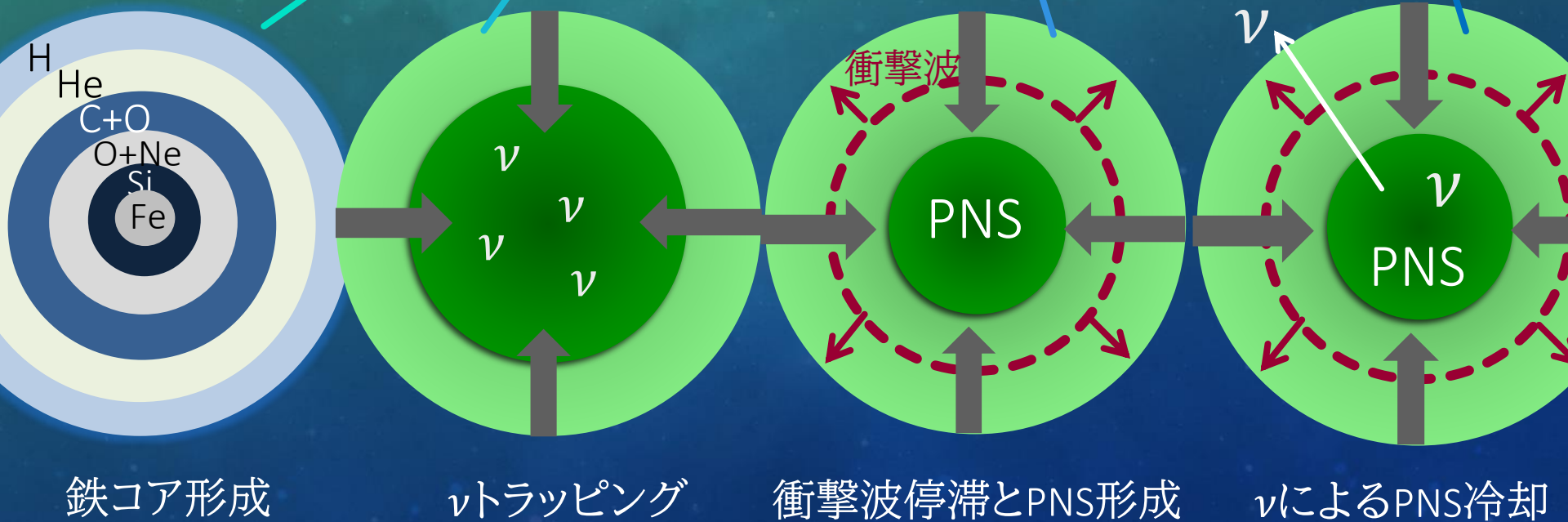
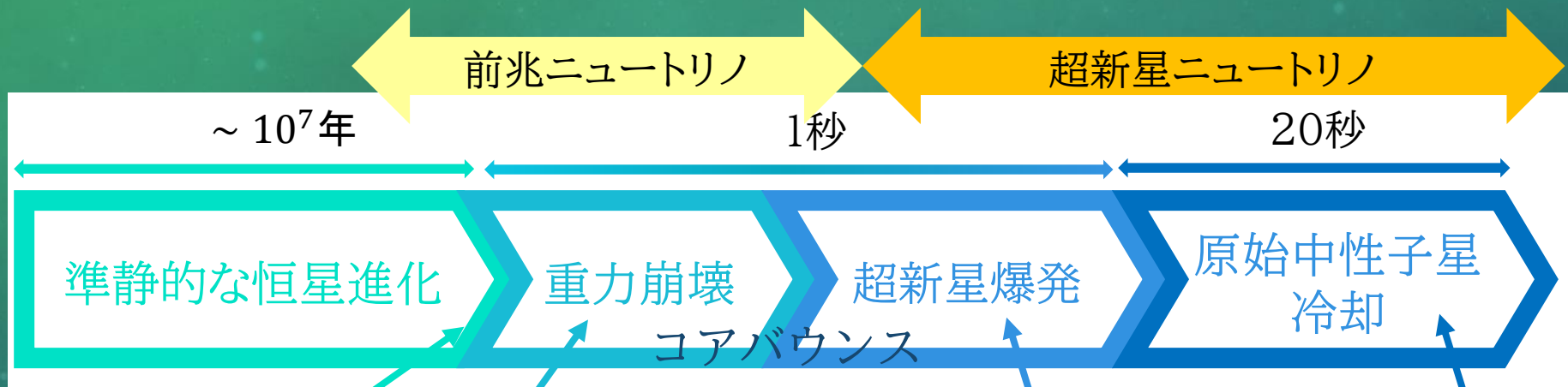


