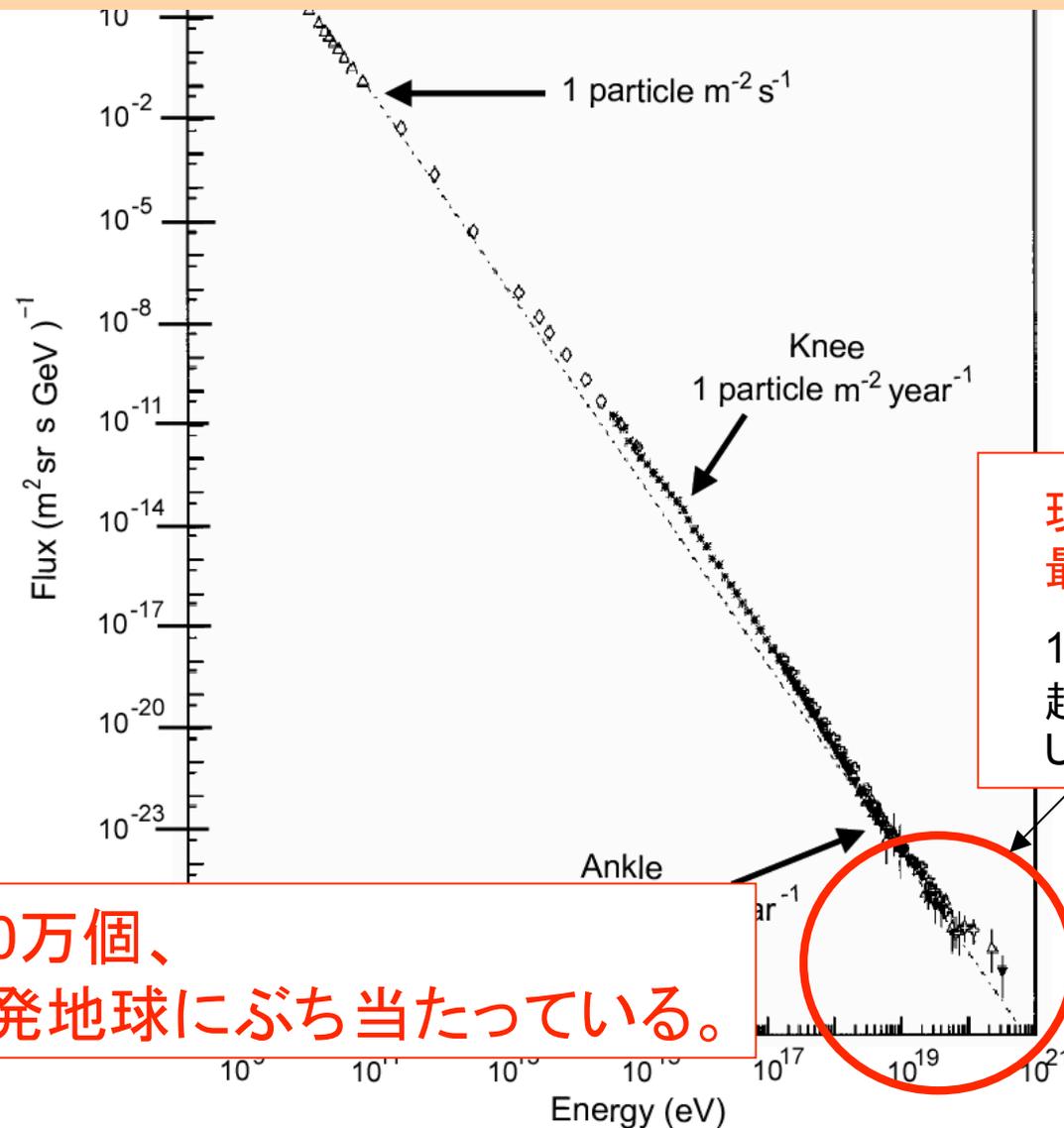


最高エネルギー宇宙線の加速

寺澤 敏夫・浅野 勝晃
(東京工業大学)

•LHCの衝突エネルギー: 重心系で14TeV、実験室系で 10^{17} eV

•UHECRの場合: 重心系で300TeV、実験室系で 10^{20} eV



現在の宇宙物理学の
最大の謎

10^{20} eV(=16J)に達する
超高エネルギー宇宙線
UHECRの存在

年間500万個、
6秒に1発地球にぶち当たっている。

1 km^2 あたり
1世紀に1個

「加速」—宇宙線の起源—の理解は
宇宙の物理的解明にとって本質的だろうか？

TAグループ・リーダー福島さんのpptの一節をお借りして...

‘Who ordered muon?’ said I. Rabi.



‘Who ordered UHECR?’ said M. Fukushima.

原理その1 $p = \frac{h}{\lambda}$ or $E \sim pc = \frac{hc}{\lambda}$

原理その2 電磁場のローレンツ変換 & ローレンツ力

$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B} \right) \quad \frac{e}{c} F^{ik} u_k$$

サイクロトロン共鳴条件

$$\omega - kc\beta = \pm \frac{\Omega_B}{\gamma} \rightarrow |k|c \sim \frac{\Omega_B}{\gamma}$$

$$|\omega| = |kV_A| \ll |kc\beta|, \quad \beta \rightarrow 1$$

$$\gamma \sim \frac{\Omega_B}{|k|c} = \frac{\Omega_B}{2\pi c} \lambda = \frac{eB}{2\pi mc^2} \lambda$$

$$E = mc^2 \gamma \sim \frac{1}{2\pi} eB\lambda \quad (\text{Hillas 条件})$$

原理その1 (rephrased)

$$E \sim \frac{hc}{\lambda} \quad E \rightarrow \text{プランクエネルギーのとき、} \lambda \rightarrow \text{プランク長さ}$$

原理その2 (rephrased)

$$E \sim eB\lambda \quad \leftarrow \text{MHD乱流があれば、必ず非熱的
粒子が生まれる}$$

‘Who ordered UHECR?’の答え: **神仏のなせる業**

So what?

...???

雷の引き金... 10^{16-18} eVのCR

Astrophysical Acceleration Processes

交流加速

○ Stochastic processes (Fermi processes)

$(v/c)^{**1}$ Diffusive Shock Acceleration

$(v/c)^{**2}$ Acceleration in MHD turbulence

○ unipolar inductor (magnetic rotators)

○ reconnection (solar flares, earth's magnetotail)

直流加速

Astrophysical Acceleration Processes

交流加速

○ Stochastic processes (Fermi processes)

$(v/c)^{**1}$ **Diffusive Shock Acceleration**

$(v/c)^{**2}$ Acceleration in MHD turbulence

○ unipolar inductor (magnetic rotators)

○ reconnection (solar flares, earth's magnetotail)

直流加速

Astrophysical Acceleration Processes

交流加速

○ Stochastic processes (Fermi processes)

$(v/c)^{**1}$ Diffusive Shock Acceleration

$(v/c)^{**2}$ Acceleration in MHD turbulence

○ unipolar inductor (magnetic rotators)

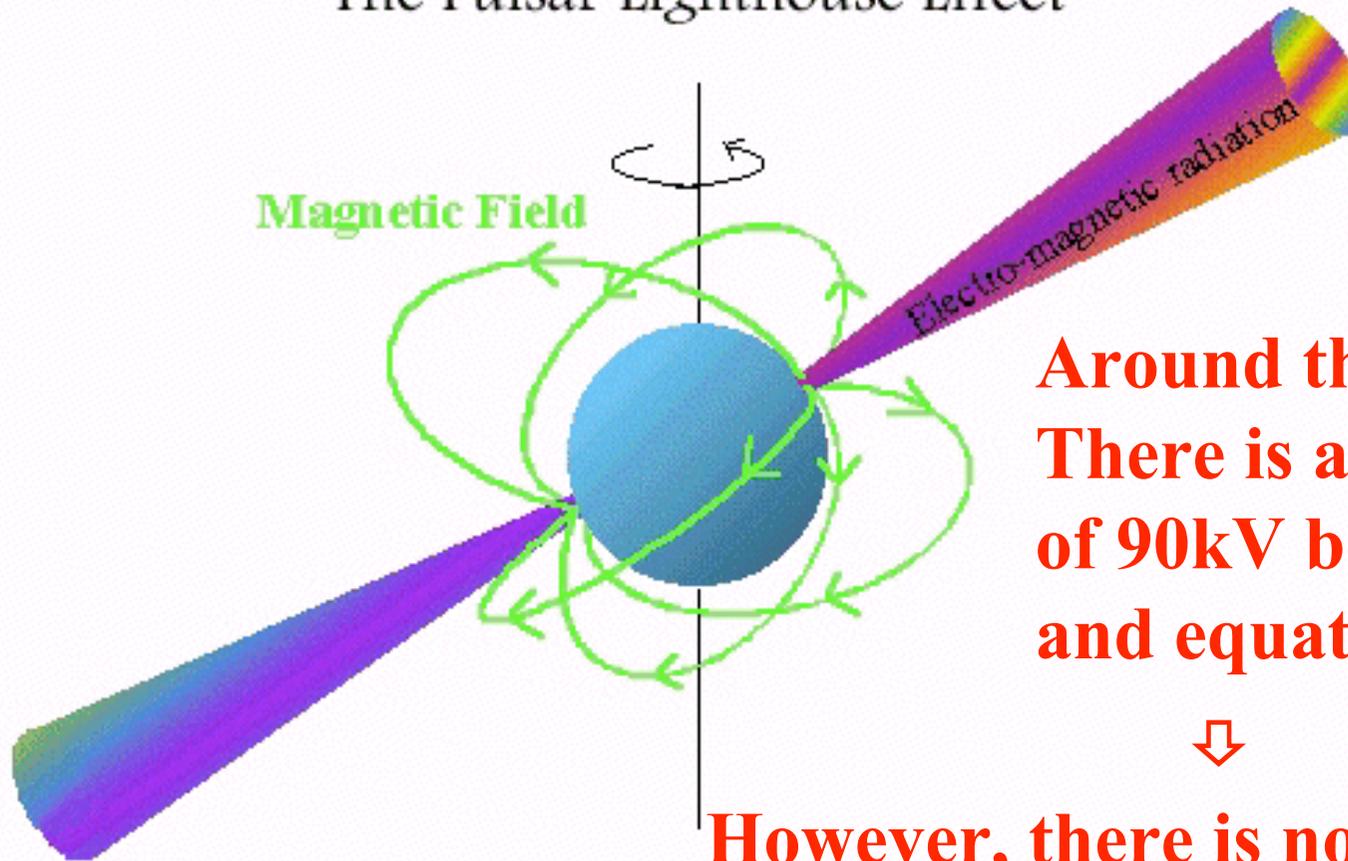
○ reconnection (solar flares, earth's magnetotail)

直流加速

unipolar inductor

$$E_{\text{max}} = 8 \times 10^{20} Z_{26} B_{13} \Omega_{3k}^2 \text{ eV}$$

The Pulsar Lighthouse Effect



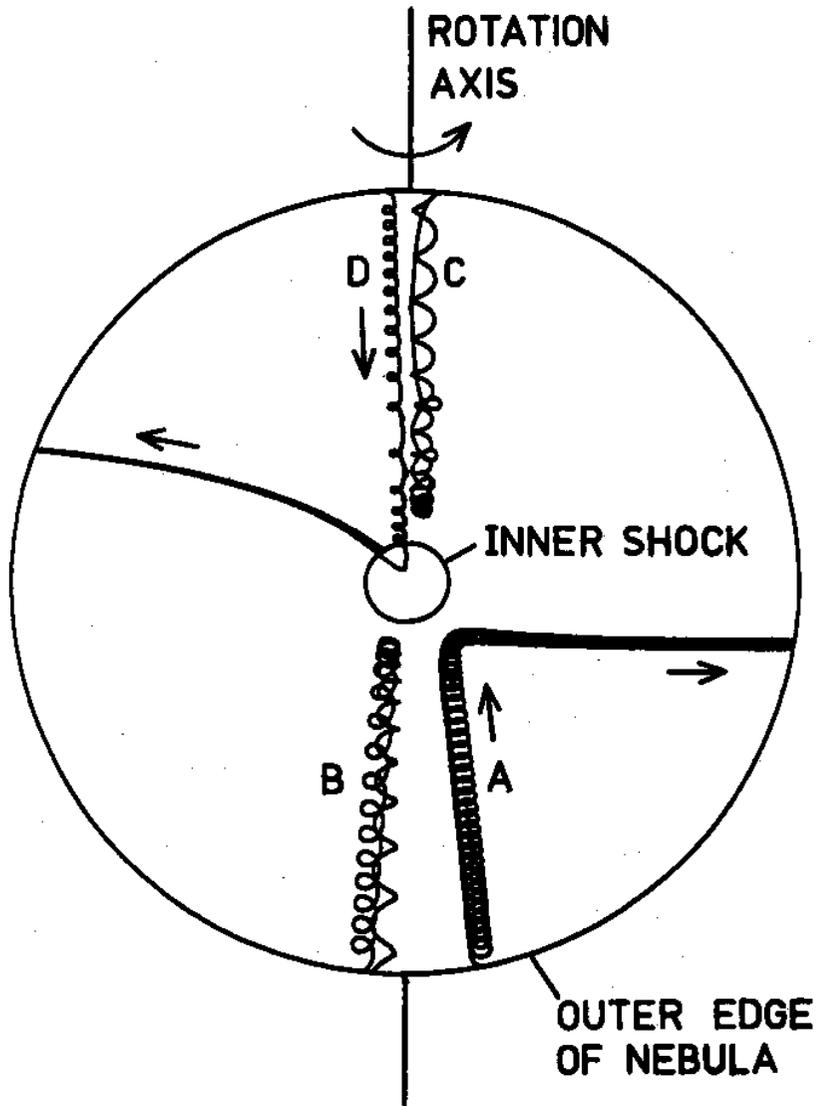
Around the Earth....

There is a potential drop of 90kV between the pole and equator.



However, there is no emission of 90keV particle beams from the earth!

Bell (1992) MNRAS 257, 493-
CR acceleration (10^{15-19} eV) in pulsar-driven SNR



How to find a way to cross
the potential drop

Magnetarなら $>10^{20}$ eV も？
(Aron, 2003)

Astrophysical Acceleration Processes

交流加速

○ Stochastic processes (Fermi processes)

$(v/c)^{**1}$ Diffusive Shock Acceleration

$(v/c)^{**2}$ Acceleration in MHD turbulence

○ unipolar inductor (magnetic rotators)

○ reconnection (solar flares, earth's magnetotail)

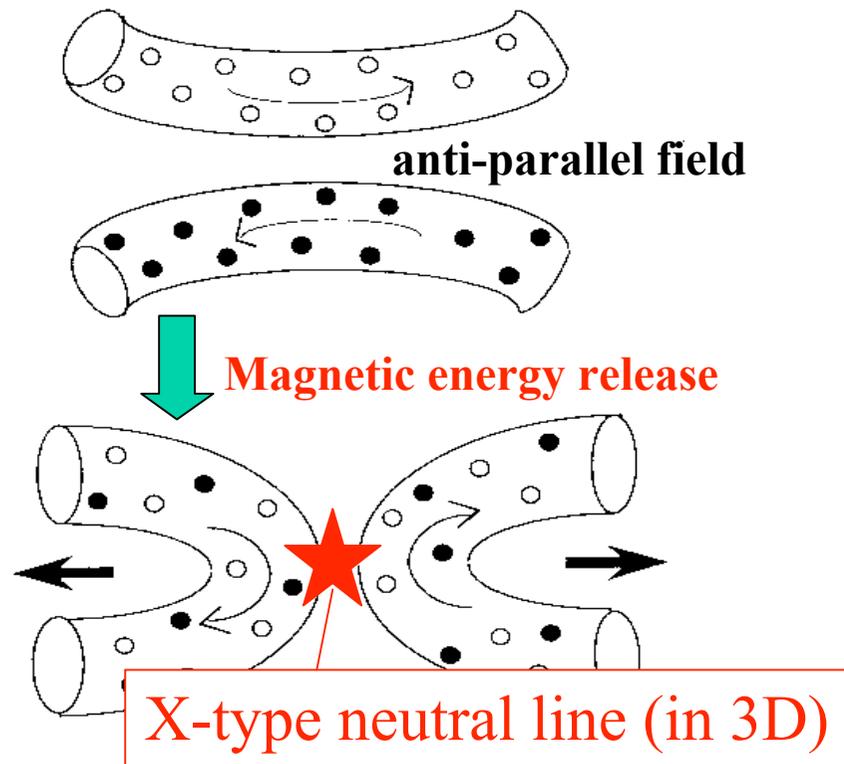
直流加速

Reconnection

Solar flares

magnetosphere

Laboratory/fusion plasmas



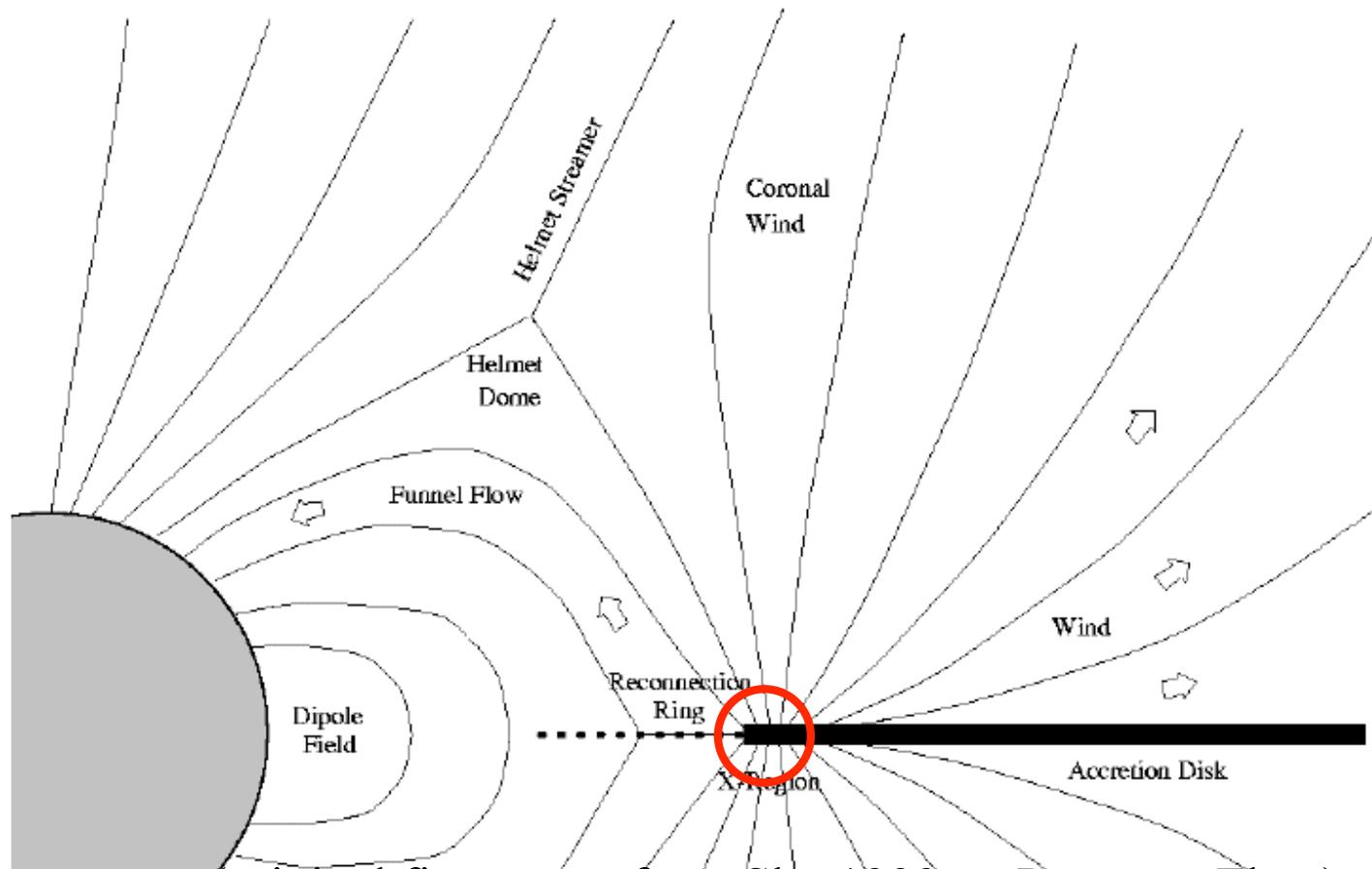
電場 E は画面に垂直。
X-lineに沿った系の空間スケール L までの加速が起きうる。

→最大エネルギー eEL

M. de Gouveia Dal Pino and Lazarianm, ApJ 536 L31-, 2000.

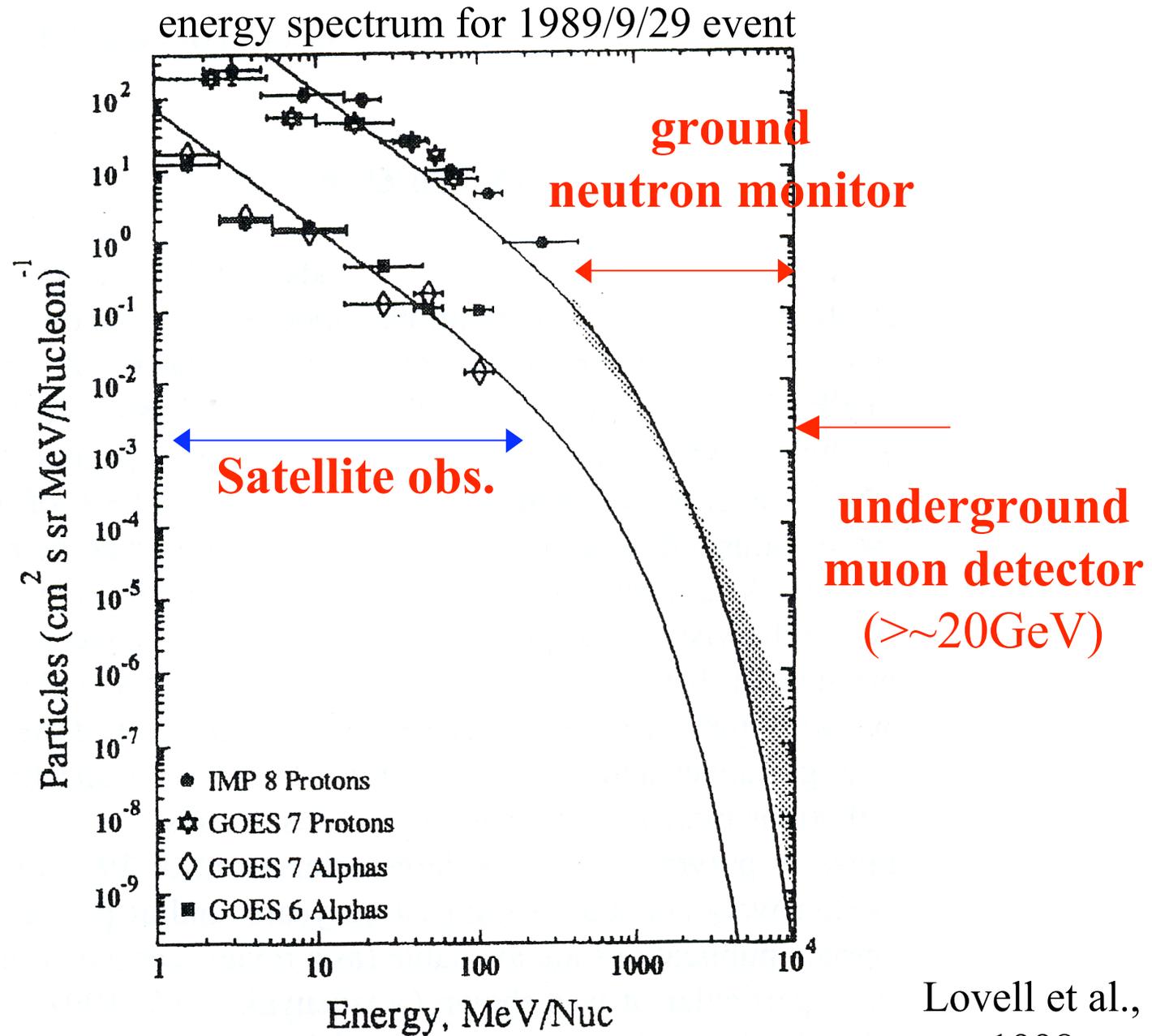
*UHECR accelerated by magnetic reconnection
in newborn accretion-induced collapse pulsars*

“UHECRs are accelerated in the magnetic reconnection site
at the helmet streamer.”



