# 衝撃波加速における被加速粒子の 最高エネルギー問題

東京工業大学 寺沢敏夫

#### Aharonian et al. (2006)

#### H.E.S.S. survey of the inner Galaxy in VHE $\gamma$ rays



#### Galactic Longitude (°)



#### 衝撃波加速における被加速粒子の最高エネルギー問題: 古典的文献

Astron. Astrophys. 125, 249–257 (1983)

The maximum energy of cosmic rays accelerated by supernova shocks P. O. Lagage and C. J. Cesarsky

$$E_{max} \sim 71 \; \frac{ZB_{-6}E_{51}}{[n_e/(3\;10^{-3}\;\mathrm{cm}^{-3})]M_e^{1/6}} \; \mathrm{TeV}$$

kneeに届く? 届かない? ... ぎりぎりのestimate optimistic vs. pessimistic opinions

# 内容

# Emaxへの到達

#### dE/dtの見積もり

Emax到達のタイミング(free expansion → Sedov) 磁場の自己増幅? (Bell & Lucek) 斜め衝撃波の効果?

付録:

斜め衝撃波の効果: heliosphere内での観測的証拠 陽子 vs. 電子: 到達エネルギーの違い? Alfven波の自己励起の実例 Hillas condition for solar flares

![](_page_5_Figure_0.jpeg)

(file#0582 Vshock = -0.30)

![](_page_6_Figure_0.jpeg)

# 特徴的加速時間 T<sub>acc</sub>の見積もり

![](_page_7_Figure_1.jpeg)

●これらにより、  $T_{acc} = [(1/p)(dp/dt)]^{-1} = 3(D_1/u_1 + D_2/u_2) / (u_1 - u_2)$ 

![](_page_8_Figure_0.jpeg)

Let the shock speed  $u_1$  (=c $\beta_1$ ) be constant in time, we have

$$E_{\max} = \frac{3}{8\eta} Z e \beta_1 B_1 u_1 t = \frac{3}{8\eta} Z e \beta_1 B_1 L \qquad \dots (3)$$

at the epoch t (where  $L = u_1 t$ ).

In the heliosphere  $\eta \sim 10-100$ , but in strong astrophysical shocks we expect  $\eta \sim 1$  (Bohm limit).

Example: Norman et al., "The origin of CR>10<sup>18.5</sup> eV" ApJ 454, 60, 1995.

Theory gives 
$$T_{acc}^{-1} = \frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{u_1 - u_2}{3} \frac{1}{\left\{\frac{D_1}{u_1} + \frac{D_2}{u_2}\right\}}$$
 .... (1)  
**Bohm factor**  
Assuming that  $D = \eta D_B$  and  $u_2 = u_1/4$ ,  $D_1/u_1 = D_2/u_2$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = \eta$ ,  
then,  
 $\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{3}{8\eta} \frac{ZeB_1u}{Ec}$   
Note:  $\eta \sim (B_0/\delta B)^2$   
The shock speed  $u_1$  (=c  $\beta_1$ ) be constant in time, we have

Let the shock speed  $u_1$  (=c $\beta_1$ ) be constant in time, we have

$$E_{\max} = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 u_1 t = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 L \qquad \dots (3)$$
  
at the epoch t (where  $L = u_1 t$ ).
$$= \frac{3}{20\eta} Ze\beta_1 B_1 L \qquad \dots 40\% [\exists \vec{u} \psi]$$

In the heliosphere  $\eta \sim 10-100$ , but in strong astrophysical shocks we expect  $\eta \sim 1$  (Bohm limit).

Example: Norman et al., "The origin of CR>10<sup>18.5</sup> eV" ApJ 454, 60, 1995.

![](_page_10_Figure_0.jpeg)

$$E_{max} \sim 71 \; \frac{ZB_{-6}E_{51}}{[n_e/(3\;10^{-3}\;\mathrm{cm}^{-3})]M_e^{1/6}} \; \mathrm{TeV} \quad (\mathrm{for}\;\eta\sim 1)$$

# 内容

### Emaxへの到達 dE/dtの見積もり Emax到達のタイミング(free expansion → Sedov) 磁場の自己増幅? (Bell & Lucek) 斜め衝撃波の効果?

付録:

斜め衝撃波の効果: heliosphere内での観測的証拠 陽子 vs. 電子: 到達エネルギーの違い? Alfven波の自己励起の実例 Hillas condition for solar flares

![](_page_12_Figure_1.jpeg)

Shock propagation speed: from corona to 1AU

#### energy spectrum for the 1989/9/29 solar event

#### Lovell et al., 1998

![](_page_13_Figure_2.jpeg)

