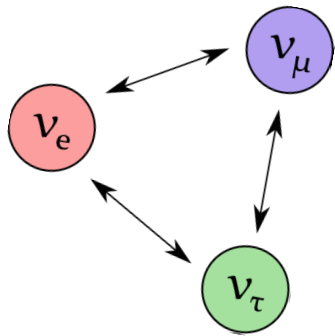


自己相互作用を伴う ニュートリノ系が見せる 非線形なニュートリノ振動



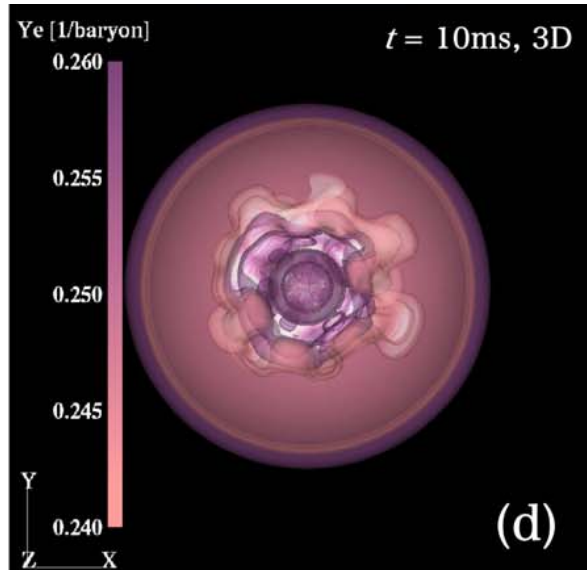
財前 真理
(ZAIZEN, Masamichi)
東大駒場 特任研究員

熱場の量子論とその応用 @KEK

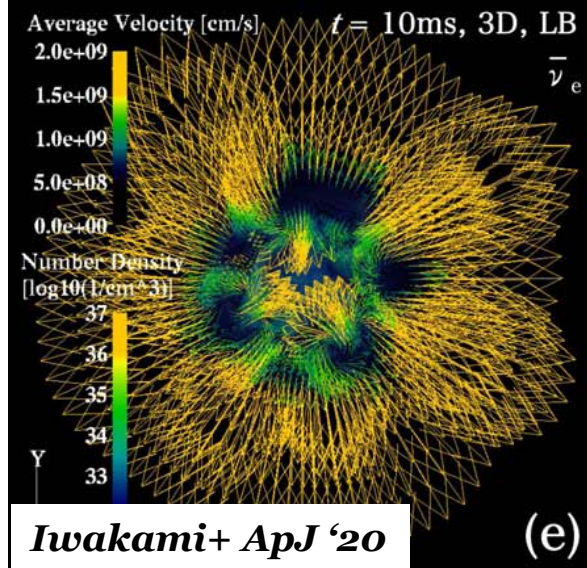
Sep. 02, 2026

爆発天体における極限環境

重力崩壊型超新星爆発 (CCSN)



(d)



Iwakami+ ApJ '20

(e)

様々な物質同士の相互作用が卓越する天体現象

ニュートリノ：流体と「弱く」結合する

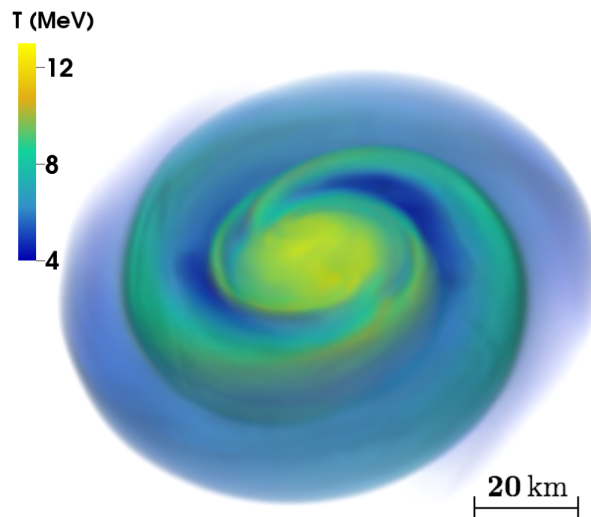
→ 平均自由行程 $\sim O(\text{km})$

→ エネルギーやレプトンなどを輸送する媒介になる

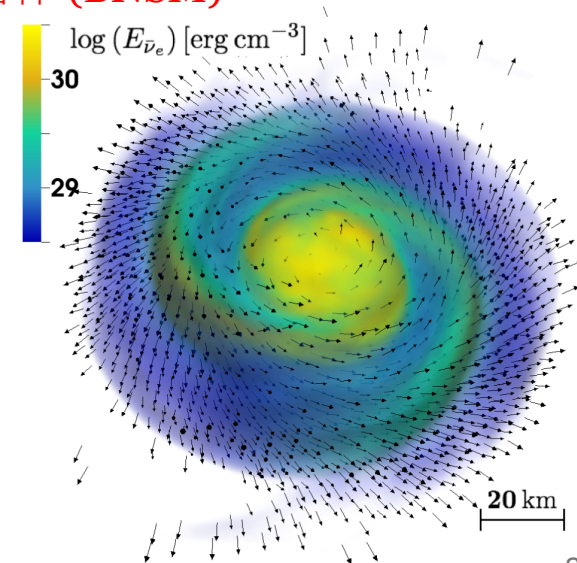
→ 流体ダイナミクスなど、天体現象に深く関連する。

→ ニュートリノの非線形な量子系に注目する

連星中性子星合体 (BNSM)