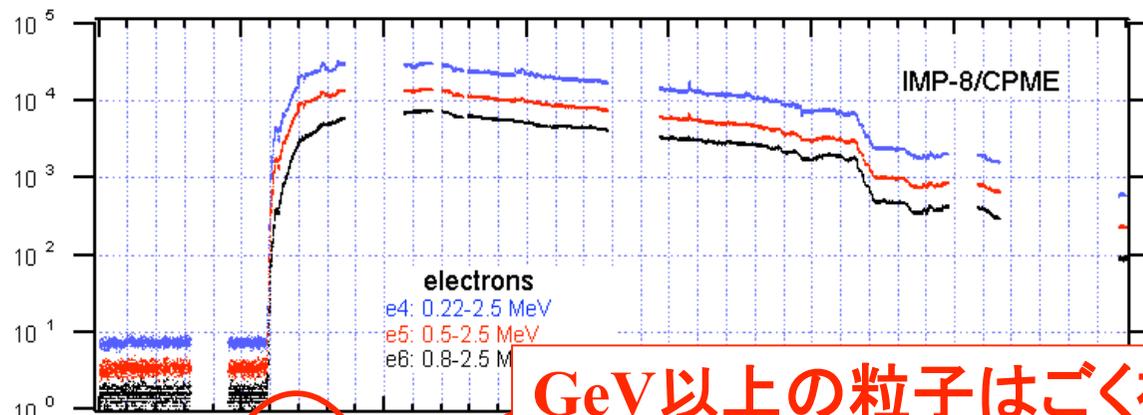
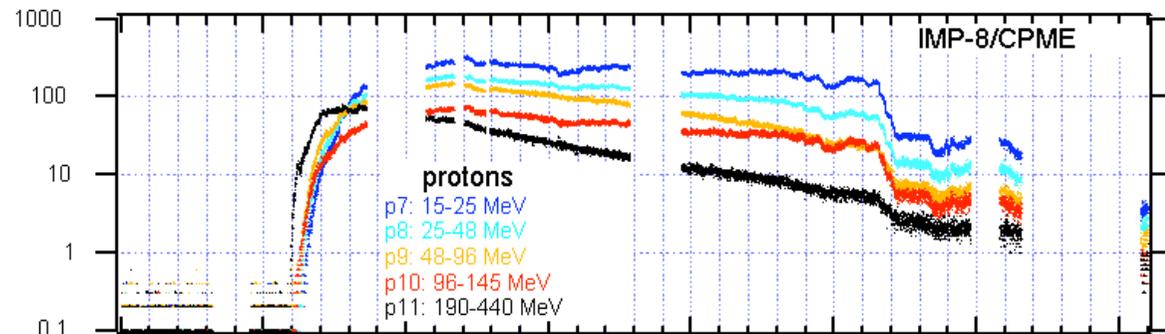
(original figure was from Shu 1999.... Protostar Flare)

*shock*か *reconnection*か?...最高エネルギー太陽フレア粒子の場合

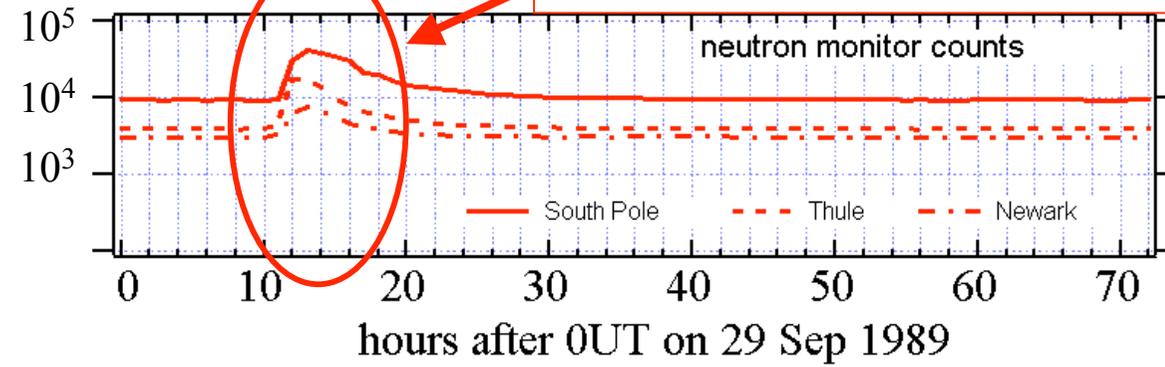


*shock*か *reconnection*か?...最高エネルギー太陽フレア粒子の場合

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

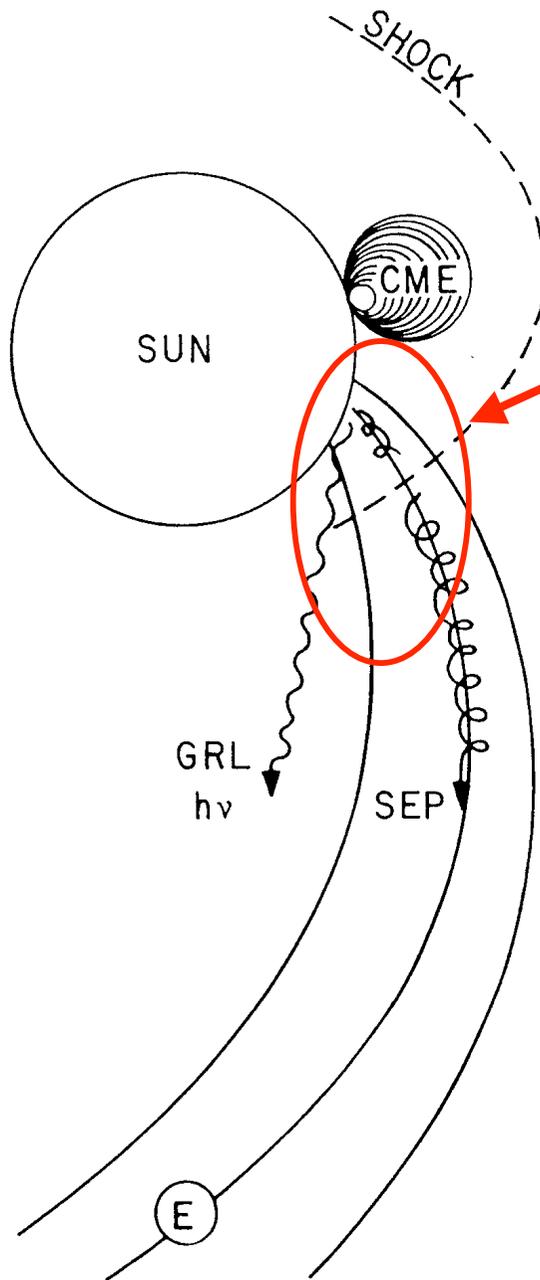


GeV以上の粒子はごく初期に加速された

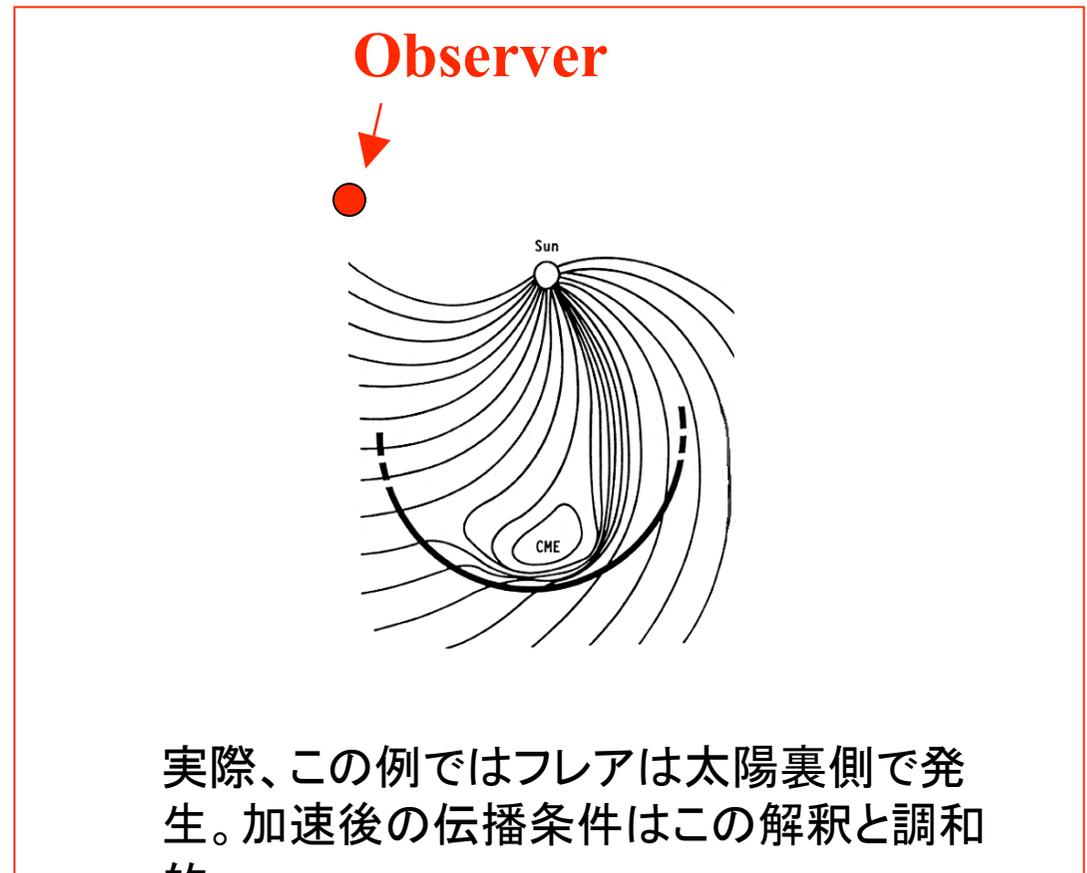


GCR level

Shock説による解釈

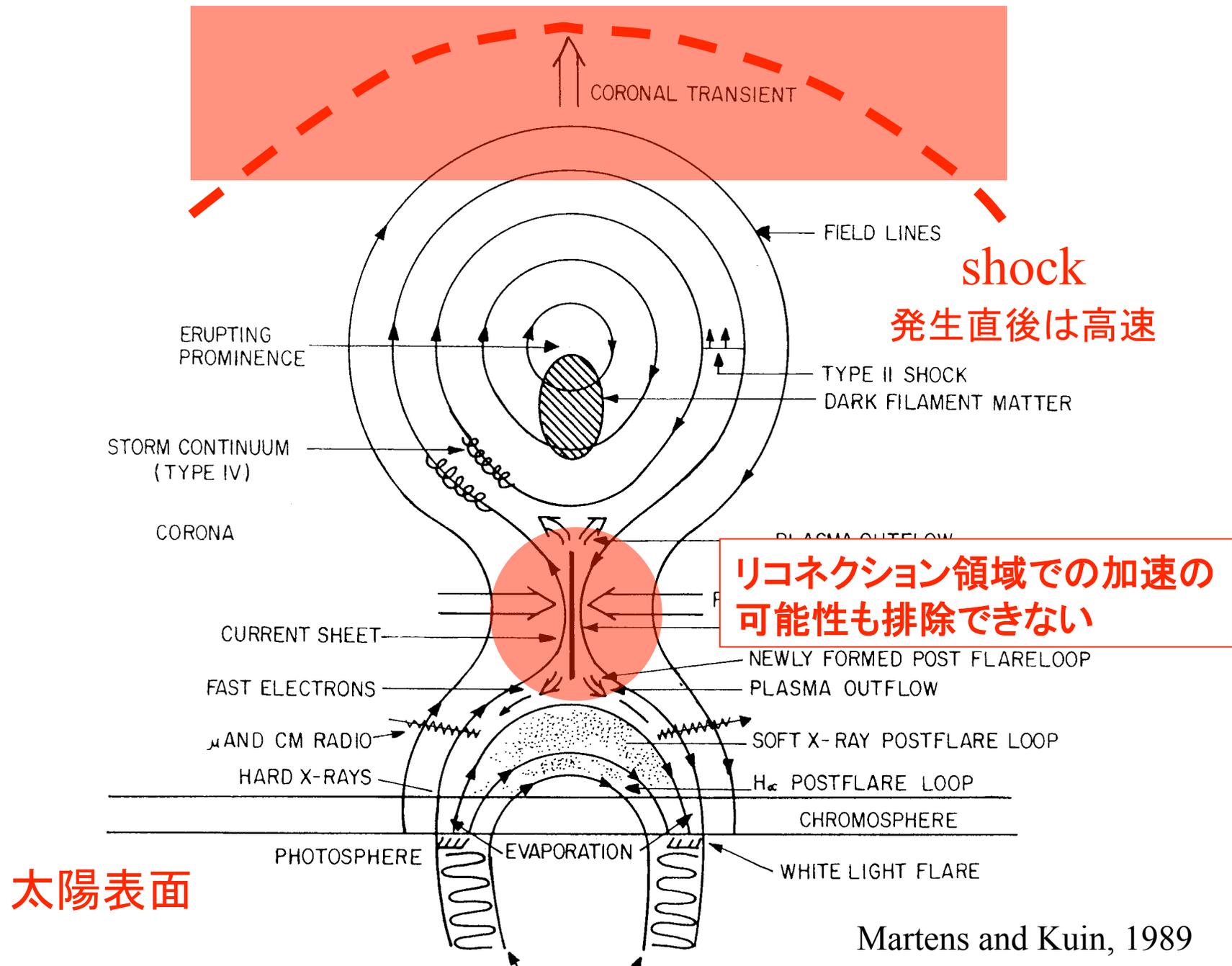


GeV以上の粒子はごく初期に加速された



実際、この例ではフレアは太陽裏側で発生。加速後の伝播条件はこの解釈と調和的

shockか reconnectionか?...最高エネルギー太陽フレア粒子の場合



Astrophysical Acceleration Processes

交流加速

○ Stochastic processes (Fermi processes)

$(v/c)^{**1}$ Diffusive Shock Acceleration

$(v/c)^{**2}$ Acceleration in MHD turbulence

○ unipolar inductor (magnetic rotators)

○ reconnection (solar flares, earth's magnetotail)

直流加速

velocity shear acceleration

... 乱流あり (Ostrowskiほか)

... 乱流なし (Lyutikov)

... 統計加速のvariation

... 直流加速のvariation

Ostrowski, AA 335, 134-144 (1998)

Acceleration of ultra-high energy cosmic ray particles
in relativistic jets in extragalactic radio sources

Ostrowskiの考えたのはshock+shear加速

Cyg Aなどのhot spotの先端

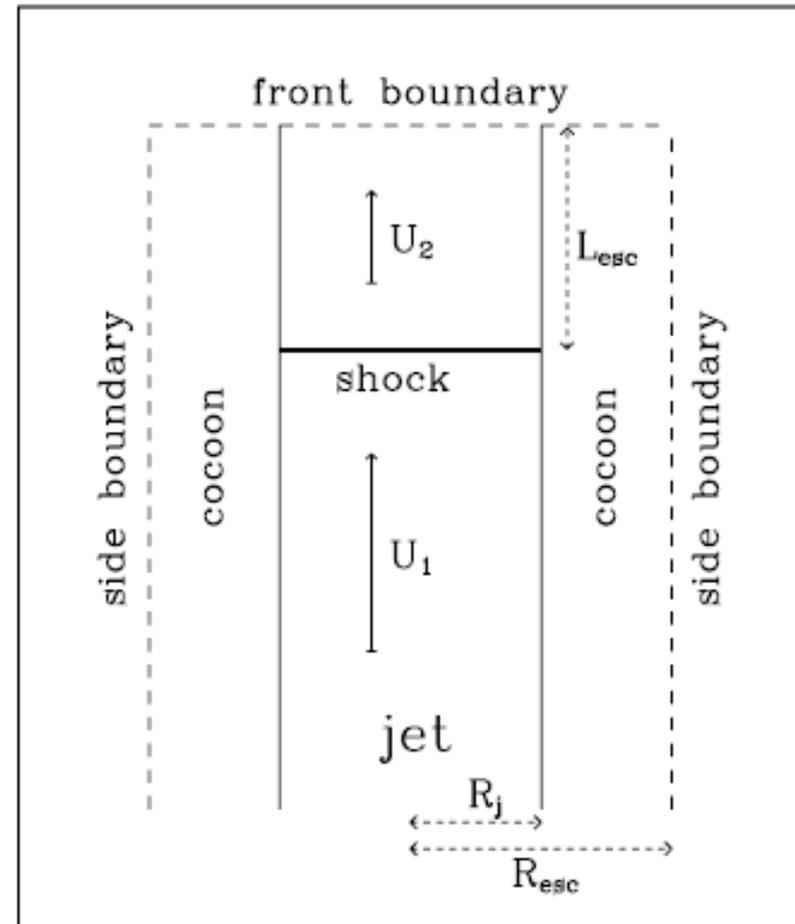
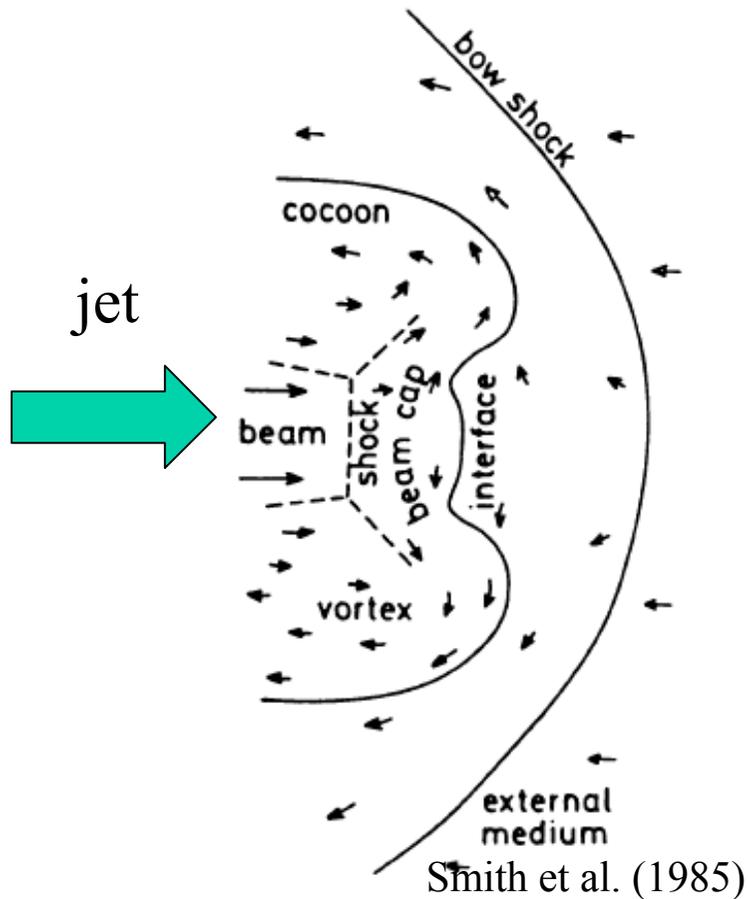
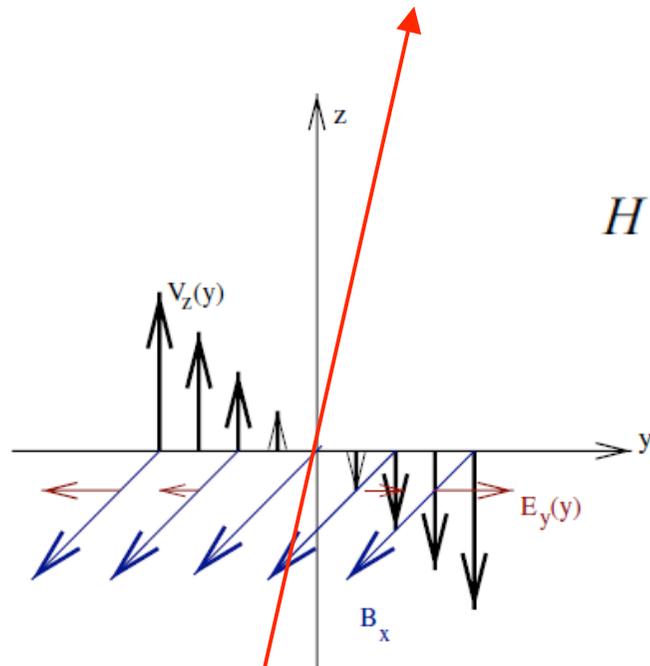


Fig. 1. A schematic representation of the terminal shock neighbourhood. The velocities and distances used in the text are indicated.

