

ニュートリノ反応に依存する ニュートリノ集団振動の振る舞い

(Spectral diversity in collisional neutrino-flavor conversion:
Flavor equipartition or swap)

財前 真理 (東大駒場)

Masamichi ZAIZEN

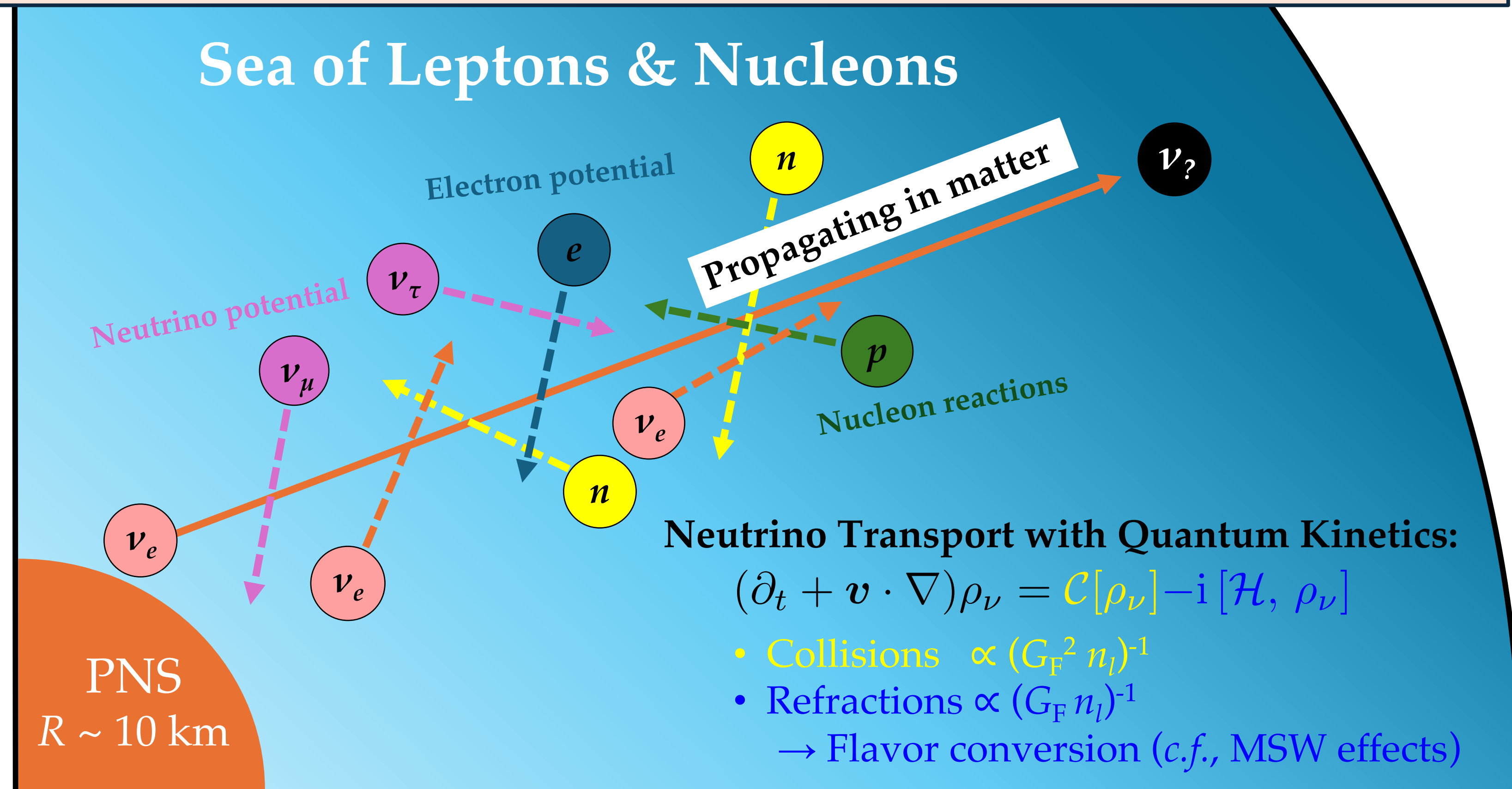
Phys., Rev. D **111**, 103029 (2025)
arXiv:2502.09260



Abstract:

