

超新星のニュートリノ爆発と磁気爆発

Tomoya Takiwaki
(RIKEN)

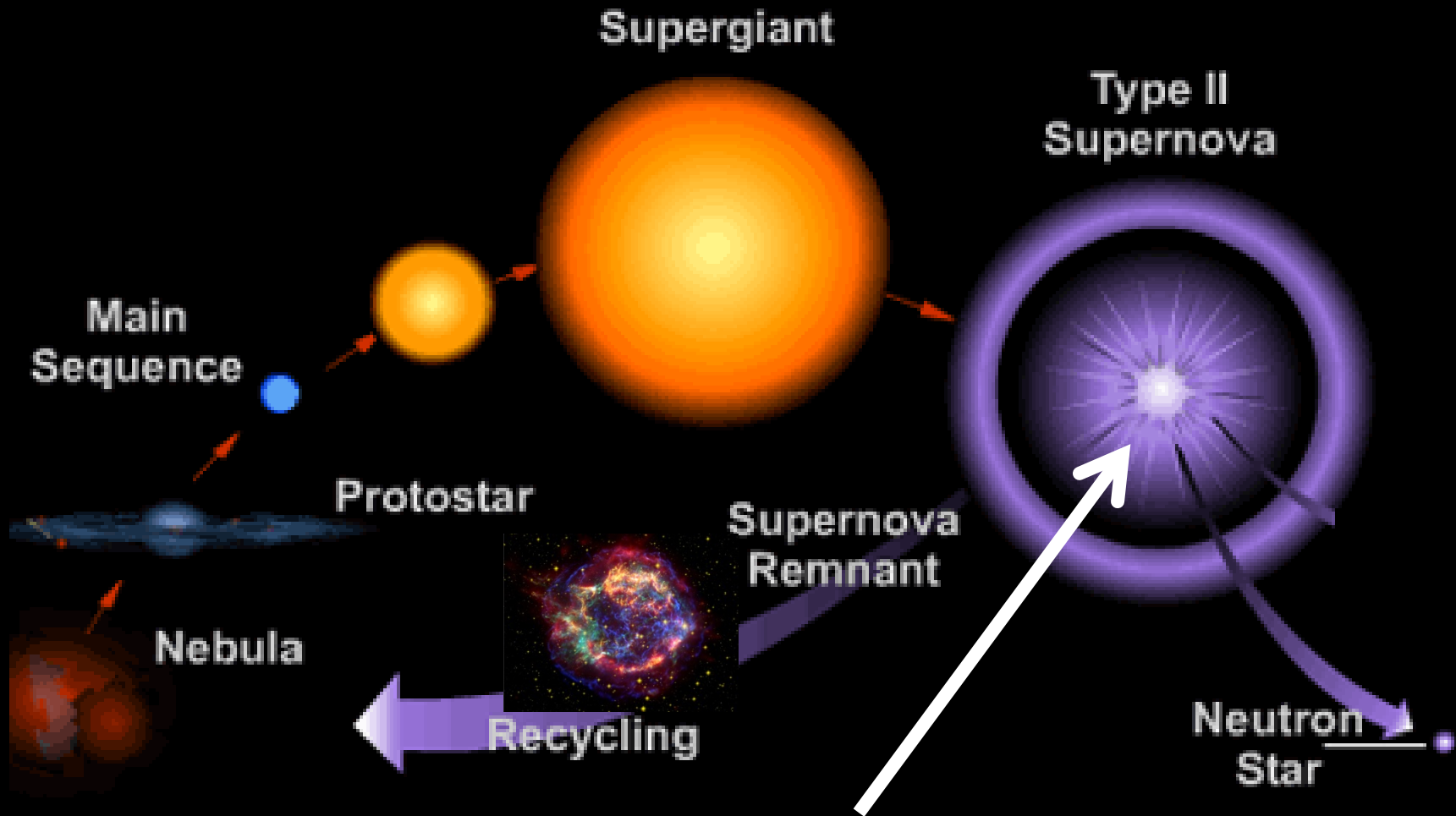
Most luminous object in Universe



Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud (1987 Oct)
D_LMC=48.8kpc=12 k ly

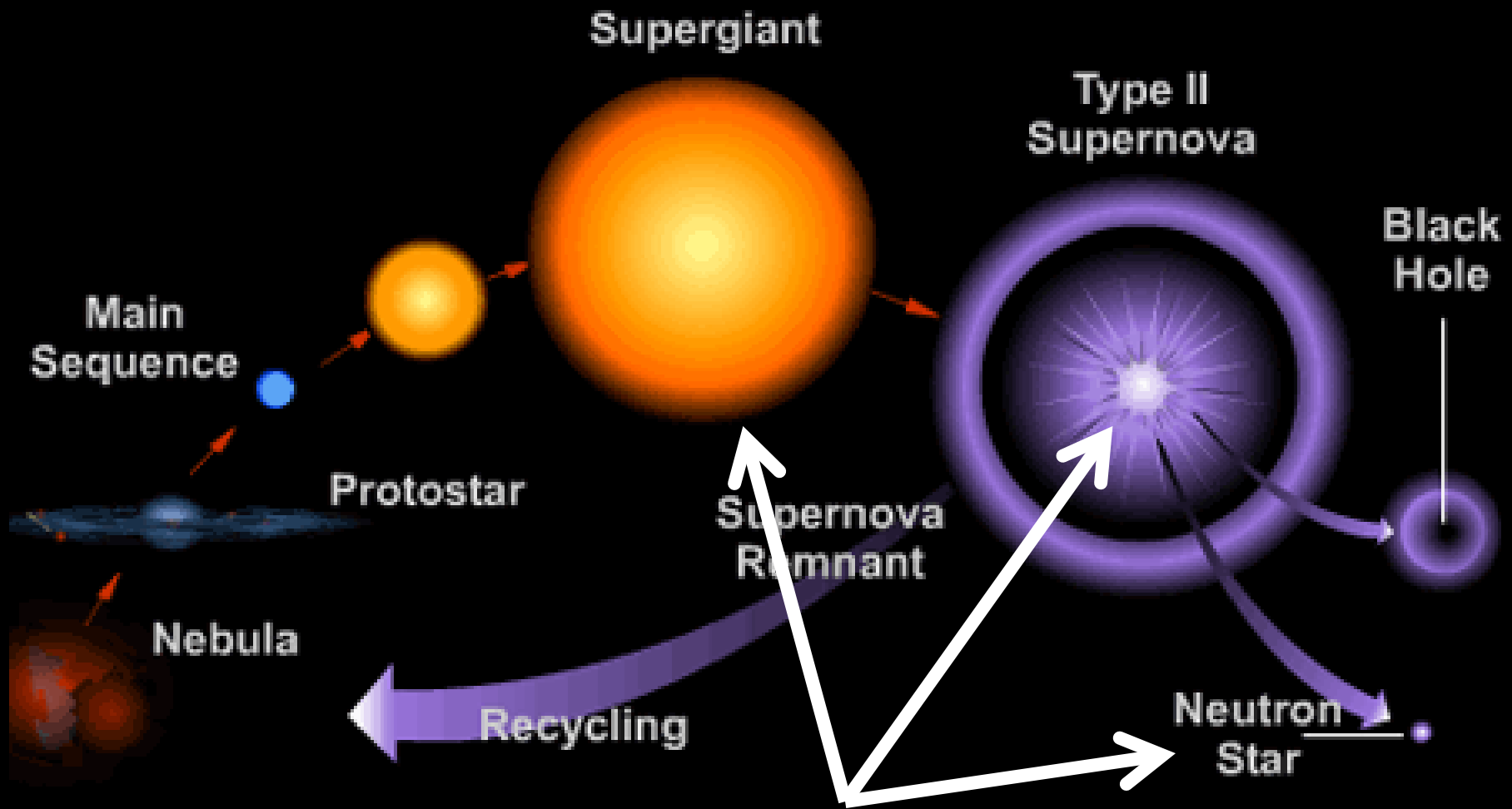
Supernovae(10pc) $M=-18$
1 billion of Sun(4.8)
Milkyway($M=-20.5$) 1/10
Duration 100day

星の一生と最期の大爆発



実は、ここでどうして爆発するのか
はっきりわかってない！

星の一生と最期の大爆発



実はいろんな爆発をするが、
どんな親星がどんな風に爆発するのか分かってない

(重力崩壊型) 超新星爆発

- およそ10太陽質量以上の星が進化のはてに起こす爆発現象
- 爆発の後には中性子星かブラックホール(コンパクト天体)が生成される。
- 爆発メカニズムの詳細は不明だが、ニュートリノが関与する説と磁場が関与する説がある

