

物質による吸収・放出反応が ニュートリノ集団振動に与える影響の調査

加藤ちなみ(東京理科大)

共同研究者：長倉洋樹(国立天文台)

財前真理(早大)

第9回超新星ニュートリノ研究会 @九州大学

ν 振動と ν 集団振動

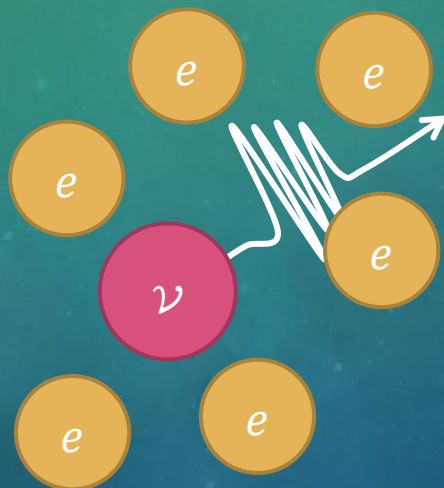
これらのダイナミクスや観測量にも影響

真空振動



有限質量による真空
中のフレーバーの時
間変化

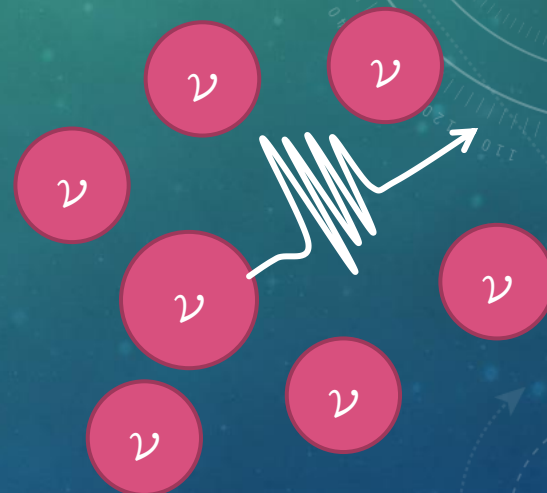
物質振動(MSW)



物質との相互作用

恒星(太陽)
超新星爆発
高密度星合体残骸
地球

集団振動



周囲の ν との相互作用

超新星爆発
高密度星合体残骸
(初期宇宙)

ν 集団振動の特徴

- ✓ ニュートリノ同士の相互作用によって起こる非線形現象
真空振動よりも十分速い高速ニュートリノフレーバー変換(FFC)

$$\nu_e \bar{\nu}_e \Leftrightarrow \nu_x \bar{\nu}_x$$

エネルギー依存しない

- ✓ 非常に細かい振動スケール・角度スケール

振動スケール(1-100cm) \ll 系のスケール(数十km)

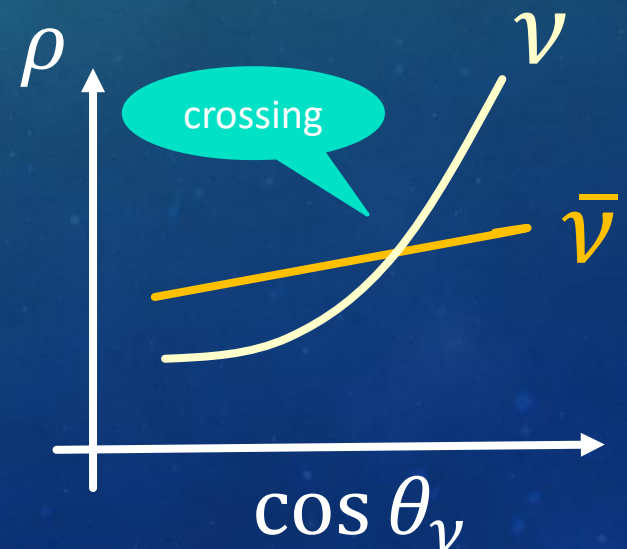
角度スケール: $\cos \theta_\nu \sim O(10^{-3})$

➡ 高い計算コスト

- ✓ レプトン数クロッシングが一つの指標

ν と $\bar{\nu}$ の角度分布の違いが重要

ν と $\bar{\nu}$ の化学ポテンシャル ~ 0 付近



集団振動 + 物質衝突

✓ 周囲の物質との衝突が集団振動に影響

衝突によって角度分布が変わり新しく集団振動を誘発

衝突が集団振動を抑制 or 促進

衝突フレーバー変換不安定性(CFI)

✓ CFI

衝突タイムスケール程度で発展する不安定的なフレーバ変換

・ ν の反応率 \neq $\bar{\nu}$ の反応率

・ エネルギースペクトルのクロッシング などが指標

(FFCと異なって、角度にクロッシングがなくても起こる)

