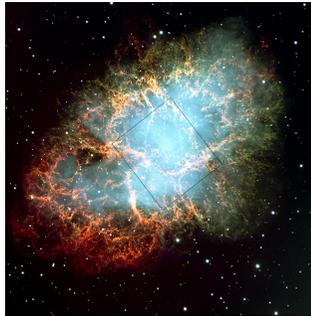


超新星におけるニュートリノ輻射輸送と状態方程式



Crab nebula hubblesite.org

住吉光介(沼津高専/KEK)



KEK

YITP

- 3次元ニュートリノ輻射輸送計算コードによる2D, 3D超新星コア
(状態方程式テーブル: 原子核組成比について)

超新星爆発メカニズム解明の鍵

• Macrophysics

- 流体力学
- ニュートリノ輻射輸送
- 回転、磁場



• Microphysics (核物理)

- 状態方程式
- ニュートリノ反応率
- 電子捕獲反応

大規模数値シミュレーション

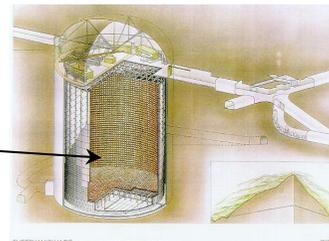
並列計算技術

爆発・高密度天体



SN1987A

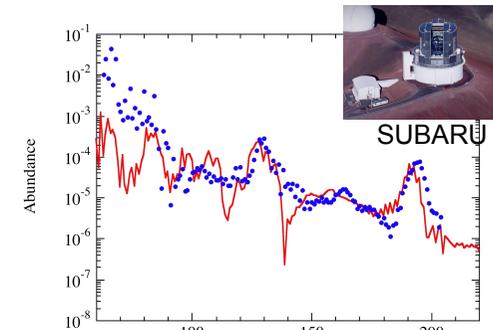
ニュートリノ観測など



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

Super-Kamiokande

元素合成



R-process

ニュートリノ輻射輸送へのこだわり

1. ニュートリノ加熱メカニズムの鍵を握る

- ニュートリノ放出・吸収量を緻密に求める

2. 放出ニュートリノ光度・スペクトルの導出

- ニュートリノ観測・元素合成・状態方程式

3. 2次元・3次元計算では近似手法

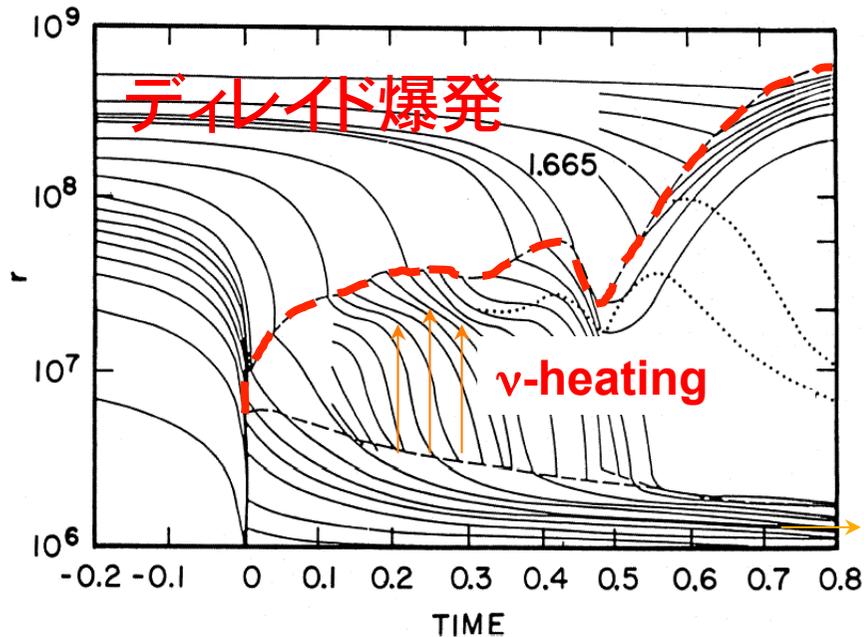
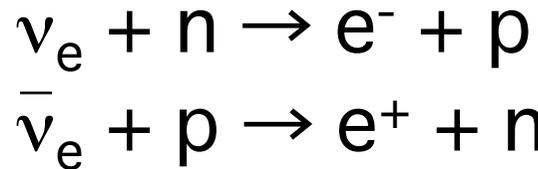
- 近似の影響を明らかに、そして最終的な答えを

→ 3次元ニュートリノ輻射計算コードを開発した

Sumiyoshi & Yamada, submitted to ApJ (2011)

ν 加熱メカニズム: 中間領域が重要

- ν 輸送 + ν 反応率 \cdot EOS \rightarrow ν -flux \cdot 加熱率



自由伝搬

ν

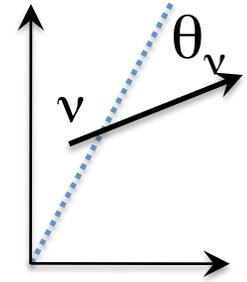
衝撃波

加熱領域

ν 光球

拡散

ν 輸送計算による ν 加熱の評価



- ニュートリノ角度分布の等方・非等方性

- 加熱率

$$Q_\nu^i \approx 110 \frac{\text{MeV}}{s \cdot N} \left(\frac{L_\nu E_\nu^2}{R_7^2 \langle \mu \rangle} X_i \right)$$

Flux factor $\langle \mu \rangle = \langle \cos \theta_\nu \rangle = 0 \sim 1$

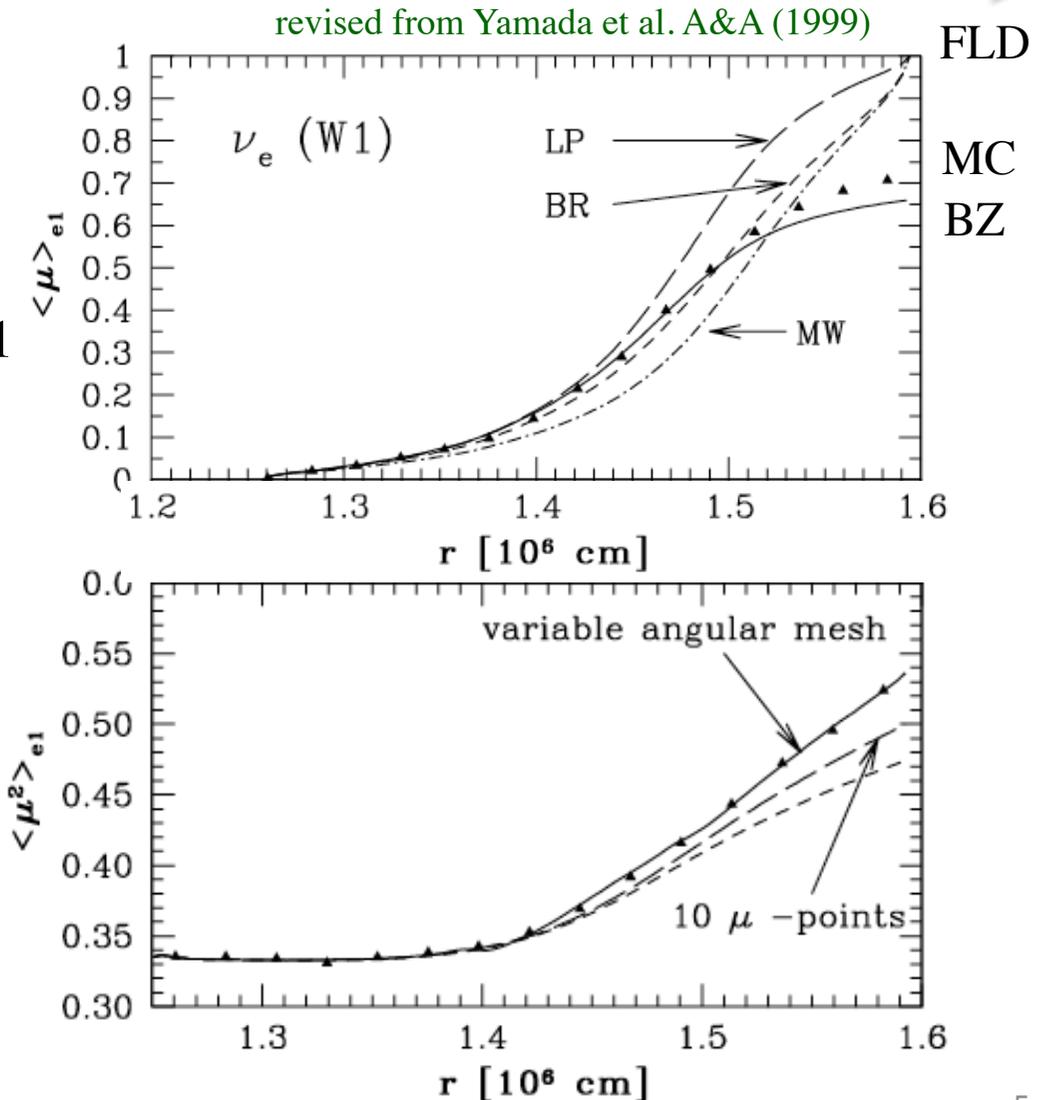
- ν 圧力-エネルギー

$$p_\nu = f \epsilon_\nu$$

Eddington factor

$$f = \langle \cos^2 \theta_\nu \rangle = \frac{1}{3} \sim 1$$

Flux limiter: overestimate $\langle \mu \rangle$, f
 → underestimate heating

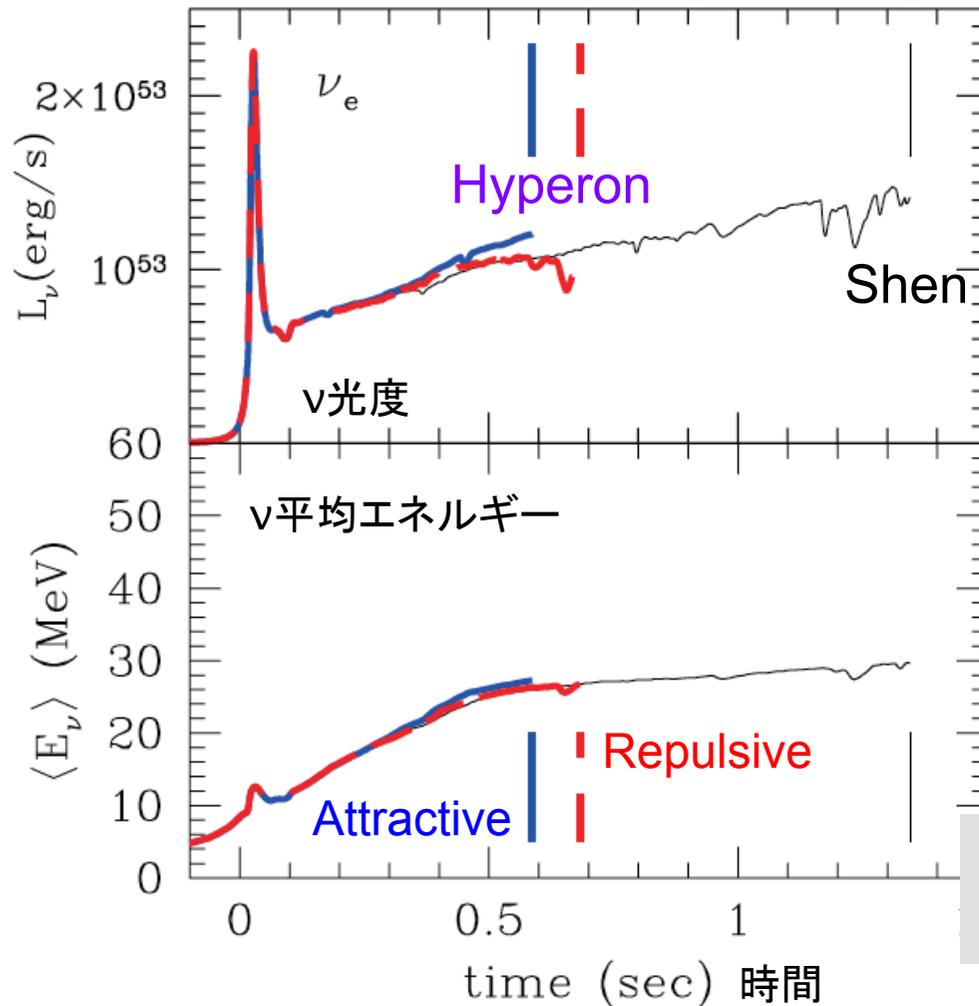


ν輻射流体計算によるν予測・観測へ(1Dの例)

