

ニュートリノ集団振動の漸近的な振る舞い

arXiv:2211.09343

財前 真理
(早稲田大学PD)

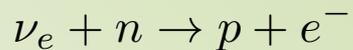
共同研究者：長倉洋樹 (NAOJ)

新学術「地下宇宙」第9回超新星ニュートリノ研究会
2023/03/02-03 @九州大学

超新星爆発とニュートリノ輸送

ニュートリノ輸送計算
→ フレーバー分布

ニュートリノ加熱



吸収

n

ν_e

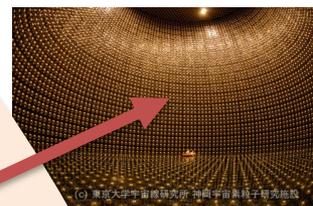
ν_μ

n

MSW共鳴

ν_e

観測



ニュートリノ集団振動

PNS

$R \sim 10 \text{ km}$

ν_e
 ν_μ

停滞衝撃波

$r \sim 200 \text{ km}$

外層

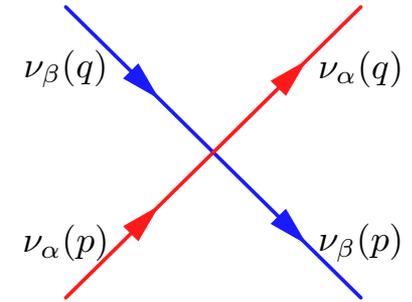
$r \sim O(1000) \text{ km}$

ニュートリノ集団振動

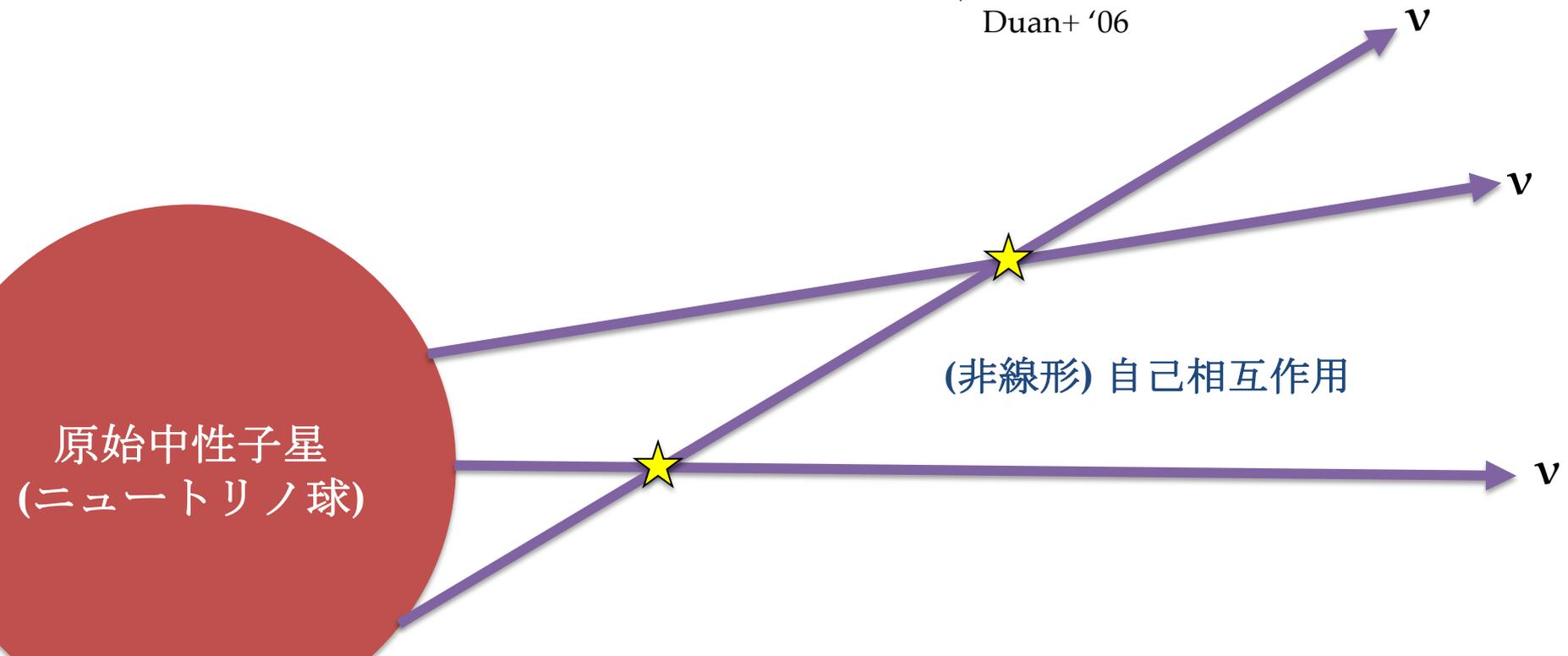
超新星中心部： $N\nu \sim 10^{58}$ ($L \sim 10^{53}\text{erg/s}$).
→ ニュートリノ同士の相互作用が卓越する。

$$H_{\nu\nu} = \sqrt{2}G_F \int \frac{d^3q'}{(2\pi)^3} (1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}') (\rho'_{\nu} - \bar{\rho}'_{\nu})$$

運動量交換



c.f., Pantalone '92
Duan+ '06



高速フレーバー変換

高速フレーバー変換 (Fast Flavor Conversion, FFC)

