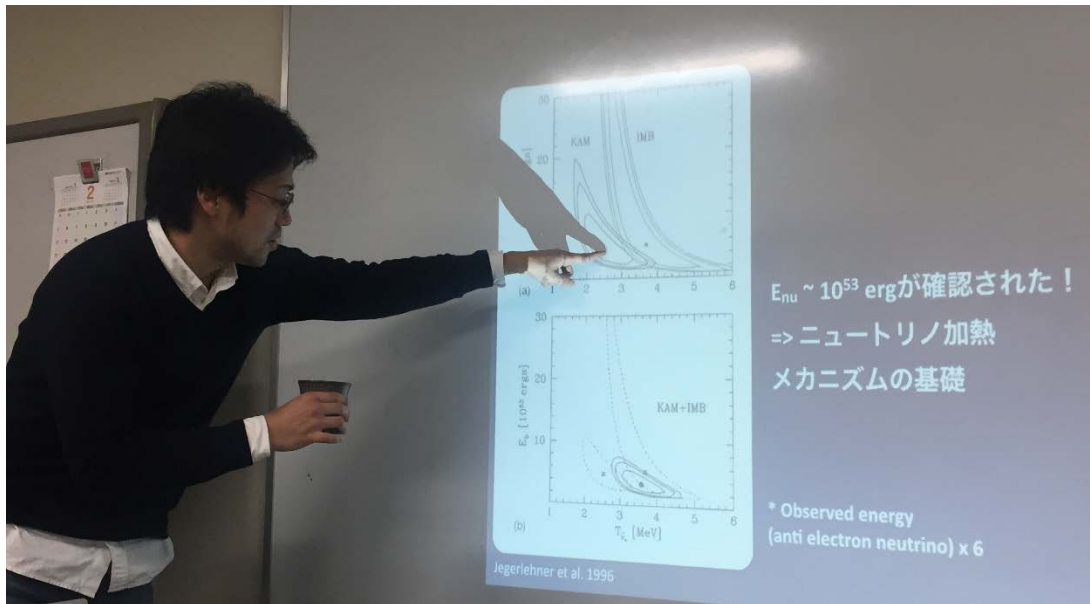


# 超新星シミュレーション



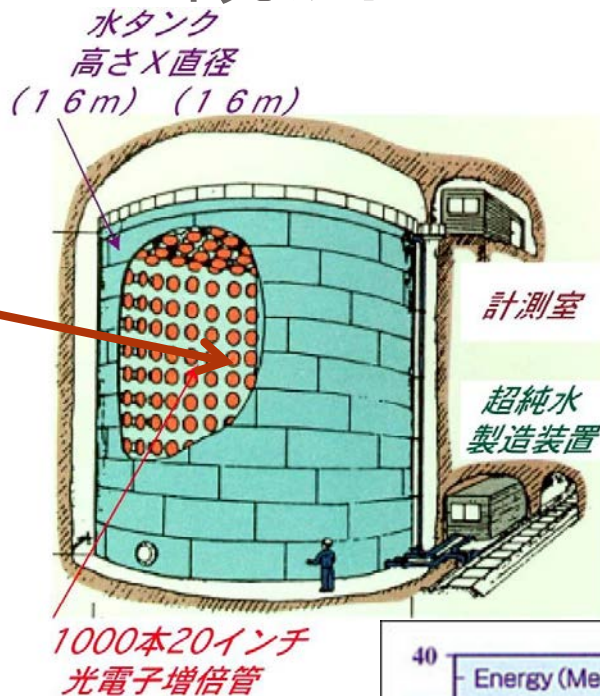
滝脇知也  
(国立天文台)

# 1987Aから30周年！



2017/02/23  
国立天文台理論部で  
超新星1987Aから  
30周年を祝った。

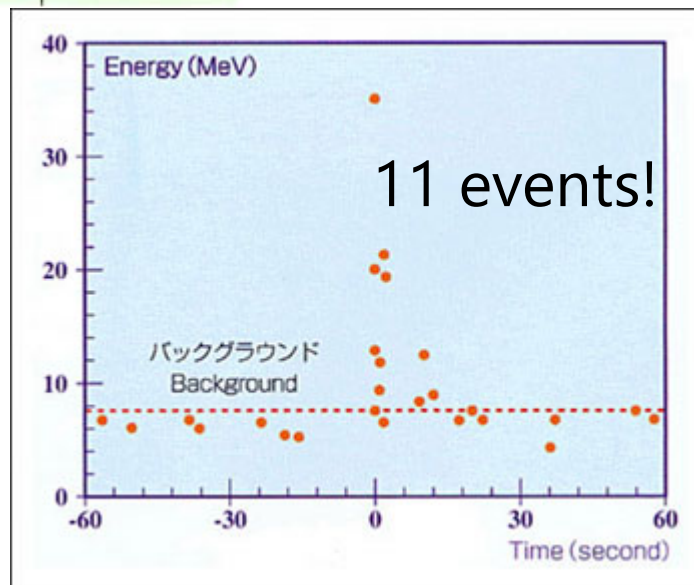
# SN1987aの観測



小柴名誉教授、  
2002年にノーベル賞を受賞



大マゼラン雲  
(となりの銀河)  
で超新星爆発起こる！



# SN1987aで分かったこと

## 超新星1987aの三つの意義

1. 天文学:  $20M_{\odot}$ の青色超巨星が超新星を起こすことが分かった。
2. 物理学: 超新星爆発では  $\sim 10^5$  s,  $10^{53}$  erg,  $\sim 10$  MeVのニュートリノを放出することが分かった。
3. 天体物理学: 2のエネルギーは鉄コアが中性子星になるときに開放される重力エネルギーに等しく。中性子星の誕生が超新星をトリガーしていることがわかった。

e.g. Beacom+2013

では、もし次の超新星が我々の銀河でおきたら？

# 次の超新星で分かりたいこと

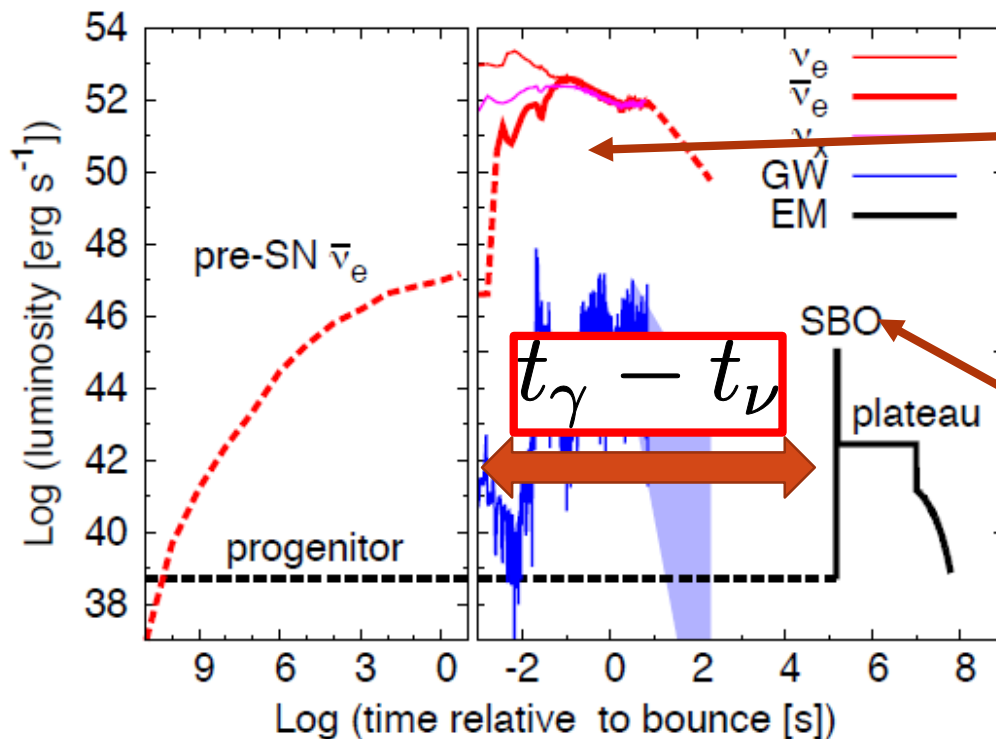
次の超新星が我々の銀河で起きたら何が分かる？

1. 天文学: どんな種類のどんな半径のどんなコアを持った親星が爆発したのか？
2. 物理学: 超新星爆発ではどんなスペクトラムのニュートリノがでるのか？どんなフレーバーのニュートリノがでるのか？
3. 天体物理学: 詳細な爆発メカニズム？ブラックホールが生成される様子？どんな元素が作られるのか？

# 次の超新星で分かりたいこと

次の超新星が我々の銀河で起きたら何が分かる？

1. 天文学: どんな種類のどんな半径のどんなコアを持った親星が爆発したのか？

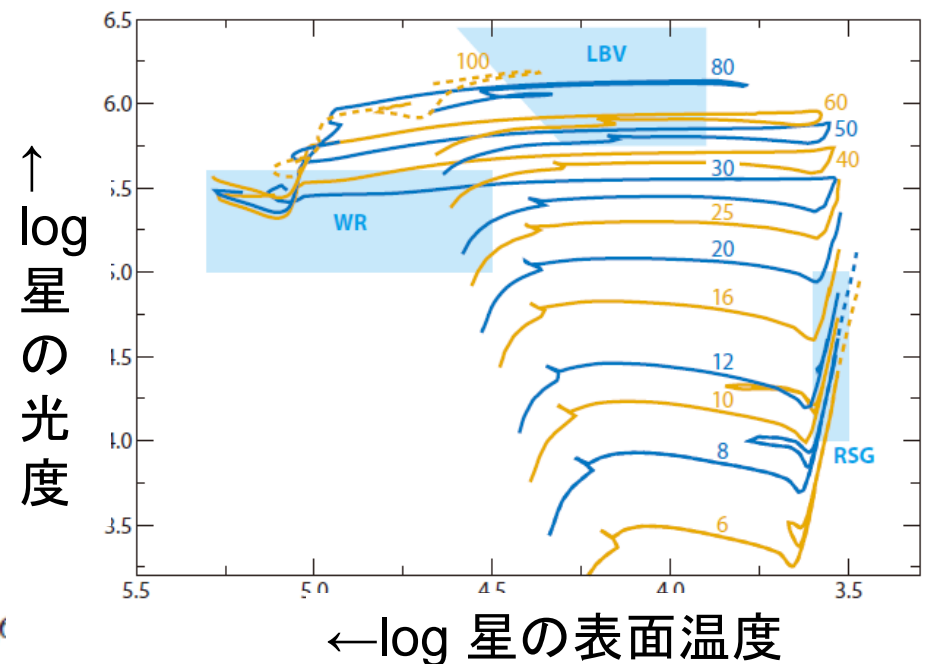
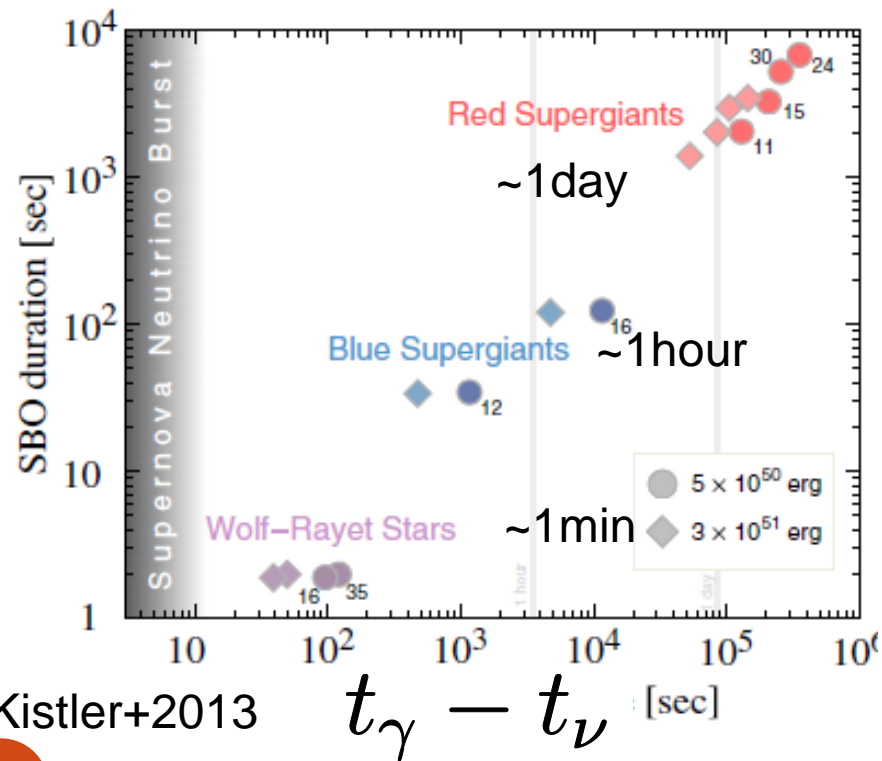


