

非軸対称性が引き起こす 超新星ニュートリノ集団振動

(*arXiv:2011.09635*)

財前 真理 (東大天文 D2)

with 堀内俊作 (バージニア工科大学), 滝脇知也 (国立天文台), 固武慶 (福岡大学),
吉田敬 (東大天文), 梅田秀之 (東大天文), John F. Cherry (サウスダコタ大学)

新学術「地下宇宙」

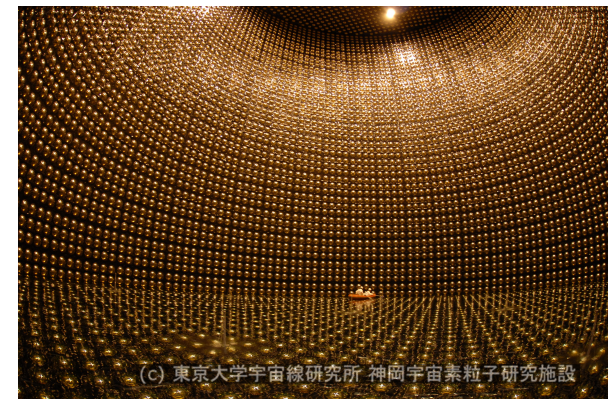
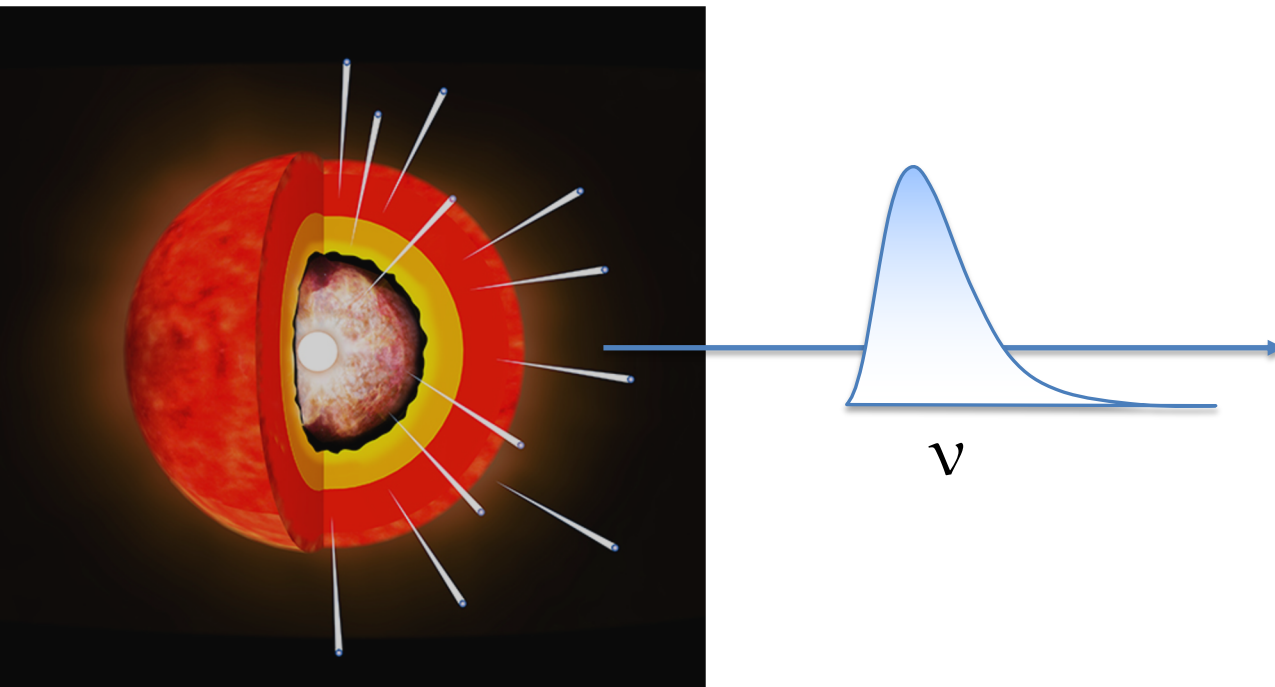
第7回超新星ニュートリノ研究会 @オンライン 2021/01/07-08

超新星ニュートリノ

ニュートリノは超新星爆発において重要な関わりを持つ。

- ・爆発メカニズム（ニュートリノ加熱）
- ・原始中性子星の冷却（状態方程式）
- ・元素合成（ニュートリノ反応）

観測で把握できるのが一番だが、稀なので一先ず理論で模索。



Neutrino detector

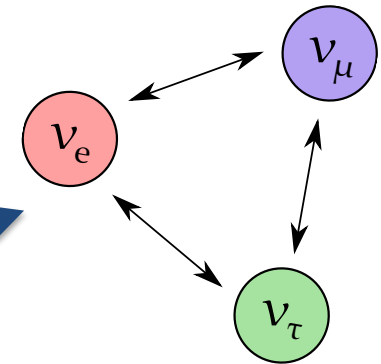
超新星ニュートリノ

ニュートリノの厄介な点の1つ：ニュートリノ振動
伝搬するだけで勝手にフレーバーが変わる。
地上に届く頃にはニュートリノは元々持っていたフレーバーの情報が失われる。
逆算するにもニュートリノ振動機構が複雑。

