

数値シミュレーションで迫る 高密度天体のエンジン

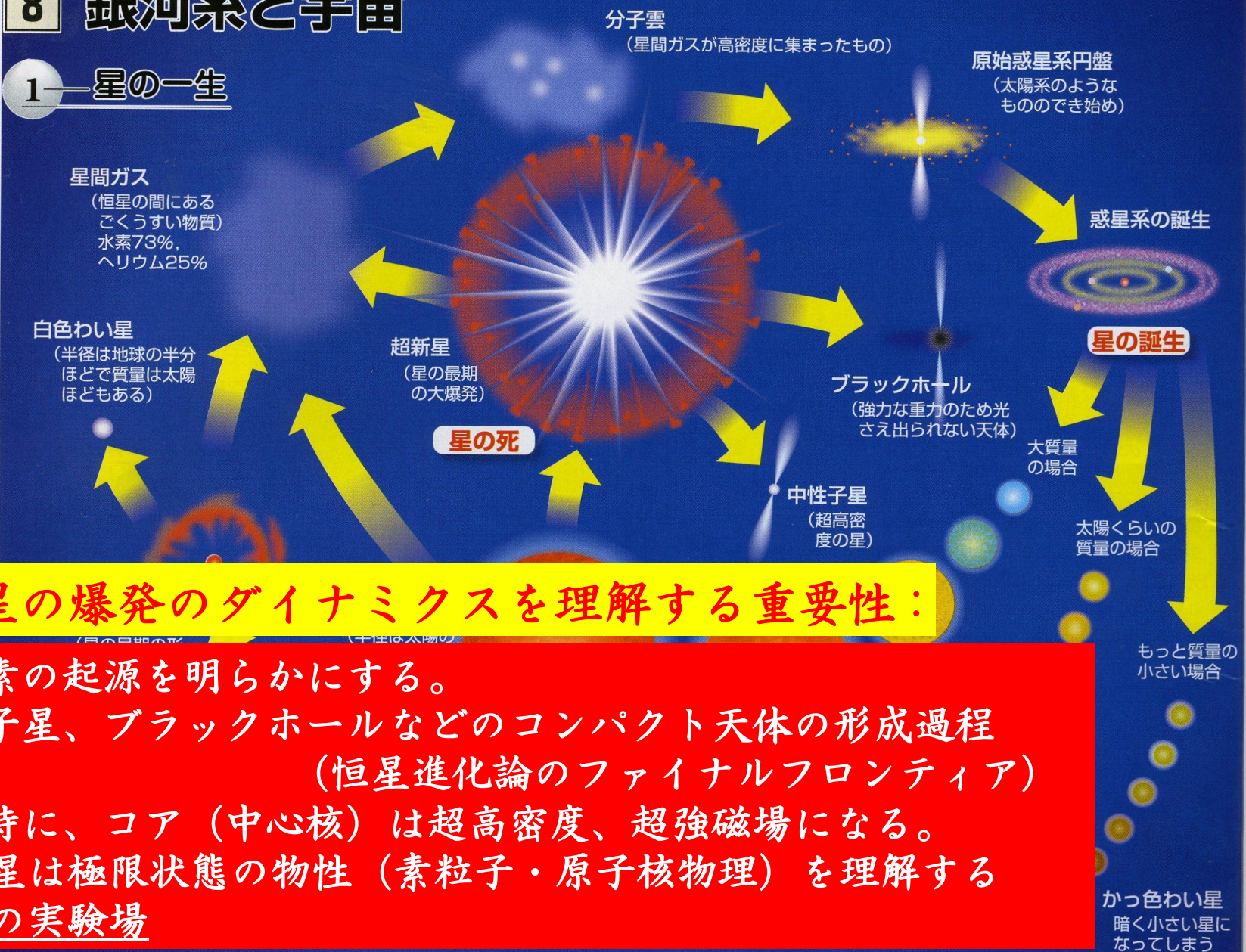
固武 慶

(国立天文台 理論研究部)

第41回天文・天体物理若手 夏の学校
8月1-4日 愛知ホテルたつき

8 銀河系と宇宙

1 星の一生



超新星の爆発のダイナミクスを理解する重要性：

- ・重元素の起源を明らかにする。
- ・中性子星、ブラックホールなどのコンパクト天体の形成過程
(恒星進化論のファイナルフロンティア)
- ・爆発時に、コア(中心核)は超高密度、超強磁場になる。
超新星は極限状態の物性(素粒子・原子核物理)を理解する
自然の実験場

超新星爆発



ニュートリノ天文学

超新星ニュートリノ



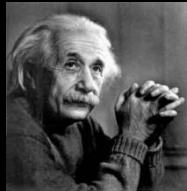
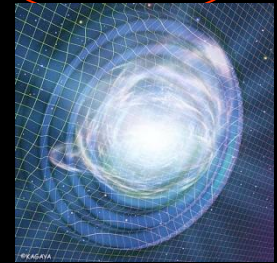
(間違いない)

重力波天文学

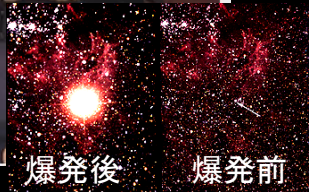
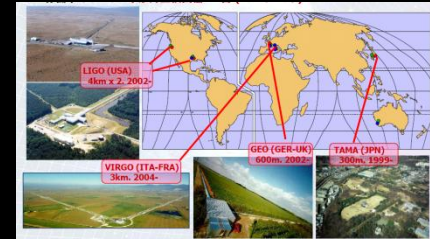
重力波

天文学的関連

- ✓ 中性子星、ブラックホールの生成のメカニズムの解明
- ✓ 宇宙における重元素合成
- ✓ ガンマ線バーストのエンジン



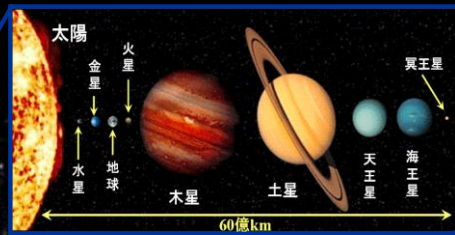
A. Einstein:
General
Relativity
(1916)



非常に多岐にわたる天体、宇宙物理現象と関連を持つ

爆発のメカニズムは未だに理解されていない!
(およそ40年に亘る問題)

高密度天体研究のスケール・特徴

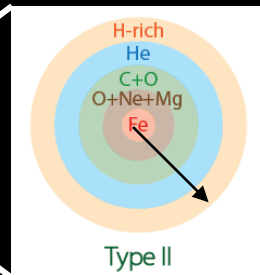


8 kpc (地球から銀河中心まで)

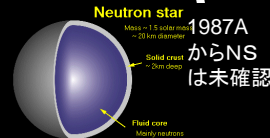
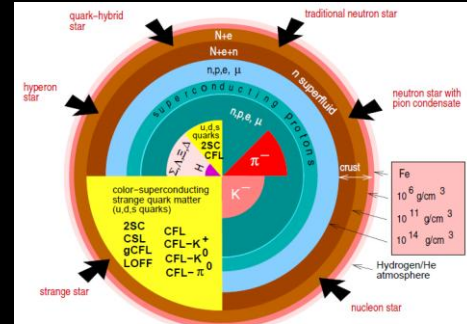
50 kpc = $50 \times 10^3 \times 3.1 \times 10^{18}$ cm $\sim 10^{22}$ cm



超新星爆発 $\sim 10^{13}$ cm (親星)



Weber (astro-ph/0407155)

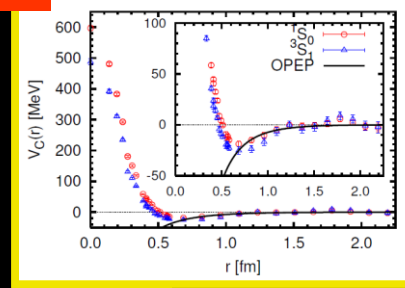


中性子星 10^6 cm

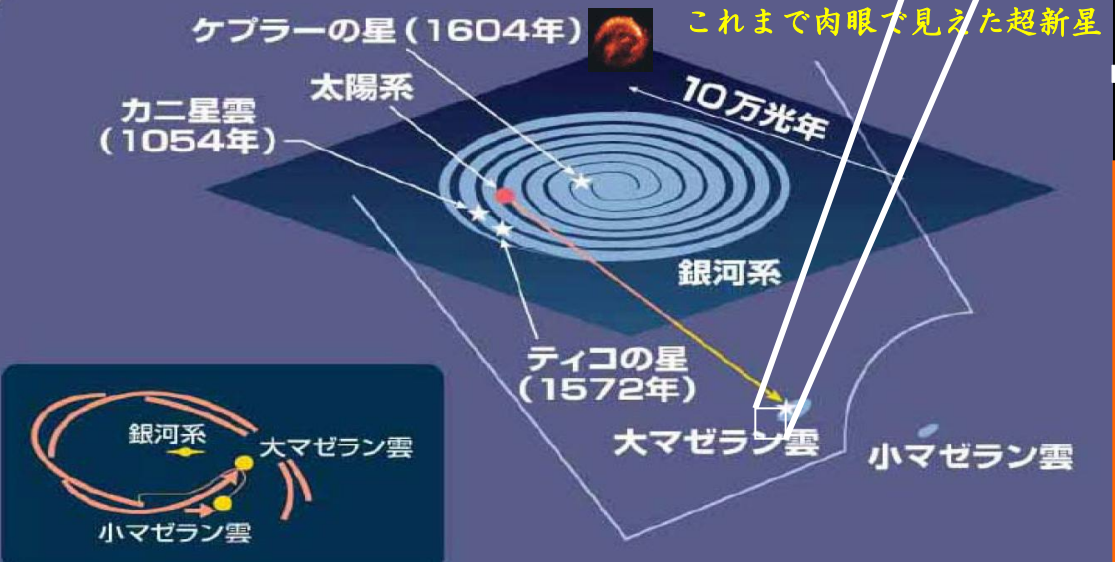
中性子星は自然の実験場

核子 (中性子・陽子)

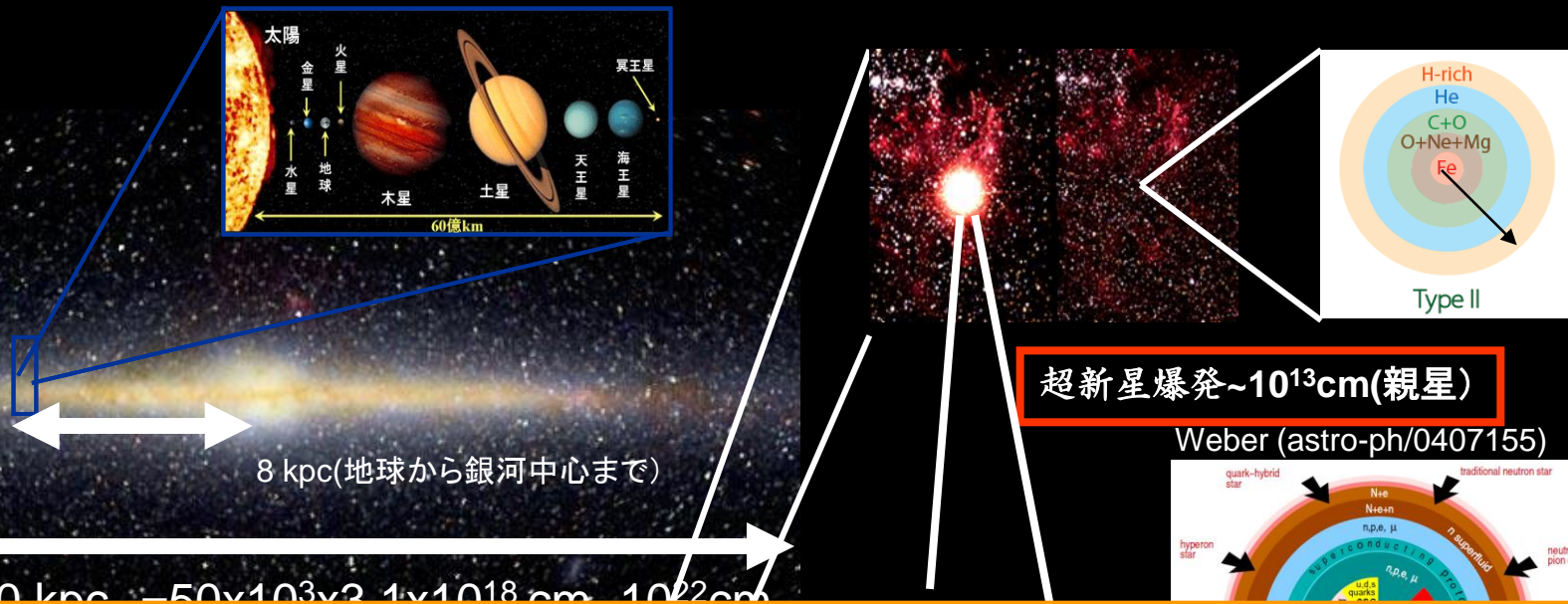
1 fm = 10^{-15} m



Ishii, Aoki & Hatsuda, PRL 99 (2007)



高密度天体研究のスケール・特徴



- ✓ クォークから天体爆発現象まで30桁以上の壮大なスケール
 - ✓ 観測が日進月歩に進む (マルチメッセンジャー天文学)
 - ✓ 自然界の4つの力が登場!
 - 強い力(核力⇒爆発天体の爆発の強さを決める)
 - 弱い力 (原子核・ニュートリノ反応⇒メカニズムを決める)
 - 電磁気力 (⇒中性子星の進化を決める)
 - 重力 (⇒爆発天体のエネルギー源を決める、一般相対論)
- 「物理のワンダーランド！」

この分野のゴール・骨組み

重力波天文学



ニュートリノ天文学



(東大宇宙線研: SuperKamiokande)

4つの力を含むシミュレーションの高精度化:
一般相対論的ニュートリノ輻射輸送計算

高密度天体核・
爆発現象
のメカニズム

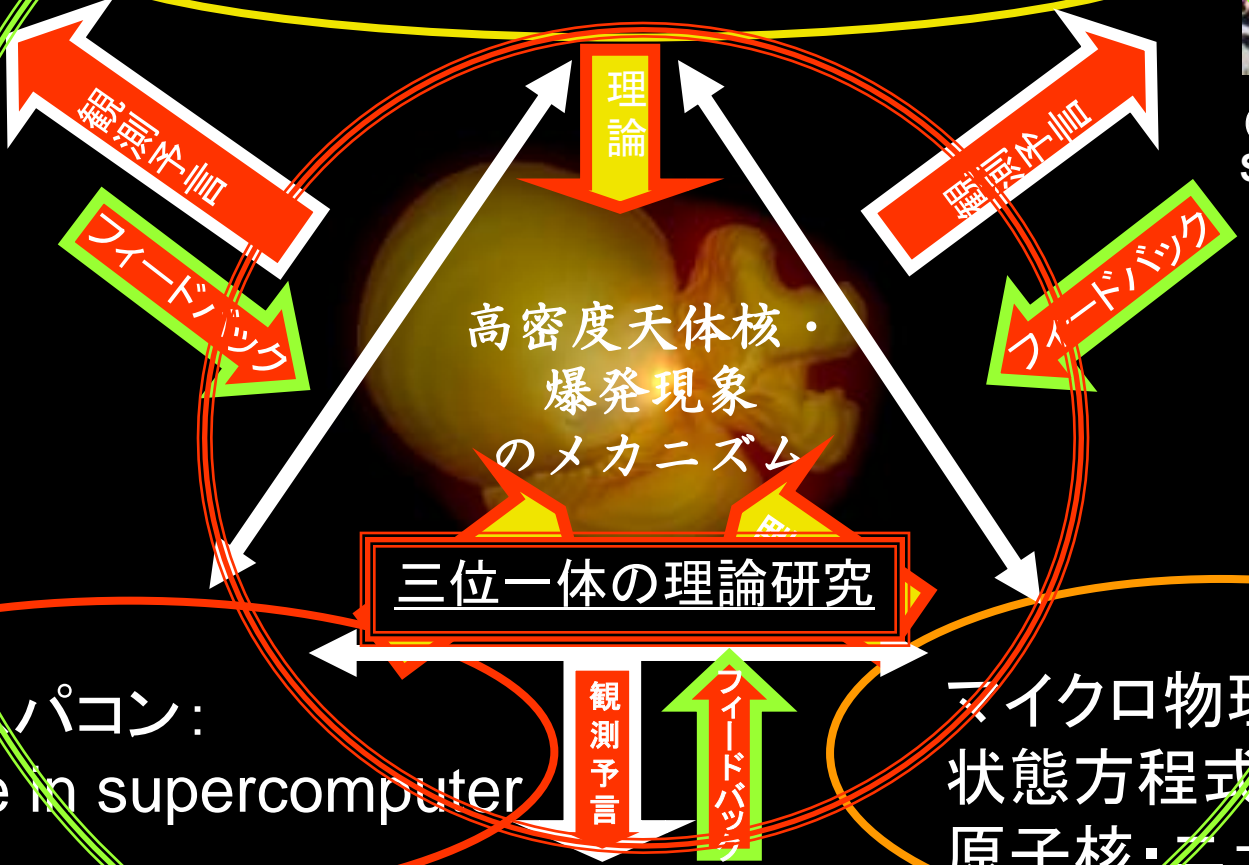
三位一体の理論研究

次世代スパコン:
Advance in supercomputer

マイクロ物理の精緻化:
状態方程式
原子核・ニュートリノ反応

多波長天文学

X線、γ線、可視(MAXI・Suzaku・Astro-H, Swift, Subaru, Widge)



目次

§ 1 超新星爆発の標準シナリオと問題点
✓超新星モデラー—40年間の苦闘

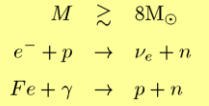
§ 2 シミュレーション研究最前線
「爆発天体現象のエンジンは解明されたか？」

§ 3 マルチメッセンジャー天文学に向けて
(重力波・ニュートリノ・多波長電磁波観測)
「天体物理・素核物理へのフィードバック」

§ 4 まとめと展望

超新星爆発の標準シナリオ

重力崩壊開始

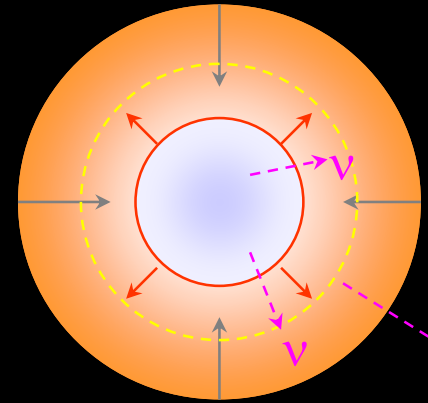
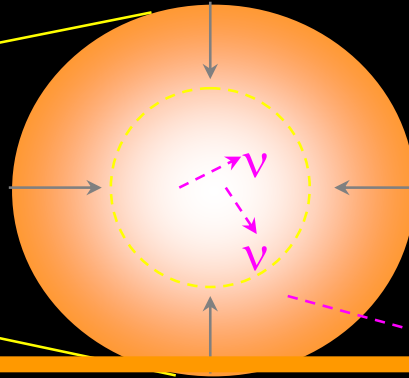
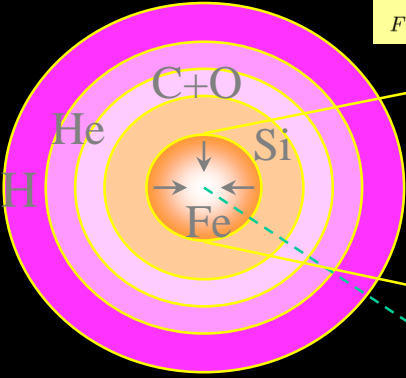