- 大質量星 ($40M_{\text{sun}}$) 重力崩壊のνシグナル→状態方程式

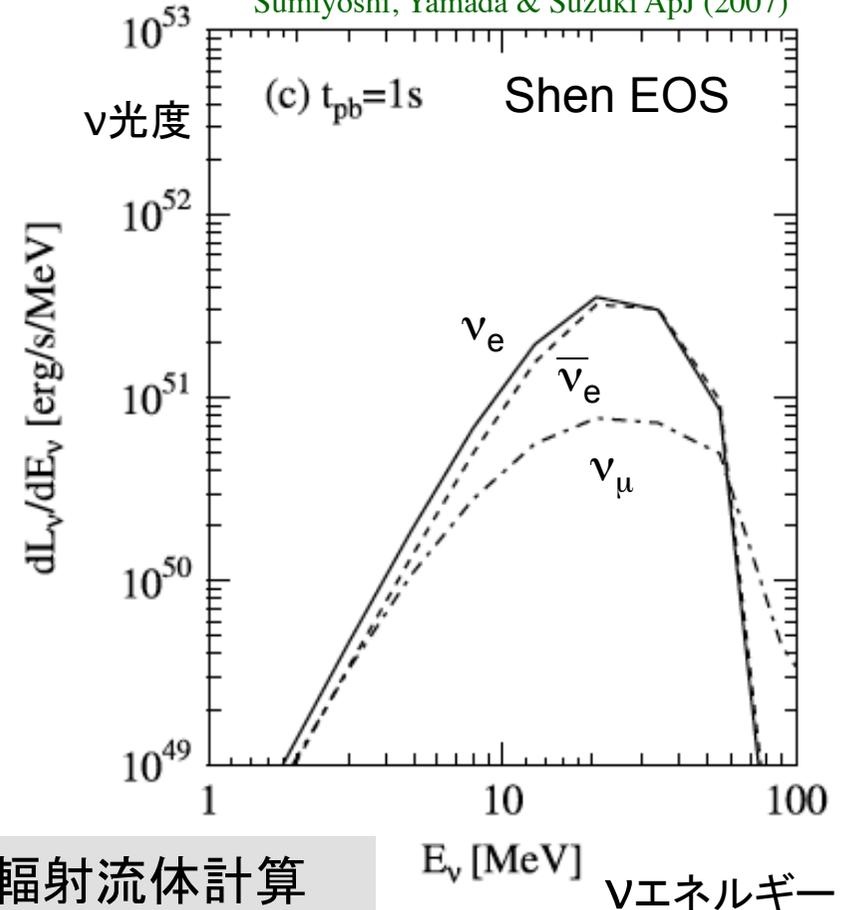
ν光度・平均エネルギー

Nakazato et al. ApJ (2011) accepted



νエネルギースペクトル

Sumiyoshi, Yamada & Suzuki ApJ (2007)



ν輻射流体計算
検出イベント数へ

Nakazato et al. (2010) PRD

ν 輻射輸送：近似から厳密計算へ

- 1D: 第一原理計算

- GR neutrino-radiation hydrodynamics

- Microphysicsの検証、系統的な研究

- Liebendoerfer, Sumiyoshi-Yamada-Nakazato

- 2D: 近似的な計算法

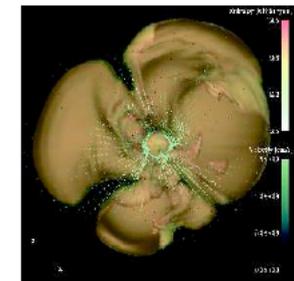
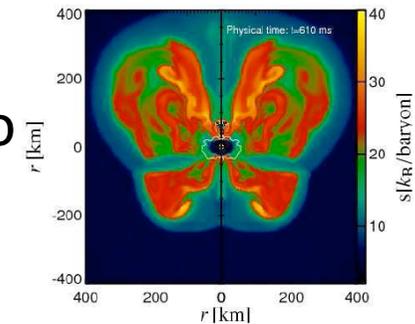
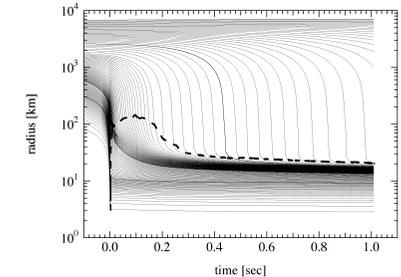
- Flux limited diffusion / Ray-by-Ray method

- Burrows, Marek-Janka, Suwa-Kotake

- 3D: 簡単な扱いから脱却へ $Ott (S_n)$

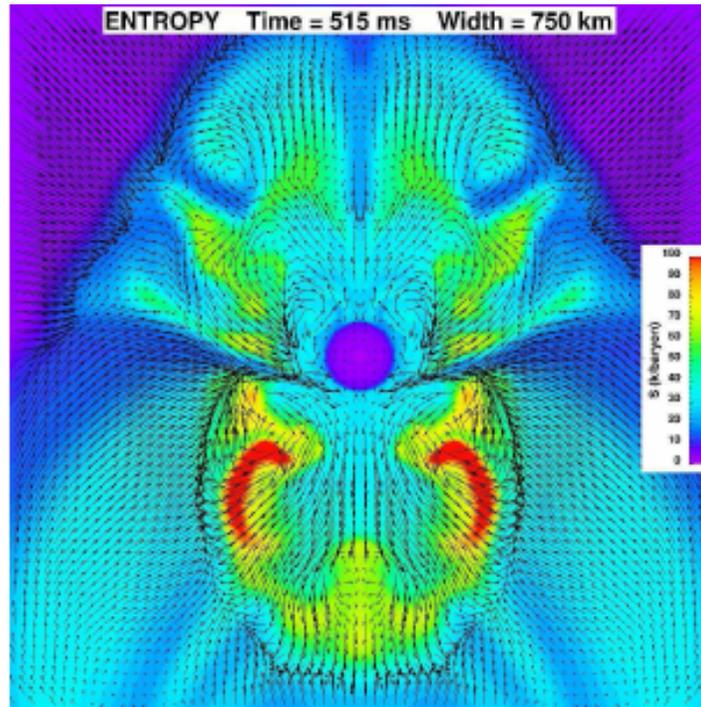
- Light bulb/neutrino-heating \rightarrow Ray-by-Ray method

- Blonding-Mezzacappa, Iwakami, Takiwaki-Kotake



2D超新星計算での近似手法

Flux-limited diffusion method

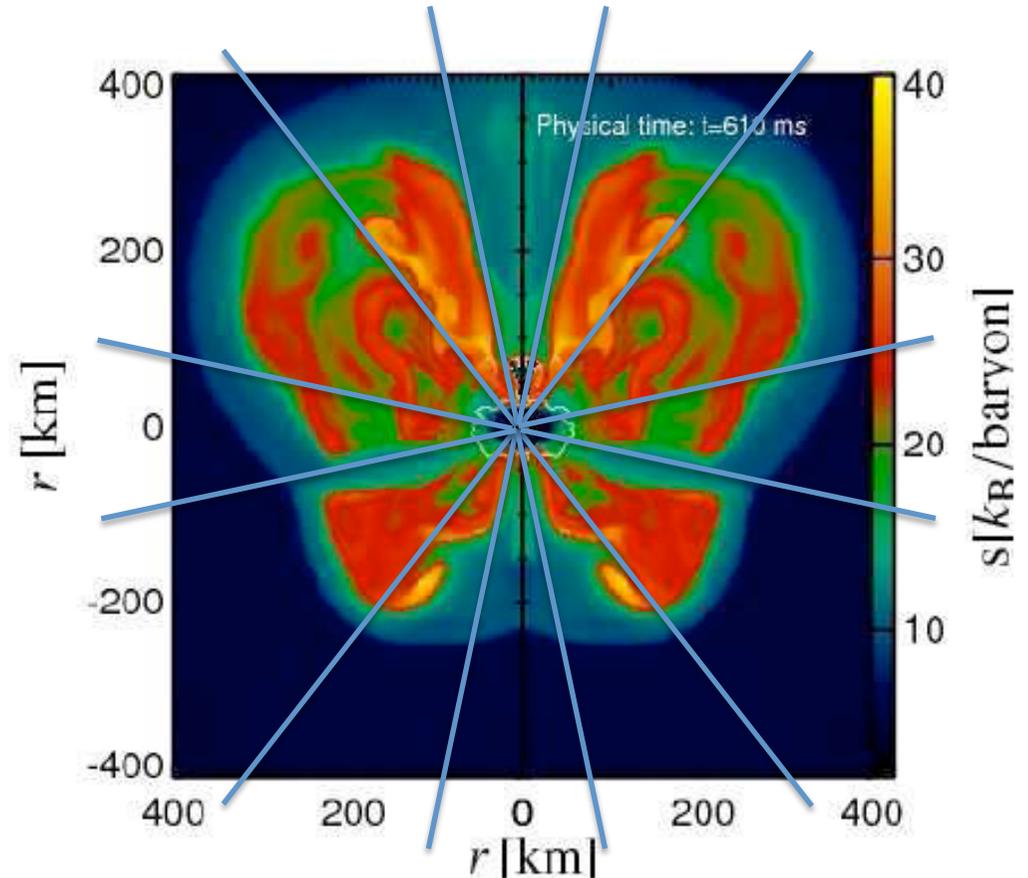


Usage of Flux limiter
- intermediate regime?

Acoustic Powered

Burrows et al. ApJ 640 (2006) 878

Ray-by-ray method



Solve 1D-transport Independently
- lateral transport?

SASI + Neutrino-heating

Marek-Janka, ApJ 694 (2009) 664

空間3次元・ボルツマン方程式

大規模計算のチャレンジ

3次元v計算に対する海外研究者のコメント

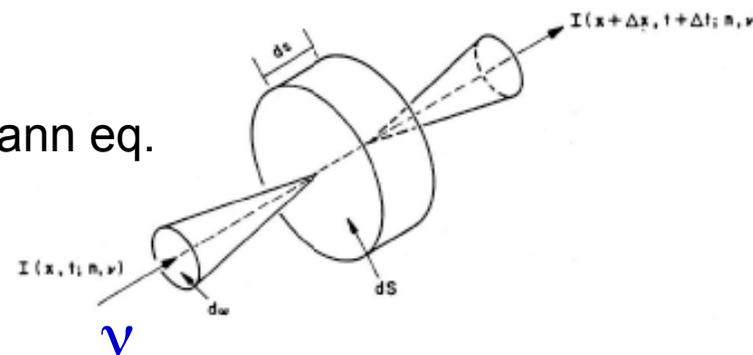
- Christian Ott:
 - 「大変だからやめた方が良い」 Condolences
 - 3D Monte Carloへ向け着手
- Anthony Mezzacappa:
 - 「我々は10-20年先を見据えてやっている」
 - Moment Closureから着手、Boltzmannも視野
- Thomas Janka:
 - (想像)「そんな計算は重いし、効率が悪い・不要」
 - (影で周到に着手しているに違いない)
- **世界で初めて(たぶん)**

3次元輻射輸送計算

- 6次元ニュートリノ分布の時間発展

$$\frac{1}{c} \frac{\partial f_\nu}{\partial t} + \frac{\partial f_\nu}{\partial s} = \frac{1}{c} \left(\frac{\delta f_\nu}{\delta t} \right)_{collision}$$

Boltzmann eq.



