

超高エネルギー宇宙線の起源： GRBアウトフローの原子核組成

柴田 三四郎 (甲南大学)

共同研究者： 富永 望 (甲南大学、IPMU)

目次

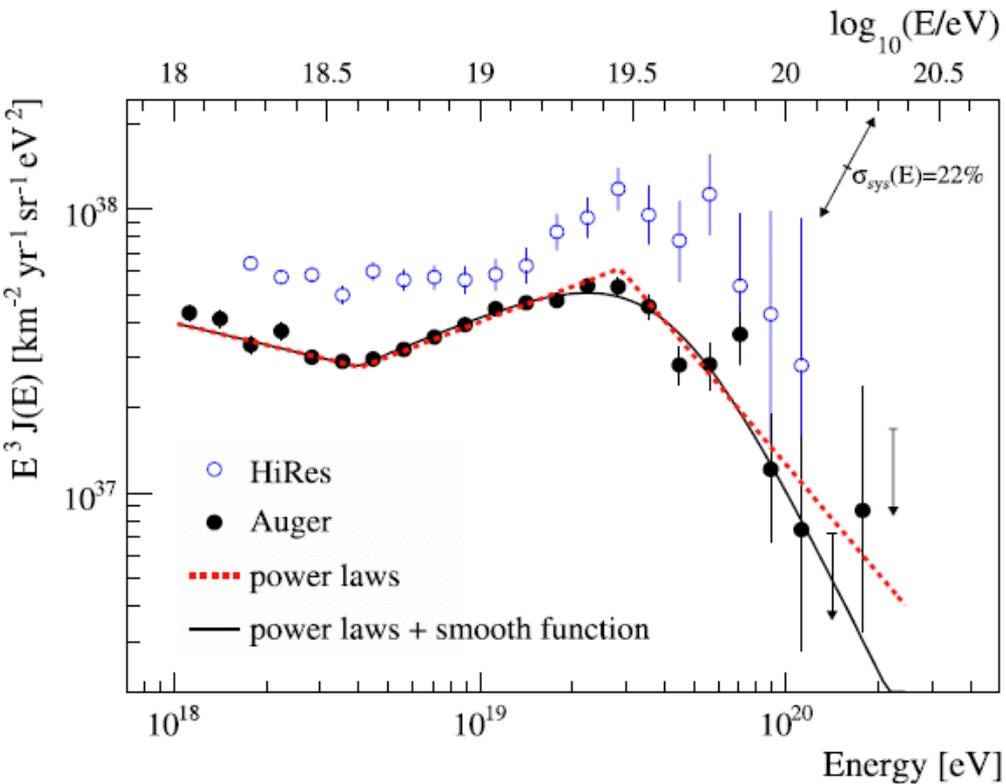
- **導入**
 - 超高エネルギー宇宙線、ガンマ線バースト
- **計算方法とモデル**
 - 計算方法、初期組成
- **結果**
 - 時間進化、平均質量数
- **議論**
- **まとめ**