Several hundred MeV~ 30 GeV

#### IMP-8 and Deep River neutron monitor 1989/09/29

Sur

CME

shock

![](_page_14_Figure_1.jpeg)

#### IMP-8 and Deep River neutron monitor 1989/09/29

CM

shock

![](_page_15_Figure_1.jpeg)

![](_page_16_Figure_1.jpeg)

![](_page_17_Figure_0.jpeg)

### Hillas' argument on the maximum attainable energy

因子3/8η~3/20ηは無視

![](_page_18_Figure_2.jpeg)

```
• Emax = Ze\beta B L
```

Emax: the maximum energy attainable through the acceleration process
Z: Charge number
β: plasma velocity (u/c)
B: magnetic field strength
L: system size

Shock acceleration Reconnection  $(\beta B: \text{ electric field})$ Trapping condition:  $(\rho_g <=L)$ 

# 内容

### Emaxへの到達 dE/dtの見積もり Emax到達のタイミング(free expansion → Sedov) 磁場の自己増幅? (Bell & Lucek) 斜め衝撃波の効果?

付録:

斜め衝撃波の効果: heliosphere内での観測的証拠 陽子 vs. 電子: 到達エネルギーの違い? Alfven波の自己励起の実例 Hillas condition for solar flares

### 先程のE<sub>max</sub>の推算:

$$E_{\max} = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 L$$

$$= \frac{3}{20\eta} Ze\beta_1 B_1 L$$

Mon. Not. R. Astron. Soc. 314, 65-74 (2000)

#### Non-linear amplification of a magnetic field driven by cosmic ray streaming S. G. Lucek<sup>\*</sup> and A. R. Bell<sup>\*</sup>

 $\eta \sim (B_1/\delta B)^2 << 1 となる可能性?!$ 

#### Gradual SEP ... acceleration at CME shocks

![](_page_21_Figure_2.jpeg)

#### <~50 MeV protonsと共鳴するアルフェン波の励起

Geotail/MGF (3 sec)

![](_page_22_Figure_2.jpeg)

Lucek and Bell (2000)の議論:磁場増幅

![](_page_23_Figure_1.jpeg)

$$v_{S} \frac{\partial U_{A}}{\partial z} = [波のエネルギー源]$$
 $\uparrow$ 
CR粒子がする仕事

波のエネルギー密度

CR粒子はプラズマに対し相対速度 ~- $v_A$ で上流(-z方向、*i.e*.圧力勾配方向) に向かって流れ出る。従ってプラズマに対し、  $(-v_A)(-\partial P_{CR}/\partial z) = v_A \partial P_{CR}/\partial z$ だけの仕事をする。

$$v_{\rm S} \frac{\partial U_{\rm A}}{\partial z} = v_{\rm A} \frac{\partial P_{\rm CR}}{\partial z}$$
従って、

$$U_{\rm A} = \frac{v_{\rm A}}{v_{\rm S}} P_{\rm CR}$$

$$U_{\rm A} = \delta B^2/2\mu_0$$
、 $v_{\rm A} = B/\sqrt{\mu_0 \rho}$ より

$$\eta^{-1} = \frac{\delta B^2}{B^2} = 2 \frac{v_{\rm S} P_{\rm CR}}{v_{\rm A} \rho v_{\rm S}^2} >>1!$$

アルフェンマッハ数(>~100) O(1)の量

Lucek and Bell (2000)の議論:磁場増幅

本当にこの議論が証明されたのか?  
準線形理論による(
$$\delta B/B$$
)<sup>2</sup> の推定  
( $\delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
と区別できていない。  
というより、準線形理論の前提  
( $\delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
というより、準線形理論の前提  
( $\delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が使えることを示した、というべき。  
( $\delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が使えることを示した、というべき。  
( $\delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が使えることを示した、というべき。  
( $\delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が使えることを示した、というべき。  
( $\delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が 使えることを示した、というべき。  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が 使えることを示した、というべき。  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が 使えることを示した、というべき。  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が 使えることを示した、というべき。  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が 使えることを示した、というべき。  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が 使えることを示した、というべき。  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
が 使えることを示した。というべき。  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
( $\Delta T$ )  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
( $\Delta T$ )  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
( $\Delta T$ )  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
( $\Delta T$ )  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
( $\Delta T$ )  
( $\Delta T$ )  
( $\Delta B/B$ )<sup>2</sup> ~ ( $n_{beam}/n_0$ )( $V_{beam}/V_A$ )<sup>2</sup>  
( $\Delta T$ )  
( $\Delta T$ 

![](_page_25_Picture_0.jpeg)

![](_page_25_Figure_1.jpeg)

