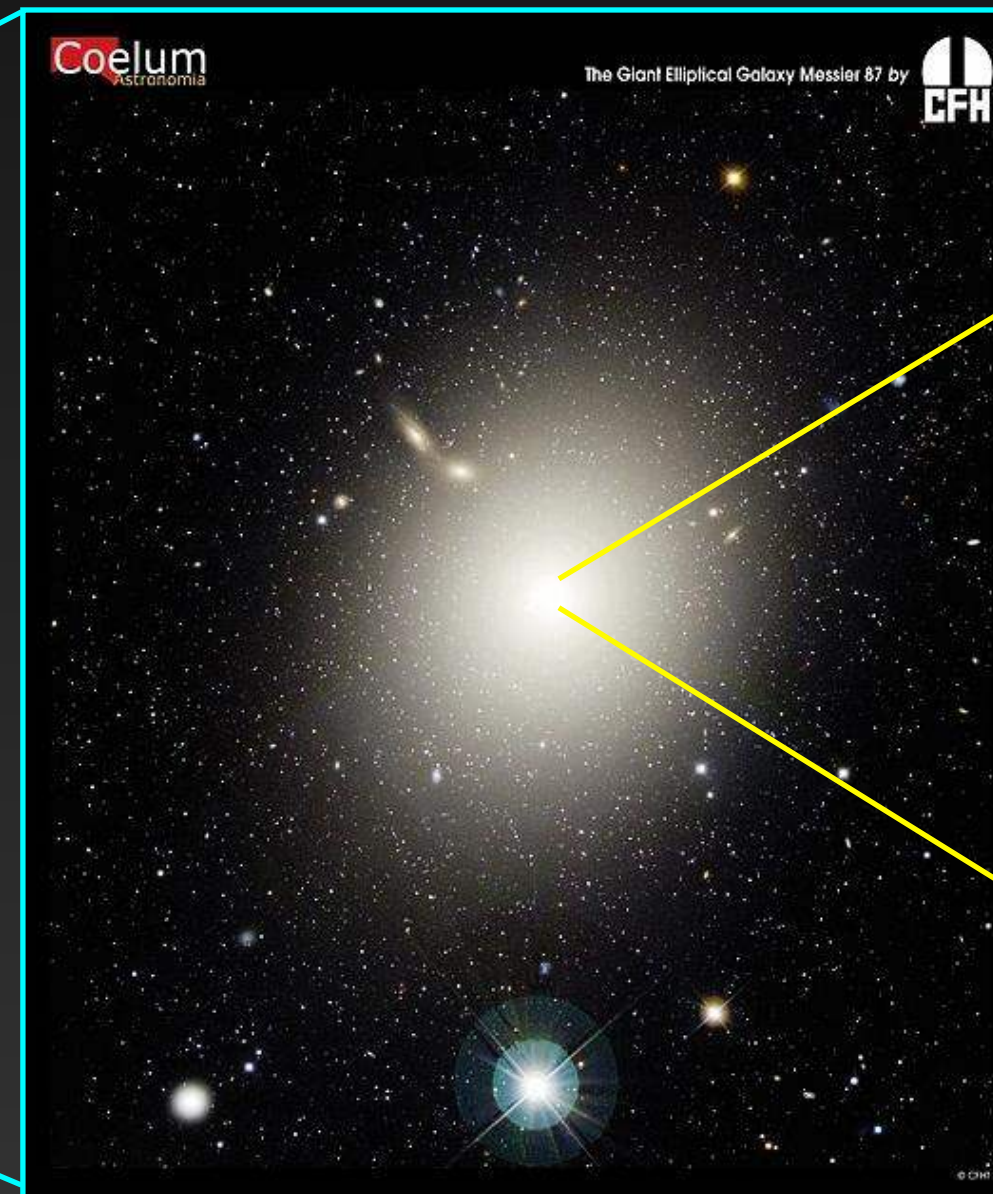
MeerKATで迫る折れ曲がる宇宙ジェットの謎

宇宙ジェット

コンパクト天体 (BH, NS)に降着したガスの一部が細く絞られて噴出する現象.



銀河 (M87) *左とは別天体！



超大質量ブラックホール



<https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190410-eht.html>

宇宙ジェット：ブラックホールに落ちた物質(ガス)の一部

銀河団

数百～数千個の銀河が集まる集団。

数千万度から 1 億度の高温なガスで満たされている。

銀河 (M87)



銀河団 (おとめ座銀河団)