ニュートリノは透過性が強いので、爆発が開始された時刻そのものが分かる。  
爆発が広がって行って星の表面まで達すると光が見え始める。

# 次の超新星で分かりたいこと

次の超新星が我々の銀河で起きたら何が分かる？

1. 天文学: どんな種類のどんな半径のどんなコアを持った親星が爆発したのか？



Smartt+2009

# 次の超新星で分かりたいこと

次の超新星が我々の銀河で起きたら何が分かる？

2. 物理学：超新星爆発ではどんなスペクトラムのニュートリノがでるのか？どんなフレーバーのニュートリノがでるのか？

たぶん、この新学術で一番ちゃんとやらないといけないこと

超新星モデリング : 滝脇、中村さん、中里さん、佐藤さん

ニュートリノ放出過程 : 滝脇、中里さん、吉田さん、加藤さん、  
藤本(空)さん、

ニュートリノ輻射輸送 : 滝脇、中里さん

ニュートリノ振動 : 鈴木さん、財前さん、藤井さん

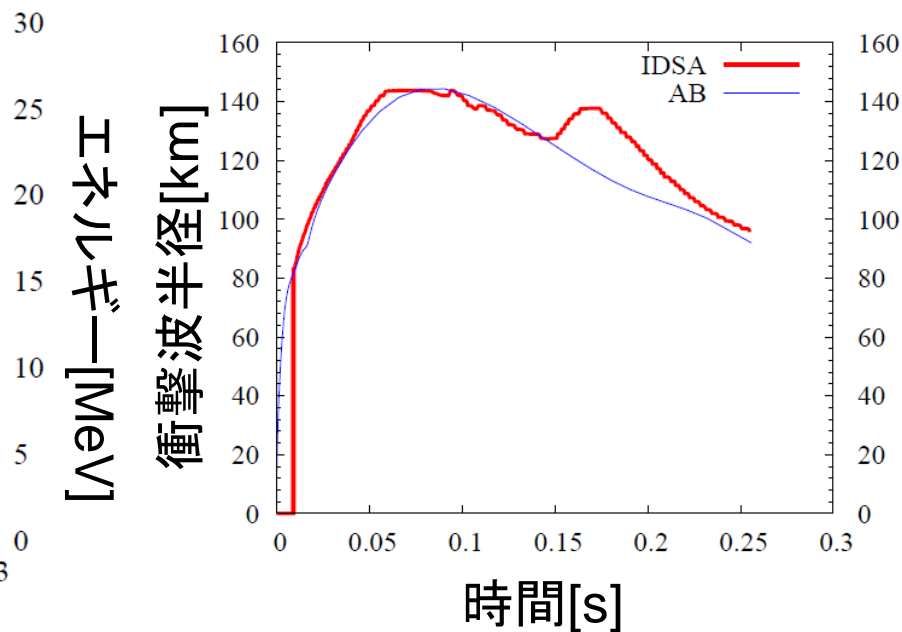
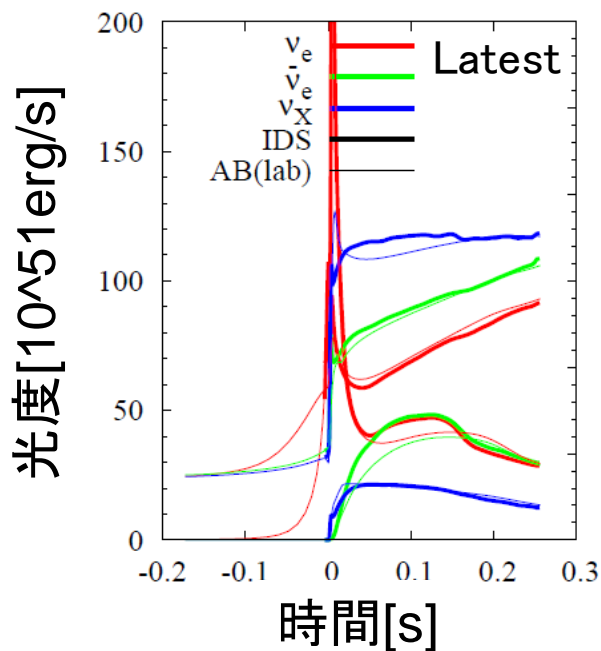
本研究会でも多くの人が発表



# ニュートリノ放射輸送スキームの発展

	Takiwaki+2012	Takiwaki+2014	Sotani+2016	Latest
重力	Newtonian	Newtonian	Newtonian	Approximate GR
$\nu_e$	Original IDSA	Flux-IDSA	Flux-IDSA	Flux-IDSA
$\bar{\nu}_e$	Original IDSA	Flux-IDSA	Flux-IDSA	Flux-IDSA
$\nu_X$	なし	Leakage	Flux-IDSA	Advanced-Flux-IDSA
反応率	最低限	最低限	標準	標準

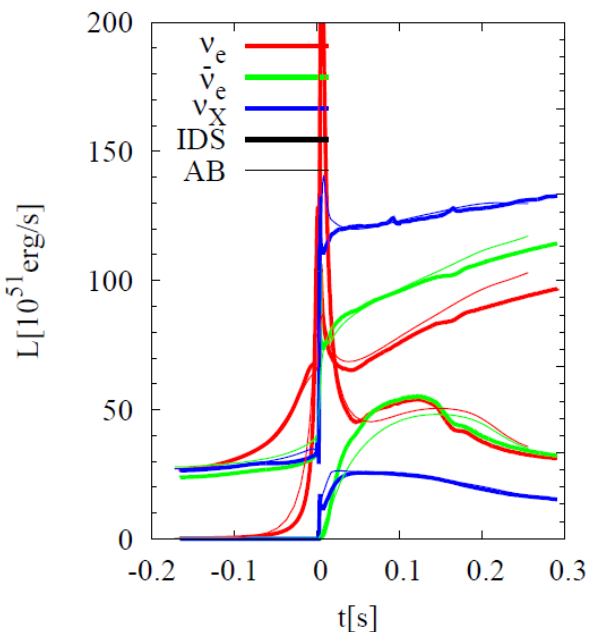
~中里さんの



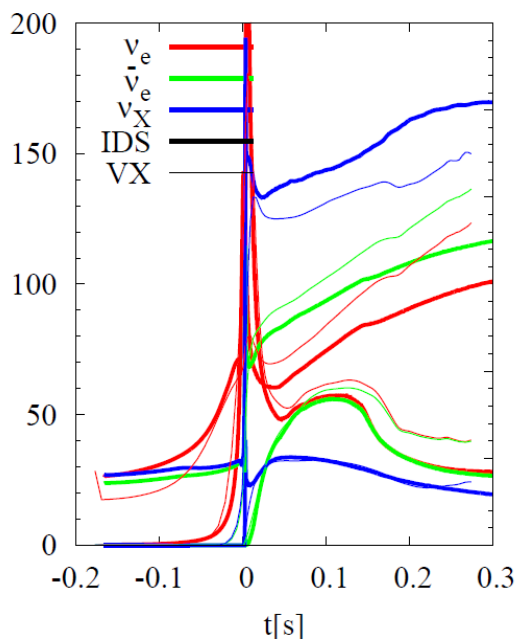
Latestは  
第一原理計算  
のGRモデルに  
驚くほどの  
一致！！

計算コストは  
1/200ぐらい。

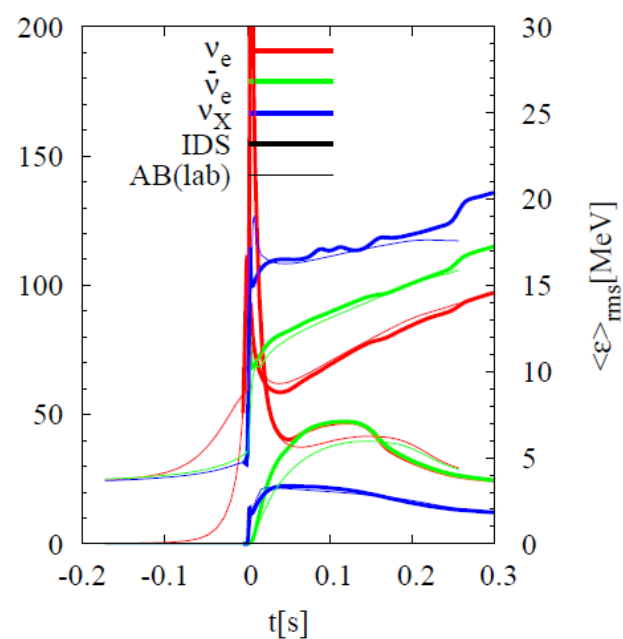
# Approximate GR



Newtonian  
 実はABは  
 comoving  
 IDSAはlab



GR効果を近似的  
 に流体にいれた  
 光度増、Xはエネ  
 ルギーが上がる



GR効果を近似的に  
 流体と輻射(ニュートリノ)  
 にいれた

ポジティブ効果とネガティブ効果、両方いれないと合っていると勘違い  
 メソッドの違うものの比較はcarefulに!

# 輻射の方程式へのApproximate GRの入れ方

$$\alpha = 1 + \phi/c^2 \quad \text{重力レッドシフトの効果}$$

Takiwaki 2014のfree streaming partの方程式

$$\frac{\partial \mathcal{E}^s}{c \partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \alpha r^2 \mathcal{F}^s = \mathcal{S}[j, \chi, \Sigma] - \alpha \mathcal{F}^s \frac{\partial \phi / c^2}{\partial r},$$

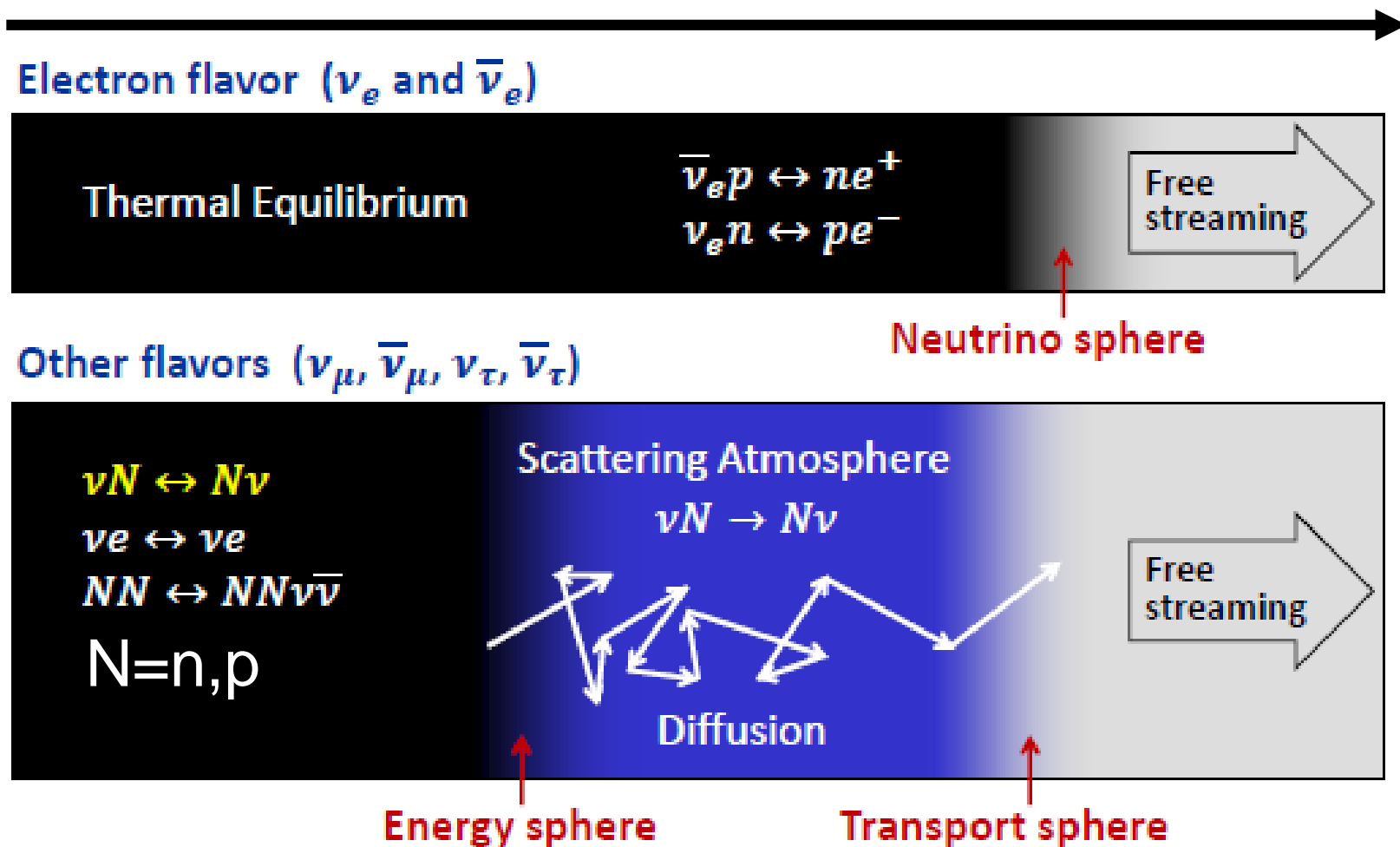
$$\mathcal{E}^s \equiv \frac{1}{2} \int d\mu f^s \quad \mathcal{F}^s \equiv \frac{1}{2} \int \mu d\mu f^s \quad \mathcal{S} \equiv -\alpha(j + \chi) \mathcal{E}^s + \Sigma$$

$$\Sigma = \min \left\{ \max \left[ \alpha_{\text{dif}} + \alpha(j + \chi) \mathcal{E}^s \right], \alpha j \omega^3 C \right\}$$

$$\alpha_{\text{dif}} = \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial}{\partial r} \frac{\alpha r^2}{j + \chi + \phi} \frac{\partial \mathcal{E}^t}{\partial r} \right)$$

# ニュートリノの放出、輸送

半径



# Neutrino Nucleon散乱の断面積

特に重要な以下の反応の取り扱いには慎重にしないといけない。

$$\nu_e + n \leftrightarrow e^- + p$$

$$\bar{\nu}_e + p \leftrightarrow e^+ + n$$

$$\nu + N \leftrightarrow \nu + N \quad (N = n, p)$$

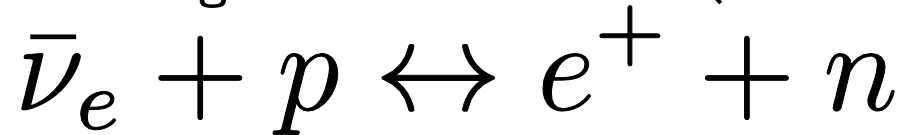
1. Weak magnetism and recoil (Horowitz 2002)
2. Inelastic scattering (Burrows & Sawyer 1998)
3. Strange Quark Correction (Melson+2016)
4. Many body effect (Horowitz 2017)

$$\frac{1}{V} \frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \frac{G_F^2 E_\nu^2}{16\pi^2} \left( [(g_a + g_a^s)^2 n_n + (g_a - g_a^s)^2 n_p] \right. \\ \left. (3 - \cos\theta) S_A + (1 + \cos\theta) n_n S_V \right) R(E_\nu/m)$$