超新星爆発におけるFFCの役割

✓ 超新星爆発ではフレーバーごとに役割が異なる

• $\nu_e, \bar{\nu}_e$: 物質と密に反応 \rightarrow 冷却と加熱

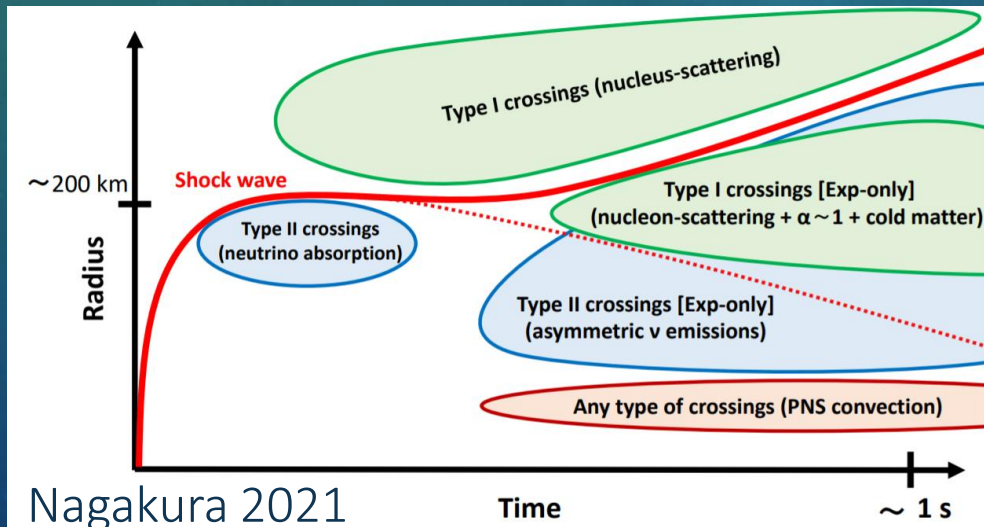
ex) 衝撃波復活

観測のメインターゲット

• $\nu_x, \bar{\nu}_x$: PNS冷却に寄与

$\rightarrow \nu_e \leftrightarrow \nu_x$ を引き起こす集団振動はとても大事

✓ ELNクロッシングはあらゆる場所・時刻で起こりうる



✓ 爆発を助ける？ 妨げる？

現状は両方の主張論文

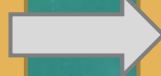
ex) Nagakura 2023 : 爆発を助ける

Ehring 2023 : 爆発を妨げる

本研究の位置づけ

現在の集団振動研究

振動＋ニュートリノ振動の
量子輸送方程式を解く



古典ボルツマン方程式に
簡易的に導入して解く

✓ 集団振動の基礎研究

- ・線形挙動 (赤穂君)
- ・非線形挙動
- ・非一様BGの影響 (財前君)
- ・物質衝突による影響

✓ 漸近的挙動の調査

物質衝突下におけるフレーバー変換の基礎研究

c.f. 等方散乱(ニュートリノ-核子散乱)による影響調査論文

CK & Nagakura, PRD, 106, 123012, 2022

✓ 流体＋ニュートリノ輸送計算

✓ ダイナミクスや観測量への影響調査

研究目標と本発表の内容

大きな研究目標

∪ 集団振動(特にfast mode)が高エネルギー現象における∪スペクトルやダイナミクスに与える影響の調査

本発表の目標

簡易化した状況下を用いた、物質による吸収・放出がFFCに与える影響の調査

- ✓ 単一エネルギーによる吸収・放出の影響の一般的な特徴
- ✓ 現実的なエネルギースペクトルを用いたときの影響の議論
- ✓ 初期角度分布による吸収・放出による影響の変更点

本計算における支配方程式

$$\begin{aligned}
 i \frac{\partial \rho_a}{\partial t} &= [\mathcal{H}_{\nu\nu}, \rho_a] + i \begin{pmatrix} 2\pi R_e - [R_e + R_a] \rho_{ee,a} & -\frac{1}{2} [R_e + R_a] \rho_{ex,a} \\ -\frac{1}{2} [R_e + R_a] \rho_{xe,a} & 0 \end{pmatrix} \\
 i \frac{\partial \bar{\rho}_a}{\partial t} &= [\bar{\mathcal{H}}_{\nu\nu}, \bar{\rho}_a] + i \begin{pmatrix} 2\pi \bar{R}_e - [\bar{R}_e + \bar{R}_a] \bar{\rho}_{ee,a} & -\frac{1}{2} [\bar{R}_e + \bar{R}_a] \bar{\rho}_{ex,a} \\ -\frac{1}{2} [\bar{R}_e + \bar{R}_a] \bar{\rho}_{xe,a} & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

振動項 衝突項

密度行列

$$\rho_a \equiv \int \rho d\phi_\nu$$

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{ee} & \rho_{ex} \\ \rho_{ex}^* & \rho_{xx} \end{pmatrix}, \bar{\rho} = \begin{pmatrix} \bar{\rho}_{ee} & \bar{\rho}_{ex} \\ \bar{\rho}_{ex}^* & \bar{\rho}_{xx} \end{pmatrix}$$

v-v potential

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

- ✓ 2-flavor
- ✓ 真空振動・物質振動無視
- ✓ 荷電カレント反応
 $R(E_\nu) = R_0 E_\nu^2$
 c.f. 電子捕獲や陽電子捕獲
- ✓ 一様BG ν ・物質

