

ニュートリノ集団振動の非線形進化

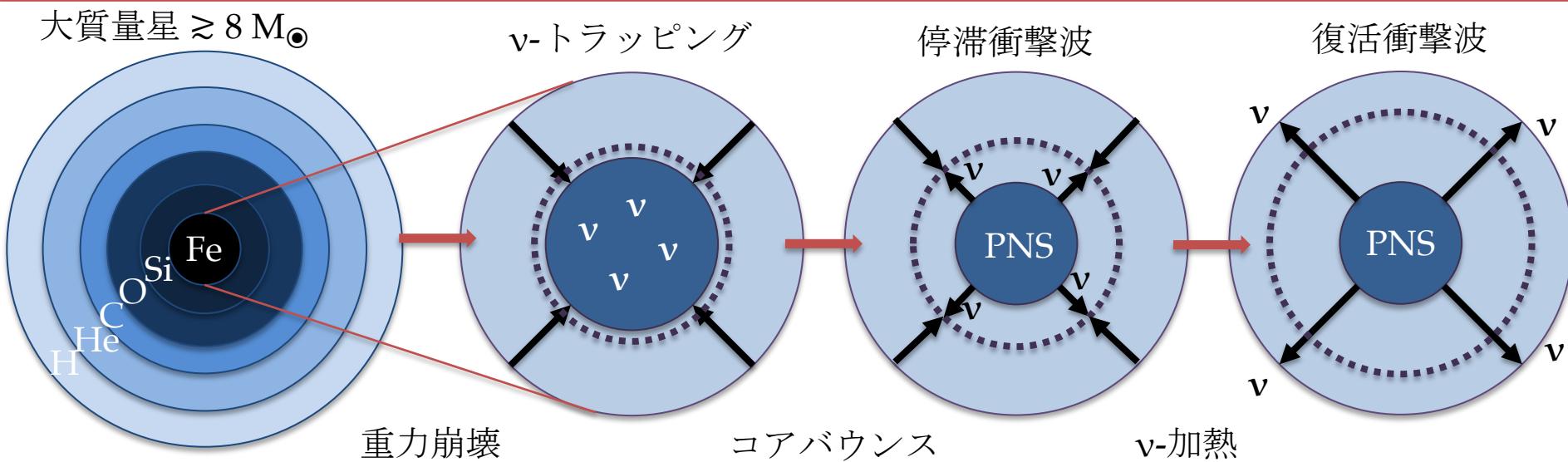
(*arXiv:2104.10532 + in prep.*)

財前 真理

(東京大学 天文学専攻 D3)

新学術「地下宇宙」
第8回超新星ニュートリノ研究会
2022/01/06-07 @オンライン

超新星ニュートリノ



ニュートリノ加熱プロセス:

- 衝撃波は降着物質のせいで停滞する.
- ニュートリノで内側から炙ることで、再度エネルギーを付与させる.

観測から得られるもの (ex. SN1987A):

- 爆発機構, 元素合成, 状態方程式, コンパクト天体, ニュートリノ物理, ...etc.

銀河系内イベント $\sim \mathcal{O}(1/100)$ yr.

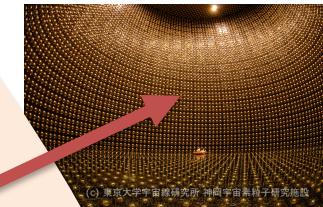
- **理論的な研究が必要不可欠 !!**

ニュートリノ振動 vs. 超新星爆発

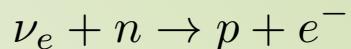
Impact:

- 爆発機構
- 元素合成
- 地上観測

地上観測



ニュートリノ加熱



吸収

ν_e

ν_μ

PNS

$R \sim 10 \text{ km}$

フレーバー変換

MSW共鳴

ν_e

ν_μ

元素合成

吸収

n

停滞衝撃波
 $r \sim 200 \text{ km}$

フレーバー変換

ν_e

ν_e

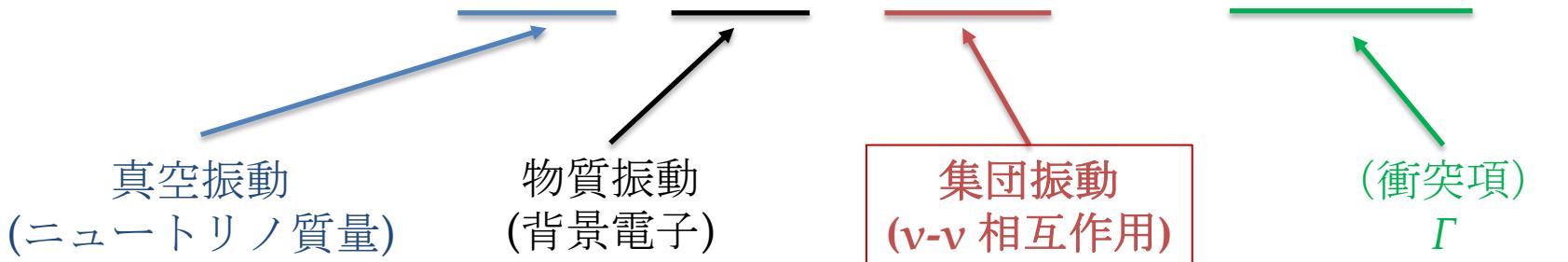
外層

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

超新星内部でのフレーバー変換

超新星内部でのニュートリノ振動:

$$i(\partial_t + \mathbf{v} \cdot \nabla) \rho_\nu = [H_{\text{vac}} + H_{\text{mat}} + H_{\nu\nu}, \rho_\nu] + \mathcal{C}(\rho_\nu, \bar{\rho}_\nu)$$



(Kato-san's talk)

振動スケール:

- 真空振動: $\omega \propto E_\nu^{-1} \sim O(1) \text{ km}$ (for 10 MeV neutrinos)
- 物質振動: $\lambda \propto n_e \lesssim O(1) \text{ cm}$ (in the decoupling region)
- 集団振動: $\mu \propto n_\nu \lesssim O(1) \text{ cm}$ (in the decoupling region)

ニュートリノ集団振動

超新星ニュートリノ: $N\nu \sim 10^{58}$ ($L \sim 10^{53}\text{erg/s}$)

ν - ν 相互作用が無視できない。

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

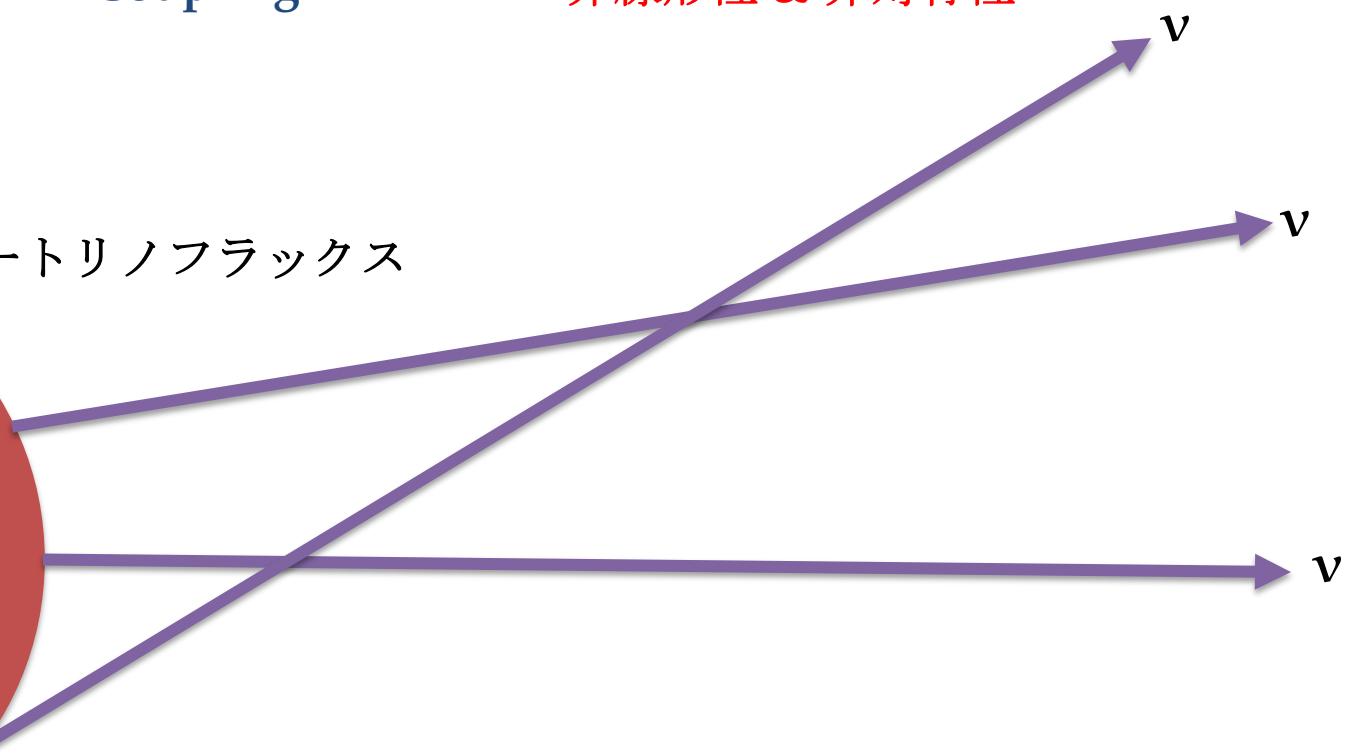
c.f., Pantalone 1992
Duan+ '06

Coupling

非線形性 & 非対称性

ニュートリノフラックス

原始中性子星
(ニュートリノ球)