導入

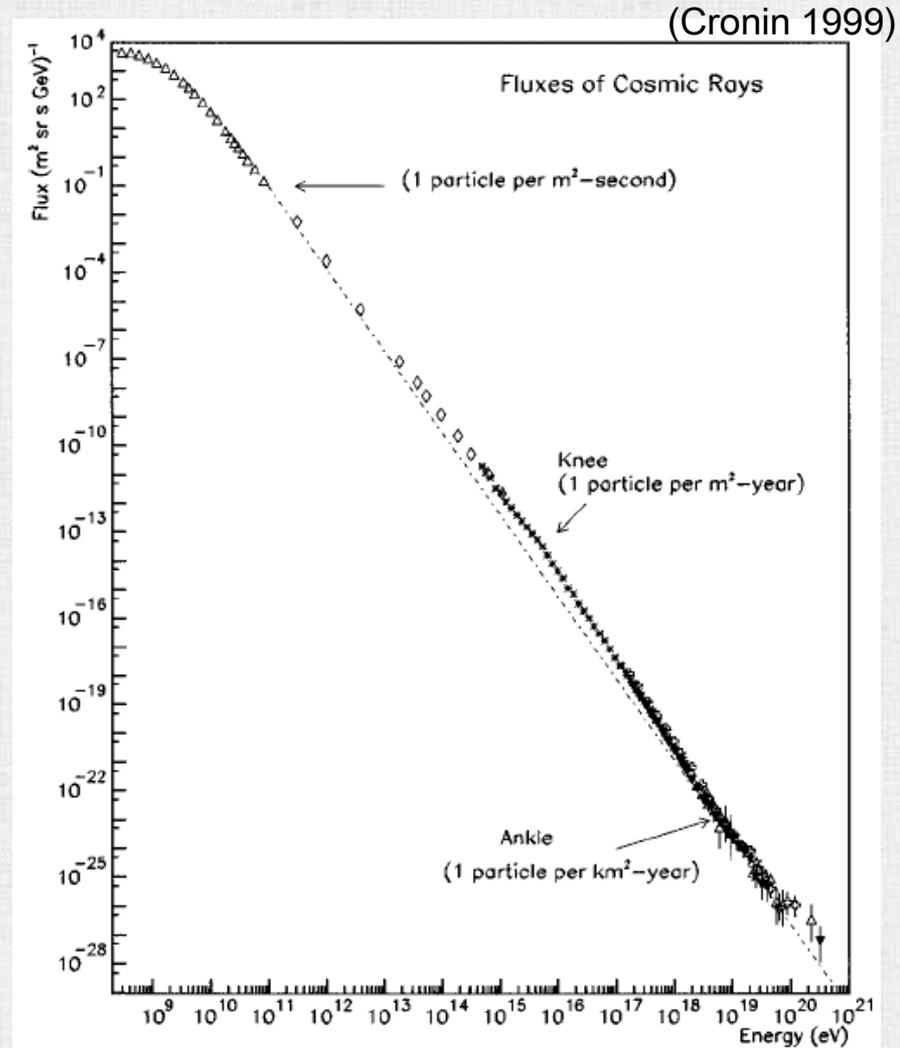
超高エネルギー宇宙線

(Ultra High Energy Cosmic Rays: UHECRs)

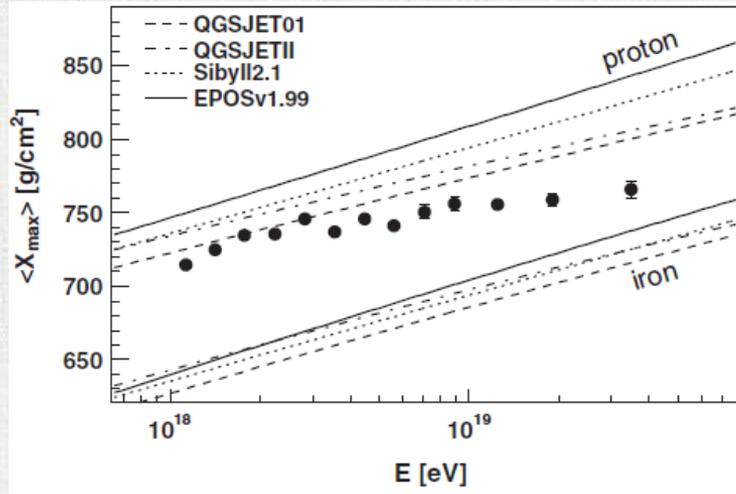
- $E \gtrsim 10^{18}$ eVの宇宙線
- 起源は分かっていない



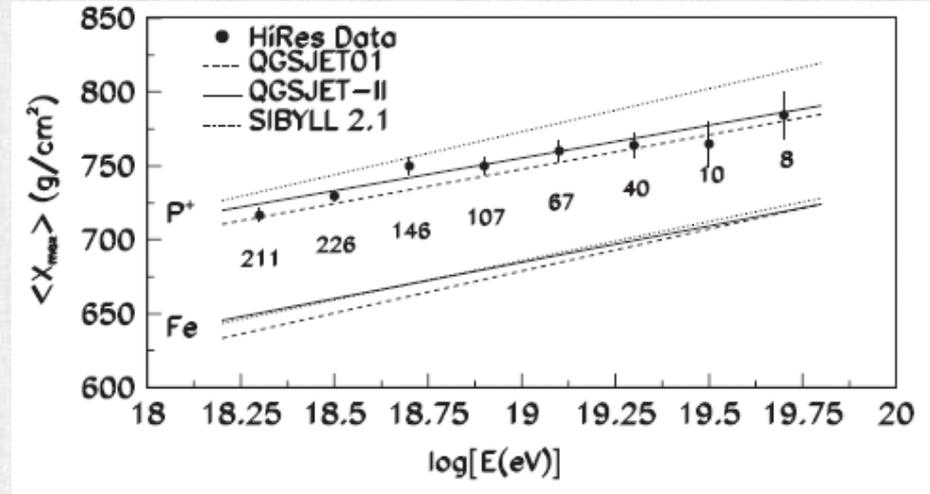
(Auger 2010)