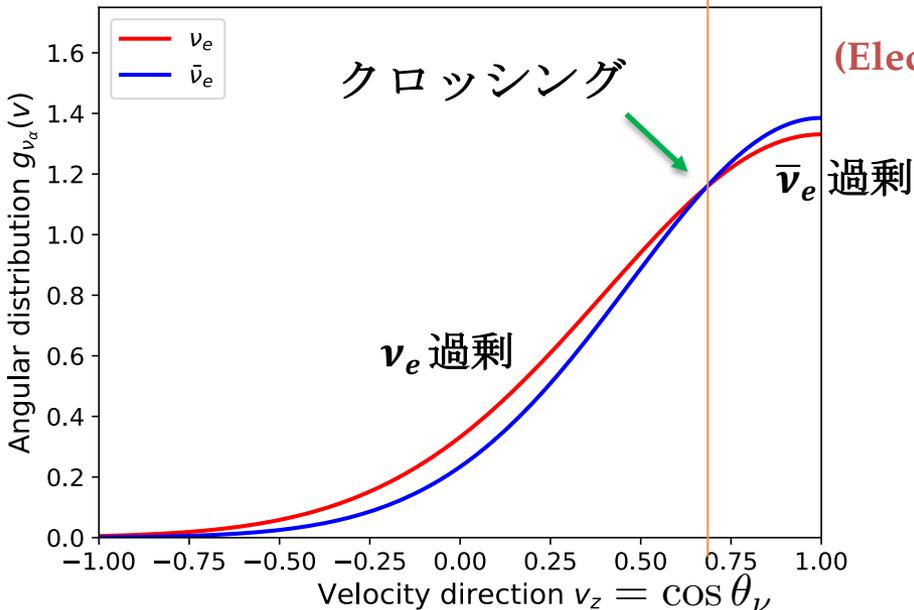
1. 集団振動モードのうちの1つ (フレーバー不安定性)
2. 振動スケール: $\sim (G_F n_\nu)^{-1} \lesssim O(\text{cm})$ or $O(\text{ns})$
<< 星構造のスケール
3. ニュートリノレプトン数角度分布の**クロッシング**がトリガー

Izaguirre+ '17

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

$$= \text{ELN} - \text{XLN}$$

(Electron Lepton Number) (Heavy-leptonic one)



もし $\nu_x = \bar{\nu}_x$ なら、この条件はELNのみで決まる。

(reasonable in CCSNe)

