



# 原始中性子星外層の後期熱的進化に関する詳細な解析

Liao Jinkun, 加藤 ちなみ, 鈴木 英之 (東京理科大学)

## Abstract

球対称一般相対性理論的な準静的原始中性子星冷却コードを用いて、原始中性子星後期進化に現れた温度ピークを調べて、エネルギー交換をする反応、特に(反)電子型ニュートリノの吸収反応について詳細な解析を行った。その結果、吸収反応を妨げている電子と中性子のパウリブロッキングが温度ピークに近い領域では緩むので、温度ピークの場合の吸収反応が起こりやすくなり、反応率が内側より高くなるのに対し、極大値より外側は密度の減少により反応率が低下していることがわかった。

## 1.Introduction

- ▶ **原始中性子星(proto neutron star, PNS)**
  - ◆ 大質量星が超新星爆発して中心部に形成するコンパクト天体
  - ◆ ニュートリノ放出により、冷却して中性子星に進化する過程が**原始中性子星冷却**(PNS cooling, PNSC)

近年、ニュートリノ検出器感度の向上より、超新星ニュートリノの検出可能な時間が長くなると期待されている。PNSCをシミュレーションすることによって、長期間進化におけるニュートリノの放出量を見積もり、PNS内部の様子を探ることができる。

また、先行研究(Nakazato et.al 2018)がPNS表面近くの重い原子核分布によるニュートリノ反応や進化計算への影響を議論した。ここでは、PNS外層の後期熱的進化に着眼して解析を行った。

## 2.Method

コード： 球対称一般相対性理論的な準静的原始中性子星冷却計算コード

ニュートリノ輸送： multi-energy flux limited diffusion scheme

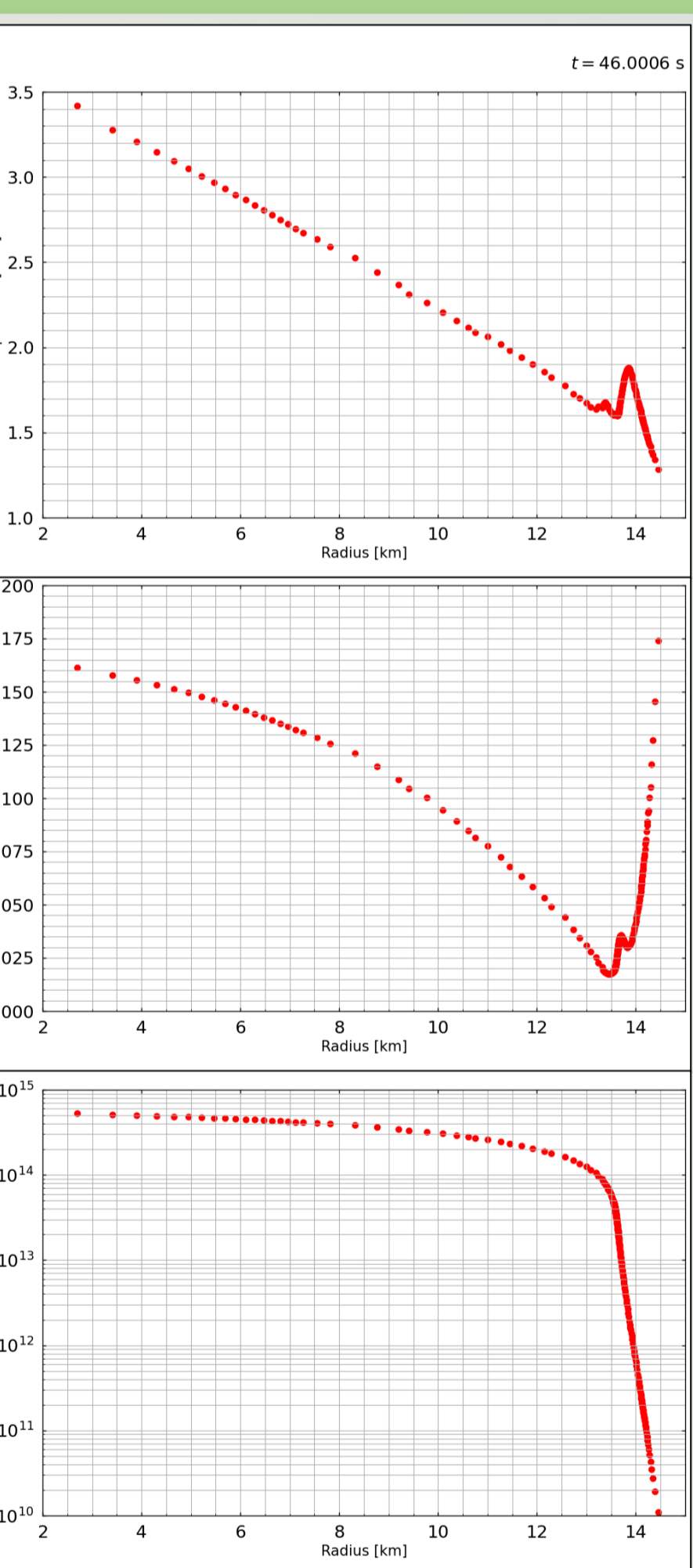
Flux limiter： Mayle & Wilson(1987)