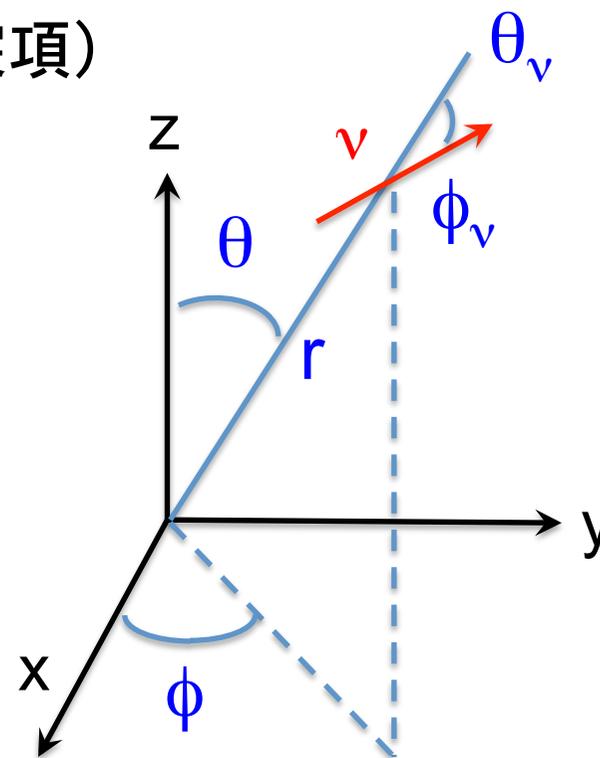
- 左辺: ニュートリノ数の変動
- 右辺: ニュートリノ反応による変動 (衝突項)

$$f_\nu(r, \theta, \phi; \varepsilon_\nu, \theta_\nu, \phi_\nu; t)$$

- ニュートリノエネルギー (ε_ν), 角度 (θ_ν, ϕ_ν)
 - 球対称でも3次元計算 ($r, \theta_\nu, \varepsilon_\nu$)
- ニュートリノ反応率・状態方程式

- 陰解法による計算コードを完成

- 大規模疎行列による線形方程式



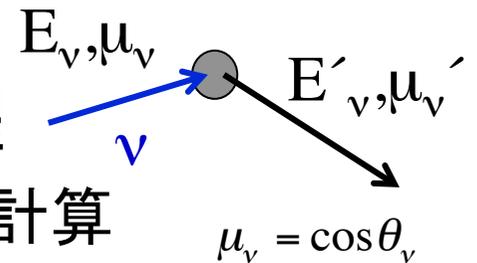
球座標でのボルツマン方程式

$$\begin{aligned} \frac{1}{c} \frac{\partial f_\nu}{\partial t} + \frac{\mu_\nu}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 f_\nu) + \frac{\sqrt{1-\mu_\nu^2} \cos \phi_\nu}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta f_\nu) + \frac{\sqrt{1-\mu_\nu^2} \sin \phi_\nu}{r \sin \theta} \frac{\partial f_\nu}{\partial \phi} \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \mu_\nu} [(1-\mu_\nu^2) f_\nu] + \frac{\sqrt{1-\mu_\nu^2} \cos \theta}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi_\nu} (\sin \phi_\nu f_\nu) = \frac{1}{c} \left(\frac{\delta f_\nu}{\delta t} \right)_{collision} \end{aligned}$$

- 保存形: 差分化して解く
- 陰解法: 安定性、時間ステップ、平衡解を保証

- 衝突項: 全ての ν 吸収・放出・散乱過程

- 散乱前後のエネルギー・角度ごとに積分計算



$$\frac{1}{c} \left(\frac{\delta f_\nu}{\delta t} \right)_{collision} = j_{emission} (1 - f_\nu) - \frac{1}{\lambda_{absorption}} f_\nu + C_{inelastic} \left[\int f_\nu (E'_\nu, \mu'_\nu) dE'_\nu \right]$$

衝突項: ニュートリノ反応による寄与

Bruenn (1985)
+ Shen

- 爆発メカニズム解明に必要な基本セット

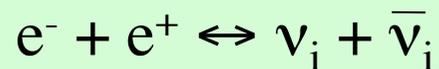
- 放出/吸収:



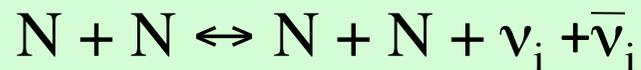
- 散乱:



- 対生成・消滅:



3 species:



$\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu$

- ここ数年の計算資源で扱うための処方:

- エネルギーが変化する反応は扱わない(電子散乱)
- 線形方程式の範囲で取り入れる(対生成・消滅)
- ローレンツ変換の効果は取り入れる予定

大規模行列の解法：計算科学との連携

- 線形方程式

$$A\vec{f}_v = \vec{d}$$

- ニュートリノ分布

$$N_{\text{space}} = n_r \times n_\theta \times n_\phi$$

$$N_v = n_\varepsilon \times n_{\theta v} \times n_{\phi v}$$

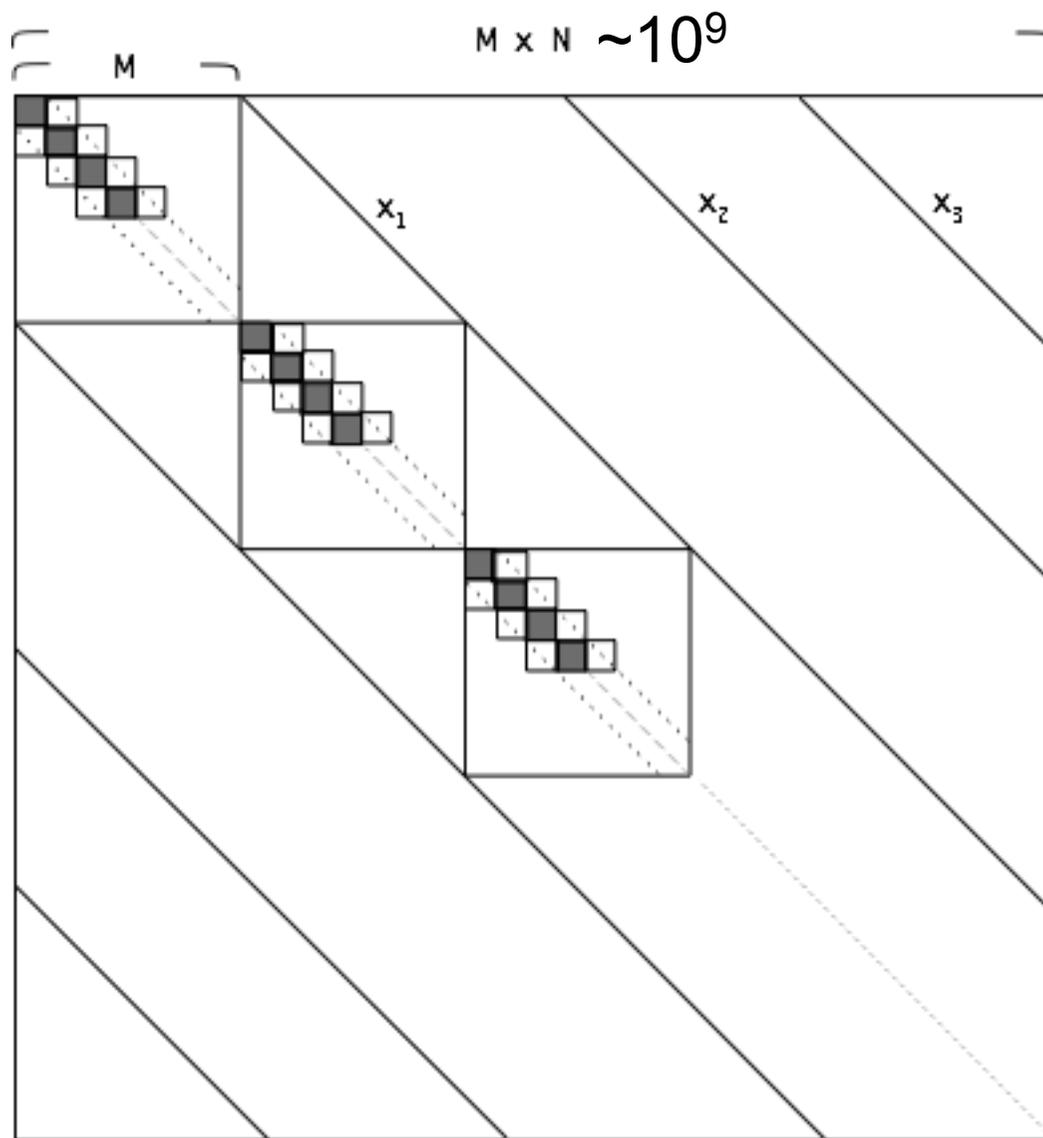
$$N_{\text{vector}} \sim 10^6 \times 10^3$$

v分布: >20GB

行列: >1TB

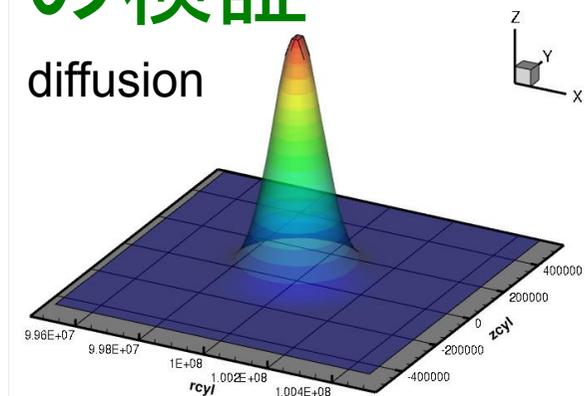
- 反復法・並列化

アルゴリズム・前処理
(with 筑波大・KEK)

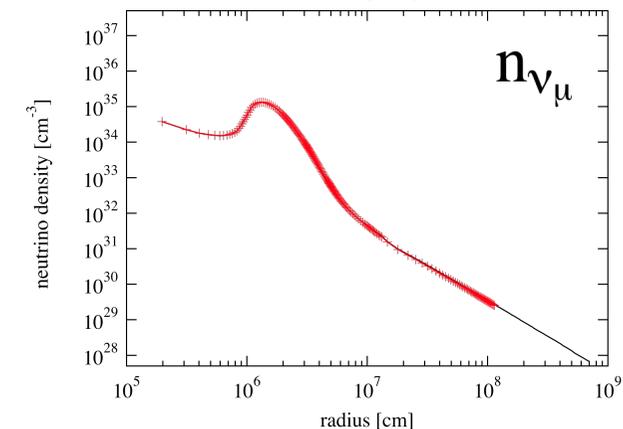
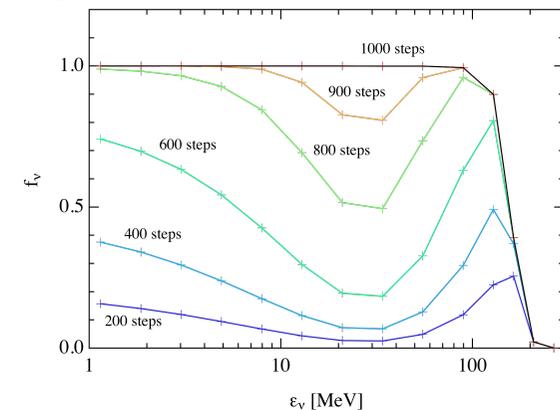


