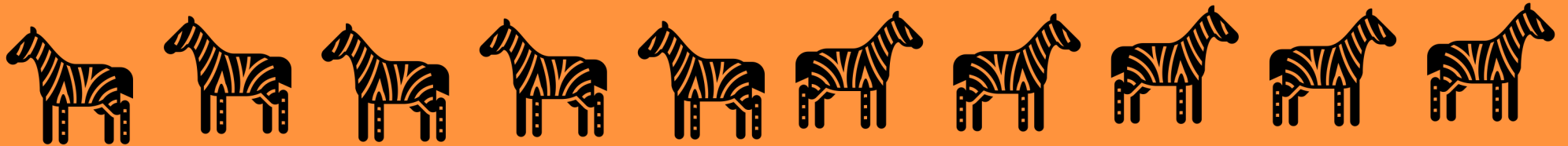


電子陽子ヘリウムプラズマ中を伝播 する相対論的衝撃波での粒子加速と ニュートリノ放射



富田 沙羅 (東北大学)

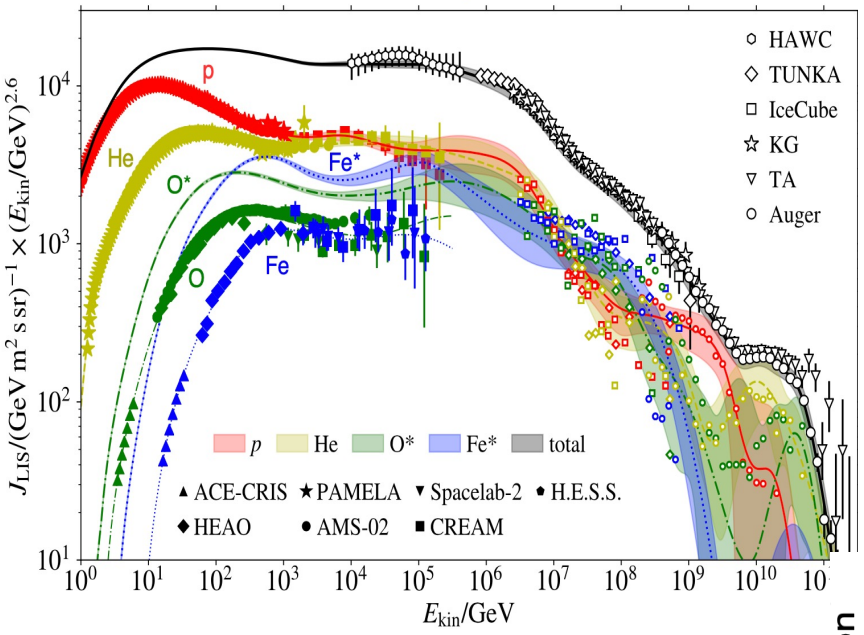


共同研究者：大平豊(東大), 木村成生(東北大)

天文学会秋季年会, 2023年9月20-22日, 名古屋大学

超高エネルギー宇宙線の組成

化学組成ごとの宇宙線エネルギースペクトル

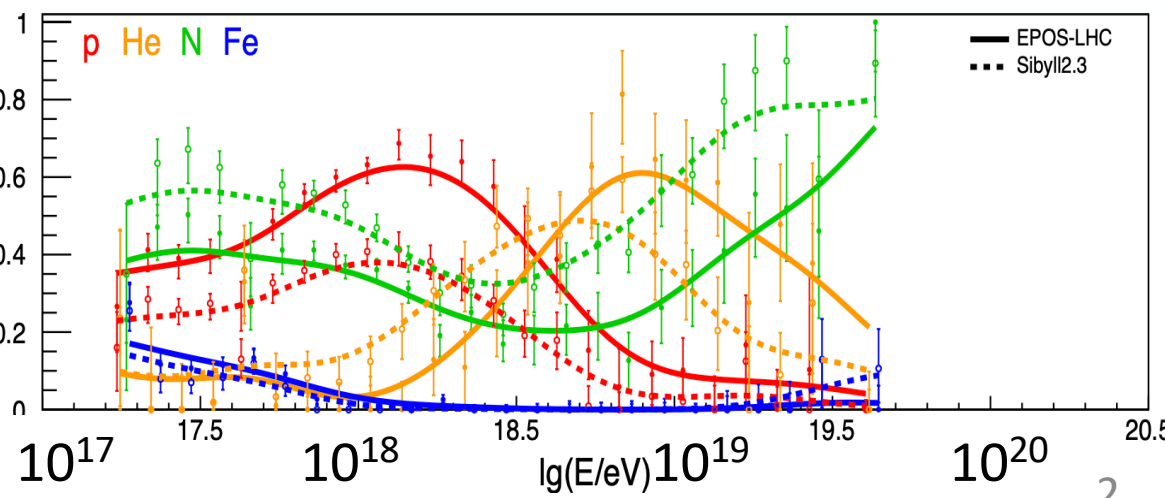
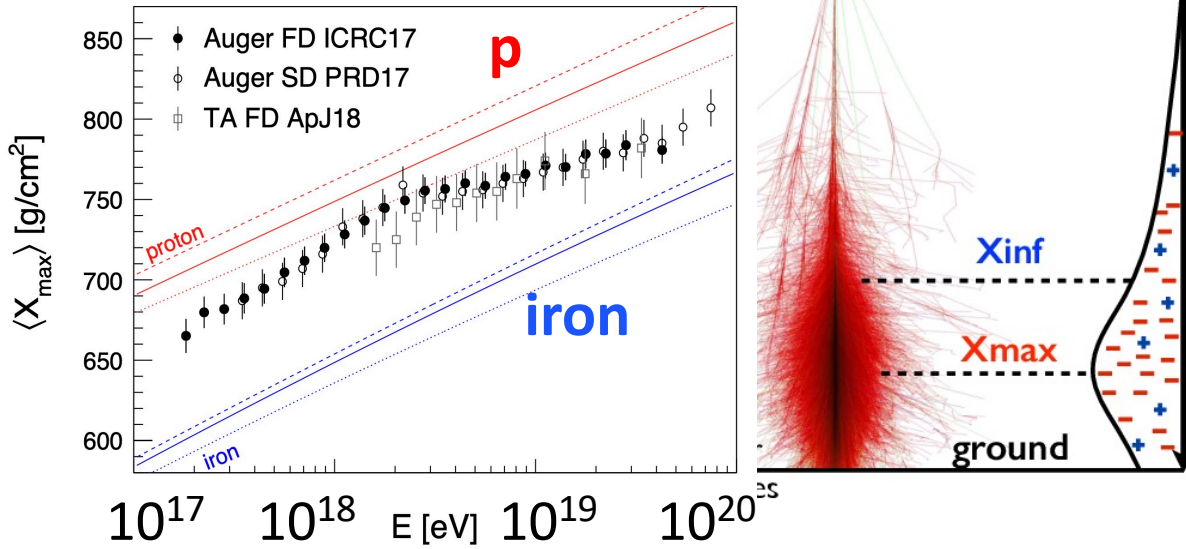