EOS： Shen(2011)

ニュートリノ反応： Bruenn(1985) + Nucleon Bremsstrahlung ...

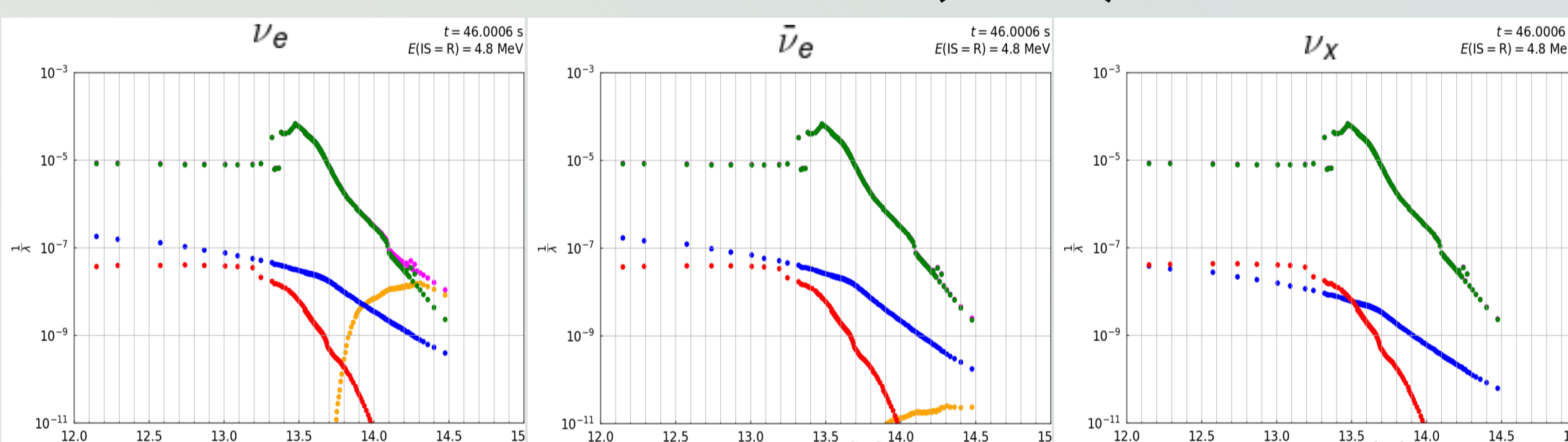
メッシュ： 空間252, エネルギー16

## 3.Result

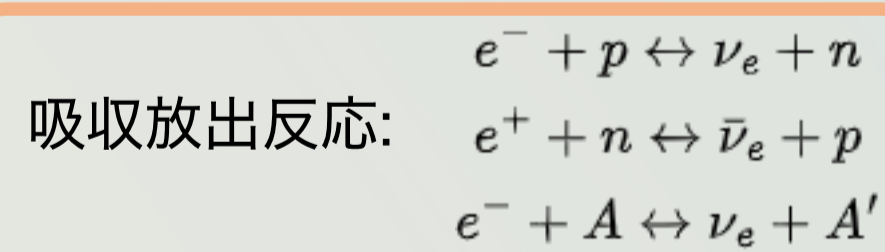


PNSCコードを用いて、50秒まで計算した。密度が時間的に増大していく。進化後期の温度分布から、PNSが全体的に温度が下がり続けて冷却するが、PNS表面から1 kmに周りより温度が高いピークが現れている。形成原因を調べた。

ニュートリノごとに各反応の平均自由行程の逆数は以下ようになる。後期進化では散乱反応が主導的である。また、熱交換に関して表面近くでは $\nu_e$ の吸収放出反応が優位である。吸収放出反応はBruenn(1985)の式で計算した。



