

# 超新星の3次元回転爆発

滝脇知也 (国立天文台)

固武慶 (福岡大学)

諏訪雄大 (京都大学)

チューニング：似鳥啓吾 (理研)

牧野淳一郎 (東工大 理研)

# 分野5と超新星爆発、重要性

## 物質粒子

|      | 第1世代  | 第2世代   | 第3世代  |
|------|---|--|---|
| クォーク | <br>アップ      | <br>チャーム      | <br>トップ      |
|      | <br>ダウン      | <br>ストレンジ     | <br>ボトム      |
| レプトン | <br>電子ニュートリノ | <br>ミューニュートリノ | <br>タウニュートリノ |
|      | <br>電子       | <br>ミューオン     | <br>タウ       |

ビッグバン  
構造形成(課題4)  
星形成

銀河形成へFB



核力(課題1)  
原子核(課題2)  
ニュートリノ

超新星爆発(課題3)

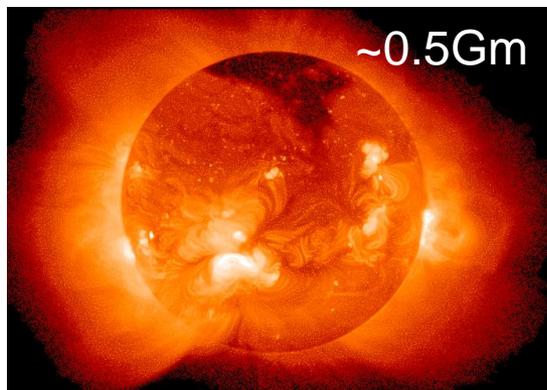
次世代観測機器

分野5、総動員で挑む課題!

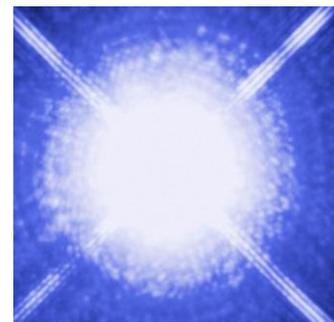
# 星の一生と最期の大爆発



ガス雲



主系列星(例えば太陽)

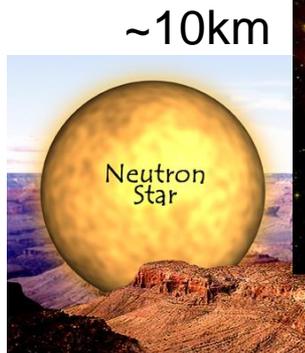


白色矮星(シリウス)

軽い星は長寿  
~100億年



重い星は短命  
~1000万年



中性子星(パルサー)  
やブラックホール



超新星残骸(Cas A)



超新星爆発(1987A)

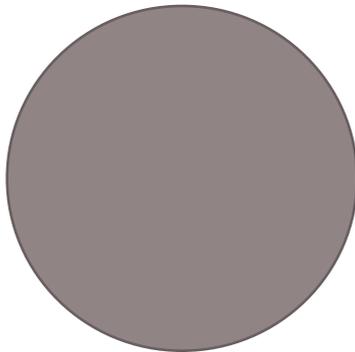


赤色巨星(アンタレス)

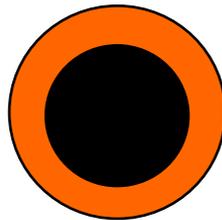
# 超新星爆発のメカニズム

- (1) 重力不安定になった鉄のコアがつぶれる
- (2) 密度が高くなり中心に中性子星ができる  
つぶれるのが急にとまるので衝撃波が伝搬
- (3) 衝撃波を中性子星から出た  
ニュートリノで温めることで元気にし、  
中性子星の外側を吹っ飛ばす

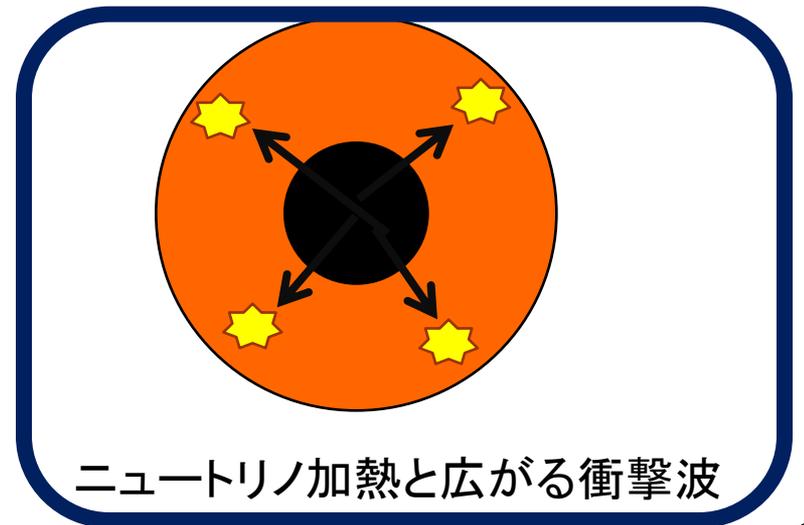
ここが難しい！



鉄コア



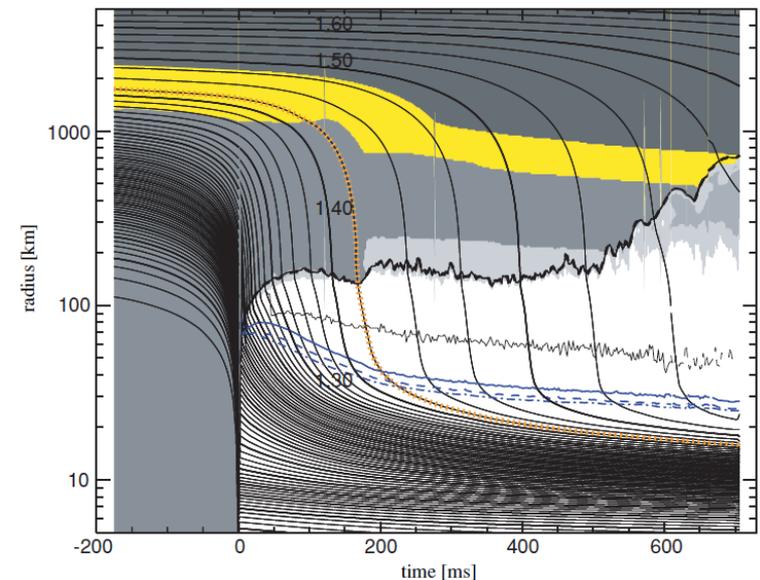
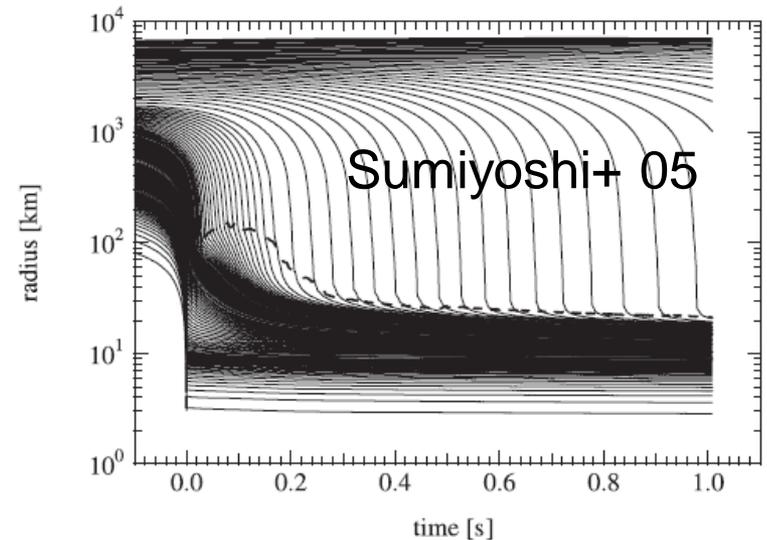
中性子星と衝撃波



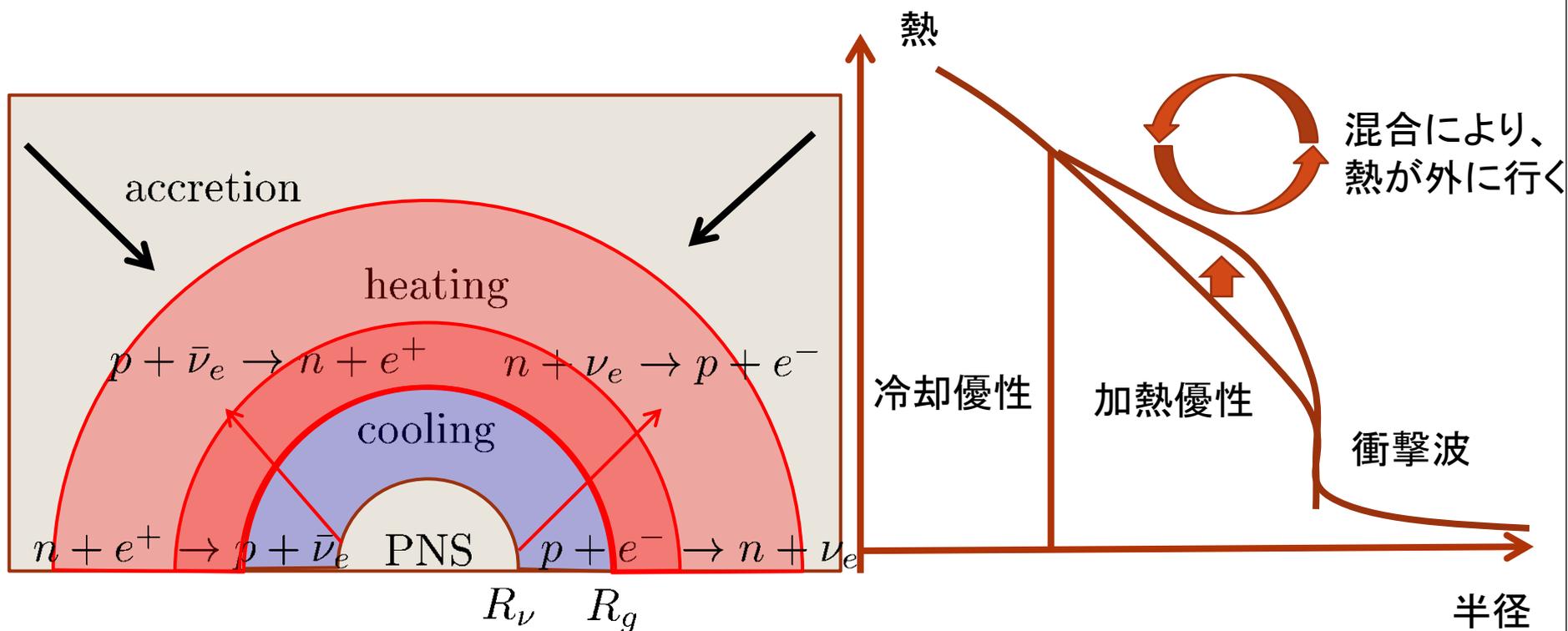
ニュートリノ加熱と広がる衝撃波

# 超新星爆発の研究の現状

- 星の形状を球対称を仮定  
=> 超新星は爆発しない
- 星の形状を軸対称に仮定  
=> 爆発することもある  
=> 混合が重要である
- 軸対称の対流は不自然  
=> 3次元では？  
爆発するのか？  
何が重要？