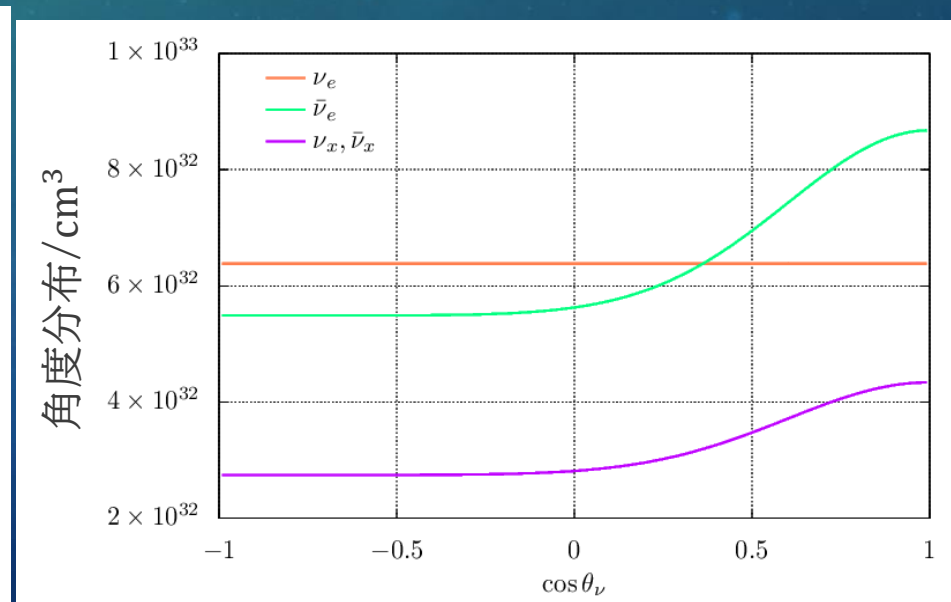
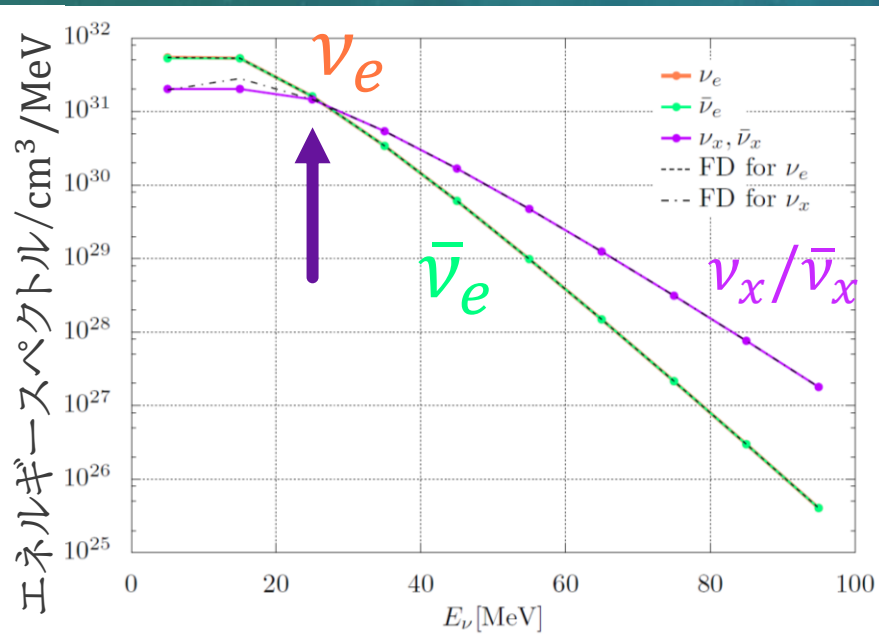
計算条件

✓ $\sim 50\text{km}$ at 100ms の状況を模擬

➔ $\bar{\nu}_e, \nu_x/\bar{\nu}_x$ と ν_e のニュートリノ球の間 ($R_{\nu_e} > R_{\bar{\nu}_e} > R_{\nu_x}$)

