

コンピューター・シミュレーション
による小質量星形成効率の推定

中野 武宣

長谷川哲夫 (NAO)

Core Massの何%が星に？

SF : nonhomologous process

formation of small stellar core

growth of stellar core by accretion

Accretion を止める機構 ⇒ 星の質量

Massive Stars : UV

Larson & Starrfield 1971

Wolfire & Cassinelli 1987

Nakano 1989

Upper Limit to Stellar Mass

rather than Star Formation Efficiency

Low-Mass Stars : Outflow

星の質量は何が決める？

Cloud Coreの質量 M_{cc}

星形成の最小単位

Core Massの何%が星に？

$$M_{\star} = f(M_{cc}, \frac{\dot{M}_w}{\dot{M}_{acc}}, \dots)$$

IMF と雲の Mass Function の関係

IMF

$$\frac{dN_{\star}}{d \log M_{\star}} \propto M_{\star}^{-\gamma_{\star}}$$
$$\gamma_{\star} \approx 1.5 \quad \text{at } M_{\star} \approx 3 - 60 M_{\odot}$$

(Scalo 1986)

Mass Function of Clouds

$$\frac{dN_c}{d \log M_c} \propto M_c^{-\gamma_c}$$

$$M_{\star} \propto M_{cc}^{\alpha} \Rightarrow \gamma_{\star} = \gamma_{cc}/\alpha$$

$$\gamma_c \sim 0.6 \quad \text{for clouds}$$

$$\gamma_c \sim 1.1 - 1.5 \quad \text{for low-mass clouds}$$

Star Formation Efficiency (SFE)

Each Cloud Core

← accretion を止める機構

Cloud as a Whole

SFE : low

e.g., Open Clusters : hardly bound

⇒ SF : inefficient process

SFEの推定は容易でない

Cores + Inter-Core Medium

1つのcoreを吹き飛ばしたUVやoutflow
がまわりのmediumやcoreも吹き飛ばす
可能性

観測によるSFEの推定

$$(\text{SFE})_{\text{obs}} = \frac{\Sigma M_{\star}}{\Sigma M_{\star} + M_{\text{gas}}}$$

飛び散ったgasの量？

時間とともに変化

SFE in Cloud Cores

(星の質量を決める機構)

Nakano, Hasegawa, & Norman 1995
(Ap.J., 450, 183)

Core : not far from Equilibrium

Inflow と Outflow : 共存可

Effect of UV

Core Matterの一部が
失われる

(by Outflow and UV)

↓

残った Matter :

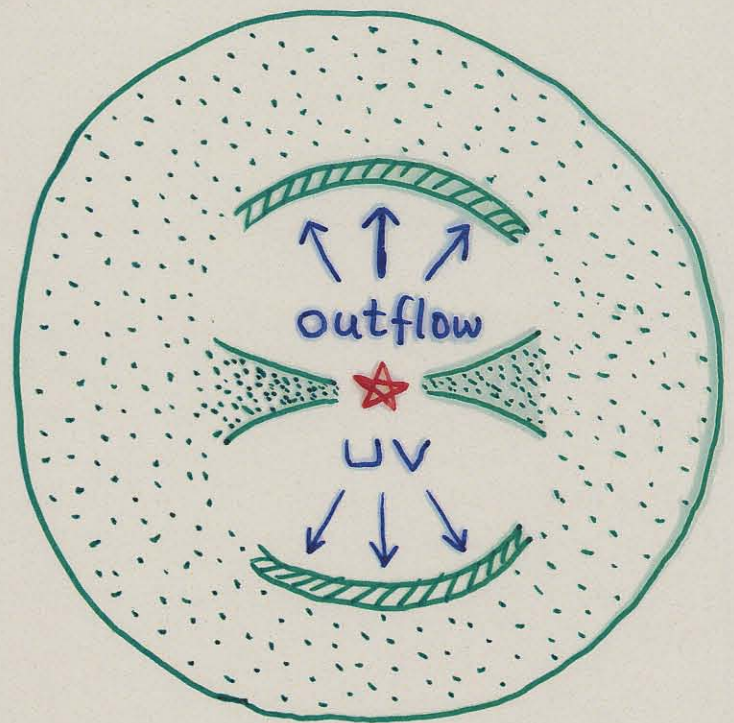
not Grav. Bound

↓

Accretion 止まる

$$M_{\star} \propto M_{\text{cc}}^{7/6}$$

(without UV)



