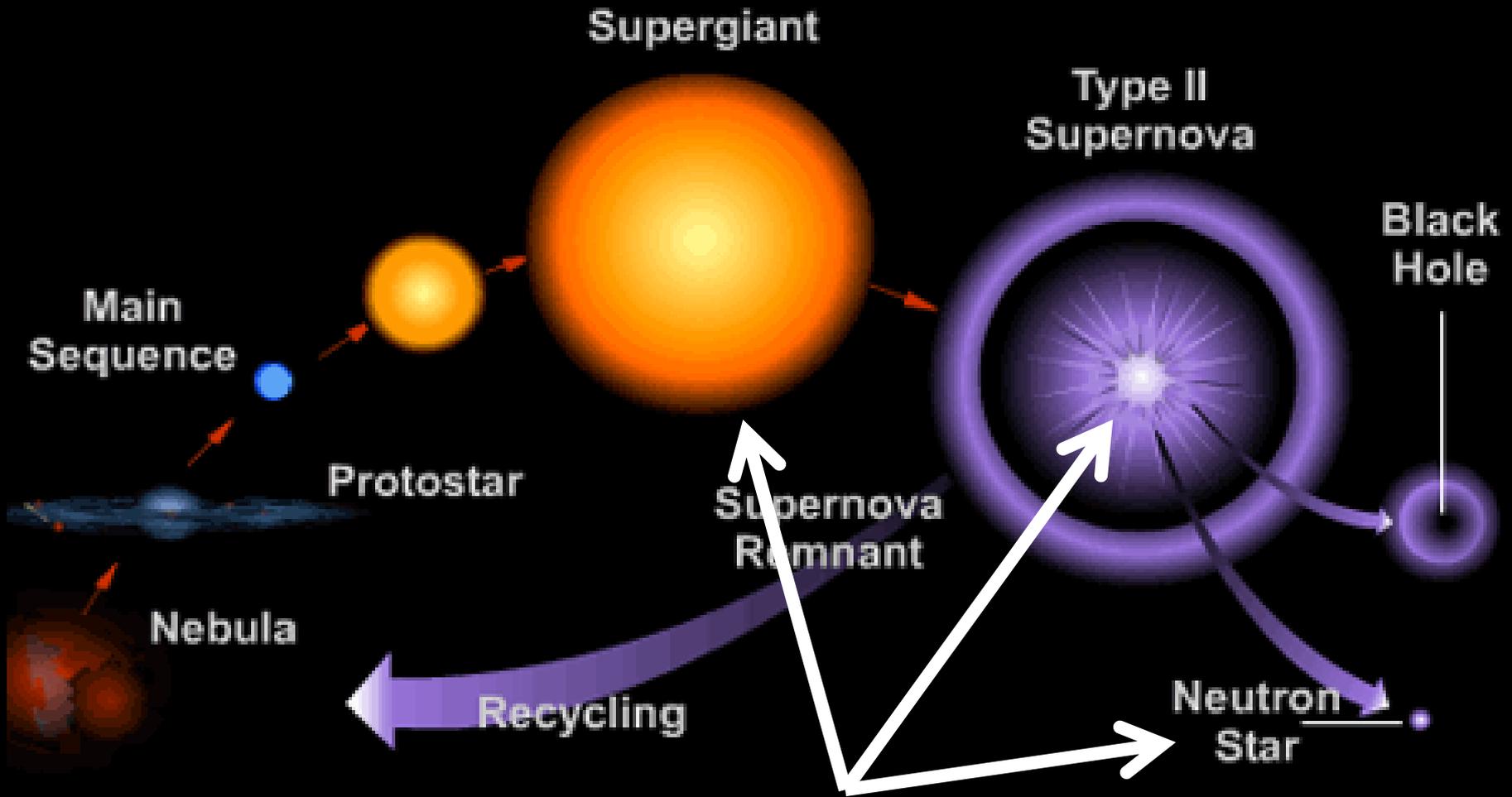


# 超新星爆発 3次元シミュレーション



滝脇知也  
(理化学研究所)

# 星の一生と最期の大爆発



実はいろいろな爆発をするが、  
どんな親星がどんな風に爆発するのか分かってない

# Contents

- 1D simulations
- 3D simulations
- 3D simulations with rotation

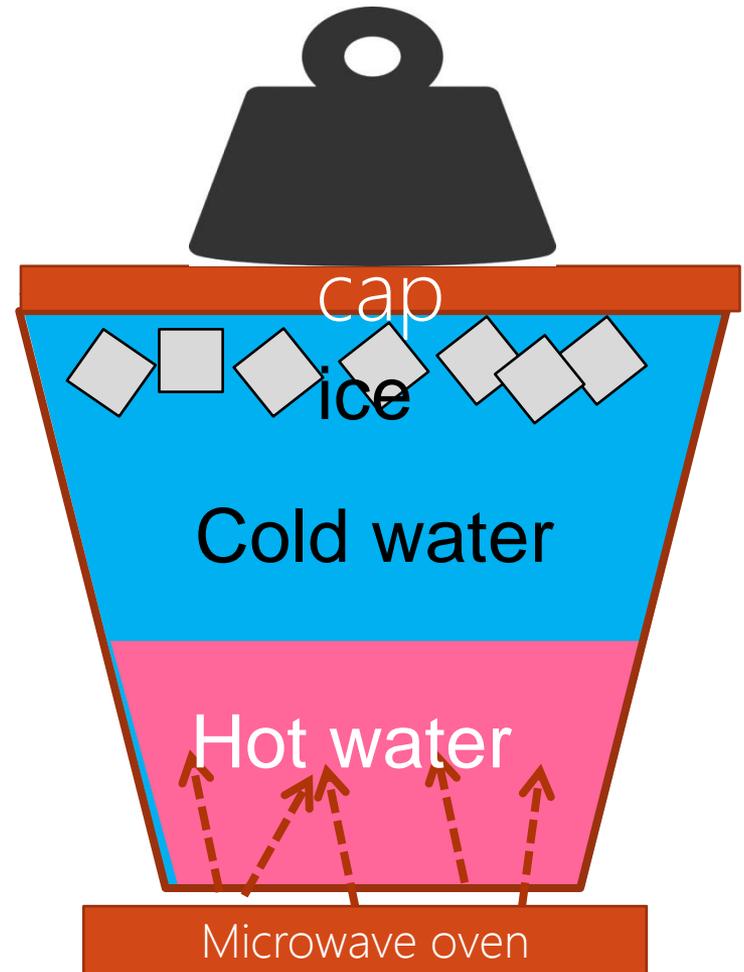
# Typical 1D simulation

# Problem

シミュレーションしてみると爆発しないという問題がある。

1980年代から続く長い問い。  
2000-2005年 state-of-the-art simulations with detailed neutrino transportが1次元球対称の仮定では爆発しないことを確認した。

(Liebendoerfer+2001, Rampp+2002, Thompson+2003 and Sumiyoshi+2005)

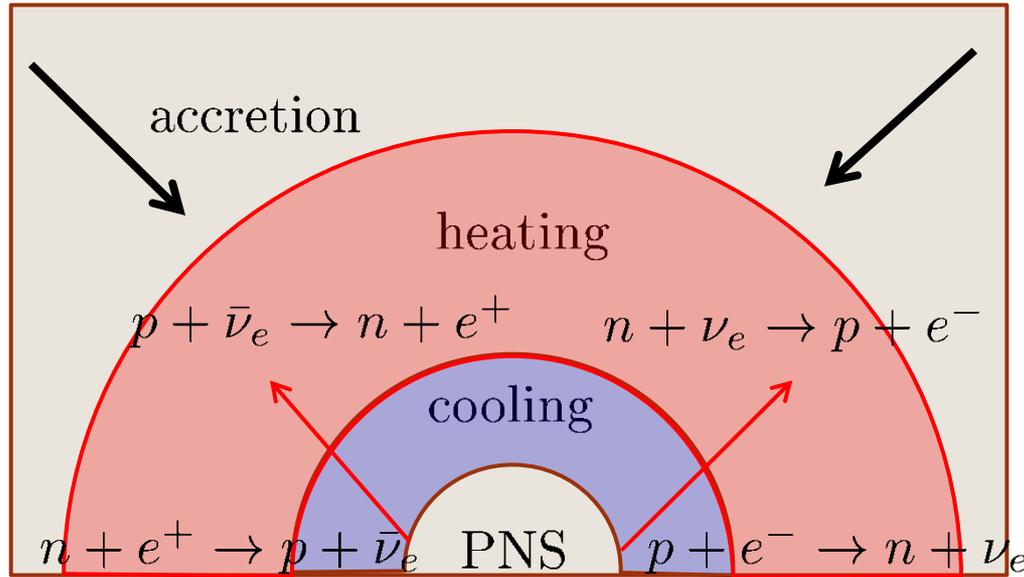


(in 1D)ニュートリノ加熱 < 蓋の重さ

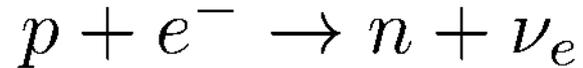
5 => 爆発しない！

# Neutrino Heating Mechanism

Janka 01



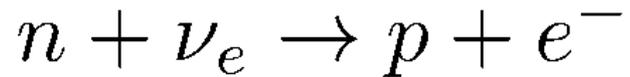
-Cooling term



$$C \sim 145 \frac{\rho}{m_u} \left( \frac{kT}{2\text{MeV}} \right)^6 \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$$

$$\rho_{\text{proton}} \times \rho_{\text{electron}} (\propto T^3) \times \sigma (\propto T^2) \times \bar{E} (\propto T)$$

-Heating term



$$\mathcal{H} \sim 160 \frac{\rho}{m_u} \left( \frac{L_\nu 52}{r_7^2} \right) \left( \frac{kT_\nu}{4\text{MeV}} \right)^2 \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$$

$$\rho_{\text{neutron}} \times \rho_{\text{neutrino}} (\propto T_\nu^3 / r^2) \times \sigma (\propto T_\nu^2) \times \bar{E} (\propto T_\nu)$$

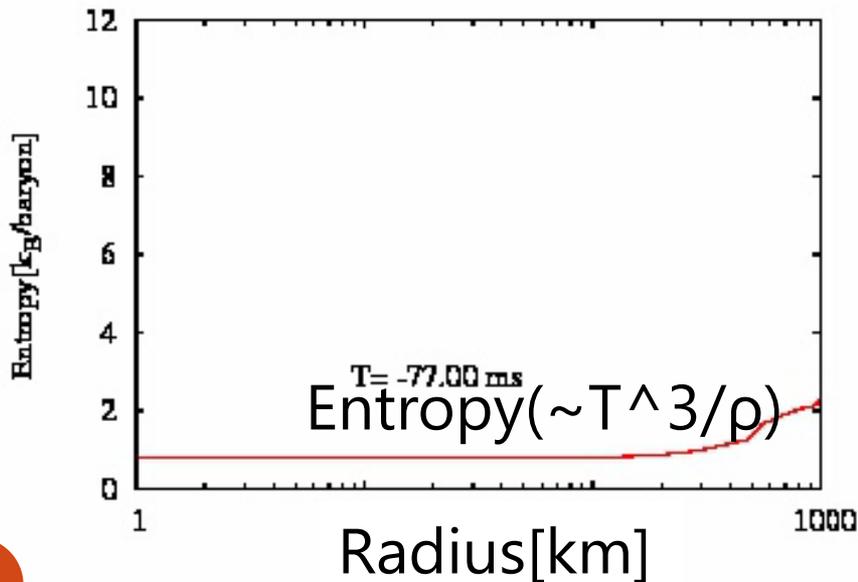
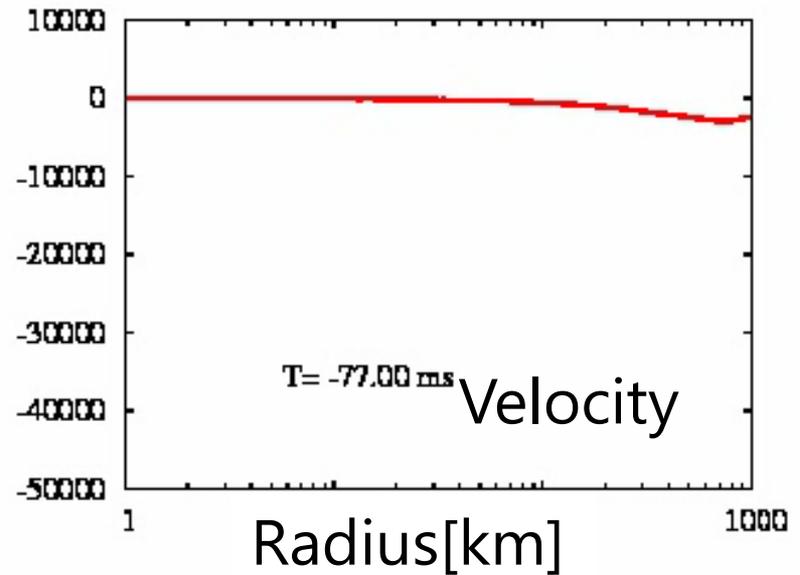
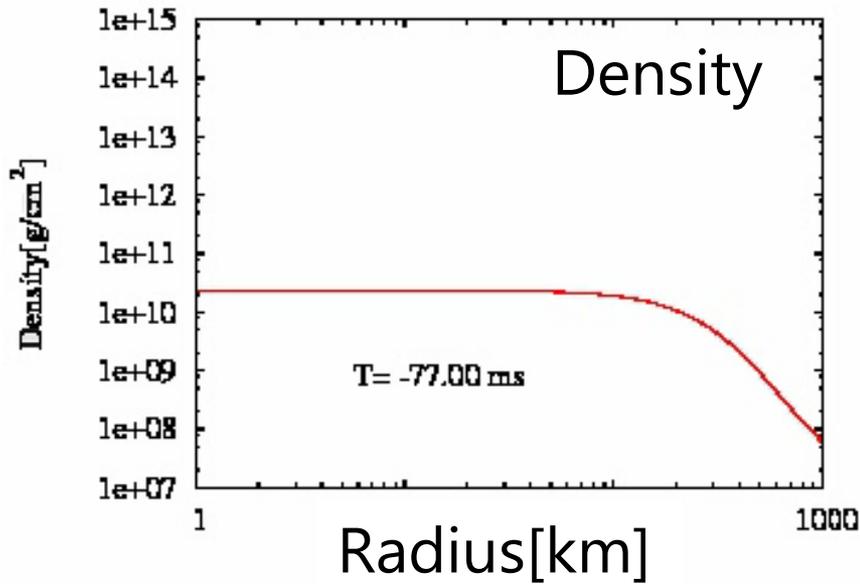
$$T \propto r^{-1} \text{ より}$$

