



# Core-Collapse Supernova Simulations in the Post-K Era 「二刀流」

Kei Kotake

(Fukuoka University/NAOJ)

Tomoya Takiwaki (RIKEN), Yudai Suwa (Kyoto Univ.)

Takami Kuroda (Univ. Basel), Ko Nakamura (Waseda Univ)

Kazuhiro Hayama (Osaka-city Univ), Yohei Masada (Kobe Univ.)

Horiuchi Shunsaku (Virginia tech.) and Masaomi Tanaka (NAOJ)

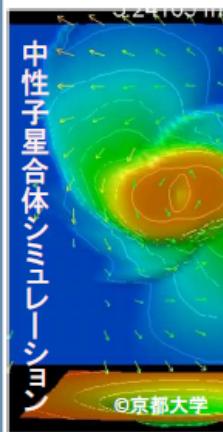
HPCI分野5会議, ポスト「京」重点課題9  
3/12, 2015, 紀尾井町フォーラム

## ⑨ 宇宙の基本法則と進化の解明

### 概要・意義・必要性

- (1) 必要性の観点：自然界の基本法則と宇宙の進化過程には多くの謎が残されている。実験・観測だけでは到達できない情報を得るための精密計算や、素粒子から宇宙まで複数の階層にまたがるシミュレーションを実現し、未解決問題を解明できる。
- (2) 有効性の観点：「京」を通じて計算機科学者、応用数学学者との連携体制が確立。更なる成果創出に向けて実験・観測との連携も進んでいる。計算科学を軸として分野を横断し研究手法を超えて連携する世界にも類のない体制が構築されつつある。
- (3) 戦略的活用の観点：ポスト「京」で初めて可能になる精密計算や階層をまたぐ現象の計算を大型実験・観測のデータと合わせることで、計算科学のみならず素粒子・原子核・宇宙物理学全体にわたる物質創成史解明へのブレークスルーが得られる。

### 内容の詳細



#### サブ課題A「究極の物理法則と宇宙開闢の解明」

- 素粒子の精密実験と呼応する精密計算を実現し、標準模型を超える物理法則の発見を目指す。実現すれば、素粒子物理全体のブレークスルーとなる。物質と時空の究極理論として期待される超弦理論を解析して、将来的に基本法則の解明につなげる。

#### サブ課題B「物質創成史の解明と物質変換」

- 元素合成機構を明らかにするため、バリオン間相互作用、原子核の構造・中性子星の形成、超新星爆発・中性子星合体という複数の階層をシミュレーションで橋渡しする。放射性核廃棄物の核変換の基礎的データを与え、社会貢献につなげる。

#### サブ課題C「現代物理学が紐解く宇宙進化の謎」

- 初代星、銀河、巨大ブラックホールなどの異なる階層をつなぐシミュレーションを実現し、宇宙の進化を明らかにする。

### ポスト「京」利用の必要性

- 計算の精密化や複数の階層をまたがる大規模計算を実現するには、「京」の能力を大幅に超える計算量が必要。
- 計算の高速化・効率化を進めて、ポスト「京」の能力により最大限の科学的成果を得られるようにする。
- アプリケーションの内容に応じ、HPCI全体で最適な資源配分の実現を検討。

### 必要な計算資源（実行効率を1EFLOPSの15%程度と仮定）

サブ課題A 60日、サブ課題B（バリオン間相互作用60日／原子核・核変換60日／超新星爆発60日）、サブ課題C 60日、を目安。全300日のうち100日をポスト「京」で、残りは他のHPCI資源の活用を想定。