3次元 ν 輸送計算コードの検証

- 解析解との比較
 - ガウス分布の拡散、自由伝搬
 - 伝搬経路に沿っての形式解
 - 平衡値に至る時間発展
 - 球対称計算との比較
 - バックグラウンド固定
 - 重力崩壊中・バウンス後
 - 密度・流束・モーメント量
 - ν 反応率・平均自由行程
- cf. 1D ν -radiation hydrodynamics (GR)



equilibrium

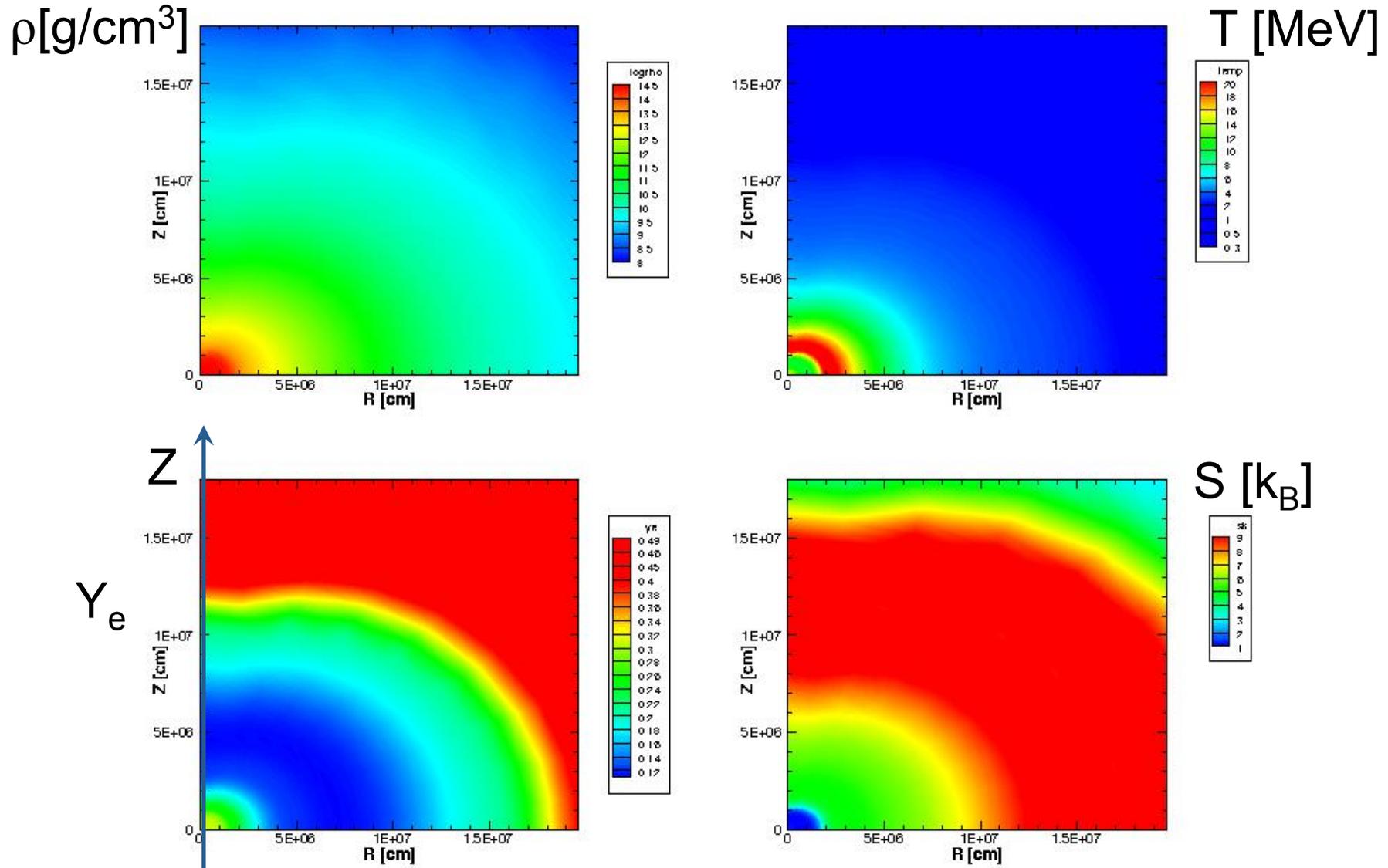


超新星コアへの応用

2D, 3D形状での ν 輻射輸送

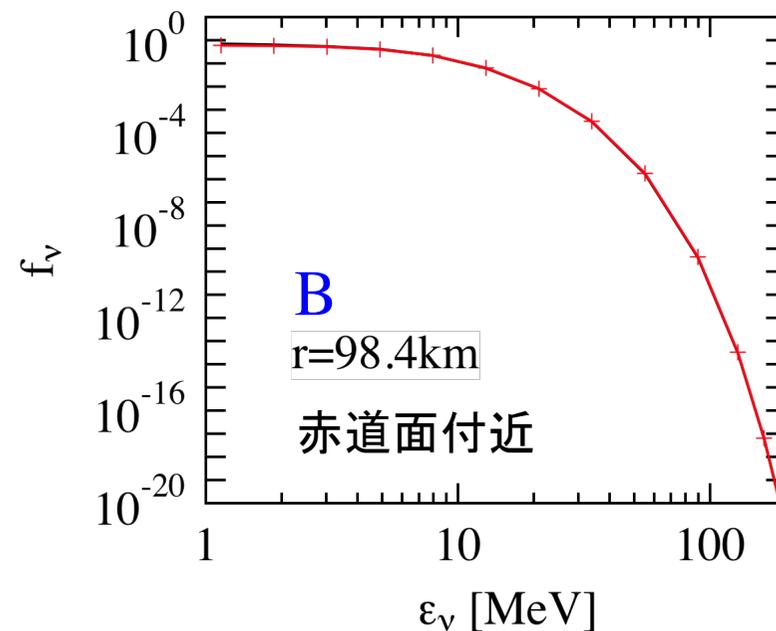
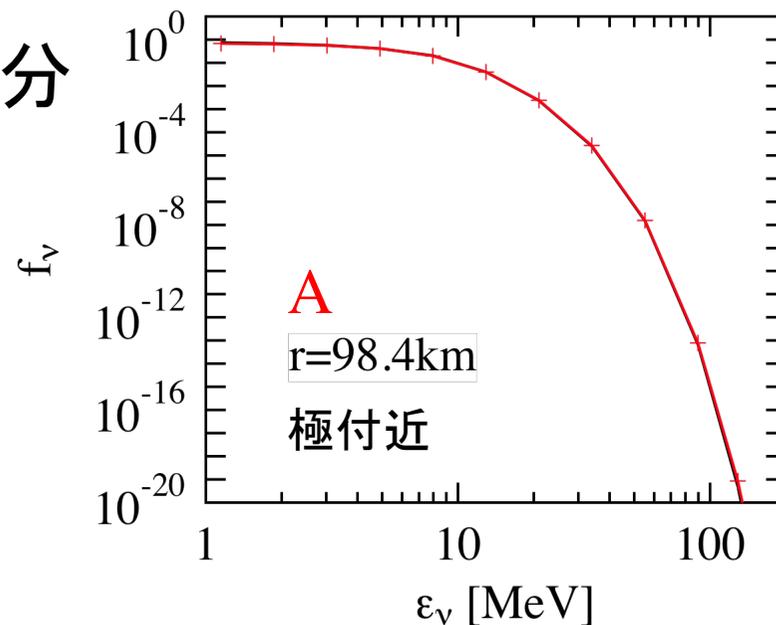
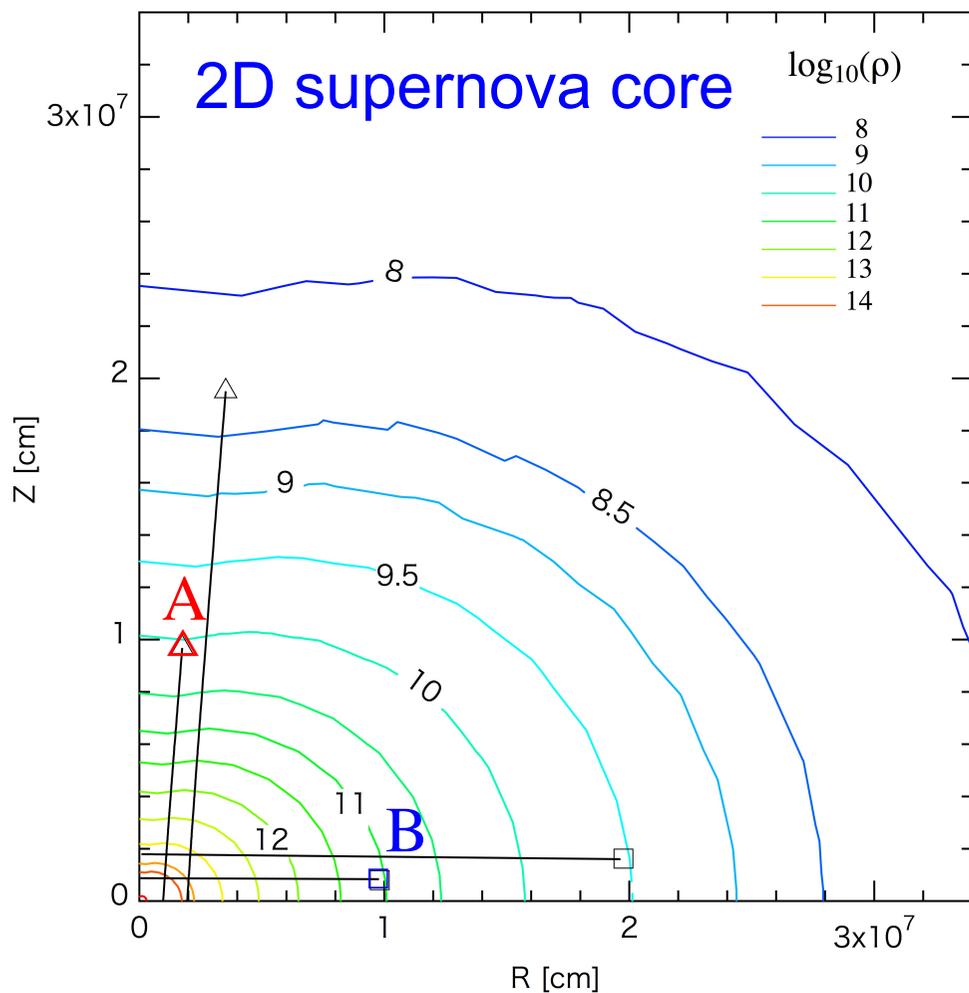
Axially symmetric supernova core