$$C \propto 1/r^6 \quad \mathcal{H} \propto 1/r^2$$

6

外側ではヒーティングが優勢でニュートリノ反応で加熱される！

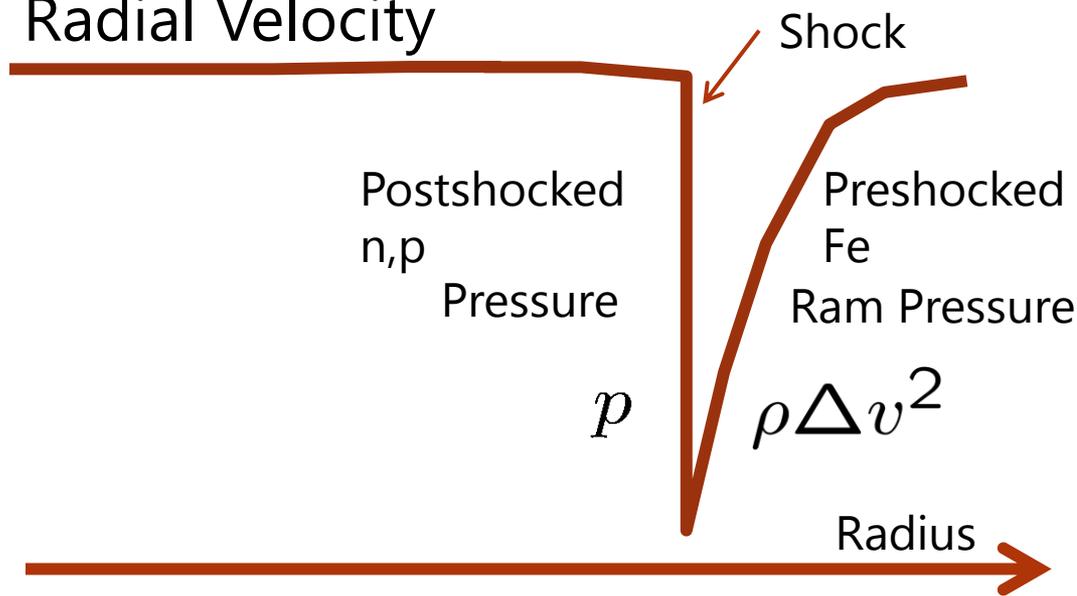
# Basic setup



- (1) Gravitational Collapse
- (2) Core-bounce by nuclear force
- (3) Shock propagation and stalling

# Key aspects of Neutrino Mechanism

## Radial Velocity

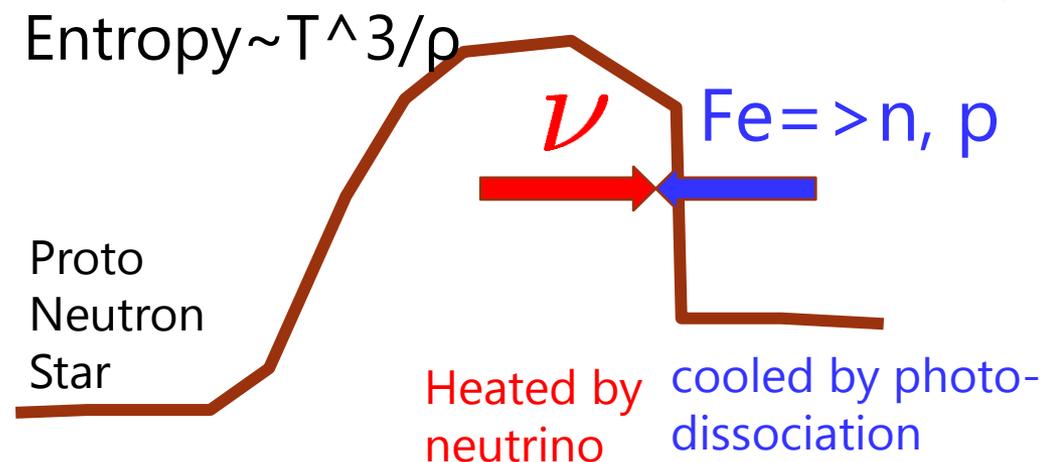


When the shock is stalling, Pressure inside and ram pressure outside balances.

$$p \sim \rho \Delta v^2$$

RHS is determined by stellar structure (density profile).

## Entropy $\sim T^3/\rho$



LHS is determined by two ingredients.

(1) Photo-dissociation

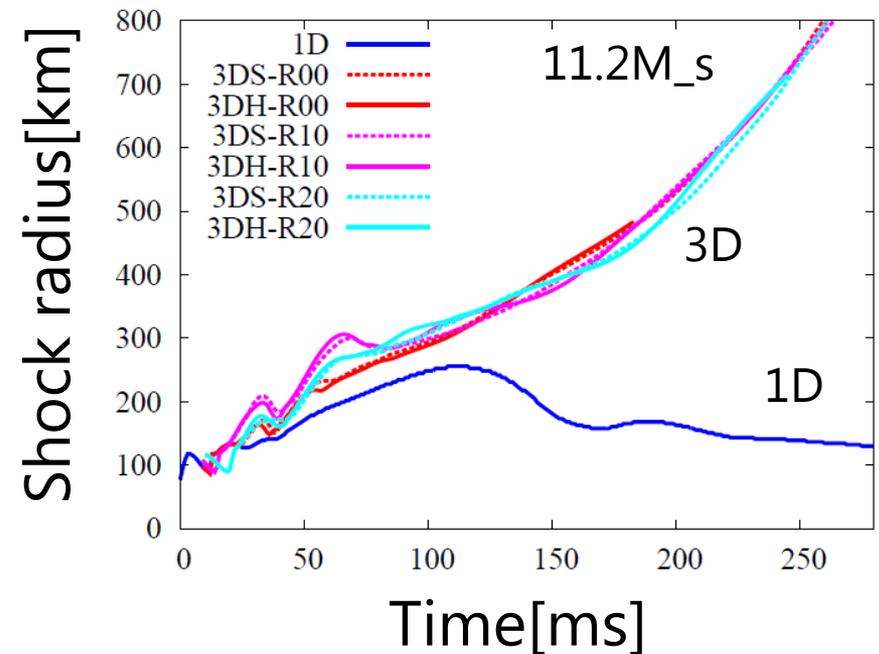
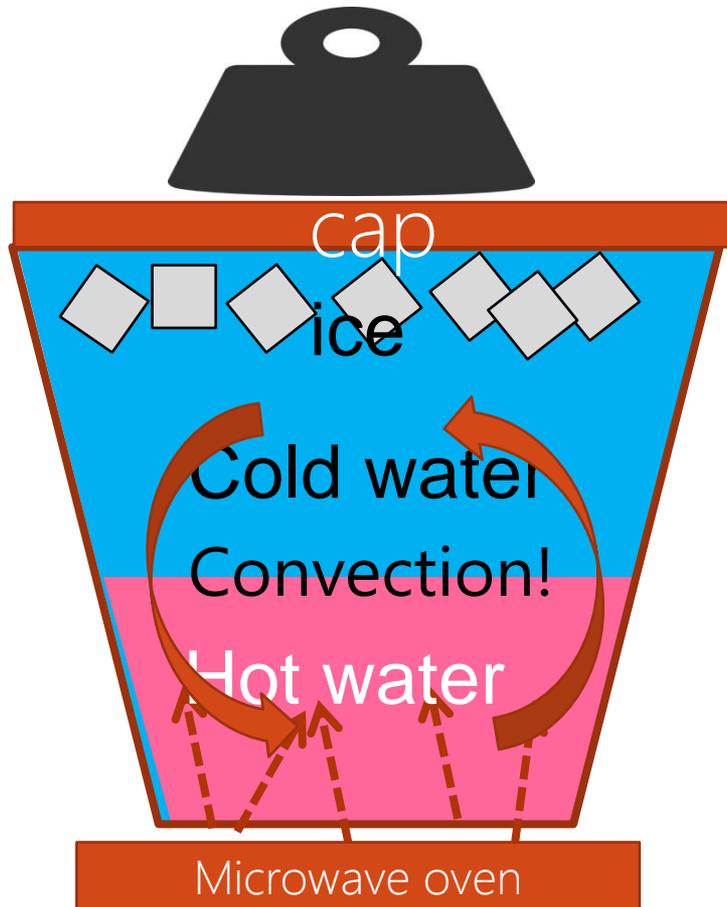


(2) Neutrino Heating



**From 1D to 3D**

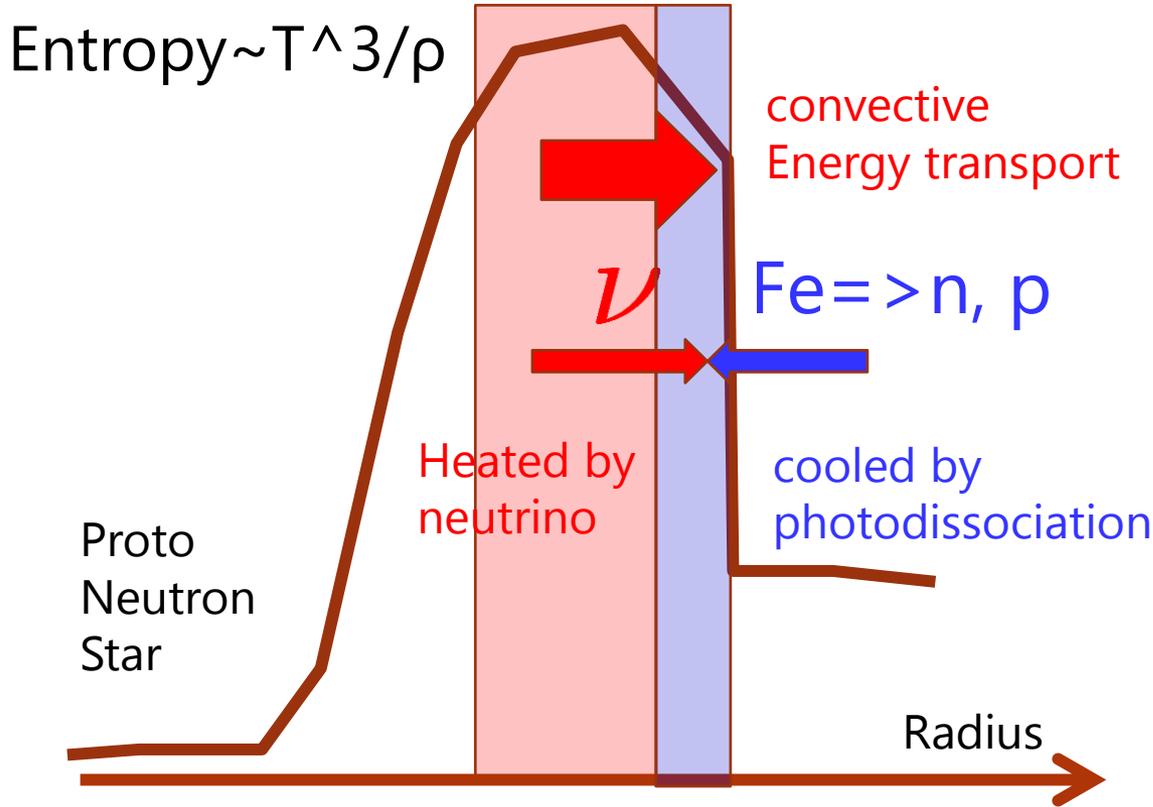
# Era of 3D simulation is coming!



2 month times 16,000 cores are used in K computer

Most distinct development is shift from 1D to 3D(or 2D)!  
We succeed to make a few explosion models!

# Key aspects of Neutrino Mechanism

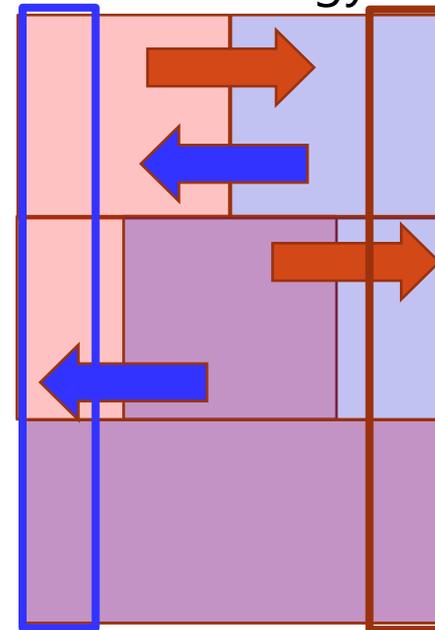


Cooler than the initial state but  $\nu$  heat is active

Negative entropy gradient leads Rayleigh-Taylor instability

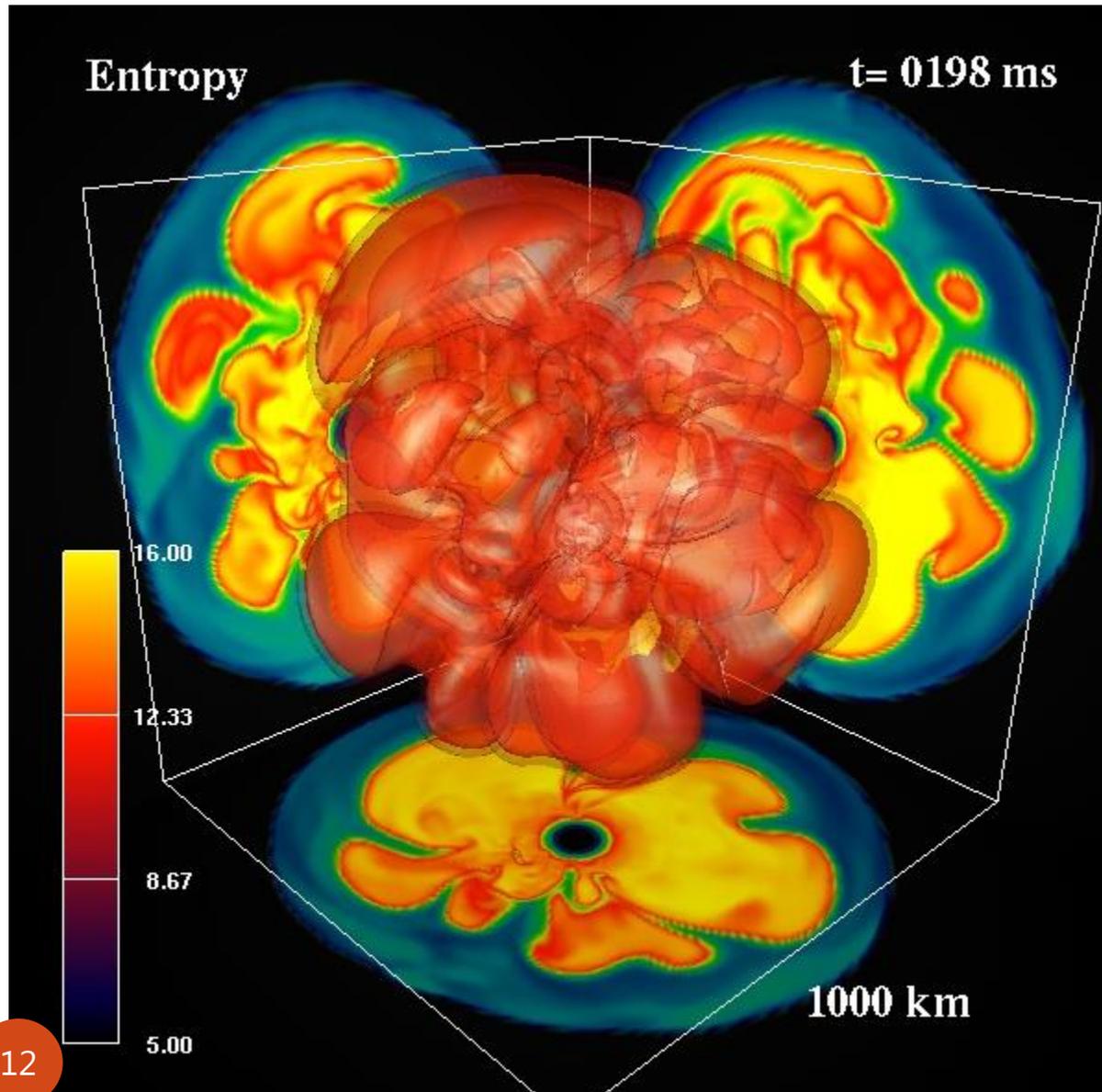
(Cold heavy matter is put over Hot light matter)

Rayleigh-Taylor convection transfer energy outward.