MSW resonance
~ O(1000 km)

Collective oscillation
~ O(10-100 km)

Vacuum oscillation
~ outside SN



超新星でのニュートリノ振動

超新星内部：3種類のニュートリノ振動

(質量 & 背景電子 & ニュートリノ)

$$i(\partial_t + \mathbf{v} \cdot \nabla) \rho_i$$

$$= \left[\underbrace{+U \frac{M^2}{2E_\nu} U^\dagger}_{\text{真空振動}} + \underbrace{\sqrt{2}G_F N_e}_{\text{物質振動}} + \underbrace{\sqrt{2}G_F \int d\Gamma' (1 - \cos \theta_{ik}) (\rho'_{\nu_k} - \bar{\rho}'_{\nu_k})}_{\text{集団振動}}, \rho_i \right]$$

「真空振動」
質量二乗差 & 混合角

「物質振動」
電子密度分布

Phase dispersion
vs.
Phase synchronization

「集団振動」
ニュートリノ-ニュートリノ相互作用

ニュートリノ集団振動

ニュートリノ集団振動：

ニュートリノ同士の相互作用が原因の非線形効果。
コアに近いO(100-1000) kmで振動効果が生じる。

ρ_p : ニュートリノ密度行列

$$i \frac{\partial \rho_p}{\partial t} = [H_{\text{VO}} + H_{\text{MSW}} + \overbrace{H_{\nu\nu}}^{\text{Non-linearity}}, \rho_p]$$

Non-linearity

$$H_{\nu\nu} = \sqrt{2} G_F \int d\mathbf{q} (1 - \mathbf{v}_p \cdot \mathbf{v}_q) (\rho_q - \bar{\rho}_q)$$

Coupling

PNS

Bulbモデル

$\rho_\nu(\{t\}, \{r, \Theta, \Phi\}, \{E, \theta, \phi\}) : (1+3+3)\text{-D}, 7\text{次元問題}$

└─ $\rho_\nu(\{r, \Theta, \Phi\}, \{E, \theta, \phi\}) : (3+3)\text{-D}$

定常仮定

└─ $\rho_\nu(\{r\}, \{E, \theta, \phi\}) : (1+3)\text{-D}$

空間球対称

└─ $\rho_\nu(\{r\}, \{E, \theta\}) : (1+2)\text{-D}$

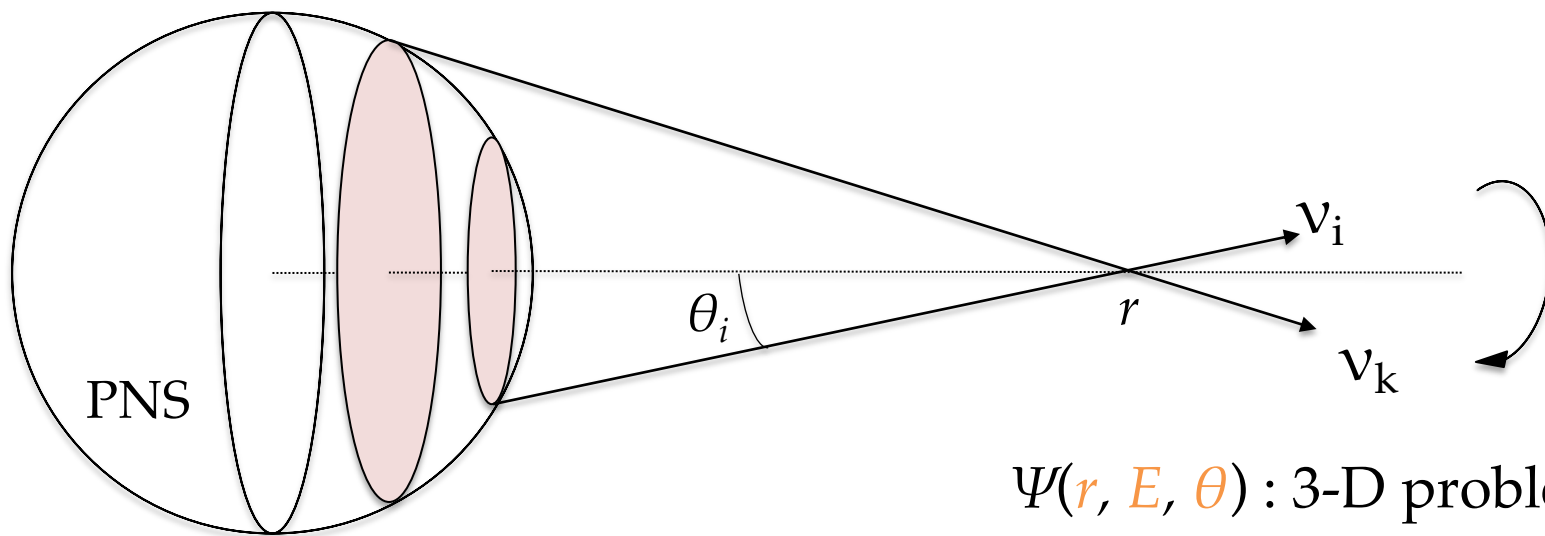
軸対称

(Bulbモデル)

