

磁場に貫かれたフィラメント状 分子雲の自己重力不安定

工藤哲洋（長崎大学教育学部）

共同研究者：花輪知幸（千葉大）， 富阪幸治（国立天文台）

filamentary molecular cloud, gravitational instability, magnetic field

本日の内容

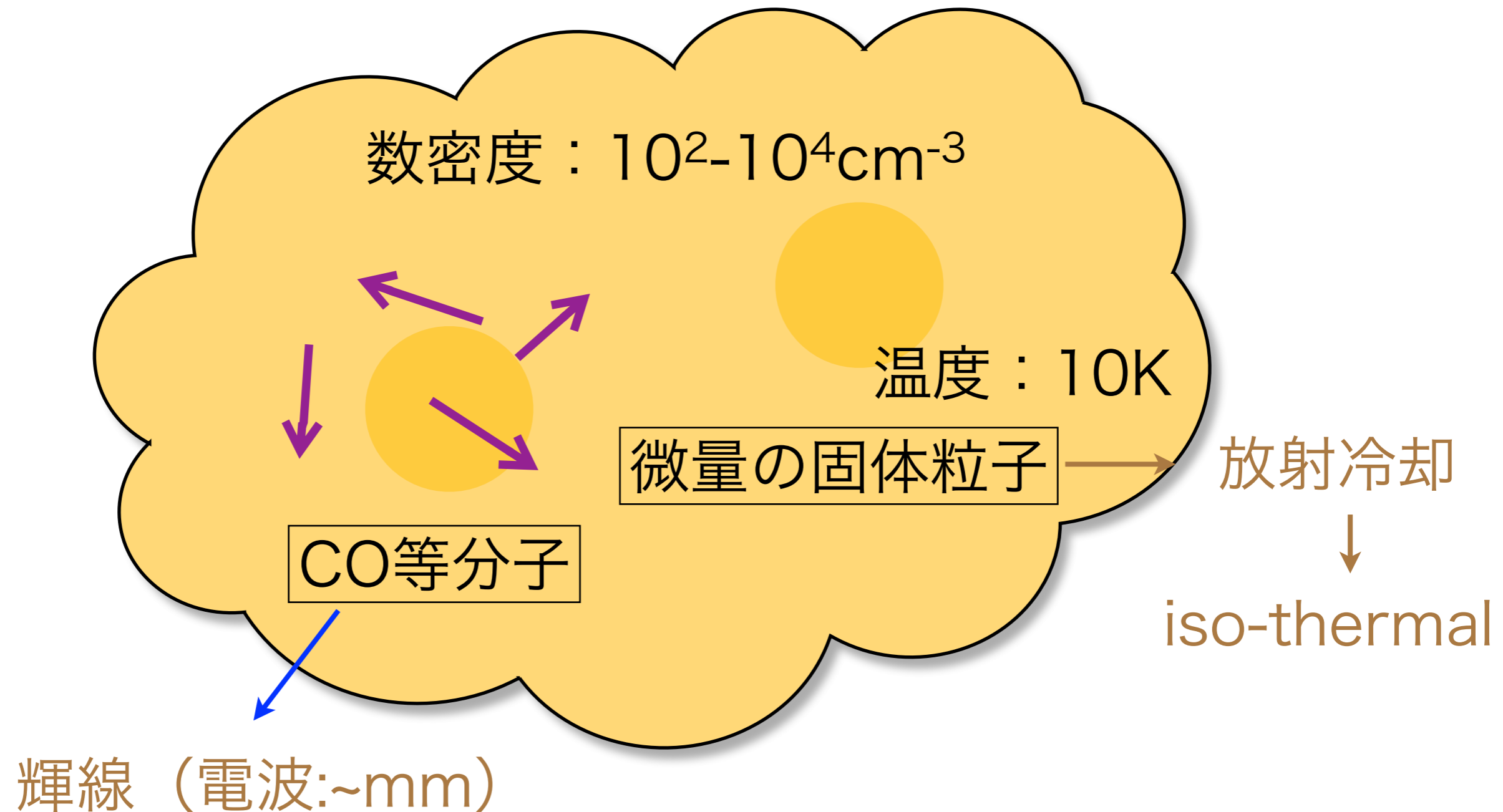
- ・ 平板状分子雲の場合 *sheet-like molecular cloud*
自己重力不安定とコア形成, 磁場の影響
- ・ フィラメント状分子雲の場合 *filamentary molecular cloud*
自己重力不安定とコア形成, 磁場の影響
- ・ フィラメント状分子雲の生成からコア形成
(preliminary) *formation of filamentary cloud*

平板状分子雲の場合

sheet-like molecular cloud

Molecular cloud

主成分：H₂（水素分子）

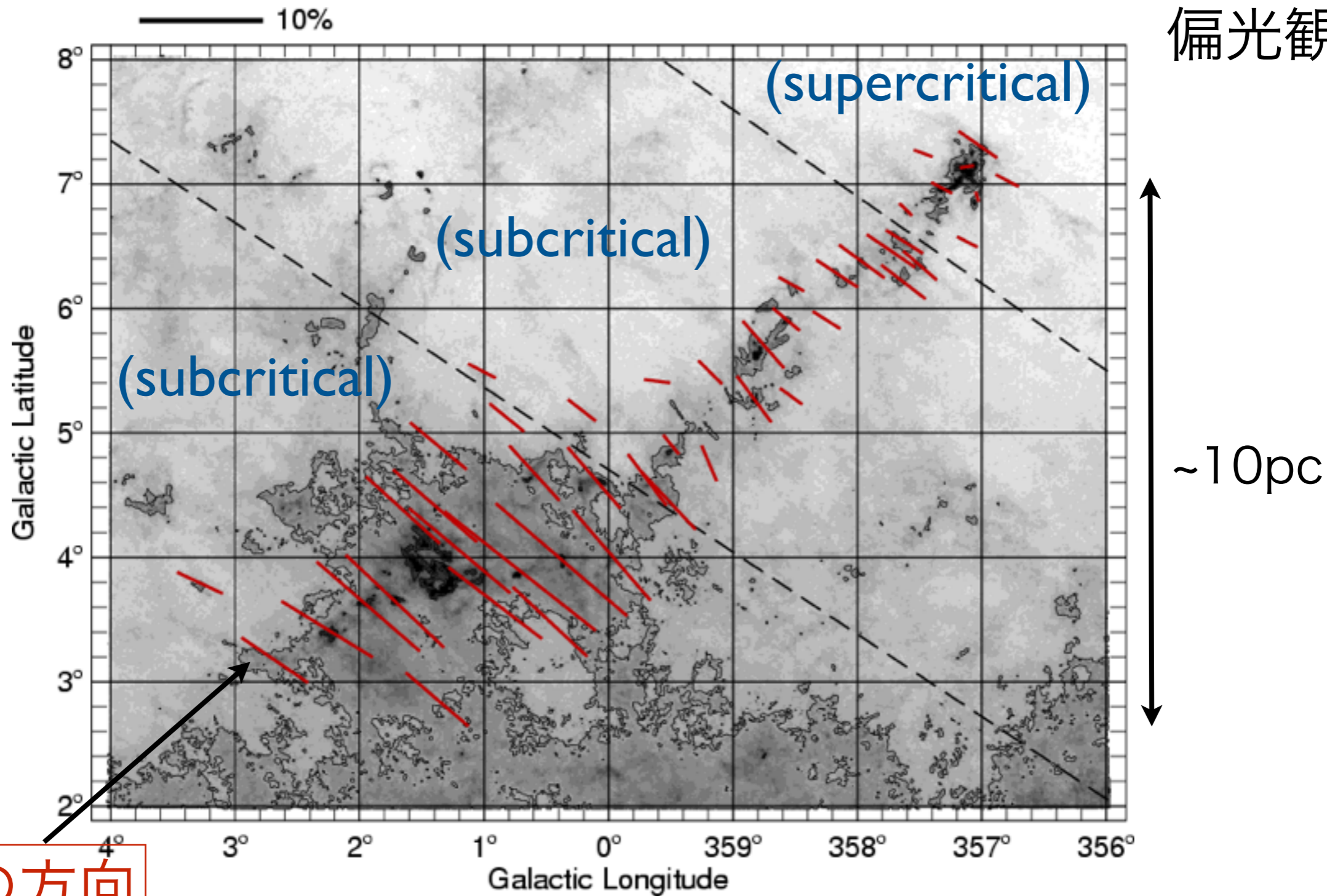


輝線幅 $\sigma \simeq 0.6 \text{ km/s} \rightarrow$ 内部の乱雑運動（乱流）

Magnetic field

Alves et al. (2008)

偏光観測



磁場の方向

Mean polarization vectors, for each of the observed 46 fields, overplotted on the dust extinction map of the Pipe nebula obtained by [Lombardi et al. \(2006\)](#). The lengths of these vectors are proportional to the scale indicated in the top left-hand corner. Only stars showing were used in the calculus of the mean polarization and position angle. The dashed-lines indicate the celestial meridians defined by and (see text and Fig. 2).