束縛状態を脱する時期の正確な推定？

Matzner & McKee 2000, ApJ, 545, 364

Windの方向分布

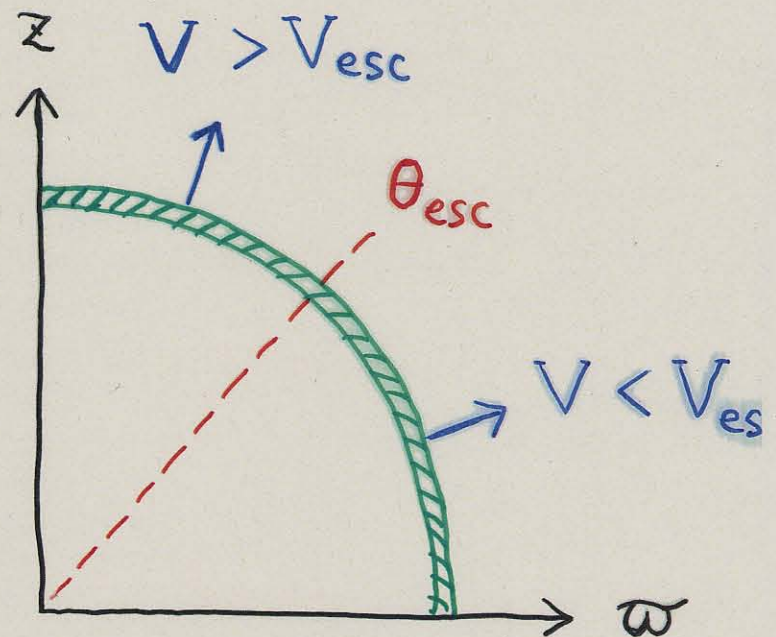
$$F(\mu)d\mu \propto \frac{d\mu}{1 + \theta_w^2 - \mu^2}, \quad \theta_w \sim 10^{-2}$$

Windによる圧縮層がCore表面に到達した時

$V > V_{\text{esc}} \Rightarrow$ 吹き飛ぶ

$V < V_{\text{esc}} \Rightarrow$ 星に落下

↓
SFE



問題点：

圧縮層の運動への重力の取り扱い
圧縮層が到達するまで、ガスは静止
構造変化に伴う重力の変化を無視
(V_{esc} の変化)

基礎方程式

Eq. Continuity:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = S_w(\rho)$$

Eq. Motion:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \nabla \mathbf{v} = -\nabla P - \rho \nabla \Psi + \mathbf{S}_w(\mathbf{p})$$

Gravity:

$$\nabla^2 \Psi = 4\pi G \rho$$

Eq. State:

$$P = C_s^2 \rho \quad (\text{isothermal})$$

Wind:

$$\dot{M}_w \sim 0.1 \dot{M}_{\text{acc}}$$

$$V_w \approx 200 \text{ km s}^{-1} \sim 10^3 C_s$$

方向分布 (Matzner & McKee 1999)

$$F(\mu) d\mu \propto \frac{d\mu}{1 + \theta_w^2 - \mu^2}$$
$$\mu = \cos \theta$$
$$\theta_w \sim 10^{-2}$$

2nd order Godunov

近似、仮定等

軸対称、回転なし (球座標 r, θ, ϕ)

$$\frac{\partial}{\partial \phi} = v_{\phi} = 0$$

赤道面对称

2次元運動 : r 方向だけでなく、 θ 方向も

r_{\min} ($\approx 0.03 R_0$) よりも内側に入ったガスは
星まで落下したと見なす。

R_0 : 初期の Cloud 半径

r_{\max} ($\approx 10 R_0$) よりも外に出たガスは
系から失われたと見なす。

Wind : momentum の効果 \gg 圧力の効果

初期状態 :