対称性以外の近似:

- 等方ニュートリノ放射 (具体的な運動量角度分布を無視)
- Free-streaming (散乱なし)
- ...

Bulbモデル



$\Psi(r, E, \theta) : 3\text{-D problem}$

(Duan+ 2006)

空間グリッド :

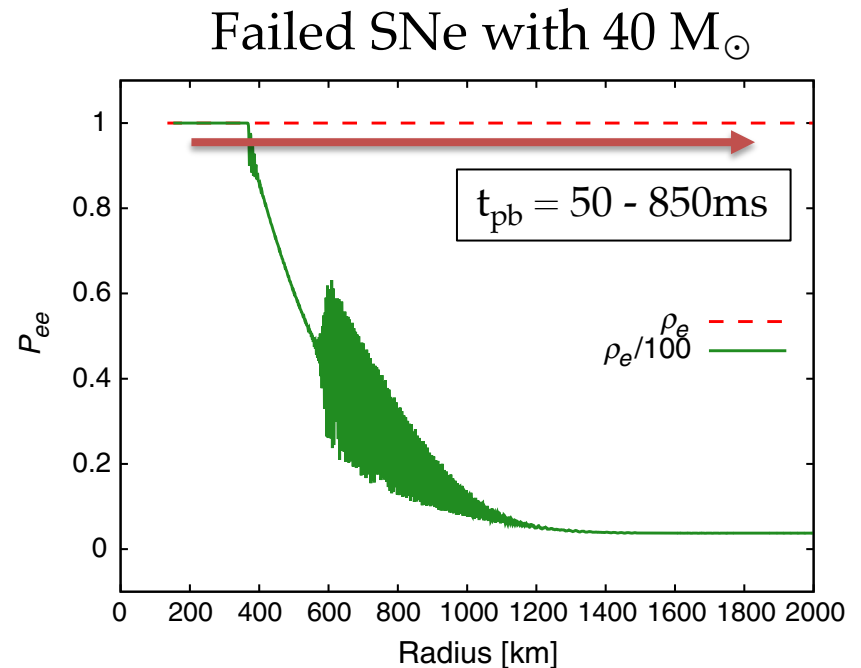
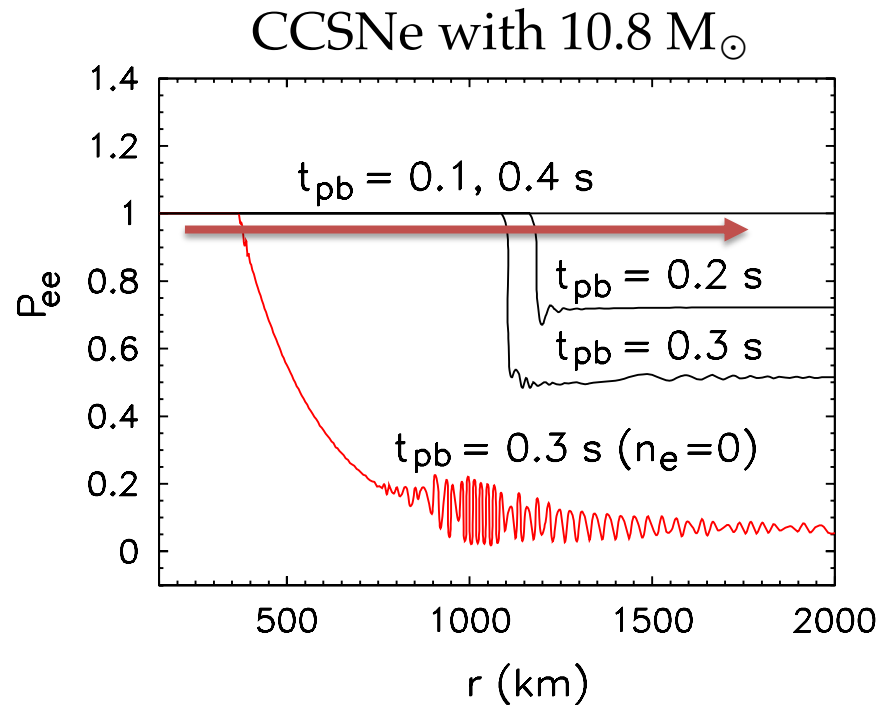
$\Delta r \sim \mathbf{O(1cm)} - \mathbf{O(1m)}$, 振動波長に依存 (外に行くほど長くなる)