# 超新星のニュートリノ爆発、基礎



単純にはアクリーション vs ルミノシティ

詳細には混合が重要

中心ほど熱く、加熱はゲイン半径付近で強い、衝撃波の直下を温めるには物をかきまぜるのが非常に有効

# 3次元計算のモデル

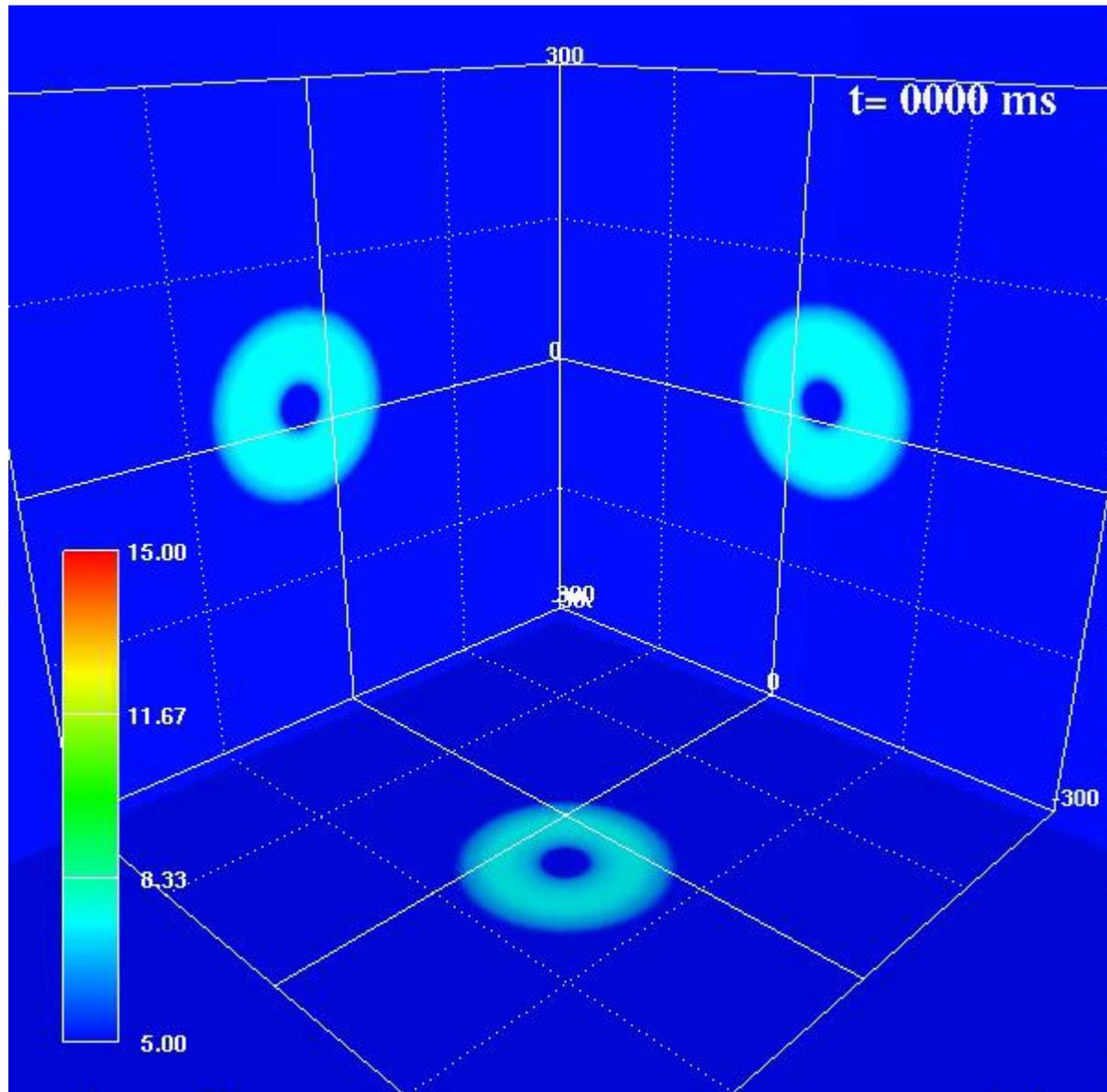
重い親星は質量降着率が高い

| Initial angular velocity | s11.2     | N13       | s27       |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 0 rad/s                  | Performed | Performed | Performed |
| 0.3rad/s                 |           | Performed |           |
| 0.5ras/s                 | -         | Performed |           |
| 1.0rad/s                 | Performed | Performed | Performed |
| 2.0rad/s                 | Performed | performed | Performed |

計算効率の良いIDSAで11(+3)モデル計算できた。

軽い親星が対流で爆発する結果は何度か報告したので省略して重い親星の結果を話す。

s27  $\Omega=0$ rad/s



Failed

(or need long-term sim.)

EoS : LS-K220

resolution :  
384(r)x64( $\theta$ )x128( $\varphi$ )

Neutrino Transport :  
Ray-by-Ray:IDSA  
+Leakage

Hydro:  
HLLE, 2<sup>nd</sup> order

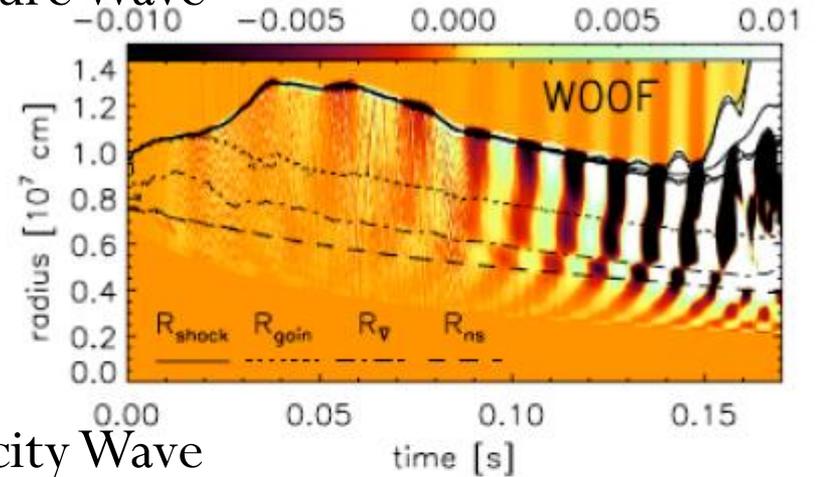
# Standing Accretion Shock Instability(SASI)