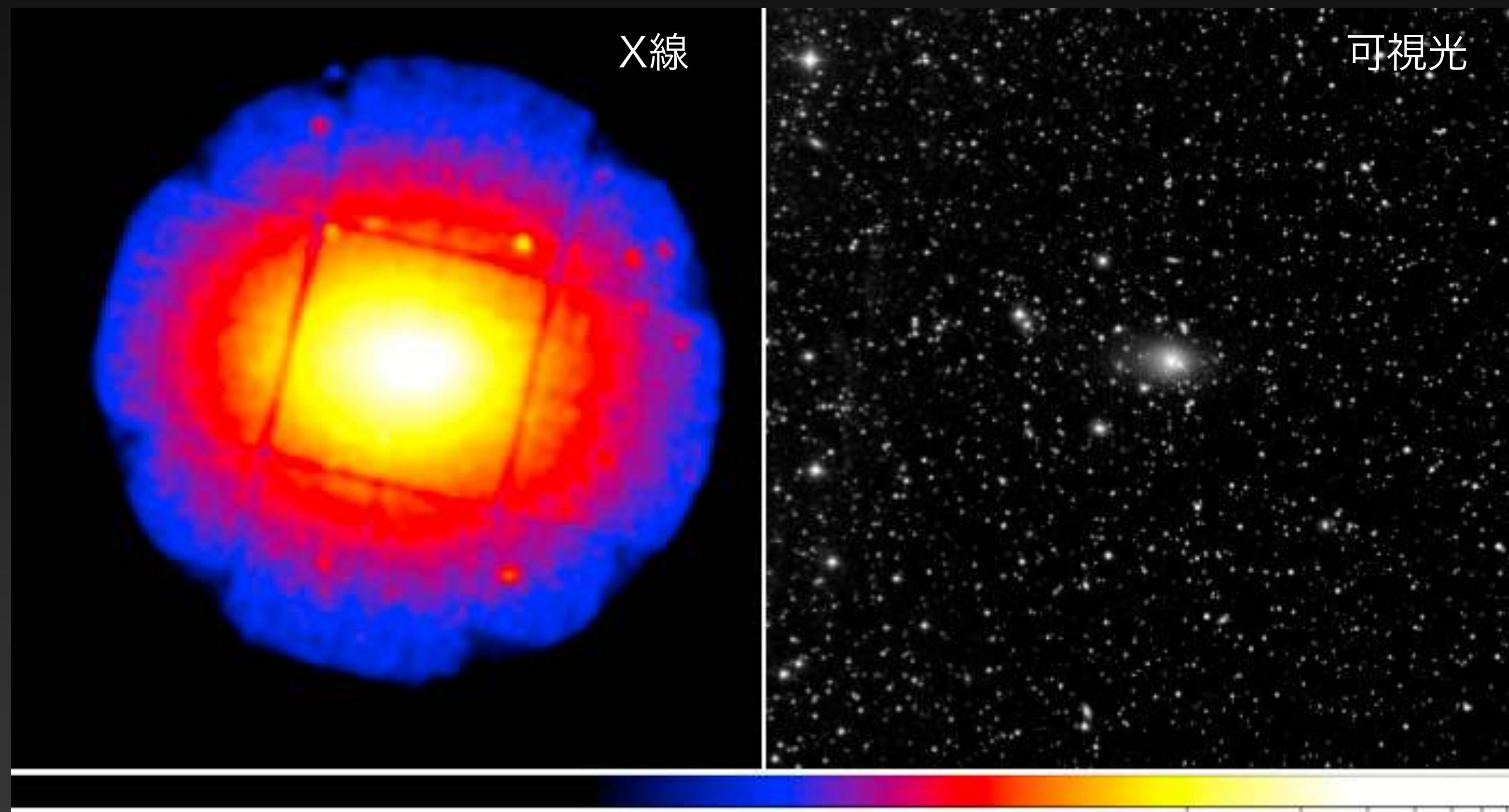


クレジット：東京大学木曾観測所

銀河団

数百～数千個の銀河が集まる集団。

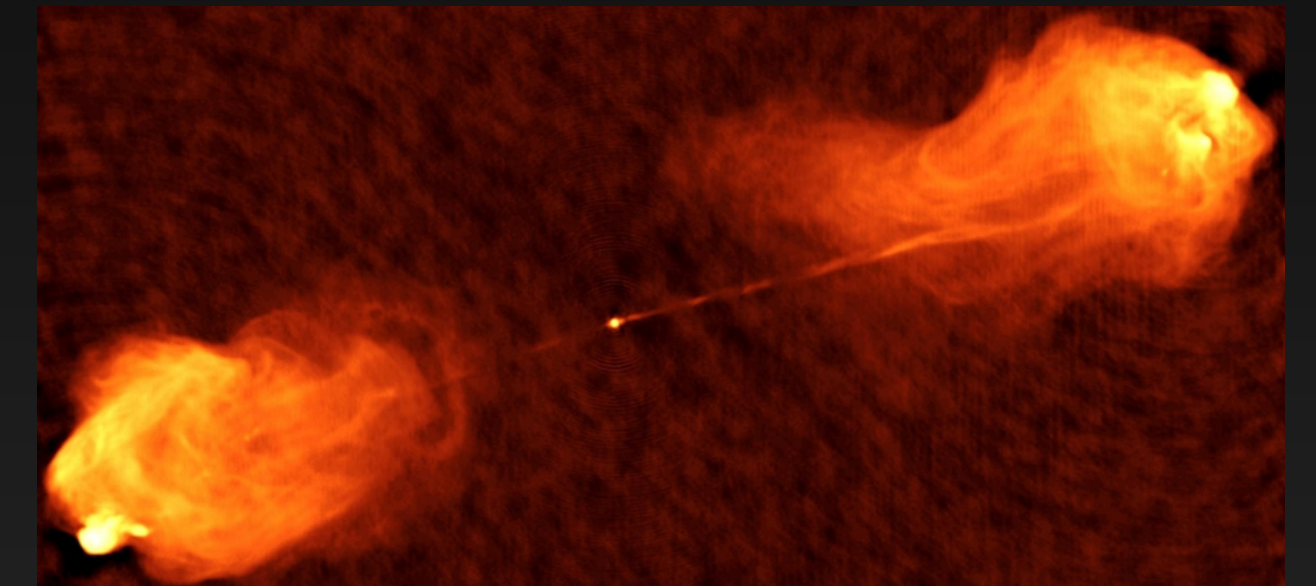
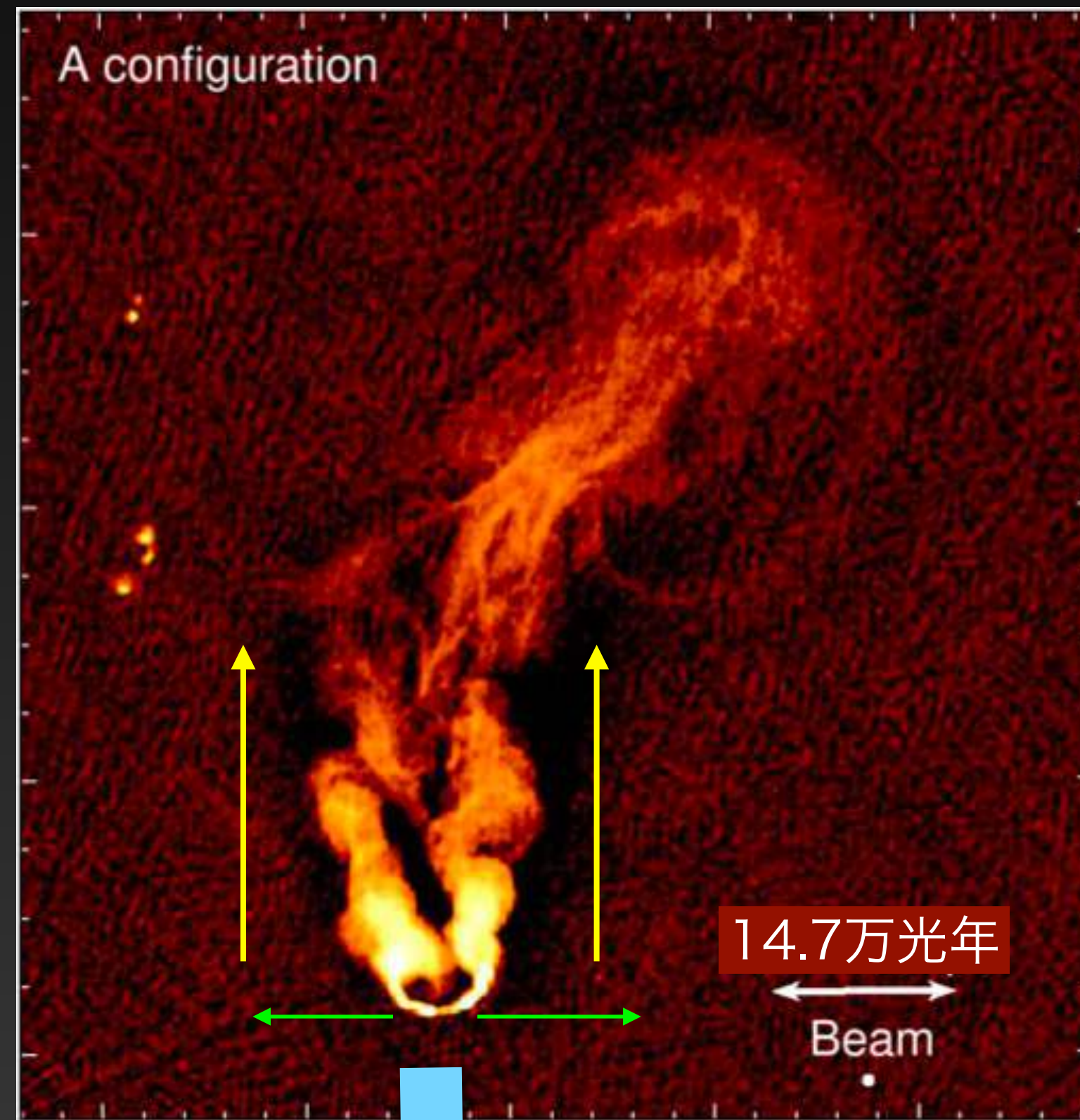
数千万度から1億度の高温なガスで満たされている。



銀河団内の折れ曲がったジェット

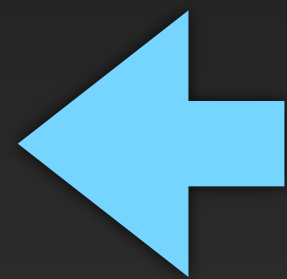
Head-tail radio galaxy : 折れ曲がったジェット (WAT, NAT)を持つ銀河の総称.