$\mathbf{r \in [100, 1000] km}$ 物質振動 λ vs. 集団振動 μ

運動量空間 :

$$N_{\text{flavor自由度}} \times N_E \times N_\theta = 16 \times 200 \times 2048 \sim \mathbf{6 \times 10^6}.$$

Matter suppression



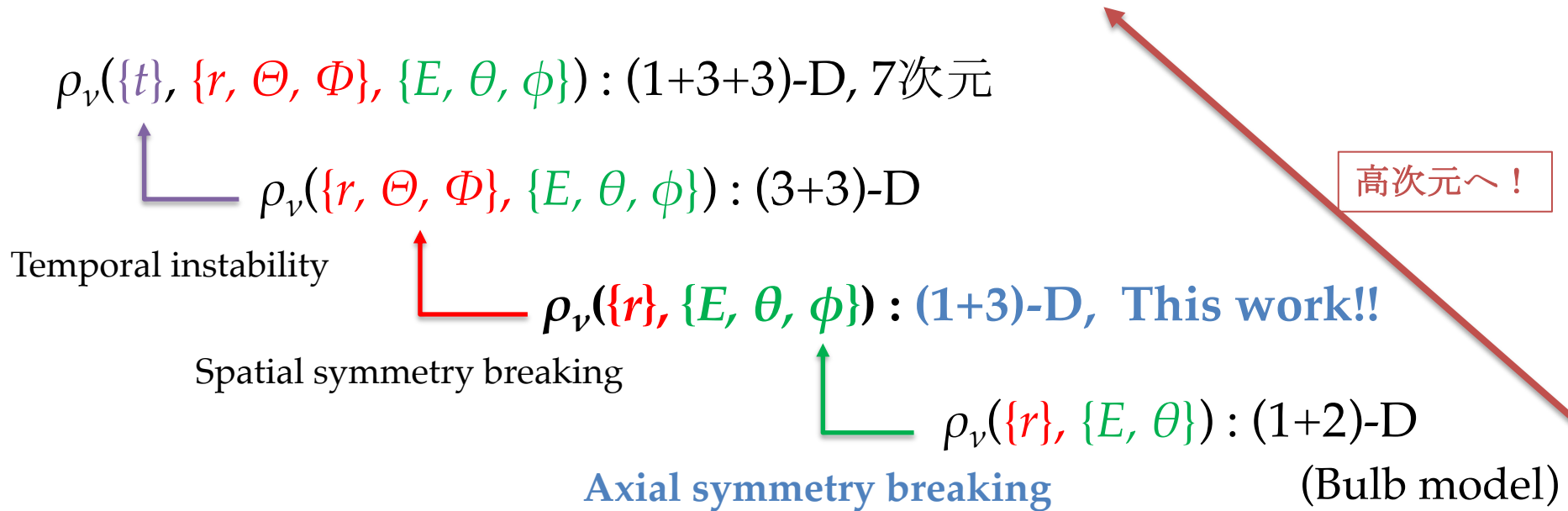
(Chakraborty+ 2011, Zaizen+ 2018)

背景電子の密度が高いと、集団振動が抑制される効果が多く報告されている。(Esteban-Pretel+ 2008, Dasgupta+ 2012, MZ+ 2020, Sasaki+ 2020)

