

ニュートリノ集団振動および散乱を含む ニュートリノ輸送計算コードの開発

加藤ちなみ(東京理科大)

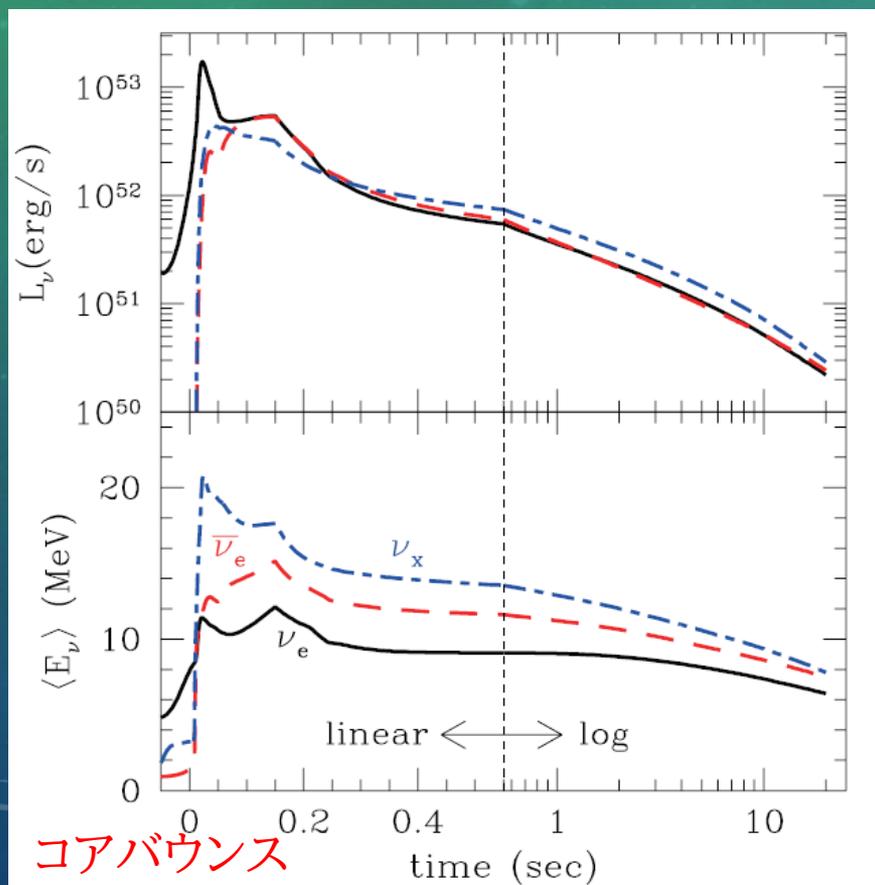
共同研究者：長倉洋樹(プリンストン大)

森長大貴(早大)

超新星ニュートリノとその観測の重要性

超新星爆発はニュートリノなしには再現できません

衝撃波加熱, PNS coolingなど



超新星ニュートリノ観測から多くの情報が得られる

超新星爆発メカニズム, 重元素合成, EOS, BHや中性子星形成, ニュートリノ物理 etc.

- ➡ 超新星ニュートリノの理論予想の精度を上げる必要性
- ➡ ニュートリノ集団振動

ニュートリノ振動と集団振動

- ✓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
- ✓2つの振動モード

$$l_{\text{fast}} \sim (\hbar c)^{-2} G_{\text{F}}^{-1} n_{\nu}^{-1}$$

① fast mode: 真空振動よりも早い振動

振動スケール: $O(1-100)\text{cm}$ 超新星内部 $< O(100)\text{km}$

② slow mode: 真空振動と同程度か少し短い振動

振動スケール: $O(0.1-10)\text{m}$ 超新星内部 $O(100-1000)\text{km}$

Fast conversionについては高い空間・角度解像度が原因となってグローバルな非線形計算が難しい

振動スケール \ll 星中心のスケールハイト(数十km)

