

超新星残骸内における超新星爆発による宇宙線加速

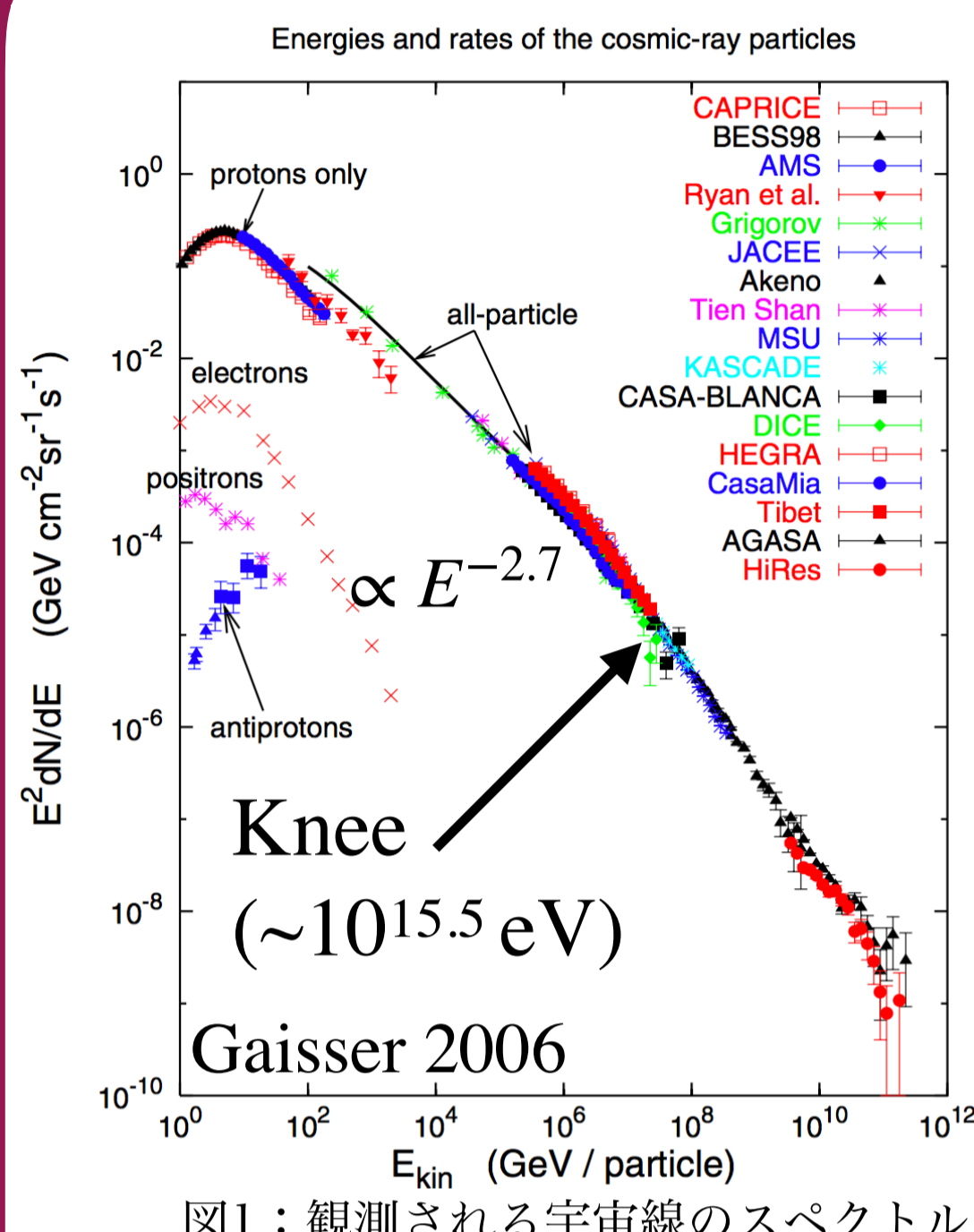
安田 晴皇 (京都大学 宇宙物理学教室 D1)