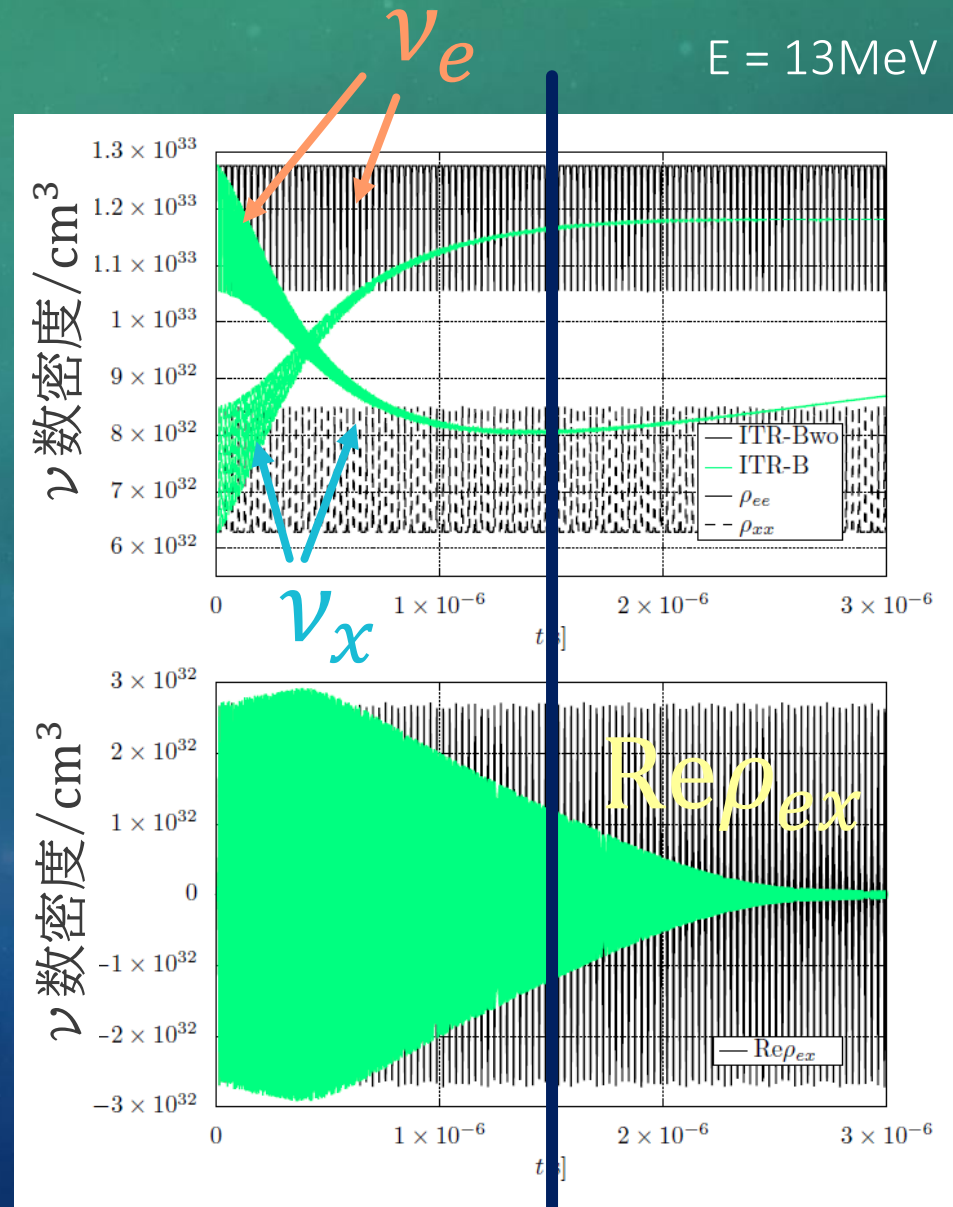
✓ 初期の ν_e と ν_x の大小関係が逆転

ν flavor	$n_\nu/[10^{33}\text{cm}^{-3}]$	$T_\nu/[\text{MeV}]$	$\mu_\nu/[\text{MeV}]$	$R_e(30\text{MeV})/[\text{cm}^{-1}]$	$R_a(30\text{MeV})/[\text{cm}^{-1}]$
ν_e	1.28 (1.28)	4.5	0.0	2.0×10^{-5}	1.1×10^{-6}
$\bar{\nu}_e$	1.26 (1.16)	4.5	0.0	2.0×10^{-6}	1.1×10^{-7}
$\nu_x, \bar{\nu}_x$	6.28 (5.78)	6	-8.9	0.0	0.0



Single-energyでの結果

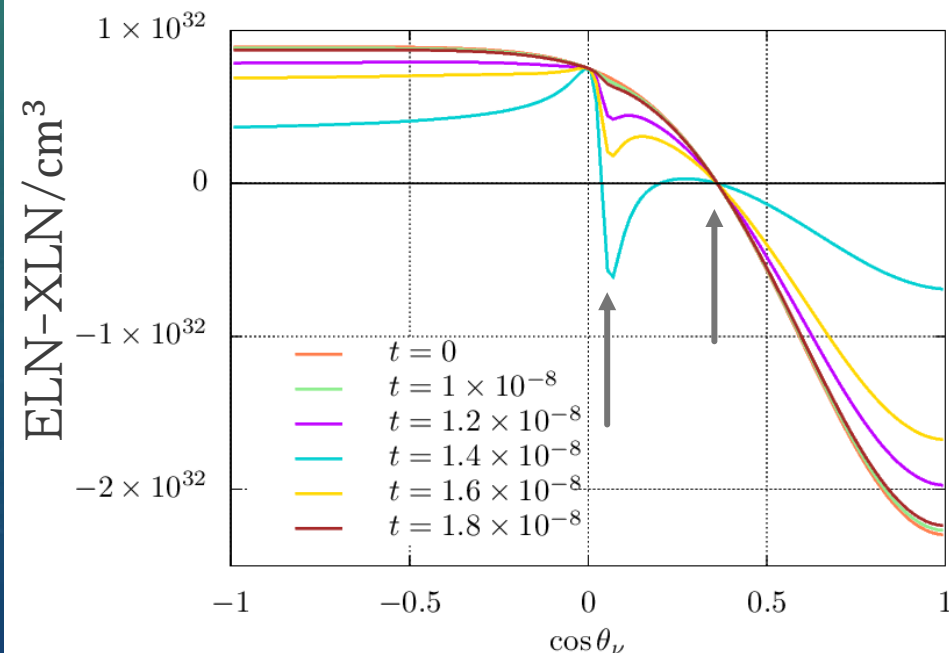
- ✓ FFC timescale $\sim 10^{-12}s$
 \ll collision timescale $\sim 10^{-6}s$
- ➔ FFC & collision driven phases
- ✓ ν_e : FFCによる減少
- ➔ 放出反応による熱化
- ✓ 衝突がクロッシングをずらす
 \Leftrightarrow 吸収による減衰
- ✓ 寿命が短く勢いの強いFFC