超高エネルギー宇宙線の原子核組成



(Auger 2010)



(HiRes 2010)

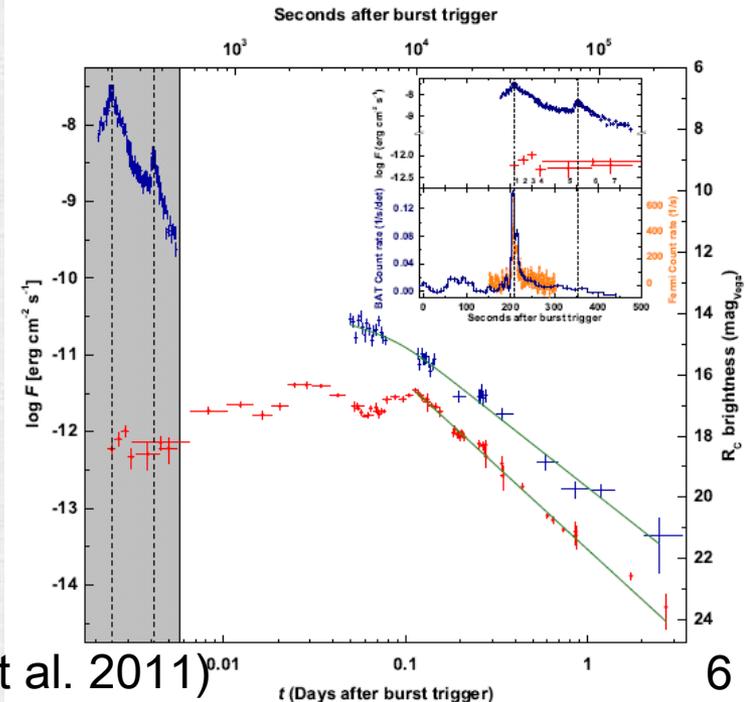
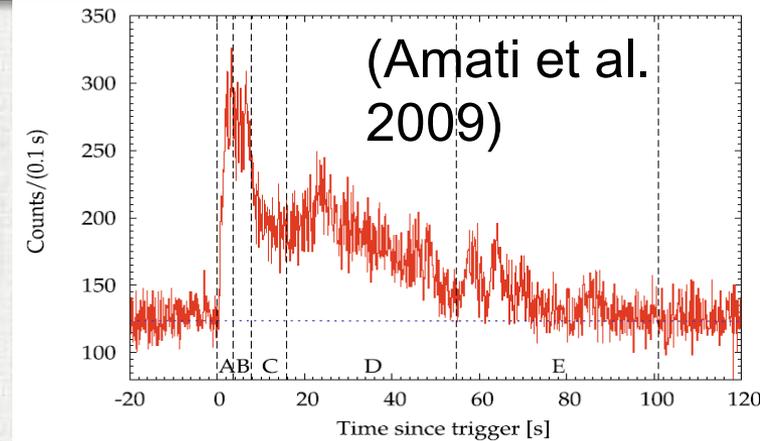
- Auger (左)の結果を再現するには…
 - 加速源において**多量の重元素**が含まれていなければならない (Hooper & Taylor 2010)

加速源の候補

- 活動銀河核 (AGN) ?
 - Metallicity は典型的には $\sim 5Z_{\text{sun}}$ ($\sim 10\%$; e.g. Nagao+06)
 - Augerの結果を再現するのは難しそう 😞
- ガンマ線バースト (GRB)s?
 - Long GRBは重力崩壊型超新星爆発と関係している
 - 金属がたくさん含まれているかも 😊

ガンマ線バースト (GRB)