Hotter than the initial state

# Shape of the explosion ?



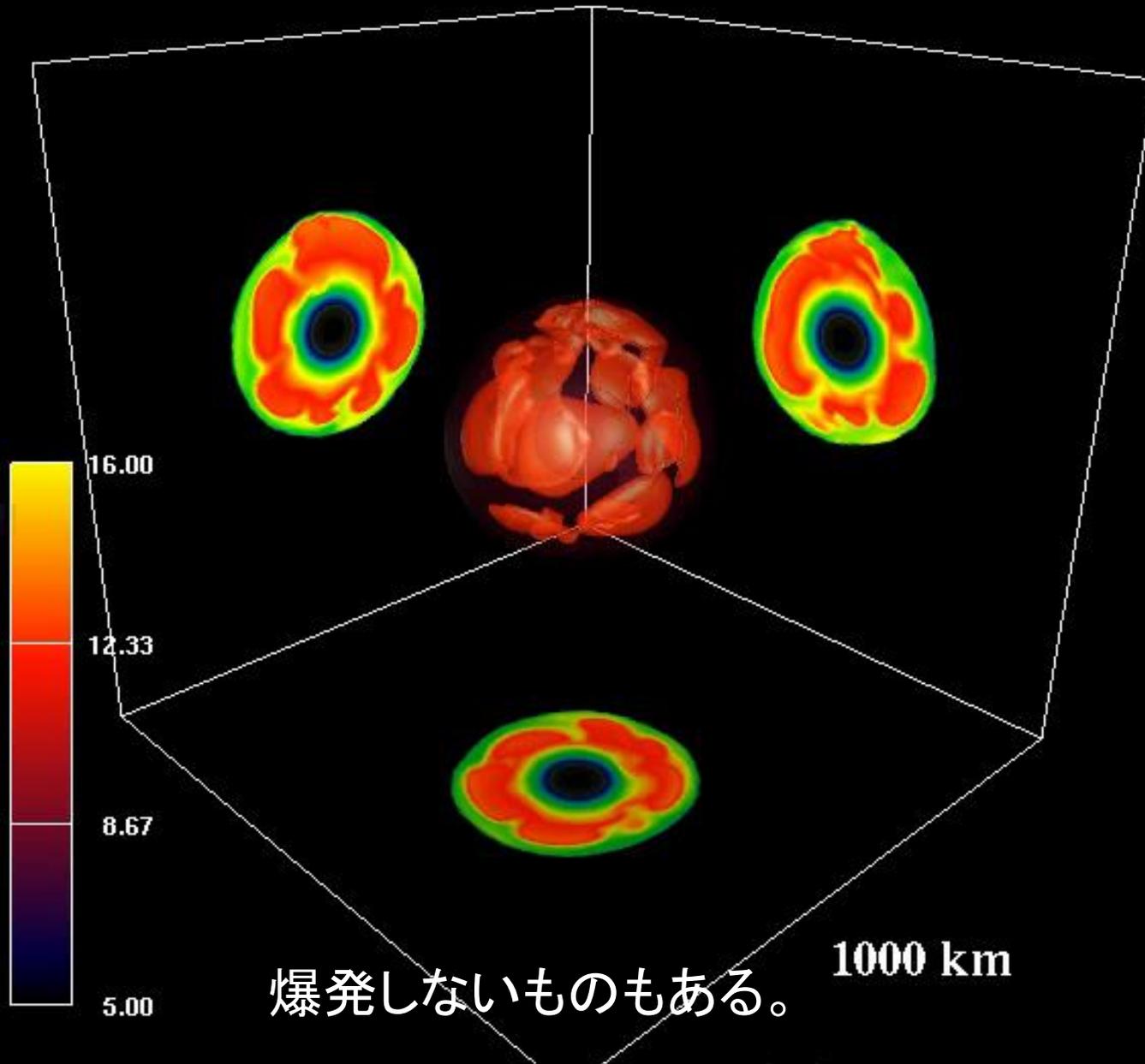
Many hot bubble is observed.

That is evidence of strong convection.

Entropy

27.0M\_s R0.0

t= 0150 ms

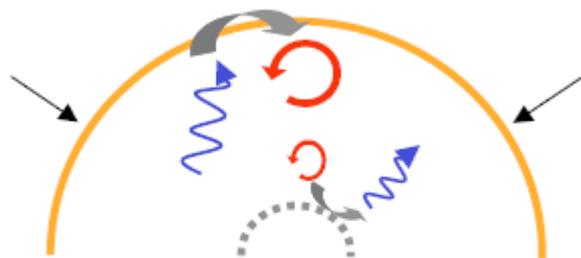


爆発しないものもある。

# SASI

## (Standing accretion shock instability)

Scheck+ 2008

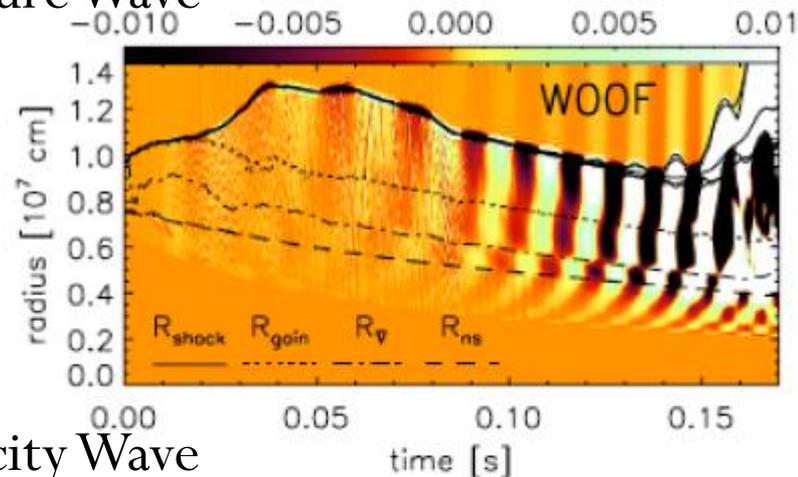


Advective-acoustic cycle

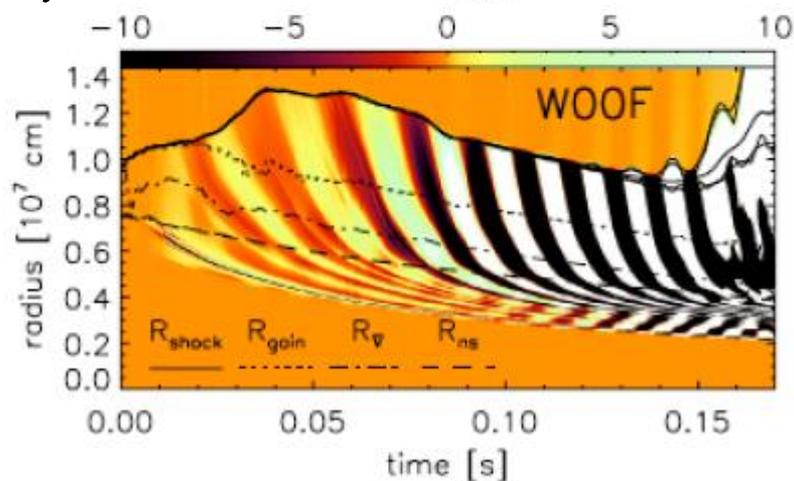
From Foglizzo's slides

Standing Accretion Shock Instability(SASI)  
渦が落ちる時間スケールで成長が律速。  
上から物がどんどん降ってくるとき成長しやすい

Pressure Wave



Vorticity Wave



# 今後解明すべきこと

(A) 3Dでは爆発するかどうか、ぎりぎりの問題。一般相対論の効果を入れ、ニュートリノ輻射輸送をより精密化する。

(B) シミュレーションで起きている対流(乱流)の強さは現実と同じなのか？

(1) 空間解像度や流体手法は十分か？

(2) (弱)磁場、(弱)回転の影響は？

(C) 超新星内での乱流モデル(長期計画)

