誘発的星形成シナリオにおける膨張シェルの分裂過程

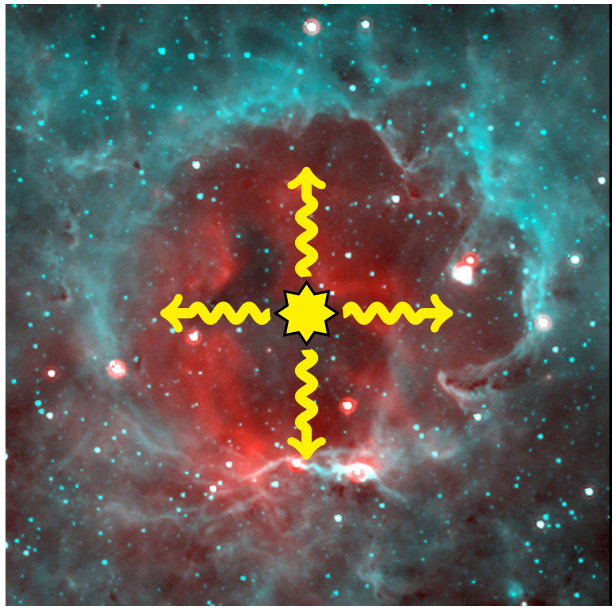
岩崎一成 (名大理)
日本学術振興会特別研究員 PD

共同研究者
犬塚修一郎 (名大理)
釣部通 (阪大理)

理論懇シンポジウム「林忠史郎先生と天文学・宇宙物理学」
@京大 １２月２０日

大質量星からの Radiative Feedback

An example, N12 (赤外線) Deharveng et al. 2010



- 大質量星が電離光子を放出
- 高温高圧な電離領域 (HII 領域) が膨張
  ⇒ 衝撃波によってガスを圧縮
- 膨張シェルが形成
- シェルの中で星が形成されている。

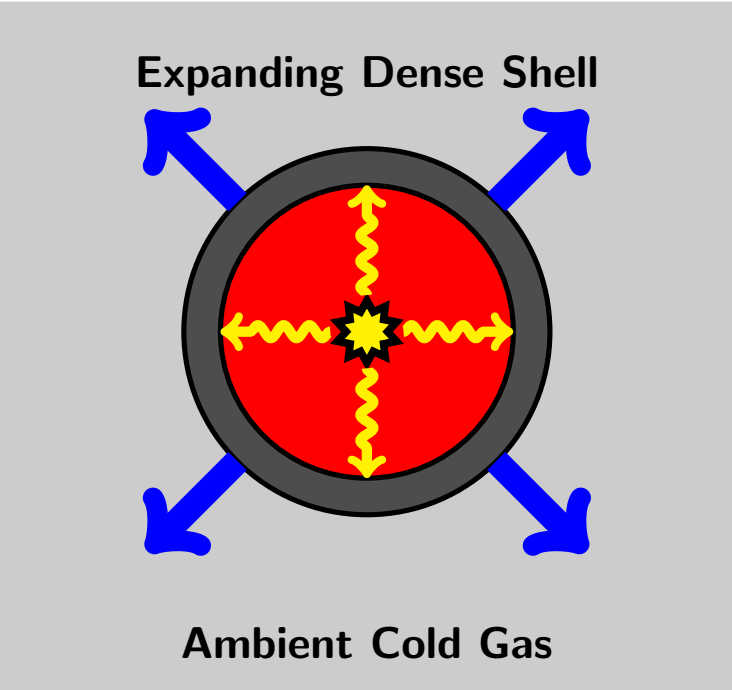
統計的には (Deharveng et al. 2010)...

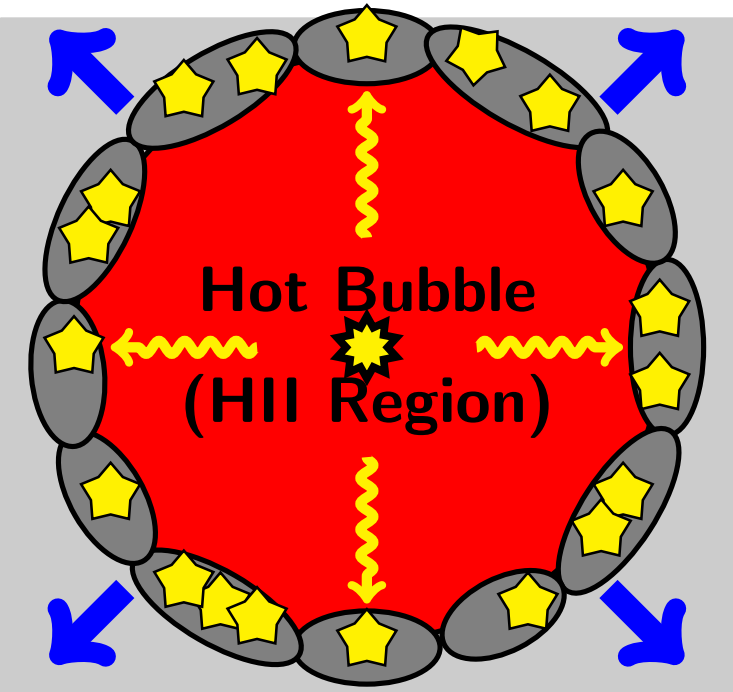
- 64 個の HII 領域のうち、20%以上で、その周囲のシェル中で大質量星形成の証拠
- HII 領域の膨張が星形成を誘発する確率が高い？

Collect and Collapse モデル Elmegreen & Lada '77

模式図

膨張シェルが重力不安定性により分裂、収縮 ⇒ 星形成





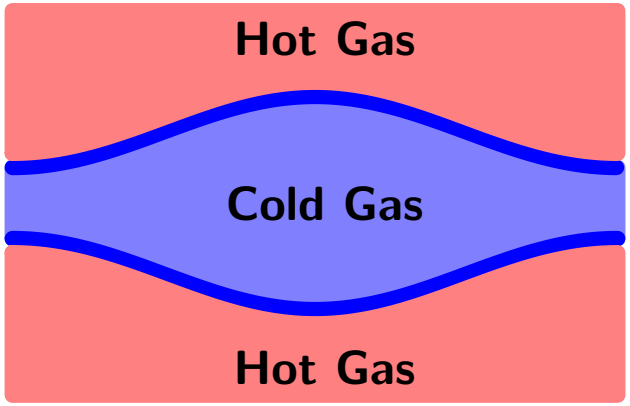
- いつ分裂するのか？
- どのくらいの質量の分裂片ができるのか？

対称なガス層の安定性解析

- ガス層の面密度小　(厚み)≪(音速)×(自由落下時間)
  - シェルの進化の大部分はこの状態

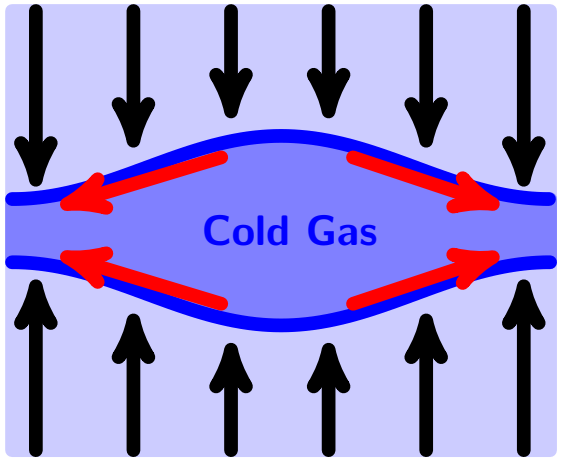
ホットガスによって両面を束縛されたガス層
(Elmegreen & Elmegreen '78)