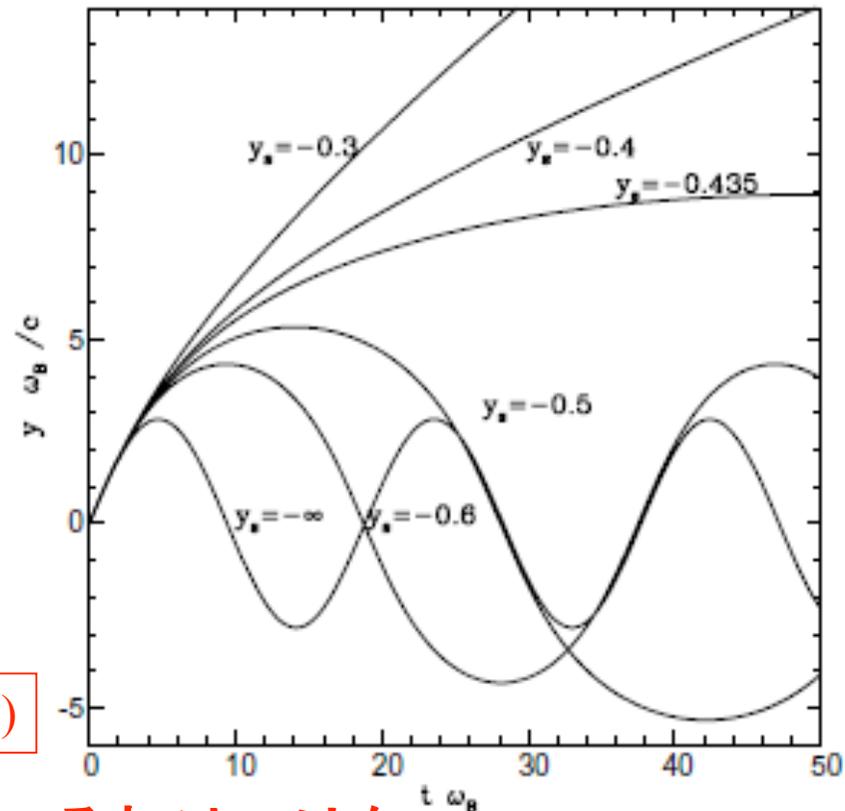
Lyutikov and Ouyed, *Astropart Phys.* 27, 473-489 (2007)
~~Inductive acceleration of UHECRs in sheared relativistic jets~~



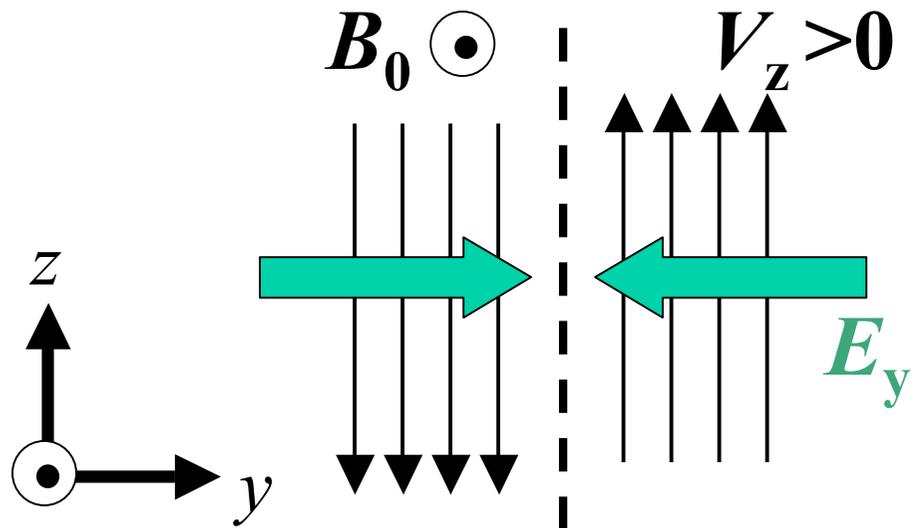
$$H = mc^2 \left(\sqrt{1 + \frac{p_y^2}{m^2 c^2} + \frac{Z^2 \omega_B^2 (Y_g - y)^2}{c^2}} + \frac{eZ\Phi}{mc^2} \right)$$

“Shear flowの作る $-V \times B$ 電場
 のもとでの粒子加速”

(論文のタイトルが内容とミスマッチ)



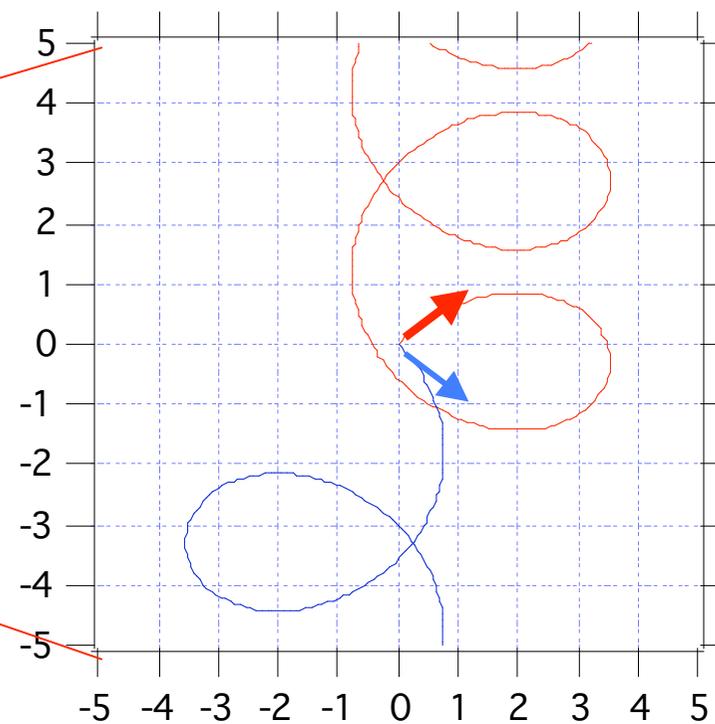
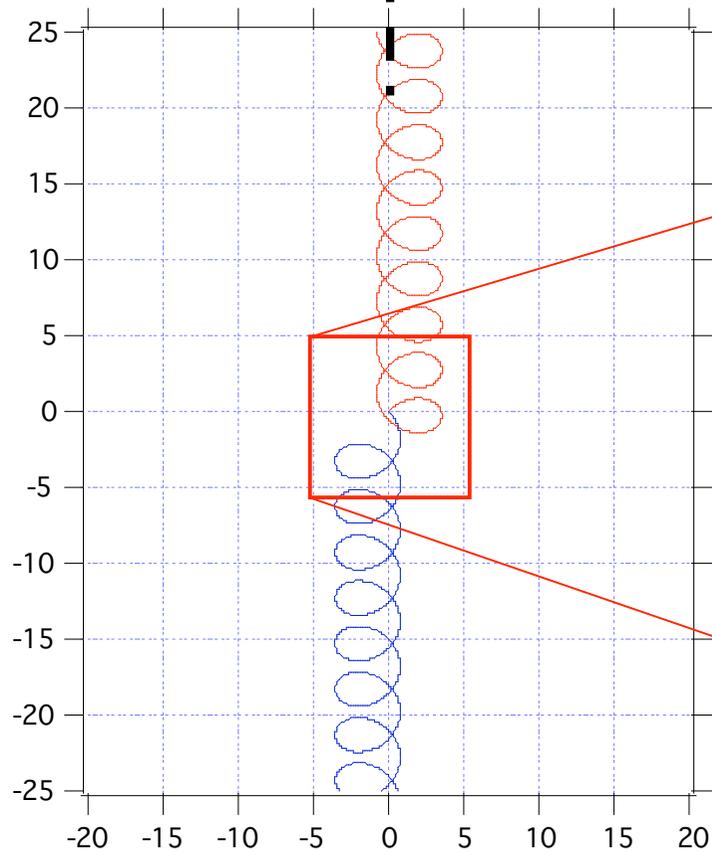
ただし、計算がまちがっているわけではない

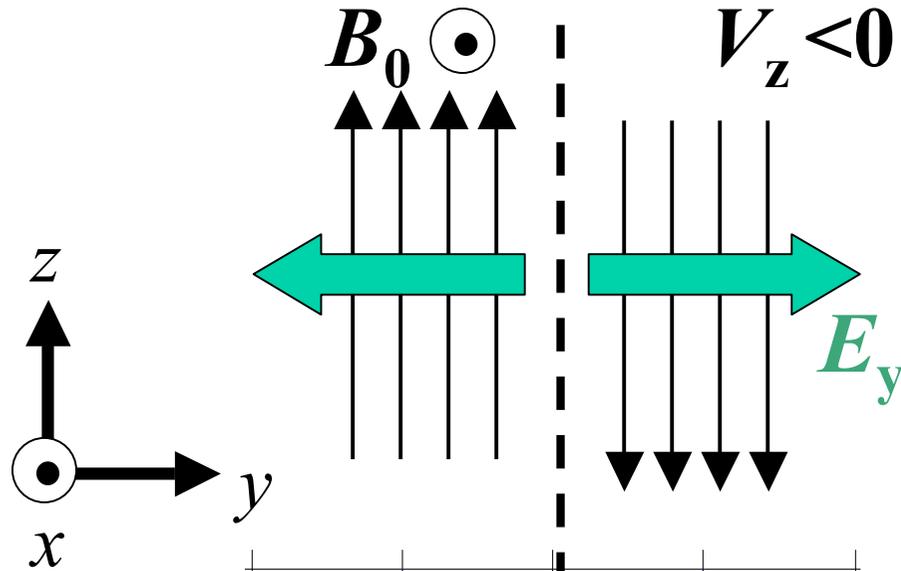


Shear velocity field $V_z(y) = c \tanh(y/y_s)$

Stable orbit

injection

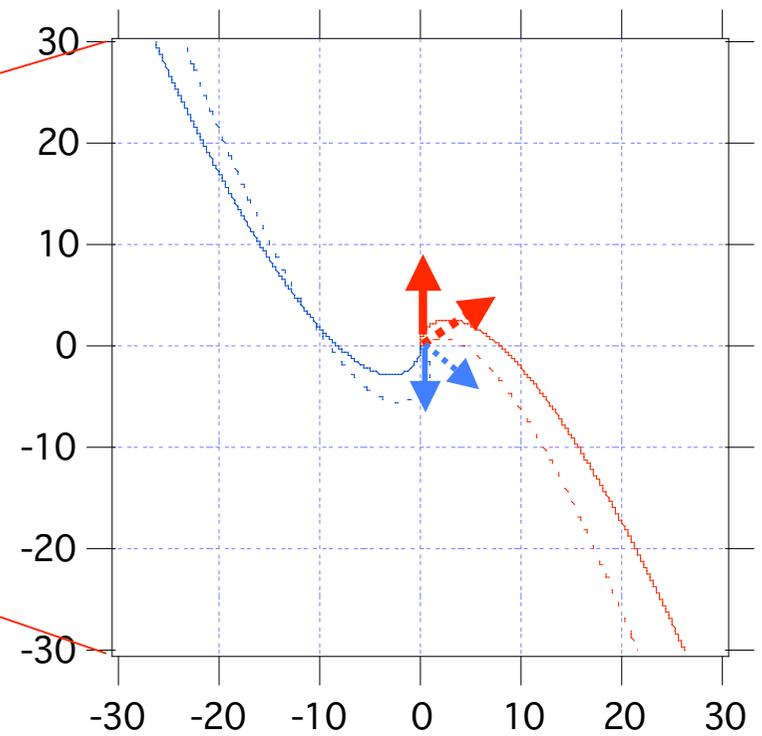
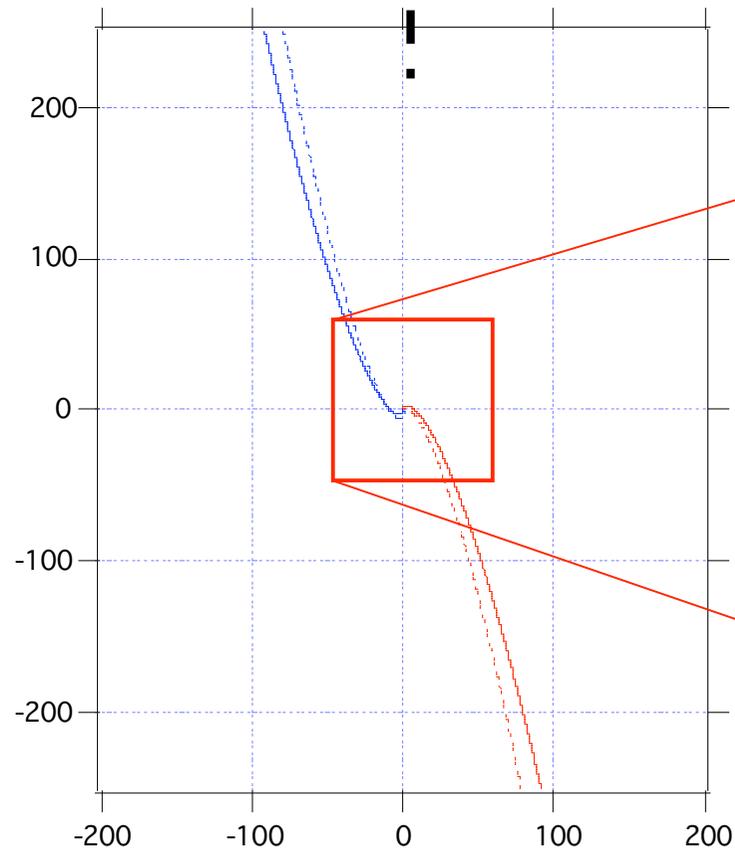


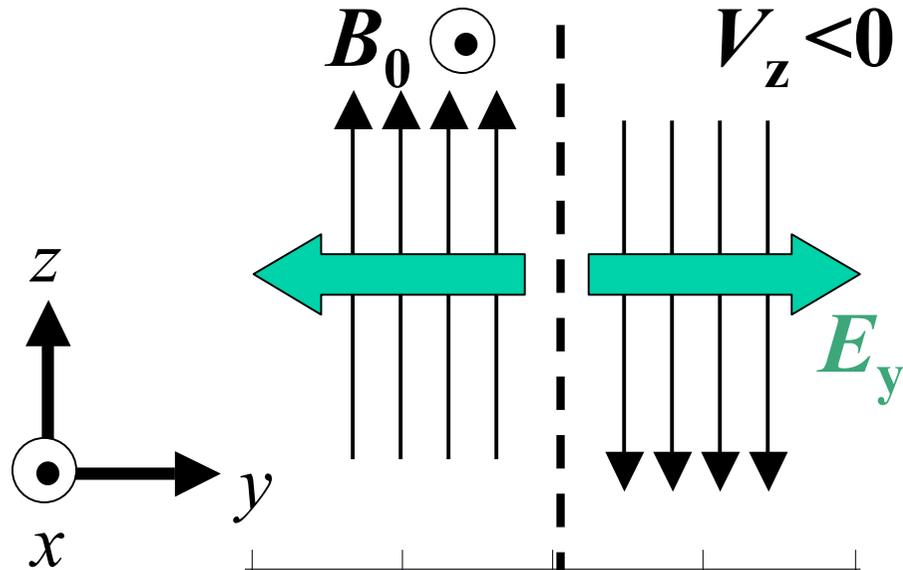


Shear velocity field $V_z(y) = -c \tanh(y/y_s)$

Unstable orbit

injection

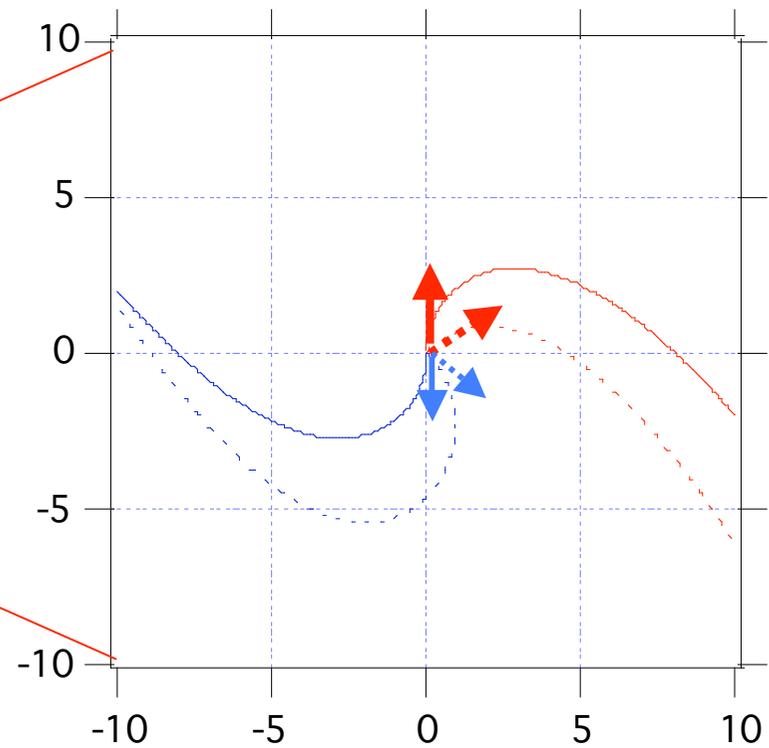
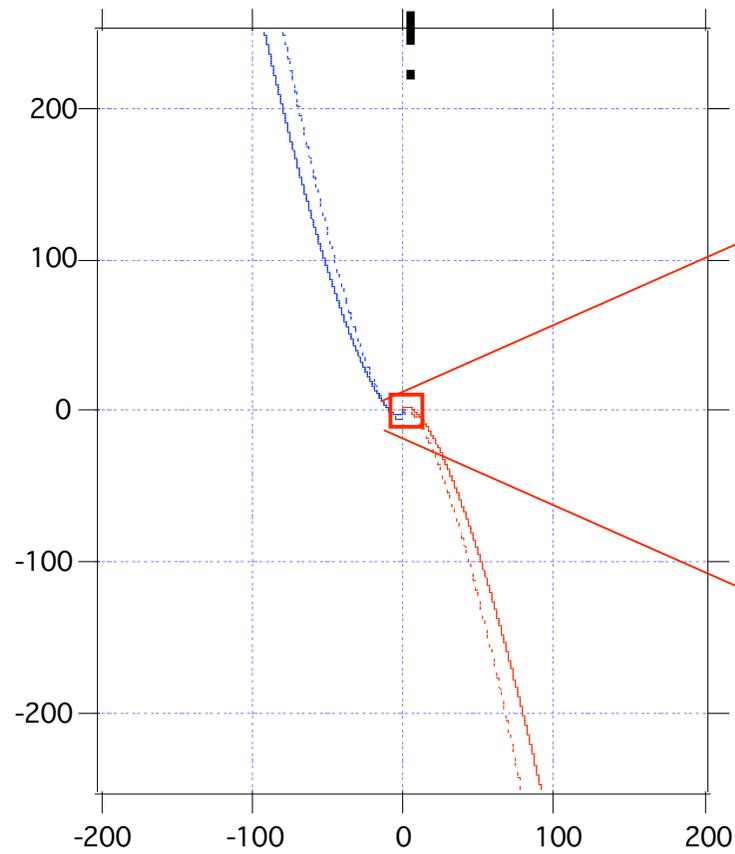