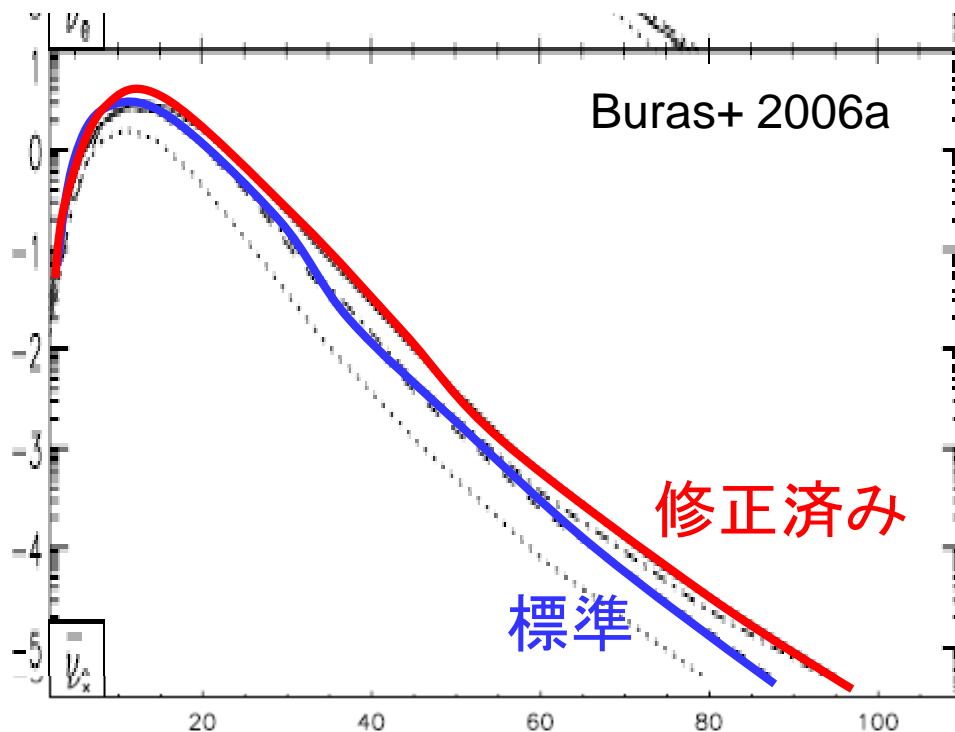
詳細は省くが、基本的に $\nu$ が外に出てきやすくなる。

# Neutrino Nucleon散乱の断面積

1. Weak magnetism and recoil (Horowitz 2002)



エネルギースペクトラム



$$\frac{1}{V} \frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \frac{G_F^2 E_\nu^2}{16\pi^2} \left( [(g_a + g_a^s)^2 n_n + (g_a - g_a^s)^2 n_p] \right. \\ \left. (3 - \cos\theta) S_A + (1 + \cos\theta) n_n S_V \right) R(E_\nu/m)$$

この効果で  
高エネルギーの  
反電子ニュートリノが  
出てきやすくなる。

# Neutrino Nucleon 散乱

1. Weak magnetism and recoil (Horowitz 2002)
2. Inelastic scattering (Burrows & Sawyer 1998)
3. Strange Quark Correction (Melson+2016)

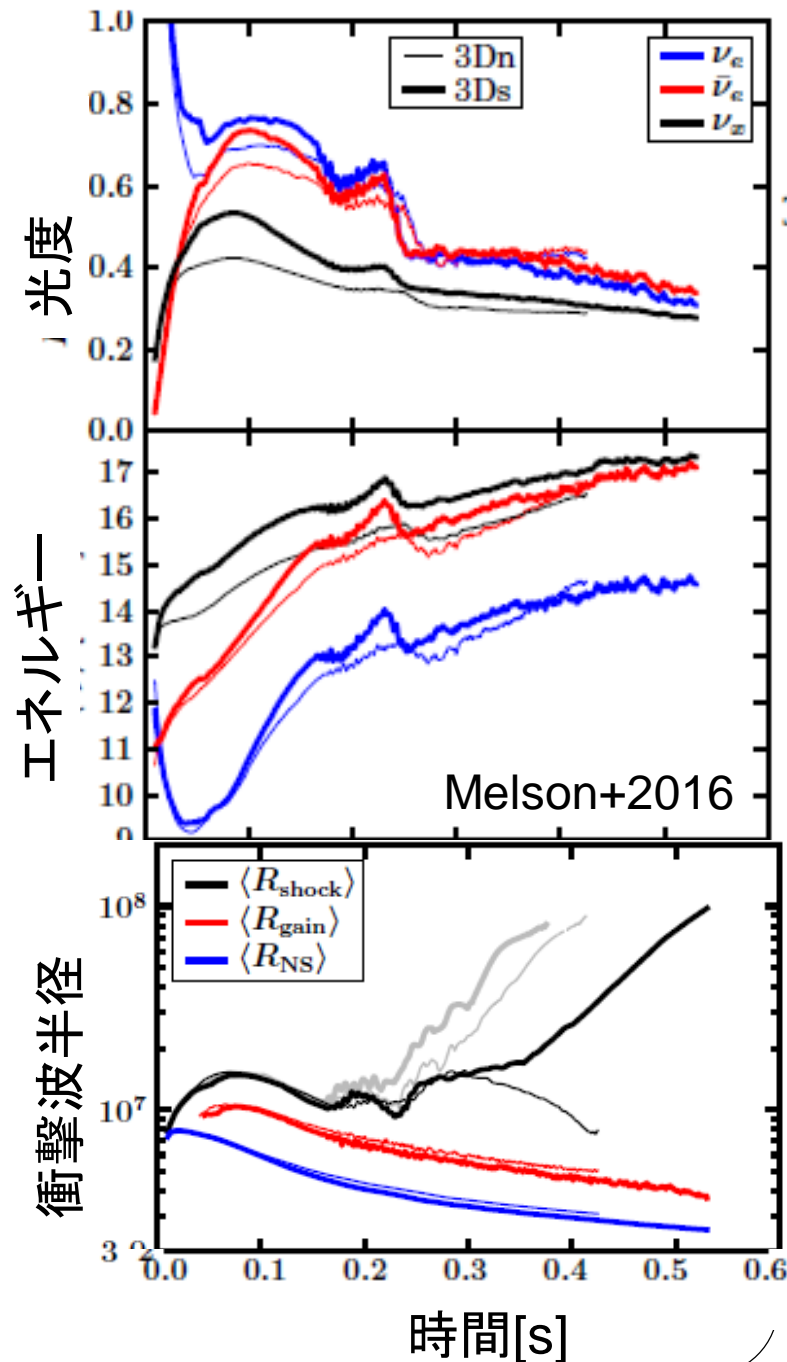


1,2の効果は標準で入っていて  
3の効果をon/off

onだと散乱断面積が減って  
ニュートリノが抜けやすくなる。

そのせいでニュートリノ加熱率が上  
がって爆発しやすくなる。

ただし、実験で許される上限ぎりぎ  
りの値を使っているという批判も。



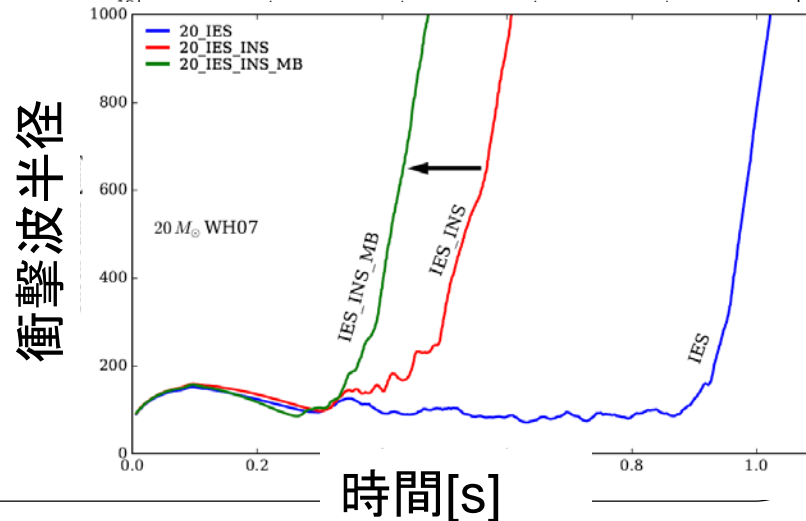
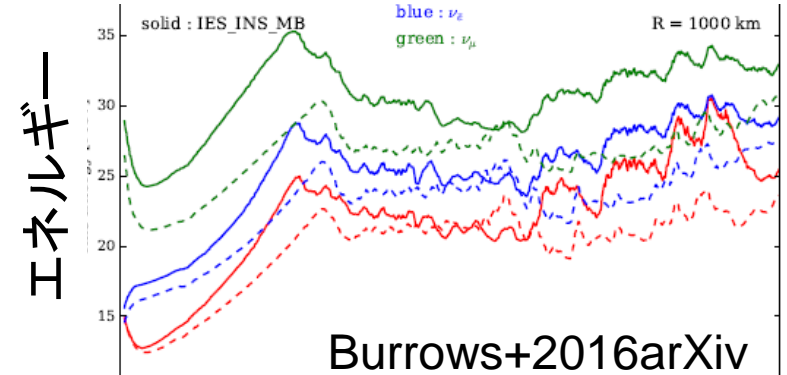
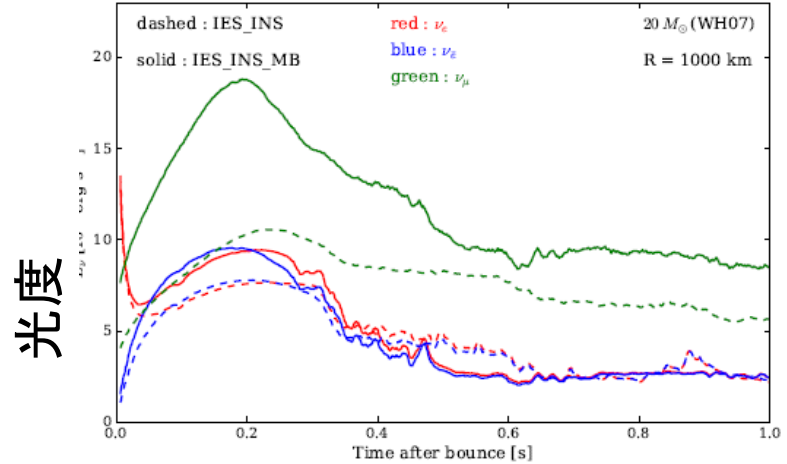
# Neutrino Nucleon散乱

1. Weak magnetism and recoil (Horowitz 2002)
2. Inelastic scattering (Burrows & Sawyer 1998)
4. Many body effect (Horowitz 2017)



1,2と1,2,4の比較。 $\nu_X$ の光度が2倍に！  
非常に影響を受ける(疑いのも?)。

やはり、ニュートリノ加熱率が上がって爆発しやすくなる。





# Neutrino Nucleon 散乱の断面積

## Correction

1. Phase space
2. Matrix element
  - a. recoil
  - b. weak magnetism
  - c. form factors
  - d. strange quarks
3. Pauli blocking
4. Fermi/thermal motion of initial nucleons
5. Coulomb interactions
6. Mean field effects
7. NN Correlations in RPA
8. NN Correlations beyond RPA
9. Meson exchange currents
10. Other components such as hyperons
11. Other phases such as meson condensates or quark matter
12. Corrections from superfluid/ superconductor pairing
13. Nonuniform matter
14. Magnetic field effects