- 両面が接触不連続面
- 音波が厚みを何回も往復
  ⇒ 非圧縮的
- ガスが集まる。⇒ 境界が歪む



衝撃波面の影響
(Vishniac '94, KI & Tsuribe '08)

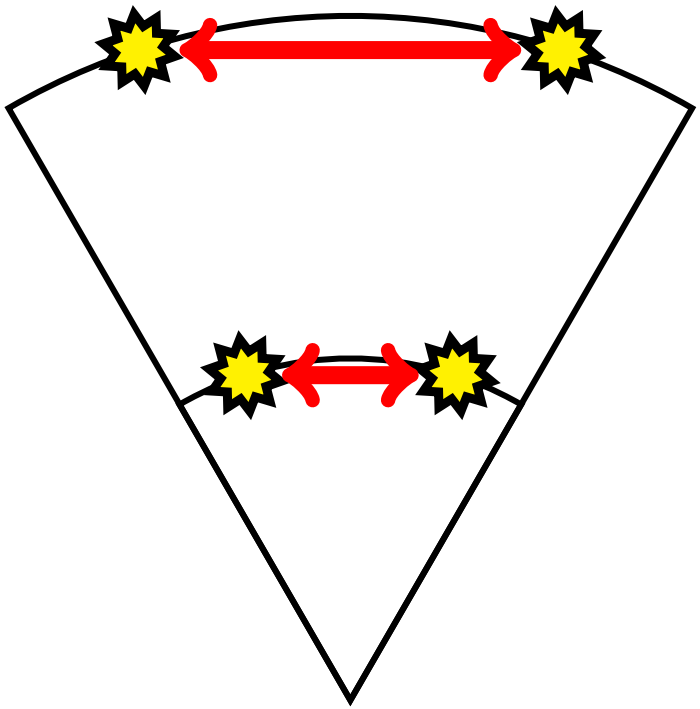
- Gas flow の衝突, 両面が衝撃波面
- 境界 (衝撃波面) が歪む
- 境界面にガスの流れ (赤矢印)
- **安定化！**



膨張シェルの安定性解析 Elmegreen ’94, Whitworth et al. ’94

- 周囲は一様密度、状態方程式は等温
- **対称ガス層の分散関係 (衝撃波面＋衝撃波面) ：$\Gamma_{\rm grav}$**
- 膨張による安定化の効果を加える。

重力不安定となる条件



$$\Gamma_{\rm grav} > \Gamma_{\rm exp} \equiv \frac{V_{\rm shell}}{R_{\rm shell}}$$

- $\Gamma_{\rm grav}$：ガス層の重力不安定性の成長率
- $\Gamma_{\rm exp}$：シェルの膨張率

多次元シミュレーション (先行研究)

線形解析の問題点

- (衝撃波面＋衝撃波面) 境界条件
  - 実際は、衝撃波面＋接触不連続面 (電離面)
  - 過度に安定化されている。
- 厚み方向に平均化 (密度分布は、大きく非対称)

- 線形解析ではどうしても近似が入る。
- シェルの分裂過程を調べるためには、多次元計算が不可欠。
- しかし、シェルを分解するには膨大な計算量が必要！
  ⇒ 未だ分解している計算はない。

本研究

三次元流体計算

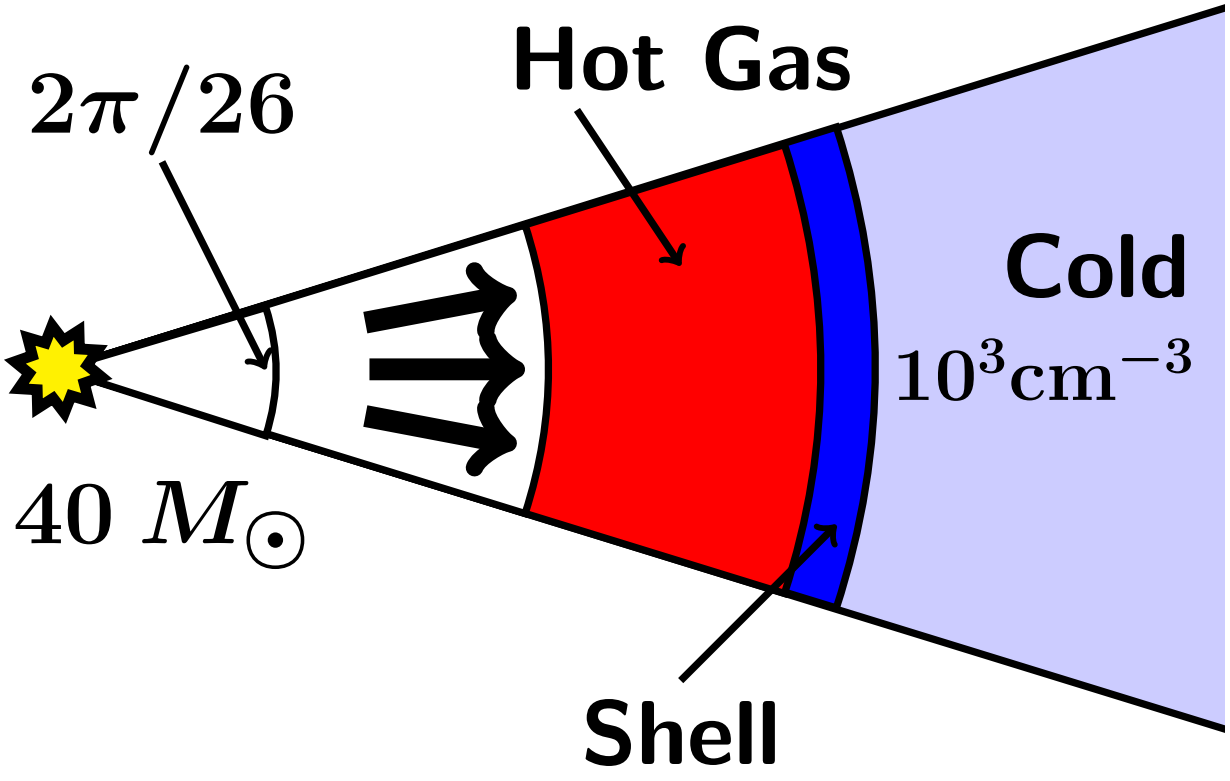
- 三次元 SPH 法を用いて、シェルの厚みを分解した高解像度の数値計算を行う。
- 重力不安定性が起こる条件を求める。

線形解析

- シェルの厚み方向の密度分布を考慮 (準解析的モデルで求める)
- 衝撃波面と接触不連続面の境界条件を考慮。
- ただし、シェルの時間進化を無視。
- 三次元流体計算と比較