Scheck+ 2008

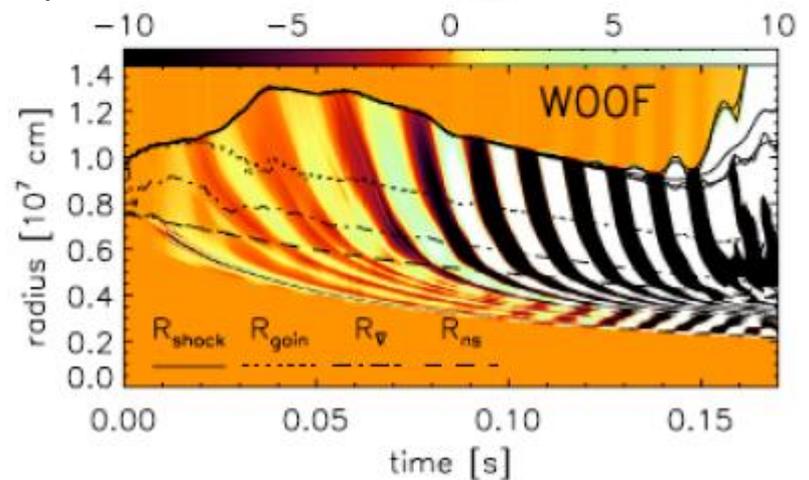


Advective-acoustic cycle  
From Foglizzo's slides

Pressure Wave



Vorticity Wave



s27  $\Omega=2.0\text{rad/s}$

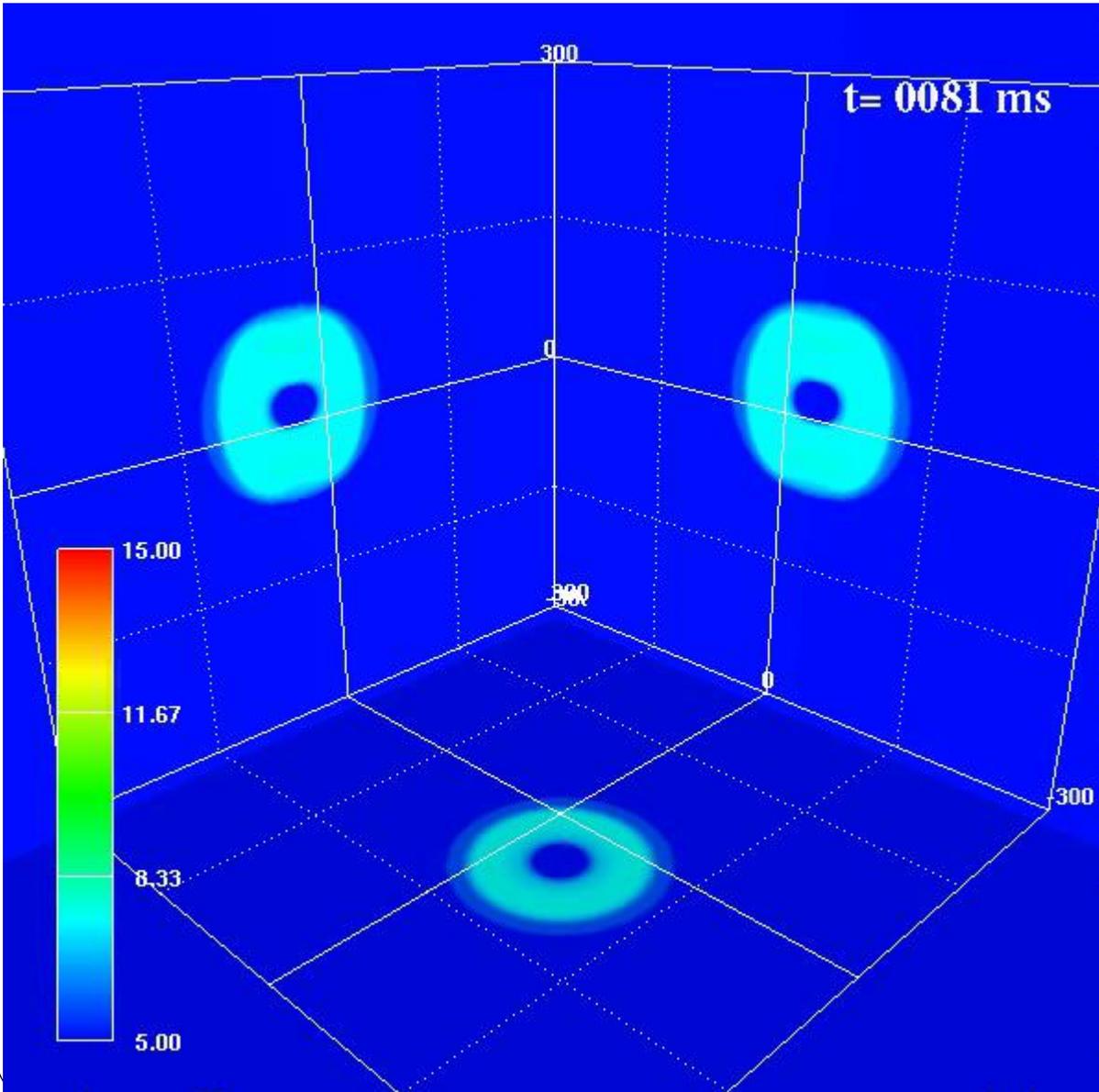
Explode !  
Spiral  
Dominant

EoS : LS-K220

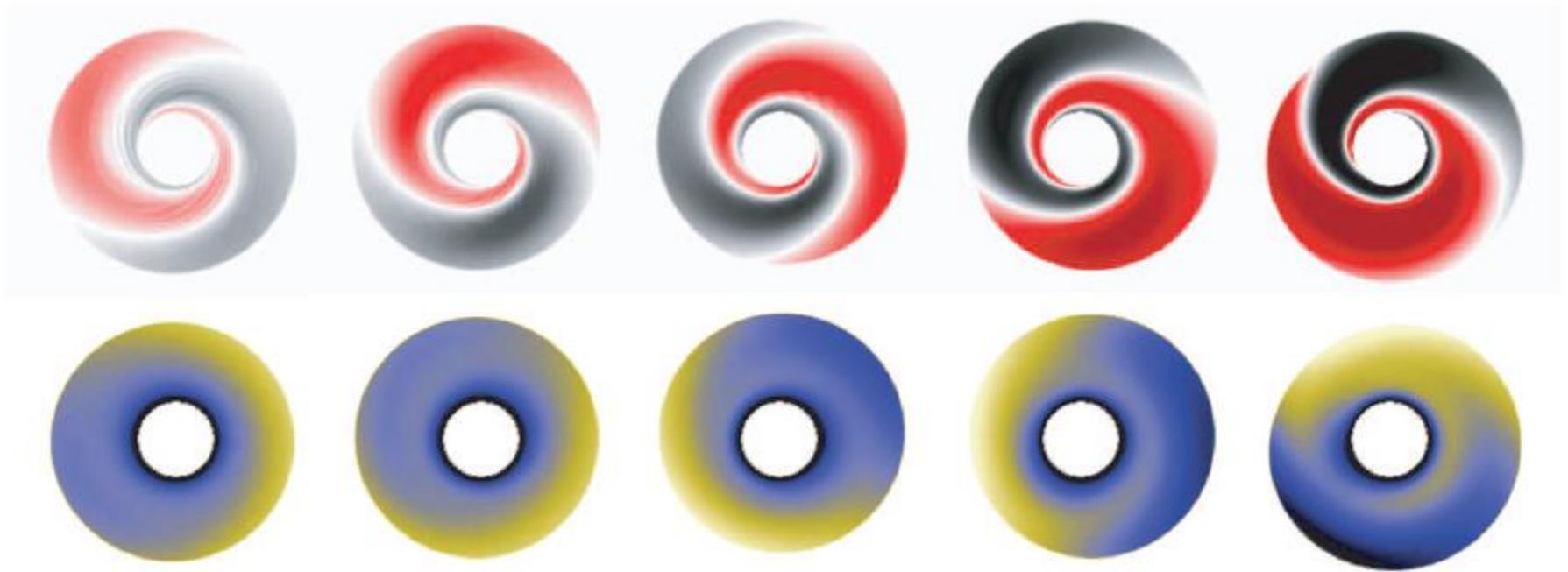
resolution :  
384(r)x64( $\theta$ )x128( $\varphi$ )

Neutrino Transport :  
Ray-by-Ray:IDSA  
+Leakage

Hydro:  
HLLE, 2<sup>nd</sup> order



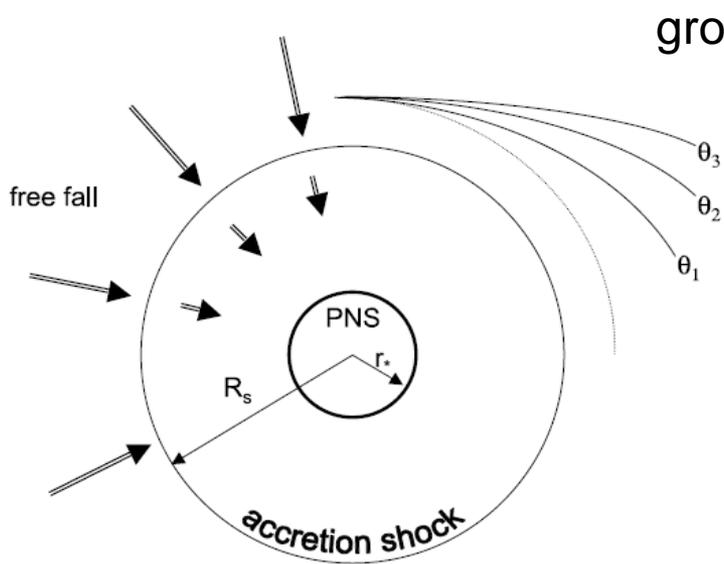
# Spiral SASI Mode



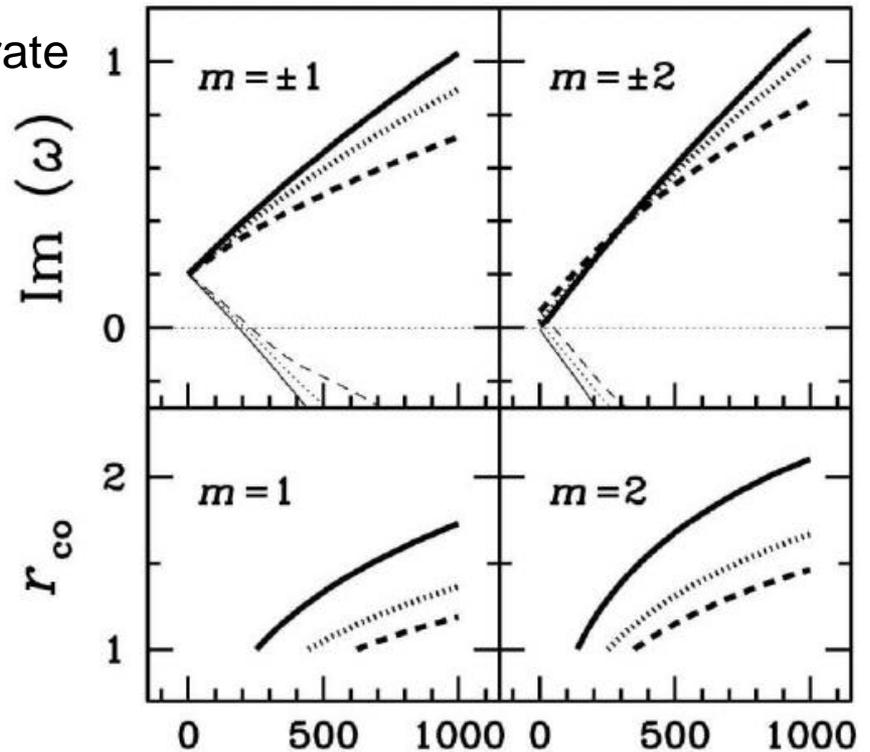
Blondin+2007

Top: angular velocity, red->rapid, black-> slow  
Left: pressure, blue->higher, white->lower

# Liner analysis of spiral mode



Blondin+2007



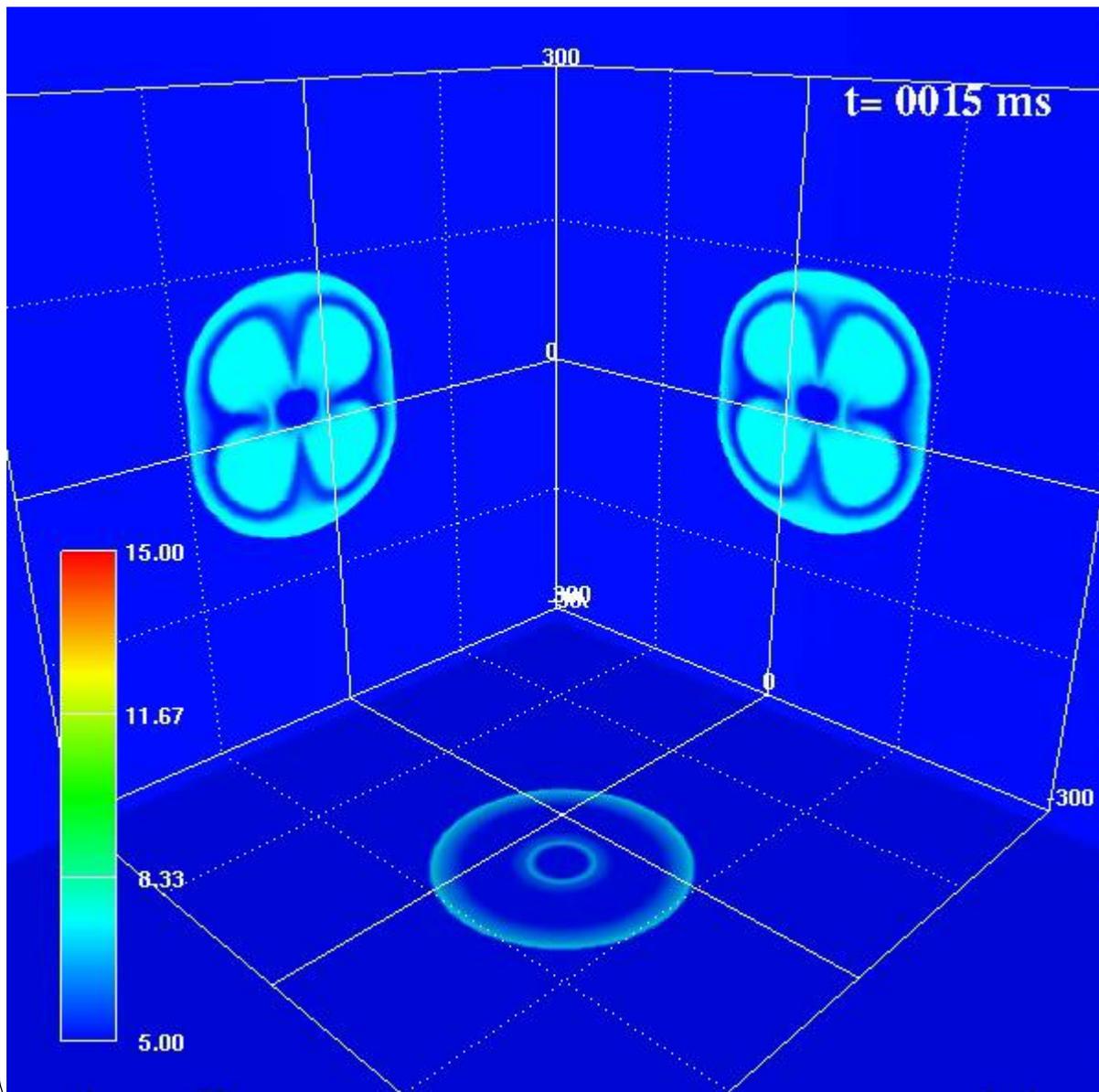
Specific angular momentum  $L \equiv r^2 \Omega$

$$\tilde{\omega} [\text{rad/s}] = \omega \frac{|v_{\text{sh}}|}{r_{\text{sh}} - r_*} \quad \text{Yamasaki+2008}$$

Liner analysis in  
Cylindrical geometry

Rapid Rotation => Rapid growth rate

s27  $\Omega=2.0\text{rad/s}$  2D



Non -  
Explode !