爆発メカニズムは、**コンパクトオブジェクト**の生成と**その活動性**(流体的、輻射的運動)に強く依っている。

プラン

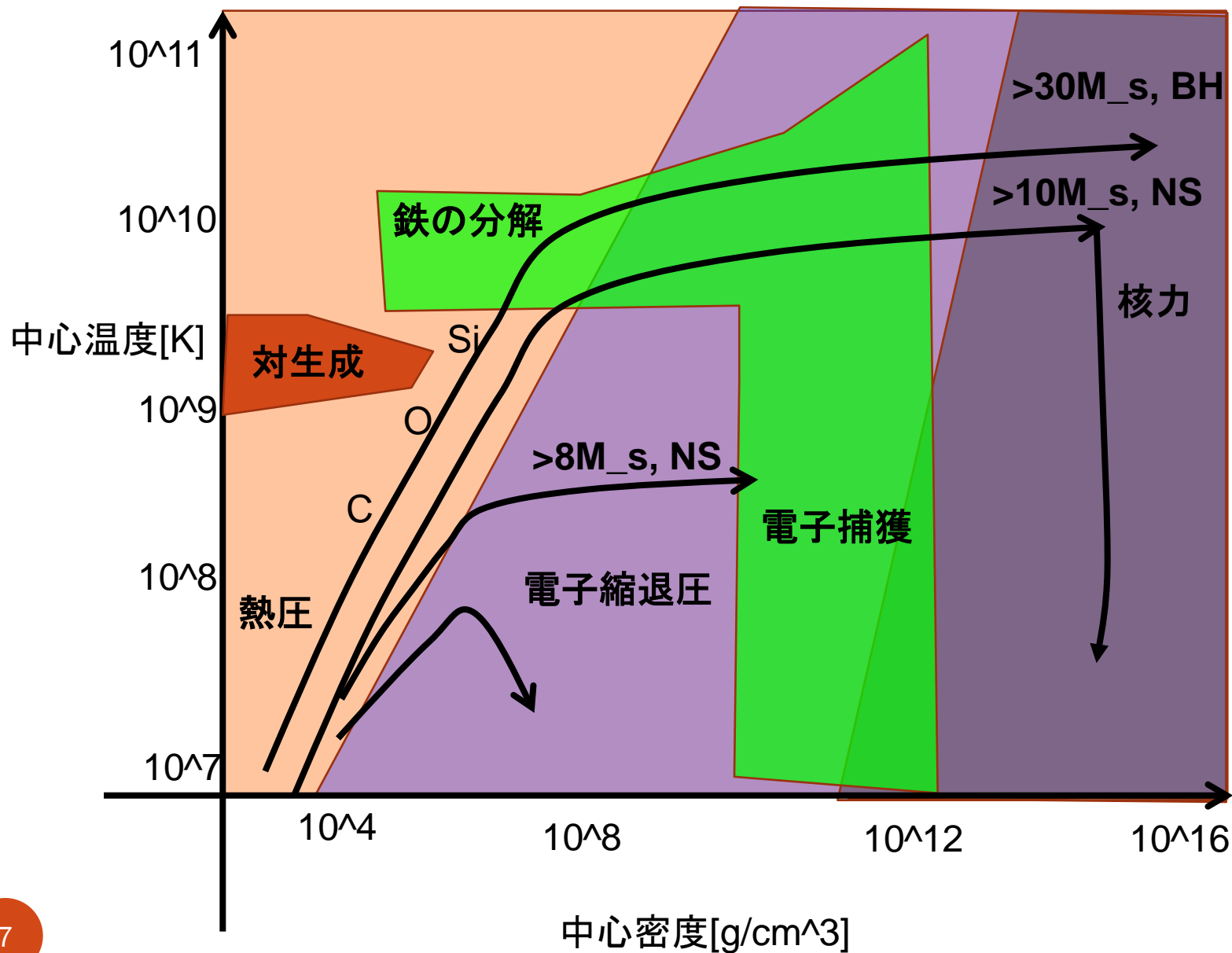
起：超新星とは何か、問題

承：ニュートリノ加熱機構の詳細

転：それ以外の爆発メカニズム

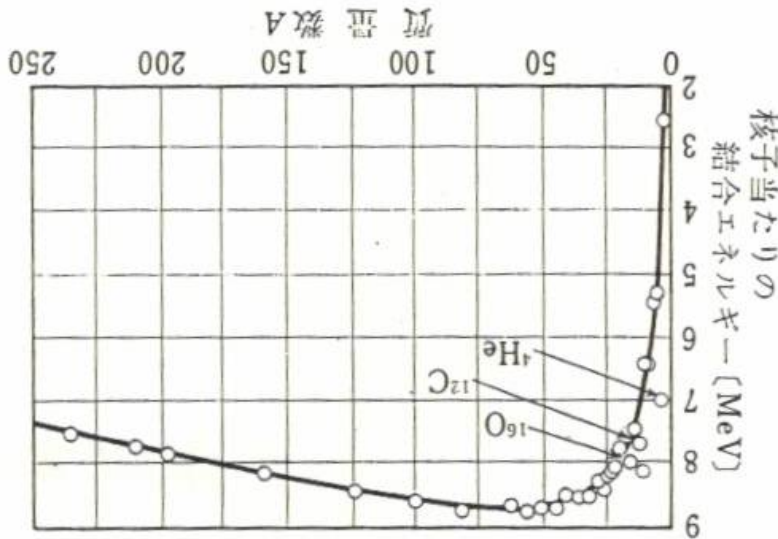
結：まとめと他の研究とのつながり

星の進化と重力不安定

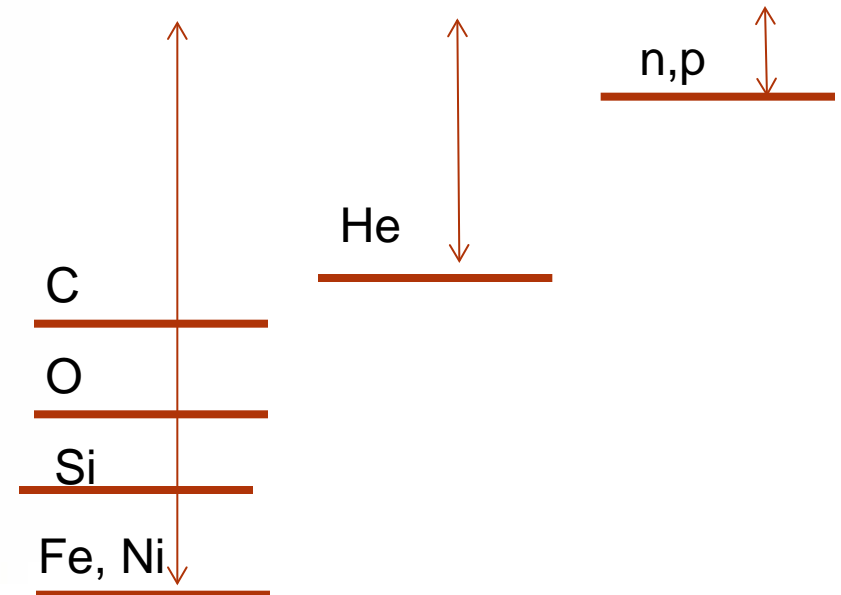


原子核と束縛エネルギー

図 質量数と核子当たり結合エネルギーの関係



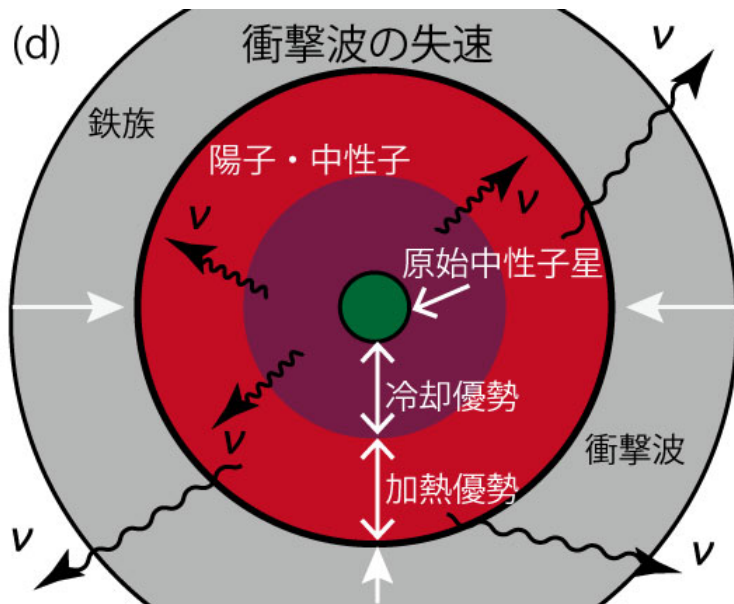
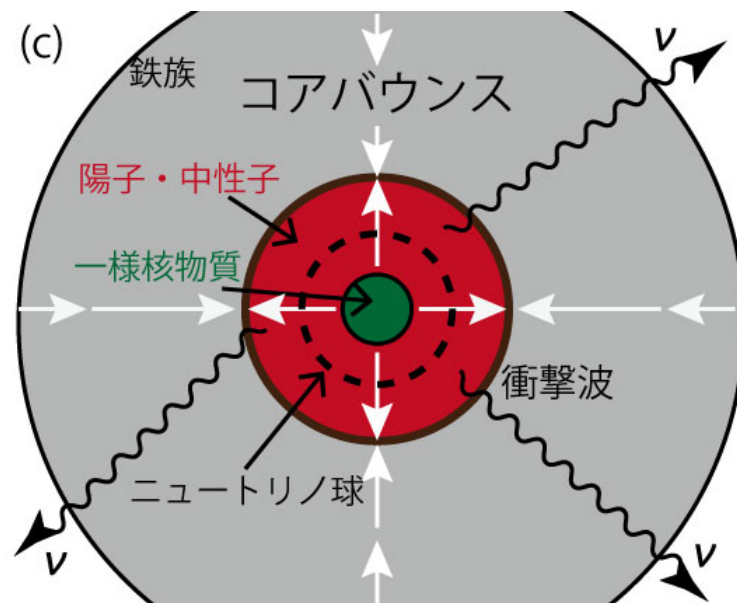
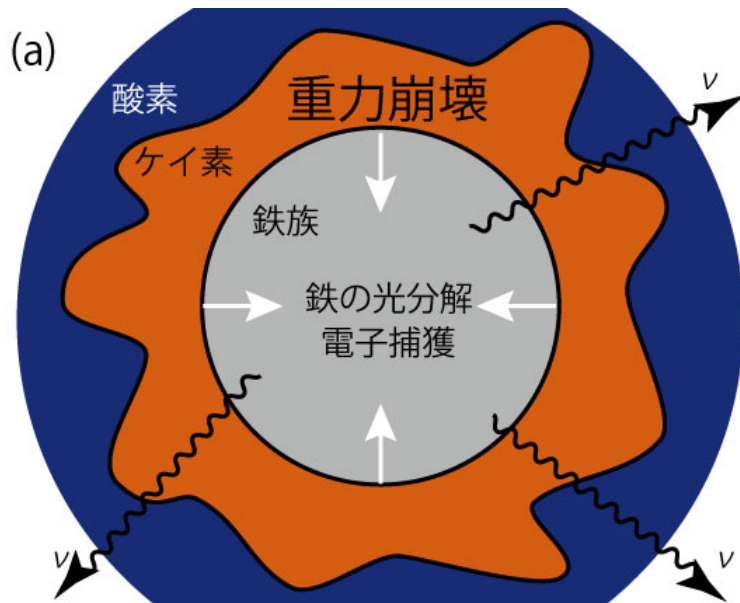
← 元素合成



光分解 →

元素合成: 質量数が増加、束縛エネルギー増加
エネルギー解放

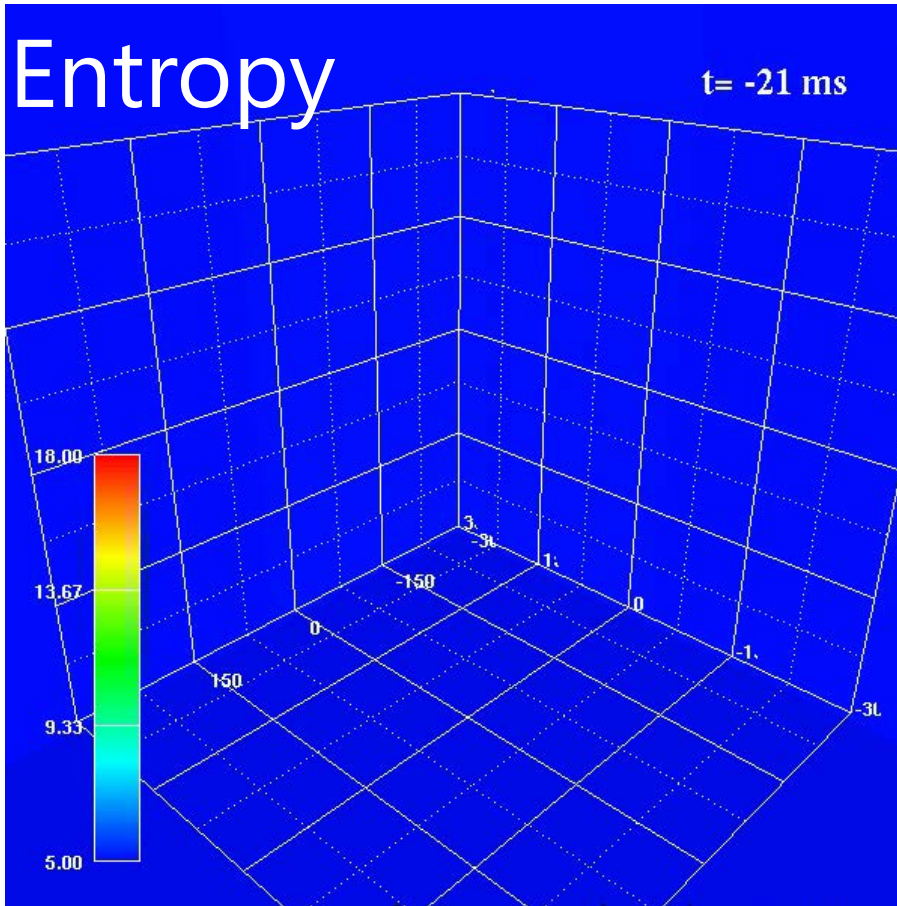
光分解: 質量数が減少、エネルギー吸収



爆発メカニズムの議論には、
これに加えて
中性子星付近の運動を
解明する必要がある

Problem

Entropy



Supernovae shock in simulation tends to stall and does NOT explode.

Long-lasting Problem \sim 1980.

In 2000-2005, state-of-the-art simulations with detailed neutrino transport confirm that!

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

Why does SN in real world explode?

Why does SN in sim. fail to explode?

プラン

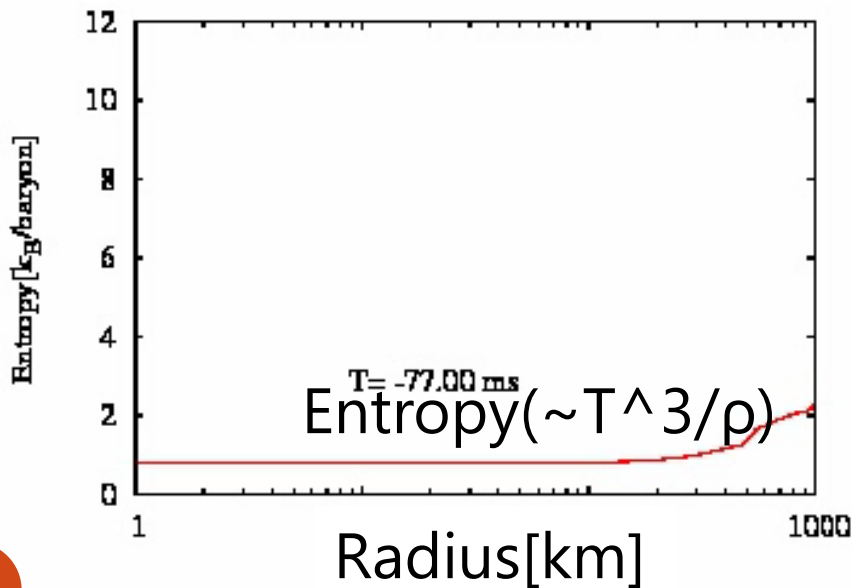
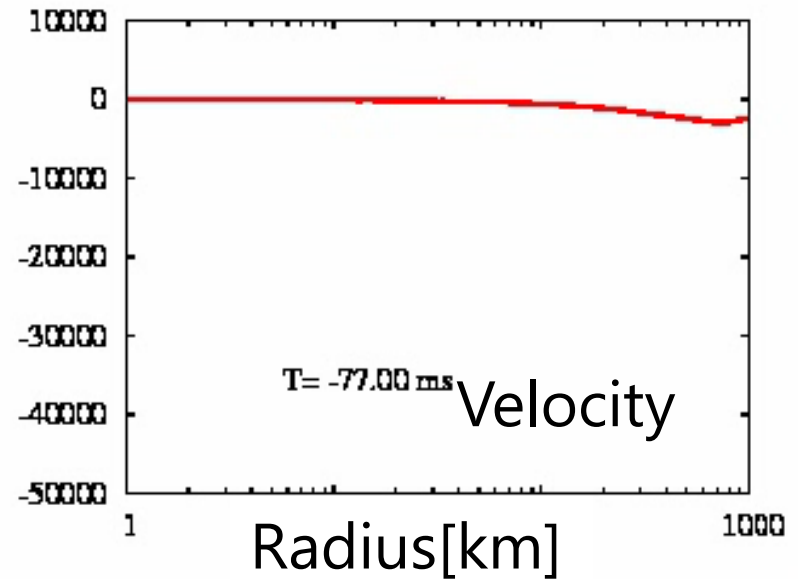
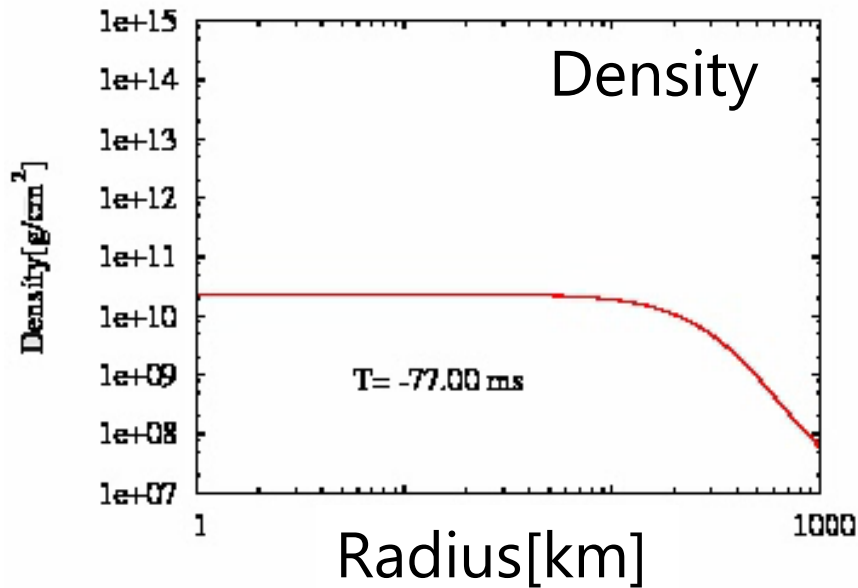
起：超新星とは何か、問題