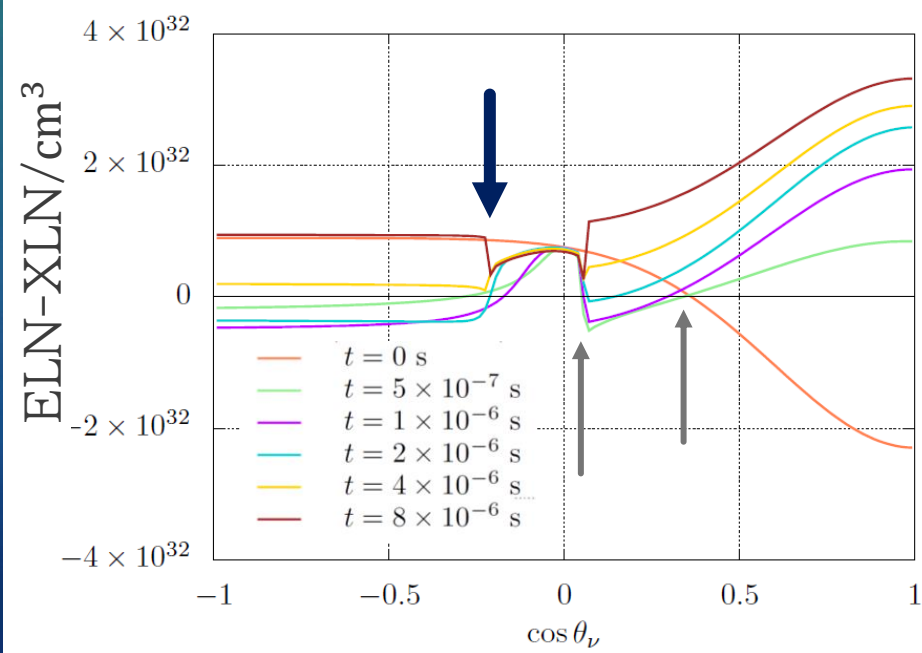
角度分布の時間発展

- ✓ ELN-XLN = 各角度の電子型レプトン数-重レプトン型レプトン数
 - ✓ 吸収・放出はタイムスケールが十分長くても、角度分布をシフトさせてELN-XLNクロッシングをずらす
- ➡ FFCが強く起こる角度を広げる役割

反応なし

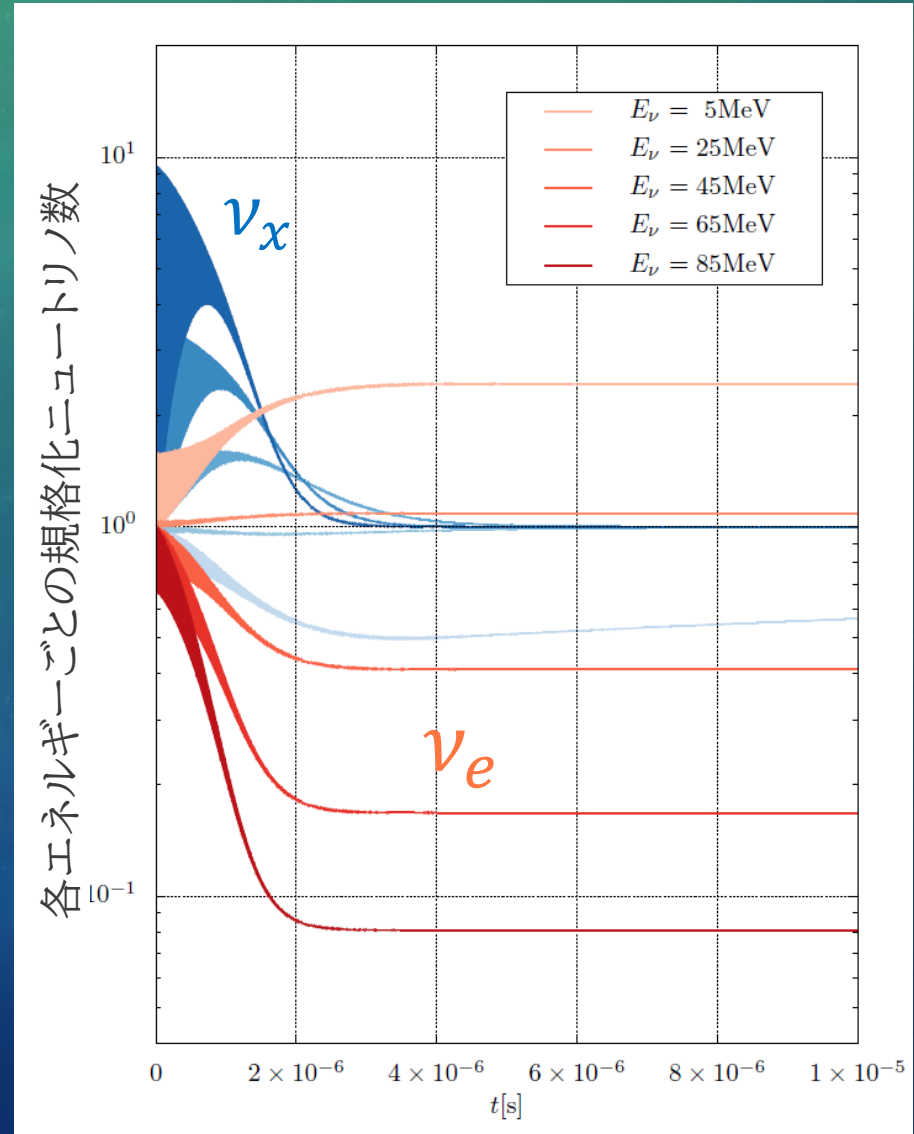
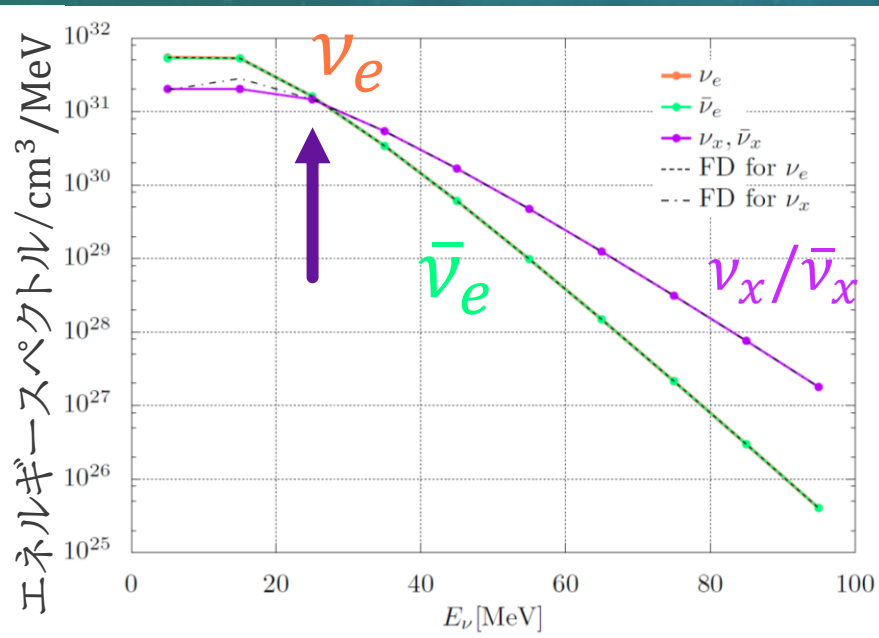