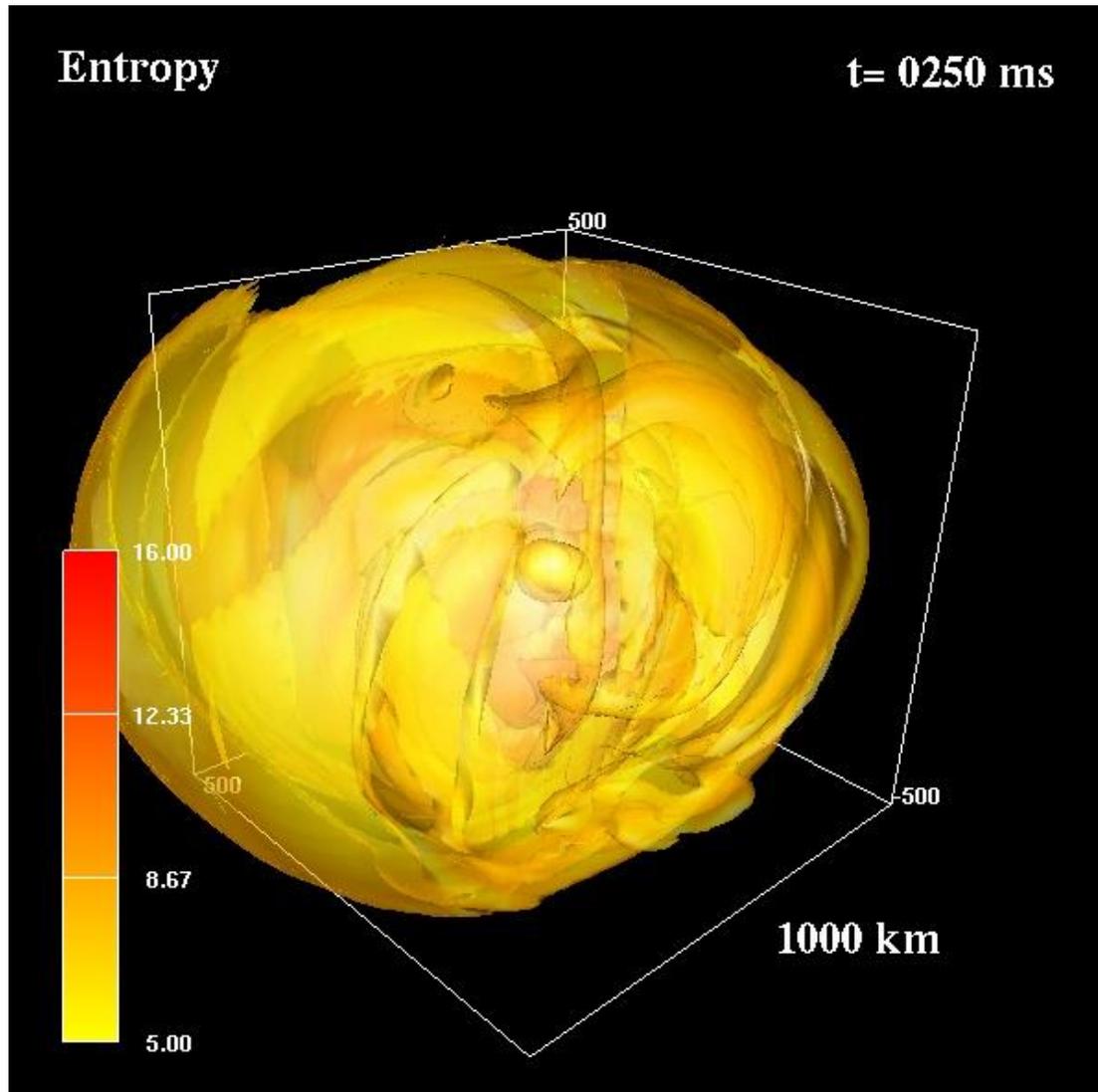
3D effect is important

EoS : LS-K220 X  
resolution :  
384(r)x128( $\theta$ )

Neutrino Transport :  
Ray-by-Ray:IDSA  
+Leakage

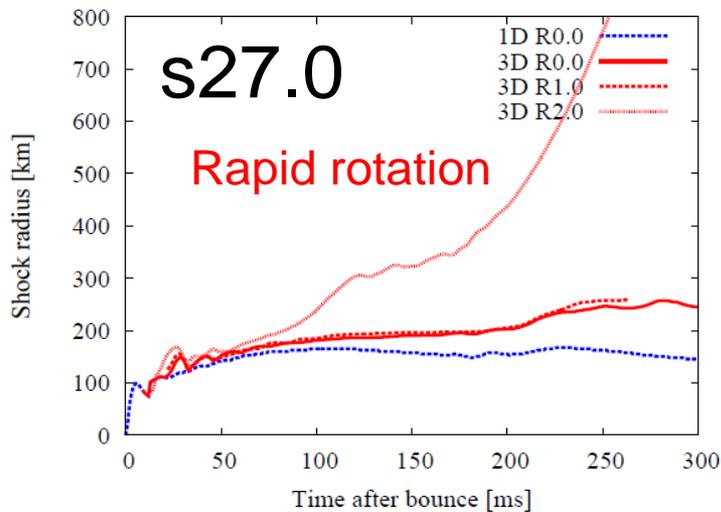
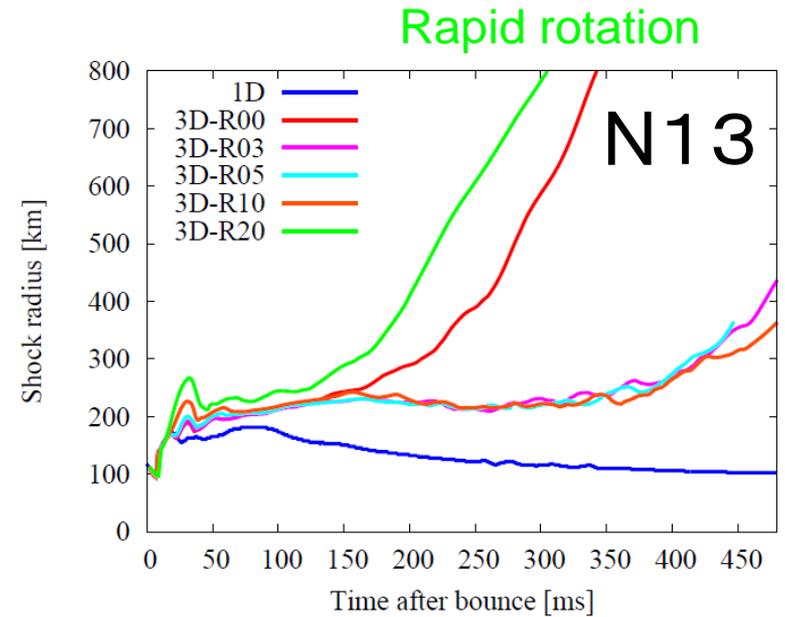
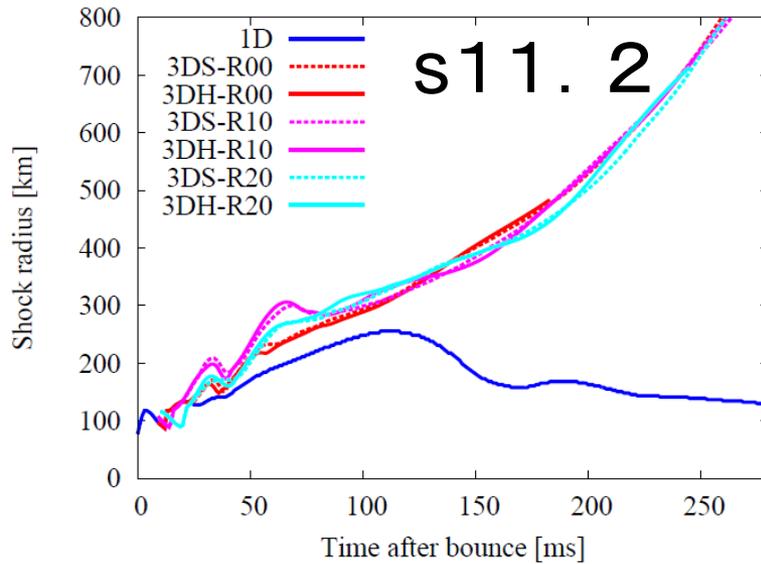
Hydro:  
HLLE, 2<sup>nd</sup> order

# Shape of the explosion ?



Strong expansion is found at equatorial plane

# Does rotation affect the shock revival?



1D => no shock revival

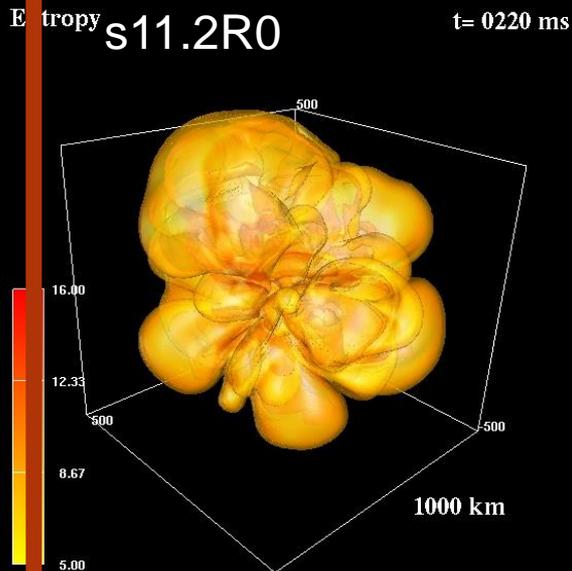
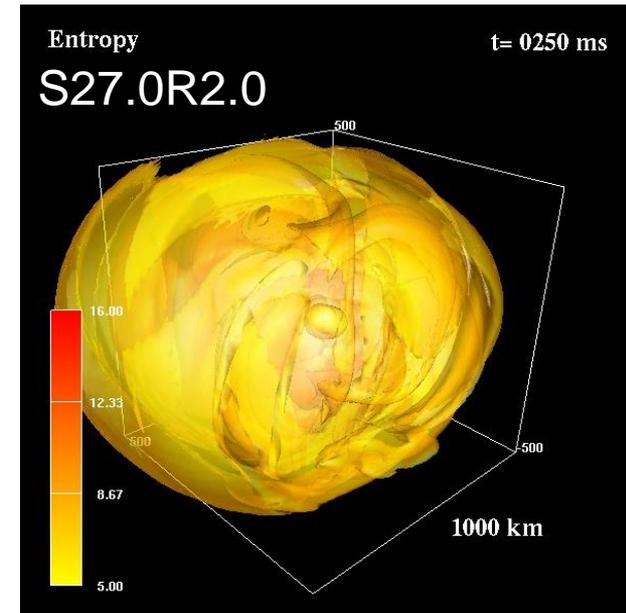
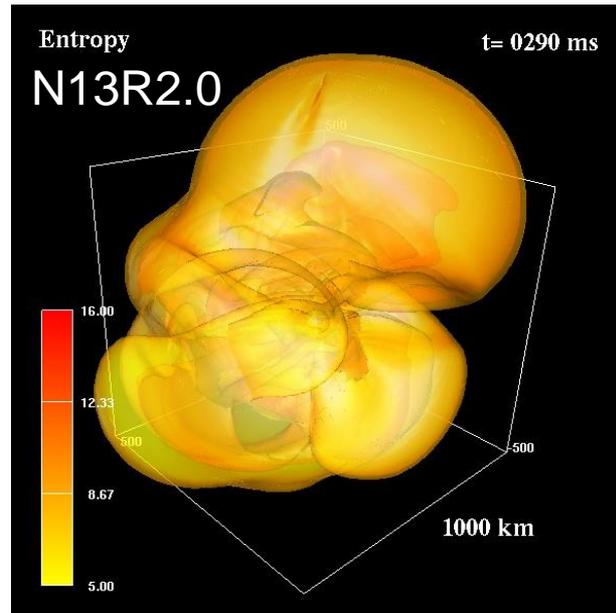
s11.2 : No