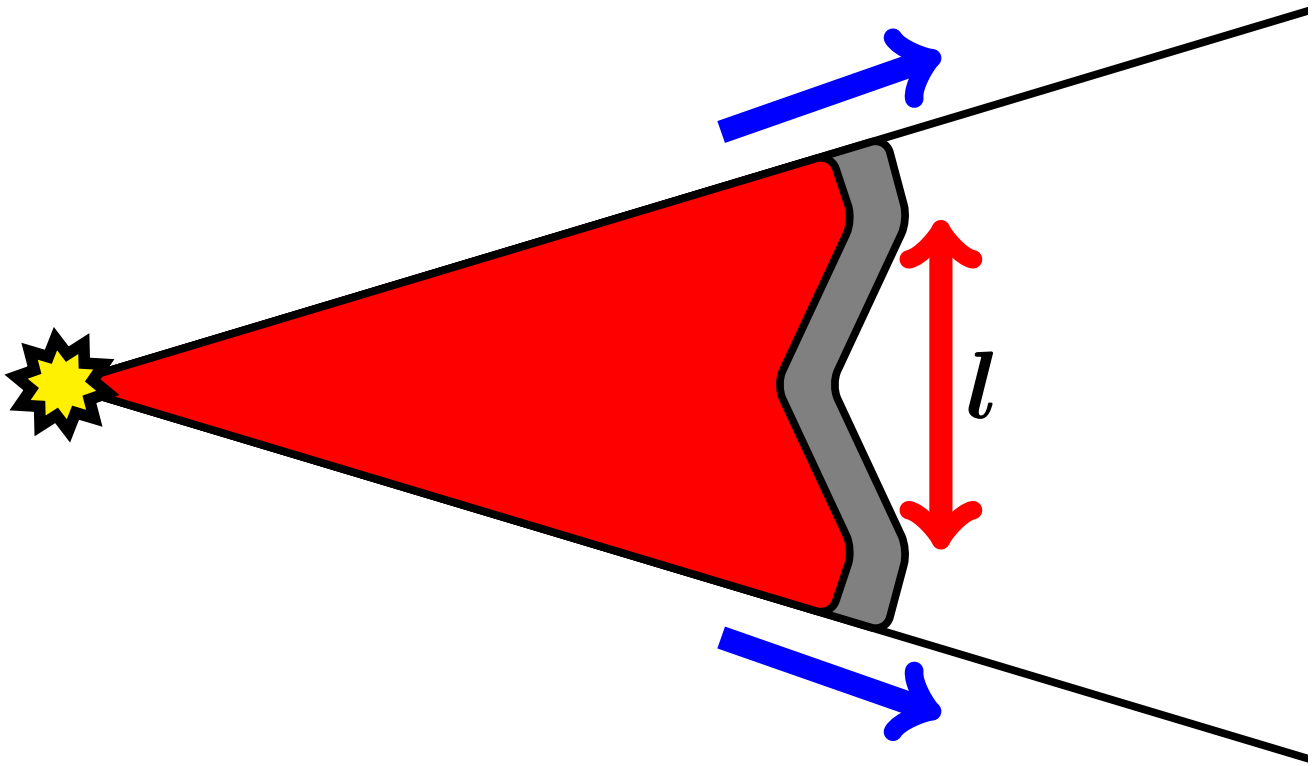
Simulation Setup

- 粒子数の節約のため、シェルの一部のみを解く
- 電離光子の輻射輸送は解かない。
- hot gas と cold gas を考える (各々の温度で等温変化)。
- cold gas は空間的に一様
- hot gas 粒子をピストンで押す。



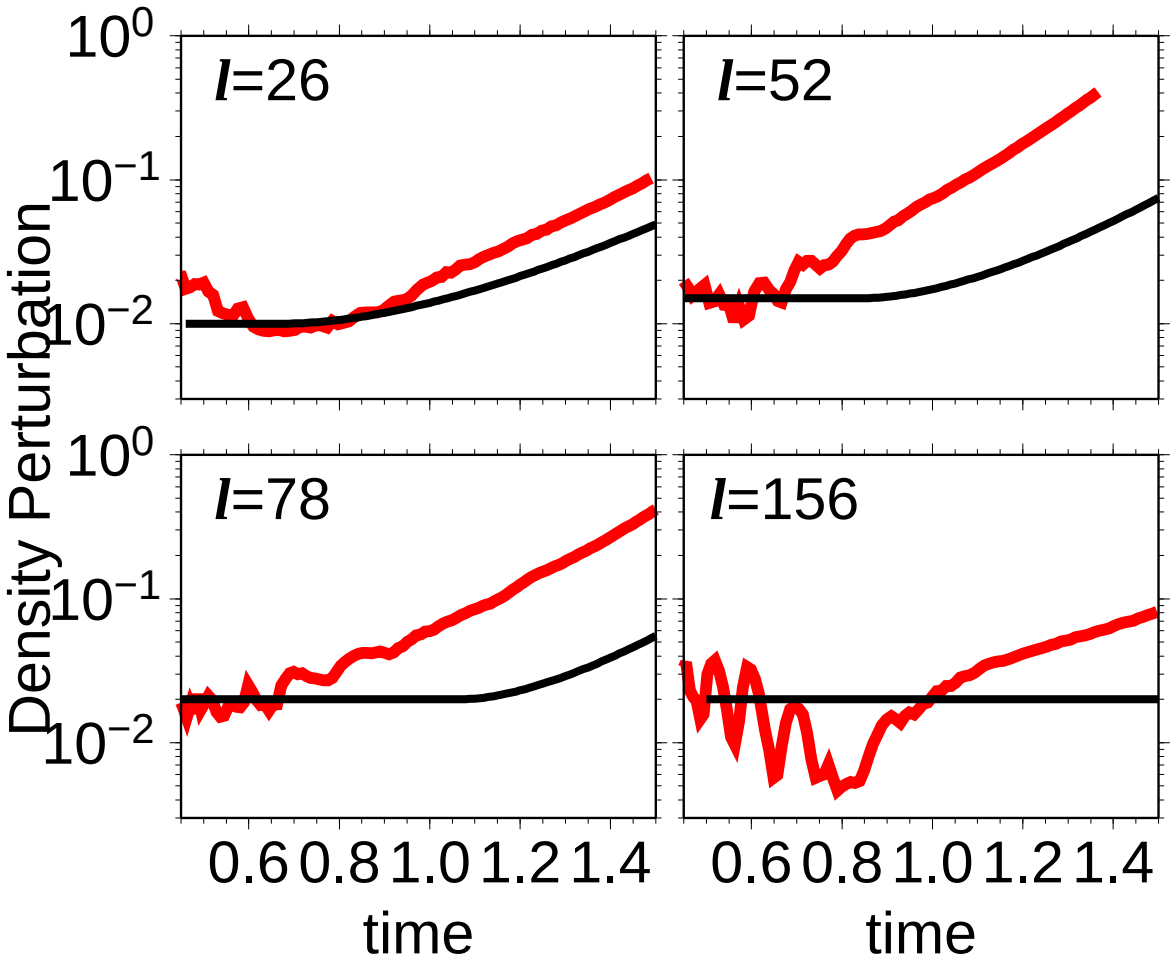
摂動

- Corrugation-type の摂動をシェルに加える。
- l: angular wavenumber.
- 各 run では、一つのモード l のみを考える。