ニュートリノ
トラッピング

$\rho_c \sim 10^{12} \text{g/cm}^3$

コア・バウンス

$\rho_c \sim 3 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$



超新星爆発

$E_{exp} \sim 10^{51} \text{erg}$

鉄コアのサイズ

星の外殻への衝撃波の伝播

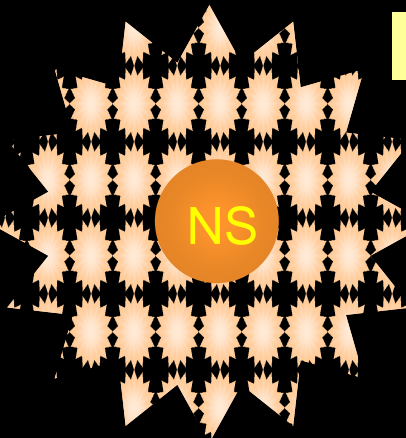
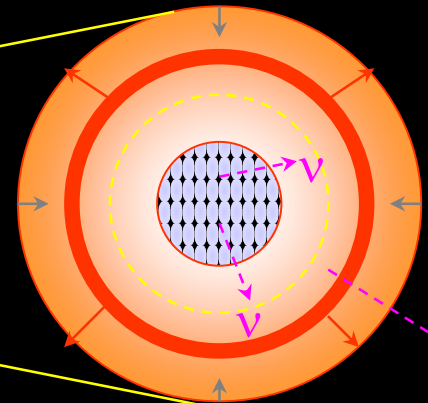
$R_{\text{core}} \sim 1000 \text{km}$

$M_{\text{core}} \sim 1.4M_{\odot}$

$\rho_{\text{center}} \sim 3 \times 10^9 \text{g/cm}^3$

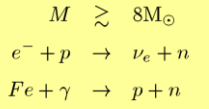
$T \sim 1 \text{ MeV}$

衝撃波の失速



超新星爆発の標準シナリオ

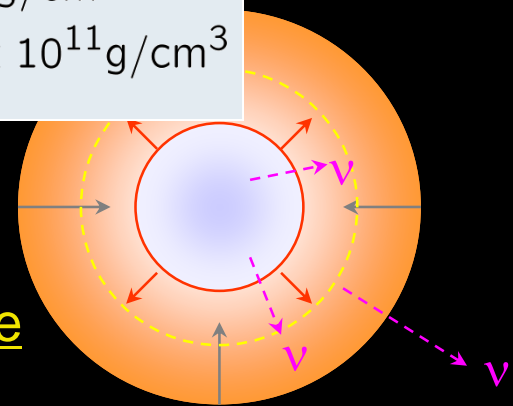
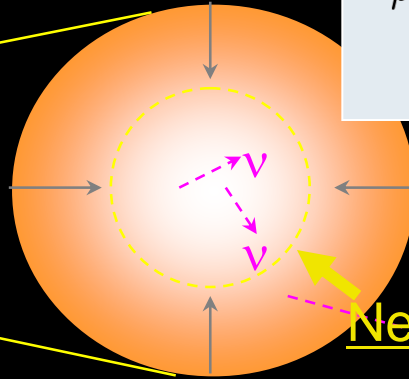
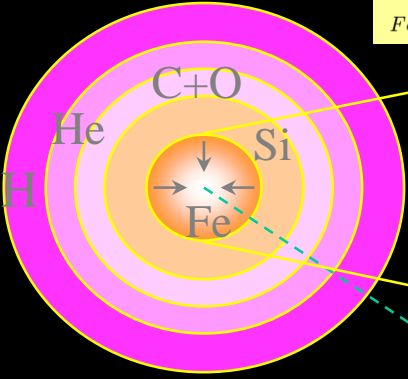
重力崩壊開始



ニュートリノ
トラッピング K.Sato (1975)

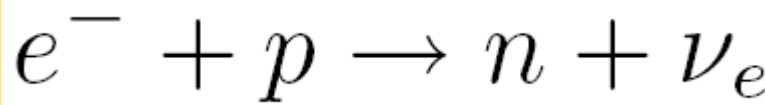
$\rho_{\text{center}} \approx 10^{12} \text{g/cm}^3$
 $\rho_{\text{trap}} \approx 1.4 \times 10^{11} \text{g/cm}^3$

$\rho_c \sim 3 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$



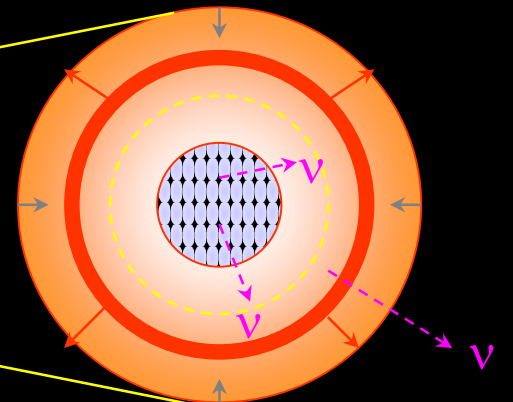
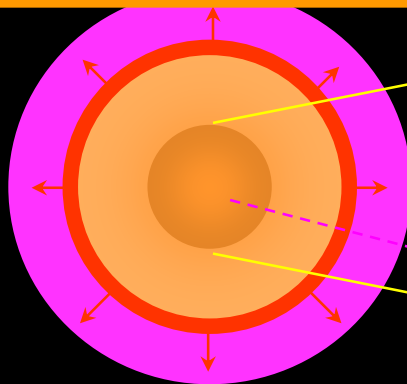
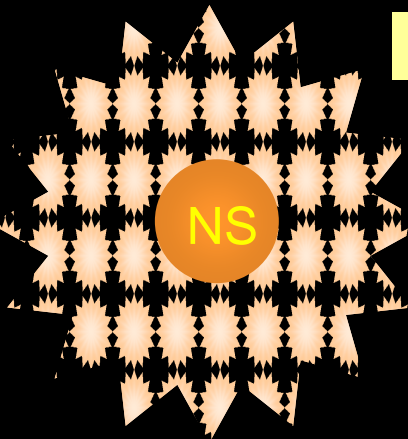
Neutrino sphere

超新星爆発



衝撃波の失速

$E_{\text{exp}} \sim 10^{51} \text{erg}$

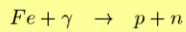


超新星爆発の標準シナリオ

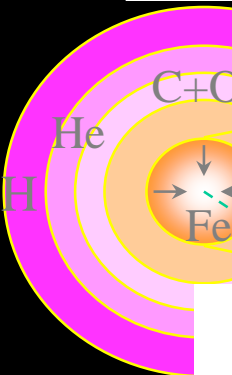
$$\rho_{\text{center}} \approx 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

重力崩

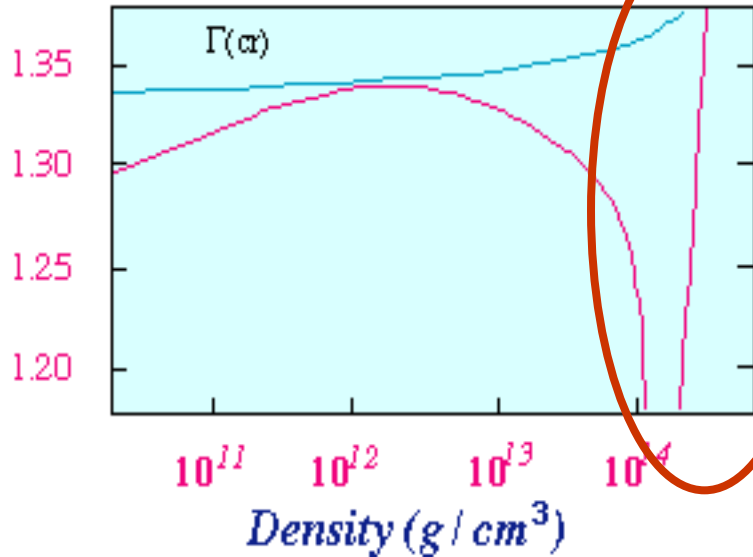
g/cm³



$$P = K \rho^\Gamma$$

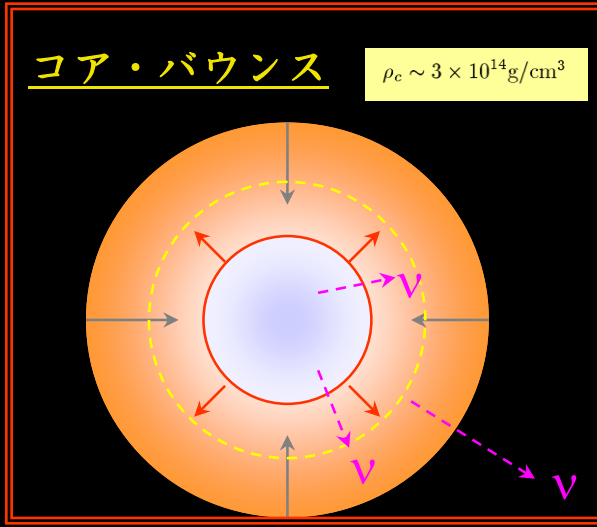


Adiabatic Index (Bruenn, 1985)



Stiff!!

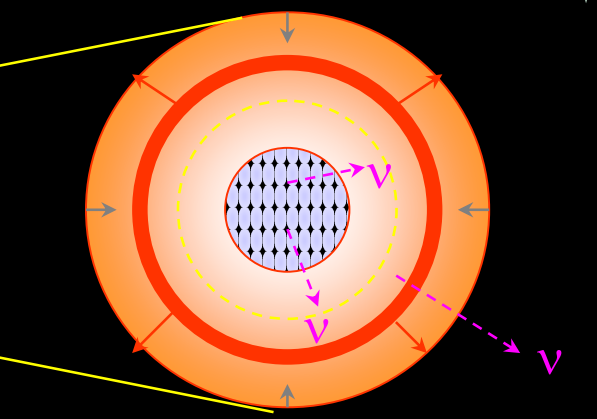
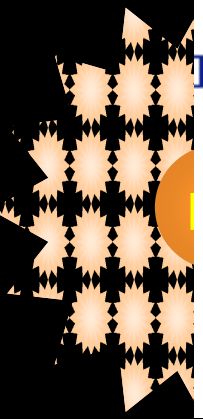
波の伝搬



コア・バウンス $\rho_c \sim 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$

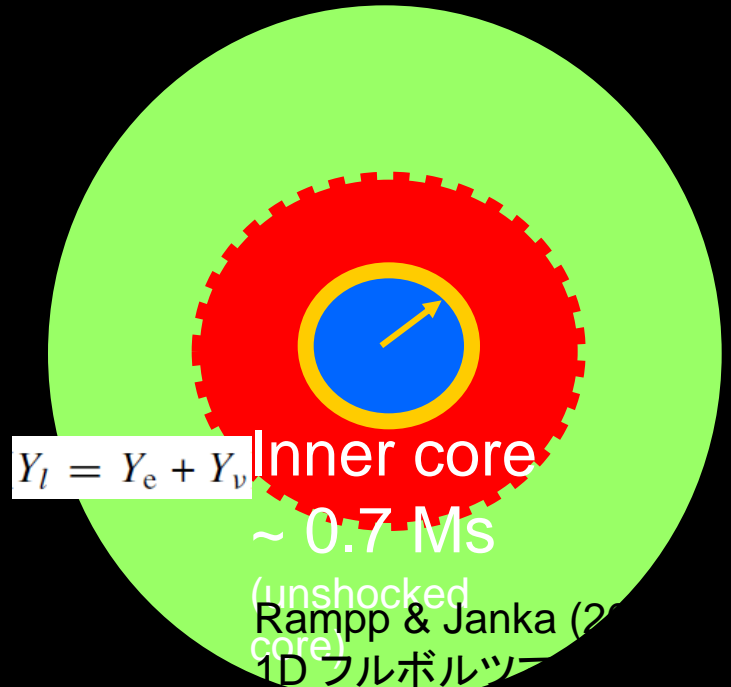
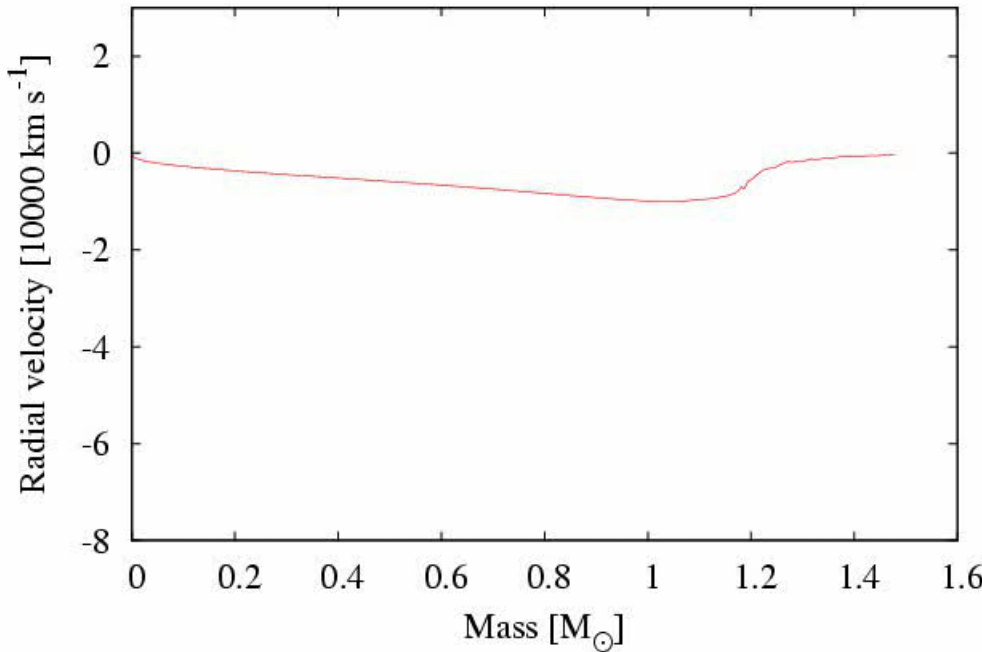
超新

衝撃波の失速



バウンス付近の物理

鉄コア質量 = 1.4 Ms

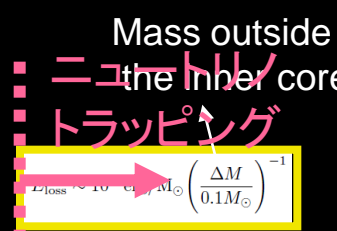


✓ The initial shock position is given ~

$$M_{ic} \sim 0.7 M_{\odot} \left(\frac{Y_e}{0.34} \right)^2$$

$$Y_e = \frac{n_e}{n_b}$$

✓ During the shock-passage in the iron core, the kinetic energy of the shock gets small due to the photo-dissociation at

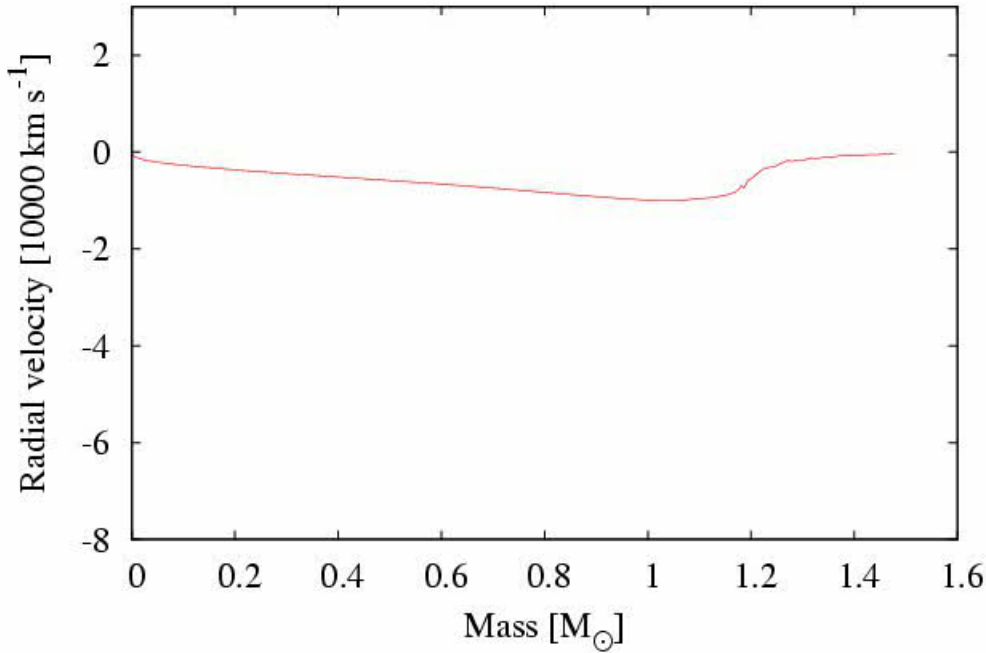


✓ Larger Y_e leads to more massive inner core \Rightarrow Good for explosions.
To accurately determine the electron cap. rates is crucial!!

✓ バウンスショックは鉄の光分解(吸熱)、衝撃波背面のニュートリノ冷却で失速

バウンス付近の物理

鉄コア質量 = 1.4 Ms



$$Y_l = Y_e + Y_\nu$$

Inner core

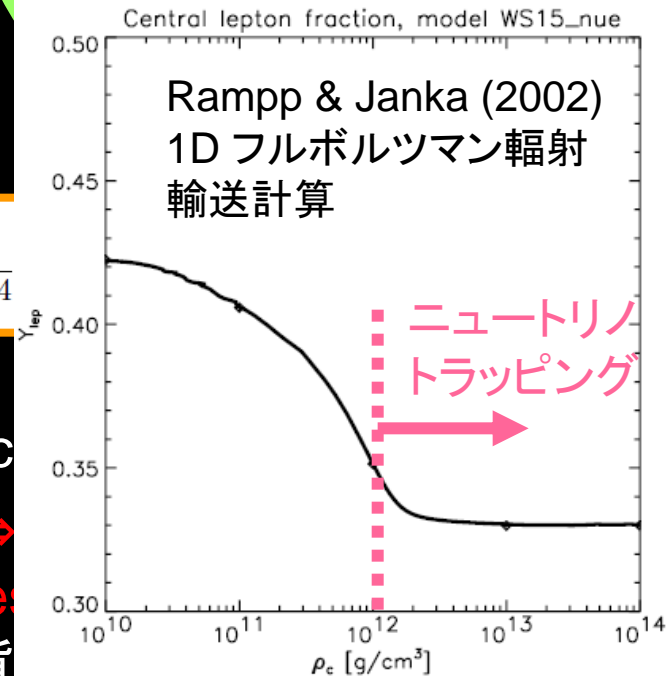
✓ The initial shock position is given ~

$$M_{ic} \sim 0.7 M_\odot \left(\frac{Y_e}{0.34} \right)$$

✓ During the shock-passage in the iron core, the strength of the shock gets small due to the photo-dissociation of iron nuclei.