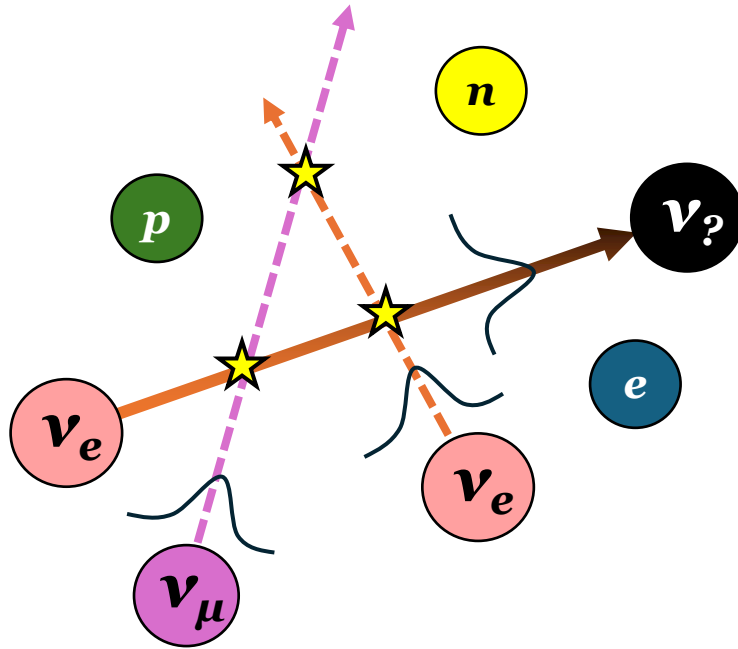


Foucart+ PRD '16



フレーバー状態を伴うニュートリノ輸送

様々な物質同士の間相互作用が卓越する天体現象



ニュートリノはフレーバーとしての量子状態 $|\psi_\nu\rangle$ をもつ。

$$i\frac{d\rho_\nu}{dt} = [\mathcal{H}[\rho_\nu], \rho_\nu]$$

高密度なニュートリノは、互いに相互作用し、その量子状態を左右する。

粒子数だけでなく、フレーバー状態もまた輸送される。

→ **ニュートリノ振動**によって、そのフレーバーが変化する

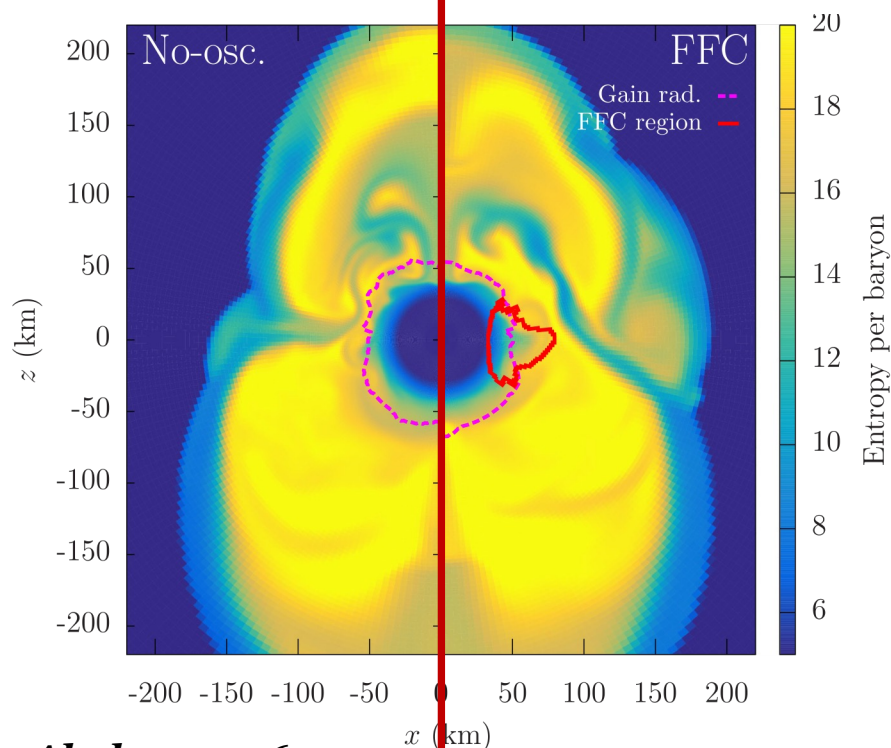
実効的な量子輸送計算

higgstan.com



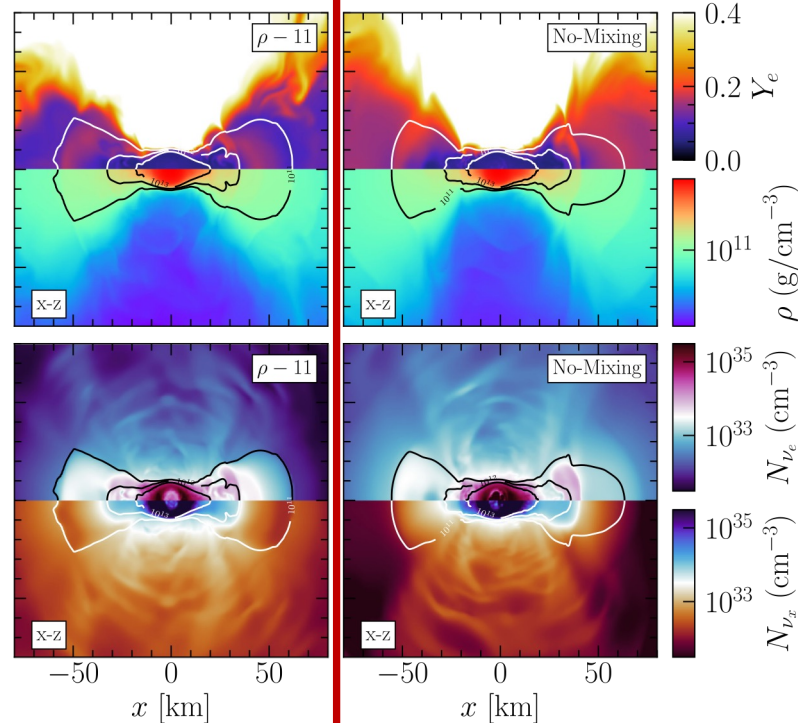
ニュートリノ振動の(簡易的な)モデル入り

超新星爆発



Akaho+ 2026

連星中性子星合体



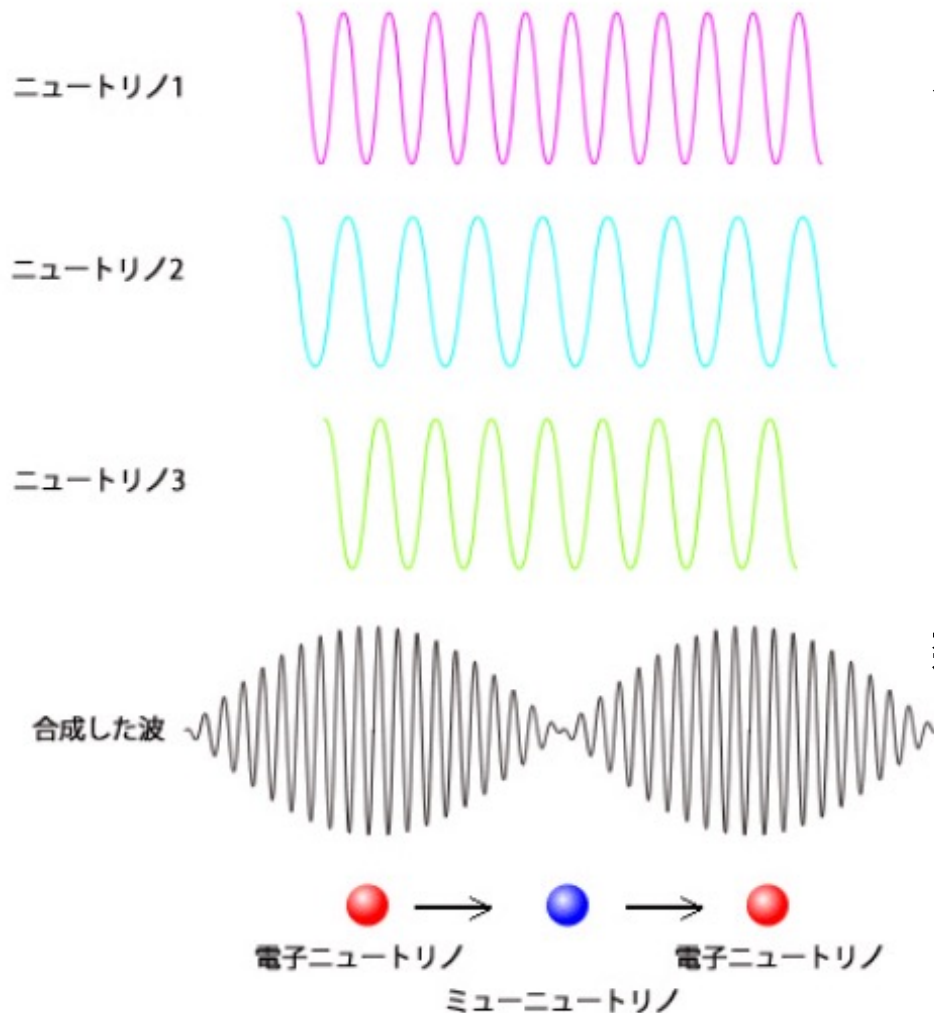
Qiu+ 2025

確かにニュートリノ振動が、マクロな天体現象を変える

1粒子系としてのニュートリノ振動

From Super-K homepage[©]

<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/neutrino/kajita/vibration/>



