

# 超新星爆発における ニュートリノ集団振動

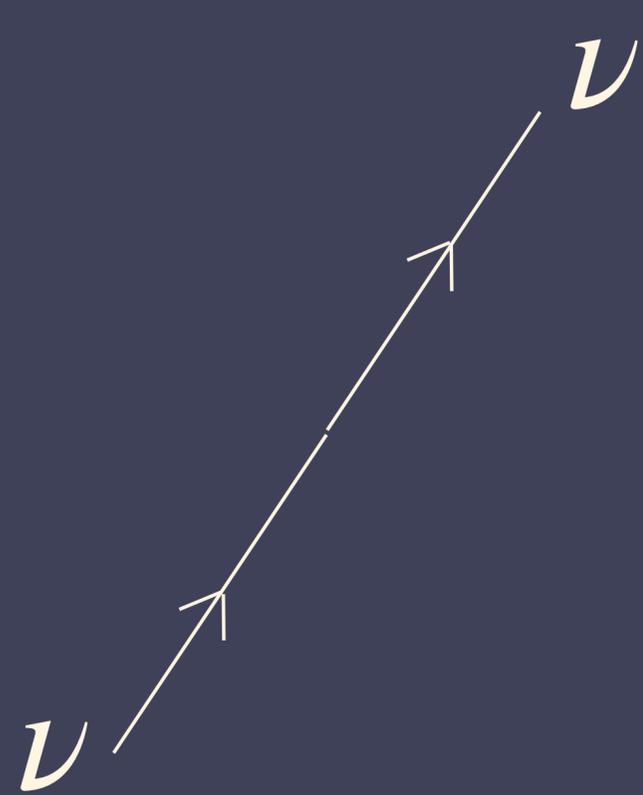
原田 了 (理研)

共同研究者: 長倉洋樹(NAOJ)、岩上わかな、大川博督、山田章一(早稲田大)、  
古澤峻(関東学院大)、松古栄夫(KEK)、住吉光介(沼津高専)

AH & Nagakura submitted to ApJL

arXiv: 2110.08291

# ニュートリノ振動



$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle & |\nu_e\rangle, |\nu_x\rangle &: \text{フレーバー固有状態} \\ |\nu_x\rangle &= -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle & |\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle &: \text{質量固有状態} \\ & & \theta &: \text{混合角} \end{aligned}$$

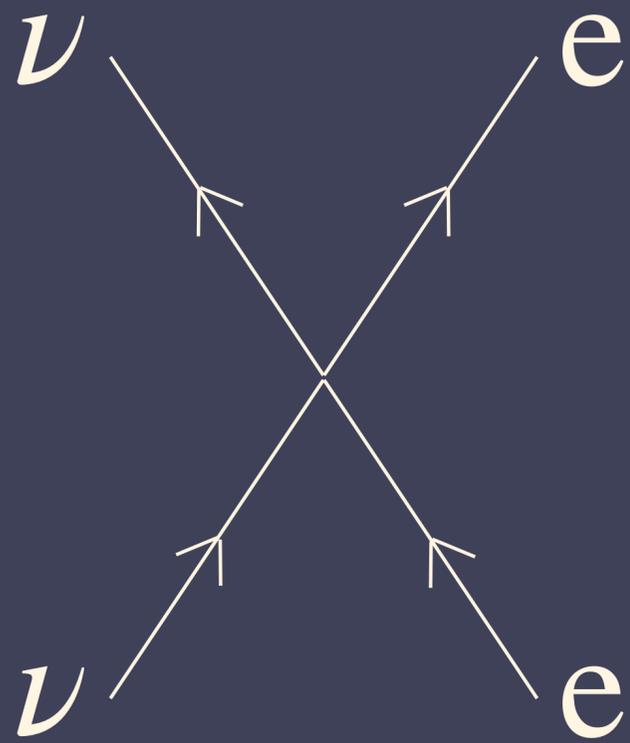
$$|\nu(t=0)\rangle = |\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle$$

$$|\nu(t)\rangle = \cos\theta e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + \sin\theta e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle$$

$$= e^{-i\frac{E_1+E_2}{2}t} \left\{ (\cos(E_2 - E_1)t + i \sin(E_2 - E_1)t \cos 2\theta) |\nu_e\rangle - i \sin(E_2 - E_1)t \cos 2\theta |\nu_x\rangle \right\}$$

- ・ニュートリノ振動→ニュートリノ質量固有状態とフレーバー固有状態の不一致

# ニュートリノ振動



$$|\nu(t=0)\rangle = |\nu_e\rangle = \cos\theta_m |\nu_1\rangle + \sin\theta_m |\nu_2\rangle$$

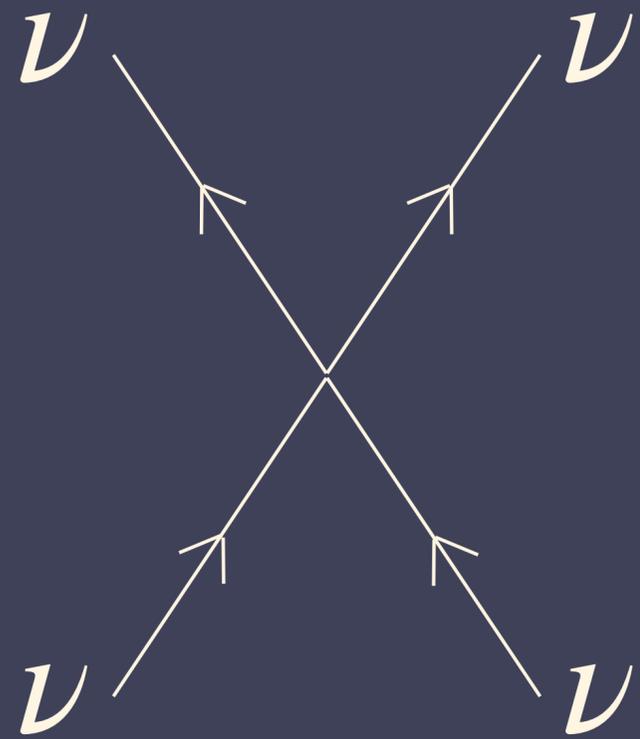
$$\begin{aligned} |\nu(t)\rangle &= \alpha |\nu_1\rangle + \beta |\nu_2\rangle \\ &= \alpha' |\nu_e\rangle + \beta' |\nu_x\rangle \end{aligned}$$

$$\tan 2\theta_m = \frac{\Delta m^2 \sin 2\theta}{\Delta m^2 \cos 2\theta - 2\sqrt{2}G_F n_e E} \quad : \text{物質中の混合角}$$

$\sqrt{2}G_F n_e E$   
ν-e相互作用ポテンシャル

- ・ニュートリノ振動→ニュートリノ質量固有状態とフレーバー固有状態の不一致
- ・物質(MSW)効果：電子との相互作用ポテンシャルでニュートリノのエネルギーが変わる

# ニュートリノ振動



$$i\frac{d}{dt}\rho(p) = [H, \rho(p)] + \mathcal{C}[\rho]$$

: Quantum Kinetic Equation (QKE)

$$H = H_{\text{vacuum}} + H_{\text{MSW}} + \sqrt{2}G_{\text{F}} \int d^3p' (1 - \hat{p} \cdot \hat{p}') (\rho_{p'} - \bar{\rho}_{p'})$$

ν-ν 相互作用ポテンシャル

- ・ニュートリノ振動→ニュートリノ質量固有状態とフレーバー固有状態の不一致
- ・物質(MSW)効果：電子との相互作用ポテンシャルでニュートリノのエネルギーが変わる
- ・ニュートリノ集団振動：ニュートリノ同士の相互作用ポテンシャルでエネルギーが変わる

# ニュートリノ集団振動

Slow mode

$$H = H_{\text{vacuum}} + H_{\nu-\nu}$$

$$\omega_s \sim \sqrt{\frac{\Delta m^2}{2E} \sqrt{2} G_F n_\nu} \sim \mathcal{O}(10^{1-2}) \text{ m}^{-1}$$

- ・振動のタイムスケールが長い  
→他の様々な効果で邪魔されて  
coherenceが崩れるかも？

Fast mode

$$H = H_{\nu-\nu}$$

$$\omega_f \sim \sqrt{2} G_F n_\nu \sim \mathcal{O}(1) \text{ m}^{-1}$$

- ・振動のタイムスケールが短い  
→即座にフレーバーが変わる
- ・高エネルギー  $\nu_x$  が  $\nu_e$  に変化して、  
加熱率やダイナミクス、元素合成に  
影響？