- Fix the ρ , T , Y_e profile & Solve 3D ν -transfer



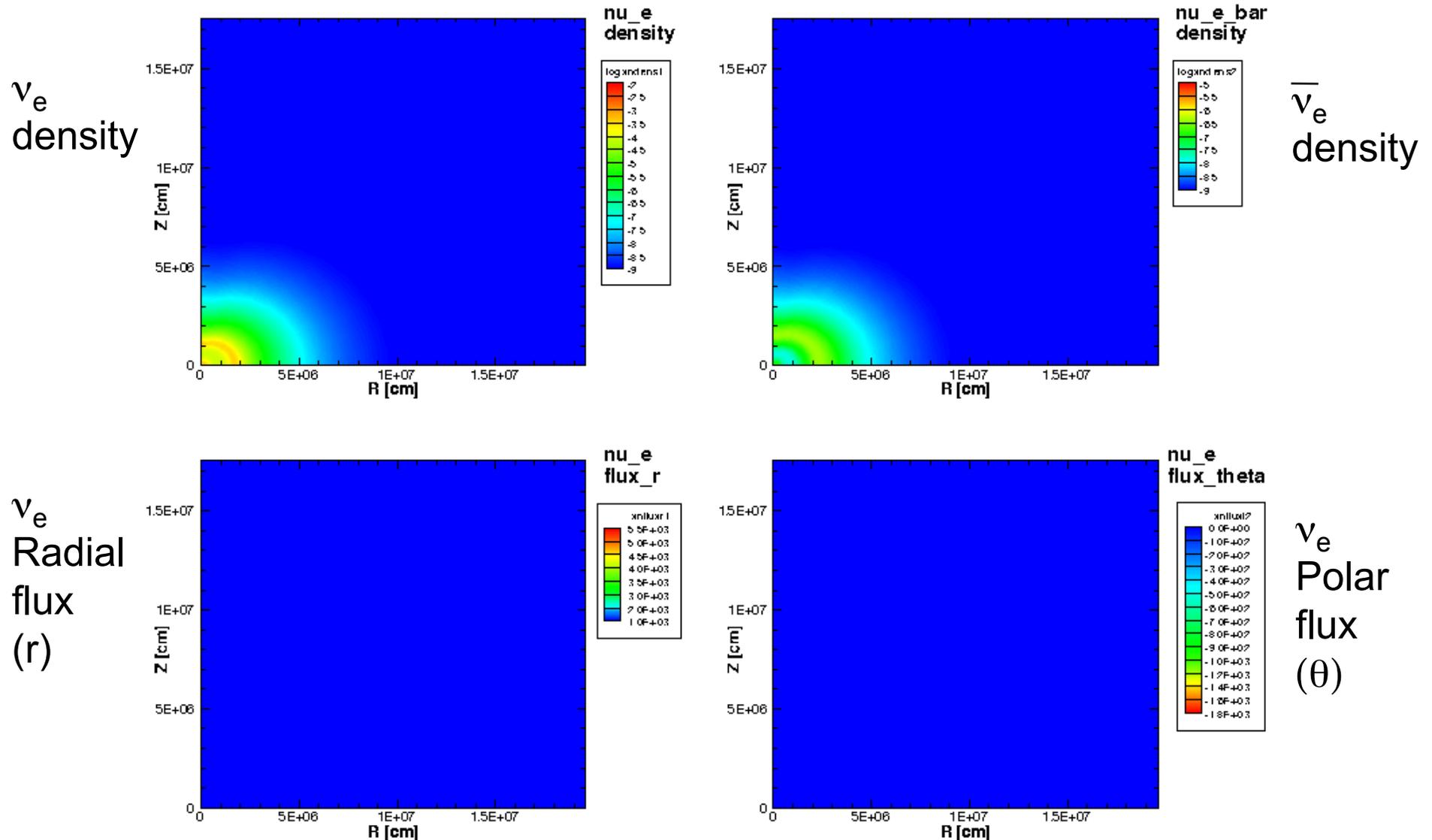
形式解との比較: エネルギースペクトル

- 数値計算 vs 経路に沿って積分



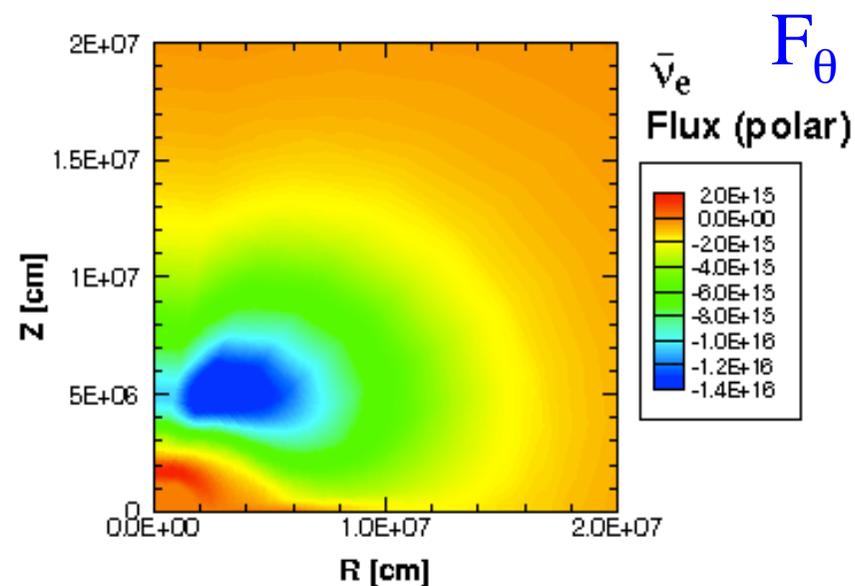
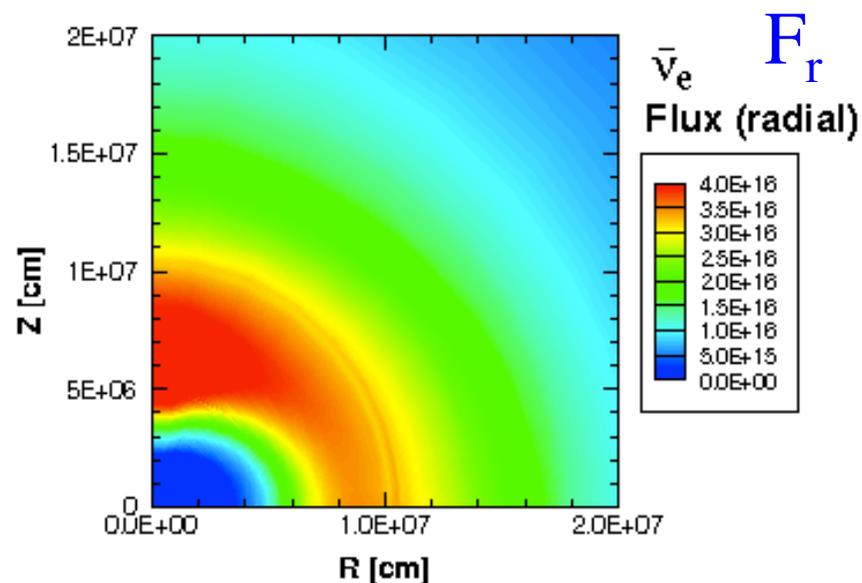
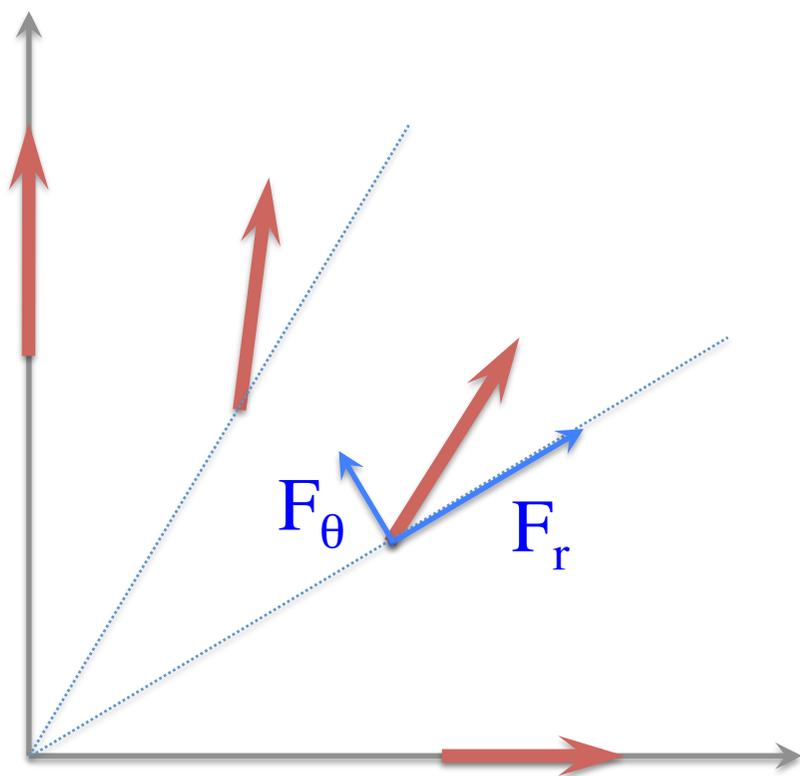
Axially symmetric supernova core

- From small densities, the time evolution until the stationary state



3次元 ν 輸送計算の強み

- 例：極方向への流束
 - ray-by-rayを越えて
 - 拡散領域外でもOK



ニュートリノ分布のモーメント量

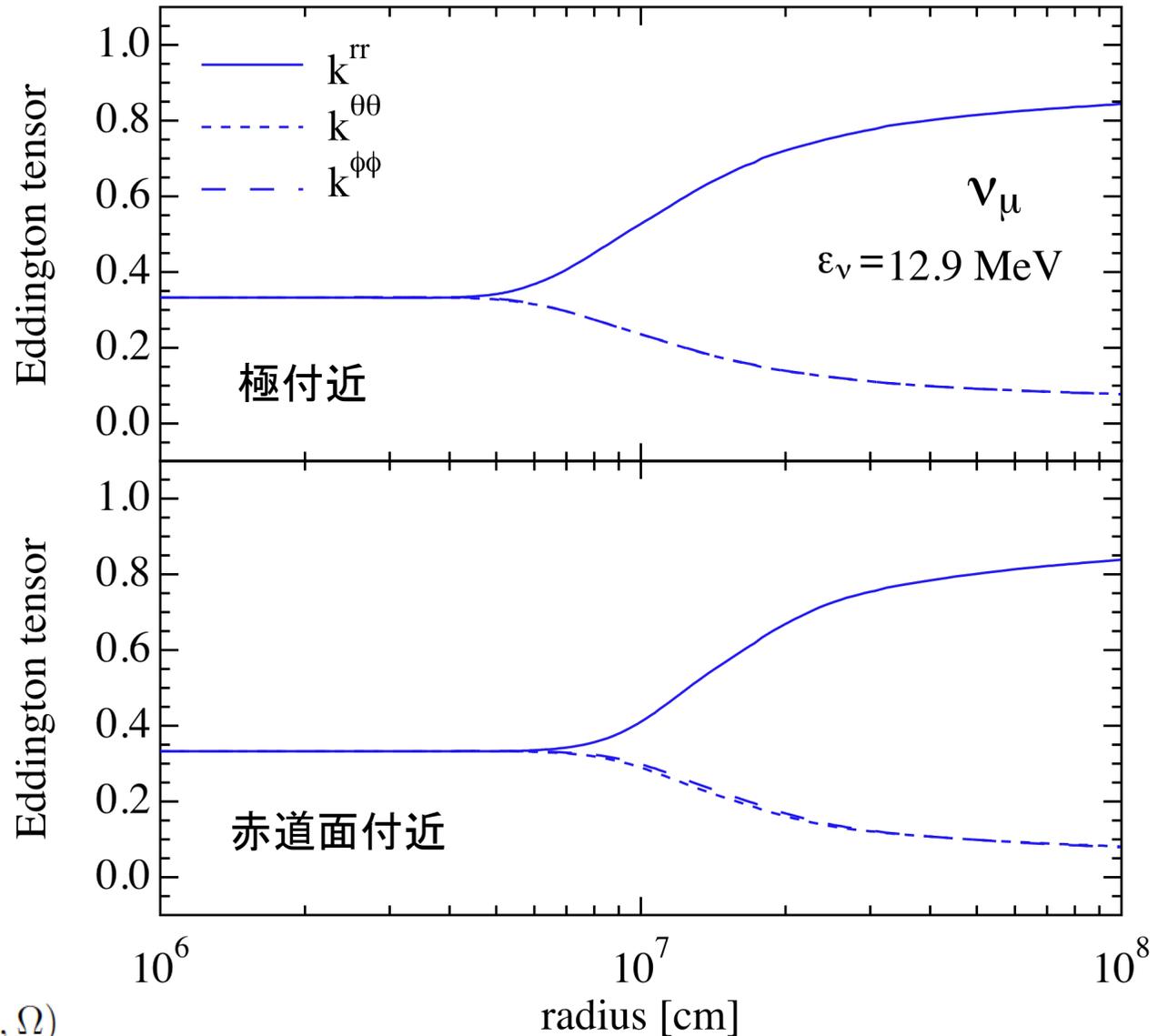
- Eddington tensor

$$k^{ij} = \frac{P_{\nu}^{ij}}{E_{\nu}}$$

- 対角要素
 - (rr, $\theta\theta$, $\phi\phi$)
- 非対角要素
- エネルギーごと

- モーメント法での
処方へ情報

$$P_{\nu}^{ij} = \int \frac{d\varepsilon \varepsilon^2}{(2\pi)^3} \int d\Omega \varepsilon n_i n_j f(\varepsilon, \Omega)$$