密度摂動の時間進化
～Elmegreen ’94 との比較～

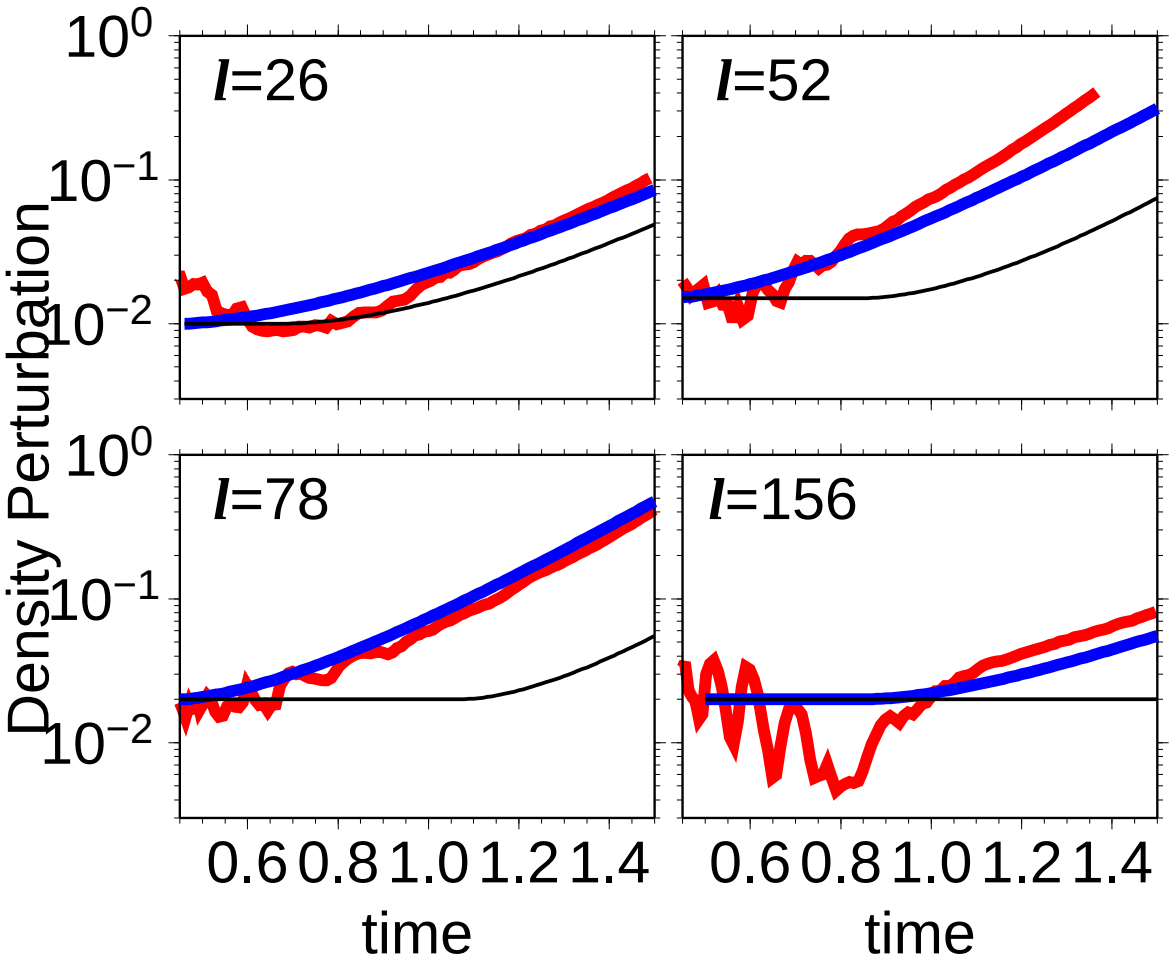
赤線：SPH 計算, 黒線：過去の線形解析 (Elmegreen ’94)



SPH 計算の方が早く成長し始める！

密度摂動の時間進化
～我々の線形解析との比較～

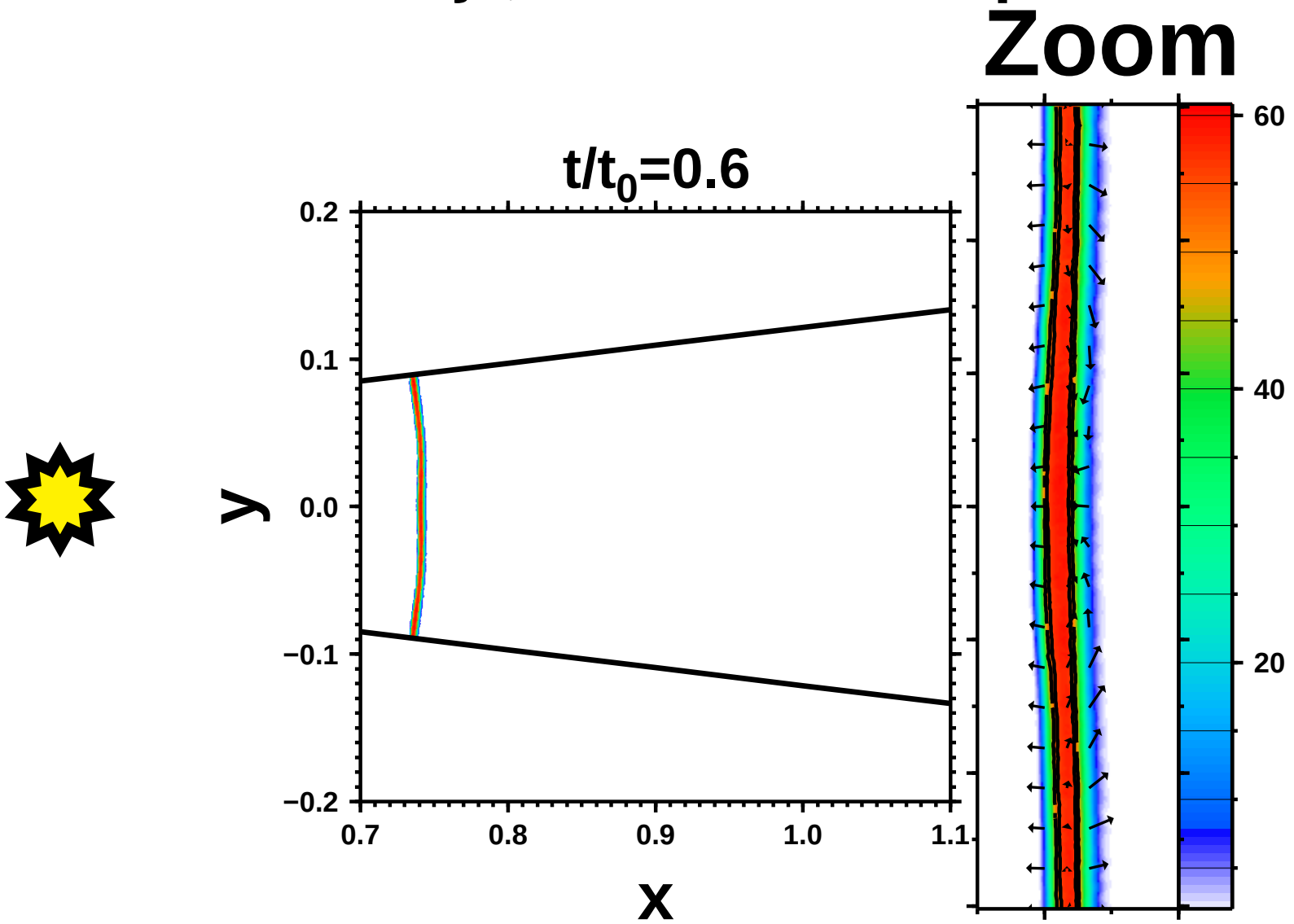
赤線：SPH 計算, 我々の線形解析、黒線：過去の線形解析 (Elmegreen ’94)