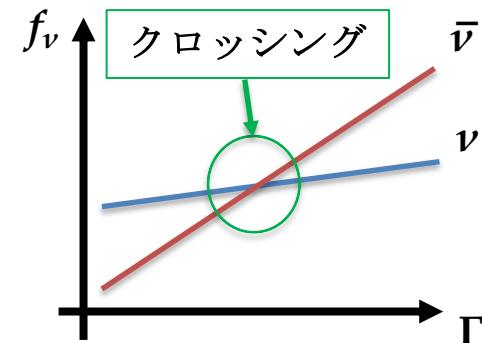


振動モード

ニュートリノ集団振動は $(\rho - \bar{\rho})$ の項が重要.

ν と $\bar{\nu}$ の運動量空間分布の間に
「クロッシング」が存在することがポイント.

(Morinaga '21 and Dasgupta '21)



- Slow mode

- エネルギー分布間でのクロッシング: ω_E
- 真空振動からの影響 → $O(0.1-10)$ m.
- $\bar{\nu}$ は負のエネルギー扱いなので、結果的にグローバルに満たされる.

e.g.,

- Duan+ '06
- Chakraborty+ '16

- Fast mode (Fast Flavor Conversion, FFC)

- 角度分布間でのクロッシング: G_ν
 - ニュートリノ密度のみで駆動 → $O(1-100)$ cm.
 - ローカルな条件.
 - 停滞衝撃波内部でも条件が満たされる可能性あり.

e.g.,

- Sawyer '05 & '16
- Izaguirre+ '17

クロッシングの可能性

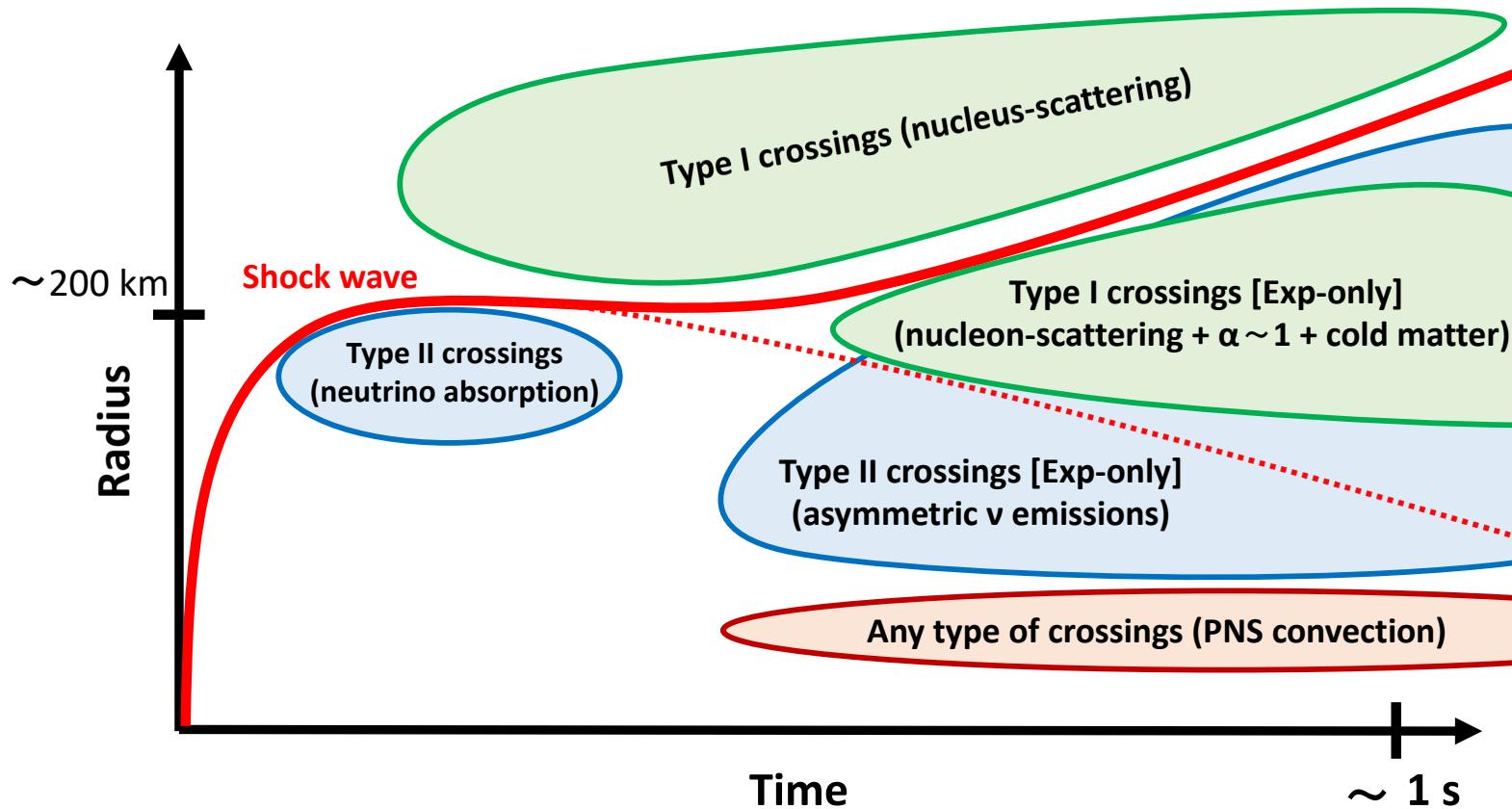
FFC の指標:

電子レプトン数分布

(Electron Lepton Number, ELN)