- XLMDT Sum of all reaction
- XLMDAE Absorption and emission
- XLMDSE Electron scattering  $\nu + e^+ \leftrightarrow \nu + e^+$
- XLMDTP Thermal pair  $e^- + e^+ \leftrightarrow \nu + \bar{\nu}$ ,  $\bar{\nu} \leftrightarrow \nu + \bar{\nu}$ ,  $N + N \leftrightarrow N + N + \nu + \bar{\nu}$
- XLMDIS Isoenergetic scattering off nucleon  $\nu + n \leftrightarrow \nu + n$ ,  $\nu + p \leftrightarrow \nu + p$ ,  $\nu + A \leftrightarrow \nu + A$



$$\nu_e + n \rightleftharpoons e + p$$

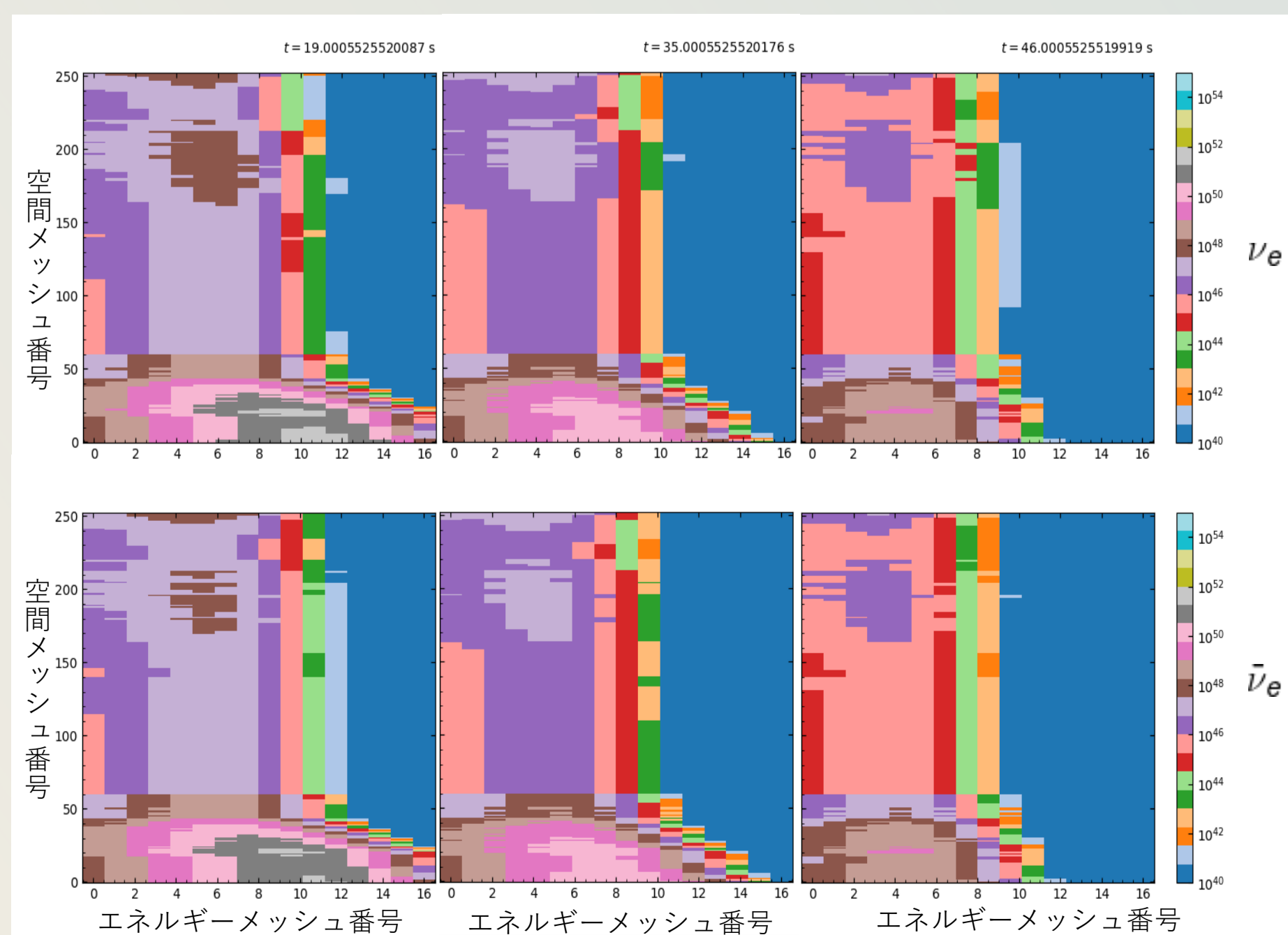
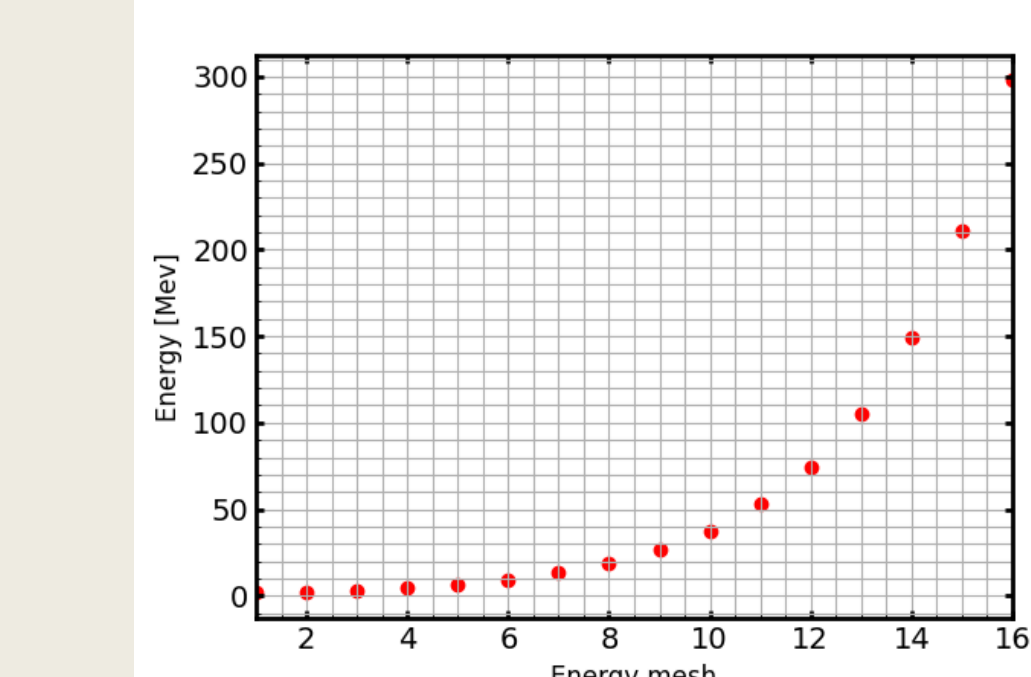
$$1/\lambda^{(\nu)}(\omega) = \frac{G^2}{\pi} \eta_{np} (g_V^2 + 3g_A^2) [1 - F_i(\omega + Q)] (\omega + Q)^2 \left[ 1 - \frac{M_e^2}{(\omega + Q)^2} \right]^{1/2}$$