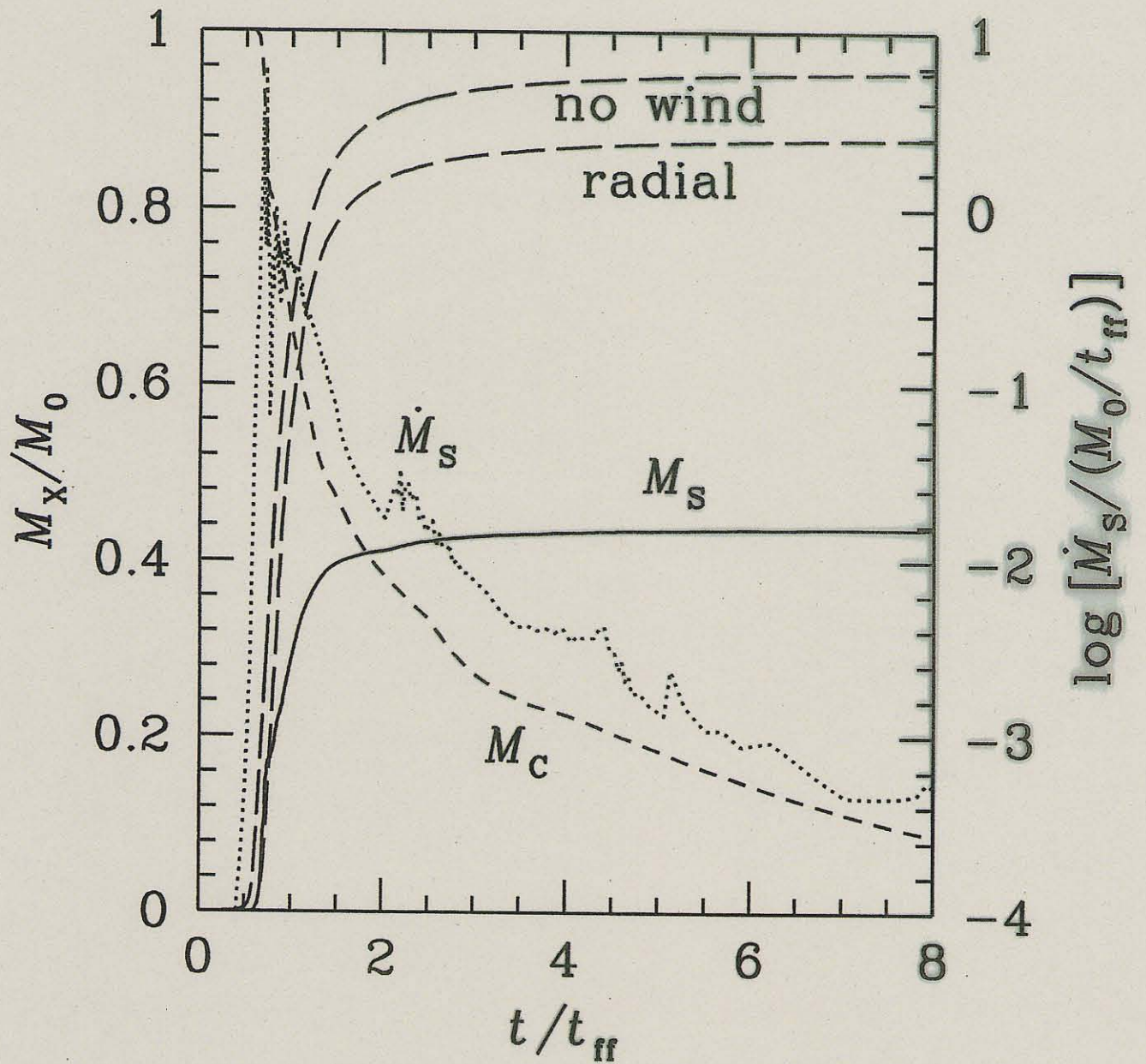
Cloud : Critical Isothermal Cloud と
相似な構造

