

暗黒物質起源の超大質量 BH と磁極反転磁気再結合ジェット

森川雅博（お茶大）

1

共同研究者:

中道晶香（京産大），丹海歩（総研大），高橋真聡（愛教大）

Galaxies nurtured by mature black holes MM <https://arxiv.org/abs/1508.05436>

SMBH from BEC-DM -Or Black and Dark Separation by Angular Momentum MM
<https://www.mdpi.com/2218-1997/7/8/265>

▶ 議論したいこと

1. 超大質量 BH は暗黒物質起源かもしれない
2. ジェットの駆動は磁極反転磁気再結合かもしれない
3. 角運動量軸で見ると普遍的な物理と多様性が現れる

I. BH に関する基本的問題

1.1. 基本的問題

SMBH (超巨大 BH) の起源 ($z=10,11,\dots$)

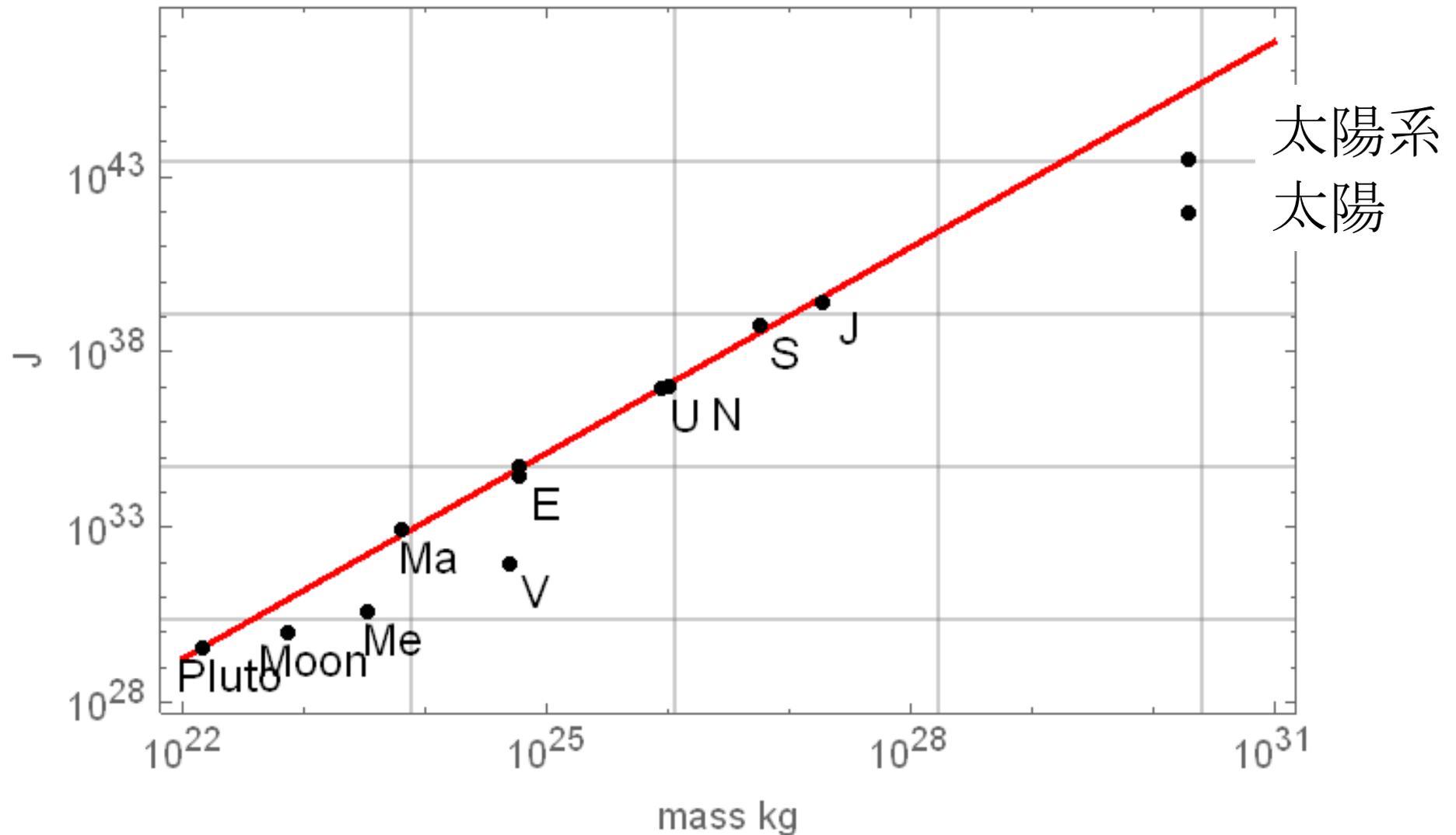
BHJ (ブラックホールジェット) の加速機構は何か

➡ 個別に議論しないで、全体を見てみましょう。

➡ 特に、角運動量軸で見る：

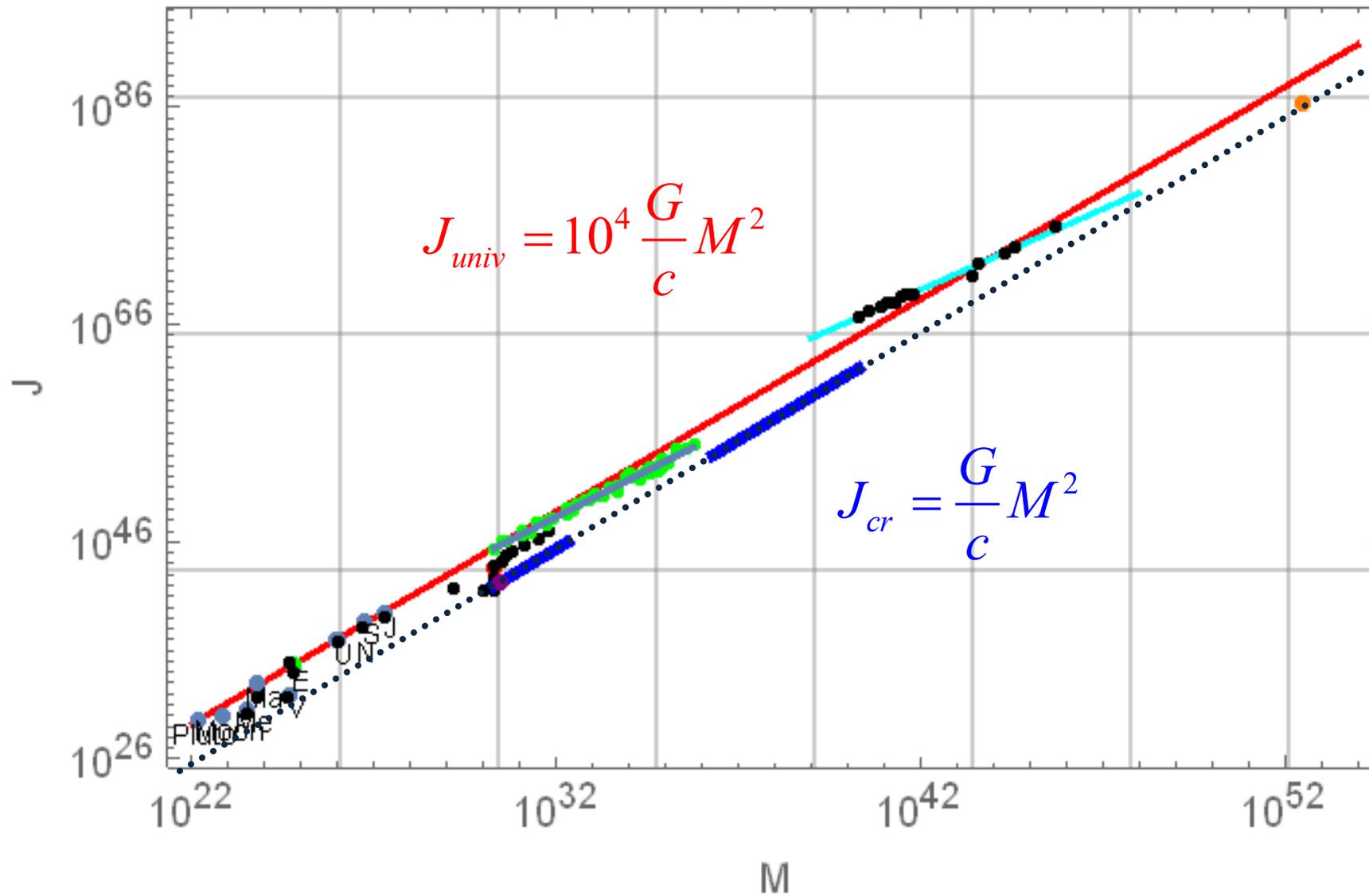
1.2. 角運動量軸で見ると

惑星は $J \propto M^2$ というスケーリングがある → 太陽（系）にも？

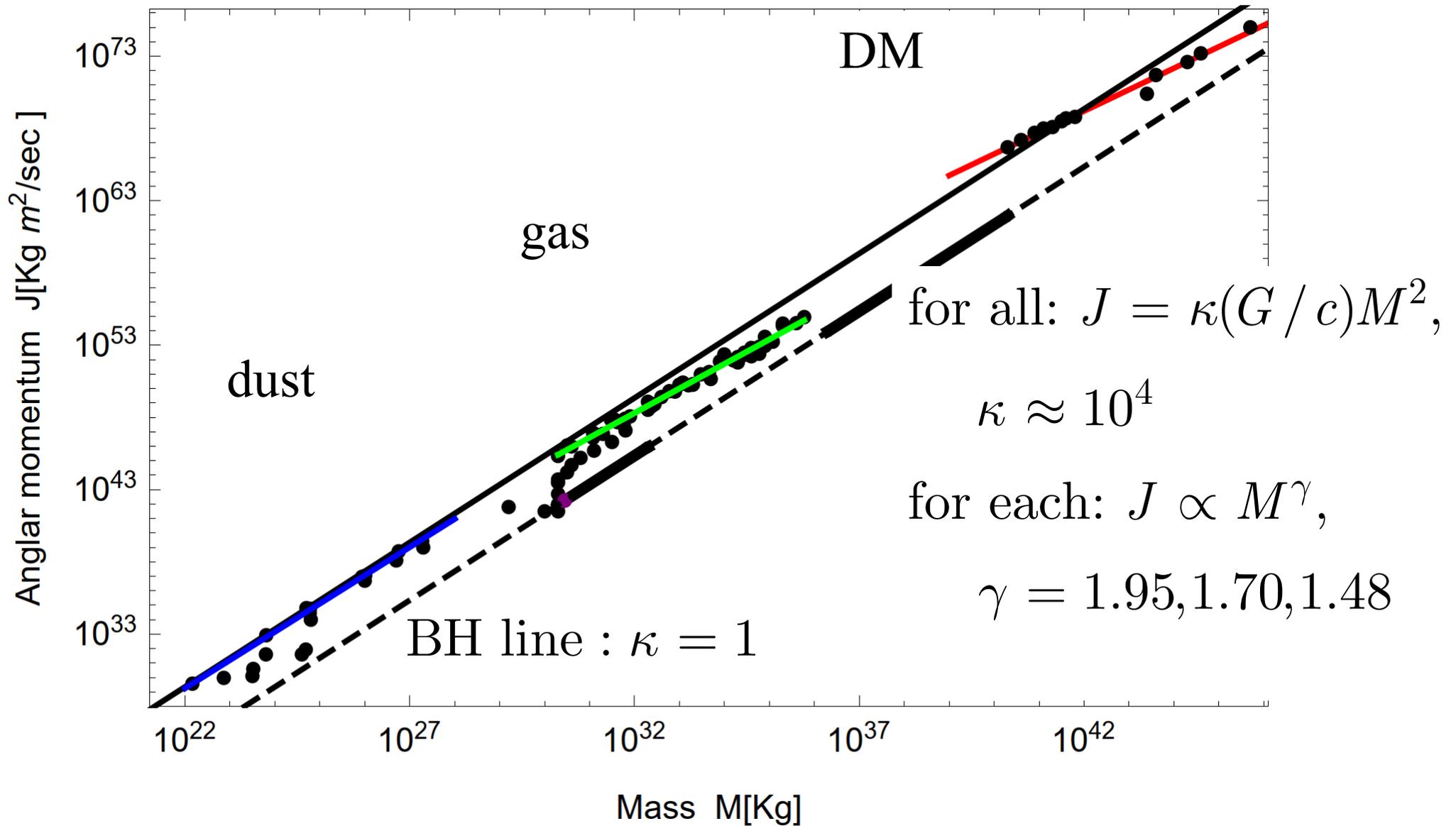


角運動量の流れから... 宇宙全体でみる

Nakamichi MM: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810687>



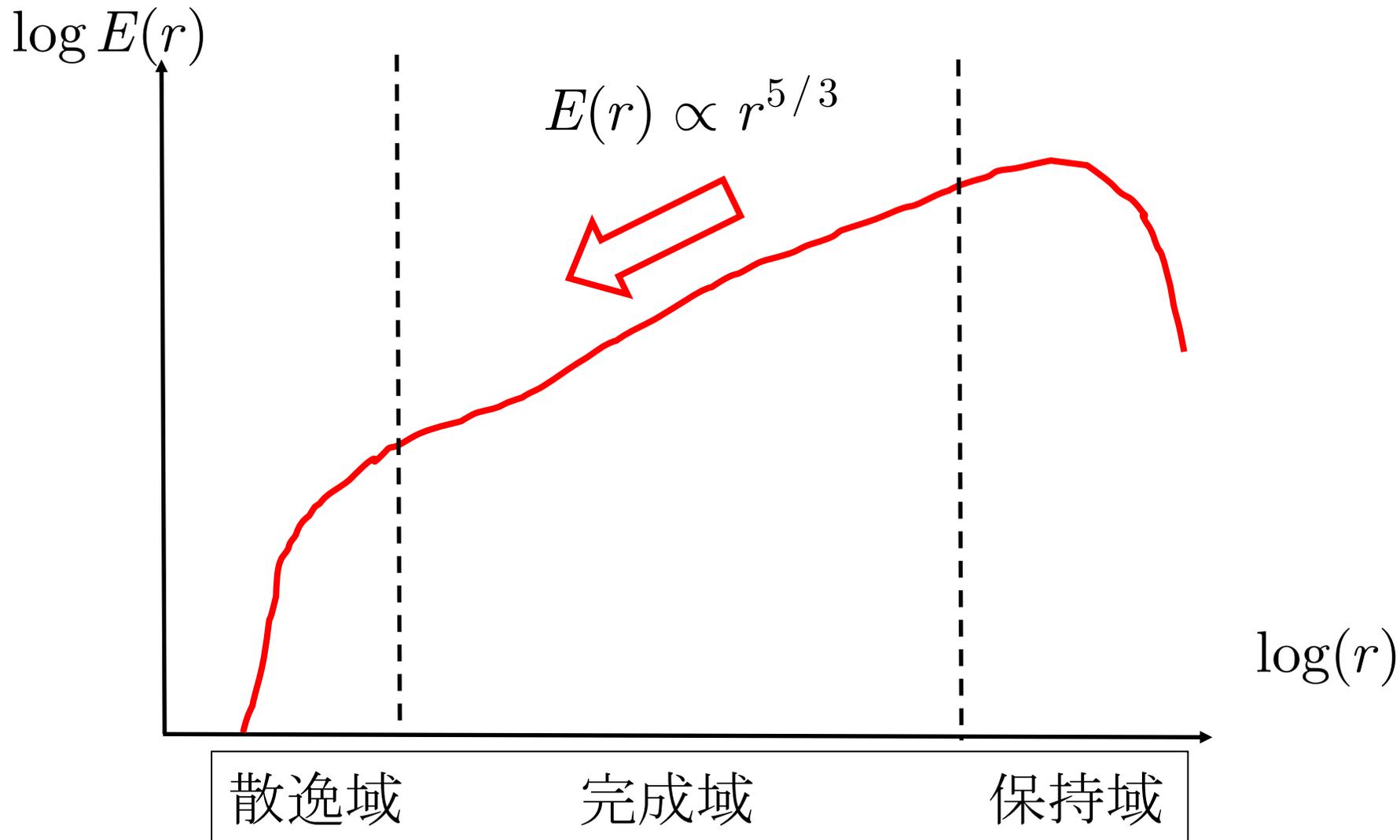
1.3. 構成要素を見ると：



◆全体として $J \propto M^2$ とスケール. そして3領域: **dust, gas, DM**

◆乱流のエネルギーカスケードと類似.

➡ Eカスケード → J分離, E散逸 → BH形成



コルモゴロフ-スケーリング(エネルギー流保存 in k) $\sigma = (r\epsilon)^{1/3}$

ビリアル関係式 $\sigma^2 = \frac{GM^2}{r}$

