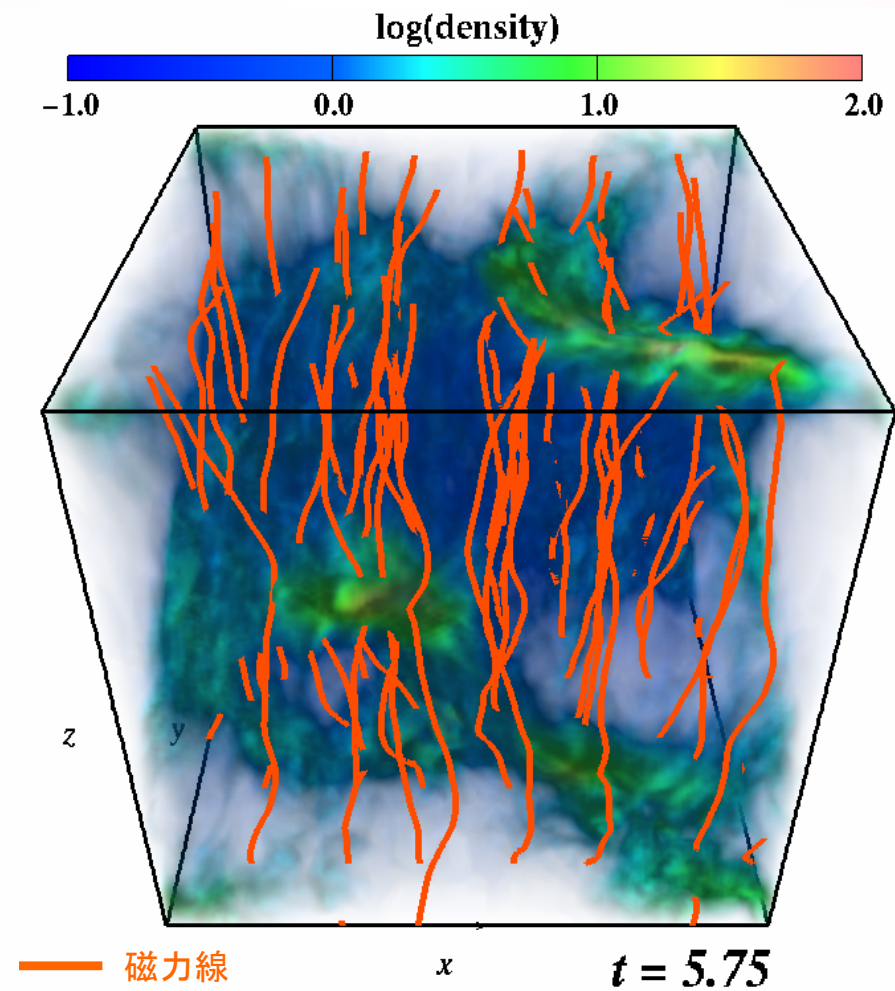


磁気乱流の減衰による乱流スペクトル・ 分子雲構造の時間変化

杉本 香菜子 (名古屋大 / 千葉大)、花輪 知幸 (千葉大先進)、
福田 尚也 (岡山理大)

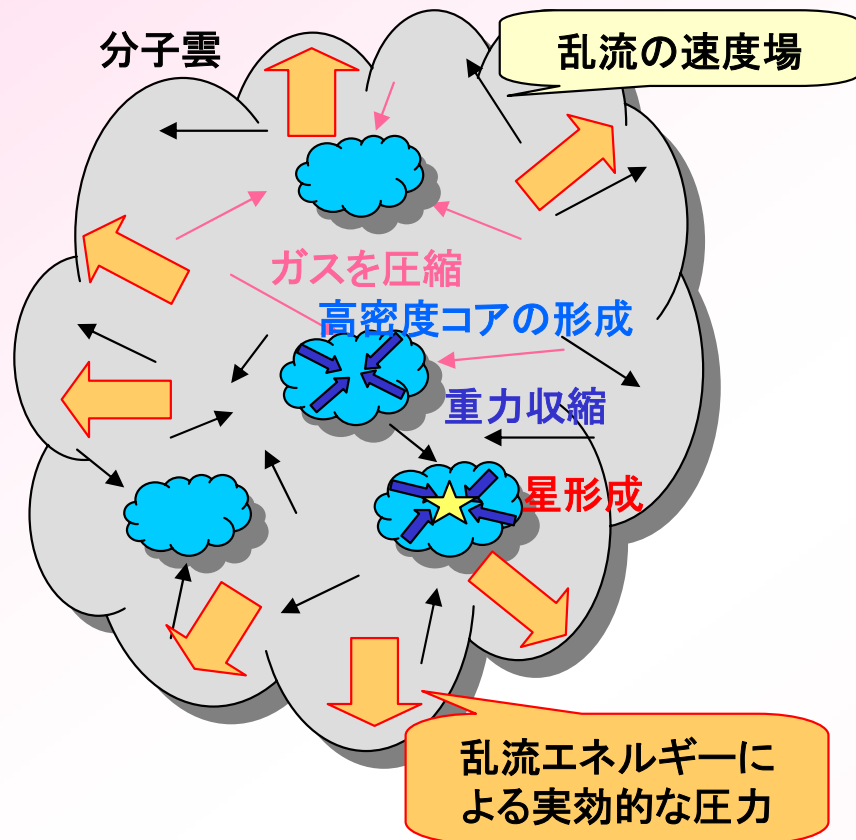
星間乱流の減衰

- 乱流のスペクトル(典型スケール)はどのように変化するか？
- Minkowski functionalsの導入: ガス雲の構造に異方性があるか？

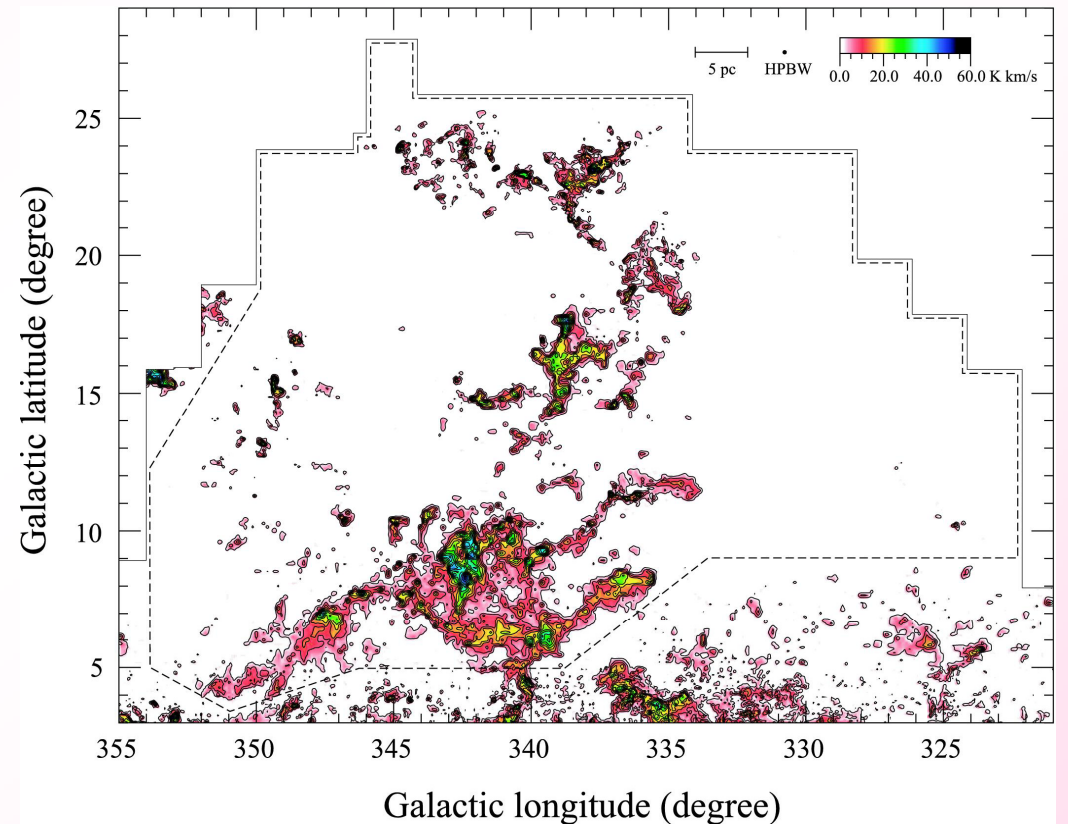


分子雲磁気乱流

分子雲乱流: 分子雲内のガスの超音速運動(マッハ数約10)
分子雲磁場とカップルした磁気乱流である



Lupus分子雲領域の ^{12}CO 積分強度図



(Tachihara et al. 2001, PASJ)