✓ Larger Y_e leads to more massive inner core \Rightarrow To accurately determine the electron capture rate

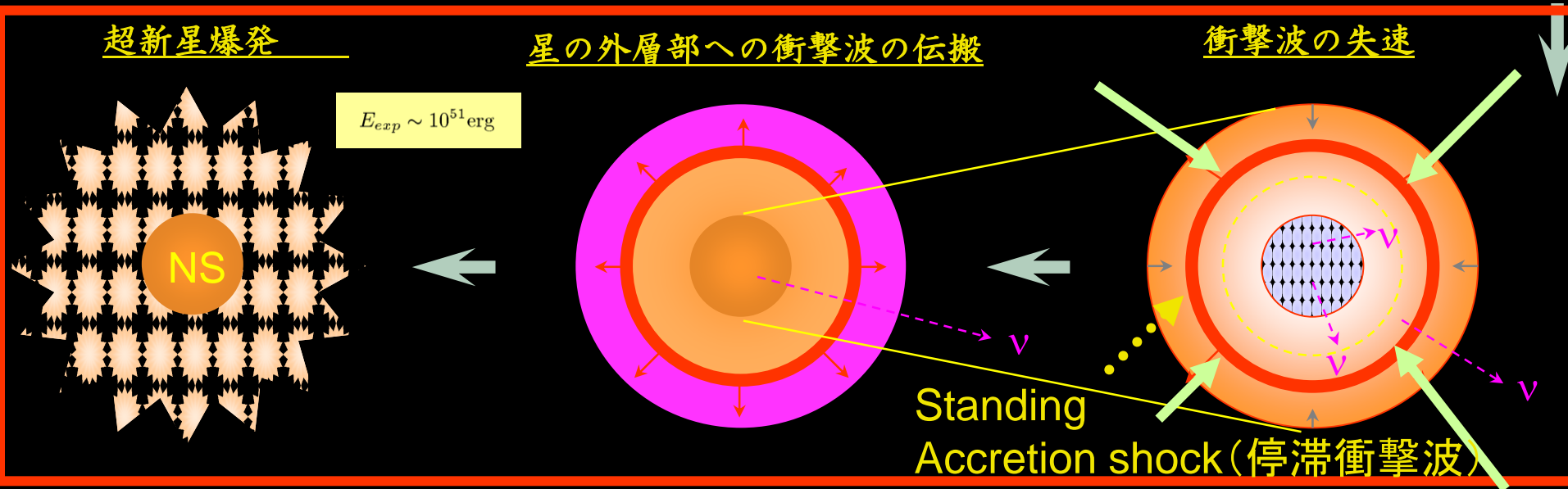
✓ バウンスショックは鉄の光分解(吸熱)、衝撃波背



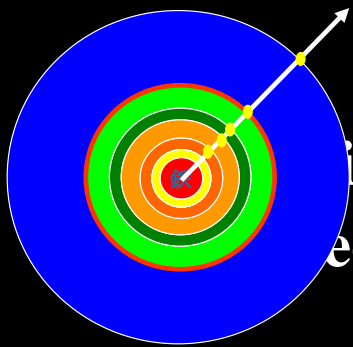
Rampp & Janka (2002)
1D フルボルツマン輻射
輸送計算

小まとめ：超新星爆発の標準シナリオ

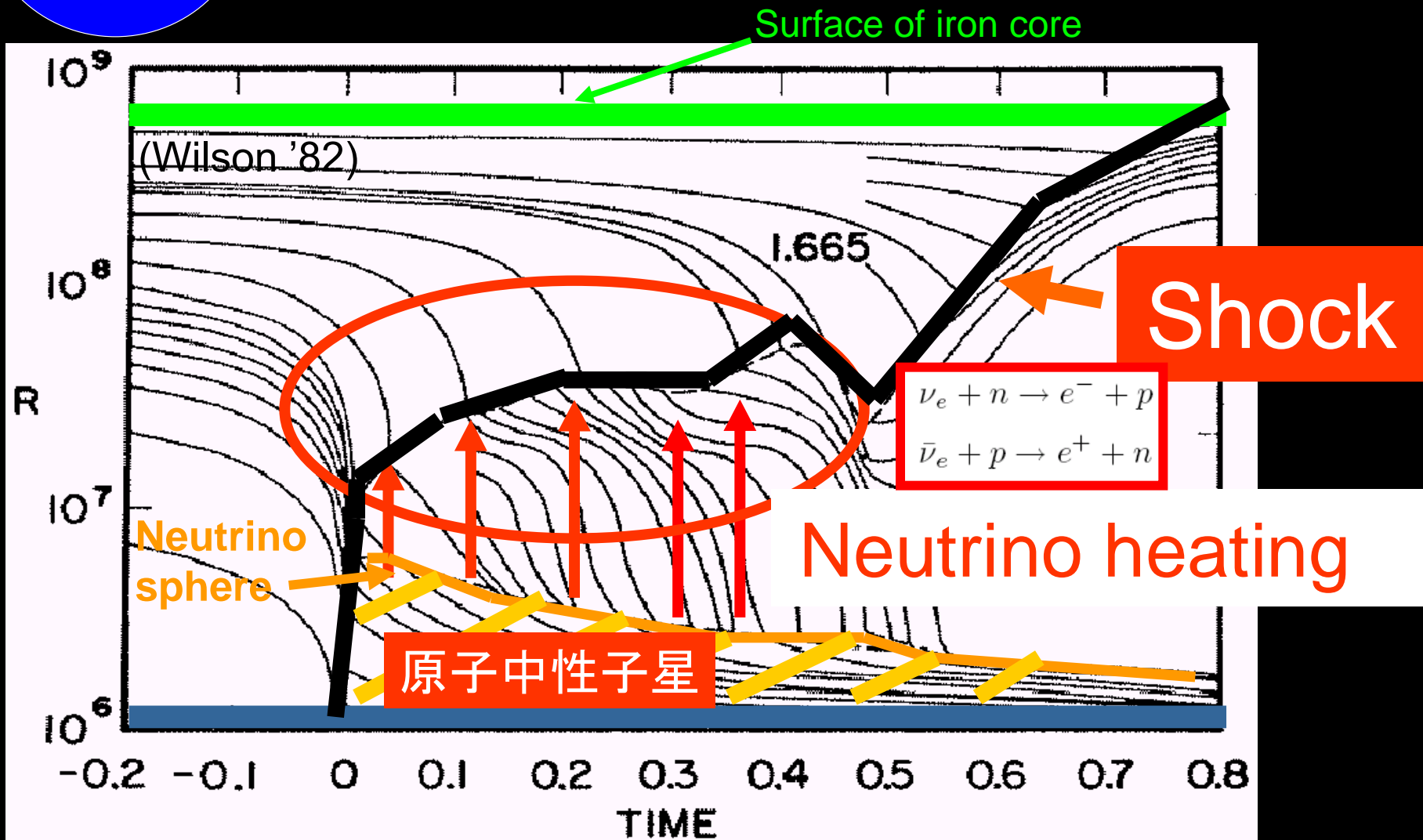
- ✓ 過去20年間のシミュレーション結果をまとめると
バウンスショックの運動エネルギーは、鉄の光分解反応
(吸熱反応) で奪われてしまう。
→ “prompt” 爆発は成功しない
- ✓ バウンスショックは停滞衝撃波に
- ✓ 超新星のメカニズムを理解することは、失速衝撃波を元気に
するメカニズムを理解すること！



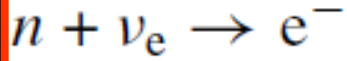
ニュートリノ加熱メカニズム



...ed and most promising way to produce SN explosions.
...ed in the 1D numerical simulation by Bethe & Wilson '85.



ニュートリノ加熱機構のオーダー評価



(中性子が毎秒暖められる)
半径Rでのニュー

$$Q_v^+ \cong \frac{L_\nu \sigma(E_\nu)}{4\pi R^2}$$

(erg/s cm²) 入射フラックス
× cm²: 的の面積
× (ターゲット粒子)

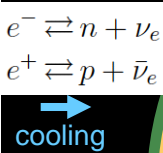
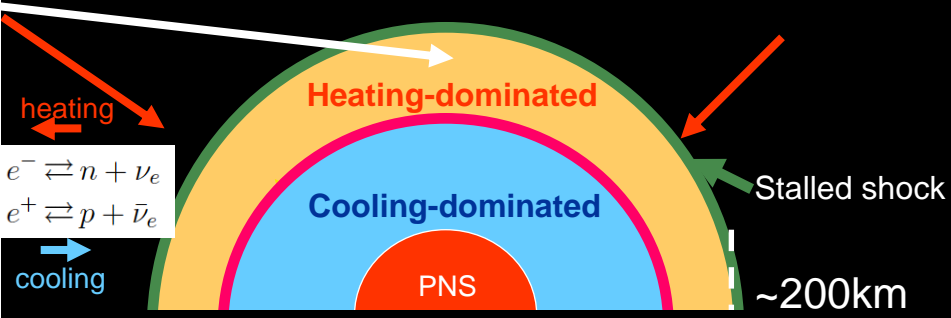
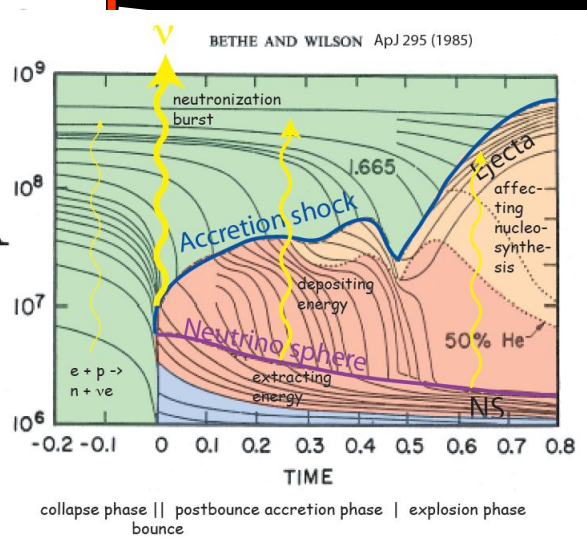
$$\sigma(E_\nu) \approx 9 \times 10^{-44} (E_\nu/1 \text{ MeV})^2 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$Q_v^+ \sim 44.8 \left(\frac{L_\nu}{10^{52} \text{ erg s}^{-1}} \right) \left(\frac{E_\nu}{15 \text{ MeV}} \right)^2 \left(\frac{R}{150 \text{ km}} \right)^{-2} \left(\frac{Y_N}{1.0} \right) \left[\frac{\text{MeV}}{\text{s} \cdot \text{nucleon}} \right]$$

一方、中性子の重力束縛エネルギーは

$$-\frac{GM_{\text{NS}} m_u}{R} = -13.0 \left(\frac{M_{\text{NS}}}{1.4 M_\odot} \right) \left(\frac{R}{150 \text{ km}} \right)^{-1} \text{ [MeV/nucleon]}$$

つまり1/4秒ぐらいニュートリノを吸い続ければ、爆発しそうである。
(実際はニュートリノ冷却が同時に起こっているので、もっと遅く爆発する)



ニュートリノ冷却率

$$Q_v^- = -\sigma(T) a' c T^4$$

$$a' = 7/16 \times 1.37 \cdot 10^{26} \text{ erg cm}^{-3} \text{ MeV}^4$$

全加熱率(加熱-冷却)

$$Q_{\text{tot}} = Q_v^+ - Q_v^- = Q_v^+ \left[1 - \left(\frac{2R}{R_v} \right)^2 \left(\frac{T}{T_v} \right)^6 \right]$$

using $\tau = \tau_s \frac{R_s}{R}$

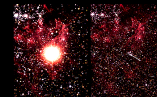
$$R_g = \sqrt{\frac{2R_s^3}{R_v} \left(\frac{T_s}{T_v} \right)^3}$$

$T_v = 4.2 \text{ MeV}, T_s = 1.5 \text{ MeV}$
 $R_s = 200 \text{ km}, R_v = 80 \text{ km}$
 $R_g \approx 95 \text{ km}$

ニュートリノ加熱メカニズムのエネルギー収支

観測される典型的な超新星の爆発エネルギー:

$$E_K \sim 1 - 2 \times 10^{51} \text{erg}$$



爆発時に開放されるエネルギー = 中性子星の重力エネルギー

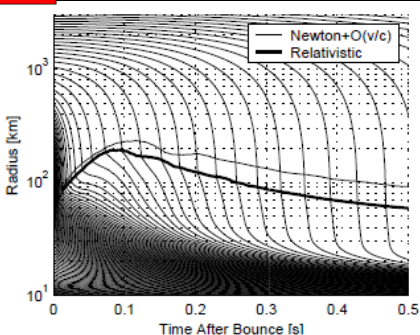
$$\approx 3 \times 10^{53} \text{erg} \left(\frac{M}{1.4 M_{\text{sol}}} \right)^2 \frac{10 \text{km}}{R}$$

エネルギーの運び手はニュートリノ

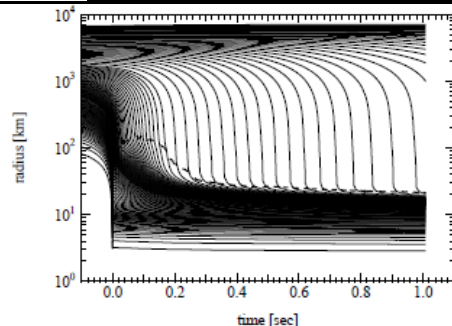
- ✓ ニュートリノ加熱メカニズムを成功させるためには、1パーセントのエネルギー輸送を行えば良い。
 - ✓ ニュートリノ輻射輸送問題を解かなくてはならない。
(フェルミオン断面積: エネルギー², エネルギー空間、角度方向へのカップリング)
 - ✓ 2次元軸対称の場合: $\sim 10^{20}$ の演算回数が必要。
一つのRunで 1 CPU年 @ 10Tflops スーパーコンピュータ
 - ✓ 数値計算の誤差を **1%以内** にしないといけない。
- Supernova simulation は数値天文学の一つのgrand challenge

Wilson's simulation の追試

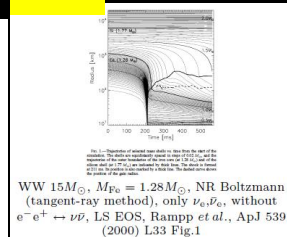
- ✓ この20年間の数値計算の主流は、Wilsonの結果を追試すること。
- ✓ 鉄コアを持つような大質量星では、球対称を仮定した数値シミュレーションでは爆発を再現できない。



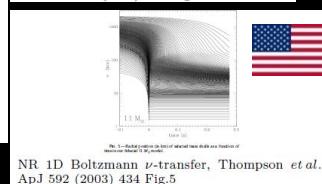
NH $13M_{\odot}$, GR Boltzman, LS EOS+Si burning
Liebendörfer *et al.*, Phys.Rev. D63 (2001) 103004
(astro-ph/0006418 v2) Fig.6



$15M_{\odot}$, Shen EOS, Sumiyoshi *et al.*, 2005.

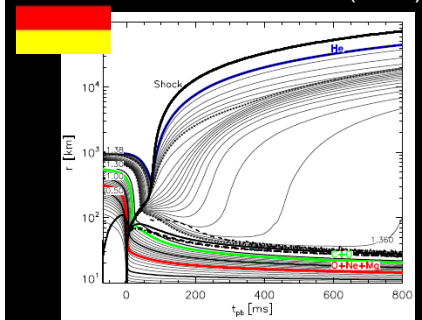


WW $15M_{\odot}$, $M_{Fe} = 1.28M_{\odot}$, NR Boltzman
(tangent-ray method), only $\nu_e, \bar{\nu}_e$, without
 $e^-e^+ \leftrightarrow \nu\bar{\nu}$, LS EOS, Rampp *et al.*, ApJ 539
(2000) L33 Fig.1

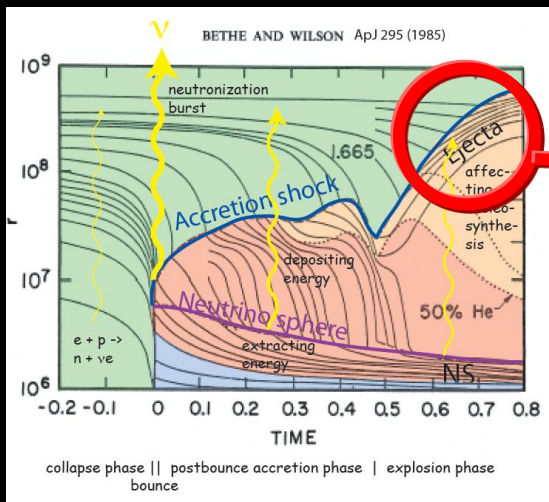


NR 1D Boltzman ν -transfer, Thompson *et al.*,
ApJ 592 (2003) 434 Fig.5

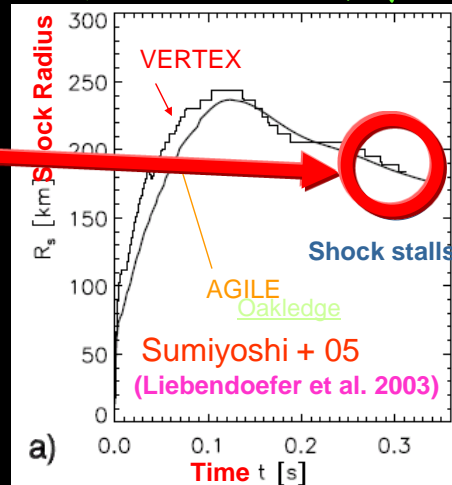
唯一の例外 $8-10M_{\text{sun}}$
ONeMg core star
Kitaura *et al.* AA(2006)



独立のグループで結果を詳細比較



~20 years



Doing-best
simulations, but..

よく一致して
爆発せず!

この20年を振り返って

- この分野のメインストリーム：1次元球対称 but ...
より詳細なマイクロ物理・高精度なニュートリノ輸送法で！

Neutrino reactions in the supernova core

Sophistications

Good(O) or bad(x) for explosion

Reaction	References
$\nu e^\pm \rightleftharpoons \nu e^\pm$	Mezzacappa & Bruenn (1993a) Cemohorsky (1994)
$\nu A \rightleftharpoons \nu A$	Horowitz (1997) Bruenn & Mezzacappa (1997)
$\nu N \rightleftharpoons \nu N$	Burrows & Sawyer (1998)
$\nu_e n \rightleftharpoons e^- p$	Burrows & Sawyer (1999)
$\bar{\nu}_e p \rightleftharpoons e^+ n$	Burrows & Sawyer (1999)
$\nu_e A' \rightleftharpoons e^- A$	Burrows & Sawyer (1999)

See 山室さん、庄司さん's talk !

- ✓ベストを尽くして1Dでは爆発しないのが現状。
- ✓パスタ・EOS、非線形ニュートリノ振動の効果等、マイクロ物理の精密化の余地は残されている。

×

×

○

—

×

(smaller Ye)

○

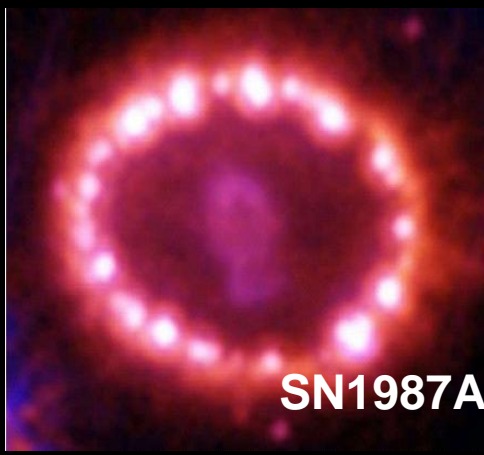
○

○

(larger Lv)

爆発の多次元性を支持する観測

図提供: 前田啓一さん、田中雅臣さん(IPMU)



SN1987A

・重力崩壊型超新星の撮像

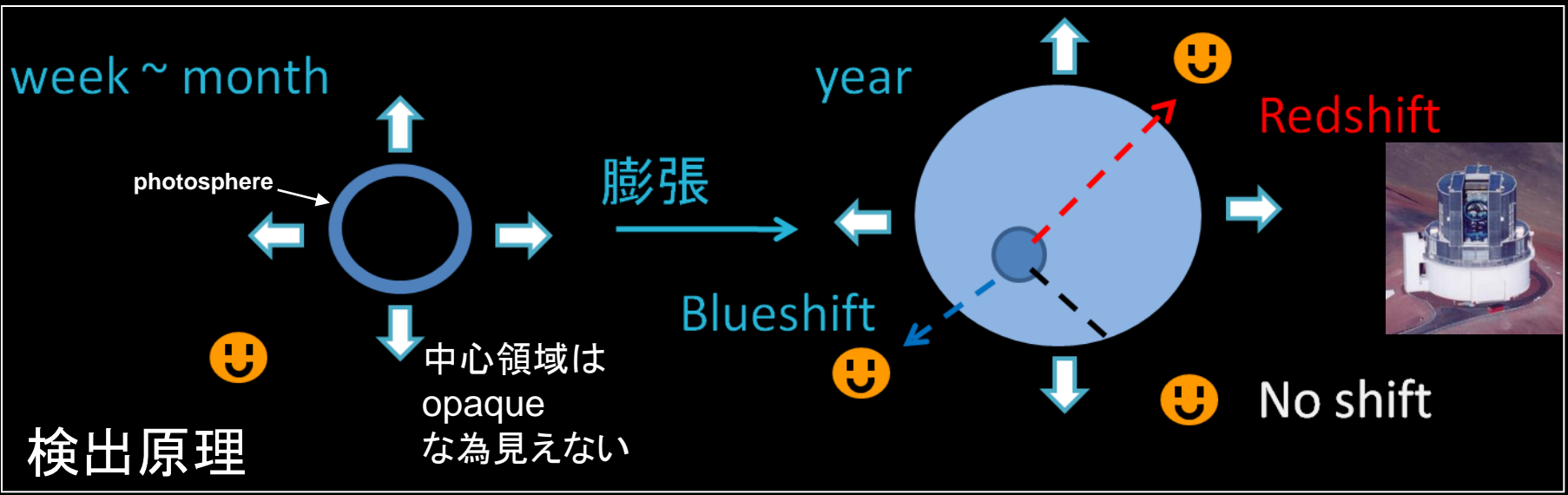
(Wang+.01,02)

・ Multidimensional explosions are favorable for reproducing the synthesized elements.