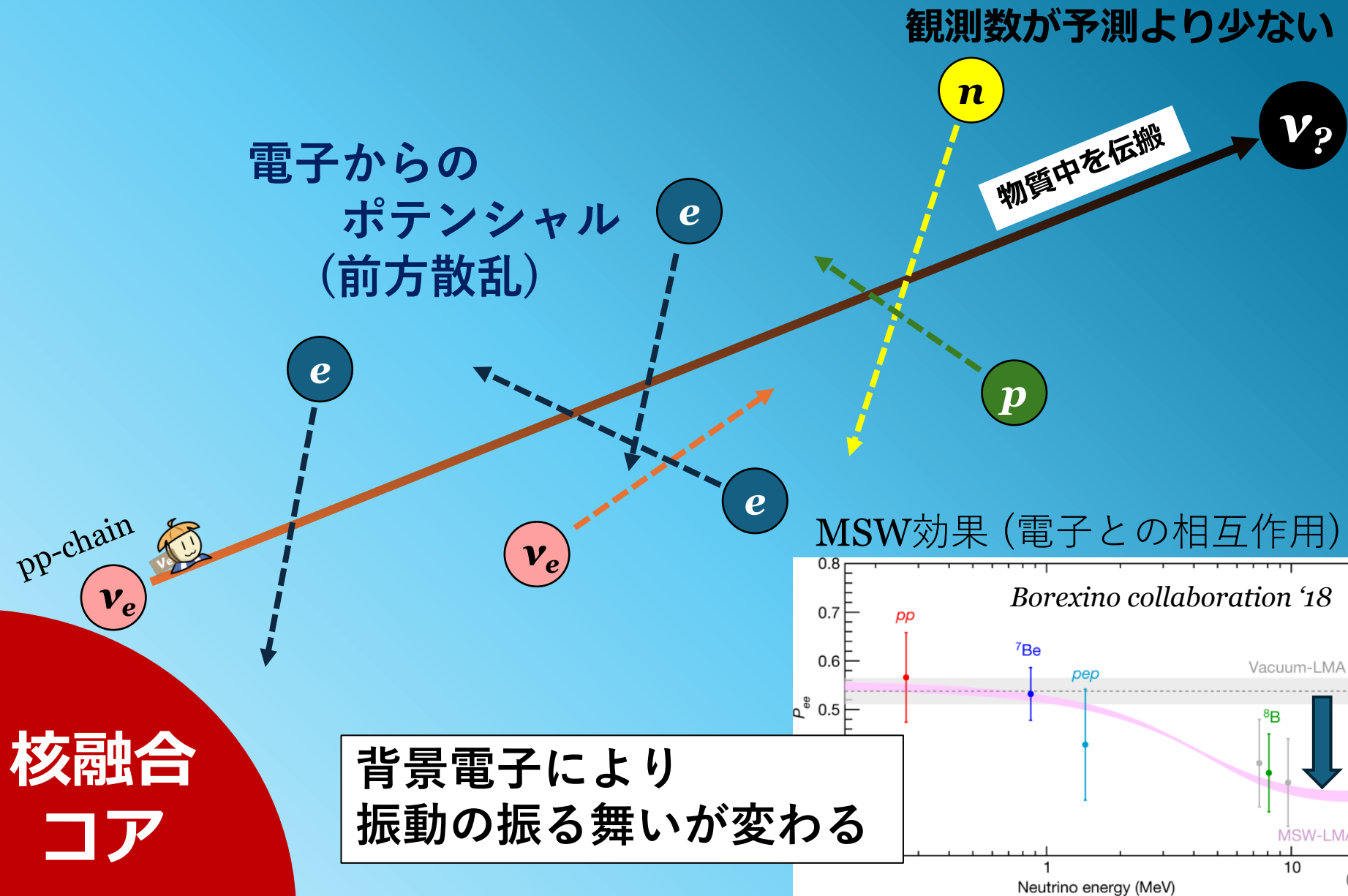
本来は勝手にこのフレーバーが変化することはない。

しかし、質量固有状態とのずれにより
✓ **真空中を伝搬するだけで、
このフレーバーが入れ替わる**
ことが実験的に明らかに

フレーバーの輸送過程として、より複雑になる。

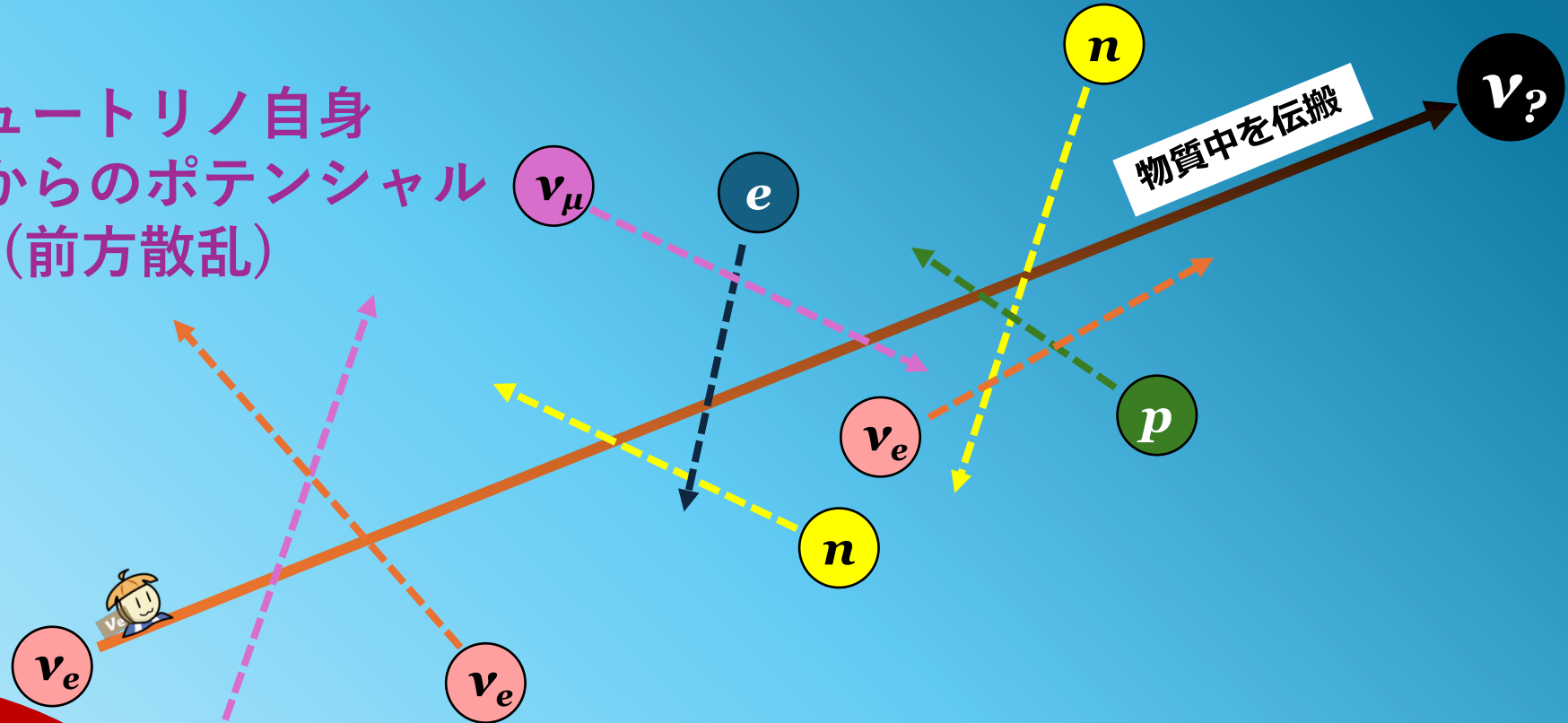


背景電子によるニュートリノ振動：太陽



背景ニュートリノによる振動：爆発天体

ニュートリノ自身
からのポテンシャル
(前方散乱)



ニュートリノ
放出領域

ニュートリノ
自己相互作用



輸送計算
+ 「非線形」な
ニュートリノ集団振動

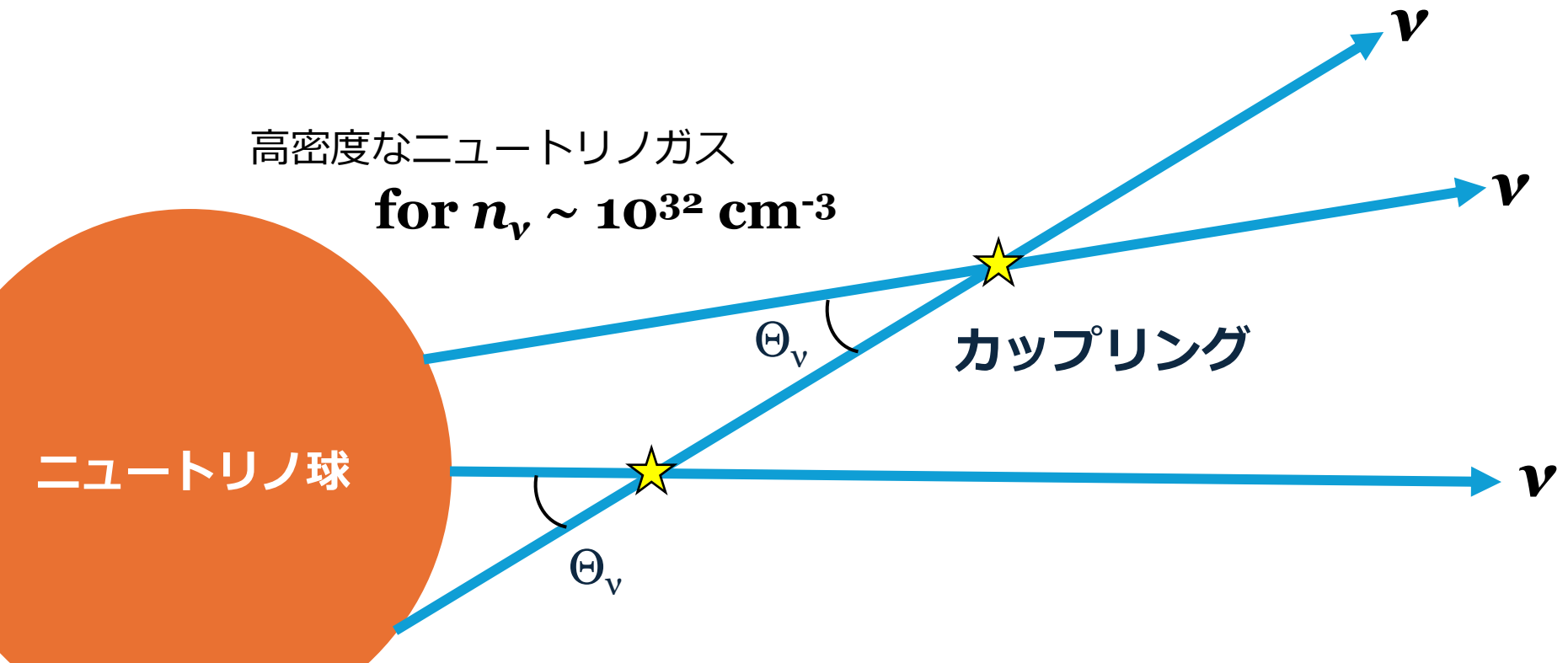
Pantaleone '92

ニュートリノ自己相互作用

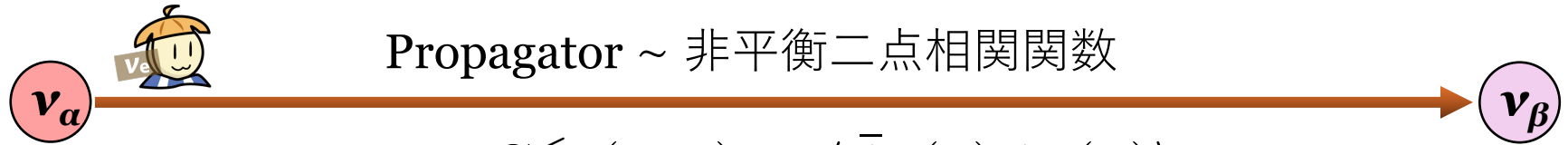
自己相互作用項

$$\mathcal{H}_{\nu\nu} = \sqrt{2}G_F \int \frac{E_\nu^2 dE_\nu d\Omega_\nu}{(2\pi)^3} (1 - \cos \Theta_\nu) (\rho_\nu - \bar{\rho}_\nu)$$

それぞれの角度モードが、全モードが作る平均場を感じる。



非平衡量子系としてのニュートリノ



$$G_{\alpha\beta}^<(x, y) = \langle \bar{\psi}_\beta(y) \psi_\alpha(x) \rangle$$

フレーバー干渉を含む

Flavor isospin



Wigner transf.

$$\rho_{\alpha\beta}(X, p) \quad \text{密度行列}$$



Kadanoff-Baym eq.