Horowitz+2002

実は補正項がいっぱい。

今、最新の計算

(Horowitz+2017)では

1-7と部分的に8まで補正が入っている。

8についてはもう少し補正があるかもしれない。

観測の方の期待に応えるためには要努力。

来年は全部考慮した

モデルを見せられます！

# 次の超新星で分かりたいこと

次の超新星が我々の銀河で起きたら何が分かる？

3. 天体物理学：

(1) 詳細な爆発メカニズム？

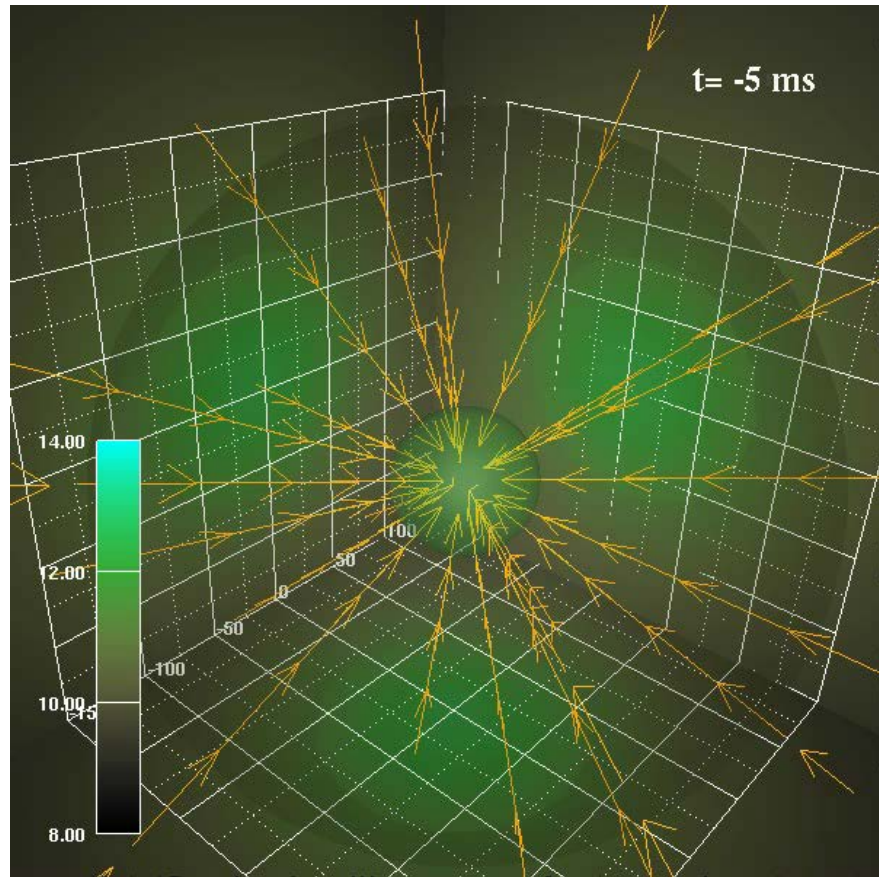
(3) ブラックホールが生成される様子？

<=中里さん

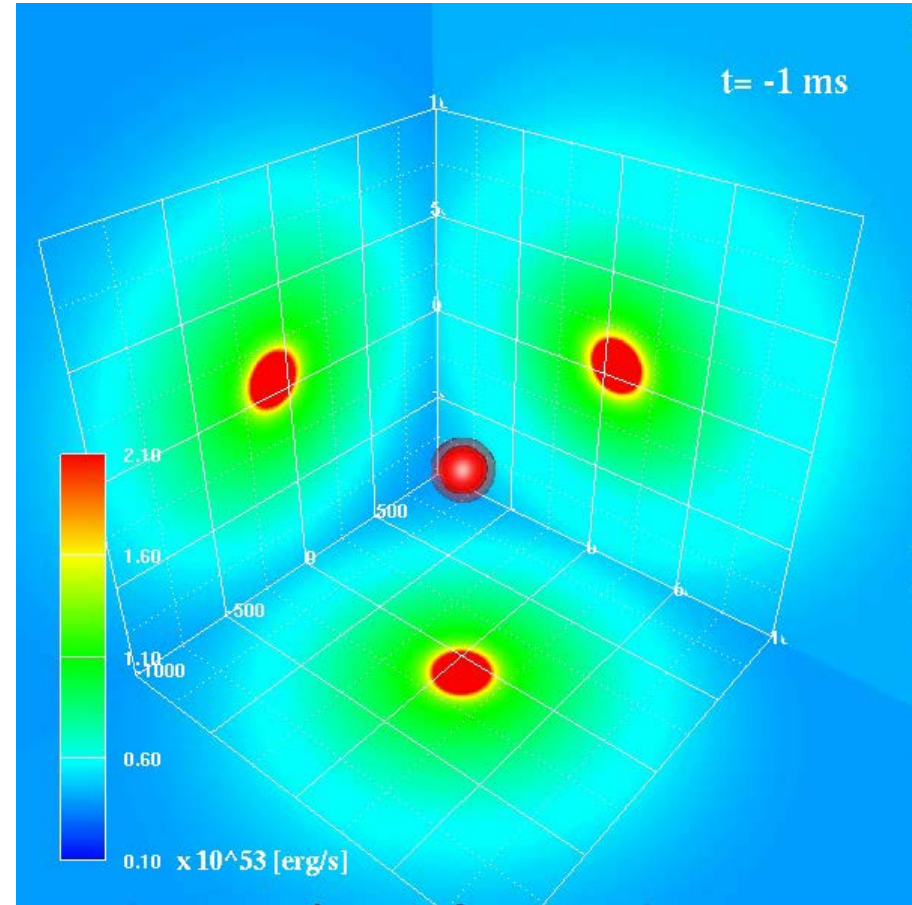
(4) どんな元素が作られるのか？

<=藤本(信)さん

# Birth of Proto-neutron star



Color: Density  
Vector: Velocity

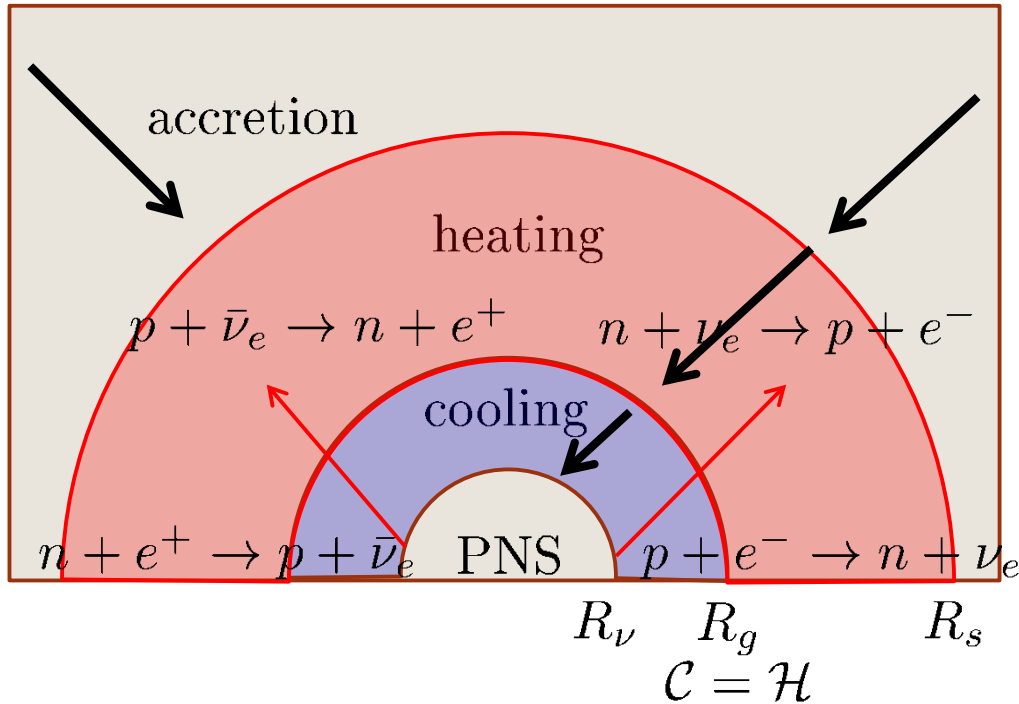


Color: Neutrino Flux

$$\Delta W \sim -10^{51} \frac{G(M/0.7M_{\odot})^2}{(R/10^8 \text{cm})} - \left( -10^{53} \frac{G(M/0.7M_{\odot})^2}{(R/10^6 \text{cm})} \right) [\text{erg}]$$

# Why Neutrino heating works

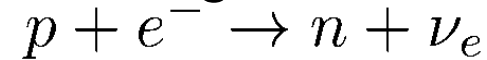
Janka 01



Cooling is proportional to  
6<sup>th</sup> power of **local temperature**

Heating is proportional to  
6<sup>th</sup> power of **central temperature**

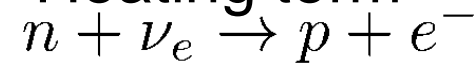
## -Cooling term



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

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

## -Heating term



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

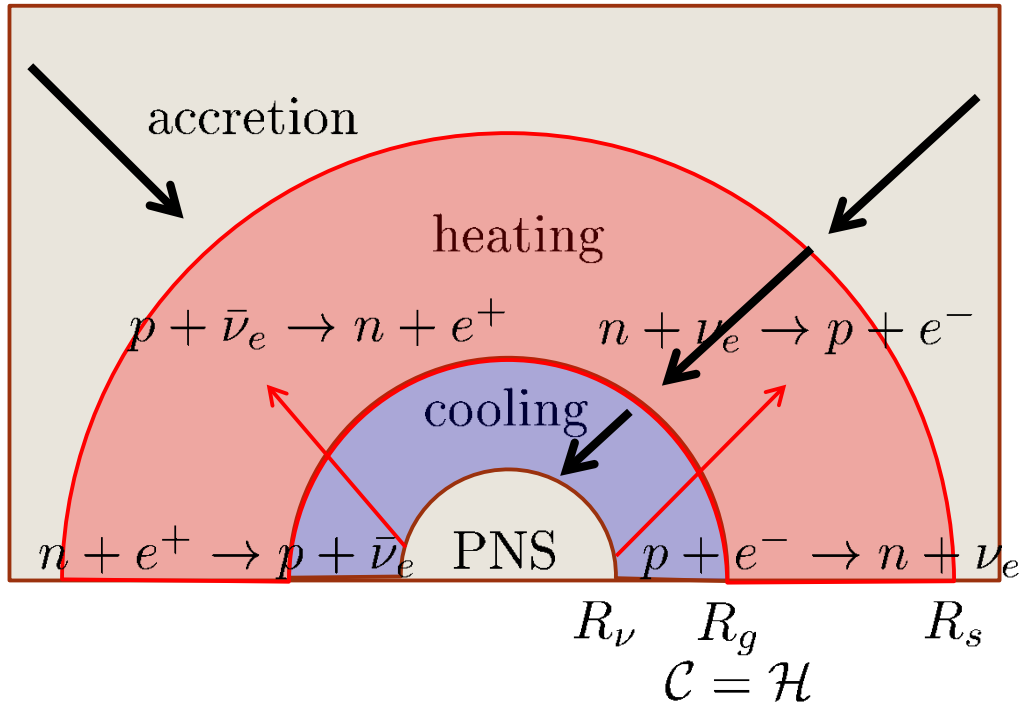
$$\rho_{\text{neutron}} \times \rho_{\text{neutrino}} (\propto T_\nu^3 / r^2) \times \sigma (\propto T_\nu^2) \times \bar{E} (\propto T_\nu)$$

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

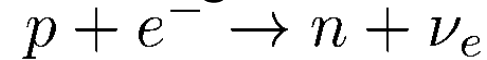
$$\mathcal{H} \propto 1/r^2$$

# Order Estimation

Janka 01

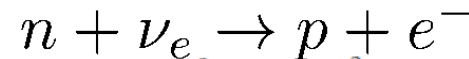


-Cooling term



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

-Heating term



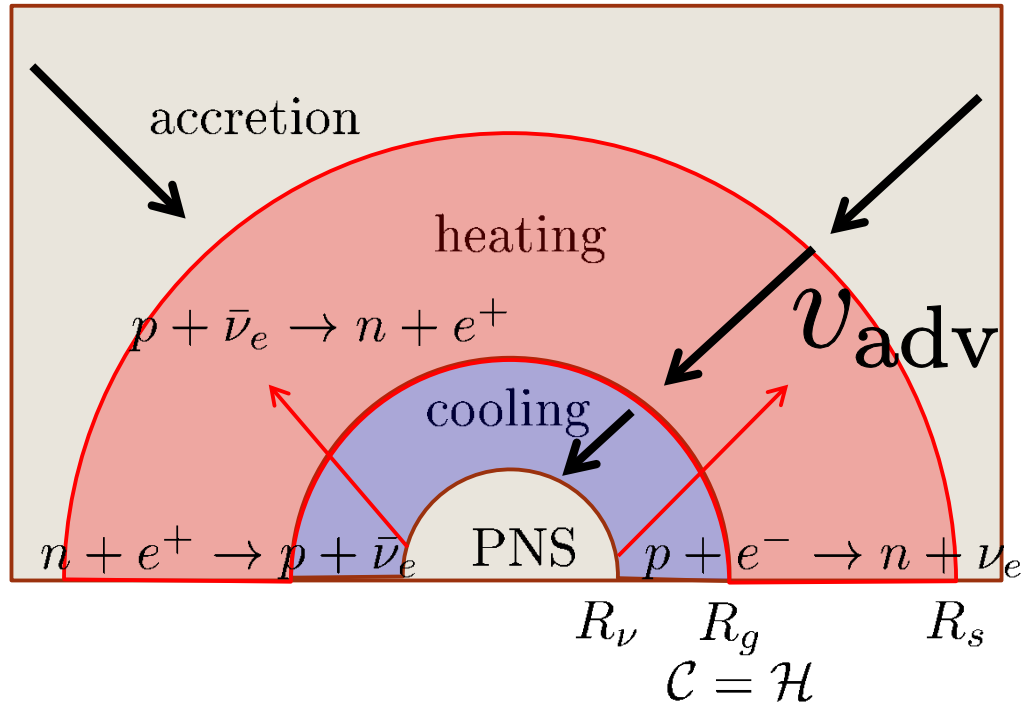
$$Q_\nu^+ = \frac{3\alpha^2 + 1}{4} \frac{\sigma_0 \langle \epsilon_{\nu_e}^2 \rangle}{(m_e c^2)^2} \frac{\rho}{m_u} \frac{L_{\nu_e}}{4\pi r^2 \langle \mu_\nu \rangle} (Y_n + 2Y_p) \\ \approx 160 \frac{\rho}{m_u} \frac{L_{\nu_e, 52}}{r_7^2 \langle \mu_\nu \rangle} \left( \frac{kT_{\nu_e}}{4 \text{ MeV}}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

(加熱率-冷却率)\*時間-重力束縛エネルギー

$$(Q_\nu^+ - Q_\nu^-) \Delta t - \frac{GM_{\text{PNS}}}{rm_u} = (160 - 145) [\text{MeV/s}] \Delta t - 20 [\text{MeV}]$$

$\Delta t \sim 1\text{s}$  で重力束縛エネルギーを振り切れるほど加熱される!

# Two time scales



$$(Q_\nu^+ - Q_\nu^-) \tau_{\text{heat}} - \frac{GM_{\text{PNS}}}{r m_u} > 0$$

$$\frac{R_s - R_g}{v_{\text{adv}}} = \tau_{\text{adv}}$$

$\tau_{\text{adv}} > \tau_{\text{heat}}$  indicates Explosion.