(1) 2Dと3Dでの違いは？

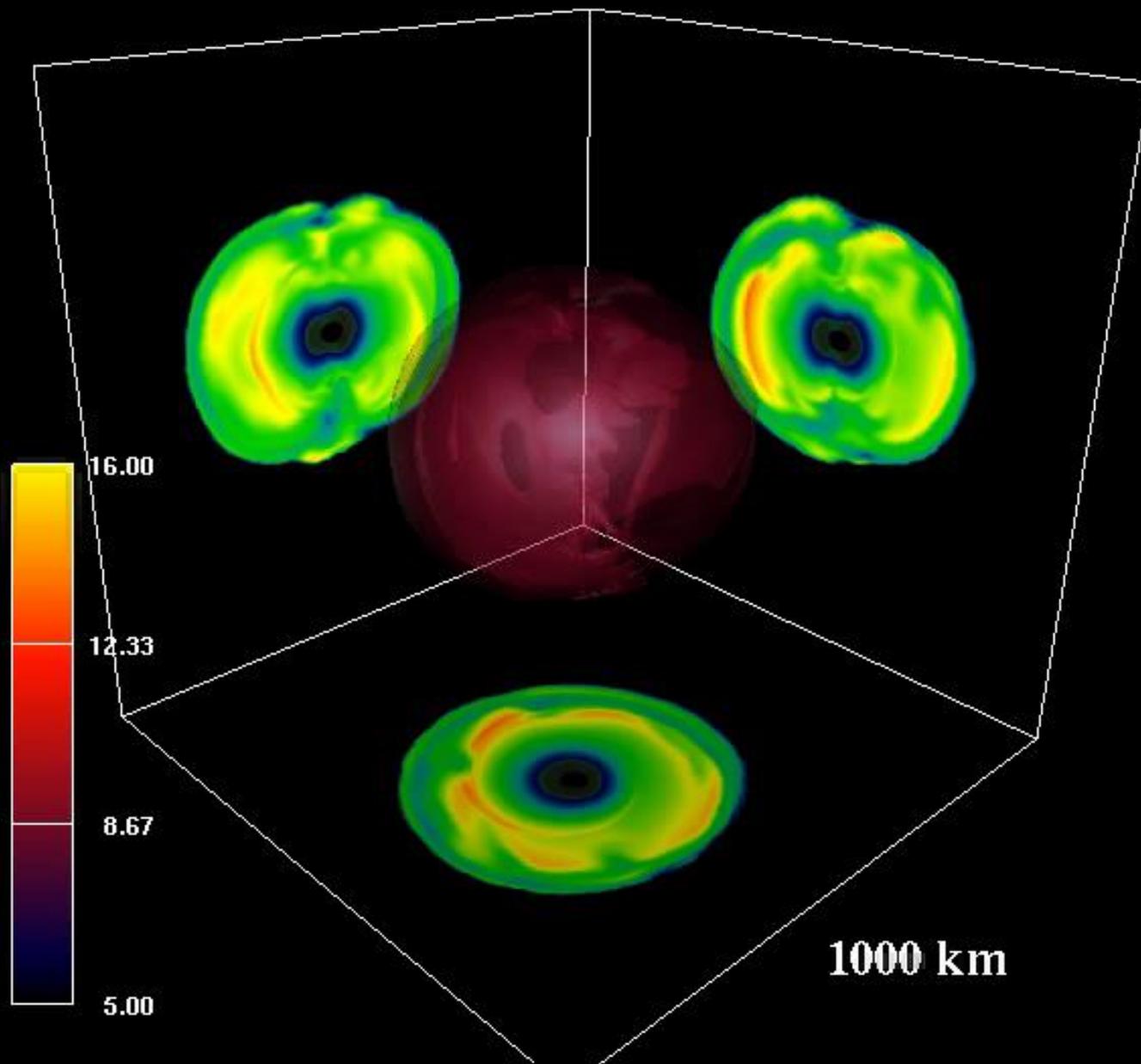
(2) エントロピーを再分配 vs  $\nu$  加熱？

3D model with rotation

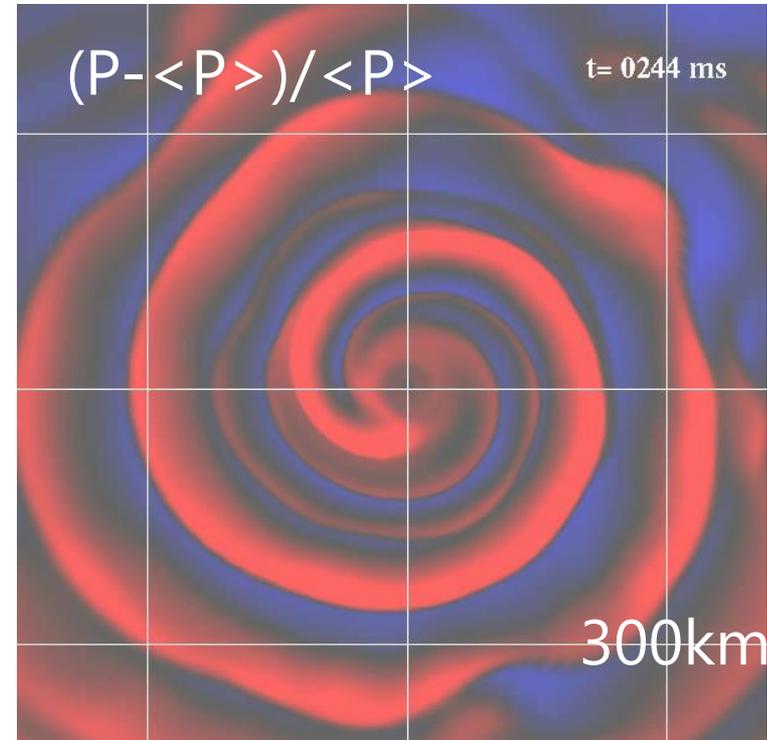
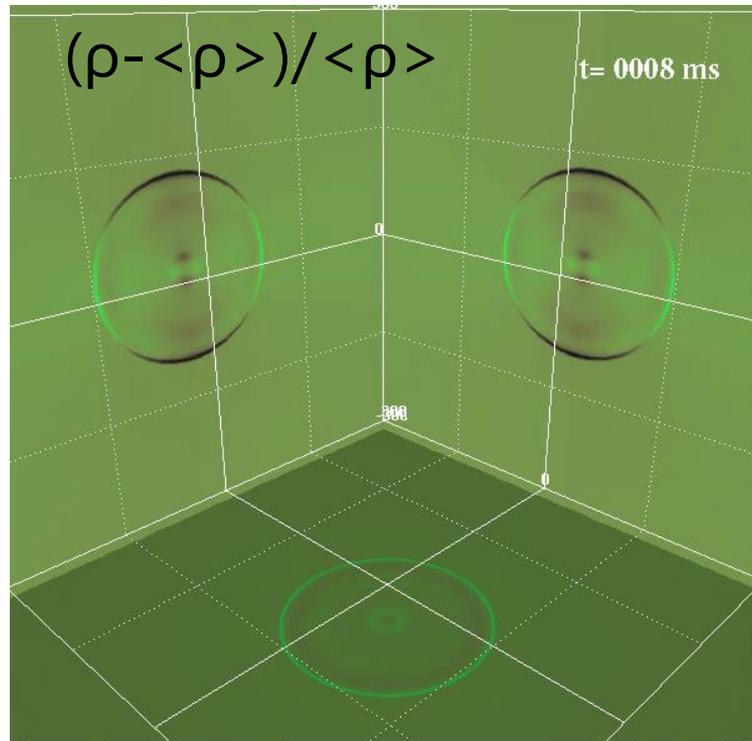
27.0M\_s R2.0

Entropy

t= 0102 ms



# Spiral Mode

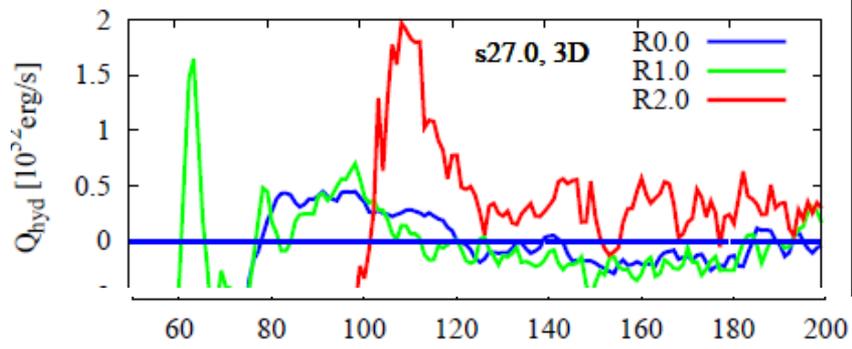
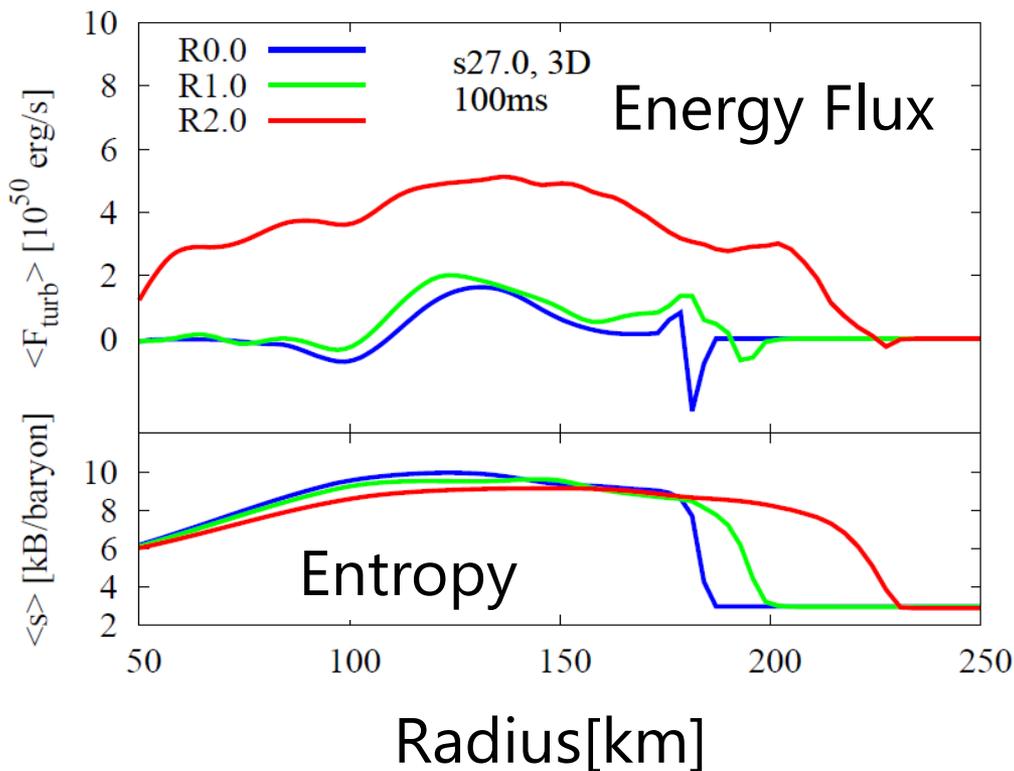


Rotational energy(T)/gravitational energy(W)  
reach some criteria => Spiral mode arises

In the rigid ball: 14%

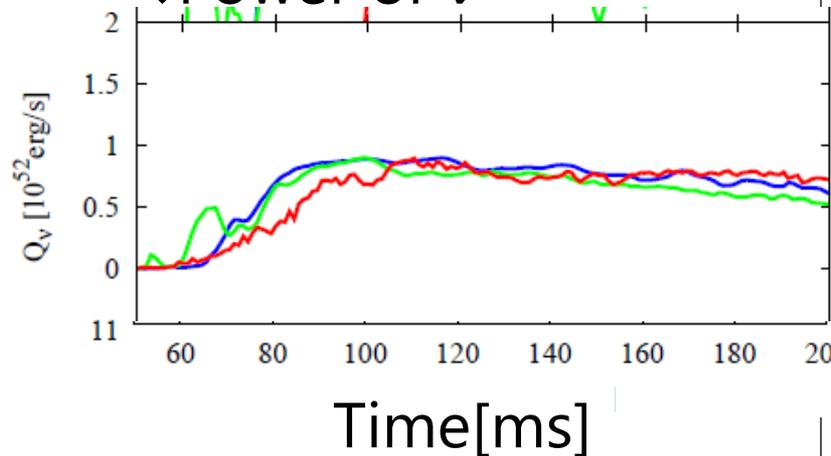
In SNe case: ~ 6% (Called low-T/W instability)