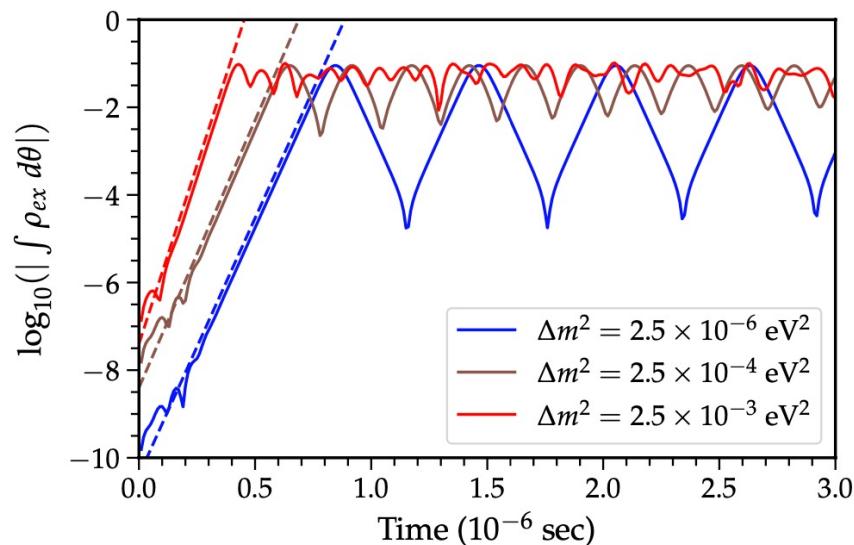
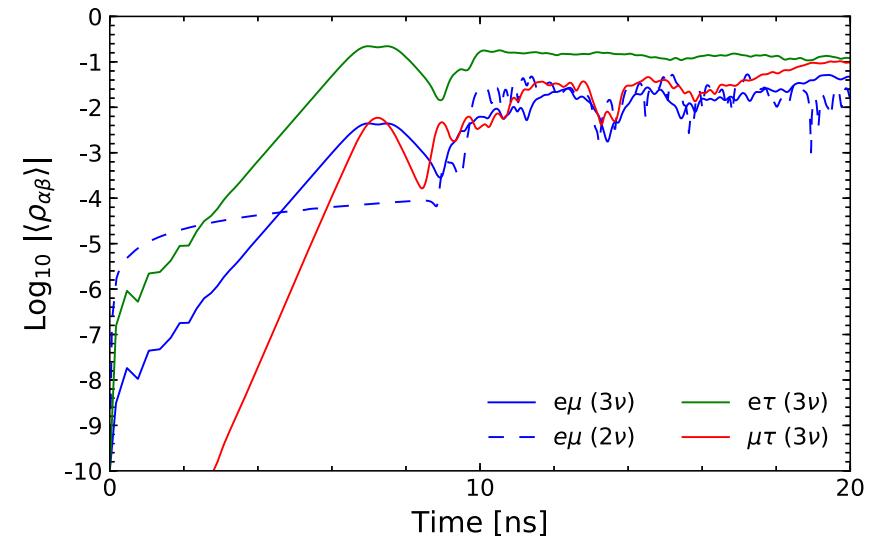
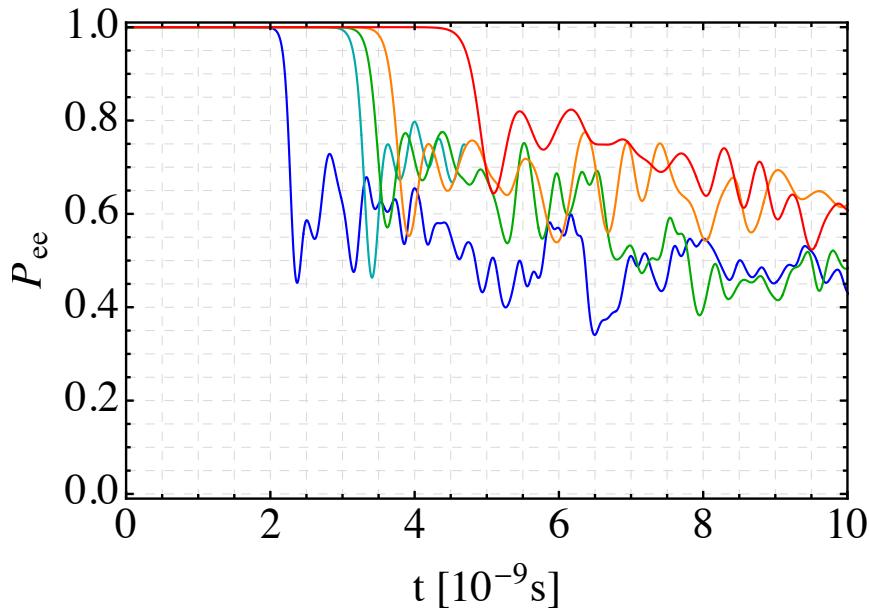
$$G_{\mathbf{v}} \propto g_{\nu_e}(\mathbf{v}) - g_{\bar{\nu}_e}(\mathbf{v})$$

Space-time diagram of ELN-angular crossings in CCSNe



一樣空間でのフレーバー進化

Dasgupta+ '17, Capozzi+ '20, Shalgar+ '21



FFC はローカルな e LN クロッシング
がトリガーする。

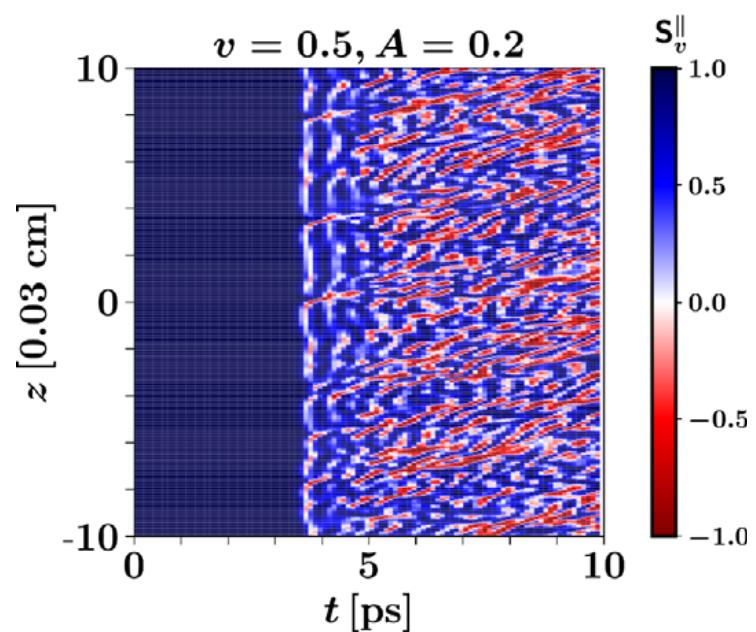
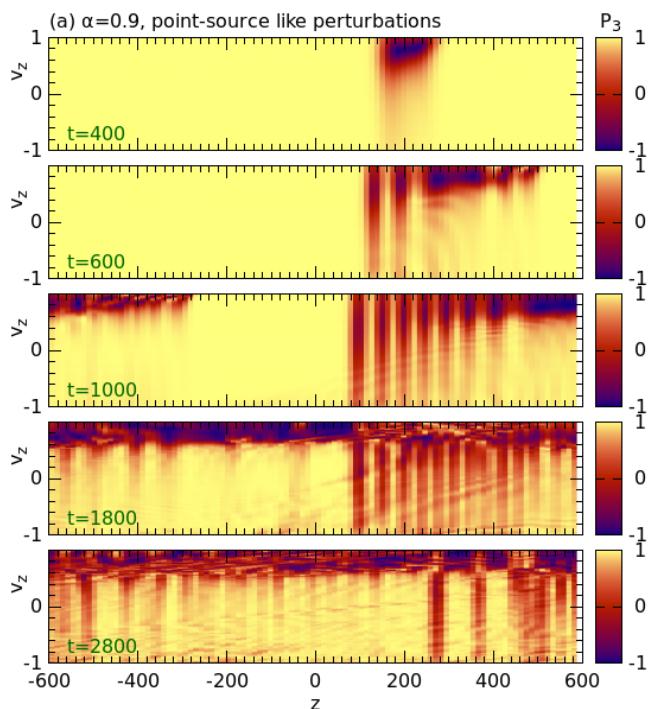
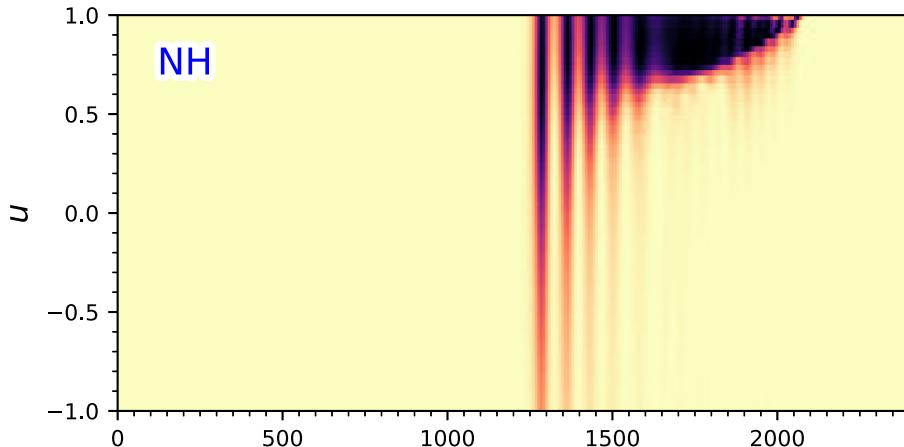
ニュートリノ分布 : (t, v_z)
一様空間を仮定して落とす。

振動スケールは ns, μ s オーダー。

非一様空間でのフレーバー進化

Martin+ '20 & '21, Bhattacharyya+ '21, Wu+ '21

$$\kappa_0 = 2 \times 10^{-4}, t = 900$$



頑張って空間分布の時間進化を見る.
ニュートリノ分布 : (t, z, v_z)

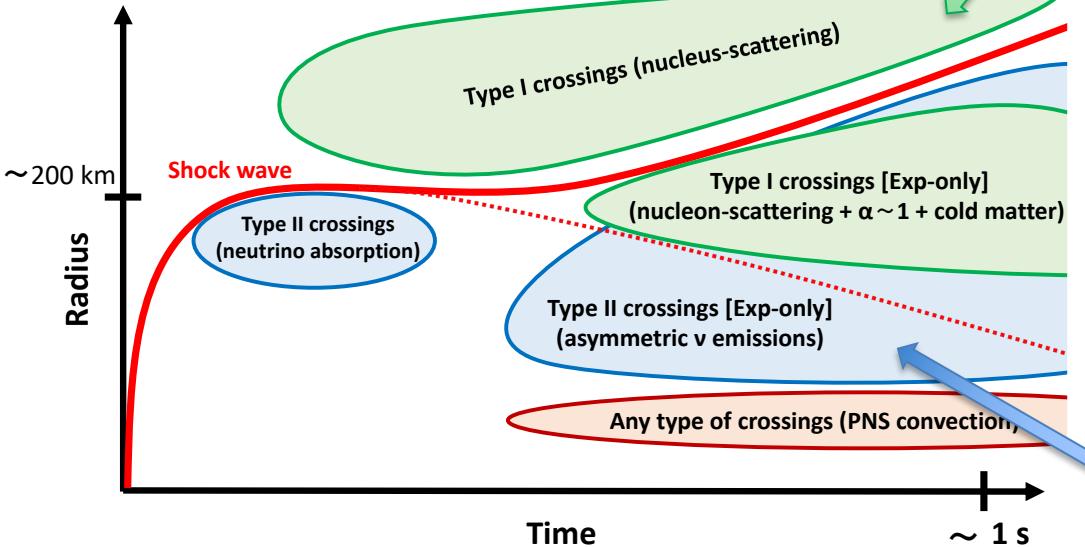
- 角度分布を跨ぐ縞模様.
- フレーバー平衡 ($\langle P_{ee} \rangle \sim 0.5$).
 - フレーバー波同士の干渉により小さいスケールの構造ができる.