1000オーダーの角度メッシュ

これまでのfast conversionの研究

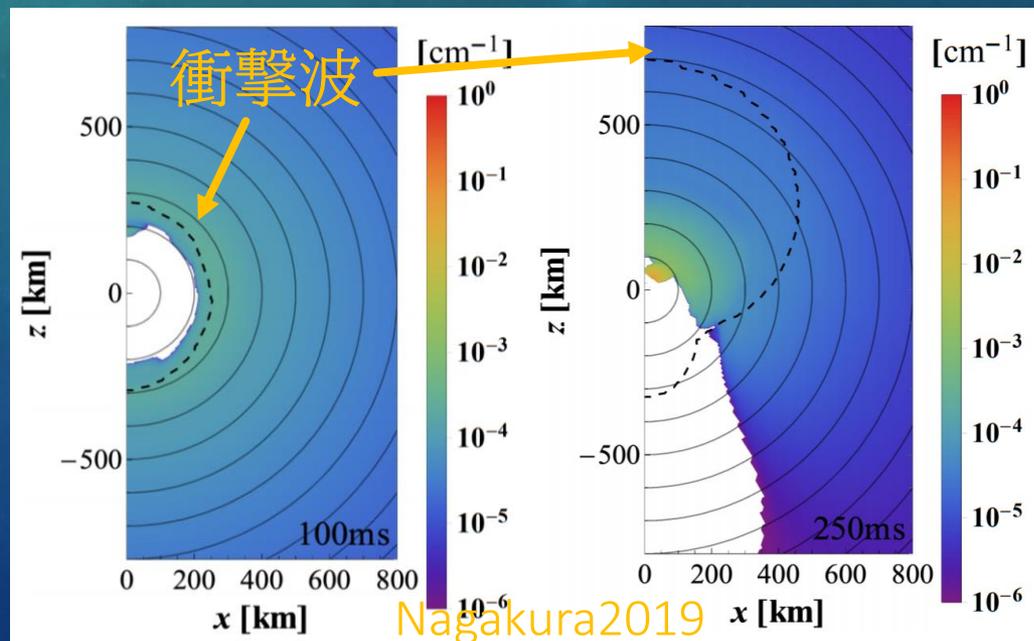
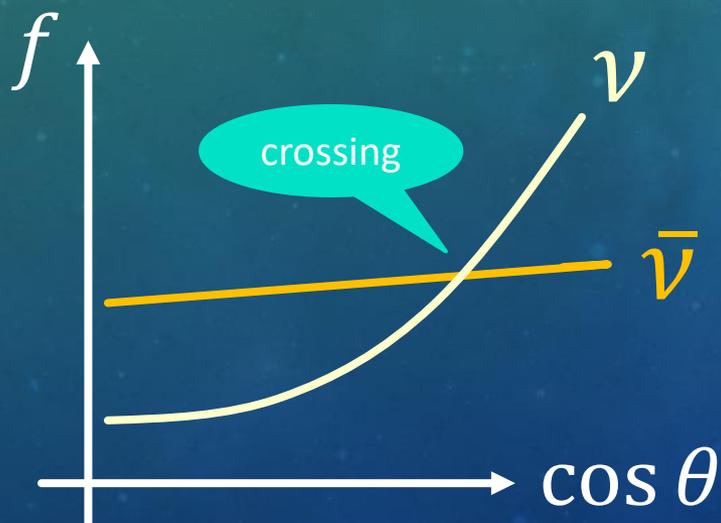
✓ 線形解析やレプトン数クロッシングを用いた集団振動が起こりうる領域・時間の調査