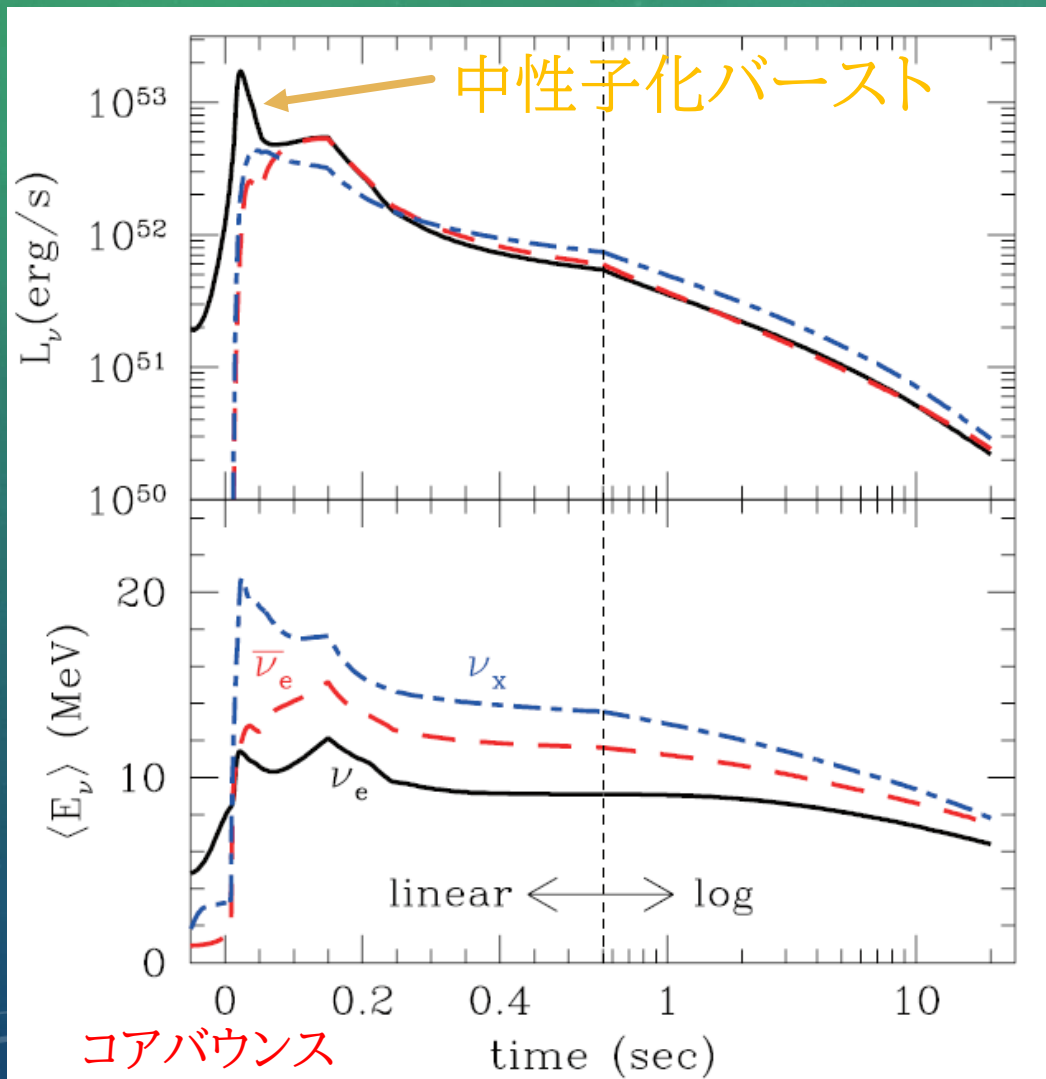
# ニュートリノ集団振動を考慮した 超新星ニュートリノスペクトルの構築

東北大学  
加藤ちなみ

# 大質量星の進化及び超新星爆発



# 超新星ニュートリノと観測の重要性



- ✓ 観測からわかること
  - 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

# 本研究の目指すところとE02班との連携

## 計画研究 E02 超新星ニュートリノと核物理・宇宙化学進化の理論研究

本計画研究は、SK-Gd(計画研究 C01) や KamLAND(計画研究 A01) などで観測が期待される超新星ニュートリノ、特に原始中性子星からのニュートリノや超新星背景ニュートリノに関連し、状態方程式や状態方程式とコンシステントなニュートリノ反応率の研究への拡張、また現在はインプットとして使っているだけの宇宙化学進化との総合的な研究への発展を目指すものである。

本新学術領域の柱の一つである低エネルギーニュートリノ観測の重要な源：重力崩壊型超新星の研究に関して世界最高水準の三次元ニュートリノ輸送計算を行っている山田を中心に、非球対称性を考慮した爆発機構の研究とともに放出されるニュートリノや残される原始中性子星のモデルを求める。

また、現実的な核力モデルに基づいた超新星物質の状態方程式を世界に先駆けて数値テーブル化して数値シミュレーションを行えるようにした鷹野を中心に、その状態方程式に対応するニュートリノ反応率を計算し、それらを用いた原始中性子星の冷却・ニュートリノ放出計算を鈴木が担当する。

また中里を中心に、残る状態方程式の不定性の範囲をカバーするようなパラメーター化した状態方程式を用いて超新星ニュートリノの計算を行い、超新星爆発時・原始中性子星冷却時のニュートリノや超新星背景ニュートリノの観測との関連を系統的に調べる。