N13 : Yes

s27 : Yes

# Shape of the explosion

Strong rotation



Low-mass accretion  
Neutrino driven convection

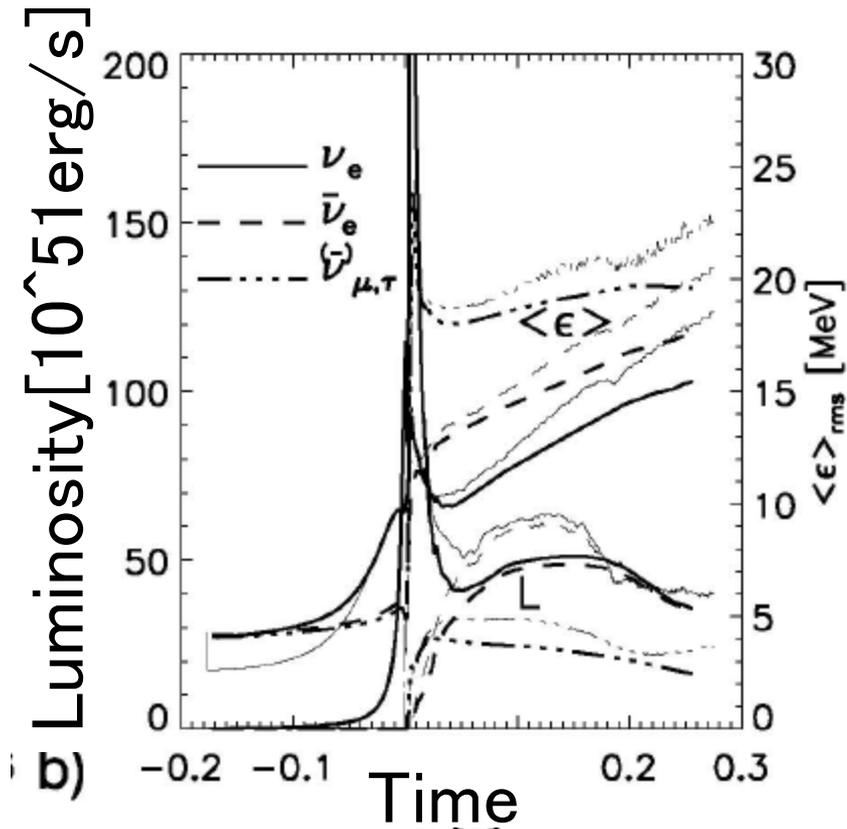
High-mass accretion  
spiral SASI

High Mass accretion rate

# 残された不定性

1. ニュートリノ反応、輸送法の精密化 => 長倉さん
2. 状態方程式の精密化 (ハイペロン、多くの核種、軽元素) => 課題1、課題2
3. 一般相対性理論の効果 (よりコンパクトで高エネルギーのニュートリノの放射) => 木内さん、関口さん

# More complete set of Neutrinos Reactions

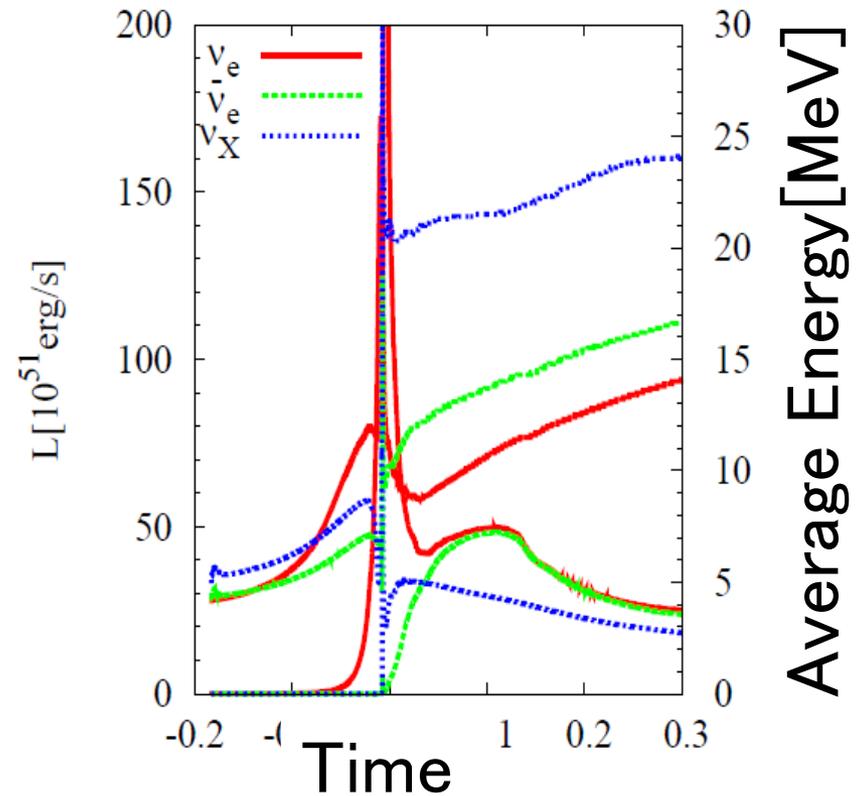


Liebendoerfer et al 2005

Sn and VE

General relativistic simulation

For simple spherical computation, the result is rather consistent.

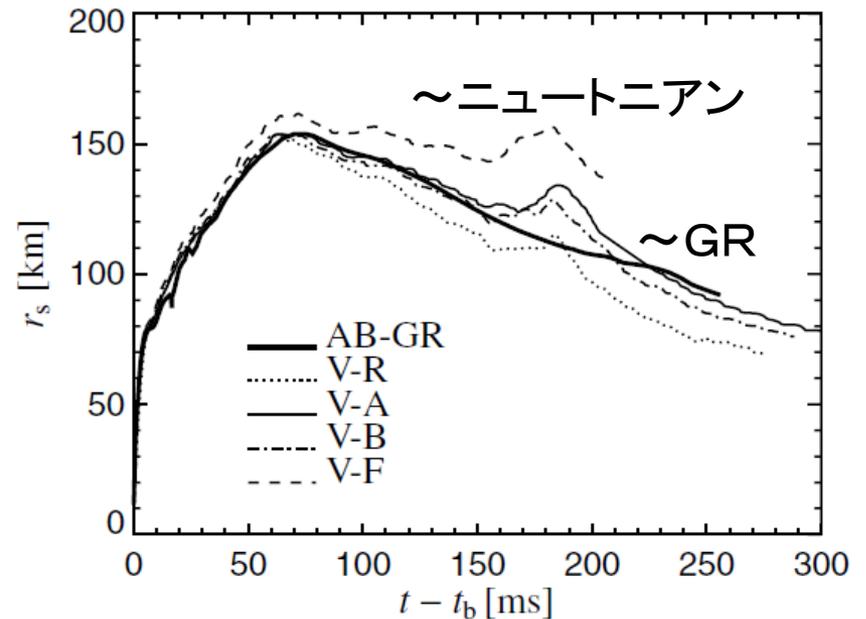
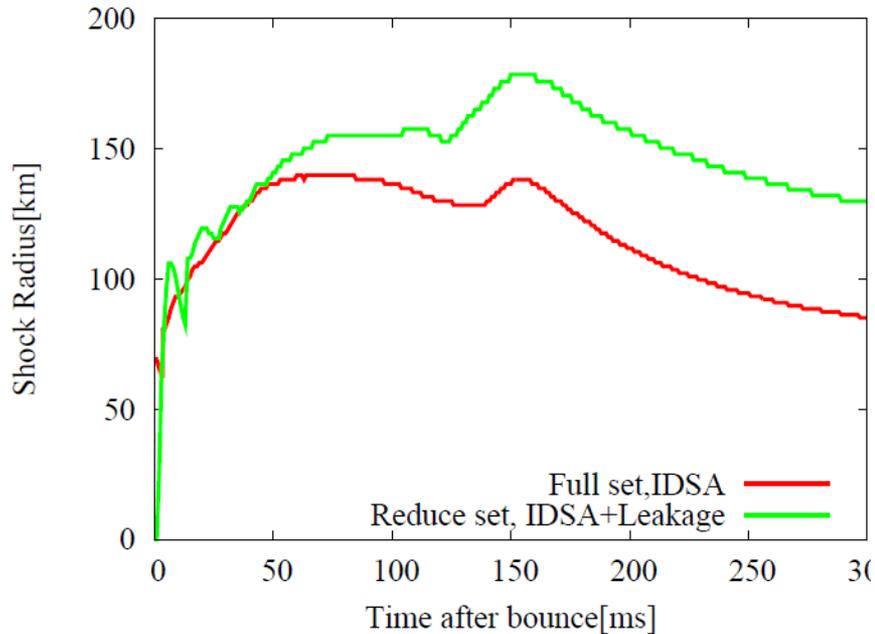