承：ニュートリノ加熱機構の詳細

転：それ以外の爆発メカニズム

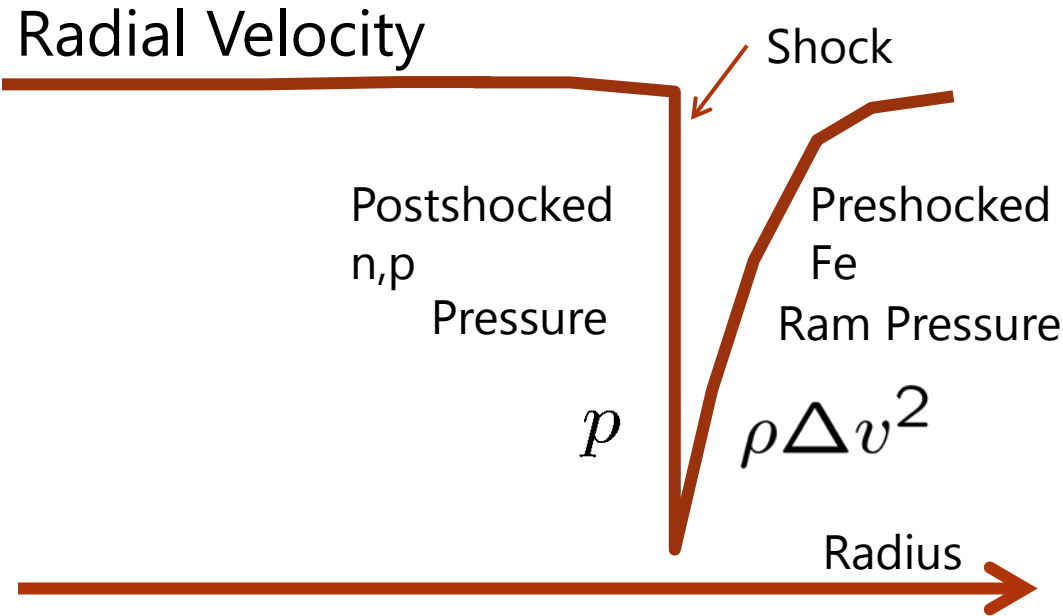
結：まとめと他の研究とのつながり

Basic setup



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

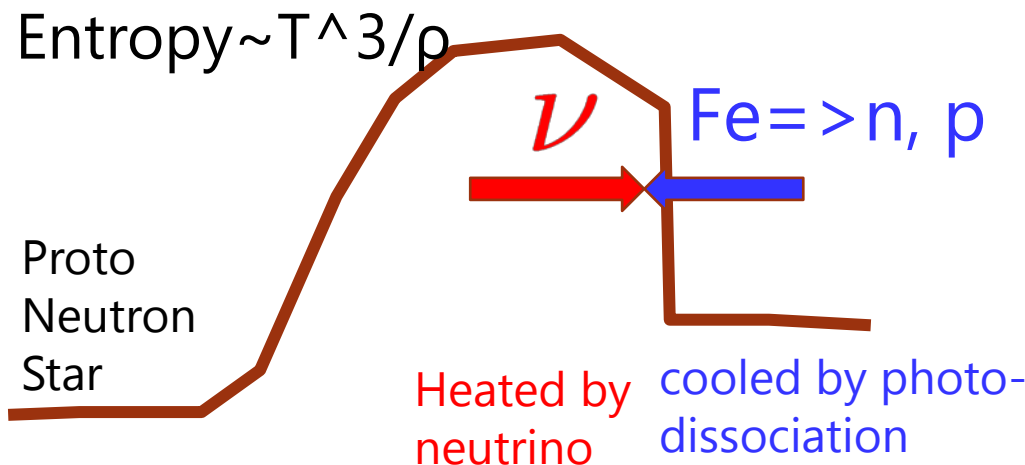
Key aspects of Neutrino Mechanism



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).



LHS is determined by two ingredients.

(1) Photo-dissociation

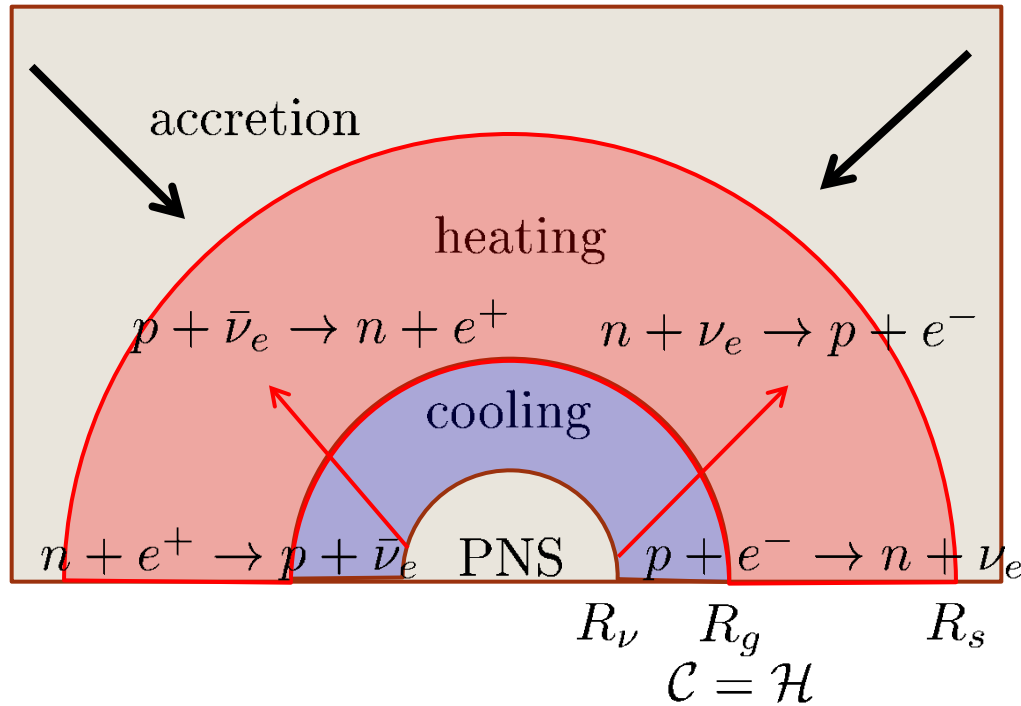


(2) Neutrino Heating



Neutrino Heating Mechanism

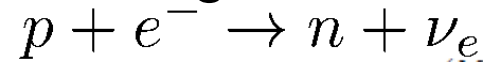
Janka 01



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

外側ではヒーティングが優勢！
そこをゲイン領域と呼ぶ。

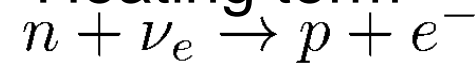
-Cooling term



$$Q_\nu^- = (3\alpha^2 + 1) \frac{\pi \sigma_0 c (kT)^6}{(hc)^3 (m_e c^2)^2} \frac{\rho}{m_u} \\ \times [Y_p \mathcal{F}_5(\eta_e) + Y_n \mathcal{F}_5(-\eta_e)] \\ \approx 145 \frac{\rho}{m_u} \left(\frac{kT}{2 \text{ MeV}} \right)^6 \left[\frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$$

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

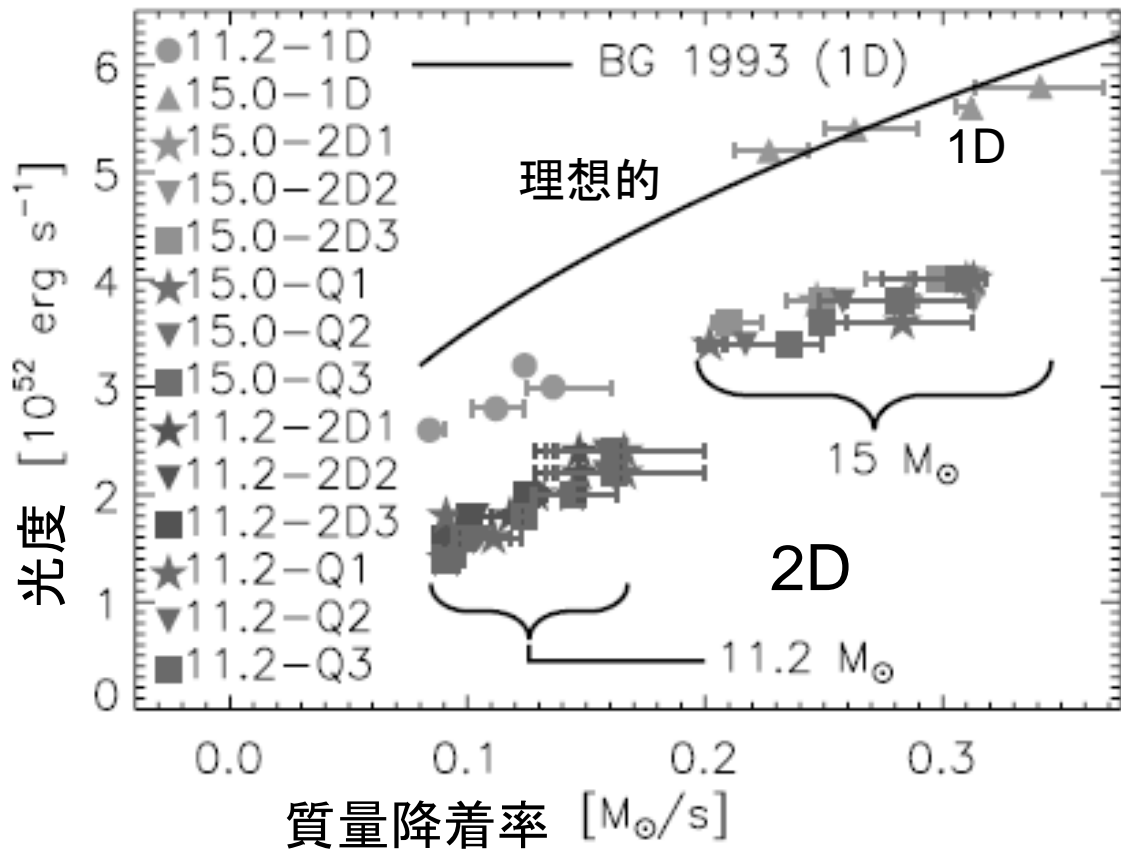
-Heating term



$$Q_\nu^+ = \frac{3\alpha^2 + 1}{4} \frac{\sigma_0 \langle \epsilon_{\nu_e}^2 \rangle}{(m_e c^2)^2} \frac{\rho}{m_u} \frac{L_{\nu_e}}{4\pi r^2 \langle \mu_\nu \rangle} (Y_n + 2Y_p) \\ \approx 160 \frac{\rho}{m_u} \frac{L_{\nu_e, 52}}{r_7^2 \langle \mu_\nu \rangle} \left(\frac{kT_{\nu_e}}{4 \text{ MeV}} \right)^2 \left[\frac{\text{MeV}}{\text{s}} \right]$$

$$\rho_{\text{neutron}} \times \rho_{\text{neutrino}} (\propto T_\nu^3 / r^2) \times \sigma (\propto T_\nu^2) \times \bar{E} (\propto T_\nu) \\ T \propto r^{-1}$$