多次元性を考慮した現実的な超新星爆発計算

EOSやニュートリノ反応の精密化

実際の超新星爆発観測からより正確に情報を引き出すために、現実的な $\nu$ 理論予想を目指す

➡ ニュートリノ集団振動によるニュートリノスペクトルへの影響を調査することでこの目標に貢献



# ニュートリノ振動と集団振動

$$i(\partial_t + v \cdot \nabla) \rho_i = \left[ \underbrace{U \frac{M^2}{2E_\nu} U^\dagger}_{\text{真空振動}} + \underbrace{\sqrt{2} G_F N_e}_{\text{物質振動}} + \underbrace{\sqrt{2} G_F \int d\Gamma' (1 - \cos\theta_{ik}) (\rho'_{\nu k} - \bar{\rho}'_{\nu k})}_{\text{集団振動}}, \rho_i \right]$$

真空振動

物質振動

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

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

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  $< O(100)\text{km}$

➡スケールが非常に小さいため、スペクトルへの影響は未調査

② slow mode: 真空振動と同程度か少し短い振動

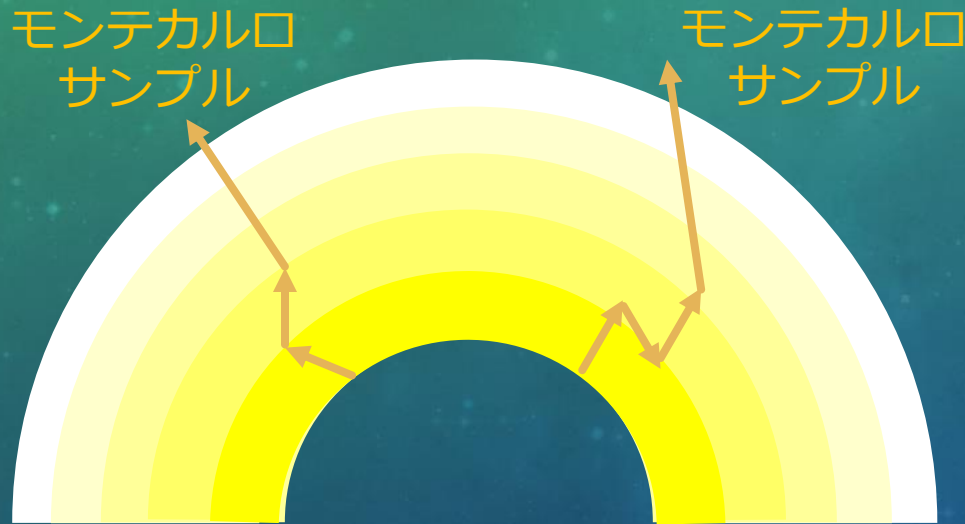
振動スケール:  $O(0.1-10)\text{m}$     超新星内部  $O(100-1000)\text{km}$