合わせて $M = G^{-1}\epsilon^{2/3}r^{5/3}$

$$J = \frac{2}{5}G^{4/5}\epsilon^{-1/5}M^{9/5}$$

唯一のパラメーターは，3領域の密度スケーリング（観測）

$$\rho_d = 6.8 \times 10^5 \left(\frac{r}{\text{Meter}} \right)^{-0.35},$$

$$\rho_g = 6.3 \times 10^{16} \left(\frac{r}{\text{Meter}} \right)^{-1.75},$$

$$\rho_D = 1.6 \times 10^9 \left(\frac{r}{\text{Meter}} \right)^{-1.33},$$

から

$$\epsilon_d = 10^{-4}\epsilon_D, \epsilon_g = 10^{-2}\epsilon_D, \epsilon_D = 3.0 \times 10^{-5}$$

となる．（構造形成の時間尺度を決める）

◆ gas → 星スケール BH：途中が見えている... 進行中

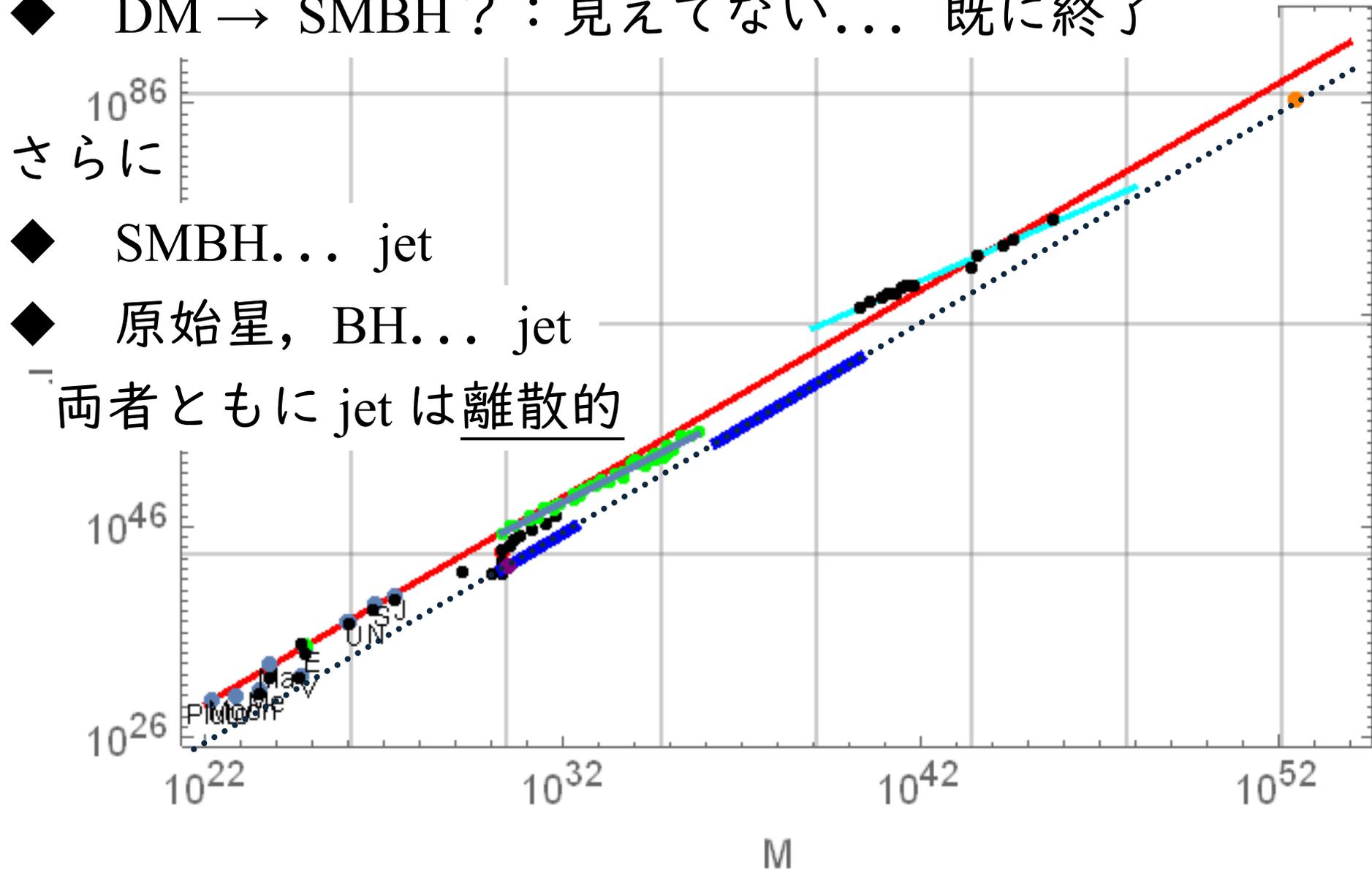
◆ DM → SMBH?：見えてない... 既に終了

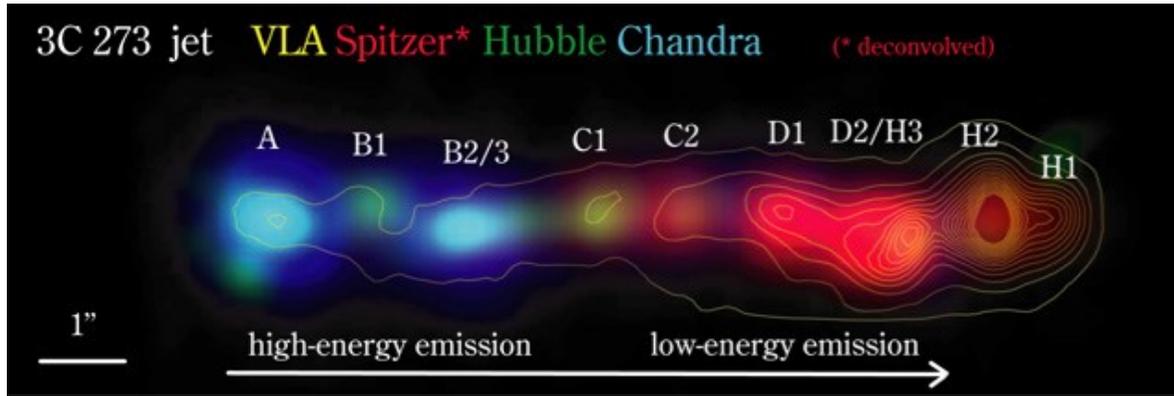
さらに

◆ SMBH... jet

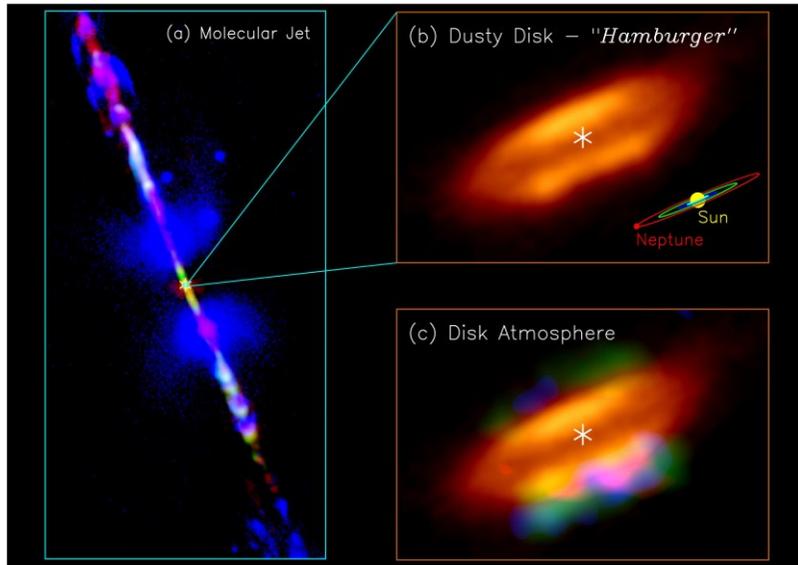
◆ 原始星, BH... jet

両者ともに jet は 離散的



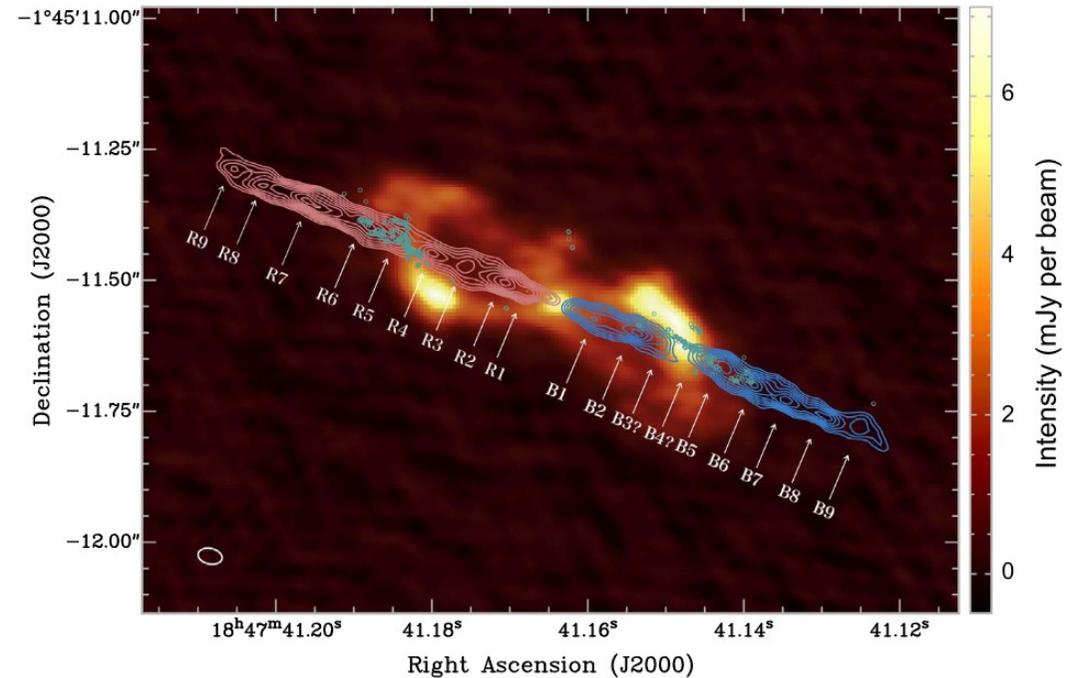


← AGN Spitzer
 $\Delta r = 12 \text{ kly}$



← 原始星 Alma

10



W43A 晚期星ジェット →
 電波放射 & 塵

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab70b8/pdf>

1.4. 未解決問題をもっと膨らますと、

SMBH の起源

- a) DM は何か どこへ行くのか
- b) SMBH が早すぎる ($z=10, 11, \dots$) GN-z11 (ガス降着では遅い)
- c) 中間質量 BH の欠如 (かつての SMBH のはず：未説明)