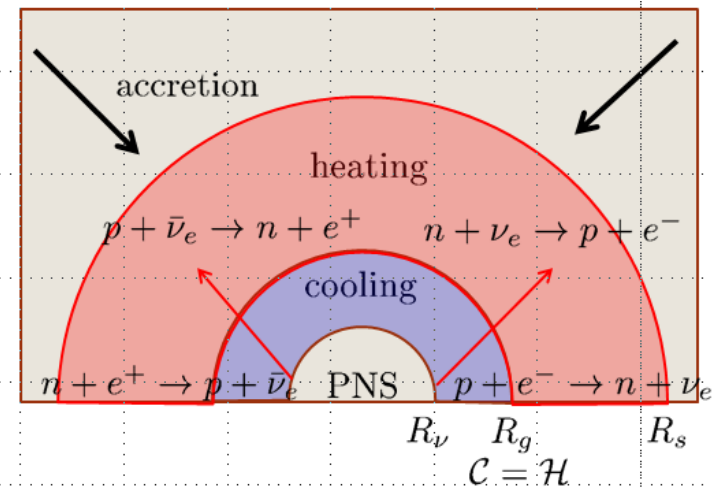
Accretion VS Luminosity



Murphy & Burrows 2008

質量降着率 < 光度 => 成功

質量降着率 > 光度 => 失敗



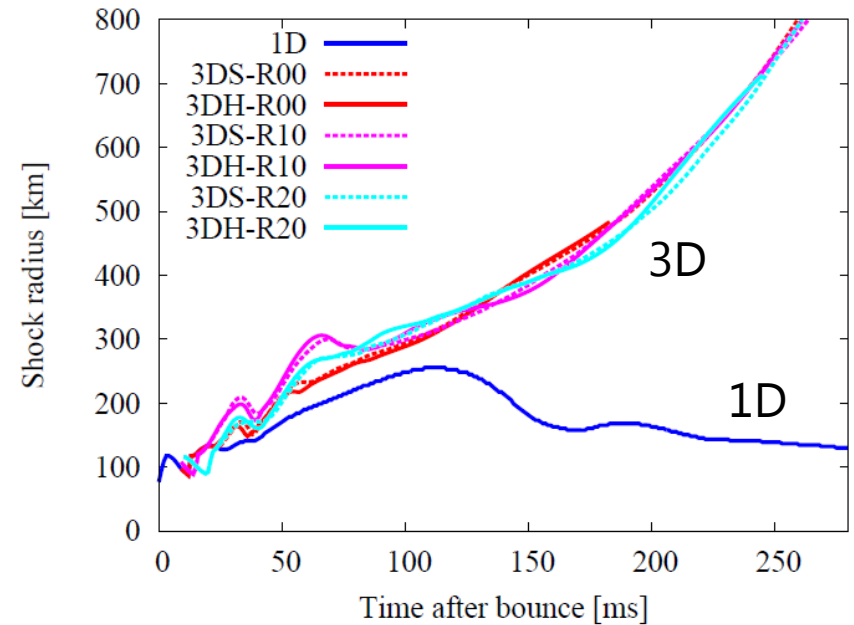
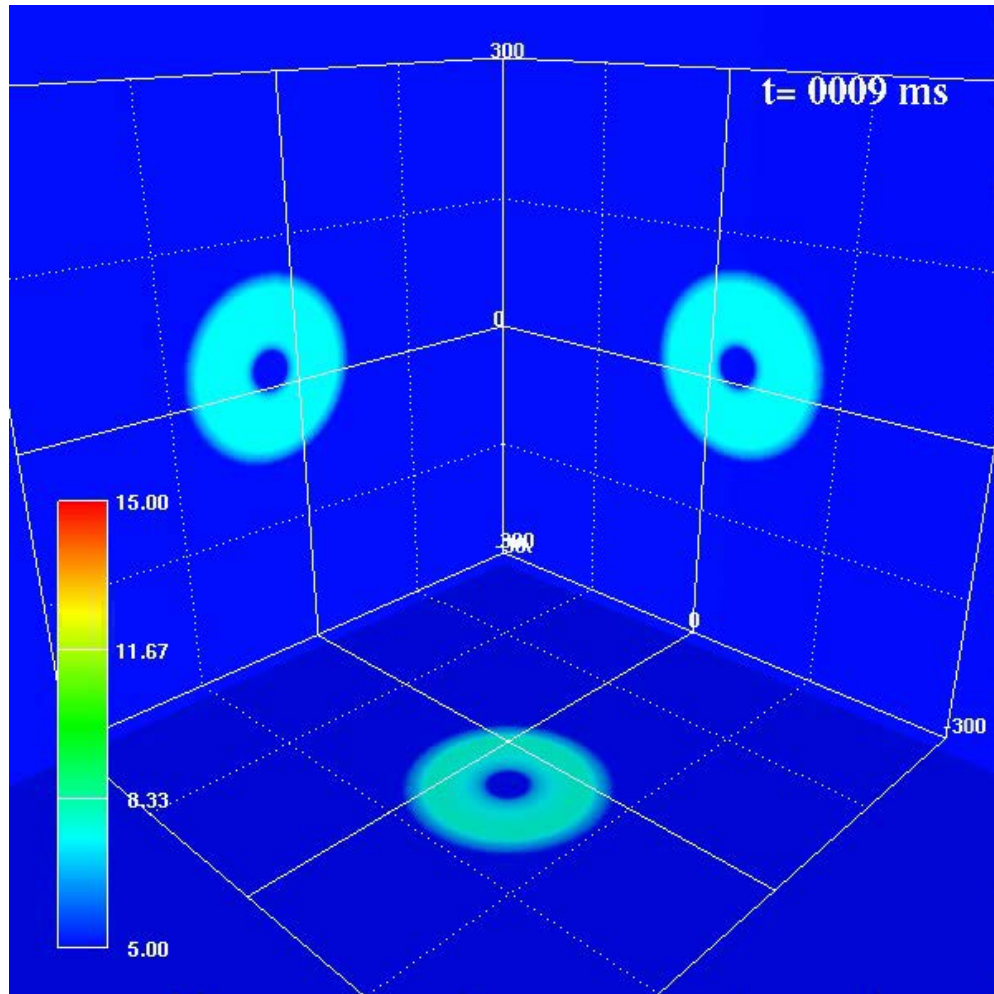
超新星爆発の中心エンジンで大事なこと

(1) ニュートリノ光度 <= 原始中性子の物理

(2) 質量降着率 < = 親星の構造

(3) ゲイン領域の多次元の影響、流体不安定性

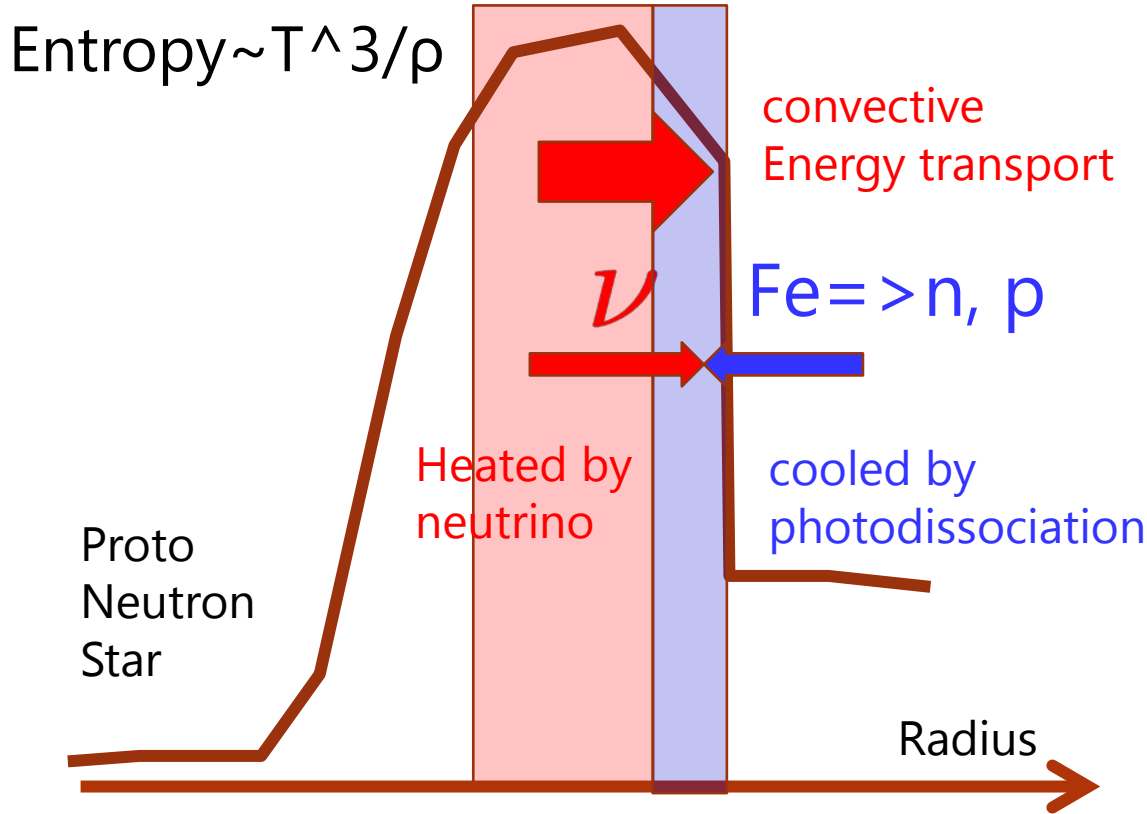
From 1D to 3D



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 model!

Key aspects of Neutrino Mechanism

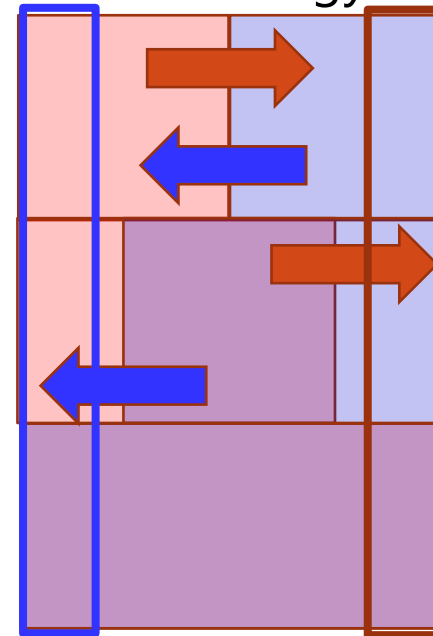


Cooler than the initial state but ν heat is active

Negative entropy gradient leads Rayleigh-Taylor instability

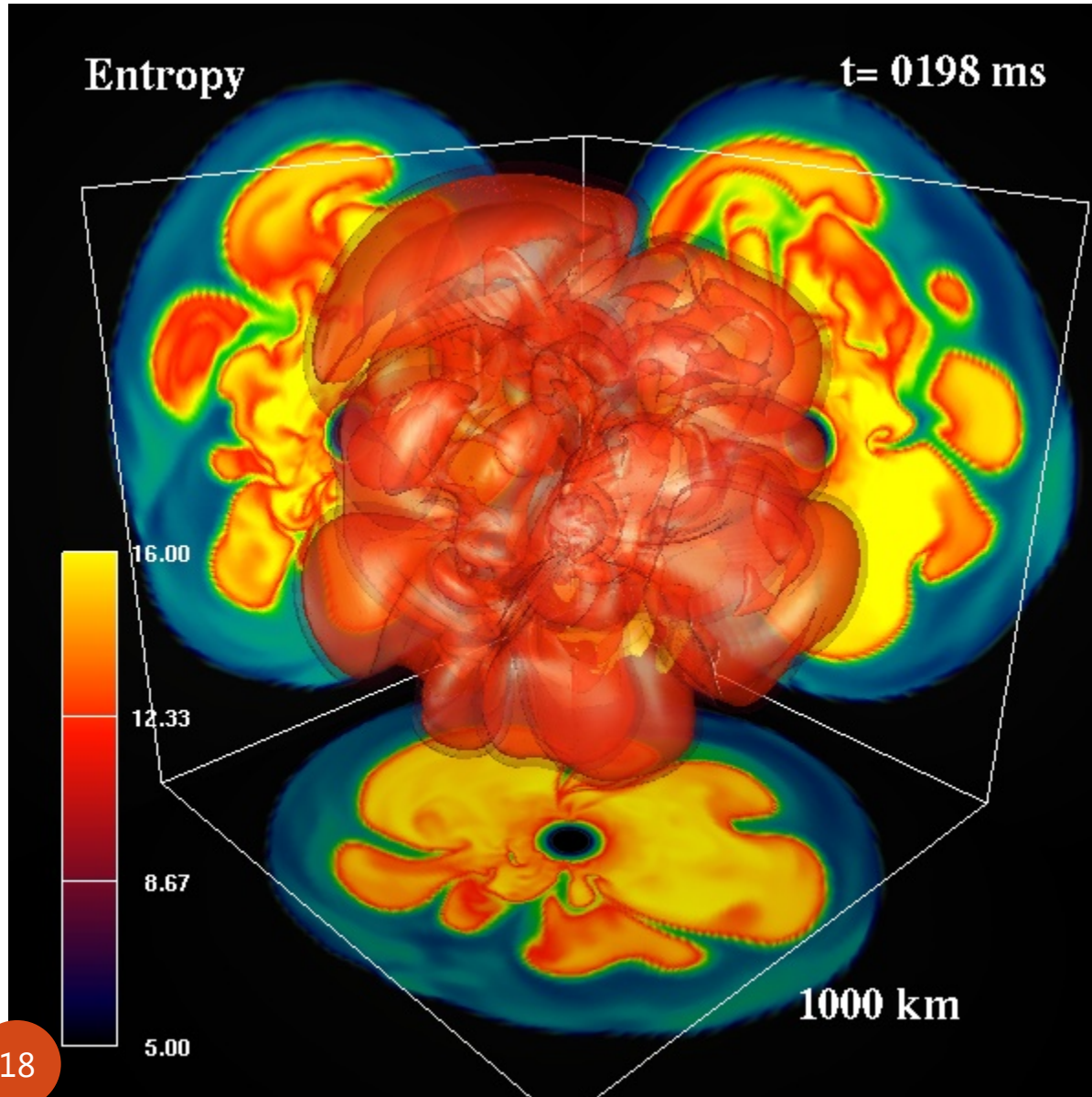
(Cold heavy matter is put over Hot light matter)

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.