超新星の爆発機構を解明できない・数値計算で再現できないと…

→ 合成された元素が出てこない・中性子星の生成メカニズムが分からぬ

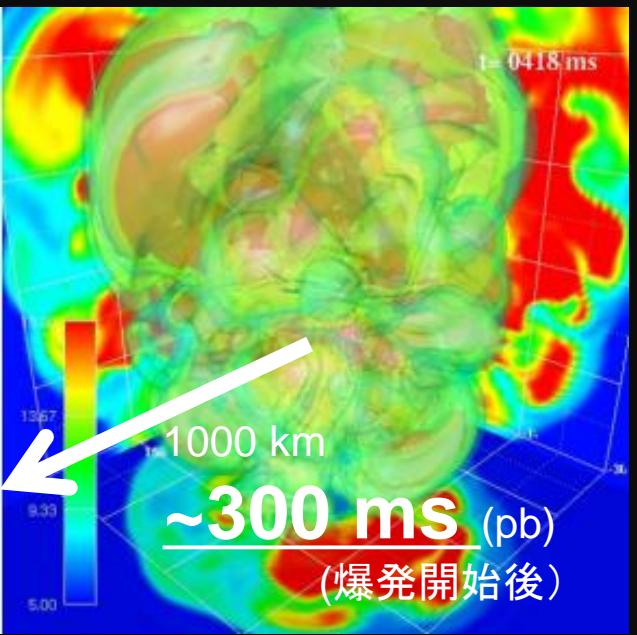
⇒ ポスト京時代のゴール：「京」の2つの成果をUpgrade

⇒ 「計算機の中で爆発」+「元素合成・観測を説明」すること

# 京での成果(その1)

# Two topics in the Post-K era

“A” self-consistent 3D model

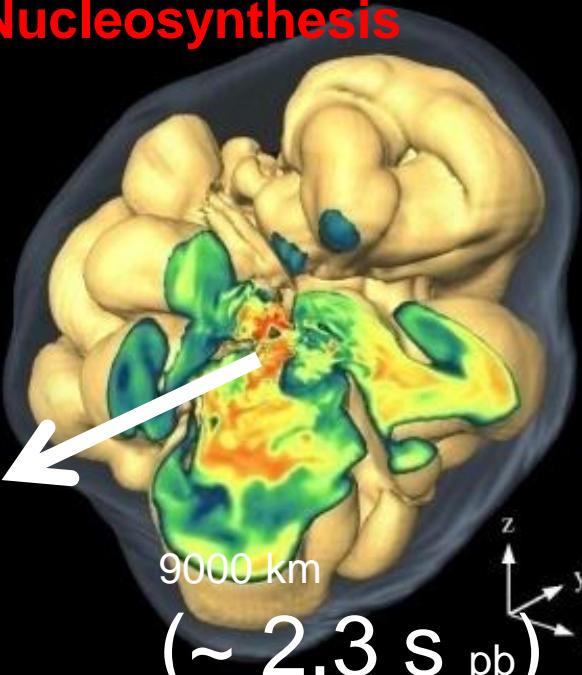


Takiwaki, KK, Suwa (2014, 2012 ApJ)

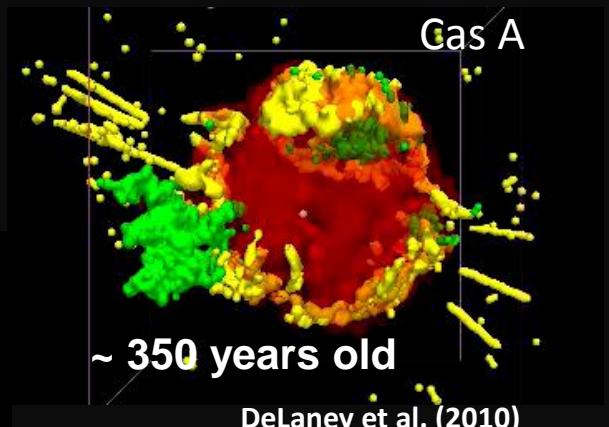
ある親星モデル(11.2太陽質量):  
ニュートリノ加熱でショックが復活  
(4D with approximate transport)

Gray-transport simulation

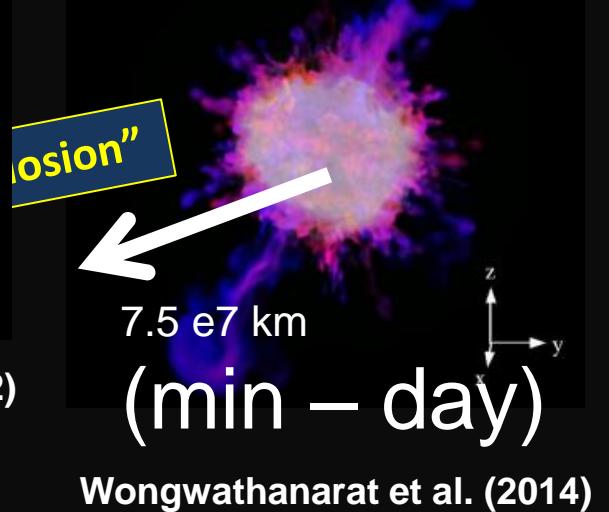
Nucleosynthesis



Wongwathanarat et al. (2012)



Hydrodynamic model:  
Mixing, RT, RM instabilities



Wongwathanarat et al. (2014)

Project L: 典型的親星を選んでself-consistentモデルで長時間進化  
(現状の計算時間の～10倍) ⇒ 観測比較・系統性の追求

Project F : フルボルツマン計算 (6D problem)

で本当にショックが復活するか? ⇒ 精緻性の追求

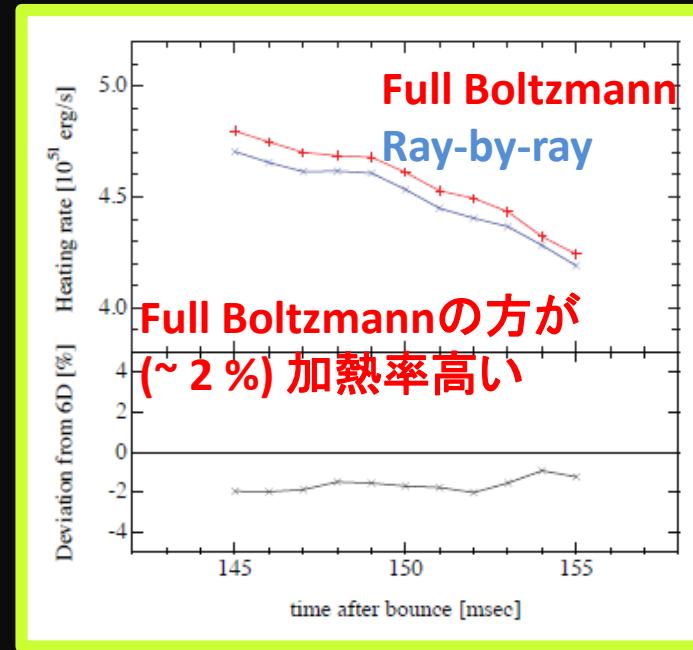
# Project F : フルボルツマン計算 (6D problem)でショックが復活するか? ⇒ 精緻性の追求