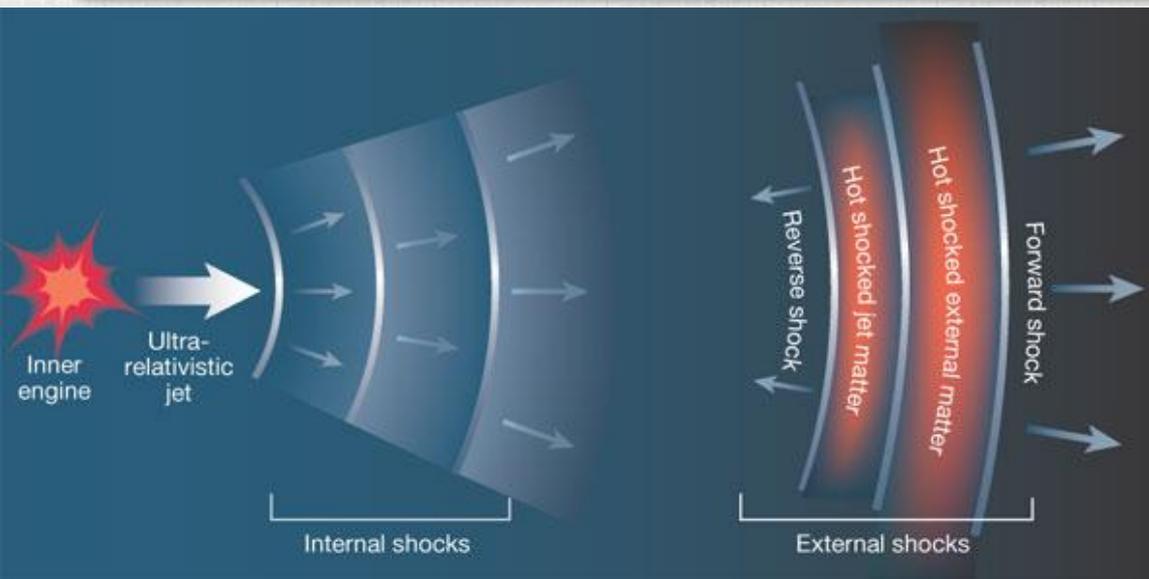
- Prompt emission
 - $10^{-3} \sim 10^3$ 秒
 - $L_{\text{iso}} \sim 10^{51-54}$ erg/s
 - 硬X線 ~ ガンマ線
- Afterglow
 - Prompt emissionの後
 - Power-law で時間進化
 - X線、可視光、電波など



GRBにおけるUHECRの加速

- 内部衝撃波 → prompt emission?
- 外部衝撃波 → afterglow

これらの衝撃波において陽子や原子核をUHEにまで加速できる (e.g., Waxman 95, Vietri 95, Wang et al. 08, Murase et al. 08)



ただしPrompt emissionの放射メカニズムはまだよく分かっていない

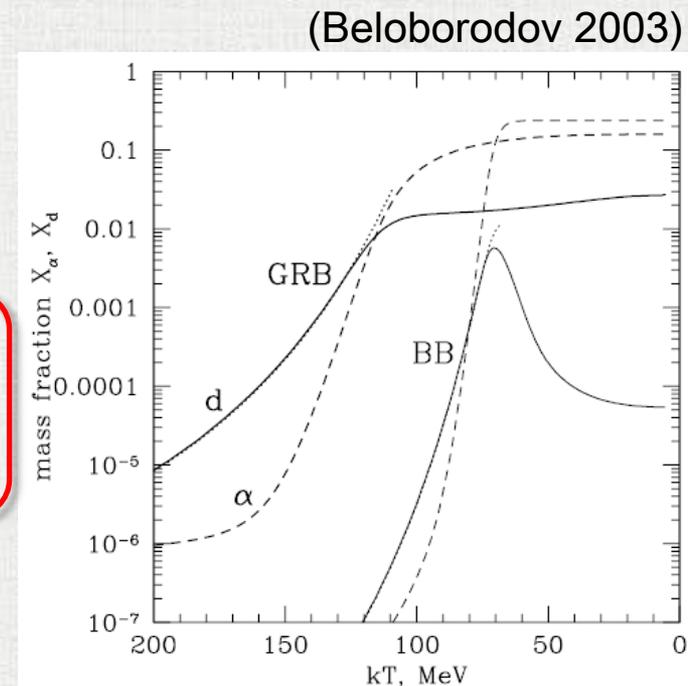
e.g.,

- 磁場モデル (Zhang & Yang, 2010, etc...)
- 光球モデル (Beloborodov 2010, etc...)