(Nagataki+.97, Maeda+.03, Kifonidius+.07, Maeda+08...)

SN1987A

✓ 超新星の後期分光観測



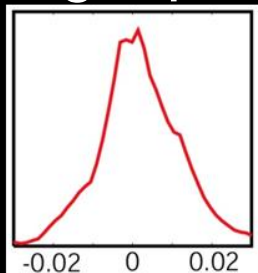
爆発の多次元性を支持する観測

図提供: 前田啓一さん、田中雅臣さん(IPMU)

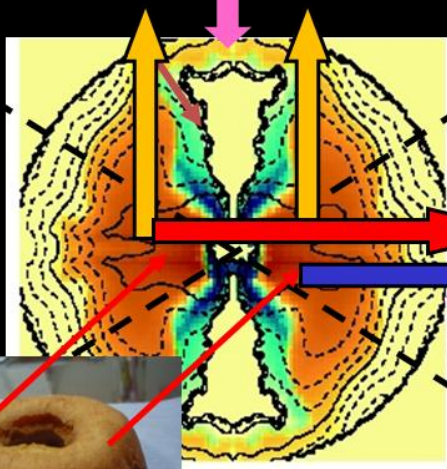
✓ 超新星の後期分光観測

田中雅臣さん(IPMU) 偏光観測

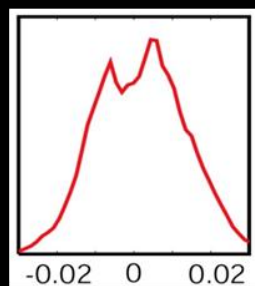
“Single-peak”



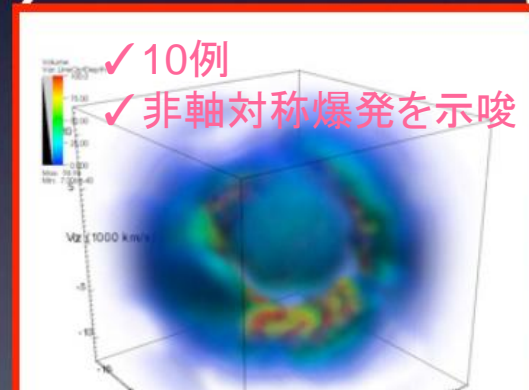
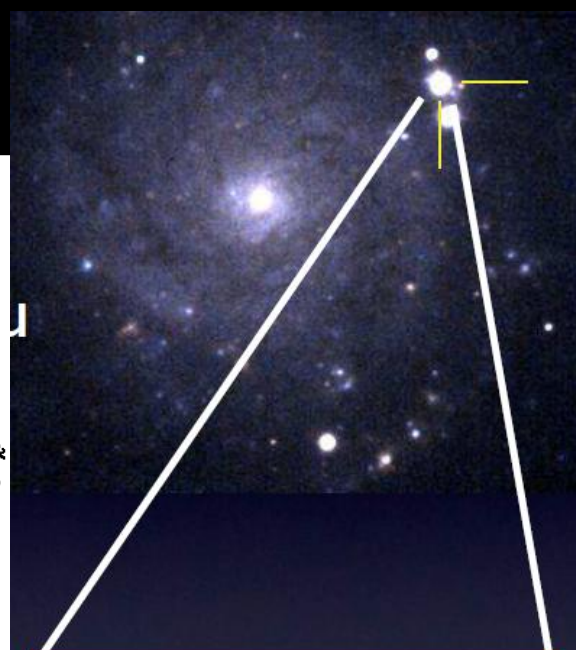
λ



“Double-peak”



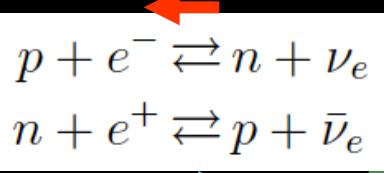
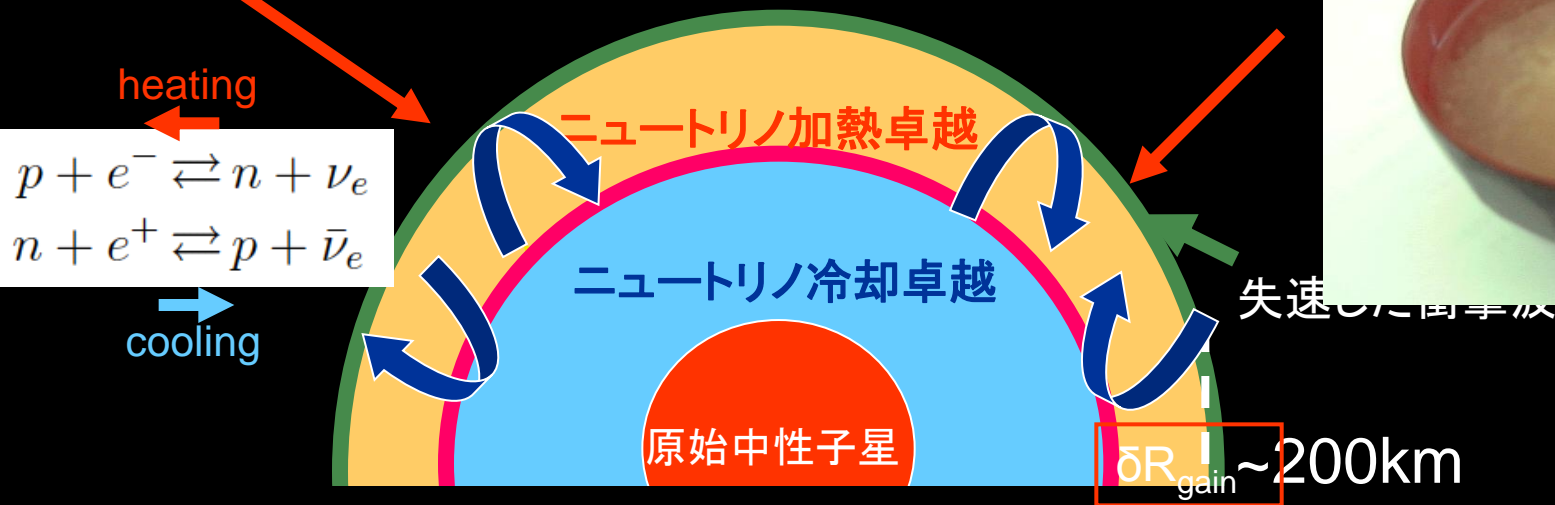
Normalized Flux (F_λ)



See 前田さん's talk !

✓ bipolar explosion & 非軸対称 : 2D · 3D 効果が重要

球対称モデルで何故、爆発しない



ニュートリノ加熱領域を通過する時間

ニュートリノ加熱領域での加熱時間

$$\tau_{\text{adv}}(t) = - \int_{r_{\text{gain}}(t)}^{r_{\text{sh}}(t)} \frac{1}{v_r(r, t)} dr = \frac{\delta R_{\text{gain}}}{v_{\text{matter}}}$$

$$\tau_{\text{heat}}(t) = \frac{4\pi \int_{r_{\text{gain}}(t)}^{r_{\text{sh}}(t)} \epsilon_{\text{bind}}^{\text{shell}}(r, t) \rho(r, t) r^2 dr}{4\pi \int_{r_{\text{gain}}(t)}^{r_{\text{sh}}(t)} Q(r, t) r^2 dr} = \frac{\text{重力ポテンシャル}}{\text{加熱率}}$$

球対称の場合、

$$\tau_{\text{adv}}(t) < \tau_{\text{heat}}(t)$$

物質は暖めるまもなく、中心に落下してしまう。

多次元(対流、流体不安定性:SASI)では、 (Standing Accretion Shock Instability)

$$\tau_{\text{adv}}(t) > \tau_{\text{heat}}(t) \quad \text{となりうることを期待。}$$

球対称モデルを越えて。

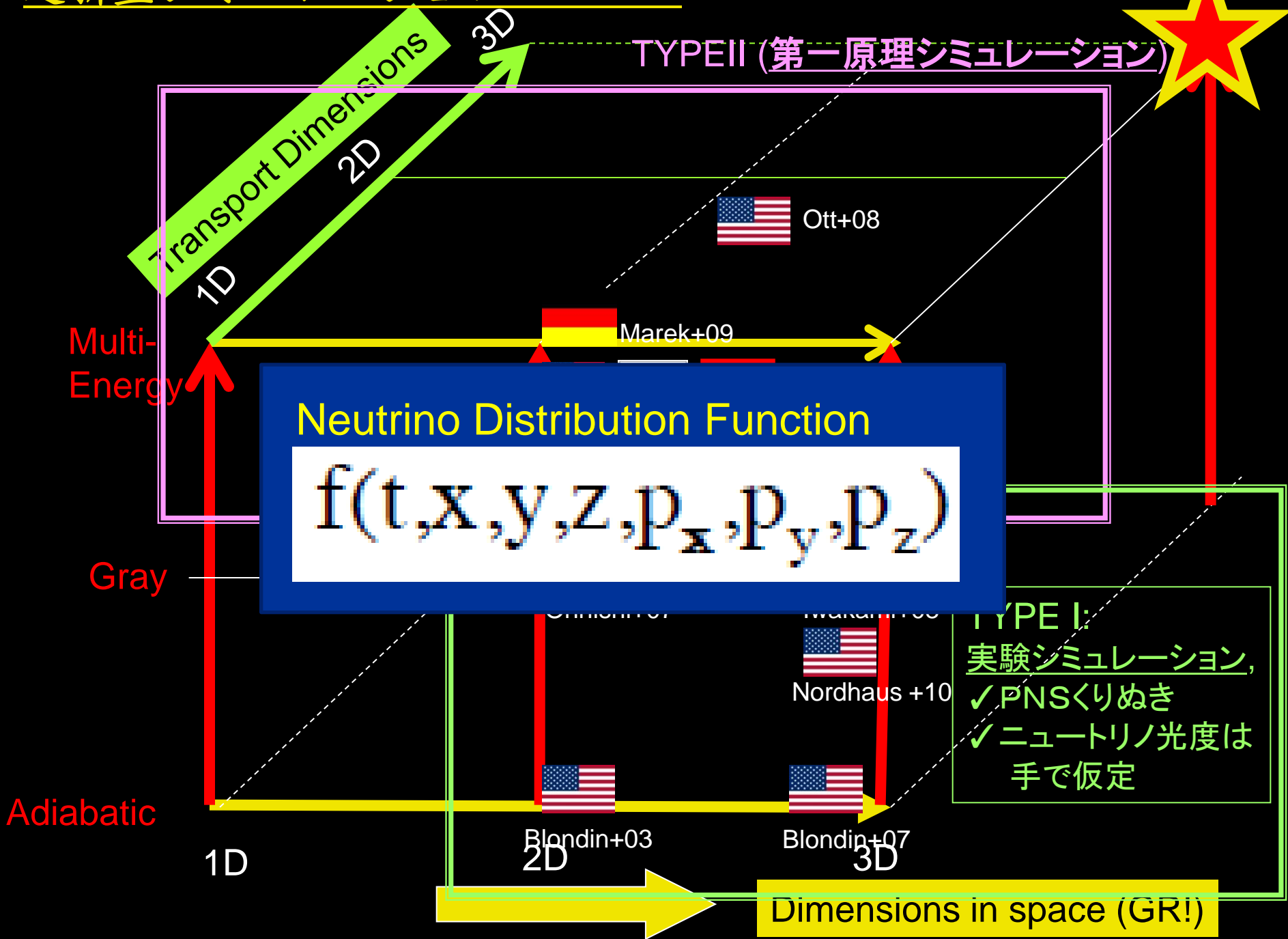
§ 2-2 非(球)対称超新星爆発シミュレーションの現状

取り組むべき問題は、

何が非対称性をつくるのか？

非対称性のニュートリノ加熱
メカニズムに及ぼす効果は？


超新星シミュレーションのゴール



2DでFull calculation (type II) の計算を行ってみると。

Buras et al. (03) PRL

Time evolution of shock in 1D and 2D models



VOLUME 90, NUMBER 24 PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending
20 JUNE 2003

Improved Models of Stellar Core Collapse and Still No Explosions: What Is Missing?

R. Buras, M. Rampp, H.-Th. Janka, and K. Kifonidis
Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Strasse 1, D-85741 Garching, Germany
(Received 7 March 2003; published 19 June 2003)

Two-dimensional hydrodynamic simulations of stellar core collapse are presented which for the first time were performed by solving the Boltzmann equation for the neutrino transport including a state-of-the-art description of neutrino interactions. Stellar rotation is also taken into account. Although convection develops below the neutrinosphere and in the neutrino-heated region behind the supernova shock, the models do not explode. This suggests missing physics, possibly with respect to the nuclear equation of state and weak interactions in the subnuclear regime. However, it might also indicate a fundamental problem with the neutrino-driven explosion mechanism.

色; エントロピー

✓ 2003年当時、2Dの方が1Dよりショックが外側に伝搬するが、爆発はしない。

多次元モデルのキーワード:

“SASI”

Blondin et al. 2003 ApJ
Scheck et al. 2004, 06 A&A
Ohnishi, Kotake, Yamada 2006, ApJ
Foglizzo et al. 2007 ApJ...

・ What is **SASI** ?

“Standing Accretion Shock Instability”

$l = 1, 2$ が卓越した
stalled shock の振動

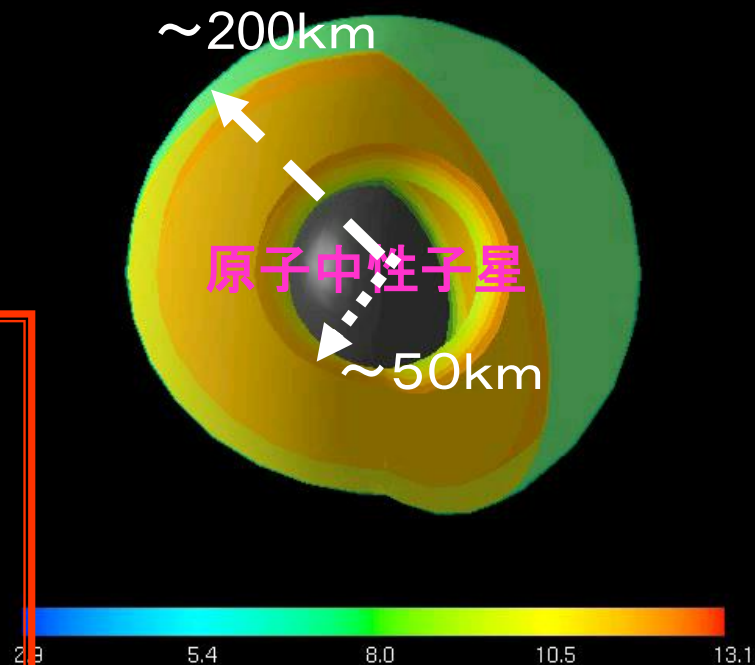
・ **SASI**は爆発のメカニズムの鍵

✓ **ゲイン領域**を落下する
タイムスケールが伸びる。
(非動径方向の運動により)