Magnetic energy ~ Gravitational energy

Molecular cloud

主成分：H₂（水素分子）

音速

$$c_s \simeq 0.2 \text{ km/s}$$

温度：10K

数密度： 10^2 - 10^4 cm^{-3}

微量の固体粒子

CO等分子

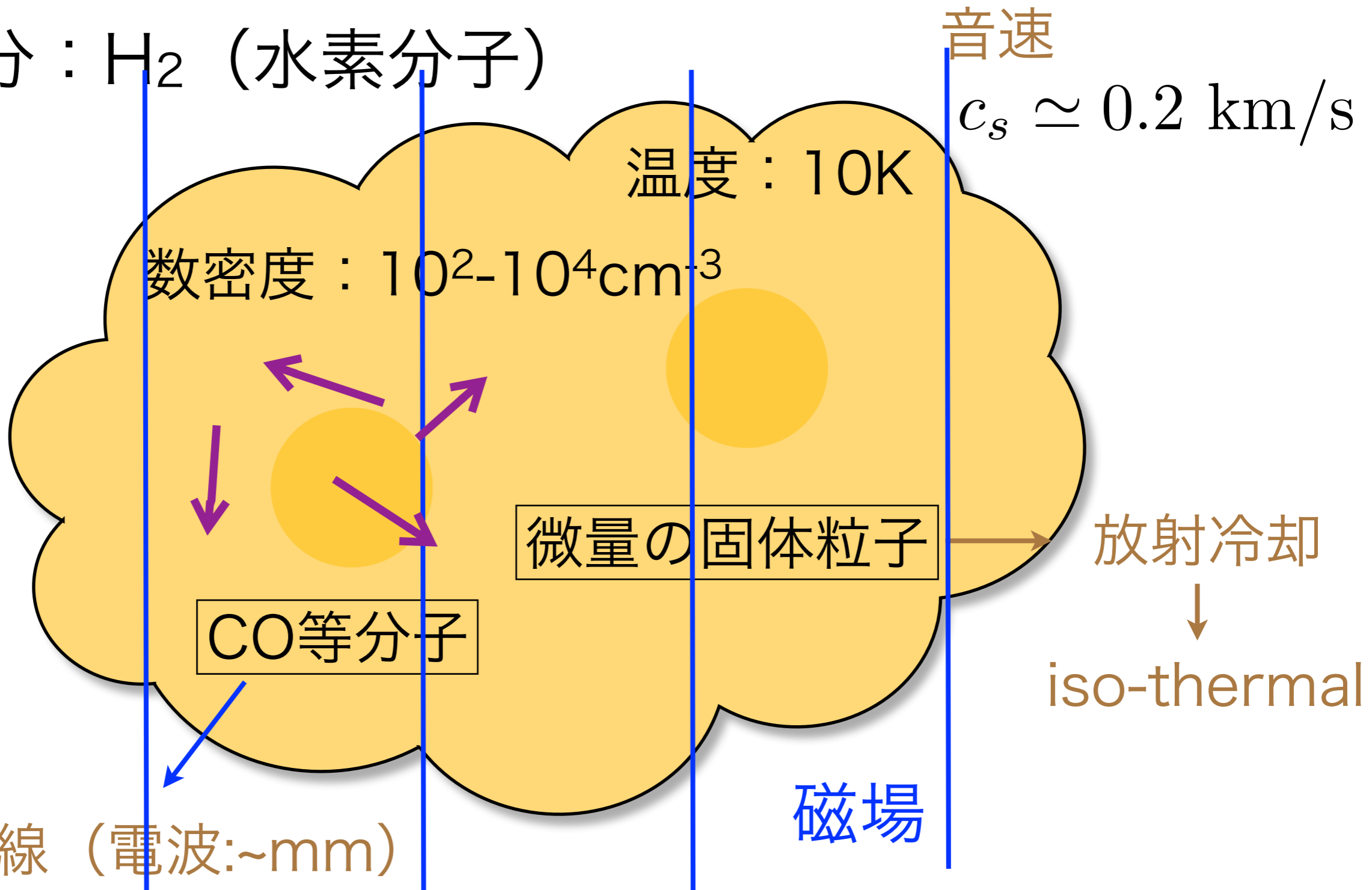
放射冷却

iso-thermal

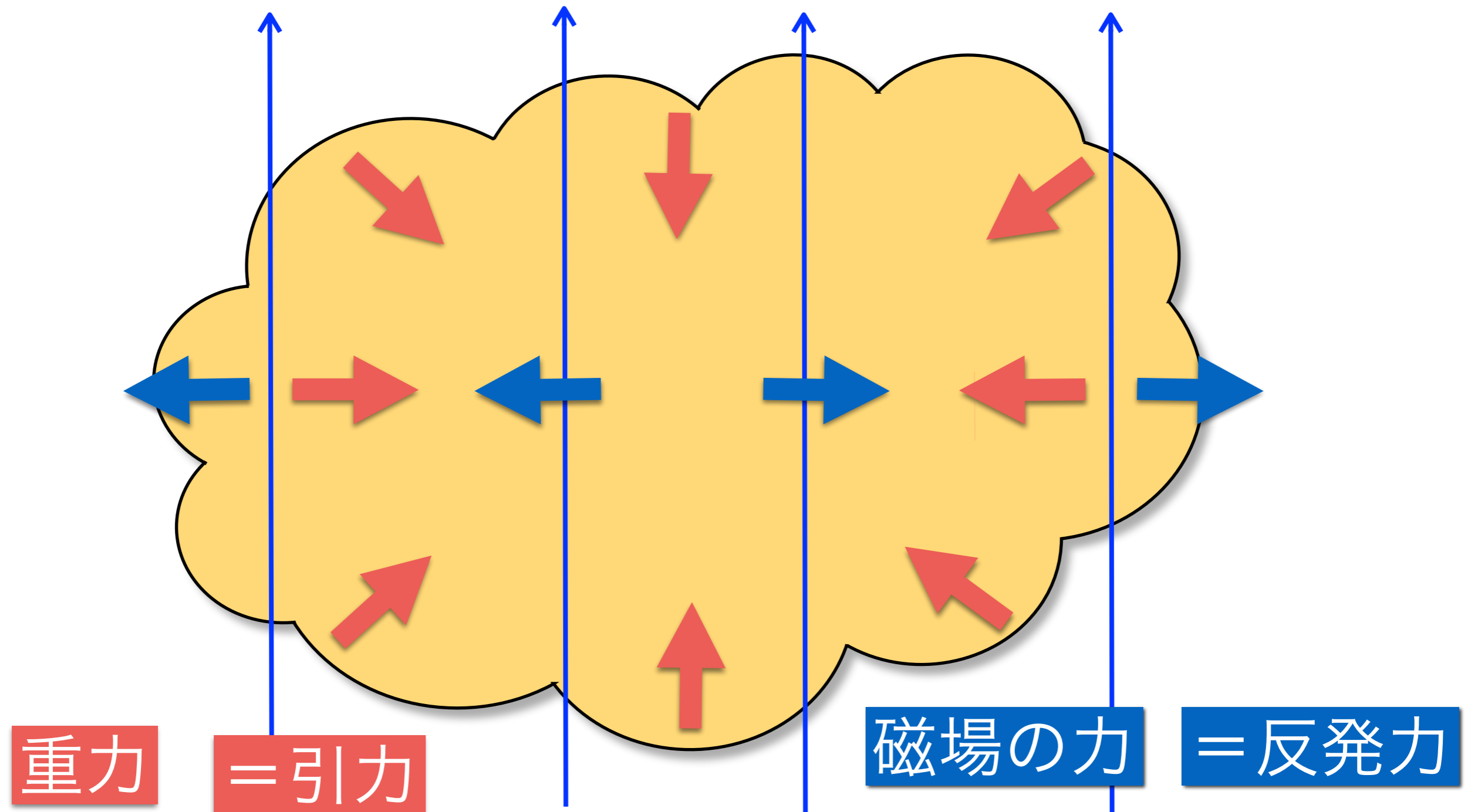
磁場

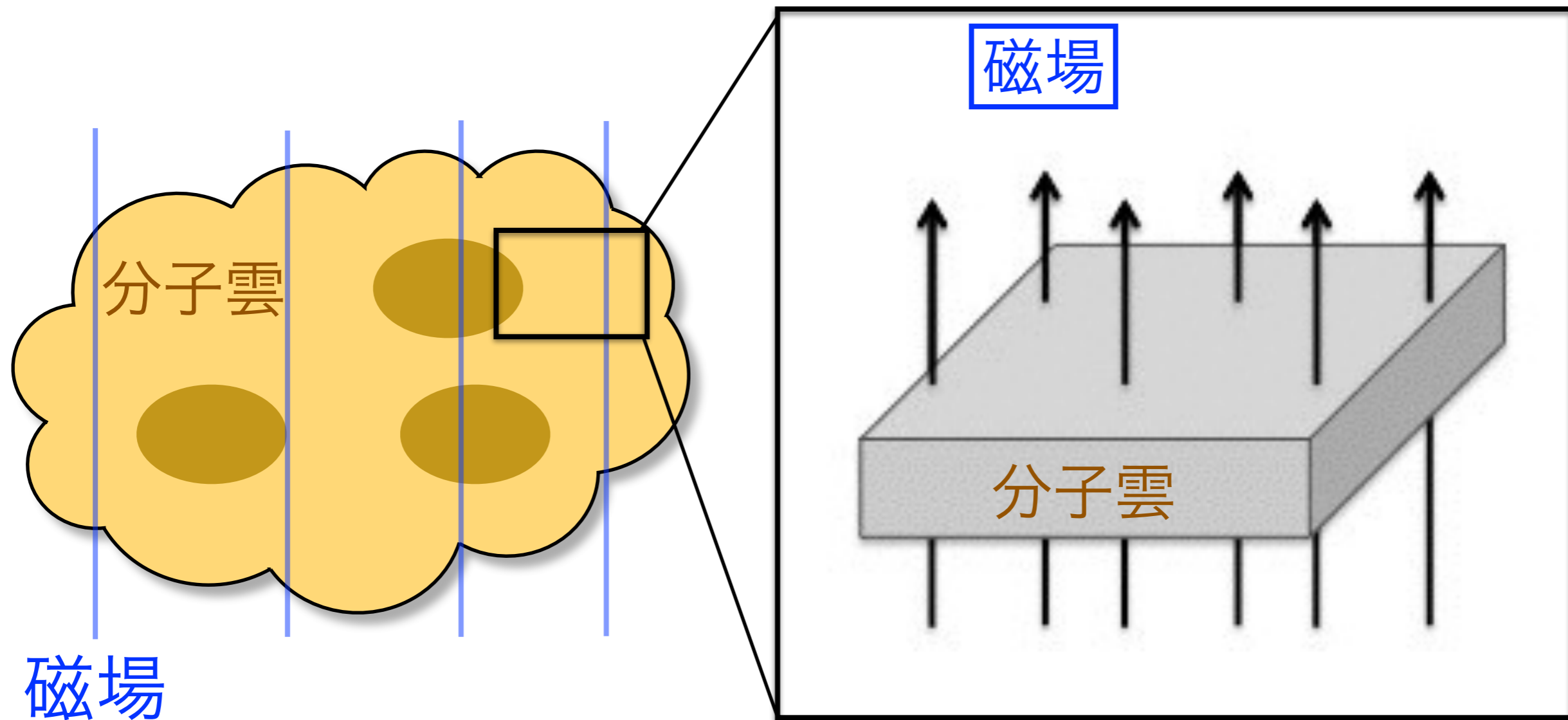
輝線（電波：~mm）

輝線幅 $\sigma \simeq 0.6 \text{ km/s}$ → 内部の乱雑運動（乱流）



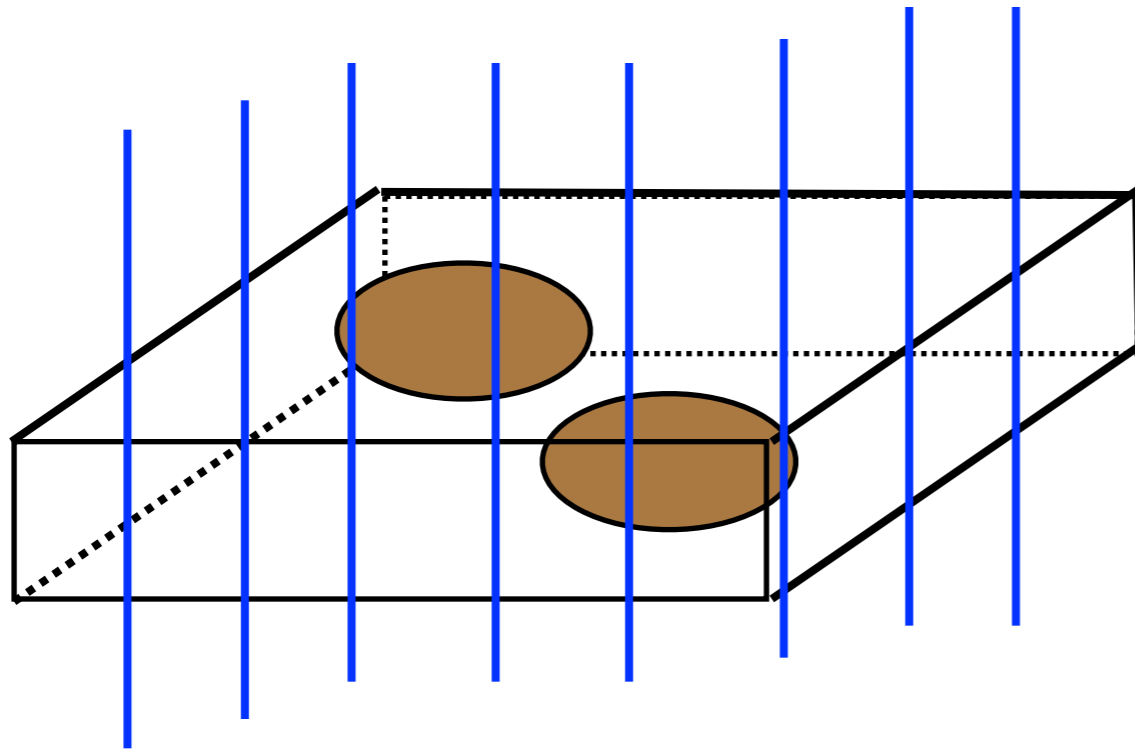
重力による分子雲の収縮や分裂を、
磁場はさまたげる。





ナイーブには，磁力線方向にのみ収縮して，
平板のような形状になるのでは。

平板状ガスの自己重力不安定



Nakano & Nakamura 1978

磁場が弱い⇒不安定

weak field → unstable

分裂して，コアは収縮する

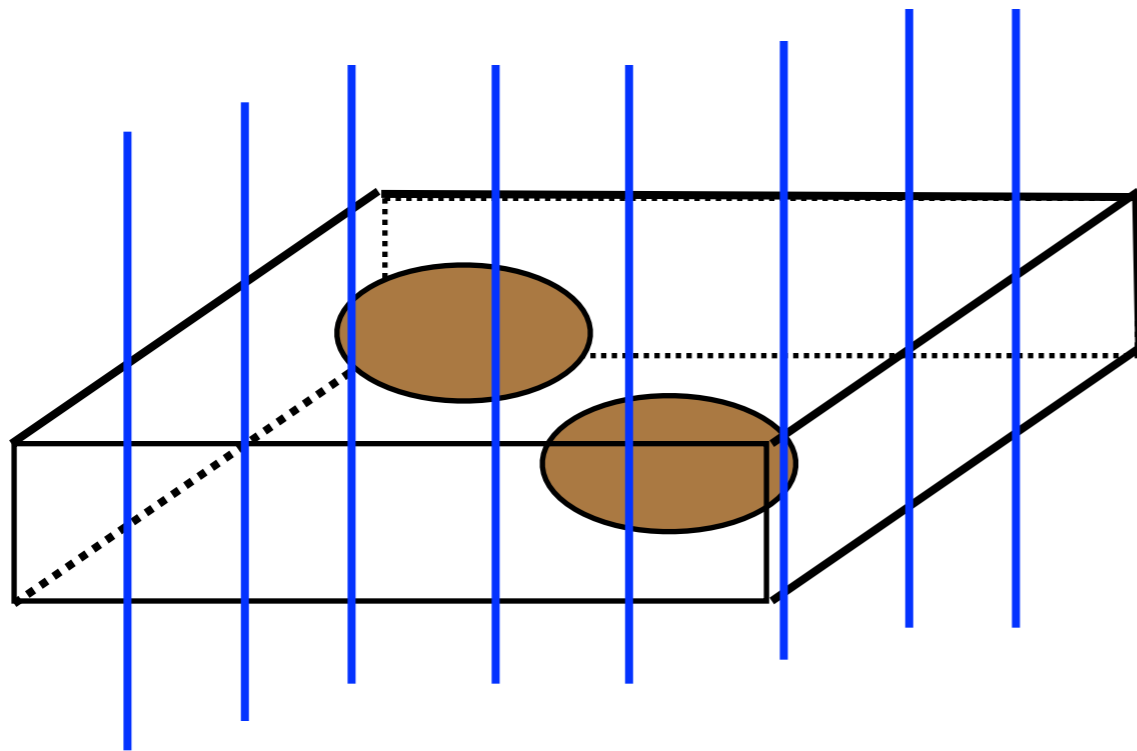
磁場が強い⇒安定

strong field → stable

分裂や収縮しない

磁場に
臨界値がある

平板状ガスの自己重力不安定



右のような状況設定の下、
数値シミュレーションを
行い、分裂と収縮の様子
を調べた。

Kudoh et. al (2007), Kudoh & Basu (2011)