Gendron-Marsolais et al. (2020)



Credit: NRAO/AU

移動方向



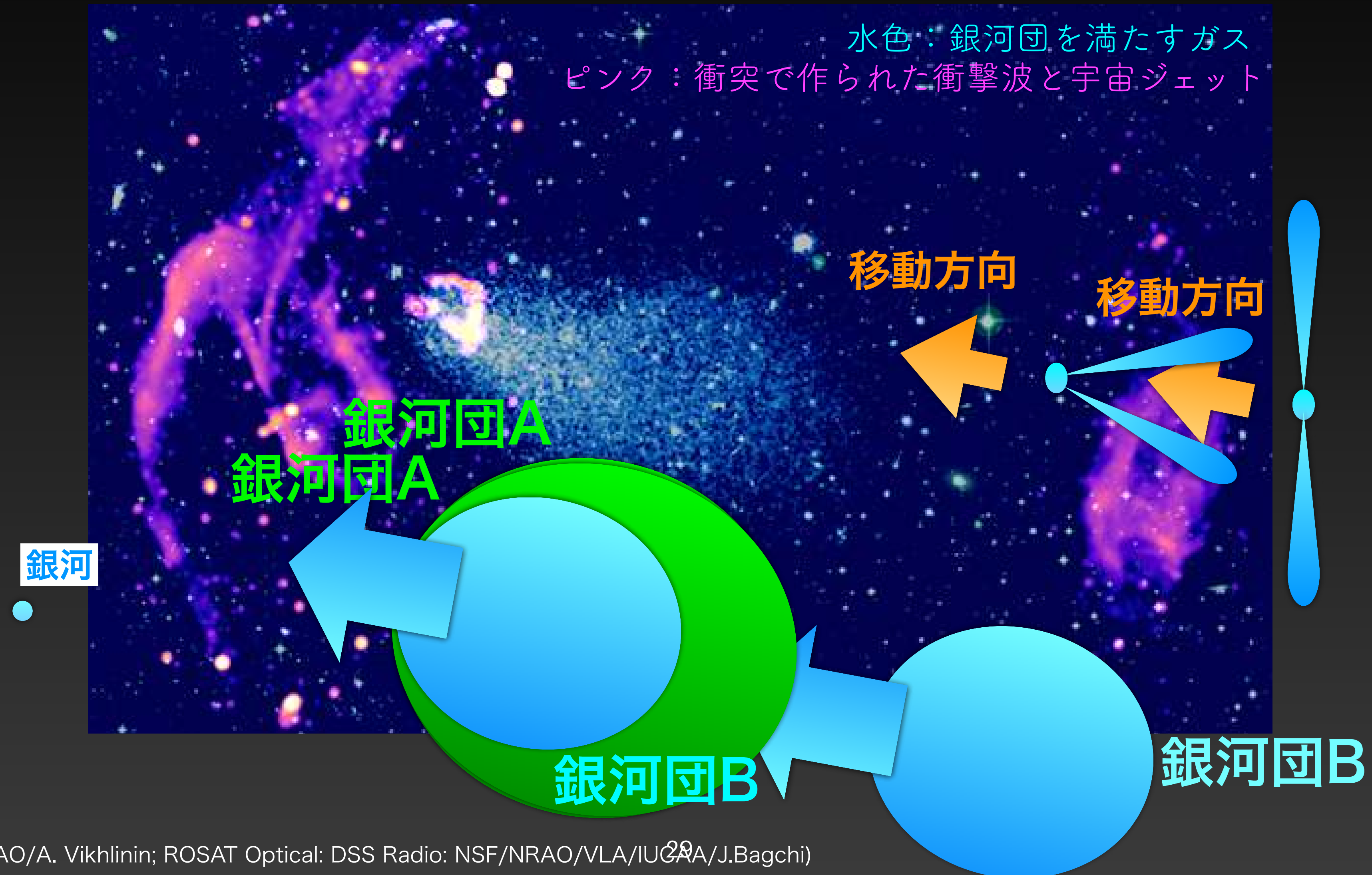
風の方角



銀河の移動方向



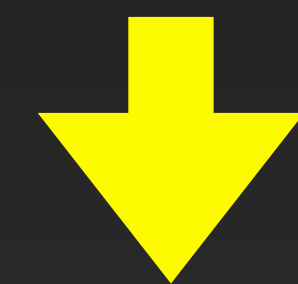
衝突銀河団 Abell 3376



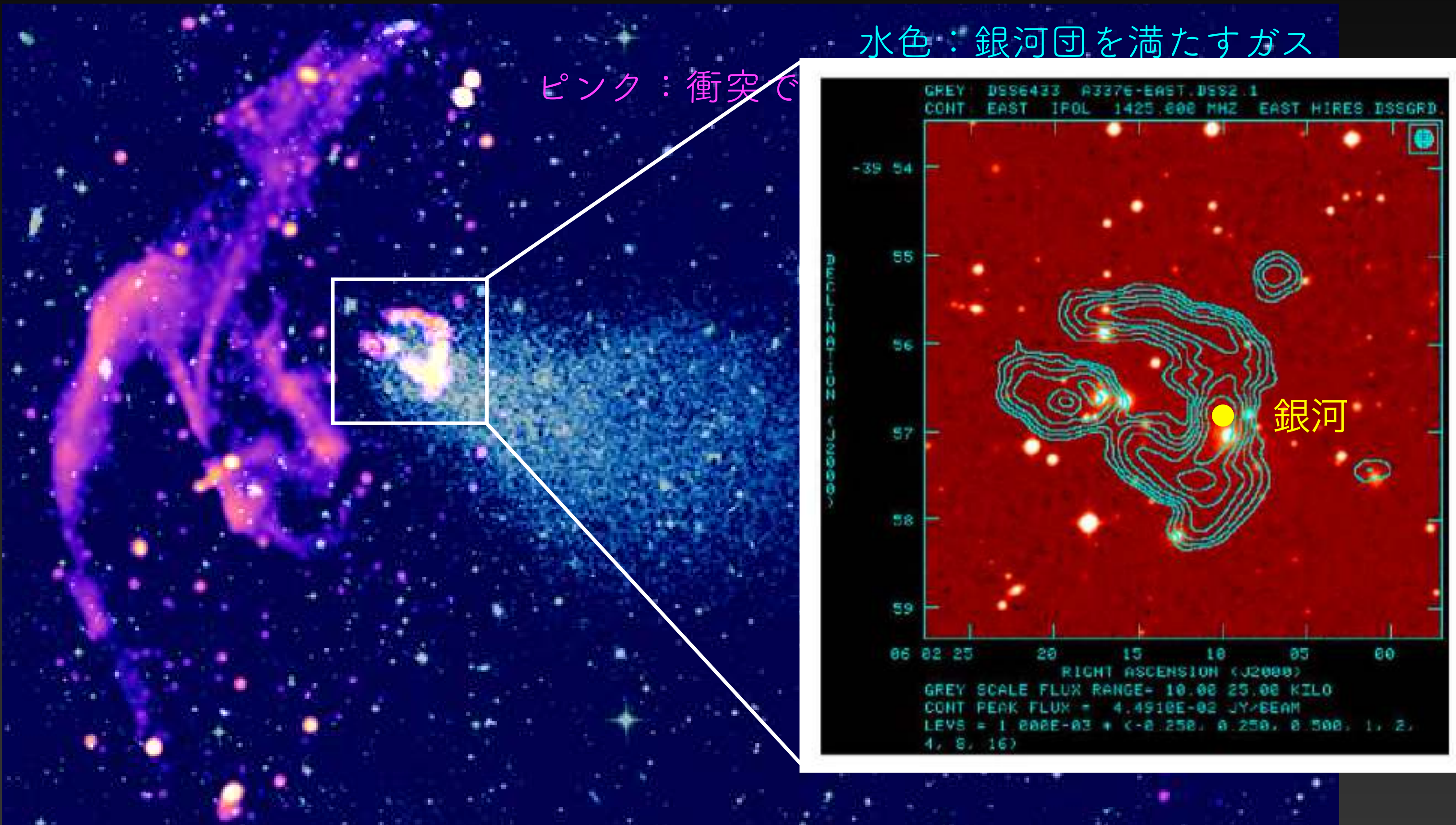
MRC 0600-399

MRC 0600-399 :