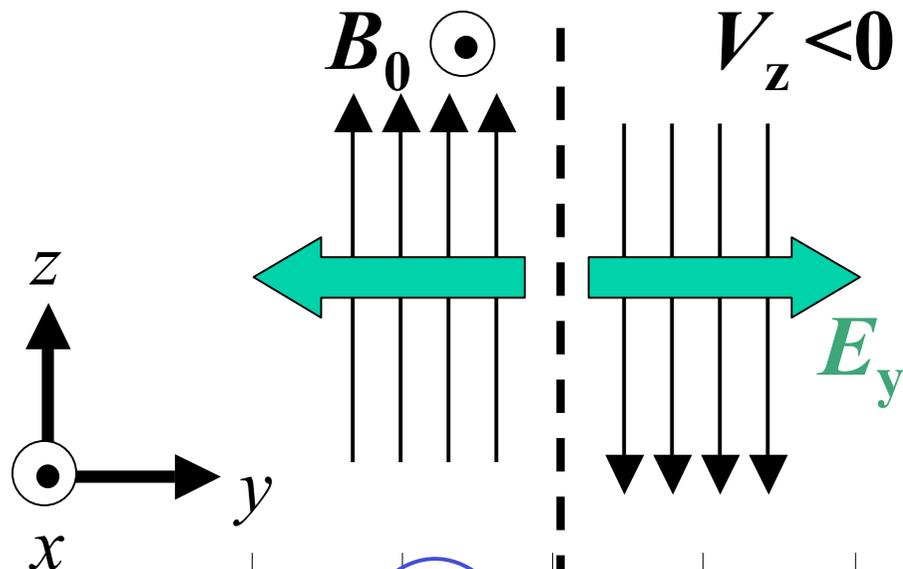


Shear velocity field $V_z(y) = -c \tanh(y/y_s)$

Unstable orbit

injection



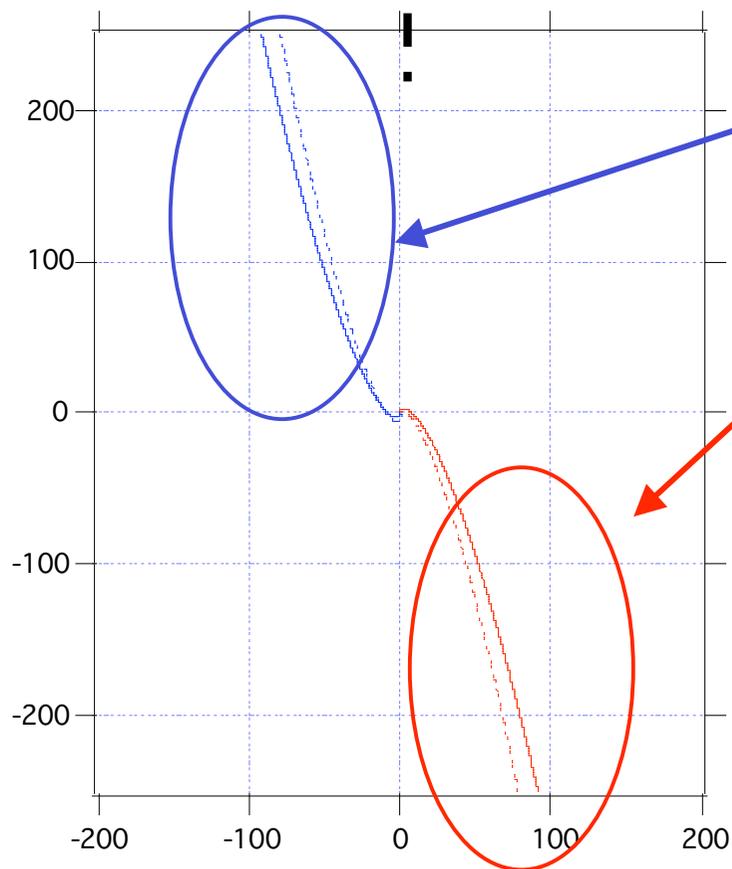


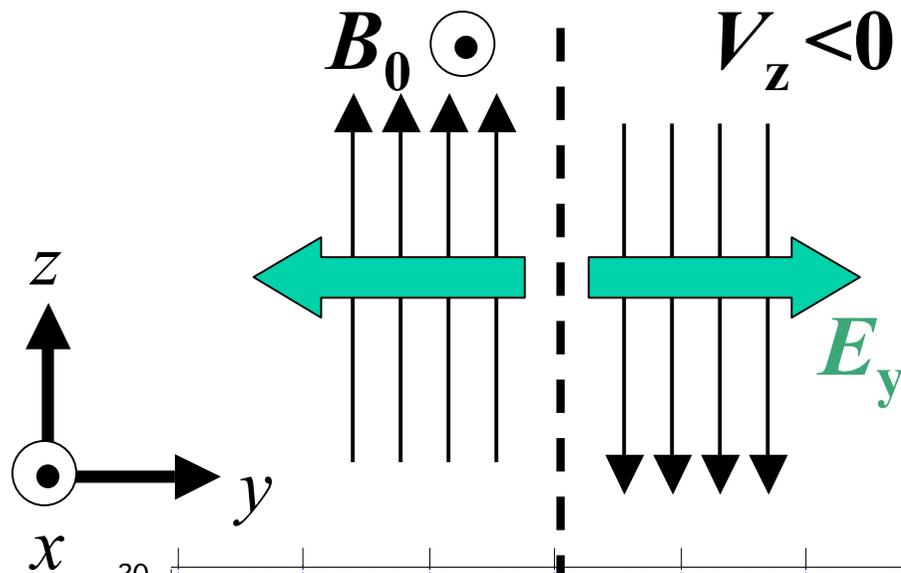
Shear velocity field

$$V_x(y) = -c \tanh(y/y_s)$$

の作る不均一電場が加速に
本質的と述べているが、加速
が起きているのは

$|y/y_s| \gg 1$ の部分。

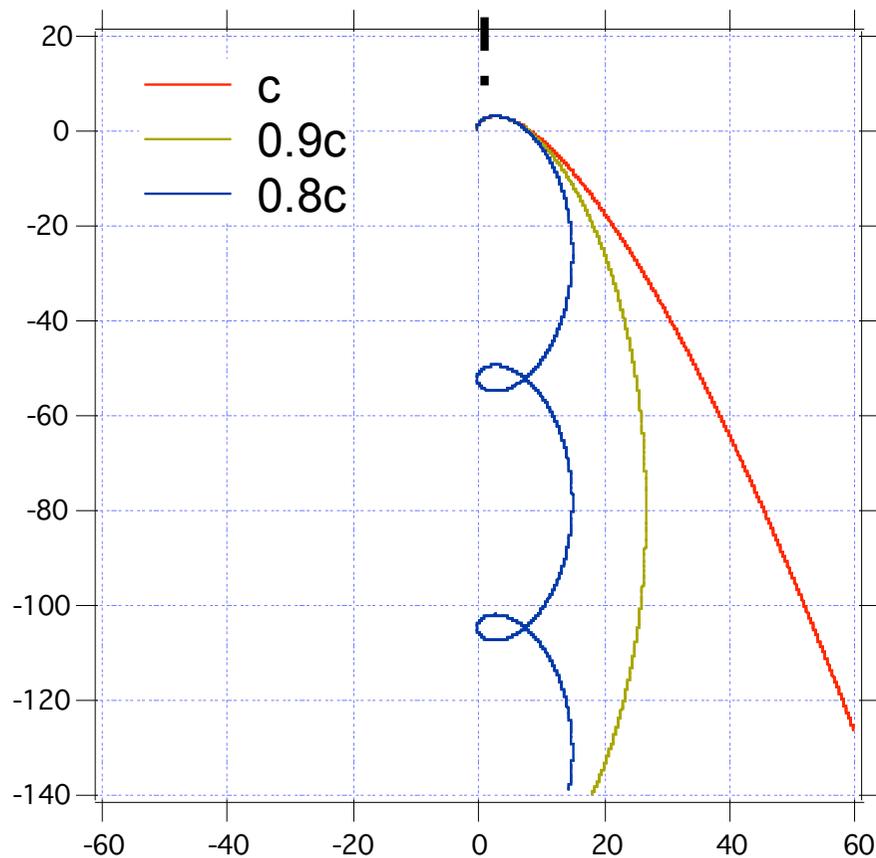


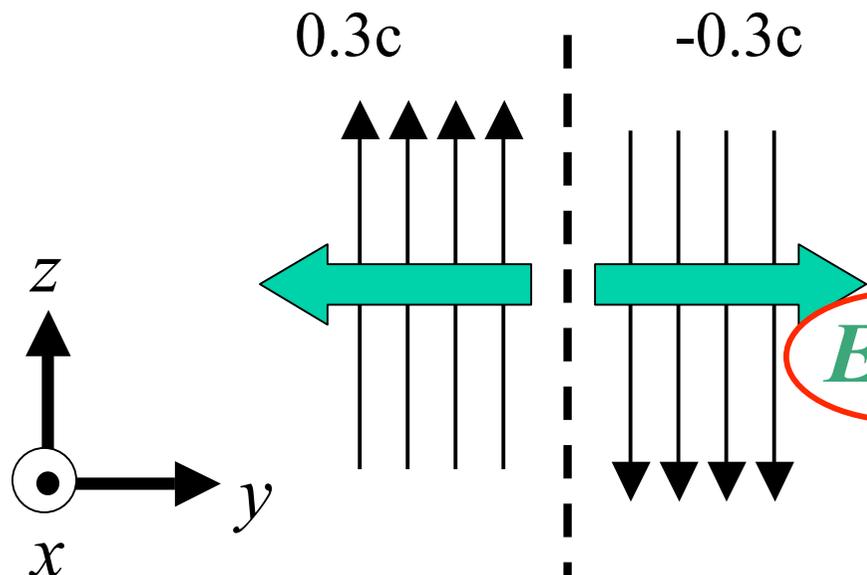


加速が際限もないように見えたのは

$$V_x(y) = -c \tanh(y/y_s)$$

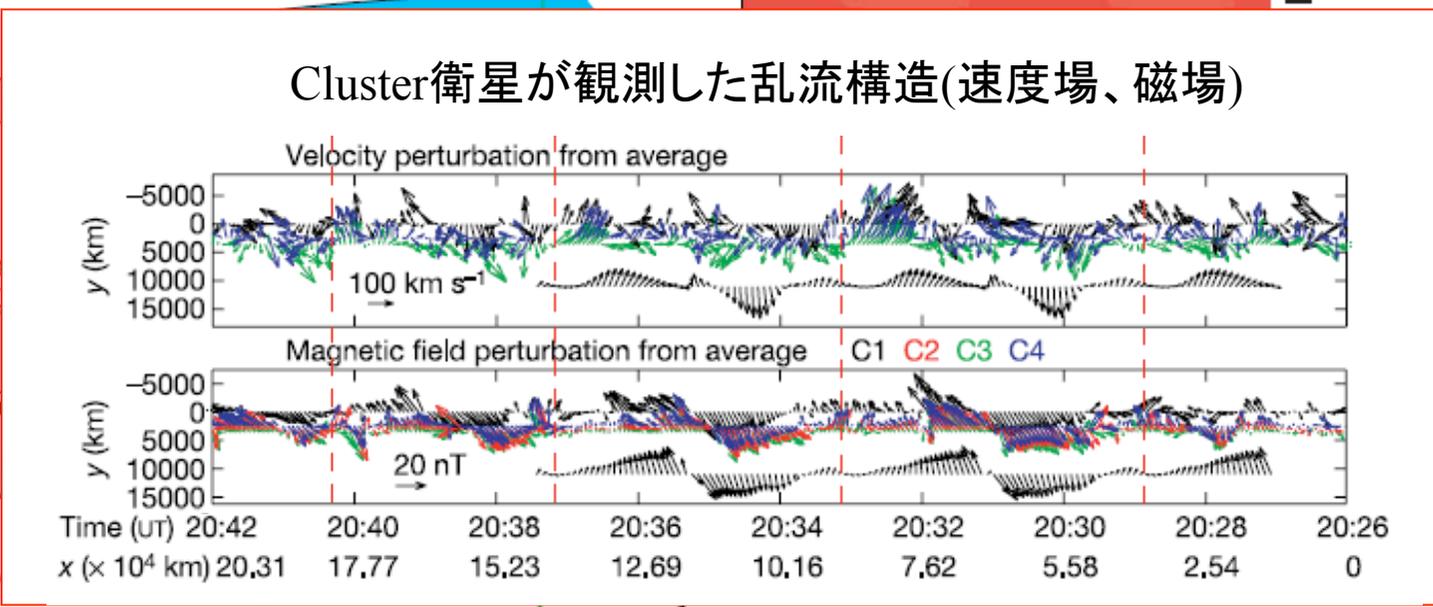
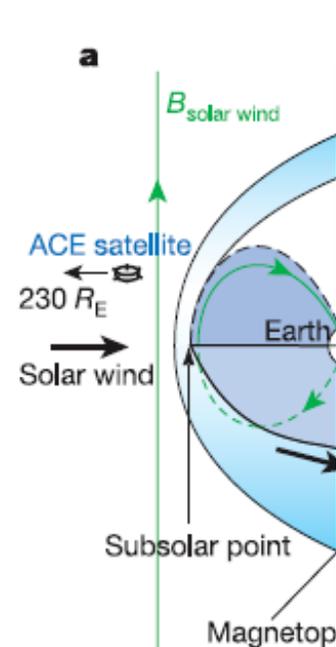
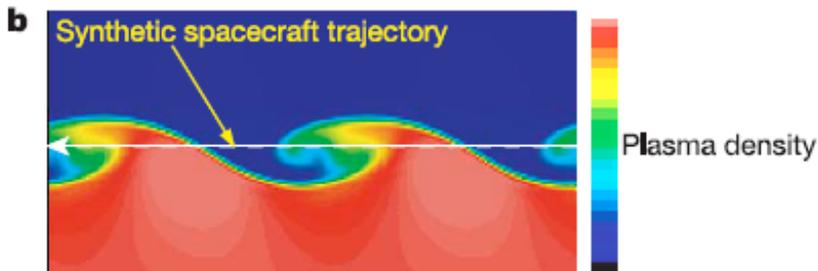
ここで c としたからである。
より現実的な $V_{\text{shear}} < c$ の場合には
加速は有限で止まる
(左下の図は $0.9c$, $0.8c$ の場合)

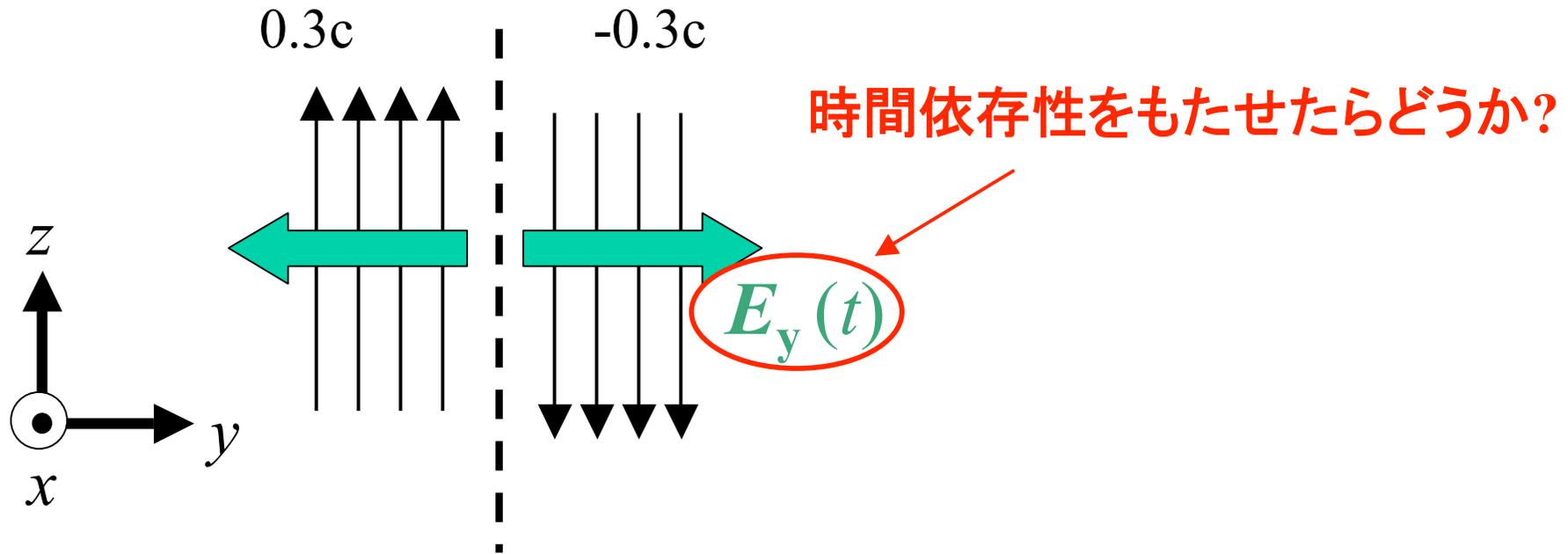




時間依存性をもたせたらどうか?

速度境界層(亜音速なら)は一般にKH-unstabl





Toy モデル

$$V_z(y) = V_s \left\{ 1 + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \cos(\omega k t + \alpha_k) \right\} * \tanh \left(\frac{y}{y_s} \right)$$

$$E_y(y) = -\frac{V_s B_0}{c} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \cos(\omega k t + \alpha_k) \right\} * \tanh \left(\frac{y}{y_s} \right)$$

$y_s > 0$: positive shear

$y_s < 0$: negative shear

電場 $E_y(y) = -\frac{V_s B_0}{c} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \cos(\omega k t + \alpha_k) \right\} * \tanh\left(\frac{y}{y_s}\right)$

のもとで、次の運動方程式を解く:

基本周波数 ω とその4倍高調波まで

“乱流”振幅の合計を1
(Bohm limitをイメージ)

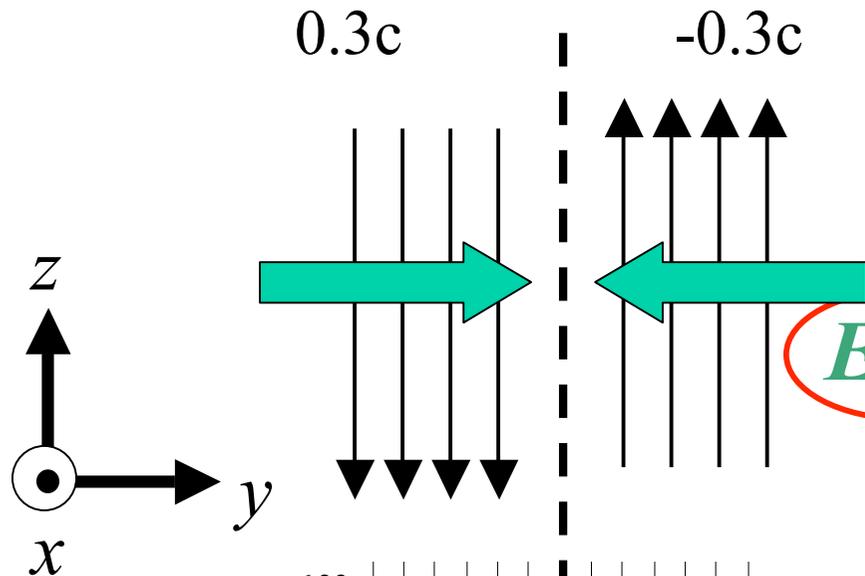
u_y 、 u_z を 4-velocity の y 、 z 成分、 $\Omega_B = \frac{eB}{mc}$ として、

$$\frac{du_y}{dt} = +\frac{\Omega_B}{\gamma} u_z + \frac{e}{mc} E_y(t, y)$$

$$\frac{du_z}{dt} = -\frac{\Omega_B}{\gamma} u_y$$

ここに $\gamma = (u_y^2 + u_z^2 + 1)^{1/2}$ 。

relativistic な場合、 γ を通して非線形性が入る。non-relativistic なるとき、 $\gamma \equiv 1$ となつて、主たる非線形性は消えてしまう。 $(E_y(t, y)$ の y 依存性を通して非線形性が入るがその効果は小さい。)

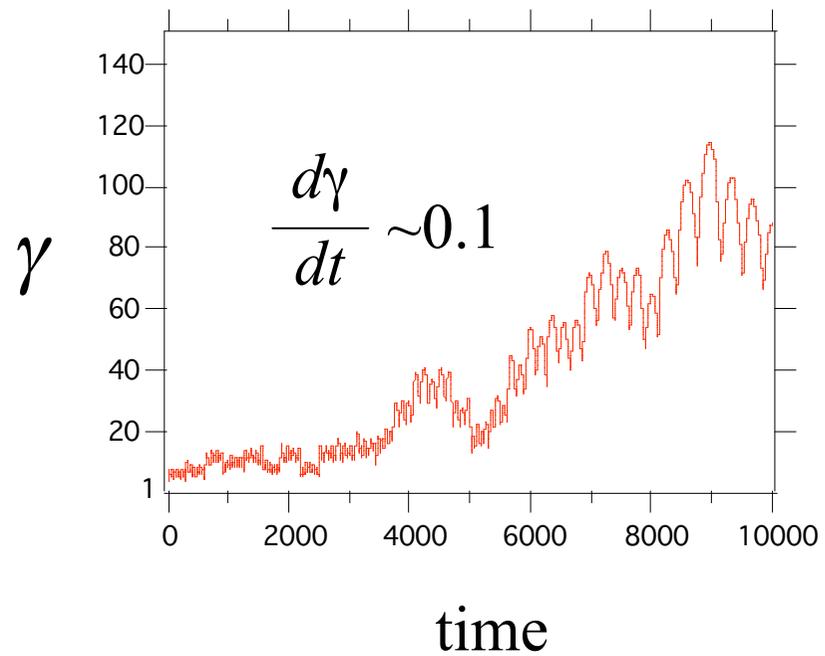
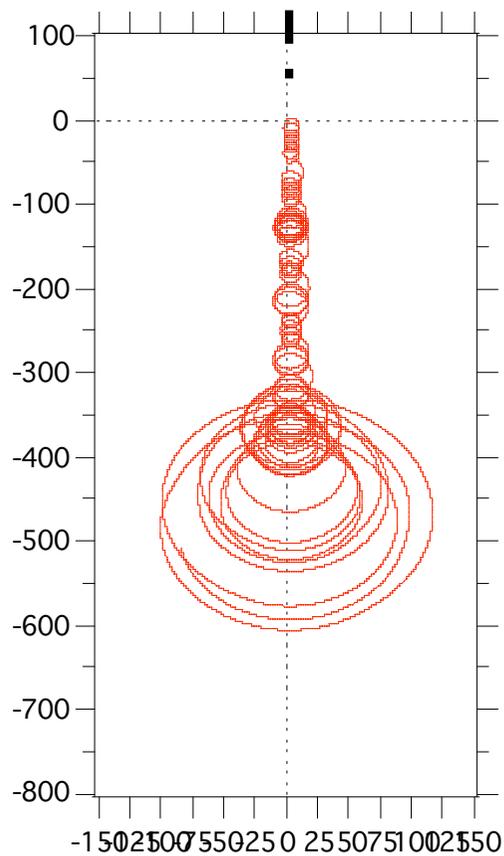


時間依存性をもたせたらどうか?