Toward making convincing model

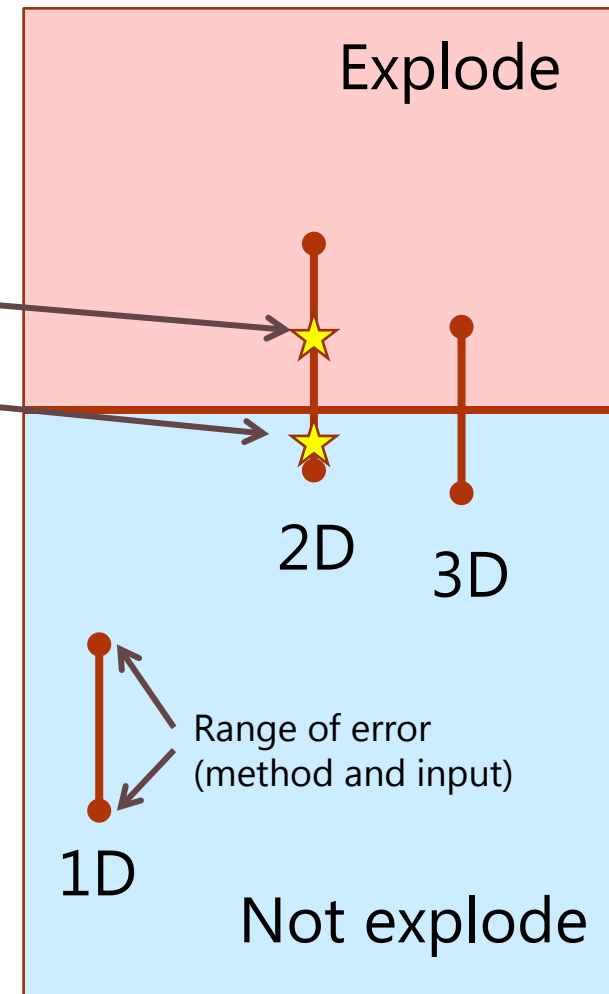
Multi-D model is very delicate that depends on input physics and methods strongly!

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)



It's urgent to brush up the numerical and physical methods.

プラン

起：超新星とは何か、問題

承：ニュートリノ加熱機構の詳細

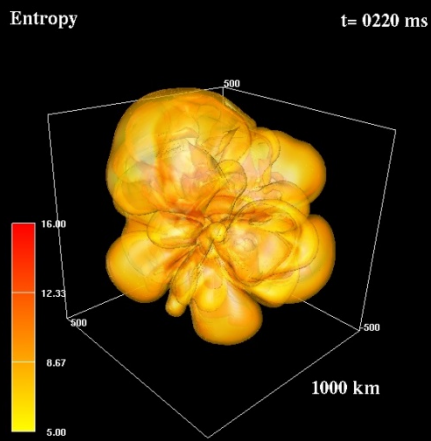
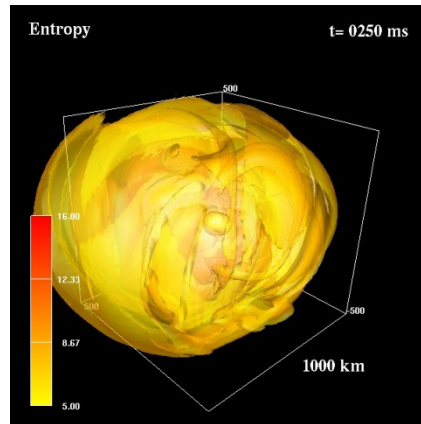
転：それ以外の爆発メカニズム
自転と磁場

結：まとめと他の研究とのつながり

Two class of CC SNe

Neutrino Mechanism

Rotation

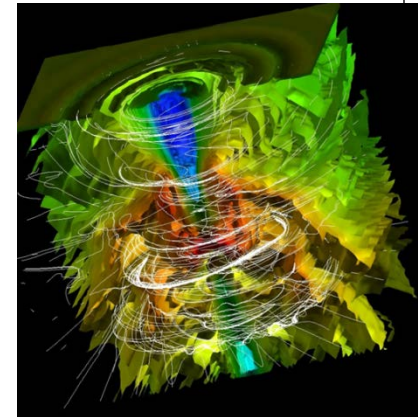
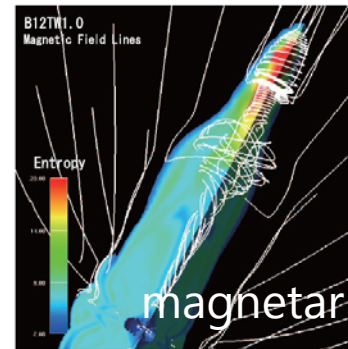


pulsar

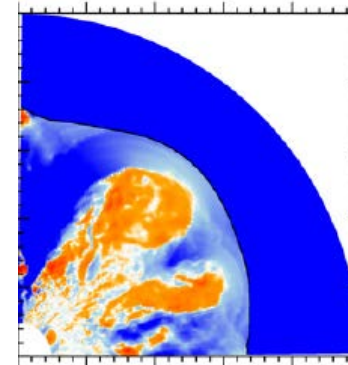
Mass

Magnetic Mechanism

Magnetic Fields
Rotation



BH



Mass

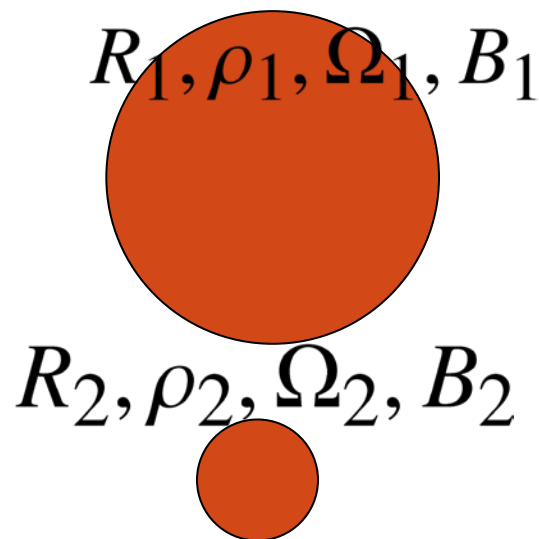
重力崩壊時のエネルギー比

質量、角運動量、磁束保存

$$\int \rho dV = \frac{4\pi}{3} \rho R^3 = \text{const.} \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-3}$$

$$\int \rho r^2 \Omega dV = \frac{4\pi}{5} \rho \Omega R^5 = \text{const.} \quad \frac{\Omega_2}{\Omega_1} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-2}$$

$$\int B dS = 4\pi R^2 B = \text{const.} \quad \frac{B_2}{B_1} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-2}$$



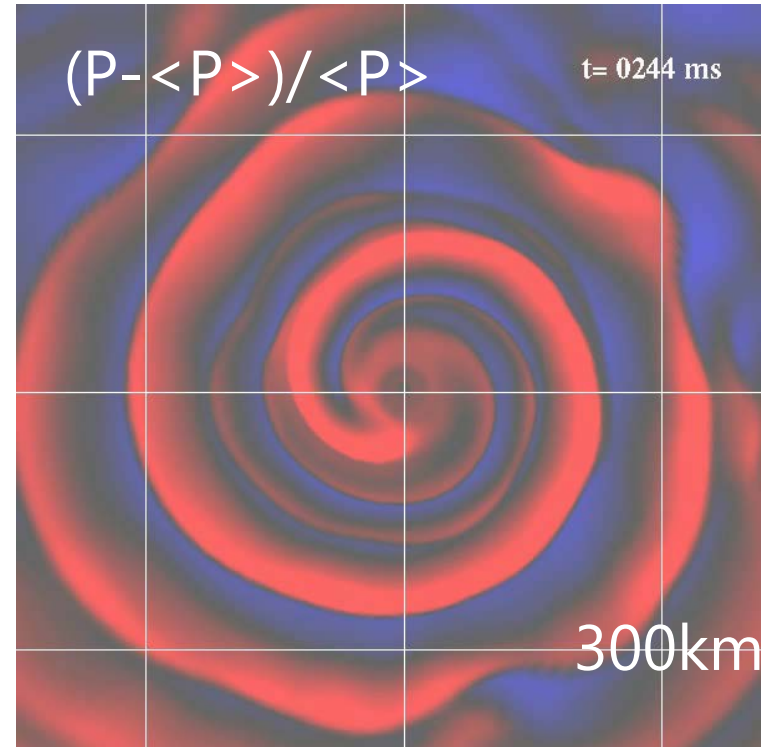
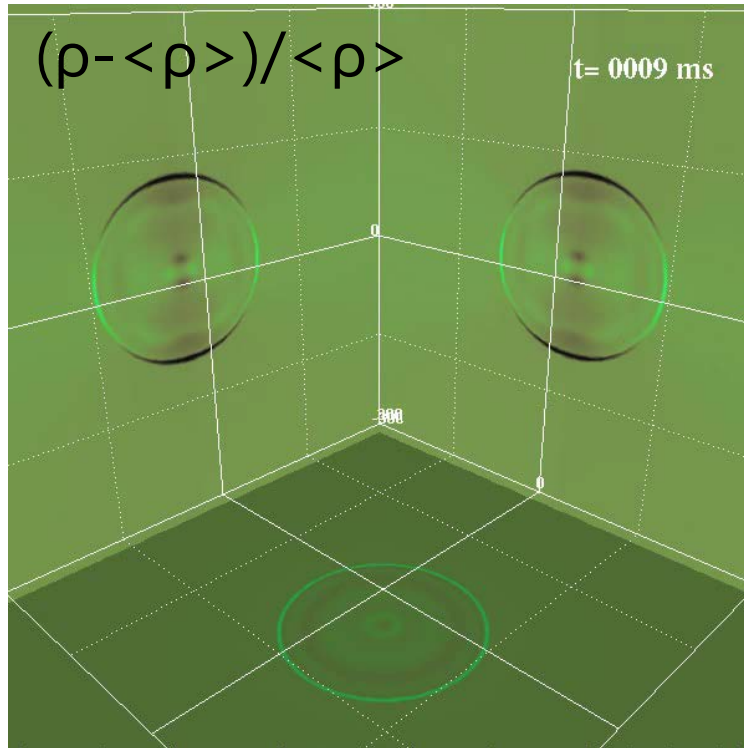
重力回転磁場のエネルギー

$$W = \int \frac{1}{2} \rho \Phi dV = \frac{2\pi G}{15} \rho^2 R^5 \quad \frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-1} \quad W : 10^{51} \text{ erg} \rightarrow 10^{53} \text{ erg}$$

$$T = \int \frac{1}{2} \rho r^2 \Omega^2 dV = \frac{2\pi}{5} \rho \Omega^2 R^5 \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-2} \quad T : 10^{48} \text{ erg} \rightarrow 10^{52} \text{ erg}$$

$$E_m = \int \frac{B^2}{8\pi} dV = \frac{B^2 R^3}{6} \quad \frac{E_{m2}}{E_{m1}} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{-1} \quad E_m : 10^{47} \text{ erg} \rightarrow 10^{49} \text{ erg}$$

Rotation

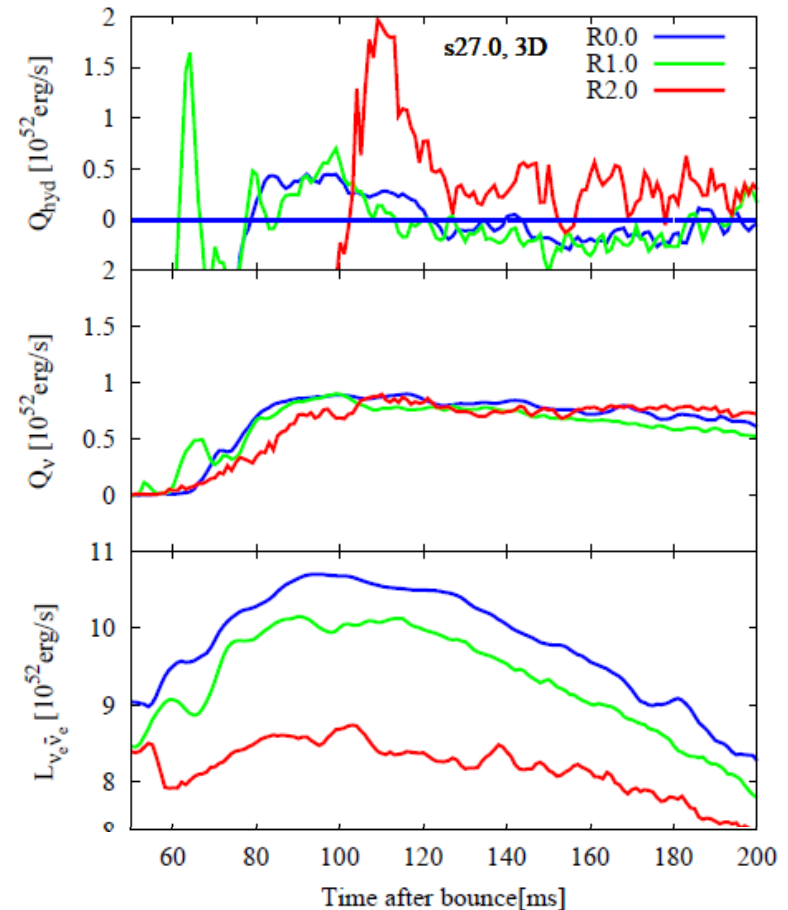
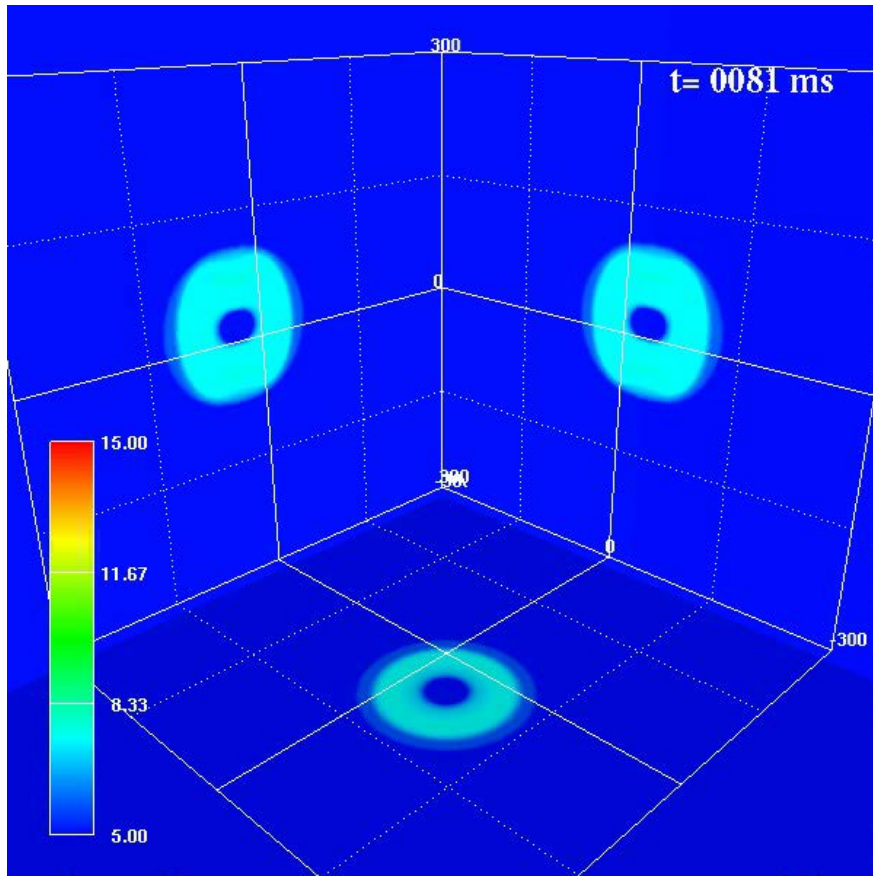