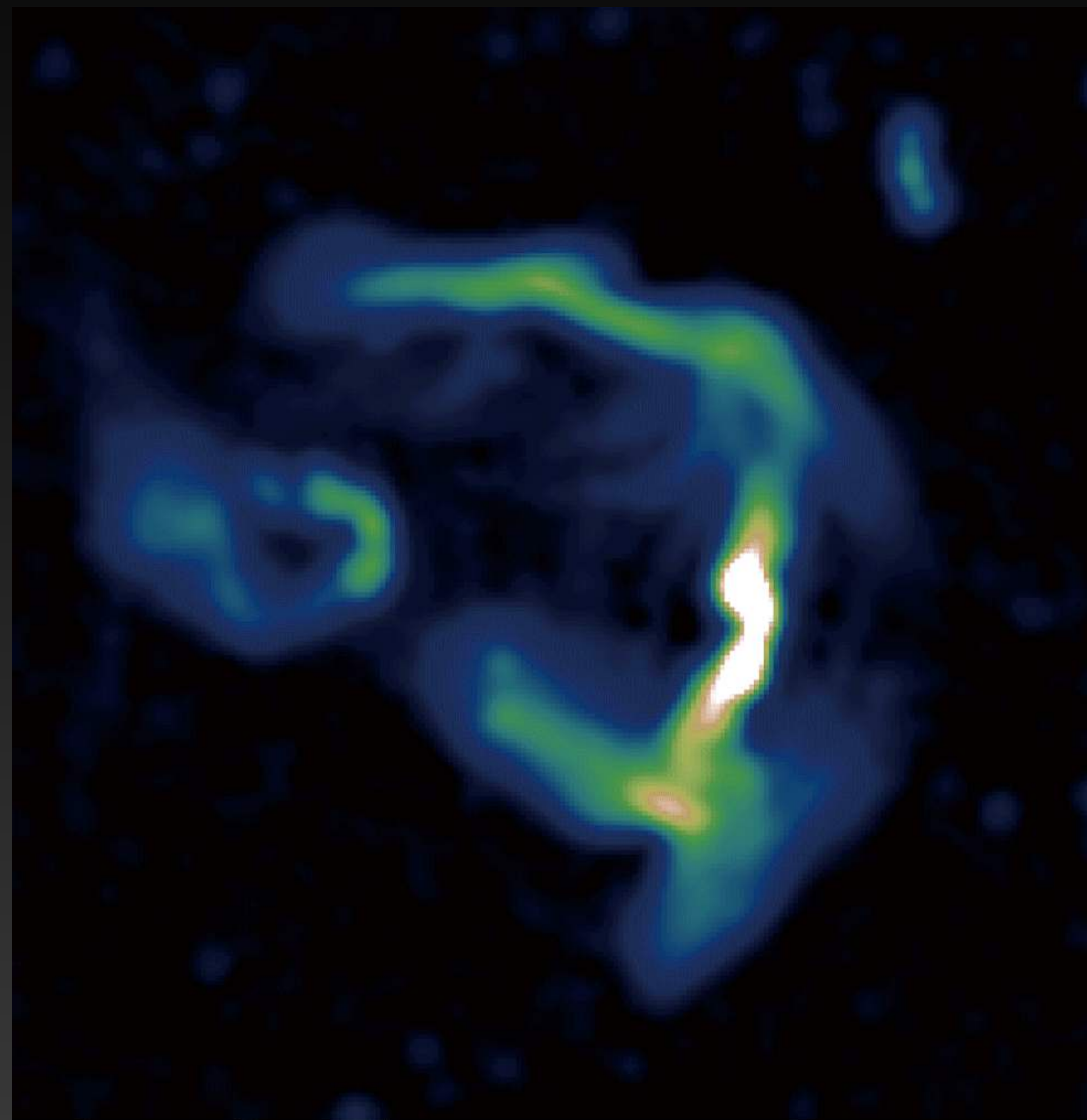
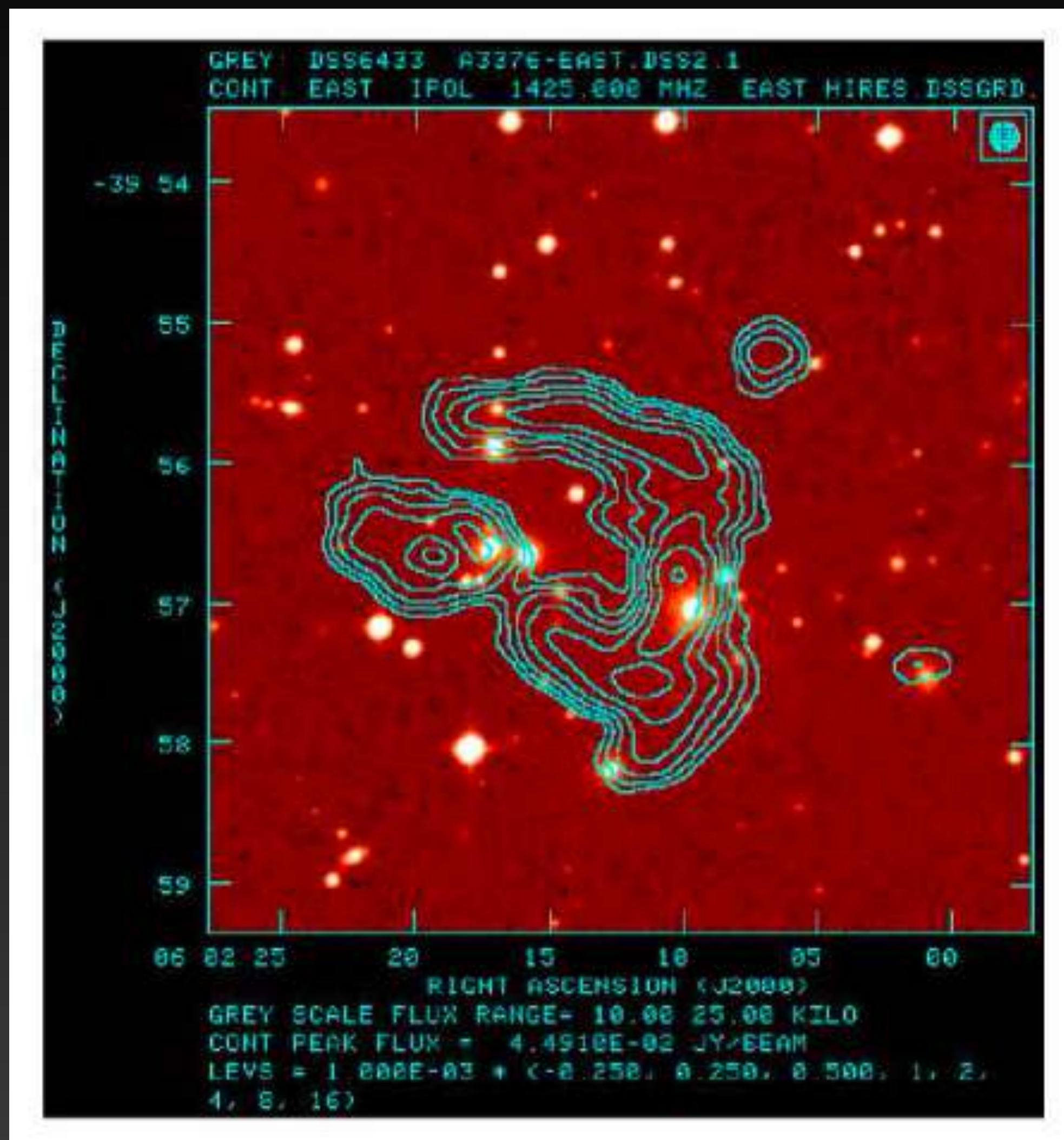
Abell 3376のBCG2.
南北に噴出したジェットが
東に折れ曲がっている。
なぜ？