Hans Dembinski et al., UHECR 2018

E > 10^{18.5} eVでは、 $m_{Fe} > m > m_p$ の重元素宇宙線が支配的。理論的解釈はできていない。天体での宇宙線スペクトルの理論予言ができていないから。

Batista et al. 2019

X_{max} 分布



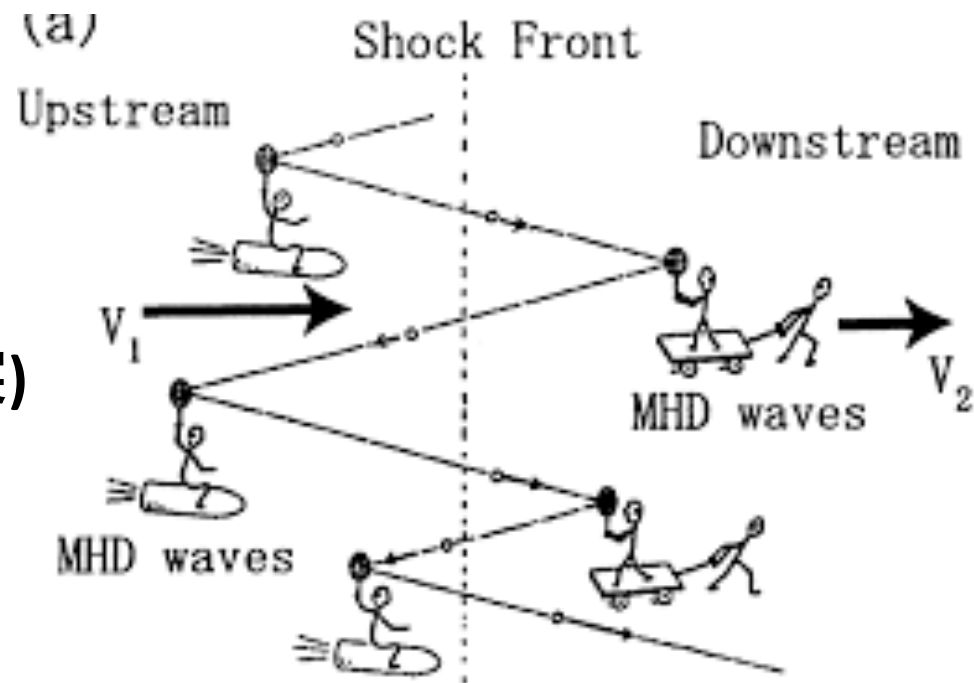
粒子加速機構

衝撃波統計加速機構(DSA機構)

$dN/dE \propto E^{-s}$ $s=2.2$ in 起源天体
(相対論的衝撃波の場合)

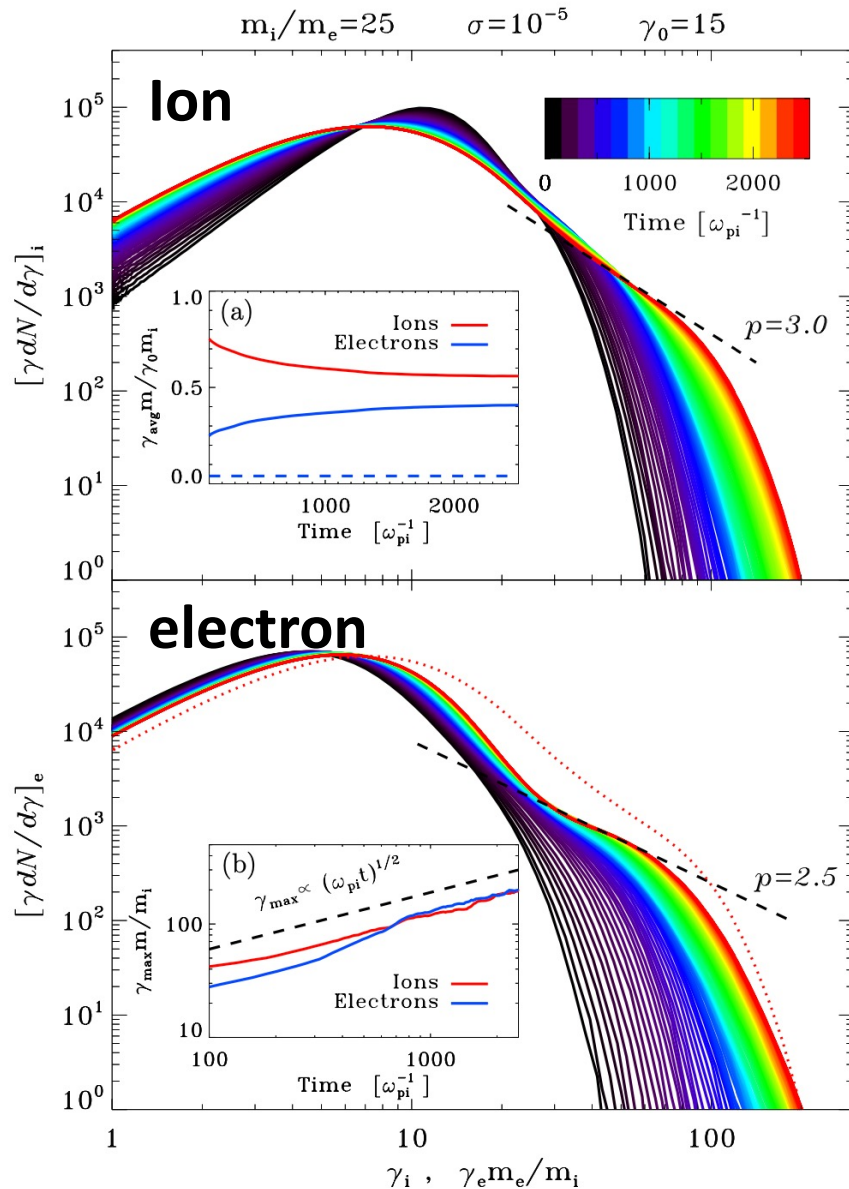
仮定:

- 無衝突衝撃波 (×2体クーロン衝突)
- 拡散的運動する粒子は
衝撃波面を自由に行き来できる。



宇宙線の衝撃波統計加速への注入機構が未解明

電子陽子プラズマ中を伝播する相対論的衝撃波の PICシミュレーション



粒子のエネルギースペクトル Sironi et al. 2013

電子と陽子は衝撃波統計加速で加速される。

加速効率 a few % . →なぜ？

✓ ヘリウムの加速効率？

✓ プロトンの加速効率にヘリウムの組成比は影響する？

Our Simulation Setting

電子陽子ヘリウムプラズマ中を伝播する相対論的無衝突衝撃波の2D PICシミュレーション

- Two-dimensional electromagnetic PIC code
- Box size: $L_x = 3400 c/\omega_{pp}$, $L_y = 128 c/\omega_{pp}$
 $(\Delta x = \Delta y = 0.1 c/\omega_{pe}, \Delta t = 0.1 \omega_{pe}^{-1})$
- $m_{e^-} : m_p : m_{He} = 1:25:100$
- $q_{e^-} : q_p : q_{He} = -1:1:2$
- $n_{e^-} : n_p : n_{He} = 1.2:1:0.1 / 21:1:10$
- 30 個/cell, 全粒子数~65億個

多数粒子の運動方程式

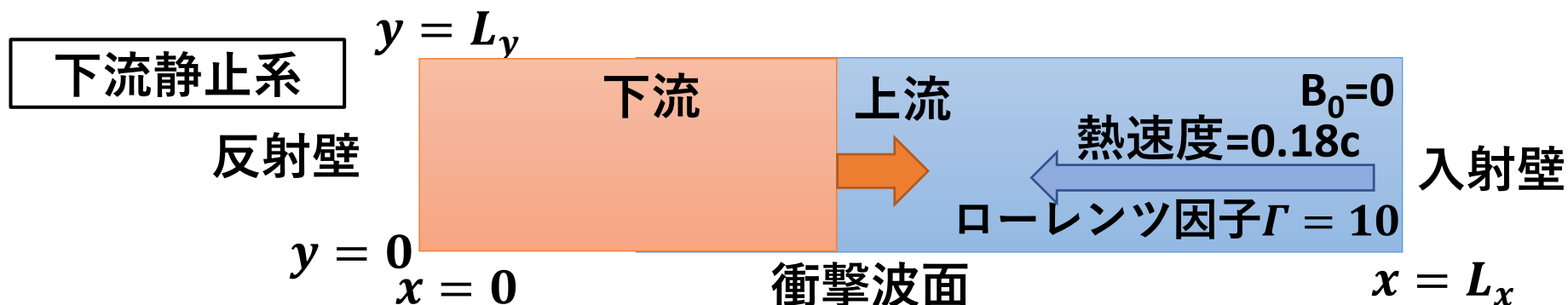
$$\frac{du_s}{dt} = \frac{q_s}{m_s} \left(E + \frac{u_s}{c\gamma_s} \times B \right),$$