Our newest version of IDSA

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

Newtonian Gravity

# Comparison of the shock radius



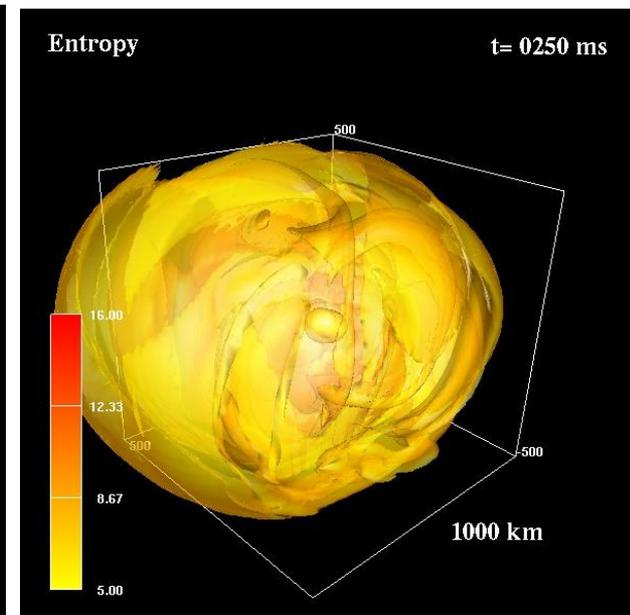
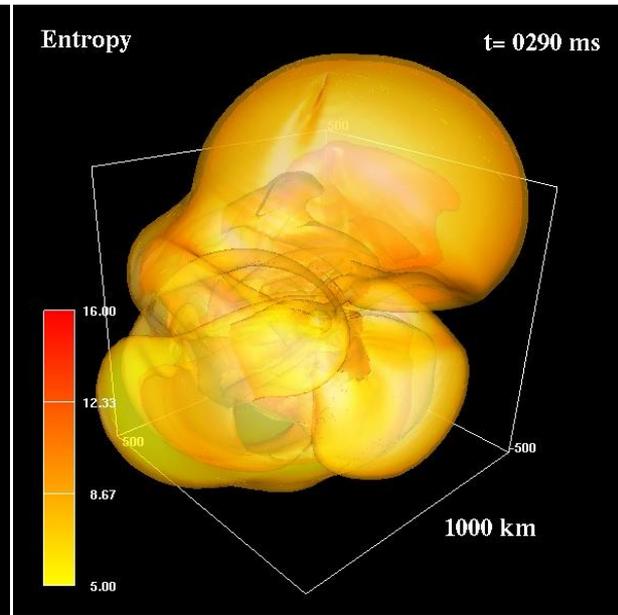
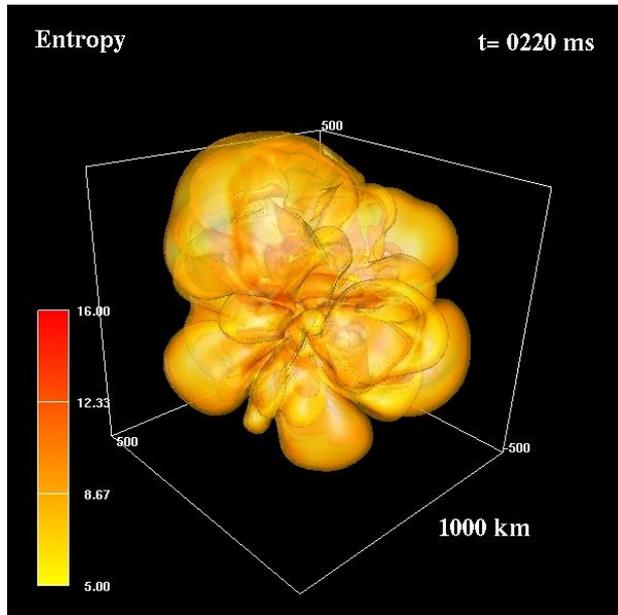
Marek et al. 2006

我々のこれまでの計算はニュートリノ反応をフルにしたものに比べ、楽観的な予想になっている。

ただし、新しいものはむしろ悲観的な予想に。

“ちょうど良い”現実的な計算には、 $\nu$ 反応、 $\nu$ 輸送、GRすべての精密化が必要

# Summary



軽い星  
対流による爆発  
多バブルの爆発

軽い回転星  
Spiral SASIと対流による爆発  
バイポーラーに爆発

重い回転星  
Spiral SASIによる爆発  
赤道面に強く爆発

超新星のニュートリノ加熱シナリオを空間3次元の自然な仮定のもと検証した。

世界に先駆けて3次元の超新星モデルを11モデル(標準解像度)+3モデル(世界一の高解像度)計算し、超新星爆発の機構の全体像をつかんだ!(世界では3モデルしか計算されていない)

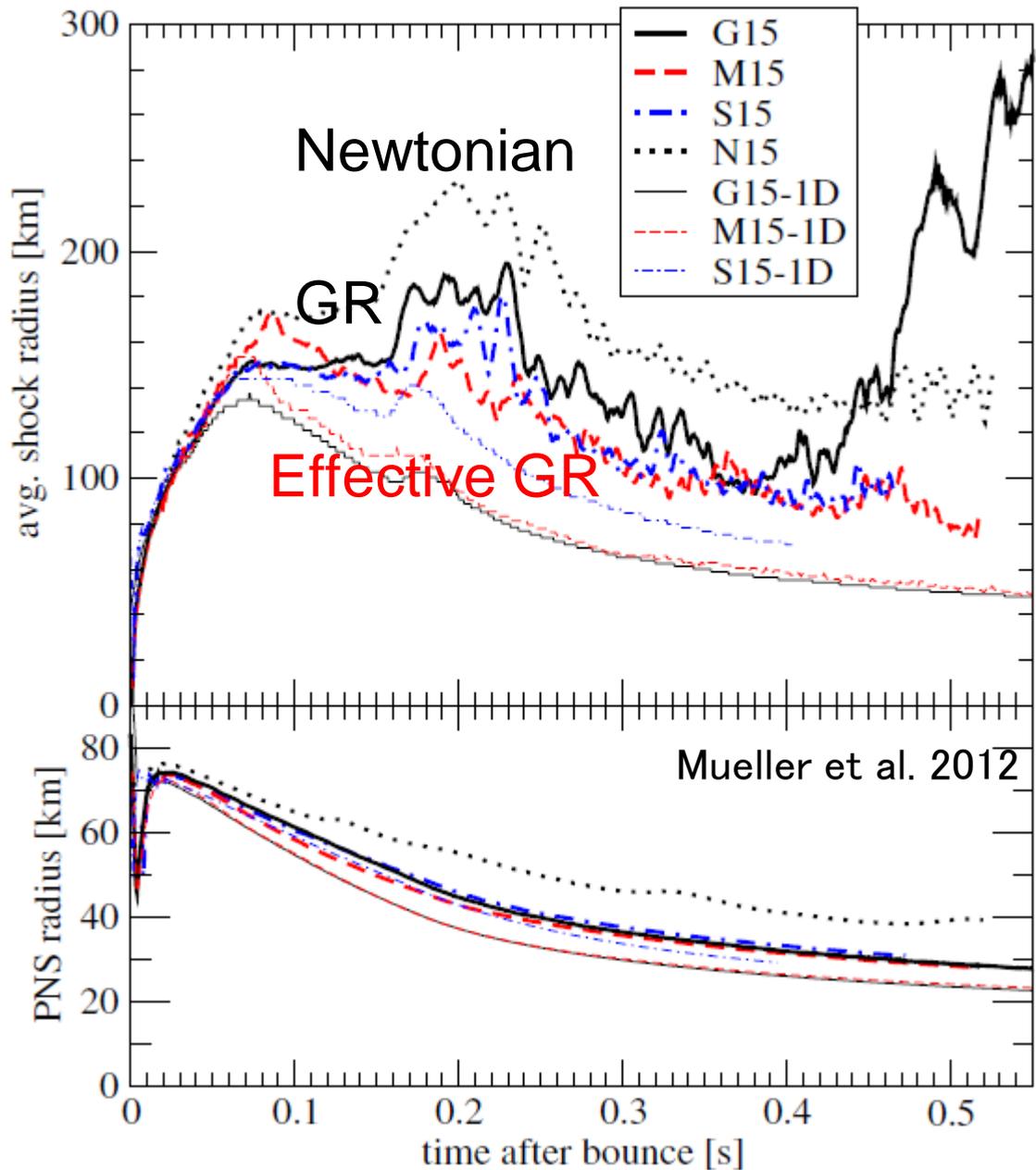
軽い星か重い星か、回転しているかいないかによって、様々に流体不安定性が起こり、それらがニュートリノ加熱爆発を助けることが分かった。

# Future Prospect

**これまでの計算で定性的に何が起こるのかシナリオはしっかりしてきた！**

**これらの定量的予言性を高めるために、  
v反応&輸送、EOS、GR  
の精密化が今後必要となる。**

# Appendix



For early evolution,

Newtonian

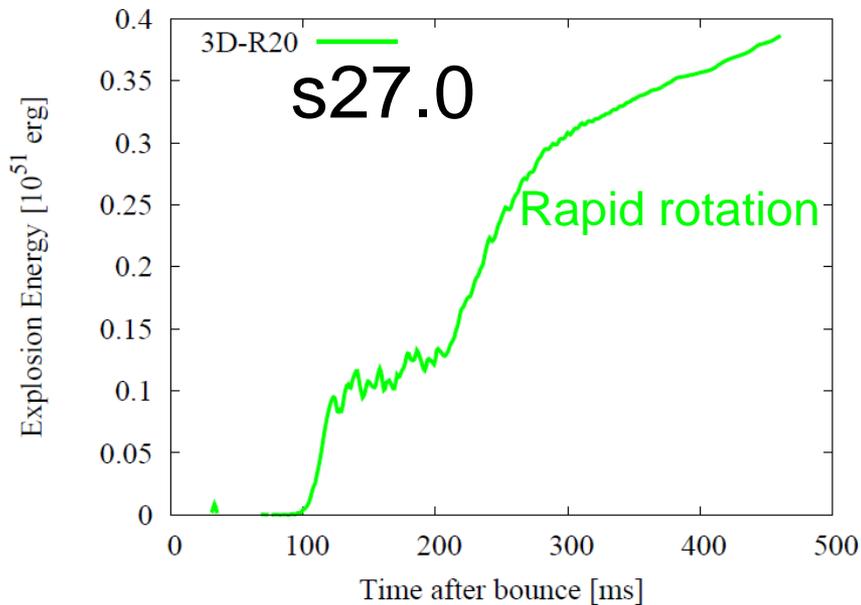
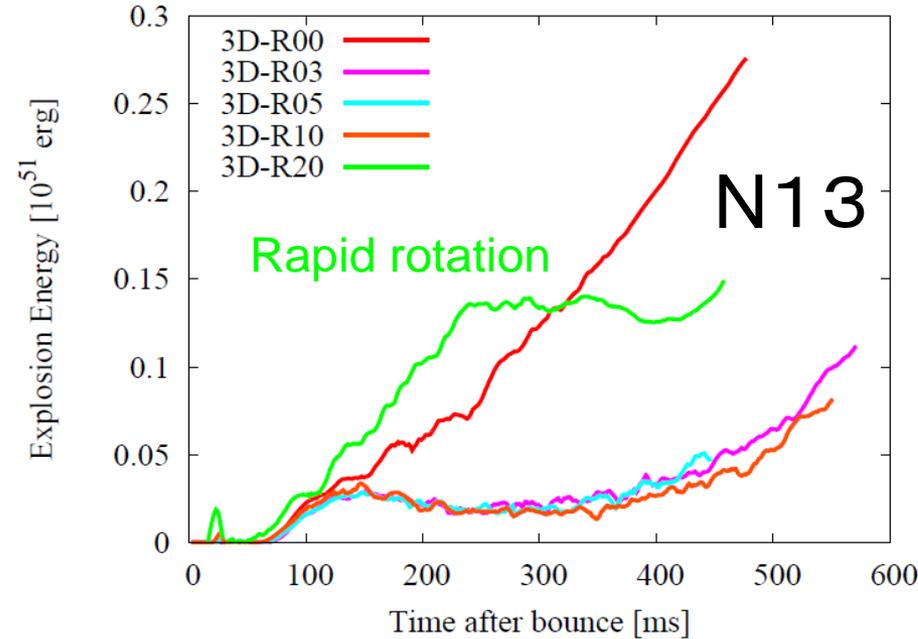
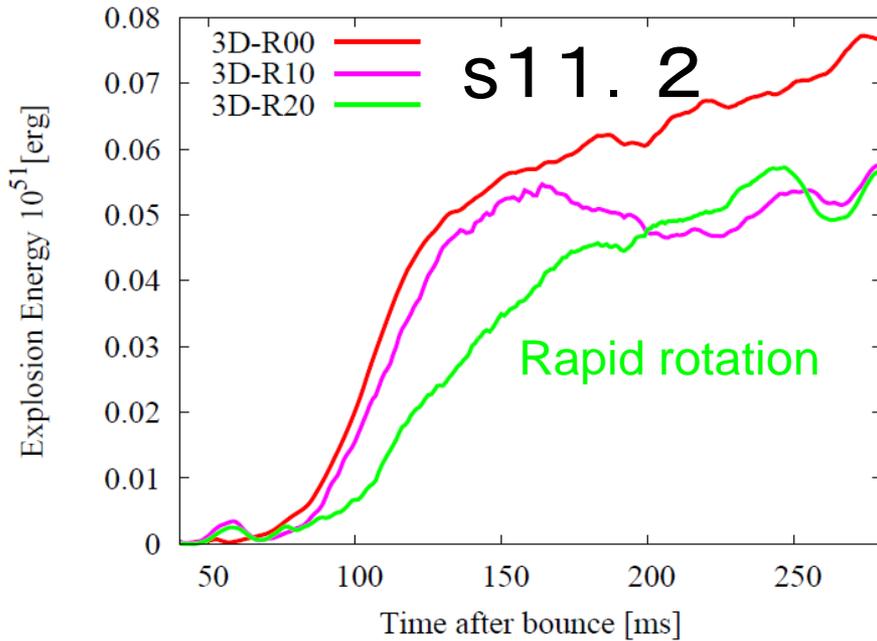
=>optimistic