磁気乱流は分子雲の構造や進化に影響する

分子雲乱流の数値計算とガス雲の構造

数値シミュレーションによるガスの面密度分布

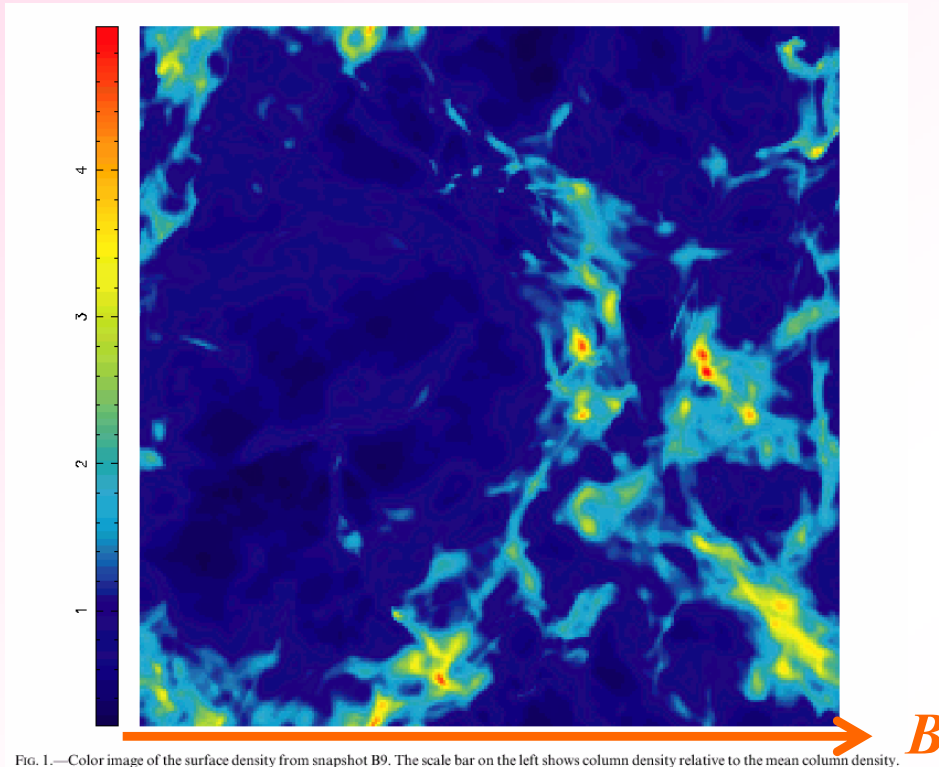


FIG. 1.—Color image of the surface density from snapshot B9. The scale bar on the left shows column density relative to the mean column density.

(Gammie et al. 2003)

数値シミュレーションによるガス雲の構造解析。。。定性的

- ・フィラメント状の細長い構造ができやすい
- ・ガス雲は磁場に垂直な方向に伸びる傾向がある

Minkowski functionalsを導入することにより、定量化出来ないか？

問題設定

進化： 乱流の減衰にともなう乱流スペクトル、スケールの変化
[圧縮性 vs 非圧縮性成分、磁場との方向性]

構造： 重力収縮によって形成されるガス雲と磁場との方向性
[Minkowski functionalsの解析: プレリミナリーな結果]

初期モデル

初期条件：一様密度・磁場＋乱流速度場

乱流速度場：
$$\mathbf{v}_{\text{turb}}(x, y, z) = \sum_k \tilde{A}(k) \mathcal{E}^{1/2} c_s \exp[i(k \cdot \mathbf{r} - \omega t)]$$

c_s : 音速、 $\mathcal{E} = \langle v_{\text{turb}}^2 \rangle / c_s^2$, k : 波数, $\omega = v_A |k|$: 周波数

初期モデルの密度、磁場分布

• 乱流速度場は、計算の初期に1度だけ与える

• 振幅 $\tilde{A}(k)$: 一様乱数

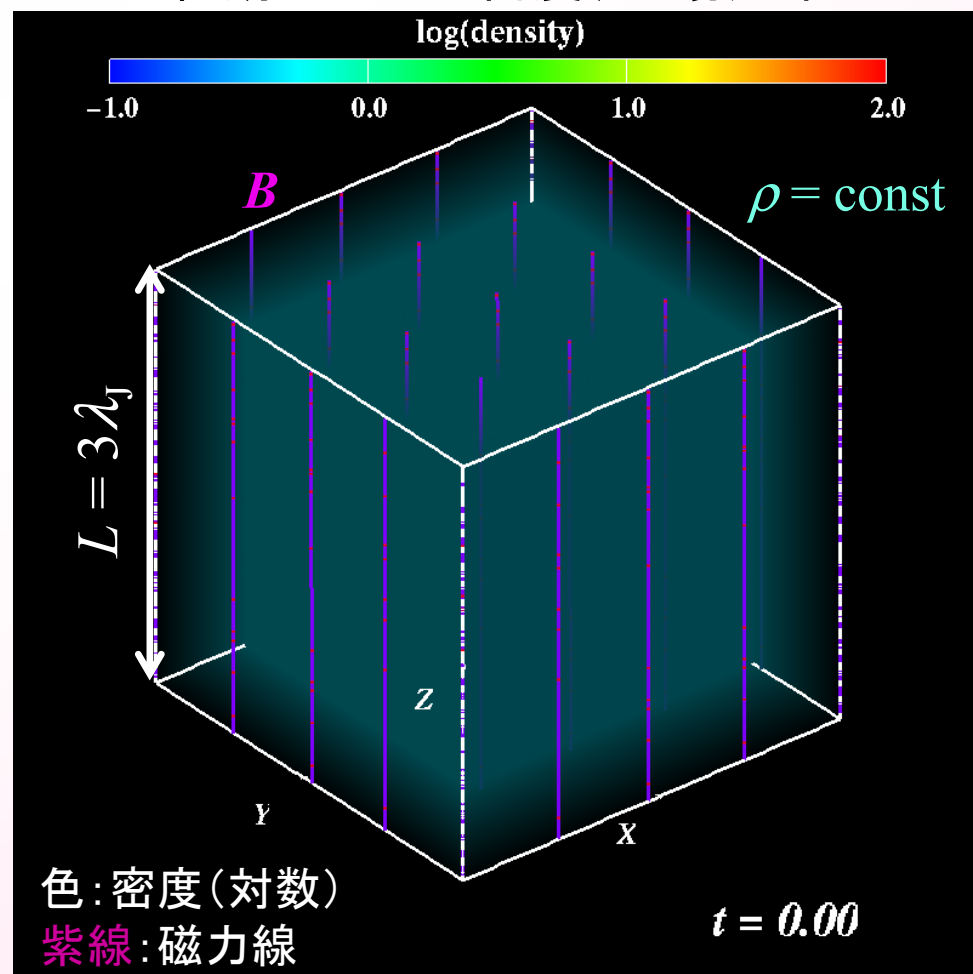
• k は $0 \leq k_i / k_J \leq 4$ ($i = x, y, z$)の範囲内で、**波数範囲を限定して与えた**

$$k / k_J = 1/3 - 1, 2/3 - 4/3, 1 - 2, 2 - 3, 3 - 4\sqrt{3} \\ 1/3 - 4\sqrt{3}$$

モデル

プラズマ $\beta = 1$

- $\mathcal{E} = \langle v_{\text{turb}} \rangle^2 / c_s^2 = 10$
- 初期の乱流: 非圧縮性
- 境界条件: 周期



数値計算

使用計算機:

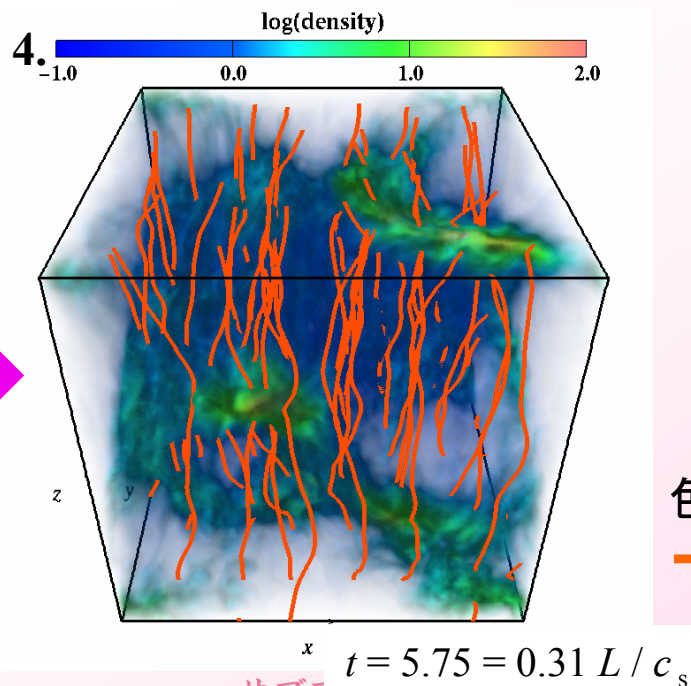
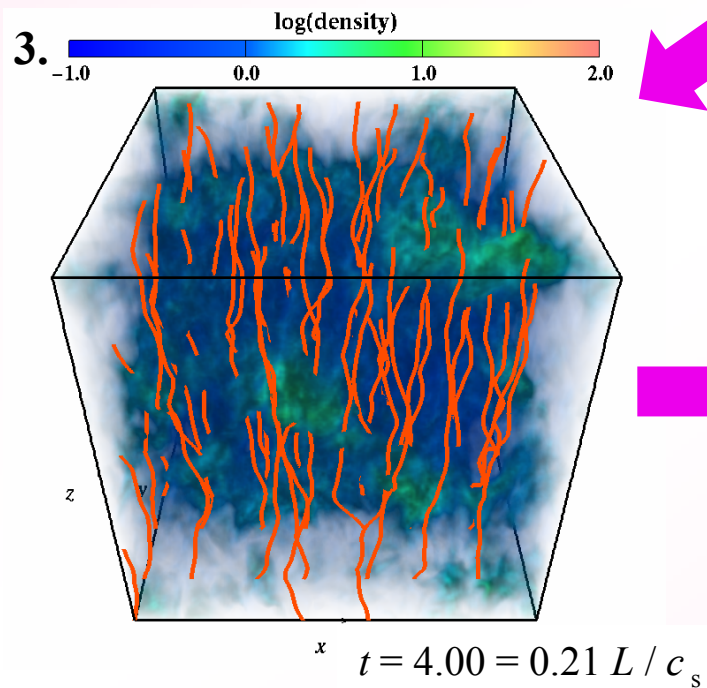
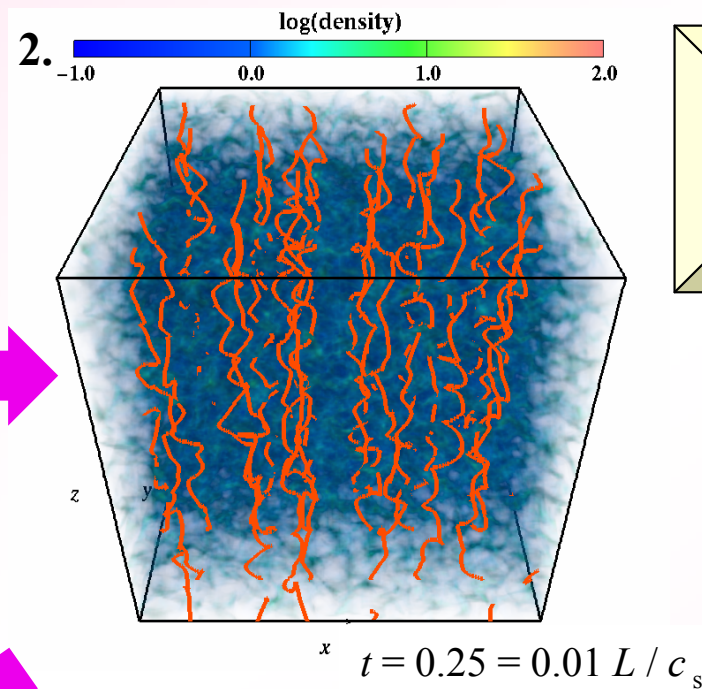
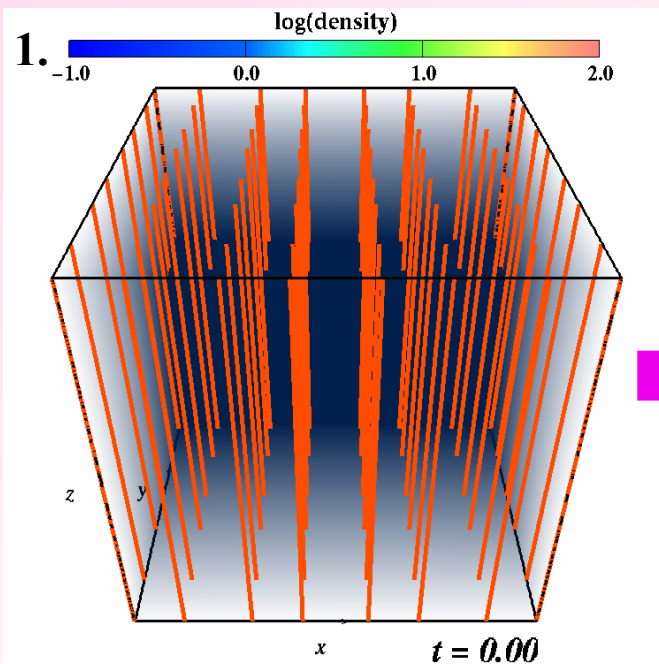
国立天文台天文学データ解析計算センターVPP5000 (32PE)

格子数 256^3 、 (512^3)

基礎方程式

- 理想MHD方程式系(等温): 2次精度風上差分法
 - 自己重力(Poisson方程式)、 $\nabla \cdot B$ 補正、圧縮性 / 非圧縮性
- 成分の分離: 多層格子反復法

ガス雲の時間発展



モデル
 $k_{\text{drv}} / k_J = 1/3 - 4\sqrt{3}$

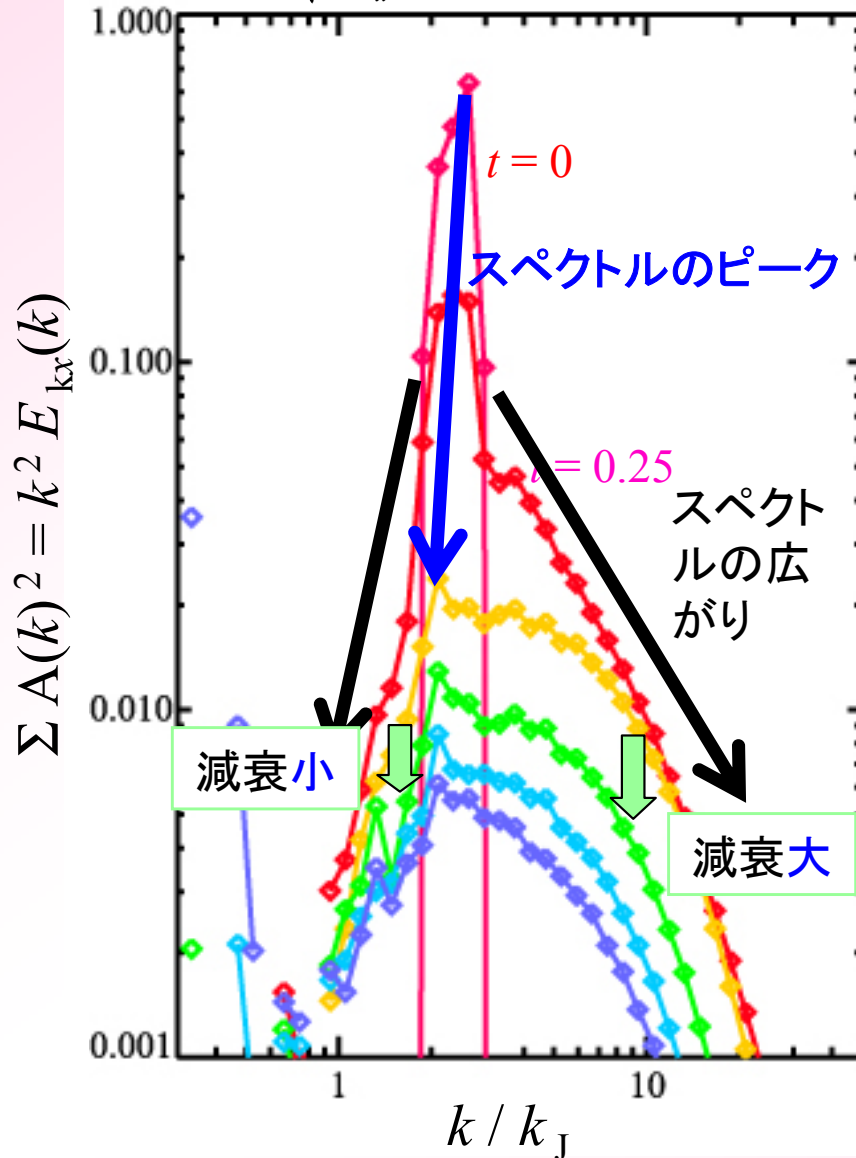
1. v (非圧縮性)
 $\downarrow (\delta B)$
2. $\delta \rho$
 \downarrow
3. v (乱流) \downarrow
4. 重力収縮