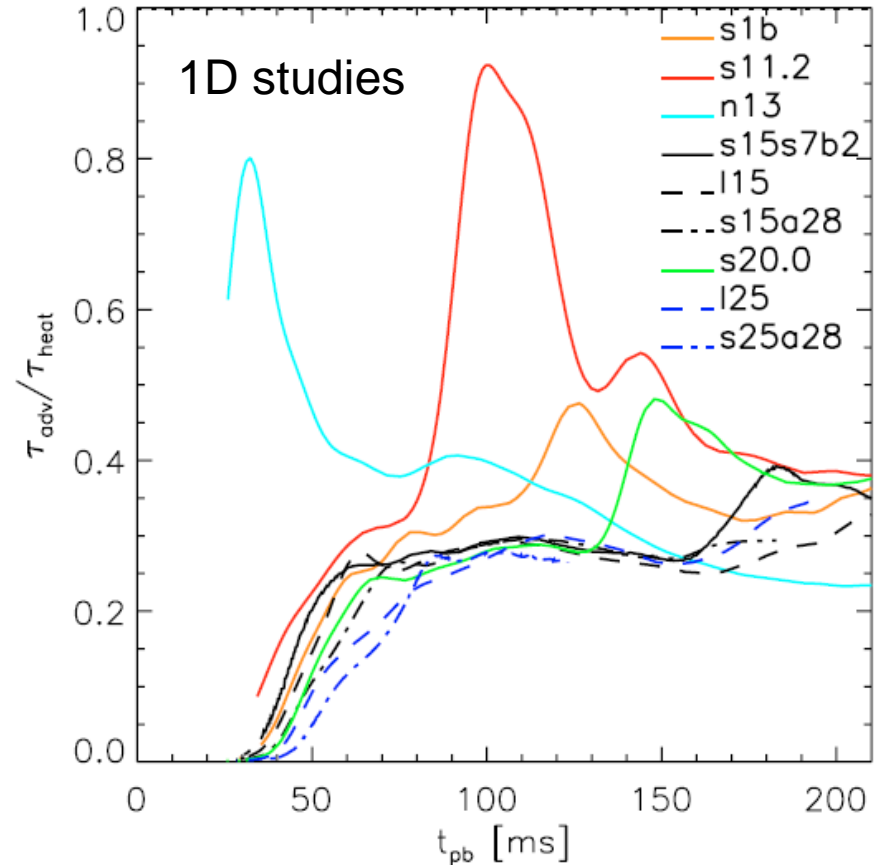
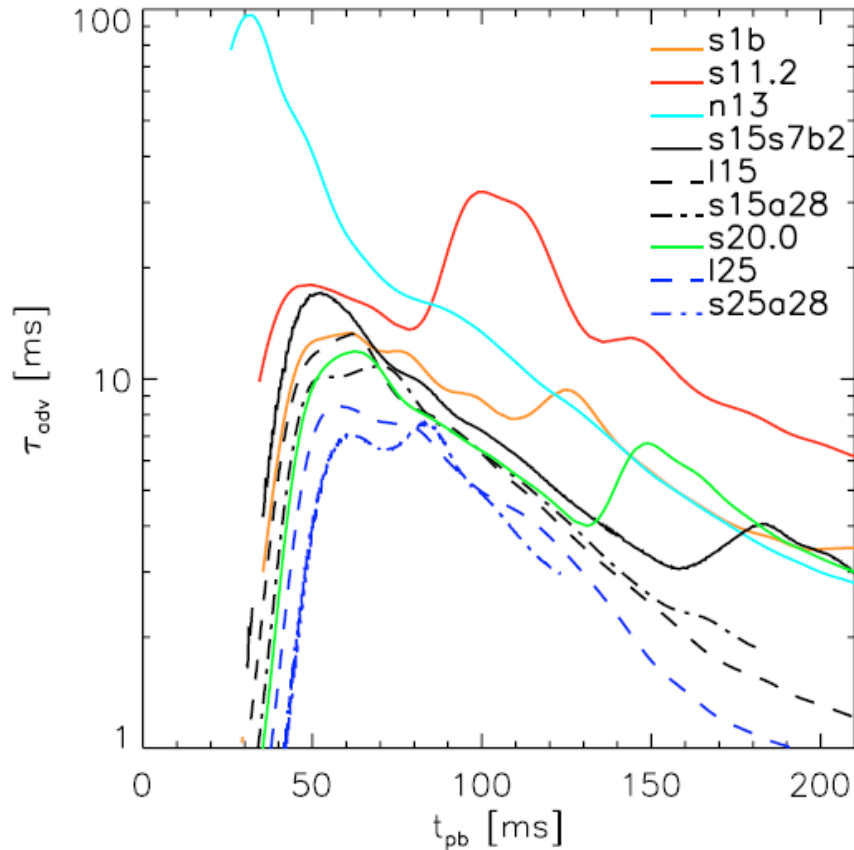
In realistic situations,  $\tau_{\text{adv}} \sim \tau_{\text{heat}} = 10\text{--}100$  ms

To judge whether shock revival happen or not,  
numerical simulations are necessary.

# Typical 1D simulation

# Two time scales

Buras+06



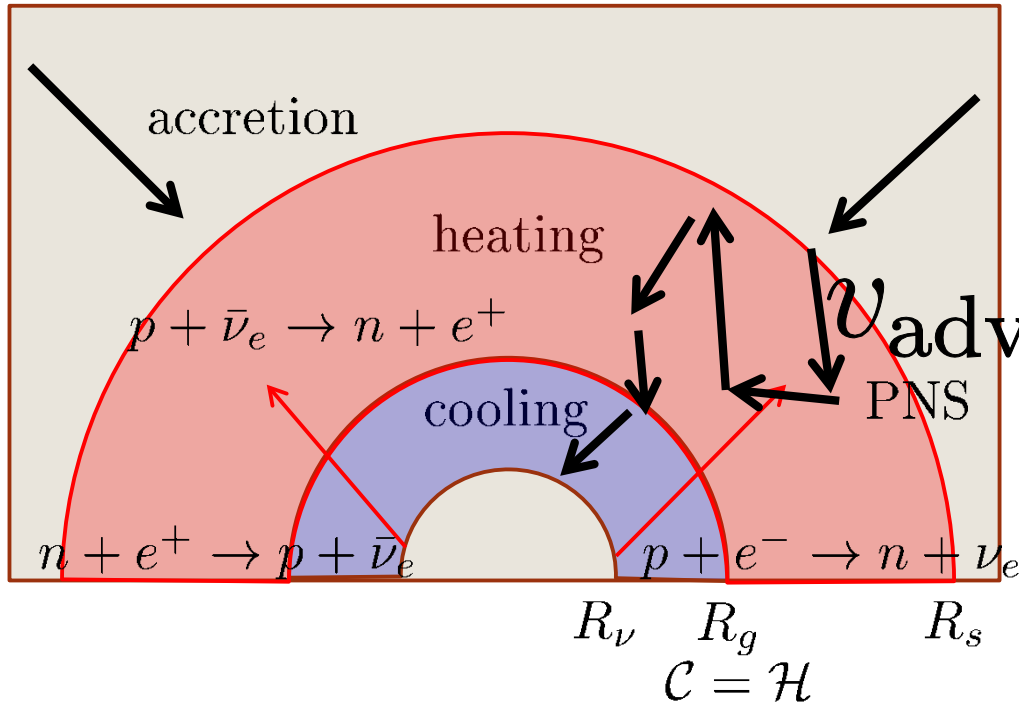
$\tau_{adv} > \tau_{heat}$  Indicates Explosion.

But actually  $\tau_{adv} < \tau_{heat}$  in 1D studies.



**From 1D to 3D**

# Two time scales



$$(Q_{\nu^+} - Q_{\nu^-}) \tau_{\text{heat}} - \frac{GM_{\text{PNS}}}{r m_u} > 0$$

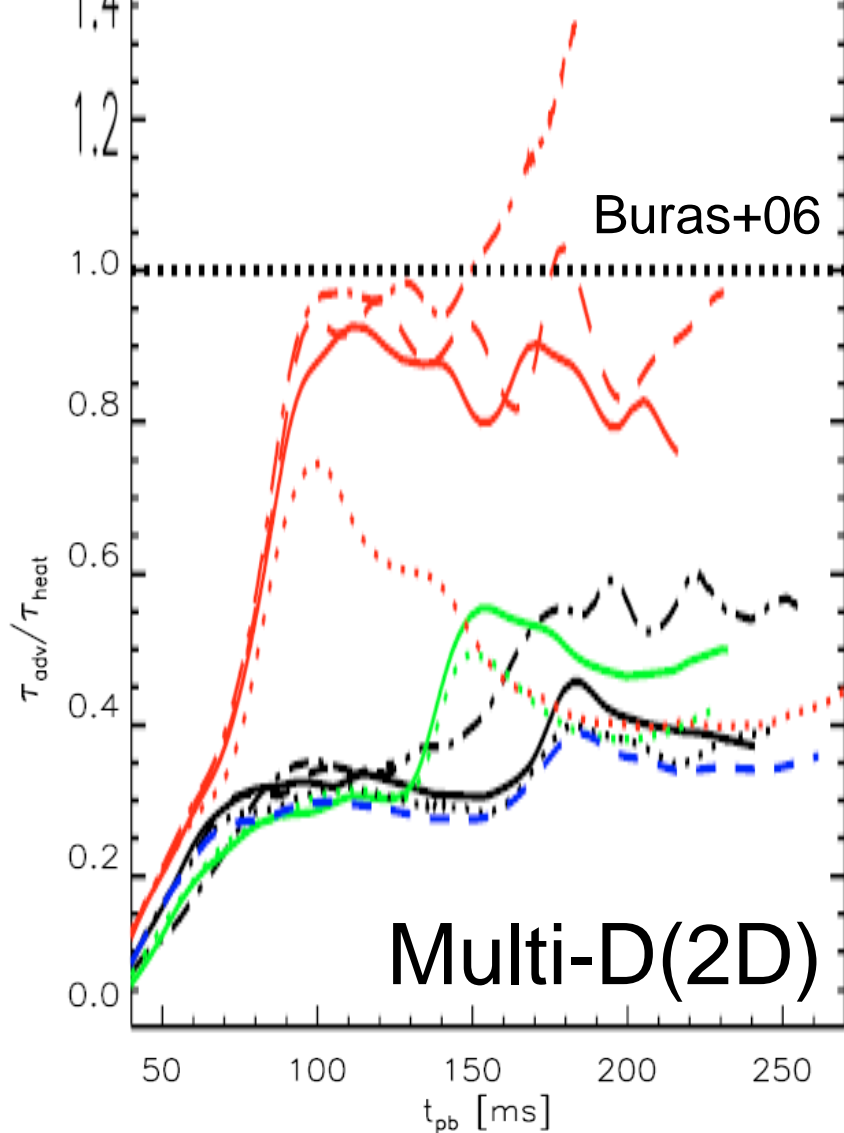
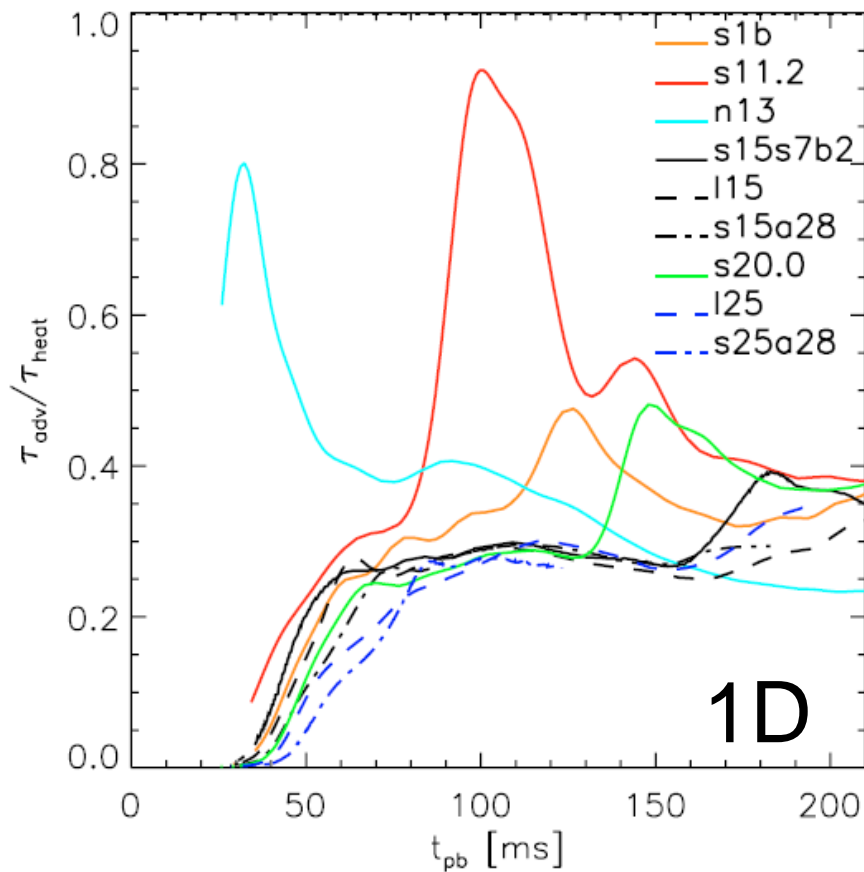
$$\frac{R_s - R_g}{\langle v_{\text{adv}} \rangle_{\text{averaged}}} = \tau_{\text{adv}}$$

$\tau_{\text{adv}} > \tau_{\text{heat}}$  Indicates Explosion.

In realistic situations,  $\tau_{\text{adv}} \sim \tau_{\text{heat}} = 10\text{--}100$  ms

In Multi-D simulations, advection time scale become larger.

# Two time scales



$$\tau_{\text{adv}} > \tau_{\text{heat}}$$

Indicates Explosion.

$$\tau_{\text{adv}} > \tau_{\text{heat}}$$

can be achieved in Multi-D studies.