角度クロッシング

線形解析によるFFCに対する必要十分条件：

Morinaga '22, Dasgupta '22

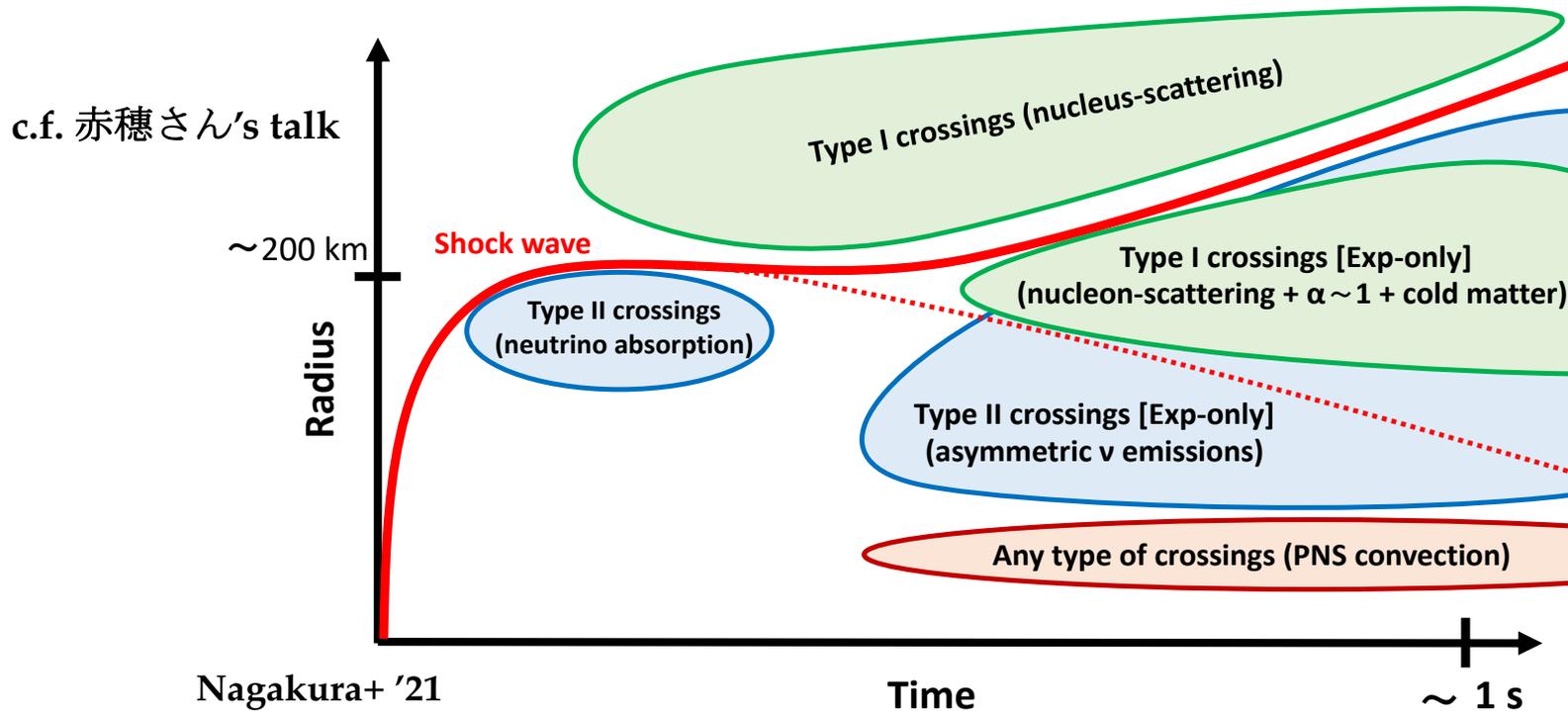
ELN-XLN角度分布での
クロッシングの存在



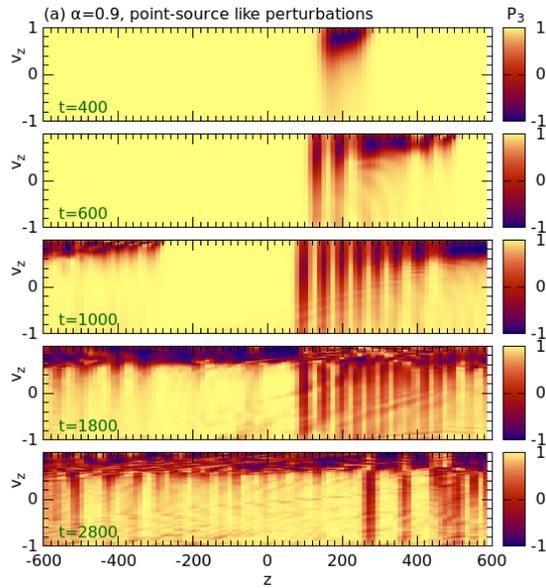
FFCの発生/成長

ローカルな条件

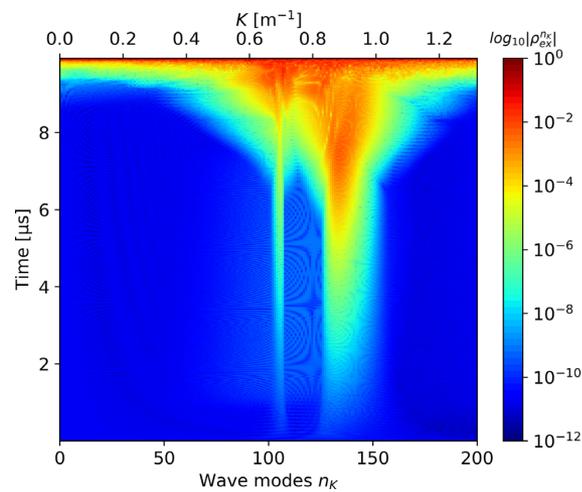
Space-time diagram of ELN-angular crossings in CCSNe