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{u_s}{\gamma_s}$$

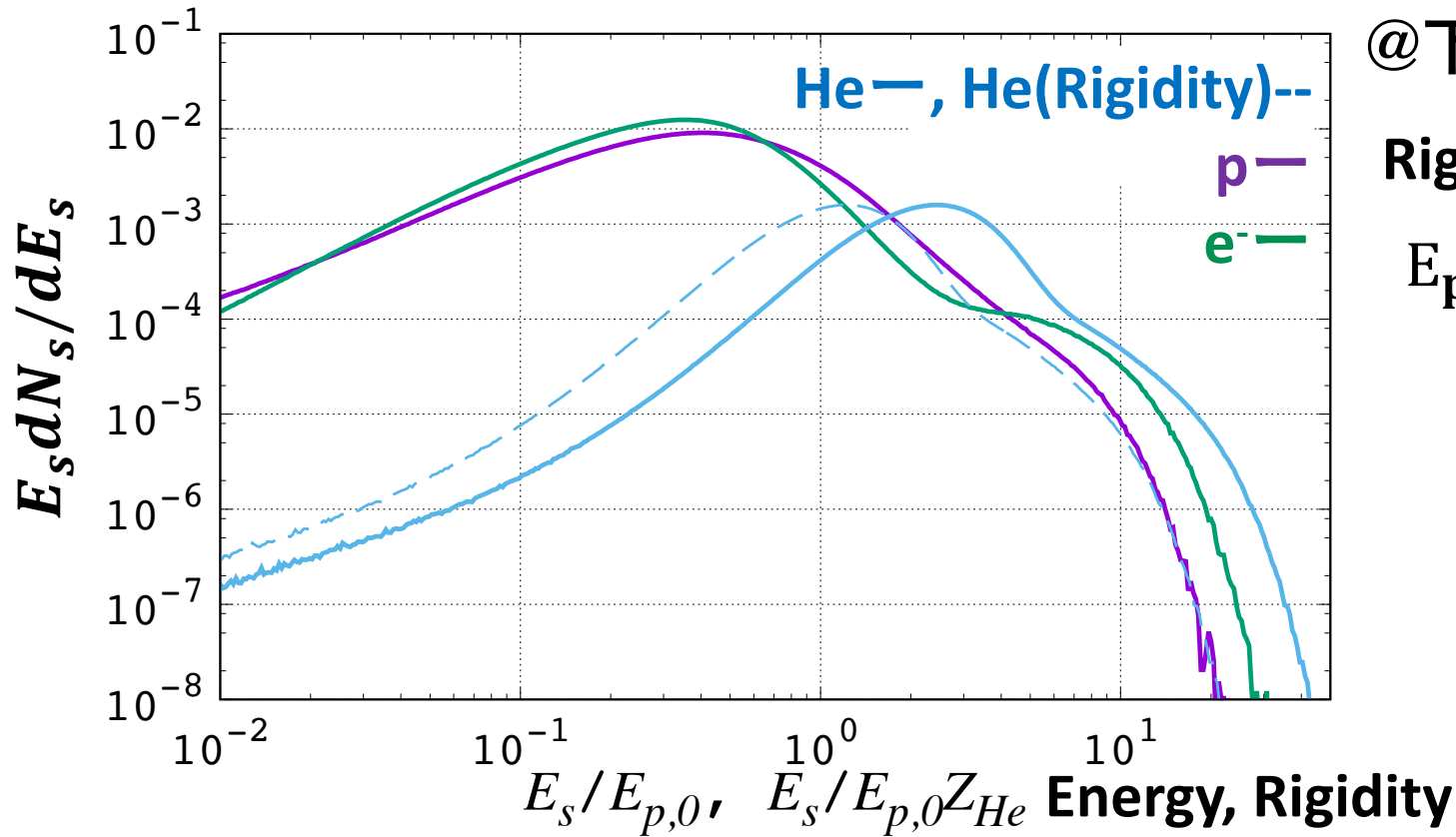
Maxwell方程式

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \times B - \frac{4\pi}{c} j,$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E$$