磁場が弱い⇒不安定

weak field → unstable

分裂して、コアは収縮する

磁場が強い⇒安定

strong field → stable

磁場の拡散を含める

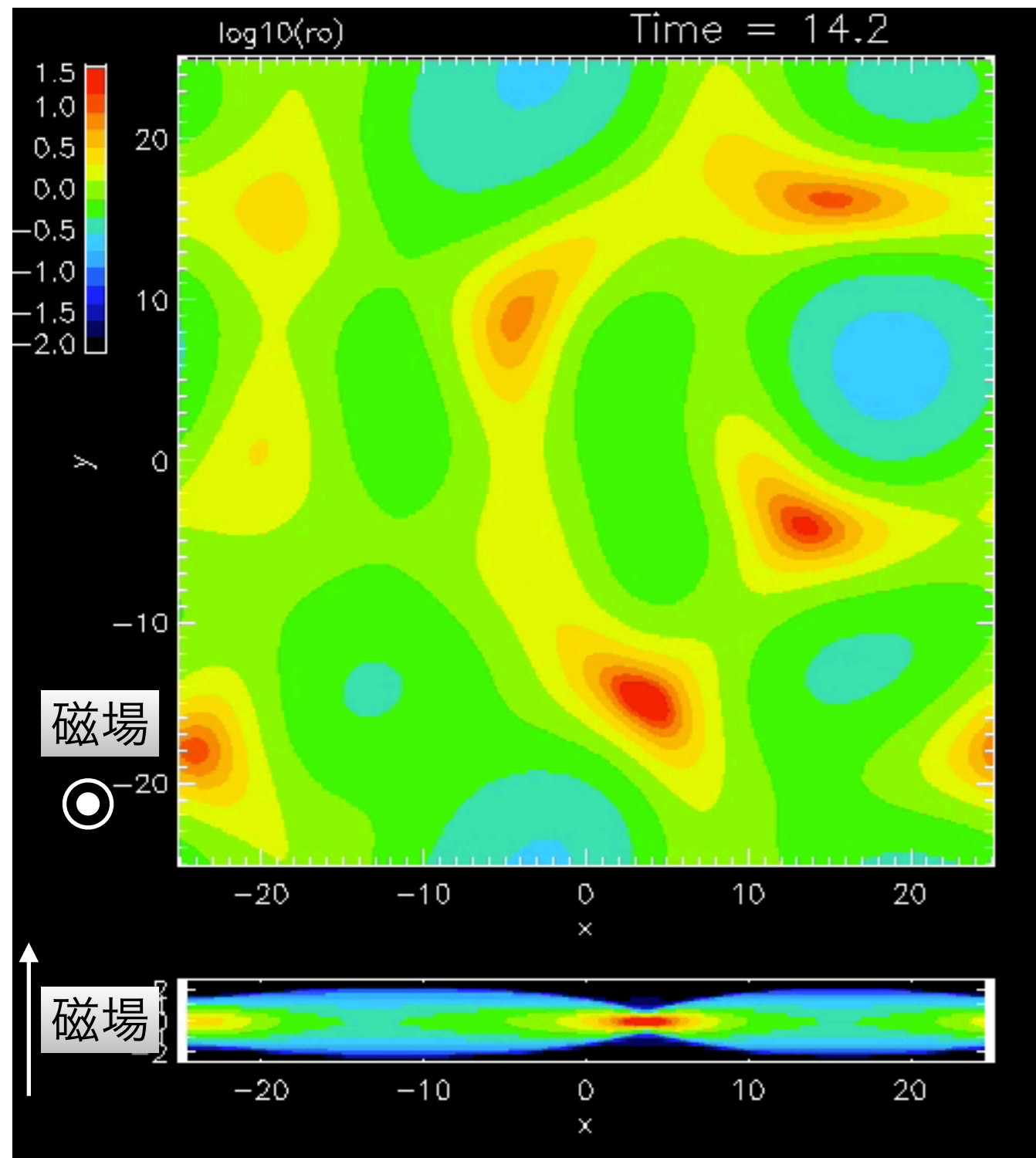
分裂や収縮しない

磁場弱い weak field

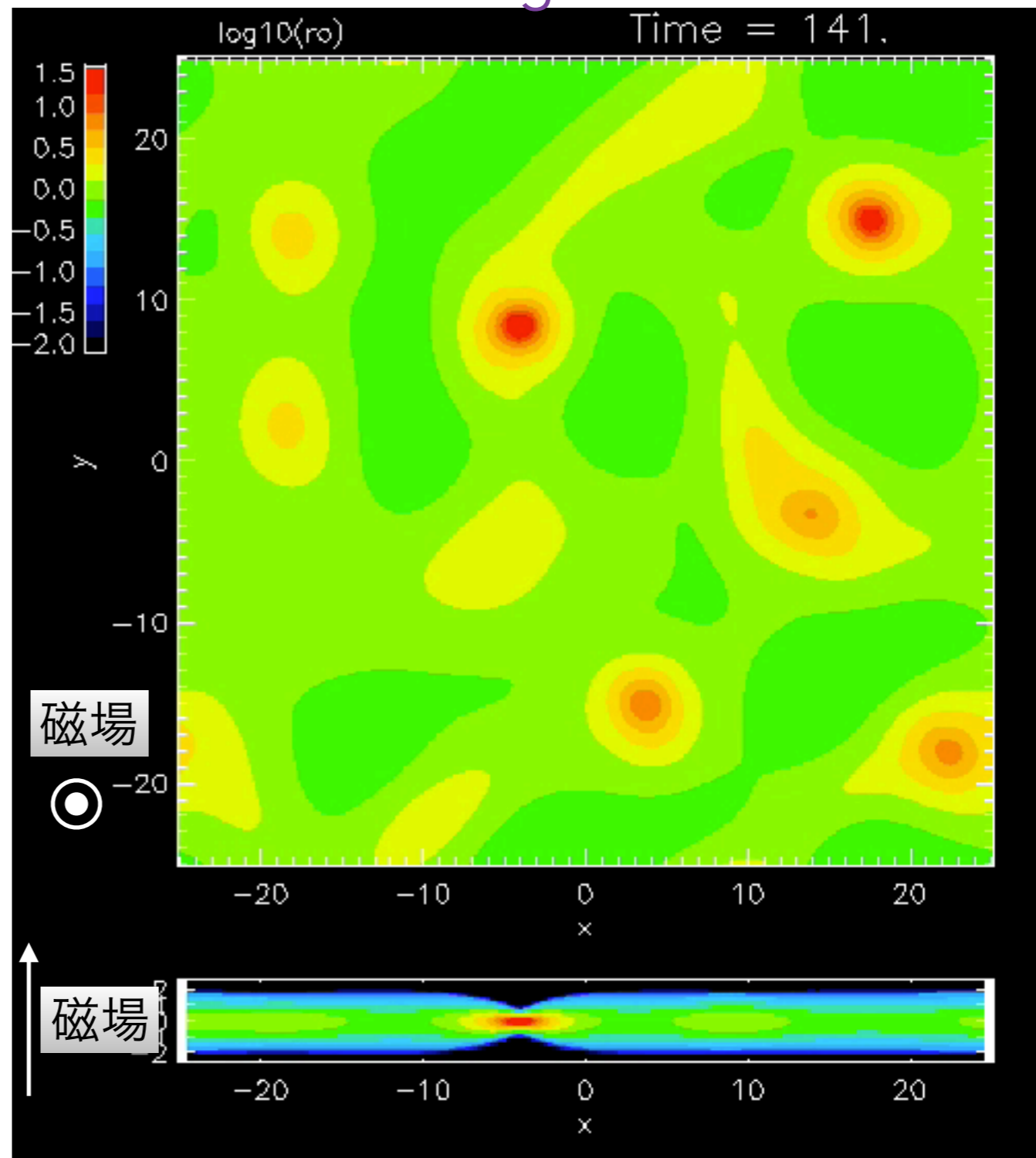
色：密度

磁場強い strong field

1pc



$$\mu \simeq 2$$



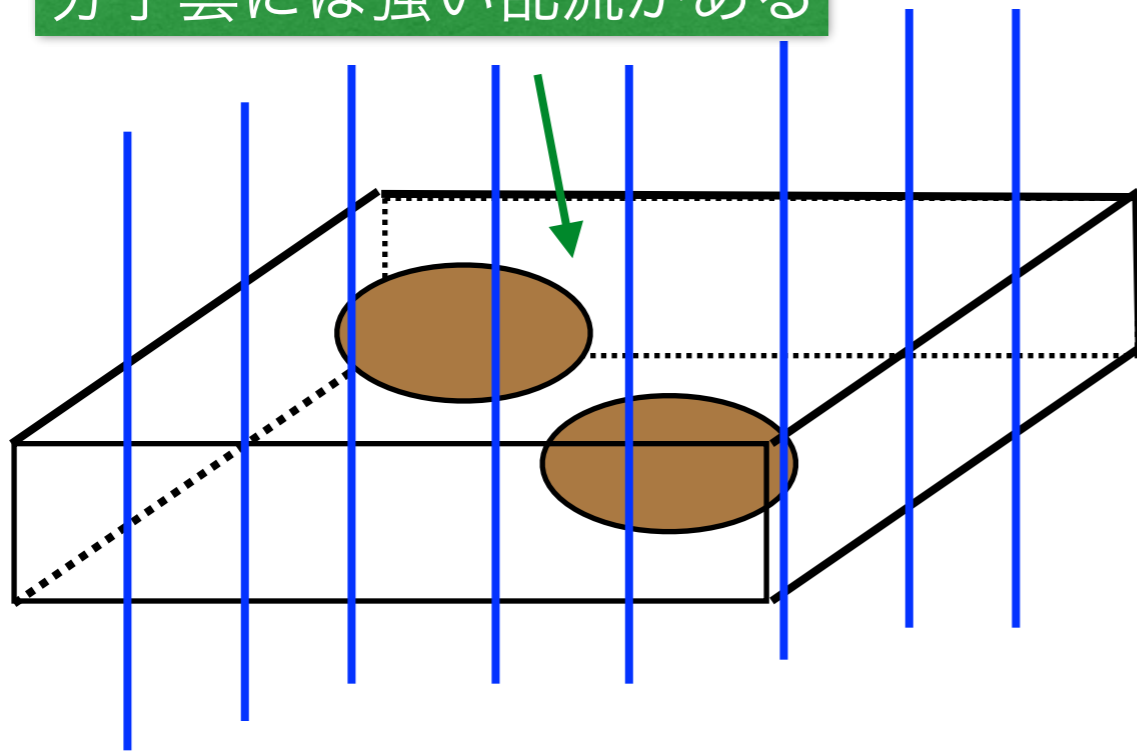
$$\mu \simeq 0.5$$

磁場が強いと，分裂や収縮に時間がかかることを再現

Kudoh et. al (2007), Kudoh & Basu (2011)

平板状ガスの自己重力不安定

分子雲には強い乱流がある



右のような状況設定の下、
数値シミュレーションを
行い、分裂と収縮の様子
を調べた。

Kudoh et. al (2007), Kudoh & Basu (2011)