我々の線形解析はSPH計算の結果を良く記述

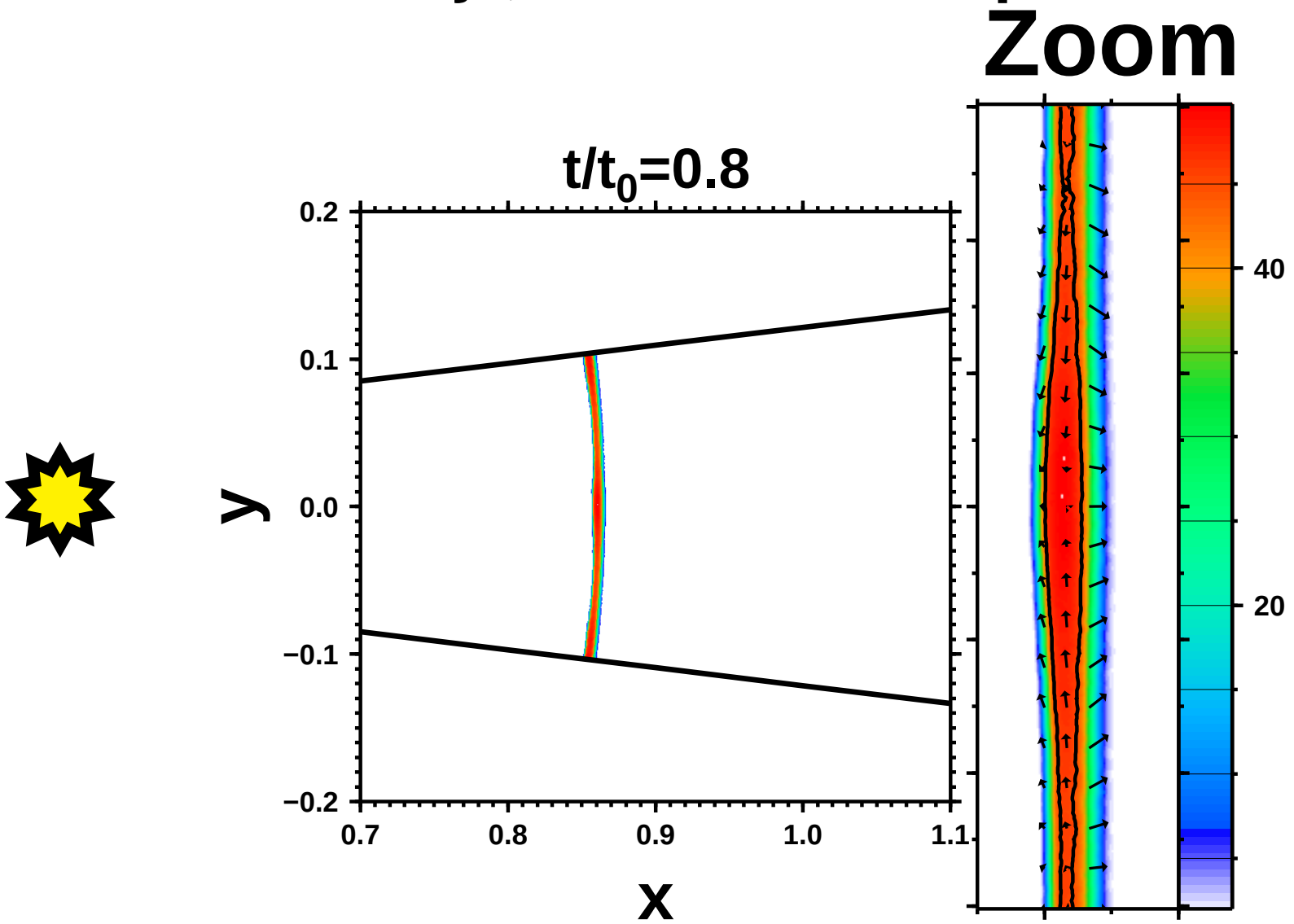
シェルの断面図の時間進化 (l = 52)

色：密度 t_0 = 1.6 Myr, 長さの単位：5.9pc



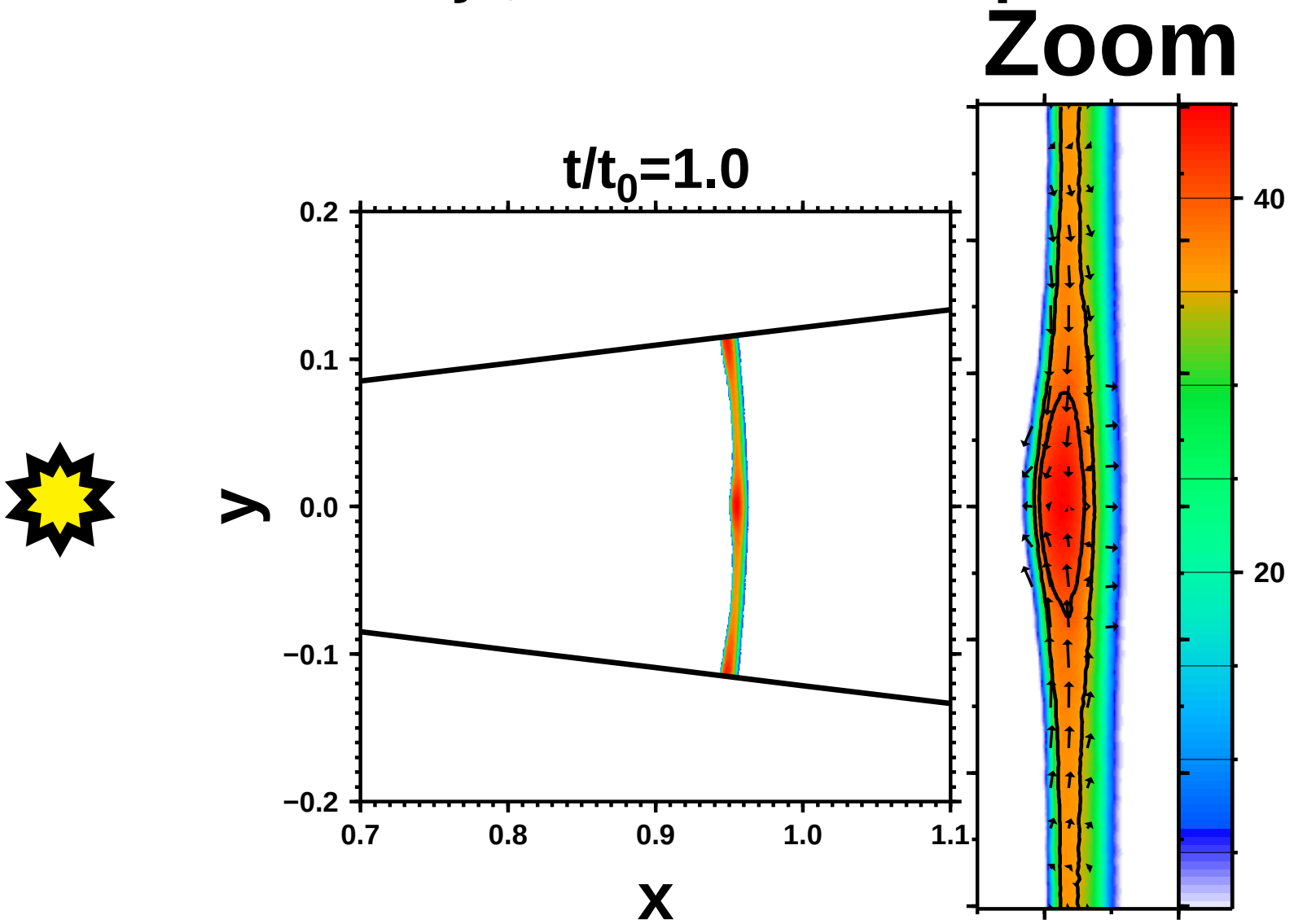
シェルの断面図の時間進化 ($l = 52$)