量子運動論的方程式

$$\left(p^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} - \Gamma_{\sigma\kappa}^j p^\sigma p^\kappa \frac{\partial}{\partial p^j} \right) \rho_\nu = \underbrace{-i [\mathcal{H}_{\text{osc}}, \rho_\nu] + \mathcal{C}[\rho_\nu]}_{\text{ニュートリノ振動項}}$$

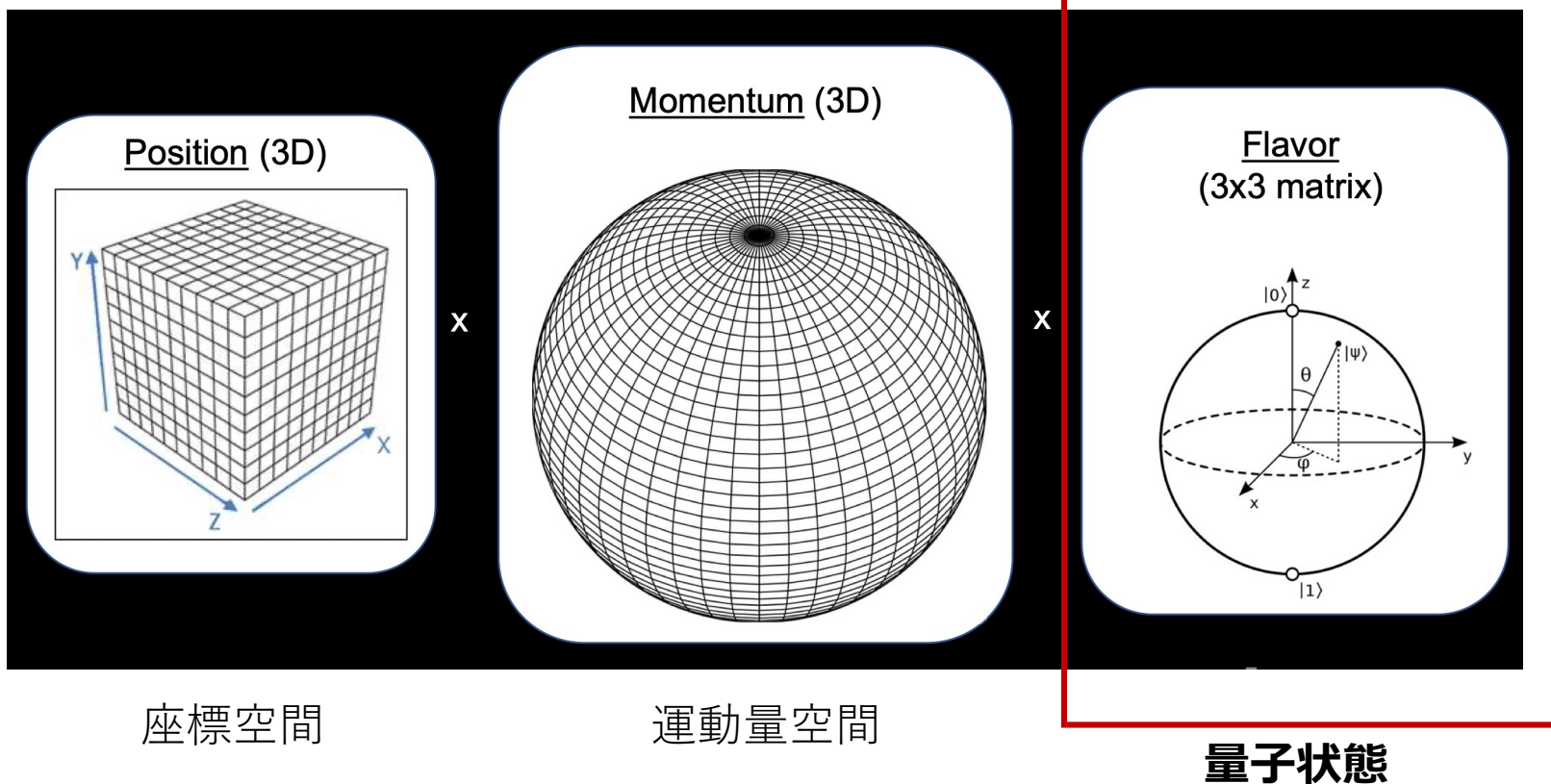
ニュートリノ振動項

量子運動論のニュートリノ輸送

量子運動論の方程式 (QKE: Beyond Boltzmann eq.)

$$\left(p^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} - \Gamma_{\sigma\kappa}^j p^\sigma p^\kappa \frac{\partial}{\partial p^j} \right) \rho_\nu = -i [\mathcal{H}_{\text{osc}}, \rho_\nu] + \mathcal{C}[\rho_\nu]$$

$\rho_\nu =$



ニュートリノ集団振動の非線形性

密度行列：対角成分 + 非対角成分

$$\rho_\nu = \begin{pmatrix} \rho_{ee} & \rho_{e\mu} \\ \rho_{\mu e} & \rho_{\mu\mu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \nu_e | \nu_e \rangle & \langle \nu_e | \nu_\mu \rangle \\ \langle \nu_\mu | \nu_e \rangle & \langle \nu_\mu | \nu_\mu \rangle \end{pmatrix}$$

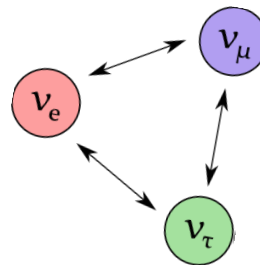
非線形な自己相互作用が
相関項を指数関数的に増幅させる

真空振動を通して
フレーバー相関が**擾動**として入る

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

線形安定性解析
→ **フレーバー不安定性**

Banerjee+ '11
Izaguirre+ '17



真空振動よりもずっと速い
フレーバー変換

$$\sqrt{2}G_F n_{\nu_e} \lesssim 1 \text{ cm}^{-1} \text{ or } 0.1 \text{ ns}^{-1}$$

Duan+ '06

ニュートリノフレーバー不安定性

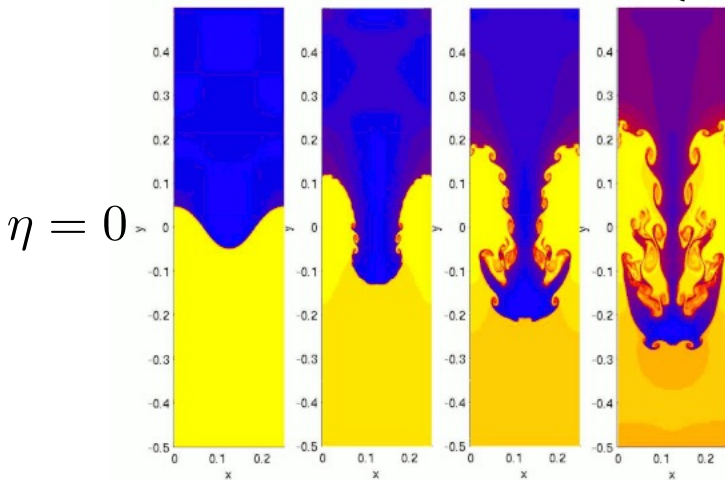
Rayleigh-Taylor 不安定性

密度の違う 2 流体が上下にある状況

$$\eta \sim e^{-i\omega t} \rightarrow \text{不安定性}$$

界面の変動 η が大きく成長する

(座標空間)