p:He=1:0.1の時の粒子のEnergy/Rigidityスペクトル



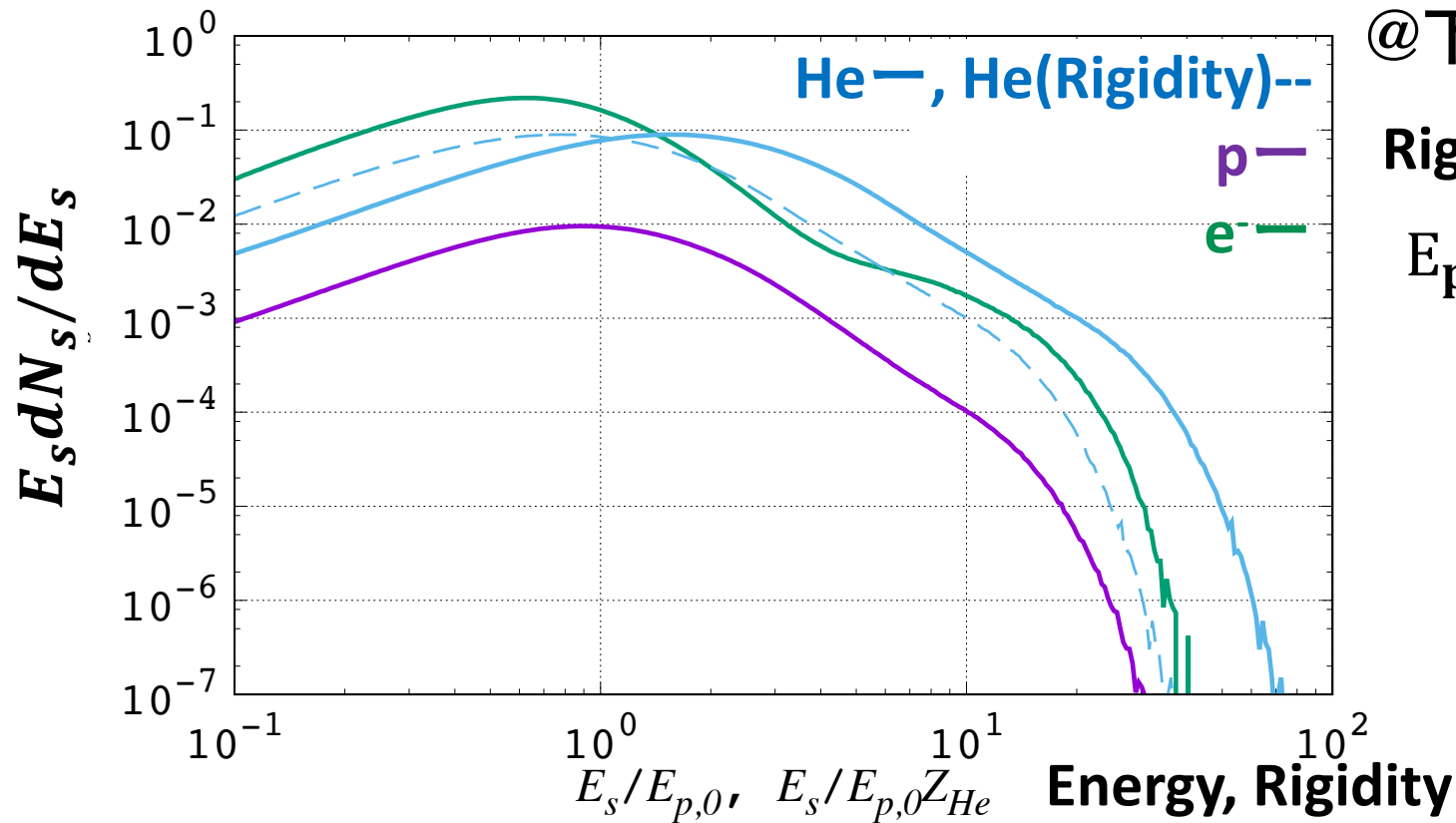
@下流 $x-x_{sh} = 200c/\omega_{pp}$

$$\text{Rigidity} = \frac{p_s c}{Ze}$$

$E_{p,0}$:陽子の
上流運動
エネルギー

- e^- , p はエネルギー等分配、熱的+非熱的分布。
- Heは低エネルギー成分がなく熱化してないが非熱的分布はある。
- p , Heの注入率は $\sim 1, 0.2$ 。ベキ指数 $s \sim 2.5$ 。
- 最高エネルギー宇宙線を作るにはソフト。

p:He=1:10の時の粒子のEnergy/Rigidityスペクトル



@下流 $x-x_{sh} = 200c/\omega_{pp}$

$$\text{Rigidity} = \frac{p_s c}{Ze}$$

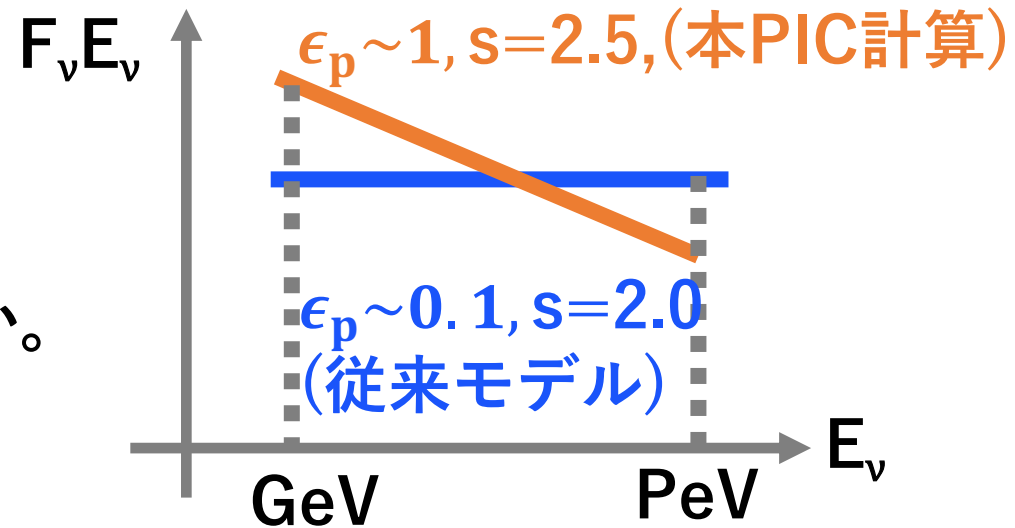
$E_{p,0}$:陽子の
上流運動
エネルギー

- e^- , pはエネルギー等分配、熱的+非熱的分布。
- Heの平均エネルギーは e^- , pより約2倍高い。熱的+非熱的分布。
- p, Heの注入率は共に ~ 1 。ベキ指数 $s \sim 2.5$ 。
- 最高エネルギー宇宙線を作るにはソフト。

ニュートリノ放射への影響

- 太陽組成比の電子陽子ヘリウムプラズマ中を伝播する相対論的無衝突衝撃波では、 $\epsilon_p \sim 1$, ベキ指数 $s=2.5$.