# Energy Transport by spiral mode



↑Power of spiral mode

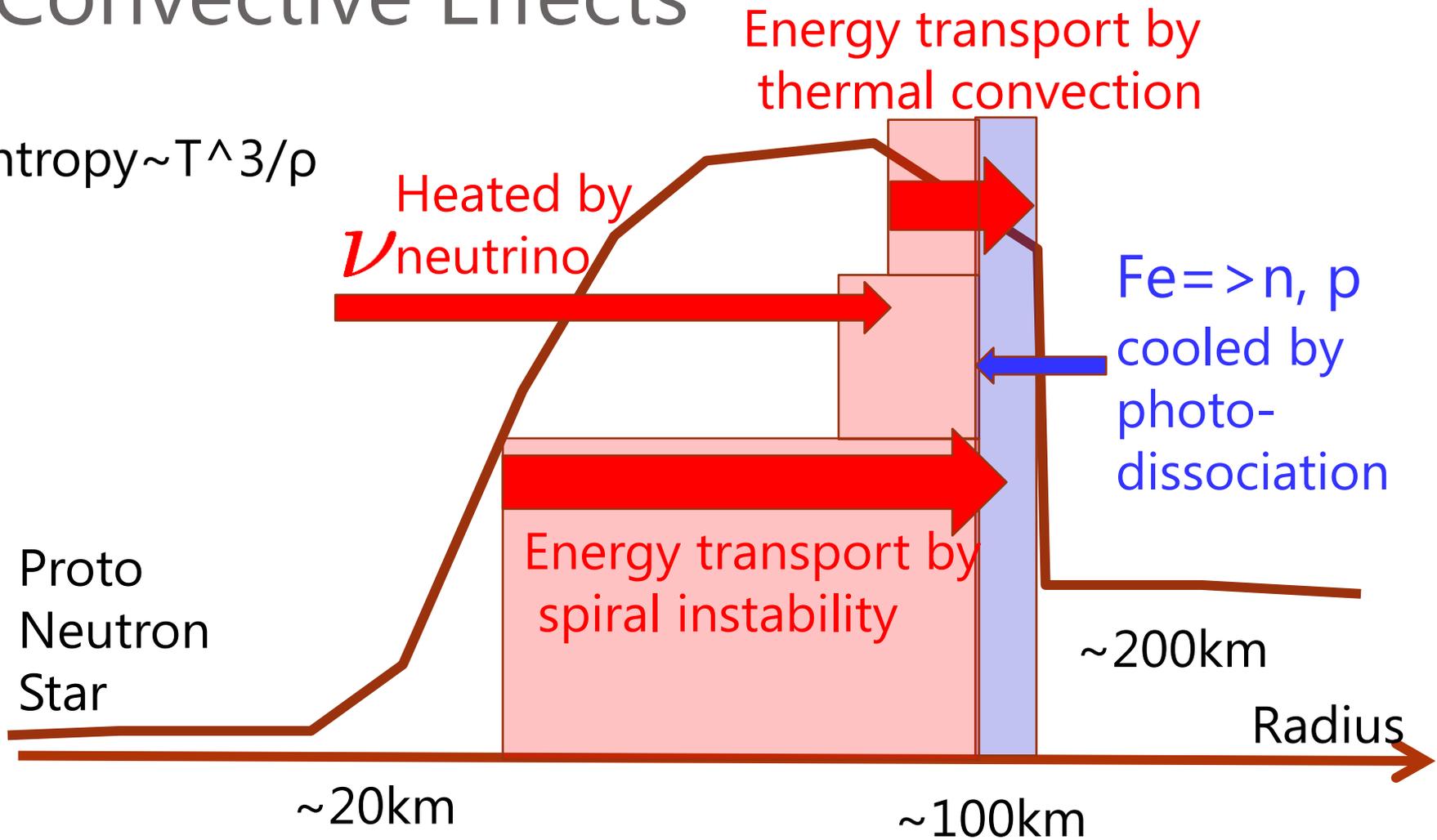
↓Power of  $\nu$



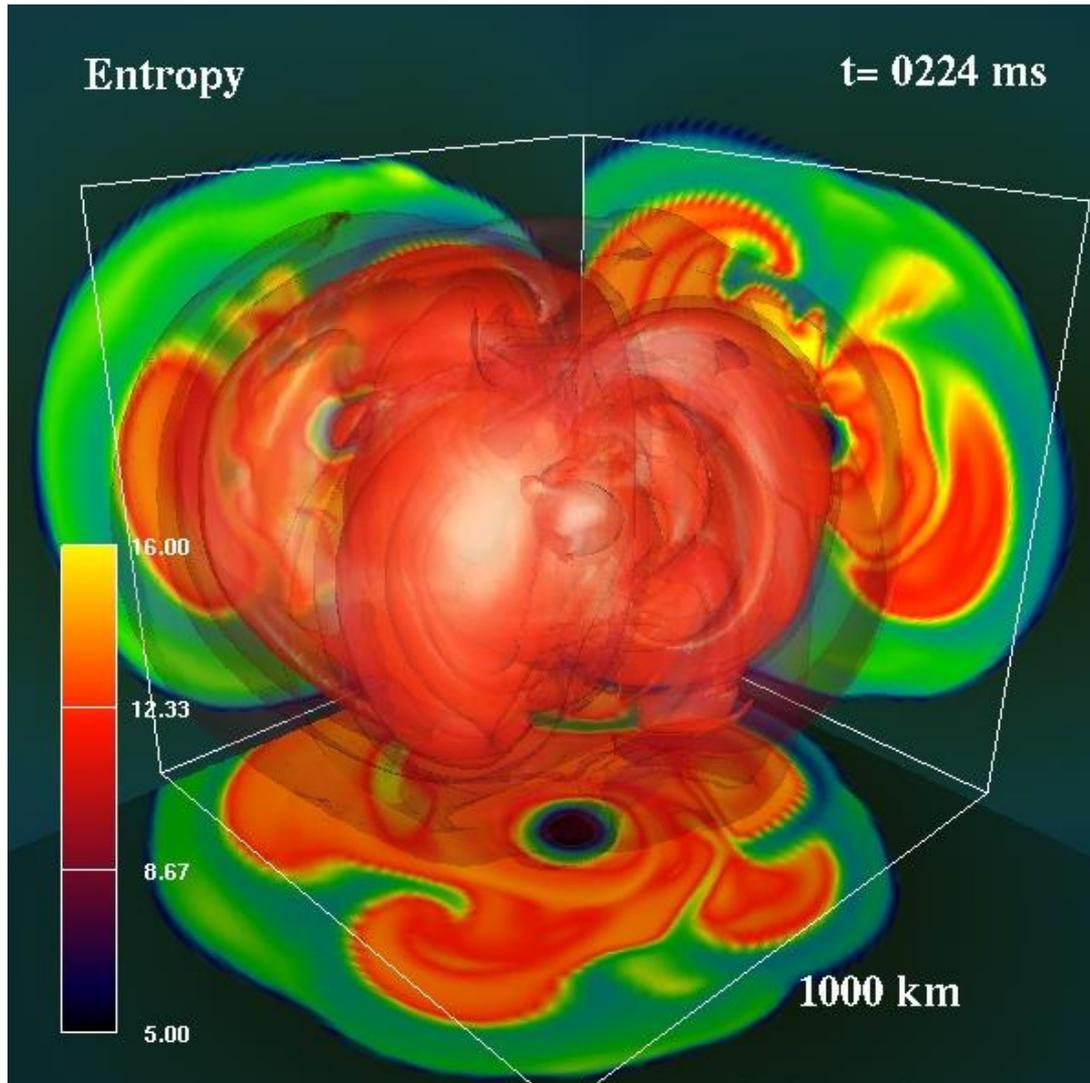
Spiral modeがエネルギーを内側から外側へ運び、爆発を助ける。

# Convective Effects

Entropy  $\sim T^3/\rho$



# Rotational Explosion



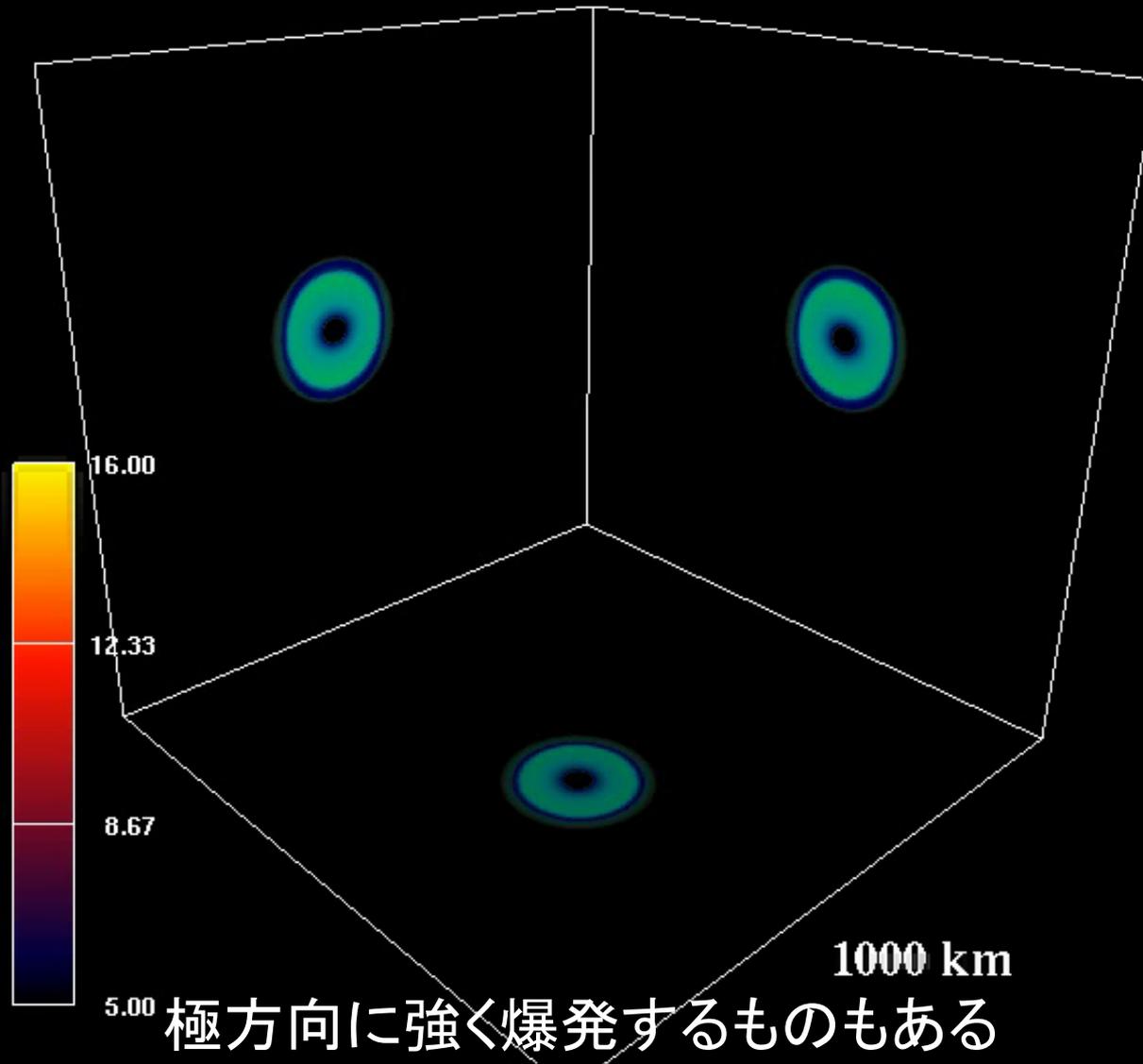
Strong expansion is found at equatorial plane

$$E_{\text{exp}} \sim 5 \times 10^{50} \text{ erg}$$

13.0M<sub>s</sub> R2.0

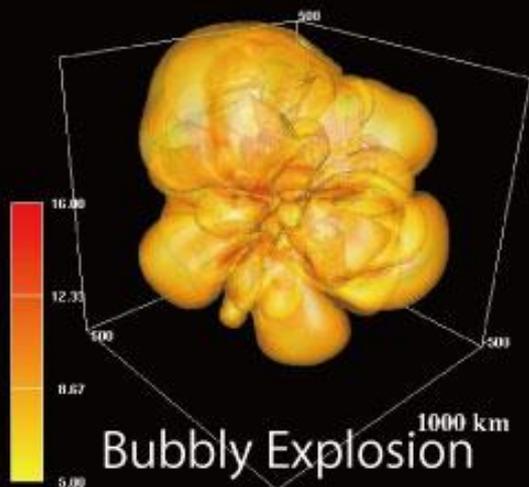
Entropy

t= 0011 ms



11.2 wo rotation

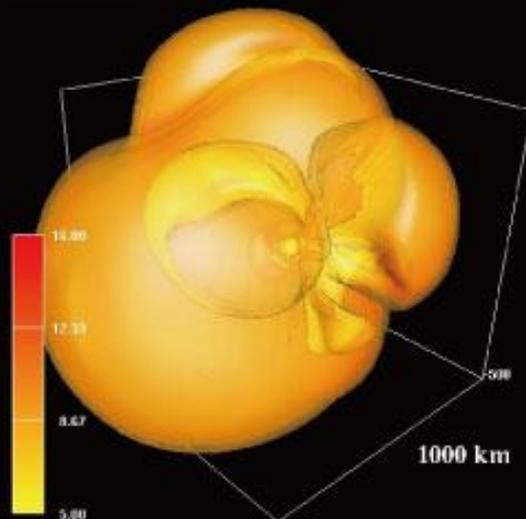
t= 0220 ms



Bubbly Explosion

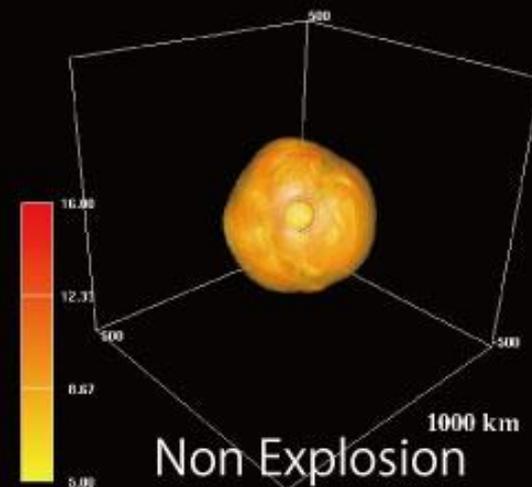
13.0 wo rotation

t= 0270 ms



27.0 wo rotation

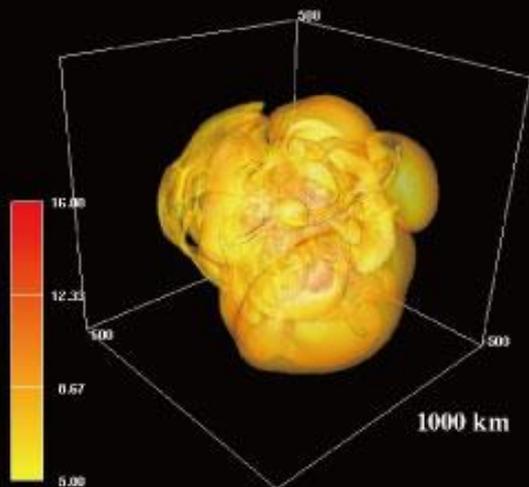
t= 0250 ms



Non Explosion

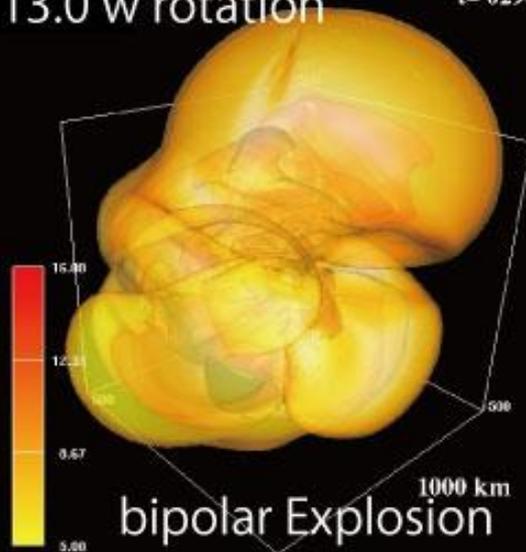
11.2 w rotation

t= 0200 ms



13.0 w rotation

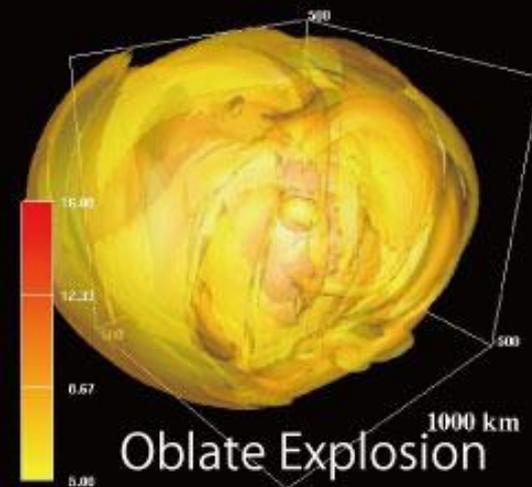
t= 0290 ms



bipolar Explosion

27.0 w rotation

t= 0250 ms



Oblate Explosion

# Summary

v-transportを解きながら3次元計算ができるようになった。  
ある程度正しい理論モデルが出来ている感触。観測との比較など、今後議論が活発に。

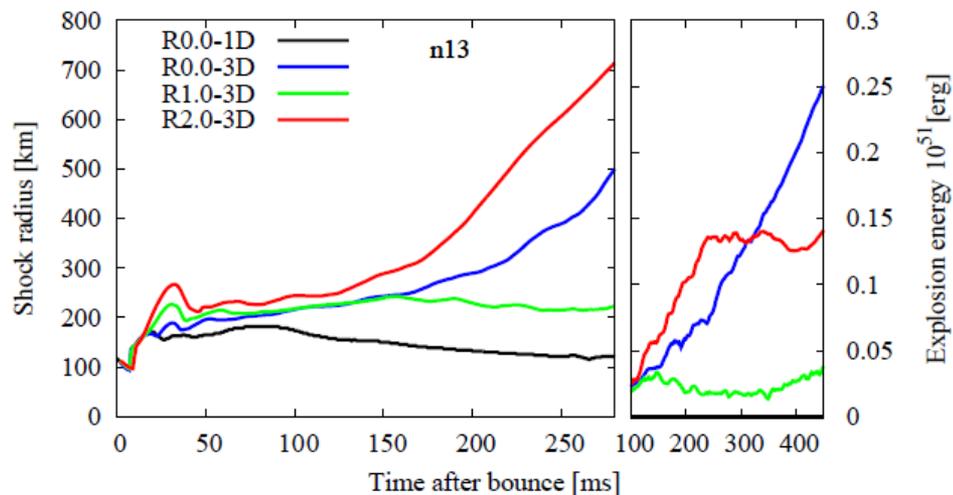
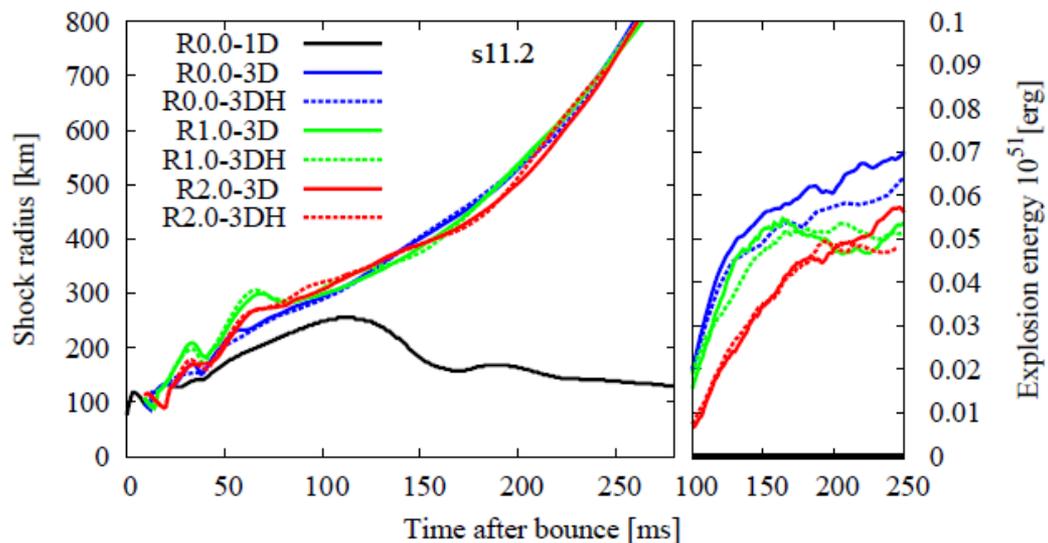
(1) 対流は強力に爆発をサポートする。