超新星爆発の中心部ではニュートリノ同士の相互作用が卓越し、その結果ニュートリノ集団振動によりそのフレーバーが入れ替わる現象が起きる。近年、こうした極限環境で集団振動が起きる可能性についての議論が盛んに行われ、collisional flavor instability (CFI) と呼ばれる背景物質との相互作用を通して生じる不安性が存在することが見つかった。線形安定性解析により、このCFIは他の不安定性と比べて比較的密度の高く、ニュートリノにとってより不透明な領域で生じることが判明した。本発表では、与えるニュートリノ反応率を変えた際にどのようにこのCFIによるフレーバー変換が呼応していくかに注目し、実際の超新星ダイナミクスへもたらされる影響について議論する。

1. Collective Neutrino Oscillation



量子運動論的 + ニュートリノ輸送方程式 (= beyond Boltzmann)

$$(\partial_t + \mathbf{v} \cdot \nabla) \rho = \underbrace{-i[\mathcal{H}_{\text{lep}}, \rho]}_{\text{振動項}} + \underbrace{\mathcal{C}_{\text{col}}[\rho]}_{\text{衝突項}}$$

移流項

振動項

衝突項

$$\rho = \begin{pmatrix} f_{ee} & f_{e\mu} & f_{e\tau} \\ f_{\mu e} & f_{\mu\mu} & f_{\mu\tau} \\ f_{\tau e} & f_{\tau\mu} & f_{\tau\tau} \end{pmatrix}$$

密度行列 (not 分布関数 $f_{\alpha\alpha}$)

$$\mathcal{H}_{\text{lep}} = \sum_{\ell} \sqrt{2} G_F \int \frac{d^3 q_{\ell}}{(2\pi)^3} (1 - \mathbf{p}_{\nu} \cdot \mathbf{q}_{\ell}) [\rho_{\ell}(q_{\ell}) - \bar{\rho}_{\ell}^*(q_{\ell})]$$