磁場が弱い⇒不安定

分裂して、コアは収縮する

磁場が強い⇒安定

分裂や収縮しない

磁場が拡散する時、不安定

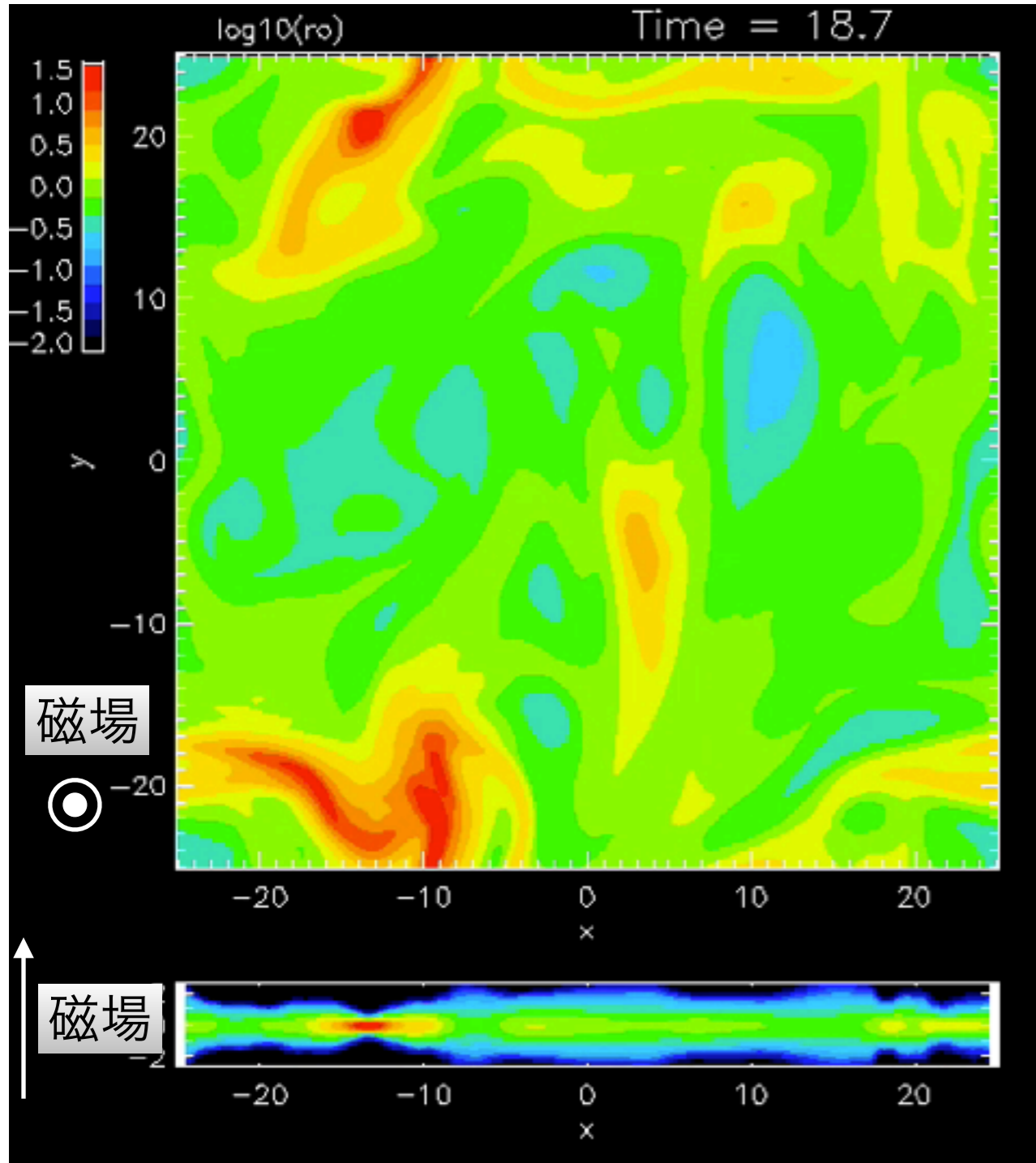
分裂して、コアは収縮する。
時間は拡散時間。

強い乱流がある場合

磁場強い

色：密度

strong field
with turbulence



大スケールの強い乱流により星の形成が速くなることを示した。

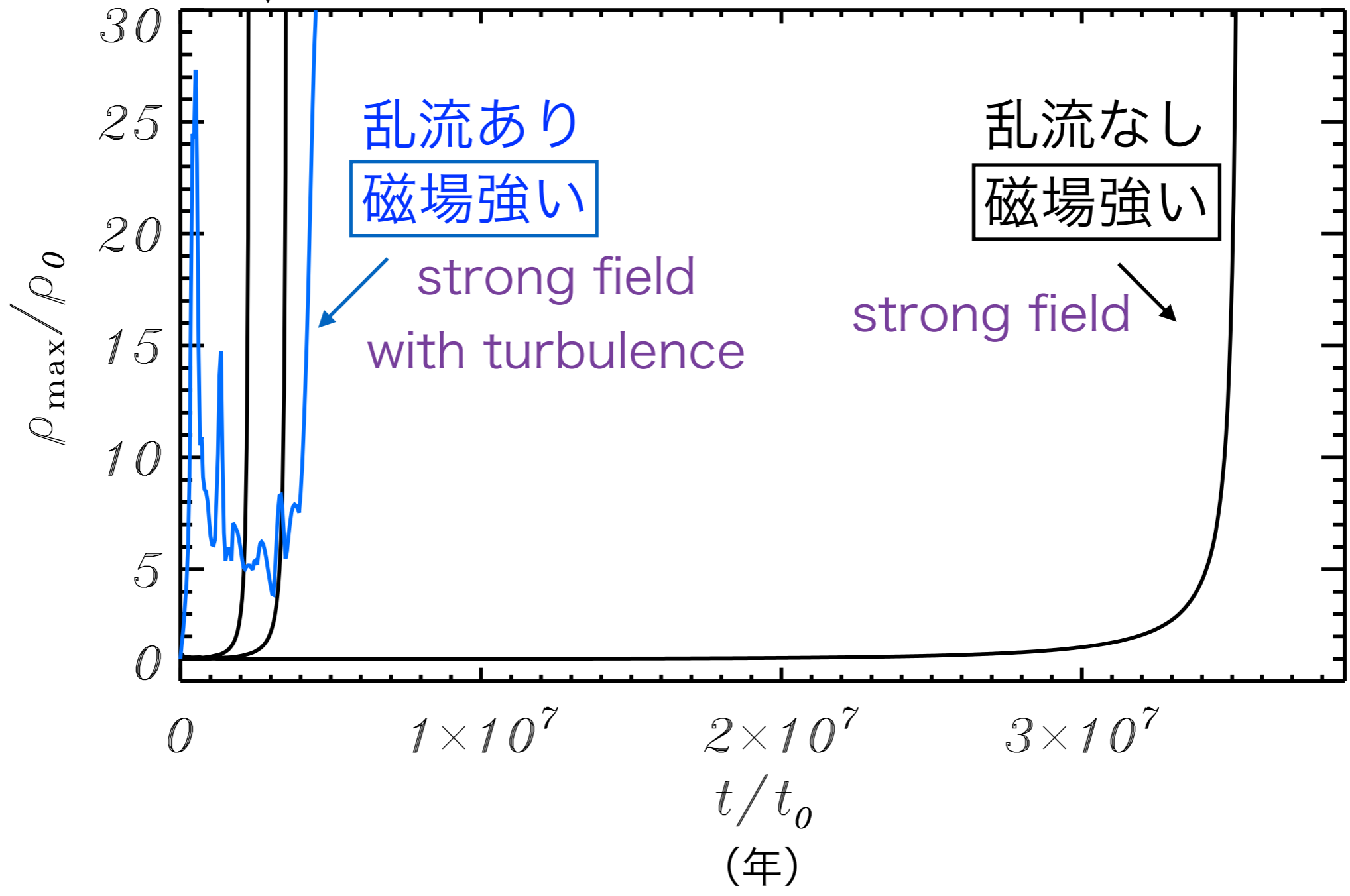


磁場があると一般には星の形成に時間がかかり、観測と矛盾しているといわれていたが。

密度の最大値の時間変化

乱流なし

磁場弱い



星の形成時間が速くなる理由

- ・ 大きなスケールの強い乱流によって、分子雲が圧縮され、密度が増大する。
- ・ 密度が増大すると、磁場の拡散が促進される。
- ・ その結果、分子雲の収縮が速いタイムスケールで進行する。

■ 分子雲から星への経路

磁場弱

重力で分裂し収縮

効率よい

~ 数100万年

自由落下

分子雲コア

星

磁場強

重力で分裂や収縮

できない

磁場の拡散

(分子雲から抜けていく)

> 数1000万年

効率悪い

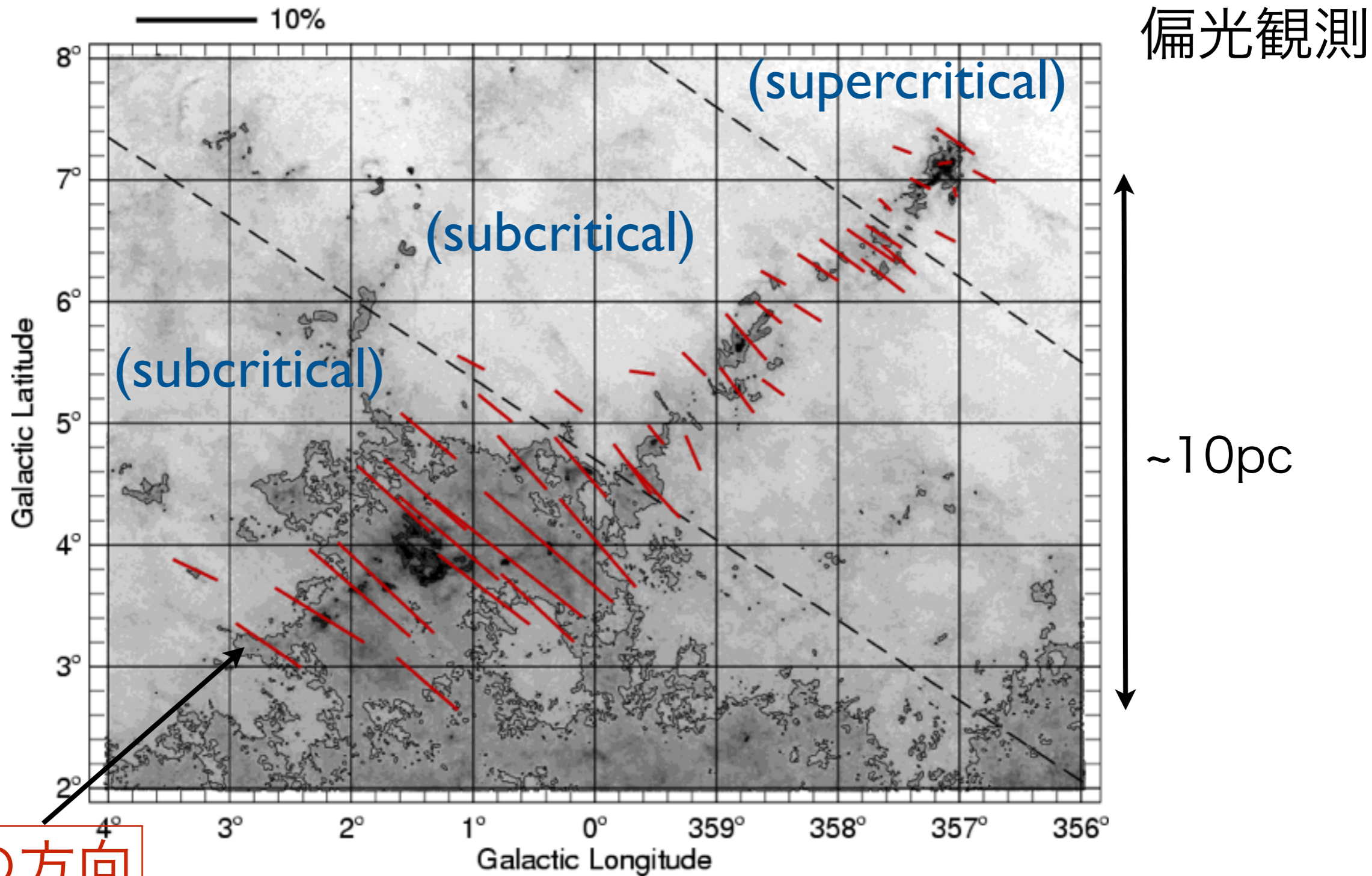
乱流による圧縮があると速くなる

フィラメント状分子雲 の場合

filamentary molecular cloud

Magnetic field

Alves et al. (2008)



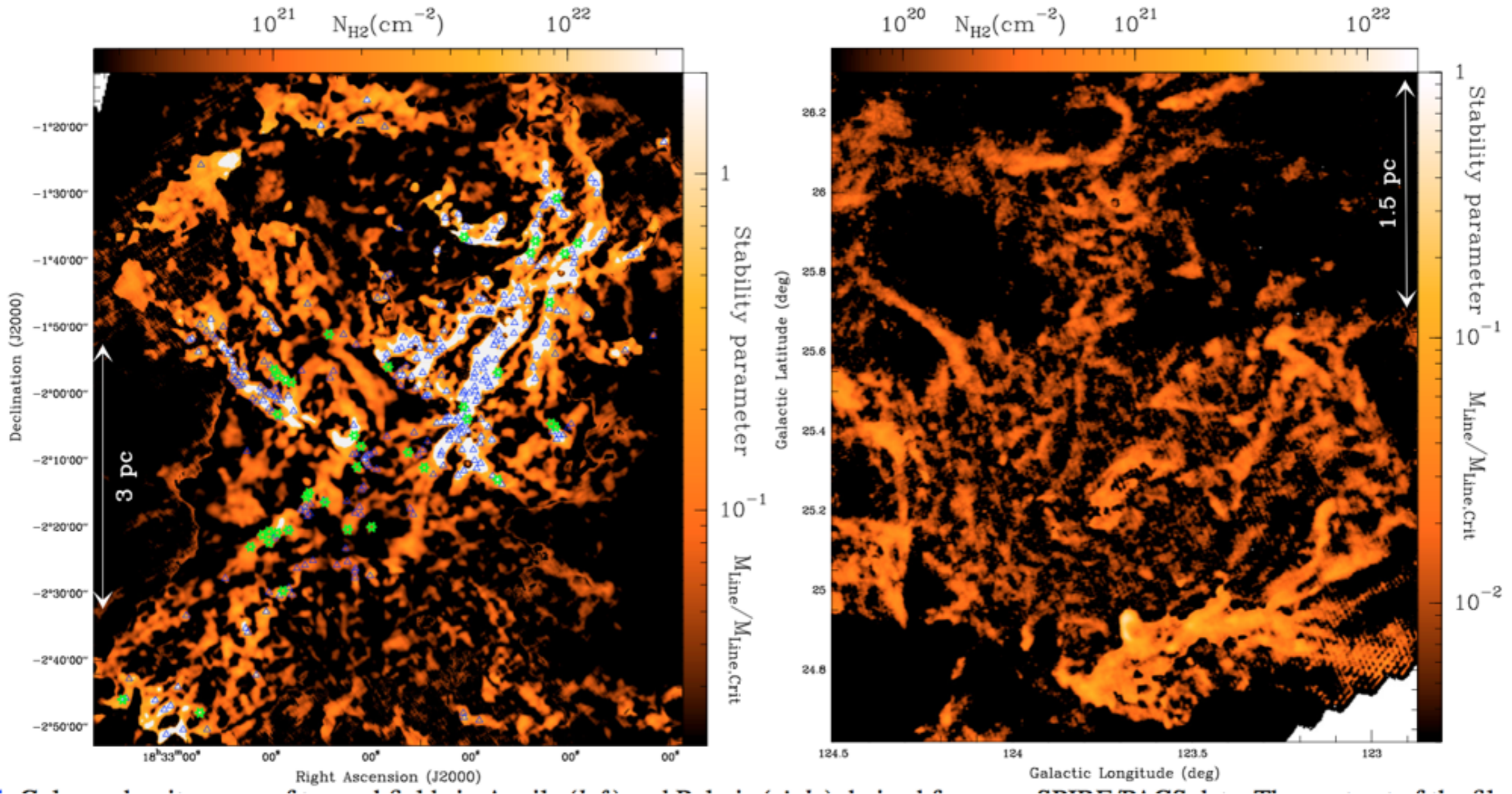
磁場の方向

Mean polarization vectors, for each of the observed 46 fields, overplotted on the dust extinction map of the Pipe nebula obtained by [Lombardi et al. \(2006\)](#). The lengths of these vectors are proportional to the scale indicated in the top left-hand corner. Only stars showing were used in the calculus of the mean polarization and position angle. The dashed-lines indicate the celestial meridians defined by and (see text and Fig. 2).

Magnetic energy ~ Gravitational energy

分子雲の赤外線観測

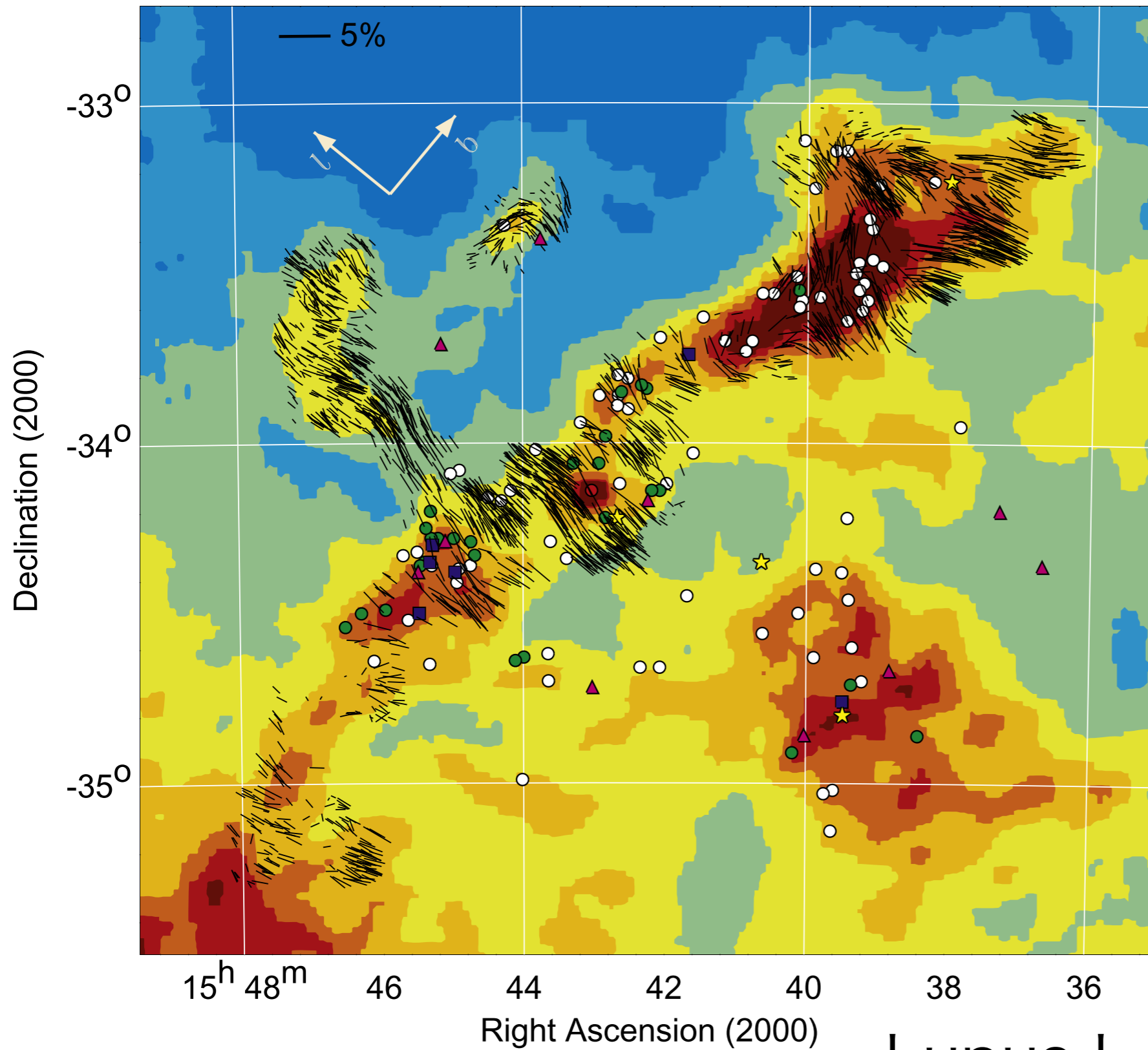
Andre et al. (2010)