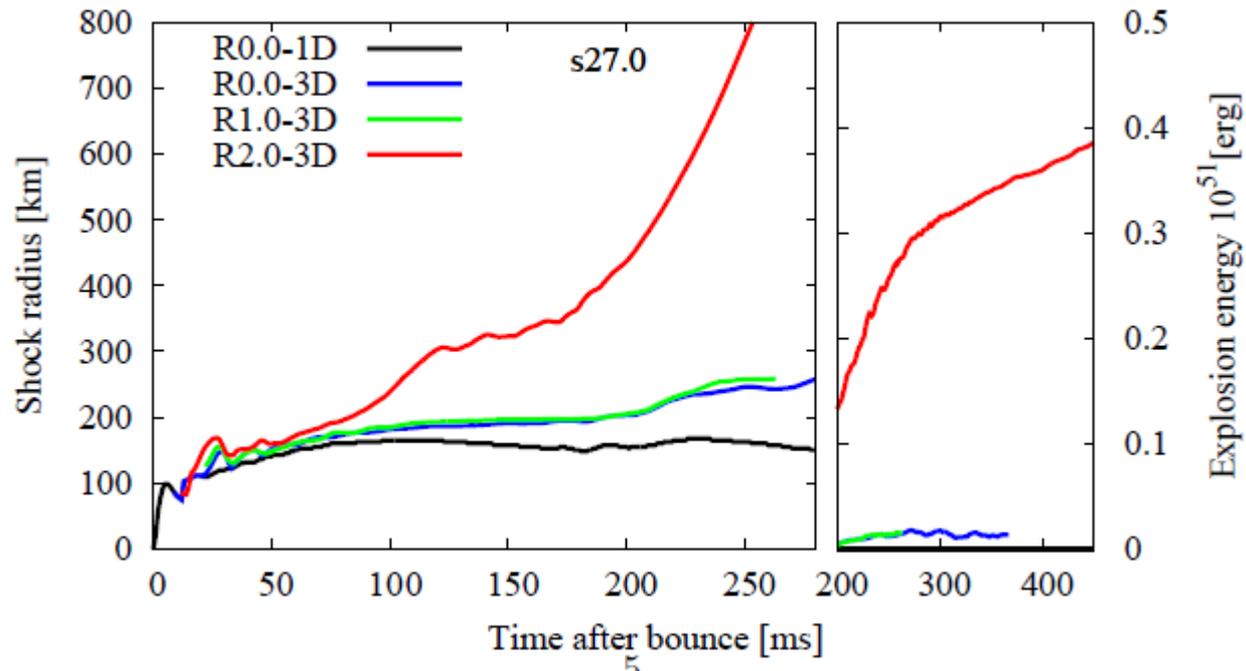
(2) 軽い星では爆発に成功するものも出てきた。

ただし、ぎりぎり。より精密なシミュレーションが必要。

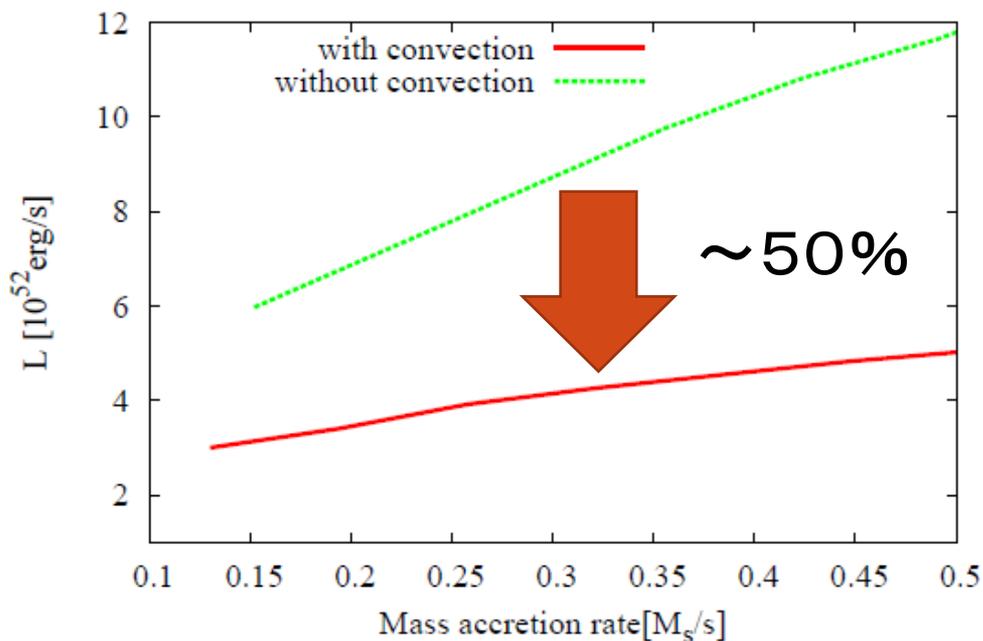
(3) 自転も高速自転の場合はスパイラルモードが立って爆発を助ける。扁平な形状になる。

# 平均衝撃波半径や爆発エネルギー

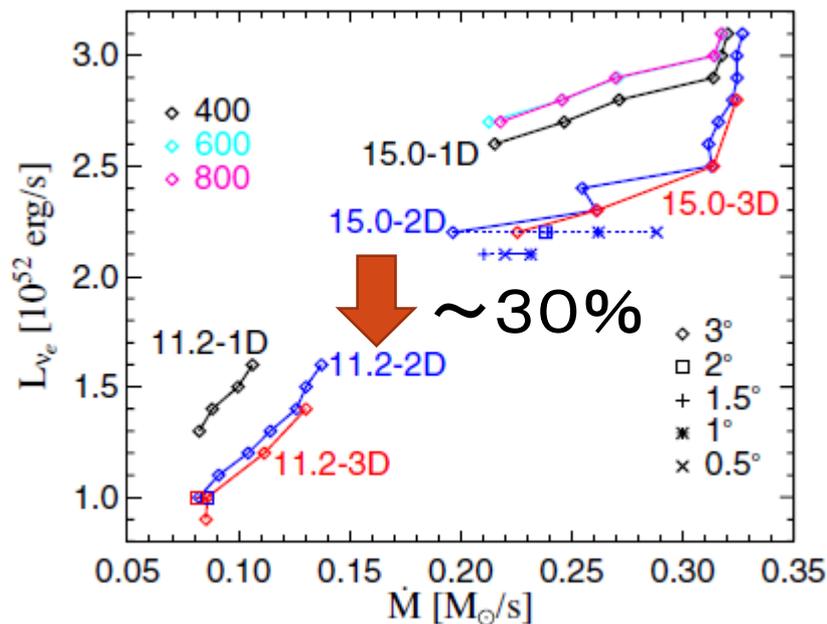




# 対流による助力の定量的な評価



Yamasaki&Yamada 2006



対流の効果はクリティカルルミノシティに直して  
~50%に及ぶかもしれない。

# Toward making convincing model

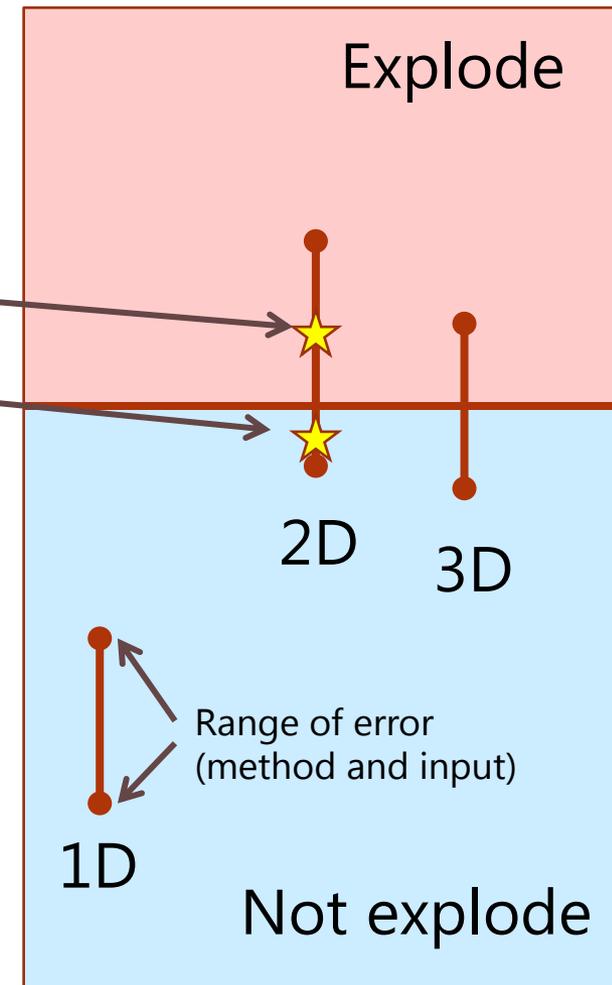
Multi-D model is very delicate that depends on input physics and methods strongly!

## 2D models for multiple progenitors

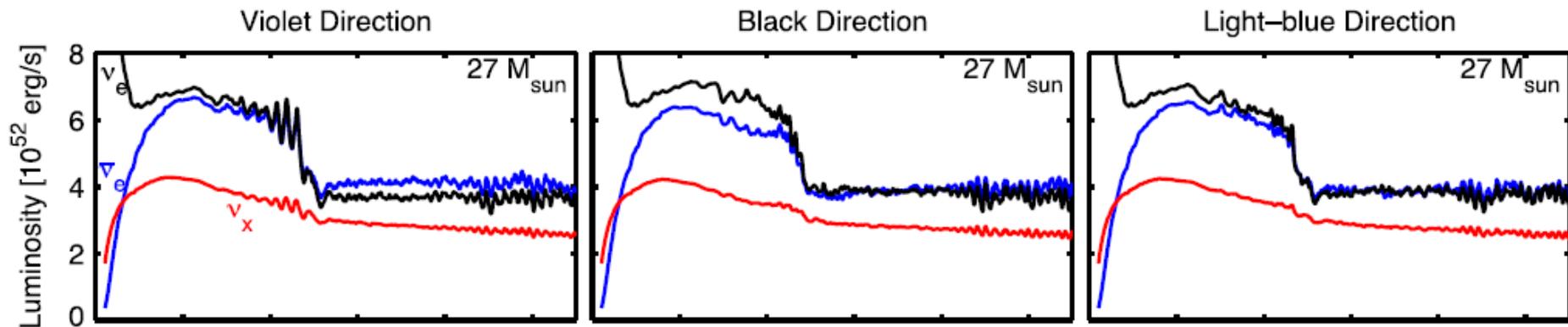
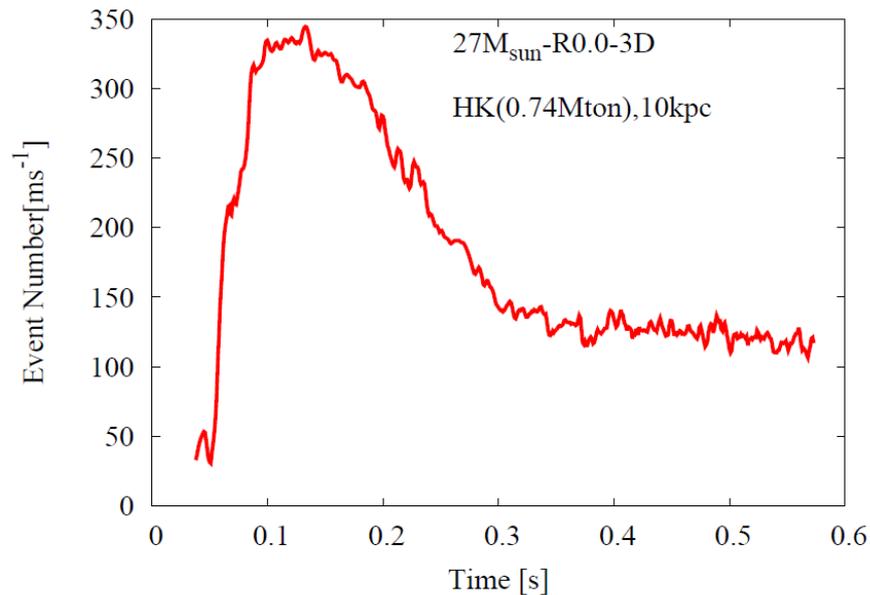
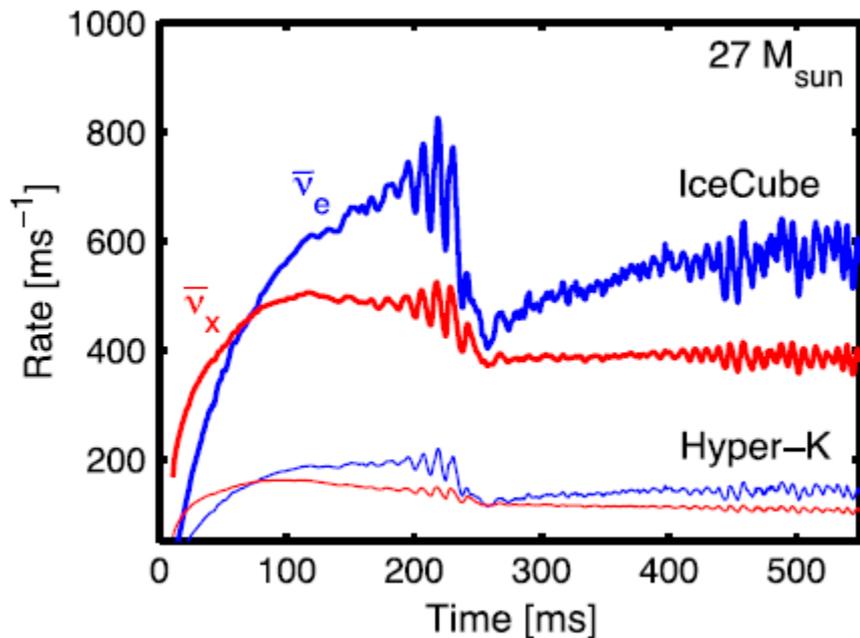
- Bruenn+12: all explode
- **Mueller+13: almost all explode**
- Dolence+14: not explode
- Nakamura+14: all explode
- Suwa +14: half of them explode
- Hanke in prep: almost all explode