➡すでにスペクトルへの影響が議論されている

c.f. 星中心のスケールハイト (数十km)

# 集団振動を取り入れたν輸送計算計算

## モンテカルロ法を用いたニュートリノ輸送計算



### モンテカルロ法のアイデア

領域内にあるモンテカルロサンプルの軌跡を追う

- ➡ さまざま過程ごとに距離(mfp)を定義して、一番直近で起こる過程を計算
- ➡ ニュートリノ振動スケールを実装？

### モンテカルロ法の利点

メッシュの細かさにほとんど依存しないため、物理的な過程を正確に扱える

- ➡ 小さい振動スケールを持つ集団振動を扱うのに適している

# 研究目標と計画

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. 集団振動が起こりうる領域・時間の調査
2. 集団振動を取り入れた $\nu$ 輸送計算コードの開発
  - ➡ モンテカルロ法による $\nu$ 振動取り扱いの確立
3.  $\nu$ スペクトルへの影響の調査
  - ➡ 集団振動が起こりうる領域に注目した $\nu$ 輸送計算
4. 集団振動の漸近挙動の調査
  - ➡ 爆発計算に集団振動を組み込む方法の考案
5. 集団振動の爆発のダイナミクスや $\nu$ 観測への影響の調査



イマココ

# 1. 集団振動が起こる領域・時間の調査

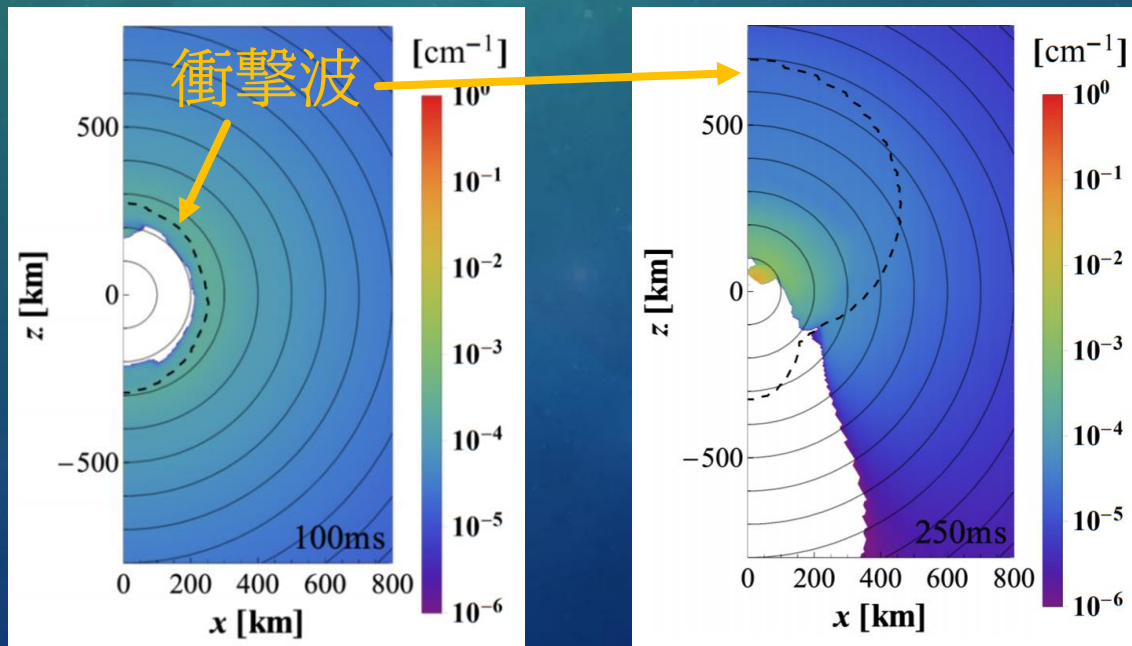
いくつかの共同研究によって実際に集団振動が起こりうる領域の調査を行った

✓ Morinaga et al. 2020 :  $r \gtrsim 200$  km,  $t_{pb} > 50$ ms