✓ **ゲイン領域**が球対称モデルより広がる。

※星の水平面对称性を課したシミュレーション
ではフルに**SASI**は追えない。

バウンス後、
失速した衝撃波



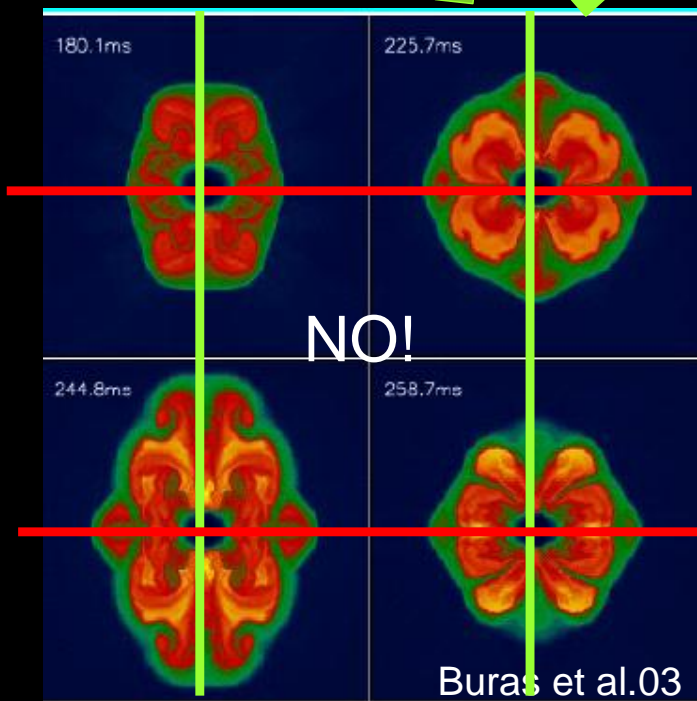
Iwakami, Kotake et al. (08), ApJ

“What is missing?”の
シミュレーション結果

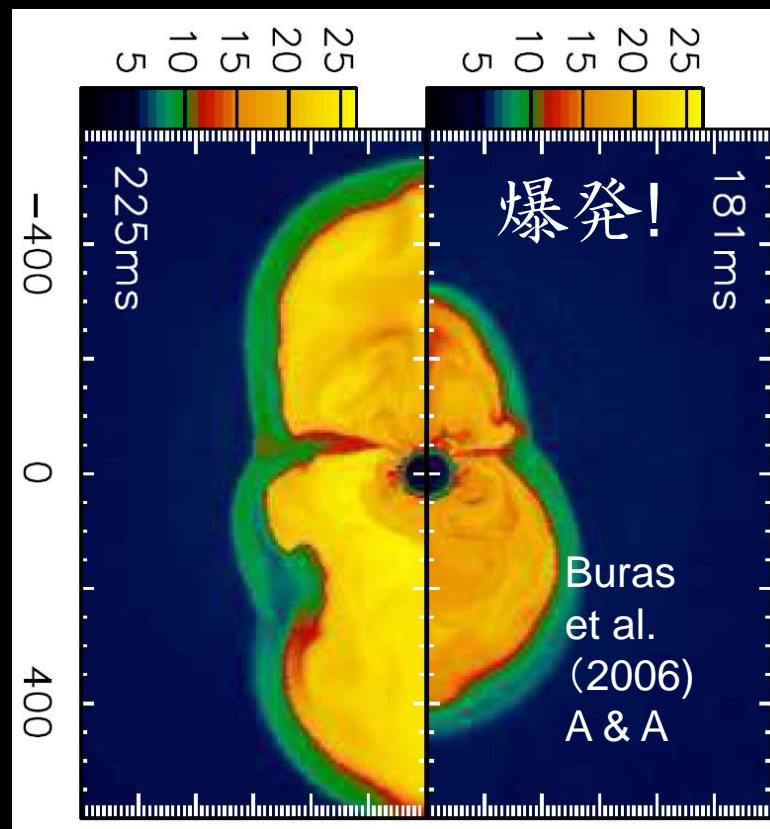
軸対称

11.2 M_{sun} の親星

Buras et al. 2006 A&A



水平面对称

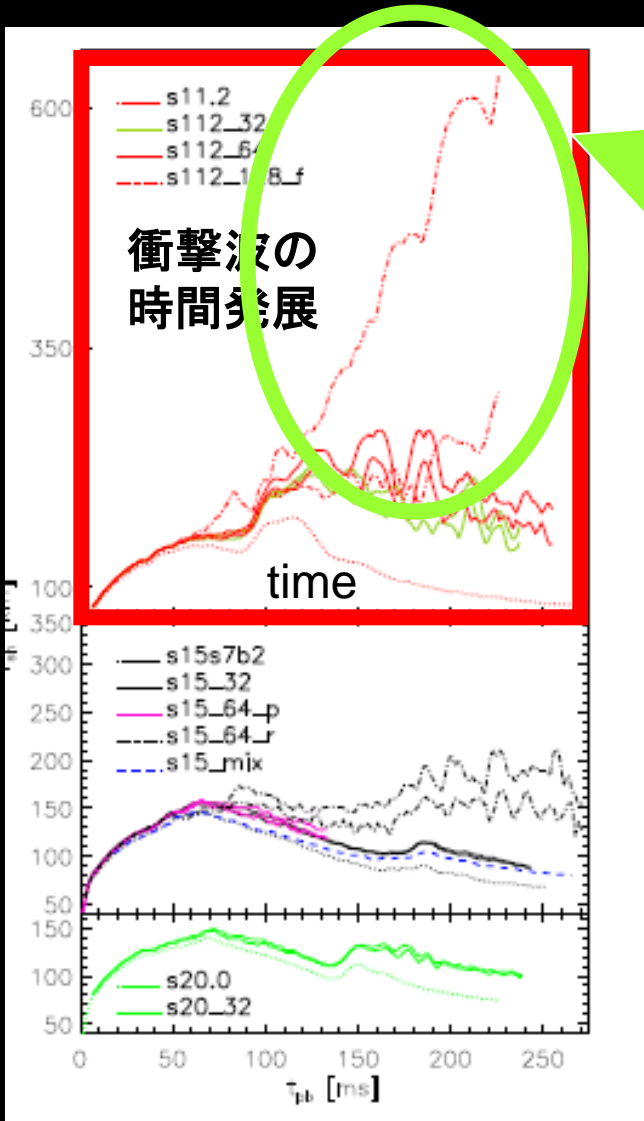


水平面对称性を課したモデルでは、SASIをフルに取り込めなかった。

2Dニュートリノ加熱メカニズム成功第一例

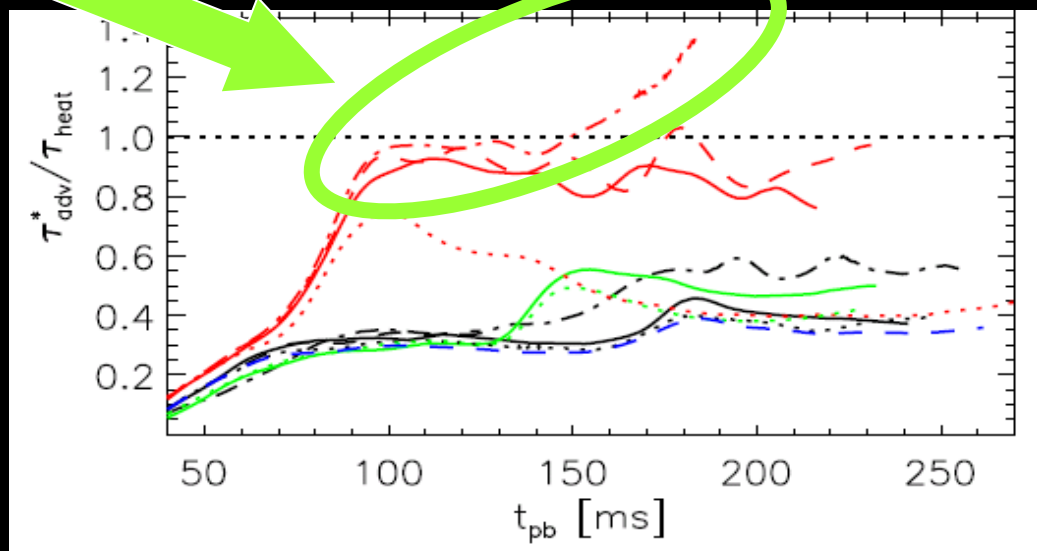
11.2 M_{sun} の親星

Buras et al. 2006 A&A



$\tau_{adv}^* / \tau_{heat}$ の時間変化

(落下のタイムスケール/ニュートリノ加熱のタイムスケール)



(ニュートリノ加熱のタイムスケール)
 <(落下のタイムスケールで爆発)
 つまりこれは、「**SASI・対流に助けられた**
 ニュートリノ加熱爆発。
 ☆爆発エネルギー 10^{49} erg $\ll 10^{51}$ erg (観測)

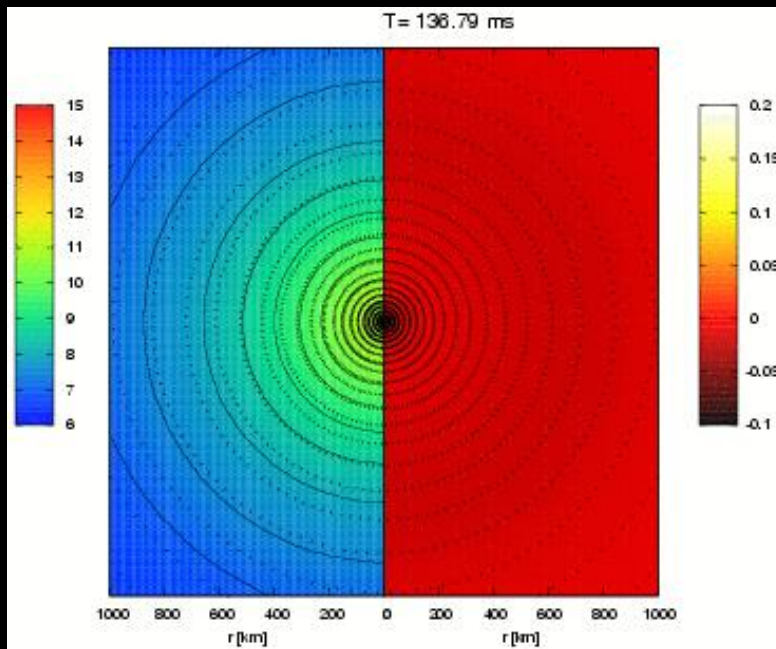
自転, SASI, ニュートリノ加熱メカニズムによる超新星爆発

Suwa, Kotake, Takiwaki, Whitehouse, Liebendoerfer, Sato (10), PASJ

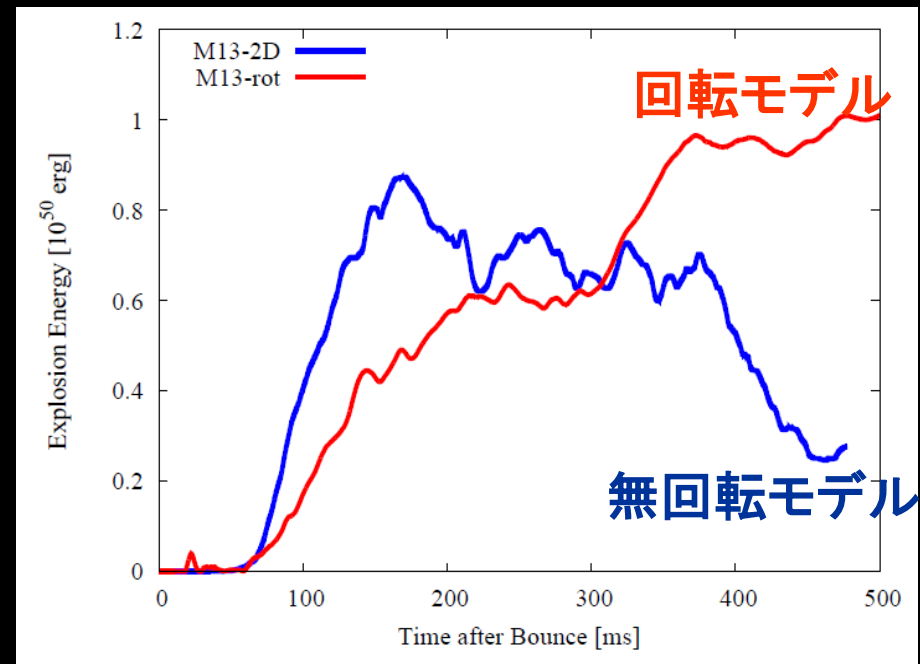
- ✓ Nomoto & Hashimoto (1988) 13 Ms (高速回転 $\Omega_0 = 2$ rad/s)
- ✓ 状態方程式は Lattimer & Swesty EOS ($K=180$ MeV)
- ✓ Ray-by-ray 2C approx. Boltzmann transport

密度

ニュートリノ加熱率



爆発エネルギーの時間発展



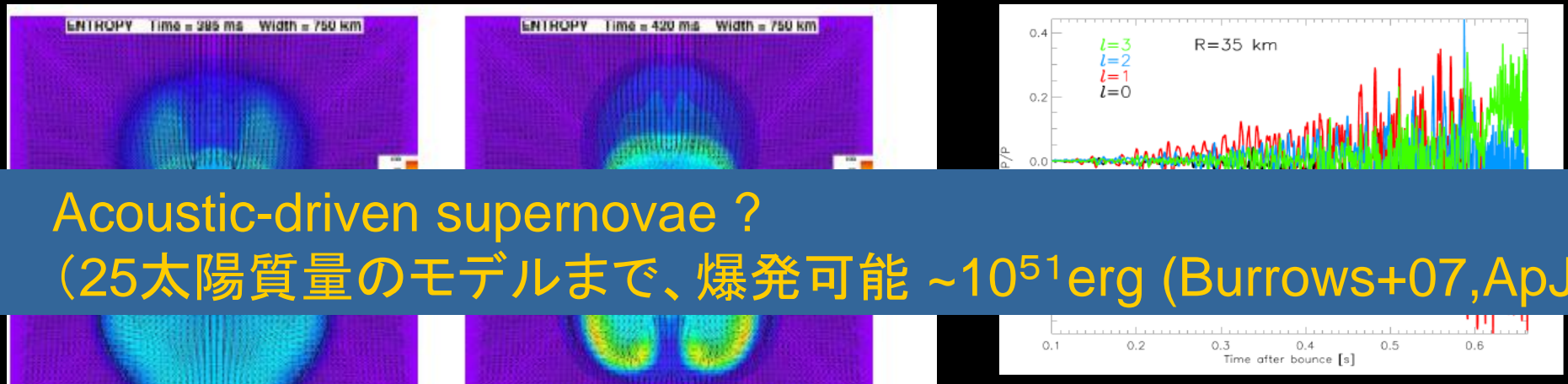
- (1) 衝撃波の流体不安定性が発達
- (2) 自転の効果でbipolar explosion

☆ 自転の効果で爆発エネルギーが大きくなる
ただまだ 10^{50} erg(一桁足りない)。

音波爆発シナリオ (Princeton)

Burrows et al. (2006) ApJ (2D-MGFLD (Multi-Group Flux Limited Diffusion) simulations)

11太陽質量の星で~600 msec dynamicsを追って爆発



Acoustic-driven supernovae ?

(25太陽質量のモデルまで、爆発可能 $\sim 10^{51}$ erg (Burrows+07, ApJ)

✓ Objections to “acoustic mechanism”

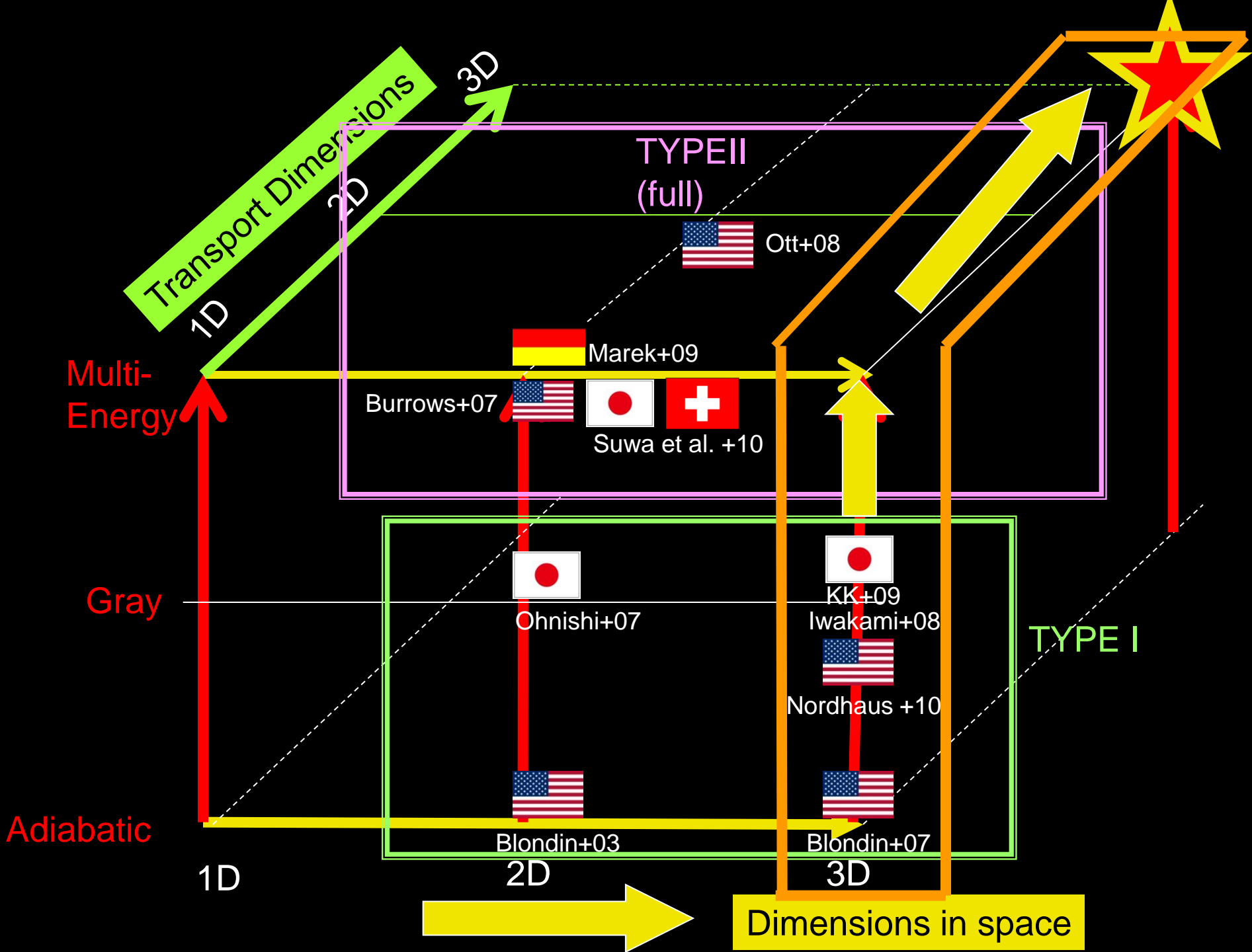
☆ Little oscillations of PNSs in Garching & Tokyo simulations

(Marek & Janka 09, Suwa, Kotake et al. (10))

☆ Semi-analytic studies predict that ..

✓ the saturation levels of g-mode oscillation are at most 10^{49} erg, much smaller than found in Burrows et al (06) (Weinberg & Quataert (08), ApJ).

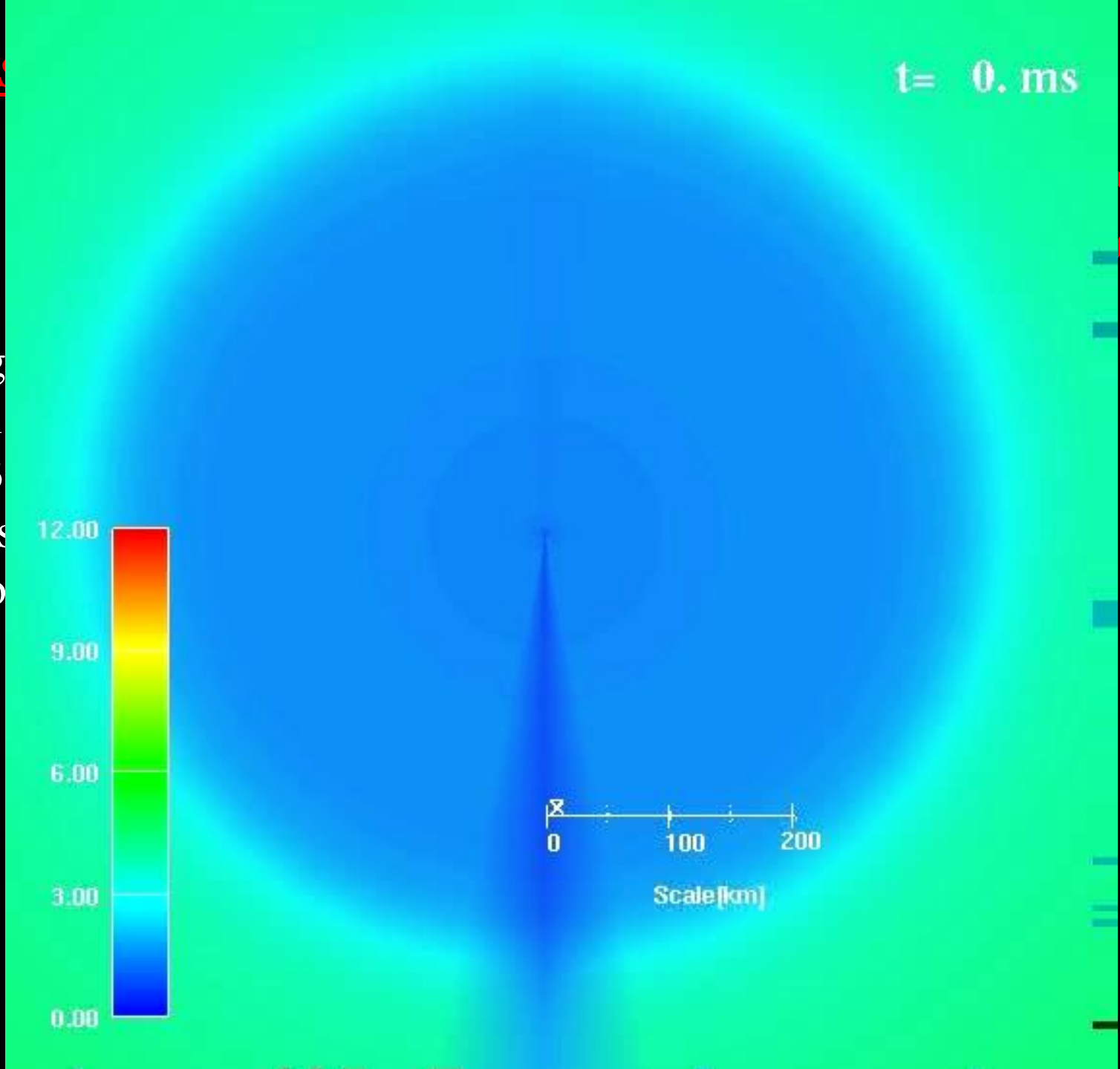
✓ there is a severe impedance mismatch between the typical frequency of SASI (~ 30 Hz) and the excited g-modes ($\sim 200\sim 500$ Hz). (Yoshida et al. 08, ApJ).



3D Results

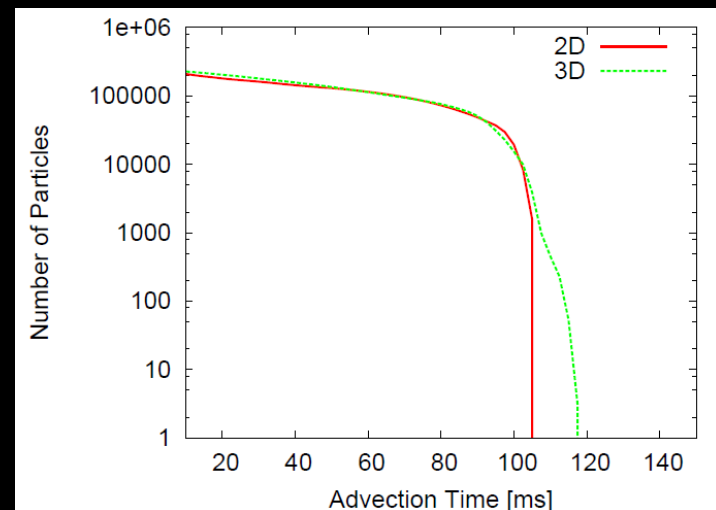
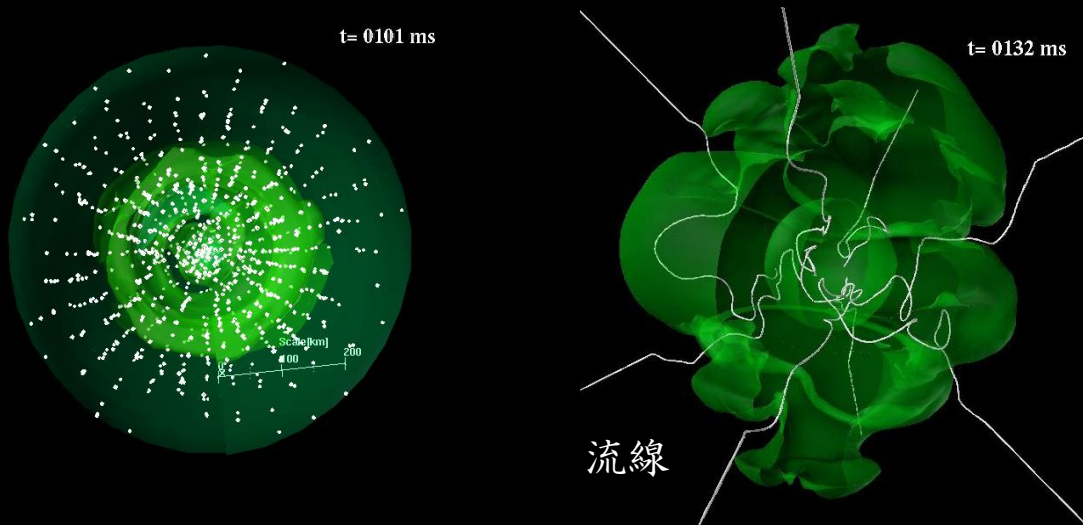
t= 0. ms

- ✓ 13 Ms prog
- ✓ Numerical
 - Grid: 3
 - Process
 - Non-ro



3Dの方が爆発しやすいか？ Yes or No!