$$\bar{\nu}_e + p \rightleftharpoons e^+ + n$$

$$1/\lambda^{(\bar{\nu})}(\omega) = \frac{G^2}{\pi} \eta_{pn} (g_V^2 + 3g_A^2) [1 - F_i(\omega - Q)] (\omega - Q)^2 \left[ 1 - \frac{M_e^2}{(\omega - Q)^2} \right] \Theta(\omega - Q - M_e)$$

$$\eta_{ij} = \int \frac{2d^3p}{(2\pi)^3} F_i(E) [1 - F_j(E)]$$

温度ピークを調べるために、吸収反応に関するPauli blocking factor を考慮した $\eta$ と電子や陽電子のブロッキング $(1 - F_i)$  ( $i=e, e^+$ )を分析する。ニュートリノのエネルギーは進化とともに減少していく。平均エネルギーに近いエネルギーメッシュで反応を見るために、ニュートリノ分布(右図)を示した。



## 3.Result

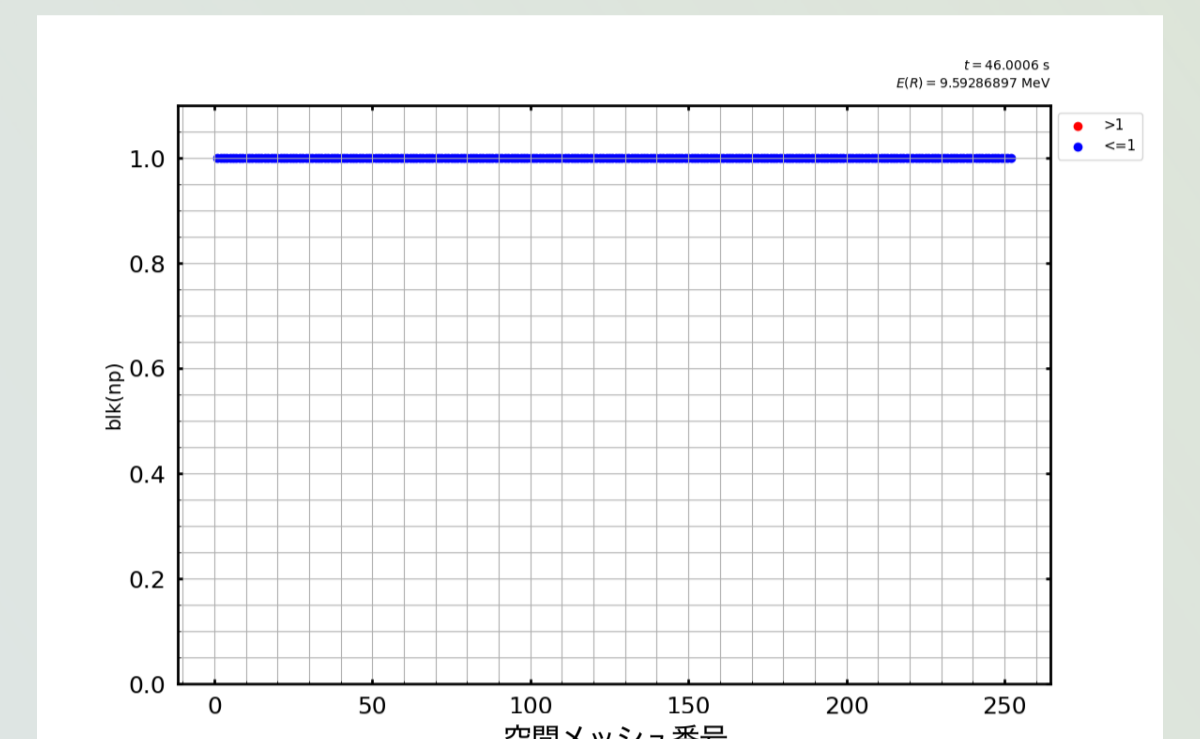
- 進化後期のPNS外層は温度の極大値が空間メッシュ196にある。
- ニュートリノ平均エネルギーは初期の ~10 MeVから徐々に後期の ~4 MeVに下がる。
- 空間メッシュ170~210のニュートリノ数は周りより一桁多い。