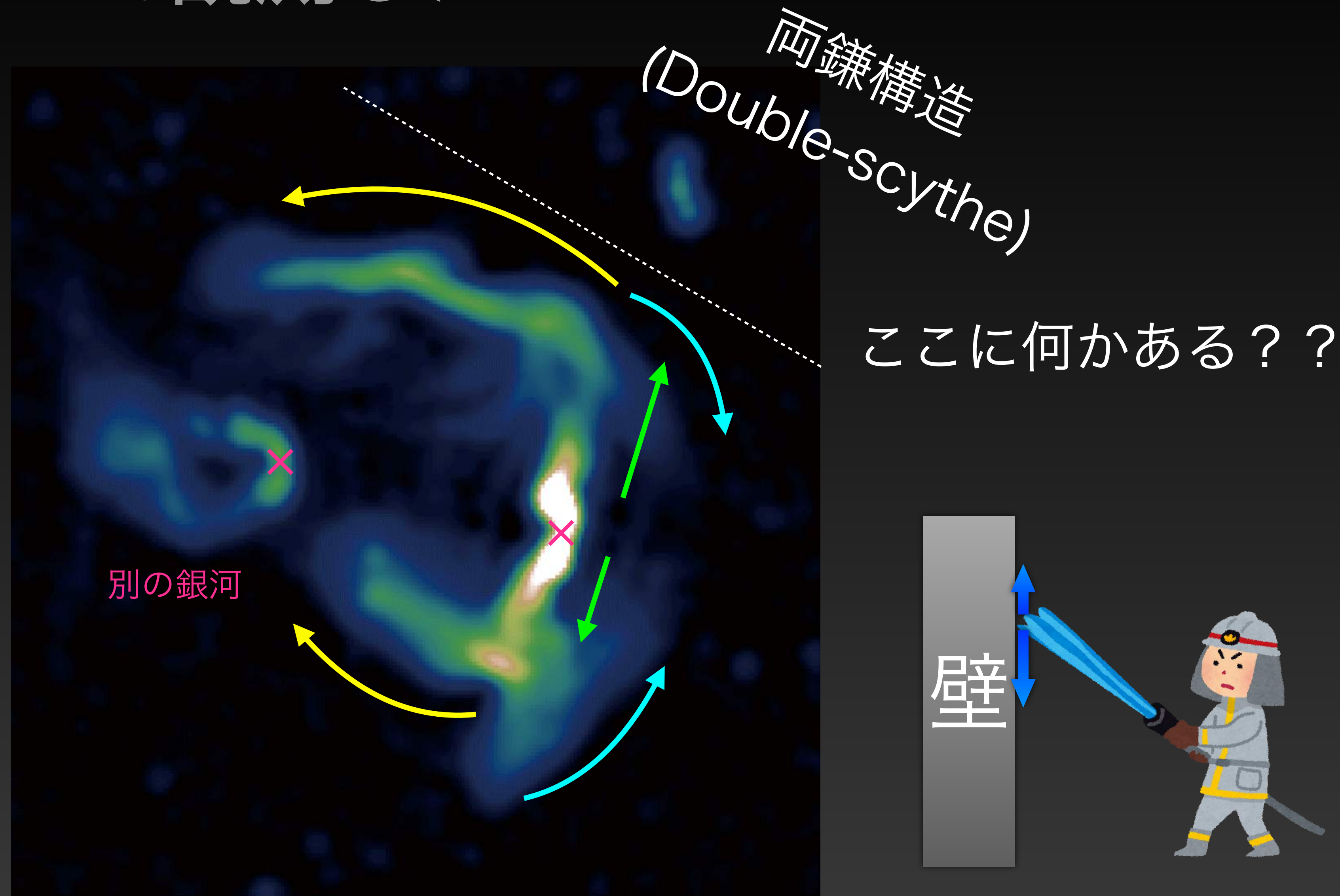
MeerKATで観測



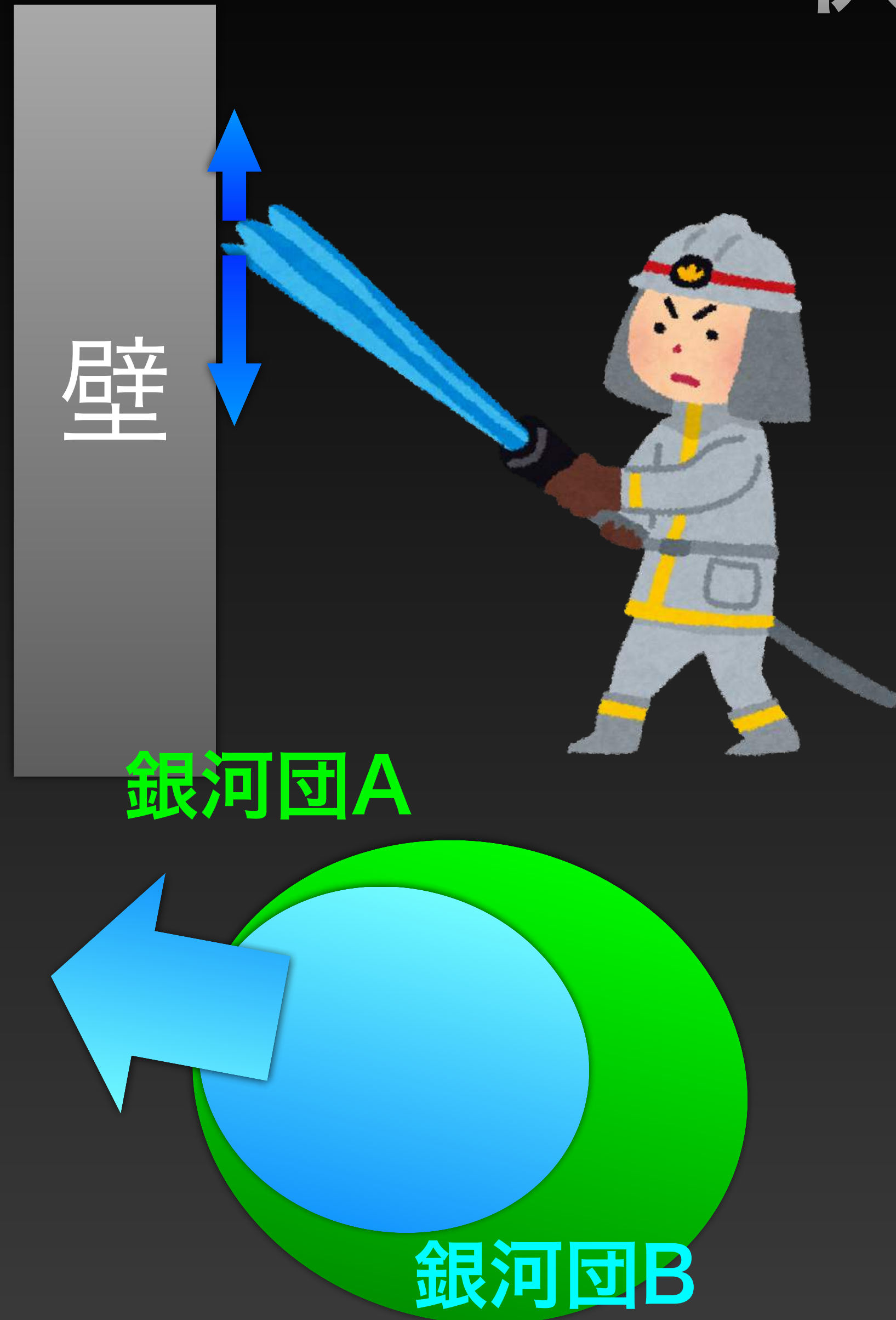
MeerKATで観測したMRC 0600-399



MeerKATで観測したMRC 0600-399



状況イメージ



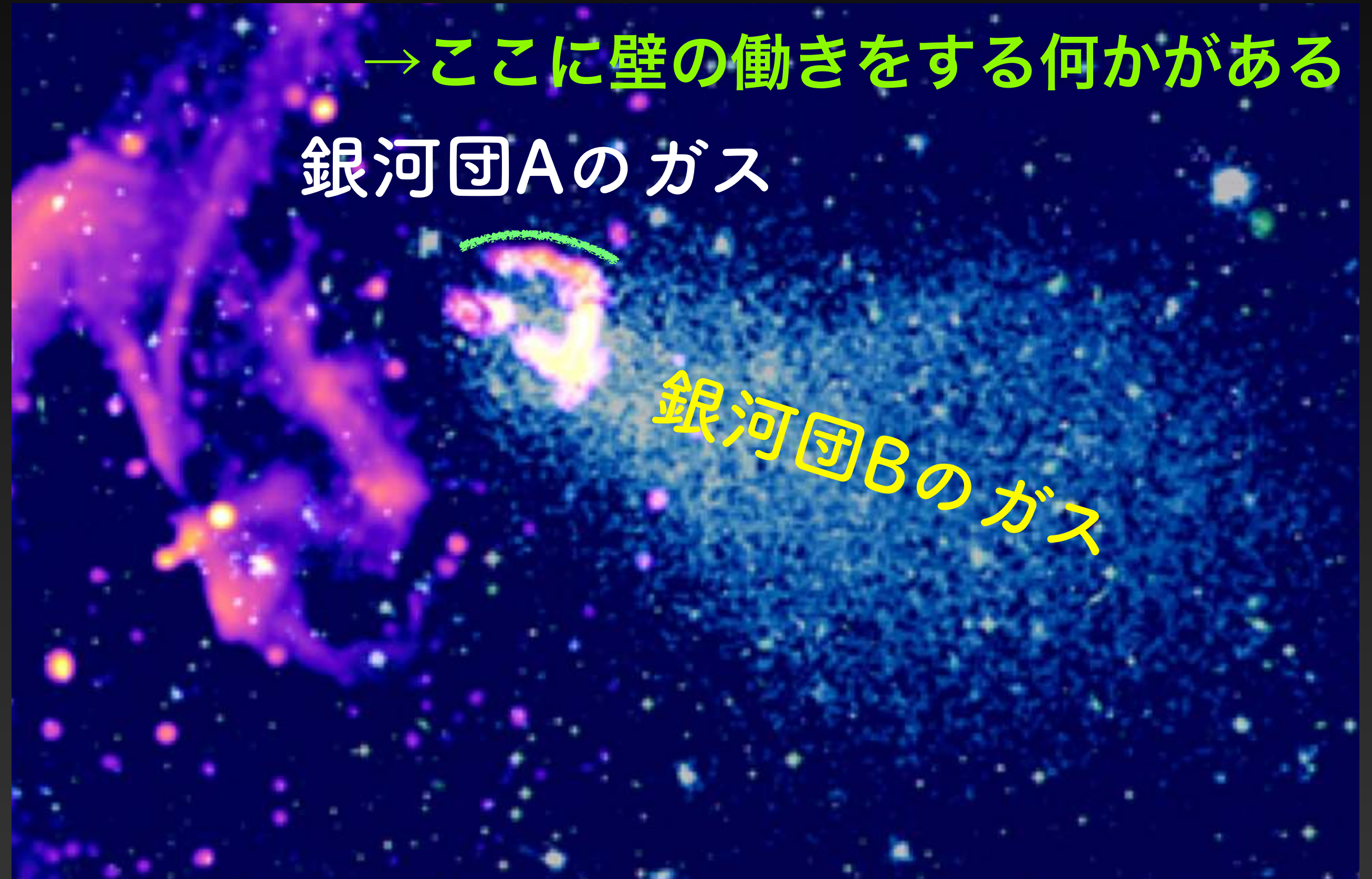
ガスの境界面

ガスが混ざってないのはなぜ??

→ここに壁の働きをする何かがある!