➡ DM 含めて角運動量カスケードしている？

BHJet の加速機構

- d) ジェットの十分な加速，収斂の普遍性
- e) BHJet の多様性 (AGN, 原始星, 晩期星)
- f) よく観察されるノット構造の起源

➡ 磁場はダイナミカルでエネルギー転化が速い

... これらがすべて繋がっていて、**力学過程は速い**

2. DM の SMBH&DH 分離

DM はおとなしくない

1. 全体シナリオ (SMBH が先, 銀河が後)

DM → SMBH (+ DH)

→ ジェット → 星形成 → 銀河形成

DM → SMBH (+ DH)

物理は Bose-Einstein Condensation (BEC) 速度分散無い

$$i\hbar \frac{\partial \psi(t, \mathbf{x})}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + m\phi + g|\psi|^2 \right) \psi: \quad \text{Gross Pitaevski eq. for BEC}$$

with

$$\Delta \phi = 4\pi Gm|\psi|^2: \quad \text{Poisson eq.}$$

ここで, $\psi(t, \mathbf{x})$ 凝縮場

- ニュートン近似...
- ガウス近似... PDE → ODE

$$\psi(t, x) = N e^{-r^2 / (2\sigma(t))^2 + ir^2 \alpha(t)}, \quad \phi(t, x) = -\mu(\tau) e^{-r^2 / (2\tau(t))^2}$$

Lagrangian:

$$L = (i\hbar/2) (\psi^\dagger \dot{\psi} - \dot{\psi}^\dagger \psi) - (\hbar^2/2m) \nabla \psi^\dagger \nabla \psi - (g/2) (\psi^\dagger \psi)^2 - (1/8\pi G) \nabla \phi \nabla \phi - m\phi \psi^\dagger \psi.$$

13

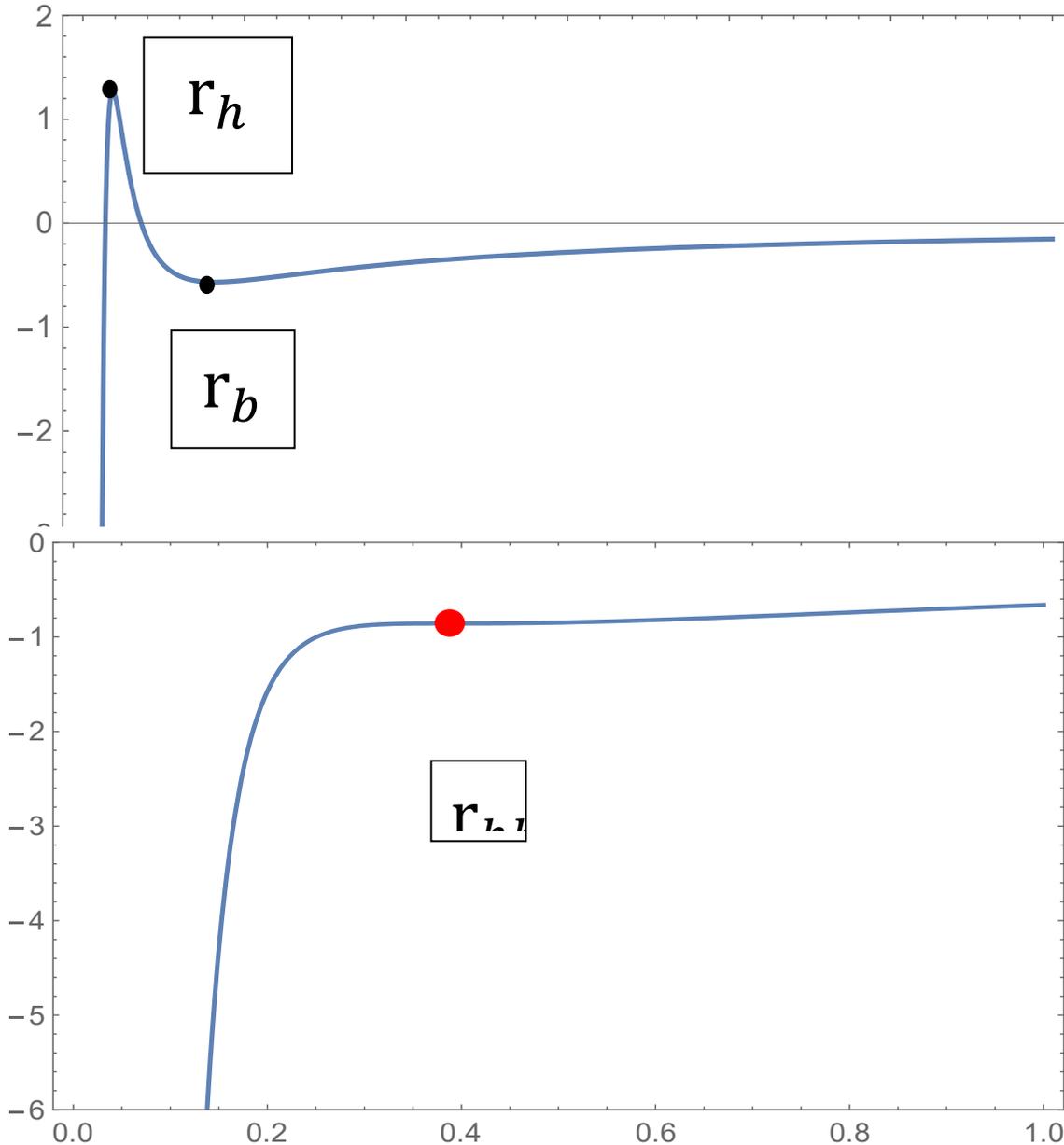
Schwarzschild radius > boson Compton wavelength ⇒ BH

i.e. $M > M_K \approx \pi \frac{m_P^2}{m}$

$$V_{\text{eff}} = \frac{gN^2}{\sigma(t)^3} - \frac{GM^2}{\sigma(t)} + \frac{J^2}{M\sigma(t)^2} \rightarrow J \text{ が大きいと BH 形成阻害}$$

有効ポテンシャル

$$V_{\text{eff}} = \frac{gM}{\sigma^3} - \frac{Gm^2M}{\sigma} + \frac{J^2}{m\sigma^2}, \quad g = -\frac{4\pi a_s \hbar^2}{m}$$



個のポテンシャル障壁が
SMBH 形成を阻害

$$\left\{ \begin{array}{l} r_h = \frac{J^2 m^3 - \sqrt{J^4 m^6 - 48\pi a_s G m^3 M^6 \hbar^2}}{2Gm^3 M^3} \\ r_b = \frac{J^2 m^3 + \sqrt{J^4 m^6 - 48\pi a_s G m^3 M^6 \hbar^2}}{2Gm^3 M^3} \end{array} \right.$$

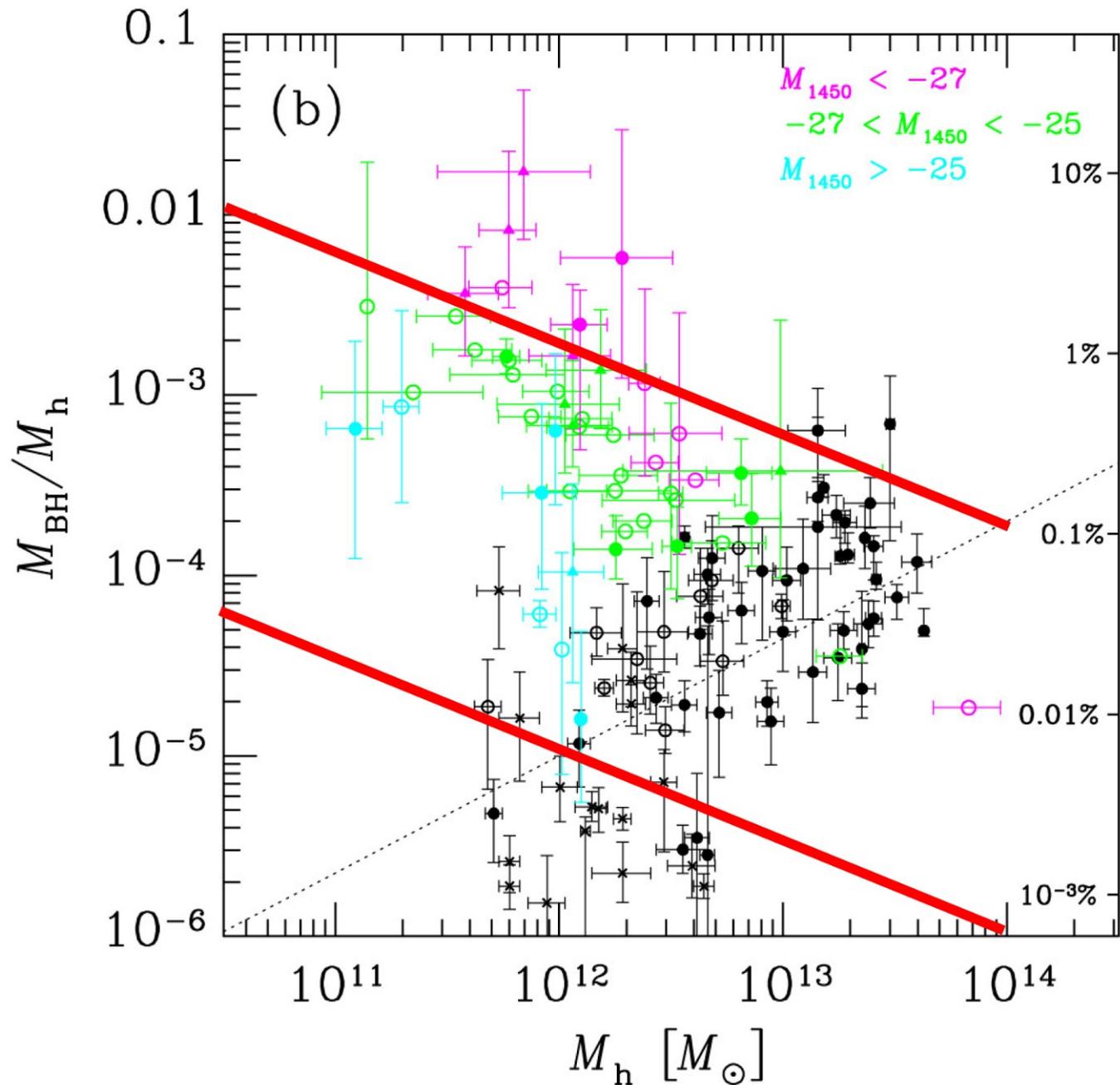
ポテンシャル障壁が消える：
 $r_h = r_b$

i.e. $r_{hb} = \frac{2\sqrt{3}\pi\sqrt{a_s}\hbar}{\sqrt{G}m^{3/2}}$

半径 r_{hb} 以内が BH を作る。
BH とその残り (DH) の質量比

$$\rightarrow M_{BH}/M_{DH} = \frac{8\sqrt{3}\pi^{3/2} a_s^{3/2} \hbar^3}{G^{3/2} m^{9/2} R r_0^2}$$

2. 検証 SMBH/DH の質量比



MBH/MDH

Observation

K. Shimasaku and T. Izumi, The Astrophysical Journal Letters, 872 L29, 2019.

upper red line :

$$\frac{M_{BH}}{M_{DH}} \approx 10^{-5} \left(\frac{M_{tot}}{10^{12} M_\odot} \right)^{-1/2}$$

lower red line :

$$\frac{M_{BH}}{M_{DH}} \approx 2 \times 10^{-3} \left(\frac{M_{tot}}{10^{12} M_\odot} \right)^{-1/2}$$

3. ジェット→星形成→銀河形成

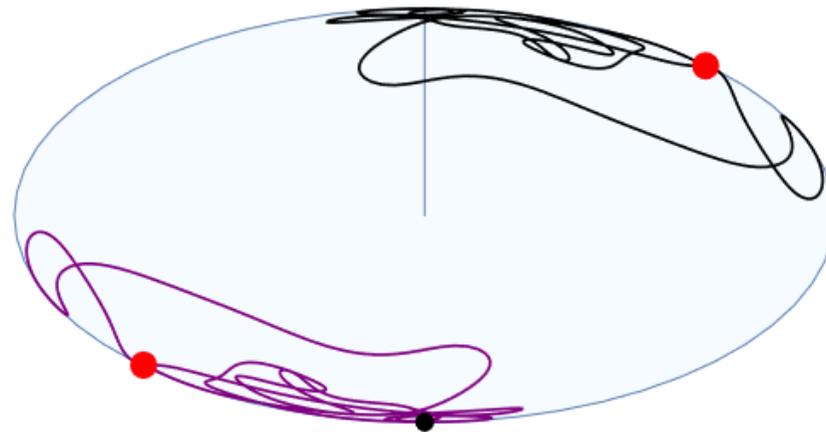
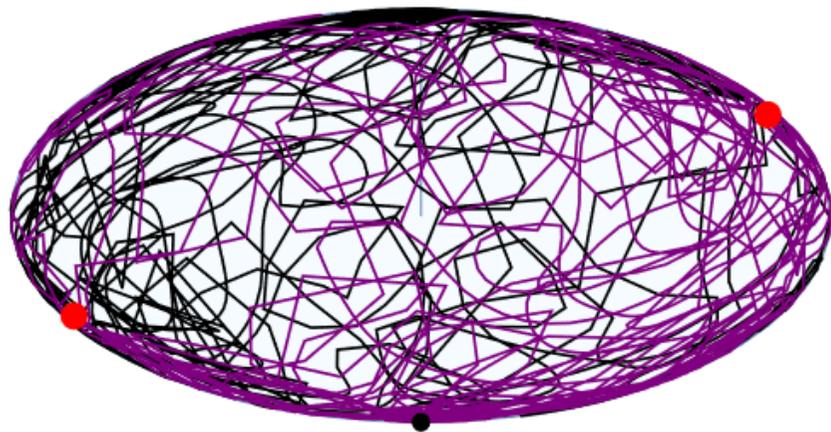
Galaxies nurtured by mature black holes MM <https://arxiv.org/pdf/1508.05436.pdf>