色：密度 $t_0 = 1.6$ Myr, 長さの単位：5.9pc



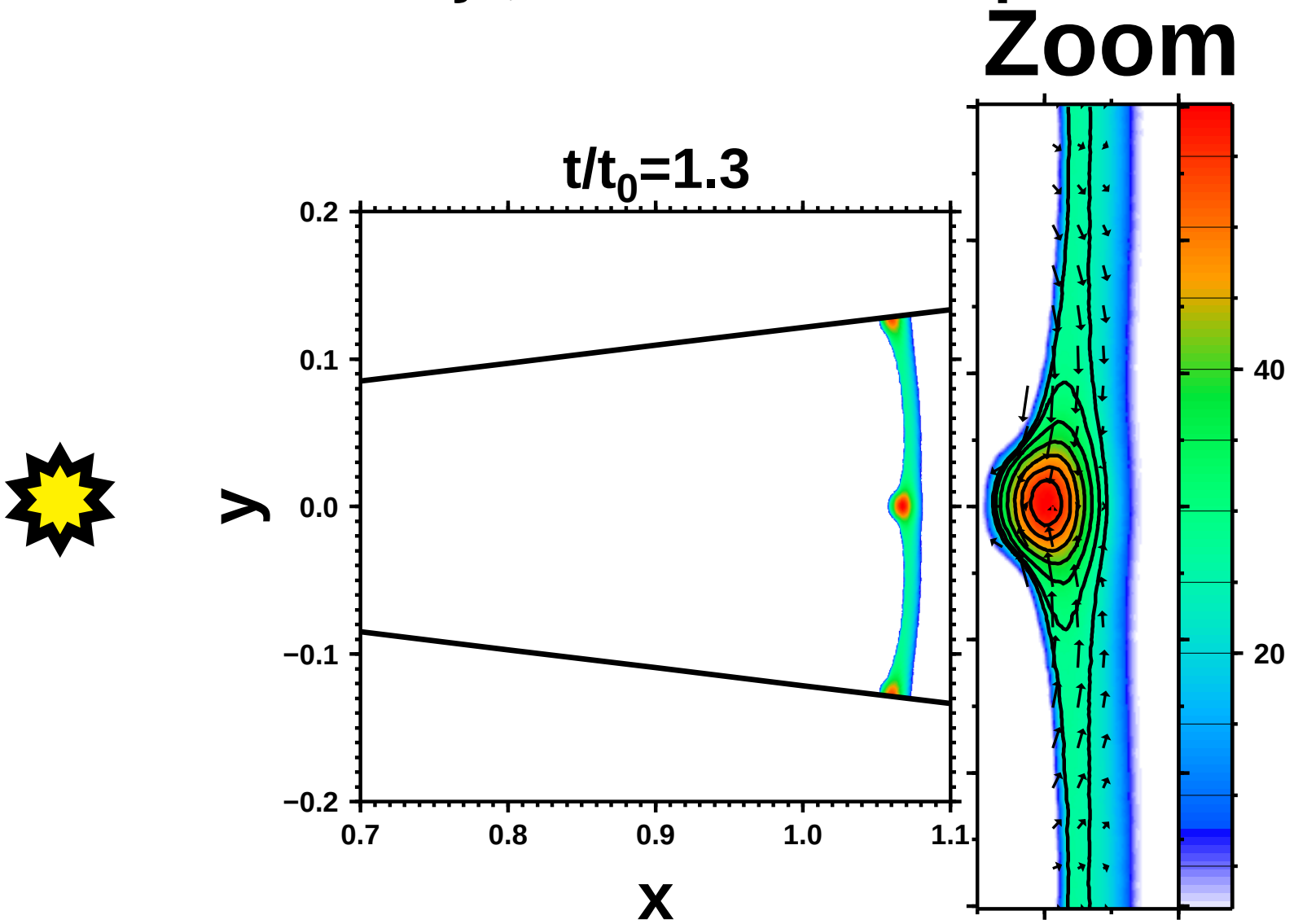
シェルの断面図の時間進化 ($l = 52$)

色：密度 $t_0 = 1.6$ Myr, 長さの単位：5.9pc



シェルの断面図の時間進化 (l = 52)