色スケール: 密度 (log)
 — 磁力線

乱流スペクトルの時間変化

モデル: $k/k_J = 2 - 3$

$\sqrt{\rho v_x}$ のスペクトル



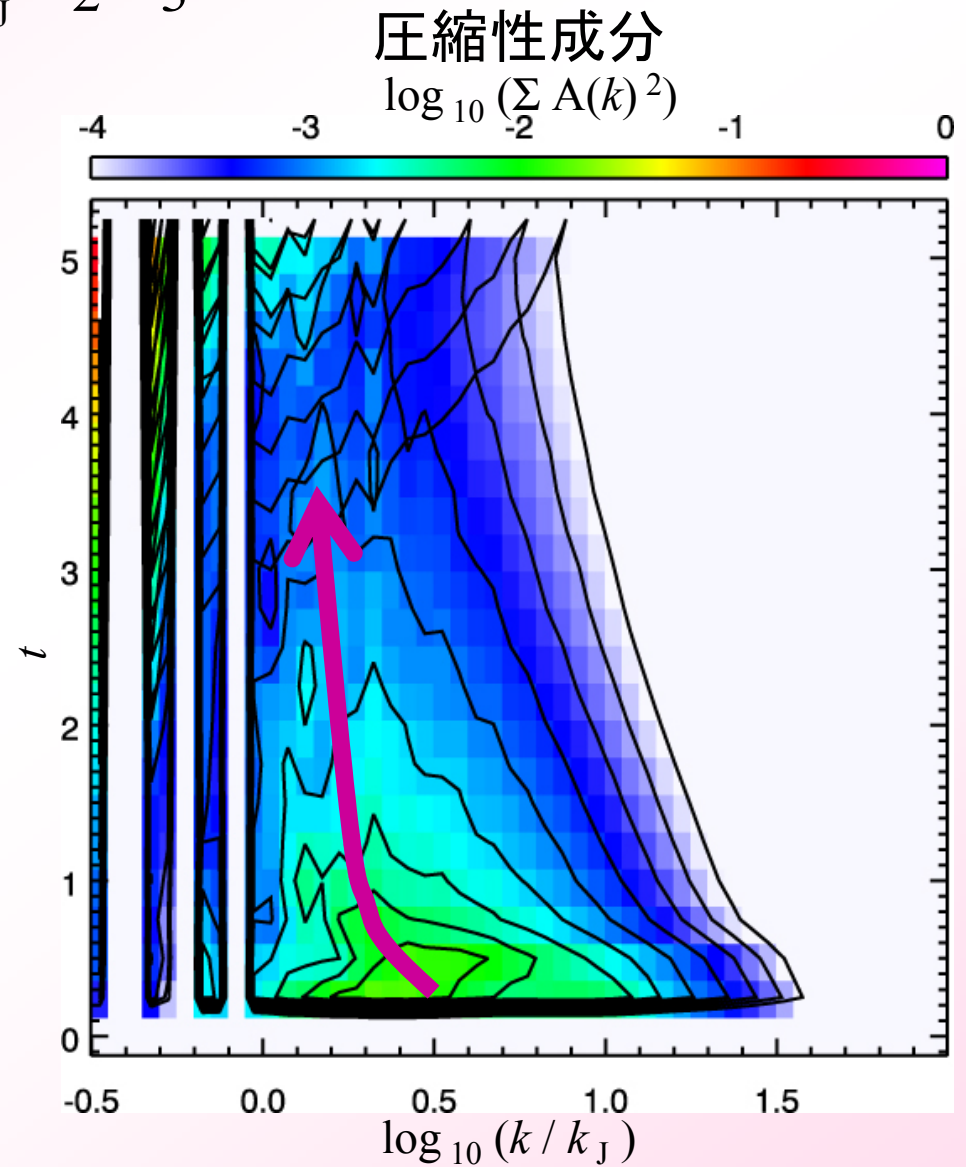
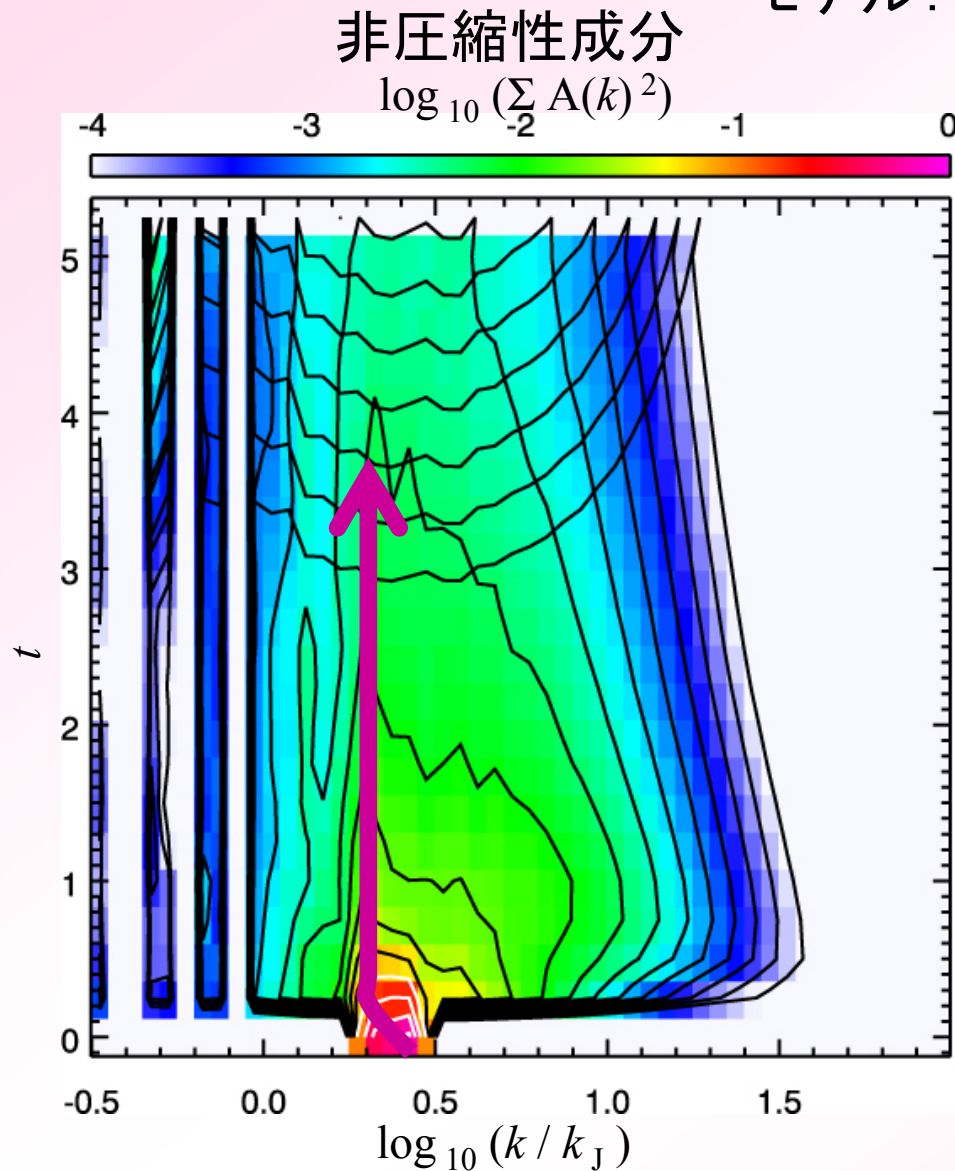
- 乱流スペクトルは、初期の波数域に対して波数が大小の両側に広がる