## 3D models for multiple progenitors

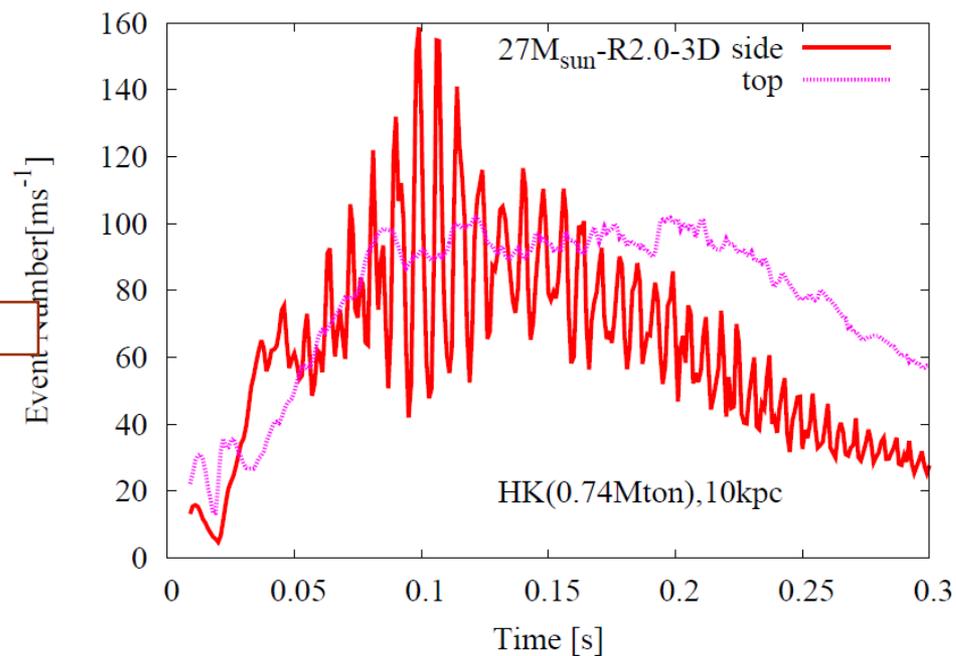
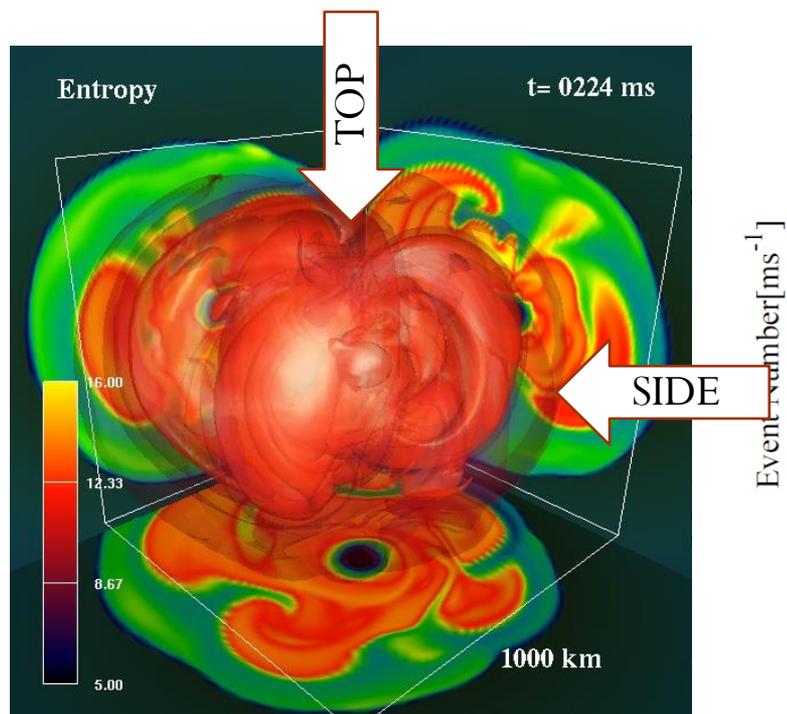
- **Hanke in prep: not explode(3model)**
- Takiwaki in prep: half of them explode (failed in heavier progenitor)



# ニュートリノによるSASIの検証



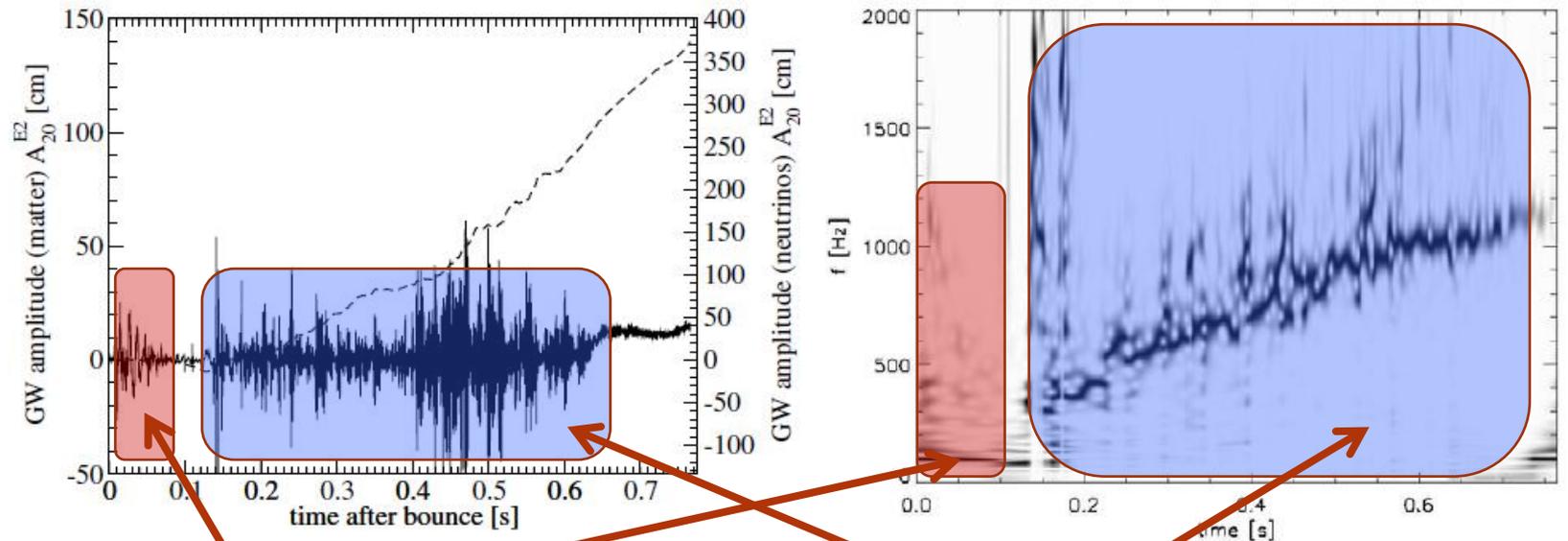
# ニュートリノによるSpiral modeの検証



Takiwaki+ in prep

Spiral modeの周期でニュートリノが時間変動する。

# 重力波によるSASIの検証



Convection

SASI

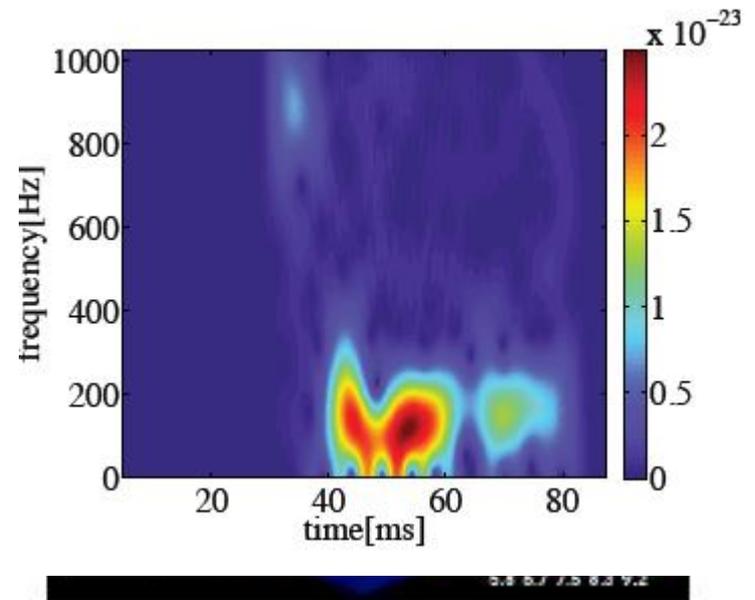
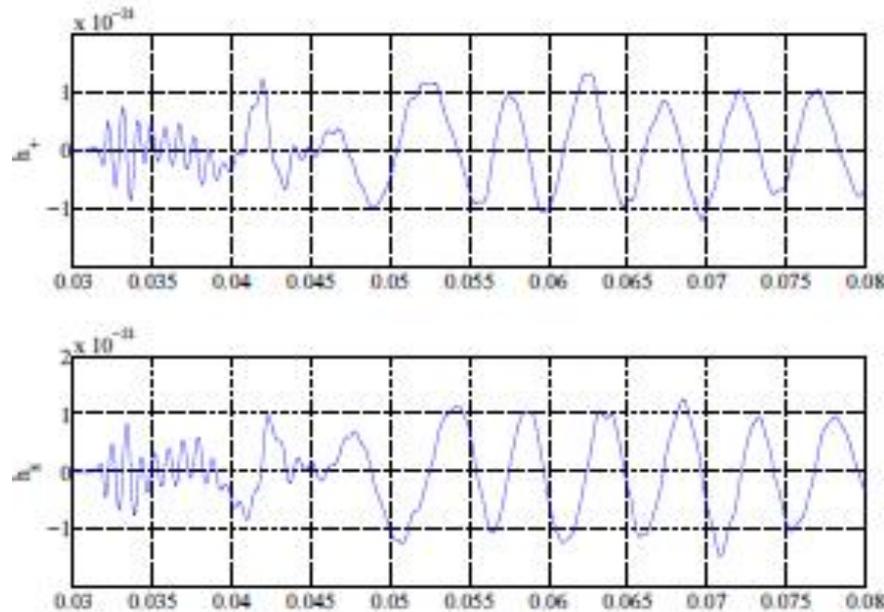
Mueller+13

$$f_p = \frac{N}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{GM}{R^2} \sqrt{\frac{(\Gamma - 1)m_n}{\Gamma k_b T}} \left(1 - \frac{GM}{Rc^2}\right)^{3/2}$$

ConvectionやSASIは重力波に反映される。

中性子星付近のBV周波数に応じた周波数で揺れる。

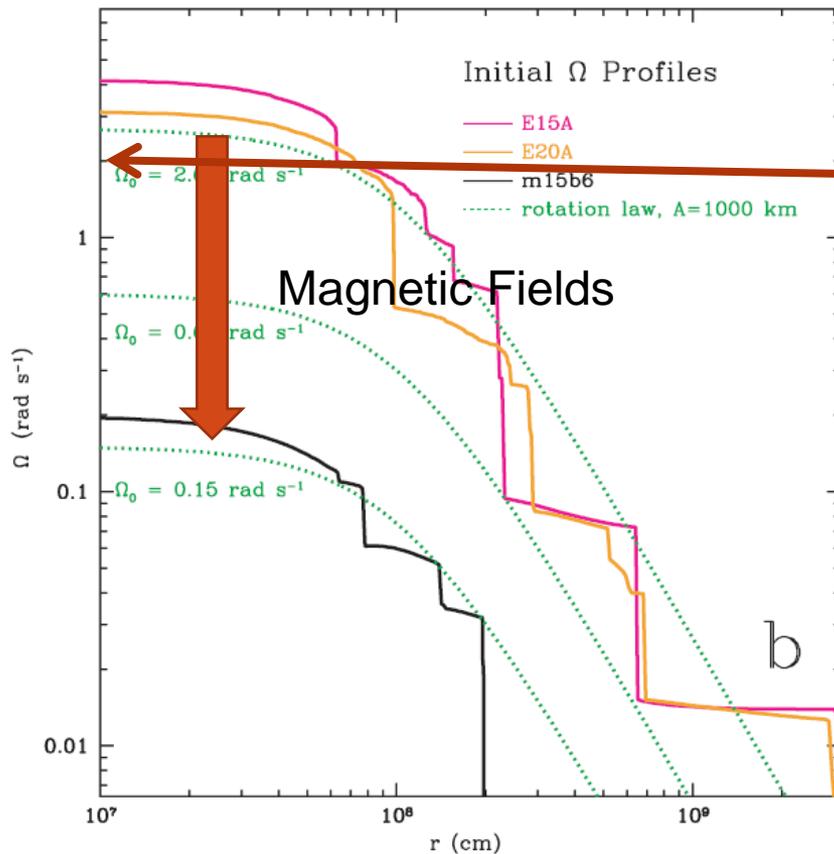
# 重力波によるSpiral modeの検証



## Spiral modeに典型的な周波数

$$\Omega_{\text{rot}} + \Omega_{\text{aco}}, \quad \Omega_{\text{rot}} \equiv 2 \frac{V_{\phi}}{2\pi\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad \Omega_{\text{aco}} \equiv 2 \frac{C_s}{2\pi\sqrt{x^2 + y^2}}$$

# Rotation rate before the collapse



Our model of rapid rotation

親星の進化計算で磁場をいれると、  
回転速度は非常に下がる。  
超新星コアは速く自転してはいけない？

議論：

この磁場の入れ方には不定性がある。  
精密理論ではない。

Ott+ 2006

# Rotation rate after the collapse

S27-R2.0 => 2000 rad/s@400ms after bounce

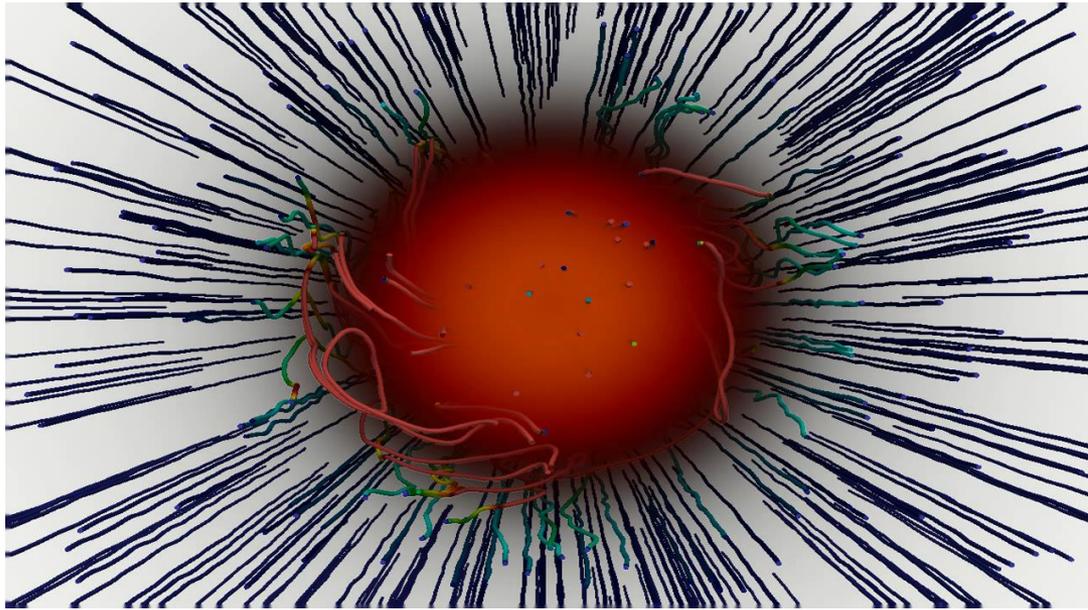
Initial period of pulsar ~10ms => 100 rad/s