ジェットが衝撃波を通して星生成を促進する

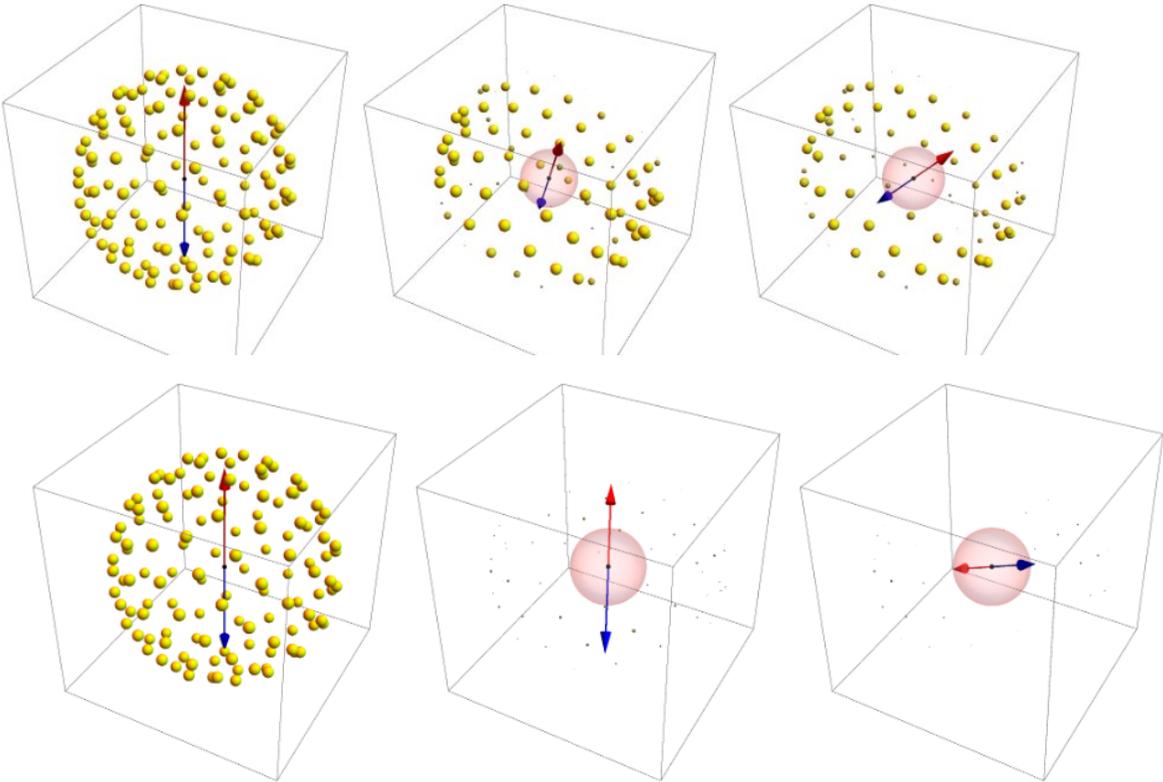
物理は、ジェットによる「ガス→星」転換のパーコレーション

$$\ddot{G}_i(t) = -\mu c_{conv} |\vec{J}(t)| G_i(t) - \dot{G}_i(t) \quad \mu: \text{SFR...環境}$$

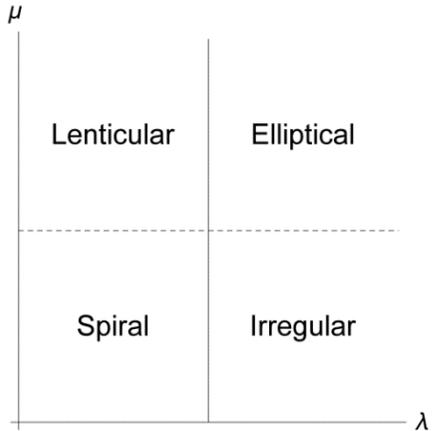
$$\dot{\vec{J}}(t) = -\lambda \vec{J}(t) \times \sum_i \dot{G}_i(t) - \kappa \vec{J}(t) \quad \lambda: \text{acc rate...系固有}$$



楕円/渦巻銀河の分離: パーコレートする/しない



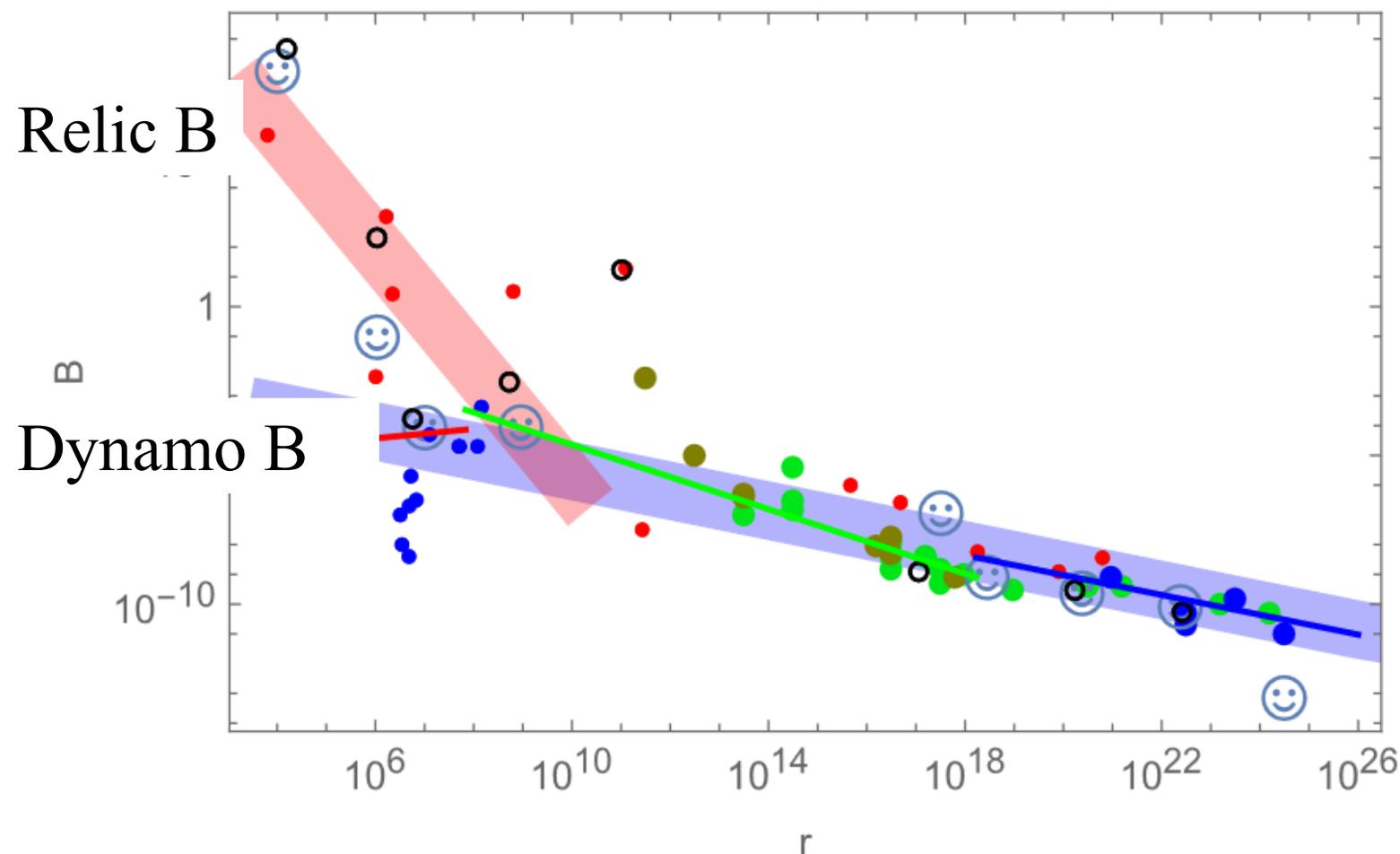
落下した塊 → バルジ
 落下しなかった塊 → GC (pop II)
 pop III は不要



3. BHJet の加速機構 (磁極反転 磁場再結合)

- 磁場はおとなしくない

$\Gamma=0.01$ $\epsilon=0.3$



◆ $J \rightarrow B$

(1%の乱流
エネルギー $\rightarrow B$)₁₈

— dust

— gas

— DM

Vallee 1995I II

Dat 1995

1. 基本的な問題

A. ジェット放出 & 加速

Γ 因子 $> 2-10$... 効率の良い加速機構は？

Blandford-Znajek 過程は定常で途中加速がないかも

B. 細いジェット(収斂 collimation)

$10^8 r_s$ 先でも広がらない... どんな収斂機構？

C. ジェット内の瘤(こぶ knot)

連続流？ 離散塊？ ... 大抵のジェットに瘤がある！？

$50 \text{kpc} < D < 110 \text{kpc} \dots > 3 \times 10^5 (v/c) \text{ year}$ 毎に噴出

PKS 0637-752 Godfrey2012

2. 普遍性から考えよう → 周辺の問題は？

ジェットが AGN に偏在するなら，普遍的な構造のはず。

→ 簡単な機構だろう

原始星，SS433，AGN などにもジェットが付随し収斂して瘤持ち

→ 同じ起源かも

20

ヒント：

→ 瘤はほぼ対称的に分布している

→ 回転軸の両端に向かって間欠的に何かが噴出している

→ 瘤が塊であれば弾道的に飛んでいくのでよく収斂する

→ 効率の良い加速では，非熱的のはず

⇒ 降着円盤ダイナモの磁極反転が間欠的に起きている！

3. 磁極反転モデル

特徴「回転する伝導流体は発電する」 & 「磁極反転を繰り返す」
磁極反転すると

- 前あった磁場に新しい磁場が突入し磁気再結合を起こす.
- MHDプラズマの塊（プラズモン）が形成され，両方向に加速.

21

すると，その特徴は：

1. 磁場からの直接加速なので，エネルギー転換効率が良い
2. 塊が弾道的に放出されるのでビームは拡散しない
3. その塊は回転しているので指向性がよい
4. 外力によりトルクを与えられて方向転換しても直進性
5. 塊たちはジェット両サイドでほぼ対称的に分布

★ ただ、数値計算しようとするとき、基礎方程式 MHD 複雑である以上に、不足要素(α 効果, 再結合), 境界条件... さらに

P.J. Kopyla, AN 332, 43 (2011)

Parameter	Sun	Simulations	Comparability
$Ra = gd^4\delta/(\nu\chi H_P)$	10^{20}	10^7	-
$Re = ud/\nu$	10^{12}	$< 10^4$	-
$Rm = ud/\eta$	10^9	$< 10^4$	-
$Pr = \nu/\chi$	10^{-7}	0.01	-
$Pm = \nu/\eta$	$10^{-6} \dots 10^{-4}$	10^{-3}	-
$N_P = \ln(p_{base}/p_{top})$	20	≈ 5	-
$Ma = u/c_s$	$10^{-4} \dots 1$	$10^{-4} \dots 1$	-/+
$\delta = \nabla - \nabla_{ad}$	$10^{-8} \dots 0.1$	$10^{-8} \dots 0.1$	-/+
$Ta = 4\Omega^2 d^4/\nu^2$	$10^{19} \dots 10^{27}$	10^8	-
$Co = 2\Omega d/u$	$10^{-3} \dots 10$	$10^{-3} \dots 10$	-/+

22

降着円盤対流層は極めて高いレイリー数... 激しい乱流状態

◆ 物理は Taylor column, Berger's vortex, & ダイナモ

4. マクロスピンモデル & 磁気再結合

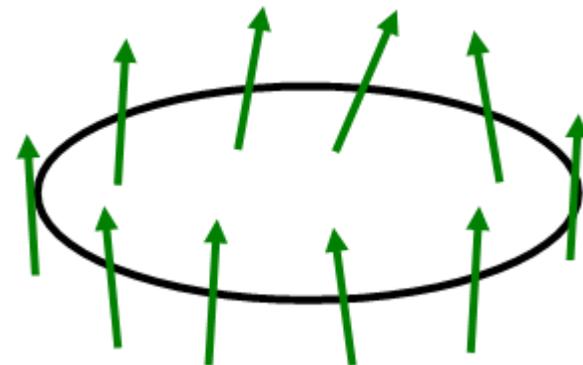
◆ 階層構造を局所ダイナモから作る(ボトムアップ)

◆ そのダイナモ要素をスピンの形で表す。(渦度

$\vec{\omega}$ と磁場 \vec{B} の式は双対関係)

スピンはお互いに相互作用しあう：

磁氣的 (大局的), 流體的 (局所的).