➔ 超新星ダイナミクスや超新星ニュートリノの観測予想に影響

✓ 非線形計算の例もあるが未解明な点が多い

✓ 散乱がfast conversionに与える影響もその一つ

レプトン数クロッシング



従来方法とモンテカルロ法

強い非線形性・高い空間及び角度解像度の必要性からかなりコストが高い計算

➡本研究ではモンテカルロ法を採用

※従来の方法: finite-difference method

MC法のメリット

- ✓ 散乱項の取り扱いが正確かつ計算コストが軽い
散乱項の積分計算に対するコストが低い
- ✓ 並列化効率がよい
散乱込みの長時間計算にはよい利点

MC法のデメリット

- ✓ 乱数による統計エラー
- ✓ 収束が遅い

研究目標と本発表の内容

モンテカルロ法によるニュートリノ輸送計算を用いた
ニュートリノ集団振動(特にfast mode)のスペクトルに
対する影響の調査

1. 集団振動を取り入れたモンテカルロ ν 輸送計算コードの開発
2. 新しい散乱計算方法の考案とその実装
3. 散乱による集団振動への影響調査

支配方程式

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = [H_{\text{vac}} + H_{\text{mat}} + H_{\nu\nu}, \rho]$$

$$i \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = [H_{\text{vac}}^* - H_{\text{mat}}^* - H_{\nu\nu}^*, \bar{\rho}]$$

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

ν_e $\bar{\nu}_e$

$$H_{\text{vac}} = U \frac{1}{2E} \begin{pmatrix} m_1^2 & 0 \\ 0 & m_2^2 \end{pmatrix} U^\dagger$$

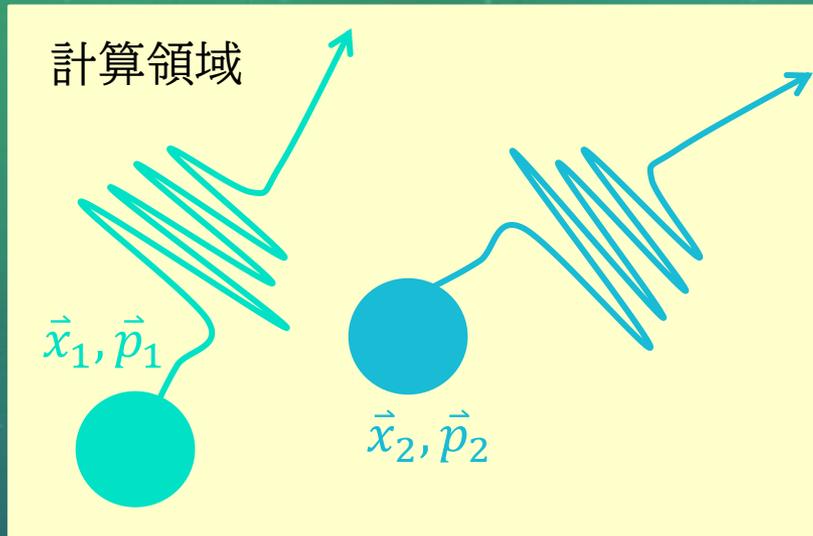
$$H_{\text{mat}} = \sqrt{2} G_F \begin{pmatrix} n_e - \bar{n}_e & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$H_{\nu\nu} = \sqrt{2} G_F \int \frac{d^3 \mathbf{q}}{(2\pi)^3} (1 - \cos \theta) (\rho - \bar{\rho}^*)$$

ν_e と $\bar{\nu}_e$ の差が重要

- ✓ これからの計算の仮定
BGとρの空間一様性
2-flavor・散乱なし
- ✓ $\rho_{ee}, \rho_{xx}, \text{Re}\rho_{ex}, \text{Im}\rho_{ex}$
 $\bar{\rho}_{ee}, \bar{\rho}_{xx}, \text{Re}\bar{\rho}_{ex}, \text{Im}\bar{\rho}_{ex}$
の8変数を計算する

モンテカルロ法による振動入りν輸送計算



内部自由度: ρ 4個, $\bar{\rho}$ 4個

✓粒子が8個の内部自由度を持っている

✓モンテカルロ法 + 差分化法のハイブリッドコード

粒子の空間発展の計算

幾何学方程式を計算
散乱計算

$H_{\nu\nu}$ の計算

$$H_{\nu\nu} = \sqrt{2}G_F \int \frac{d^3\mathbf{q}}{(2\pi)^3} (1 - \cos\theta) (\rho - \bar{\rho}^*)$$