ニュートリノ自己相互作用

これが更にニュートリノ輻射場を変える。

レプトンからのポテンシャル → 物質振動

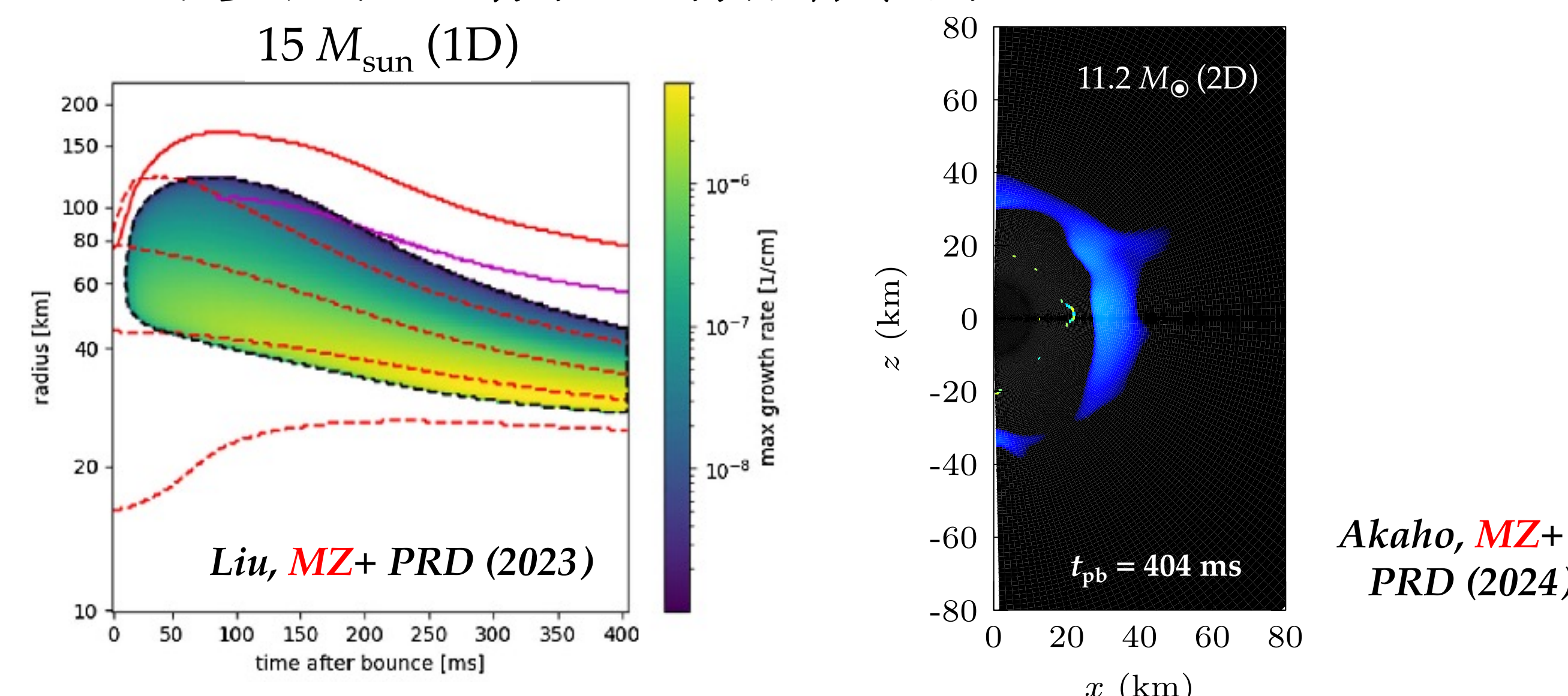
・w/ 電子: MSW効果

・w/ ニュートリノ: 非線形な「集団振動」

2. Motivation & Method

密度行列の非対角項に対する線形安定性解析

→ 不安定性の存在 + 線形成長率



親星質量によらず、密度 $10^{10-12} \text{ g cm}^{-3}$ 程度でまだ物質と結合している領域で不安定性が発生する。

自己相互作用の振動スケールは $\sim G_F N_{\nu} \sim O(\text{ps} - \text{ns})$ と非常に短いため、ニュートリノ輸送計算とは別にこの非線形挙動を理解したい。

Numerical Setup :

エネルギー分布:

$$f_{\nu_a} = \frac{\alpha}{\exp(E_{\nu}/T_{\nu}) + 1}$$

ニュートリノ反応率:

$$\mathcal{C}_{\text{col}}[\rho] = R_{\nu}(E_{\nu}) \begin{pmatrix} 0 & \rho_{xe} \\ \rho_{ex} & 0 \end{pmatrix}$$

$$\sqrt{2} G_F N_{\nu_e} = 10^4 \text{ km}^{-1}$$

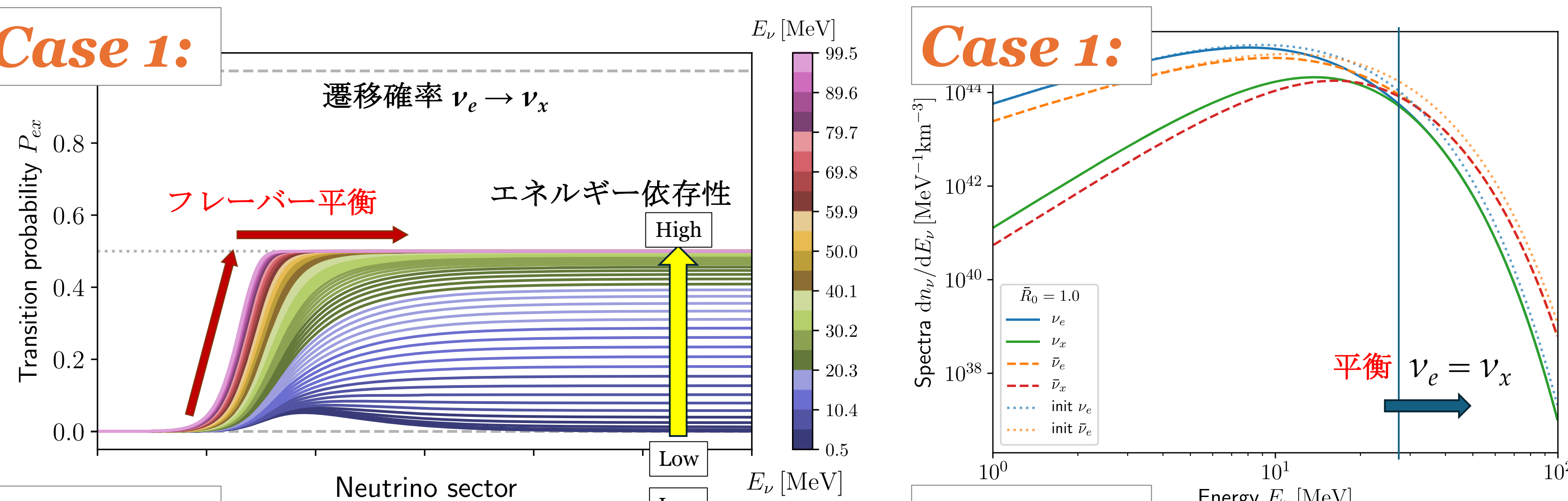
$$R_{\nu}^{(-)}(E_{\nu}) = R_0^{(-)} \left(\frac{E_{\nu}}{10 \text{ MeV}} \right)^2$$