$E_y(t)$

DSA Bohm limit

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{3}{20} e\beta B \sim 0.1$$



Astrophysical Acceleration Processes

交流加速

○ Stochastic processes (Fermi processes)

$(v/c)^{**1}$ **Diffusive Shock Acceleration**

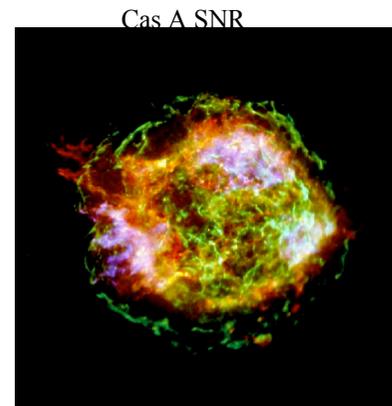
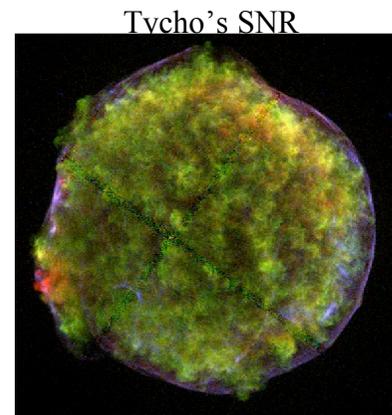
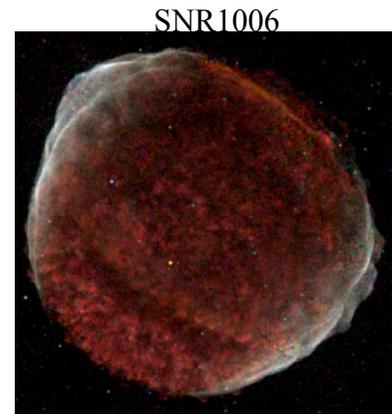
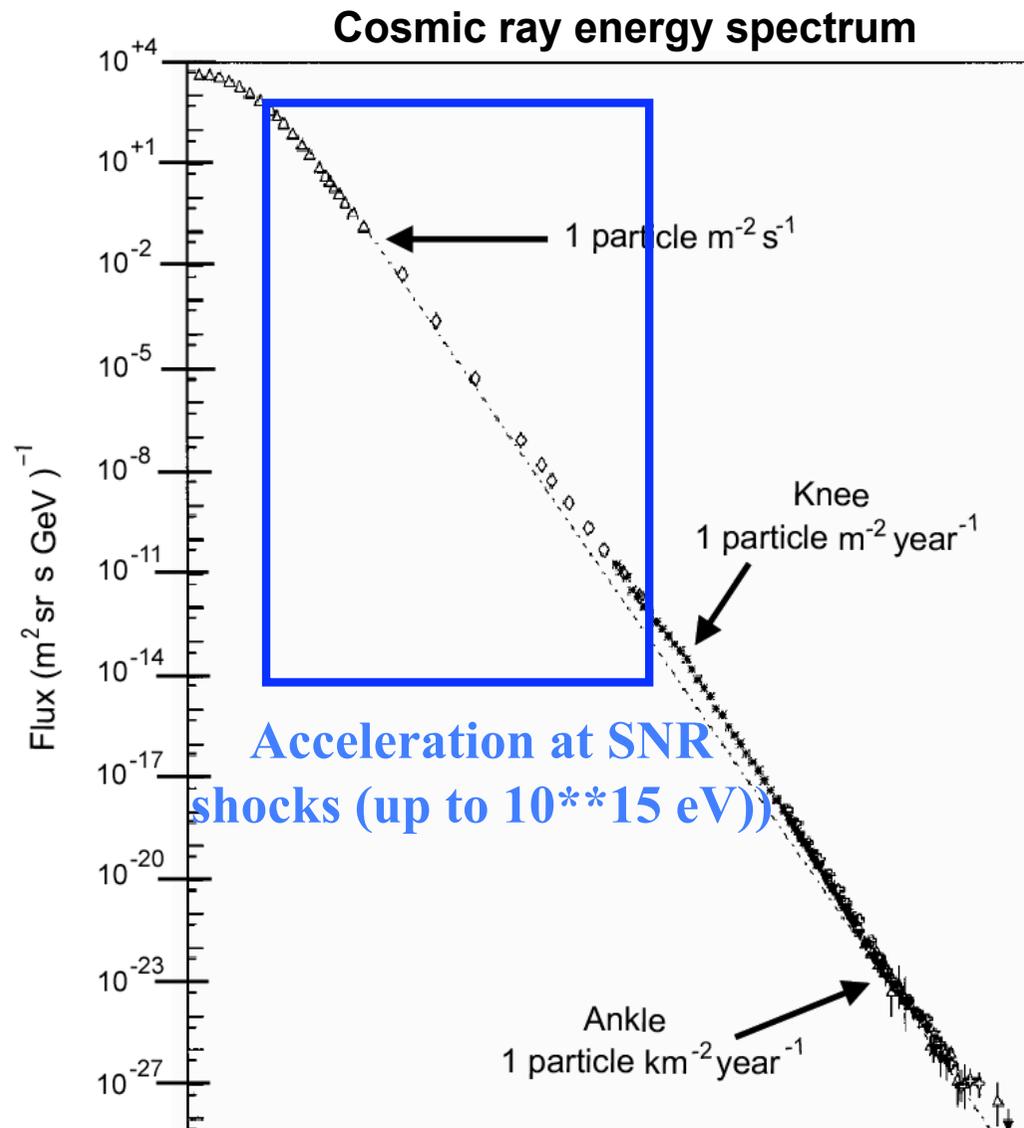
$(v/c)^{**2}$ Acceleration in MHD turbulence

○ unipolar inductor (magnetic rotators)

○ reconnection (solar flares, earth's magnetotail)

直流加速

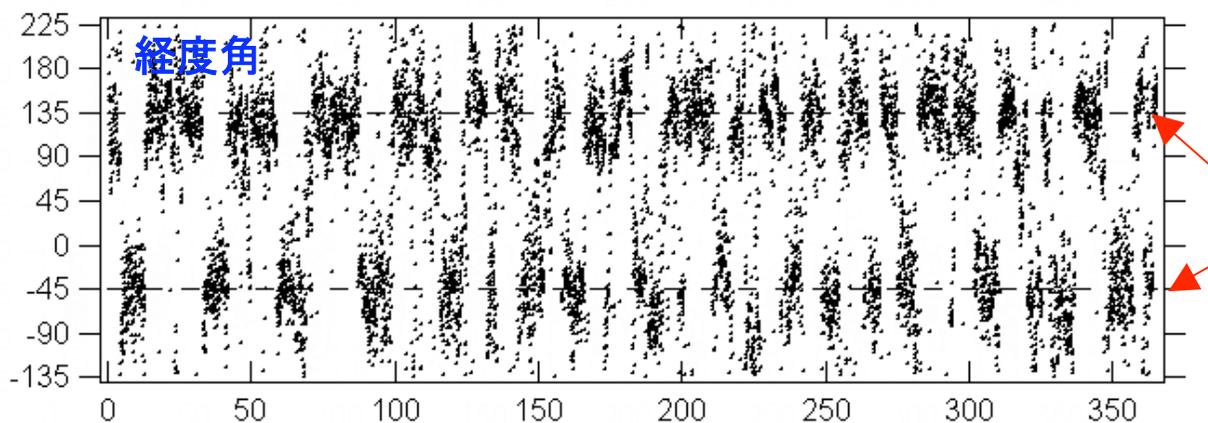
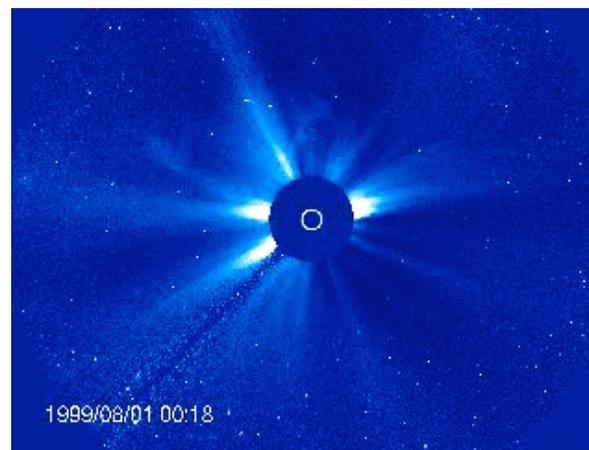
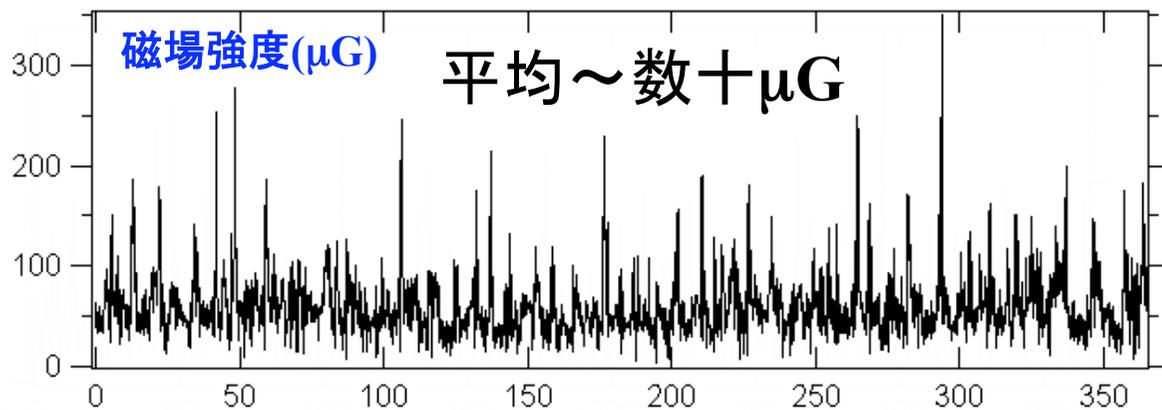
GCR($< \sim 10^{15}$ eV)については超新星衝撃波起源が定説)



宇宙線超新星衝撃波説のもとになった地球近傍での乱流・衝撃波加速の実測を見直しておく。

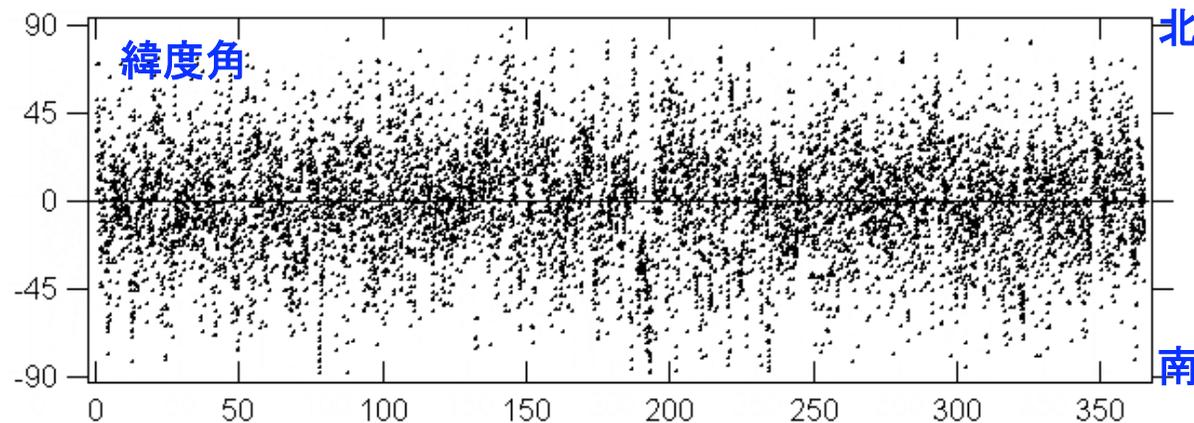
太陽風内の磁場擾乱 at 1 AU

SOHO 1998.8 1ヶ月間



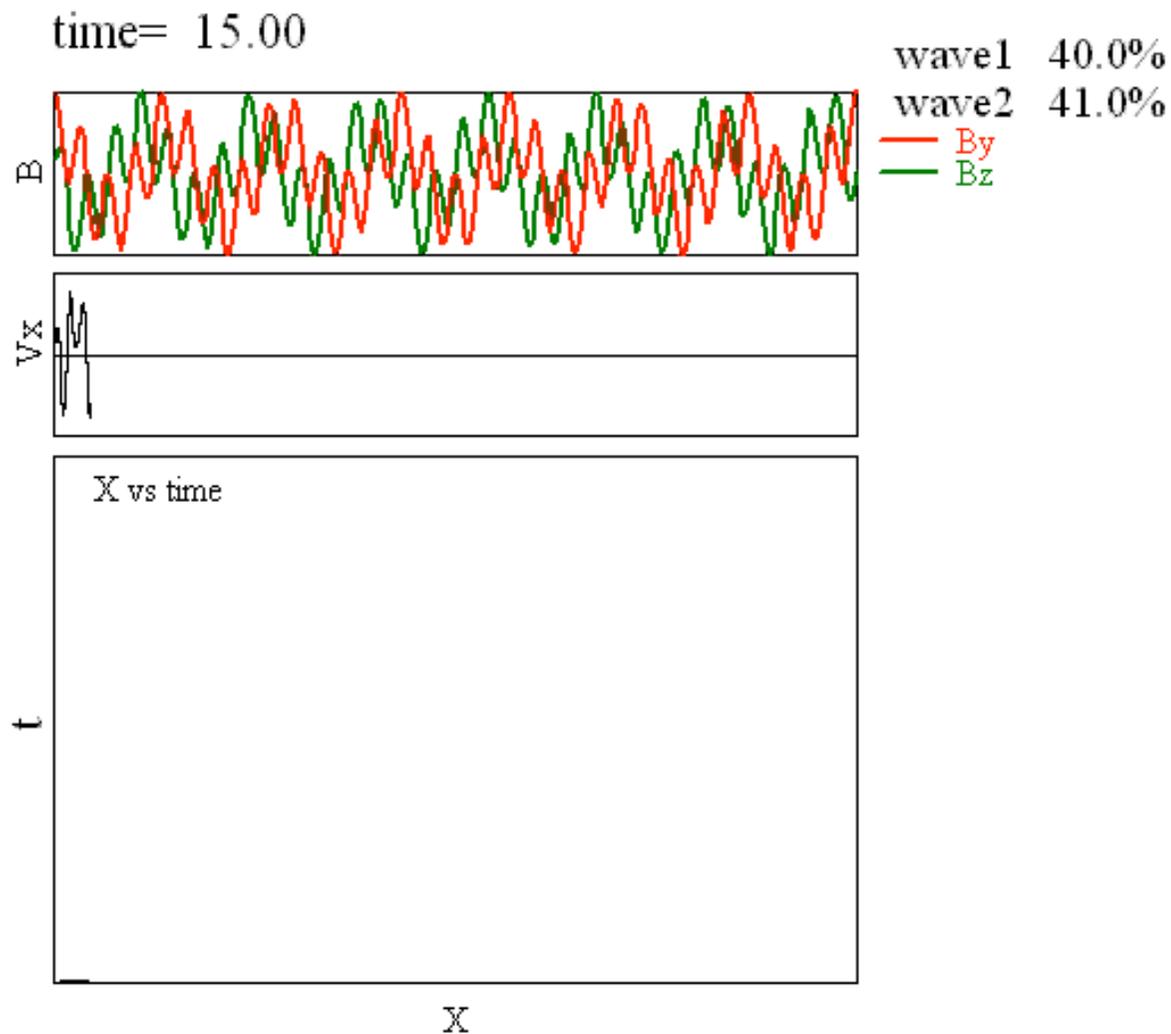
Parker's spiral angles
(135 and -45 deg)

$\eta = (B/\delta B)^2 \sim 10$ 程度
の乱流状態



1999年1月1日～12月31日
1時間平均値のプロット

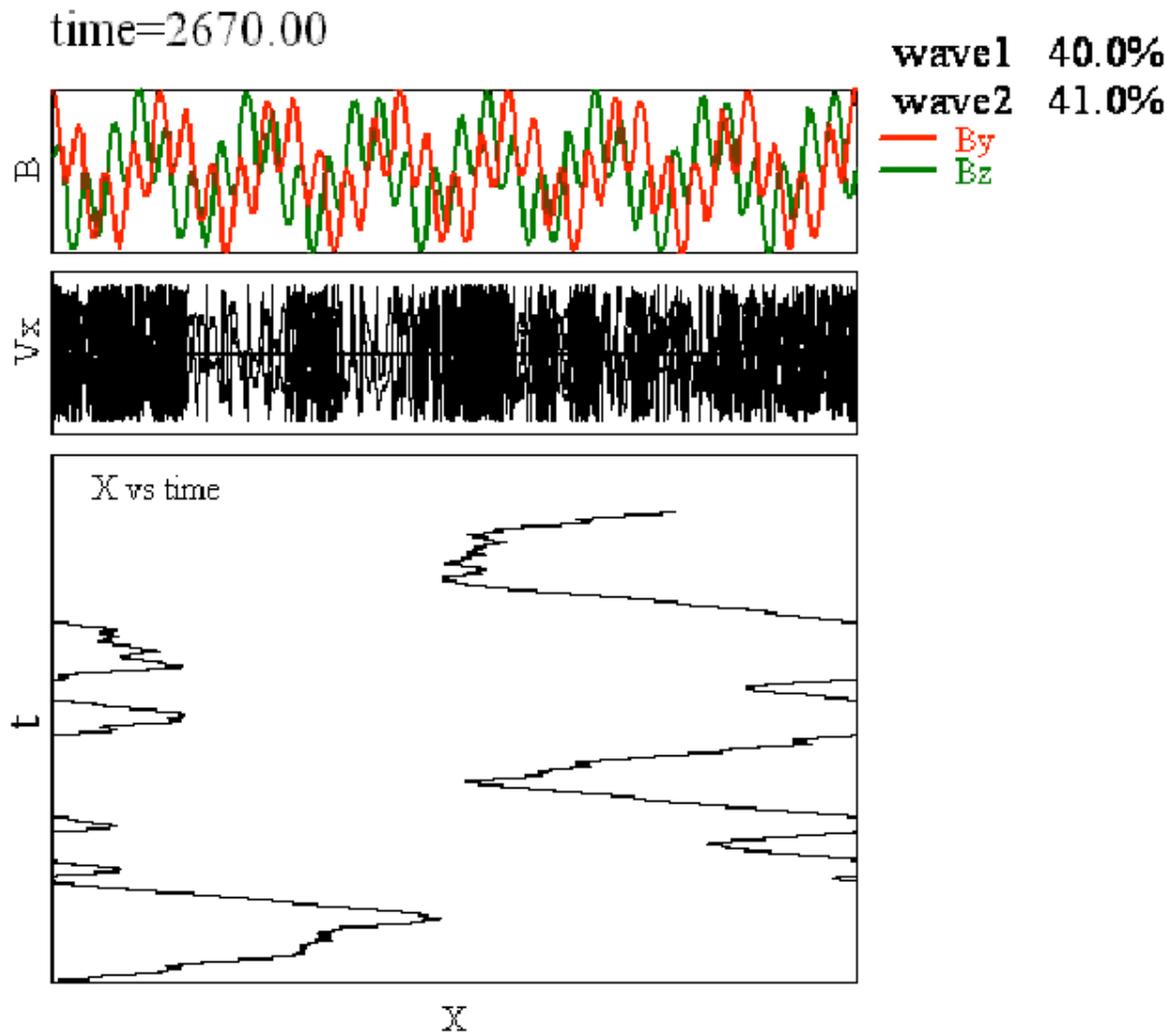
Multi-waves=40+41% of B_0 / Nonlinear / resonant



toy model乱流:

粒子を注入して運動を追跡。系は周期的として左右の端をつないでいる。(波は左から右へ伝播。波の comoving frame で粒子軌道を描いてある。)

Multi-waves=40+41% of B_0 / Nonlinear / resonant



toy model乱流:

粒子を注入して運動を追跡。系は周期的として左右の端をつないである。(波は左から右へ伝播。波の comoving frameで粒子軌道を描いてある。)

粒子は乱流内をrandom walk



mean free path $\lambda \sim \eta \rho_c$

Bohm parameter

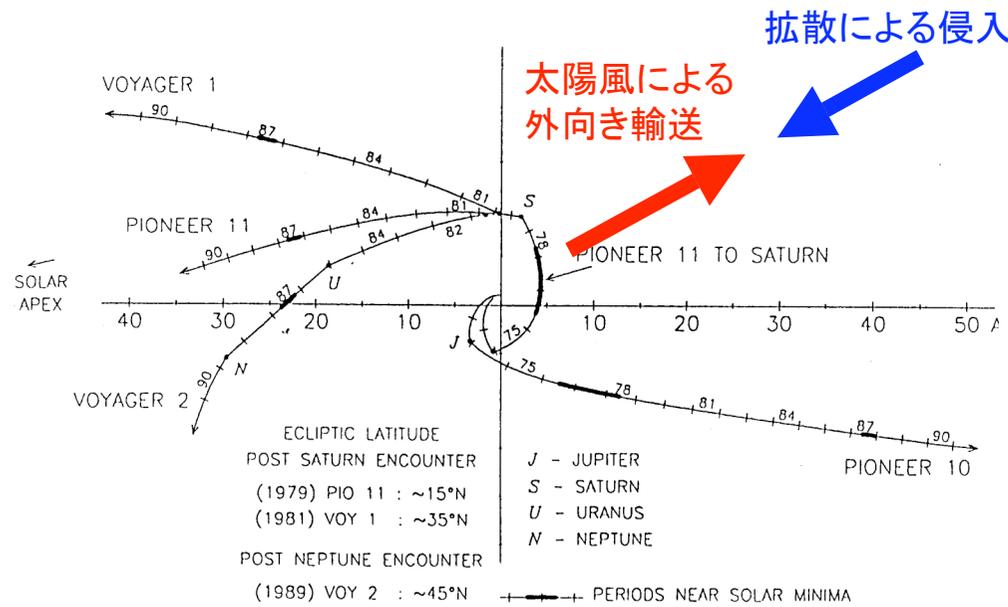
強い乱流なら $\eta \sim 1$

(Bohm limit)

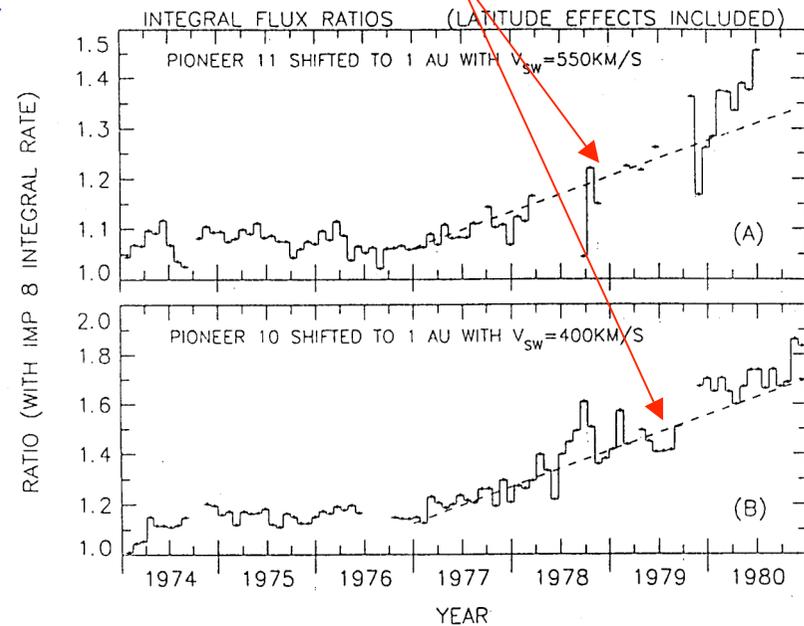
弱い乱流なら $\eta \gg 1$



太陽系に侵入するGCRの空間勾配



106MeV protons 2%/AU



$$f_{cr} = f_{cr,\infty} \exp \left\{ \frac{V_{sw}}{D} (R - R_{max}) \right\}$$

$$V_{sw}/D = 2\%/AU \text{ より } D = 3 \times 10^{22} \text{ cm}^2/\text{s} = (1/3) \lambda V$$

$$\lambda = 6.4 \times 10^{12} \text{ cm} \sim 30 \rho_c$$

従って $\eta \sim 30$ である。

衝撃波加速の標準理論: prediction for E_{\max}

The energy gain rate for particles can be written

$$\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{u_1 - u_2}{3} \frac{1}{\left\{ \frac{D_1}{u_1} + \frac{D_2}{u_2} \right\}}$$

η (Bohm parameter)

$= \lambda / \rho_g$ (mean free path / gyro radius)

$\sim (B / \delta B)^2$ (measure of turbulence intensity)

where $D_{1,2}$: diffusion coefficients (1=upstream; 2=downstream)

Let us write $D = \eta D_B$ with $D_B = (1/3) \rho_g c = (1/3) Ec / ZeB$ (D in the Bohm limit).