親星の質量が大きいと集団振動が効く半径帯の背景密度が高くなる。

実はCCSNeで影響は小さい・・・？

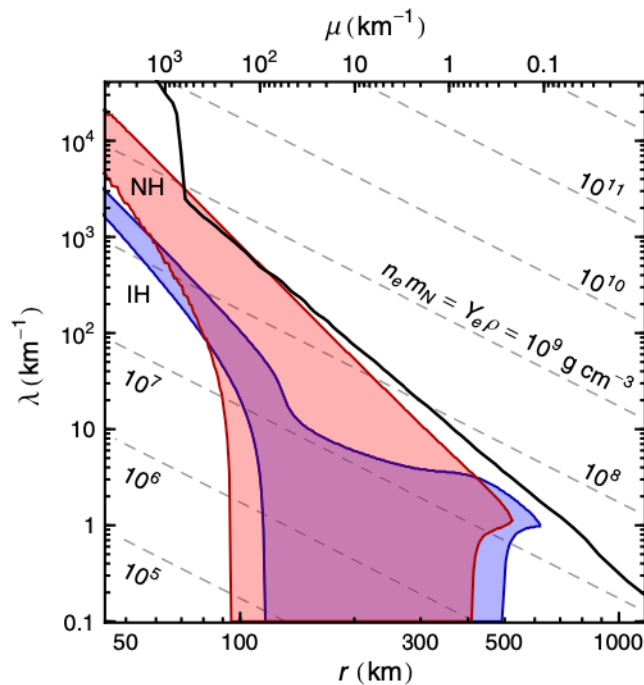
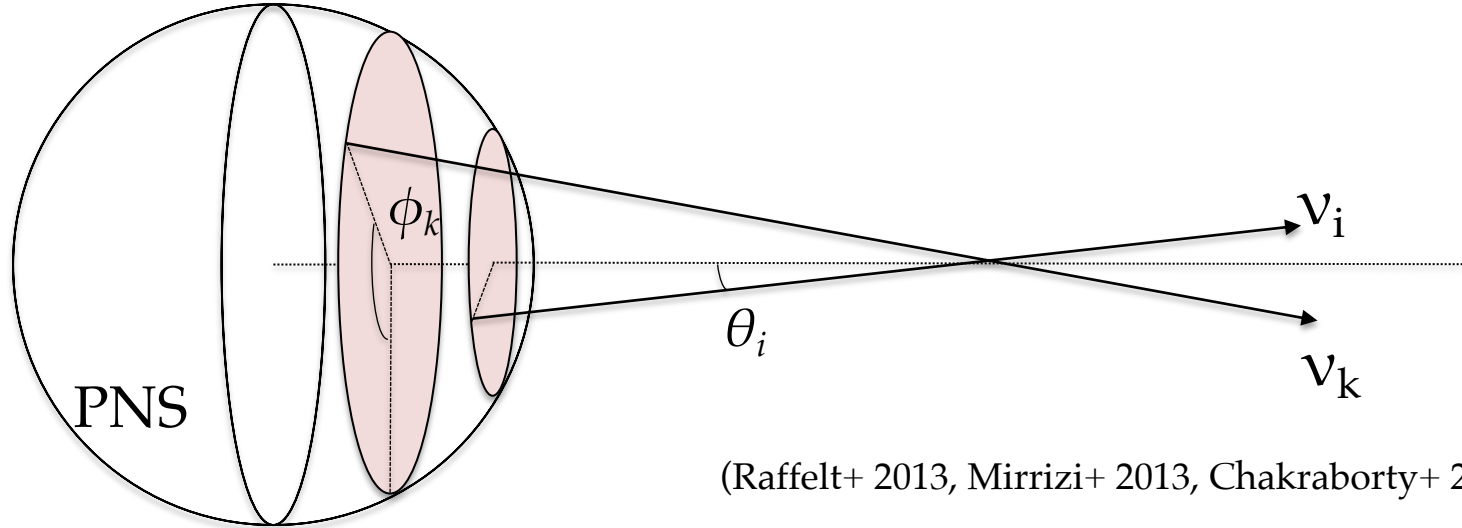
対称性の破れ



対称性以外の近似:

- Isotropic emission $\rightarrow$ Fast flavor conversions
- Free-streaming propagation $\rightarrow$ Halo effects
- ...

軸対称の破れ

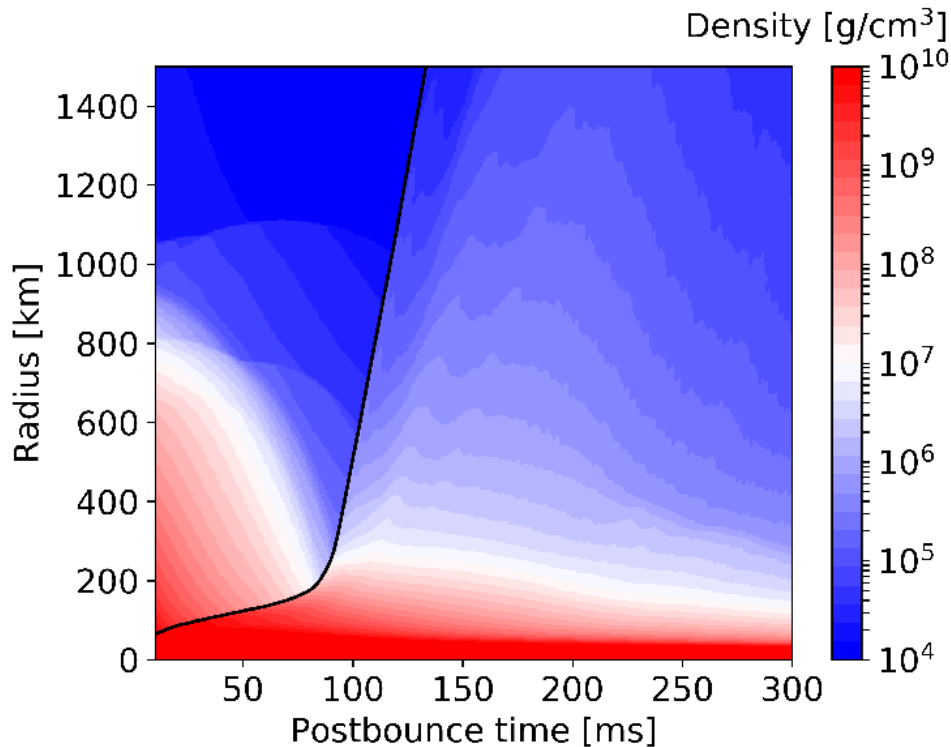


不安定性解析：

→ 非軸対称性の成長が物質抑制を幾
らか打ち破れる？

不安定領域が密度1桁ぐらい上に。

(1+3)-D 計算



電子捕獲型超新星爆発モデル
8.8 M_☉

密度分布の時間変化。
黒線は衝撃波半径。

100msで衝撃波が大きく成長し、
巻き上げられた物質により
150ms周辺では密度分布が一時的
に高くなっている。

初期条件 + 非軸対称な摂動

(空間は1次元で計算しているので摂動を与えて代用)