### • $\nu_e + n \rightarrow p + e$ の反応率

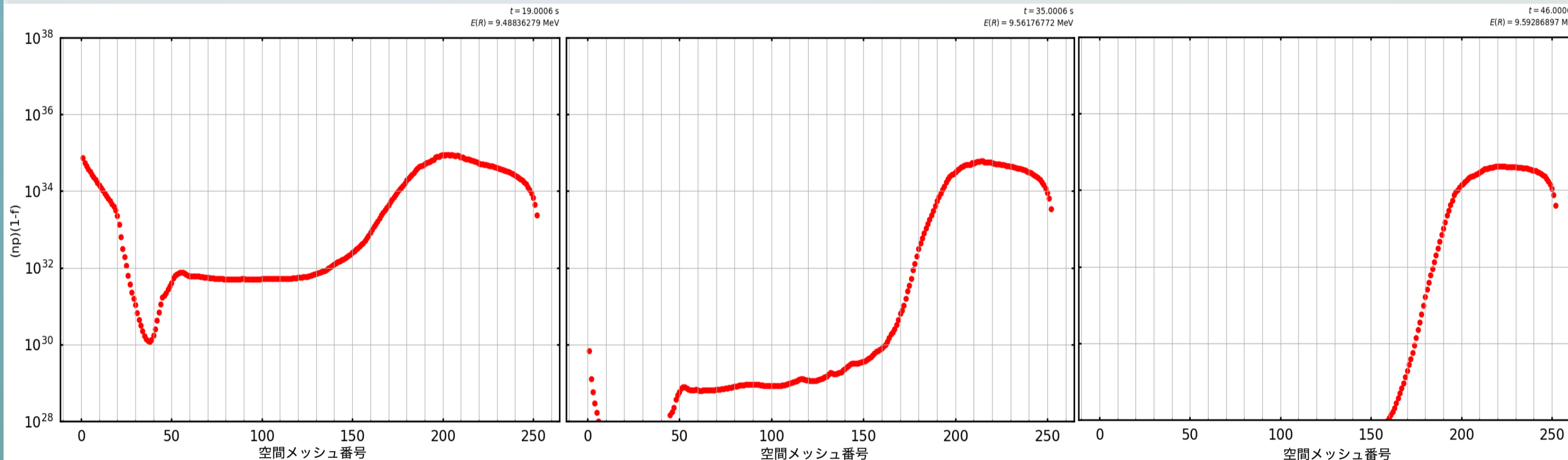
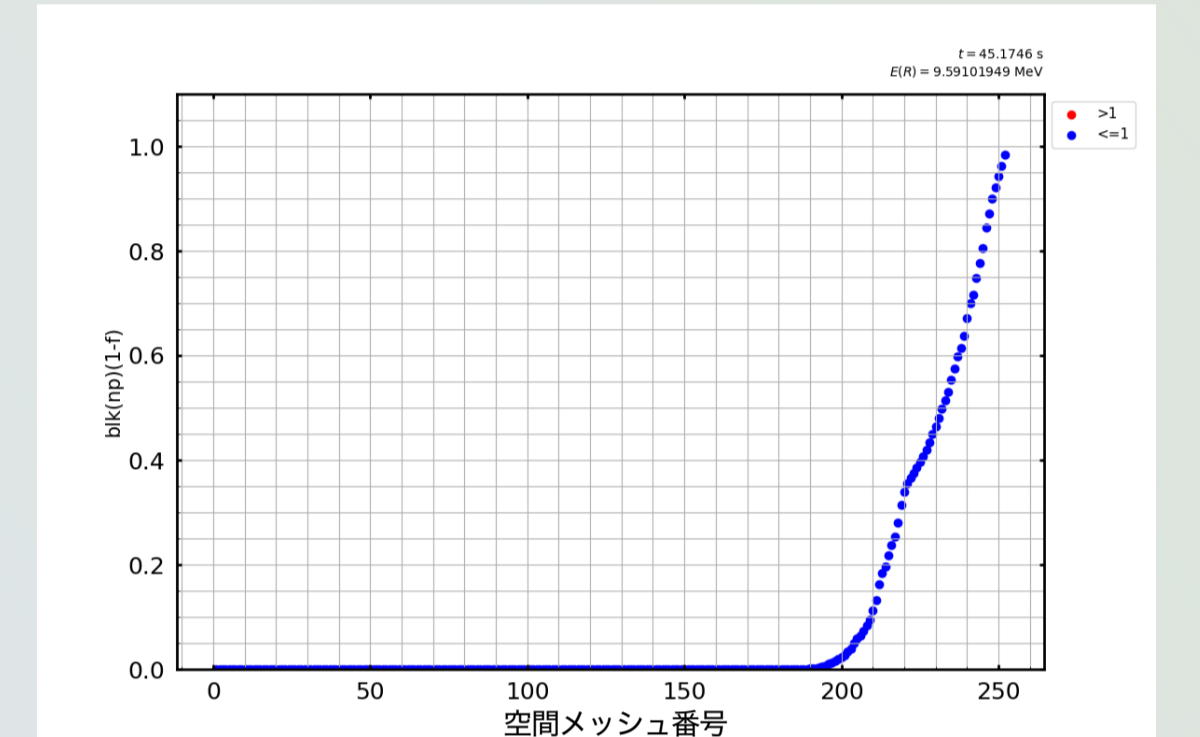
以下の量を用いて核子のPauli blockingを評価する。 $n_i$  ( $i = n, p$ )が数密度である。

$$blknp = \frac{\eta_{np}}{n_n}, \quad blknn = \frac{\eta_{nn}}{n_n}, \quad blkpn = \frac{\eta_{pn}}{n_p}, \quad blkpp = \frac{\eta_{pp}}{n_p}$$

$\nu_e$ の吸収反応では電子のPauli blockingがかかっている。空間メッシュ190~200付近からblockingが緩み、内側より吸収反応が起こりやすくなる。