# ニュートリノ集団振動

Slow mode

$$H = H_{\text{vacuum}} + H_{\nu-\nu}$$

$$\omega_s \sim \sqrt{\frac{\Delta m^2}{2E} \sqrt{2} G_F n_\nu} \sim \mathcal{O}(10^{1-2}) \text{ m}^{-1}$$

- ・振動のタイムスケールが長い  
→他の様々な効果で邪魔されて  
coherenceが崩れるかも？

Fast mode

$$H = H_{\nu-\nu}$$

$$\omega_f \sim \sqrt{2} G_F n_\nu \sim \mathcal{O}(1) \text{ m}^{-1}$$

- ・振動のタイムスケールが短い  
→即座にフレーバーが変わる
- ・高エネルギー  $\nu_x$  が  $\nu_e$  に変化して、  
加熱率やダイナミクス、元素合成に  
影響？

# QKEを解く

$i\frac{d}{dt}\rho(p) = [H, \rho(p)] + \mathcal{C}[\rho]$  を振動を解像しながら global に解くのは超高コスト

- ・理想化したQKEを解く

- ・線型化したQKEを解析する

$$i\frac{d}{dt}\rho_{\text{ex}}(\Omega) = - \int \frac{d^2\Omega'}{4\pi} G(\Omega') \hat{p} \cdot \hat{p}' \rho_{\text{ex}}(\Omega')$$

- ▶  $\rho$  の微小な非対角項で線型化

- ▶ 微小量が不安定に成長するならフレーバー変換が起こる(フレーバー不安定)

# 線形解析

$$i \frac{d}{dt} \rho_{ex}(\Omega) = - \int \frac{d^2 \Omega'}{4\pi} G(\Omega') \hat{p} \cdot \hat{p}' \rho_{ex}(\Omega') \longleftarrow i \frac{d}{dt} \rho(p) = [H, \rho(p)]$$

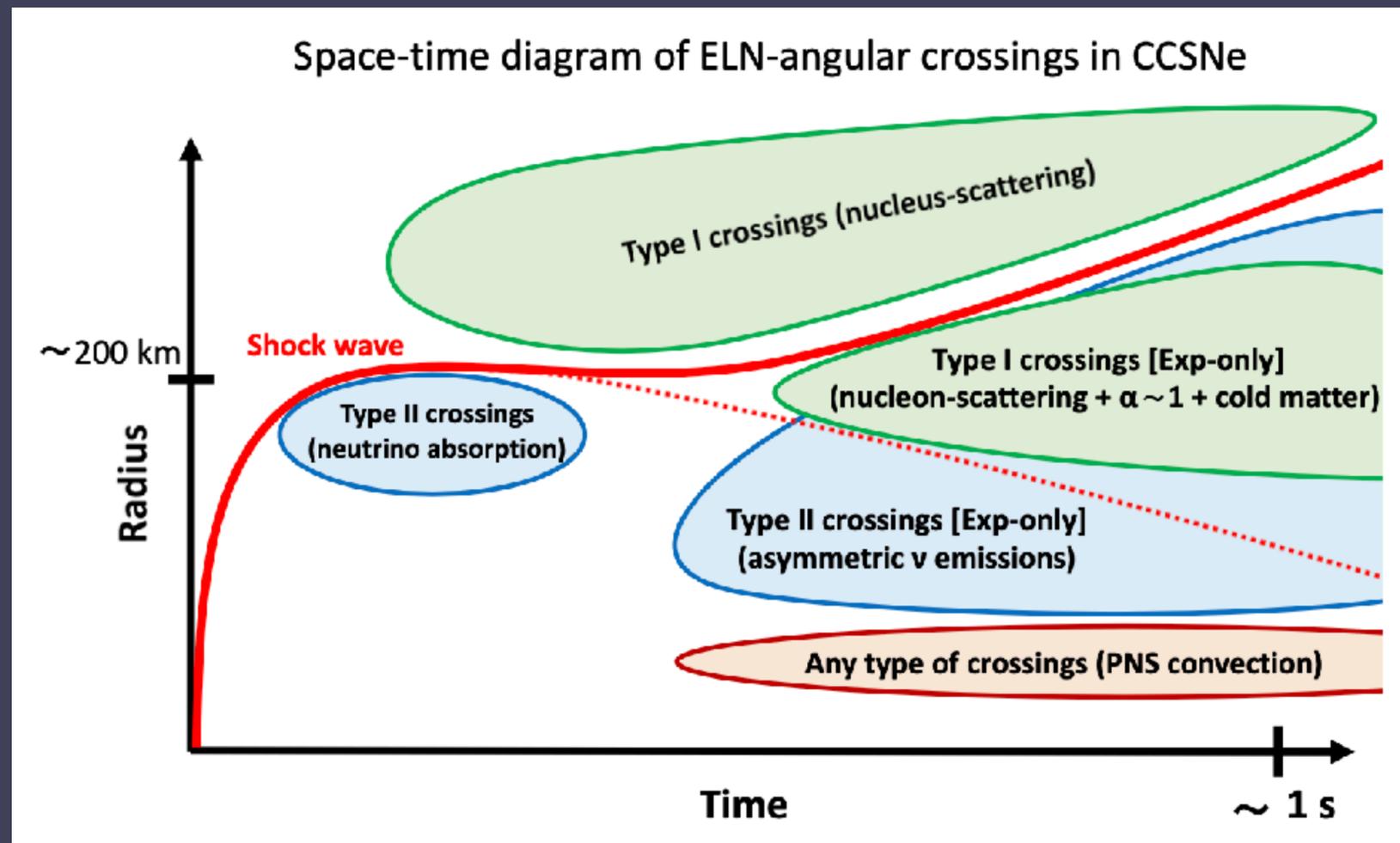
線型化QKE

QKE

$$G(\Omega) = \sqrt{2} G_F \int \frac{E^2 dE}{2\pi^2} (f_{\nu_e}(p) - f_{\bar{\nu}_e}(p)) : \text{電子型ニュートリノレプトン数 (ELN)}$$

- ・ 摂動の0次の効果はすべて電子型ニュートリノレプトン数(ELN)に入り、安定性はELNだけで完全に決まる
- ・ 定理(Morinaga 2021) : ELN crossing (ELNが正負両方の値を持つ)が起こる  
⇔ フレーバー不安定になる
- ・ 超新星シミュレーションからELN crossingを探す

# ELN crossing探査



Nagakura+(2021)

- ・ 大量の3D超新星計算からELN crossingを探す→様々な起源のものが見つかる
- ・ 角度分布の情報がなく、成長率はわからない；回転の影響もわからない