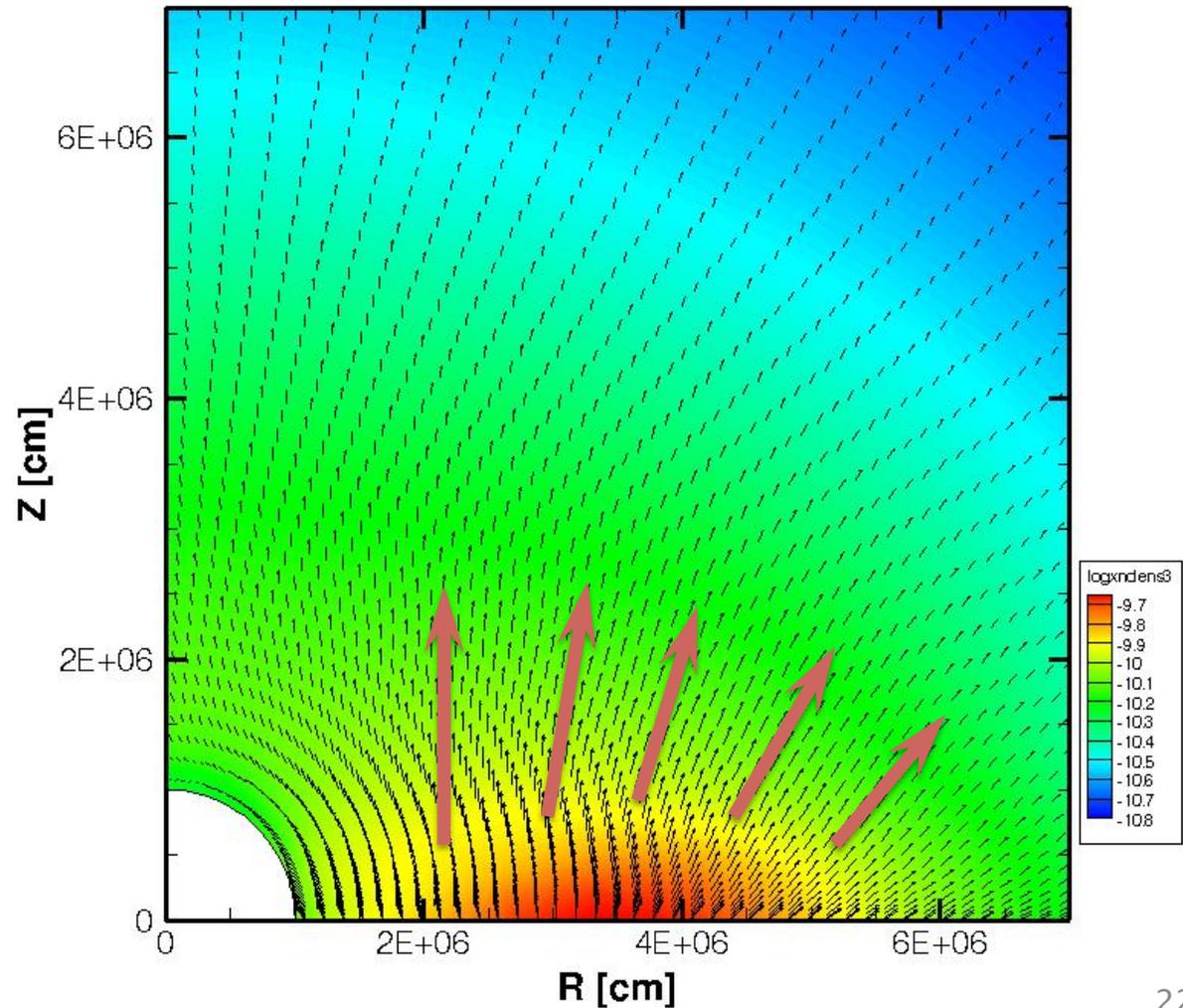
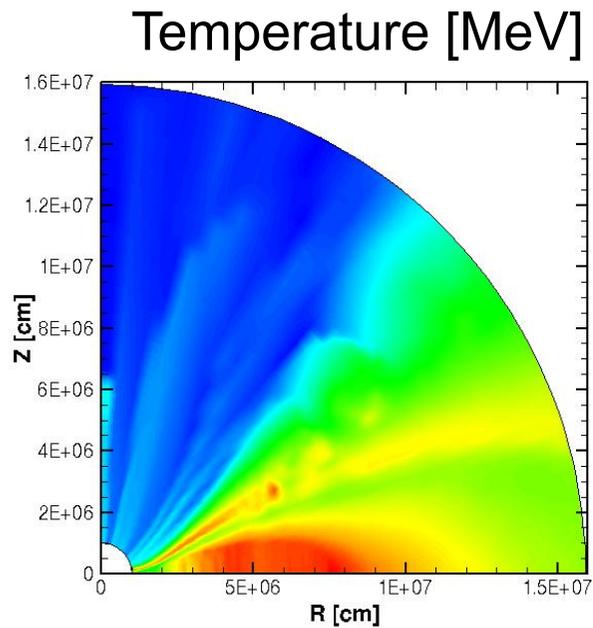
Accretion disk around BH in collapsar

From Sekiguchi (2011)

- Polar flux of thermal neutrinos from disk

ν_μ density & flux

Sumiyoshi (2011)



Preliminary

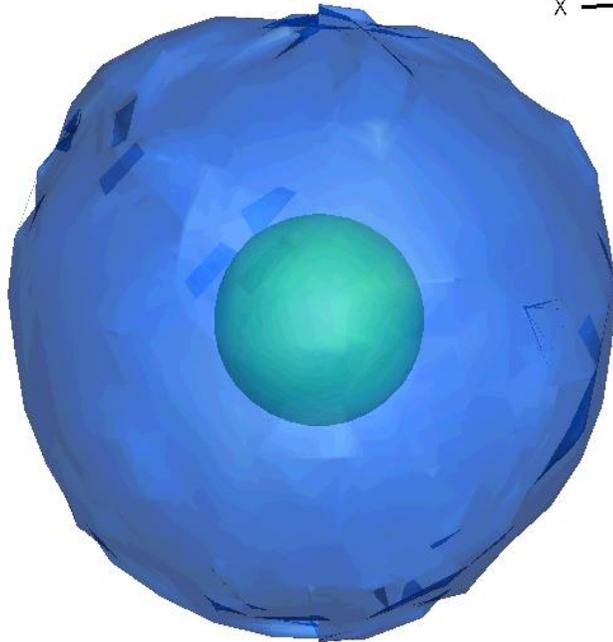
3D supernova core after bounce

From Takiwaki (2011)

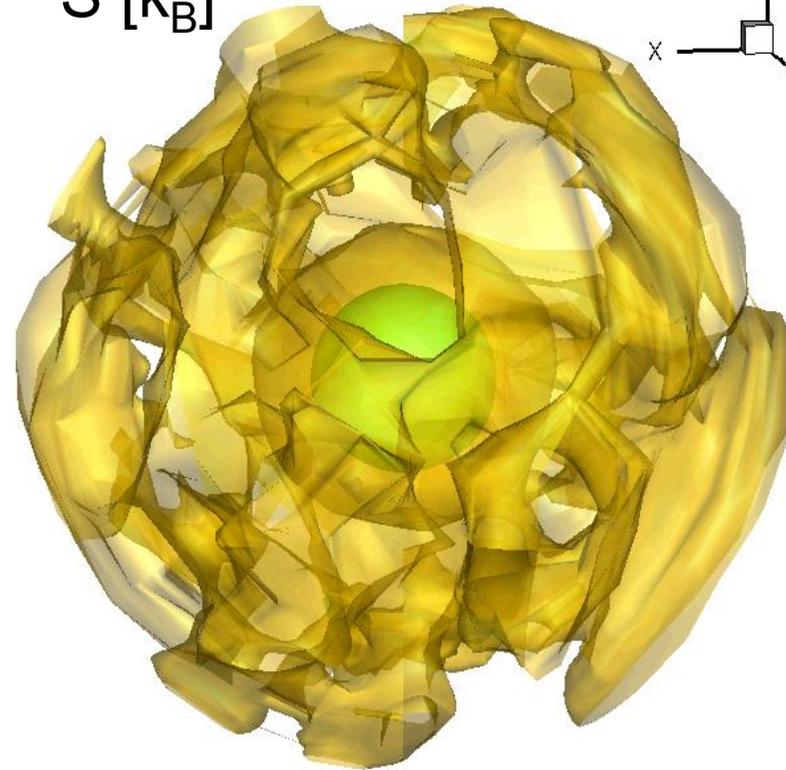
- Fix the ρ , T , Y_e profile & Solve 3D ν -transfer

Iso-Surface

ρ [g/cm³]



S [k_B]



~ 200 km

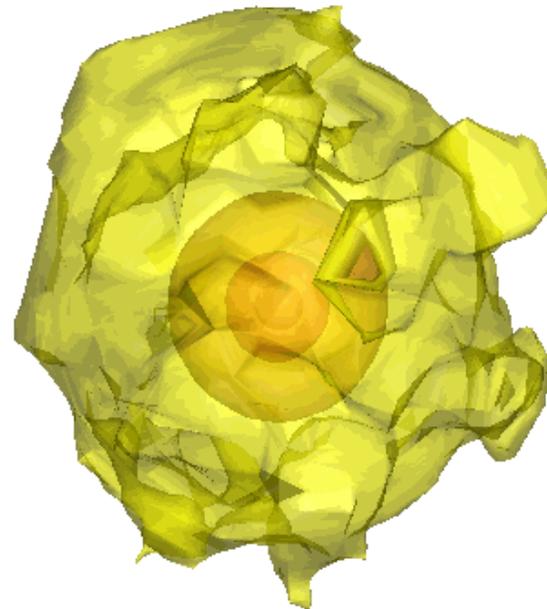
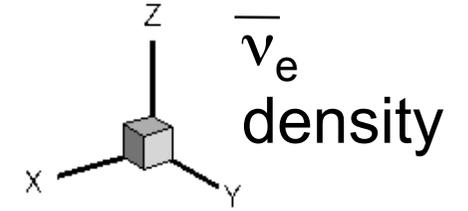
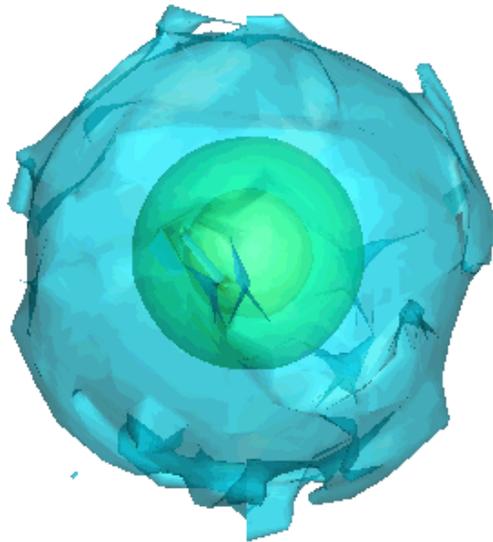
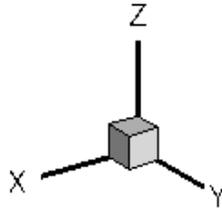