Abstract

最近の超新星残骸 (Supernova Remnant; SNR) の観測からは、1つのSNRによる宇宙線加速では、最高エネルギーがkneeに到達することが難しいことや、観測されるベキ指数を再現できないことが言われてきている。しかし、これまでのSNRでの宇宙線加速の先行研究では、単純化された星周環境が用いられてきた。そのため、複雑な星周環境下でのSNRにおける宇宙線加速を研究することが重要である。そこで我々は、スーパーバブルと呼ばれる天体に注目することにした。そこで本研究では、スーパーバブルの簡単なモデルとして、超新星残骸内部で新たに超新星が起きたときの宇宙線加速をsimulationする。

Introduction



- 銀河宇宙線の3つの特徴 (図1)
- ① 構成要素
90%: proton, 9%: He, 1%: others
- ② 元素ごとに異なるpower-law index
 $N_i(E) \propto E^{-n_i}$ (i=p, He, Li, ...)
→ $n_i = 2.7$ (p), 2.6 (He, C), 3.0 (Li, Be, B)
- ③ (protonの)最高エネルギー
 $E_{max} \sim 10^{15.5}$ eV ("knee")

● 先行研究



宇宙線加速の標準シナリオ:
超新星残骸 (SNR)における衝撃波加速 (DSA)
超新星残骸の作る衝撃波の上流と下流を粒子が往復することによって、確率的に運動エネルギーを獲得することが出来る(図2)。→粒子のエネルギースペクトルは自然と $\propto E^{-2}$ のpower-lawになる(e.g. Fermi1949, Bell1978, Blandford & Ostriker1978)。