# Boltzmann輻射流体コードとフレージャー不安定性

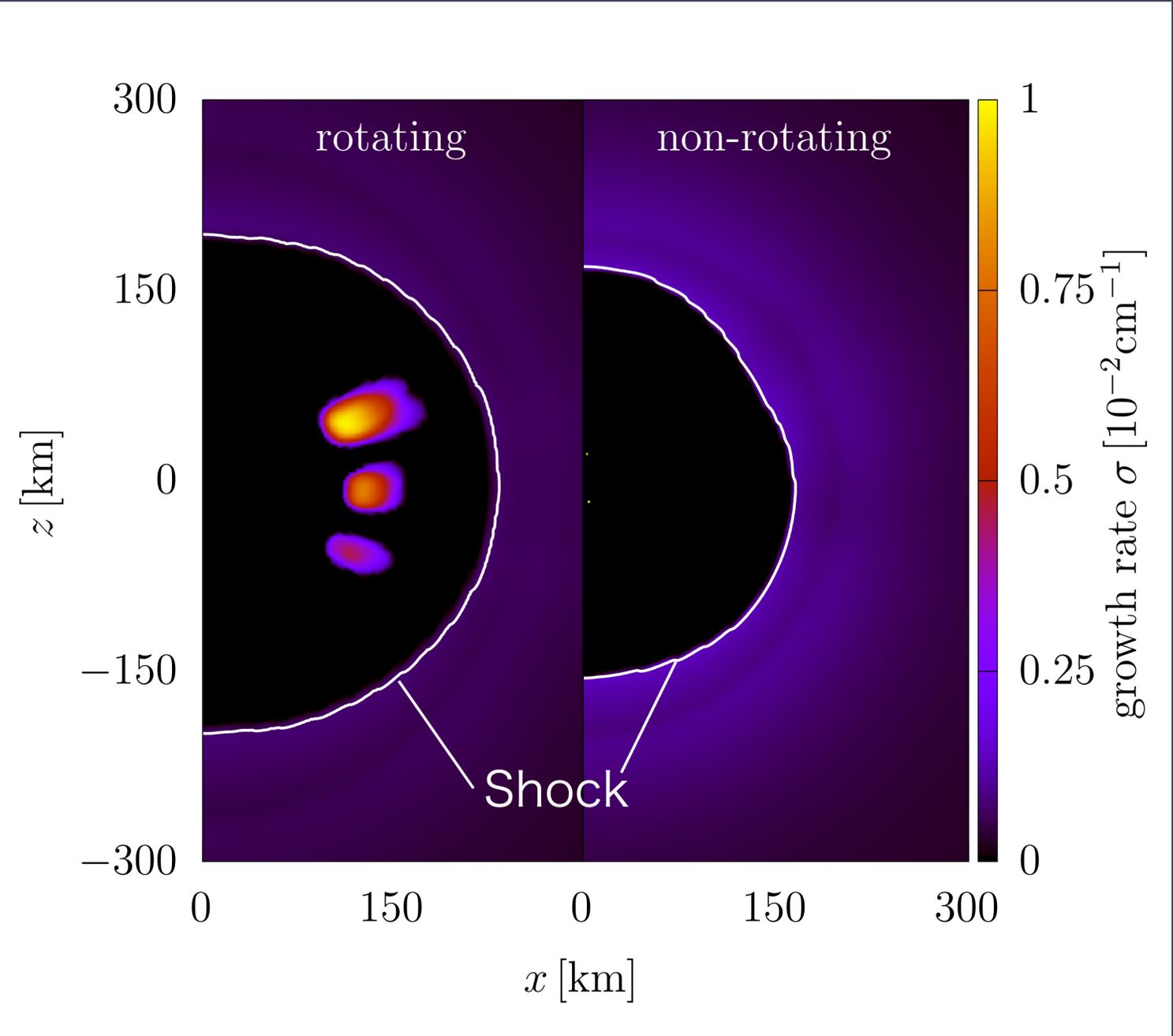
- ・ Boltzmann輻射流体コードによる超新星シミュレーションであれば、ニュートリノの分布関数がわかり、ELNの角度分布を得られる
- ・ 回転親星の超新星シミュレーションの結果から、ニュートリノ集団振動がどこで起こるかを調べる
- ・ 線形解析で分散関係を解くのは簡単ではない→近似公式

$$\sigma \sim \sqrt{-\left(\int_{G(\Omega)>0} \frac{d\Omega}{4\pi} G(\Omega)\right) \left(\int_{G(\Omega)<0} \frac{d\Omega}{4\pi} G(\Omega)\right)}$$

を利用して成長率を見積もる

- ・ ELN crossingにより不安定性が成長するという描像を反映

# 線型成長率

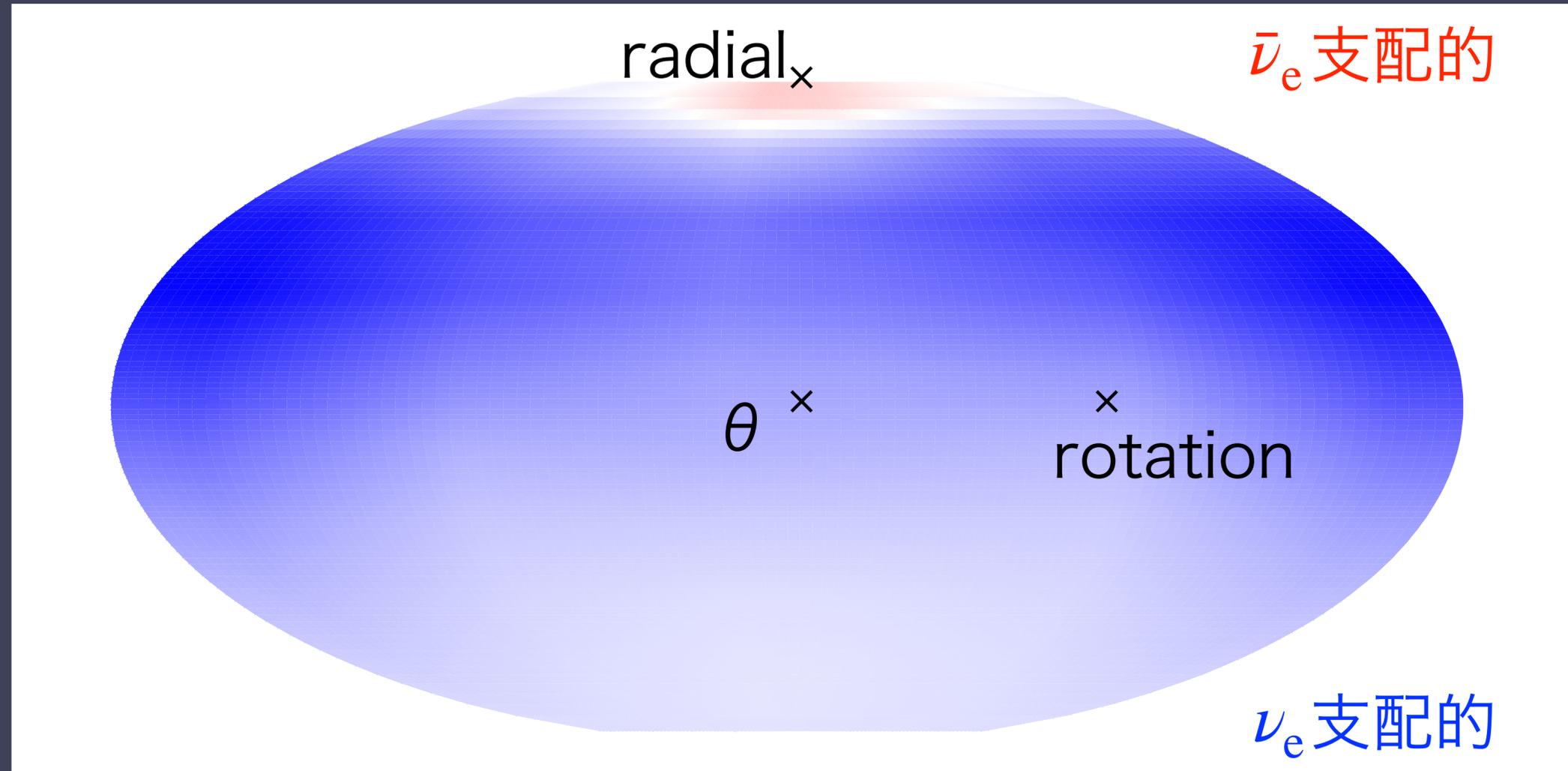


- 15  $M_{\odot}$ 親星(Woosley+2002)の中心1000 kmを4 rad/sで回す
- 線型成長率

$$\sigma \sim \sqrt{-\left(\int_{G(\Omega)>0} \frac{d\Omega}{4\pi} G(\Omega)\right) \left(\int_{G(\Omega)<0} \frac{d\Omega}{4\pi} G(\Omega)\right)}$$