GeV-TeVニュートリノが増える。
→突発的ニュートリノ放射を
IceCube-upgradeで検出できるか。

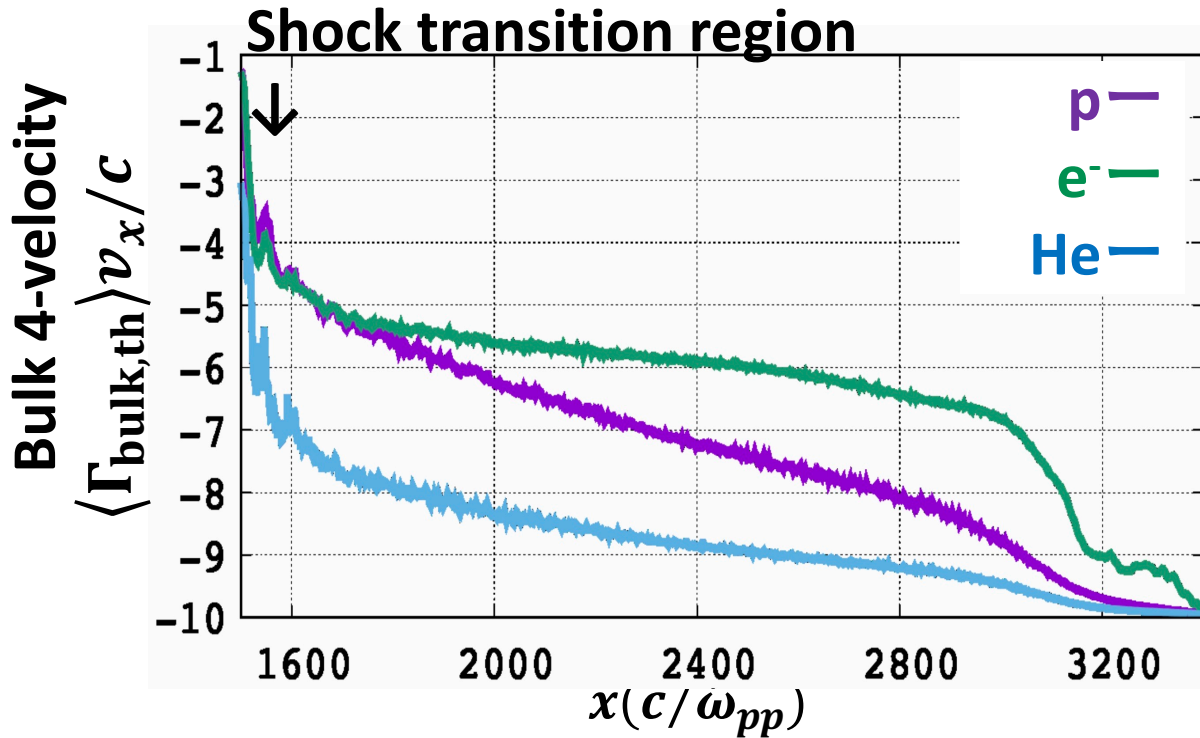


- Heの組成比が大きい環境ではpとHeの注入率 ~ 1 。 $\epsilon_p \sim 1$ 。
GRB chokedジェットやWolf-Rayet星でも、GeV-TeVニュートリノで
明るくなるか。

まとめ

- 衝撃波統計加速機構への注入機構が不明。起源天体での宇宙線(元素ごとの)のスペクトルがわからない。
- ヘリウムなど重元素の注入率や陽子加速への影響は調べられてこなかった。
- 太陽組成比の電子陽子ヘリウムプラズマ中を伝播する相対論的無衝突衝撃波では、**pとHeの注入率 $\sim 1, 0.2$, 冪指数 $s=2.5$.**
注入率の理論的説明も可能。 Tomita et al. in prep.
- Heの組成比が大きい環境で**pとHeの注入率 ~ 1 , 冪指数 2.5**
- 従来予言 **$s=2.0, \epsilon_p \sim 0.1$** よりも低エネルギー陽子のp-p衝突によるGeV- TeVニュートリノ放射光度が高くなる。

One-Dimensional Structure of the Upstream Bulk 4-Velocity



電子は磁場揺らぎによって減速を受ける。
陽子は静電場によって減速を受ける

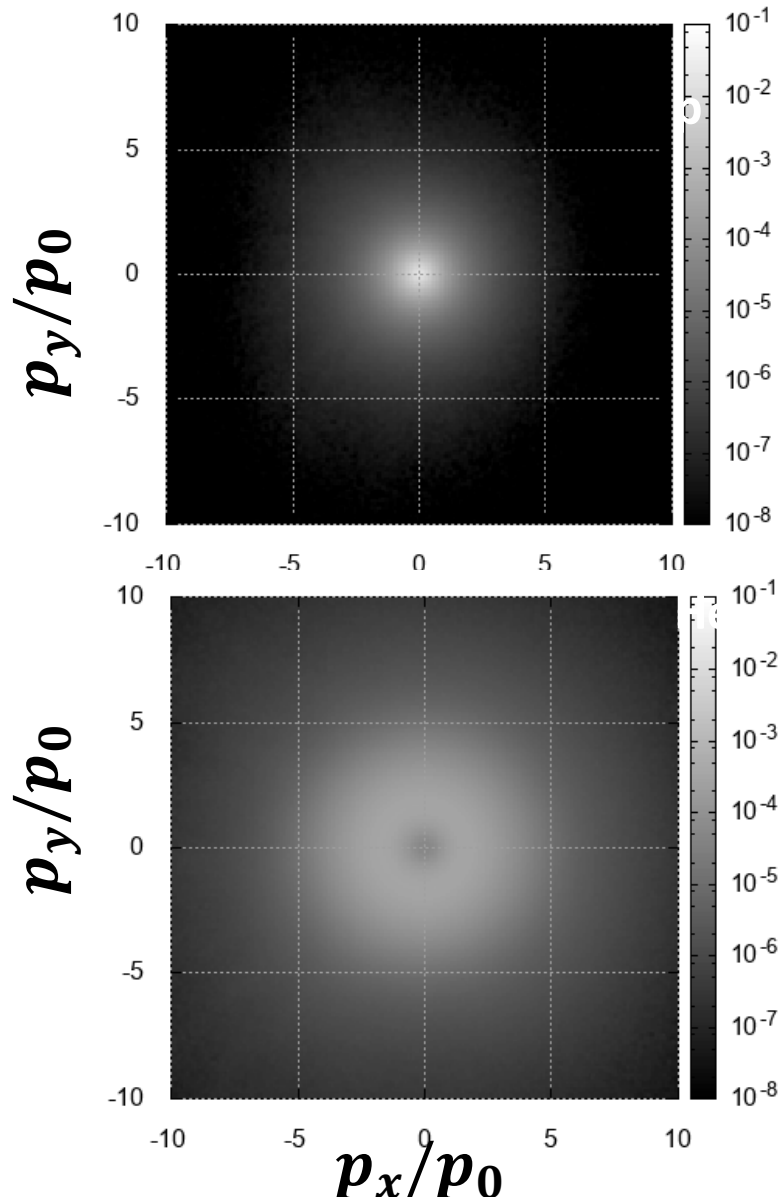
Heは陽子ほど減速していない。 $q_{\text{He}}/m_{\text{He}}$ が小さいから。

