

ニュートリノ反応から誘発される ニュートリノ集団振動

財前 真理 (早稲田大学)
Masamichi Zaizen



Abstract

超新星爆発や連星中性子星合体においてはニュートリノ輻射輸送が非常に重要な役割を果たしているが、量子運動論的な効果であるニュートリノ集団振動を考慮するとその分布に大きな影響が出る。本研究では、ニュートリノ自己相互作用に、物質とのニュートリノ反応が組み合わさることで発生するニュートリノ集団振動に注目し、その非線形な振る舞いのエネルギー依存性について議論する。

1. Collective Neutrino Oscillation

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

$$(\partial_t + \mathbf{v} \cdot \nabla) \rho = -i [\mathcal{H}_{\nu\nu}, \rho] + \mathcal{C}_{\text{col}}[\rho]$$

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 $f_{\alpha\alpha}$)

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

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。

フレーバー相関 or フレーバーコヒーレンス f_{ex} が存在することで、古典的には起こり得ないフレーバー変換が許される。

衝突フレーバー不安定性 (Collisional Flavor Instability, CFI) :

ニュートリノと反ニュートリノの間で反応率に違いがある場合、不安定性が発生し、フレーバー変換 ($\nu_e \bar{\nu}_e \leftrightarrow \nu_x \bar{\nu}_x$) を引き起こす。

非対角項の成長がこのフレーバー変換を引き起こす。
フレーバーコヒーレンスに対する支配方程式:

$$i(\partial_t + \mathbf{v} \cdot \nabla) f_{ex} = -\sqrt{2} G_F (f_{ee} - f_{xx}) \int d^3 q' (1 - \hat{\mathbf{p}} \cdot \hat{\mathbf{q}}') f'_{ex} - i C_{ex}$$

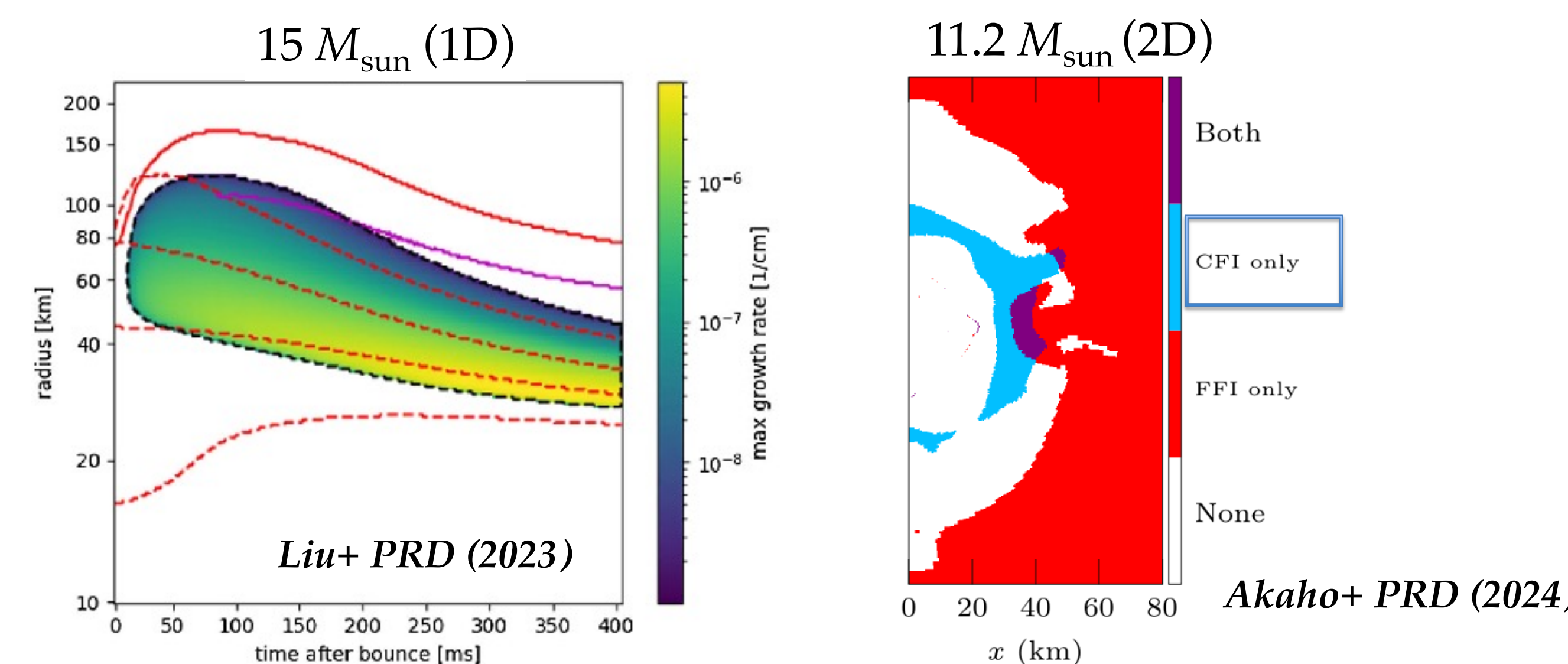
John arXiv (2021) & PRL (2023)

differential effect between $\mathbf{v}$ and $\bar{\mathbf{v}}$

$$\Gamma \neq \bar{\Gamma}$$

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、不安定性が中心部で発生する。
自己相互作用の振動波長は $\sim G_F N_\nu \sim O(\text{ns})$ 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 : テストモデル

エネルギー分布:

ニュートリノ反応率:

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

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

$$\nu_e: T_\nu = 4 \text{ MeV}, \alpha = 1$$

$$\bar{\nu}_e: T_\nu = 5 \text{ MeV}, \alpha = 0.8$$

$$\nu_x = \bar{\nu}_x: \alpha = 0$$

(initially pure electron-type)

$$C_{\text{col}}[\rho] = \Gamma(E_\nu) \begin{pmatrix} 0 & \rho_{xe} \\ \rho_{ex} & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Gamma(E_\nu) = 1 \text{ km}^{-1} \left(\frac{E_\nu}{10 \text{ MeV}} \right)^2$$

非対角成分のみ
(量子論的な効果のみ抽出)

3. Results for Collisional Flavor Instability in Multi Energy

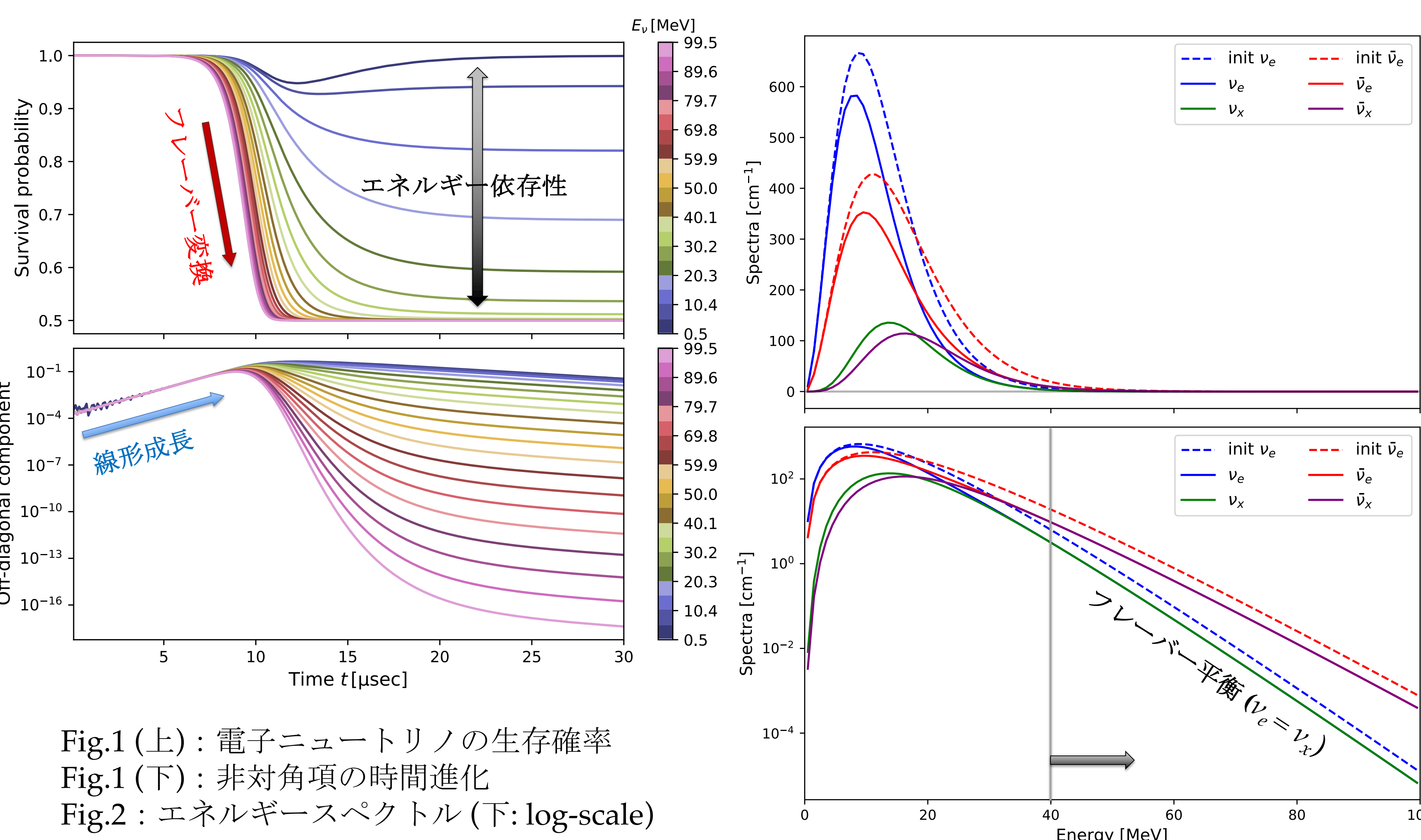


Fig.1 (上): 電子ニュートリノの生存確率

Fig.1 (下): 非対角項の時間進化

Fig.2: エネルギースペクトル (下: log-scale)

エネルギー依存性

線形成長 期間 : なし

フレーバー変換 : あり

フレーバー変換と同時に、物質からのデコヒーレンス効果が効いてくる。

→ 不安定性成長 < デコヒーレンス効果

反応率はエネルギーの2乗に依存するので、デコヒーレンスも高エネルギー側ほどよく効く。

低エネルギー側では殆どデコヒーレンスが起きず、その後元のフレーバー固有状態に戻ろうとしている。

高エネルギー側でのデコヒーレンスがこの振る舞いを妨げ、平衡状態 ($P_{ee} = 0.5, \nu_e = \nu_x$) へと向かう。

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、ニュートリノの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フレーバー不安定性が発生する。

線形成長は「集団的に」エネルギーに依らない成長率を伴って起きるが、その後のフレーバー変換では全く異なる振る舞いが起きる。高エネルギーのニュートリノほど物質からのデコヒーレンス効果を受けるため、元のフレーバー固有状態に戻れなくなっている。

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、量子論的な効果のみからの寄与を考えてきた。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ことが必要となる。