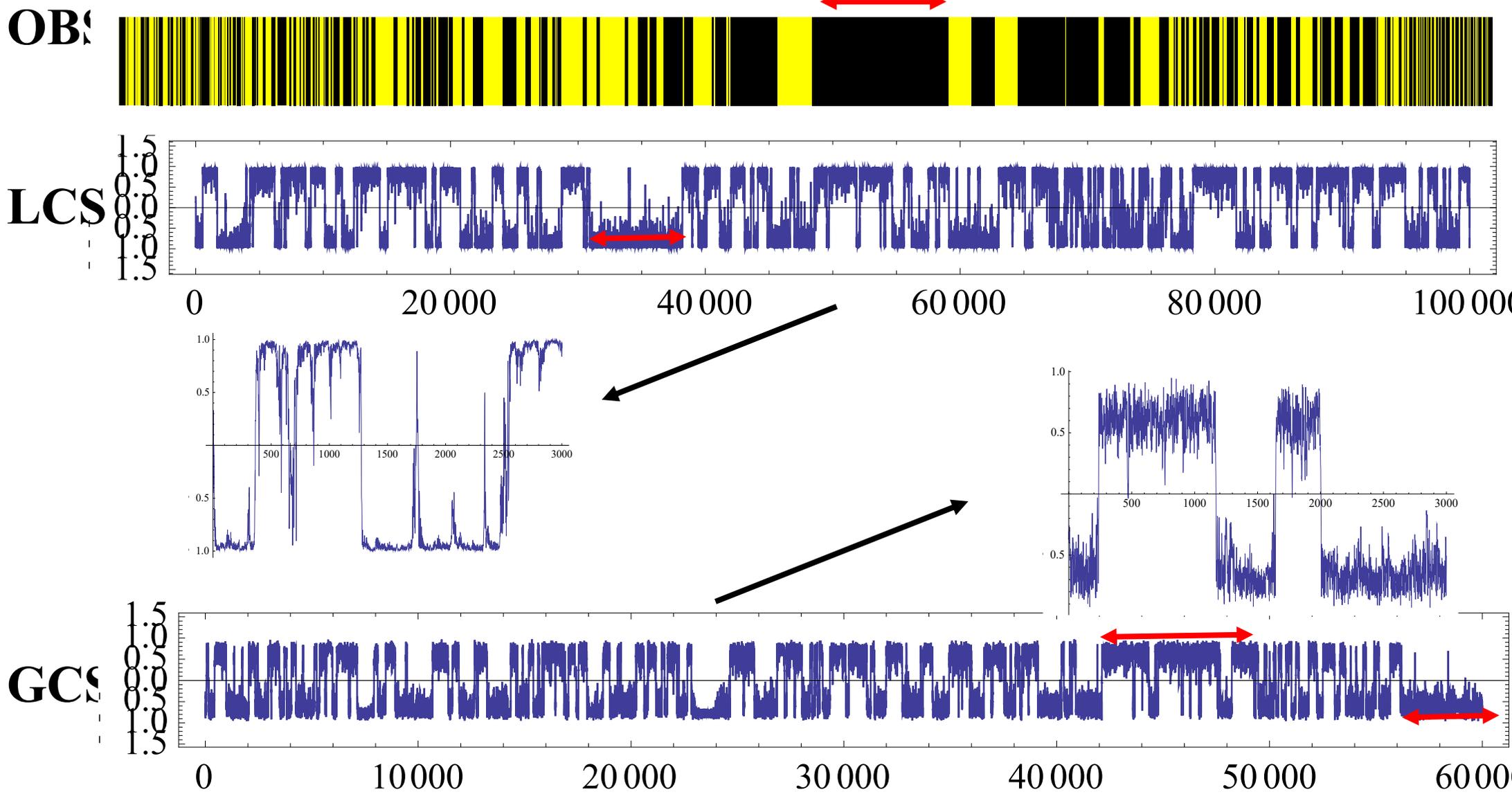
23

$$\Rightarrow \begin{aligned} K &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \dot{\vec{s}}_i^2, & V &= \mu \sum_{i=1}^N \Omega \cdot \vec{s}_i^2 + \frac{\lambda}{2N} \sum_{j=1}^N \sum_i \vec{s}_i \cdot \vec{s}_j \\ L &= K - V, & \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} &= \frac{\partial L}{\partial \theta_i}, & \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_i} &= \frac{\partial L}{\partial \phi_i} \end{aligned}$$

物理は, 確率共鳴 (カオス共鳴)

1. 地球型... 間欠的

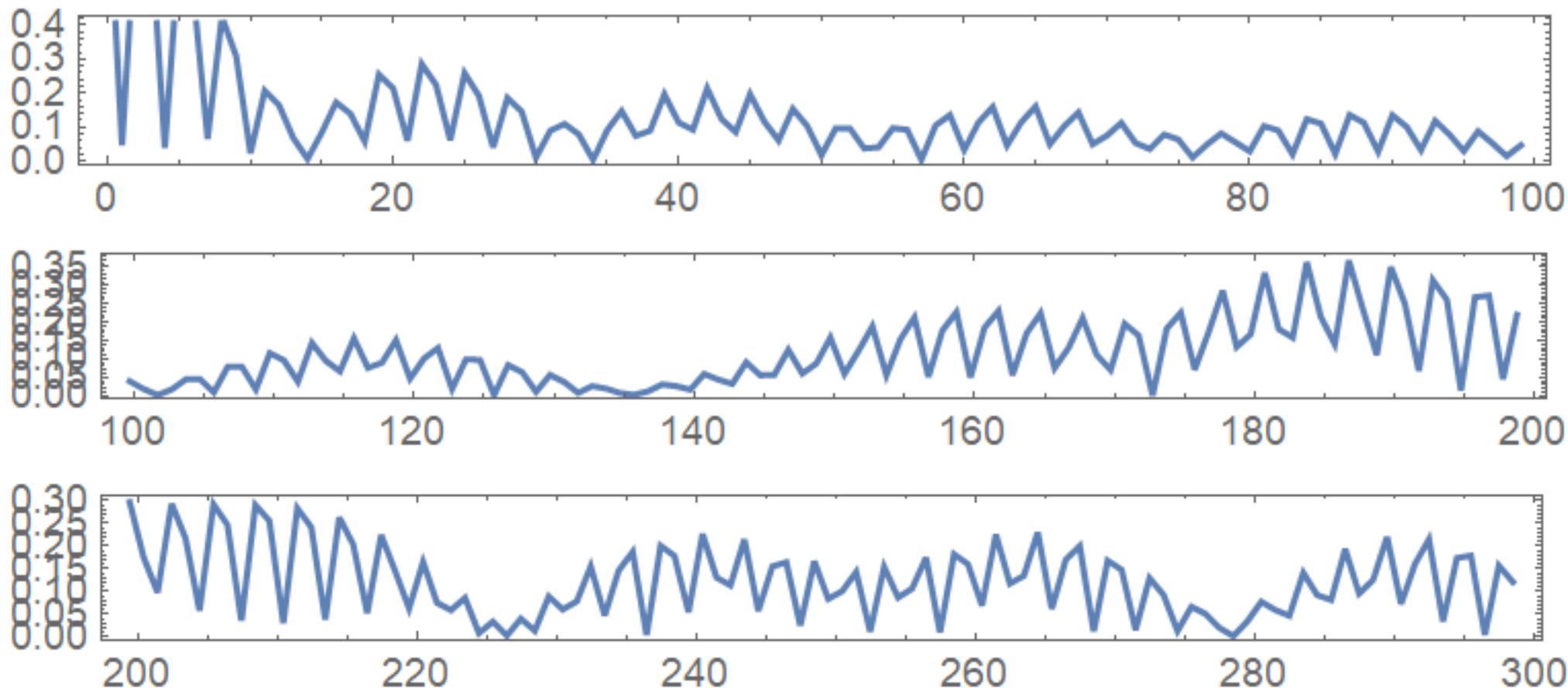
:superchron



2. 太陽型... 準周期的 (カオス共鳴)

$$N=300, \lambda=-1, \mu=-0.1, N=256 M = \frac{1}{N} \sum_{i=1 \dots N} \vec{s}_i \cdot \vec{\Omega}, \quad \vec{\Omega} = (0, 0, 1)$$

■ 太陽活動性 $|M(t)|$ (平均双極子) の時間変動:



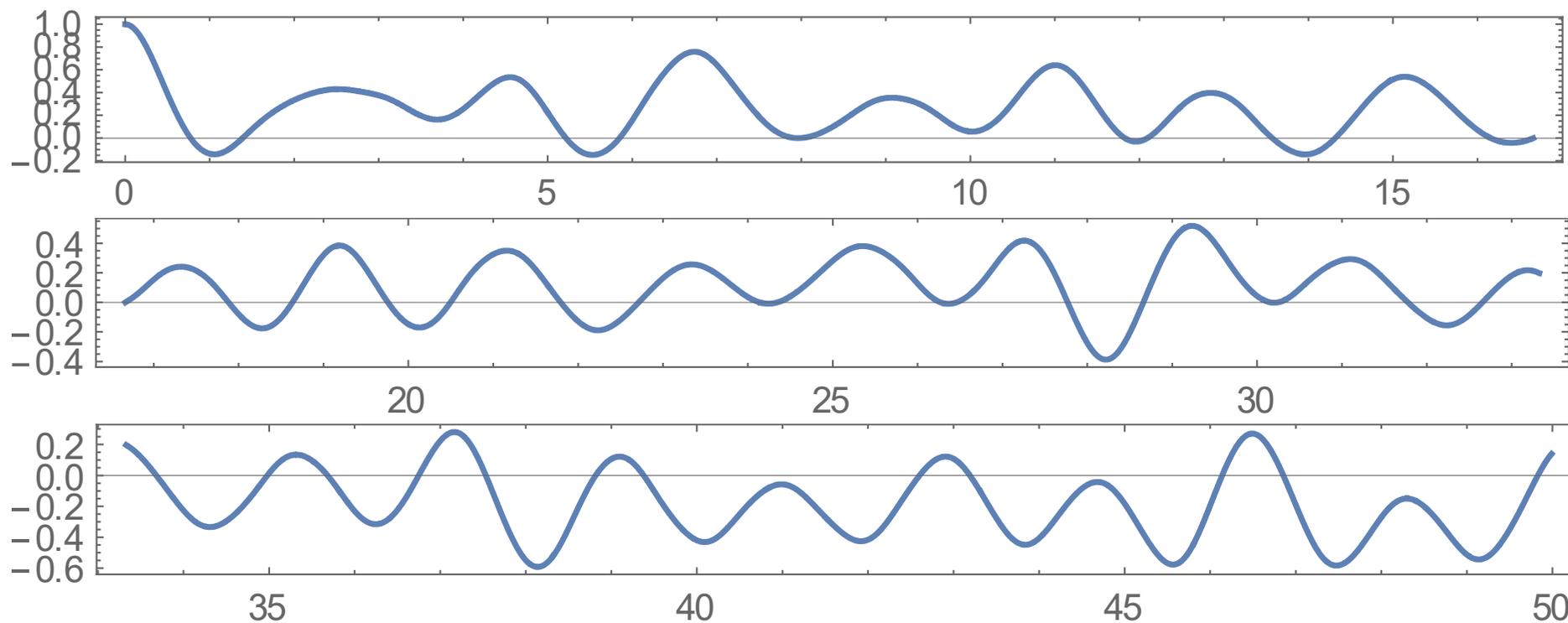
Kunitomo Namamichi Hara <https://doi.org/10.1093/ptep/ptab062>