$\rho, \bar{\rho}$ の時間発展の計算

各粒子ごとに支配方程式を計算
4th-order ルンゲクッタ

真空振動・MSW

解析解が分かっている真空振動・MSW効果に対するテスト計算

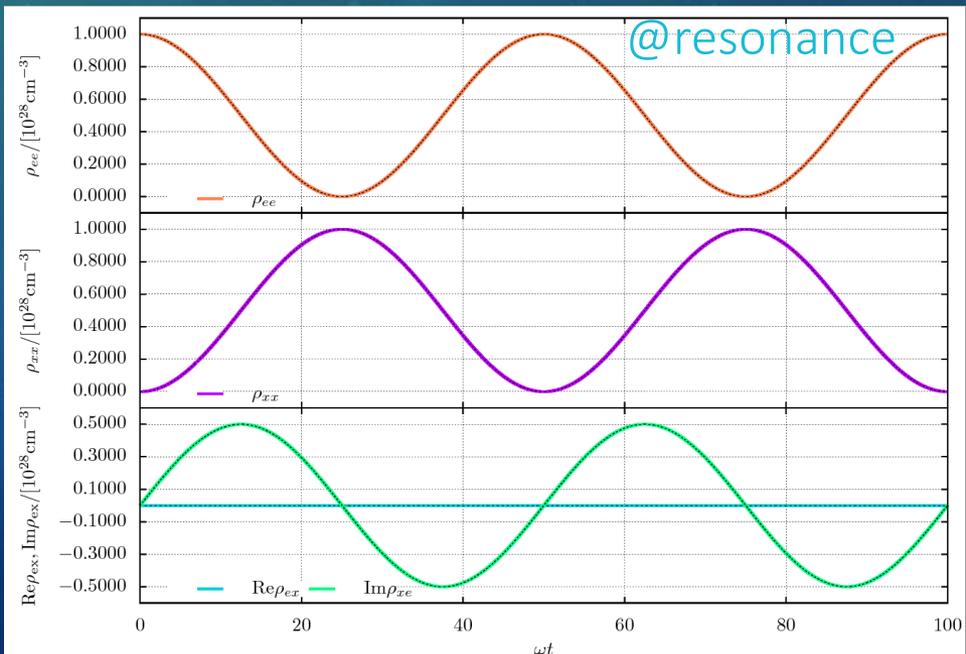
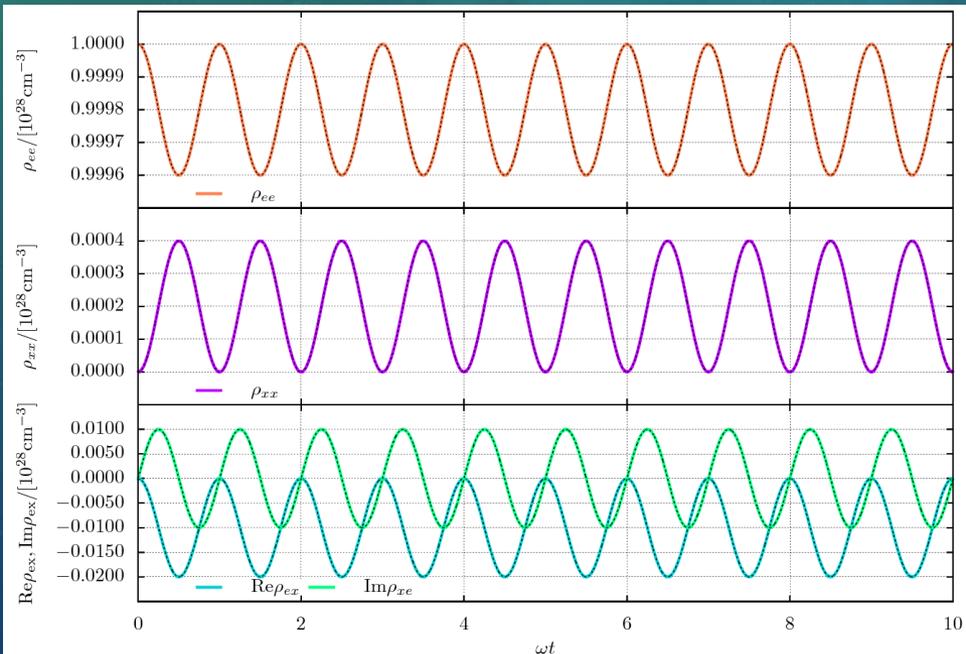
真空振動