メンバー: 長倉洋樹(基研)、岩上わかな(早稲田)、住吉光介(沼津高専), 山田章一(早稲田)  
松古栄夫(KEK)、今倉暁(筑波大)

## 京での成果(その2) : Golden code (6D full Boltzmann)の作成

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\mu_\nu}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 f) + \frac{\sqrt{1 - \mu_\nu^2} \cos \phi_\nu}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta f) \\ + \frac{\sqrt{1 - \mu_\nu^2} \sin \phi_\nu}{r \sin \theta} \frac{\partial f}{\partial \phi} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \mu_\nu} [(1 - \mu_\nu^2) f] \\ - \frac{\sqrt{1 - \mu_\nu^2} \cos \theta}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi_\nu} (\sin \phi_\nu f) = \left( \frac{\delta f}{\delta t} \right)_{\text{col}}^{\text{lb}},$$

移流項  
(Advection Term)      衝突項  
(Collision Term)



✓ 2012年コード作成終了

Sumiyoshi & Yamada (2012)

現状の最高水準: 5D ray-by-ray (MPA)

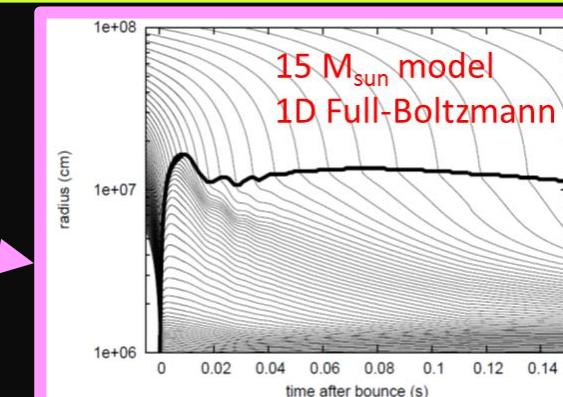
✓ 2014年 輻射テスト終了 Sumiyoshi et al. (2014)

✓ 2015年 球対称シミュレーションテスト終了

Nagakura et al. (2015)

来年度: 京で2D(軸対称)重力崩壊のシミュレーション

ゴール: 2Dで"本当に"爆発するのか?



# A list of recent “rad-hydro” milestones making “2D explosions”

Progenitor	Group	Mechanism	Dim.	$t_{\text{exp}}$	$E_{\text{exp}}(\text{B})$	$\nu$ transport
		metallicity				
mass (solar masses)		solar		$10^{-4}$ solar		primordial
10.8		<a href="#">242 kByte</a>		---	---	
11.0		<a href="#">249 kByte</a>		<a href="#">245 kByte</a>	<a href="#">244 kByte</a>	
11.2		<a href="#">242 kByte</a>		<a href="#">247 kByte</a>	---	
11.4		<a href="#">225 kByte</a>		<a href="#">245 kByte</a>	---	
11.6		<a href="#">224 kByte</a>		<a href="#">247 kByte</a>	---	
11.8		<a href="#">237 kByte</a>		<a href="#">246 kByte</a>	---	
12.0		<a href="#">234 kByte</a>		<a href="#">245 kByte</a>	<a href="#">254 kByte</a>	
12.2		<a href="#">236 kByte</a>		<a href="#">250 kByte</a>	---	
12.4		<a href="#">237 kByte</a>		<a href="#">251 kByte</a>	---	
12.6		<a href="#">233 kByte</a>		<a href="#">247 kByte</a>	---	
12.8		<a href="#">234 kByte</a>		<a href="#">247 kByte</a>	---	
13.0		<a href="#">228 kByte</a>		<a href="#">246 kByte</a>	<a href="#">243 kByte</a>	
13.2		<a href="#">232 kByte</a>		<a href="#">242 kByte</a>	---	
13.4		<a href="#">234 kByte</a>		<a href="#">240 kByte</a>	---	
13.6		<a href="#">232 kByte</a>		<a href="#">241 kByte</a>	---	
13.8		<a href="#">233 kByte</a>		<a href="#">243 kByte</a>	---	
14.0		<a href="#">234 kByte</a>		<a href="#">244 kByte</a>	<a href="#">241 kByte</a>	
14.2		<a href="#">233 kByte</a>		<a href="#">240 kByte</a>	From 10.8 to 75 $M_{\text{sun}}$ star	
14.4		<a href="#">235 kByte</a>		<a href="#">241 kByte</a>	More than 300 models	
14.6		<a href="#">236 kByte</a>		<a href="#">245 kByte</a>	(Woosley, Heger, Weaver	
14.8		<a href="#">236 kByte</a>		<a href="#">246 kByte</a>	RMP (2002)	---
Oak Ridge + (2009)	$\nu$ -driven	2D (PN)	$\sim 300$	$\sim 0.7$ (1200)	"RBR" MGFLD 1, $\mathcal{O}(v/c)$	

(Suwa et al. (2009,10,12,13), PASJ, ApJ  
see KK et al. (2012), PTEP for review)

Big breakthrough :

✓ Success of the neutrino mechanism: (shock-revival) for 8.8 to 27  $M_{\text{sun}}$  stars in 2D self-consistent simulations !