Neutrino flux:

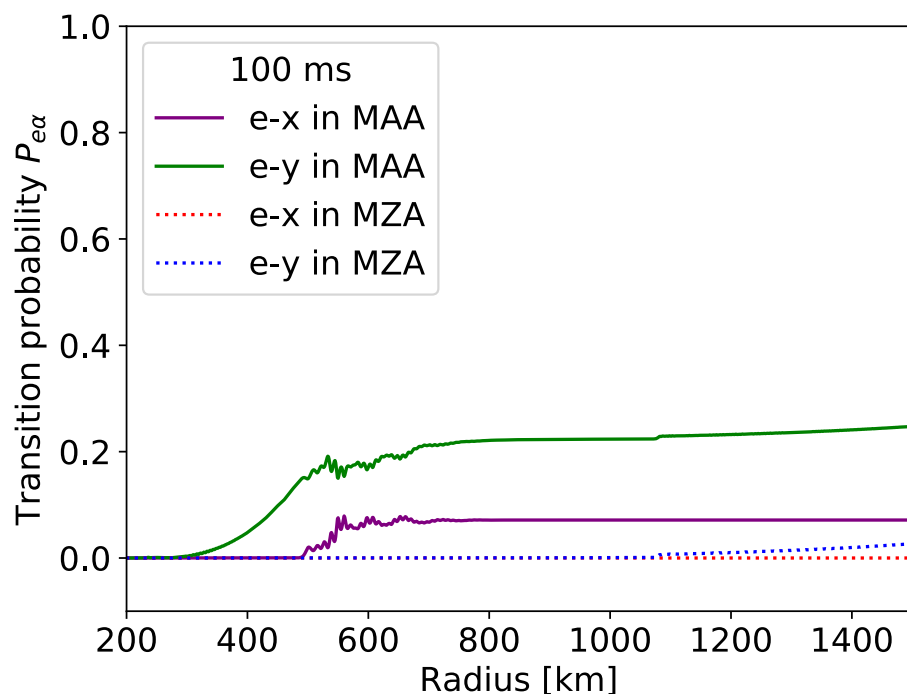
$$\Phi_{\nu_\alpha} \rightarrow (1 + \varepsilon \cos \phi) \Phi_{\nu_\alpha} \quad (\varepsilon \sim 10^{-2})$$

運動量空間：

$$N_{\text{flavor自由度}} \times N_E \times N_\theta \times N_\phi = 16 \times 200 \times 2048 \times 64 \sim 4 \times 10^8.$$

計算量およそ100倍

遷移確率



100msでの電子ニュートリノの遷移確率 $P(e \rightarrow \alpha)$ の動径進化。

MZA : 軸対称 (Bulb model)
(Multi-Zenith-Angle)

MAA : 非軸対称 (拡張モデル)
(Multi-Azimuthal-Angle)

(x, y) は非電子型 (μ, τ) の線形結合

$$(\nu_e, \nu_x, \nu_y)^T = R_{23}^\dagger(\theta_{23}) (\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)^T$$