- 波数が大きい成分のエネルギーの減衰が大きい

- スペクトルのピークは波数が小さい方(長波長側)にシフトする

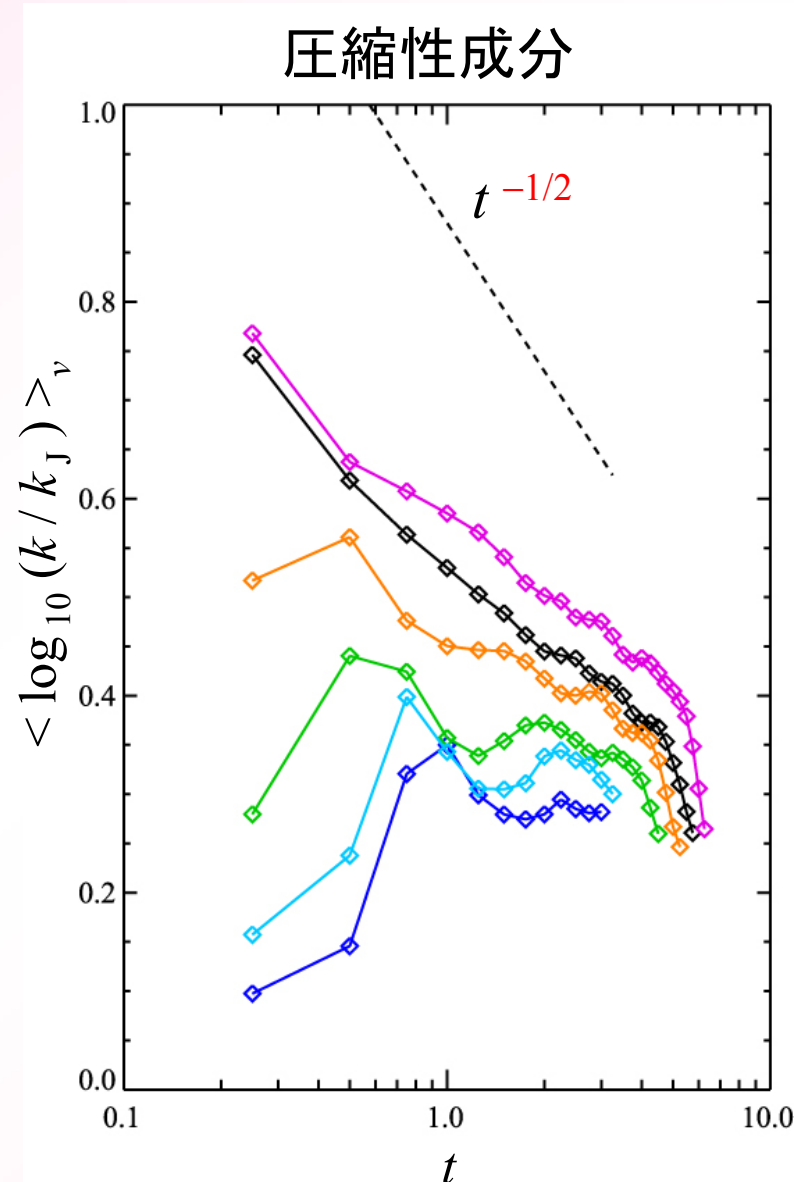
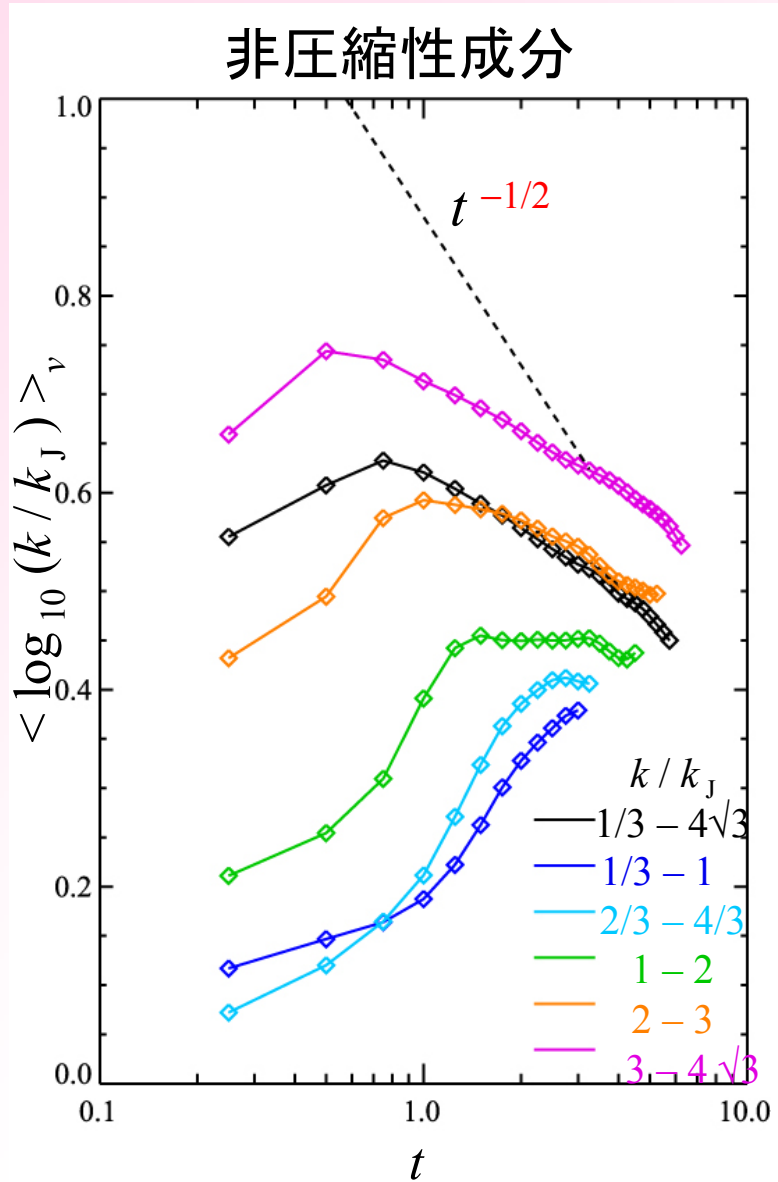
圧縮性 / 非圧縮性成分のスペクトル(v_x)

モデル: $k/k_J = 2 - 3$



- **スペクトル・ピークの波数小へのシフトは圧縮性モードの方が大きい**
- 圧縮性成分の方が波数大の成分の減衰が早い

圧縮性 / 非圧縮性成分の典型スケールの時間変化(v_x)