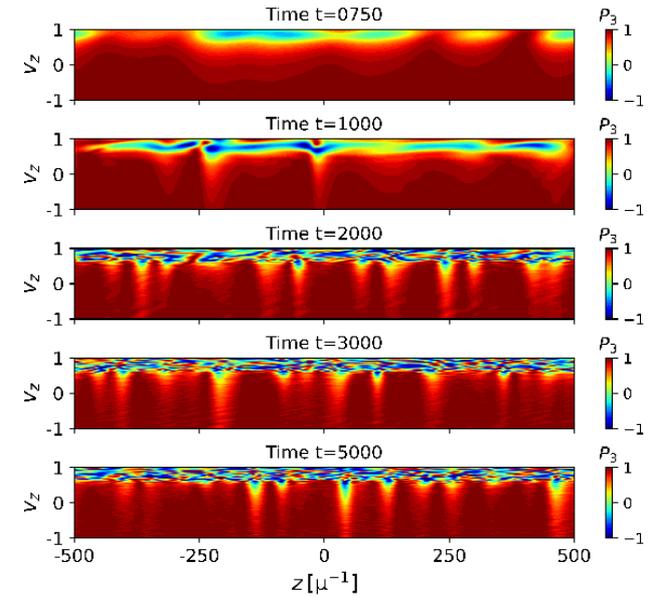
非一様空間でのFFC



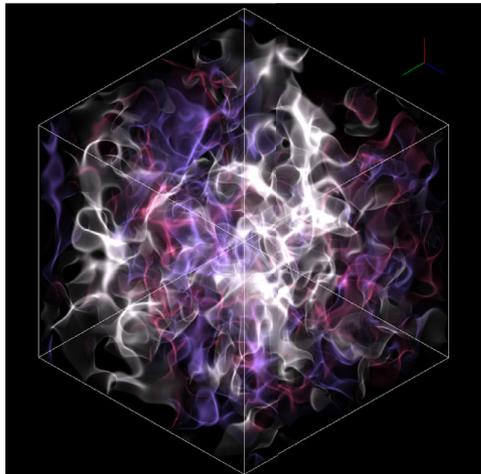
Wu+ '21



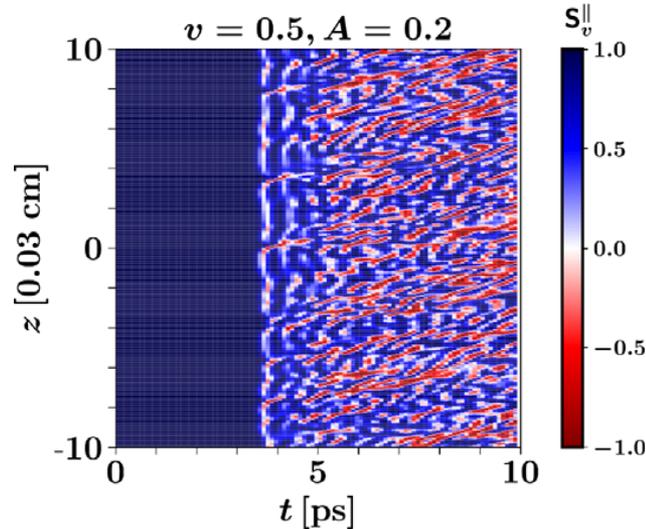
Zaizen+ '21



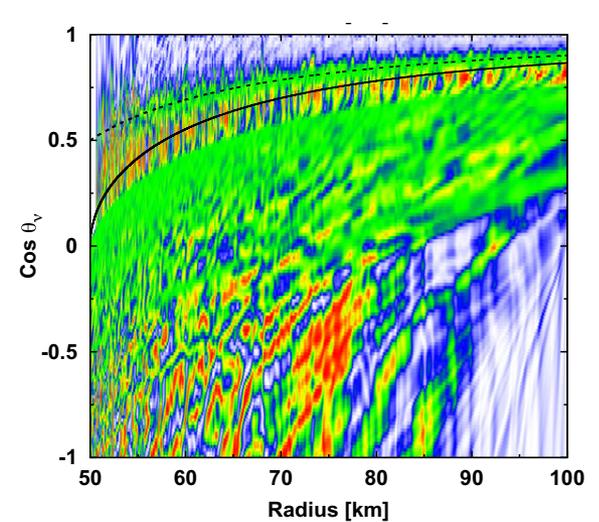
Zaizen & Nagakura '22



Richers+ '21

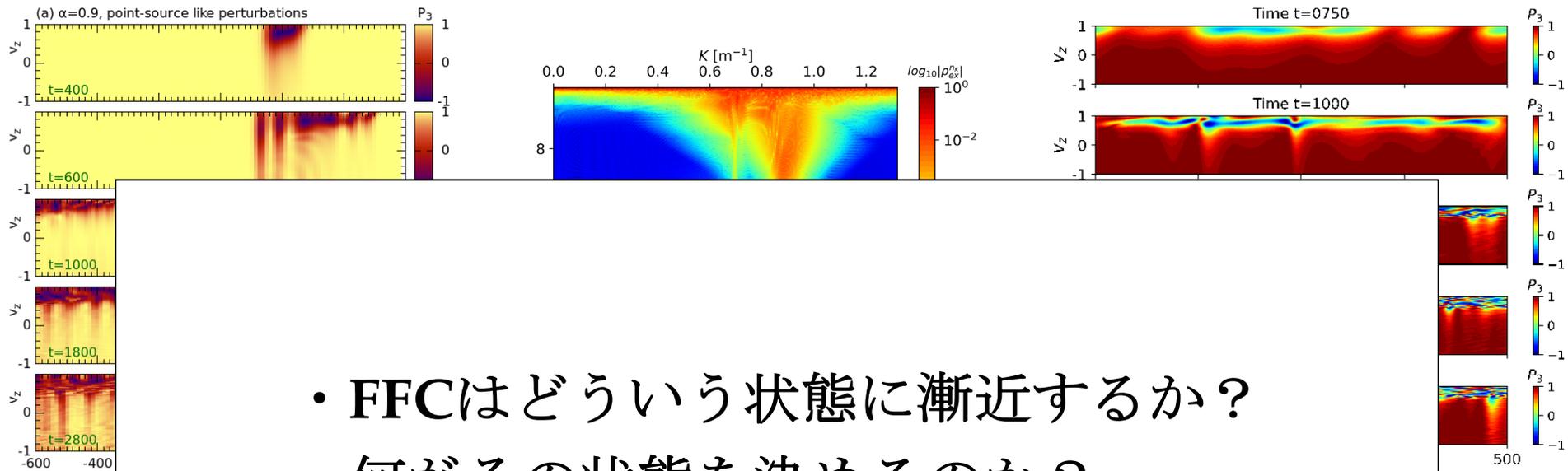


Bhattacharyya+ '21



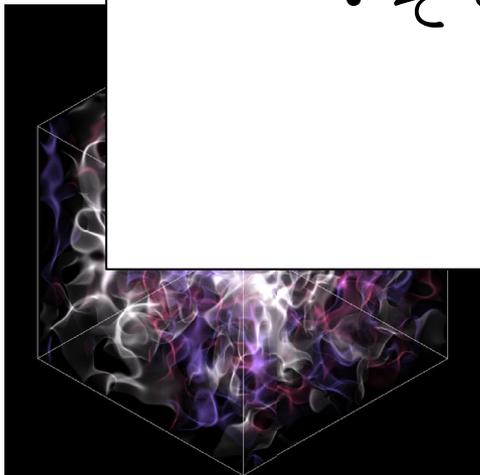
Nagakura & Zaizen '22

非一様空間でのFFC

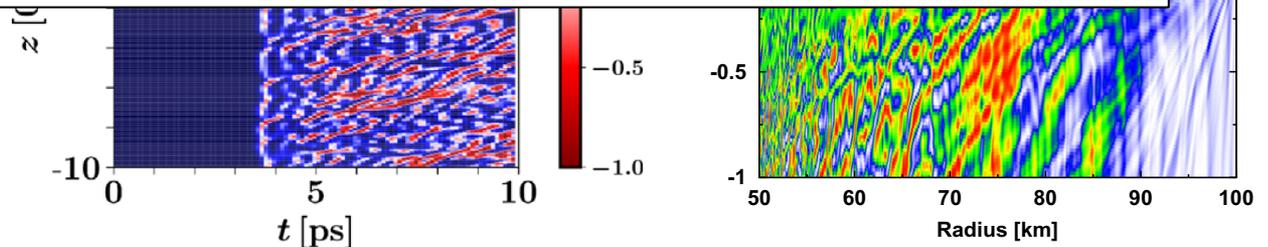


- FFCはどのような状態に漸近するか？
- 何がその状態を決めるのか？
- そもそもモデル化できそうか？

Wu+ '21



Richers+ '21



Bhattacharyya+ '21

Nagakura & Zaizen '22

支配方程式

Quantum Kinetic Equation : $(t; z; E_\nu, \theta_\nu)$

c.f., Boltzmann equation

$$i(\partial_t + \underline{v_z} \partial_z) \rho = [\mathcal{H}, \rho] + \cancel{i\mathcal{C}}$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial s} = \left[\frac{1}{c} \frac{\delta f}{\delta t} \right]_{\text{collision}}$$

c.f. 加藤さん's talk

密度行列 :

$$\rho = \begin{matrix} & \begin{matrix} f_{\nu_e} \\ \rho_{ee} & \rho_{ex} \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} \rho_{ee} & \rho_{ex} \\ \rho_{ex}^* & \rho_{xx} \end{pmatrix} & \\ \begin{matrix} \\ f_{\nu_x} \end{matrix} \end{matrix}$$

単なる分布関数ではなく
混合状態も考慮.

ニュートリノ自己相互作用のHamiltonian :

$$\mathcal{H} = \mu \int dv' (1 - vv') [g_{\nu'} \rho_{\nu'} - \bar{g}_{\nu'} \bar{\rho}_{\nu'}]$$