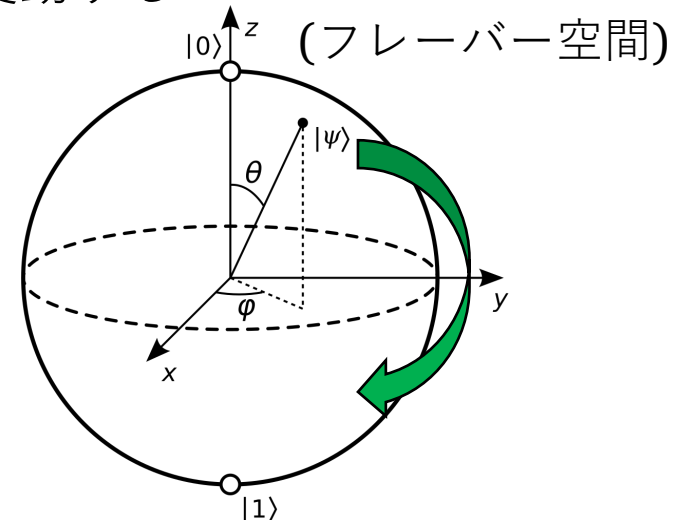


ニュートリノフレーバー不安定性

$$i \frac{d\rho_\nu}{dt} = [\mathcal{H}[\rho_\nu], \rho_\nu]$$

$$\rho_{ex} \sim e^{-i\omega t} \rightarrow \text{不安定性}$$

非対角成分が成長することで、
自己相互作用を通して
対角成分(フレーバー分布)も大
きく変動する



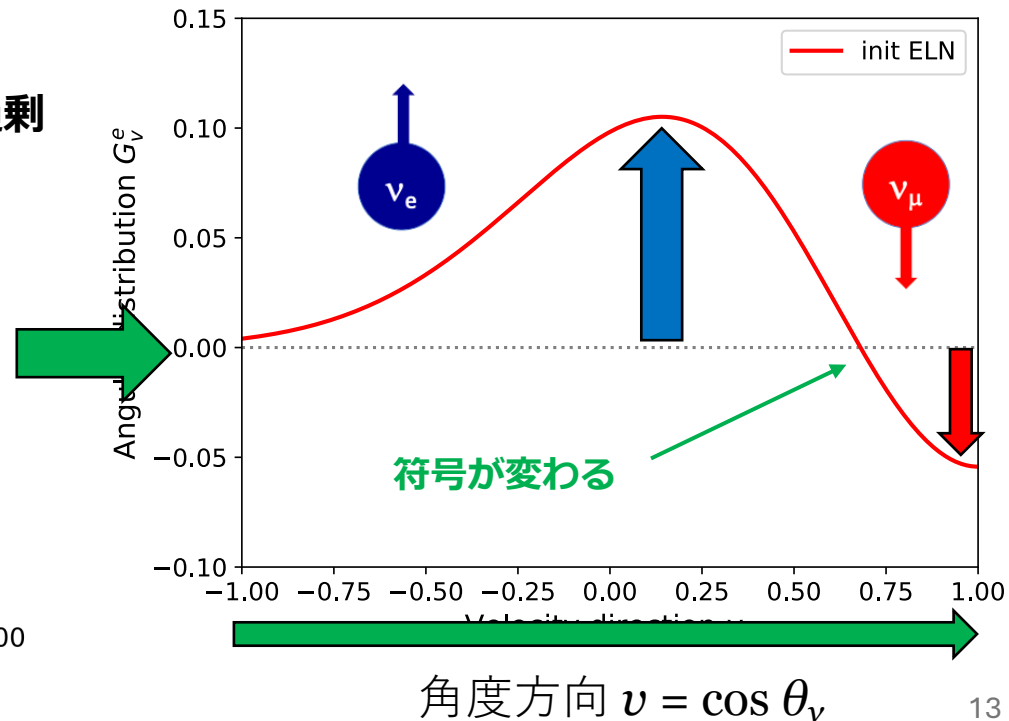
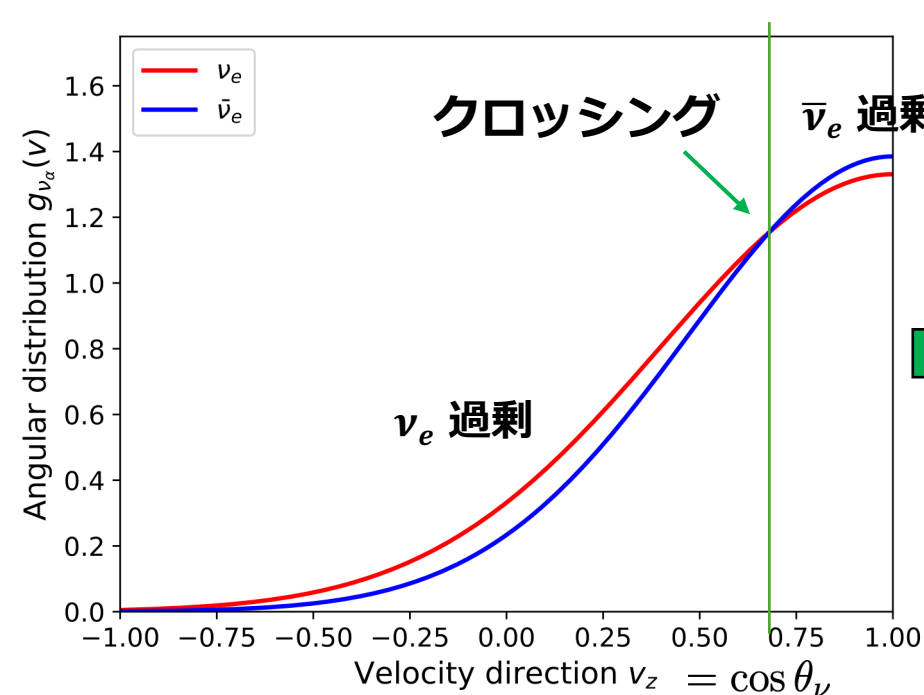
高速フレーバー不安定性 : FFI

ELN-XLN 角度分布:

$$G_v^{ex} = \sqrt{2}G_F \int \frac{E^2 dE}{2\pi^2} [(f_{\nu_e} - f_{\bar{\nu}_e}) - (f_{\nu_x} - f_{\bar{\nu}_x})]$$

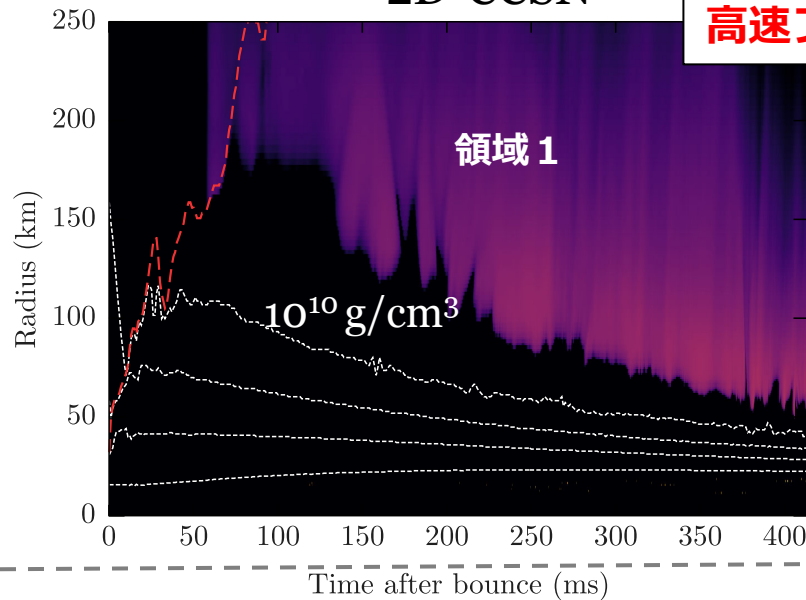
= **ELN** - **XLN**

(**Electron Lepton Number**)(Heavy-Leptonic one)

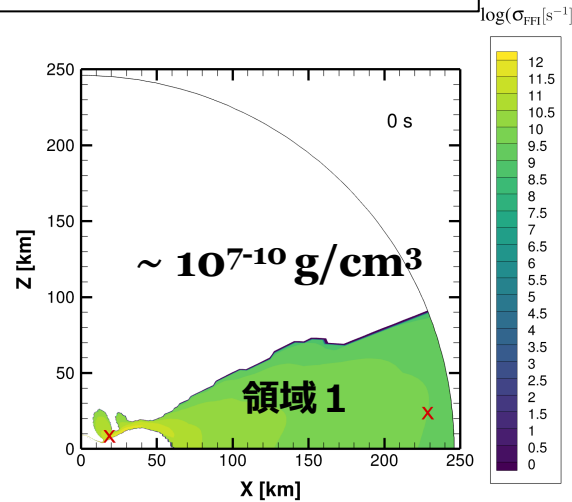


ニュートリノ集団振動の発生可能性

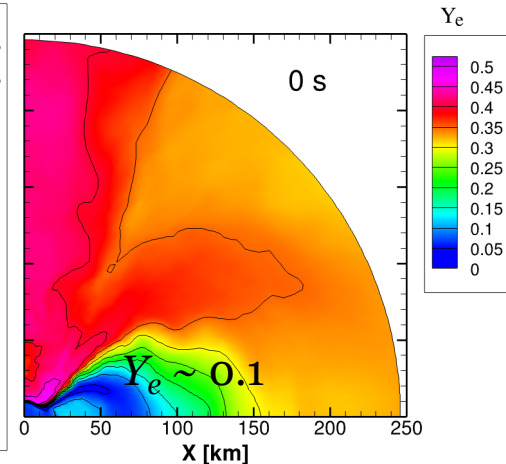
2D-CCSN



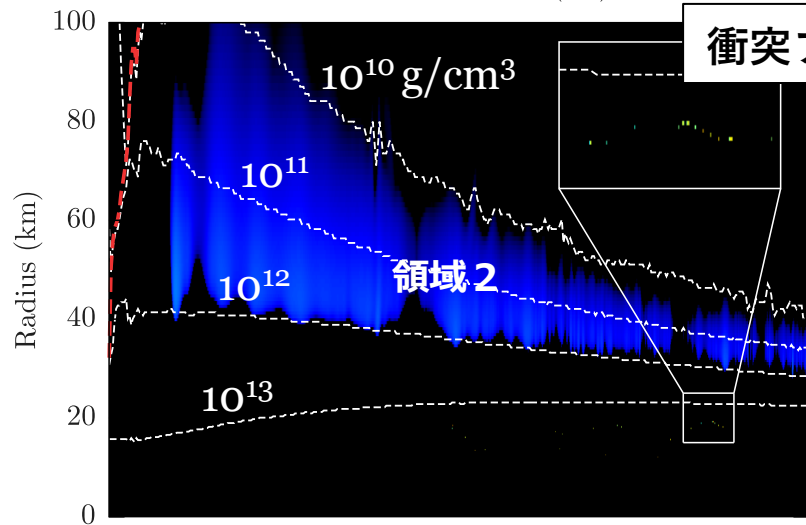
高速フレイバー不安定性, FFI



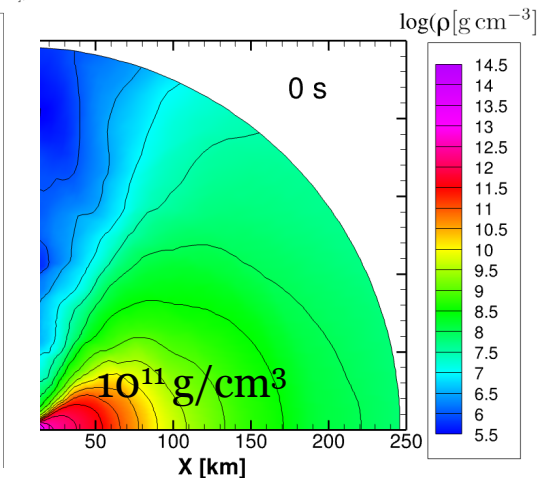
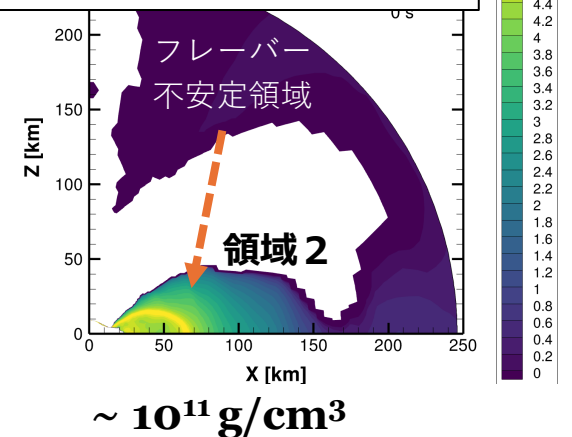
3D-BNSM