非常に小さなスケールまで，細長いフィラメント構造をしていることがわかってきた。

Magnetic field

Franco & Alves (2015)

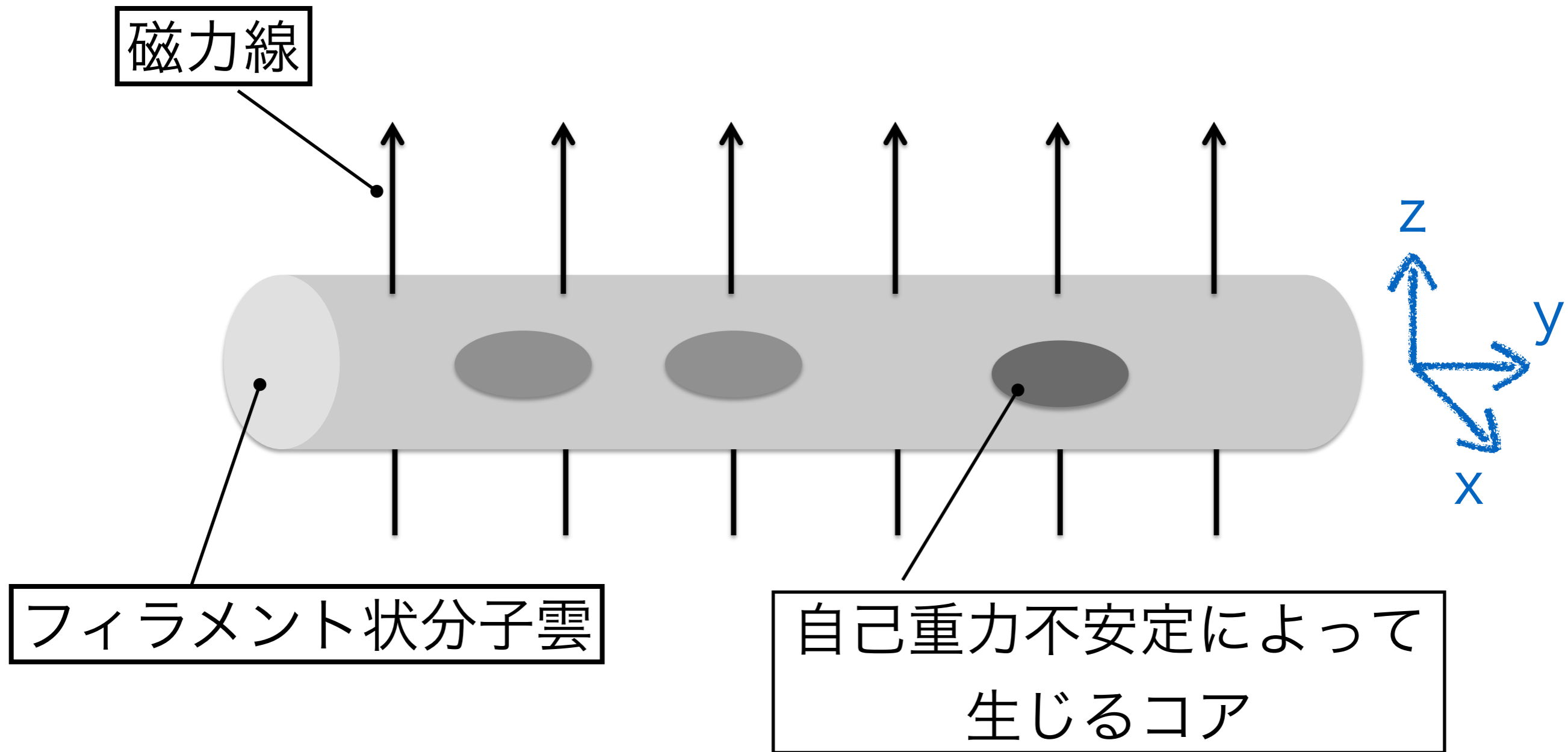


2.6 pc

色：分子雲
黒線：磁場の方向

Lupus I

磁場に貫かれたフィラメント状分子雲の模式図

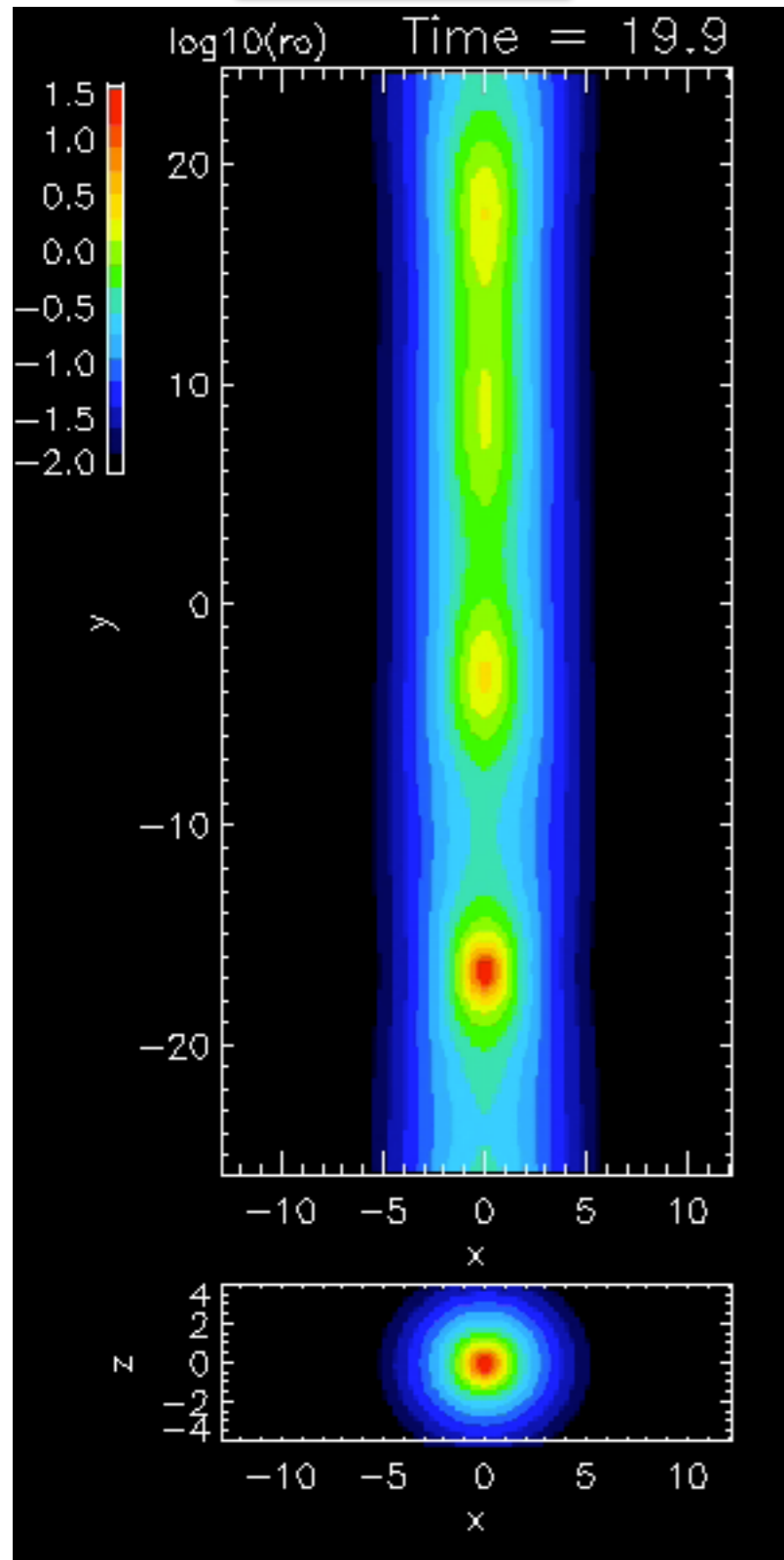


- ・ 密度分布は磁場なしの力学平衡解 (Stodolkiewicz 1963)
- ・ 磁場は一様

ただし、この計算には磁場の拡散は含めていない。

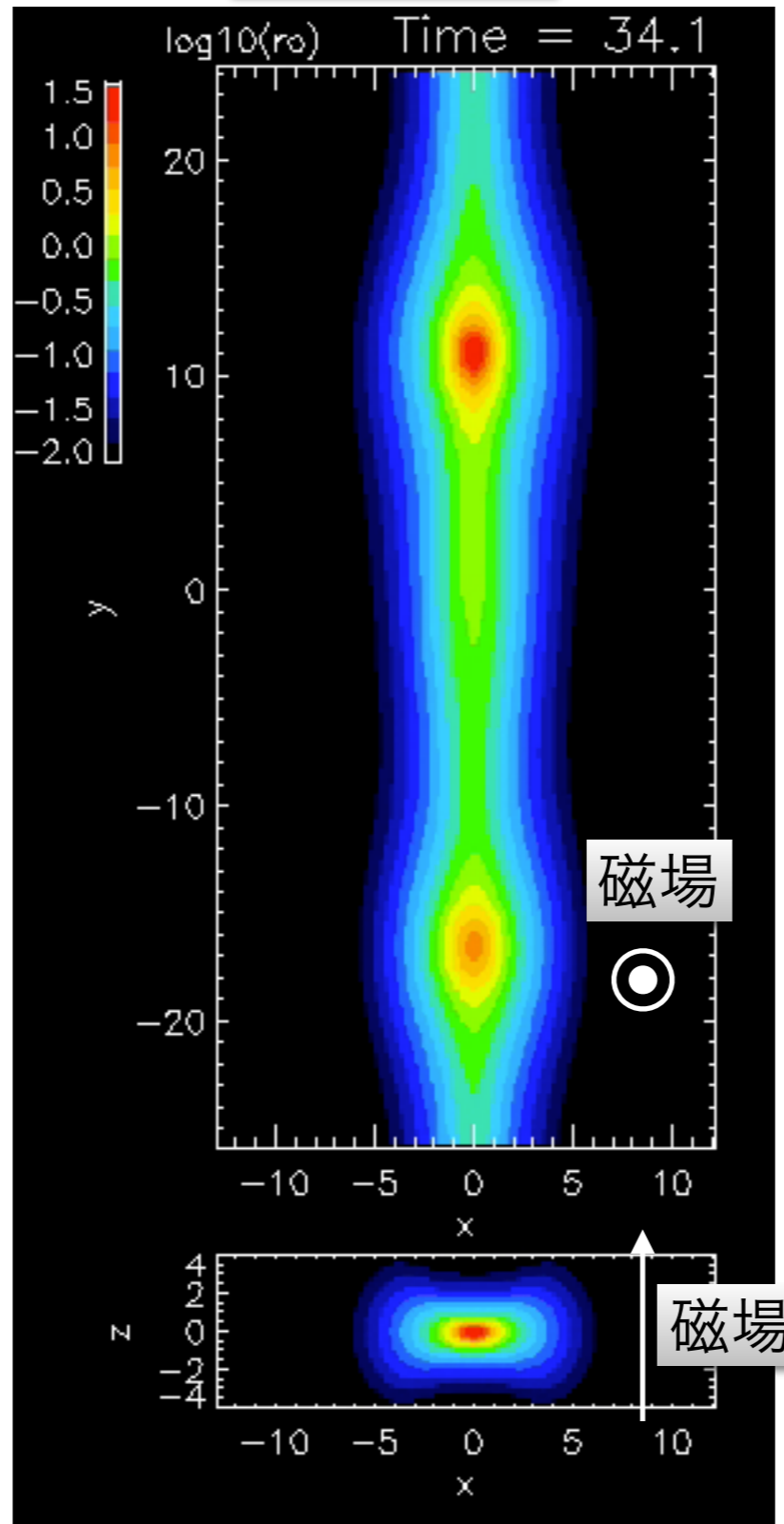
no mag. field

磁場なし



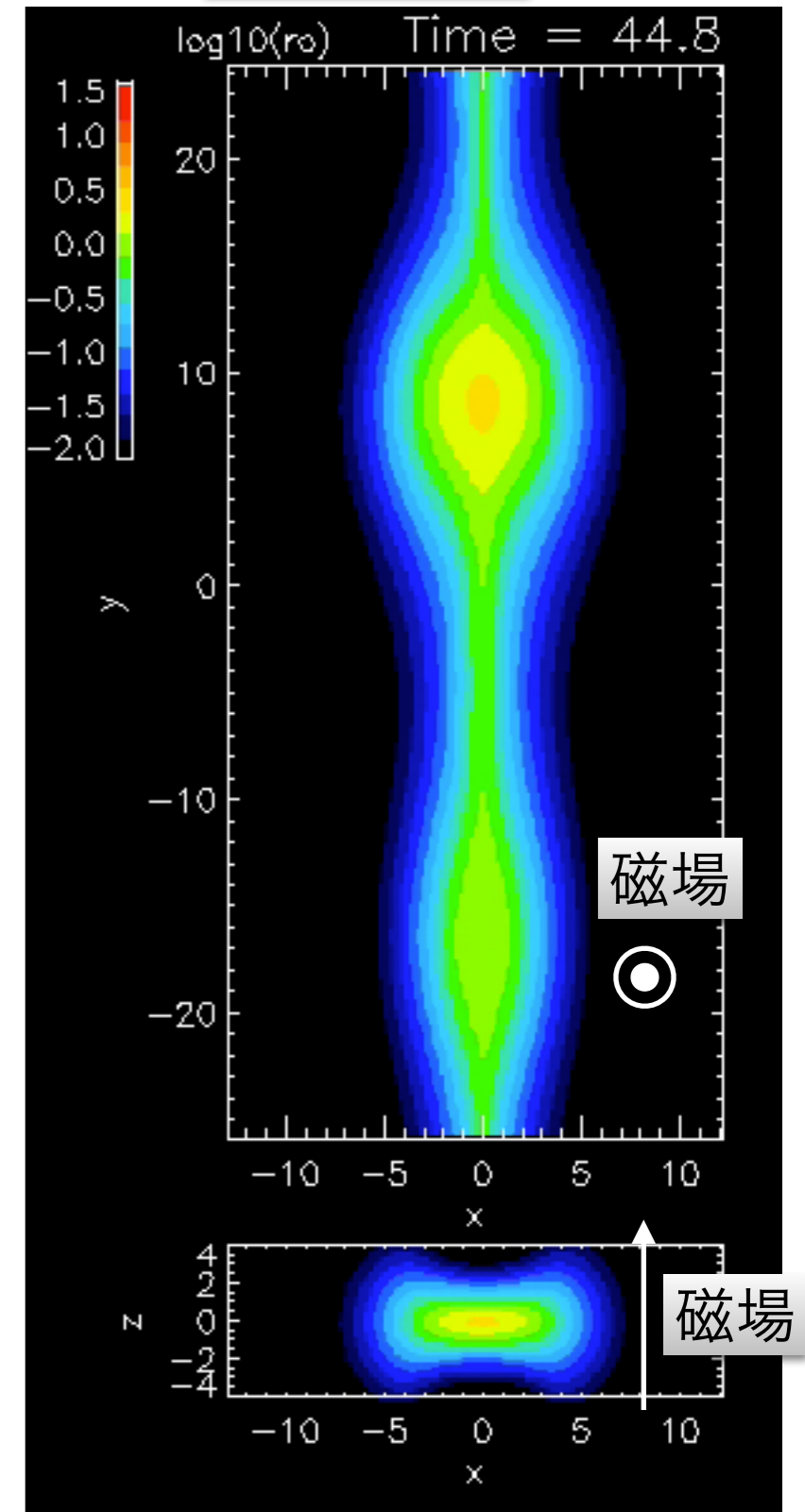
weak field

弱い磁場



strong field

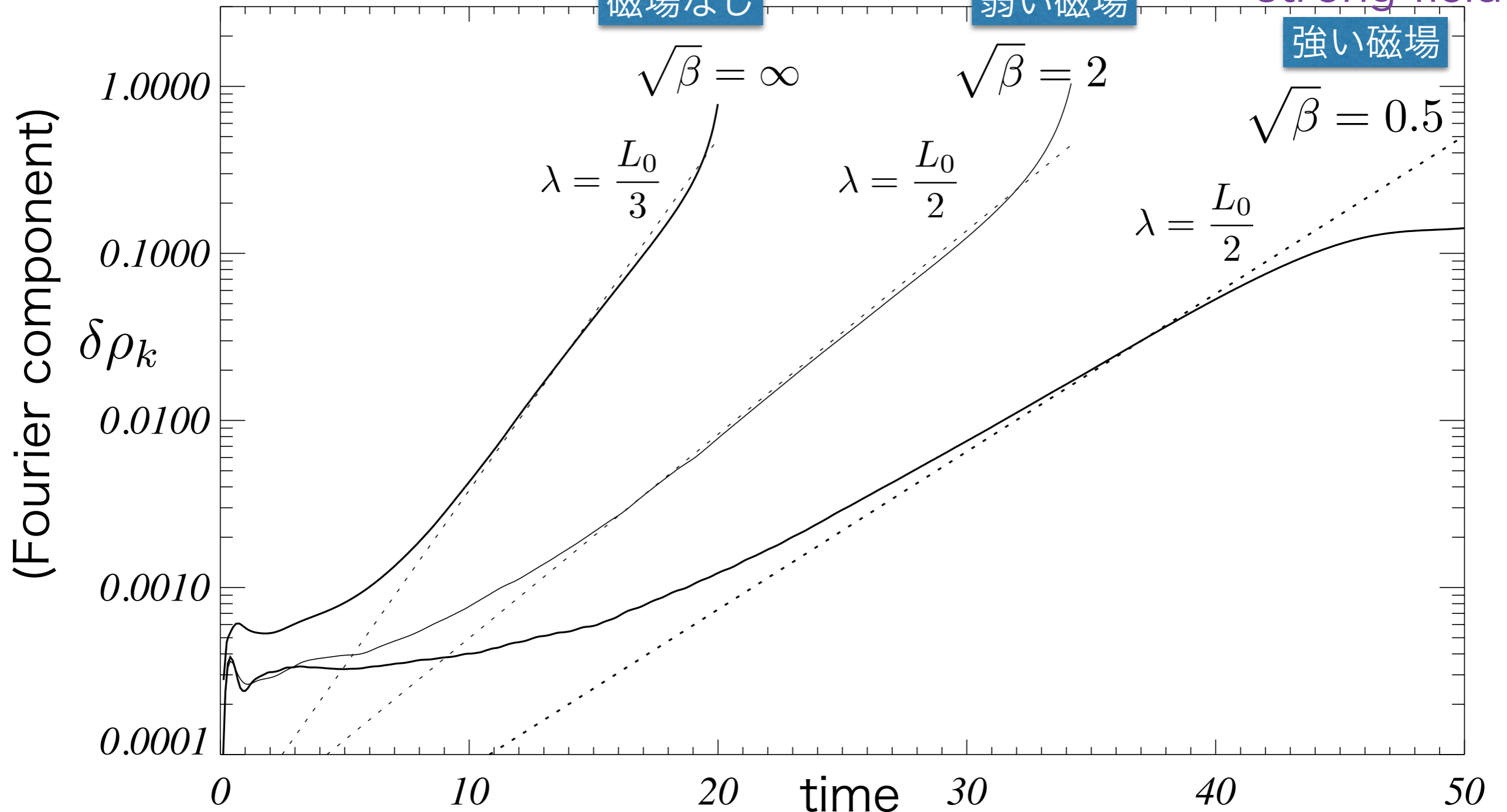
強い磁場



色等高線: 密度の対数

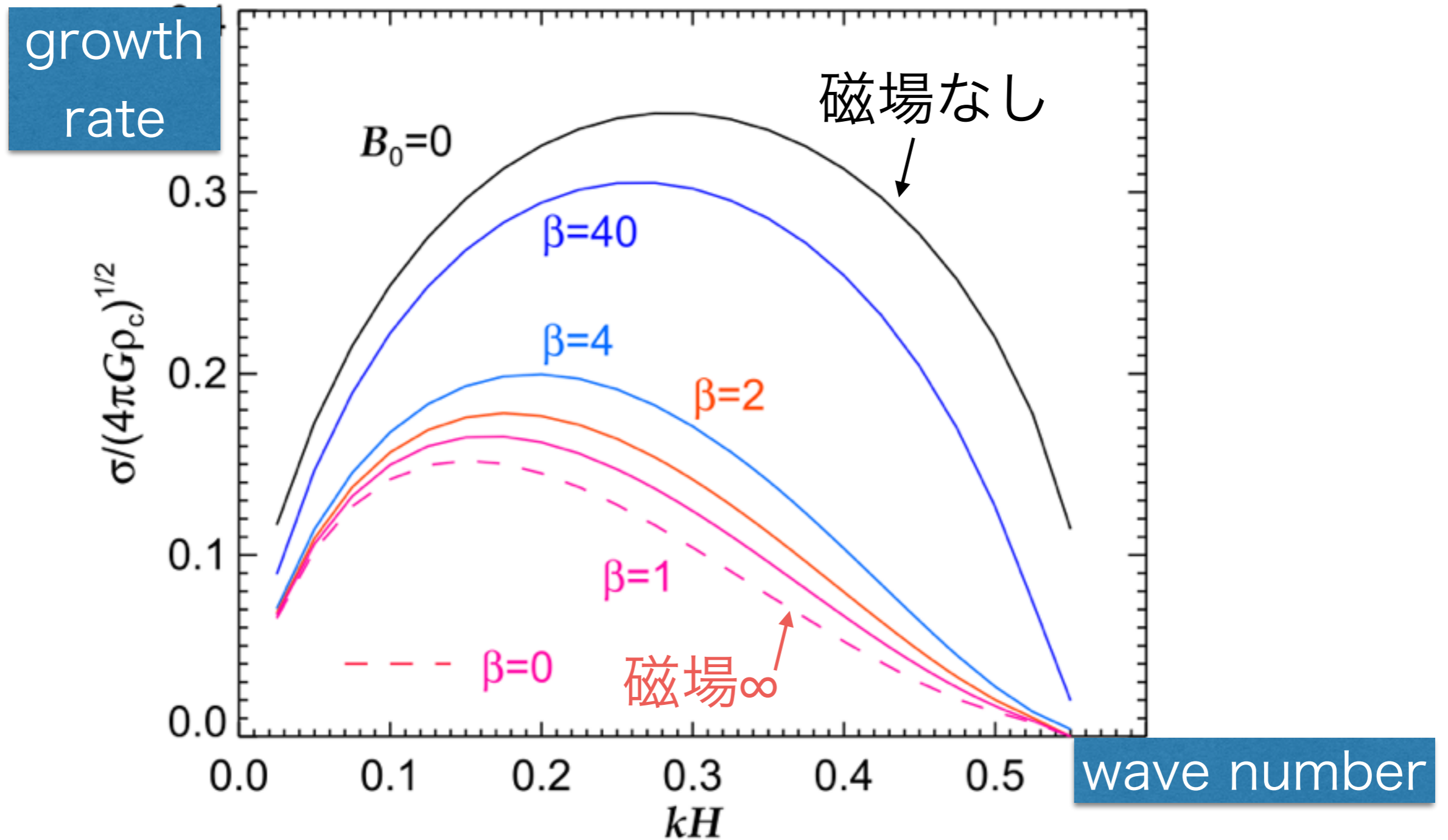
成長率の比較