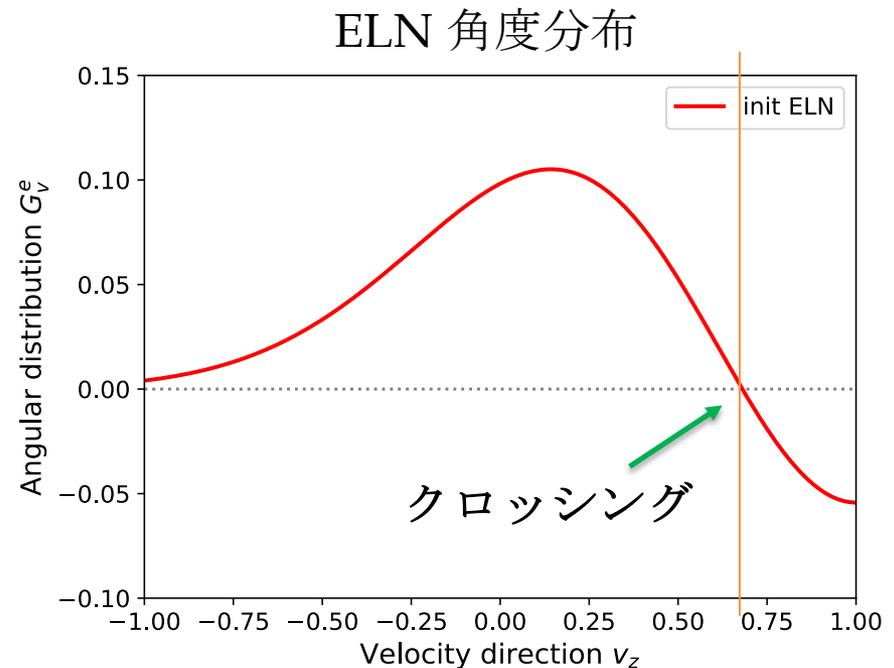
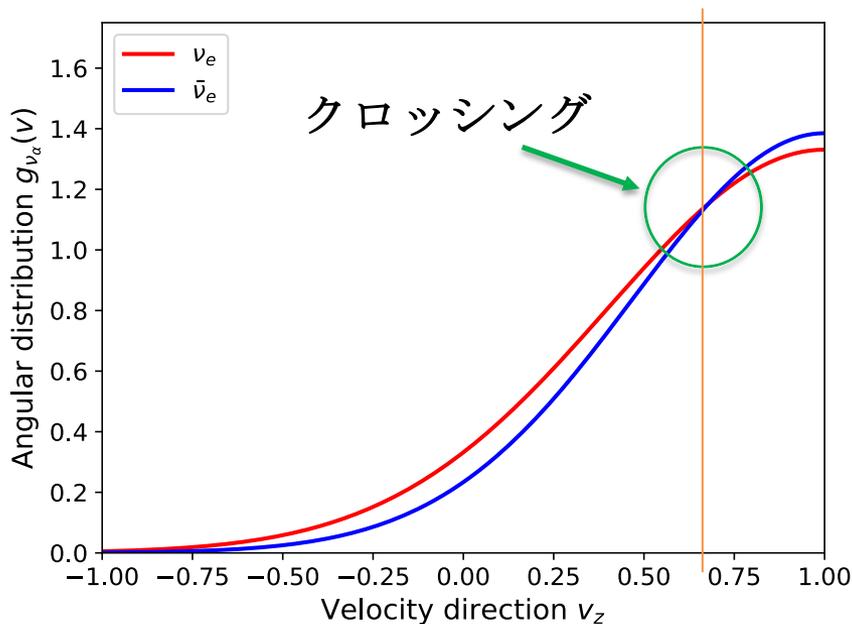
$$\mu = \sqrt{2} G_F n_\nu : \text{振動スケール} \sim O(\text{cm}^{-1})$$

ELN角度分布モデル

$$G_\nu^e = \sqrt{2}G_F \int \frac{E^2 dE}{2\pi^2} [f_{\nu_e}(\mathbf{v}) - f_{\bar{\nu}_e}(\mathbf{v})] = g_{\nu_e}(v) - g_{\bar{\nu}_e}(v)$$