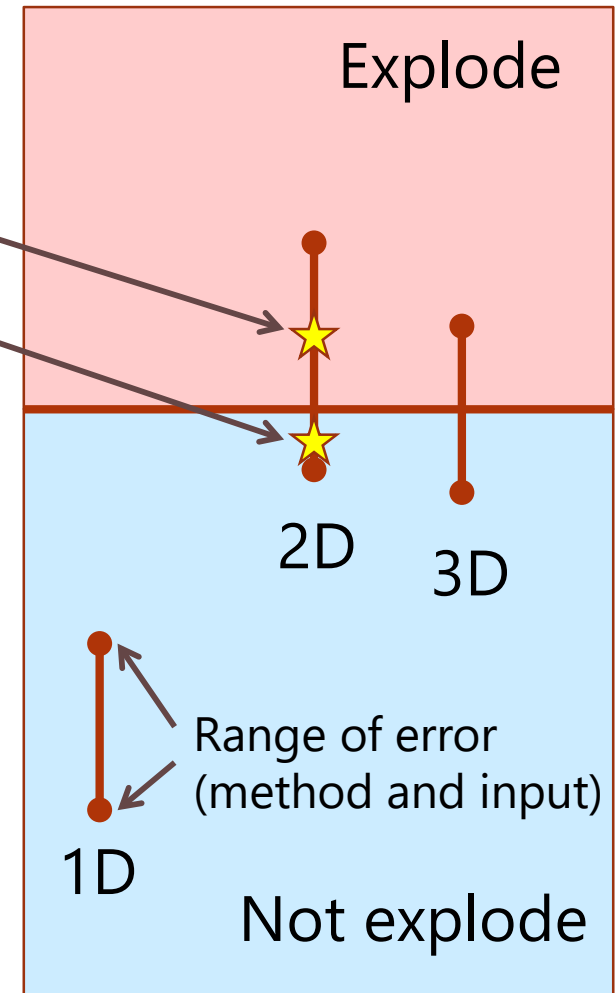
# Recent Problem of the simulations

## 2D models for multiple progenitors

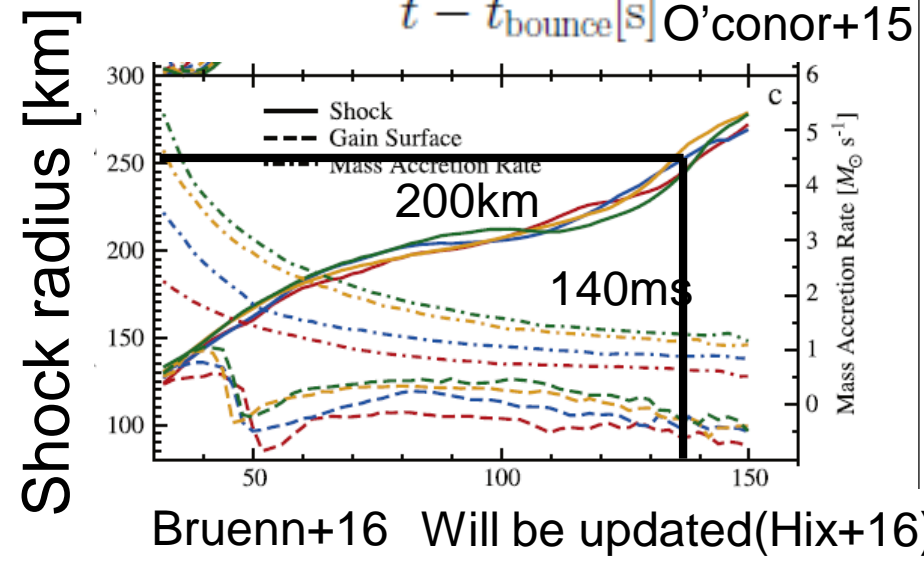
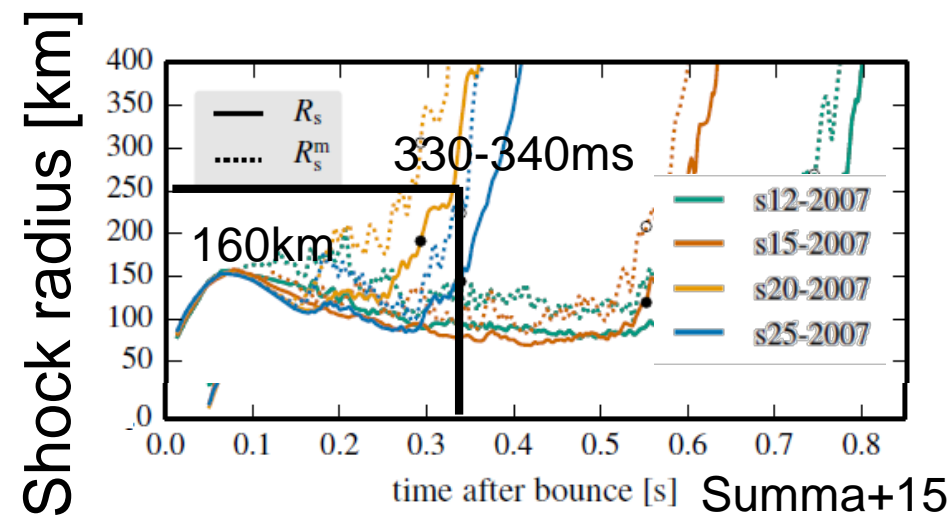
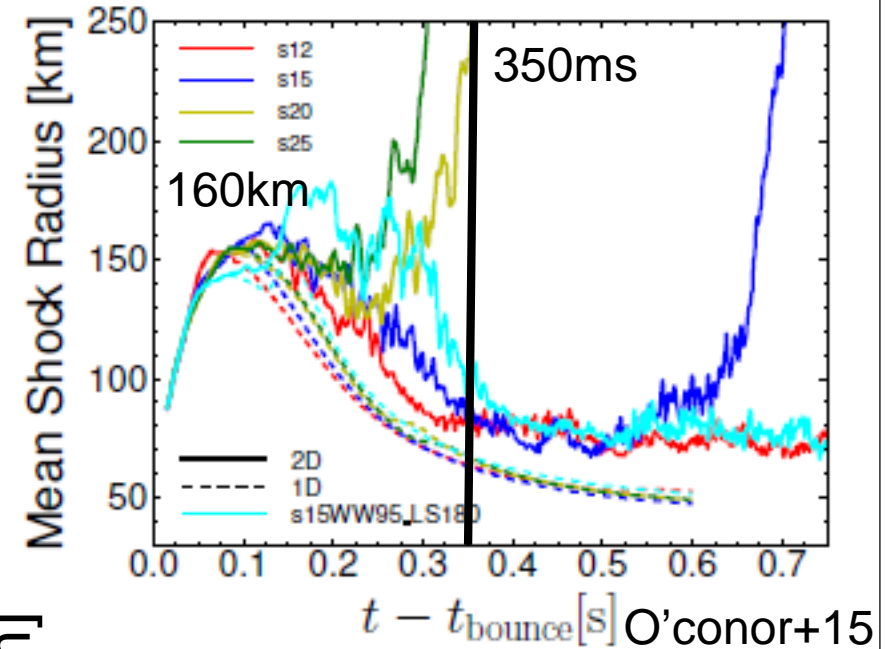
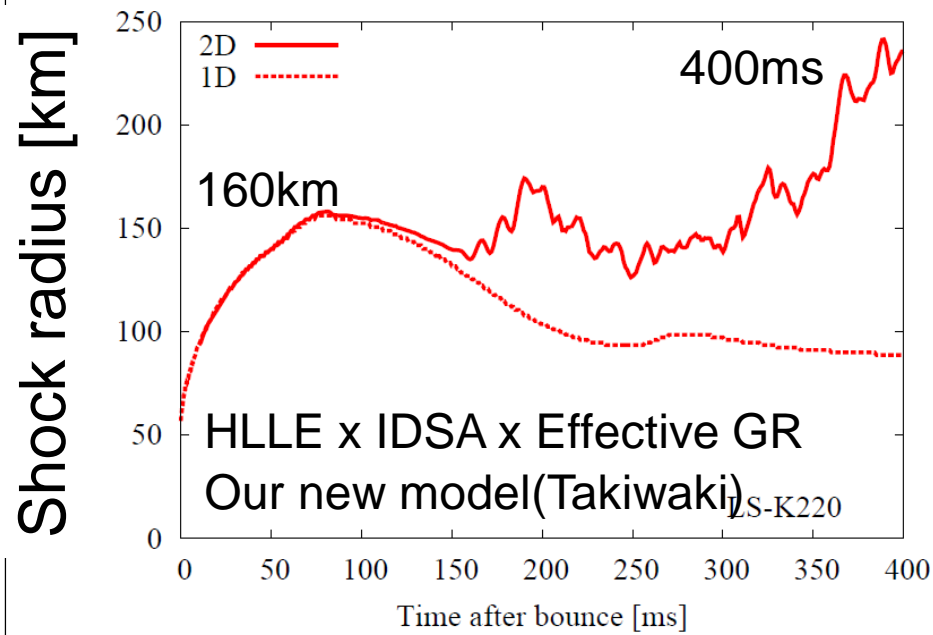
- Bruenn+12, 16: all explode
- Mueller+13: almost all explode
- Dolence+14: not explode
- Nakamura+15: all explode
- Suwa+15: half of them explode
- Summa+15: several explode
- Pan+15: all explode
- O'connor+15: a few explode

## 3D models for multiple progenitors

- Hanke+13: not explode(3model)
- Melason+15ab: explode
- Mueller+15: explode
- Takiwaki+16: 2/3 of the models explode
- Lentz+15: explode



# 2D Comparisons@ 20M\_s(WH07)

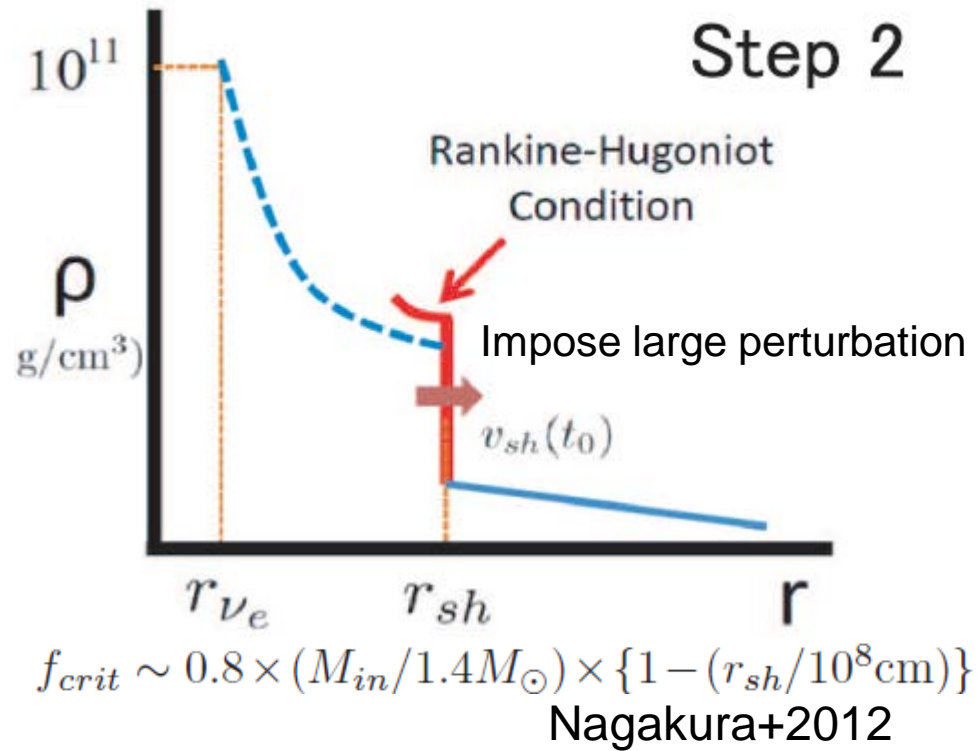
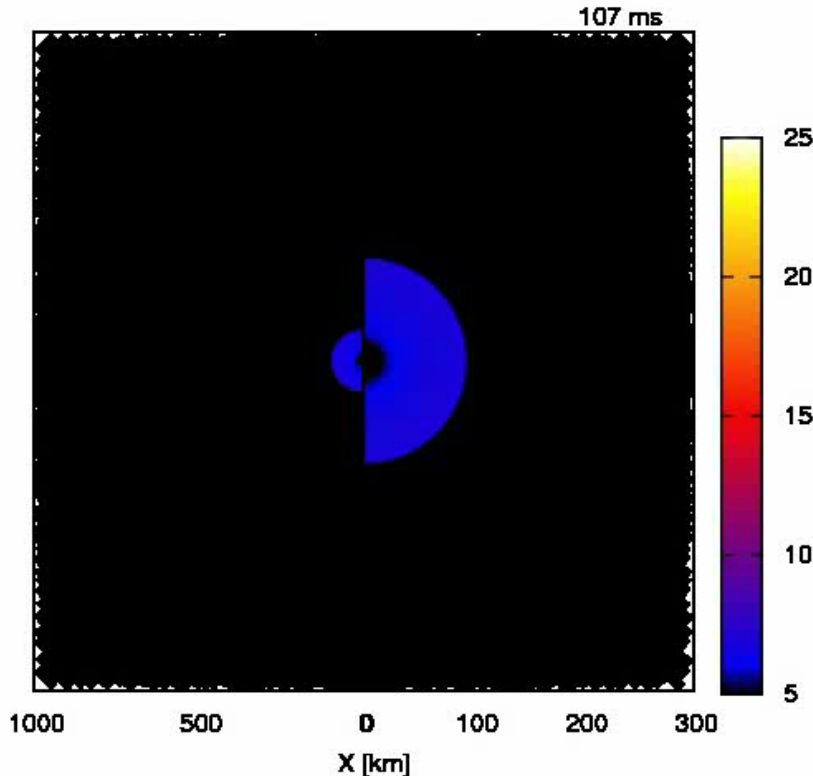


# 多次元的効果とニュートリノ

今回は(1)SASIと(2)LESAと(3)自転に注目

# S A S I (Standing Accretion Shock Instability)

## 2D Axi-symmetric



SASI focus energy at a direction!  
0.7-0.6 of increase in total pressure can  
revive the shock.