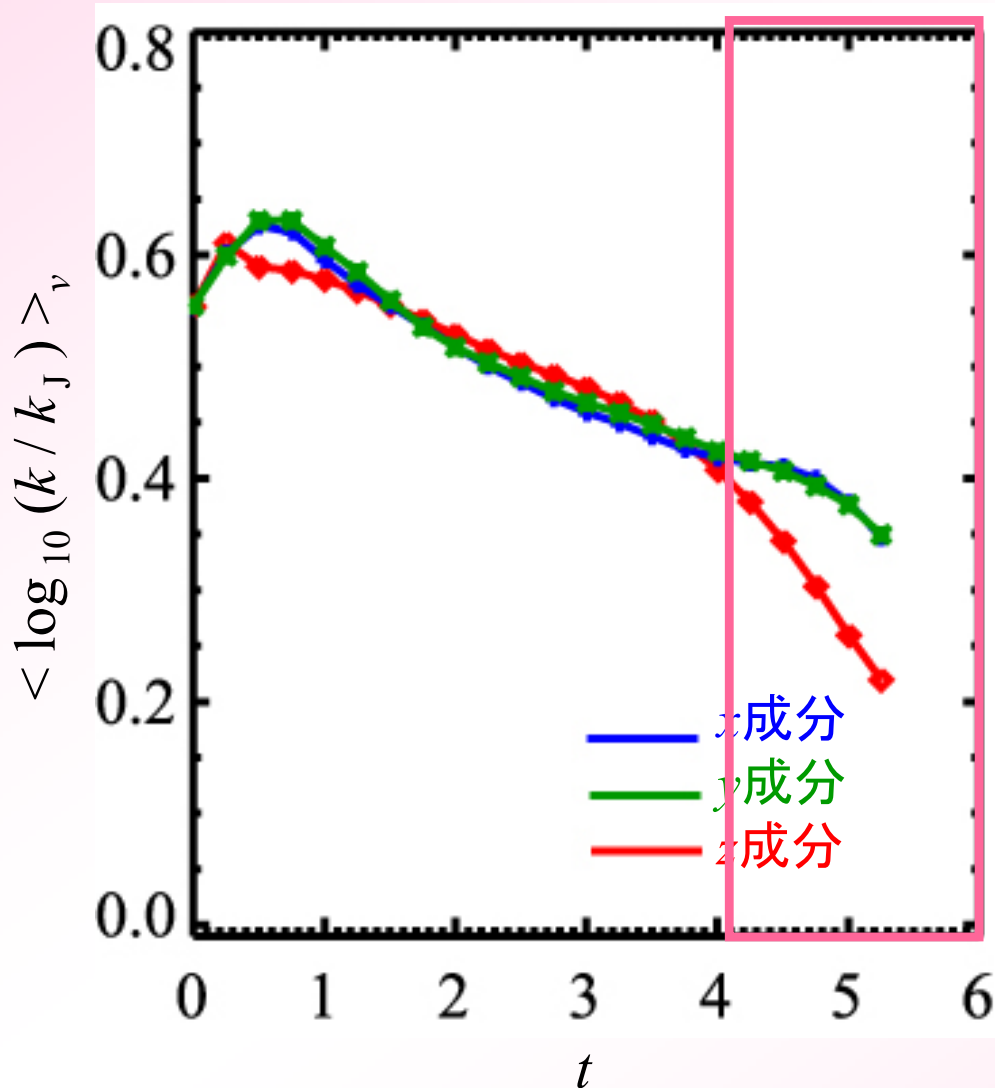
乱流の典型波数

$$\langle \log k \rangle_v = \frac{\sum_k A(k)^2 \log k}{\sum_k A(k)^2}$$

- 乱流の典型波数は両成分とも、時間とともに減少する
- 波数の減少は圧縮性成分の方が大きい

乱流スペクトルの異方性

$\sqrt{\rho v_i}$ の典型波数



- 磁場に垂直な(x, y)方向には非等方性が見られない

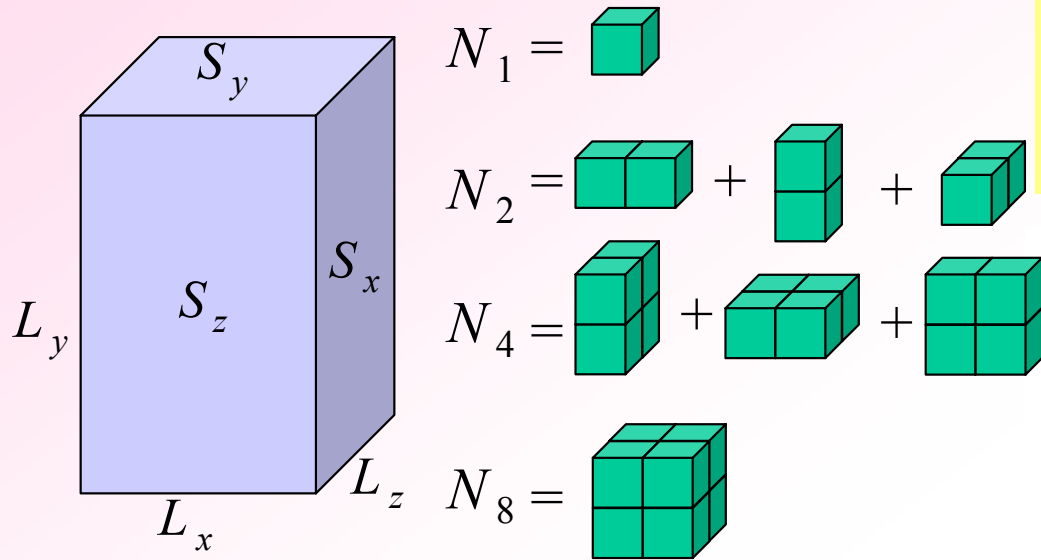
- 重力収縮期に

$$k_z < k_x, k_y$$

平均磁場方向(z方向)の典型スケール大

Minkowski functionals (\mathcal{G} , C , S , \mathcal{V})

$\rho > \rho_{th}$ を満たすガス塊を探す

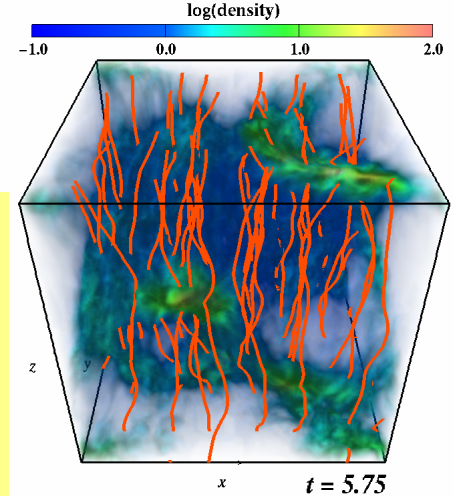


$$\mathcal{G} = N_1 - N_2 + N_4 - N_8$$

$$C = (3N_1 - 2N_2 + N_4) dl$$

$$S = (3N_1 - N_2) dS$$

$$\mathcal{V} = N_1 dV$$



\mathcal{G} : [個数]

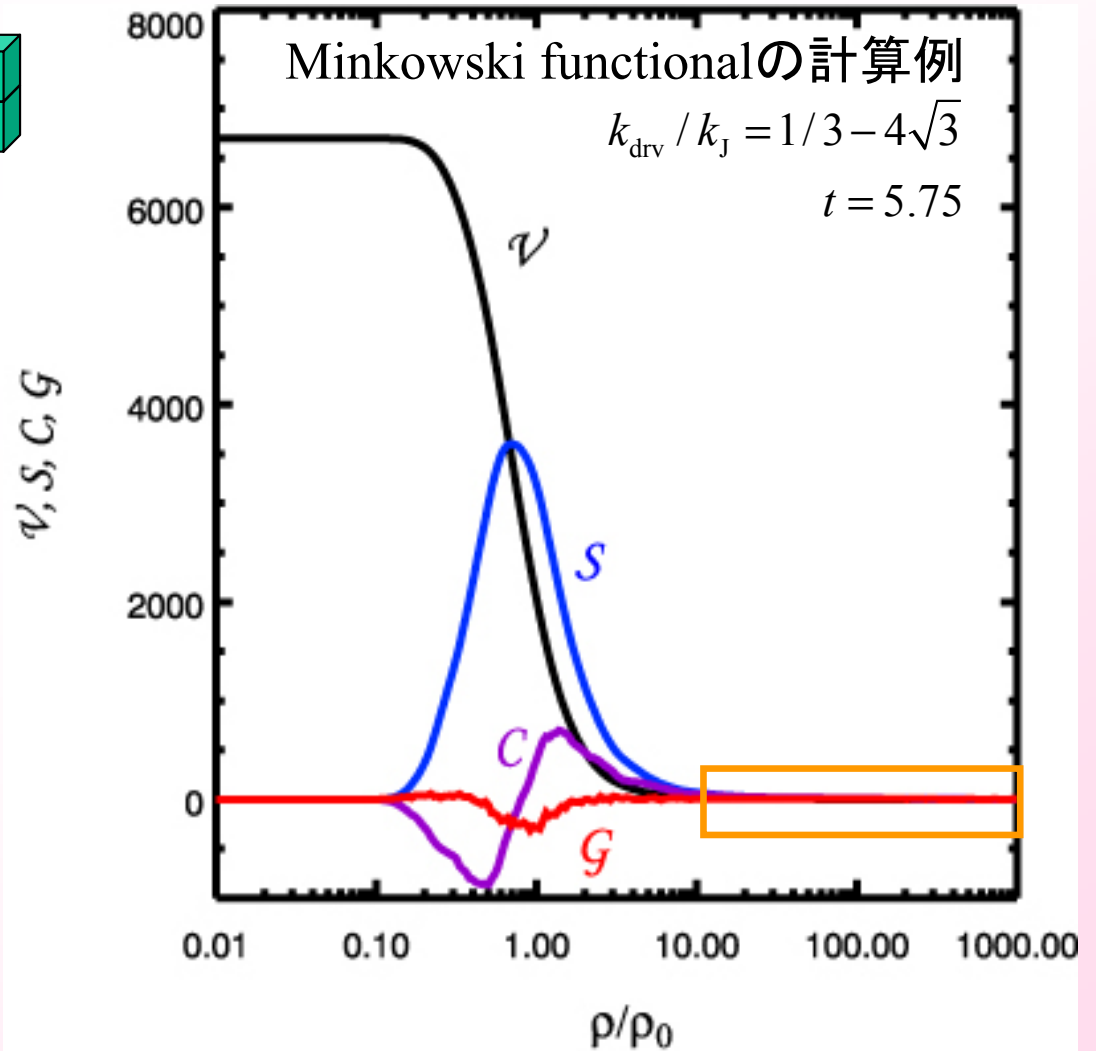
$C = \Sigma (L_x + L_y + L_z)$: [長さ]