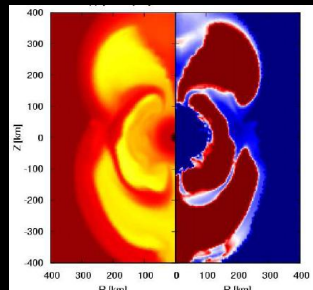
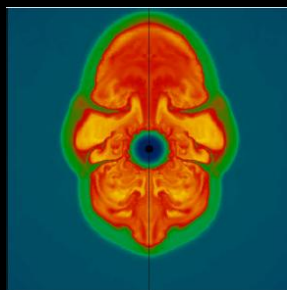
✓ ニュートリノ加熱的には得



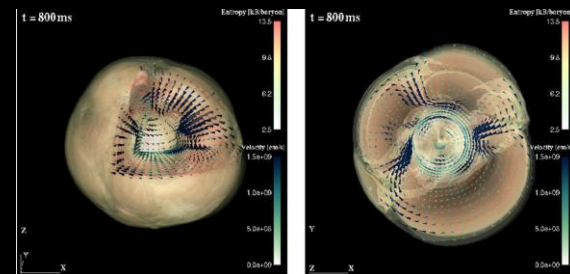
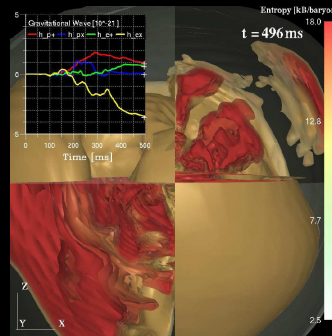
✓ 落下のタイムスケールが延びる
⇒ ニュートリノ吸収を長く受けられる

✓ 流体力学的には損 (ϕ 方向に運動エネルギーが渡ってしまう)

2D



3D





Mannheim, Germany
September 26-27, 2011

- PROJECT
- LISTS
- STATISTICS
- RESOURCES
- NEWS

- CONTACT
- SUBMISSIONS
- LINKS
- HOME

TOP 10 Systems - 06/2011

- 1 K computer, SPARC64 VIIIfx 2.0GHz, Tofu interconnect
- 2 Tianhe-1A - NUDT TH MPP, X5670 2.93Ghz 6C, NVIDIA GPU, FT-1000 8C
- 3 Jaguar - Cray XT5-HE Opteron 6-core 2.6 GHz
- 4 Nebulae - Dawning TC3600 Blade, Intel X5650, NVidia Tesla C2050 GPU
- 5 TSUBAME 2.0 - HP ProLiant SL390s G7 Xeon 6C X5670, Nvidia GPU, Linux/Windows

Japan Reclaims Top Ranking on Latest TOP500 List of World's Supercomputers

Thu, 2011-06-16 19:24



HAMBURG, Germany—A Japanese supercomputer capable of performing more than 8

quadrillion calculations per second (petaflop/s) is the new number one system in the world, putting Japan back in the top spot for the first time since the Earth Simulator was dethroned in November 2004, according the latest edition of the TOP500 List of the world's top supercomputers. The system, called the K Computer, is at the RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) in Kobe.

SUPERMICRO

GPU1 GPU2

1 TFLOP (DP) In 1U
GPU + CPU
2 GPUs in 1U
1 (Double-Precision)
TFLOPS in 1U

"Computing" the ideal future

Penguin Altus™ Servers: Supercomputing Simplified

Learn More »

APPR

Delivering Improved Reliability, Availability, Serviceability (RAS)

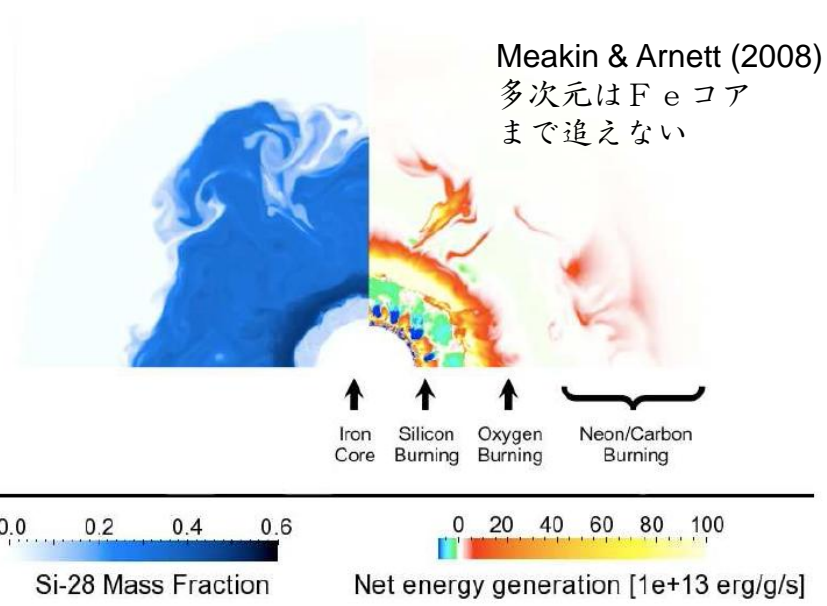


示されました

インターネット



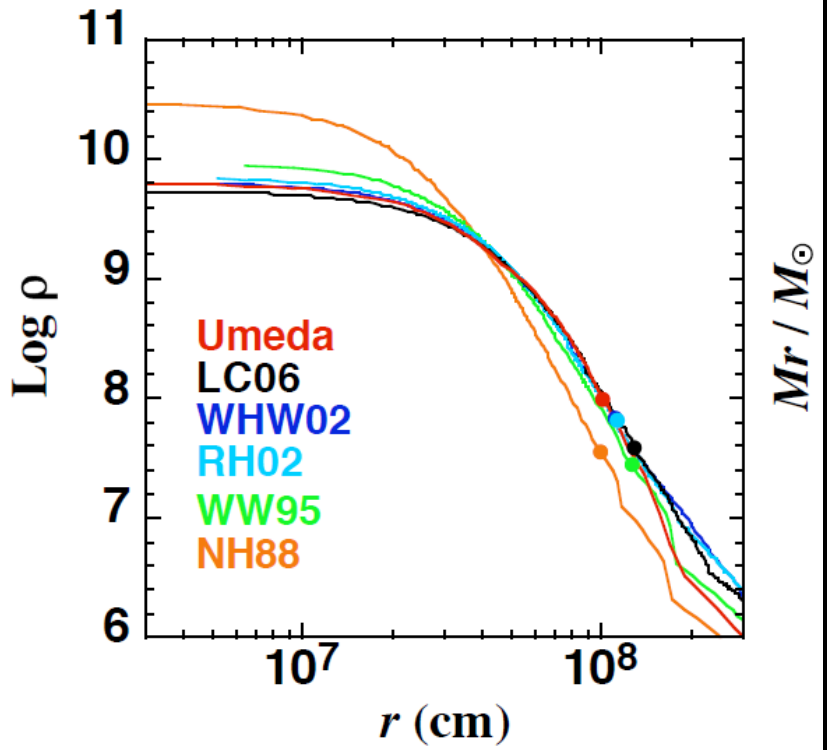
	Mass loss	対流条件	Network $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$
Umeda (YU11)	Vink et al. 01 de Jager et al. 88 Nugis & Lamers 00	Schwarzschild	240(282)核種 1.3(1.5) \times CF88
LC06 ローマ大学	Vink et al. 01 de Jager et al. 88 Nugis & Lamers 00	Schwarzschild (Ledoux+overshoot in H-burning)	282核種 Kunz et al. 02
HMM04 ロスアラモス	Vink et al. 01 de Jager et al. 88 Nugis & Lamers 00	Schwarzschild (+overshoot in H & He-burning)	CNO+ α -net+QSE+NSE NACRE
WHW02 (RH02)	Kudritzki et al. 89 Nieuwenhuijzen & de Jager 90 Hamann et al. 82	Ledoux+semiconve +overshooting	
NH88 Hashimoto95	-	Schwarzschild	



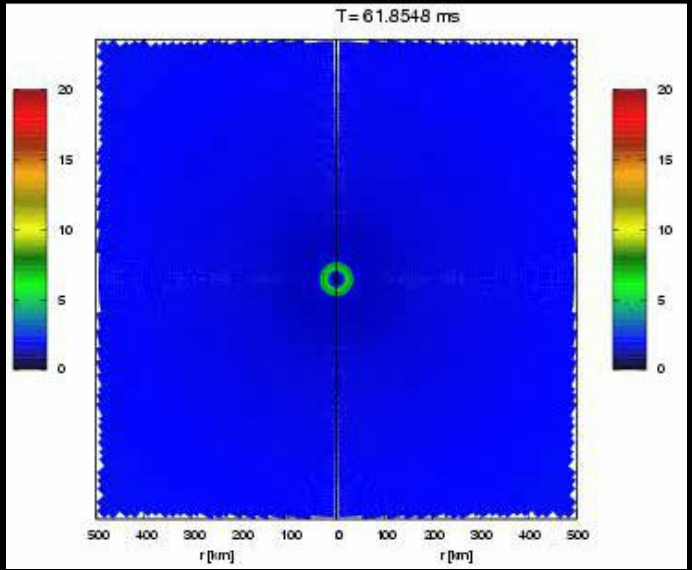


コーヒーブレイク (3/3)

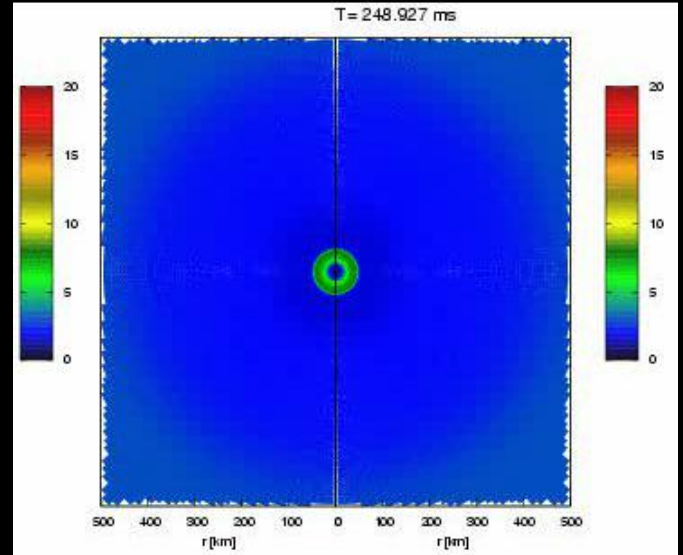
● $M_{init} = 15 M_{\odot}$



Woosley, et al. (2002) 進化モデル



Woosley, & Weaver (1995) 進化モデル



To-do-lists...

- ✓ 超新星モデラー
お互いの結果をちゃんと比較すべき
- ✓ 進化屋さん
多次元の効果などお願いします。
(両者ともHPCIのターゲットなりうる。)

超新星シミュレーションの現状: 3つの mechanism

Energy-drivers for explosions:

☆ Neutrino heating mechanism

aided by convection/SASI

(Marek & Janka 09, Suwa et al. 10, Bruenn et al. 09)

also aided by rotation

(Kotake+03,06, Walder+05, Ott+08, Suwa et al. 10)

☆ Acoustic-power deposition

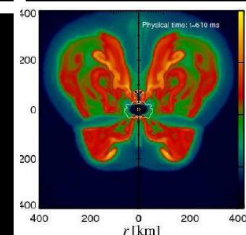
Acoustic mechanism: (Burrows+. 2006, Ott+07)

☆ Extraction of rotational energy via B-fields

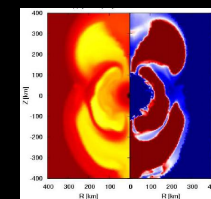
MHD mechanism:

(LeBlanc & Wilson (70), Symbalisty (84), KK+04, Takiwaki+05
Shibata+06, Obergaulinger+06,
Cerdeira Duran+07, Burrows+07, Suwa+07,
Takiwaki+08....)

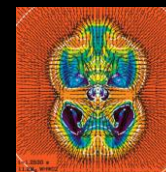
Exploding models



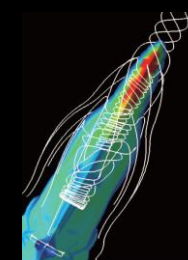
(Marek & Janka 09)



(Suwa+10)



(Burrows+06)



(Takiwaki and Kotake 10)

超新星シミュレーションの現状: 3つの mechanism

Energy-drivers for explosions:

爆発したの？

☆ Neutrino heating mechanism

aided by convection/SASI

(Marek & Janka 09, Suwa et al. 10, Bruenn et al. 09)

Most Likely !

(現状2Dでは、
状態方程式が非常に
柔らかい場合のみ、
弱い爆発を起こす。
現在 第一原理の

also aided by rotation

- ✓ 理論モデルは色々。
- ✓ 爆発メカニズムの正解を決めるには、
観測との比較、観測予言が不可欠。
- ✓ 超新星を内(理論)と外(観測)から調べるスタイルがベスト

☆ 超新星コアのダイナミクスのライブメッセンジャー

重力波($\propto 1/R$), ニュートリノ($\propto 1/R^2$)

& 元素合成

超新星からの重力波

GW amplitude from the quadrupole formula

$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4 R} \frac{\partial^2}{\partial t^2} Q_{ij} \sim \frac{R_s}{R} \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

Quadrupole moment



$$R_s = 3 \text{ km} \left(\frac{M}{M_\odot}\right) \quad v/c = 0.1 \quad R = 10 \text{ kpc}$$

$$h \sim 10^{-20}$$

• SN in our galaxy is the target of GWs

More correctly,

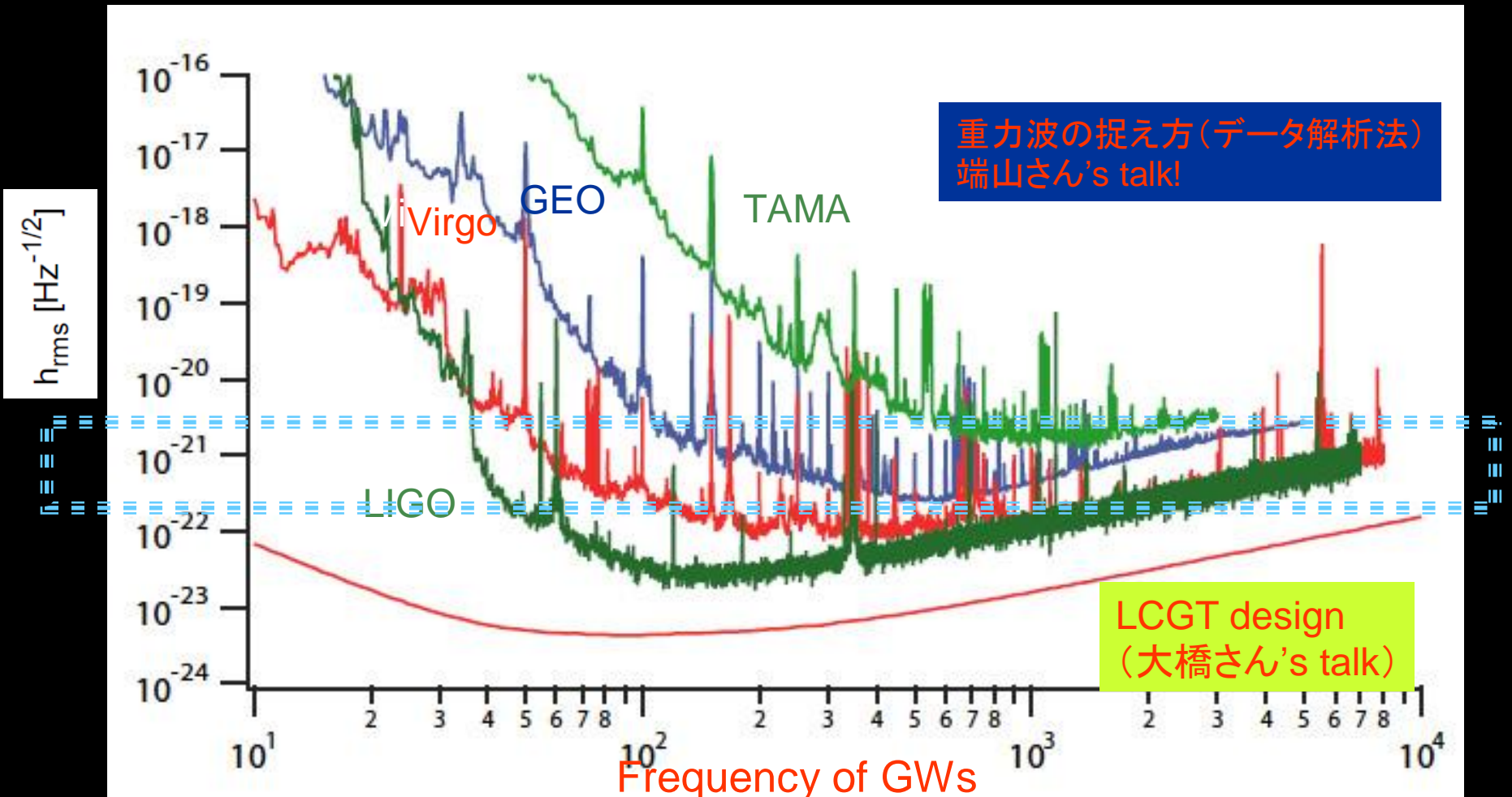
$$h_{ij} = \epsilon \frac{R_s}{R} \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

ϵ represents the degree of anisotropy.

If collapse proceeds spherically, $\epsilon = 0$
no GWs can be emitted.

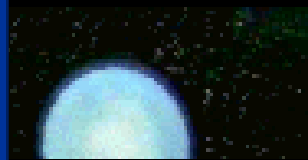
What makes the SN-dynamics deviate from spherical symmetry ?

Sensitivity curves for laser interferometers



GW amplitude f

Se



meters

Multidimensionality
(origin of anisotropy)

複雑数値計算

波形予言

Exp. Mechanism

GW emission

データ解析

一タ解析法)

✓目標「重力波から天体深部の謎を紐解く」

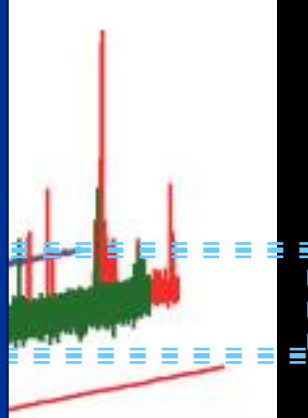
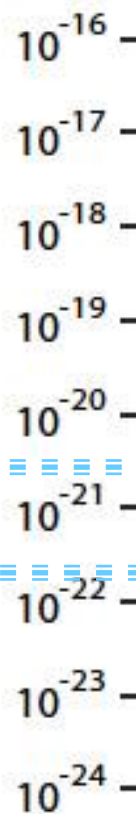
✓謎（超新星、ガンマ線バースト駆動源）
も高エネルギー宇宙物理中でもビッグテーマ！

超新星研究の醍醐味の一つ

See 久徳さん、仏坂さん's talk !