FFCのタイプ/分類

Distribution
in Zaizen & Morinaga '21

Realistic model

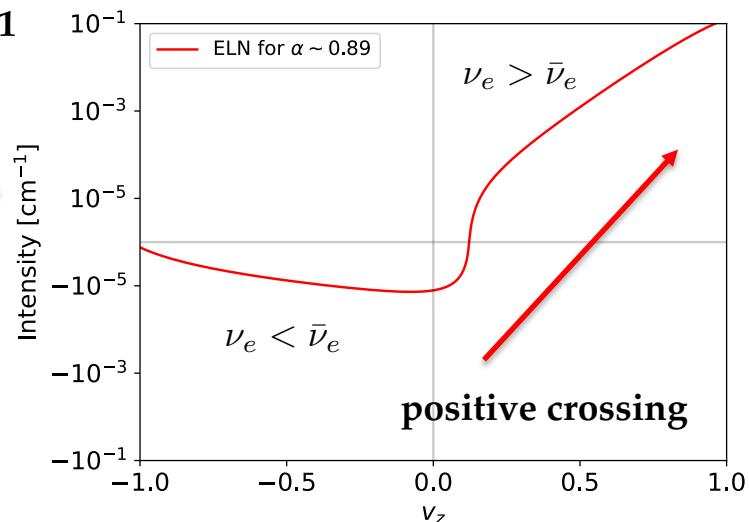
Space-time diagram of ELN-angular crossings in CCSNe



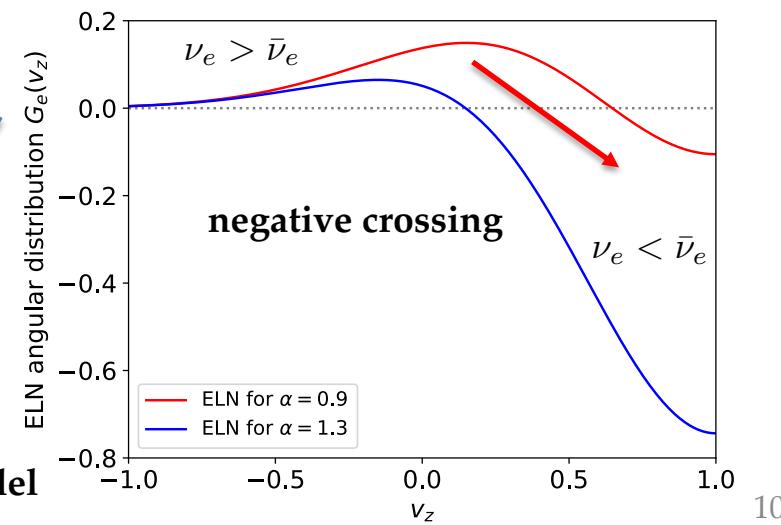
Nagakura+ '21

Distribution
in Wu+ '21
Non-realistic model

Type-I クロッシング



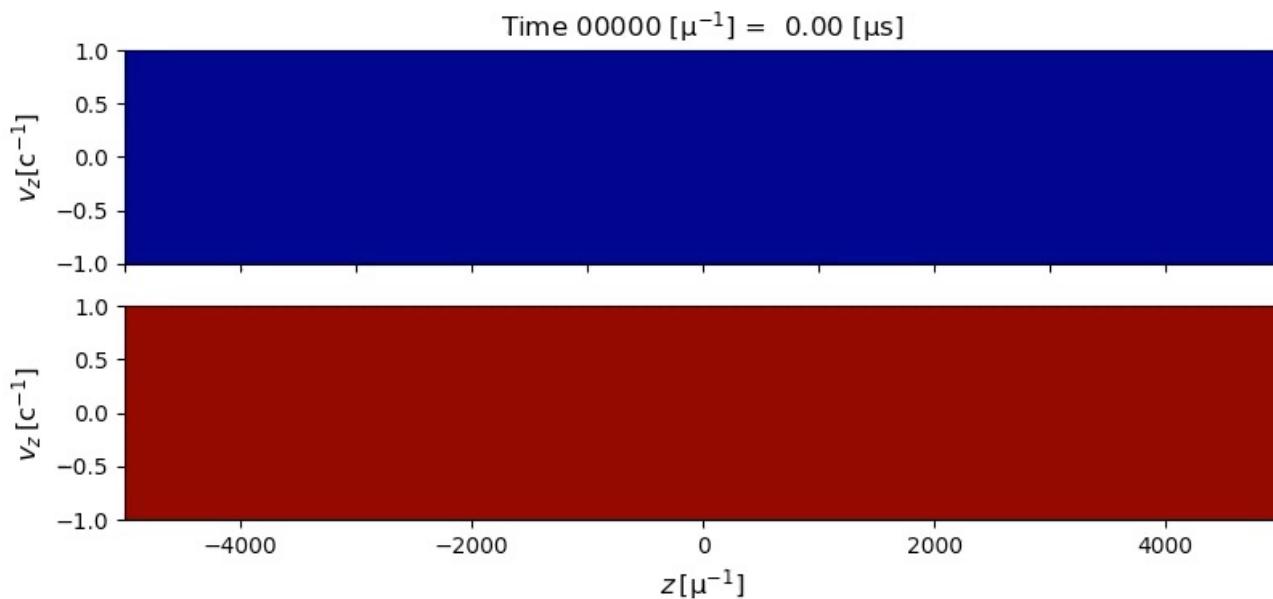
Type-II クロッシング



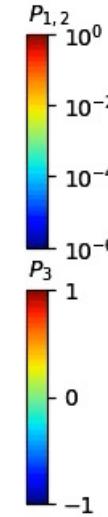
セットアップ

$$\rho_\nu(t, z, v_z) = \frac{\text{Tr}(\rho_\nu)}{2} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{P}(t, z, v_z)$$

$$P_\perp = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} = \rho_\nu^{\alpha\beta}$$