t=197ms

Time evolution of neutrino transfer in 3D

- Emitted neutrinos diffuse out and propagate

ν_e
density
Iso-Surface



t=0~0.2ms

Preliminary

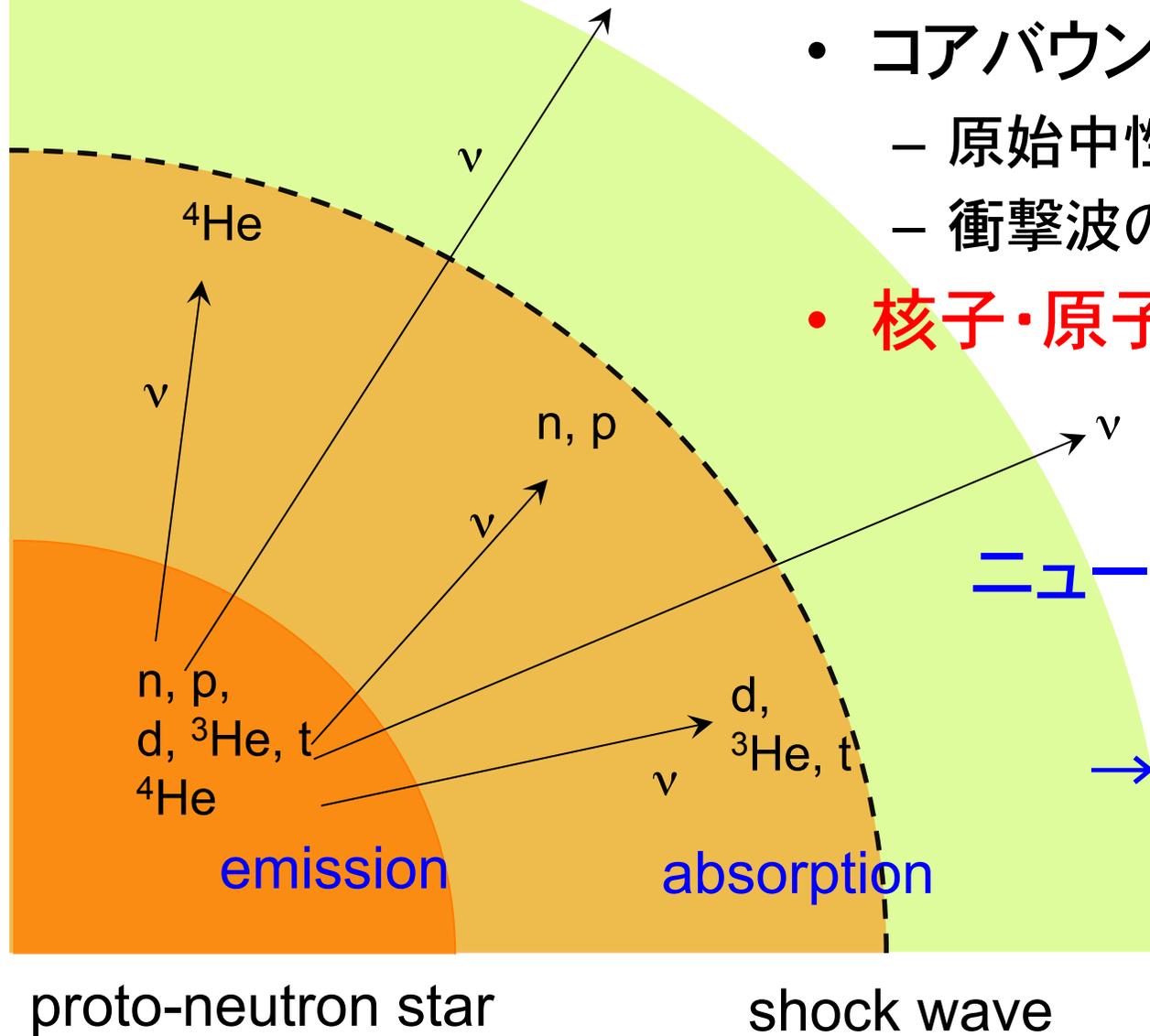
3次元ニュートリノ輻射輸送計算の応用へ

- 3次元でのニュートリノ輻射輸送の解明
 - 近似法の良否を明らかに
 - 近似法開発に役立てる(モーメント量など)
 - 爆発・コラプサーでのニュートリノ加熱量など
- 流体と組み合わせて3次元輻射流体計算へ
 - 爆発メカニズムの本質は3次元? 長倉、古澤
 - 2次元で爆発しても確認は必要
 - 2D: 系統的な計算, 3D: グランドチャレンジ
- 計算科学との連携
 - 並列化・最適化(MPI版)、行列反復解法(前処理)
松古@KEK 今倉・櫻井@筑波大

状態方程式について

原子核の混合組成の影響

ニュートリノ加熱と状態方程式: 組成

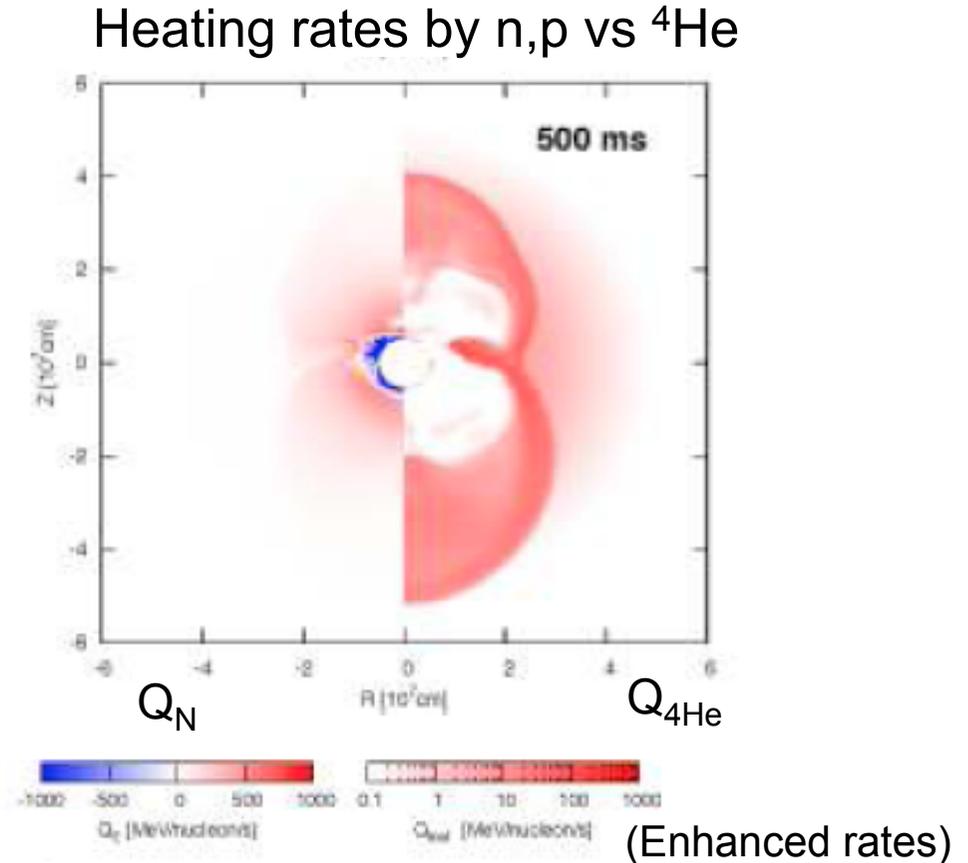
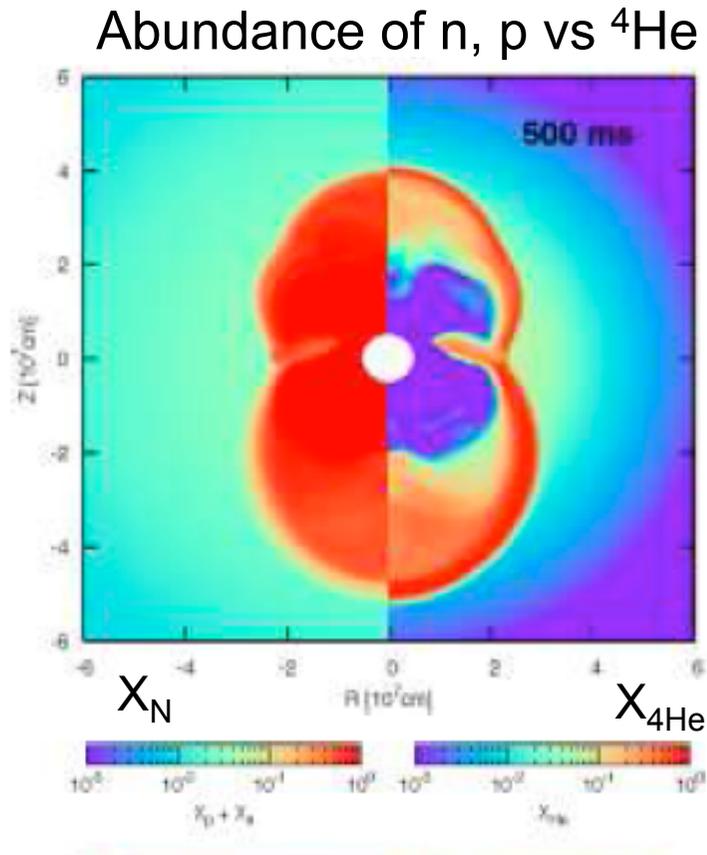