no mag. field weak field strong field
磁場なし 弱い磁場 強い磁場



実線: 数値シミュレーション結果
破線: 線形解析の成長率

線形成長率

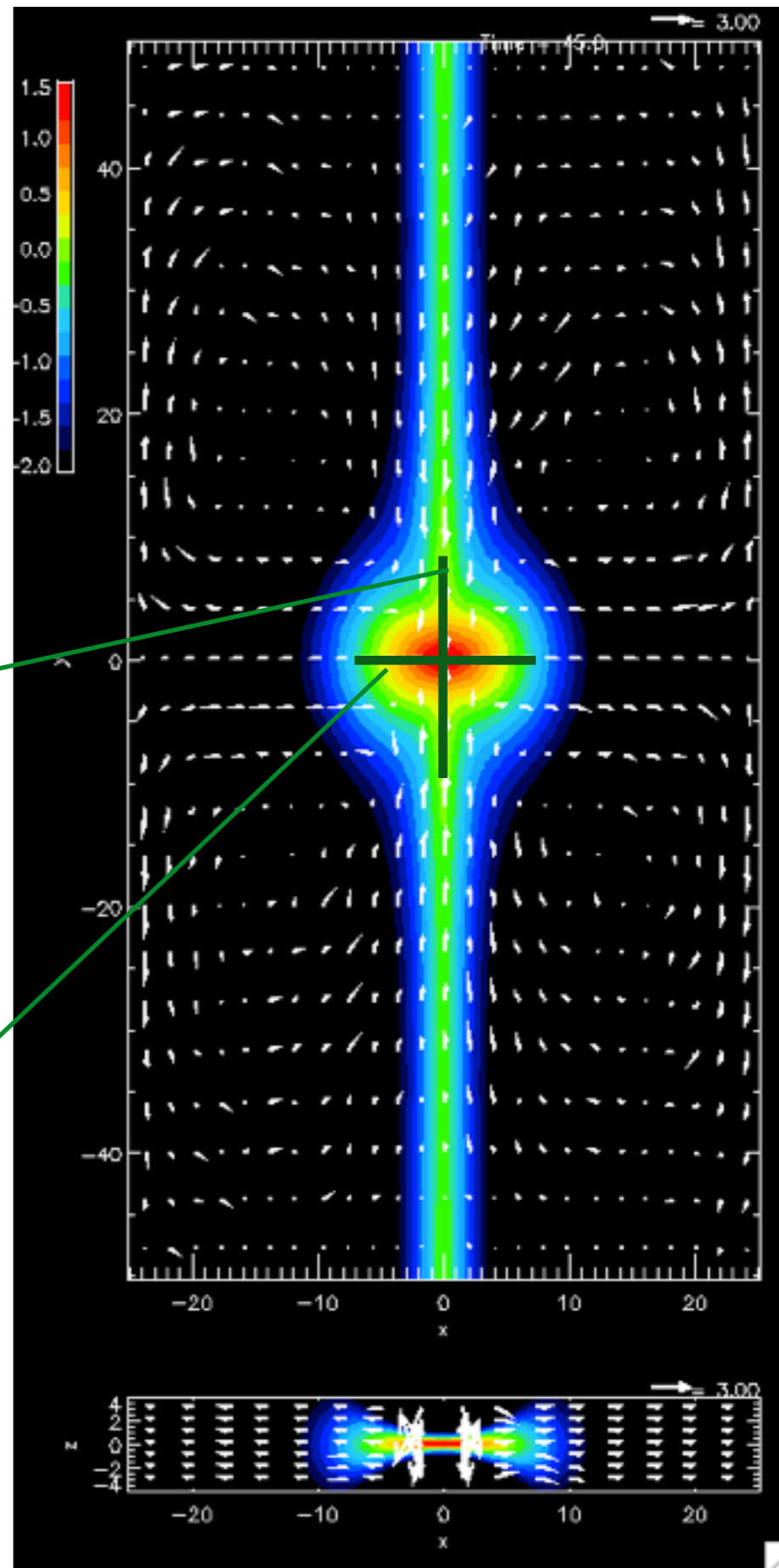
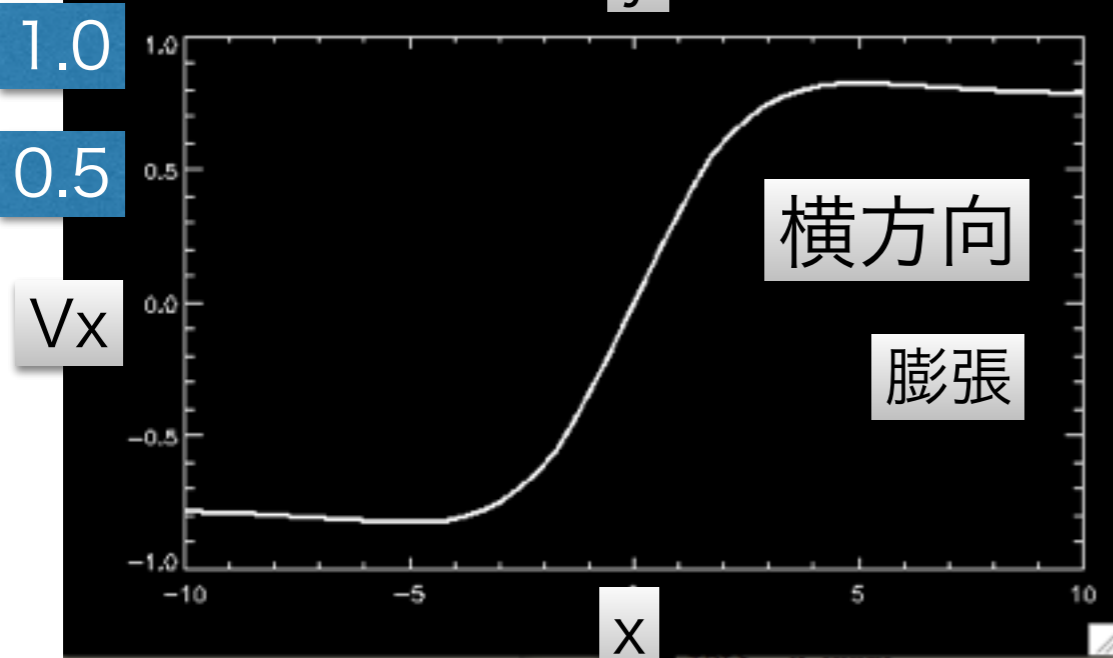
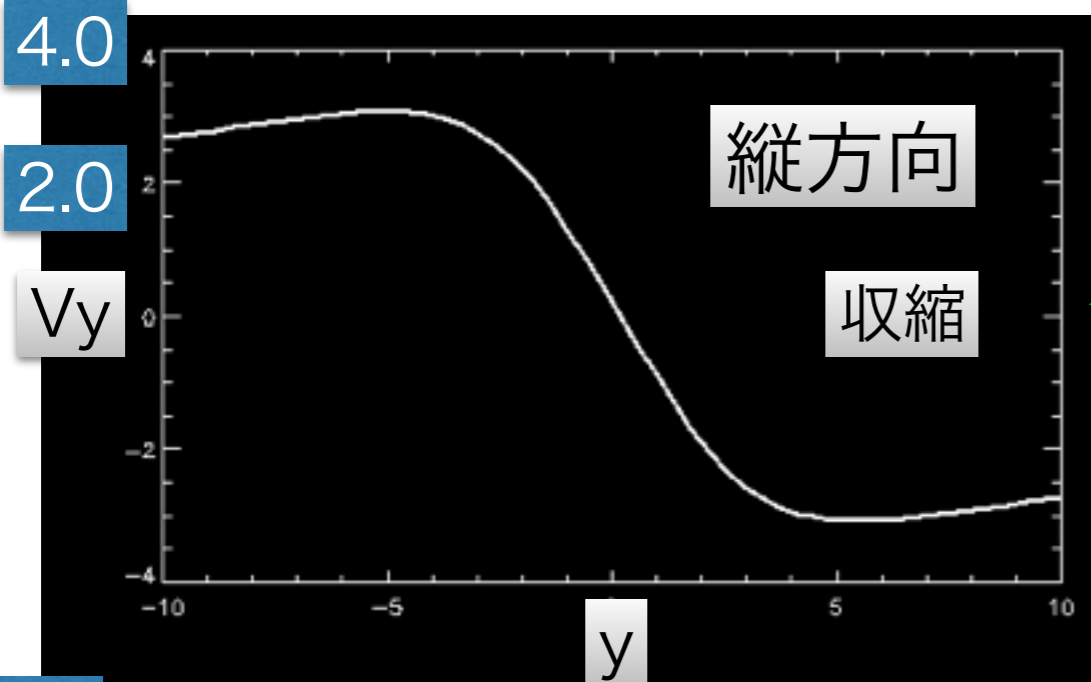


フィラメント状の分子雲の場合は、磁場が無限に強くても分裂しコアが形成される。

$$\beta = 0.49$$

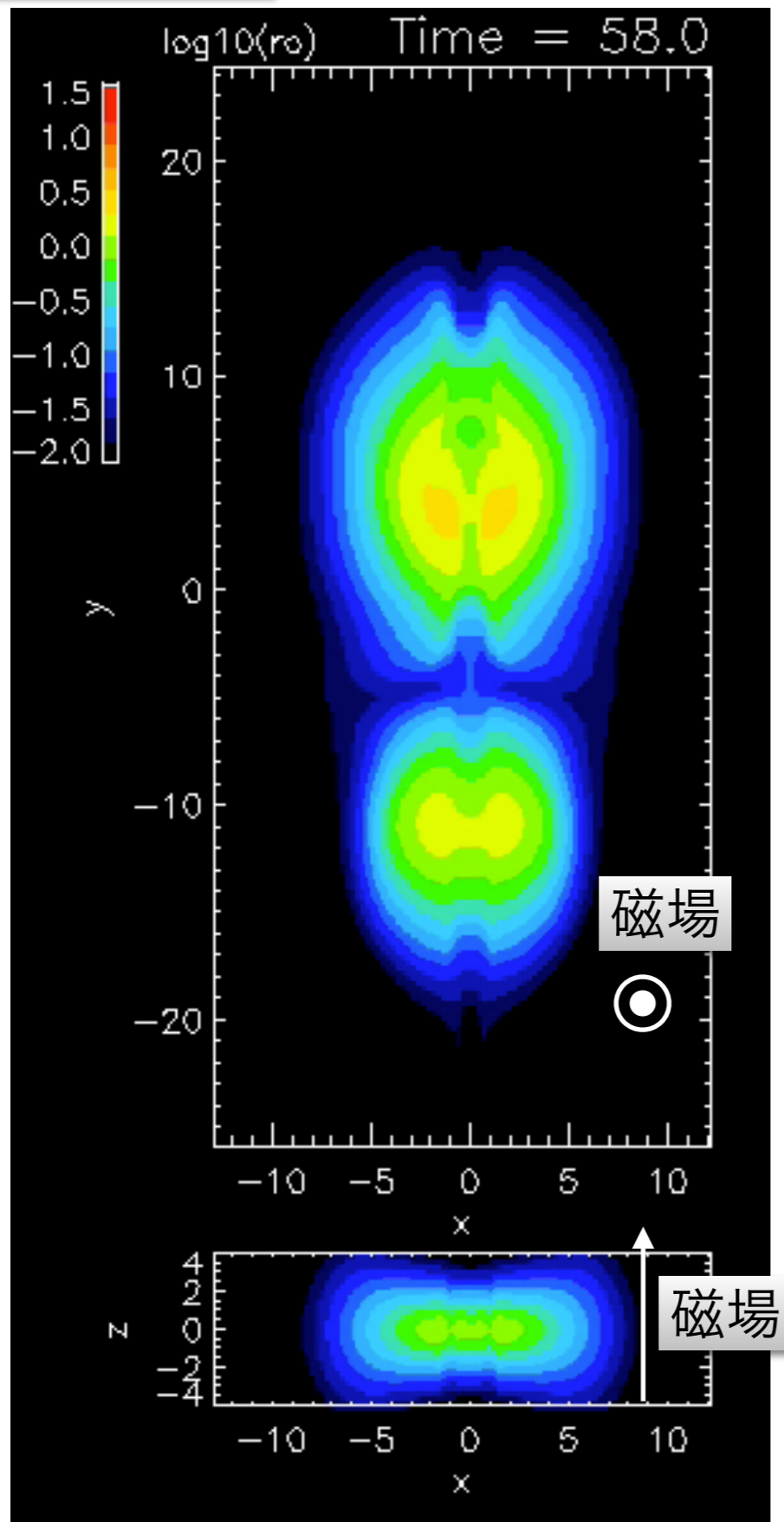
磁場が比較的強い時の 分裂と収縮

velocity



強い磁場

strong field



磁場がとても強い場合,

コアの成長は非線形段階では止まり, 磁場で支えられた「星なしコア」となる.

- ・ 磁場に垂直に貫かれたフィラメント状分子雲は、磁場の強弱に関わらず分裂し、コアが形成される。
- ・ 磁場が強い場合の分裂では、形が変形する非圧縮モードが成長している。
- ・ 磁場が強い場合、コアの成長は非線形段階では止まり、磁場で支えられた「星なしコア」となる。