銀河団Aのガス

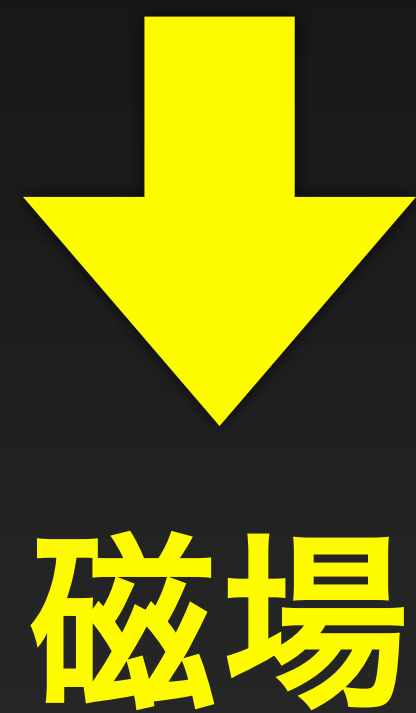
銀河団Bのガス



宇宙空間に作られた「壁」

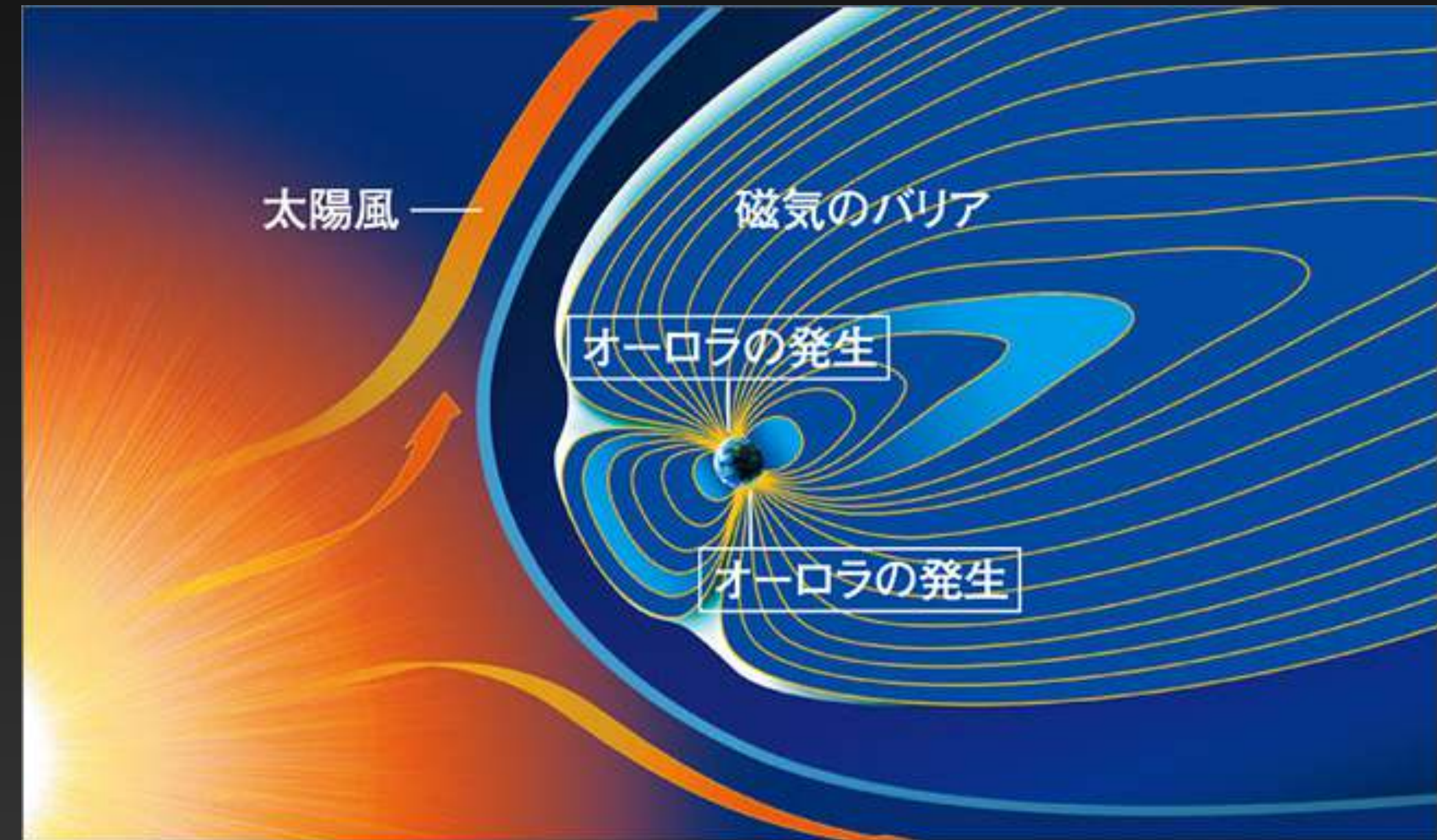
宇宙ジェットが進むのを妨げて折り曲げられる
銀河団ガスが混ざるのを妨げられる