	ν_e	$\bar{\nu}_e$	$\nu_x \bar{\nu}_x$
T_{ν}	4 MeV	5 MeV	-
α	1	0.8	0

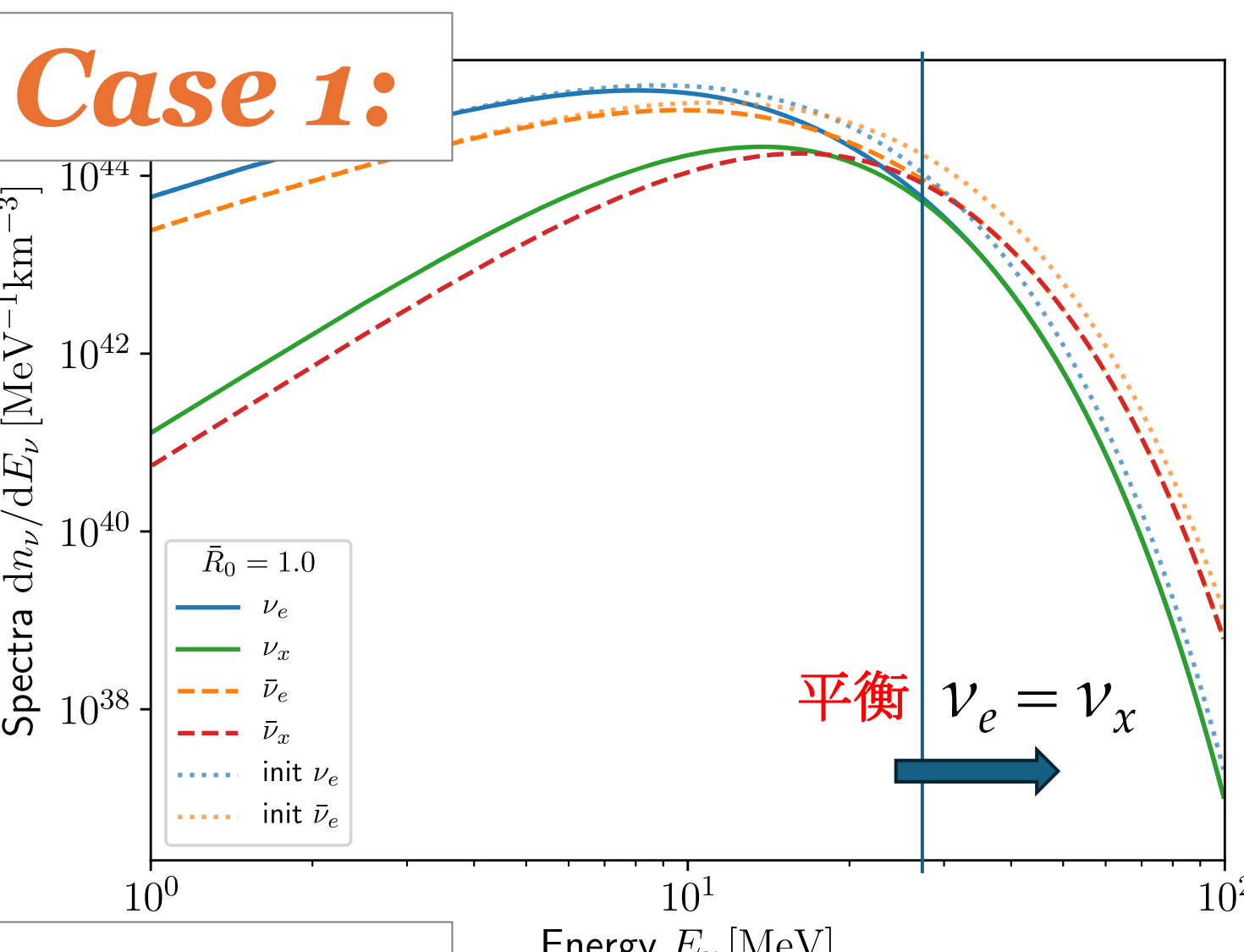
非対角成分のみ
(量子論的な効果のみ抽出)