磁場に貫かれたフィラメント状分子雲

自己重力で磁場に関わらず分裂

分子雲コア

弱い磁場

強い磁場

分子雲コアはすぐに
暴走的に収縮

分子雲コアは
星なしコアとなる

自由落下

$\sim 10^6$ 年

磁場の拡散

$\sim 10^7$ 年

星

(比較：平板の場合)

■分子雲から星への経路

磁場弱

重力で分裂し収縮

効率よい

~ 数100万年

自由落下

分子雲コア

星

磁場強

重力で分裂や収縮

できない

磁場の拡散

(分子雲から抜けていく)

> 数1000万年

効率悪い

乱流による圧縮があると速くなる

フィラメント状分子雲 の形成からコアまで

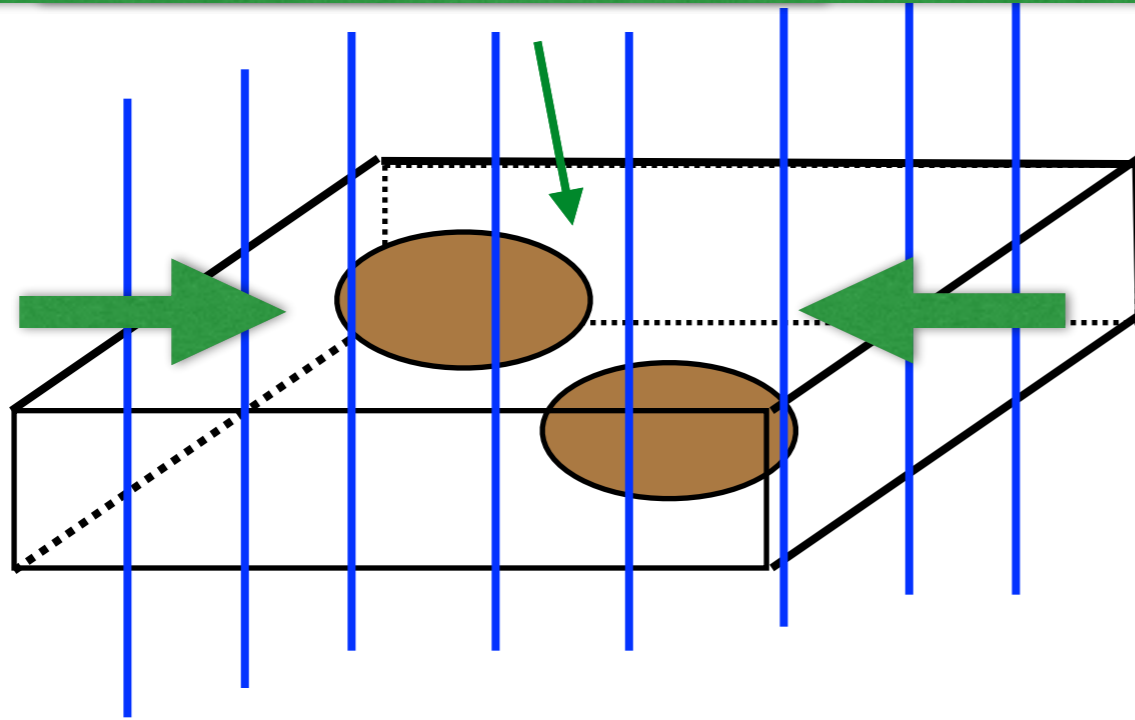
formation of filamentary cloud

preliminary

長崎大卒論：濱川，四谷

平板状ガスの自己重力不安定

分子雲を圧縮する大スケールの強い流れがある



右のような状況設定の下、
数値シミュレーションを
行い、分裂と収縮の様子
を調べた。

Kudoh et. al (2007), Kudoh & Basu (2011)