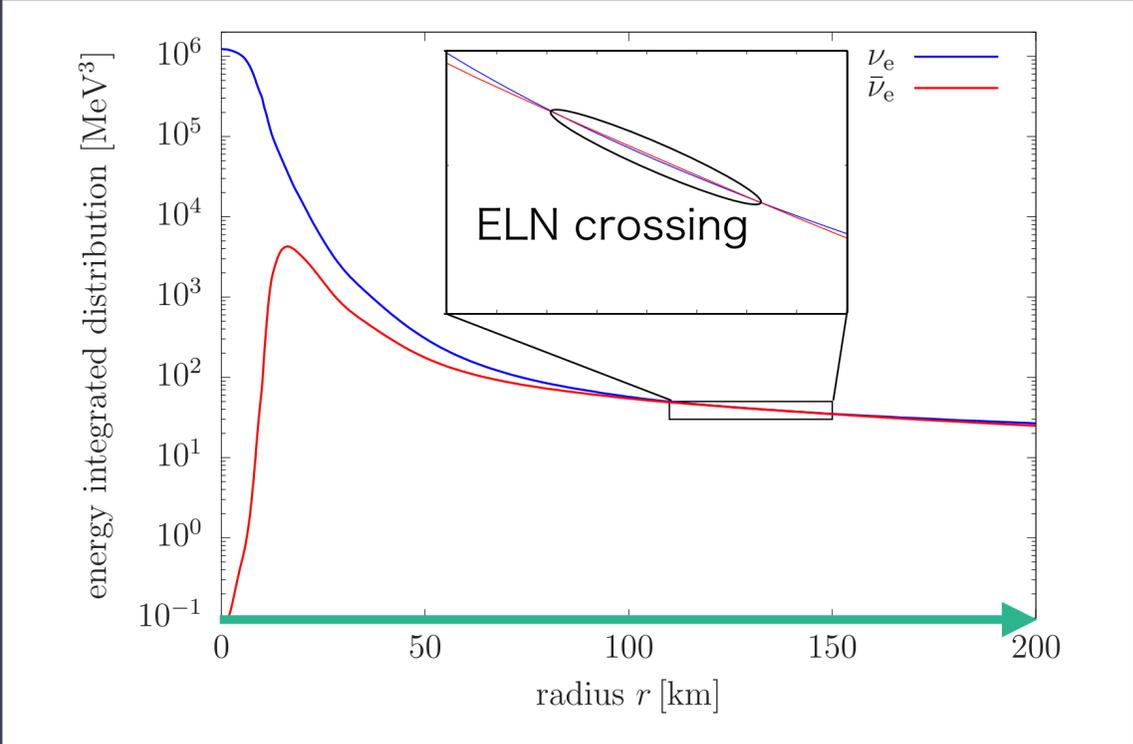
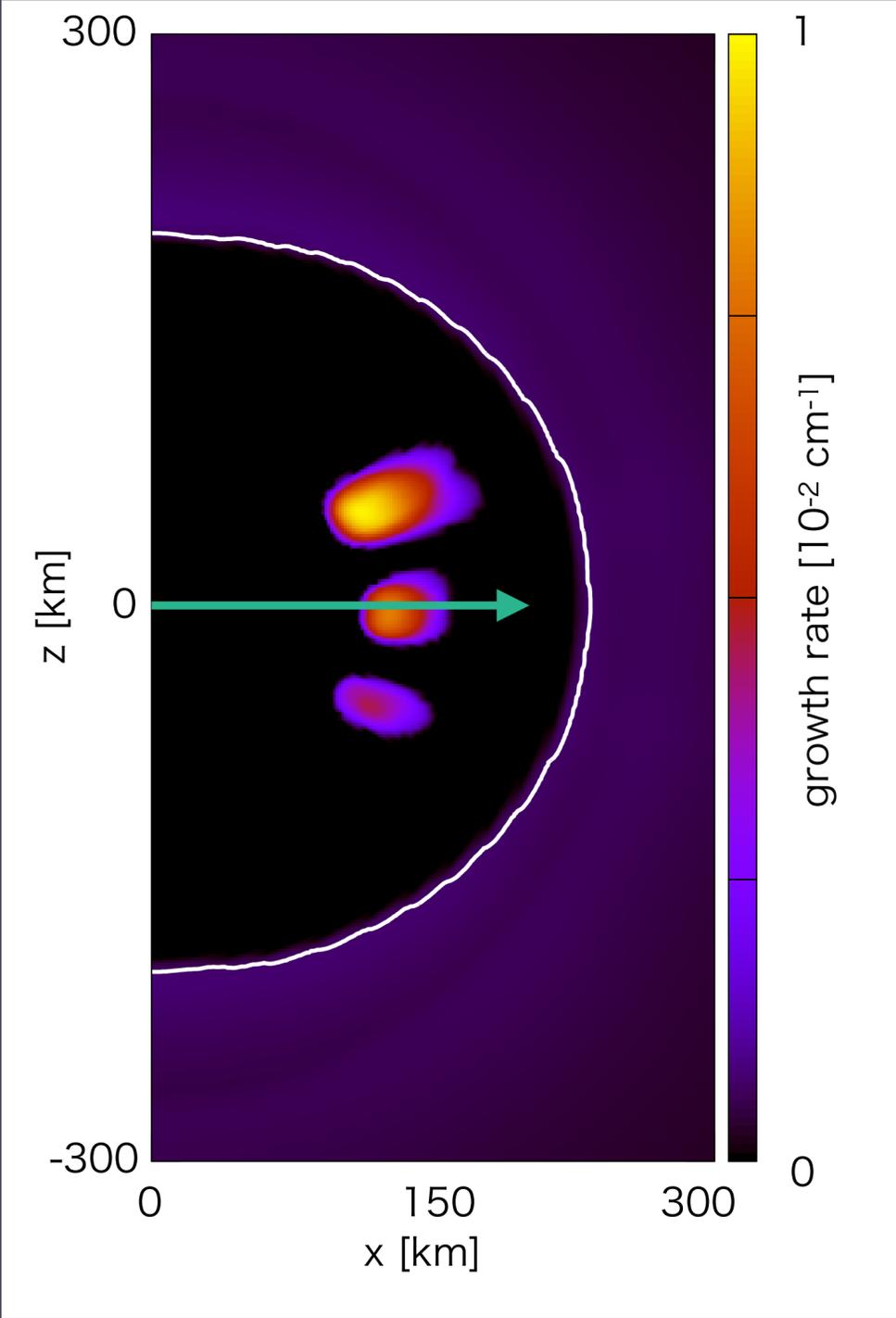
- 回転モデルでのみ不安定性の「島」が出現