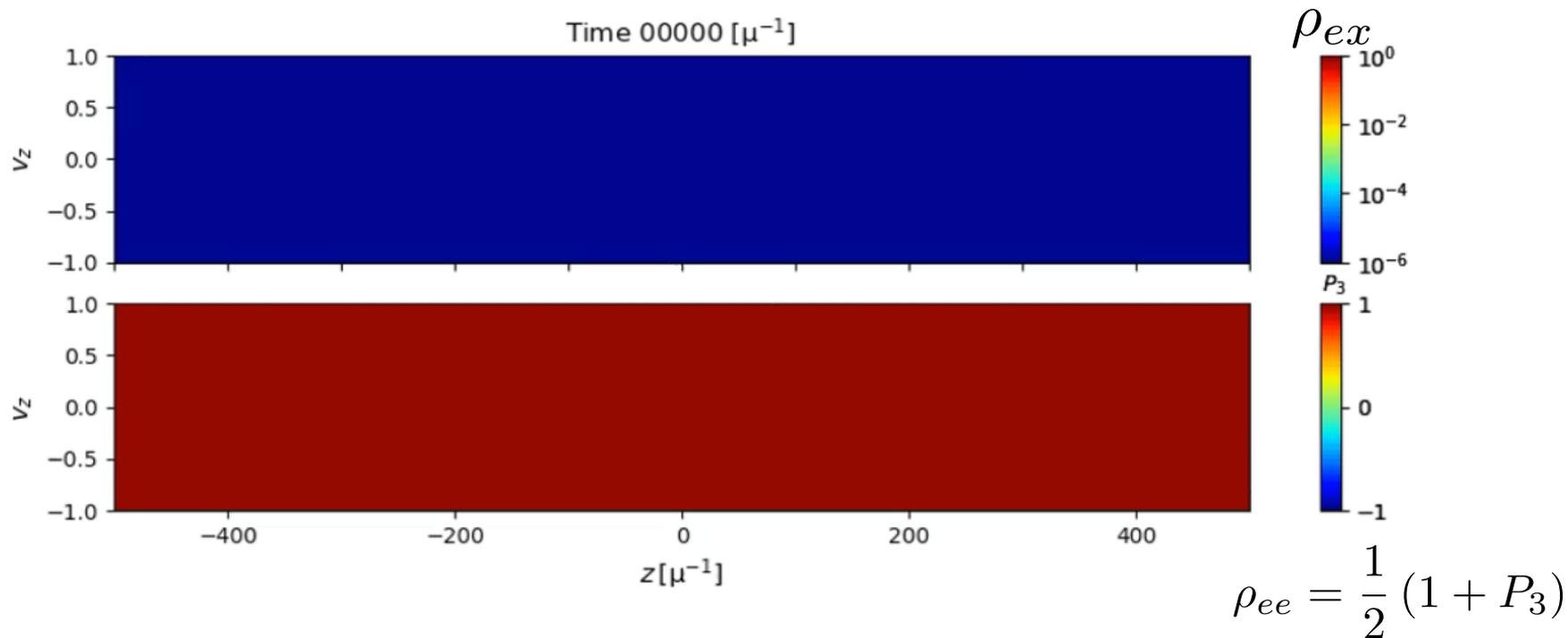
電子型ニュートリノ (ELN) のみ。
初期のXLNはゼロとする。

$$g_\nu \propto \exp \left[-(v - 1)^2 / 2\xi_\nu^2 \right]$$



フレーバー進化計算

ニュートリノ密度行列の各成分の時間進化



計算領域

$$\mu = \sqrt{2}G_F n_\nu = 0.8 \text{ cm}^{-1}$$

$$L_z [\mu^{-1}] = 1000 \mu^{-1} = 1250 \text{ cm}$$

$$t_{\max} [\mu^{-1}] = 5000 \mu^{-1} \sim 200 \text{ ns}$$

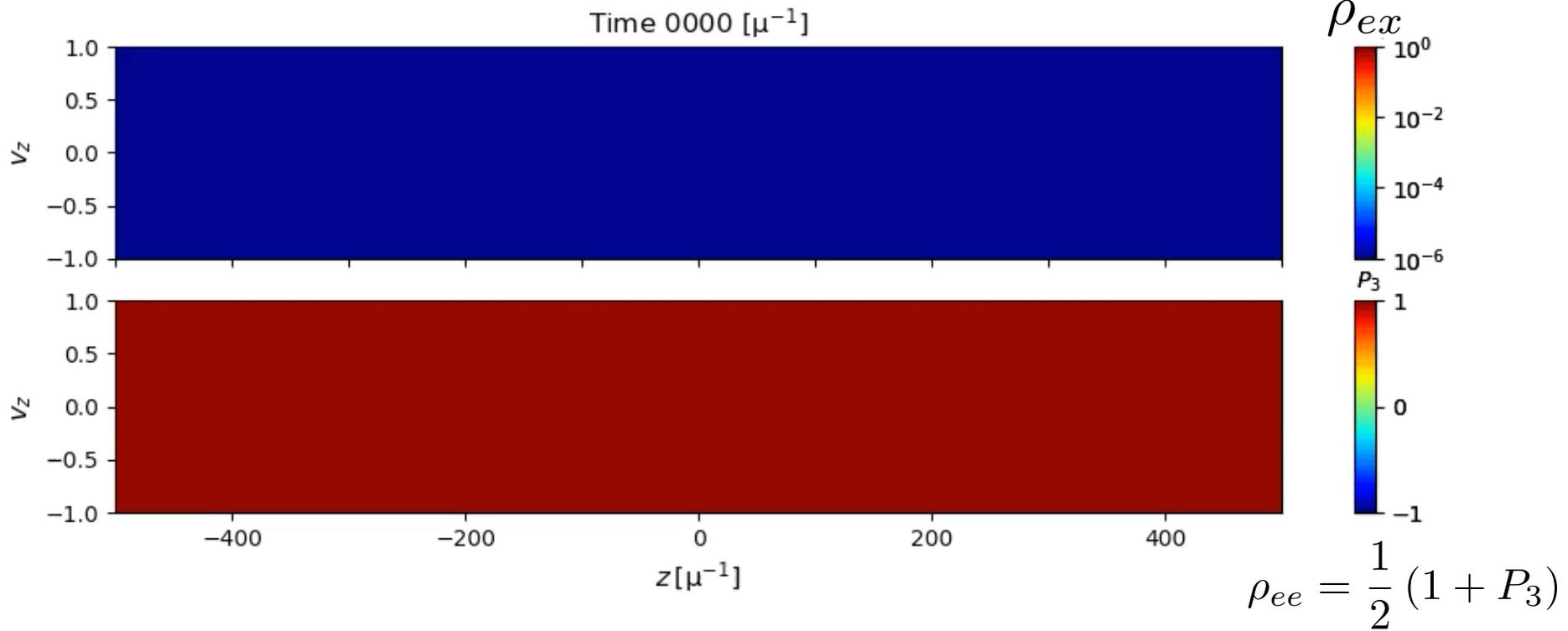
位相空間

$$N_z \times N_{E_\nu} \times N_{\theta_\nu} \\ = 10000 \times 1 \times 256$$

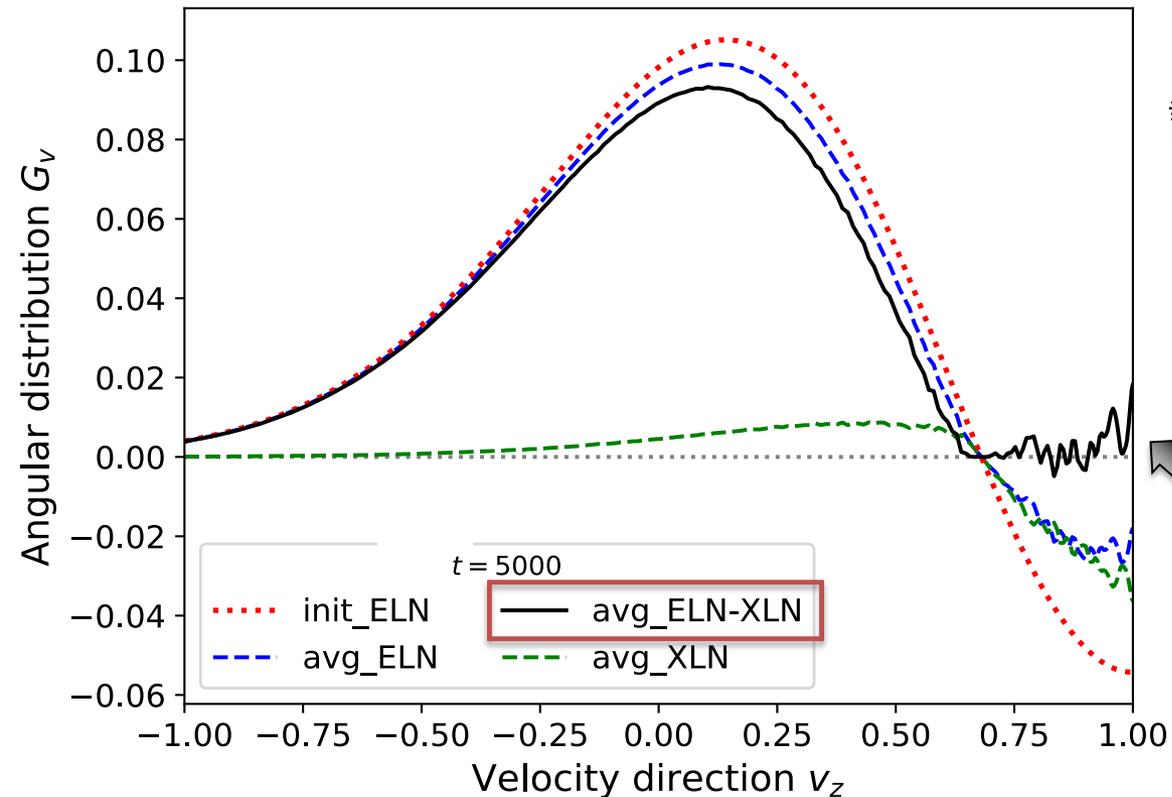
周期的境界条件

フレーバー進化計算

ニュートリノ密度行列の各成分の時間進化



空間平均での角度分布



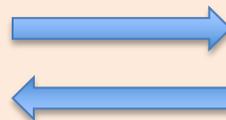
計算終了時の角度分布

ELNにはまだ
クロッシングがある。

ELN-XLNでは
クロッシングが消滅!!

FFCの安定性条件 (非線形領域でも) :