磁場が弱い⇒不安定

分裂して、コアは収縮する

磁場が強い⇒安定

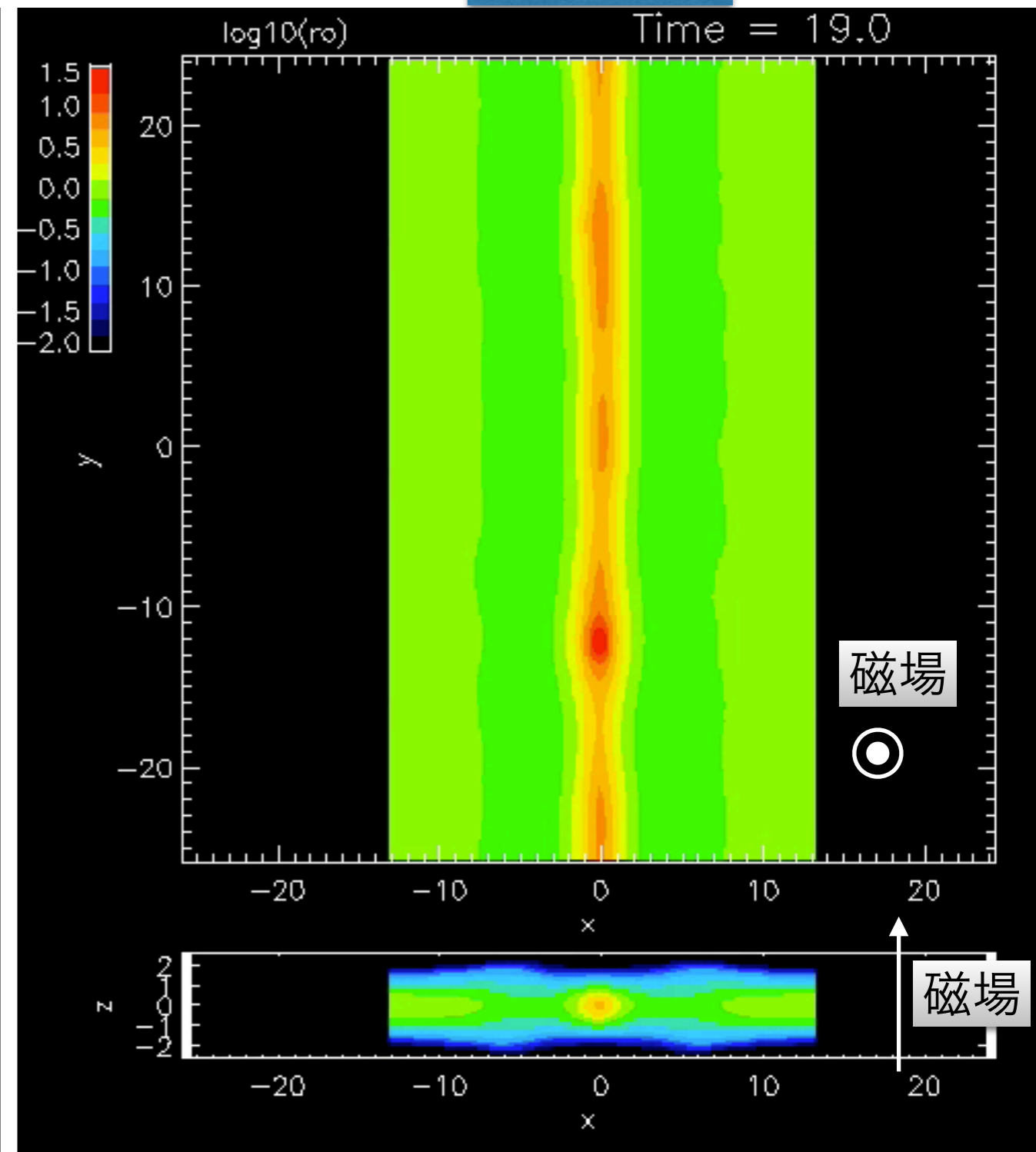
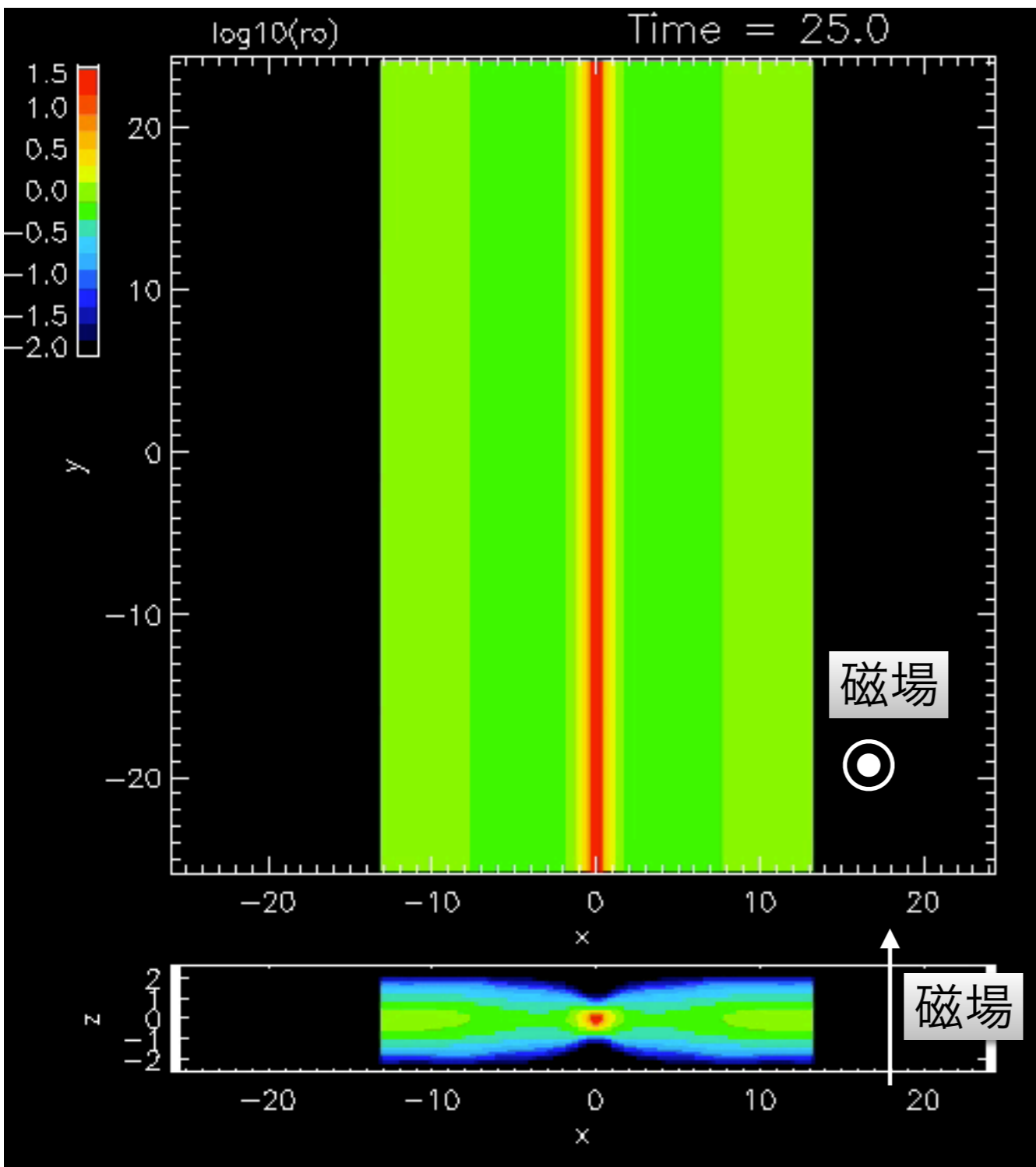
分裂や収縮しない

磁場が拡散する時、不安定

分裂、コア収縮する。
時間は拡散時間。

磁場が強い場合 strong field

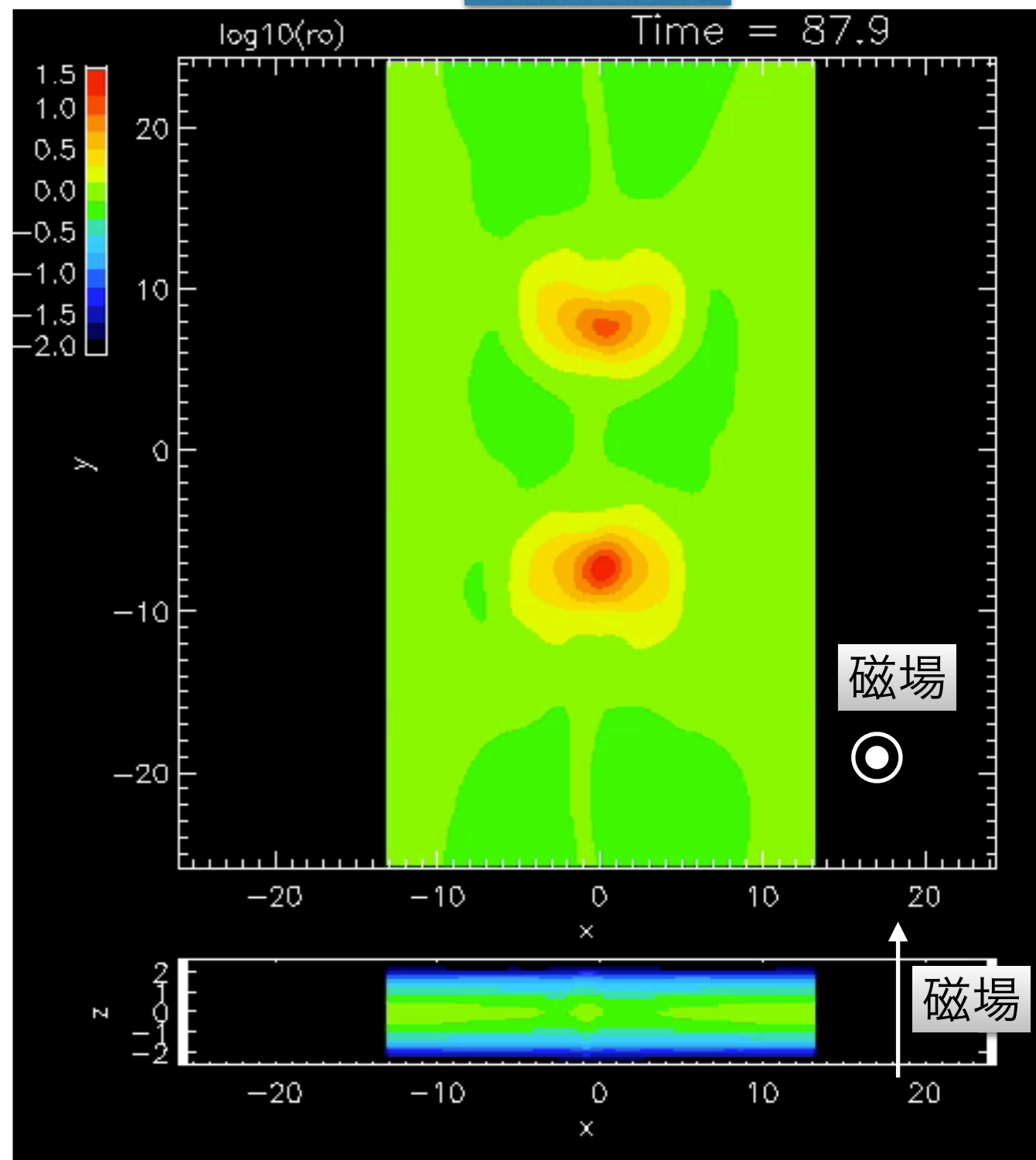
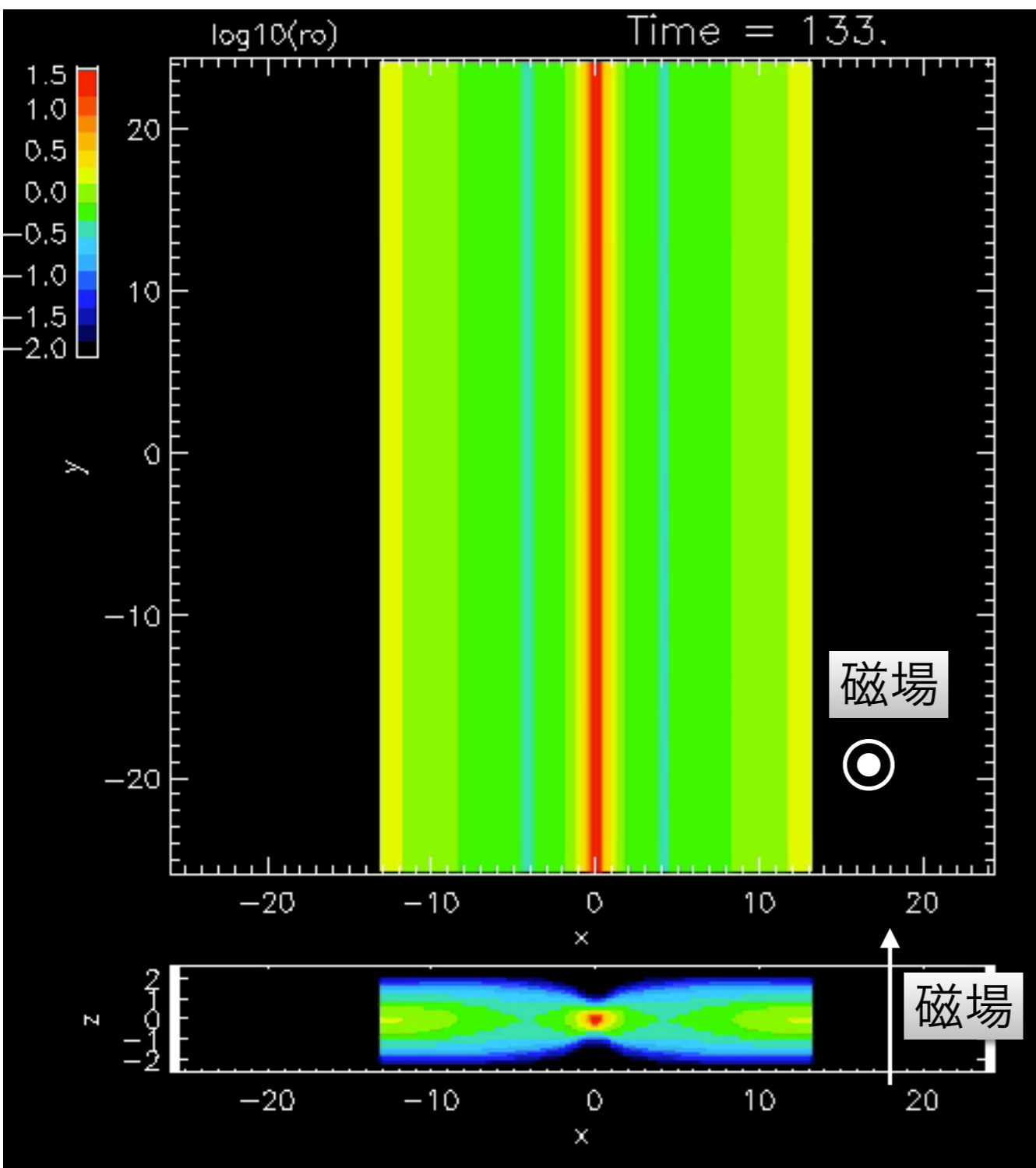
ゆらぎあり



磁場が強い場合 strong field

磁気拡散係数が先ほどの0.3倍

ゆらぎあり



星の形成時間が速くなる理由

- ・ 大きなスケールの強い乱流によって、分子雲が圧縮され、密度が増大する。
- ・ 密度が増大すると、磁場の拡散が促進される。
- ・ その結果、分子雲の収縮が早いタイムスケールで進行する。
- * 大きなスケールの乱流でできた細長い構造が分裂するモードが成長する。

まとめ

磁場に貫かれたフィラメント状分子雲

自己重力で磁場に関わらず分裂

分子雲コア

弱い磁場

強い磁場

分子雲コアはすぐに
暴走的に収縮

分子雲コアは
星なしコアとなる

自由落下

$\sim 10^6$ 年

磁場の拡散

$\sim 10^7$ 年

星