フレーバー不安定性



生存確率

$$P_{ee} = \frac{1}{2} (1 + P_3)$$

初期空間擾乱

$$P_1(t=0, z, v_z) = \epsilon_0 \exp[-z^2/50]$$

$$P_2(t=0, z, v_z) = 0$$

$$P_3(t=0, z, v_z) = \sqrt{1 - P_1^2}$$

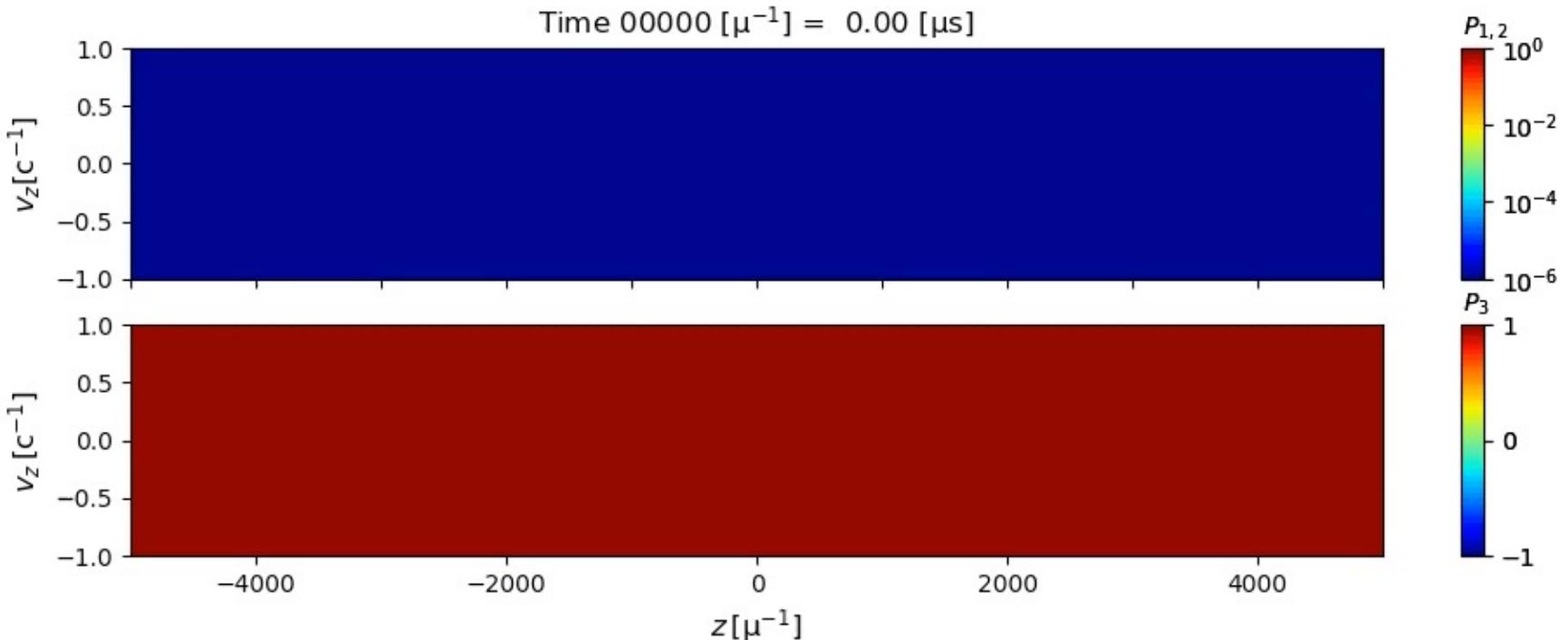
$$\epsilon_0 = 10^{-6}$$

衝突項 $\mathcal{C}(\rho_\nu, \bar{\rho}_\nu) = 0$

(衝突項の影響は加藤さんや佐々木さんの方で)

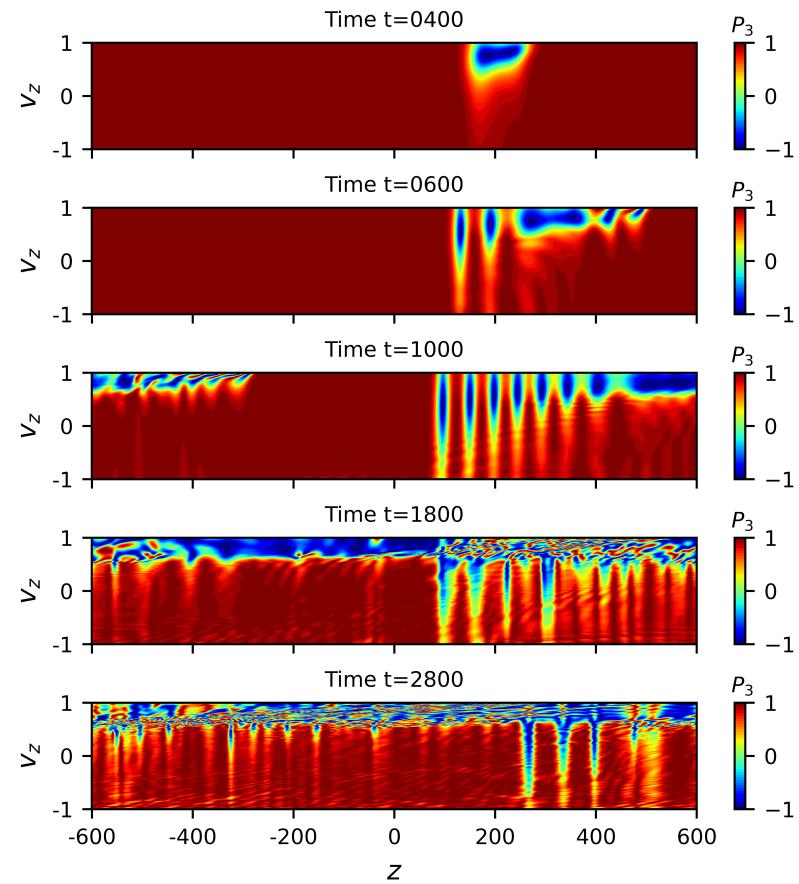
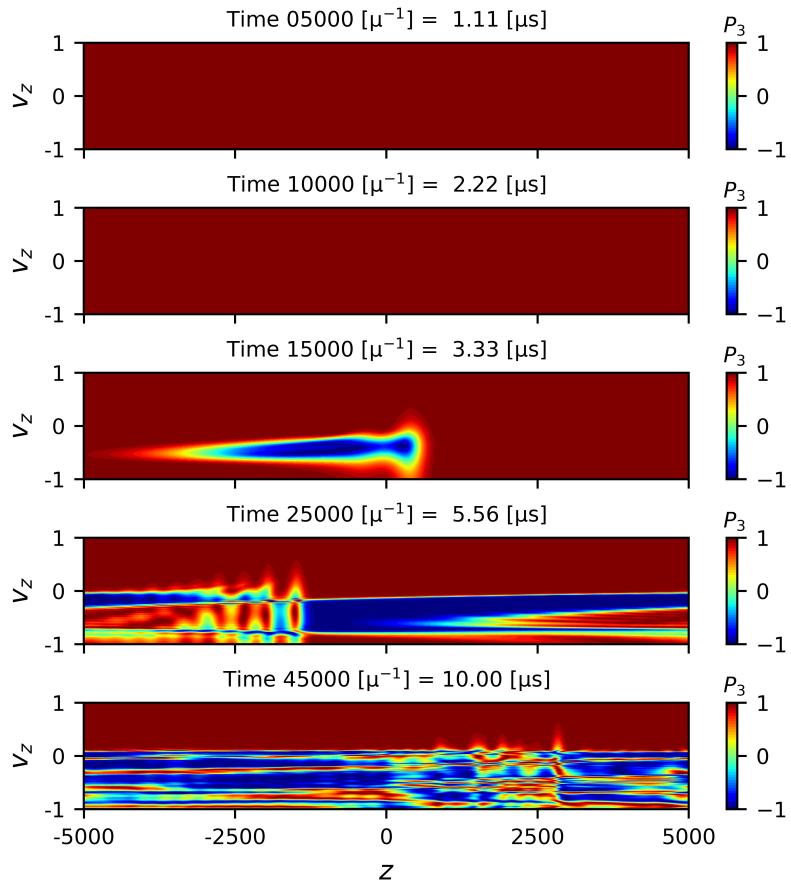
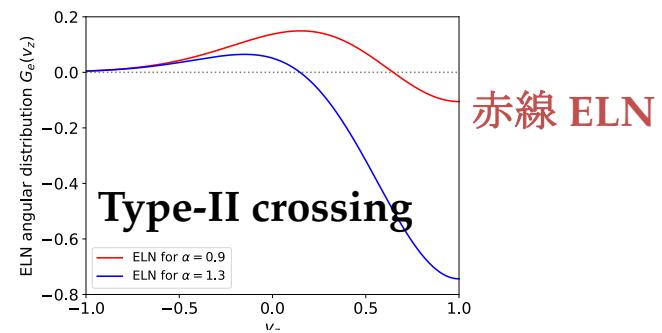
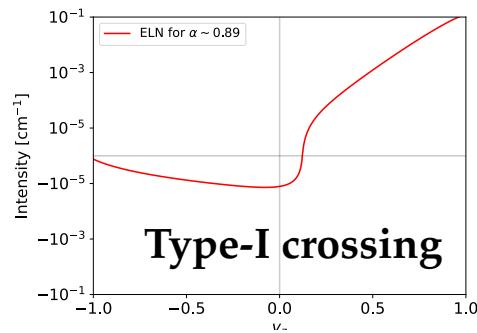
FFCの局所進化計算

$$P_{\perp} = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} = \rho_{\nu}^{\alpha\beta}$$