**Effective GR**

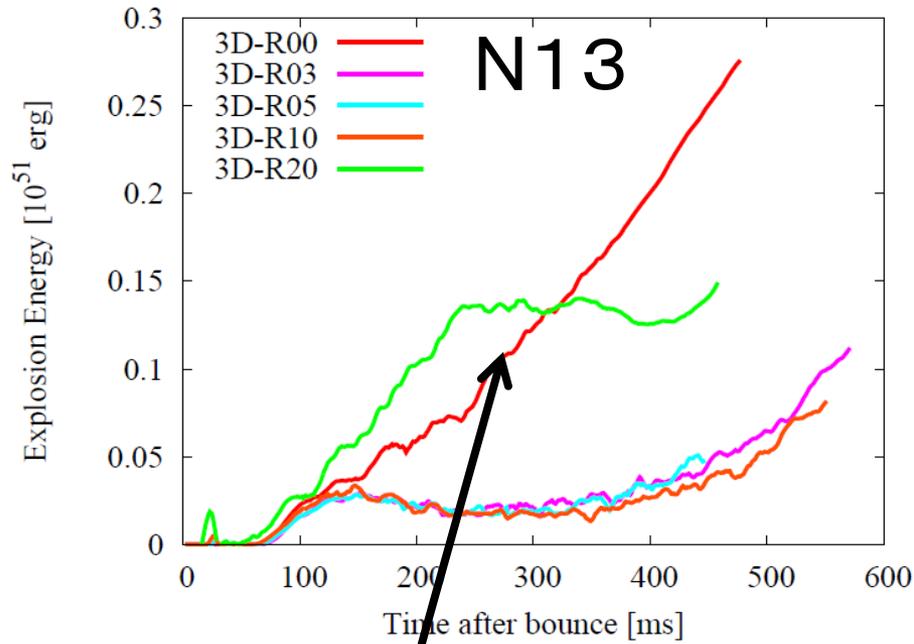
**=>pessimistic**

Full GR is important

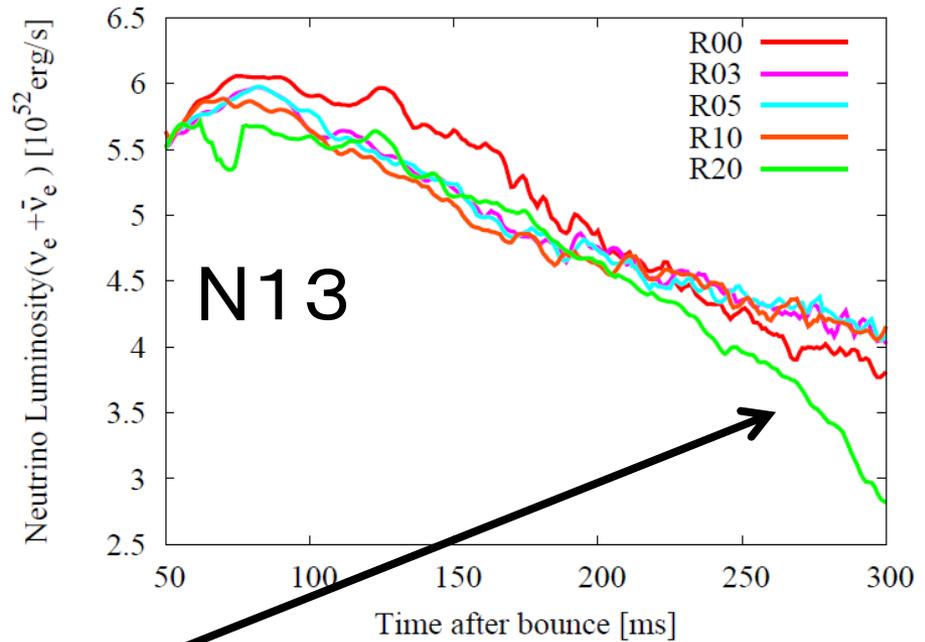
# How energetic is that?



Observe 0.1-0.4  $10^{51}$  erg.  
11.2M<sub>s</sub> and 13 M<sub>s</sub>, Rapid rotation weaken the E<sub>exp</sub> because luminosity becomes smaller in that model.

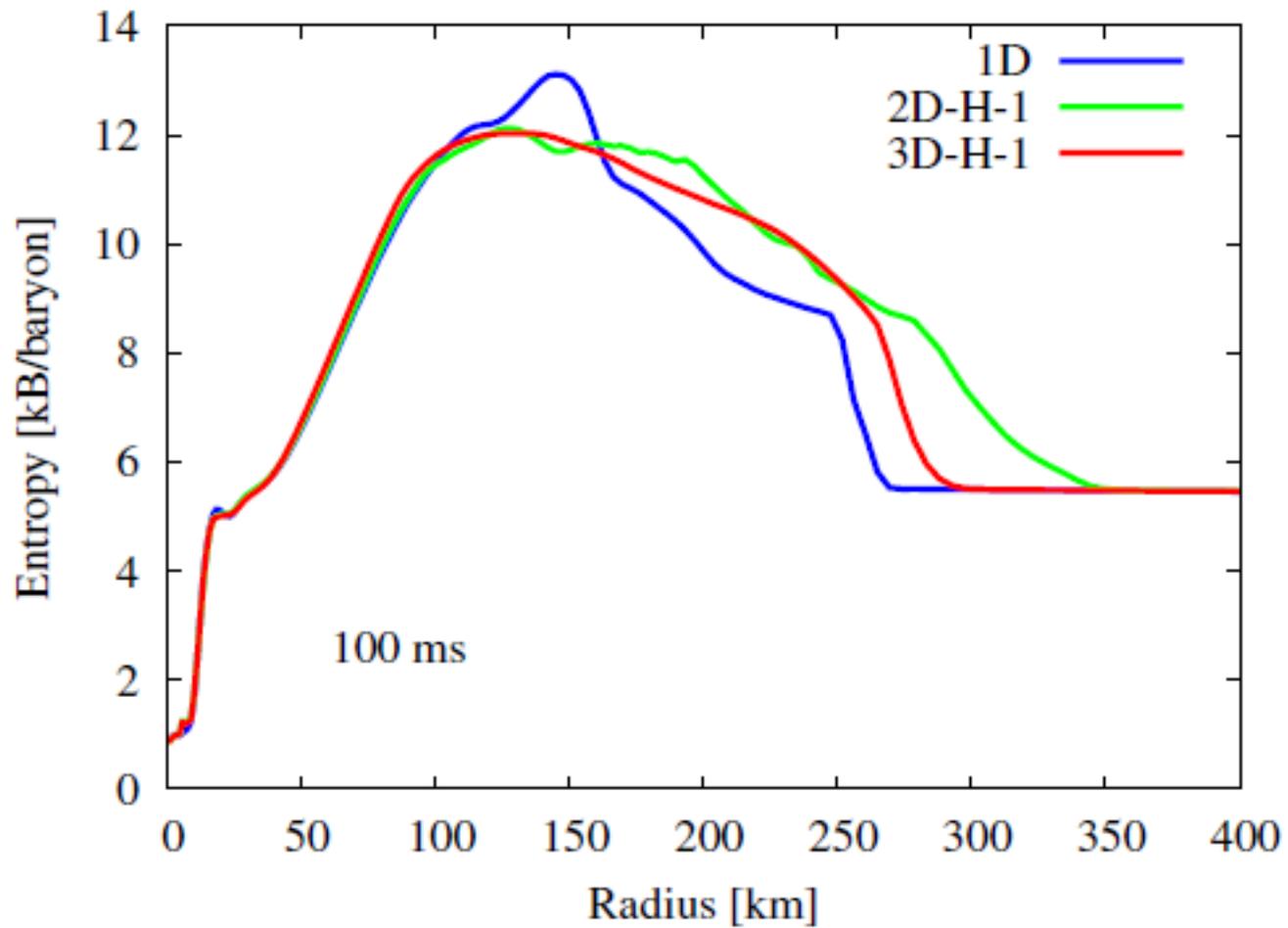


Weak Explosion

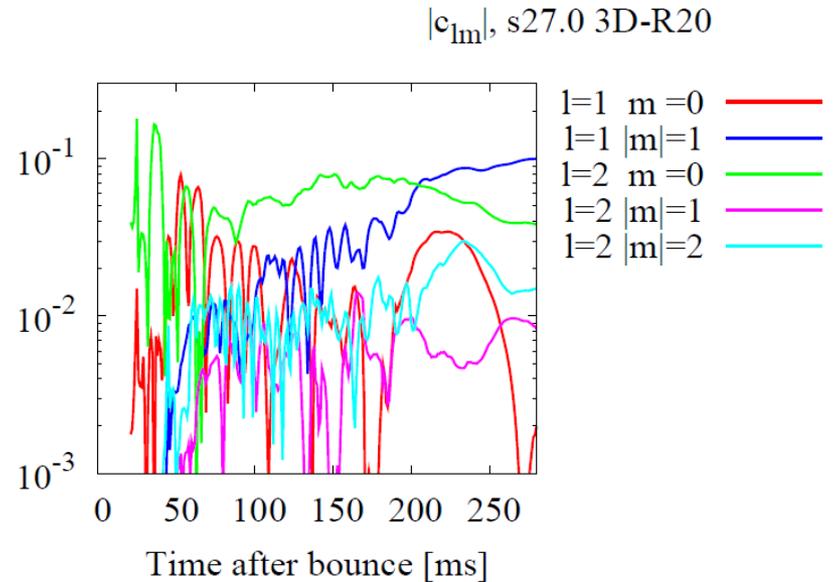
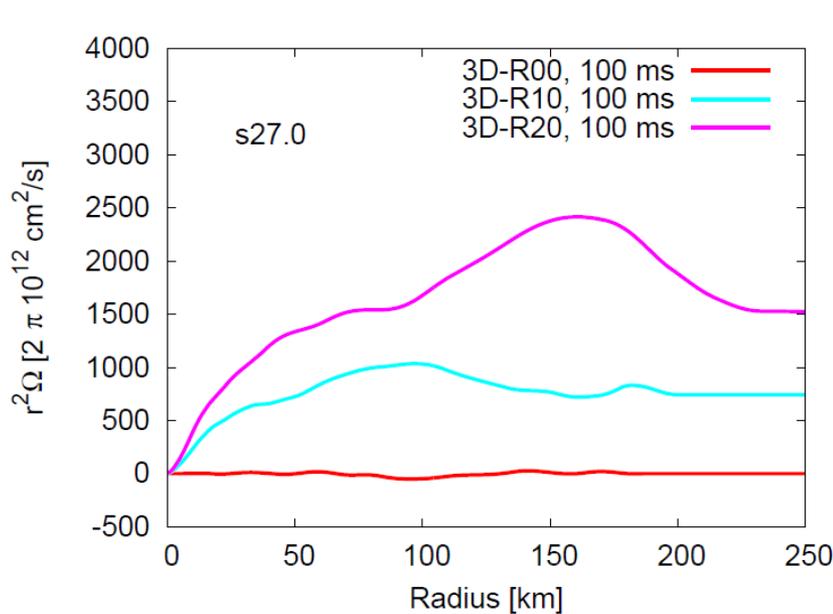