● 問題点

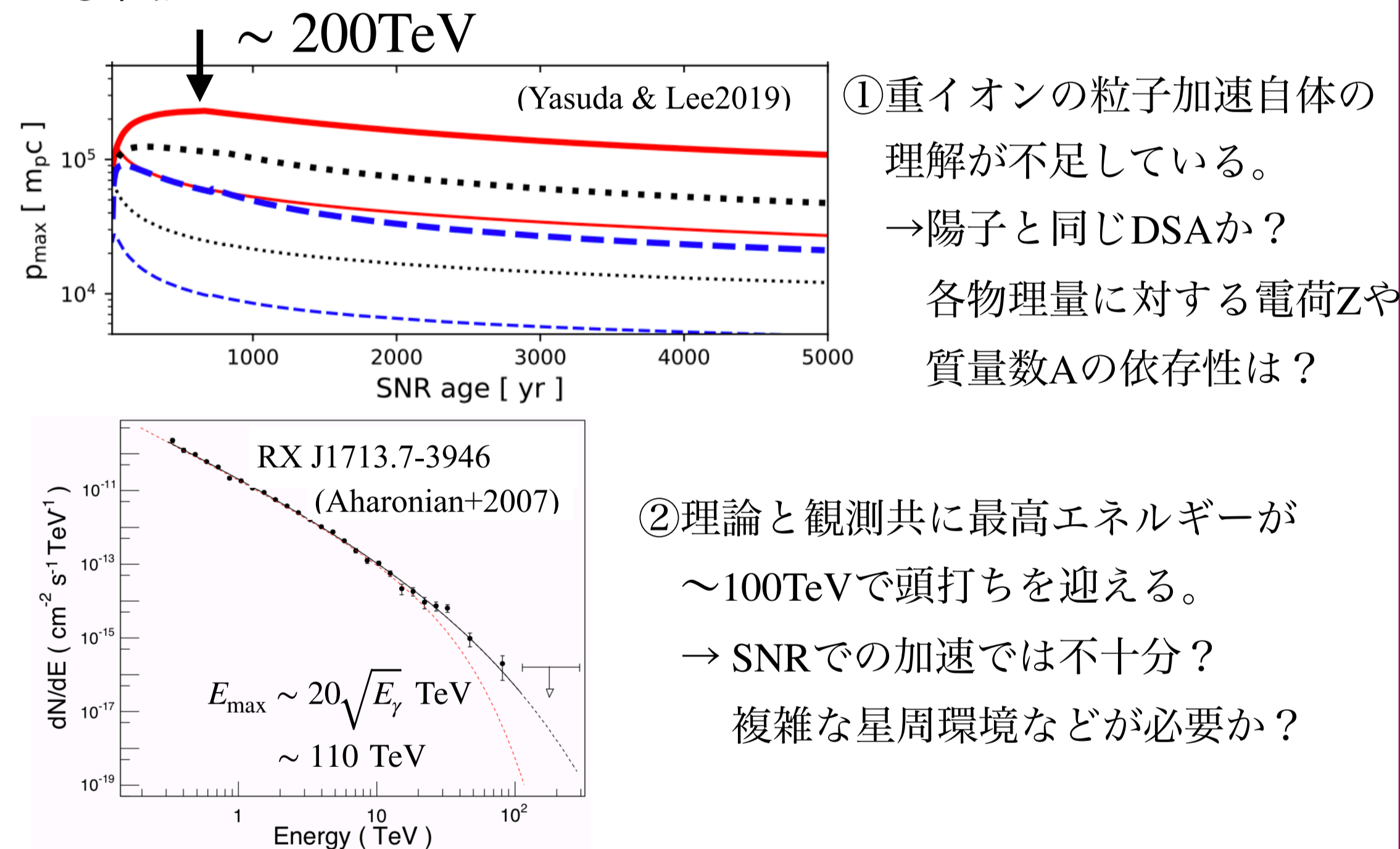


図3: 宇宙線の最高エネルギーの理論計算(上図)と、観測されたSNRからのγ線スペクトル(下図)

New candidate



OBアソシエーションと呼ばれる多数の大質量星(O型星、B型星)が局所的に存在している領域が存在。

↓
多数の恒星風や超新星爆発によって、周囲に大規模(~100 pc)なバブル状構造を形成

“スーパーバブル”

● 宇宙線加速にとって非常に重要な性質

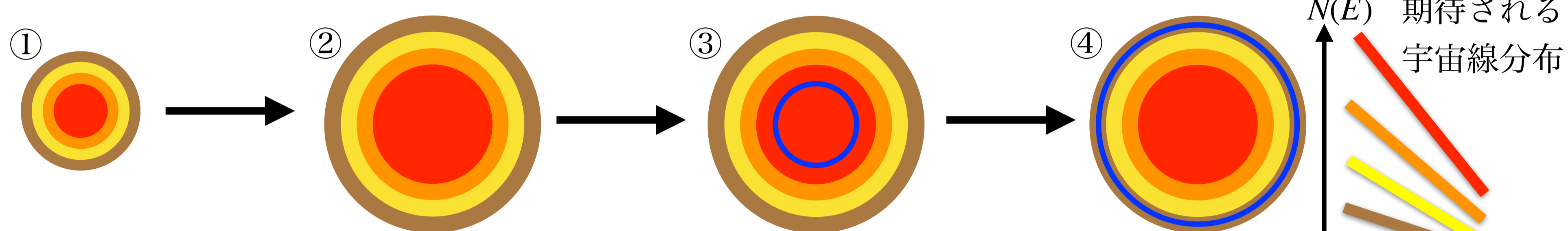
- ① 恒星風による質量放出や超新星爆発によって、スーパーバブル内部の環境は**重元素が豊富**
→ 元素毎の**ベキ指数**に影響を与える可能性?
- ② 複数の超新星爆発によって**多数の衝撃波が生成**
→ 加速の**最高エネルギー**に影響?

本研究のテーマ: **スーパーバブルによる宇宙線加速**

Method

今回は、スーパーバブルの内部構造を簡単にモデル化した状況を考える。つまり、**“超新星残骸内部で新たに超新星爆発が起きた”**時の宇宙線スペクトルを計算する。そこで、以下の4つの手順に従って計算を行うことにした。

- ① 元素分布を考慮した超新星爆発のコアを用意する。(各色は異なる元素をイメージ)
- ② 超新星コアを流体計算で約100,000年程度時間発展させ、元素分布を持つ超新星残骸を生成する。
- ③ 超新星残骸の内側に新たに衝撃波を生成する。(青線が新しい衝撃波のイメージ)
- ④ 超新星残骸内部で衝撃波の伝播を流体計算し、**同時に**宇宙線加速計算も行う。