~ 40 successful 2D models

But still,  
The neutrino mechanism:

Unexplored >90 %

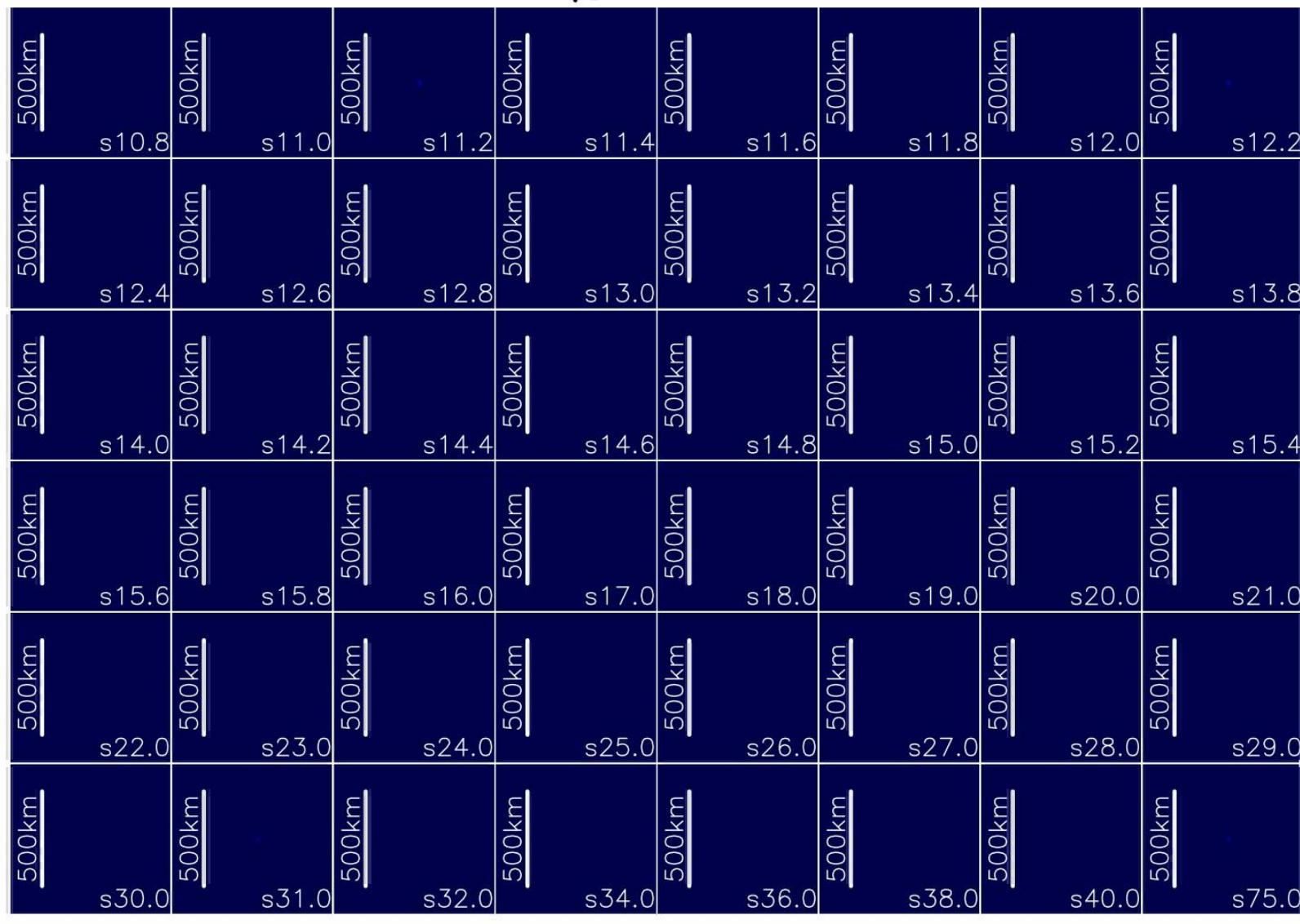
Systematic study needed:

Self-consistent (in 2D, firstly) sim.  
to gain a "landscape view" of explosion dynamics !