磁気バリア



磁場

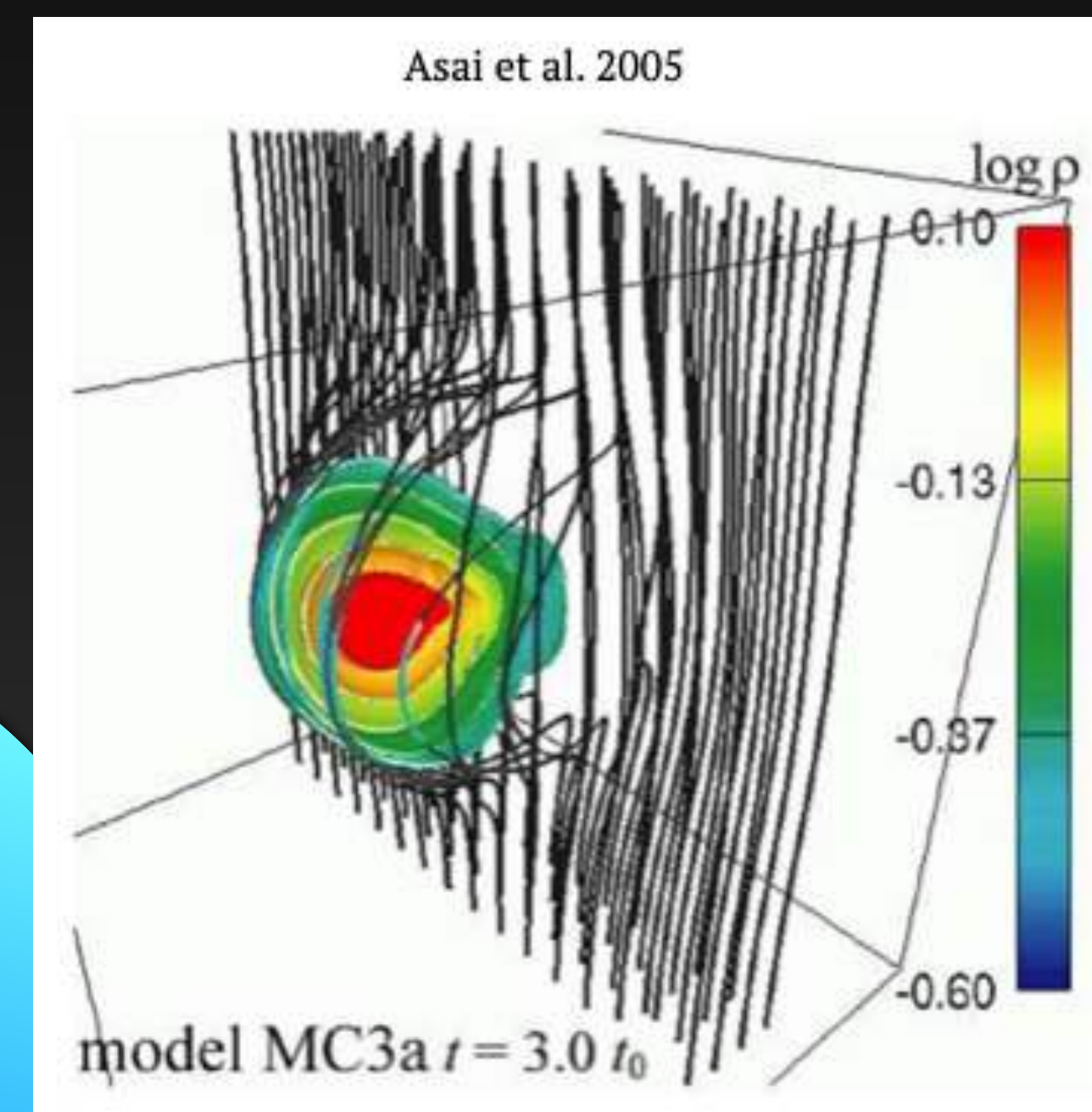
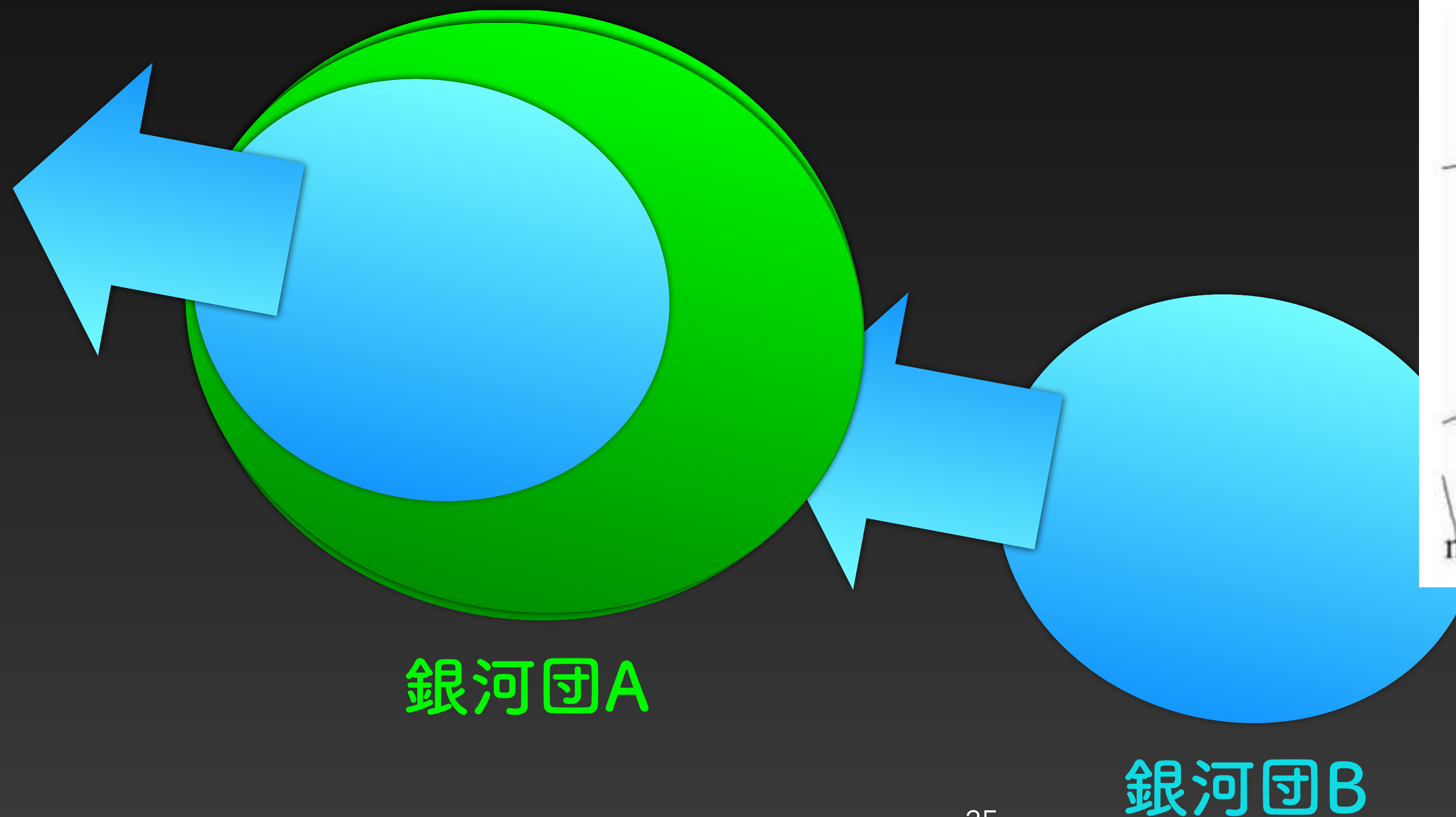
- 宇宙空間の至る所にある
- 銀河団の中にもあるが直接観測が難しい
- ゴムのような伸び縮みする性質