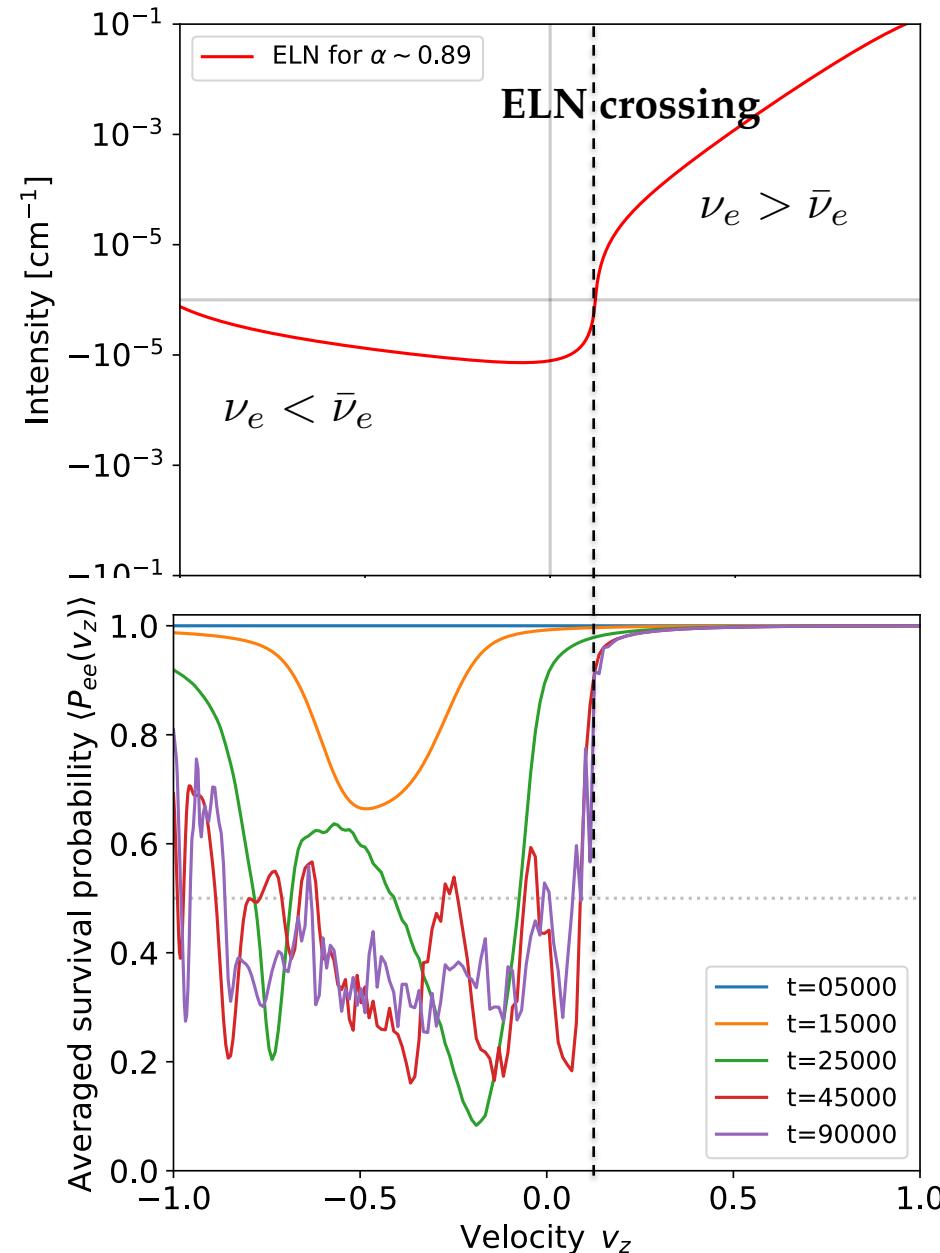


$$P_{ee} = \frac{1}{2} (1 + P_3)$$

Type-I & II の比較



クロッシングと生存確率 for Type-I



$$\alpha = \frac{n_{\bar{\nu}_e}}{n_{\nu_e}} \sim 0.89$$

- Type-I クロッシング.
- ν_e 過剰 ($\alpha < 1$).

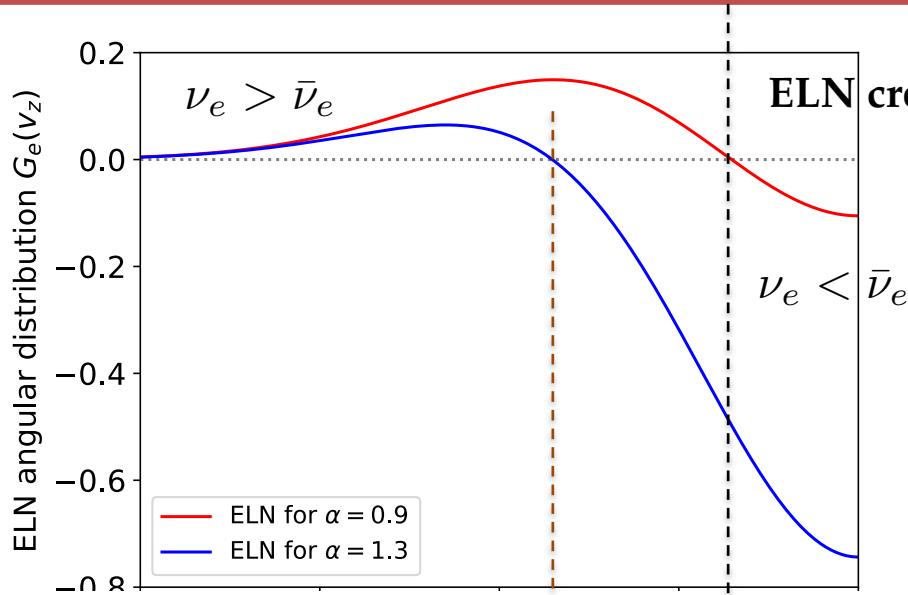
空間平均した生存確率.

$$\langle P_{ee}(v_z) \rangle = \int dz \ P_{ee}(z, v_z) \Bigg/ \int dz$$

FFC が殆ど $v_z < v_{z,c}$ でのみ起きた.
 $v_z < v_{z,c}$ でフレーバー平衡に.

FFC がクロッシングを消そうとしているように見える?

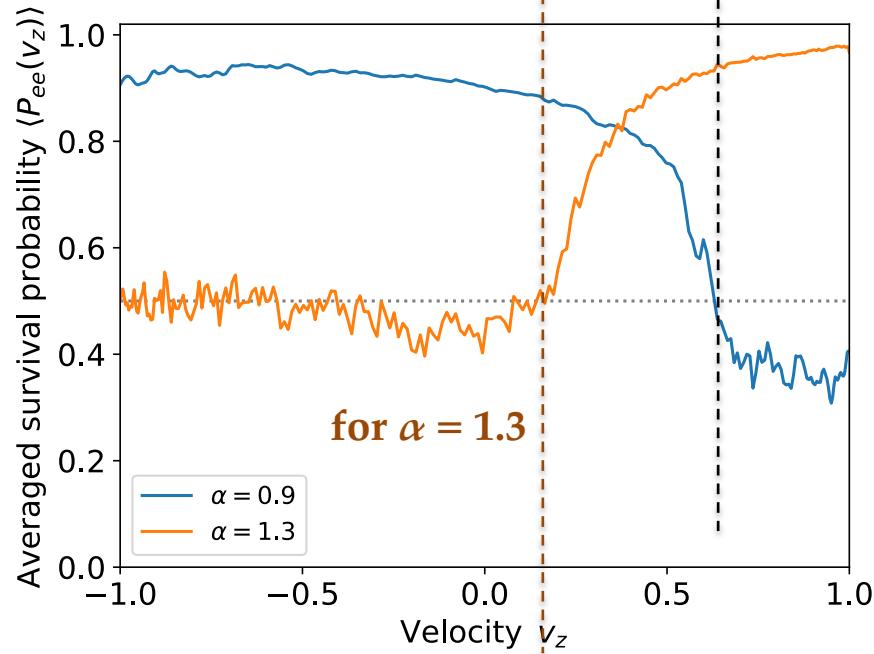
クロッシングと生存確率 for Type-II



ELN crossing for $\alpha = 0.9$

- Type-II クロッシング.
- ν_e 過剰 ($\alpha < 1$).
- $\bar{\nu}_e$ 過剰 ($\alpha > 1$).