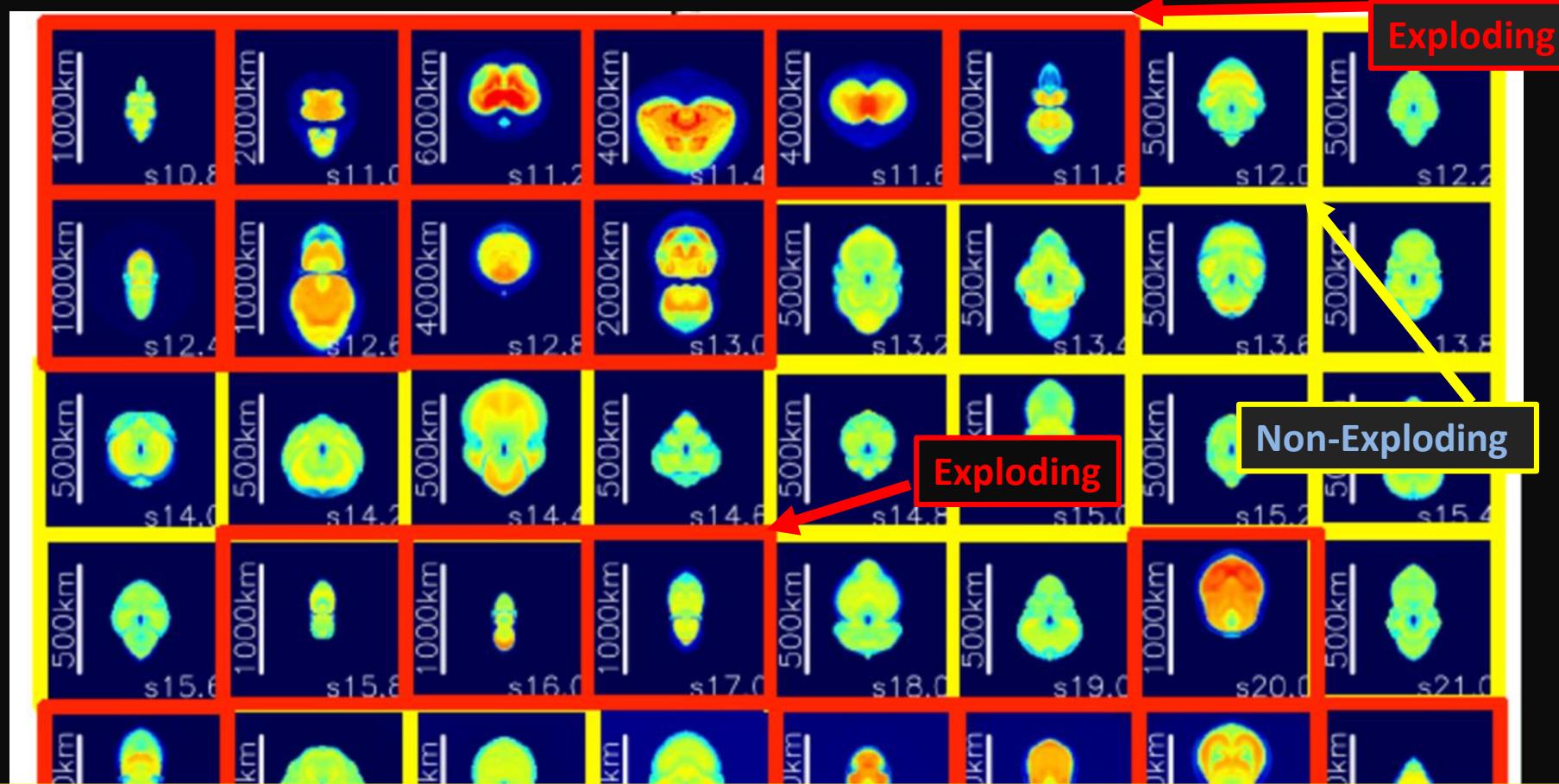
# Recent trend : 2D Landscape simulations

$T_{pb} = 0\text{ms}$

Nakamura et al. (2014)



# Recent trend : 2D Landscape simulations



✓ "Progenitor mass" is a good diagnostics for explosion.

✓ Key : "Compactness:  $M_{\text{core}} / R_{\text{core}}$ "

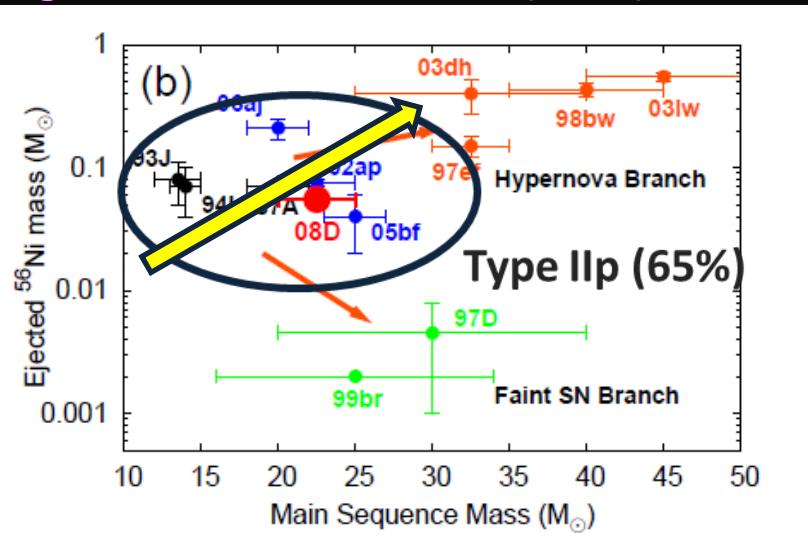
More Compact  $\Rightarrow$  Stronger gravity due to PNS  $\Rightarrow$  higher accretion neutrino luminosity  
 $\Rightarrow$  helpful for shock-revival  $\Rightarrow$  (Diagnostic) Explosion energy higher

✓ Core-Collapse SN problem = Initial value problem !  $\Rightarrow$  Multiple progenitor studies needed!