# ELN角度分布



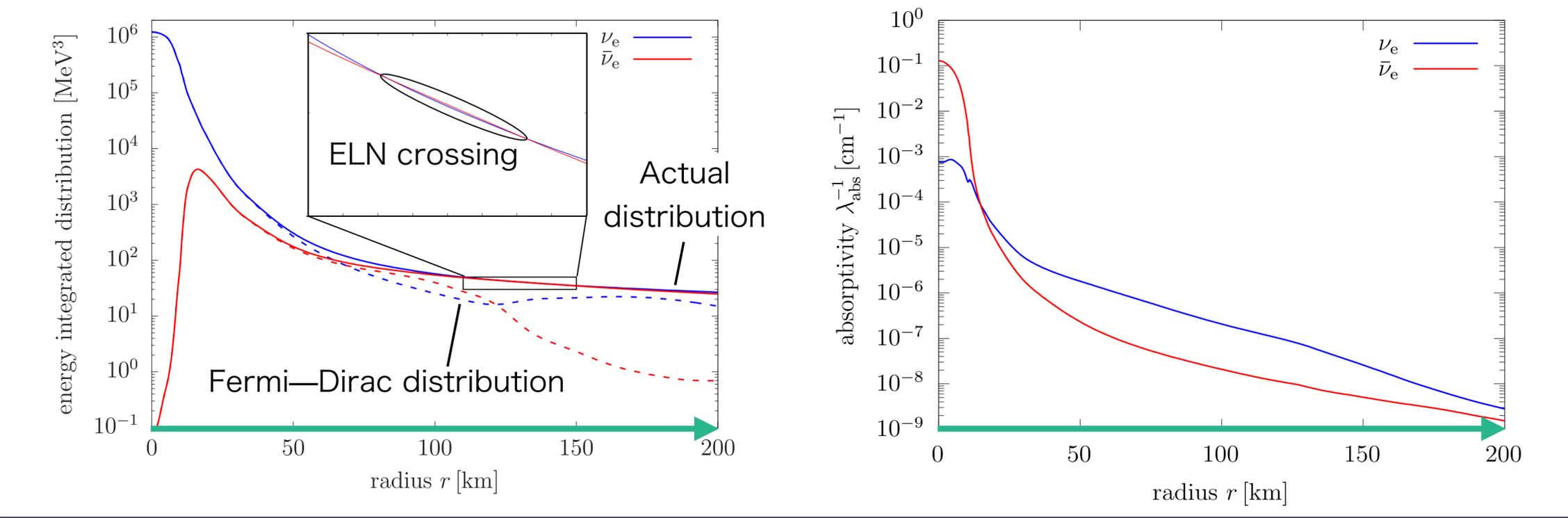
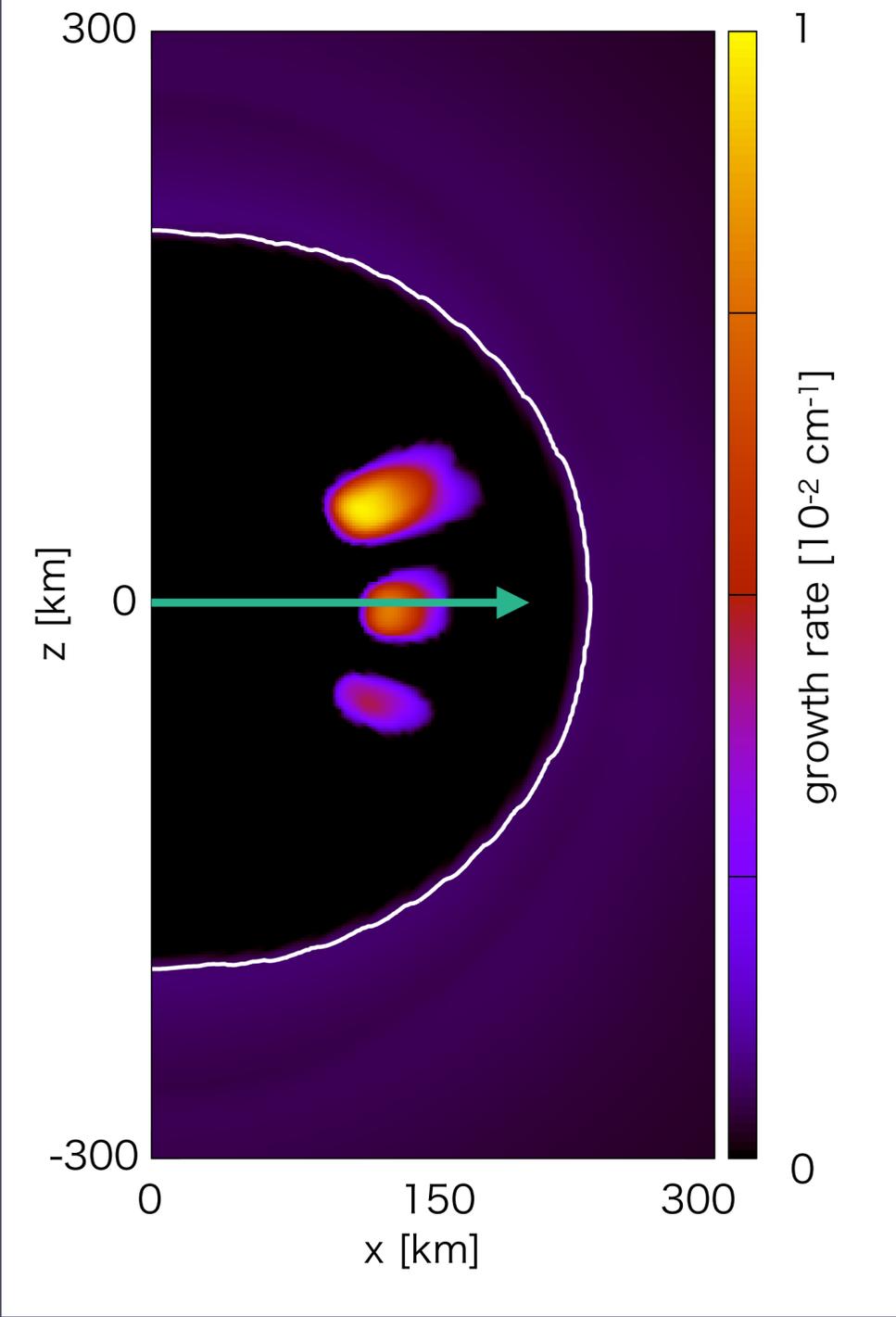
- ・ フレーバー不安定領域のELNの角度分布
- ・ radial外向き方向にのみ  $\bar{\nu}_e$  が卓越してELN crossingを起こす
- ・ 電子型ニュートリノの吸収によるもの

# 外向き分布関数



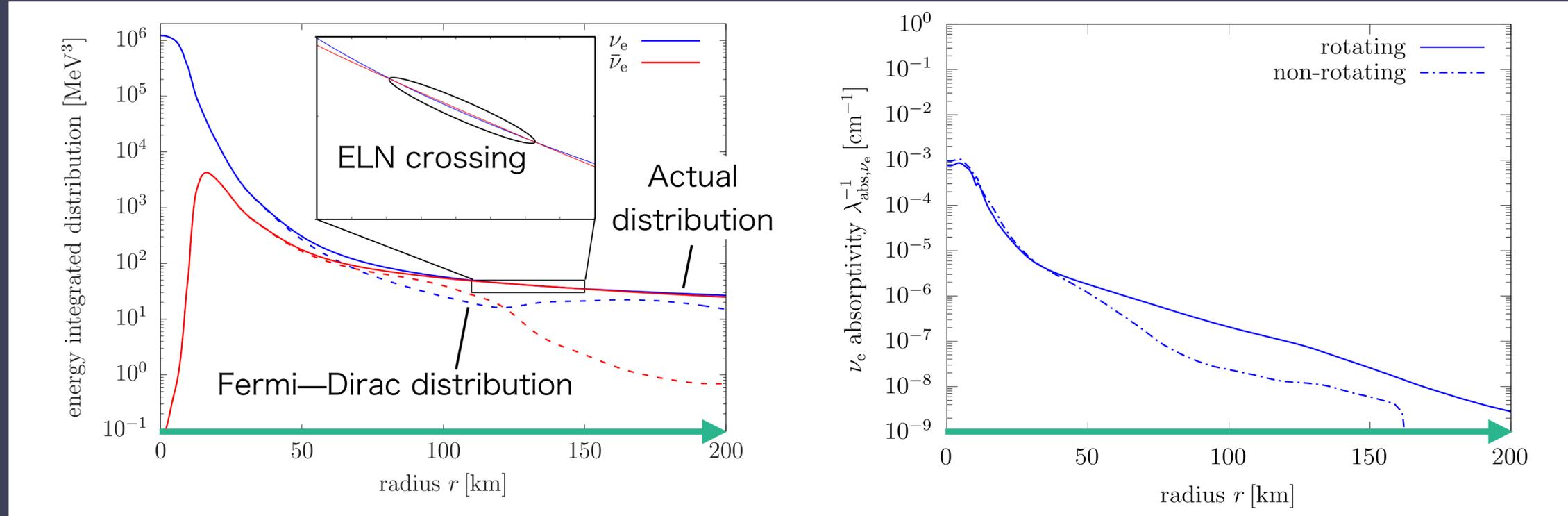
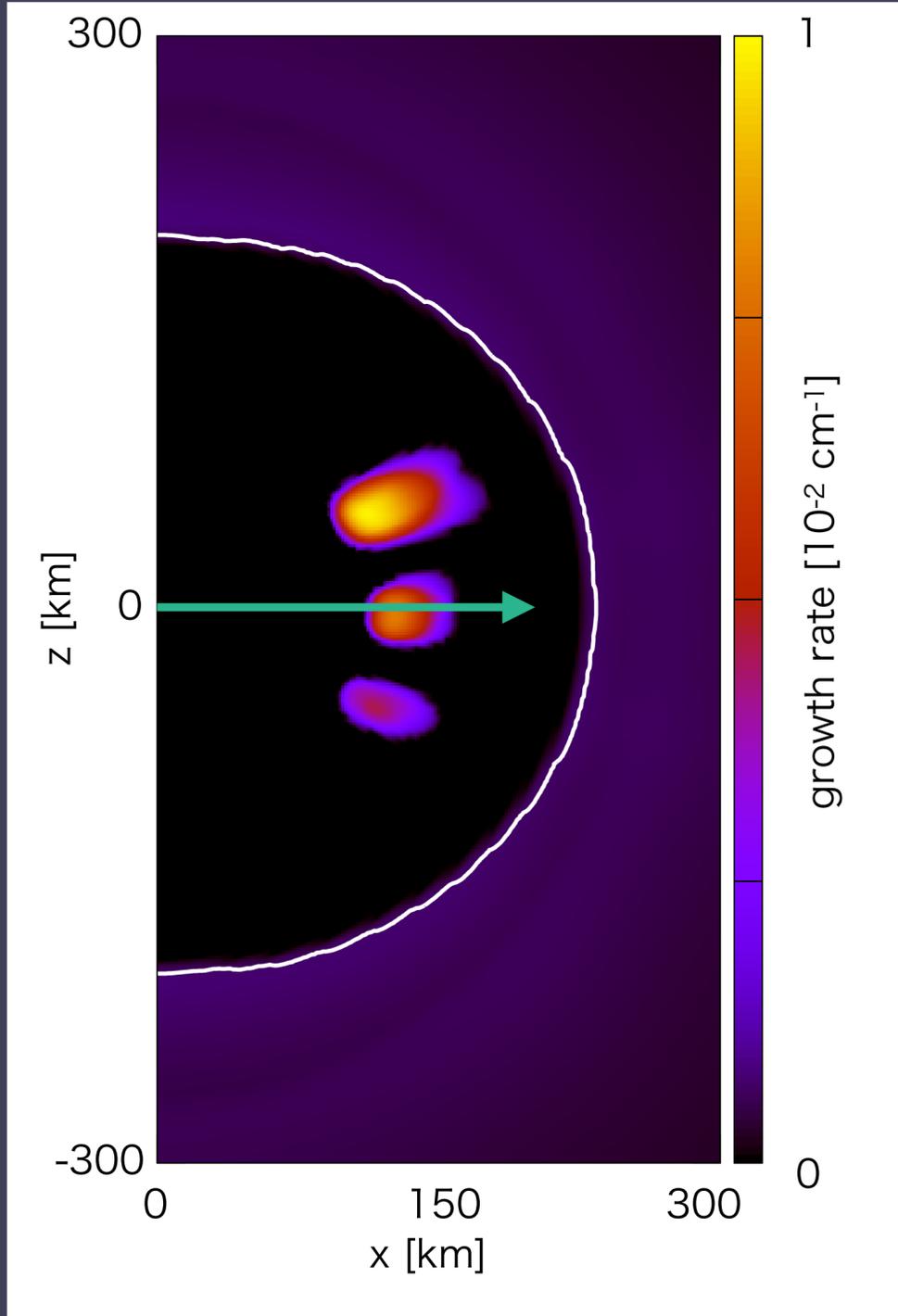
- ・ エネルギー積分した外向きニュートリノ分布関数
- ・  $\nu_e$  が  $\bar{\nu}_e$  より速く吸収されてELN crossingを作る
- ・ Boltzmann方程式の衝突項 =  $-(f - f_{\text{FD}})/\lambda_{\text{abs}}$