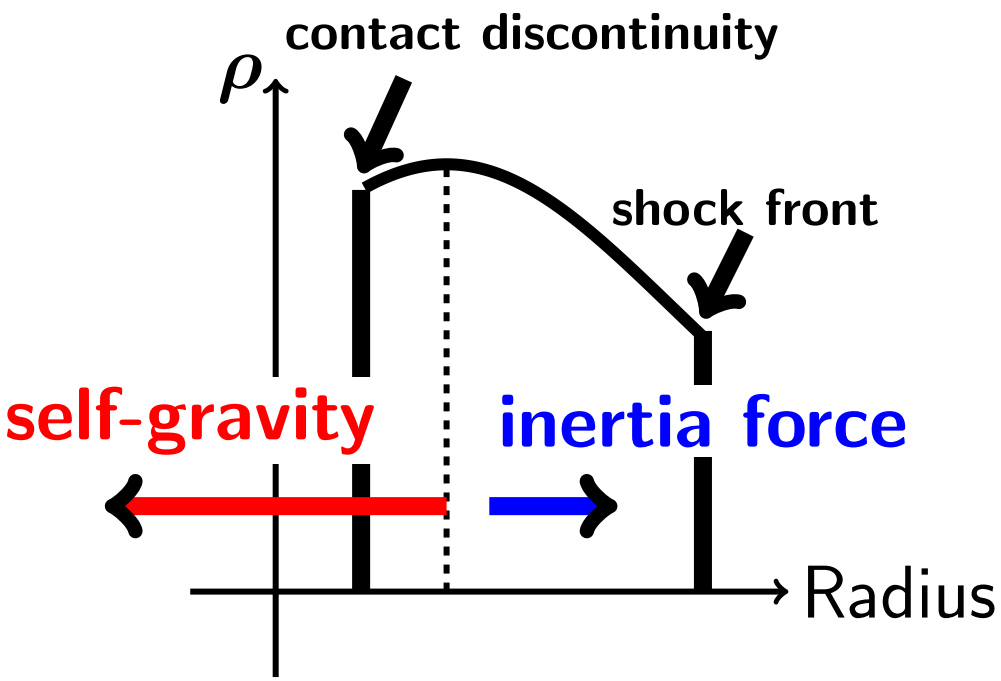
色：密度 t_0 = 1.6 Myr, 長さの単位：5.9pc



接触不連続面の変形

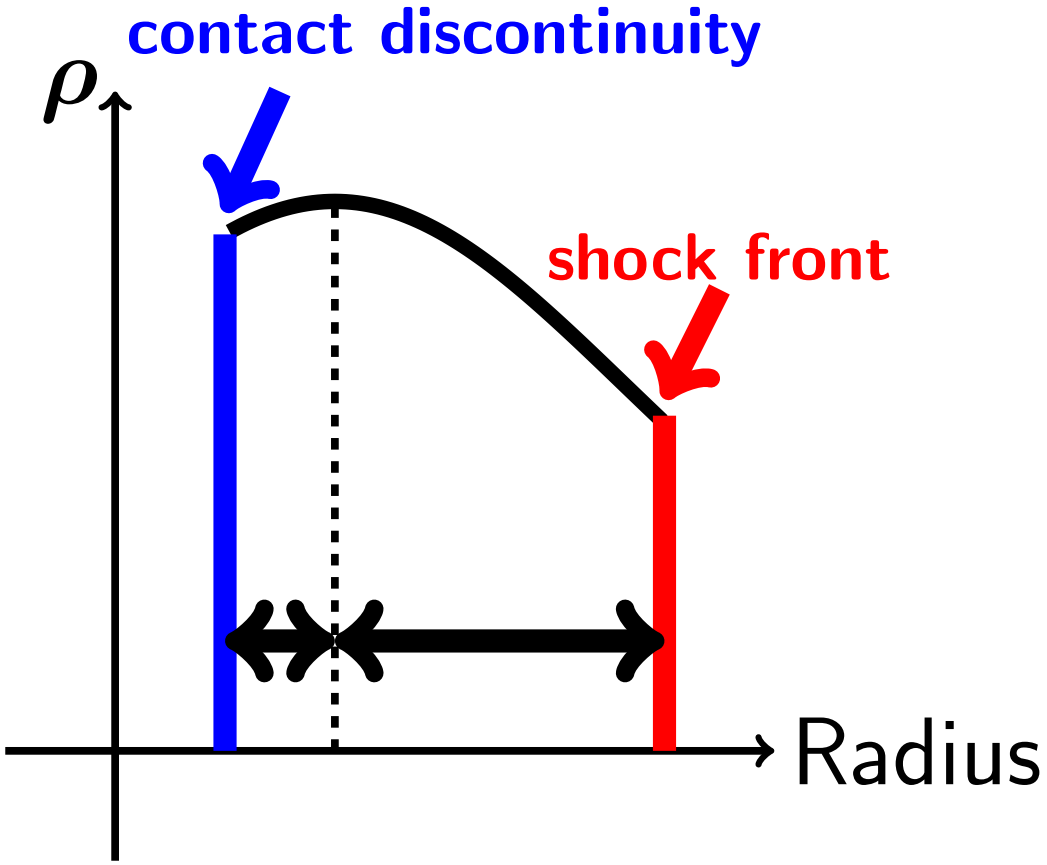
密度分布の非対称性が大きく関わる。シェルが太ってくると...

- 減速による慣性力 < 自己重力：曲率の効果で常に中心向き



- **ピークは、接触不連続面に近づく (衝撃波面から離れる)**
- (今日は話しませんが) 密度分布は 3 つの phase に分かれることが分かった。

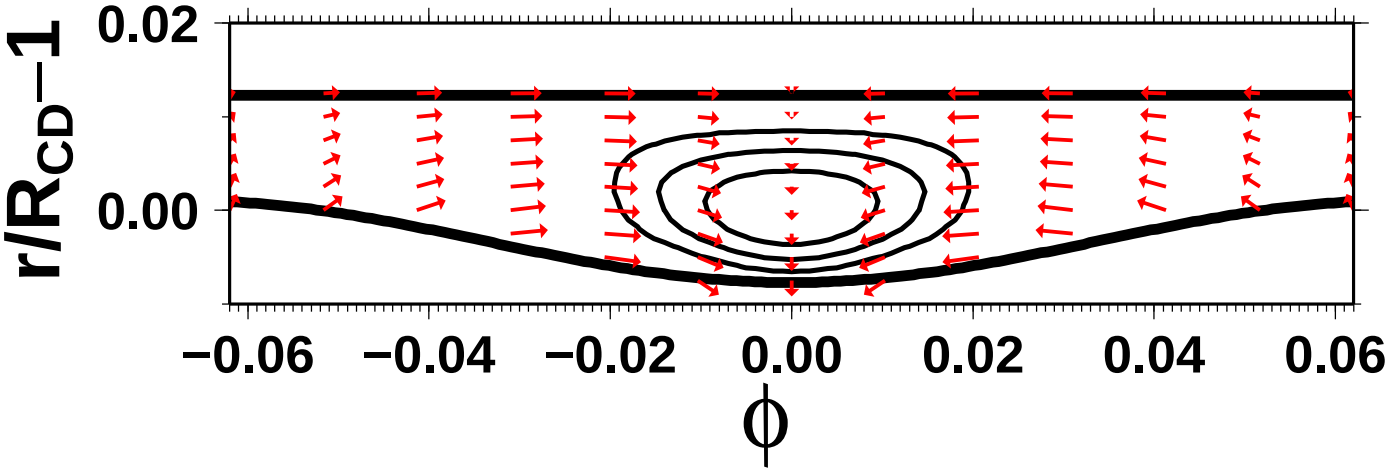
接触不連続面の変形



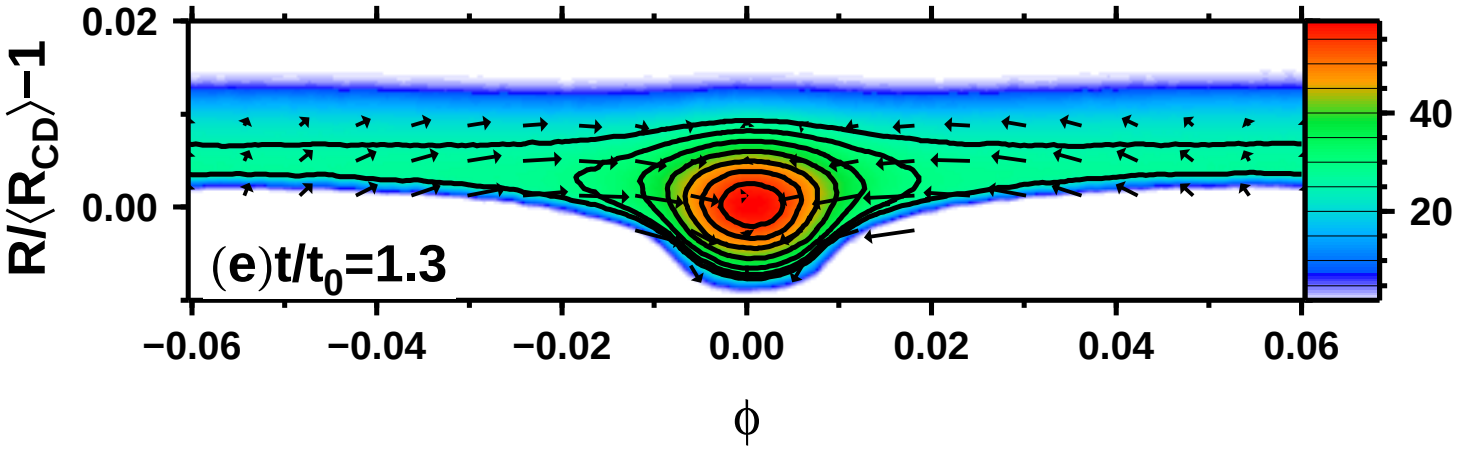
- 衝撃波面〜ピークの距離 > 重力のスケールハイト
  - ピークに向かって崩壊できる。(圧縮モード)
- 接触不連続面〜ピークの距離 < 重力のスケールハイト
  - 接触不連続面が変形する。(非圧縮モード)