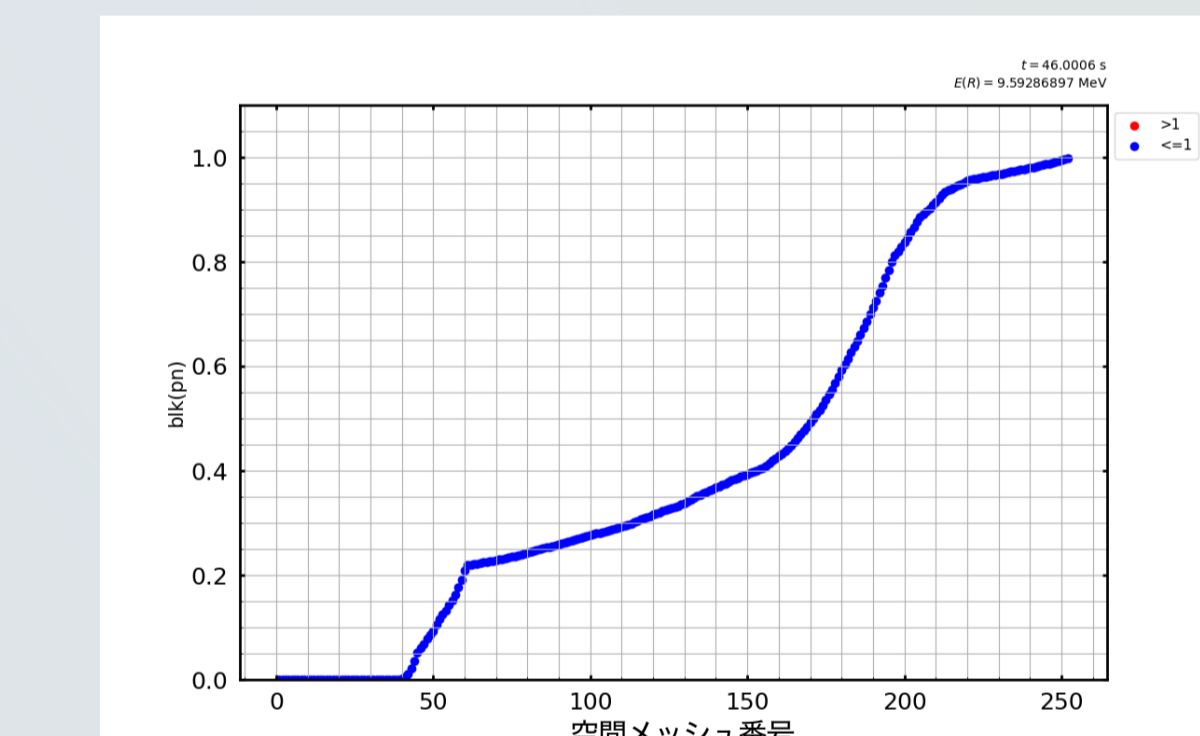


35秒までに空間メッシュ200付近に反応率の極大値が存在する。この場所より外側では、バリオン密度が激減しているため、反応率が低い。それに、この空間領域のニュートリノ数が内側より少なく、吸熱のプロセスは空間メッシュ200付近より弱い。温度ピークの形成原因となる。