# Observation

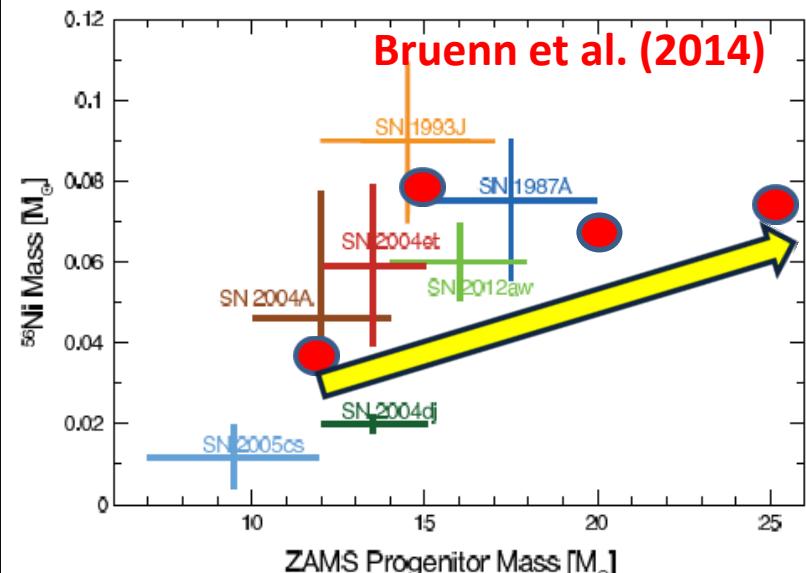
# vs Theory (2D models)

Light-curve : Tanaka et al. (2009)

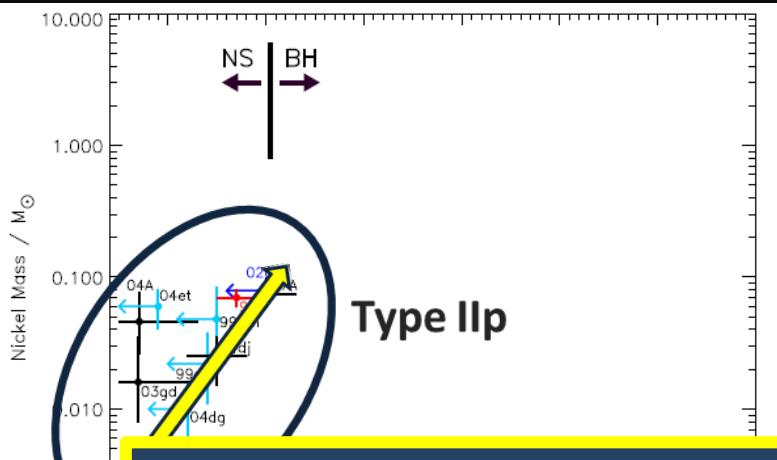


("Cautions": "2D" with unsaturated " $M_{\text{Ni}}$ " and " $E_{\text{exp}}$ ")

Bruenn et al. (2014)

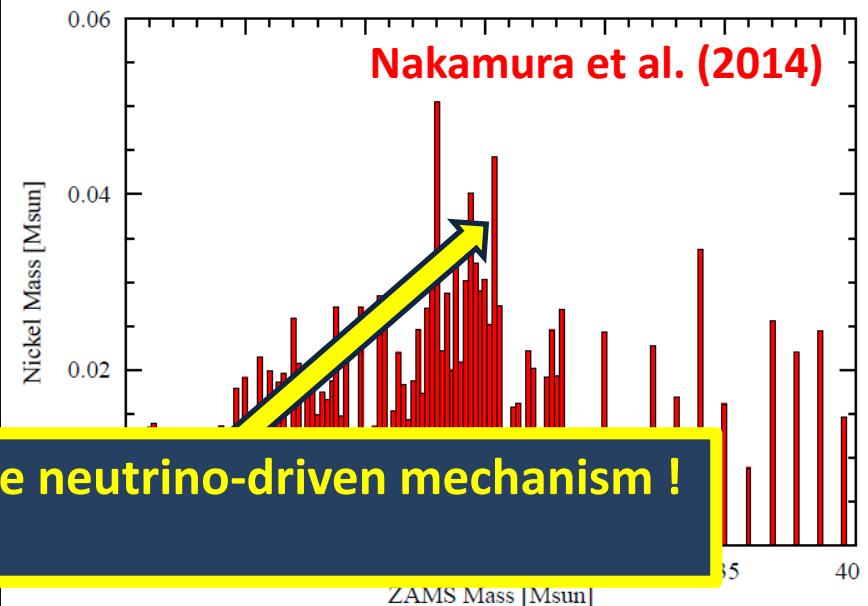


Pre-supernova image : Smartt (2009)



- ✓ Lend support to the validity of the neutrino-driven mechanism !
- ✓ Must go to 3D models !!

Nakamura et al. (2014)