断面の比較

- 線形解析から求めた固有関数



- SPH 計算結果



- **SPH 計算でのシェルの断面図 ~ 線形解析の固有関数**

解析的表式

- 線形解析の結果から重力不安定性開始時刻と質量を見積もった。

$$t = 0.9\ \mathrm{Myr} \left(\frac{Q_{\mathrm{UV}}}{10^{49}\ \mathrm{s}^{-1}}\right)^{-3/28} \left(\frac{T_{\mathrm{c}}}{30\ \mathrm{K}}\right)^{3/8} \left(\frac{n_{\mathrm{E}}}{10^{3}\ \mathrm{cm}^{-3}}\right)^{-25/56}$$

$$M = 34\ \mathrm{M}_{\odot} \left(\frac{Q_{\mathrm{UV}}}{10^{49}\ \mathrm{s}^{-1}}\right)^{-9/56} \left(\frac{T_{\mathrm{c}}}{30\ \mathrm{K}}\right)^{33/16} \left(\frac{n_{\mathrm{E}}}{10^{3}\ \mathrm{cm}^{-3}}\right)^{-47/112}$$

T_{c}：シェルの温度
観測では、コアの質量 (数十〜数百 $M_{\odot}$)

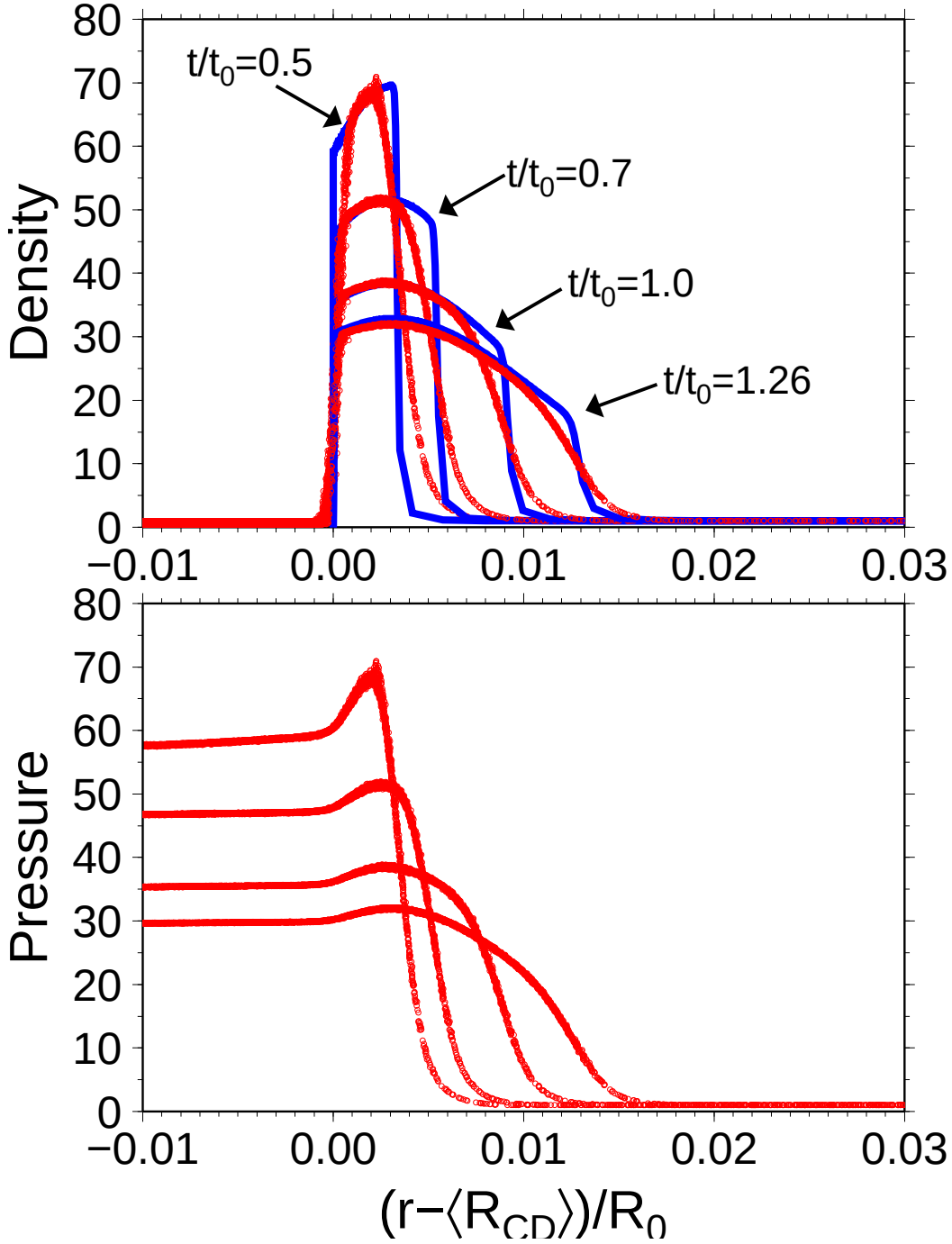
Summary and Future Works

Summary

- 膨張シェルの高解像度三次元シミュレーションを行った。
- 従来の線形解析 (Elmegreen '94, Whitworth et al. '94) からの予言よりも早く不安定となる。
- 衝撃波面は平らであるが、接触不連続面は大きく歪む。
- これらの３次元計算結果は、我々の行った線形解析によってよく説明される。
- シェルが重力不安定となる時刻での物理量の解析的表式を与えた。

Future Works

- 周囲の分子雲の乱流
- 熱的不安定性：超音速の乱流を引き起こす。
  - 流体的な速度分散が上がる。
  - 実効的な γ は、負になる。
- 輻射輸送：電離面の影響 (電離面の不安定性など)
- 磁場


Density
Pressure
t/t0=0.5
t/t0=0.7
t/t0=1.0
t/t0=1.26
80
70
60
50
40
30
20
10
0
−0.01
0.00
0.01
0.02
0.03
(r−⟨RCD⟩)/R0