# SASI

Advective-acoustic cycle



Foglizzo's slides

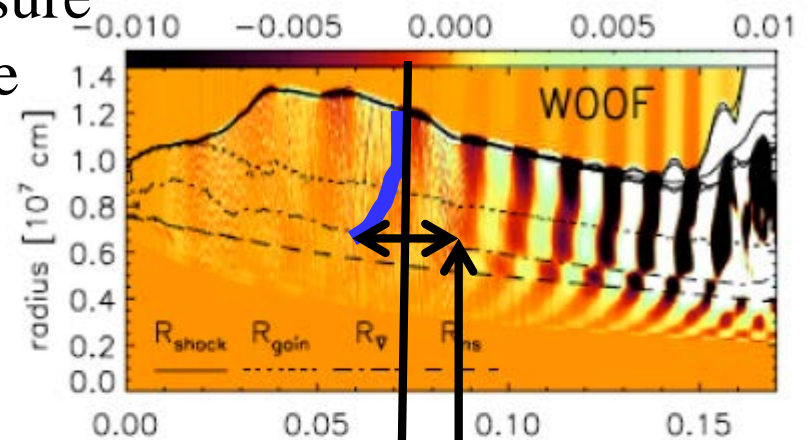
Standing Accretion Shock Instability (SASI)

$$\tau_{\text{SASI}} \sim R_{\text{sh}} / v_r$$

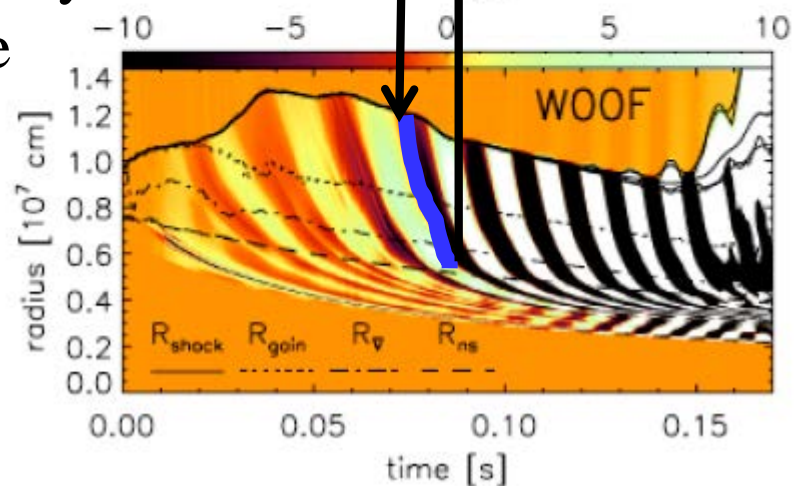
$\dot{M} \uparrow, v_r \uparrow, \tau_{\text{SASI}} \text{ Rapid!}$

Pressure  
Wave

$\tau_{\text{SASI}}$

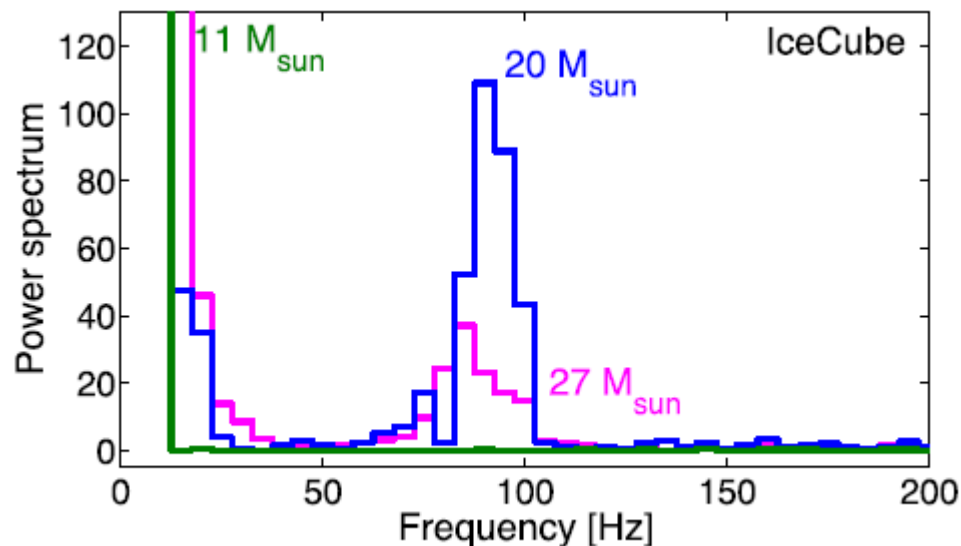
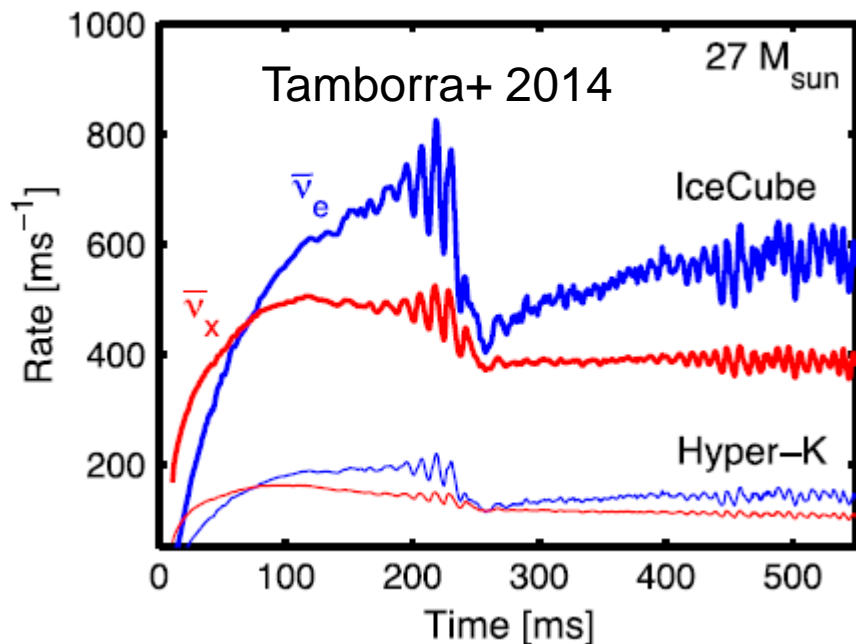


Vorticity  
Wave





# Neutrino signals from no-rotating model



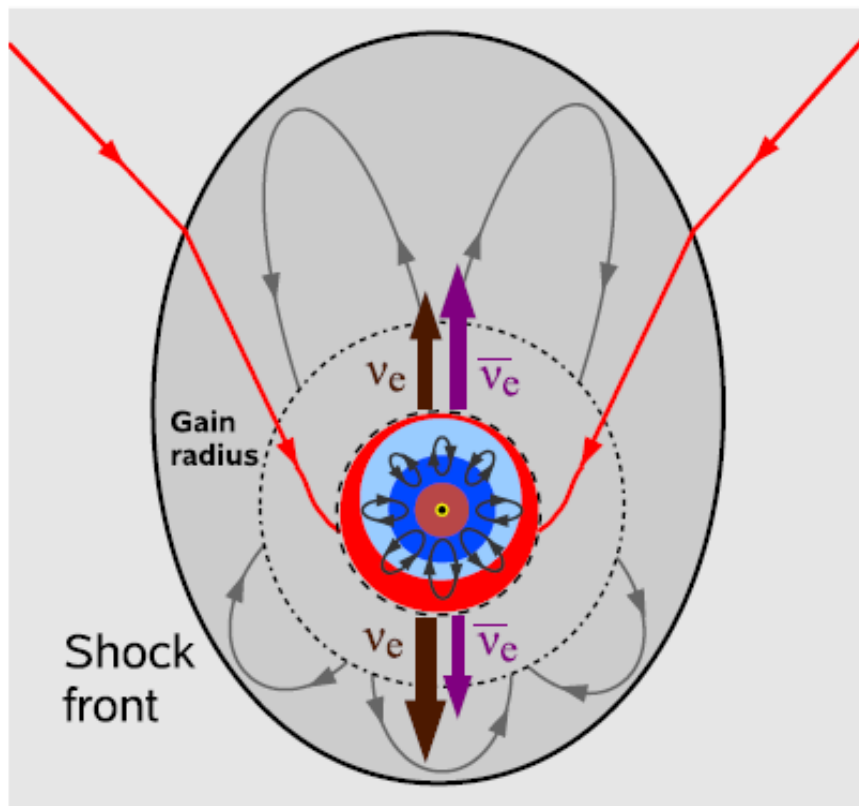
SASIによる揺れがニュートリノ観測に現れる。

周波数空間で見ると特徴がはっきりわかる。

⇒ SASIの証拠

⇒ 爆発メカニズムを特定

# LESA (Lepton-number Emission Self-sustained Asymmetry)



Tamborra+ 2014

LESA:

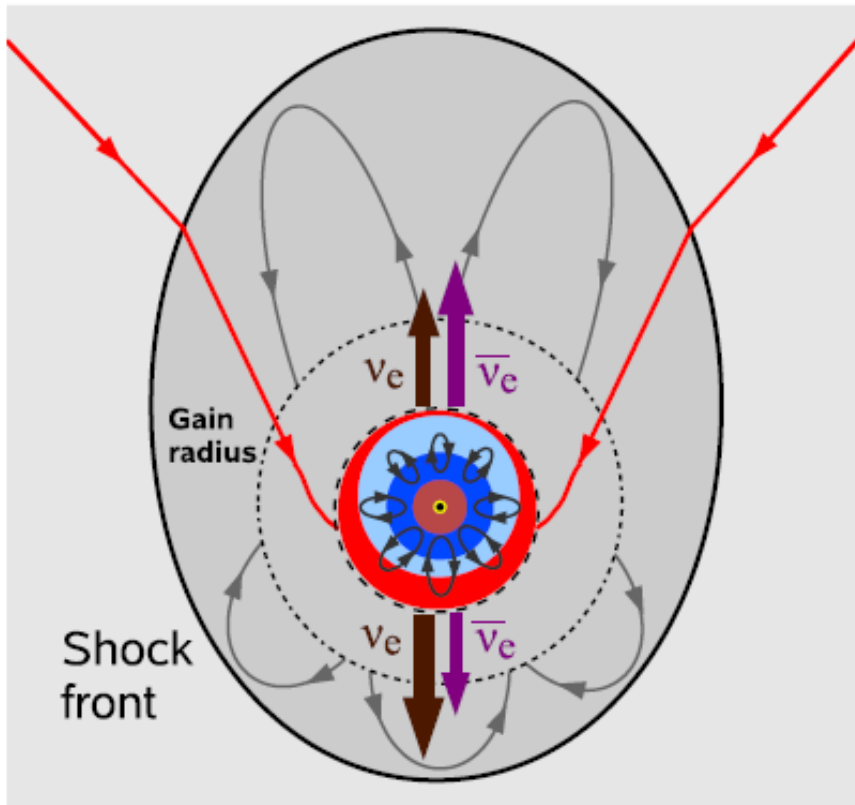
電子タイプと反電子タイプのニュートリノの放出が片側(北極とか)に寄る現象。

1. 北極側に強く衝撃波が歪む
2. 南極側に新鮮な高い $Y_e$ の物質が降着
3. 南極で電子タイプ、北極で反電子タイプのニュートリノが強く放出される。
4. 反電子タイプのほうがエネルギーが高いため加熱も強く起こる
5. 北極側に衝撃波が歪む(1に戻る)