# 外向き分布関数と吸収係数



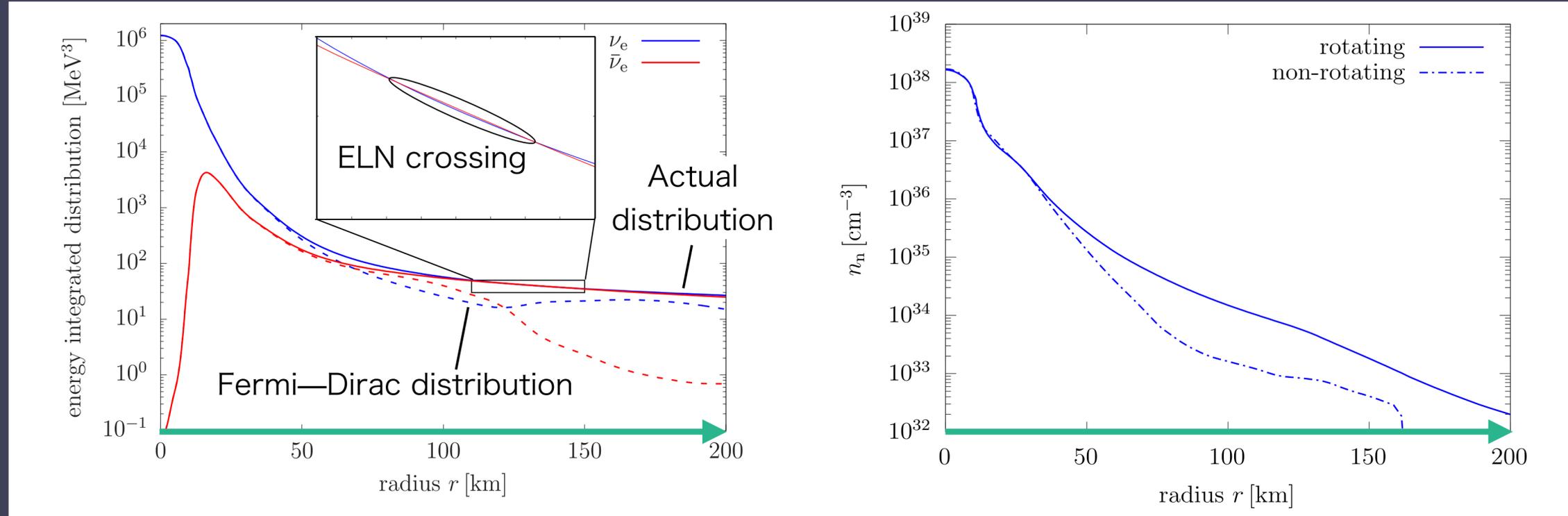
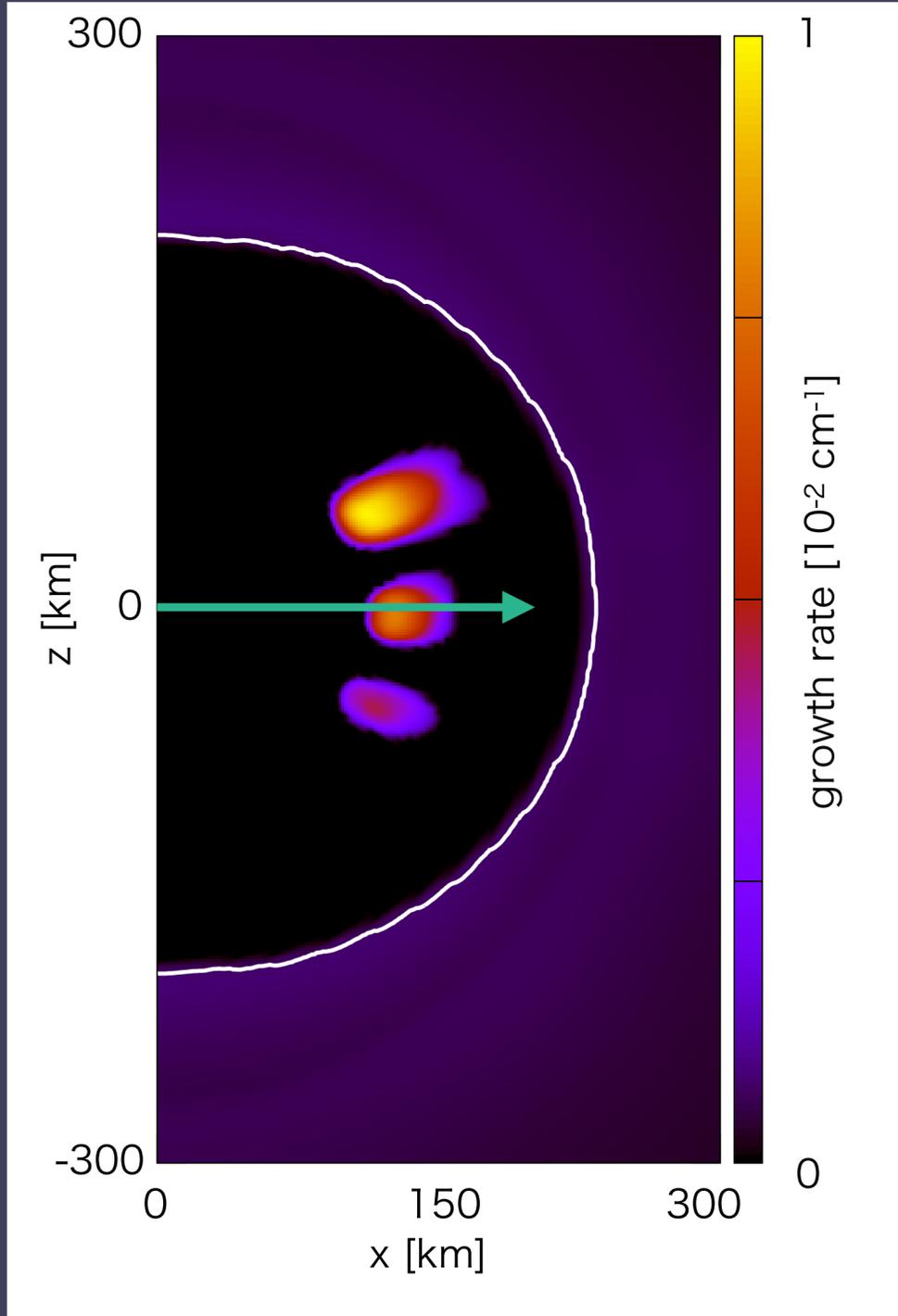
- ・ Boltzmann方程式の衝突項 =  $-(f - f_{\text{FD}})/\lambda_{\text{mfp}}$
- ・  $f_{\text{FD}}$  が  $\nu_e$  と  $\bar{\nu}_e$  で逆転している
- ・ 吸収係数が  $\nu_e$  のほうが大きい  
→  $\nu_e$  が強く吸収される