(Wu+ '21 の追計算)

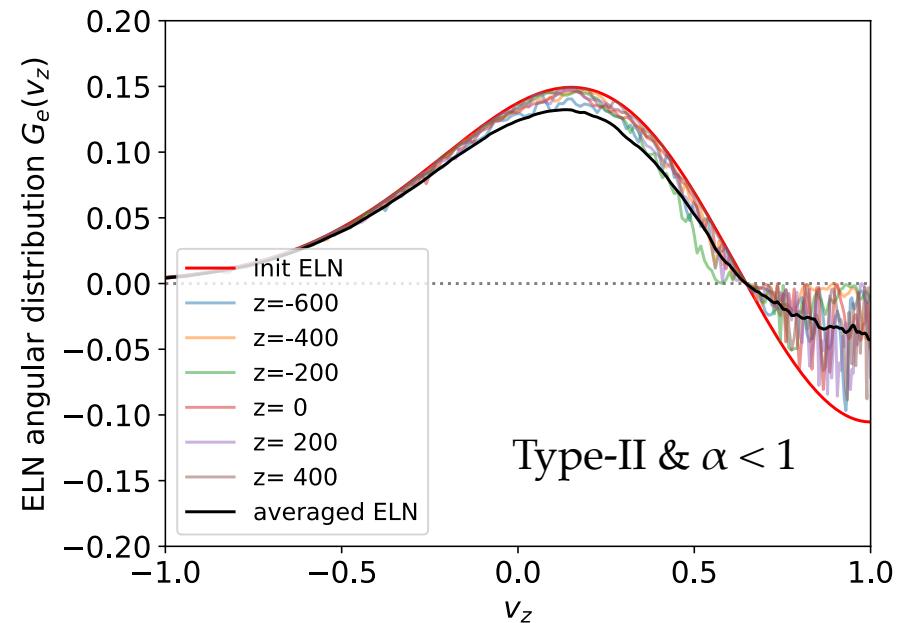
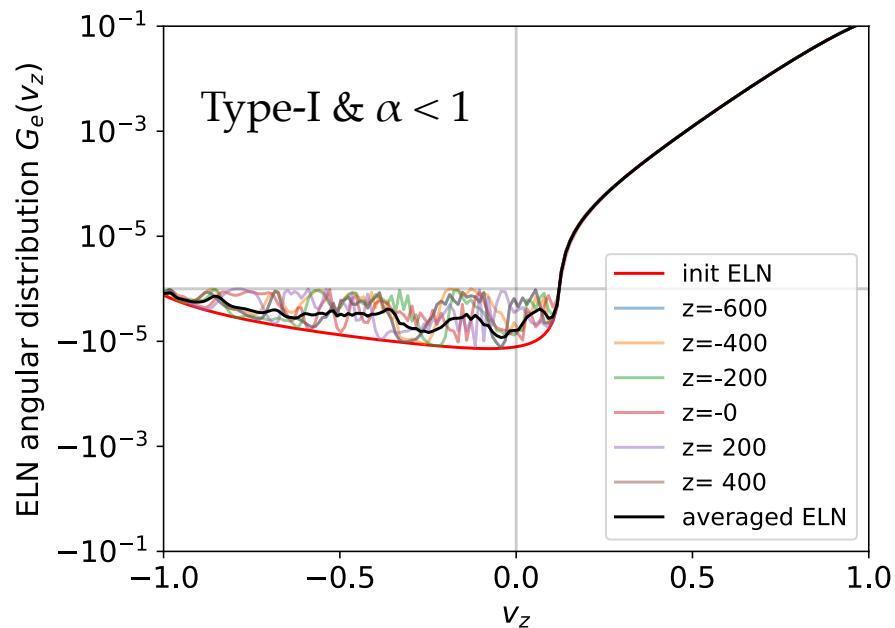


FFC が $v_z > v_{z,c}$ で起きた (for $\alpha < 1$).
 $v_z < v_{z,c}$ で起きた (for $\alpha > 1$).

同じ Type でも α で反対の傾向に.

同じ α だと、Type-I と反対の傾向に.

Type-I & II ELN



クロッシングを埋めるようにFFCが角度分布を変化させている。

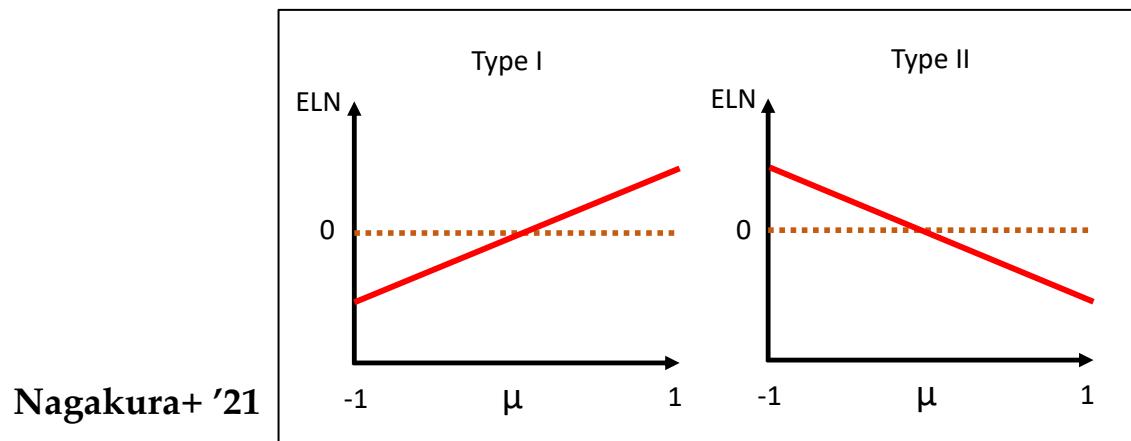
v_e 過剰の場合、 v_e の多いところから少ないところへ移送しているように見える。

逆もまた然り。

Type-I & II クロッシング

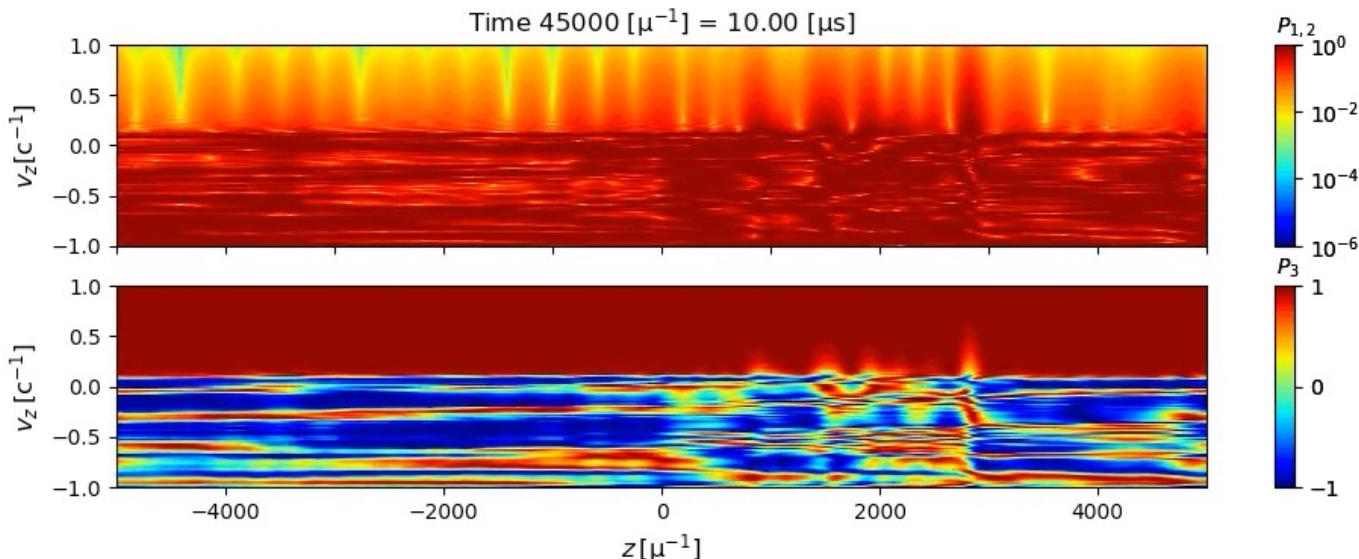
漸近的な FFC の振る舞い： α に応じてクロッシングを埋める。

	Type-I クロッシング	Type-II クロッシング
$\alpha < 1$ (v_e 過剰)	FFC at $v_z < v_{z,c}$	FFC at $v_z > v_{z,c}$
$\alpha > 1$ (\bar{v}_e 過剰)	(未計算だが恐らく) FFC at $v_z > v_{z,c}$	FFC at $v_z < v_{z,c}$



まとめ

- ✓ 超新星内部の高いニュートリノフラックス
→ ニュートリノ集団振動.
- ✓ 角度分布における ν と $\bar{\nu}$ 間のクロッシング
→ Fast Flavor conversion (FFC).
- ✓ フレーバー波同士の干渉によるフレーバー平衡.
 - Type-I & II クロッシングを簡単にカテゴライズできる?
 - より一般的なケースで分類すればCCSN計算に組み込めそう?
 - (衝突項の取り扱い等々問題はまだ山積み.)