GRBジェットの原子核組成

- Lemoine 02, Pruet+02, Beloborodov 03
 - GRBジェットでの元素合成
 - 最初、陽子と中性子のみから計算
 - 軽元素(d, He, etc..)が出来る。
 - 重元素は出来ない。

最初は本当に陽子と中性子のみ？
重元素が含まれていたらどうなる？



計算方法とモデル

計算方法

- GRBアウトフローを定常、球対称として計算
- 磁場、磁場の散逸を(手で)入れる (重力は無視)

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho \Gamma v) = 0,$$

質量保存

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \left\{ (w + b^2) \Gamma^2 v^2 + \frac{b^2}{2} \right\} \right] + \frac{\partial p}{\partial r} = 0,$$

運動量保存

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 (w + b^2) \Gamma^2 v) = 0,$$

エネルギー保存

$$\frac{\partial}{\partial r} (r b \Gamma v) = -\frac{r \Gamma b}{\tau_{\text{dis}}},$$

磁場の発展方程式

$$\tau_{\text{dis}} = \frac{2\pi \Gamma^2}{\epsilon \Omega} \sqrt{1 + u_A^{-2}},$$

磁場の散逸の時間スケール

$$p = \frac{e_{\text{int}}}{3} = \frac{a T^4}{3} \left(1 + \frac{7}{4} \frac{T_9^2}{T_9^2 + 5.3} \right)$$

状態方程式

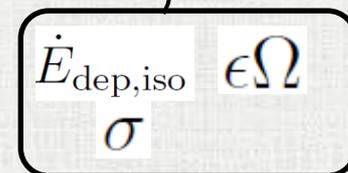
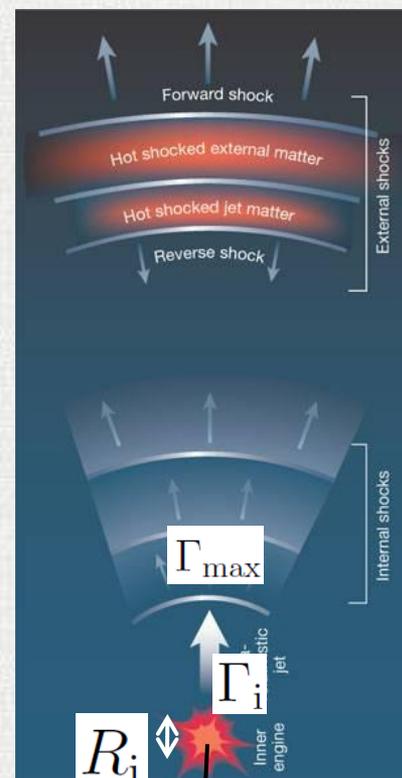
モデルパラメーター

- モデルパラメーター
 - エネルギー注入率: $\dot{E}_{\text{dep,iso}}$
 - ジェットの初期半径: R_i
 - 初期のローレンツ因子: Γ_i
 - 最大ローレンツ因子: Γ_{max}
 - 中心天体の角振動数: $\epsilon\Omega$
 - 磁場のパラメータ: $\sigma \equiv b^2/w$

→ 密度、温度の時間進化

→ 原子核反応計算

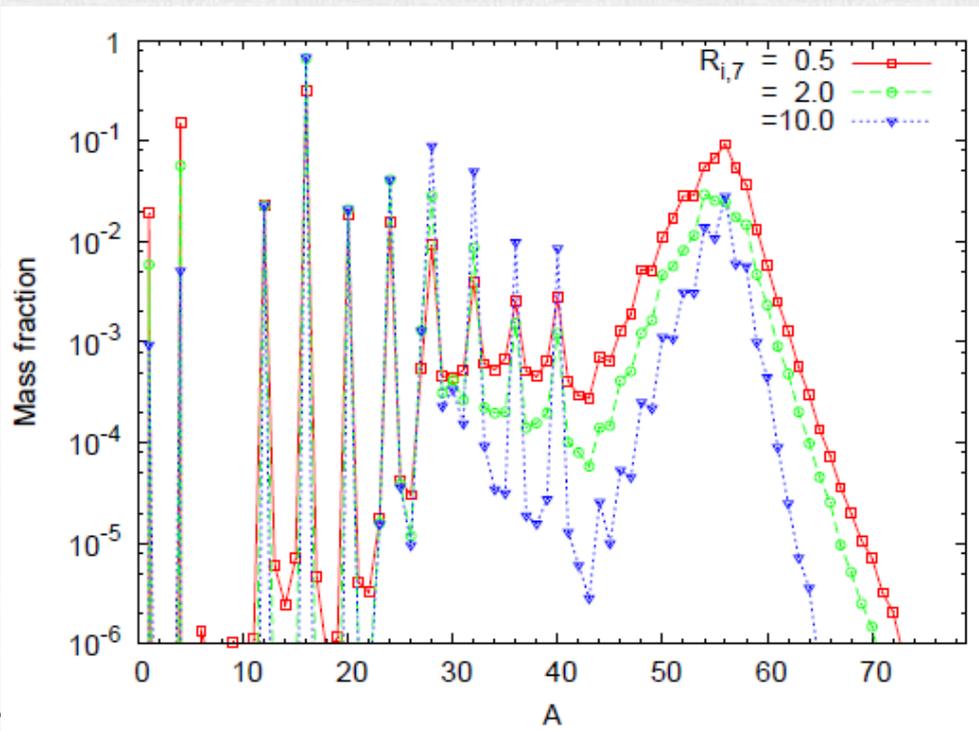
(from Piran 2003)