Envelope : $\rho = 10^{-5} \bar{\rho}_{\text{cloud}}$

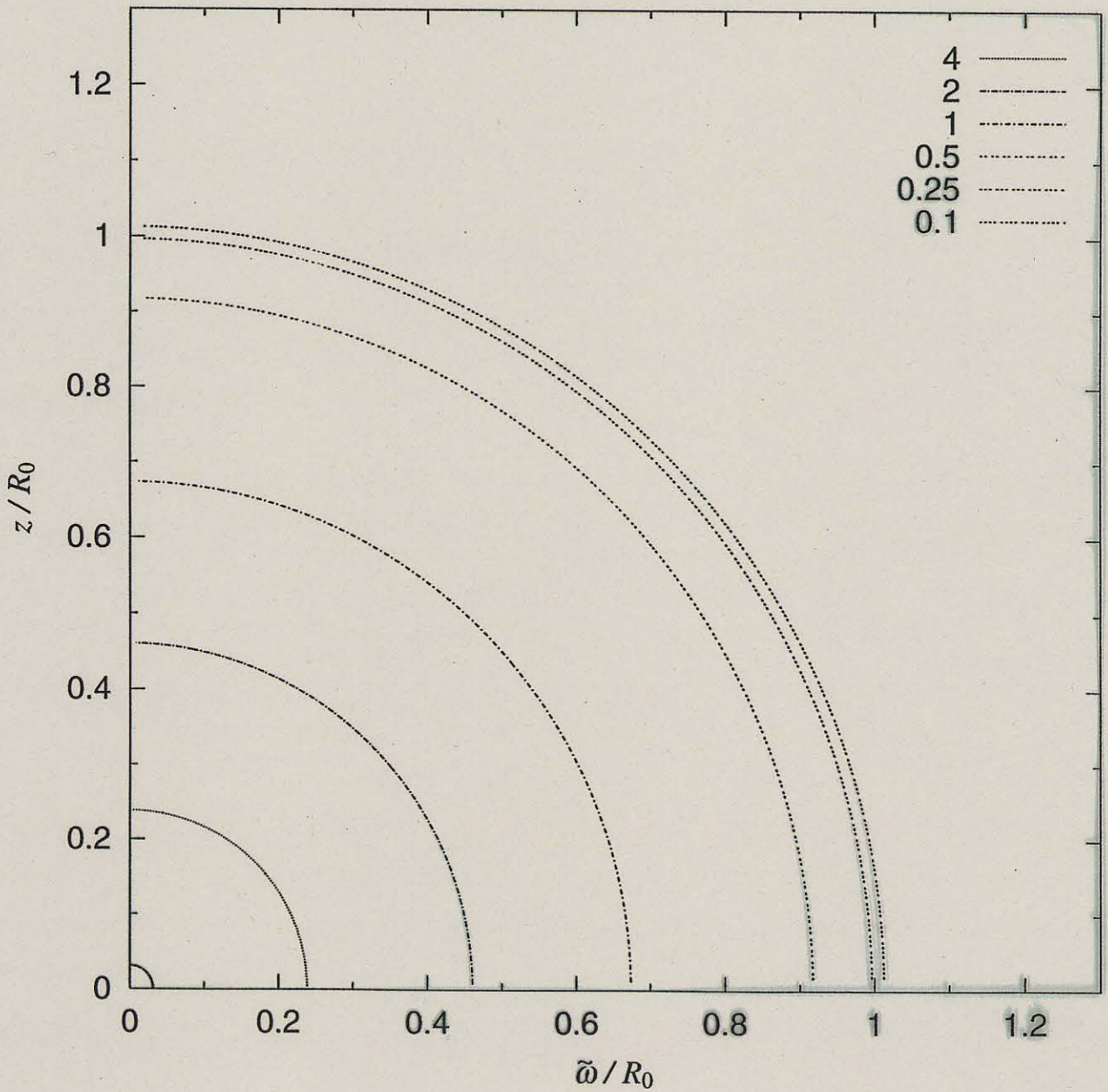
not far from Virial Equilibrium