# 回転の効果-無回転モデルとの比較



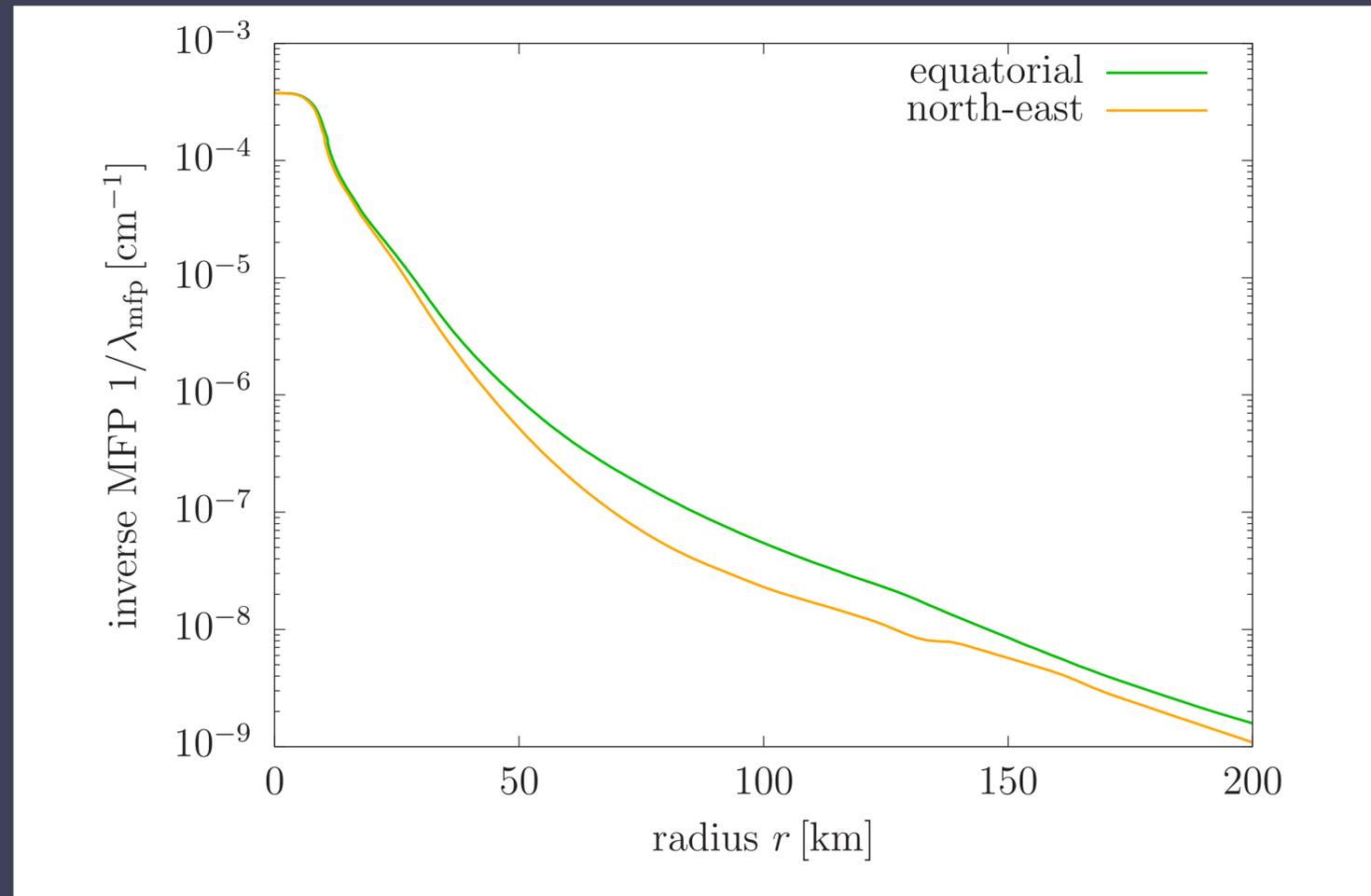
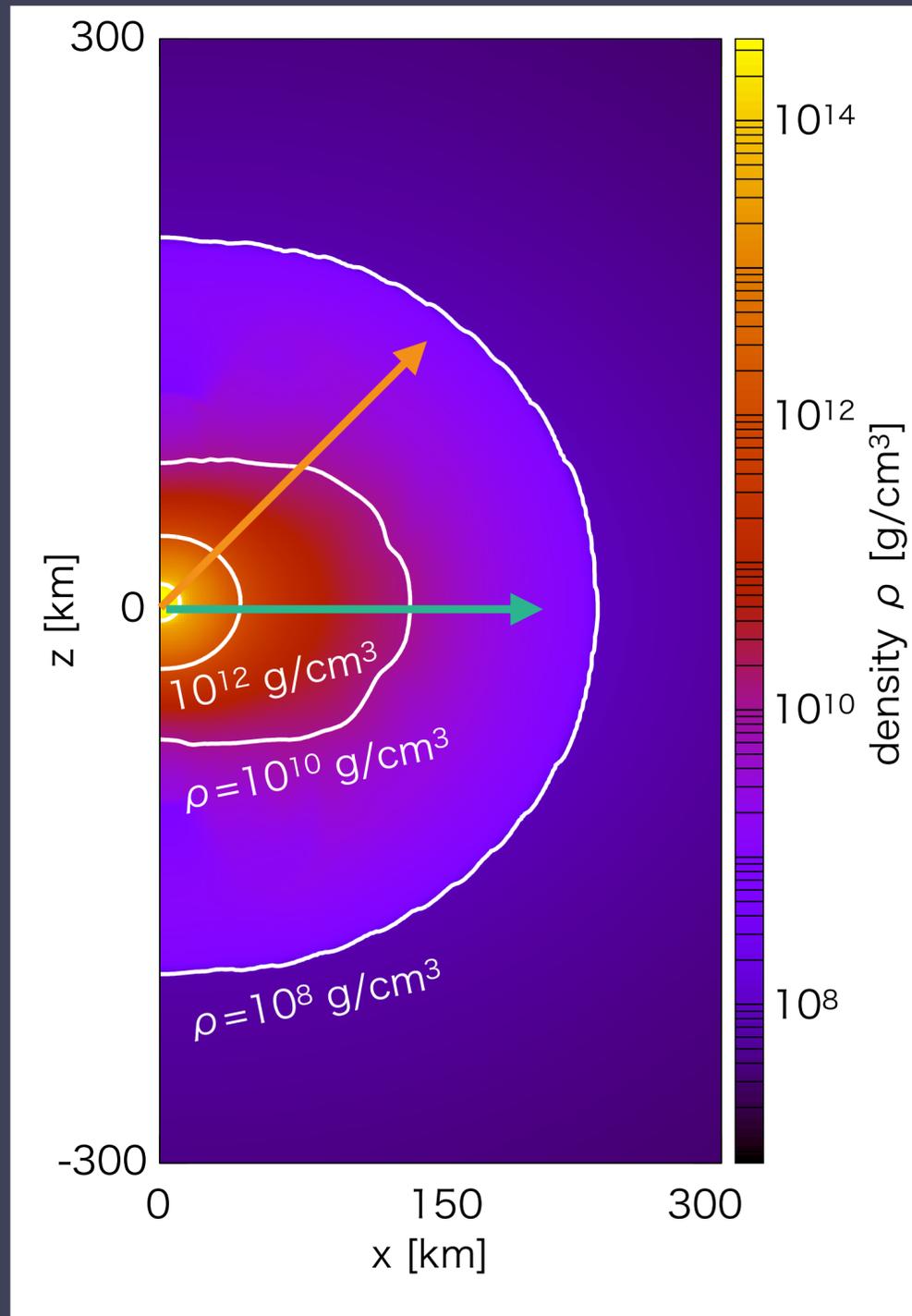
- ・ 無回転モデルでは吸収係数が速く減少して十分吸収されない→ELN crossingも起こらない