Mori et al. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20862.x> など

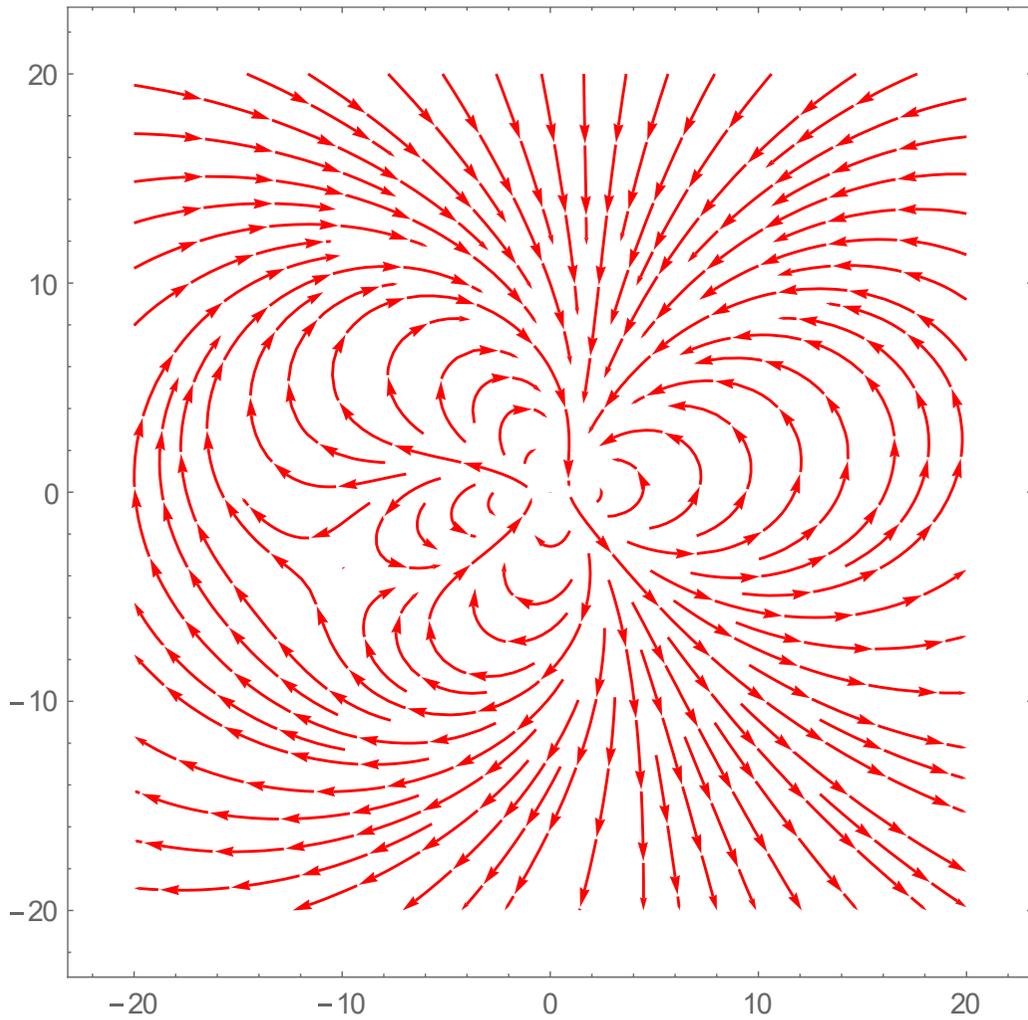
3. 磁極反転の様子—スピンモデル

ディスク面に BH を囲むようにスピンを配置して結合する：

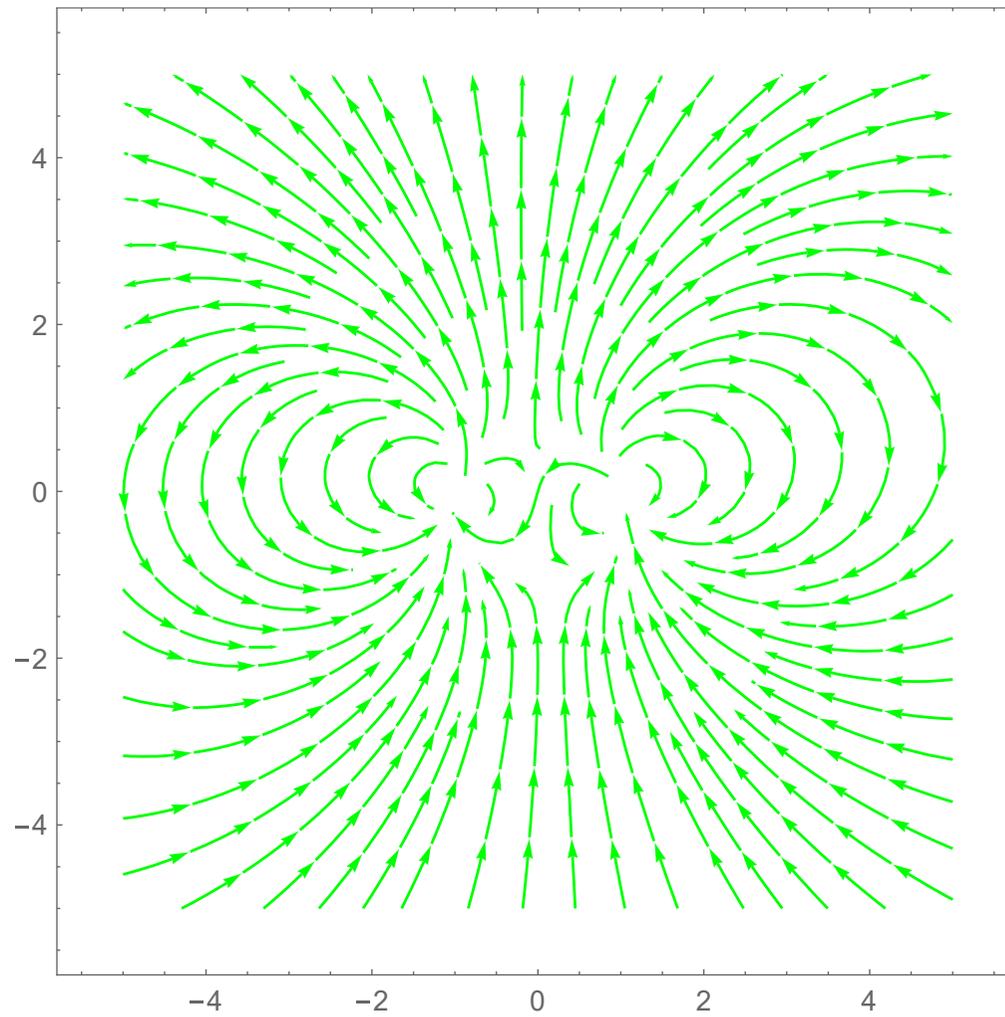
`cs[-2,-1,5,10,0,50]`



◆ y-z plane B_y - B_z component

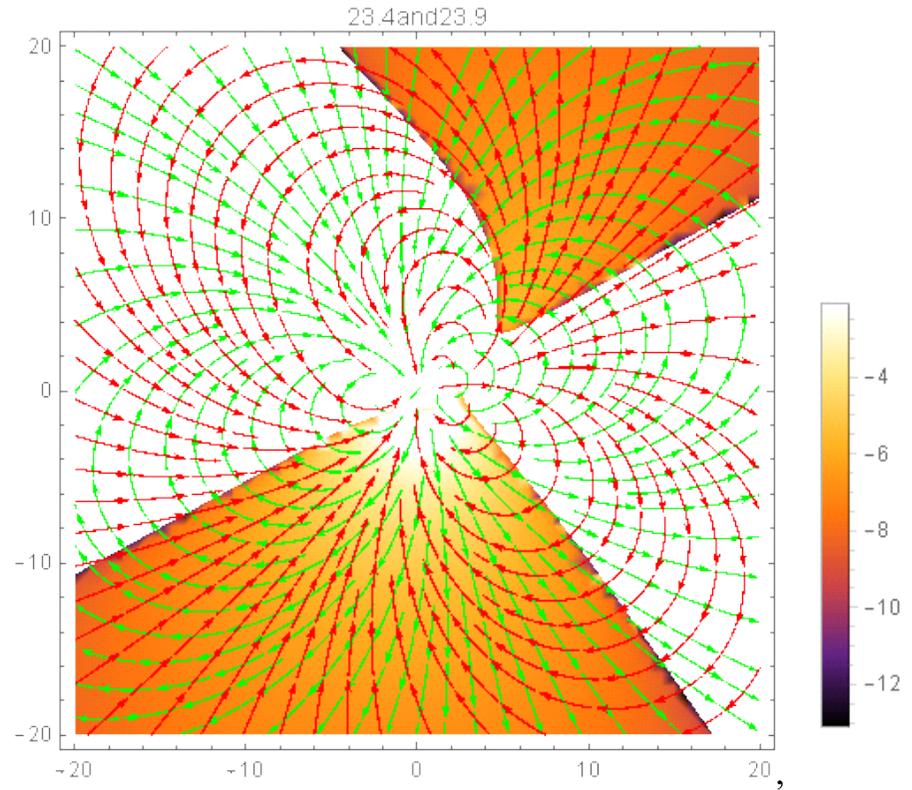
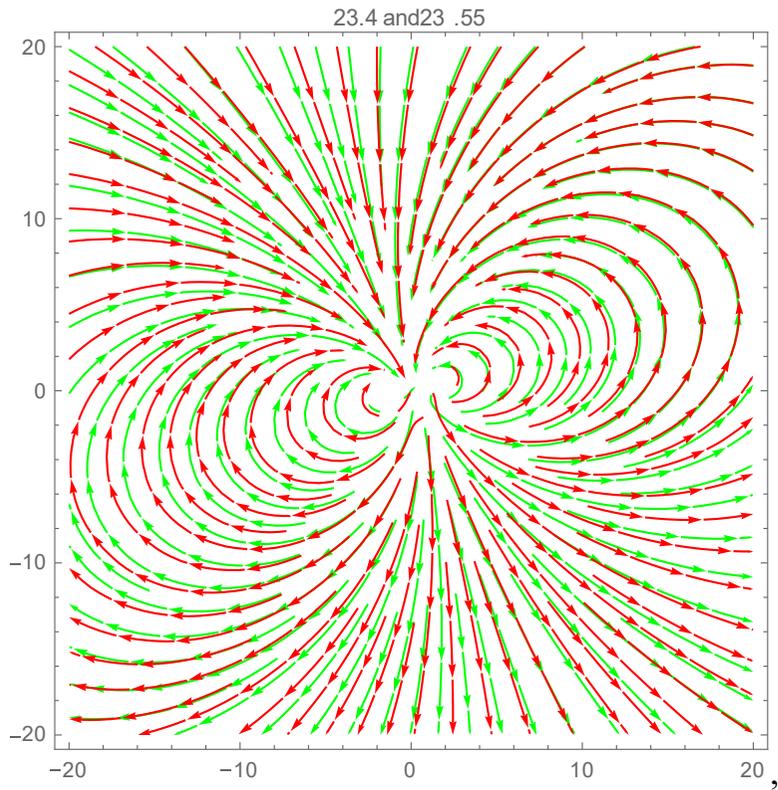


下向き磁場 at $t=43.2$



上向き磁場 at $t=26.7$

◆ 反平行磁場成分の出現：



23.4to24.4.avi

[234to2.4.avi](#)



24.4to25.4.avi

[244to254.avi](#)

◆ 特徴

- 時間尺度：

周期 2 に対して，反平行磁場成分が 10 倍で最大になるまで
0.3

- 反平行磁場成分の方向が定まらない。

29

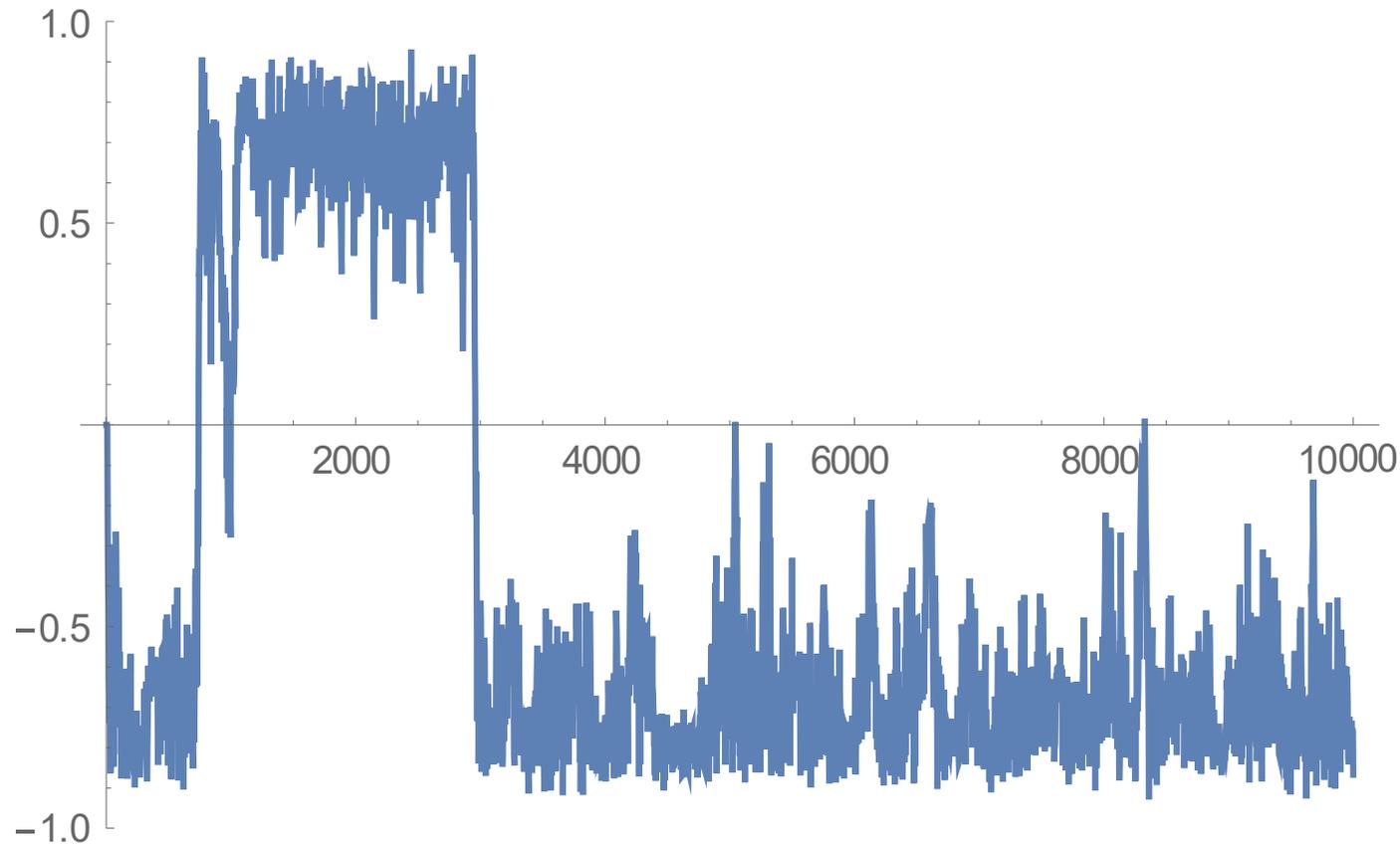
ジェット噴出の方向も定まらない？

- 大局磁場は（あってもいいが）ダイナモ磁場が主役だろう。

大局磁場は，ジェット両方向の非対称性や倍周期を作る。

4. 地球型 (間欠的磁極反轉)