Time after bounce (ms)



衝突フレイバー不安定性, CFI



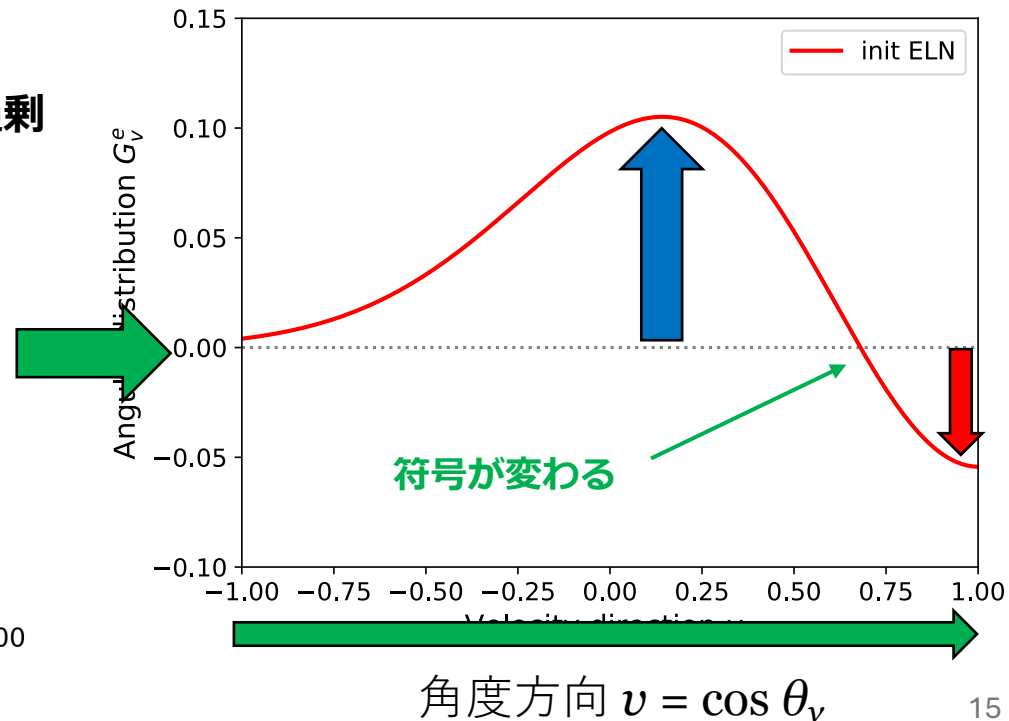
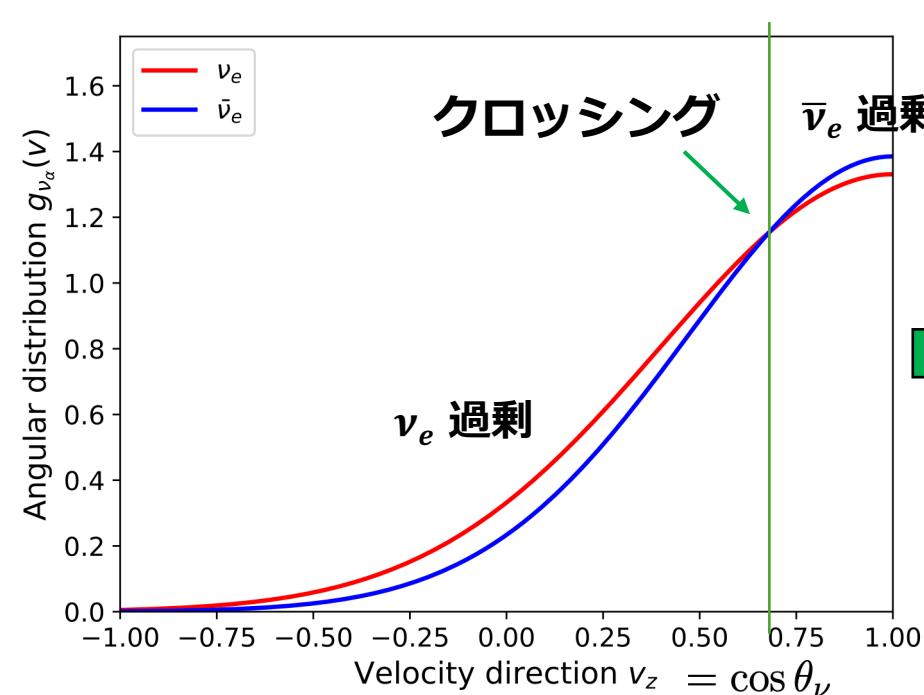
FFI: 数値計算

ELN-XLN 角度分布:

$$G_v^{ex} = \sqrt{2}G_F \int \frac{E^2 dE}{2\pi^2} [(f_{\nu_e} - f_{\bar{\nu}_e}) - (f_{\nu_x} - f_{\bar{\nu}_x})]$$

= **ELN** - **XLN**

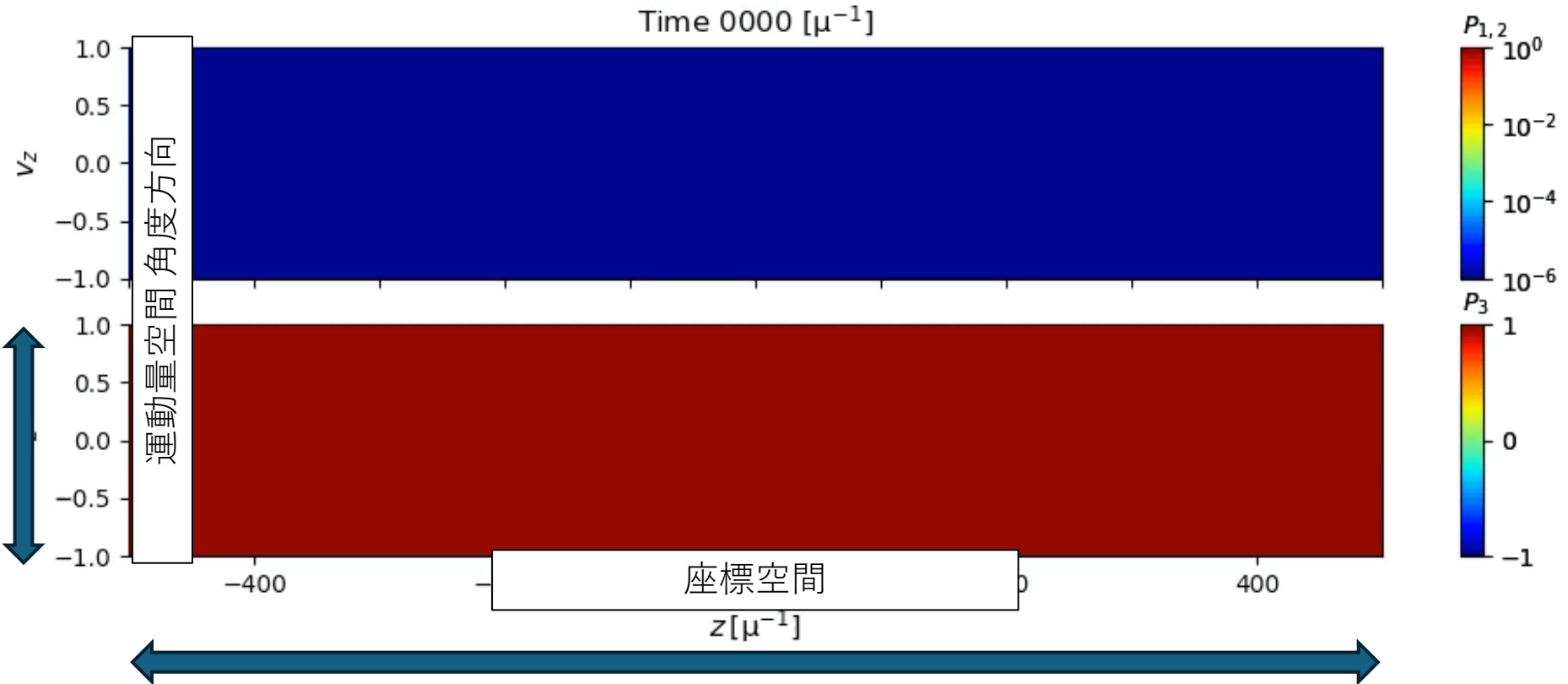
(**Electron Lepton Number**)(**Heavy-Leptonic one**)