$E_\nu = 20\text{MeV}$
 NO/ν_e
 $\Delta m^2 = 2.45 \times 10^{-3} \text{eV}^2$
 $\theta_\nu = 0.01$

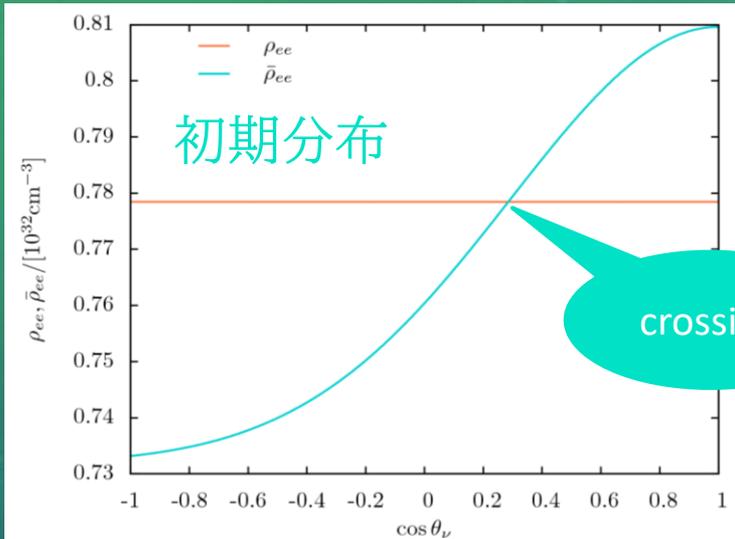
MSW

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = [H_{\text{vac}} + H_{\text{mat}} + H_{\nu\nu}, \rho]$$

$$i \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = [H_{\text{vac}}^* - H_{\text{mat}}^* - H_{\nu\nu}^*, \bar{\rho}]$$