$$M_0 / M_{\text{vir}} \approx 1 - 2$$

$$M_0 = 1.5 M_{\text{vir}} \quad f_w = 0.1$$

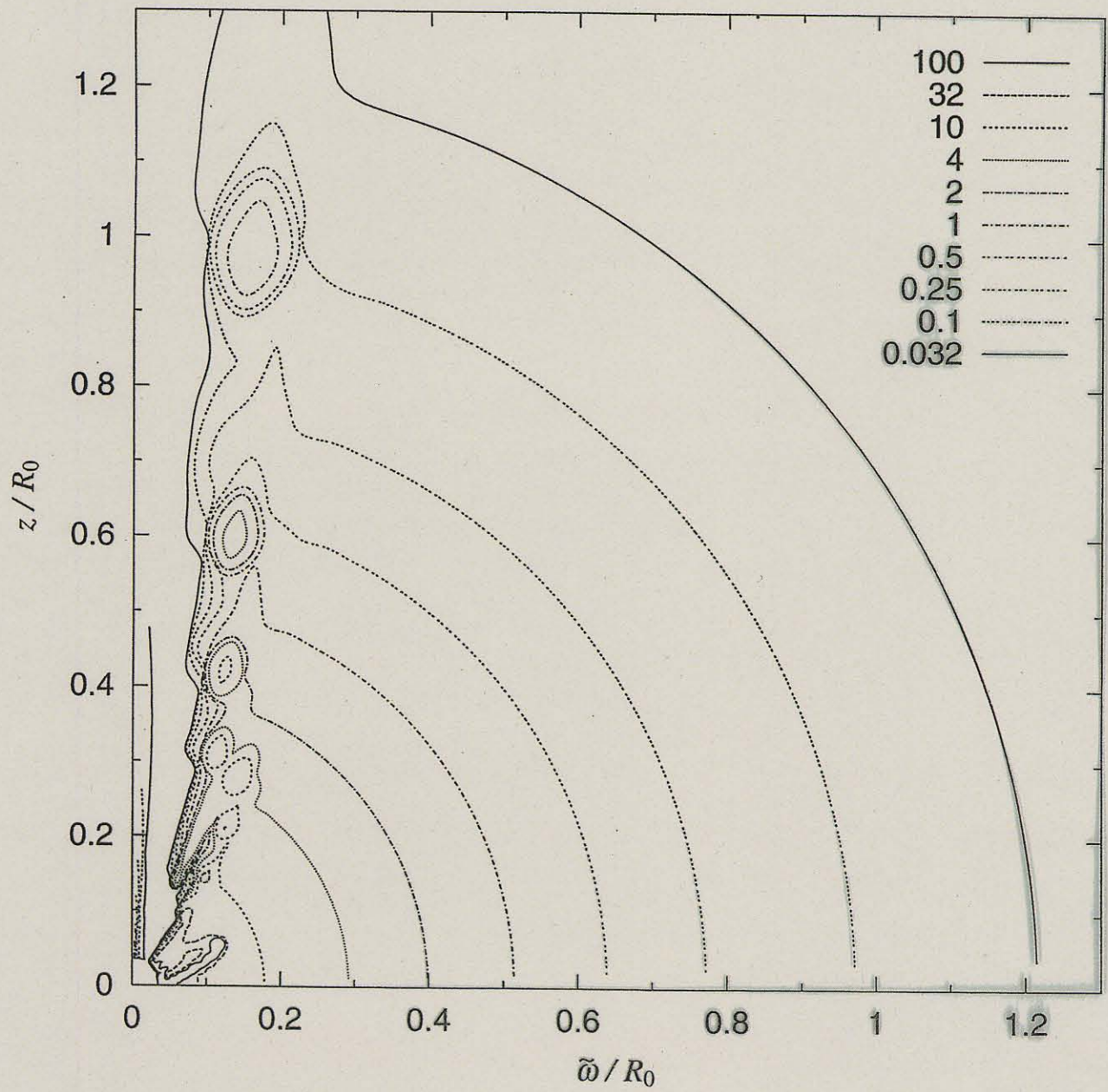