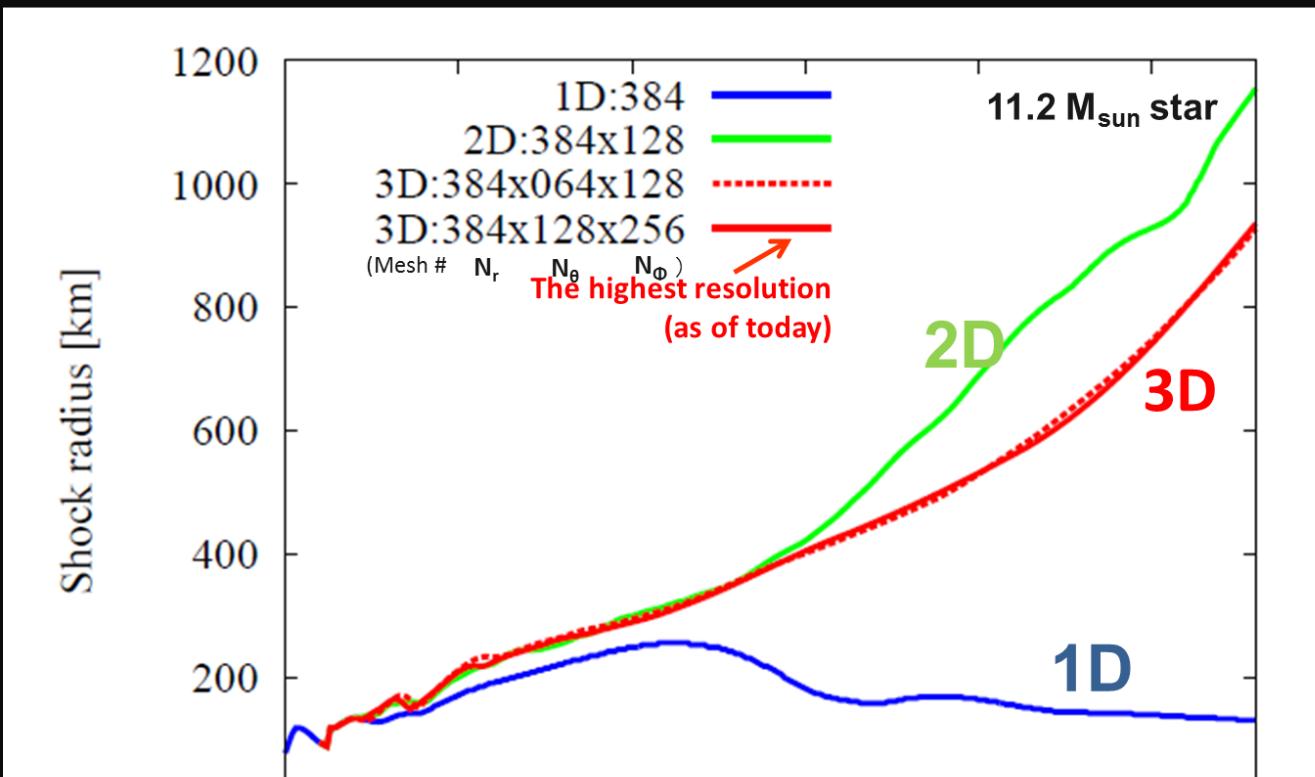
# Project L: 特徴的親星で3D self-consistentモデルで長時間進化 ⇒ 観測比較・系統性を解明

メンバー: 滝脇知也(理研)、諏訪雄大(京大)、中村航(早大)、黒田仰生(バーゼル大)、  
固武慶(福岡大)、住吉光介(沼津高専)、今倉暁(筑波大)、松古栄夫(KEK)

マルチメッセンジャー解析: 田中雅臣(天文台), 端山和大(大阪市大)、堀内俊作(バージニア工科大)

Takiwaki et al. (2014), ApJ

✓ 3D vs 2D  
京の成果(その1)