集団振動: 簡易的なfast conversion



軸対称を仮定

$$\omega/\mu = 1.2 \times 10^{-9}$$

$$E_\nu = 50 \text{ MeV}$$

$$\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-6} \text{ eV}^2$$

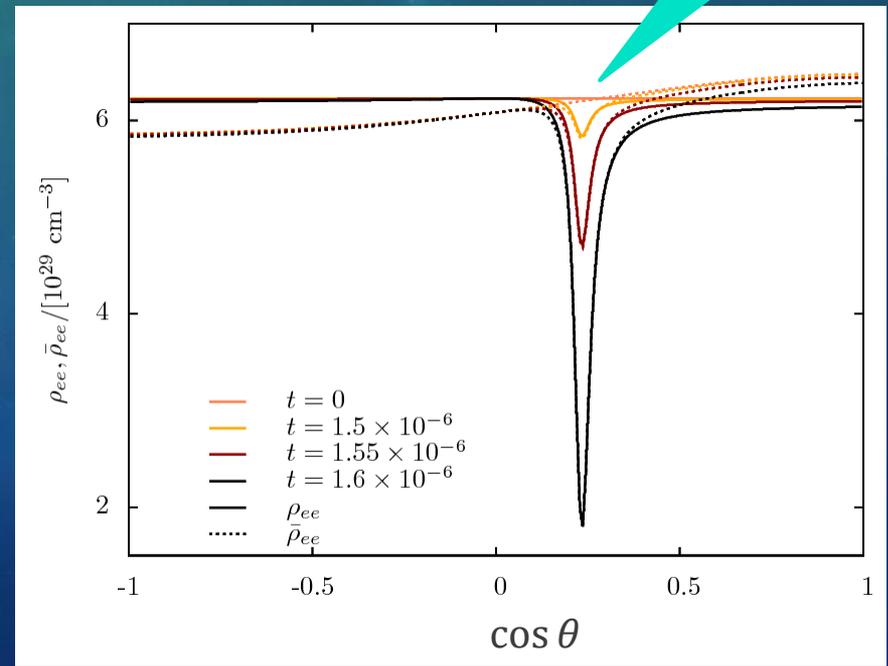
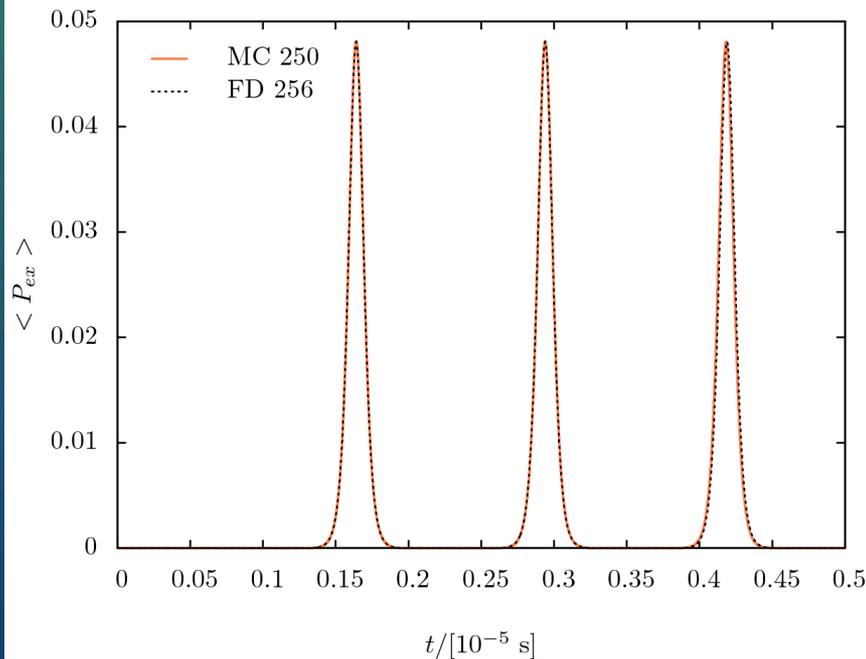
$$\theta_\nu = 10^{-6}$$

Shalgar 2020

$$\langle P_{ex} \rangle = 1 - \frac{\int \rho_{ee} d \cos \theta_\nu}{\int \rho_{ee,0} d \cos \theta_\nu}$$

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = [H_{\text{vac}} + H_{\text{mat}} + H_{\nu\nu}, \rho]$$

$$i \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} = [H_{\text{vac}}^* - H_{\text{mat}} - H_{\nu\nu}^*, \bar{\rho}]$$



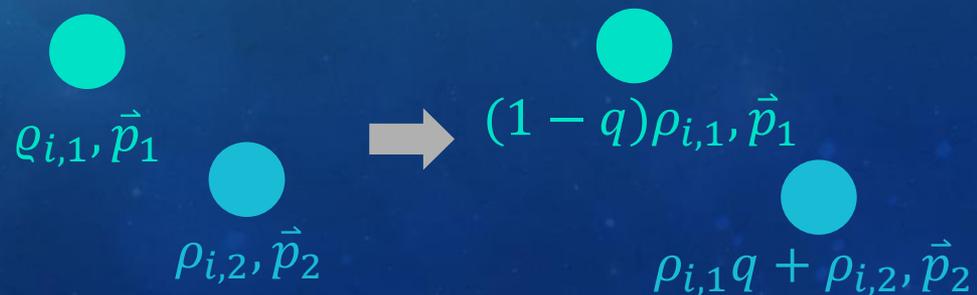
簡易的な等エネルギー・等方散乱の実装

従来のモンテカルロ計算

- ✓ 粒子に1個の平均自由行程
- ✓ ランダム変数を用いて散乱後の角度を決定
 - ➔ 粒子の角度更新
- ✓ 粒子の平均散乱距離 = λ

本計算

- ✓ 粒子に8個の平均自由行程
 - ➔ 各成分ごとに散乱判定
- ✓ 粒子の角度は角度メッシュの中央値に固定
 - ➔ 散乱後同じ角度ビンの粒子に散乱した成分のみ移行
- ✓ 粒子の平均散乱距離 = λq
散乱時に移動させる v 数密度 = ρq