高速フレイバー変換 : FFC

高速フレイバー変換, FFC

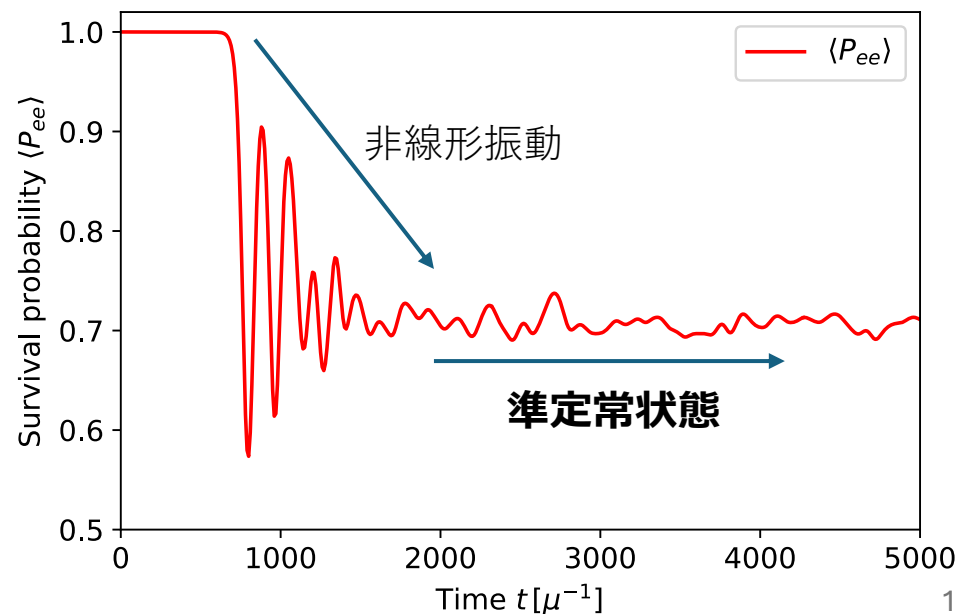
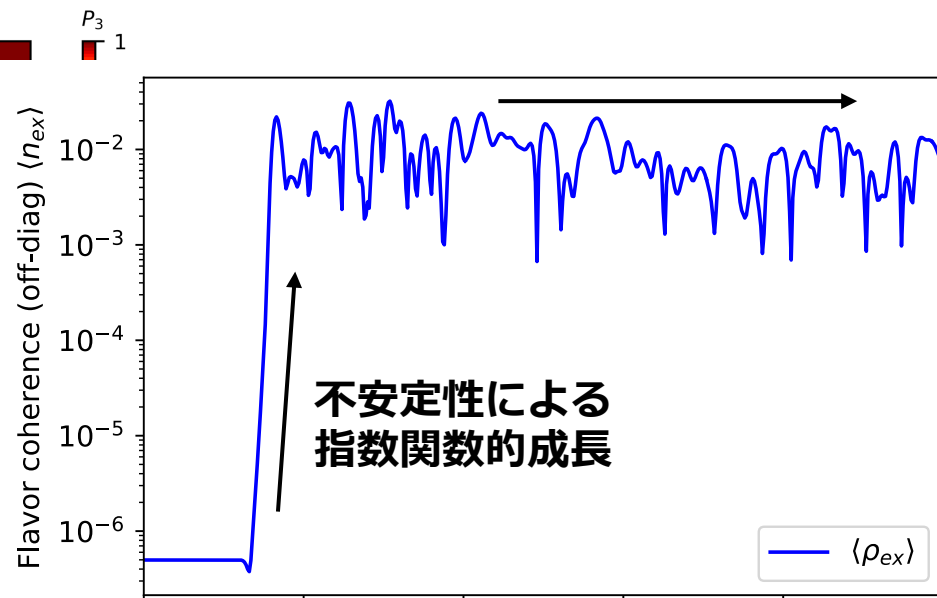
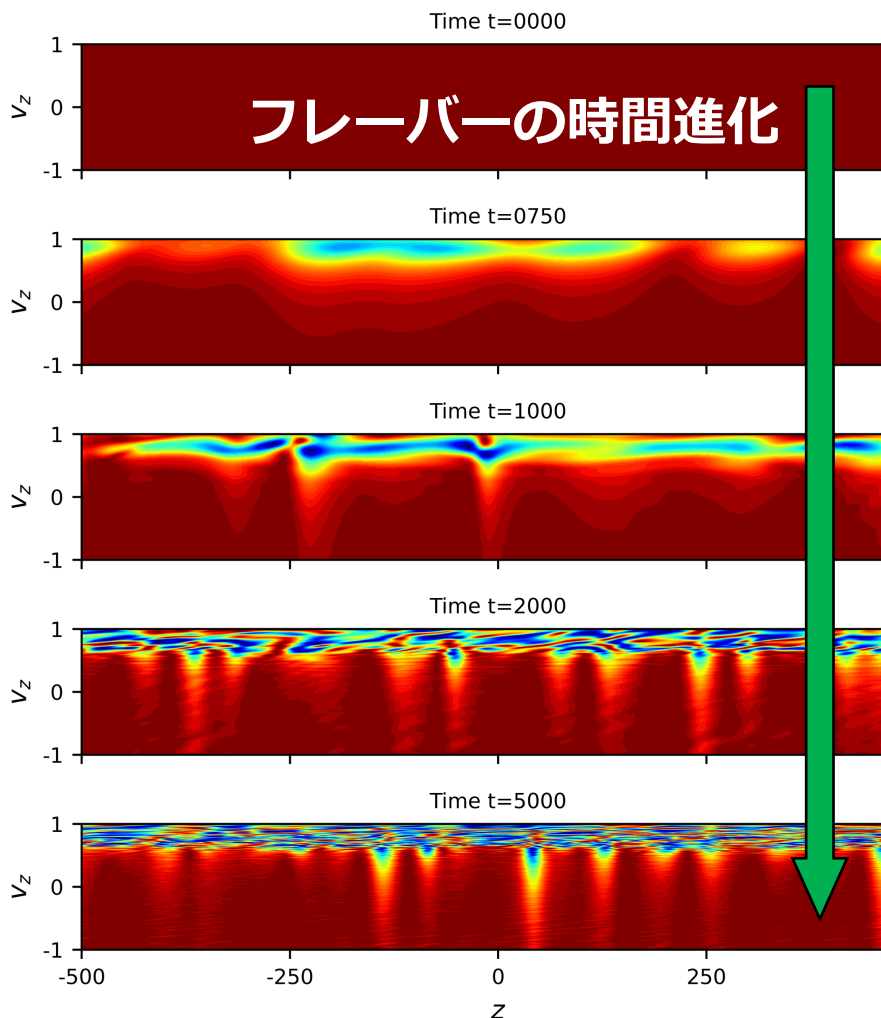
$$\rho_\nu = \begin{pmatrix} \rho_{ee} & \rho_{ex} \\ \rho_{ex}^* & \rho_{xx} \end{pmatrix}$$



$$\rho_\nu = \begin{pmatrix} \rho_{ee} & \rho_{ex} \\ \rho_{ex}^* & \rho_{xx} \end{pmatrix}$$