Initial State : $M_{\star} = 0$ $t = 0$



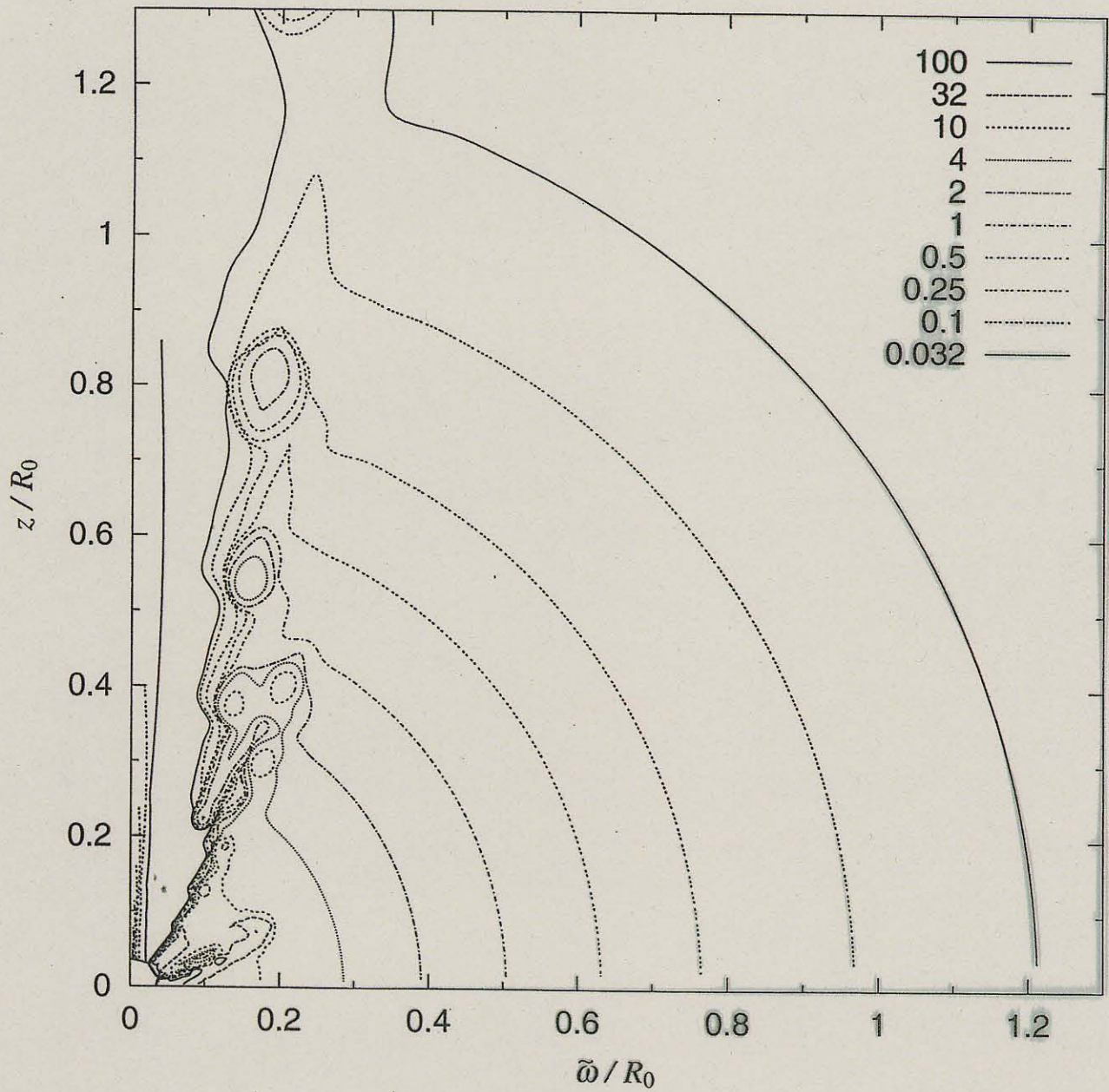
$$M_{\star} = 0.10 M_0 \quad t = 0.7073 t_{\text{ff}}$$