$S = \Sigma (S_x + S_y + S_z)$: [面積]

$\mathcal{V} = \Sigma (L_x L_y L_z)$: [体積]

を典型的に表す統計量

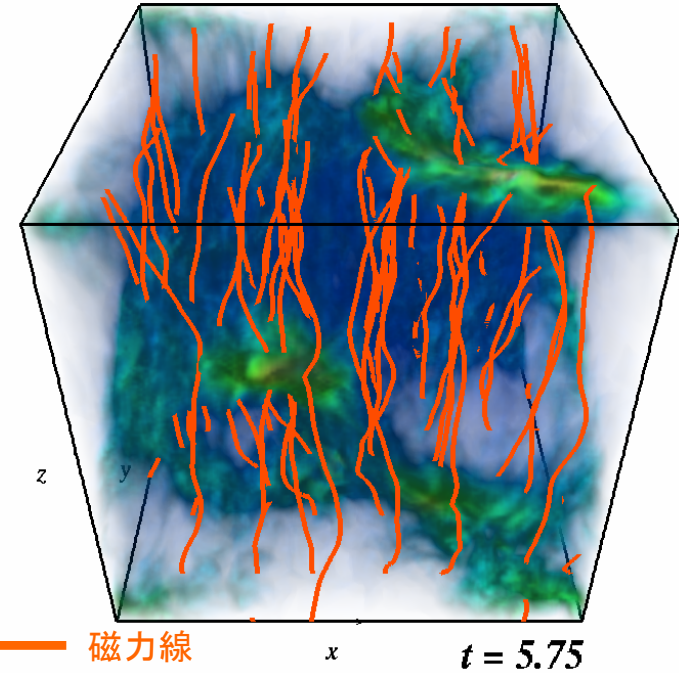
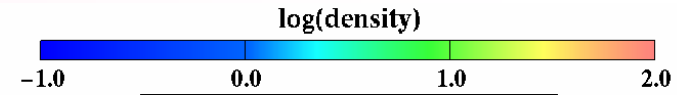
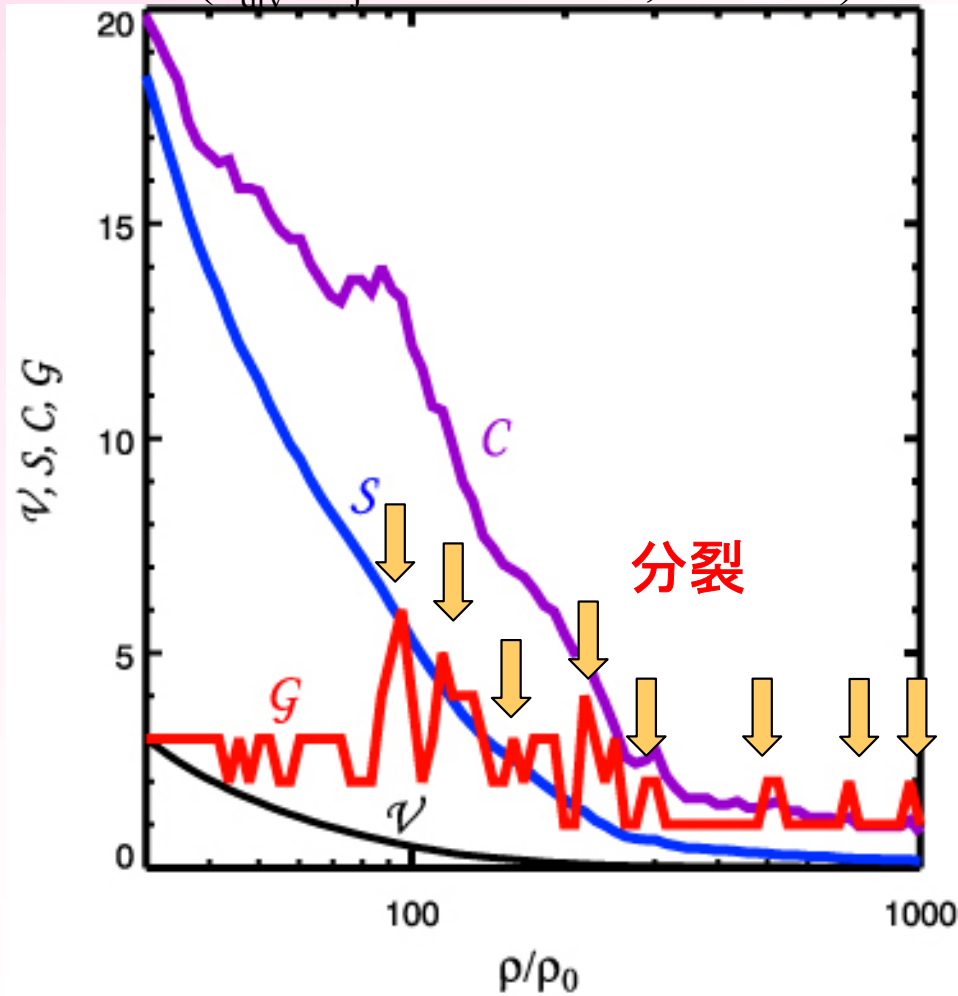
$\Rightarrow \rho_{th}$ を変化させることで、ガス塊の形状を現す統計量を得られる。



Minkowski functionals とガス雲の構造 (1/2)

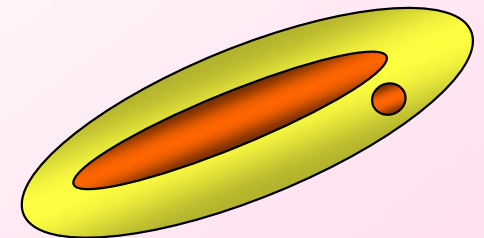
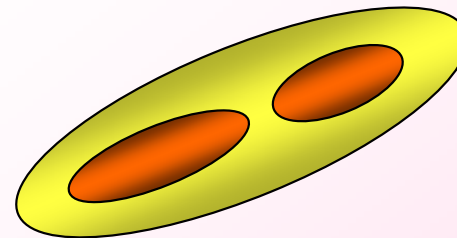
Minkowski functionalの高密度部分