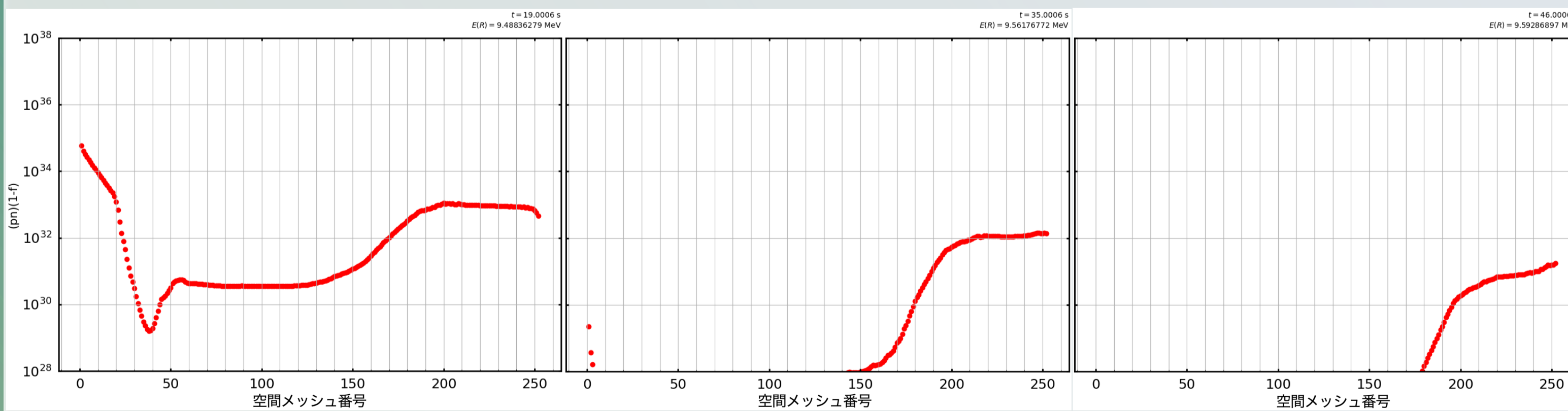
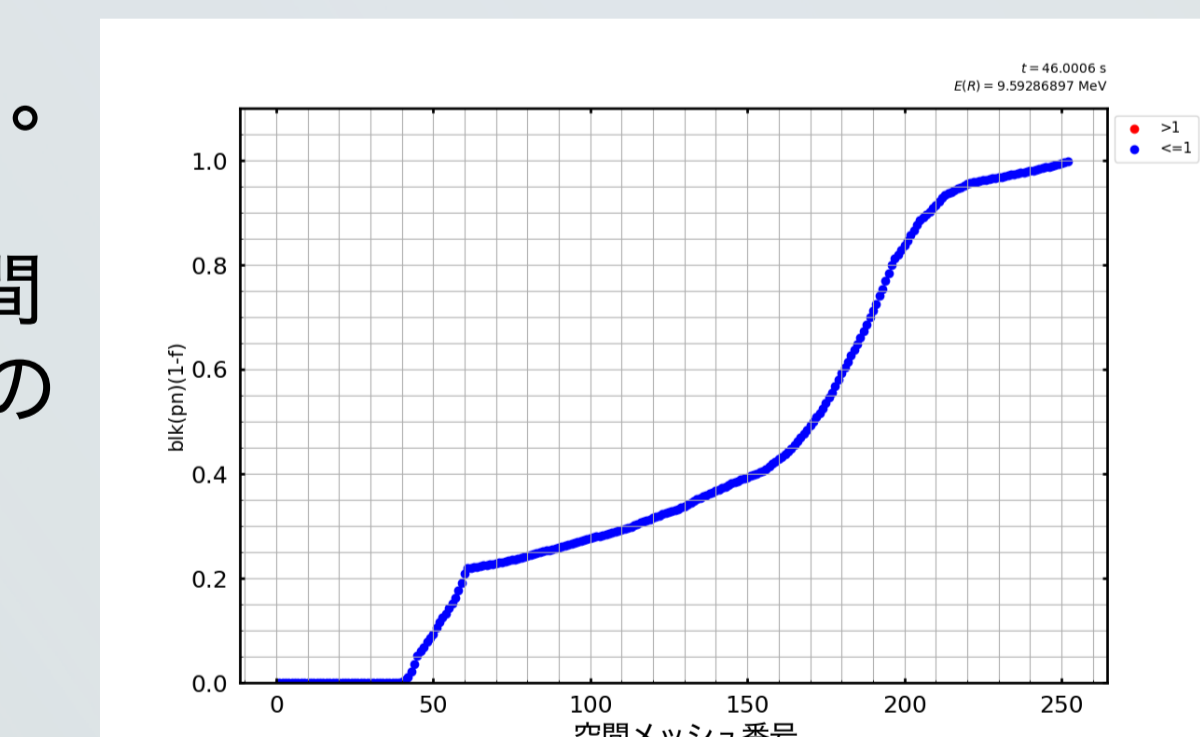


### • $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ の反応率

$\bar{\nu}_e$ の吸収反応では中性子のPauli blockingがかかっている。左図の傾きを見ると、空間メッシュ150~200付近から、blockingがより早く緩んでいる。この空間は温度ピークの上りの部分に対応して、内側より吸収反応が起こる確率が上がる。



$\bar{\nu}_e$ の吸収反応は $\nu_e$ の吸収反応より弱い、空間メッシュ150~200の反応率が単調増大しているのは同じである。



## 4.Summary

原始中性子星の外層における進化後期の温度ピークはニュートリノ吸収放出反応が影響している。吸収反応の観点から、内側では電子と中性子のPauli blockingが強くて、それぞれ $\nu_e$ と $\bar{\nu}_e$ の吸収を妨げる。中心から温度ピークが生成する場所へ向かってブロッキングが緩むことで、温度極大値の場所の吸熱プロセスが周りより強い。また、温度極大値の場所より外側では、空間的にバリオン密度が下がり、十数秒にわたって吸収率とニュートリノの数も温度ピークが生成する場所より小さいので、温度ピークの右側が形成する。PNS全体的に温度が下がるが、温度ピークの場所は周りより冷却しにくい。

吸熱プロセス(>0) + 冷却プロセス(<0) ⇒ 正味な温度変化

今後の展望として、PNSの温度は時間発展で冷却しつつあるので、冷却に寄与する反応も調べて温度分布の時間発展を説明することを目指す。