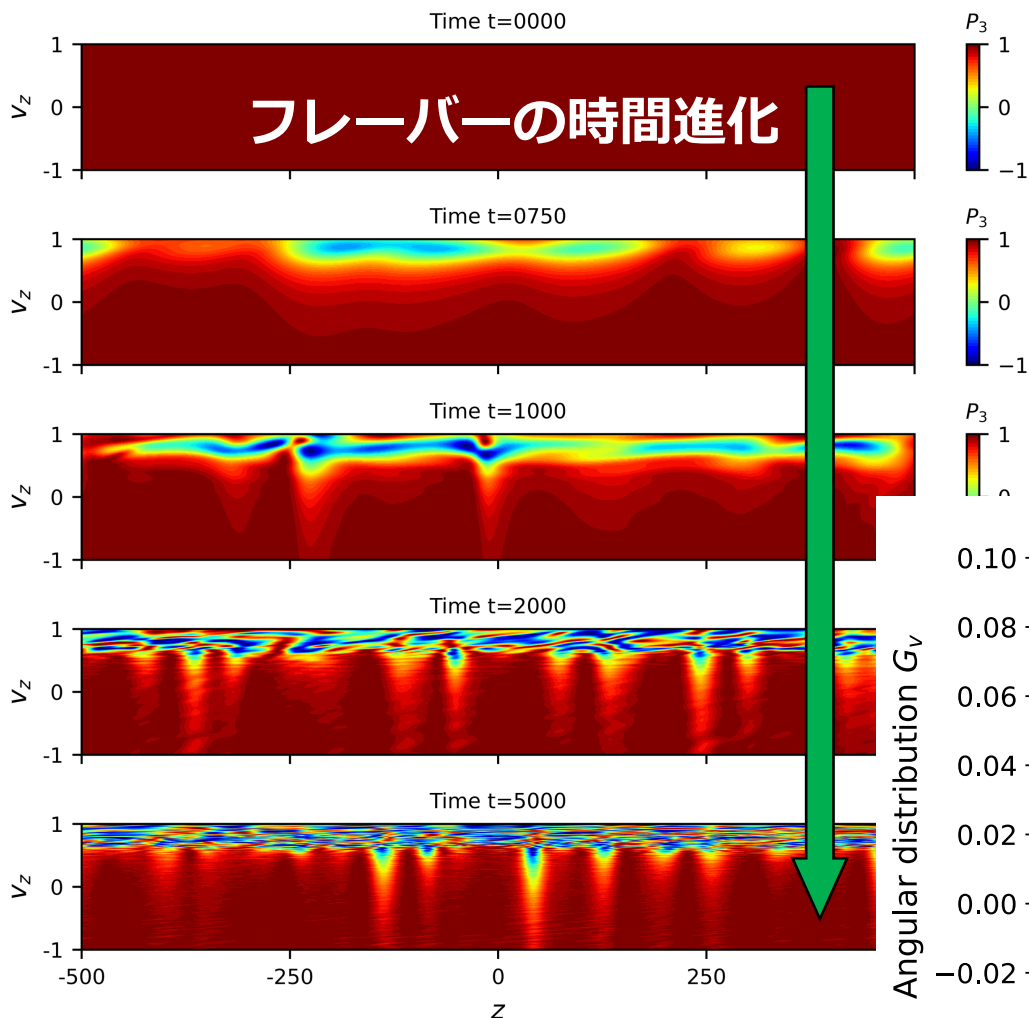
準定常状態への漸近挙動

フレーバーの時間進化



準定常状態と安定性

フレーバーの時間進化

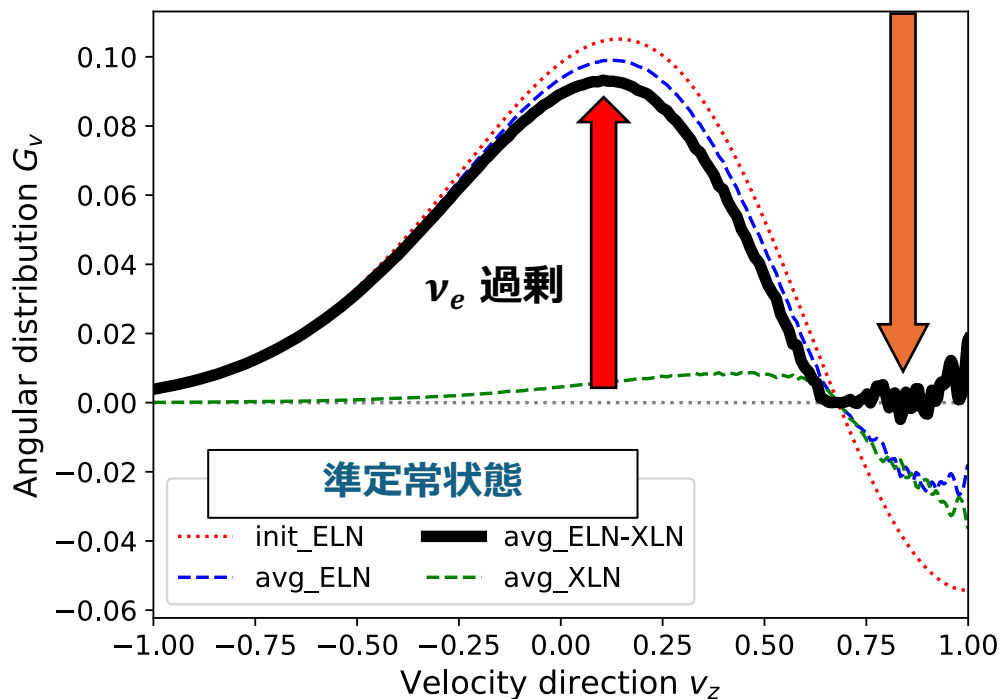


$$\mathbf{v}_e = \mathbf{v}_\mu$$

$$(f_{\nu_e} - f_{\bar{\nu}_e}) - (f_{\nu_X} - f_{\bar{\nu}_X})$$

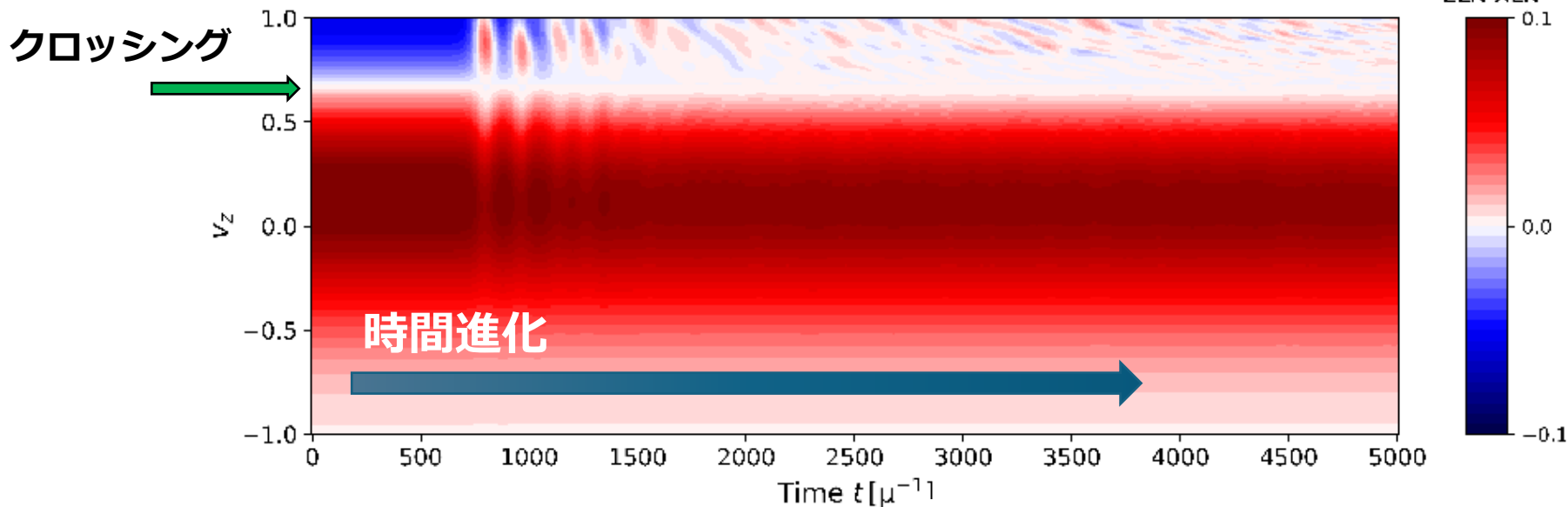
不安定を作っていた

クロッシングが消滅 ~ 安定化



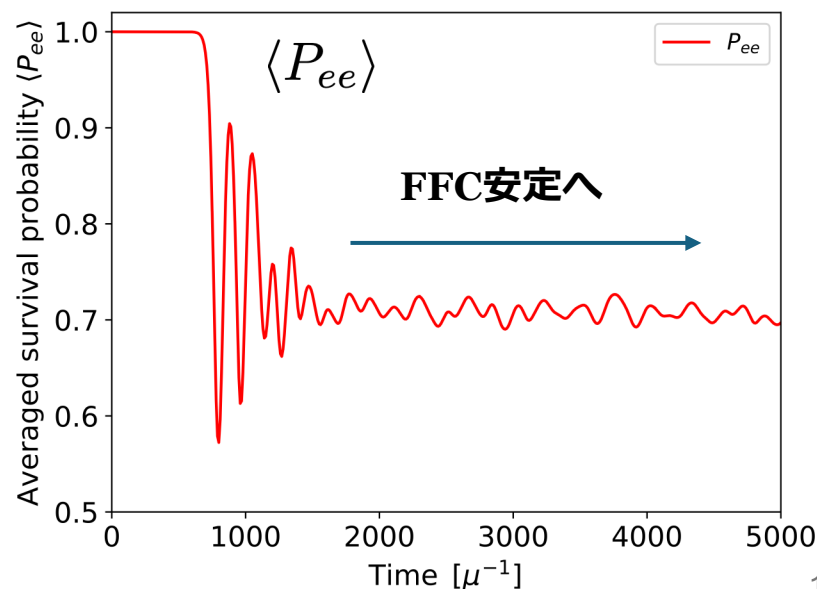
安定性と漸近挙動

空間平均 ELN-XLN 角度分布.



FFCは、不安定性を生むクロッシングを消すようにフレーバーを混ぜていく。

(*c.f.*, RT不安定性)

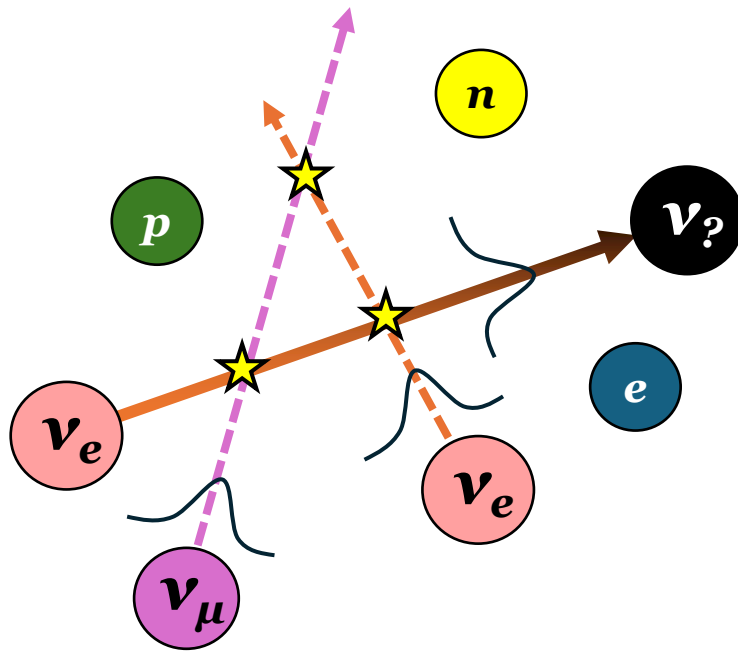


まとめ

- 自己相互作用するニュートリノ系

- フレーバー不安定性

- フレーバー間のクロッシングによって不安定性が生じる。
- それに伴う非線形なフレーバー混合 (FFC) の結果、系全体が安定化に向かう。
- **量子系であっても、流体とある意味似たようなもの**



- 一方で、いま考えていたのは平均場としてのニュートリノ自己相互作用

- 本来は、量子多体系としての振る舞いを見る必要がある？