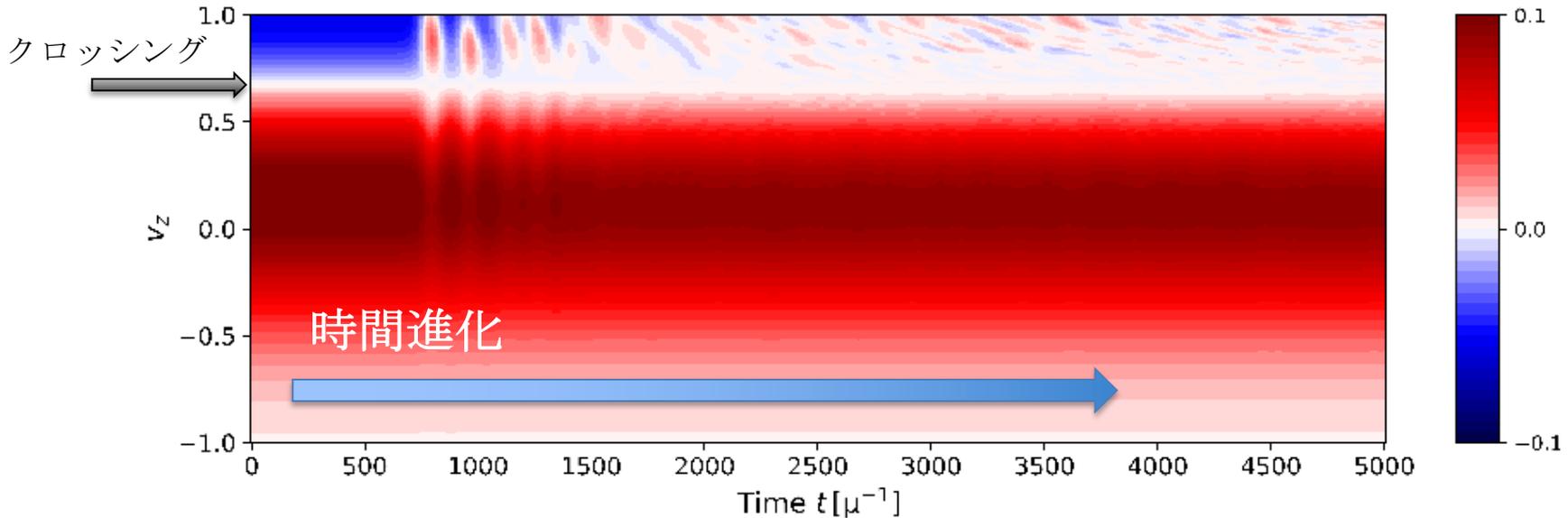
ELN-XLN角度分布での
クロッシングの消滅



FFCの停止/(準)定常

空間平均での角度分布

ELN-XLN の時間進化

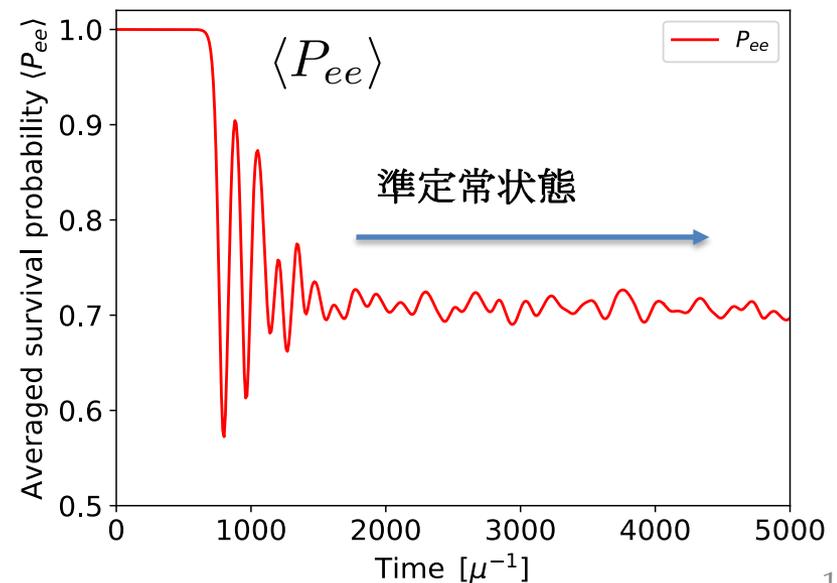


クロッシングの消滅



準定常状態への到達

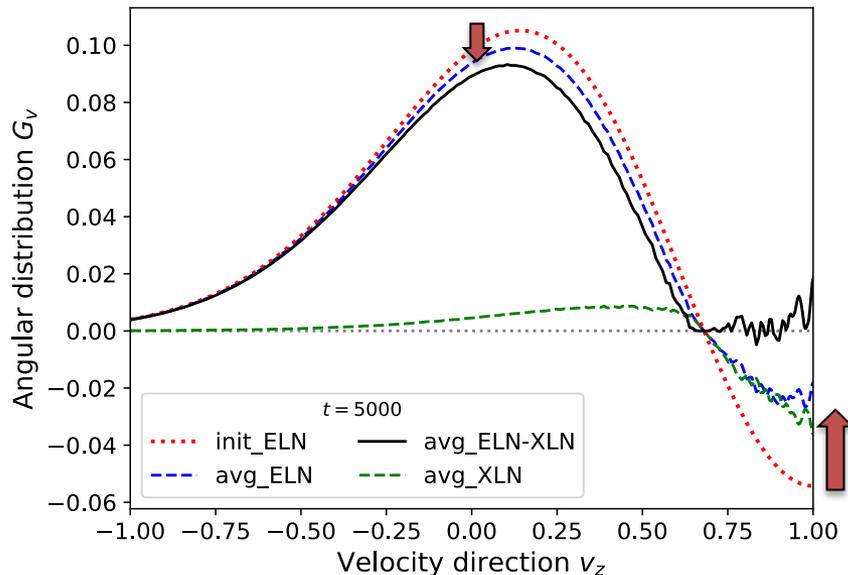
FFC はクロッシングを無くすように進む。



準定常状態のモデル化

準定常状態を特徴付ける量：

1. ELN-XLNクロッシングの消滅
2. ELN (XLN) に対する保存則



元の方程式：

$$i(\partial_t + v_z \partial_z) \rho_v = [H_{vv}, \rho_v] \\ = [H_E, \rho_v] - [v_z H_F, \rho_v]$$

角度積分

$$H_E = \sqrt{2} G_F \int d\Gamma' \rho_{v'}$$

$$H_F = \sqrt{2} G_F \int d\Gamma' v'_z \rho_{v'}$$

保存系

$$\partial_t H_E + \partial_z H_F = 0$$

保存則

~~フラックス項~~

(周期的境界条件)

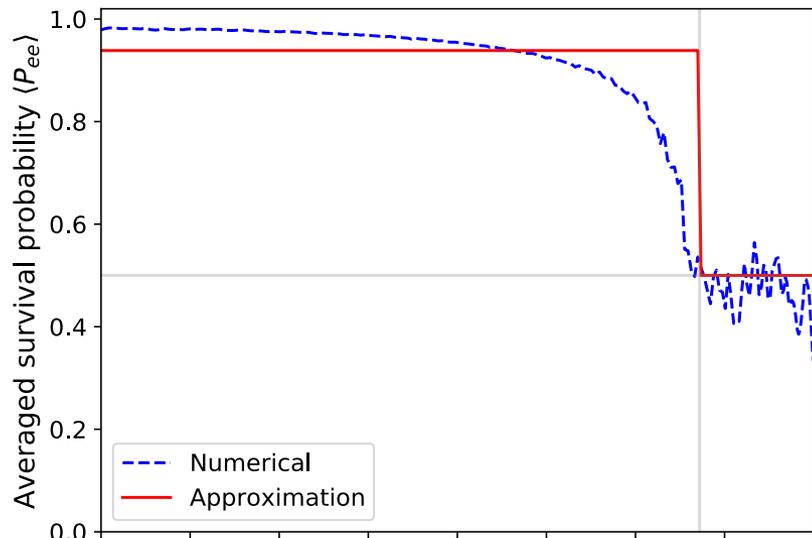
Note.

Dirichletなど別条件の場合は当然この制約も変わる。

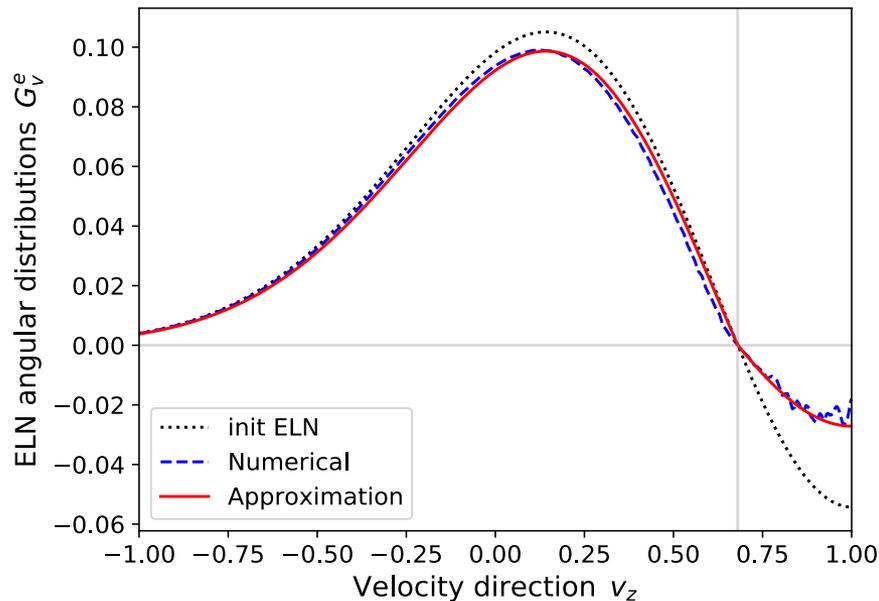