Assuming $D_1/u_1 = D_2/u_2$, $\eta_1 = \eta_2 = \eta$, we get

$$\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{3}{8\eta} \frac{ZeB_1 u_1^2}{Ec}$$

Namely,

$$\frac{dE}{dt} = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 u_1$$

If B_1 and β_1 are constant, we get

$$E_{\max} = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 u_1 t = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 L$$

where we define $\beta_1 = u_1/c$ and $L = u_1 t$.

Shock propagation distance

衝撃波加速の標準理論: prediction for E_{\max}

The energy gain rate for particles can be written

$$\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{u_1 - u_2}{3} \frac{1}{\left\{ \frac{D_1}{u_1} + \frac{D_2}{u_2} \right\}}$$

η (Bohm parameter)

$= \lambda / \rho_g$ (mean free path / gyro radius)

$\sim (B / \delta B)^2$ (measure of turbulence intensity)

where $D_{1,2}$: diffusion coefficients (1=upstream; 2=downstream)

Let us write $D = \eta D_B$ with $D_B = (1/3) \rho_g c = (1/3) Ec / ZeB$ (D in the Bohm limit).

Assuming $D_1/u_1 = D_2/u_2$, $\eta_1 = \eta_2 = \eta$, we get

$$\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{3}{8\eta} \frac{ZeB_1 u_1^2}{Ec}$$

Namely,

$$\frac{dE}{dt} = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 u_1$$

$D_1 = D_2$ とすれば $3/(20\eta)$

If B_1 and β_1 are constant, we get

$$E_{\max} = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 u_1 t = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 L$$

where we define $\beta_1 = u_1/c$ and $L = u_1 t$.

Shock propagation distance

大規模な太陽面爆発(フレア)に伴って発生した惑星間空間衝撃波における粒子加速に適用してみると、

$$E_{\max} = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 u_1 t = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 L$$

先にGCR勾配から求めた ~ 30 より小さな値を使った

$\eta = 10$, $Z=1$, $\beta_1=1/300$ (衝撃波速度 $c\beta_1=1000\text{km/s}$)
 $B_1=100\mu\text{G}$, $L=1\text{AU}$ として、 $E_{\max} \sim 60\text{ MeV}$

地球付近への衝撃波到着に伴って観測される陽子の代表的エネルギーを説明

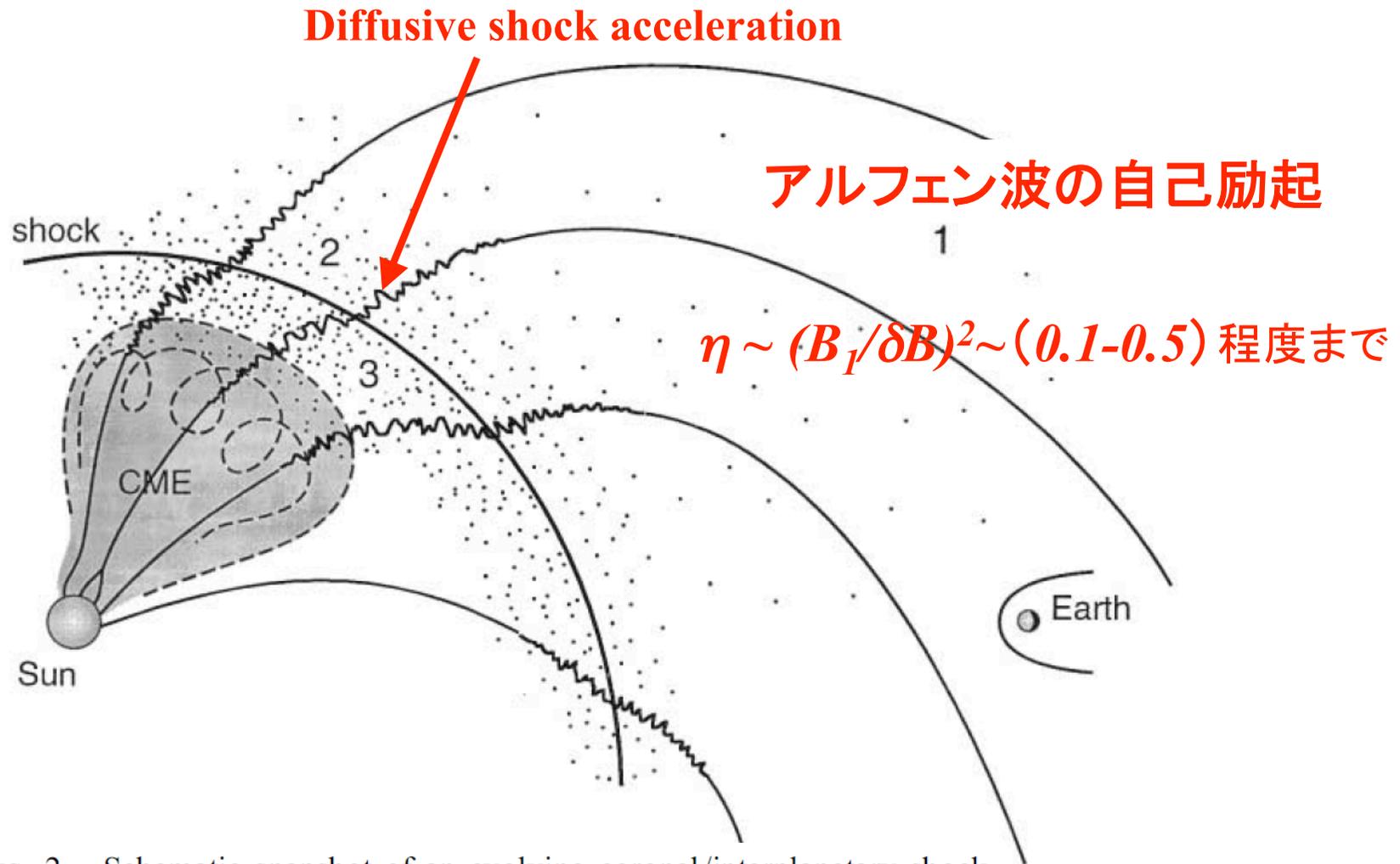
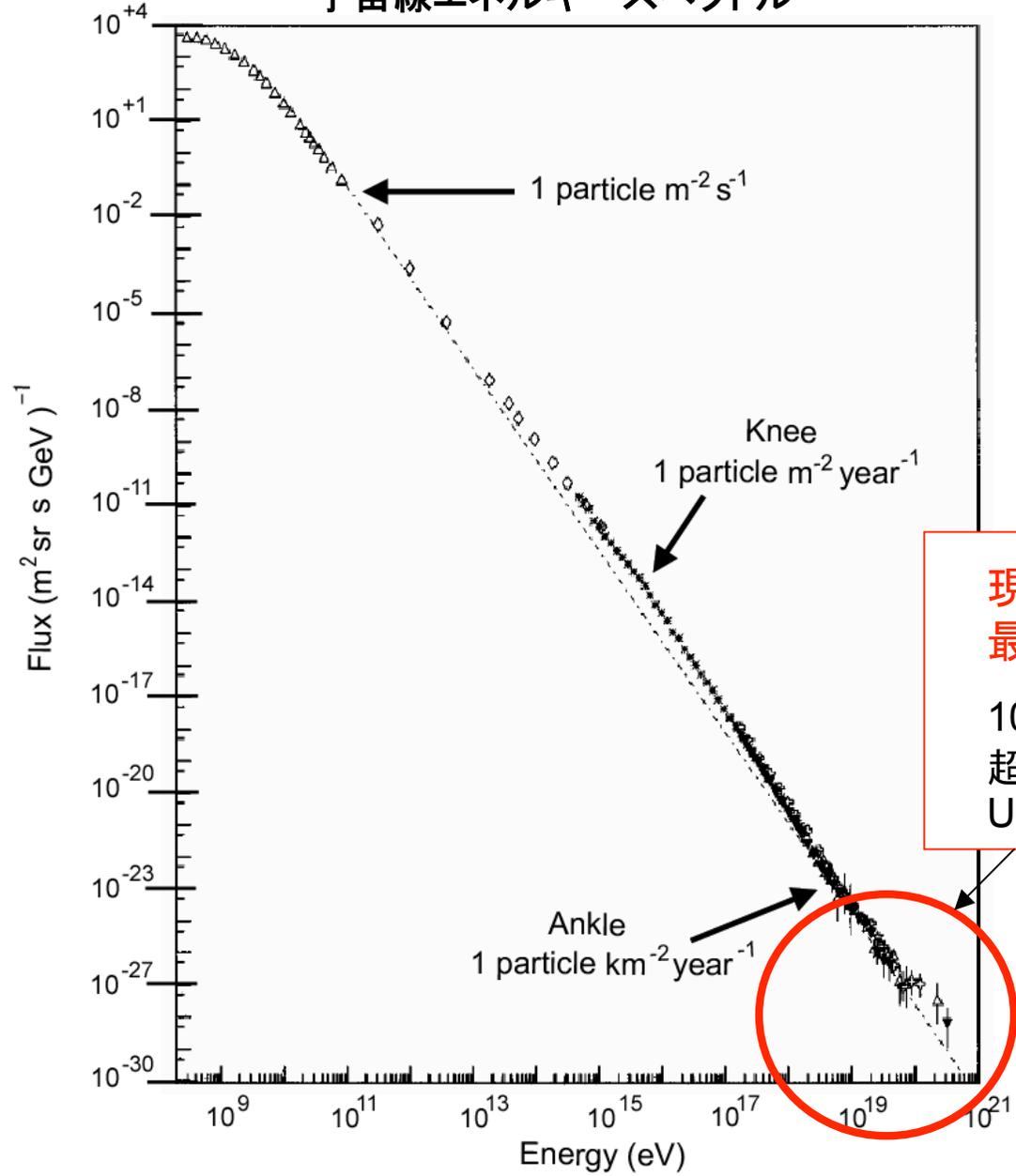


FIG. 2.—Schematic snapshot of an evolving coronal/interplanetary shock driven by a CME. Accelerated ions are denoted by dots. Magnetic field lines are shown, with wiggles denoting magnetic fluctuations. The spatial domain accessible to the ions is divided into solar wind (1), a proton-excited turbulent sheath upstream of the shock (2), and the turbulent shock-heated solar wind downstream of the shock (3).

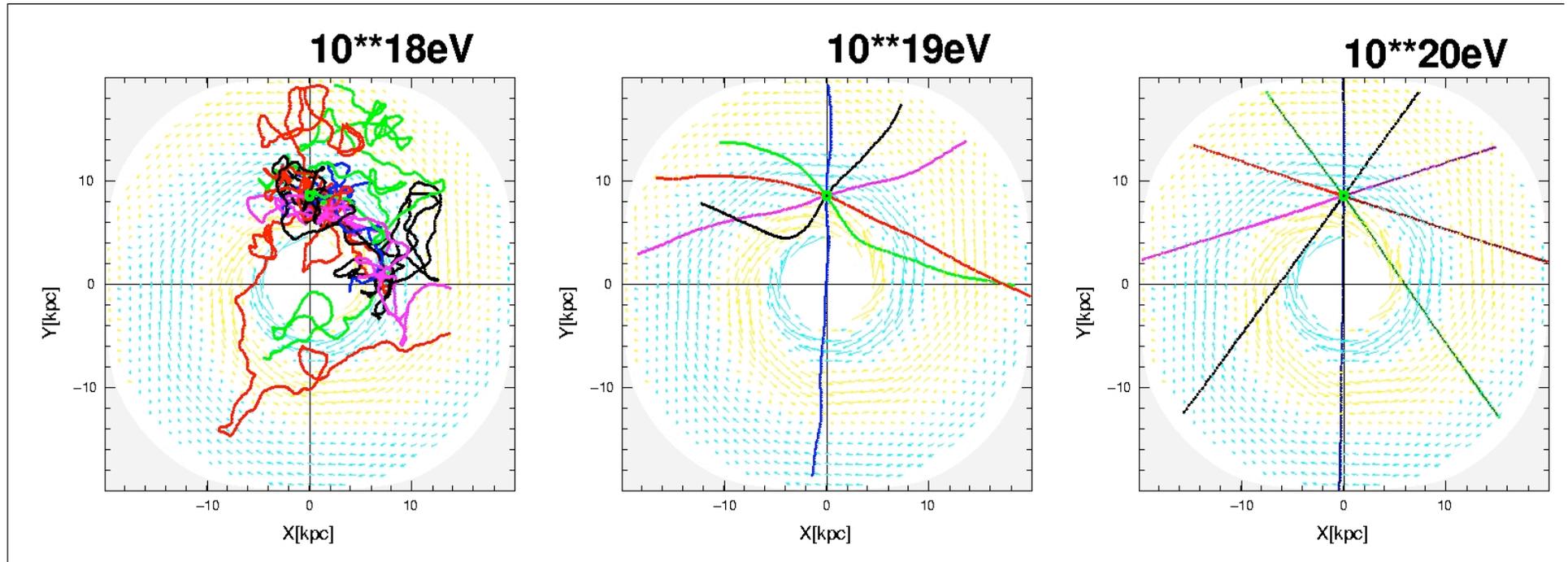
宇宙線エネルギースペクトル



現在の宇宙物理学の
最大の謎

10²⁰eV(=16J)に達する
超高エネルギー宇宙線
UHECRの存在

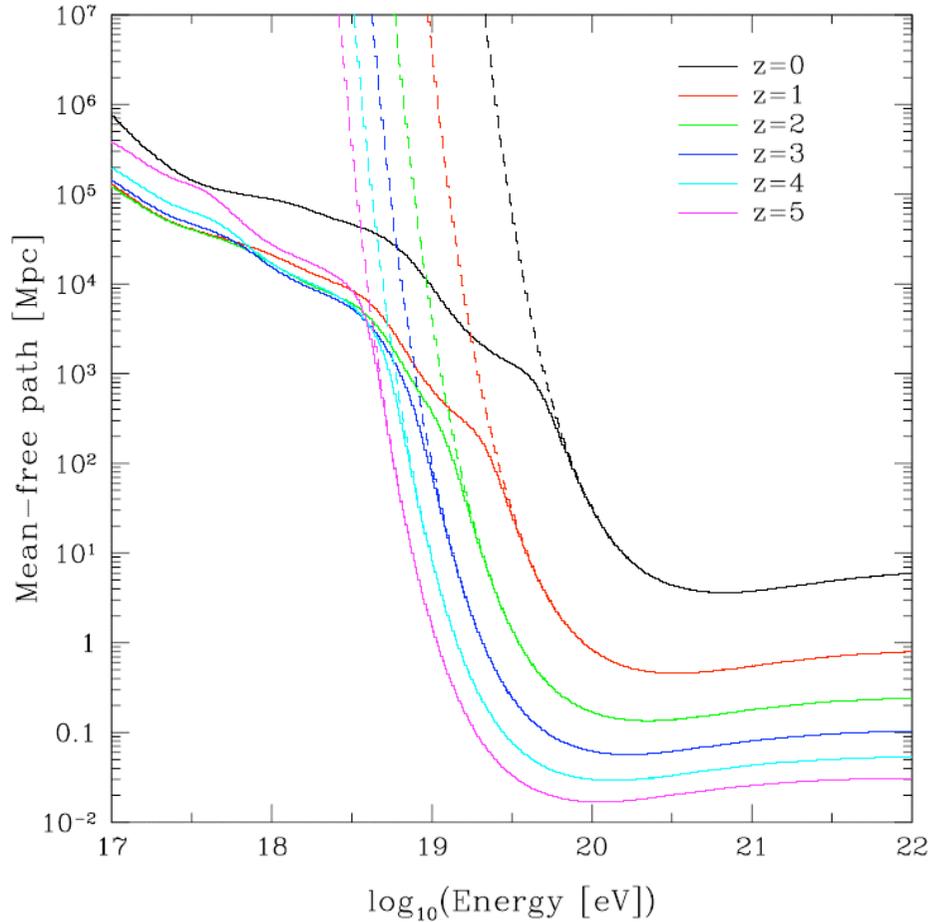
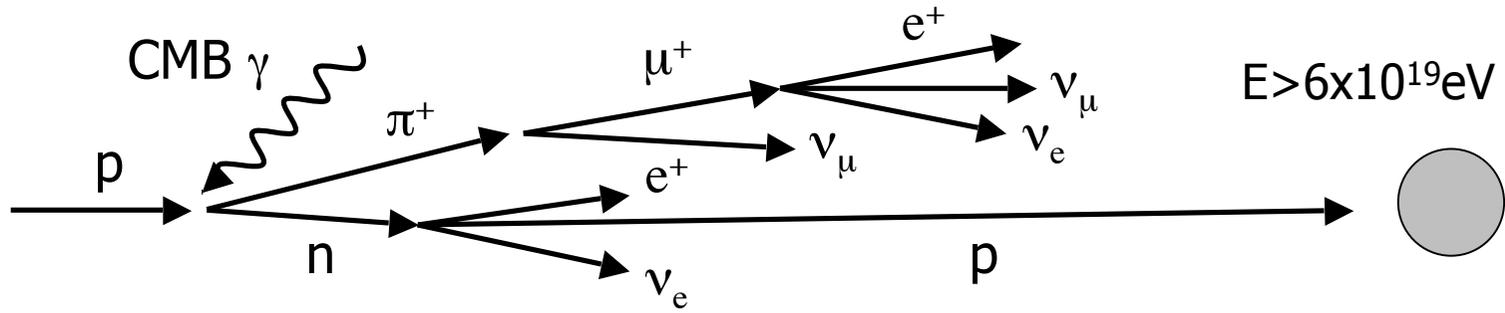
Cosmic Ray Propagation in our Galaxy



UHECR $> \sim 10^{19}\text{eV}$ は銀河系内に閉じ込められない
→ extragalactic origin
(ただし、電荷数=1の陽子の場合)

最高エネルギー宇宙線の起源を論ずるにあたってのポイント(2)

最高エネルギー宇宙線で見える宇宙はせいぜい近傍75Mpc

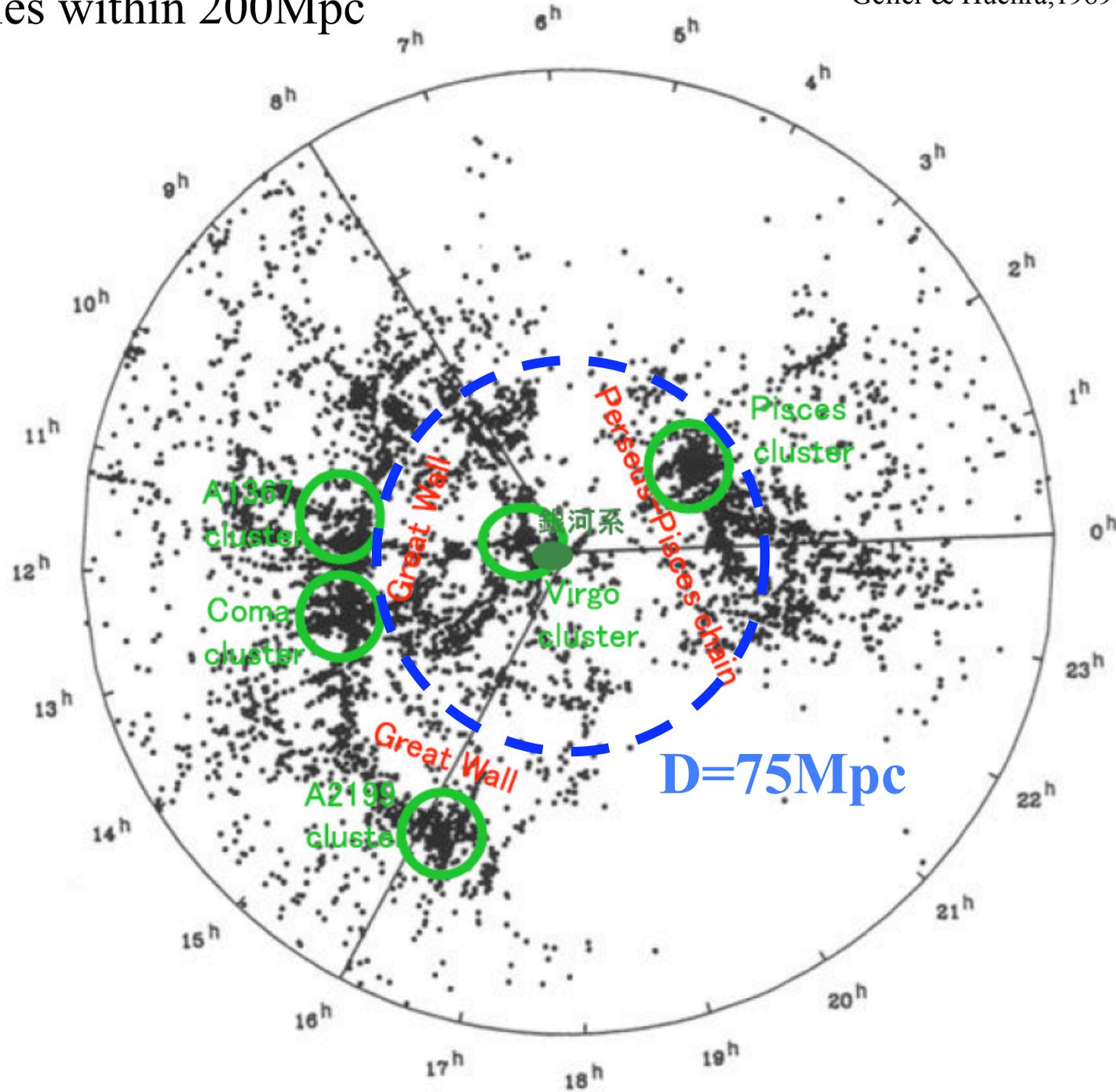


GZK Mechanism

(Takami et al. 2007)

Galaxies within 200Mpc

Geller & Huchra, 1989, Science 246, 897-



Diffusive shock acceleration: prediction for E_{\max}

The energy gain rate for particles can be written

$$\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{u_1 - u_2}{3} \frac{1}{\left\{ \frac{D_1}{u_1} + \frac{D_2}{u_2} \right\}}$$

η (Bohm parameter)

$= \lambda / \rho_g$ (mean free path / gyro radius)

$\sim (B / \delta B)^2$ (measure of turbulence intensity)

where $D_{1,2}$: diffusion coefficients (1=upstream; 2=downstream)

Let us write $D = \eta D_B$ with $D_B = (1/3) \rho_g c = (1/3) Ec / ZeB$ (D in the Bohm limit).