- 本計算には、Yasuda & Lee 2019で開発された、流体と宇宙線加速の同時計算を可能にした、CR-Hydro codeを使用した。さらに本研究を遂行するにあたり、元素分布を反映した流体計算と重イオンの粒子加速も考慮出来るようにコードを新規に改良した。
- 超新星コアは、流体としてTruelove & Mckee 1999のpower-law ejecta ($M_{ej} = 11M_{\odot}$, $E_{SN} = 1.2 \times 10^{51}$ erg)を、元素分布はRauscher et al. 2002のa15s28cモデルで計算された元素分布を参考にしたモデルを使った。
- 星周環境としては、 $n_p = 1.0 \text{ cm}^{-3}$ の一様分布と Anders & Grevesse (1989) の太陽組成を用いた。
- 簡単のため、1H、4He、12C、14N、16O、20Ne、28Si、32S、56Fe、58Niの10種類のみを考えた。

Results

上記の4手順それぞれのステップにおいて、各物理量がどうなっているか示す。

- ① 超新星コアが低密度な星周空間を膨張しようとする(図5)。
- ② 100,000年膨張することで、およそ30pc規模の超新星残骸を形成された(図6)。

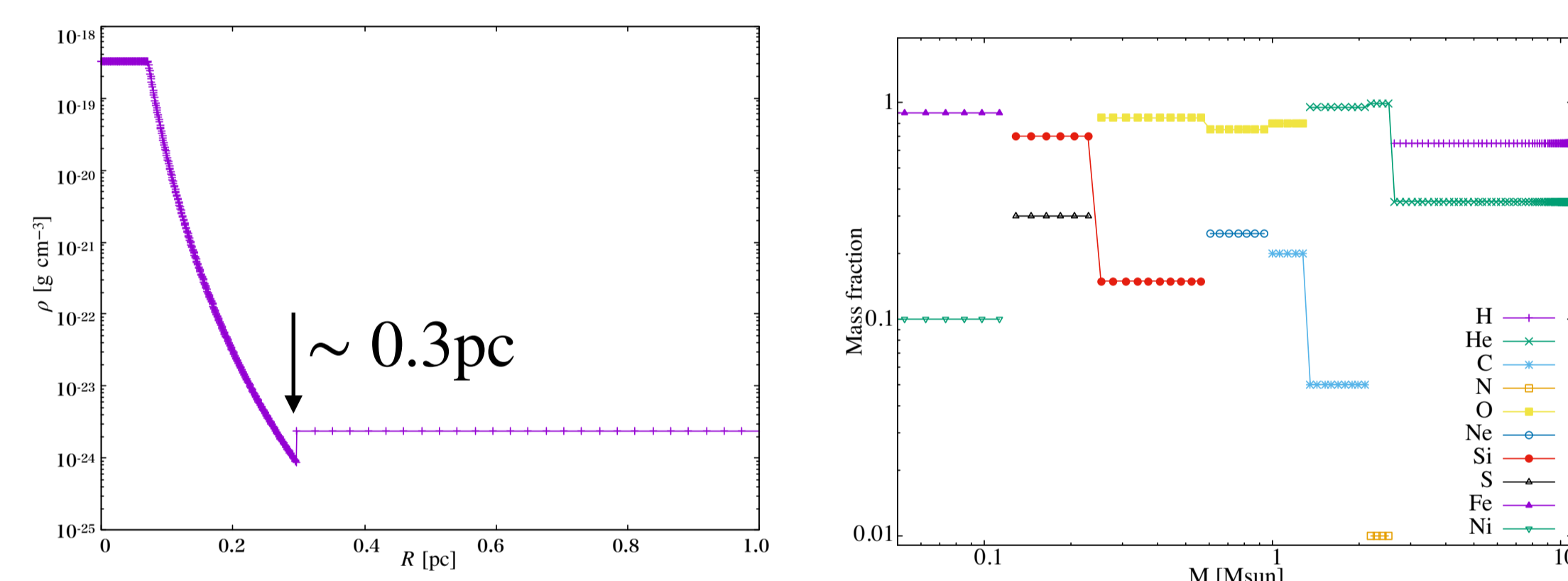


図5: 最初の超新星爆発から20年後の密度の半径分布(左図)と、初期条件として用意した元素分布(右図)。

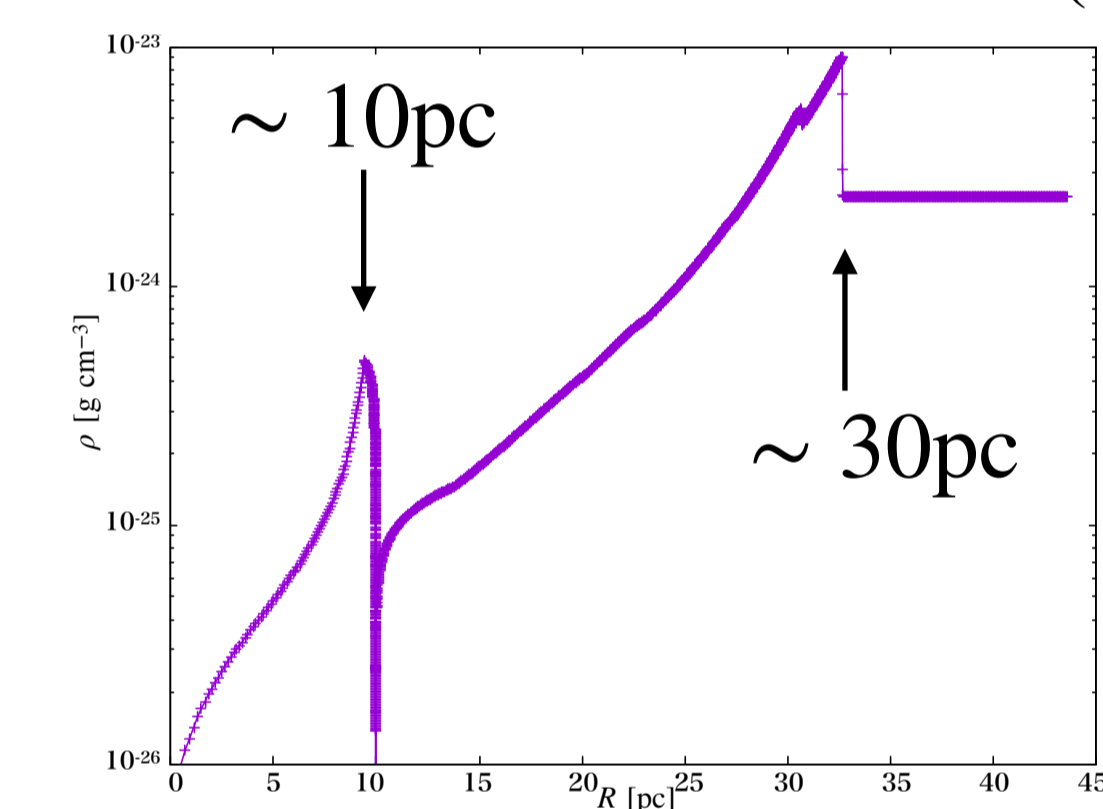


図6: 爆発から100,000年後の密度の半径分布。

- ③④ 内側から新しい衝撃波が伝播していること(図7の左)、さらにHやHe、Cが加速されておらず、他の元素が加速されていることから、衝撃波の位置毎の元素分布を反映した宇宙線加速が行われていることが分かる(図7の右)。