Note

Back slides

Slow vs. Fast

EoM:

$$i(\partial_t + \mathbf{v} \cdot \nabla) \rho_\nu = [H_{\text{tot}}, \rho_\nu] + \mathcal{C}[\rho_\nu, \bar{\rho}_\nu]$$

$$H_{\text{tot}} = U \frac{M^2}{2E} U^\dagger + v^\mu \Lambda_\mu + \sqrt{2} G_F \int d\Gamma' v^\mu v'_\mu g_{\mathbf{v}'} \rho'_{\nu}$$

ニュートリノエネルギー
(in 真空振動)

クロッシング

$$H_{\nu\nu}(\mathbf{v}) = \sqrt{2} G_F v^\mu \int d\Gamma v_\mu g_\Gamma \rho_\nu$$

ハミルトニアンとしては
角度依存性しか残らない。

エネルギー分布でのクロッシング:

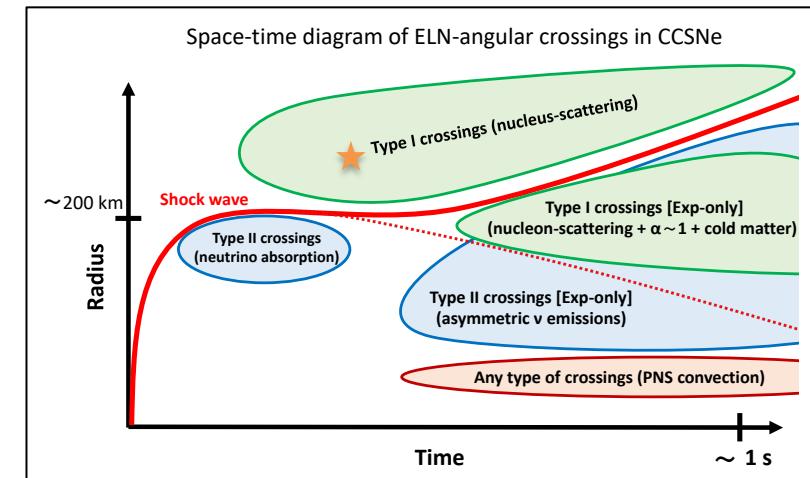
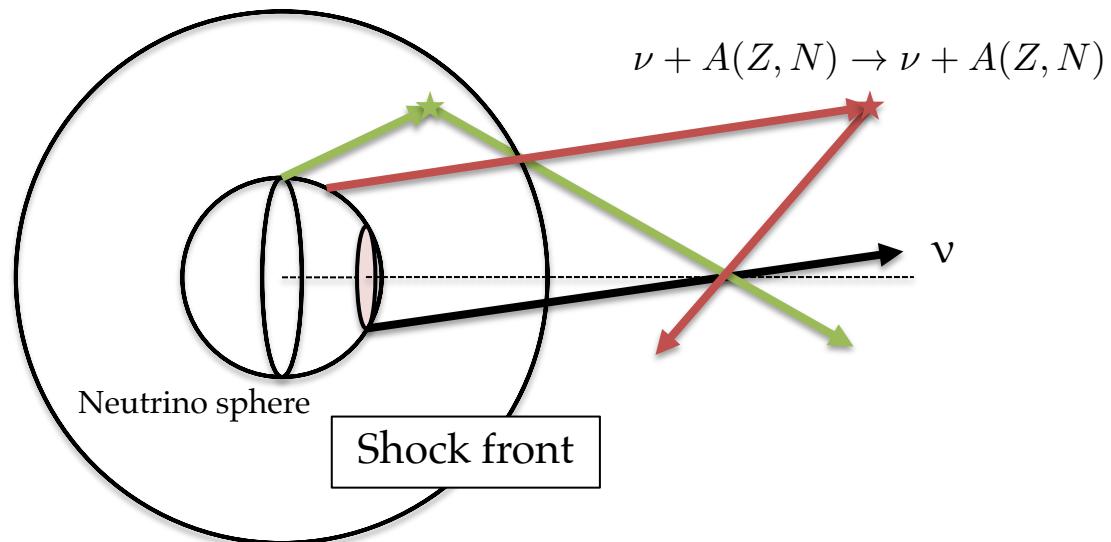
→ 真空振動が slow mode に影響を与える. Long-scale になる.

角度分布でのクロッシング:

→ Fast mode は真空振動と独立に進化できる (はず).

→ FFC のみ調べたいなら、真空振動項を落とせばよい.

コヒーレント散乱



Nagakura+ '21

$$\sigma_A(E_\nu, (A, Z)) \approx \frac{G_F^2 E_\nu^2}{4\pi} A^2 \left[1 - \frac{2Z}{A} (1 - 2 \sin^2 \theta_W) \right]^2$$

コヒーレント ニュートリノ-原子核 散乱:

- 散乱断面積 $\propto E_\nu^2$.
- 反 v の方が平均エネルギーが高い.
→ 内向き方向で支配的になる.
- 内向きと外向きの間でクロッシングができる.
 - (散乱なしなら v が一般的に支配的になる).

Morinaga+ '20

セットアップ

H_{vac} , H_{mat} , 衝突項 Γ を無視.

$$\begin{aligned}(\partial_t + v_z \partial_z) \mathbf{P}(t, z, v_z) &= \mathbf{H}(t, z, v_z) \times \mathbf{P}(t, z, v_z) \\&= \left[\mu_{\nu_e} \int dv'_z (1 - v_z v'_z) G_e(v'_z) \mathbf{P}(t, z, v'_z) \right] \times \mathbf{P}(t, z, v_z)\end{aligned}$$

$$\rho_\nu(t, z, v_z) = \frac{\text{Tr}(\rho_\nu)}{2} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{P}(t, z, v_z)$$

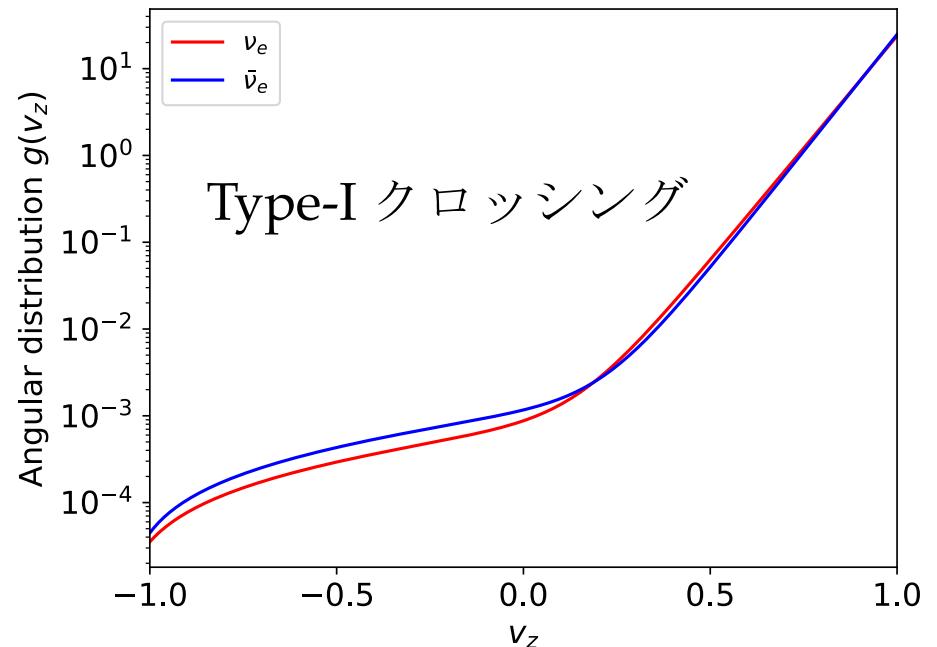
σ : Pauli matrices
 P : Polarization vector

$$G_e(v_z) \equiv g_{\nu_e}(v_z) - \alpha g_{\bar{\nu}_e}(v_z)$$

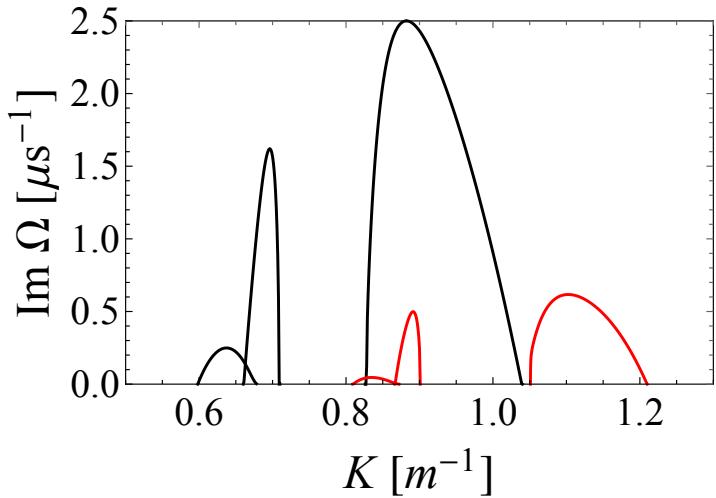
g_ν : 角度分布

G_e : eLN 角度分布

衝撃波前方領域でのコピー
レント散乱



線形 & 非線形フェイズ



線形安定性解析から得られるフレーバー変換の成長率.
(黒線が今回の条件.)

左下の線形フェイズと一致.

(赤線は他条件のものなので気にせず.)

途中から非線形領域に突入. カスケードが見える.