反応あり



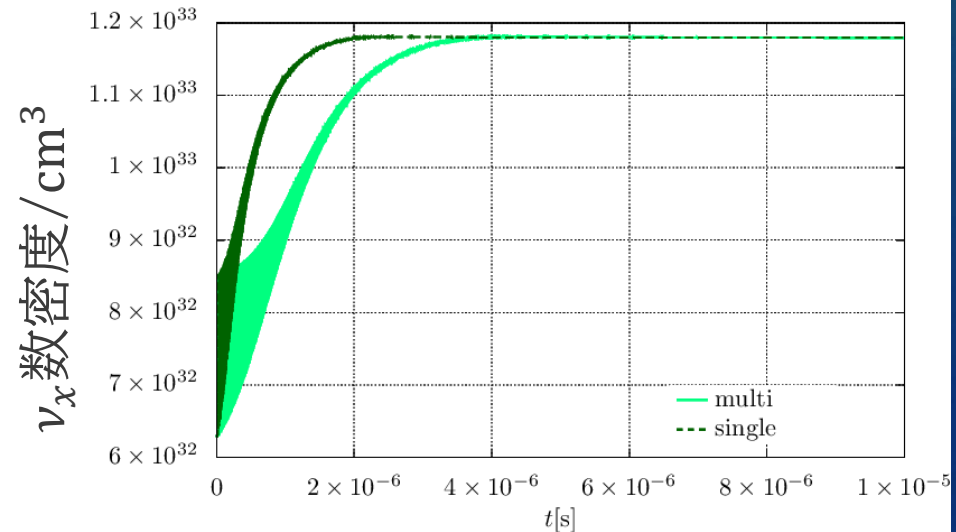
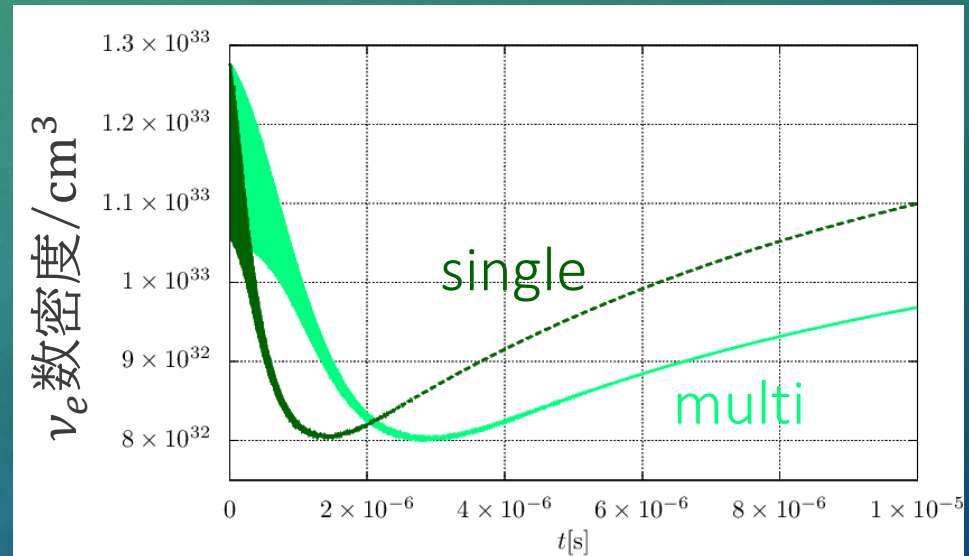
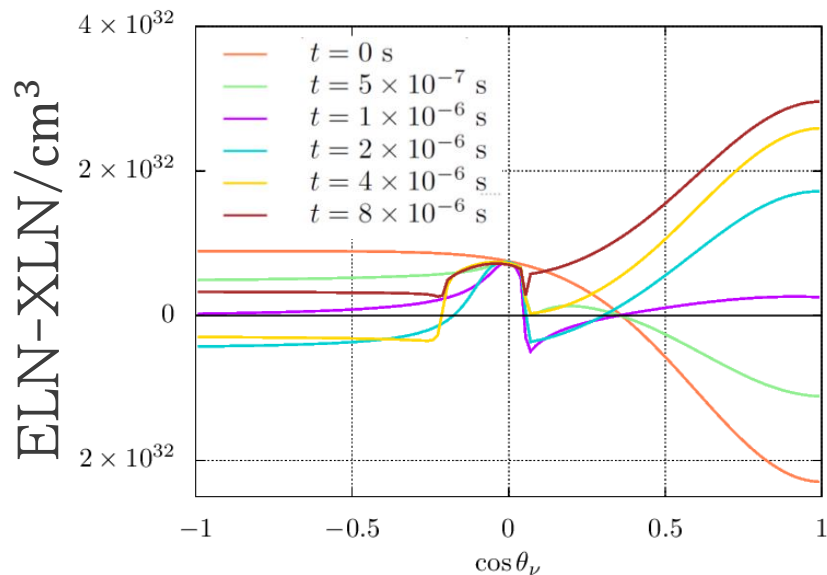
Multi-energyにおけるエネルギー依存したFFC