Assuming $D_1/u_1 = D_2/u_2$, $\eta_1 = \eta_2 = \eta$, we get

$$\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{3}{8\eta} \frac{ZeB_1 u_1^2}{Ec}$$

Namely,

$$\frac{dE}{dt} = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 u_1$$

If B_1 and β_1 are constant, we get

$$E_{\max} = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 u_1 t = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 L$$

where we define $\beta_1 = u_1/c$ and $L = u_1 t$.

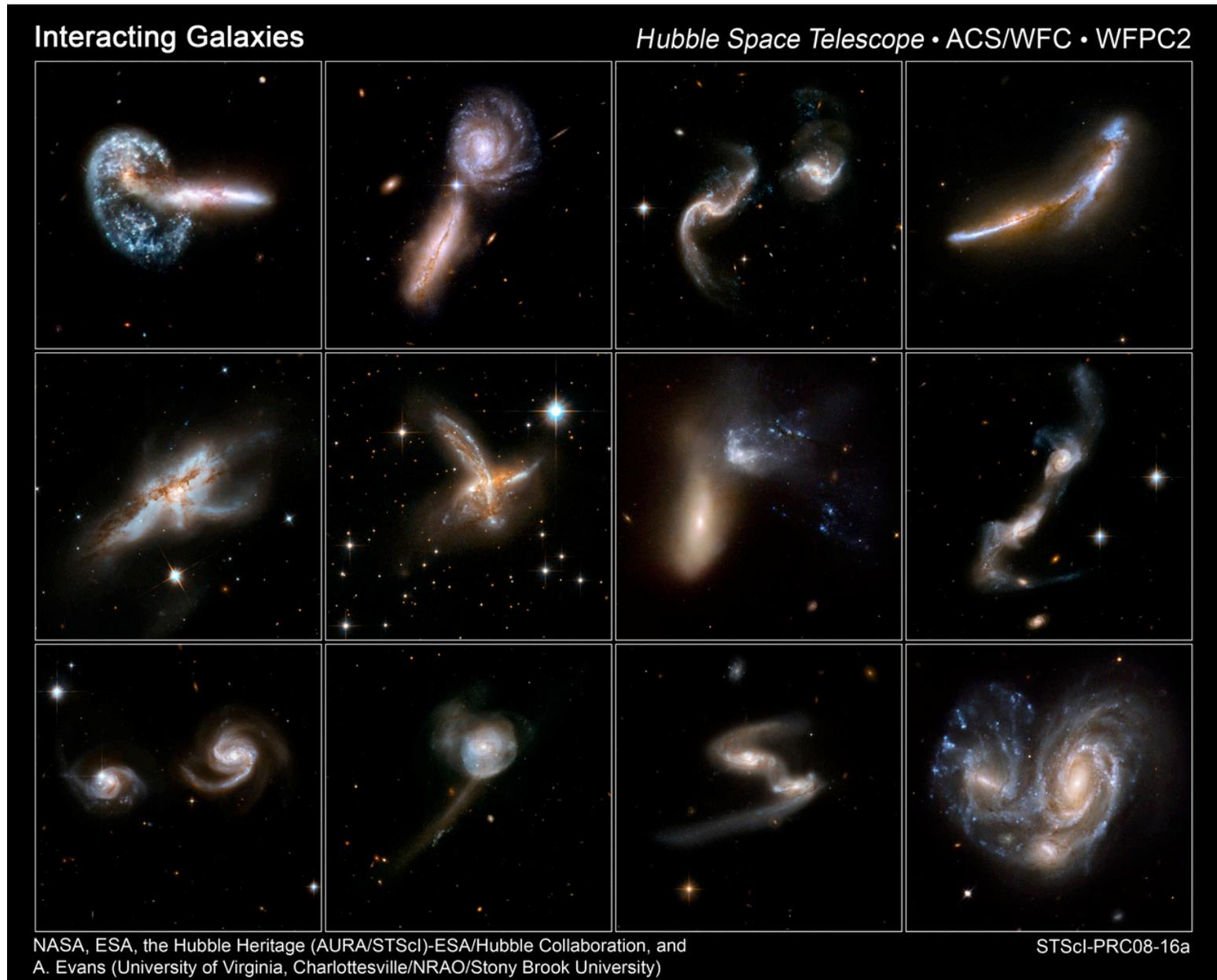
Shock propagation distance

$D_1 = D_2$ とすれば $3/(20\eta)$

L が大きいと加速に有利

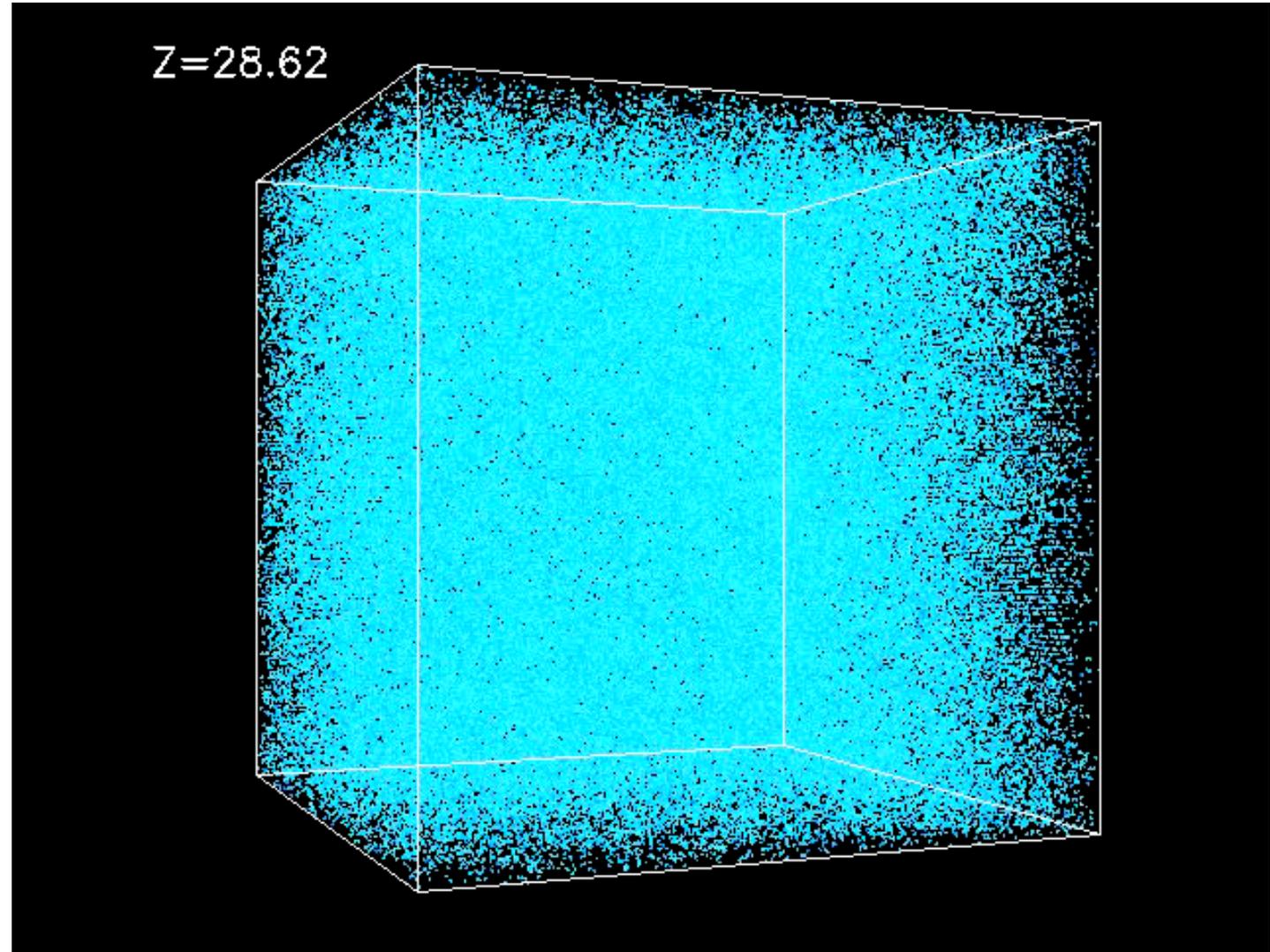
Lが大きいと加速に有利

Galaxies are colliding ...need cosmological time scale



Cosmological structure formation

	epoch
$z=28$...	$t \sim -13$ Gy
2 ...	-11.4 Gy
1 ...	-8.2 Gy
0.5 ...	-5.2 Gy
0.1 ...	-1.3 Gy
0 ...	present

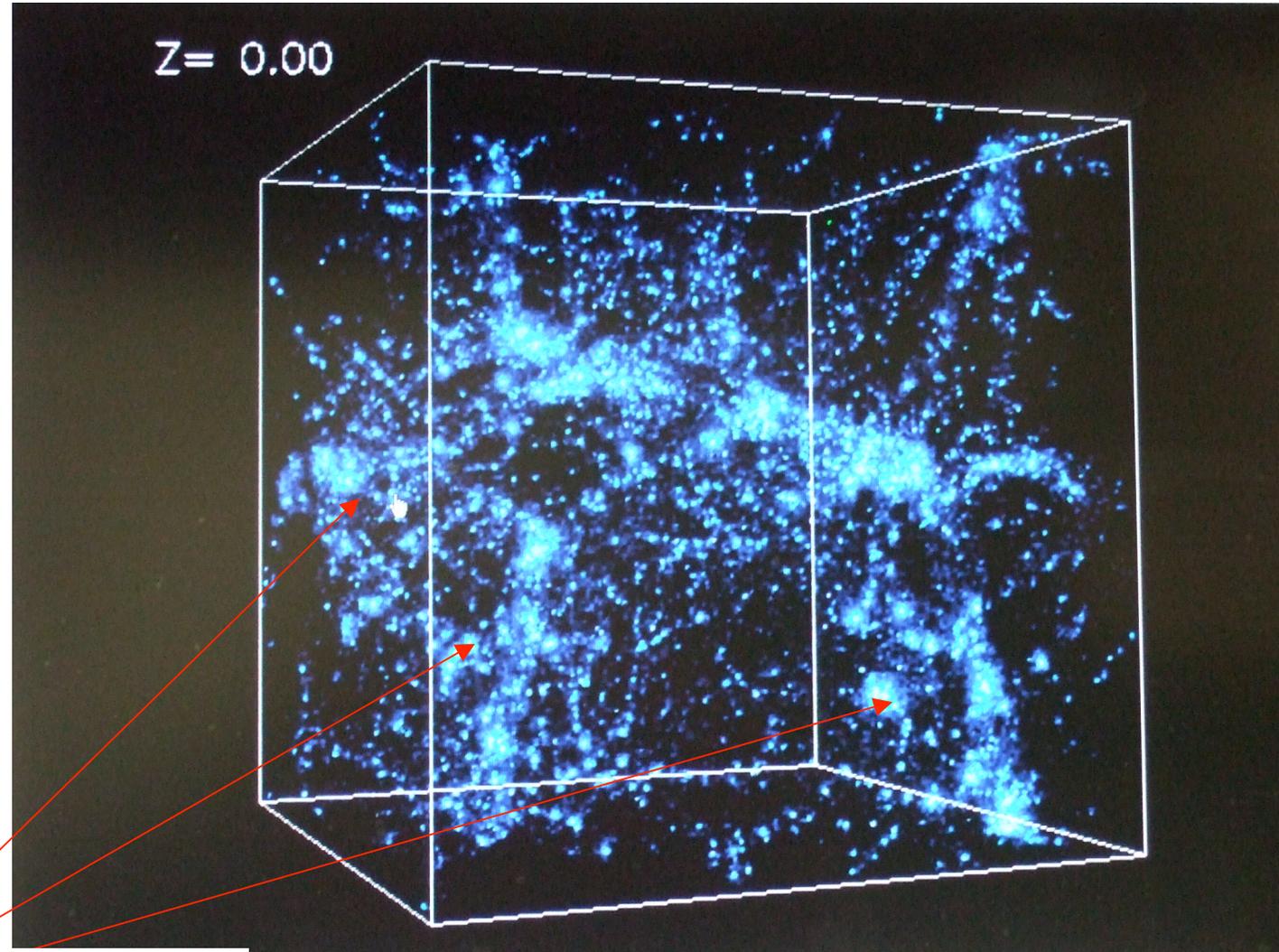


Scale size=60Mpc

Simulations were performed at the National Center for Supercomputer Applications by Andrey Kravtsov (The University of Chicago) and Anatoly Klypin (New Mexico State University). Visualizations by Andrey Kravtsov.

Cosmological structure formation

	epoch
$z=28$...	$t \sim -13$ Gy
2 ...	-11.4 Gy
1 ...	-8.2 Gy
0.5 ...	-5.2 Gy
0.1 ...	-1.3 Gy
0 ...	present



many G-G collisions
→ formation of shocks
(speed= 10^1 - 10^3 km/s)



Scale size=60Mpc

Simulations were performed at the National Center for Supercomputer Applications by Andrey Kravtsov (The University of Chicago) and Anatoly Klypin (New Mexico State University). Visualizations by Andrey Kravtsov.

galaxy cluster内に形成された衝撃波によるUHECR加速の議論

L が大きいと加速に有利

(Inoue et al., ApJ 628, L9-, 2005)

$E_{max} = (3/20\eta) Ze\beta B L = (3/20\eta) ZeB V_s^2 t_{acc}/c$ を書き直して、

$$t_{acc} = \frac{20 \eta r_g c}{3 V_s^2}$$

$$\simeq 4.4 \times 10^8 \eta \frac{E_p/Z}{10^{18} \text{ eV}} \left(\frac{B_s}{1 \mu\text{G}} \right)^{-1} \left(\frac{V_s}{2200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-2} \text{ yr}$$

衝撃波速度 $\sim 2200\text{km/s}$ で4億年程度で $10^{18}\text{eV}/Z$ への加速
(加速領域の空間スケールは $t_{acc} V_s \sim 1\text{Mpc}$ 位)

プロトンが 10^{18}eV まで加速されるなら、鉄($Z=26$)は $>10^{19}\text{eV}$ まで加速可能と考える。

UHECRがプロトンなら galaxy cluster内での加速説は難しい

Shock加速 $E_{\max} = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 u_1 t = \frac{3}{8\eta} Ze\beta_1 B_1 L$

衝撃波速度 $c\beta_1$ が大きいと加速に有利

相対論的衝撃波による粒子加速 (a private list, not intended to be exhaustive)

Peacock (1981) MNRAS **196**, 135-

Kirk and Schneider (1987) ApJ **315**, 425-; **322**, 256-

Heavens and Drury (1988) MNRAS **235**, 997-

Kirk and Heavens (1989) MNRAS **239**, 995-

Quenby and Lieu (1989) Nature **342**, 654-

Begelman and Kirk (1990) ApJ **353**, 66-

Ellison et al. (1990) ApJ **360**, 702-

Vietri (1995) ApJ 453, 883- “Acc. of UHECR in GRB” など

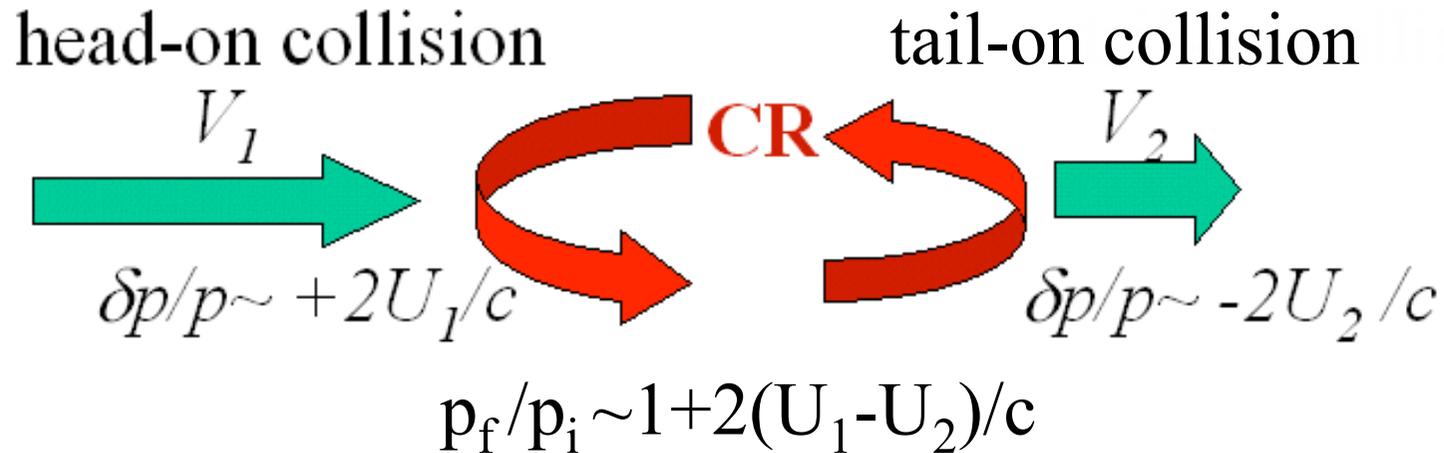
Bednarz and Ostrowski (1998) PRL **80**, 3911-

Gallant and Acterberg (1999) MNRAS **305**, L6-

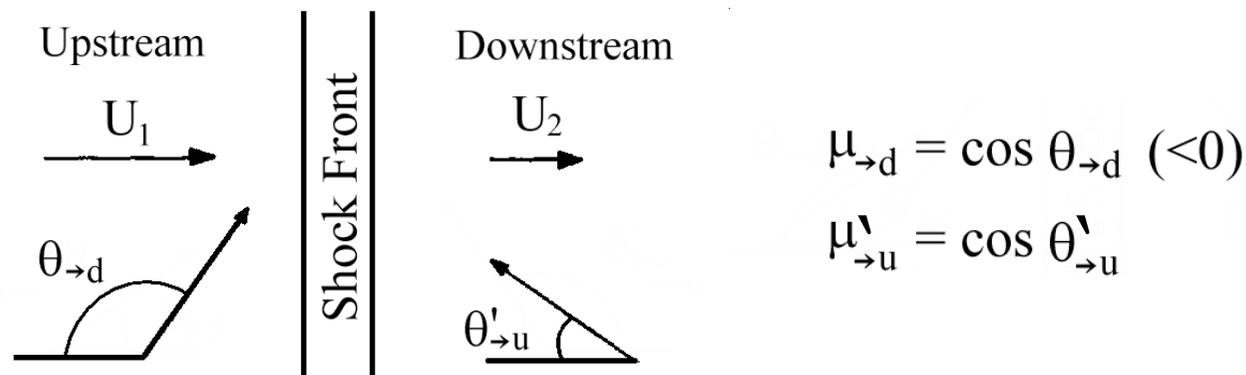
Kirk et al. (2000) ApJ **542**, 235-

Meli and Quenby (2001) 27th ICRC **OG**, 2026-, 2742-

非相対論的な場合の加速素過程



相対論的な場合の加速素過程



$$\frac{E_f}{E_i} = \Gamma_r^2 (1 - \beta_r \mu_{\rightarrow d}) (1 + \beta_r \mu'_{\rightarrow u})$$

where β_r is $(U_1 - U_2)/c$, and Γ_r is the corresponding Lorentz factor

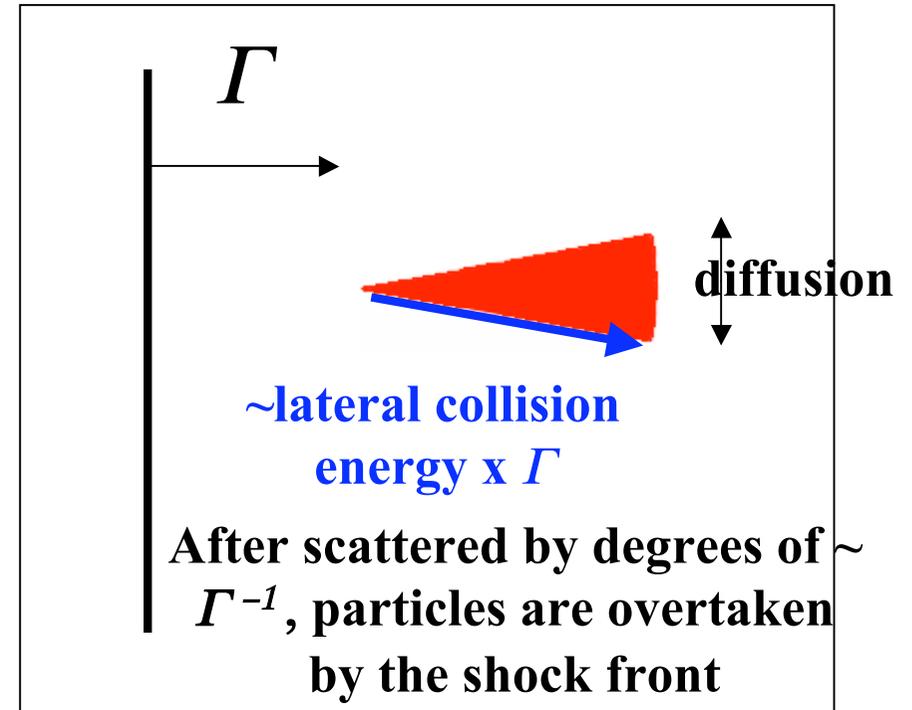
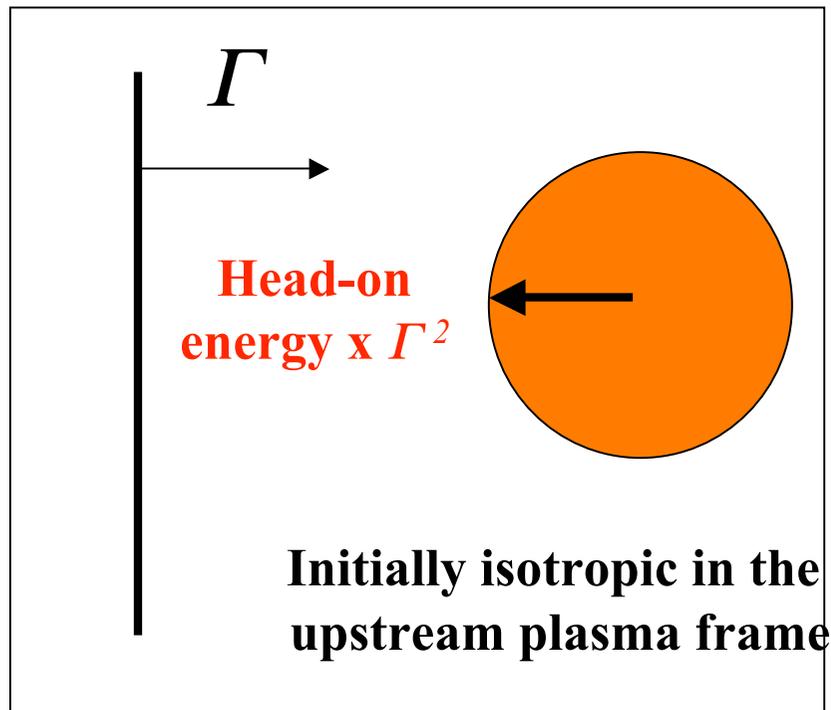
Γ^2 effect: further consideration