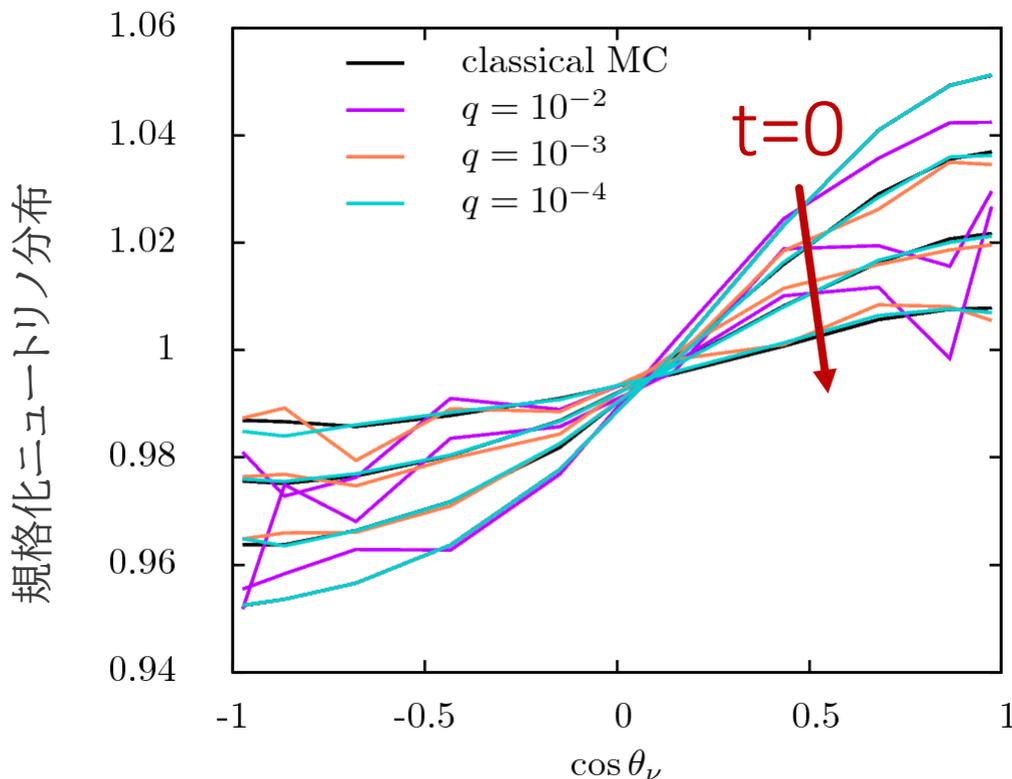


従来方法と本計算との比較計算

✓ 単一エネルギーのニュートリノの熱化計算
等方散乱を仮定

✓ classical MC : 10^5 個・200回run → 平均

QKE MC : 2000個・ $q = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$ ・ $N_\theta = 10$ ・1回run