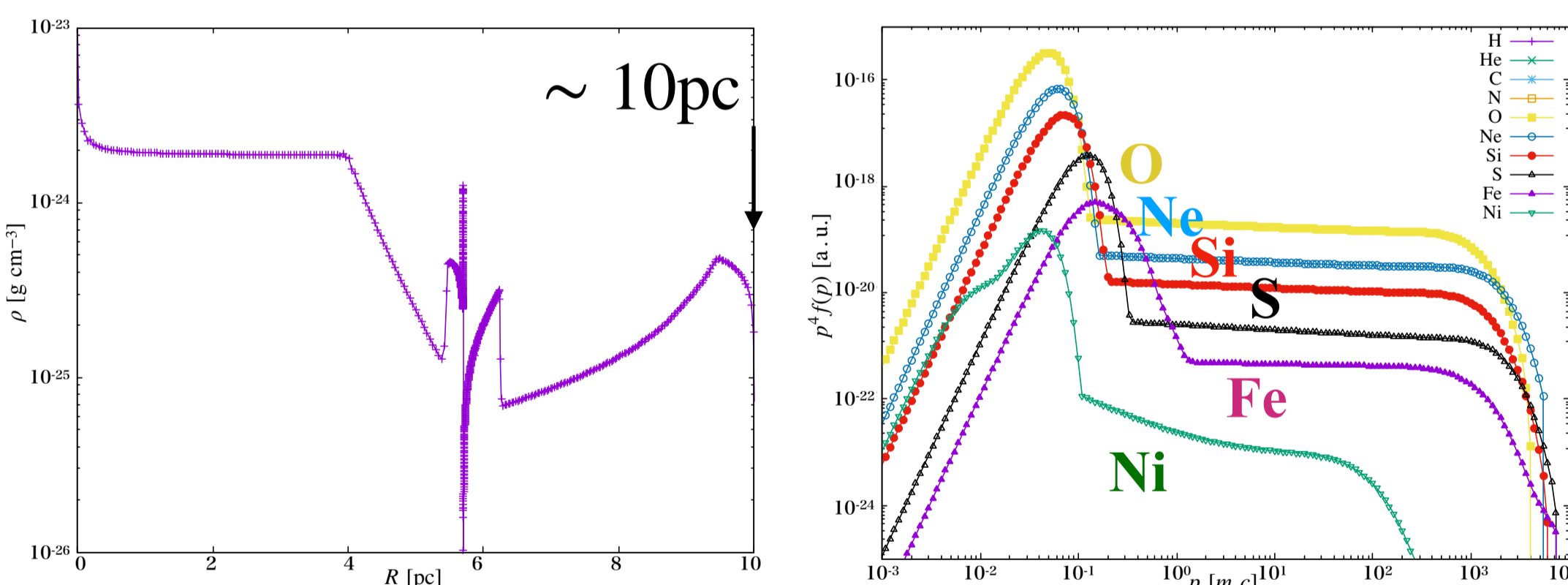


図7: 最初の超新星爆発から101,000年後の密度の半径分布(左図)と同時刻における各元素毎の宇宙線スペクトル(右図)。

Discussion

- Ni以外の元素の宇宙線スペクトルにおいては、ベキ指数に大きな違いは見られなかった。
→宇宙線スペクトルのベキ指数は、衝撃波の速度に大きく依存する。
→10,000年まで残骸が膨張したことによって、密度が薄まり衝撃波の速度が場所によらず高速だから?
→密度が濃い、つまり**衝撃波が遅い場所における元素分布の違い**が宇宙線スペクトルに影響する?
- Niのベキ指数だけ、他の元素と比べてsoftになっている。
→現時点で原因は不明。集中的に解析する予定。
- 本研究では、内側からは一度の爆発が起こる状況しか考えていなかった。
→**超新星爆発が連続して起こると**、衝撃波に何度も掃かれて**密度の濃い領域が出来やすくなる**。
→宇宙線のベキ指数の違いを説明可能な、都合の良い内部構造を形成する可能性も?

Reference

Aguilar, M., Ali Cavasonza, L., Alpat, B., et al. 2018, PRL, 121, 051103
Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., Bazer-Bachi, A. R., et al. 2007, AAP, 464, 235
Anders, E., & Grevesse, N. 1989, GCA, 53, 197
Caprioli, D., Amato, E., & Blasi, P. 2010, Astroparticle Physics, 33, 307
Caprioli, D., Blasi, P., & Amato, E. 2009, MNRAS, 396, 2065
Ohira, Y., Kawanaka, N., & Ioka, K. 2016, PRD, 93, 083001
Rauscher, T., Heger, A., Hoffman, R. D., et al. 2002, ApJ, 576, 323
Truelove, J. K., & McKee, C. F. 1999, ApJS, 120, 299
Yasuda, H., & Lee, S.-H. 2019, ApJ, 876, 27