Rotational energy(T)/gravitational energy(W)
reach some criteria => Spiral mode arises

In the rigid ball: 14%

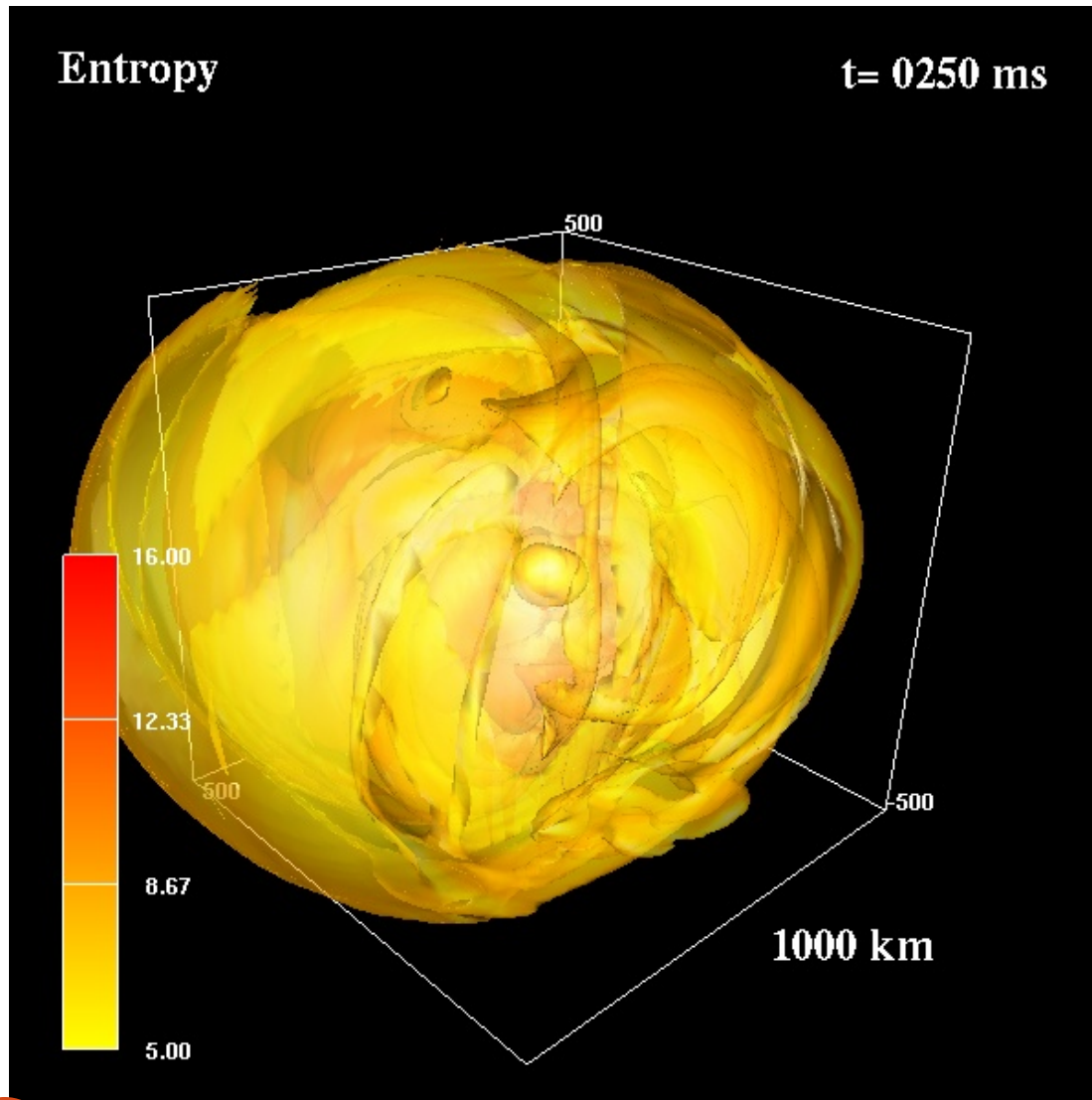
In SNe case: ~ 6% (Called low-T/W instability)

Rotation



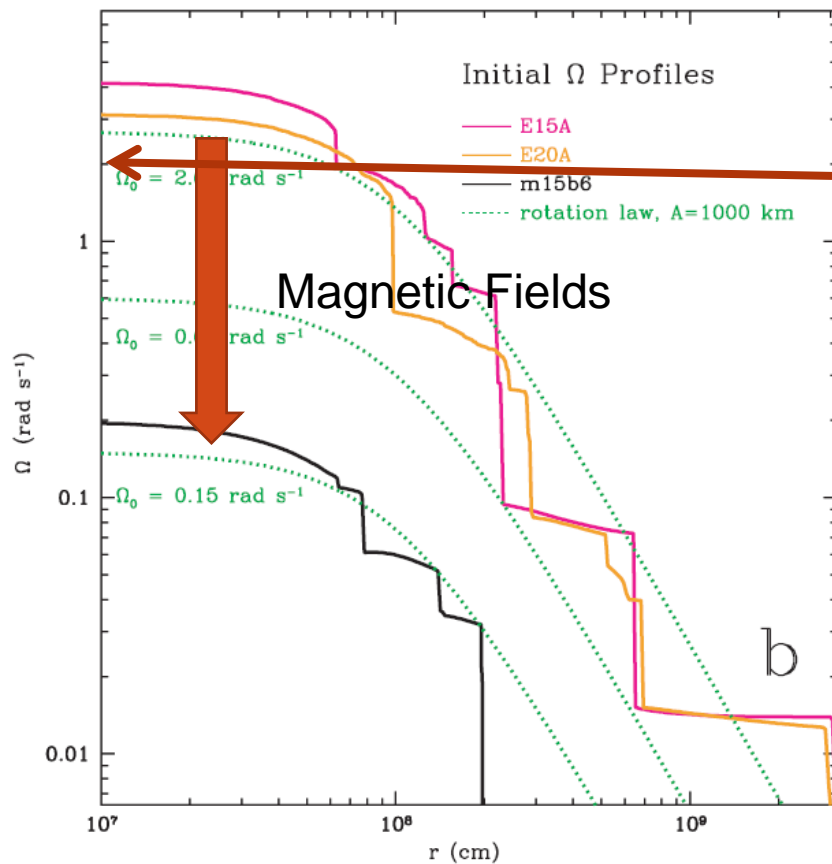
Spiral wave transfer the energy to the outer region.
Finally explosion is found!

Rotation



Strong expansion is found at equatorial plane

Rotation rate before the collapse



Ott+ 2006

Our model of rapid rotation

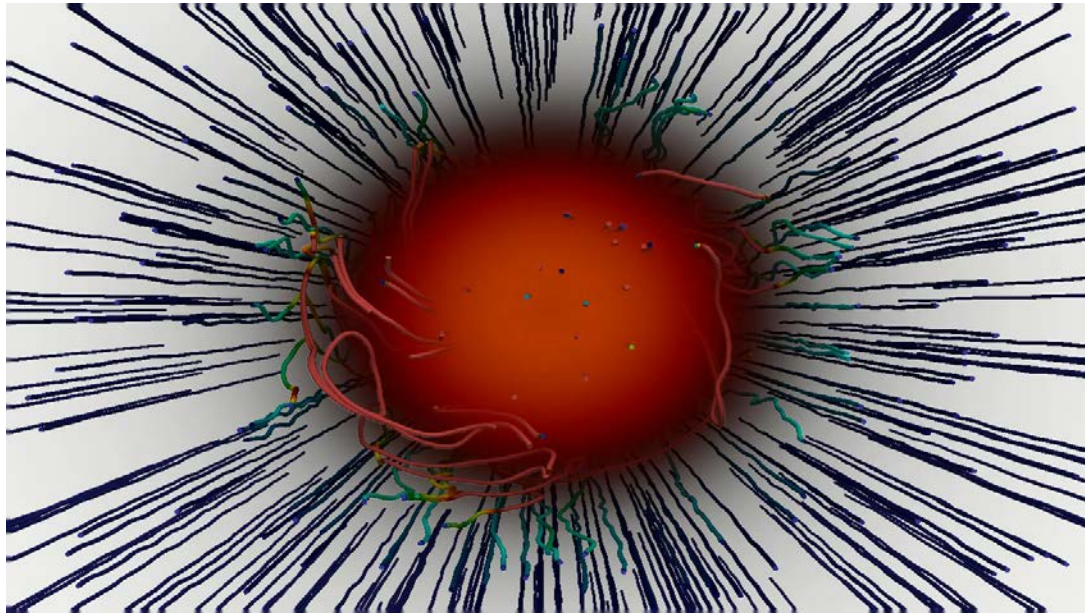
親星の進化計算で磁場をいれると、
回転速度は非常に下がる。
超新星コアは速く自転してはいけない。