3. Results for Collisional Neutrino-Flavor Conversion in Multi Energy

Case 1:



Case 1:



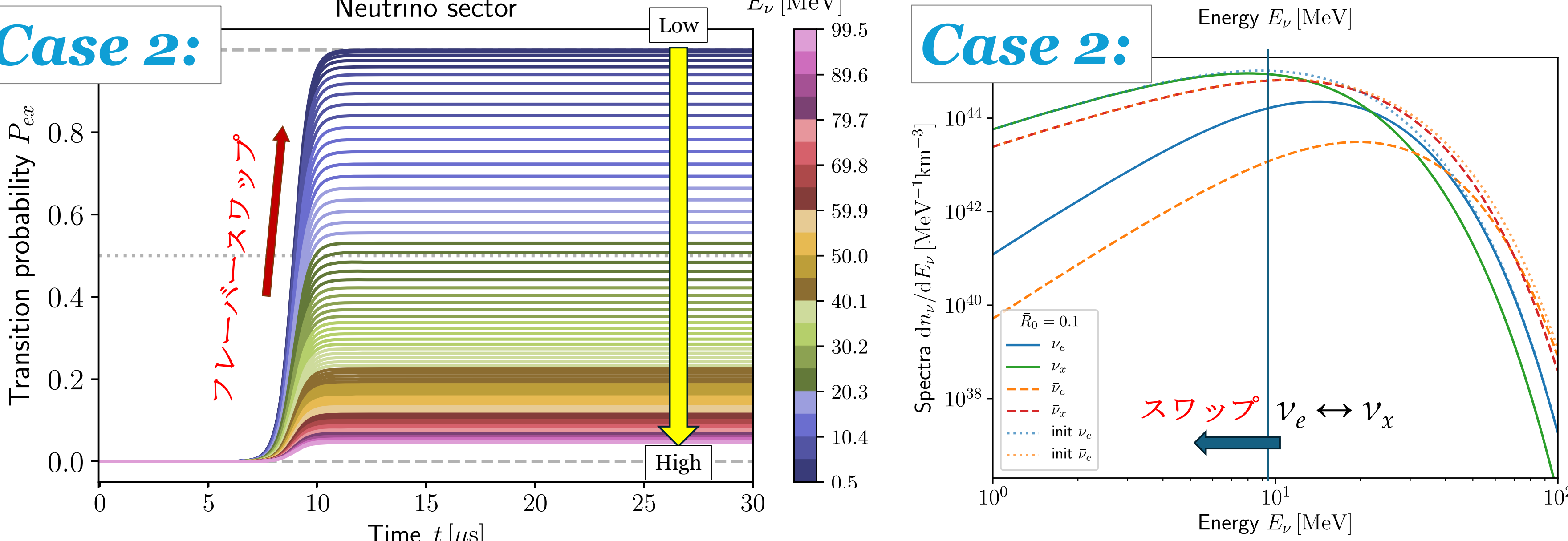
Case 1:

$$N_{\nu_e} > N_{\nu_e} \ \& \ \langle R_{\nu_e} \rangle > \langle R_{\nu_e} \rangle$$