衝撃波前方での原子核とのコヒーレント散乱による集団振動

✓ Nagakura et al. 2019 :  $r \gtrsim 100$  km,  $t_{pb} > 50$ ms

多次元流体運動に伴うニュートリノ非球対称放出による集団振動





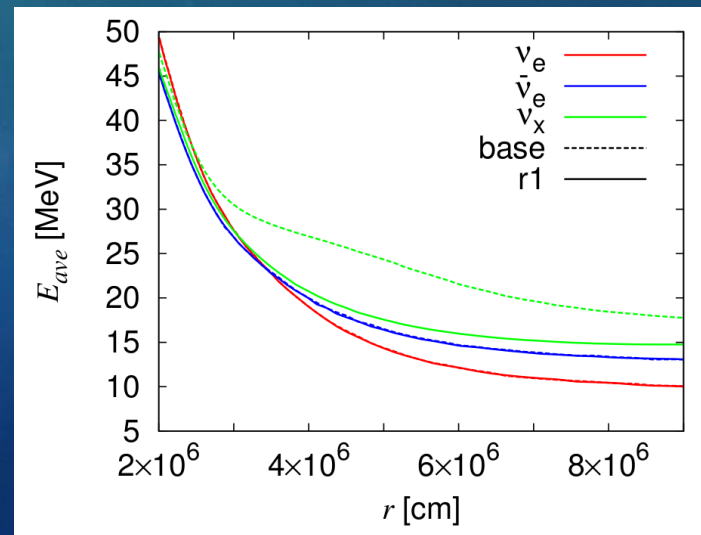
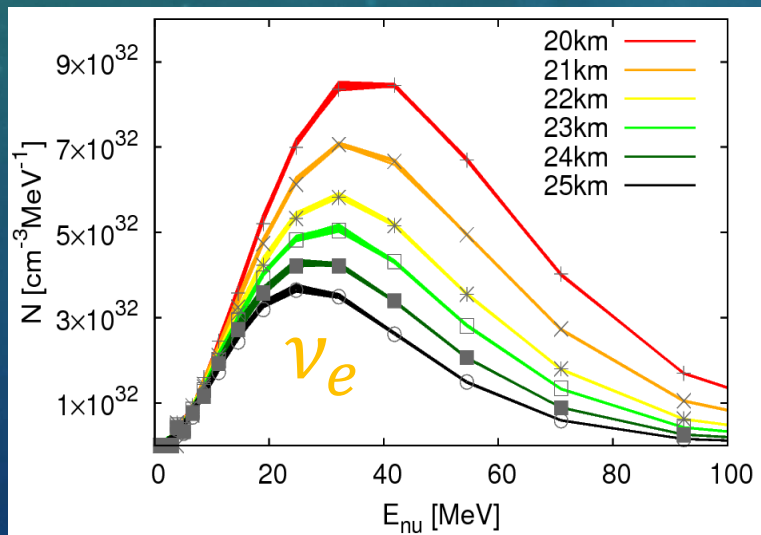
## 2. 集団振動を取り入れた $\nu$ 輸送計算コードの開発

Kato et al. 2020

モンテカルロ輸送計算を用いた $\nu$ -核子散乱のスペクトルへの影響の調査と爆発計算への実装法の考案

- ➡核子散乱で交換するエネルギー  $\ll$  エネルギーメッシュ幅
- ➡集団振動における空間解像度の問題点と類似
- ➡輸送計算コードは完成している (あとは振動を実装する)

$\nu$ 振動を扱う上で重要な重レプトン型ニュートリノ放出の精密化



# まとめ：研究目標と計画

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. 集団振動が起こりうる領域・時間の調査
2. 集団振動を取り入れた $\nu$ 輸送計算コードの開発
  - ➡ モンテカルロ法による $\nu$ 振動取り扱いの確立
3.  $\nu$ スペクトルへの影響の調査
  - ➡ 集団振動が起こりうる領域に注目した $\nu$ 輸送計算
4. 集団振動の漸近挙動の調査
  - ➡ 爆発計算に集団振動を組み込む方法の考案
5. 集団振動の爆発のダイナミクスや $\nu$ 観測への影響の調査



イマココ