M

$h_{rms} [Hz^{-1/2}]$



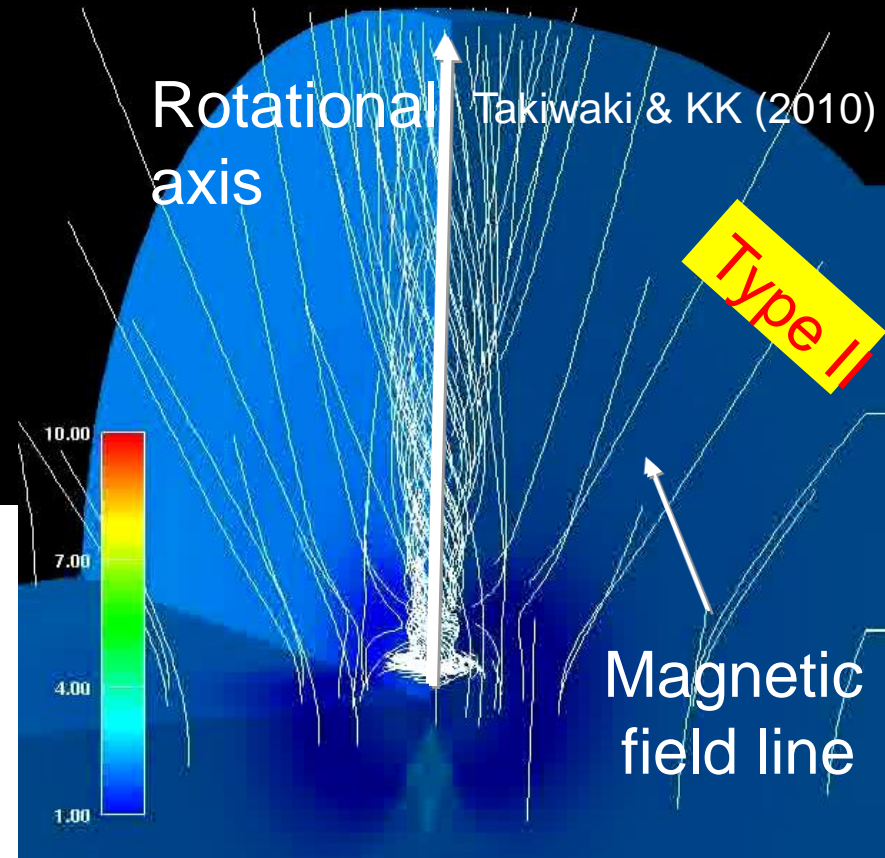
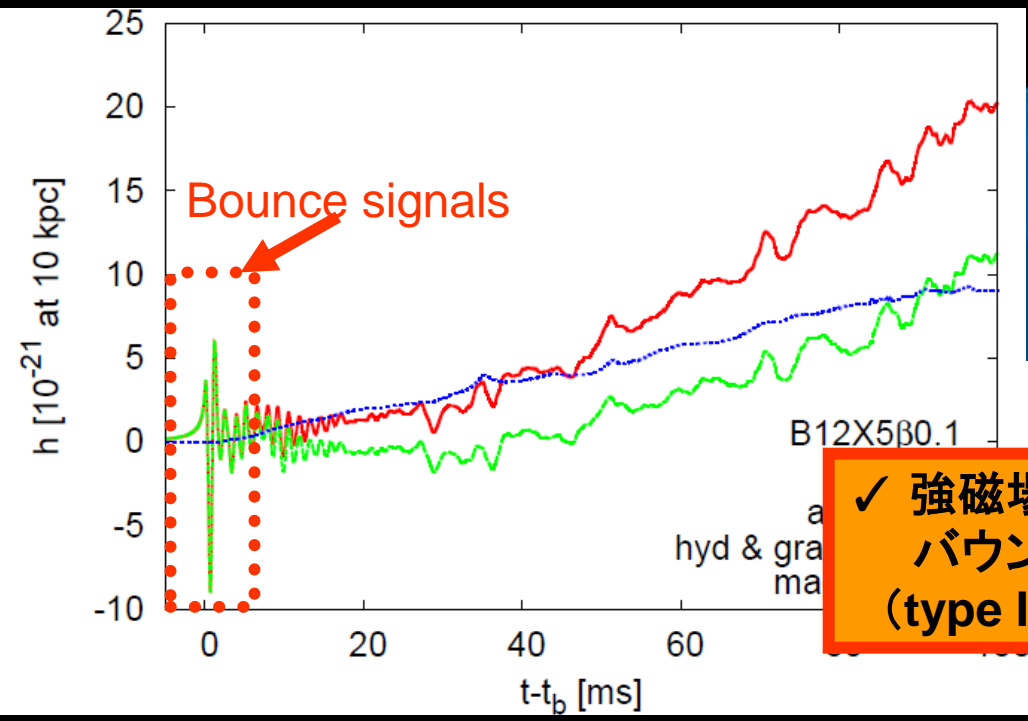
esign
ん's talk)

MHD爆発に伴って放出される重力波

(e.g., Kotake et al. (04), Obergaulinger et al.(06), Shibata et al.(06), Takiwaki & Kotake (10))

- ✓ The MHD mechanism works only when pre-collapse core has rapid rotation ($P_0 < 4$ s) and strong magnetic fields ($B_0 > 10^{11}$ G).
- ✓ GW amplitudes from prolately expanding material **positively increase**

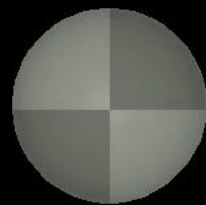
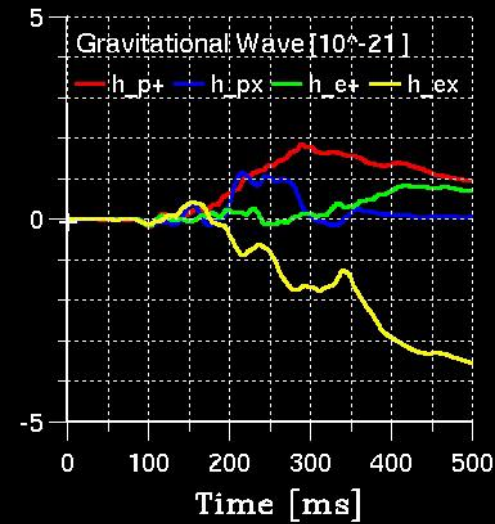
Gravitational waveform from MHD explosion



✓ 強磁場超新星から放される重力波：
バウンス+テール(尾)型
(type II = type I + tail と呼ぶ。)



3次元SASI駆動型超新星爆発のシミュレーション



Entropy [kB/baryon] (KK et al. 09, KK et al. 11)

$t = 1$ ms

18.0

12.8

7.7

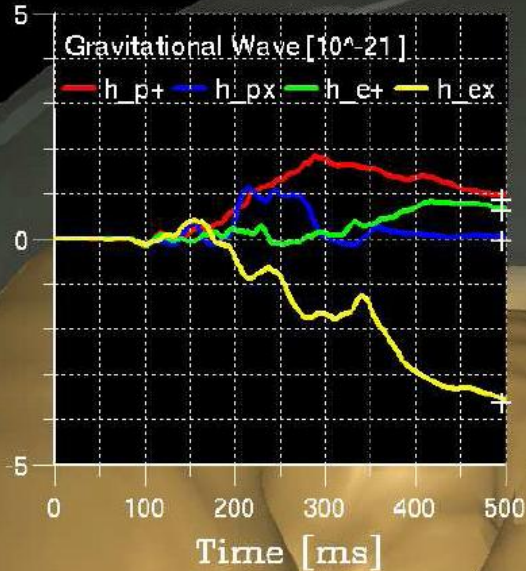
2.5

Z

Y

X

「3つの爆発メカニズム」と「その重力波形」



Neutrino-driven explosion

Entropy [kB/baryon]

$t = 496$ ms
Kotake et al. 09

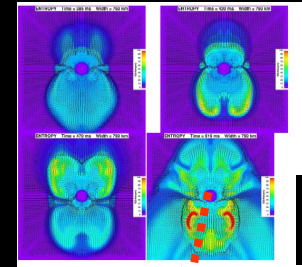
18.0

12.8

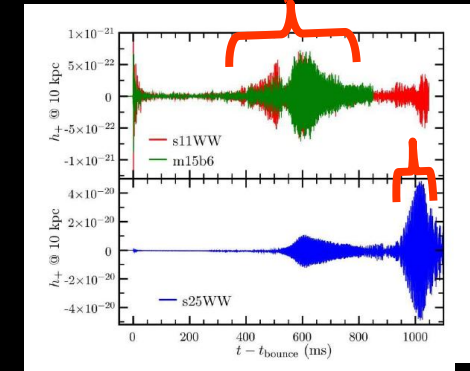
7.7

2.5

Acoustic-wave mechanism



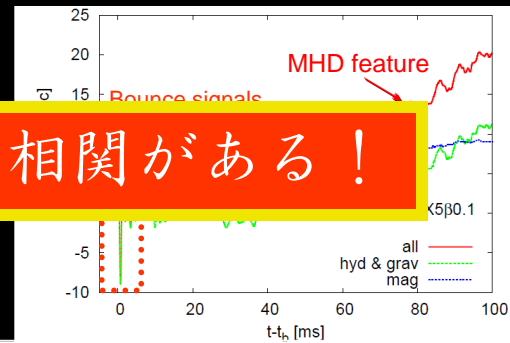
Burrows +06



Ott+06

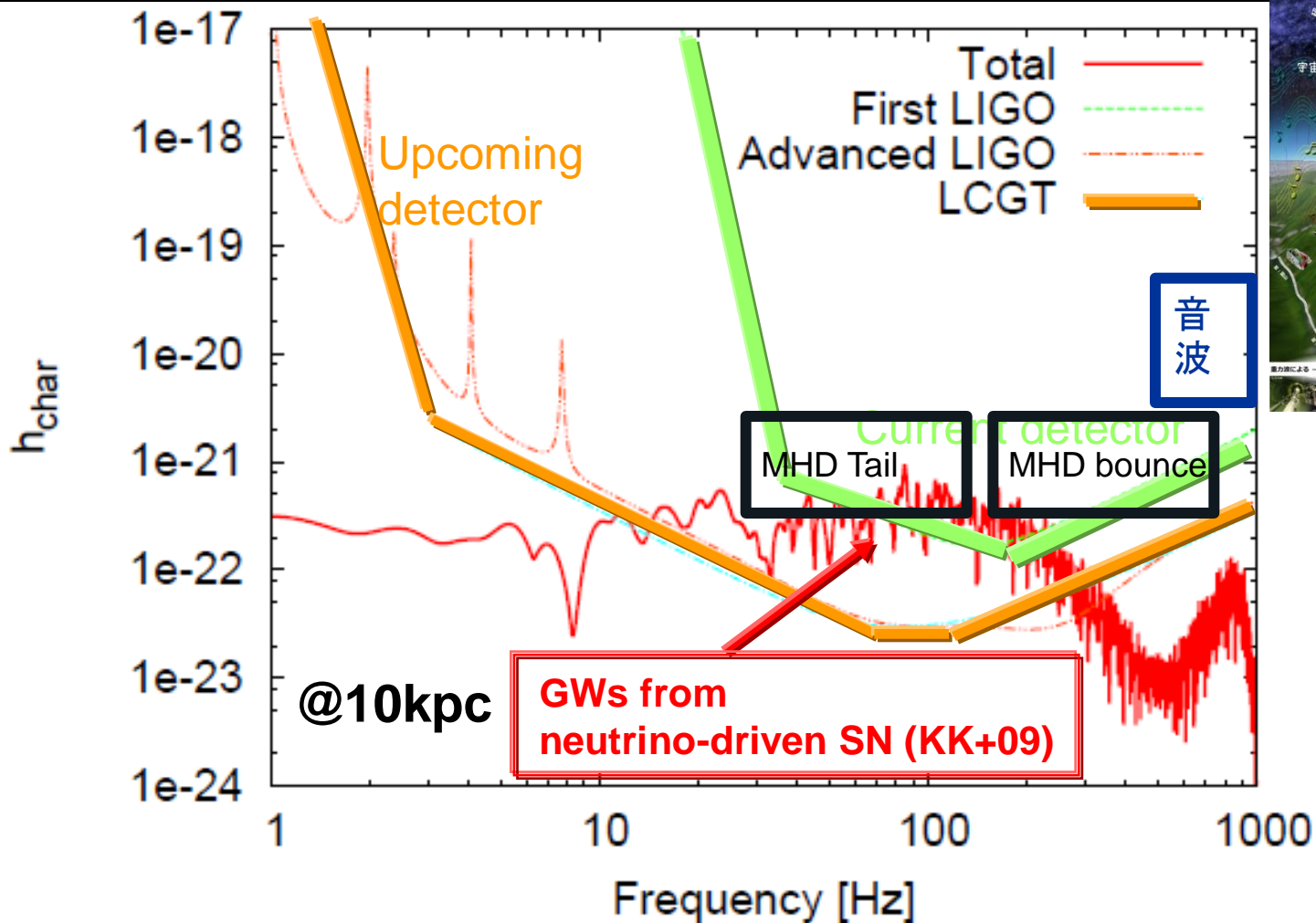
MHD mechanisms

(Takiwaki and Kotake 10)



爆発のメカニズム \Leftrightarrow 重力波の特徴にクリアな相関がある！

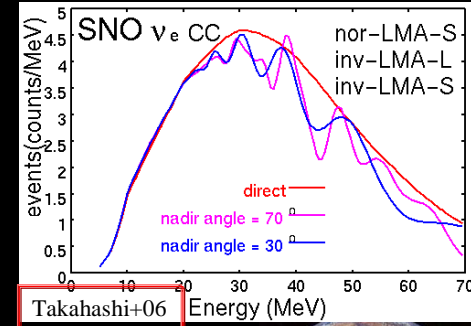
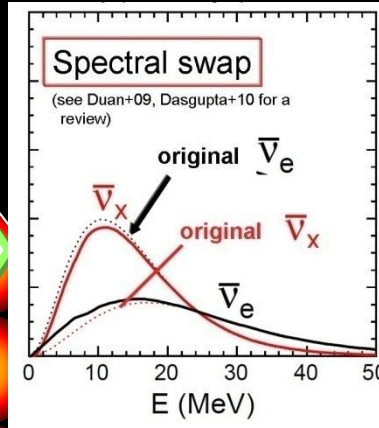
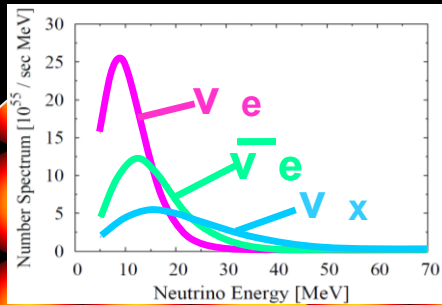
まとめ「超新星からの重力波」



- ☆銀河中心超新星からの重力波を捉えるのに、次世代検出器が不可欠。
- ☆いつ起こるか分からない (波形予言の精密化、データ解析法が進行中)
- ☆ MHD爆発、ニュートリノ駆動爆発の峻別? 「Multi-messenger 天文学」

超新星ニュートリノ

(see reviews for Kotake +06, Dighe+09)



Neutrino emission

Self-interaction

Nucleosynthesis

Numerical Modeling

Exp. Mechanism

Neutrino Parameters

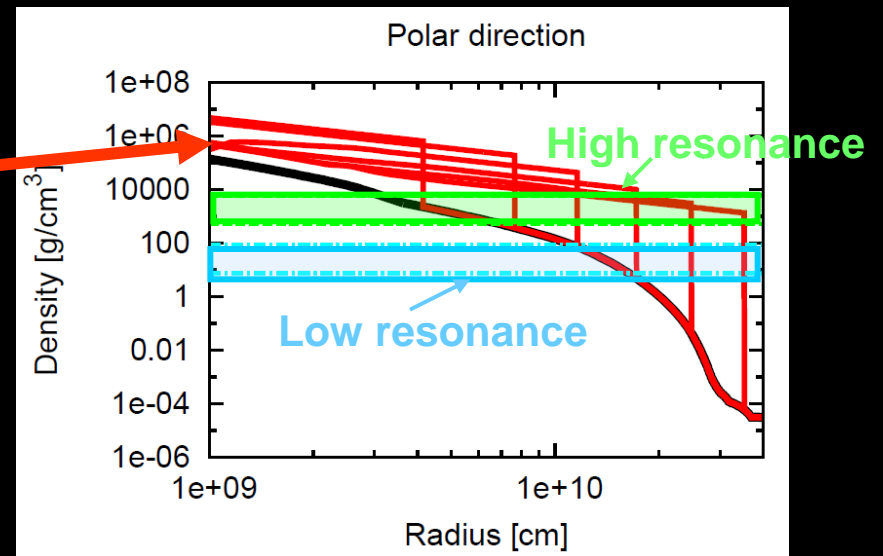
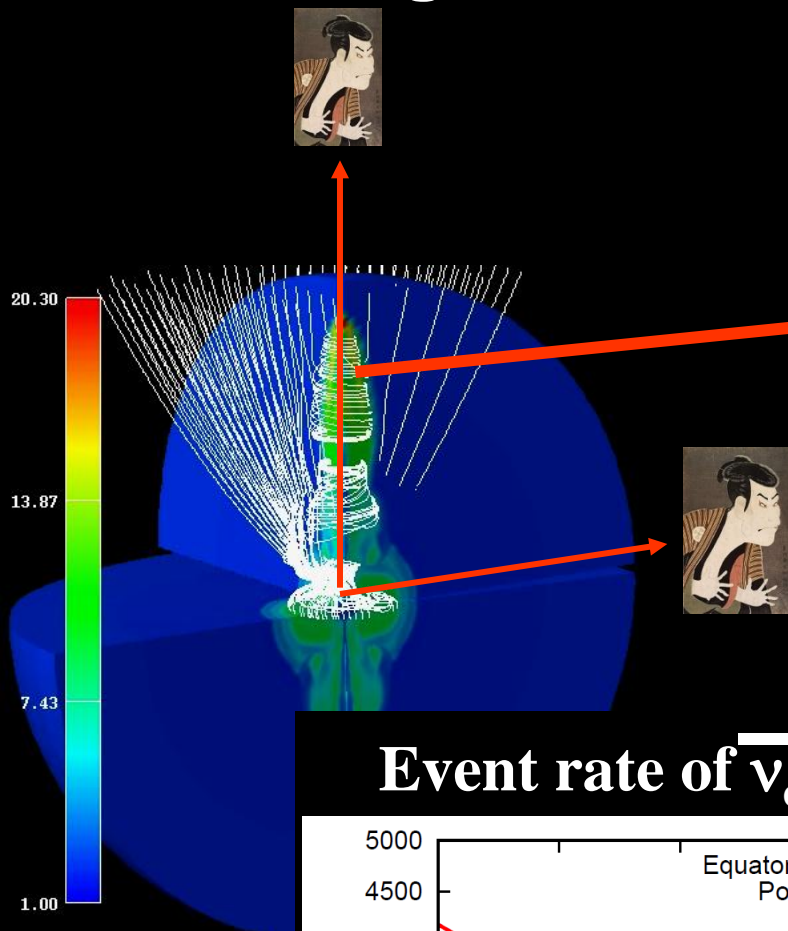
Gravitational Waves

Supernova Neutrinos

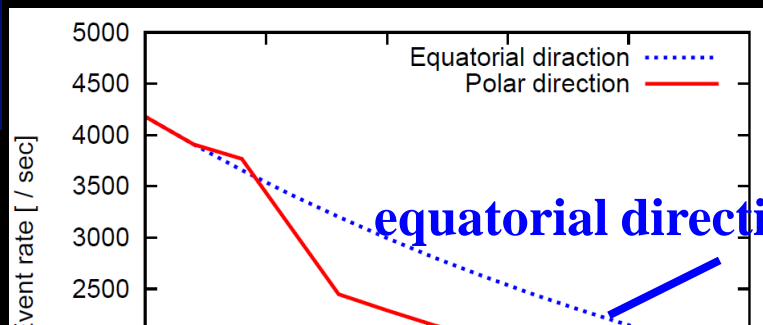
- ✓ Could have a great impact on the elementary physics
- ✓ Useful as a tomography, i.e., the time evolution of the SN dynamics!