O3次元性が不可欠→衝撃波そのものを取り入れた粒子シミュレーションは未完 O流体方程式にCRの運ぶ電流項 (CRへの反作用は考えない)  $(1/\mu_0)$  rot  $B = j_{plasma} + j_{CR}$ 

$$\rho \frac{du}{dt} = -B \wedge (\nabla \wedge B)/\mu_0 \underbrace{j \wedge B}_{CR} \nabla P$$
  

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \wedge (u \wedge B),$$
  

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho u),$$
  

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho u),$$
  

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho u),$$

# 内容

### Emaxへの到達 dE/dtの見積もり Emax到達のタイミング(free expansion → Sedov) 磁場の自己増幅? (Bell & Lucek) 斜め衝撃波の効果?

付録:

斜め衝撃波の効果: heliosphere内での観測的証拠 陽子 vs. 電子: 到達エネルギーの違い? Alfven波の自己励起の実例 Hillas condition for solar flares

#### SN1006 shock-accelerated TeV electrons $\rightarrow$ synchrotron radiation

![](_page_27_Figure_1.jpeg)

We expect that the spherical shock is seen circular (projection effect).

However, the hard X ray image has a bipolar shape. Why?

The magnetic shock geometry should be responsible for this bipolar nature.

.... quasi-parallel shock

Chandra Hard X ray image (Weisskopf and Hughes, astro-ph/0511327)

#### SN1006 shock-accelerated TeV electrons $\rightarrow$ synchrotron radiation

![](_page_28_Figure_1.jpeg)

We expect that the spherical shock is seen circular (projection effect).

However, the hard X ray image has a bipolar shape. Why?

The magnetic shock geometry should be responsible for this bipolar nature.

Which geometry is more likely?

Chandra Hard X ray image (Weisskopf and Hughes, astro-ph/0511327)

![](_page_29_Figure_0.jpeg)

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

### Purely parallel shock

### Purely perpendicular shock

![](_page_30_Figure_0.jpeg)

磁力線がbow shockに接する点の近傍(~perp. shock)で衝撃波ドリフト加 速機構が働き電子ビームを生成する。散乱は効かないので統計加速には なっていない。 Shock drift acceleration

Diffusive shock acceleration

![](_page_31_Figure_2.jpeg)

![](_page_32_Figure_0.jpeg)

斜め衝撃波を扱う場合の処方箋: de Hoffman-Teller系へ座標変換せよ:  $U_{1,HT}, U_{2,HT}$ : flow velocity parallel to B (*de Hoffmann-Teller* velocity)  $U_{1,HT} = U_{1,n}/\cos \theta_1, U_{2,HT} = U_{2,n}/\cos \theta_2$ 法線方向速度 $U_{1,n}, U_{2,n}$ に比べ(cos  $\theta_{1,2}$ )<sup>-1</sup>倍速い

磁力線に垂直方向の拡散が無視できるなら、加速率は前と同じ式にdHT速度を用いて

$$T_{acc}^{-l} = \frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{U_{I,HT} - U_{2,HT}}{3} \frac{1}{\left\{\frac{D_1}{U_{I,HT}} + \frac{D_2}{U_{2,HT}}\right\}} \propto (\cos\theta)^{-2}$$

Drury's theorem (1983, Rep. Progress in Phys.)

### 斜め衝撃波:加速は速いが行き着く先(冪の値)は同じ: 定常状態のエネルギースペクトルはθに依存しない。

In oblique shocks, the DSA process gives the power-law spectrum for accelerated particles with the index  $\gamma$ ,

$$\gamma = \frac{U_{1,\text{HT}} \cos \theta_1 + 2U_{2,\text{HT}} \cos \theta_2}{U_{1,\text{HT}} \cos \theta_1 - U_{2,\text{HT}} \cos \theta_2}$$

In terms of normal velocities, this becomes

$$\gamma = \frac{U_{1,n} + 2U_{2,n}}{U_{1,n} - U_{2,n}}$$

which is the same as purely parallel shock case.

Assumption: (1) Particles are almost isotropic at the shock front (2) Steady state is reached

![](_page_33_Picture_8.jpeg)

U<sub>1,HT</sub>,U<sub>2,HT</sub>: flow velocity parallel to B (*de Hoffmann-Teller* velocity)

![](_page_34_Figure_0.jpeg)

## 内容

#### Emaxへの到達 dE/dtの見積もり Emax到達のタイミング(free expansion → Sedov) 磁場の自己増幅? (Bell & Lucek) 斜め衝撃波の効果? (了)

付録: 陽子 vs. 電子

![](_page_36_Figure_0.jpeg)