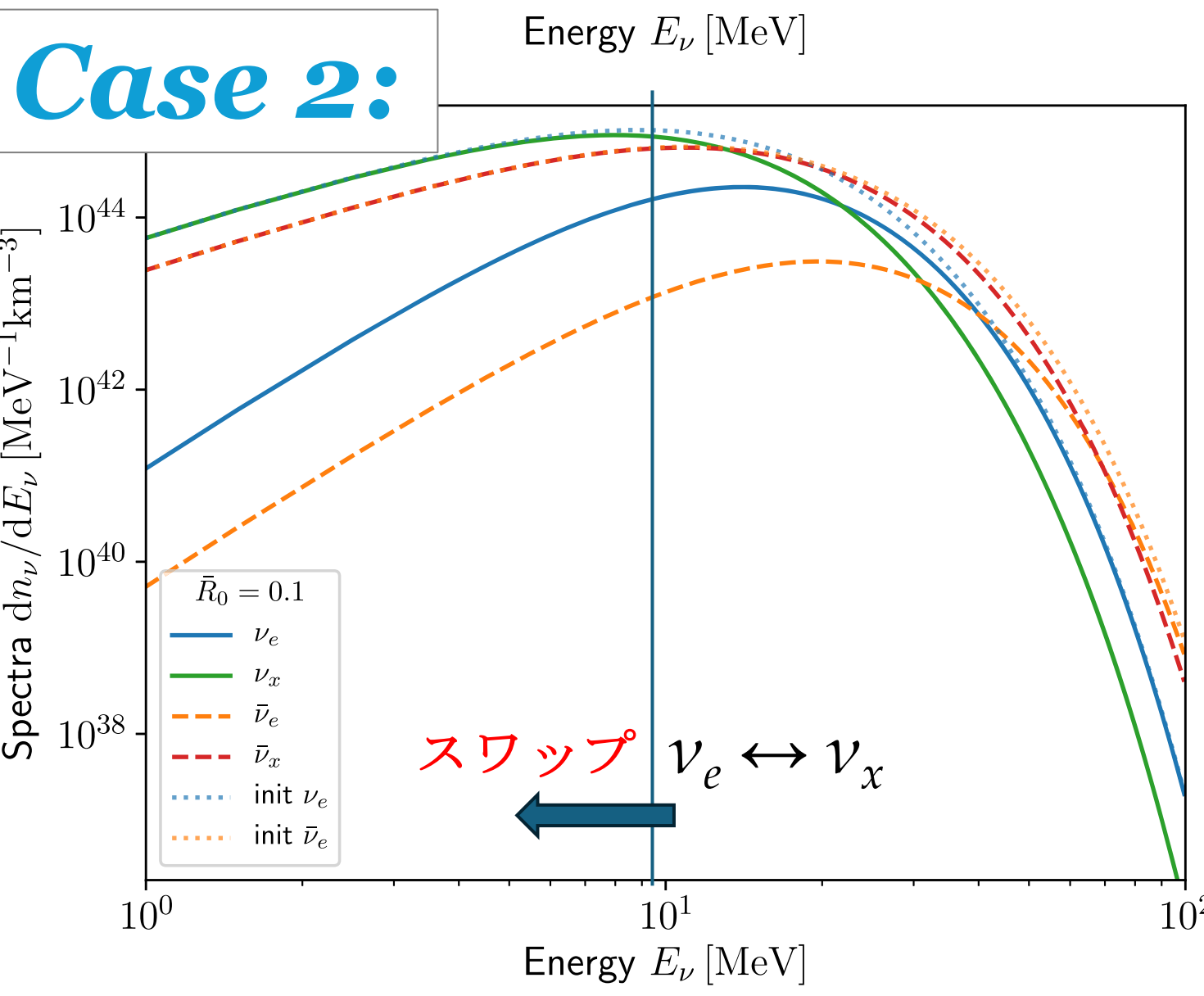
ニュートリノと反ニュートリノの間で、数密度と反応率の大小関係が同じ状況

高エネルギー成分のニュートリノは、フレーバー平衡 ($P_{ex} \sim 0.5$) に向かう

Case 2:



Case 2:



Case 2:

$$N_{\nu_e} > N_{\nu_e} \ \& \ \langle R_{\nu_e} \rangle < \langle R_{\nu_e} \rangle$$

ニュートリノと反ニュートリノの間で、数密度と反応率の大小関係が捻れている状況
→ 異なる不安定性モード

低エネルギー成分のニュートリノが、フレーバーズワップ ($P_{ex} \sim 1.0$) に向かう

4. Summary & Conclusion

超新星爆発の中心部ではニュートリノ同士の自己相互作用が卓越し、その結果ニュートリノ集団振動によりフレーバーが入れ替わる現象が起きる。その中でもニュートリノと物質がまだ結合しているような密度帯では、物質との相互作用によるデコヒーレンス効果がフレーバー間で差動的に働くことでもフレーバー不安定性が生じることがわかっている。

本研究では、ニュートリノと反ニュートリノの間の反応率の大小関係によってどのエネルギー帯がフレーバー平衡に至るのか、あるいはスワップに至るのかが決まることが判明した。今回は簡単のためにニュートリノ反応の対角項を落として、量子論的效果のみからの寄与を考えてきた。しかし実際の環境では古典的な平衡状態へと向かわせる効果も効くため、この両者の平衡状態を踏まえた進化を考える必要がある。特に、平衡状態やスワップに至ると、古典的な平衡状態へと戻すフィードバックが大きく働くため、PNS冷却を加速させることが期待される。