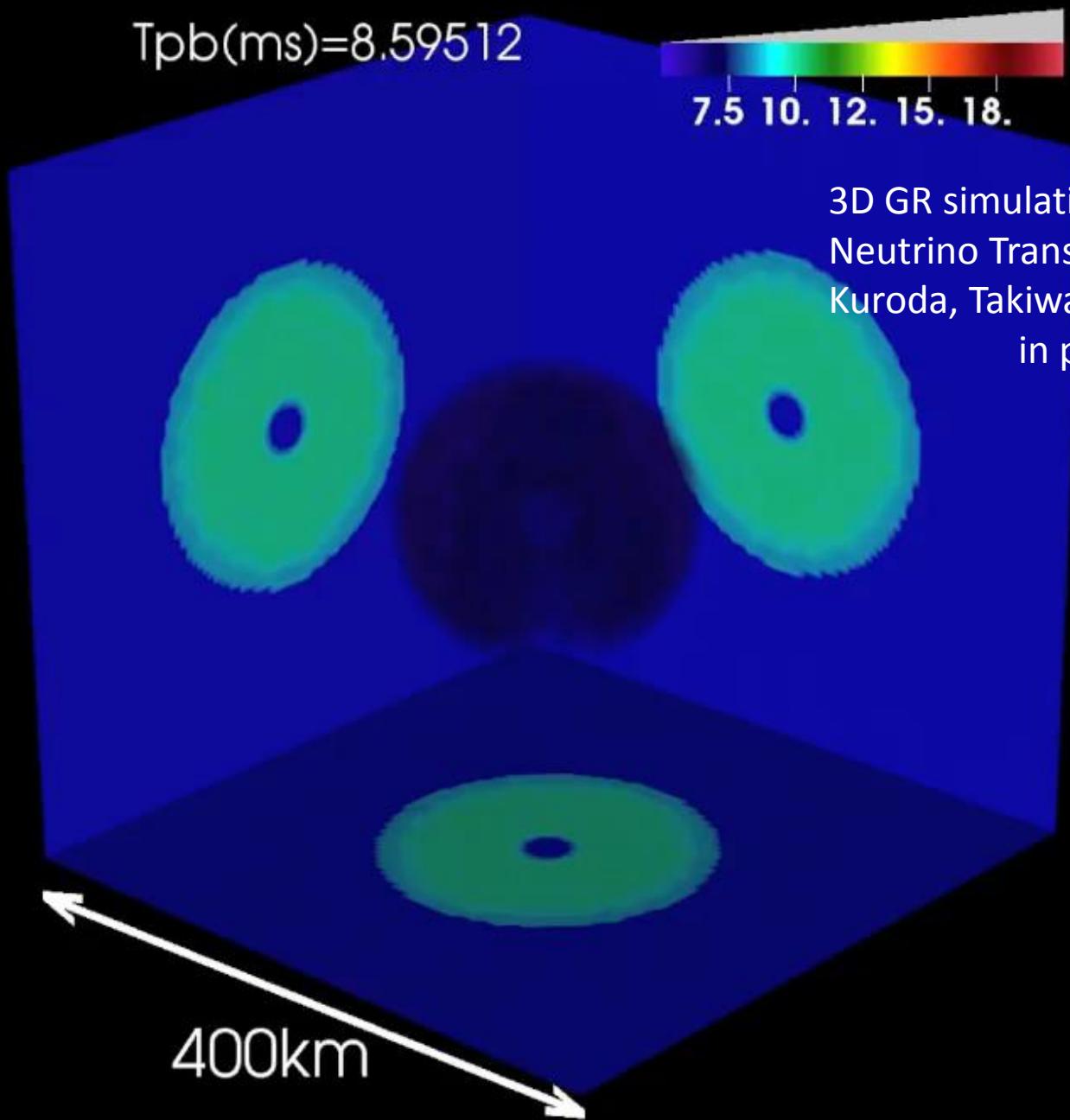


- ✓ 3D explosions are weaker than 2D explosions (Hanke et al. (2014): 27 M<sub>sun</sub> however, Nelson et al. (2015): 9.6 M<sub>sun</sub>) ⇒ Systematic 3D modeling needed !!
- ✓ Encouraging... Find possible ingredients to boost explosions !

Tpb(ms)=8.59512

7.5 10. 12. 15. 18.

3D GR simulations with  
Neutrino Transport;  
Kuroda, Takiwaki, KK  
in prep



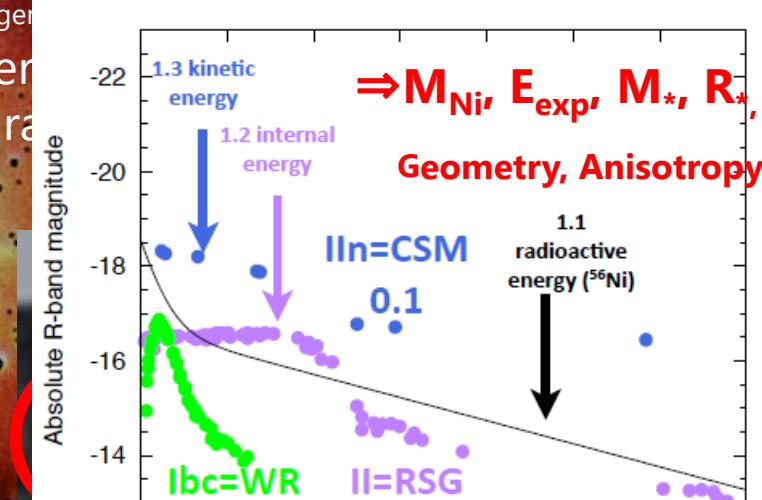
# SN 20xx ! in the Galactic center: End-to-End Bridging Simulations



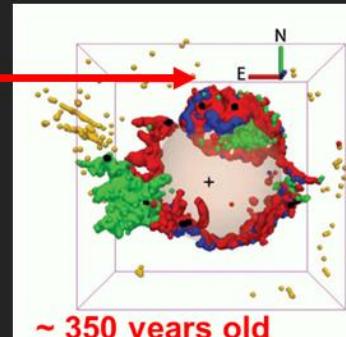
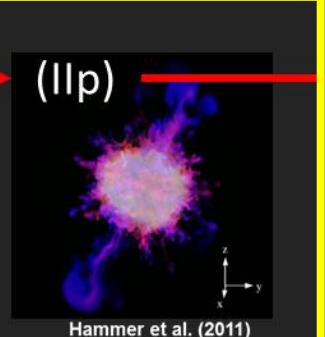
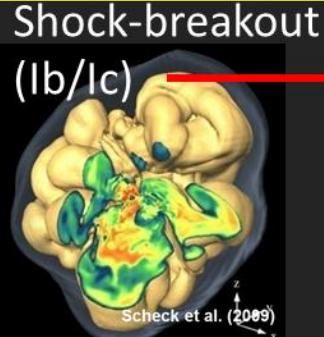
**SK detects ~ 10,000 neutrinos**

< 15min SURGE meeting (Supernova Urgent Response Group)

< 1 hour SK provide alert: Astronomers (onset of neutrino burst, duration)



## Self-Consistent CCSN Simulations



# まとめ：5年後に向けて

ポスト京クラス(京の60倍を仮定)：時間方向・(位相)空間に伸ばす

## 1. Project F: 定量的理解

計算：3D full Boltzmann + SR/post-Newton hydro simulation

位置づけ：他グループを遥かに凌駕

ゴール：ニュートリノメカニズムの成否

テーマ：滝脇モデル空間分解能：爆発開始500ミリ秒 1 モデル

こんな親星が面白い！  
マイクロ物理の効果

Feedbacks

精密に計算すると…

## 2. Project L: 系統的理解

計算：3D approximate transport (IDSA, M1) + GR simulation

位置づけ：他グループと競争、優位性を確保

ゴール：長時間計算、ニュートリノ加熱機構の観測的実証

テーマ：Systematics (親星、空間分解能力依存性、自転・磁場、EOS、マイクロ物理の効果) を調べる。