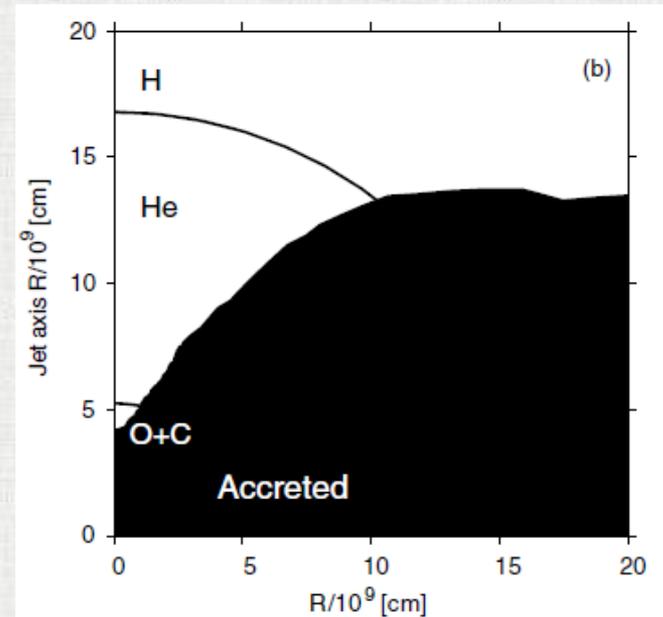
初期組成

- ジェット状爆発で降着した物質
- 爆発のパラメーターは

$$\dot{E}_{\text{dep}} = 1.5 \times 10^{51} \text{ [erg/s]} \quad \theta_{\text{jet}} = 15^\circ$$



(Tominaga 2009)