<http://www.kagayastudio.com/symphony/introduce.html>

状況イメージ

銀河団Aの中の磁場が
銀河団Bによって掃き集められて
ガス境界面に沿うように分布



MHDシミュレーション結果



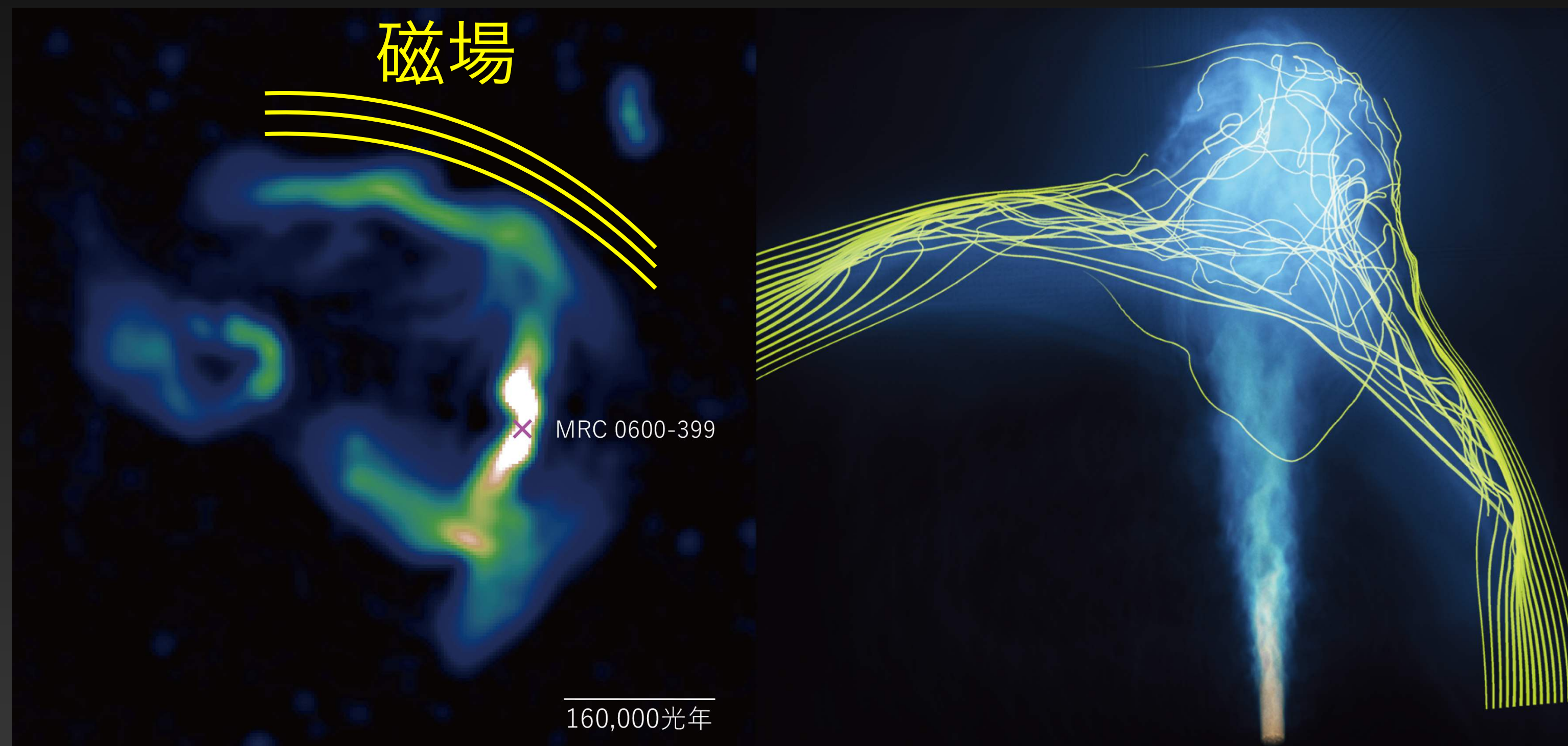
Credit: Takumi Ohmura, Mami Machida, Hiroataka Nakayama, 4D2U Project, NAOJ

国立天文台シミュレーションプロジェクト (CfCA)

ここまでのまとめ

観測・シミュレーションから銀河団中の大局的に揃った磁場による
ジェットの折れ曲がりを示唆

→ 偏波解析からわかる磁場の傾向と矛盾はないか？



全体のまとめ

本セミナーでは

宇宙磁場について, SKAとその先行機について, 先行機を用いた研究について
を紹介.

もし興味がある場合は, 毎年1~2月に先行機データの解析講習会を開催している
のでぜひ!

詳しくは↓SKAJPホームページを参照.

<http://ska-jp.org/>