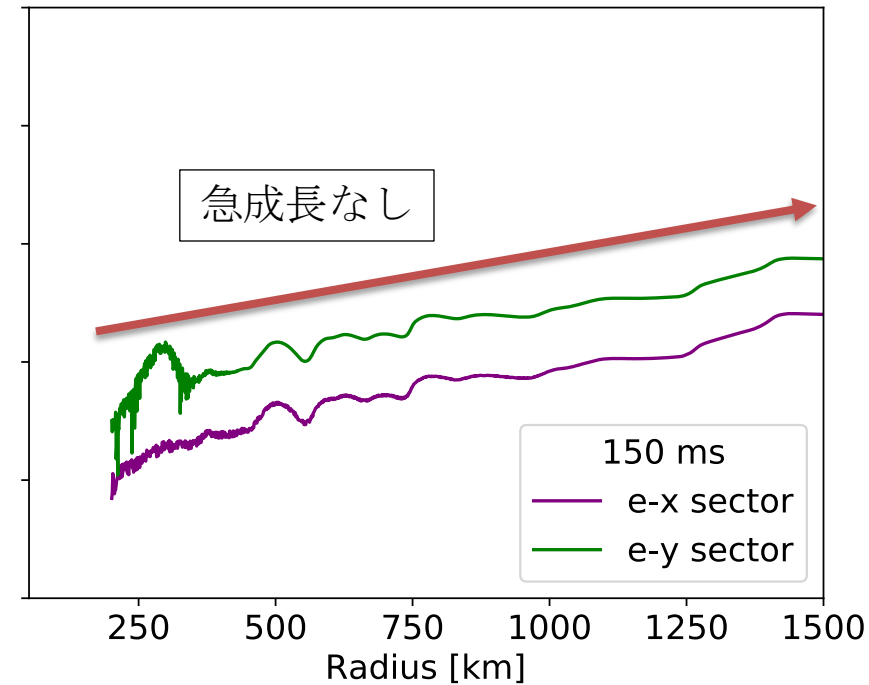
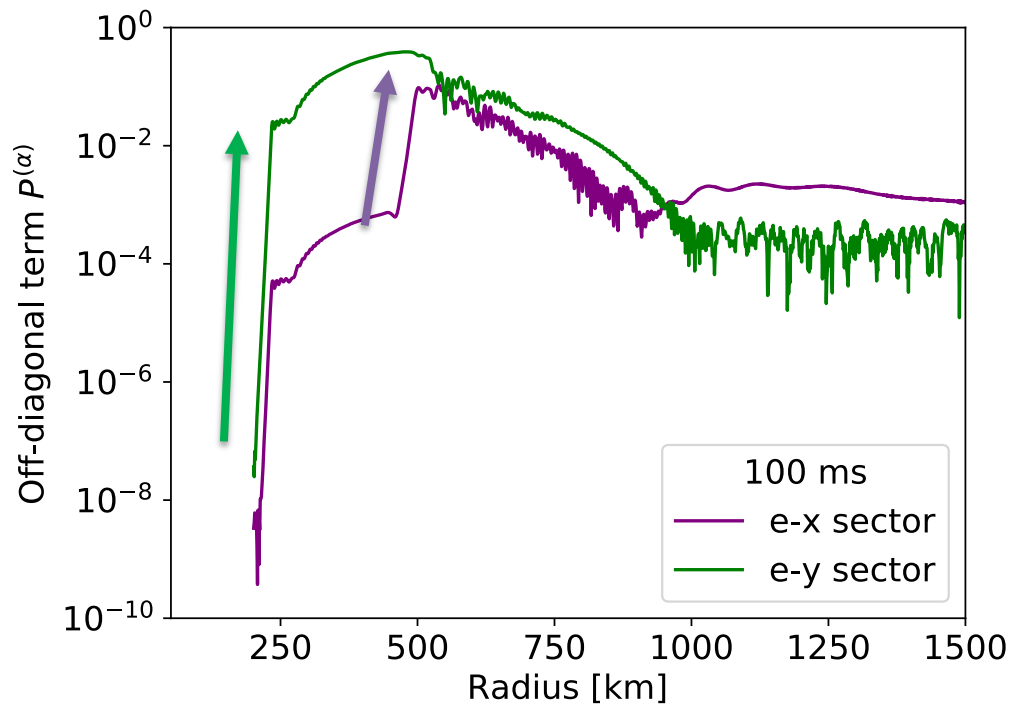
100ms :

- ・ 軸対称 (**MZA**) : 振動効果なし
- ・ 非軸対称 (**MAA**) : 数100km あたりで振動効果あり

150ms :

- ・ 非軸対称な場合でも振動効果が見られず (グラフなし)

非軸対称性の成長



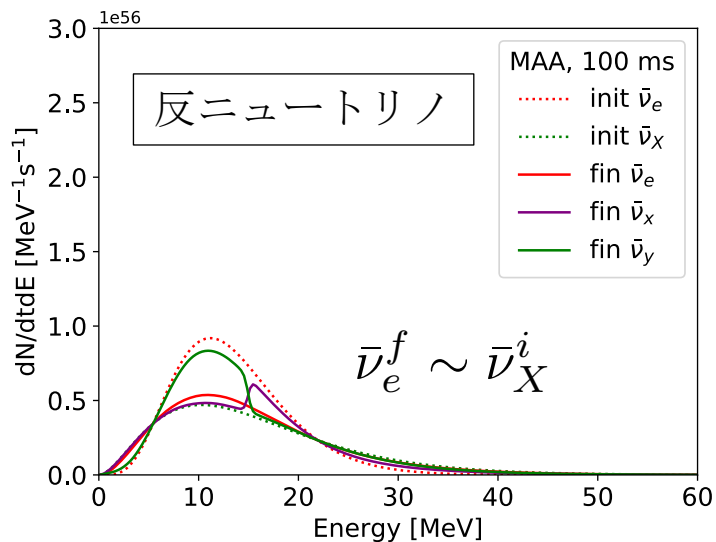
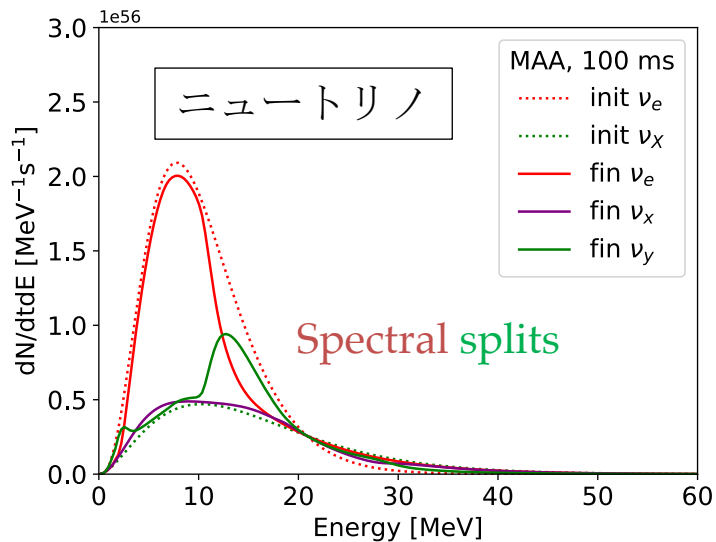
$$P^{(\alpha)} = \int d\Gamma' |\rho_{e\alpha}| \cos \varphi'$$