- ✓ FFC: ν_e と ν_x の差をなくす
 - ➔ 変換向きがエネルギー依存
- ✓ ν_e と ν_x の差が大きい高エネルギー ν がよく混ざる
- ✓ エネルギー依存するFFC

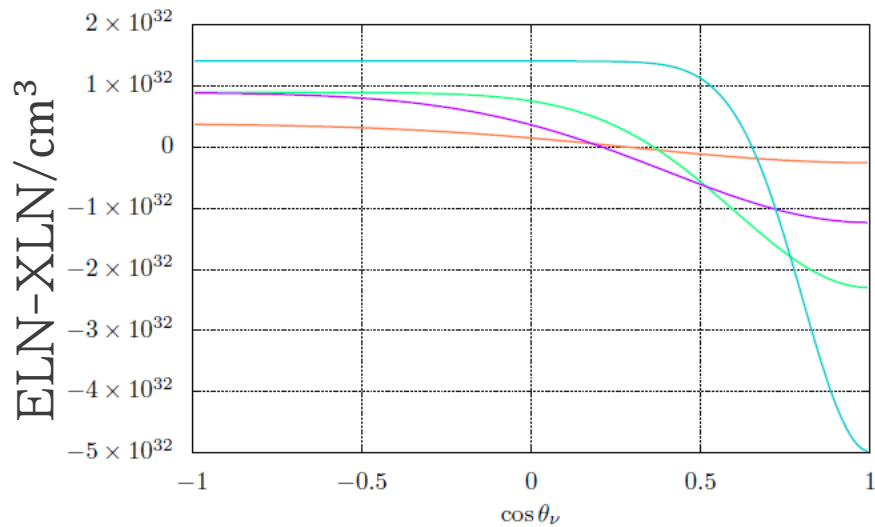


Multi-energyの効果

- ✓ 低エネルギーνが多い
 - ➔ 衝突によるdamping効果↓
 - ➔ 長寿命のFFC
- ✓ レプトン数クロッシングが衝突の効果で同様に移動



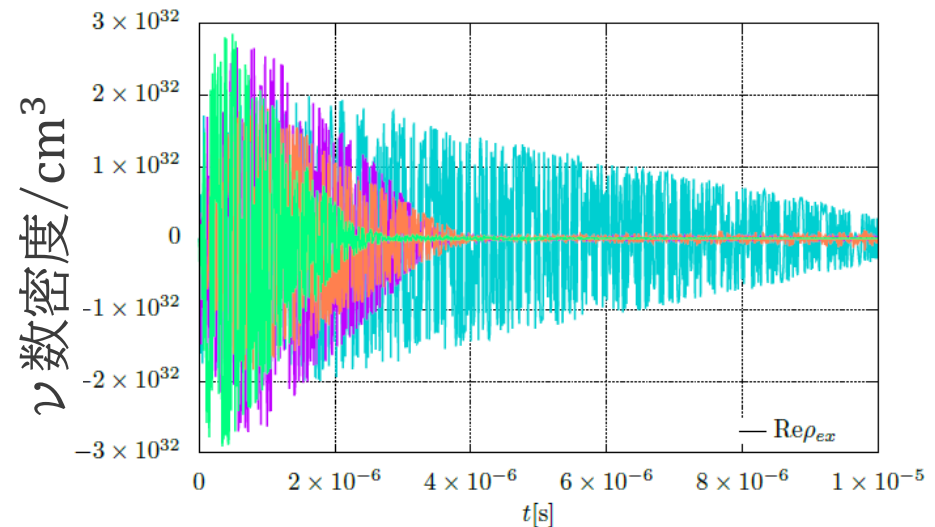
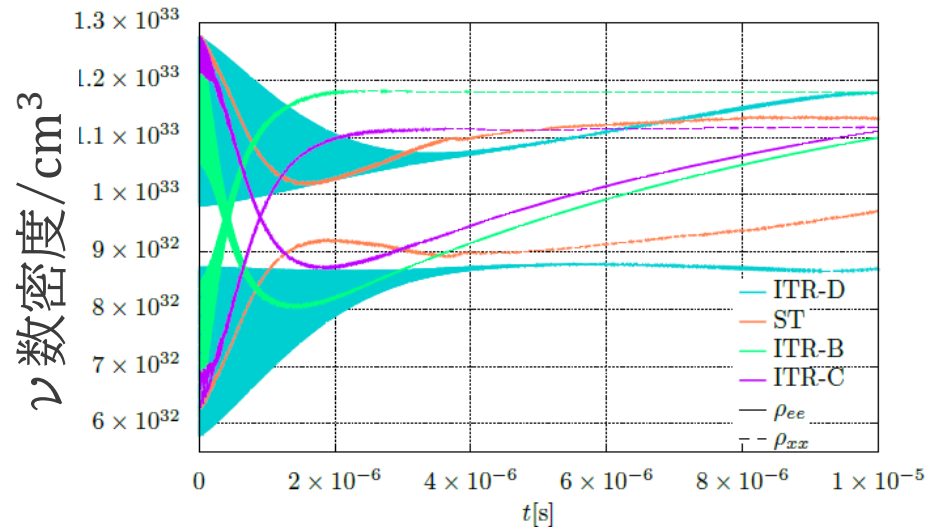
様々な初期角度分布