$e\Delta\phi = 0.5 \Gamma m_p c^2$ より、衝撃波面直前で、

$$\langle E_{\text{He}} \rangle \sim \Gamma m_{\text{He}} c^2 + Z_{\text{He}} e\Delta\phi \sim 0.75 \Gamma m_{\text{He}} c^2$$

$$\langle E_p \rangle \sim \Gamma m_p c^2 + e\Delta\phi \sim 0.5 \Gamma m_p c^2$$

p & Heの下流での運動量空間分布



$$N(p_x/p_0, p_y/p_0)$$

下流 $x-x_{sh} = 200c/\omega_{pp}$

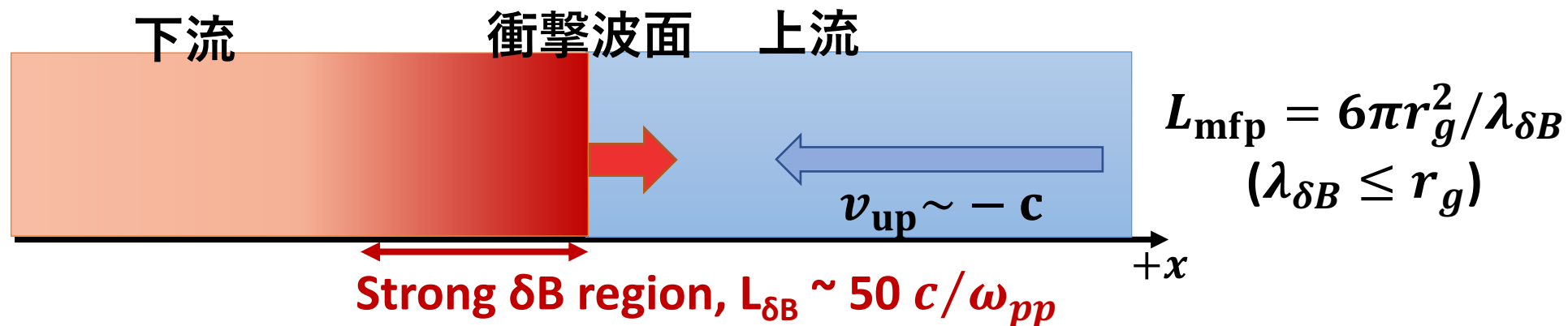
$$p_0 = \Gamma m_p v$$

:上流陽子のバルク運動量

紫楕円：バルク成分

- 下流陽子は十分熱化している。
- 下流Heはリング分布!
→Heは十分熱化していない!

陽子とヘリウムの注入機構



DSA機構への注入 = 下流から上流への染み出し

- 陽子は強磁場領域で十分散乱され、全粒子が上流に染み出す。
- ヘリウムの注入条件(in下流静止系):

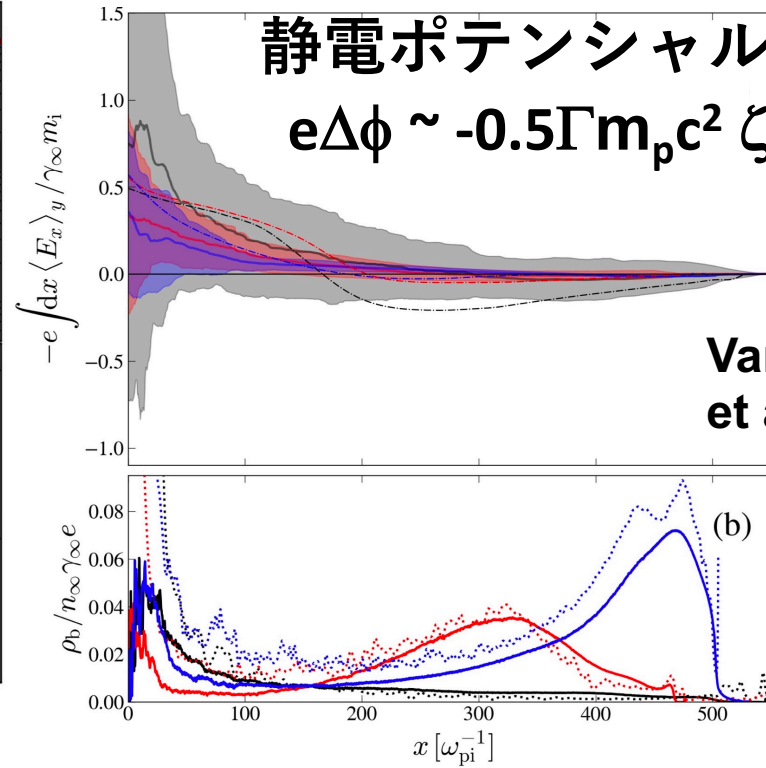
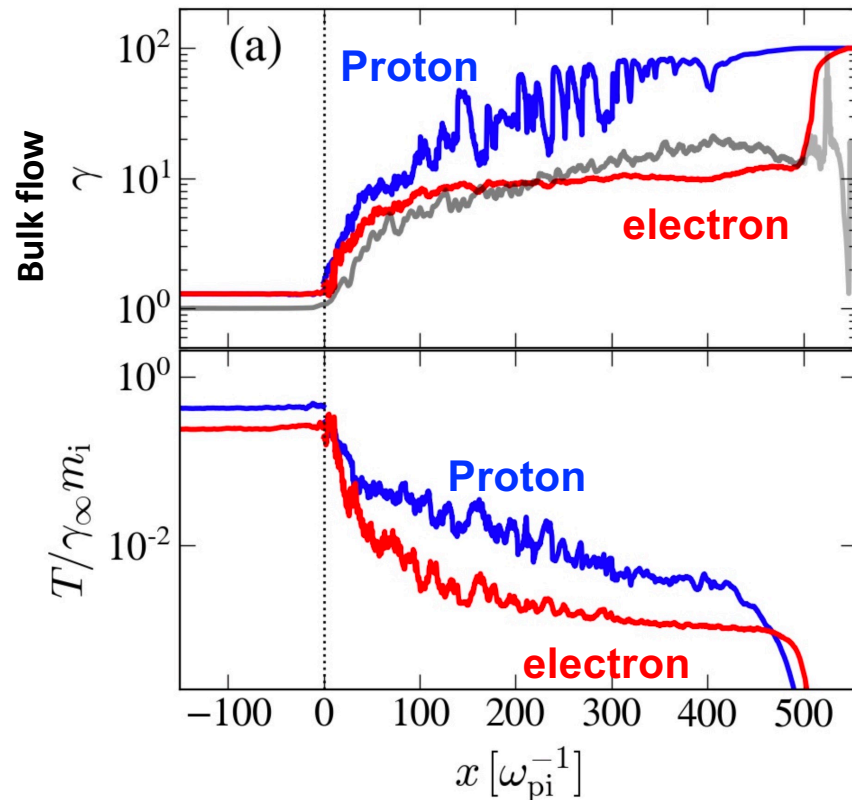
粒子の速度が衝撃波の伝播速度よりも速い: $v_x > v_{\text{sh}}$

$$\text{注入効率} = \frac{\text{Flux}_{\text{down} \rightarrow \text{up}}}{\text{Flux}_{\text{up} \rightarrow \text{down}}} = \frac{\iint_R f_d(p_x, p_y) (v_{\text{sh}} - v_{\text{up}}) dp_x dp_y}{n_{\text{up}} (v_{\text{sh}} - v_{\text{up}})} \sim 0.2$$