$\rho_{e\alpha}$ が $O(1)$ 近くまで成長するとフレーバー変換が起きる。
もし非軸対称性が成長していないなら φ に対して一様なので $P^{(\alpha)} \ll 1$ になる。

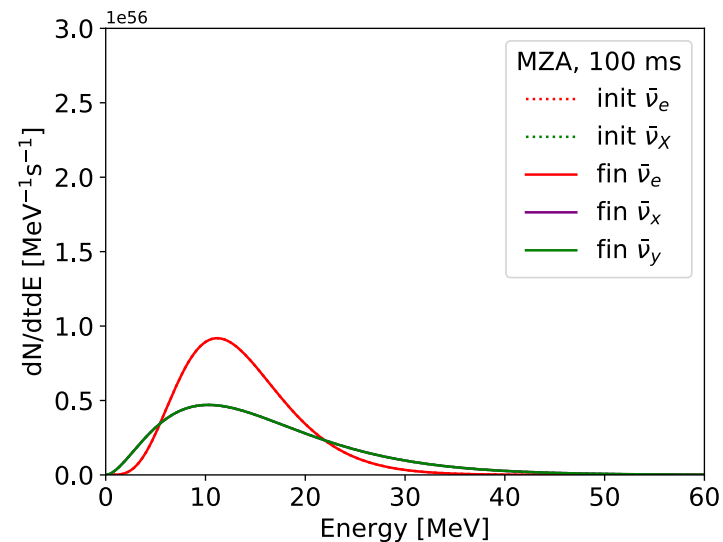
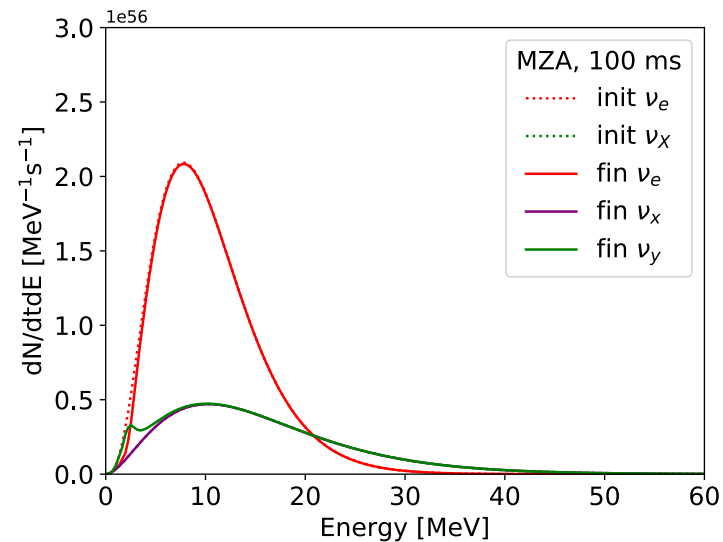
150ms では密度分布が高く、非軸対称性すら成長できなくなっている。

スペクトル変化 @100ms, 1500km

非軸対称 (1+3D)



軸対称 (1+2D)



まとめ

- 超新星においてニュートリノは重要な役割を持つ。
- 観測するにもニュートリノ振動の考慮が厄介。
 - 特にニュートリノ集団振動が7次元問題で複雑。対称性でなんとか。
- 背景密度が高いと物質振動が集団振動を阻害する。
- 対称性を破る効果でこれを打ち破れる可能性が。
- 集団振動に非軸対称性を考慮すると、軸対称での物質抑制を超えて振動効果が見られる場合がある。
- 一方で、それでも超えられないレベルも存在する。
- 今後更なる高次元化で抑制の状況が変わるかも。
 - 不安定性解析によれば、特に非定常にすると物質振動をキャンセルする周波数が発生するらしい (Dasgupta+ 2015, Capozzi+ 2016,)
 - 問題は計算量。