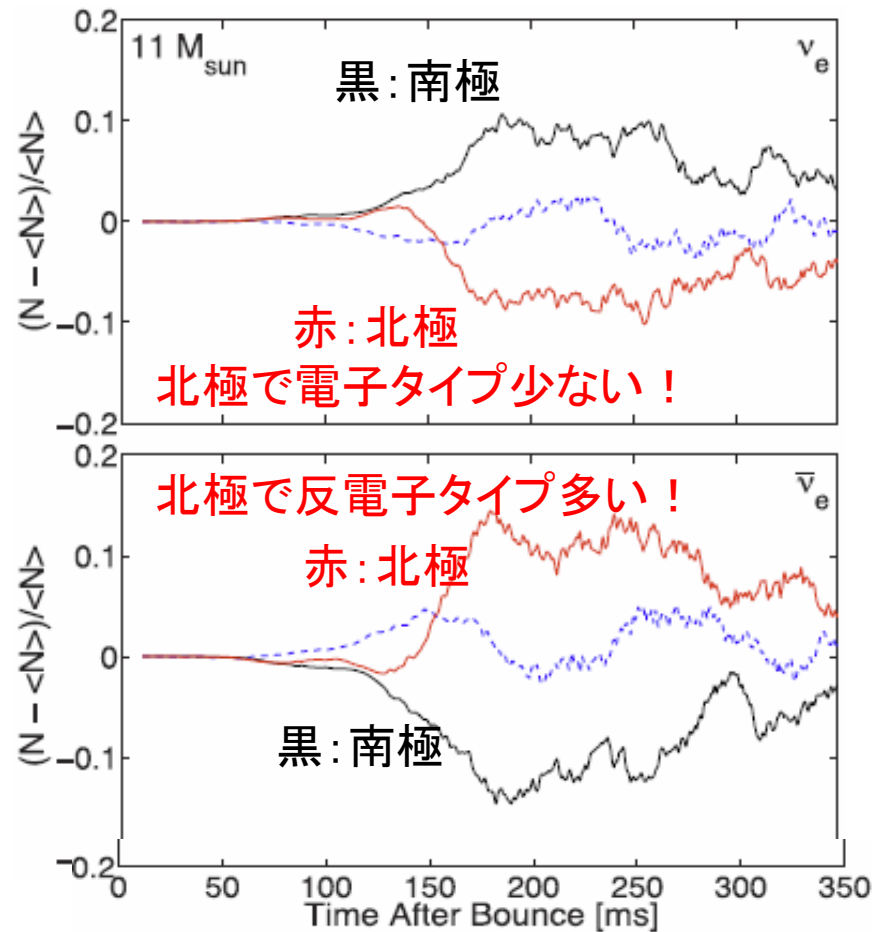
示唆: Unipolarな爆発を手助け

注意: SASIが起こると打ち消されるセンス

# LESA (Lepton-number Emission Self-sustained Asymmetry)



Tamborra+ 2014

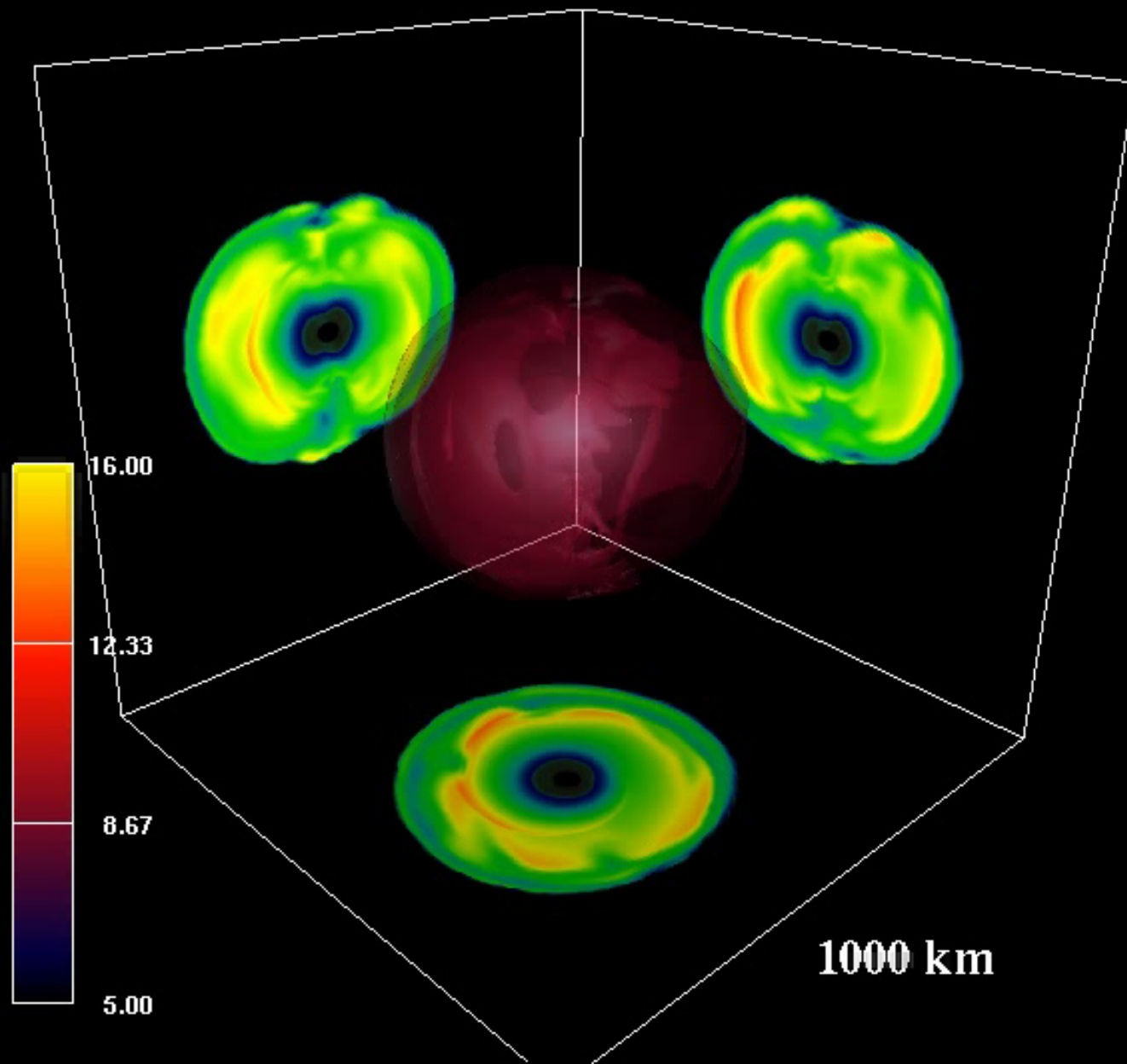


全フレーバーの観測が待ち遠しい

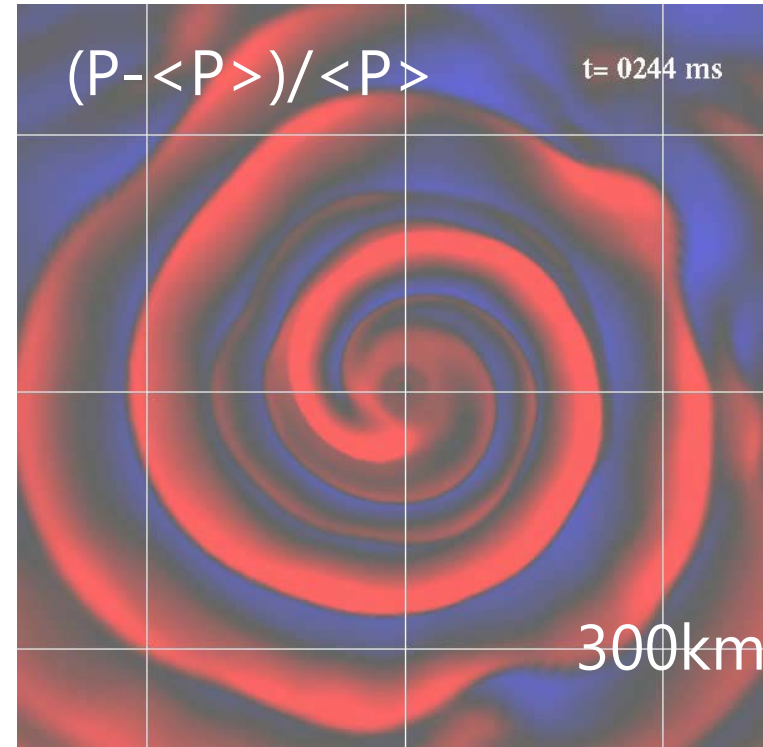
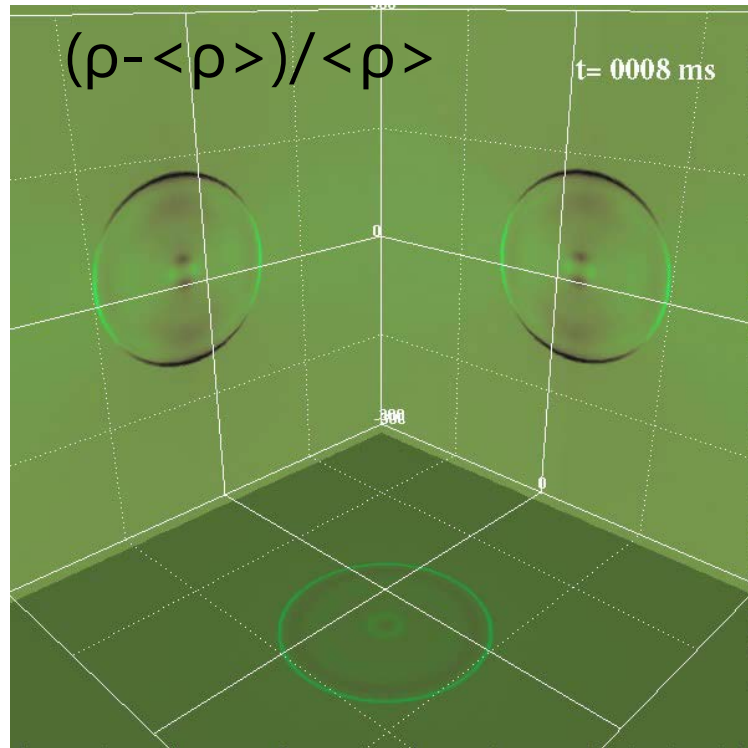
27.0M\_s R2.0

Entropy

t= 0102 ms



# Spiral Mode

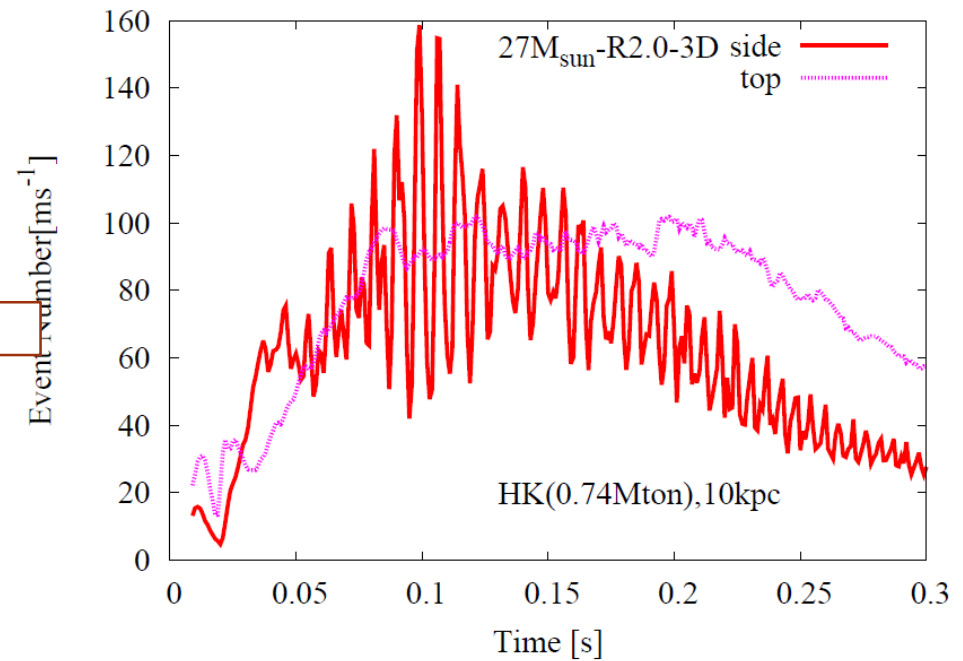
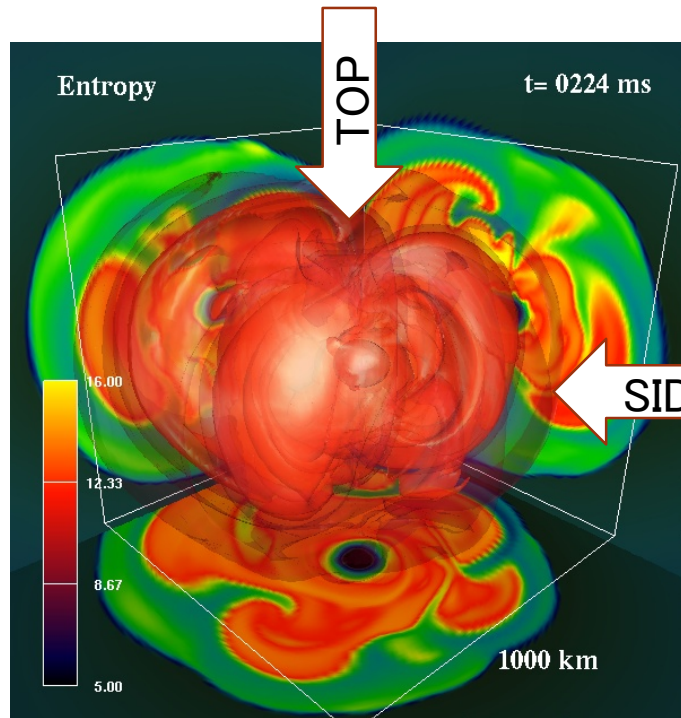


Rotational energy(T)/gravitational energy(W)  
reach some criteria => Spiral mode arises

In the rigid ball: 14%

In SNe case:  $\sim 6\%$  (Called low-T/W instability)

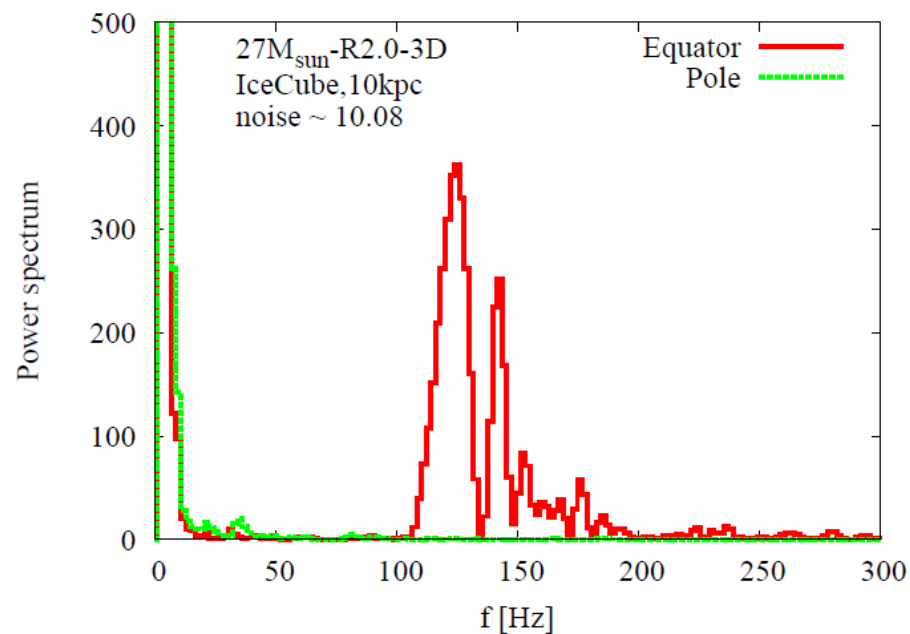
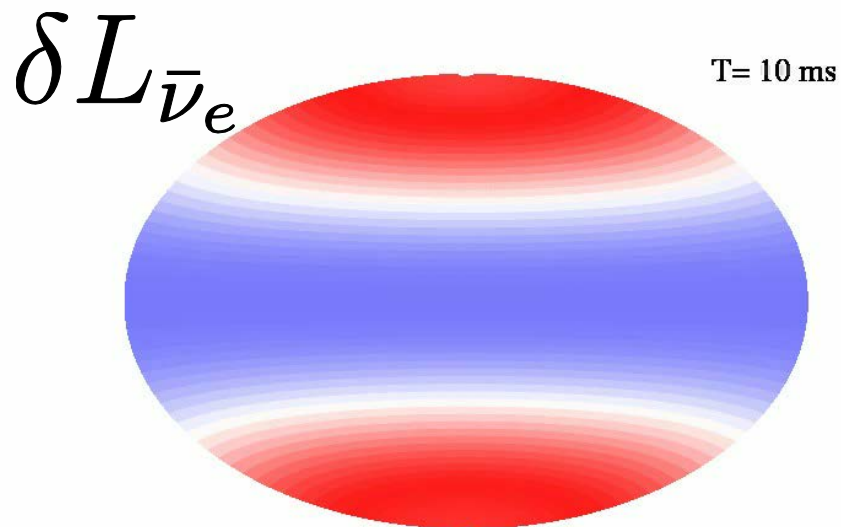
# Neutrino signals from rotating model



Takiwaki+ in prep

Period of spiral mode is extracted by  $\nu$ -signal

# 角度依存性と振動数



赤道からみていると灯台のよ  
うにニュートリノの放射が周  
期的にくる。

赤道方向からみた場合、  
フーリエ変換すると~120Hz  
にピークがくる。これは回転  
周期に対応している。

# まとめ

- 1987aのニュートリノ観測は天文学、物理学、天体物理学を大いに発展させた
- 次の近傍で起きる超新星はさらに天文学、物理学、天体物理学を発展させるだろう。
- 天文学: 親星の情報  
物理学: ニュートリノのフレーバー、スペクトラム  
天体物理学: 超新星の爆発メカニズム
- 最近の理論の発展  
シミュレーション結果の収束(1D,2D)  
ニュートリノの反応率の補正  
SASI, LESA, 自転からくる特徴的なニュートリノ放射