→本シミュレーション結果と一致.

$$f_d(p_x, p_y) \propto \delta(p - \langle E_{\text{He}} \rangle / c), \langle E_{\text{He}} \rangle \sim 3\Gamma m_p c^2, p_c \ll \langle E_{\text{He}} \rangle / c$$

相対論的無衝突衝撃波での電子加熱機構

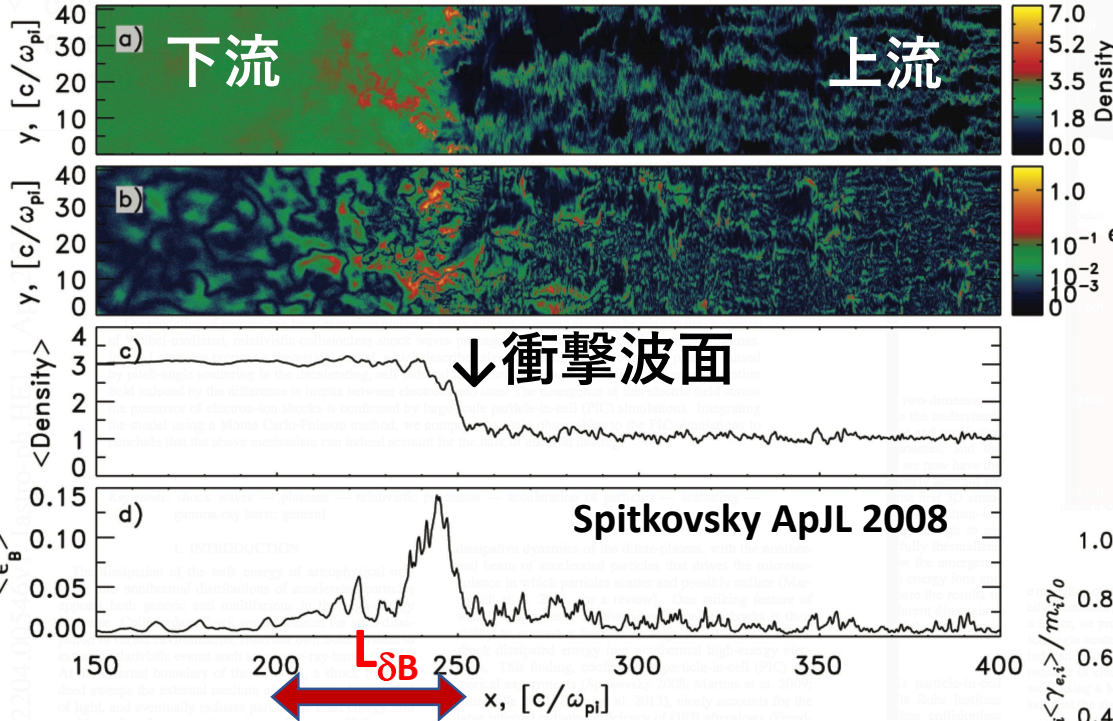


Vanthieghem
et al ApJL 2022

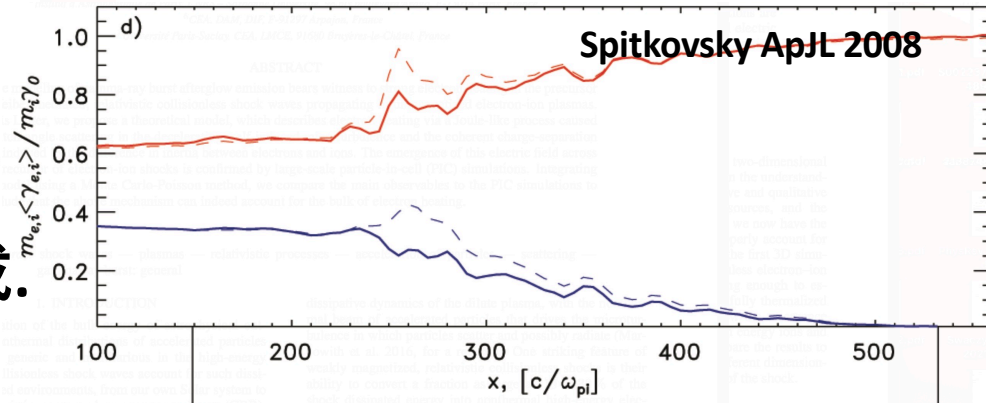
1. 上流で電子はすぐにワイベル磁場によって減速するが、陽子は減速しない。
2. 電荷分離が上流に強い静電場を生成. $-e\Delta\phi \sim 0.5\Gamma\rho_p c^2$
3. 電子が静電場で加速される。

相対論的衝撃波の第一原理シミュレーション

相対論的無衝突衝撃波の2D PICシミュレーション



電子は衝撃波上流で効率的に加熱される. $U_{e^-} \sim U_p$
GRB残光の観測的示唆と一致.



ワイベル不安定性による衝撃波形成.

典型的波長 $\lambda_{\delta B} \sim 10 c/\omega_{pi} \sim 10^8 \text{cm}$
増幅磁場の存在領域, $L_{\delta B} \sim 50 c/\omega_{pi}$

近年、電子の加熱機構が理論的に示された!