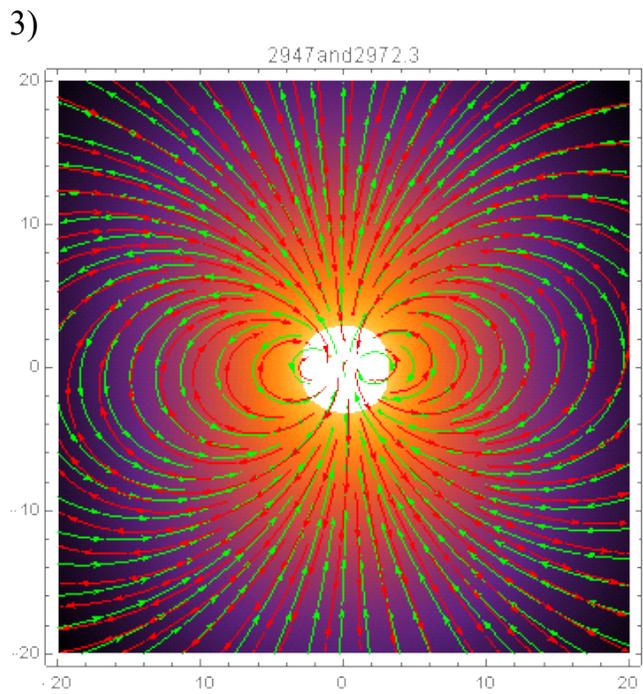
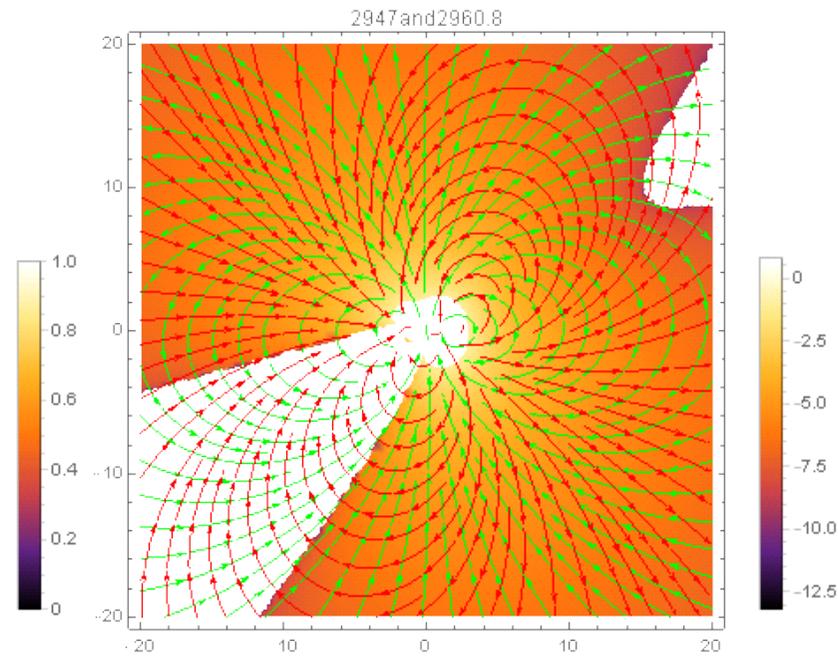
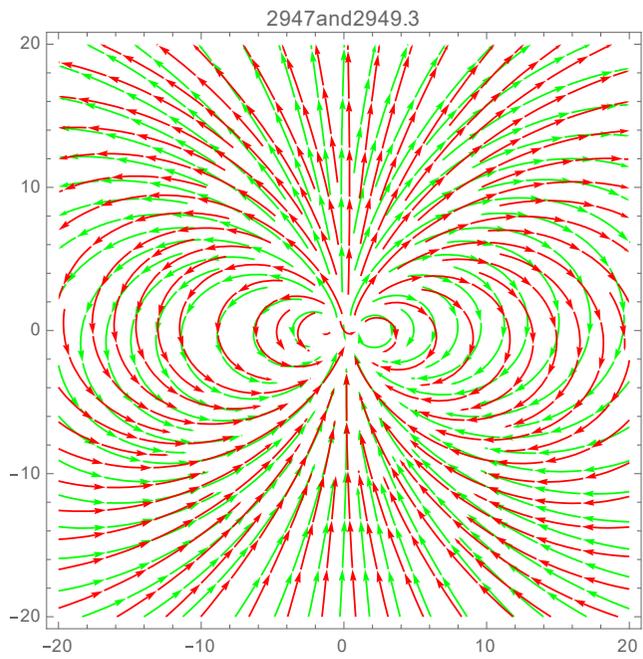
ns[0,3000,9,0.4,-10.,-9.,4]



30

1)

2)



[EarthLike2947.avi](#)

◆ 特徴

- 反転の様相は太陽型と殆ど同じ
- 周期 10000?に対して 10 倍で最大になるまで 50
- Excursion (完全に磁極反転にまで至らないもの) が多数

5. 議論&検証

加速...できるか

磁極反転時に効率よく磁気再結合すれば、磁場エネルギーがプラズマ塊の運動エネルギーに転換される。(回転は考えてない)

$$B_{BH} = 10^8 M_{sun}$$

$$R = 100 R_S$$

$$B = 300 \text{ Gauss}$$

[Kino et al. 2015, ApJ, 803, 30](#)

に対して,

$$B \approx \mathbf{m} \mu_0 r^{-3}$$

$$E_{mag} \approx \mu_0 \mathbf{m}^2 (3R)^{-3} \approx 8 \times 10^{53} \text{ erg}$$

M_{sun} のプラズマ塊なら、最大 $\beta \approx 0.7$ ぐらいまで加速できる。

★ 太陽コロナ質量放出との比較 10^{32} erg

1.収斂

...はじめはいろいろな方向に噴出？

■3C279

<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20120918/c04>

$$\Delta r = 51y$$

■3C273

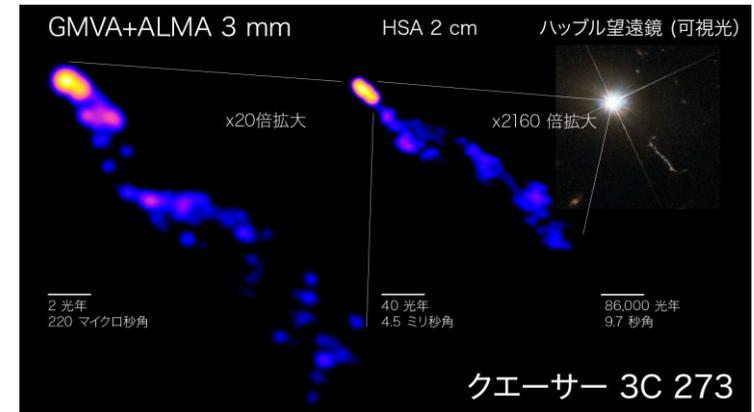
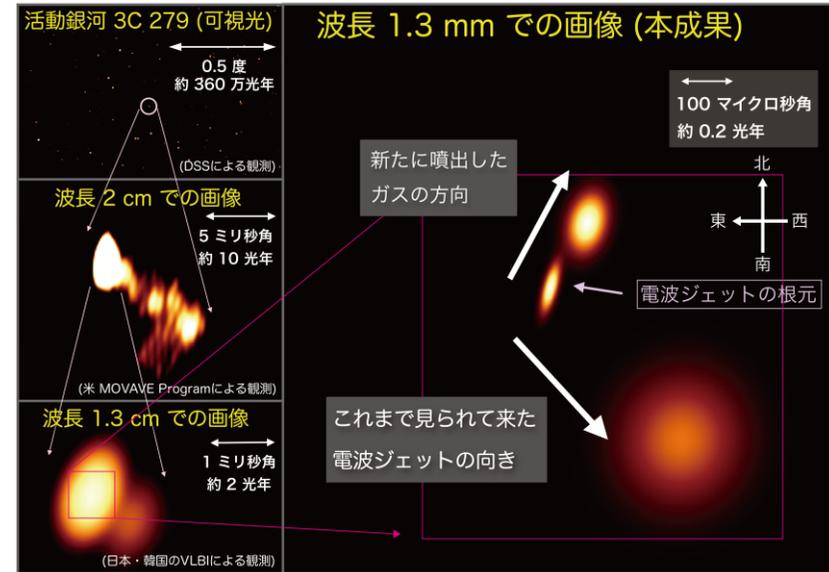
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac97e5/pdf>

<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20221122>

■プラズモンの安定性：不明

だけど，プラズマ圧力～磁気圧，で安定？

I. S. Shklovskii, Pis'ma Astron. Zh. 6, 131-135 (1980)... Sov. Astron. Lett. 6(2), 73, 1980



2. 曲がったジェット・対称性

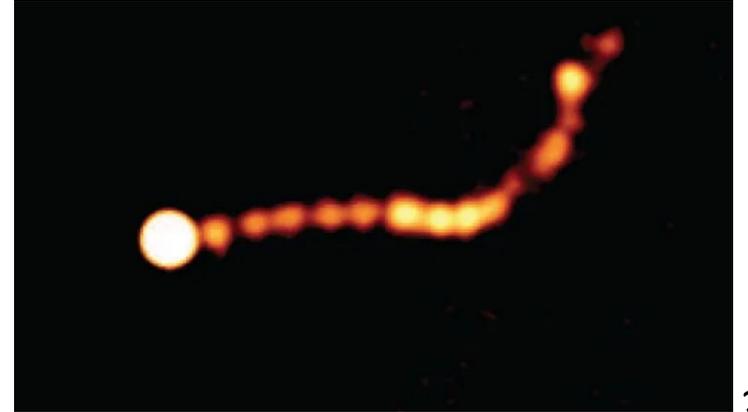
■PKS 0637-752

曲げられても直線性を保っている！？

Image: Dr Leith Godfrey, ICRAR and Dr Jim Lovell, UTas.

■Centaurus A

■Abel3376 [Jets from MRC 0600-399 bent by magnetic fields in the cluster Abell 3376 | Nature](#)



ジェット・ノットの両方向への対称性

■NGC1052 の東西ジェット：

<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2003/13/aah3907.pdf>

考察（観察）—途中で光ったり消えたりする（速度は維持して）

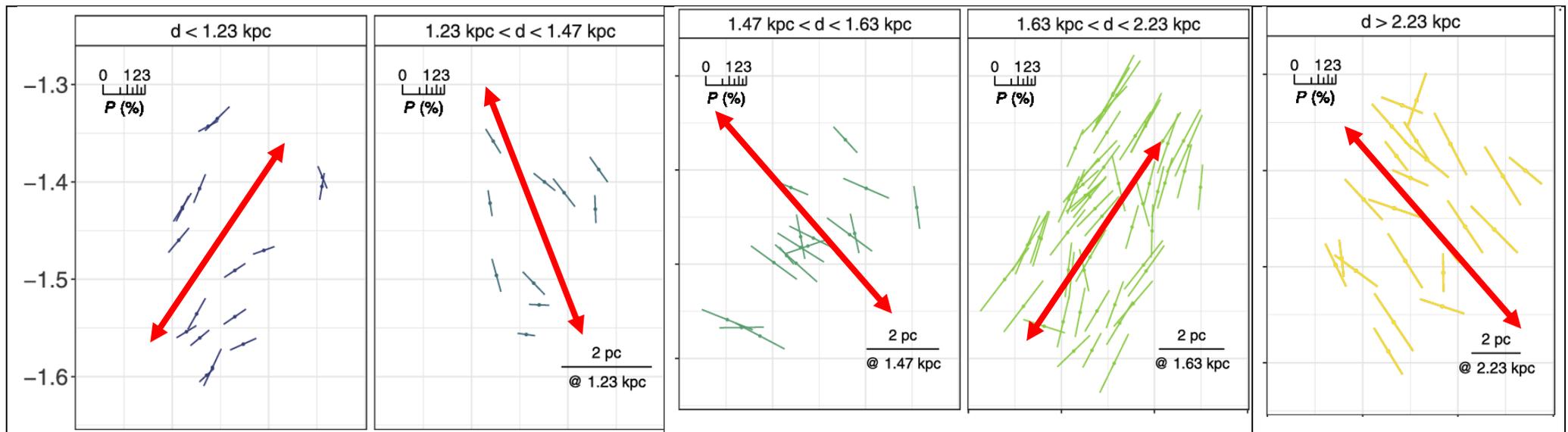
—knot 速度はずっと一定。輻射しロスするはずなのに、大きな運動エネルギーが溜め込まれている？

—Collimation プラズマ流体は拡散する。Kpc にわたっての収束

3. その他の特性

- ◆ 倍周期: 磁極反転ごとにプラズモン. 全体の磁場(強ければ)に対して, 順方向と逆方向が繰り返すので, プラズモンの大きさは大小大小を繰り返す. (cf. 太陽は 22 年周期 (11 年でない))
- ◆ 磁極反転の痕跡: (ほぼ) 周期的な磁場方向の切り替えが空間的に残っているかもしれない.