フラックス項のモデル化が必要？

in prep.

準定常状態のモデル化



50%
= フレーバー平衡



- 準定常状態を特徴付ける量：
1. ELN-XLNクロッシングの消滅
 2. ELN (XLN) に対する保存則

$$P_{ee} = \begin{cases} p & \text{for } G_v < 0 \\ 1 - (1 - p) \frac{A}{B} & \text{for } G_v > 0 \end{cases}$$

$$p = 1/2 \quad (\text{for 2 flavor case})$$

$$A \equiv \left| \int_{G_v^{ex} < 0} \frac{d\mathbf{v}}{4\pi} G_v^{ex} \right|$$

$$B \equiv \left| \int_{G_v^{ex} > 0} \frac{d\mathbf{v}}{4\pi} G_v^{ex} \right|$$

For $B > A$

まとめ

- 超新星爆発を理論的に理解するためには、ニュートリノ物理の完全な把握が求められる。
 - ニュートリノ集団振動
 - フレーバー分布の変化がダイナミクスや観測量に影響を与える。
- 高速フレーバー変換
 - 角度分布におけるクロッシングによって誘発。
 - ローカルな条件だが、短いスケールでフレーバーが混ざる。
 - FFCの準定常状態が知りたい (モデル化したい)。
- FFCの準定常状態
 - クロッシングを消すようにFFCが進む。
 - 境界条件からの制約 (保存則など) を組み合わせることでモデル化が可能。