$$(k_{\text{drv}} / k_{\text{I}} = 1/3 - 4\sqrt{3}, t = 5.75)$$



長さ方向の分裂

不均等な分裂



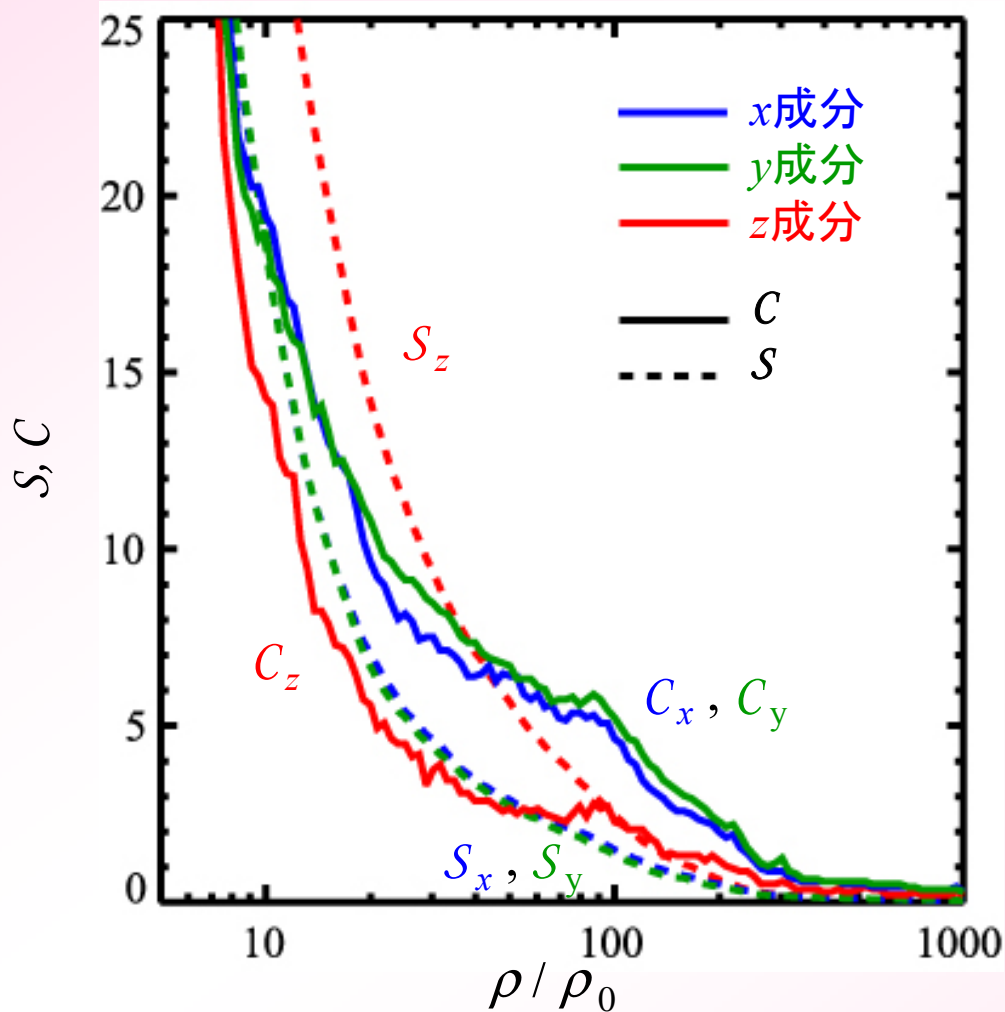
G の増加 \Rightarrow ガス雲内部の高密度領域が分裂

S, C の増加小 \Rightarrow 細長いガス雲が長さ方向に分裂 or 不均等な分裂

Minkowski functionals とガス雲の構造 (2/2)

C, S の各方向成分

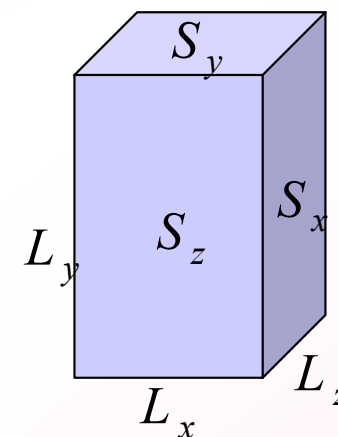
$(k_{\text{drv}} / k_J = 1/3 - 4\sqrt{3}, t = 5.75)$



$$10 \lesssim \rho / \rho_0 \lesssim 300$$

$$C_z < C_x, C_y$$

$$S_z > S_x, S_y$$



⇒ 磁場に平行な方向 (z 方向) に短い構造

$$\rho / \rho_0 \gtrsim 300$$

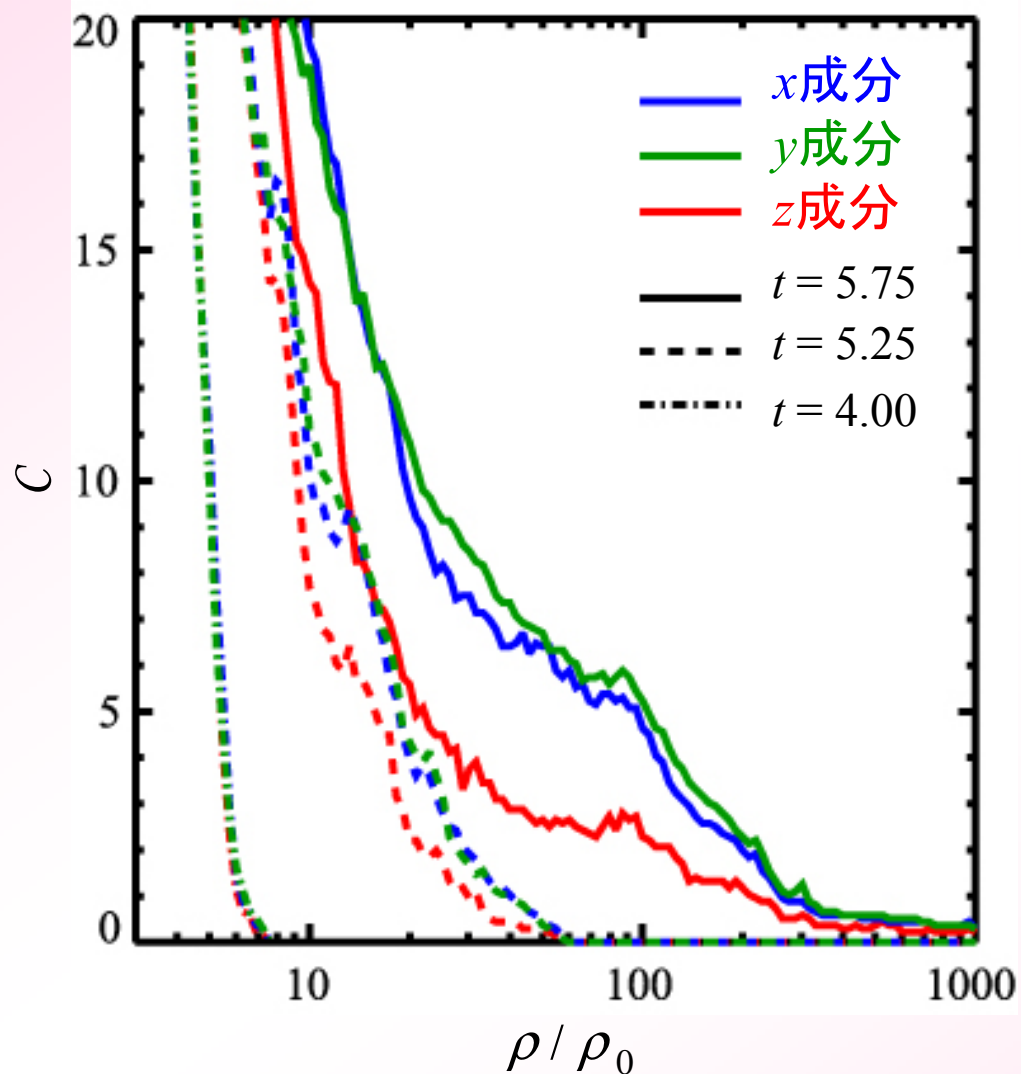
$$C_z \approx C_x \approx C_y$$

$$S_z \approx S_x \approx S_y$$

⇒ 等方な構造

時間発展と *Minkowski functionals* の異方性

C の各方向成分の時間変化
($k_{\text{drv}} / k_{\text{J}} = 1/3 - 4\sqrt{3}$, $t = 5.75$)



$t = 5.25$ 以降 (自己重力収縮後期) に $\rho \gtrsim 10$ の部分に異方性が現れる

まとめ

乱流スペクトルの時間変化

- スペクトルは初期の波長域に対して広がる → 減衰
- 典型波数緩やかに減少(長波長方向にシフト)
- 非圧縮性成分の方が波数の減少が早い
- 自己重力収縮期に $k_{\parallel} < k_{\perp}$

ガス雲の構造: ガス雲の構造解析にMinkowski functionalsを導入

- 高密度領域でガス雲が階層的に分裂
- 自己重力収縮後期に非等方性
- $10 \lesssim \rho / \rho_0 \lesssim 300$: 重力収縮したガス雲は**磁場に垂直な方向に伸びた構造**を持つ

⇒ Minkowski functionalsは分子雲の構造解析に有益だろう