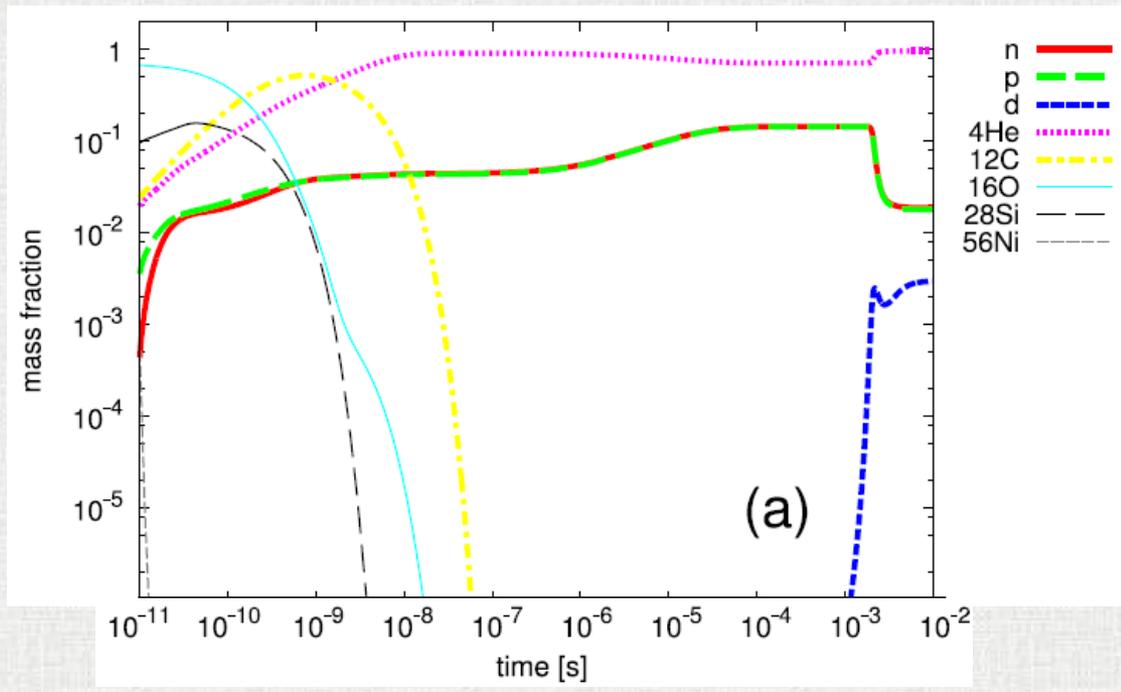


結果

原子核組成の時間進化

- $\dot{E}_{\text{dep,iso}} = 10^{53} \text{ erg/s}$ $\Gamma_i = 1.22$ $\epsilon\Omega = 10^3 \text{ /s}$, $\Gamma_{\text{max}} = 100$

- $R_i = 5 \times 10^7 \text{ cm}$ $\sigma = 0$, (磁場なし)

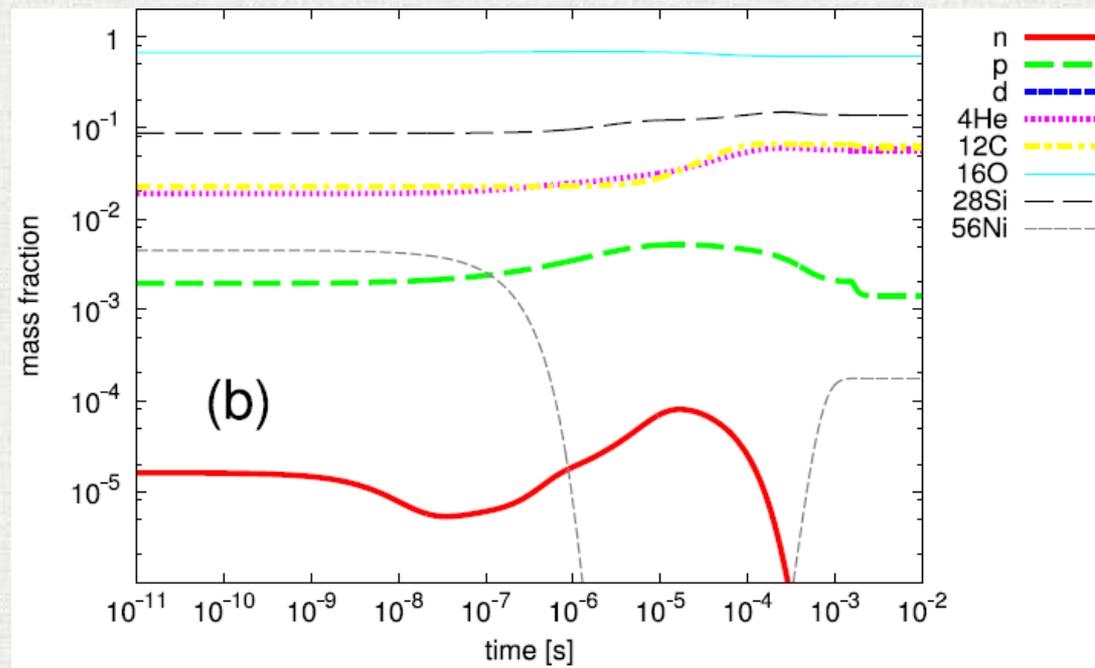


- 重元素は壊れる、軽元素のみ残る。

原子核組成の時間進化

- $\dot{E}_{\text{dep,iso}} = 10^{53}$ erg/s $\Gamma_i = 1.22$ $\epsilon\Omega = 10^3$ /s , $\Gamma_{\text{max}} = 100$,