Low Luminosity

Rotation => weak contraction =>  
 weak Gravitational energy release  
 and small Mass accretion(since it explode)  
 => Low Luminosity



# Quantitative consistency bwn, Sim. and LA.

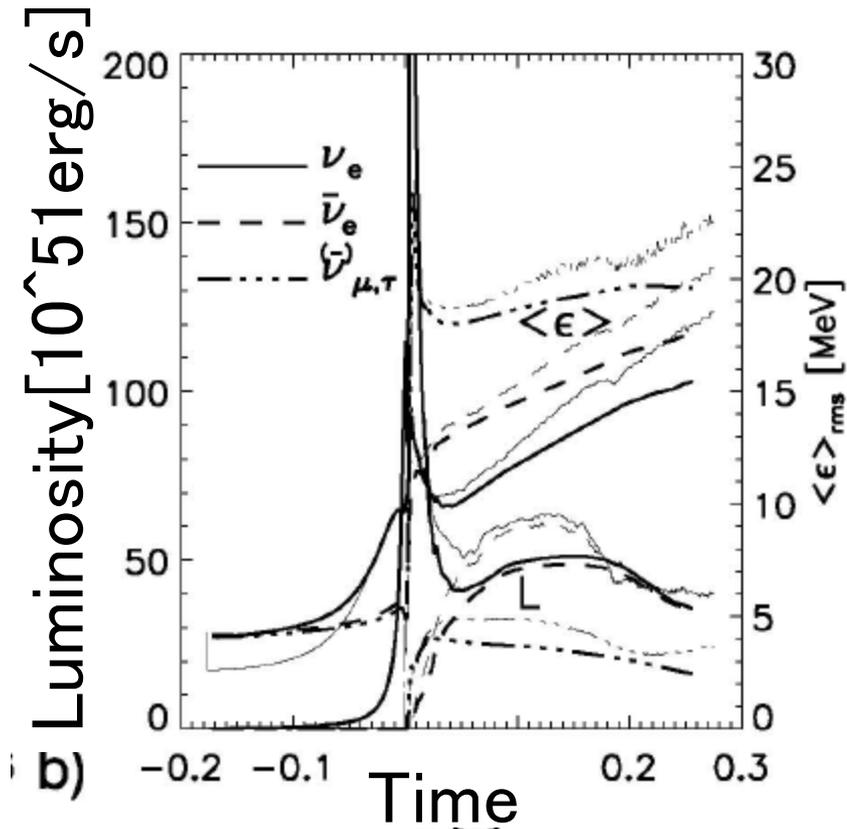


Geometry is spherical  
L is not constant  
Where is  $r^*$ ?

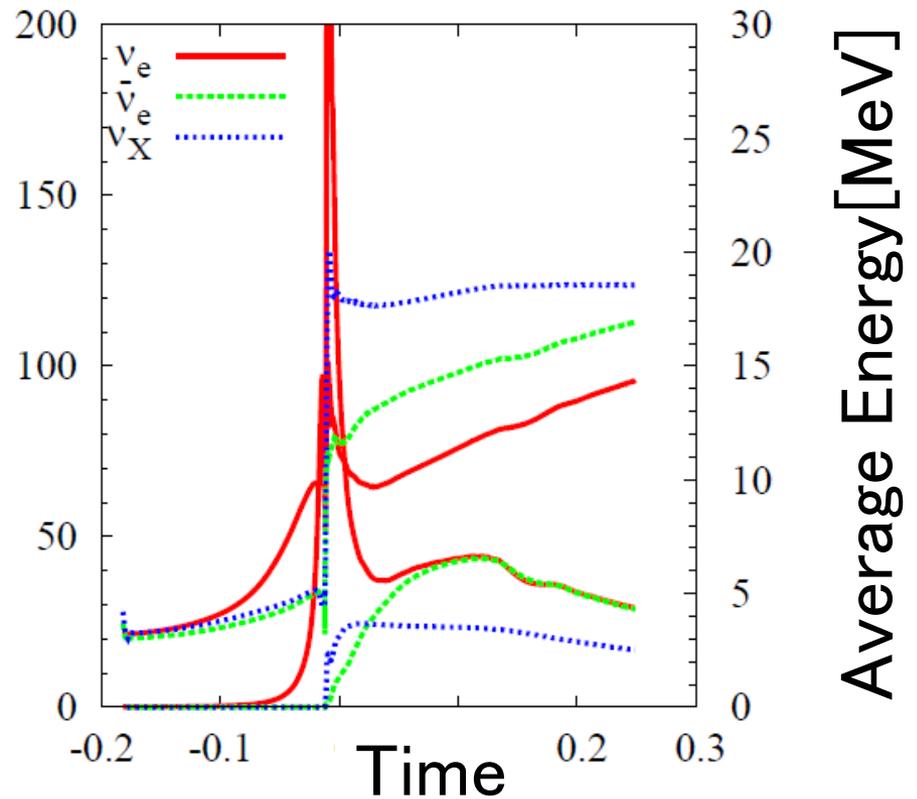
$L=2000 \Rightarrow$

Liner analysis  $\omega=150$  [rad/s]  
In simulation  $\omega=25$  [rad/s]  
Suppression by convection?

# M1-Closure



Liebendoerfer et al 2005



Newly Developed M1-Closure code

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

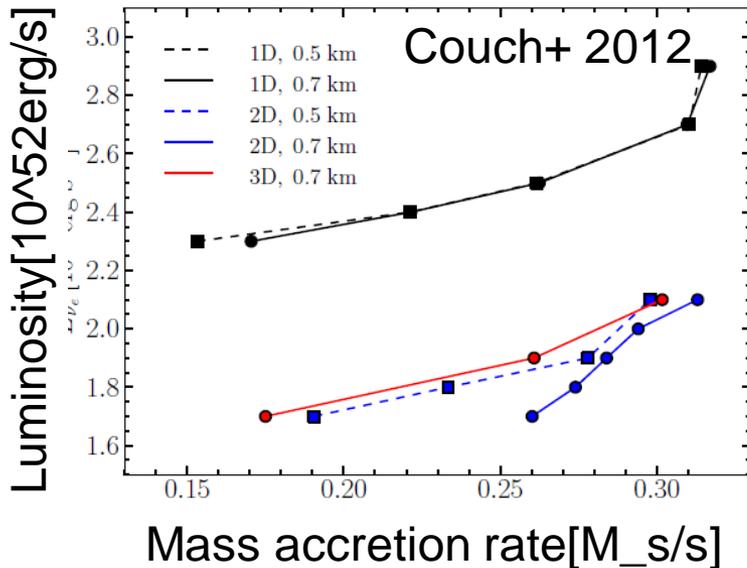
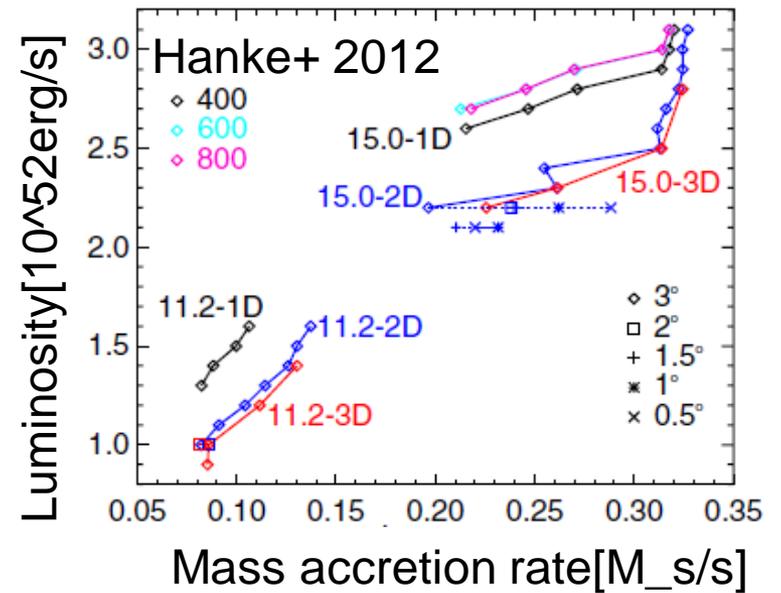
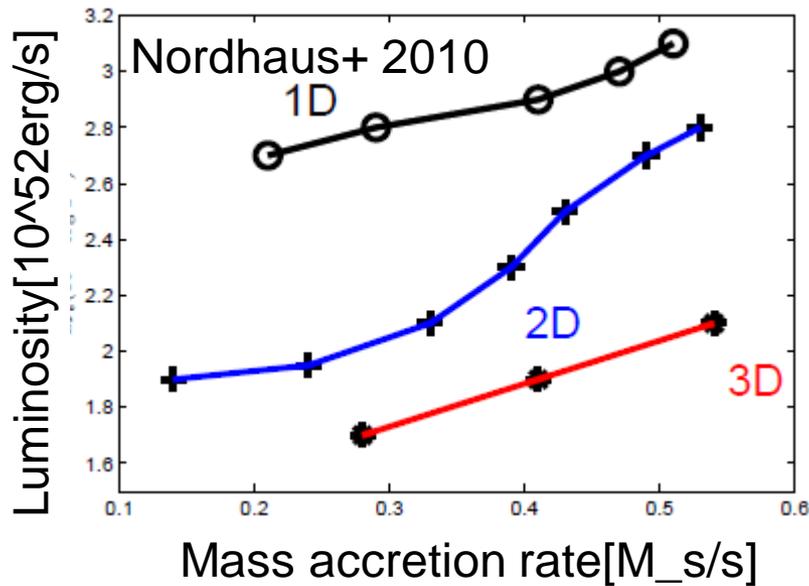
Newtonian Gravity

Sn and VE

General relativistic simulation

For simple spherical computation, the result is rather consistent.

# 2D vs 3D study with Light bulb Method



3D > 2D

Nordhaus+2010, Dolence+2013

2D > 3D

Hanke+2012, Couch+2012

# Viscosity as the hidden parameter