Neutrino signatures in **MHD explosion** of supernovae

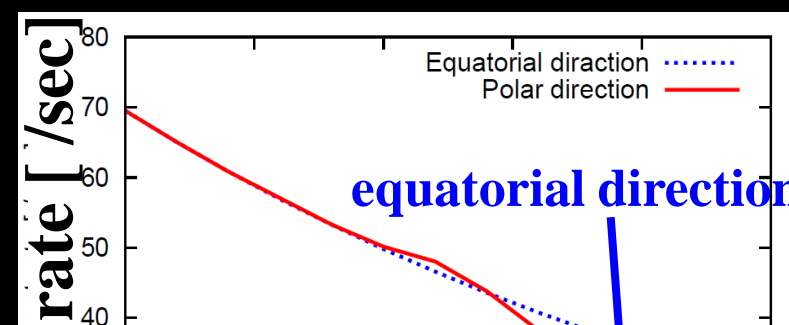
Kawagoe, Takiwaki, Kotake JCAP (2009)



Event rate of $\bar{\nu}_e$ @ SK



Event rate of ν_e @ SK



- ✓ These features are inherent to MHD explosions.
- ✓ Good measure to tell the difference from other scenarios.

Time [sec]

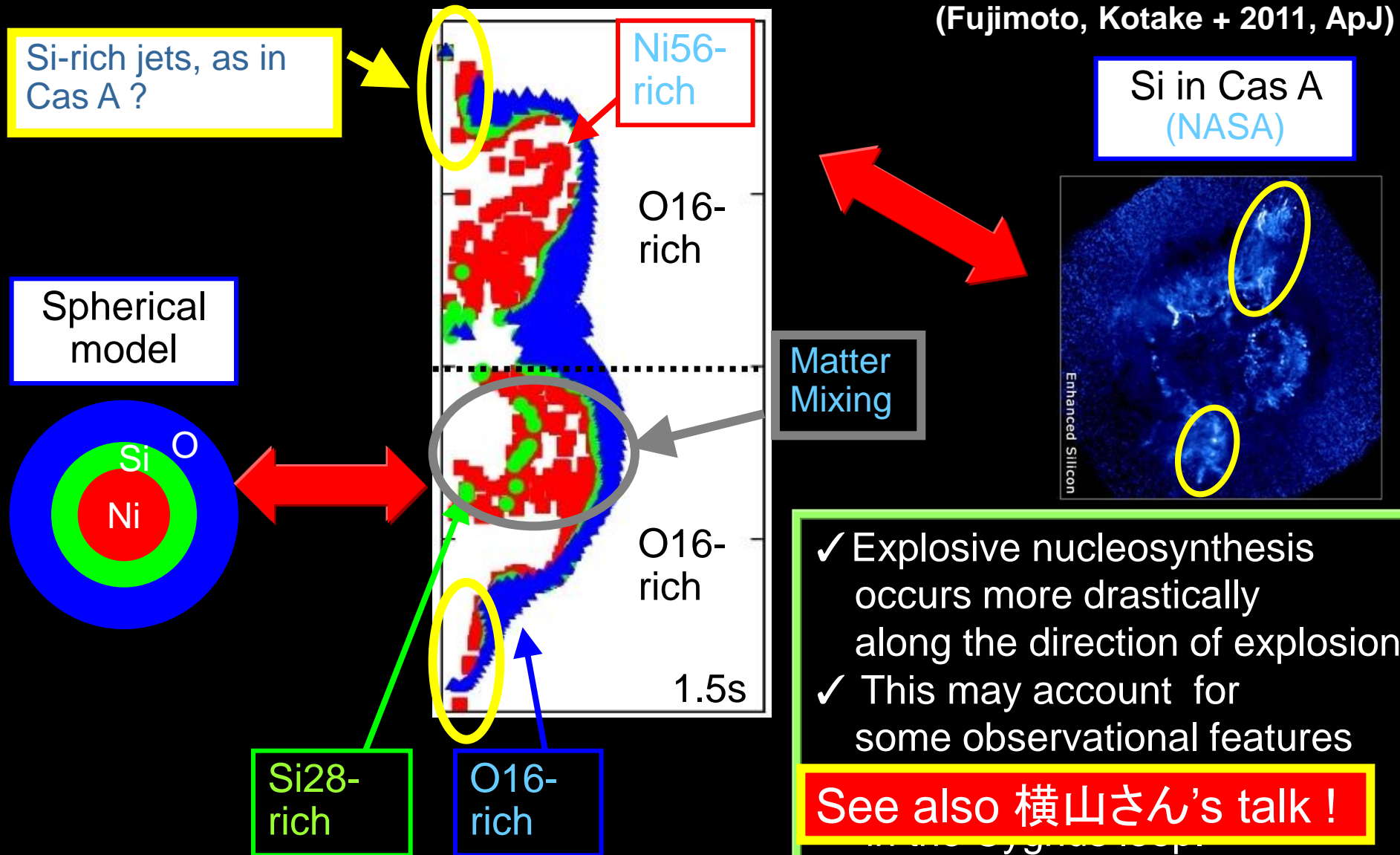
Time [sec]

超新星爆発における爆発的元素合成

(Kifonidis et al. (2003,2006), Hungerford et al. (05), Young et al. (2006), Maeda et al. (2008))

✓ Explosive nucleosynthesis in SASI-aided 2D explosions

(Fujimoto, Kotake + 2011, ApJ)



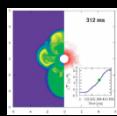
- ✓ Explosive nucleosynthesis occurs more drastically along the direction of explosion
- ✓ This may account for some observational features

See also 横山さん's talk !

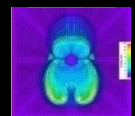
展望：超新星エンジンを探る三つの観測の目



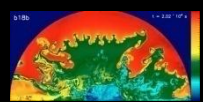
対流



SASI



G-mode?



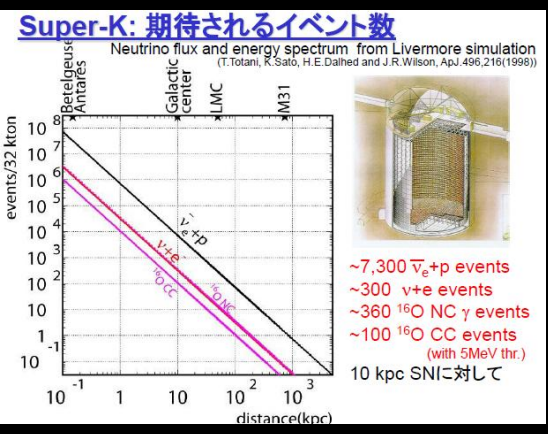
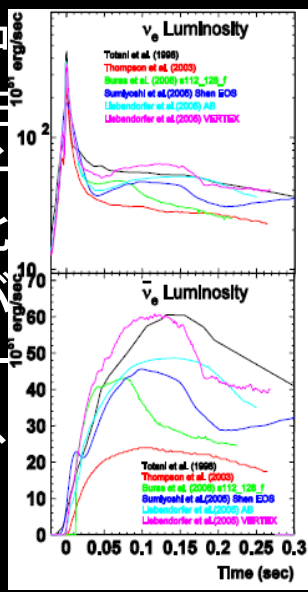
0秒 数ミリ秒

1秒(?) > 数時間

重力崩壊開始

バウンス

中性子化バースト



ニュートリノ

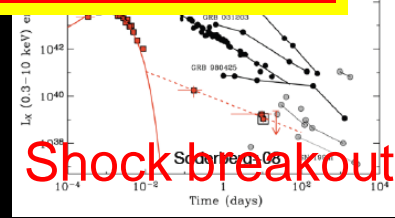
衝撃波

元素合

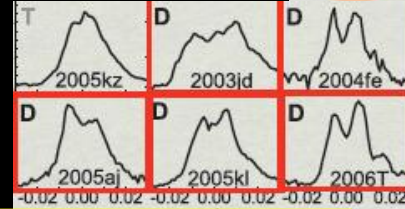
爆発

See 牧島先生's talk !

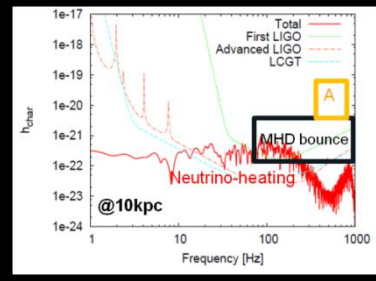
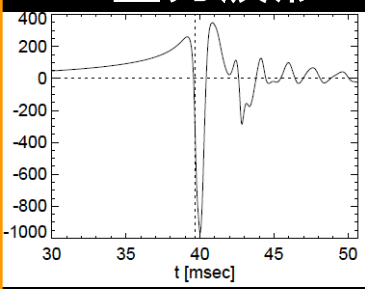
電磁波



Subaru
Tanaka+06(偏光)
Maeda+06



重力波形



重力波

See also 釋さん's talk !

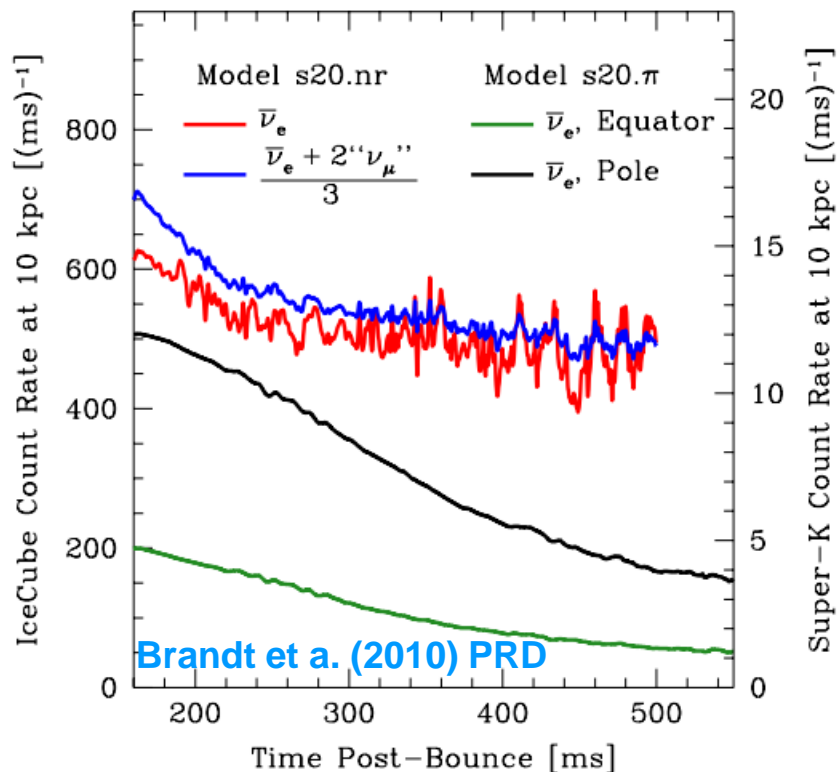
カウンターパート

まとめ：超新星からのマルチメッセンジャー

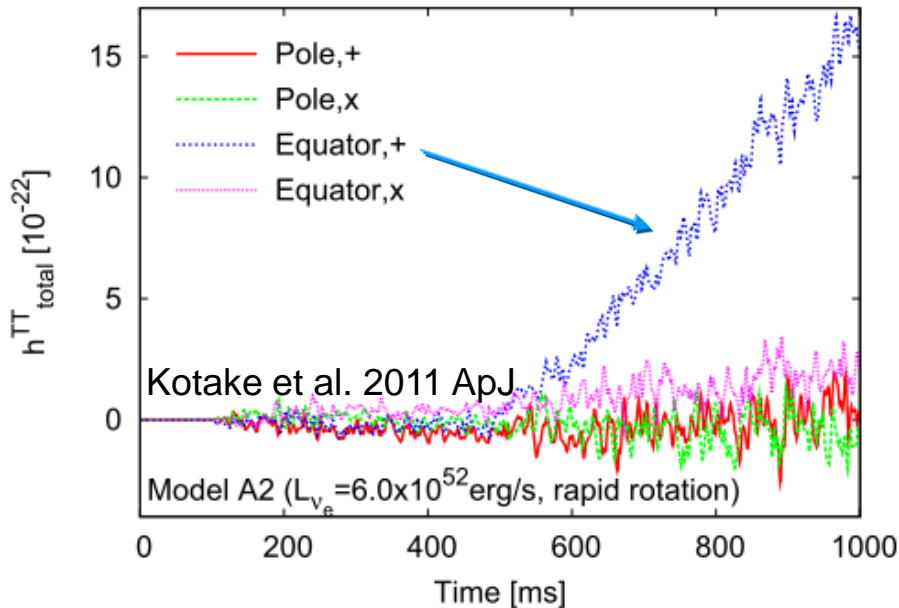
Messenger	Gravitational Waves	Neutrinos	Photons (nucleosynthesis)
Mechanism			
Neutrino-heating mechanism 	Stochastic (Convection & SASI)	Stochastic (Convection & SASI)	<u>ν p process</u> Anisotropic explosive nucleosynthesis
	<u>Excess for equator</u> (Spiral SASI modes)	<u>Polar excess</u>	?
	Burst signals (bounce & BH formation)	<u>Disappearing signals</u>	<u>No photon (?)</u>
MHD mechanism	Burst & tail (rapid rotation + magnetic fields)	<ul style="list-style-type: none"> Anisotropy in SK events (MSW effect) $\bar{\nu}_e$ bursts (RSF) 	<ul style="list-style-type: none"> r-process sites ? Path to hypernovae ?

まとめ：超新星からのマルチメッセンジャー

Messenger	Gravitational Waves	Neutrinos	Photons (nucleosynthesis)
Mechanism			
Canonical rotation	Stochastic (Convection & SASI)	Stochastic (Convection & SASI)	ν p process
			Anisotropic explosive nucleosynthesis
		Polar excess	?
		Disappearing signals	No photon (?)
		Anisotropy in SK events (MSW effect)	r-process sites ?
		$\bar{\nu}_e$ bursts (RSF)	Path to hypernovae ?



からのマルチメッセンジャー



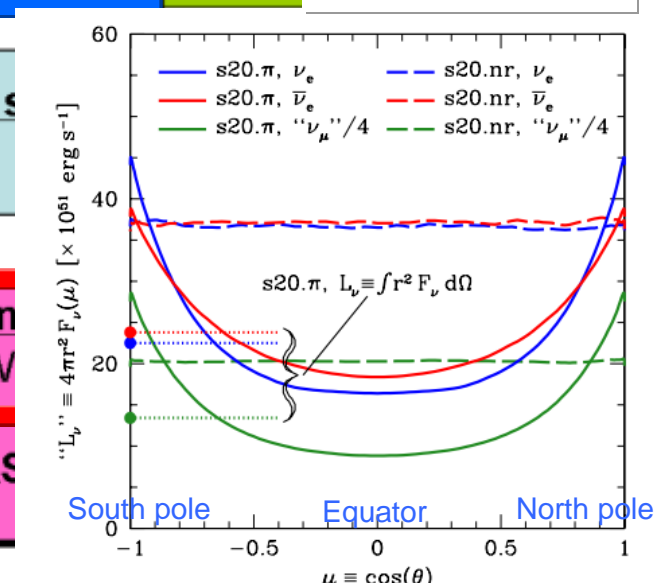
s	Neutrinos	Photons (nucleosynthesis)
	Stochastic (Convection & SASI)	ν p process
		Anisotropic explosive nucleosynthesis

mechanism

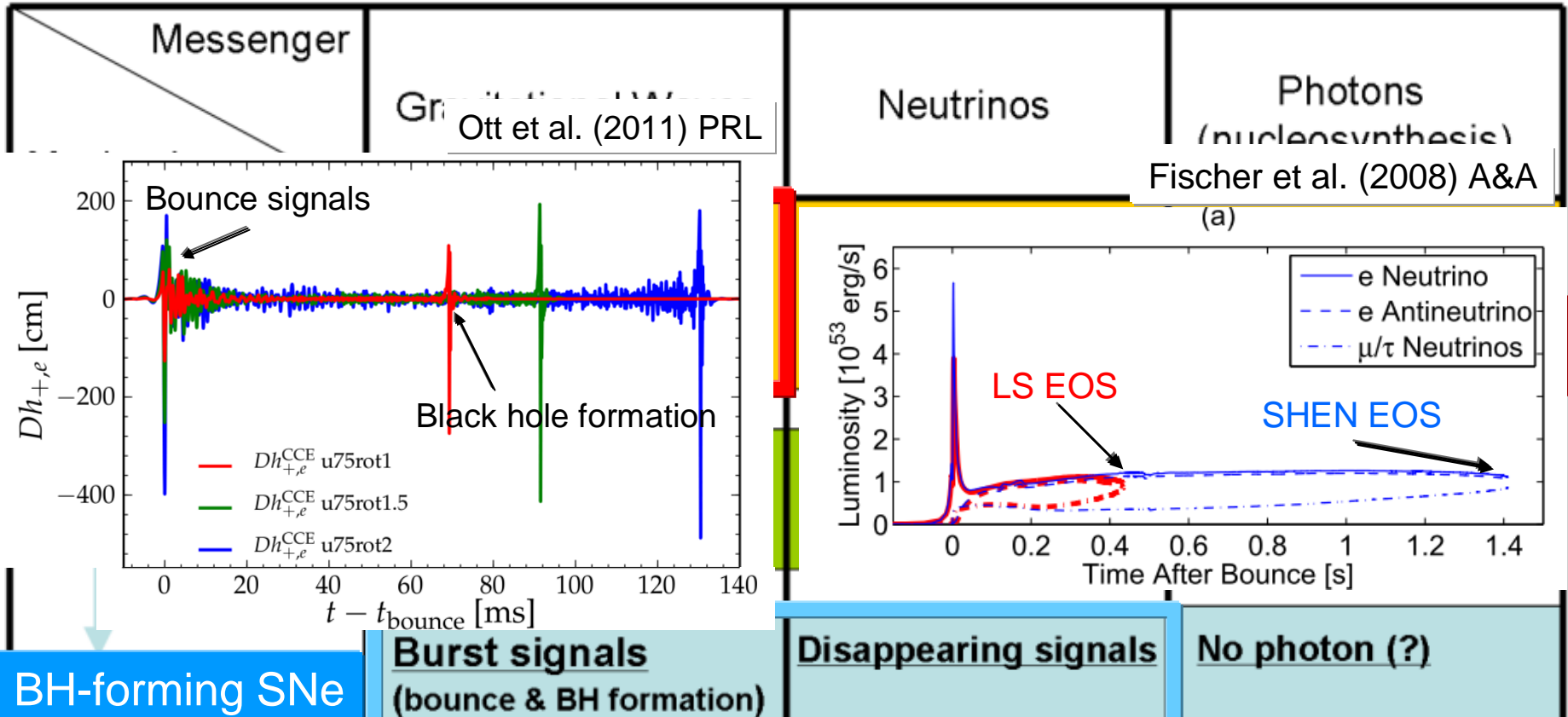
Rapidly Rotation

black-hole forming

	Excess for equator (Spiral SASI modes)	Polar excess	?
	Burst signals (bounce & BH formation)	Disappearing s	Brandt et al 2010 PRD
MHD mechanism	Burst & tail (rapid rotation + magnetic fields)	Anisotropy in events (MSW)	
		$\bar{\nu}_e$ bursts (RS)	



まとめ：超新星からのマルチメッセンジャー (Kotake +11)



- ✓ Multi-messenger astronomy of SN will be highly interesting (although challenging!) in the next decades.
- ✓ Multi-dimensionality (convection, SASI, rotation, B-fields) holds a key to bridge the SN theory (incl. nuclear theory) and these multi-messenger observation.

高密度天体研究の歴史を振り返ると(私見ですが。)

起

承

転

起

~~結~~

佐藤勝彦(1975)
Neutrino Trapping

Mayle & Wilson ('80)
数値シミュレーションで
Neutrino heatingの重要性

中村卓史(1980) 数値相対論

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

野本憲一, 蜂須泉(1987)~
SN1987A: 多次元効果の実証

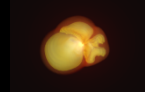


山田章一(1991) 多次元計算の先駆け

柴田大(1995)
数値相対論本格始動

Advance
in Computers:
京速スパコン

我々の世代
流体不安定性、自転磁場
メカニズム(2D・3D・輻射輸送
計算)



電磁波 & 次世代観測:

ニュートリノ(QCD相転移へのプローブ)
重力波(爆発メカニズムへのプローブ)
元素合成(r-process サイト, vp プロセス)

天体物理研究
新たな地平へ