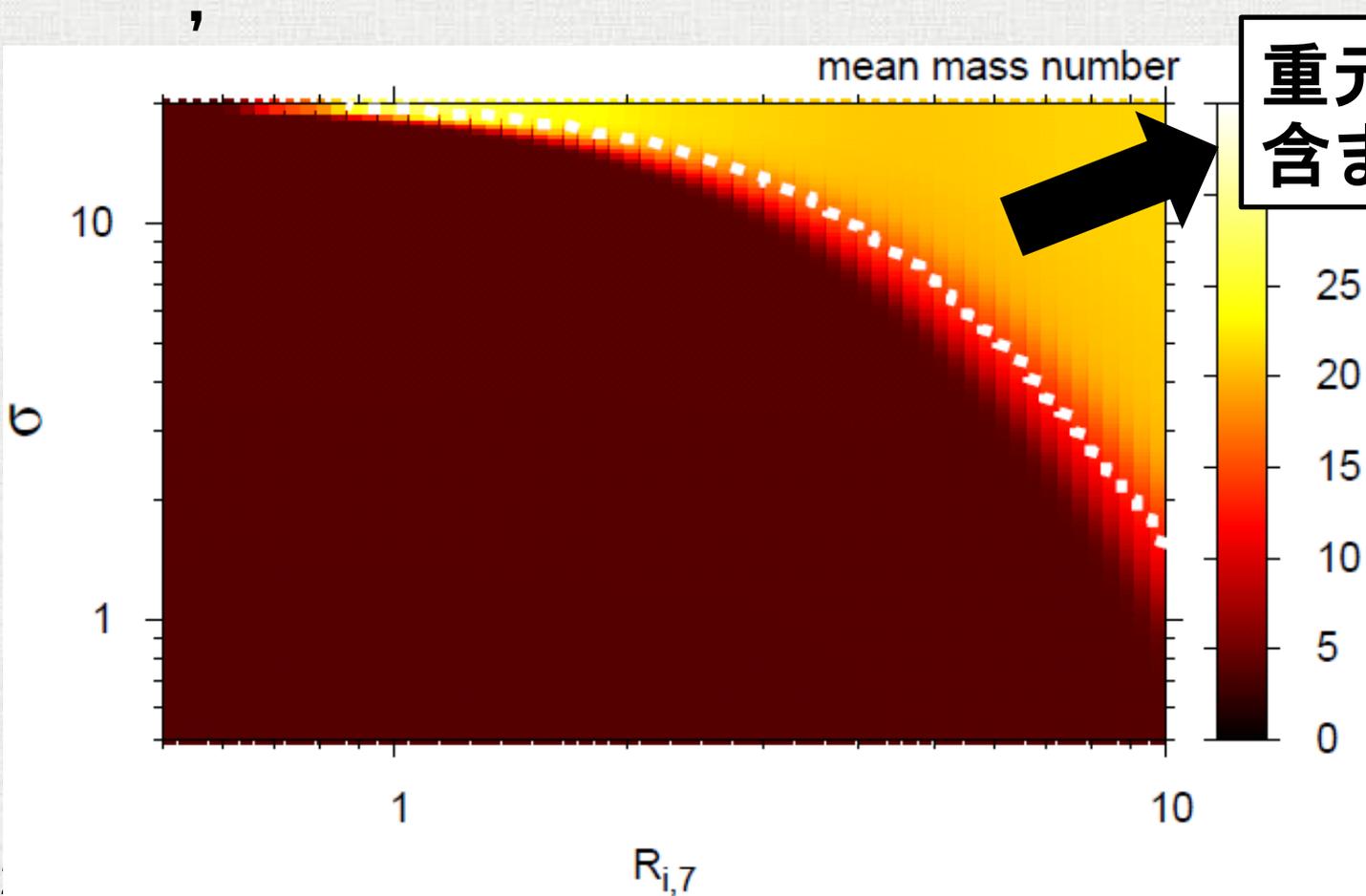
$R_i = 5 \times 10^7$ cm $\sigma = 10$ (磁場有り)



- 初期組成が残る

平均質量数

$$\dot{E}_{\text{dep,iso}} = 10^{53} \text{ erg/s} \quad \Gamma_i = 1.22, \quad \epsilon\Omega = 10^3 \text{ /s}, \quad \Gamma_{\text{max}} = 100$$



重元素が多量に
含まれる！

まとめ

まとめ

- GRBジェットが最初、多量の重元素を含んでいたと仮定し、最終的なジェット中の原子核組成を求めた。
- 標準的なファイアボールモデルにおいては、重元素は残らず、軽元素のみしか残らない。
- しかし、ジェットが磁場で加速される様な場合には重元素は残り得る。
→ Augerの結果を再現できるかも