Fastest pulsar ~ 16ms

Club 19 ms

Ott+ 2006

# ニュートリノ + 磁場



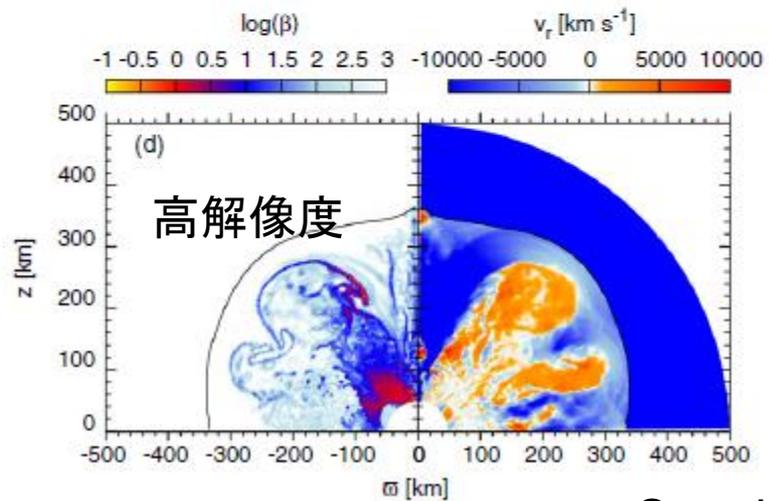
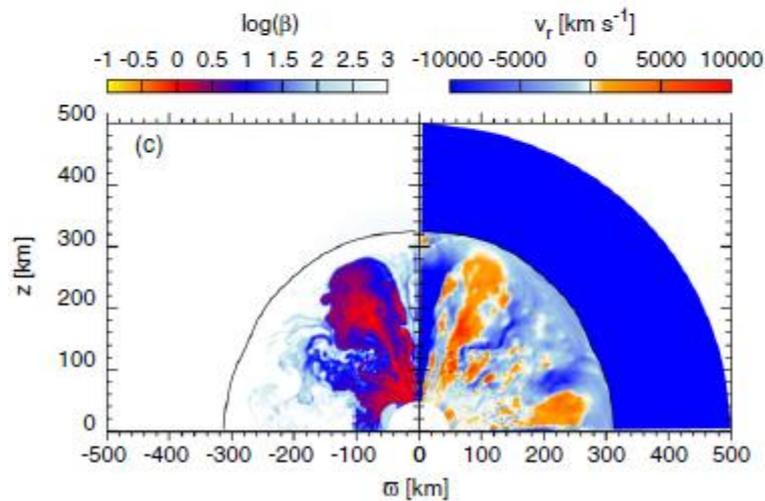
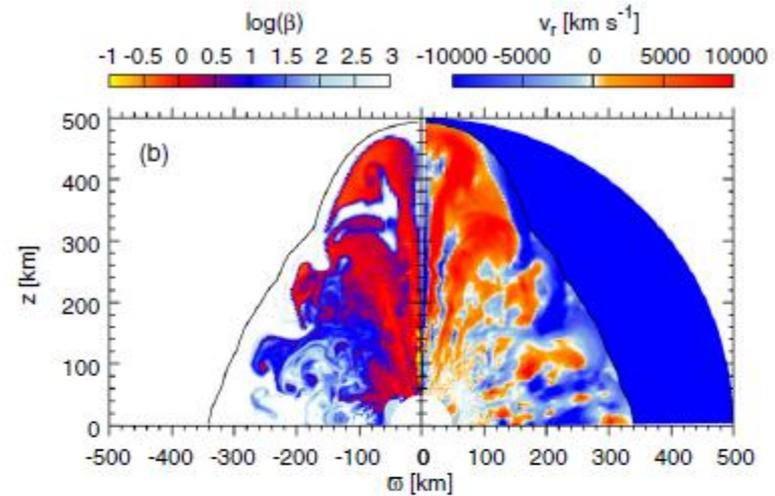
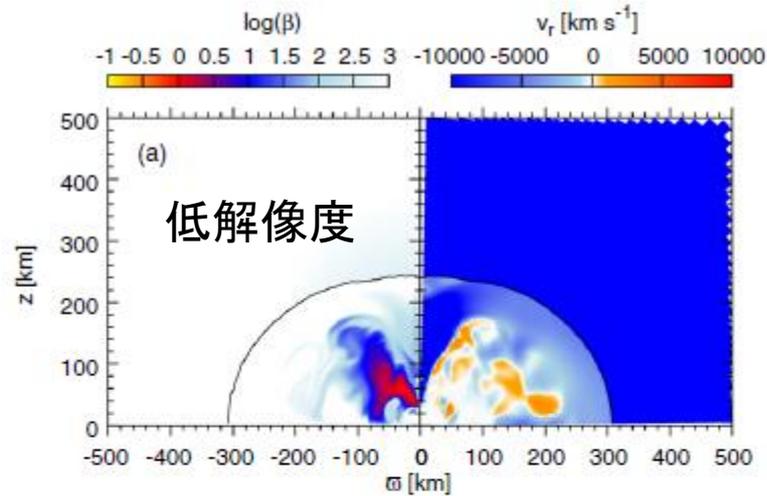
Masada+ 2014

磁気回転不安定性で  
対流安定な場所でも  
乱流的になる。

それがニュートリノ光  
度が上がったたり、加熱  
に効くかもしれない。

高解像度計算が必要  
すぐに完全な計算はできない  
徐々に調べる

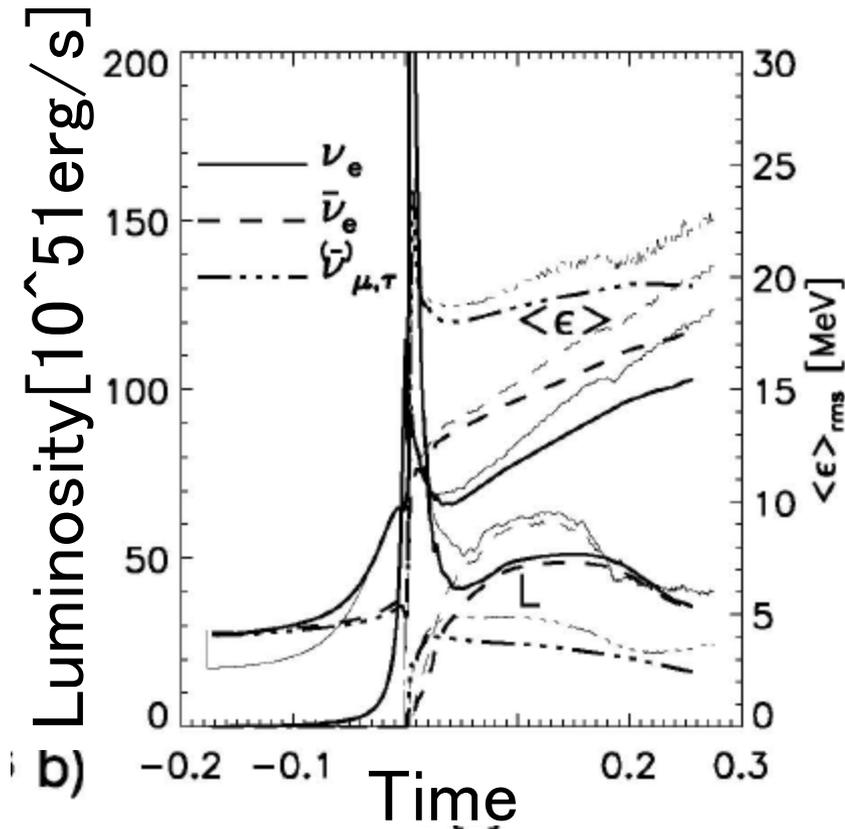
# MRI+v-heating



Sawai+ 2014

MRIで強いconvectionが起きて  
角運動量を輸送、赤道面に強く爆発

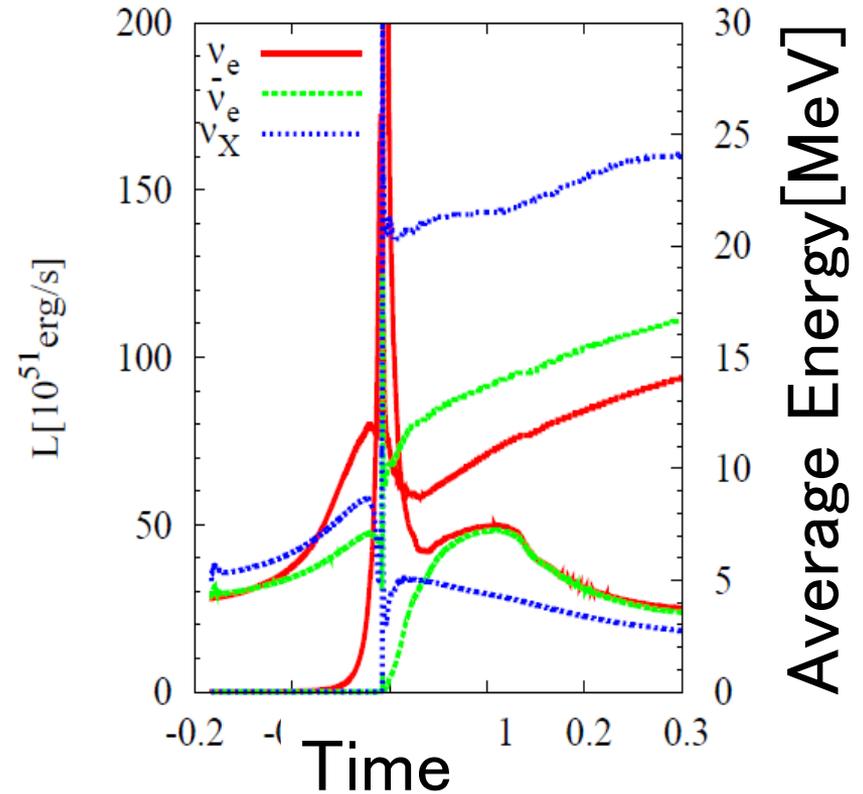
# ルミノシティとエネルギー



Liebendoerfer et al 2005

Sn and VE

General relativistic simulation



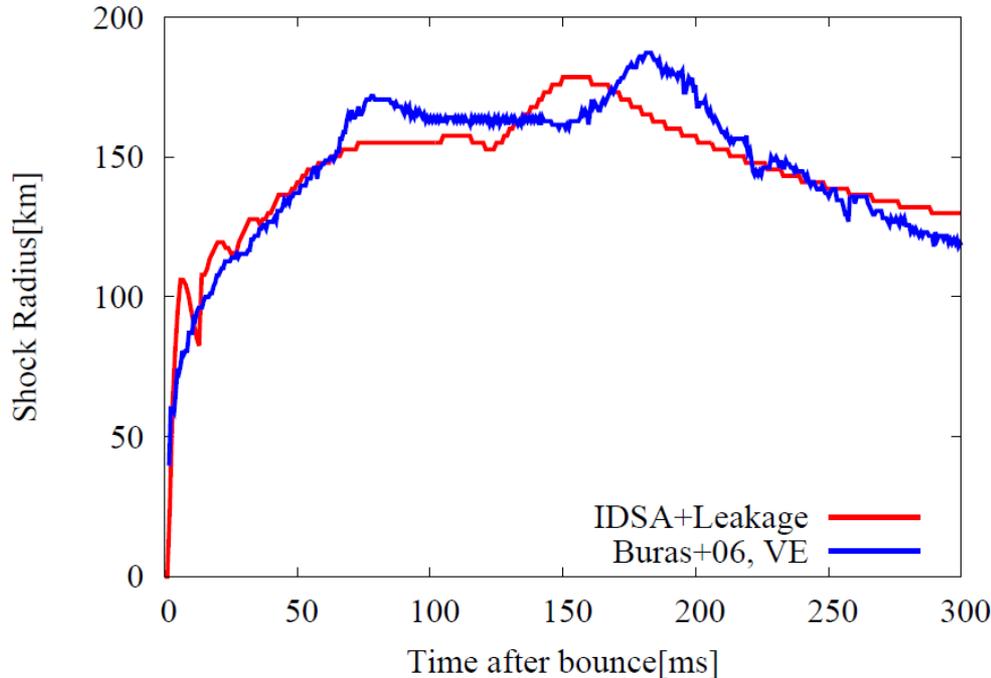
Our newest version of IDSA

ecp,aecp,eca,csc,nsc,pap,nes,nbr

Newtonian Gravity

およそ先行研究を再現。

# 衝撃波半径の詳細な比較



Buras+06の  
ニュートニアンモデル  
と比較した。

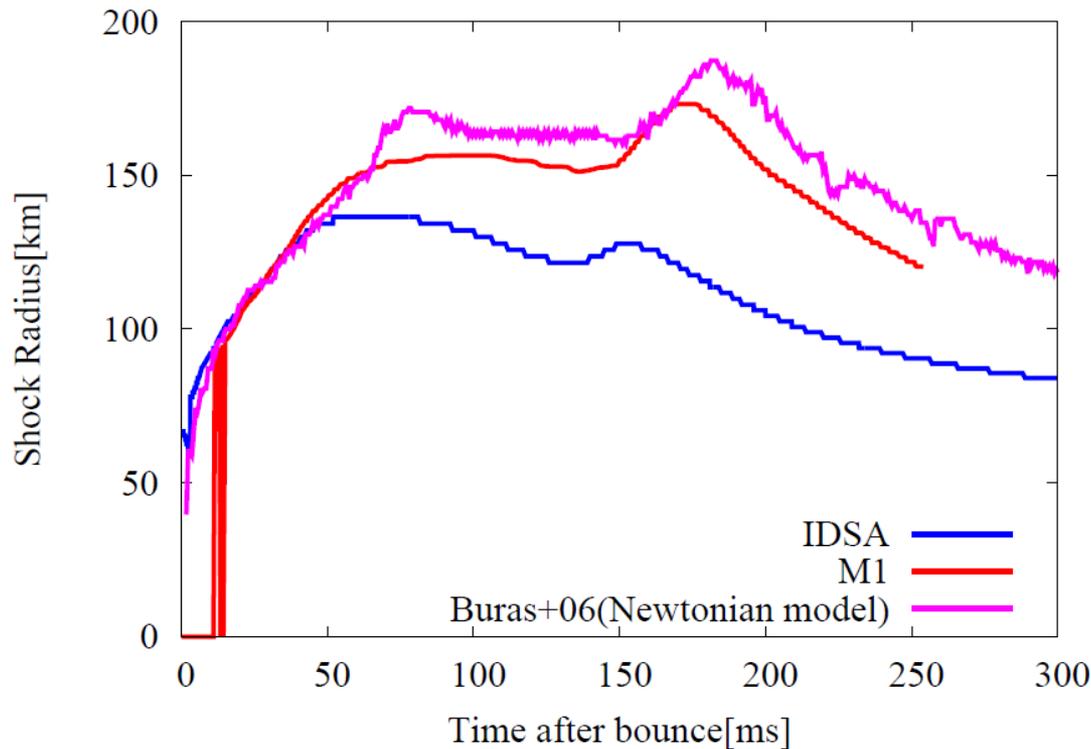
注)ぎざぎざは論文の図から  
トレースしたために生じている。

かなり合っているが、以下の+-の効果打ち消し合う形になっている。

+ : 電子と $\nu$ の散乱などが入ってない

- : IDSAはVEに比べてニュートリノの特性速度が速く、物質を通りぬける時間が短い。温める時間が少ない。

# 衝撃波半径の比較



VE > M1 > IDSAの順。

第一原理的なもののほど、ニュートリノがフリーストリーミングになるのが遅く、長く物質を加熱するせいだと予想している。