✓異なるELN-XLNクロッシングを初期に持つ4モデル

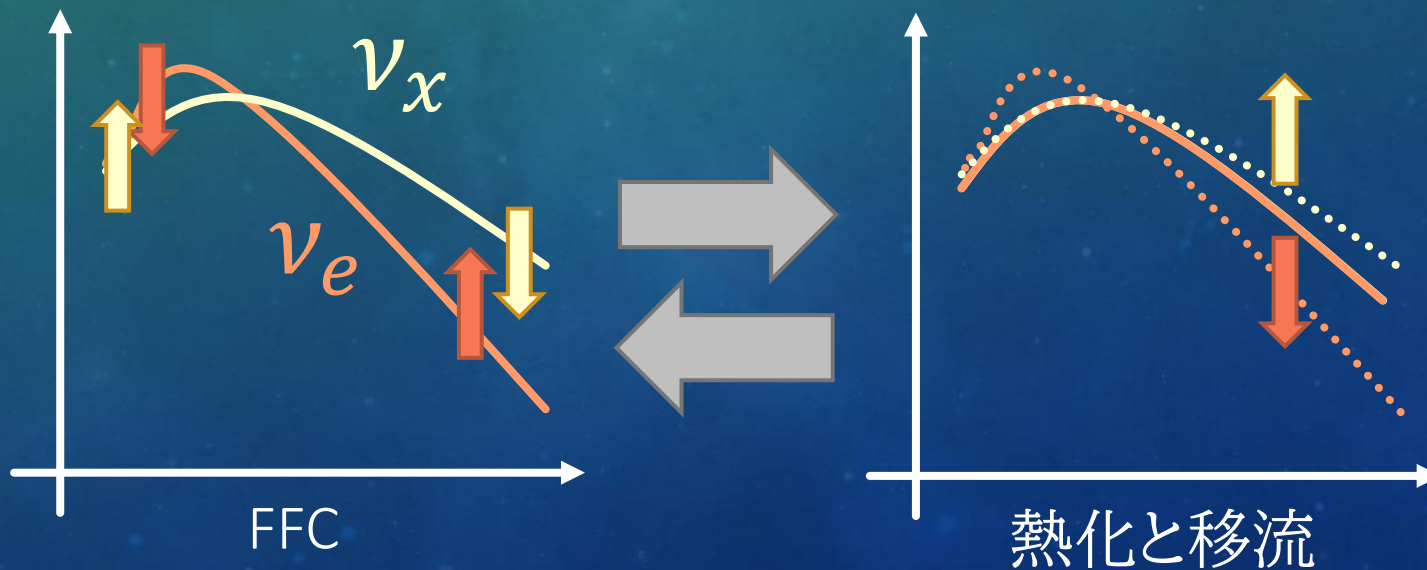
✓FFCの強さ+角度分布に非等方向が異なる

➡同じ反応率でも衝突によるFFCの減衰が異なる



議論：FFCによる局所heating

- ✓ 高エネルギーの v_e が一時的にたくさんできる
 - ➔ その後、物質に吸収されて熱化
 - ➔ 局所heating source?
- ✓ 移流の効果があれば、 v_x がまた補充される
 - ➔ 再びFFCによって $v_e \rightarrow v_x$
 - ➔ このプロセスが繰り返し替えされる？



まとめと今後

まとめ

- ✓ ν 集団振動: ν 同士の相互作用による非線形現象
超新星爆発のダイナミクスや観測に影響する可能性あり
- ✓ 集団振動 + 物質衝突が今話題
- ✓ 超新星爆発の状況を模擬した状況におけるフレーバー進化のダイナミカル計算
- ✓ 吸収・放出によって、より勢力的で短寿命なFFC
- ✓ 局所的なheating sourceになりうる可能性

今後

- ✓ エネルギー交換のある散乱(電子散乱)の影響
- ✓ 流体へのフィードバックによる熱力学量への影響調査
- ✓ 超新星爆発計算への実装・ダイナミクスや観測量への影響調査