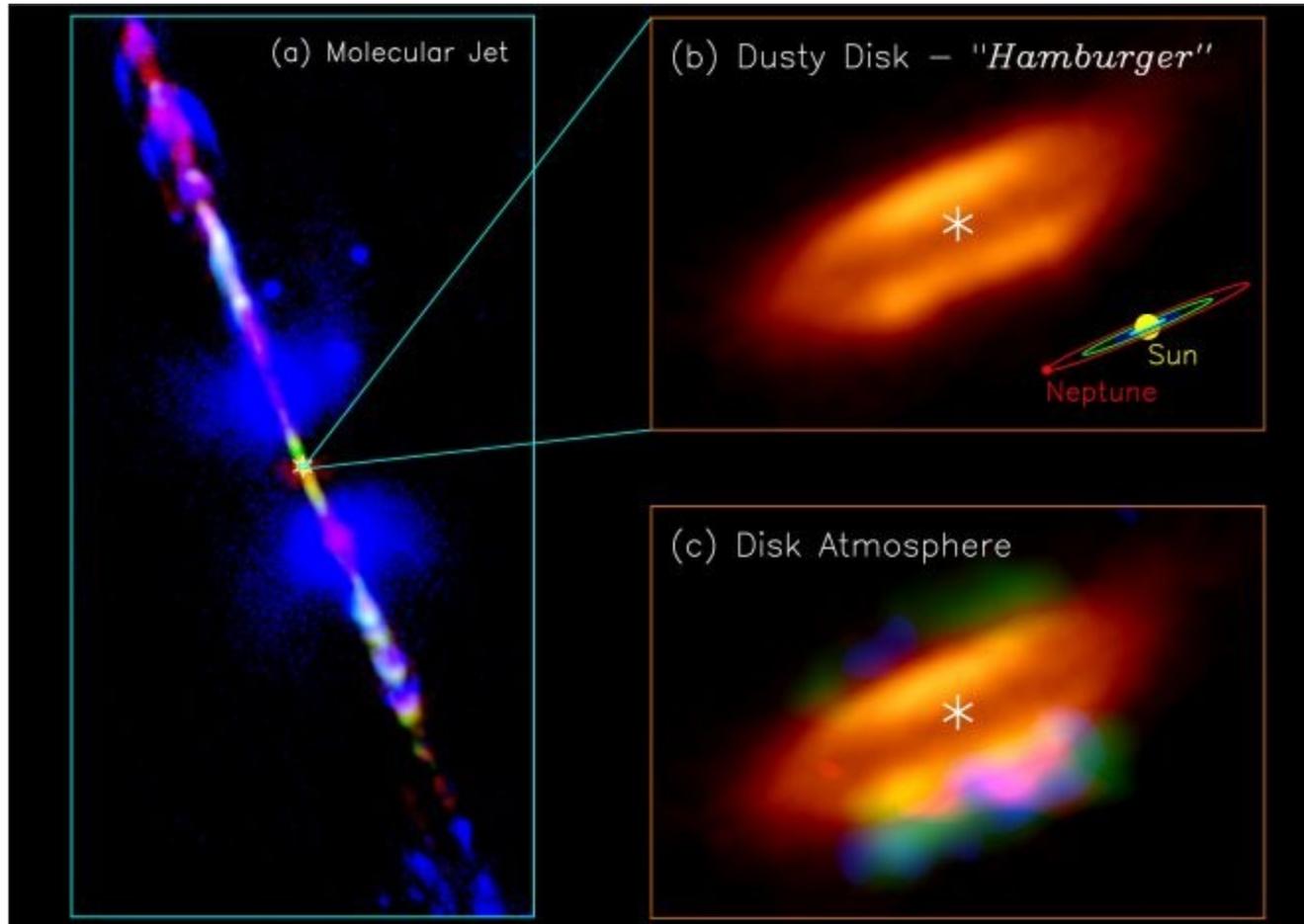
36



銀河中心へ磁区がありそう? (Yasuo Doi et al 2024 ApJ 961 13)

4. 普遍性 (原始星, $\Xi = \text{AGN}$, $\text{AGN} \dots$)

■ HH212 原始星 $\Delta r = 45 \text{AU}$ $\Delta t = 1.4 \text{y}$

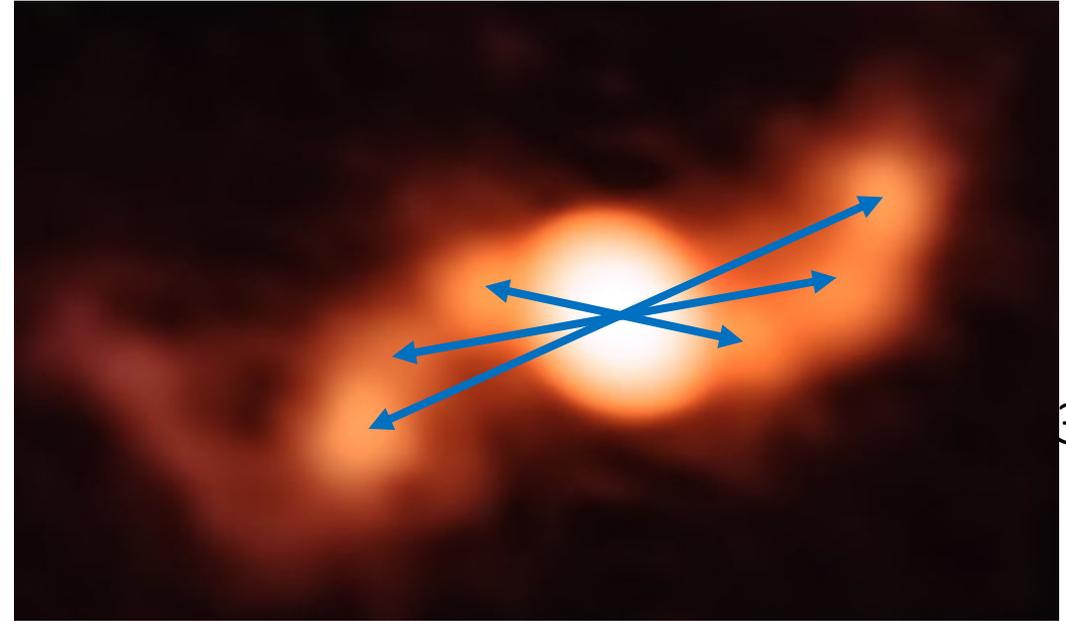


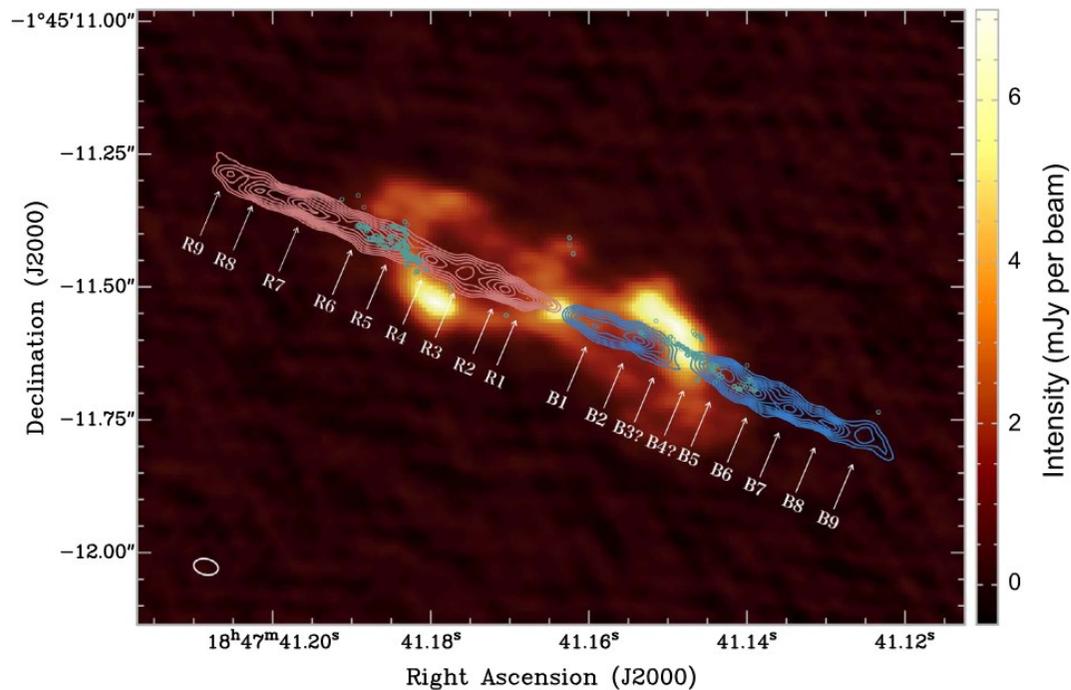
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/ Chin-Fei Lee, Zhi-Yun Li, Paul T. P. Ho, 平野尚美 (ASIAA), Qizhou Zhanb, Hsien Shang (ASIAA) et al. 2017

ジャイロ効果 (cf ライフリング)

■W43A 晩期星のジェット 電波放射 & 塵 $\Delta r=500\text{AU}$ $\Delta t=24\text{y}$

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab70b8/pdf>





■ GRS1915+105 micro quasar

■ SS433 micro quasar?

■ 考察 (観察)

- どのジェットも塊が観察されほぼ対称。

ただし、螺旋運動の縁を見ているだけのものもあるかも。

- ジェットは塊の噴出的 特に SS433

★ フレアについて

磁極反転時，激しい磁気再結合はあらゆる方向で起こる。

(双極子が卓越するが) 全方向に飛び出すプラズマは，太陽と同じようにフレアを作るだろう：

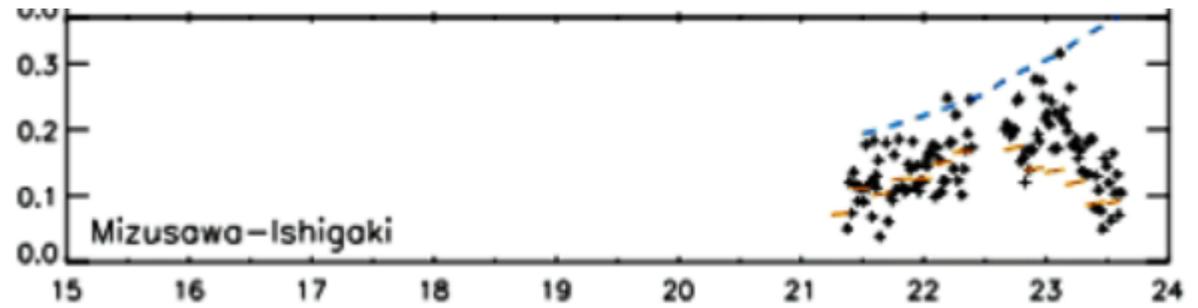
磁極反転⇒ジェット噴出⇒大きなフレア

◆ マイクロクエーサー

Cyg X-3 のフレア

J. S. Kim, 2013

Spencer 2022 [Major and Minor Flares on Cygnus X-3 Revisited \(arxiv.org\)](https://arxiv.org/abs/2201.00000)



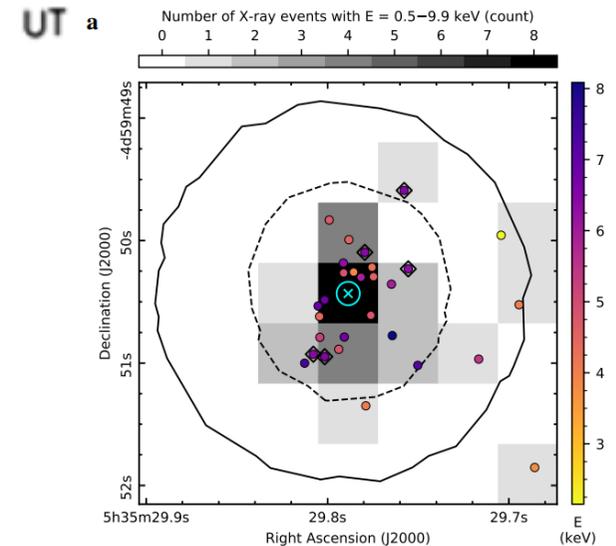
40

◆ OPTICAL FLARE IN 3C 273

A. C. Sadun 1985 *PASP* 97 395

◆ 原始星 HOPS 383 の X 線フレア

<https://arxiv.org/pdf/2006.02676.pdf>



■もっと広範には...MagRec からの活動性

	大 MagRec	小 MagRec	遠方では
太陽	コロナ質量放出(CME) →衝撃波, 宇宙線加速	太陽フレア P	太陽風 P 電波バースト 彩層 コロナ
AGN QSO	ジェット・ノット →衝撃波・宇宙線加速	フレア	アウトフロー X線 P, コロナ
原始星 晩期星	ジェット・ノット	フレア	NGC 6302 とか 

P: Pink noise

6. まとめ

◆ 角運動量の分岐, の視点から活動的なシナリオ:

DM → SMBH → ジェット → 星形成 → 銀河

a) DM → SMBH

BEC, SMBH+DH の分離, 多くの BH

b) SMBH → ジェット

磁気再結合, 磁極反転, 様々な加速

ついでに,

c) ジェット → 星形成 → 銀河: パーコレーション

銀河の多様性

◆ 発展：

- a) 離散ジェットの数値計算，それからの星形成
- b) 超長期揺らぎの視点から，現象のつながりを見る
ピンクノイズ

例えば，太陽圏のピンクノイズの伝播

太陽 5 分振動 → フレア → 太陽風 → 南極氷床・14C・SST・PDO, ...

同様に，BH 圏のピンクノイズ伝播？

QPO or スピン同期(BH)

→ ジェット，X，UV，フレア，アウトフロー