議論：

この磁場の入れ方には不定性がある。
中性子星の観測を説明するために、
現象論的にいれている。

もし、角運動量を捨てるプロセスがあれば、速く回っていてもよい。

ニュートリノ + 磁場



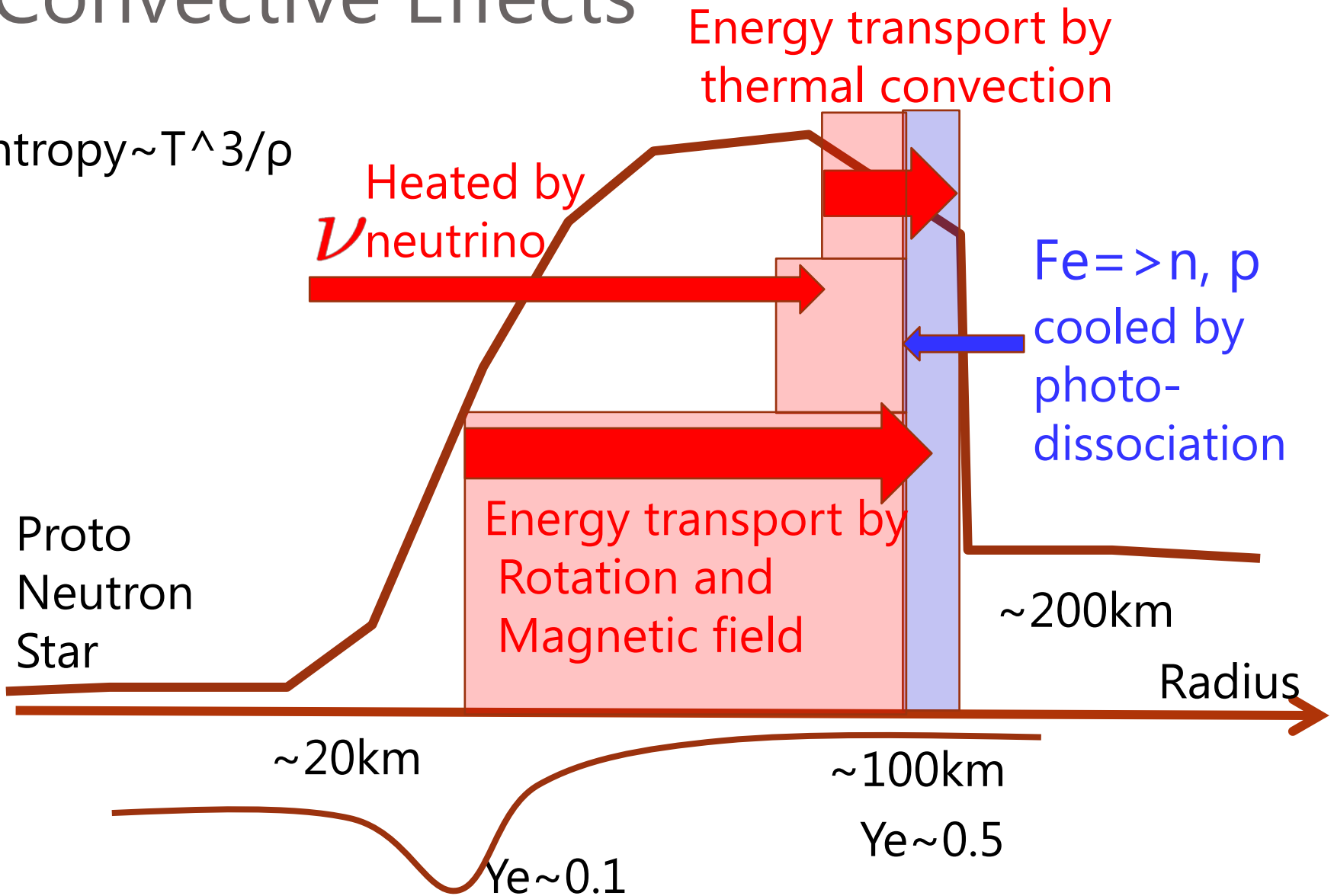
磁気回転不安定性で
対流安定な場所でも
乱流的になる。

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。

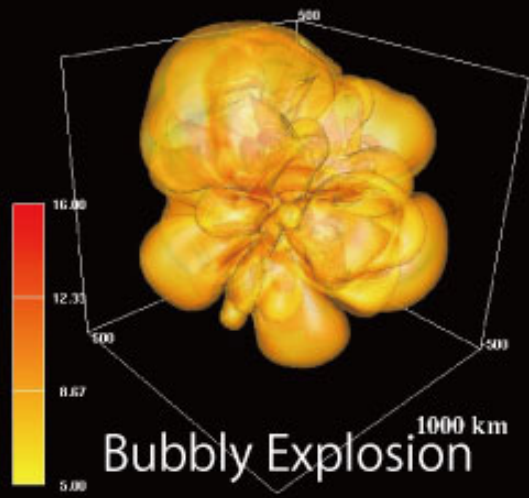
高解像度計算が必要
すぐに完全な計算はできない
徐々に調べる

Convective Effects

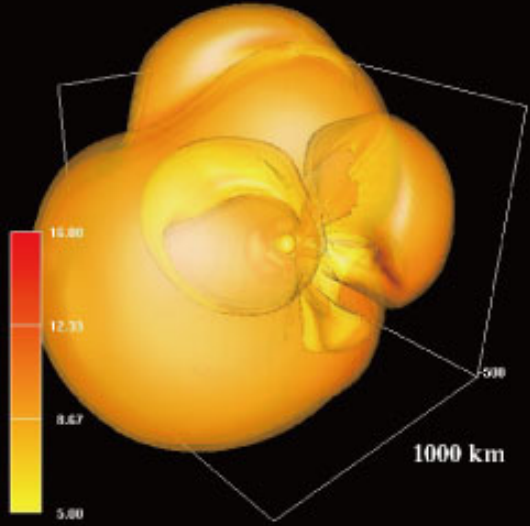
Entropy $\sim T^3/\rho$



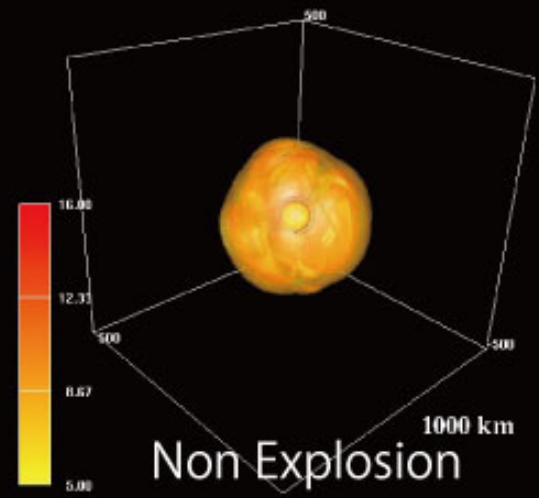
11.2 wo rotation $t = 0220$ ms



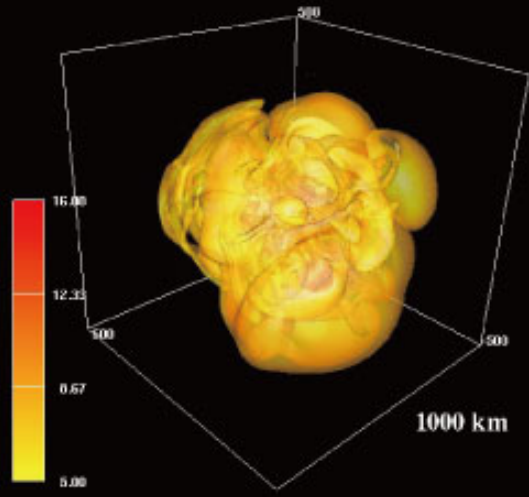
13.0 wo rotation $t = 0270$ ms



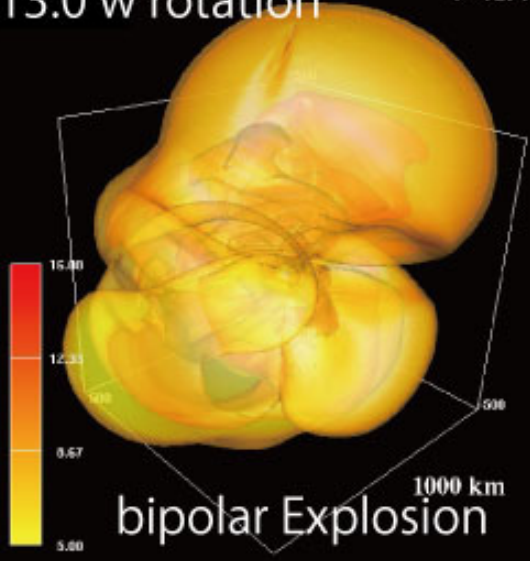
27.0 wo rotation $t = 0250$ ms



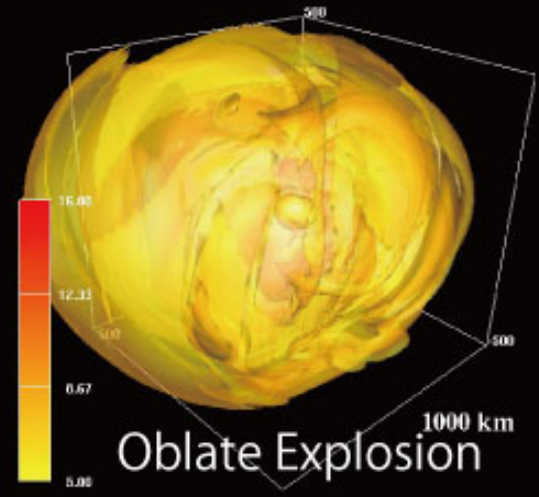
11.2 w rotation $t = 0200$ ms



13.0 w rotation $t = 0290$ ms



27.0 w rotation $t = 0250$ ms



プラン

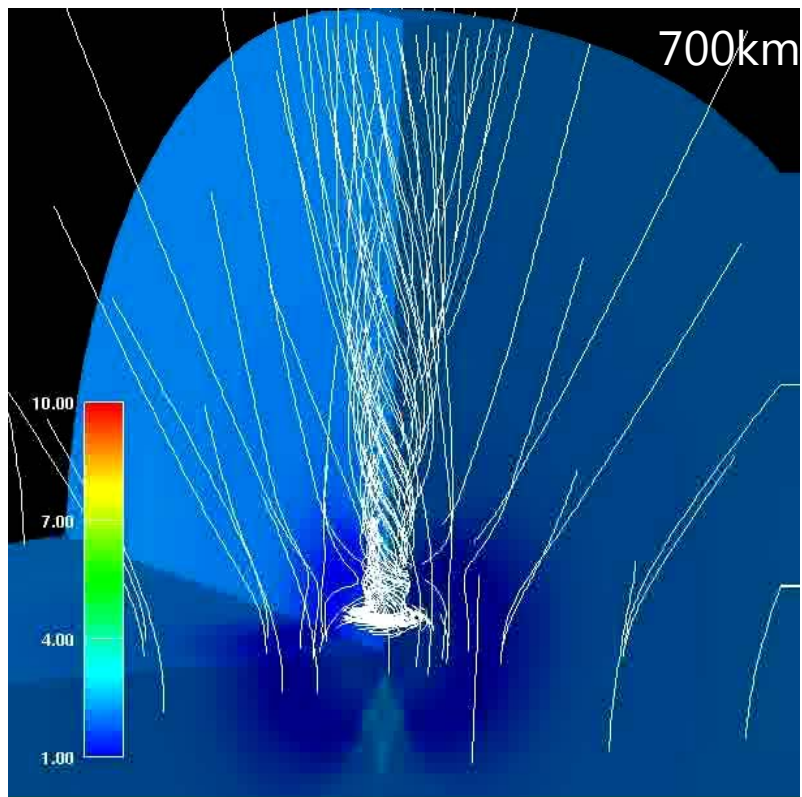
起：超新星とは何か、問題

承：ニュートリノ加熱機構の詳細

転：それ以外の爆発メカニズム
自転と磁場

結：まとめと他の研究とのつながり

Magneto-driven Explosion



Jet & wound magnetic line
(entropy contour)

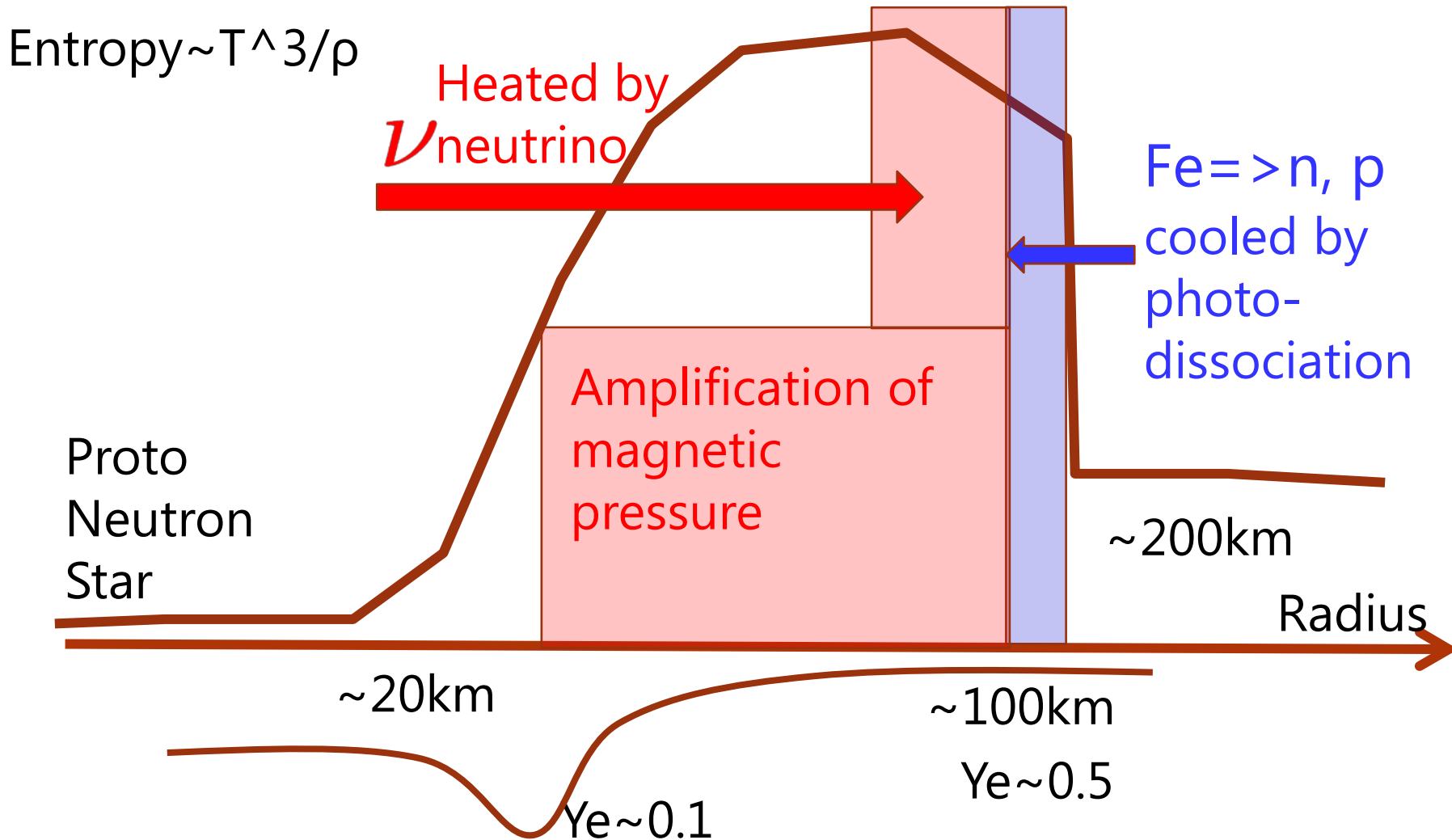
- 磁場をねじって強力なバネを極付近に作る。
- バネが外側の圧力を跳ね返して爆発！

sn2006aj:

jet状の爆発をして中性子星を残している(ことが測光から示唆)。

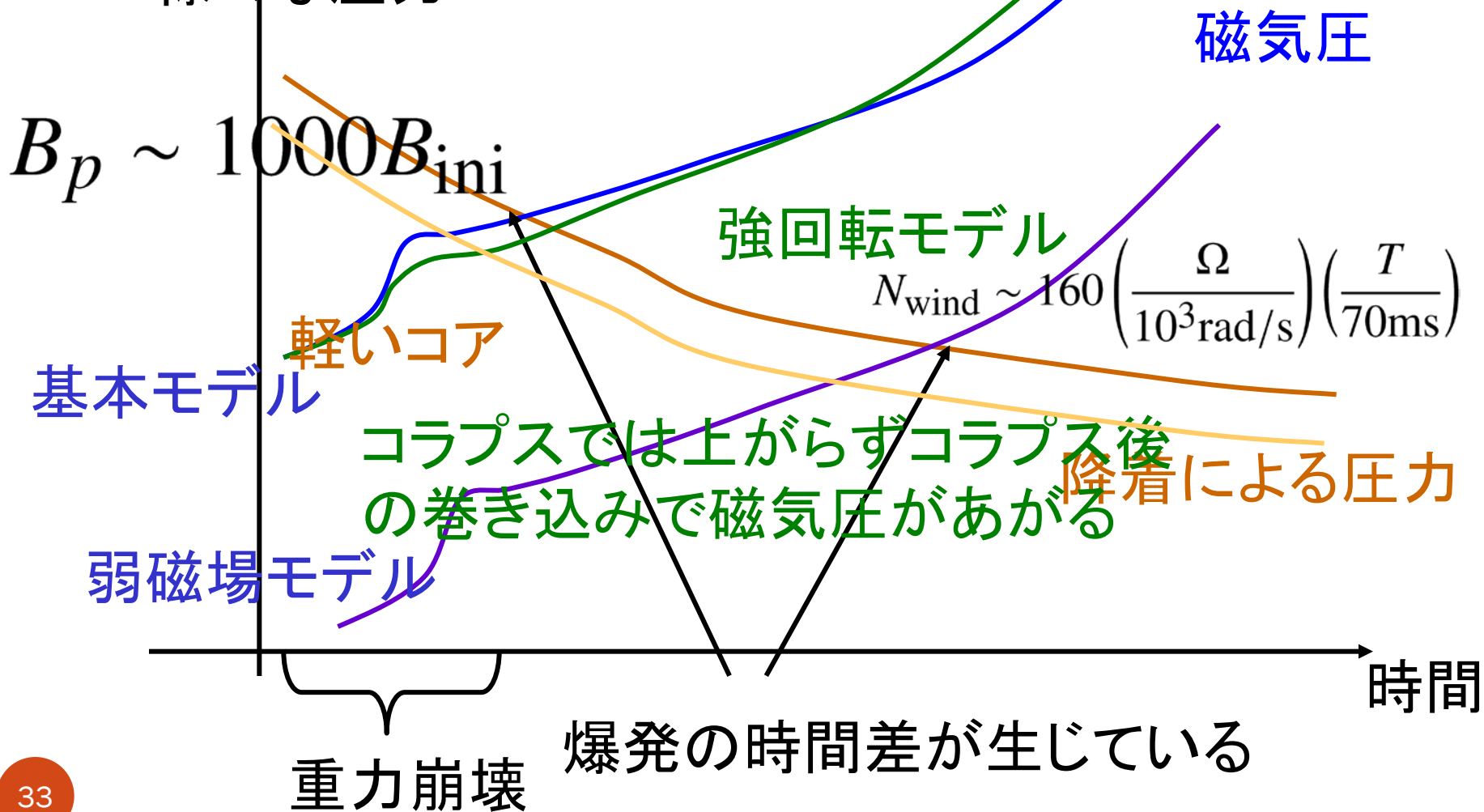
磁気爆発か？

Winding Effects



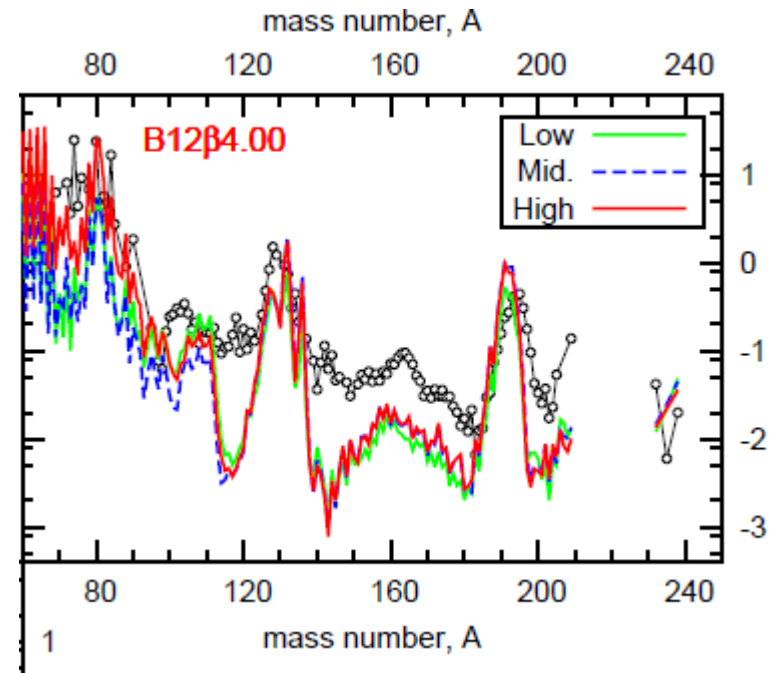
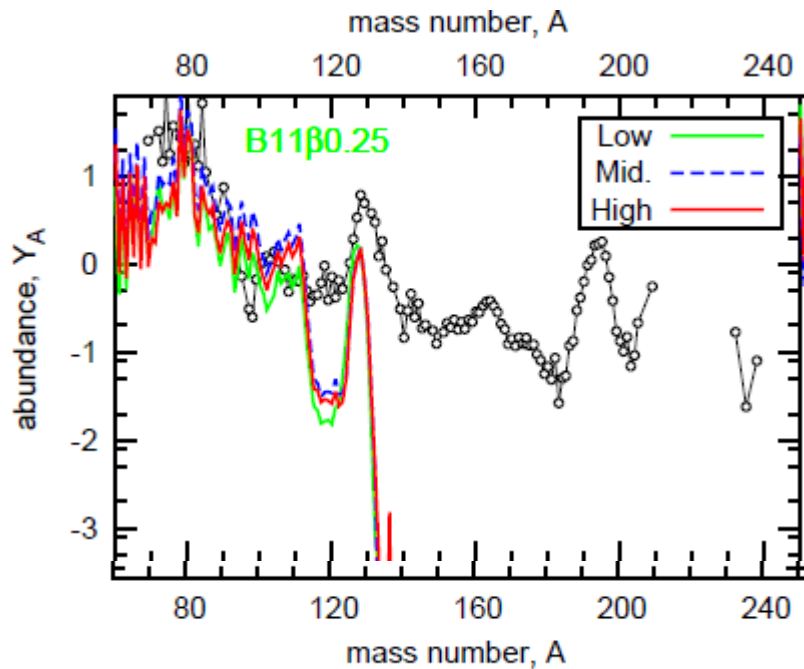
降着に抑えられた爆発

様々な圧力



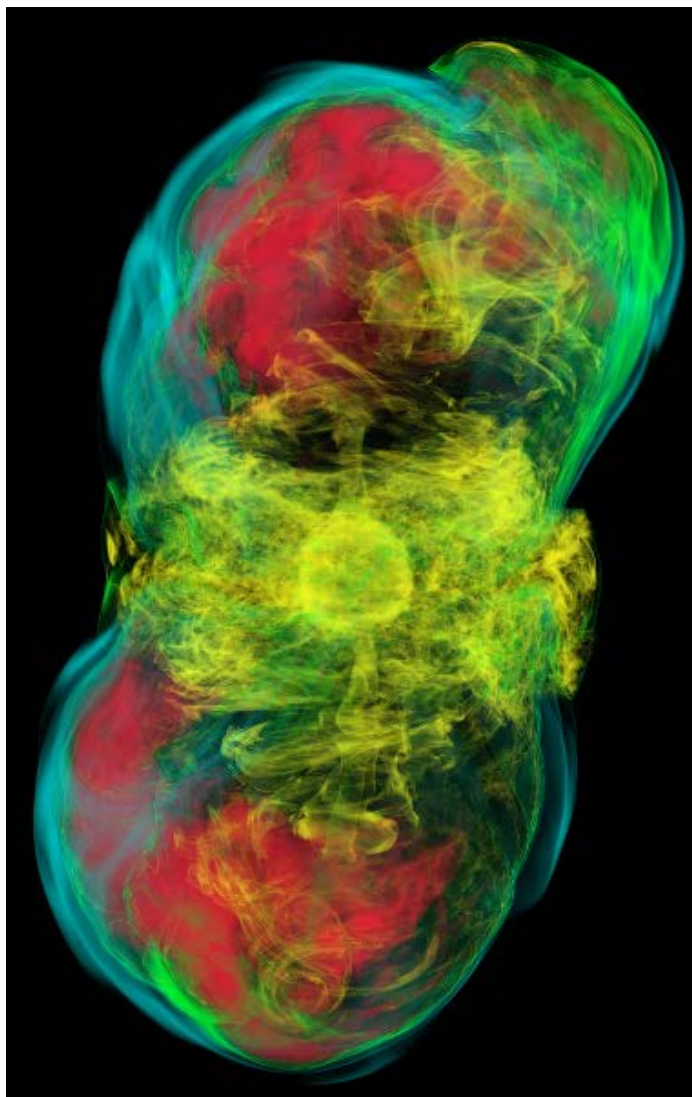
R-process

Nishimura+ in prep



爆発の仕方によってできるr-processエレメントも異なる。

磁場モデルの問題点



- 初期磁場はOK？
- 3次元だとジェットが弱くなる？
- ジェットのあとニュートリノで爆発するのか？

基本的なシナリオにも不定性あり。

プラン

起：超新星とは何か、問題

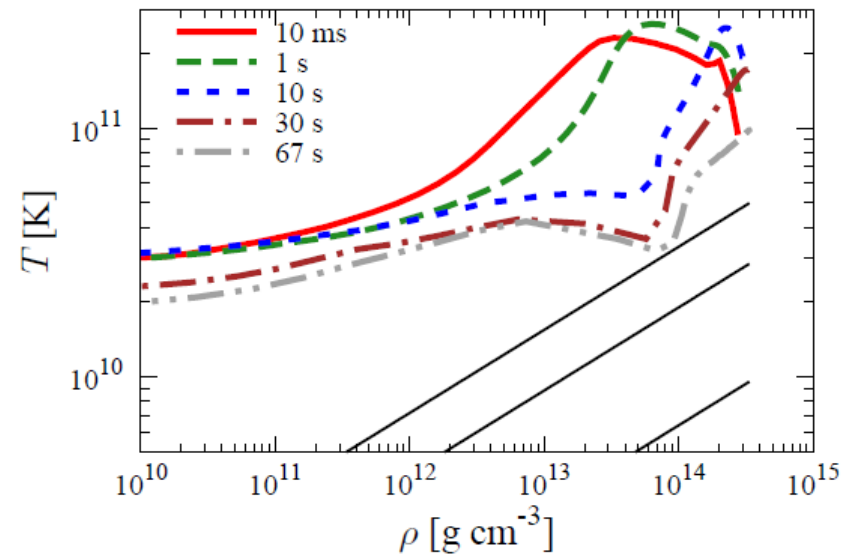
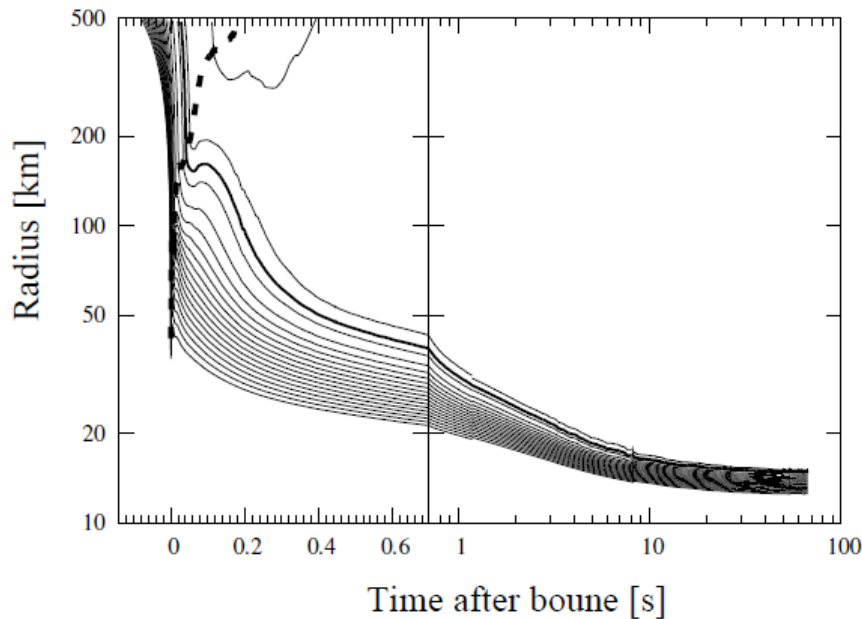
承：ニュートリノ加熱機構の詳細

転：それ以外の爆発メカニズム

結：まとめと他の研究とのつながり

From Supernovae to Neutron star

Suwa 2014



爆発モデルの原始中性子星から、クラストができるまでの冷却、収縮過程を追うことができるようになった！

3次元の自転・磁場分布を追うのは不可能だが、何らかの示唆は提供可能？

Summary

- ニュートリノ加熱メカニズム
=> 成功まであと一歩
=> 手法の更新
- 自転
=> 赤道方向に爆発
=> 初期自転は？
- 磁場
=> 極方向に爆発
=> 3次元、ニュートリノ？
- 中性子星への長時間計算
熱進化はOK、自転磁場はもう一歩