✓ QKE MC計算はclassical MCの計算結果を再現

✓ mfp factor(q)の調整によって統計誤差が減少

Fast conversionに対する散乱の効果

✓ 等方散乱による熱化

➔ 同じ角度方向の ρ_{ee} と $\bar{\rho}_{ee}$ の差がなくなる

✓ 線形phaseの成長率が散乱によって抑制されている

Shalgar 2020

軸対称を仮定

$\omega/\mu = 1.2 \times 10^{-9}$

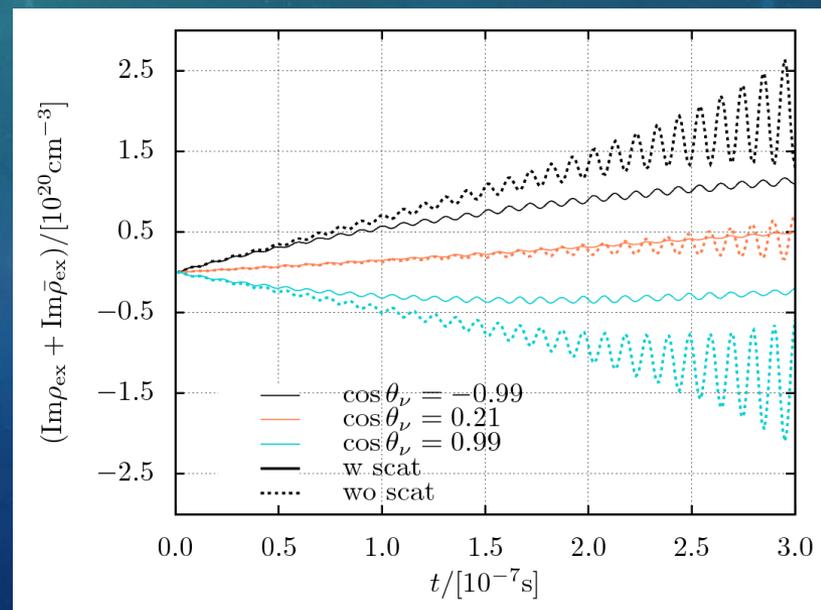
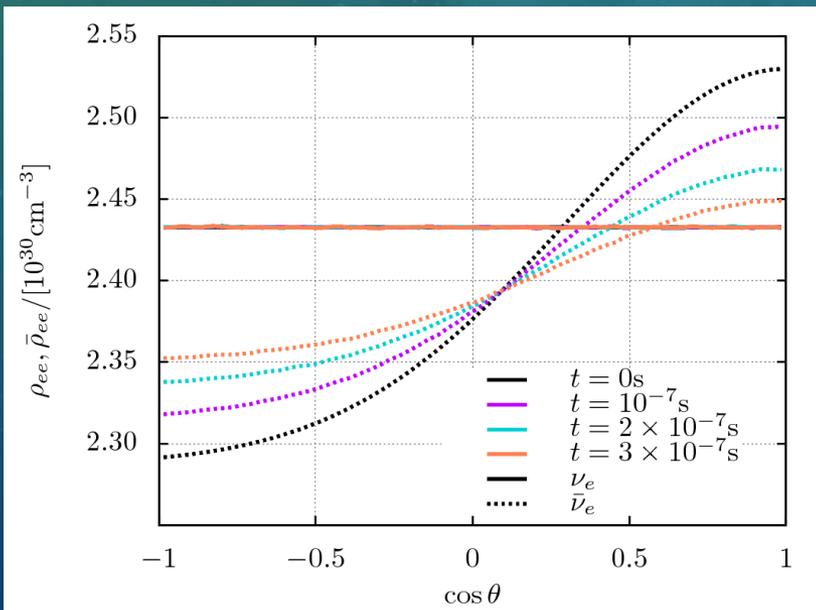
$E_\nu = 50\text{MeV}$

$\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-6}\text{eV}^2$

$\theta_\nu = 10^{-6}$

$C = 10\text{km}^{-1}$

32000個 $\cdot q = 10^{-5} \cdot N_\theta = 64 \cdot 1$ 回run



まとめと今後

まとめ

- ✓ニュートリノ集団振動を取り入れた超新星ニュートリノの理論予想が目標
- ✓散乱計算コストの低さ・簡単さからモンテカルロ法を採用
- ✓簡易的なセットアップでのfast conversion計算
- ✓散乱の新しい実装方法の考案・統計誤差減少に成功
 - ➡ 散乱がfast conversionを抑制する傾向

今後

- ✓fast conversionに対する散乱の影響調査を継続
- ✓仮定(軸対称・単一エネルギー)を外して現実的な計算へ