$$M_0 = 1.5 M_{\text{vir}} \quad f_w = 0.1$$



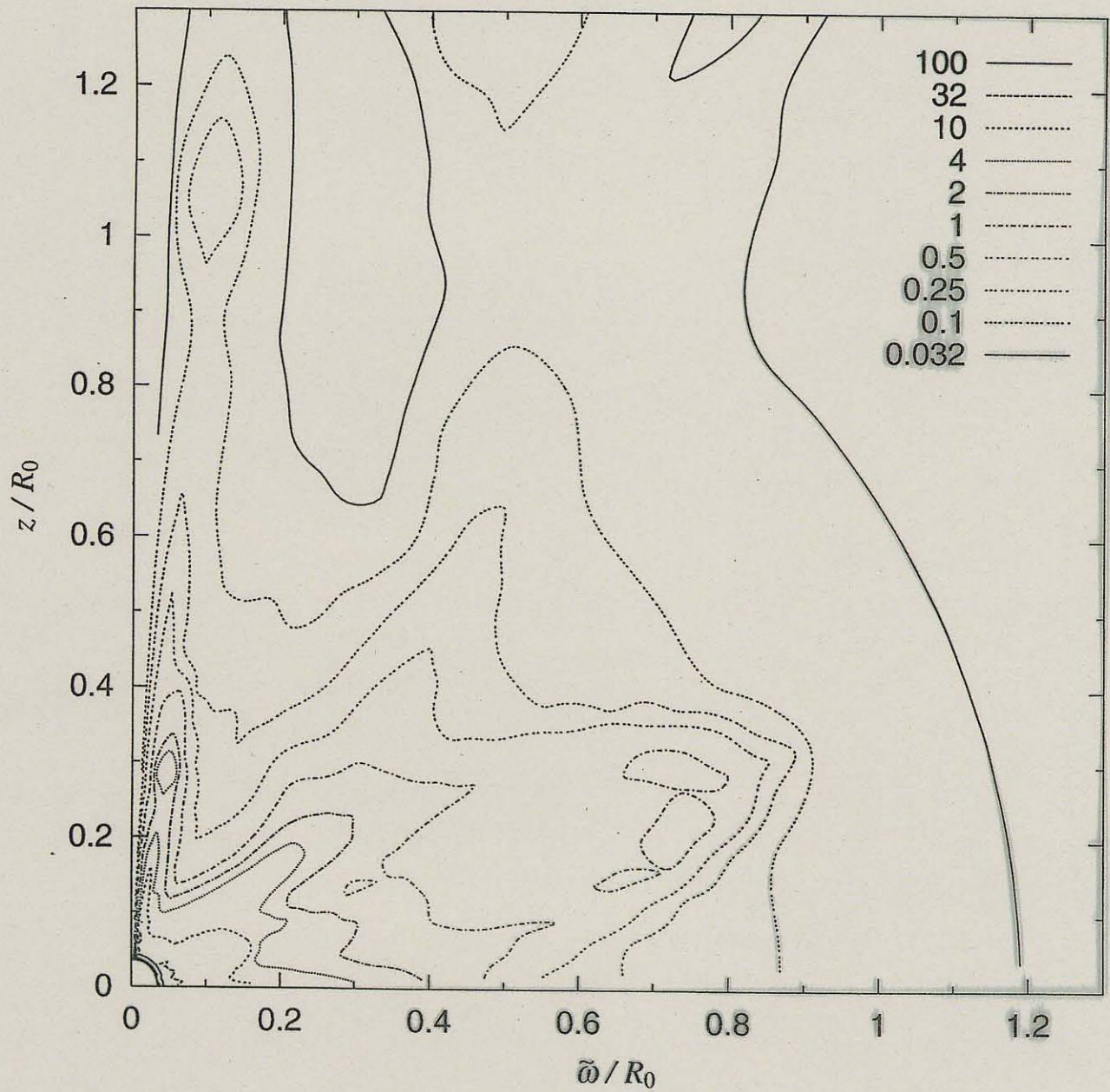
$$M_{\star} = 0.15 M_0 \quad t = 0.7233 t_{\text{ff}}$$

$$M_0 = 1.5 M_{\text{vir}} \quad f_w = 0.1$$



$$M_{\star} = 0.25 M_0 \quad t = 0.9253 t_{\text{ff}}$$

$$M_0 = 1.5 M_{\text{vir}} \quad f_w = 0.1$$



$$M_{\star} = 0.35 M_0 \quad t = 1.172 t_{\text{ff}}$$

$$M_0 = 1.5 M_{\text{vir}} \quad f_w = 0.1$$