# 回転の効果-無回転モデルとの比較



- ・  $\nu_e$  を吸収する中性子の密度分布が遠心力で外に広がっている
- ・  $\nu_e$  が長時間吸収を受け続ける
- ・ ELN crossingが起こってフレーバー不安定になる

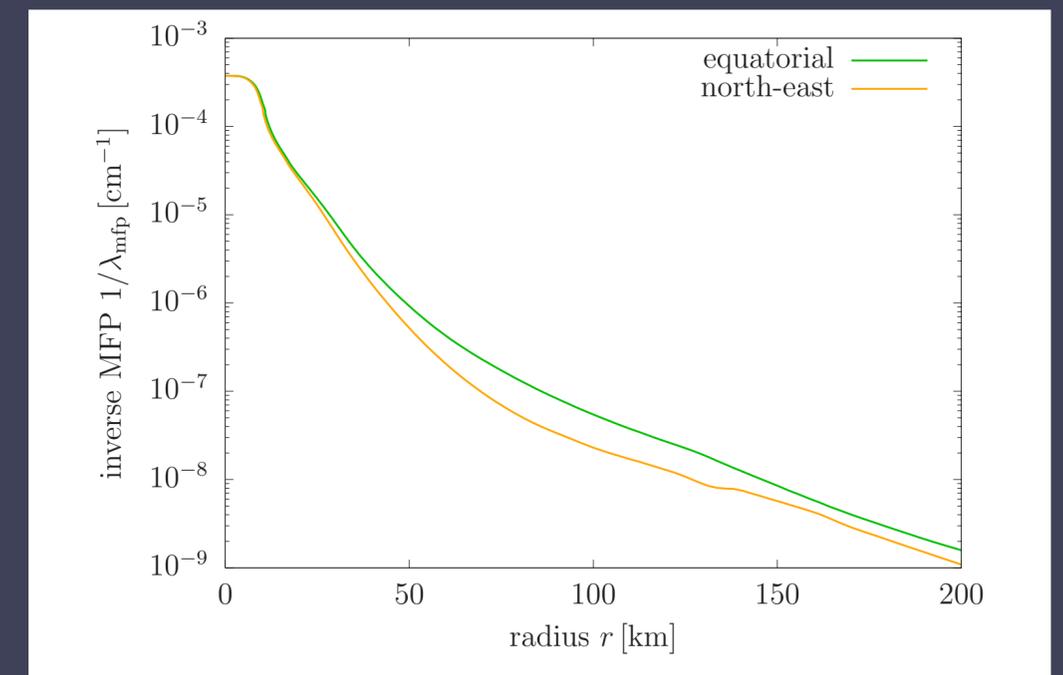
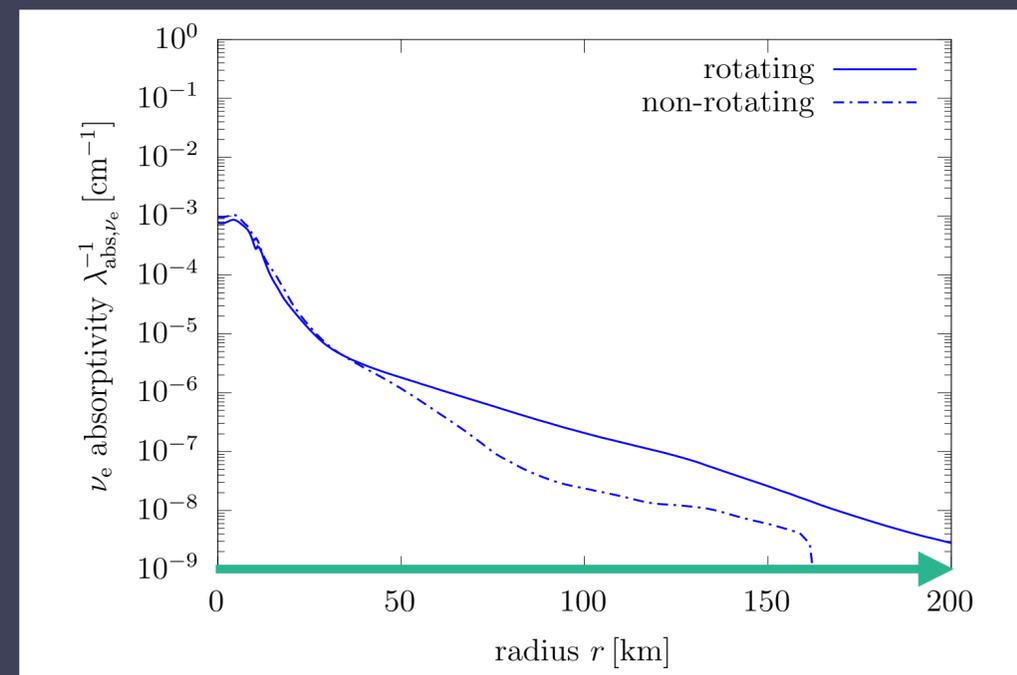
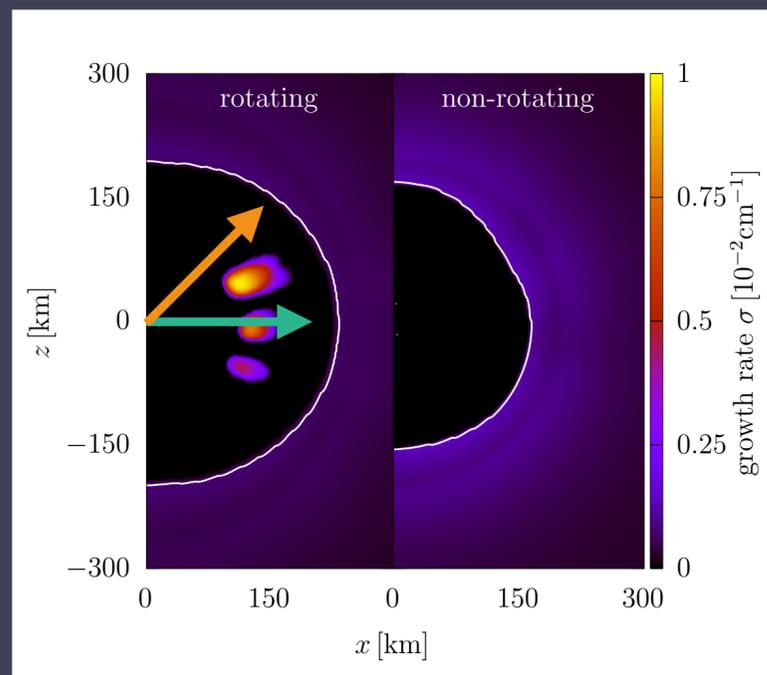
# 回転の効果-方向依存性



- ・ 遠心力で物質が赤道方向に広がる
- ・ 赤道方向以外では吸収係数が速く減少する
- ・ 赤道方向に飛ぶ  $\nu_e$  は長時間吸収を受け続ける

# まとめと議論

- ・ ニュートリノ集団振動は超新星ダイナミクスなどに大きな影響を与える可能性があるが、フレーバー変換がいつ起こり、どう変換するかが議論されている
- ・ 親星が回転していると、遠心力で中性子分布が赤道方向に広がり、そちらに飛ぶ  $\nu_e$  が強い吸収を受けてELN crossingを起こし、フレーバー不安定になる
- ・ 将来的にはこの回転誘起型フレーバー不安定性がどの程度の回転を必要とするか、超新星ダイナミクスにどのような影響が出るかを調べていく必要がある



Thank you for listening!