- コアバウンス後において
 - 原始中性子星の表面
 - 衝撃波の背面
- **核子・原子核の組成は?**

ニュートリノ放出・吸収
→ 冷却/加熱
→ 爆発メカニズム

ν -heating mechanism: ^4He in supernova core

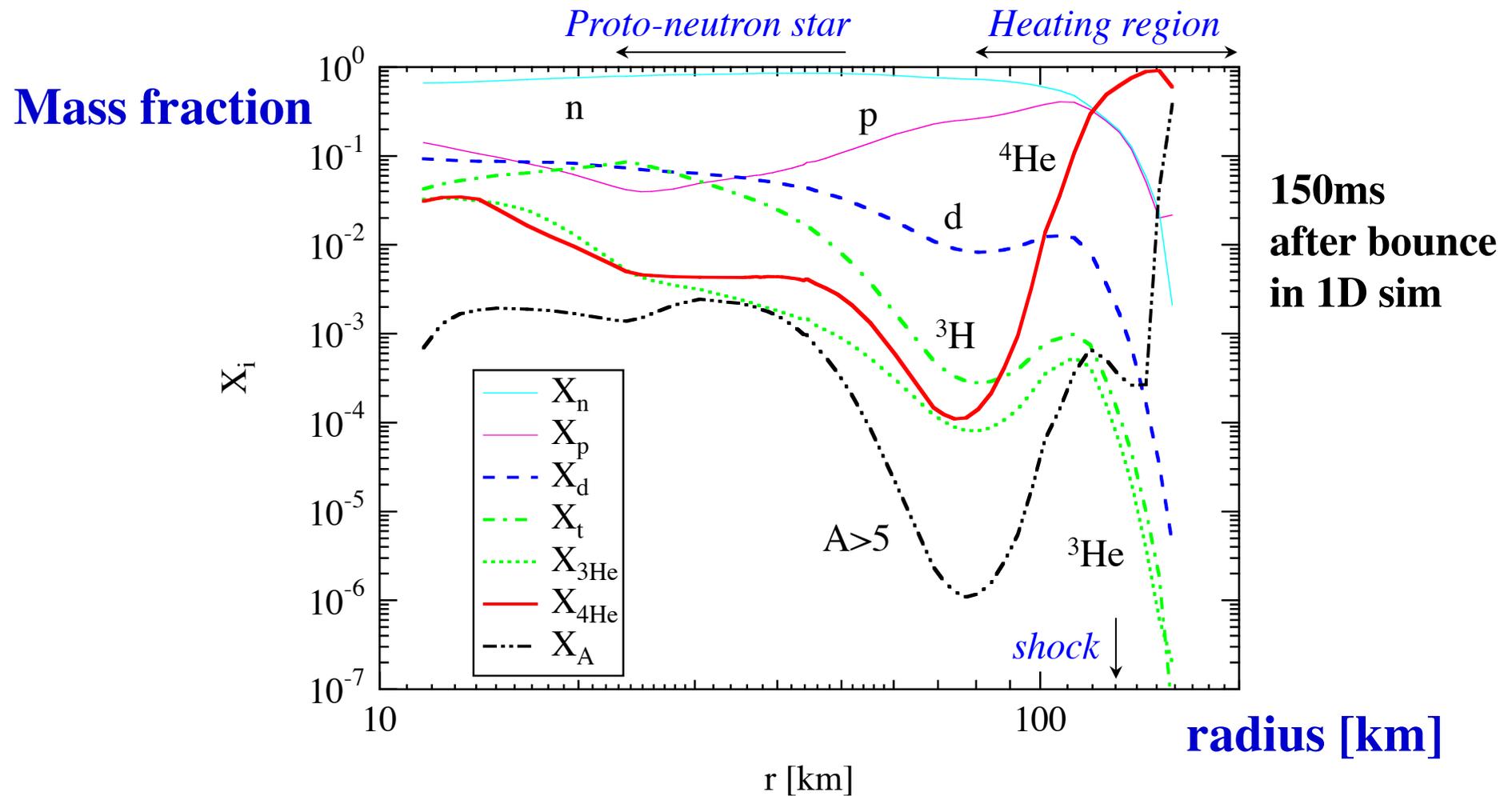
- Inelastic ν - ^4He scattering might help the shock revival Haxton PRC ('88)
- Shock revival IF ν - ^4He rates is 3-10 times larger & $\delta v/v$ Ohnishi ApJ ('07)



- fraction of other clusters ??

超新星コアには様々な軽元素が出現する

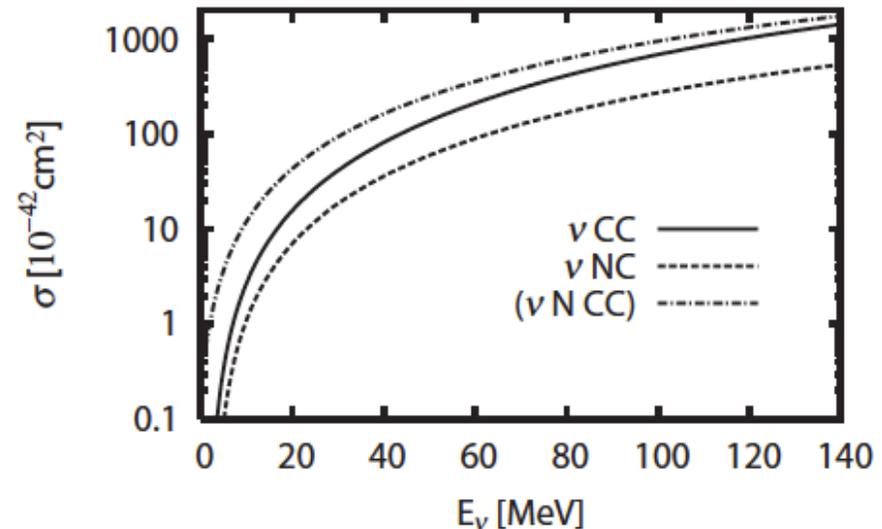
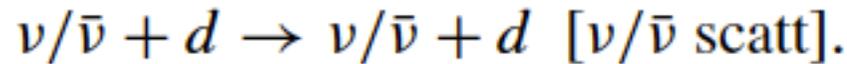
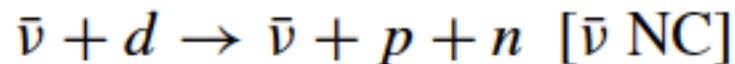
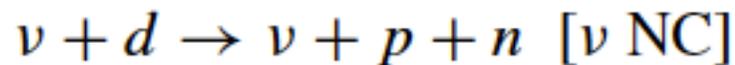
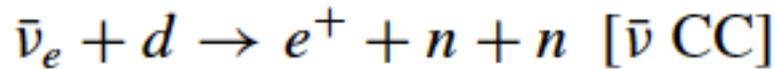
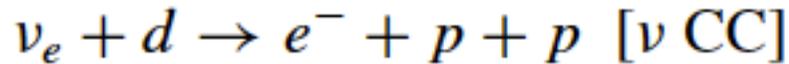
- d, ^3H , ^4He in cooling / heating region



ν -重陽子反応:ニュートリノ加熱への寄与

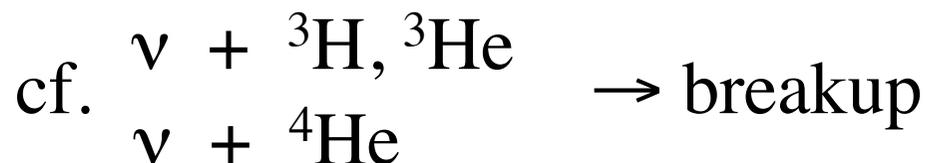
Nakamura, Sumiyoshi and Sato PRC (2009)

- Application of neutrino-deuteron reactions



- Average energy transfer from neutrino to matter

$$\langle \sigma \omega \rangle_{T_\nu} = \int dE_\nu f(T_\nu, E_\nu) \sigma \omega(E_\nu). \quad f(T_\nu, E_\nu) = \frac{N}{T_\nu^3} \frac{E_\nu^2}{e^{E_\nu/T_\nu} + 1}.$$

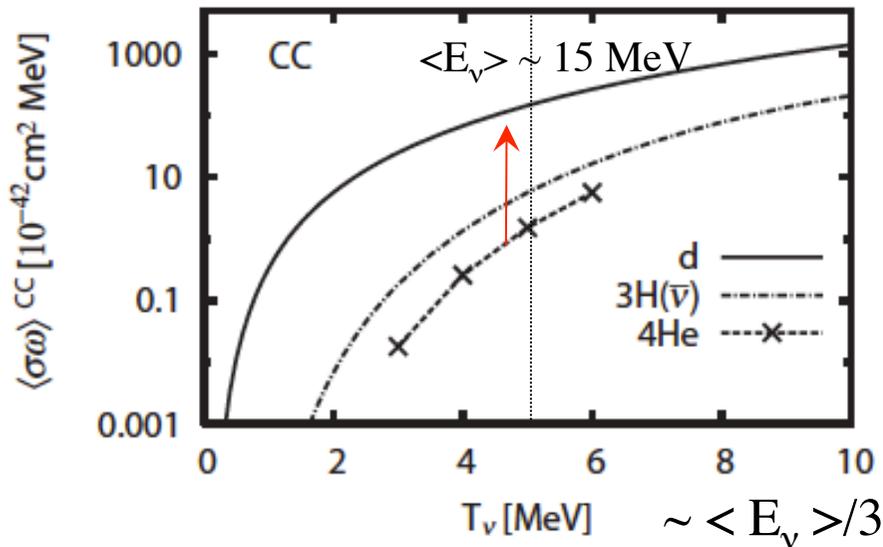


ニュートリノ加熱率の評価

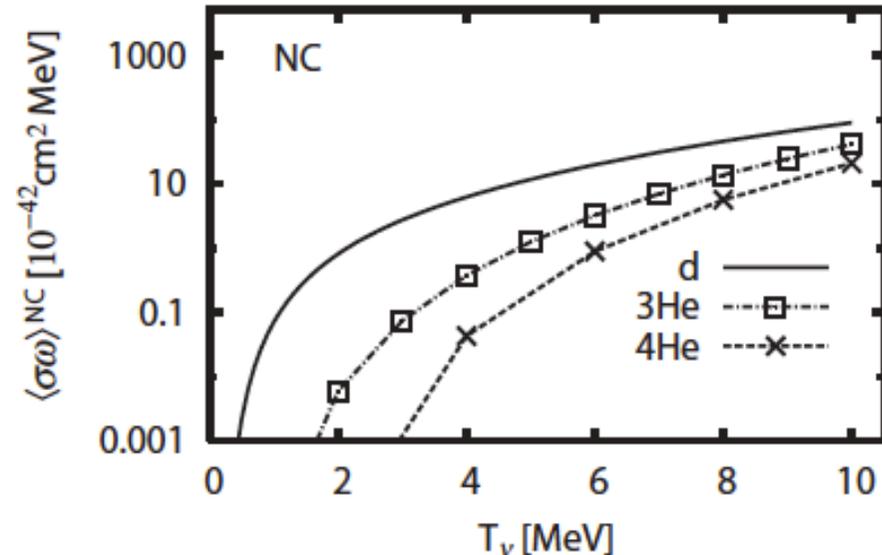
- Nucleon $Q_v^N \approx 223 \cdot \frac{L_{\nu,52} E_{\nu,15}^2}{R_7^2} X_i \left[\frac{\text{MeV}}{s \cdot N} \right]$
- Nuclei $Q_v^A \approx 32 \cdot \frac{L_{\nu,52}}{R_7^2 E_{\nu,15}} X_i \overline{\langle \sigma E \rangle}_{\nu-A} \left[\frac{\text{MeV}}{s \cdot N} \right]$ Haxton PRL ('88)

Average energy transfer x cross section $\overline{\langle \sigma E \rangle}_{\nu-A} [10^{-40} \text{MeVcm}^2]$

- 加熱率: ν -deuteron $>$ ν - ^3He , $t >$ ν - ^4He dが沢山いれば効く



Nakamura, Sumiyoshi & Sato PRC (2009)



O'Connor et al. PRC (2007)

まとめ

- ニュートリノ輻射輸送の重要性
 - ニュートリノ加熱・観測シグナル
 - 1D: 第一原理計算による系統的な探求
 - 親星・ニュートリノ反応・状態方程式
- 3Dニュートリノ輻射輸送が可能になった
 - 物質分布の元で、ニュートリノ輻射は計算できる
 - 3Dニュートリノ輻射流体計算へ
 - 3次元での爆発メカニズムの解明
- 状態方程式における原子核組成
 - 例: 軽元素によるニュートリノ加熱

Thanks for collaboration with

- Supernova research
 - S. Yamada
 - K. Nakazato
 - H. Suzuki
 - H. Kikuchi
- RMF-EOS table
 - H. Shen
 - K. Oyamatsu
 - H. Toki
- Extension of EOS table
 - S. Furusawa
 - C. Ishizuka
- Supercomputing
 - H. Matsufuru
 - A. Imakura
 - T. Sakurai
- Numerical simulations
 - H. Nagakura
 - T. Takiwaki
 - K. Kotake
 - Y. Sekiguchi
- Many body theory
 - M. Takano
 - H. Togashi and others



*Supercomputing resources at KEK,
YITP, UT, RCNP, NAOJ, JAEA*

Core-collapse supernovae is one of
the target simulations on K-computer