Gallant and Ackerberg, 1999

$$\frac{E_f}{E_i} = \Gamma_r^2 (1 - \beta_r \mu_{\rightarrow d}) (1 + \beta_r \mu'_{\rightarrow u})$$

Γ^2 effect: only at the first encounter with the shock

relativistic beaming $\sim \Gamma^{-1}$



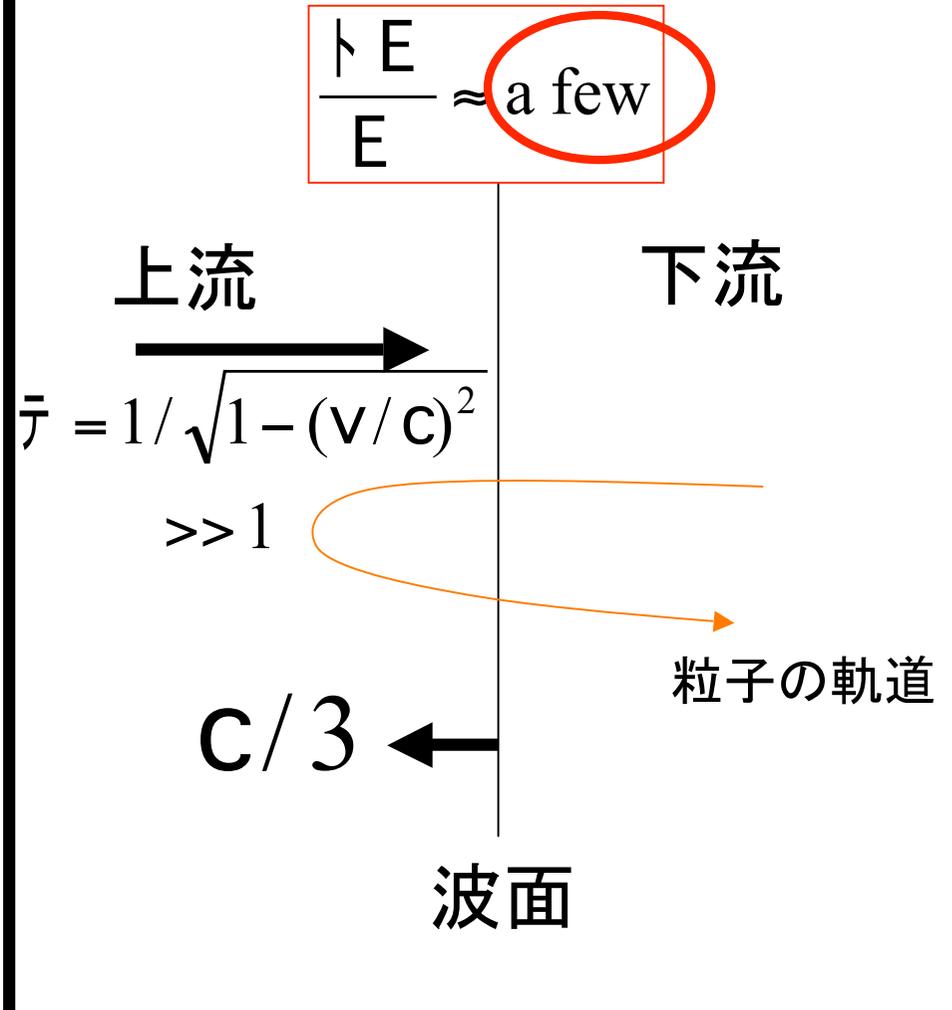
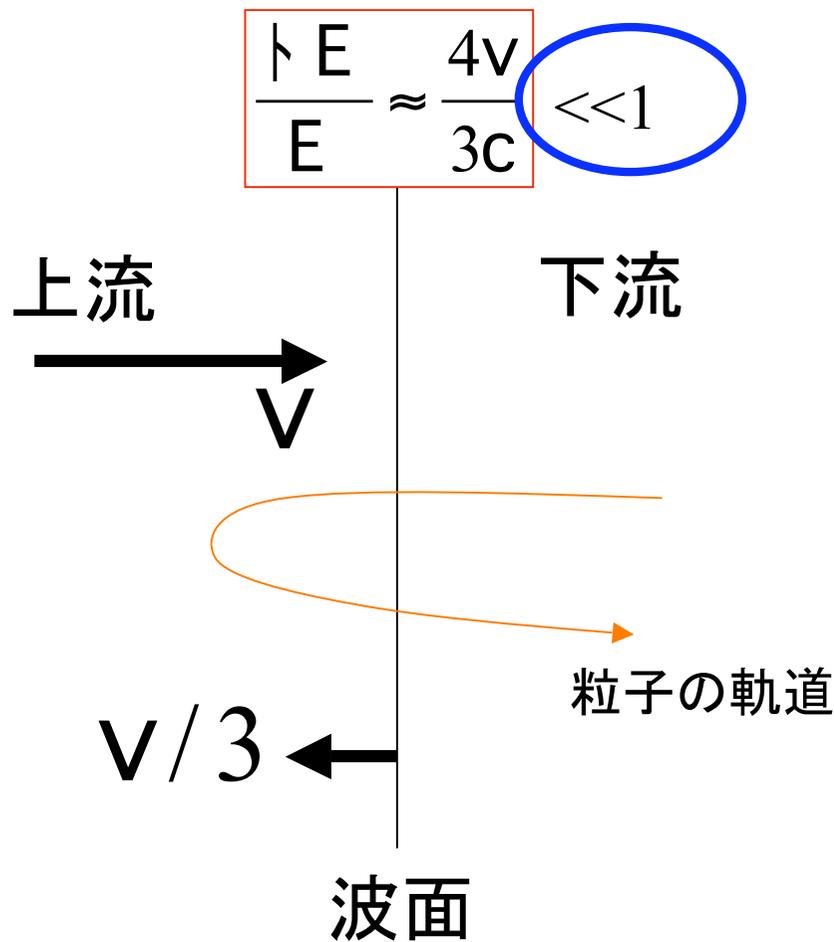
AGN, GRBがUHECR
の有力加速源候補

Γ^2 倍にはならないがやはり高効率

衝撃波

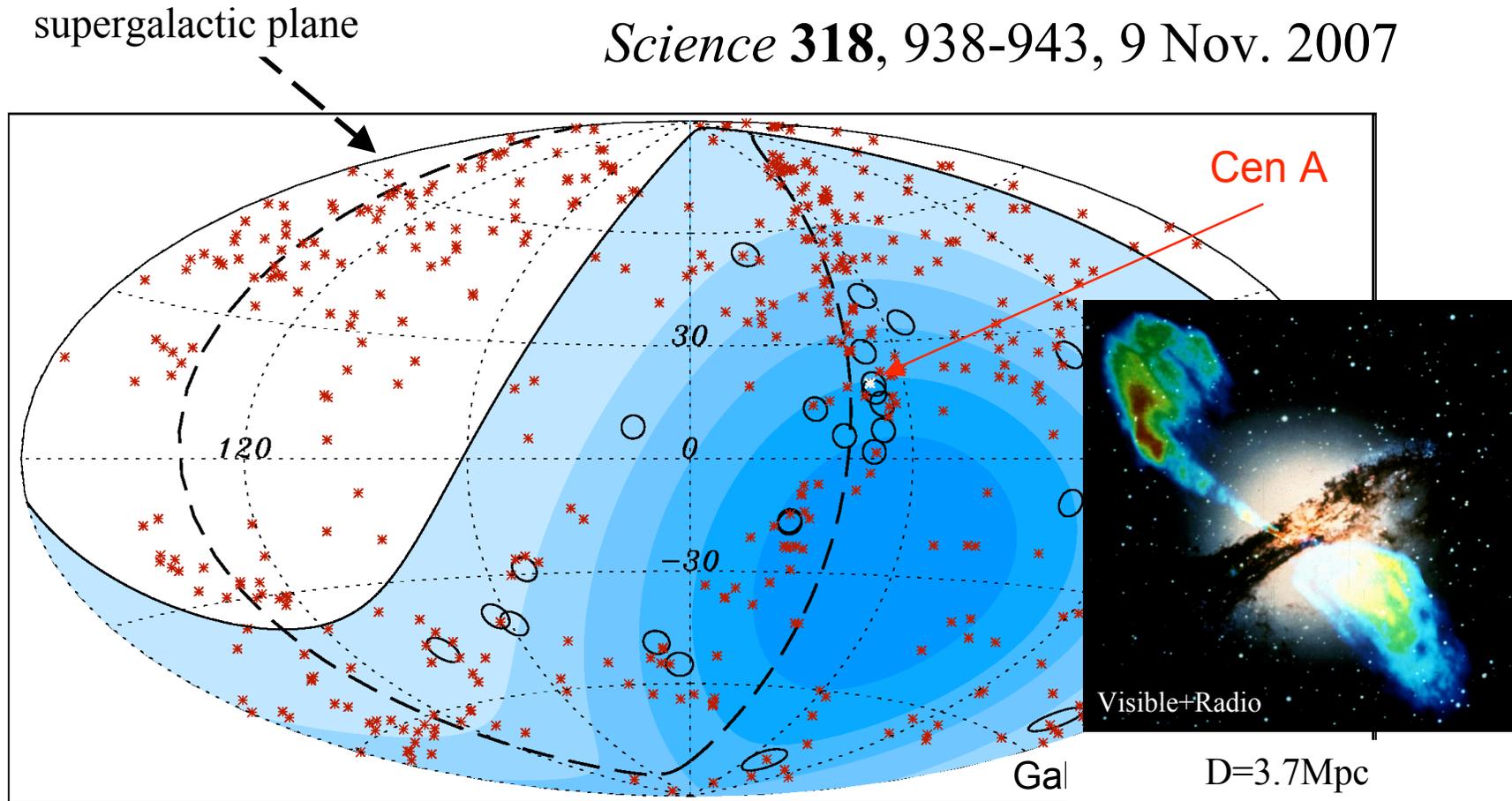
非相対論的衝撃波
非効率なのが問題

相対論的衝撃波 2回目以降



Recent results from the *Pierre Auger* collaboration

Science **318**, 938-943, 9 Nov. 2007



Directions of 27 UHECR events (circles or ellipses) are compared with nearby AGNs (red crosses). There is a statistically significant correlation among UHECR directions and the supergalactic plane. It is notable that two UHECR events coincide with the direction of Centaurus A radio galaxy.

加速のことだけ考えていてはいけない

加速の必要条件は当然、 $t_{\text{acc}} < t_{\text{esc}}$
(加速時間 < 脱出時間)

さらに輻射によるエネルギー損失時間 t_{loss} を考慮する必要あり

$t_{\text{acc}} < t_{\text{esc}} < t_{\text{loss}}$ 粒子は加速後、系から脱出し宇宙線となる

$t_{\text{acc}} < t_{\text{loss}} < t_{\text{esc}}$ 粒子は一旦加速されるが、
系から脱出する前に冷えてしまう

$t_{\text{loss}} < t_{\text{acc}} < t_{\text{esc}}$ 粒子はそもそも加速されない

↓
E大

最近、Ptitsyna & Troitsky (astroph:0808.0367)が考察しているが、彼らの表現はいささか錯綜しているので自前の考察を試みる

シンクロトロン輻射によるエネルギー損失

$$-\left(\frac{d\mathcal{E}}{dt}\right)_{\text{synch}} = \frac{2}{3} \frac{e^4}{m^2 c^3} B^2 \beta^2 \gamma^2$$

エネルギー損失の特徴的時間

$$\tau_{\text{loss}} \equiv \left(-\frac{1}{\mathcal{E}} \frac{d\mathcal{E}}{dt}\right)_{\text{synch}}^{-1} = \frac{3}{2} \frac{m^3 c^5}{e^4} \frac{1}{B^2 \gamma}$$

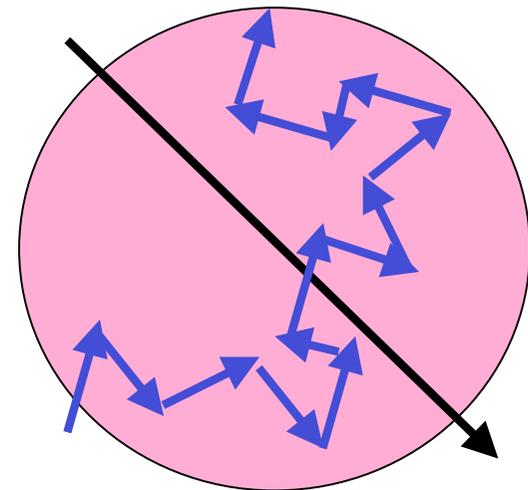
系からの脱出時間: 下限と上限

$$\tau_{\text{crossing}} = \frac{L}{c}$$

$$\tau_{\text{Bohm}} = \tau_{\text{gyro}} (L/\rho_g)^2 = \frac{eB}{mc^3 \gamma} L^2$$

現実の粒子の脱出時間はこれらの中間

加速領域: 空間スケール L

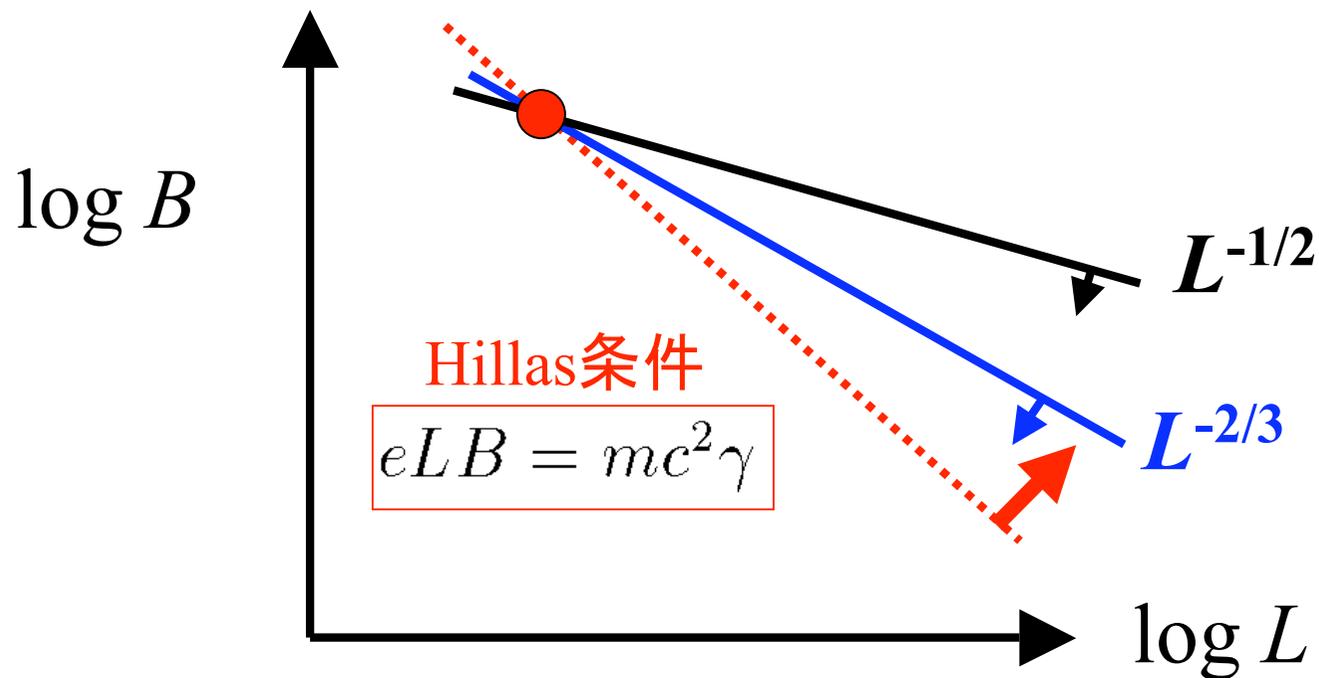


最短脱出時間について

$$\tau_{loss} > \tau_{crossing} \rightarrow \frac{3 m^3 c^5}{2 e^4} \frac{1}{B^2 \gamma} > \frac{L}{c} \text{ より } LB^2 < \frac{3 m^3 c^6}{2 e^4} \frac{1}{\gamma}$$

最長脱出時間について

$$\tau_{loss} > \tau_{Bohm} \rightarrow \frac{3 m^3 c^5}{2 e^4} \frac{1}{B^2 \gamma} > \frac{eB}{mc^3 \gamma} L^2 \text{ より } L^2 B^3 < \frac{3 m^4 c^8}{2 e^5}$$



最短脱出時間について

最

$$L_{\text{pc}}^{1/2} B < 0.539 \mathcal{E}_{20}^{-1/2}$$

$$L_{\text{pc}}^{2/3} B < 0.315$$

$$L_{\text{pc}} B \geq 0.0803 \mathcal{E}_{20}$$

ただし、BはGauss単位

$\mathcal{E}_{20} \equiv \mathcal{E}/(10^{20}\text{eV})$, $L_{\text{pc}} \equiv L/(1\text{pc})$

$$\text{り } LB^2 < \frac{3 m^3 c^6}{2 e^4 \gamma}$$

$$L^2 \text{ より } L^2 B^3 < \frac{3 m^4 c^8}{2 e^5}$$

Hillas条件を満たすL,Bの領域

$\log B$

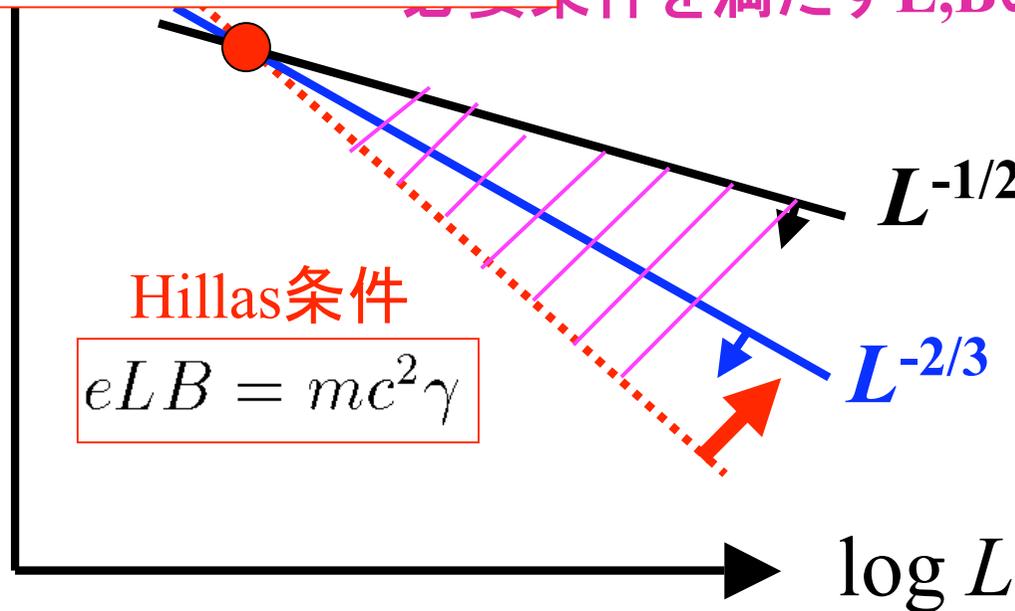
Hillas条件

$$eLB = mc^2 \gamma$$

$L^{-1/2}$

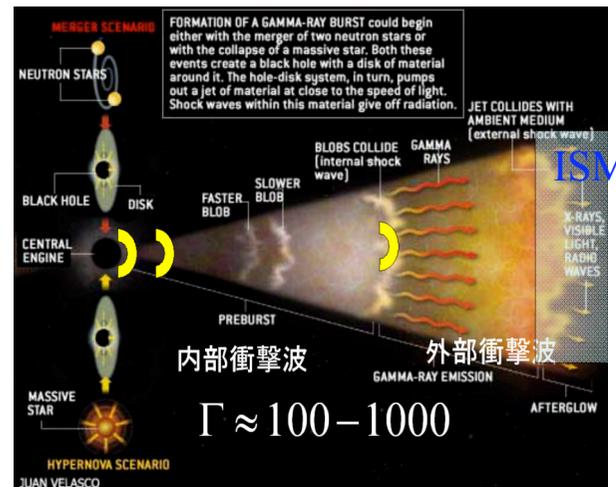
$L^{-2/3}$

$\log L$

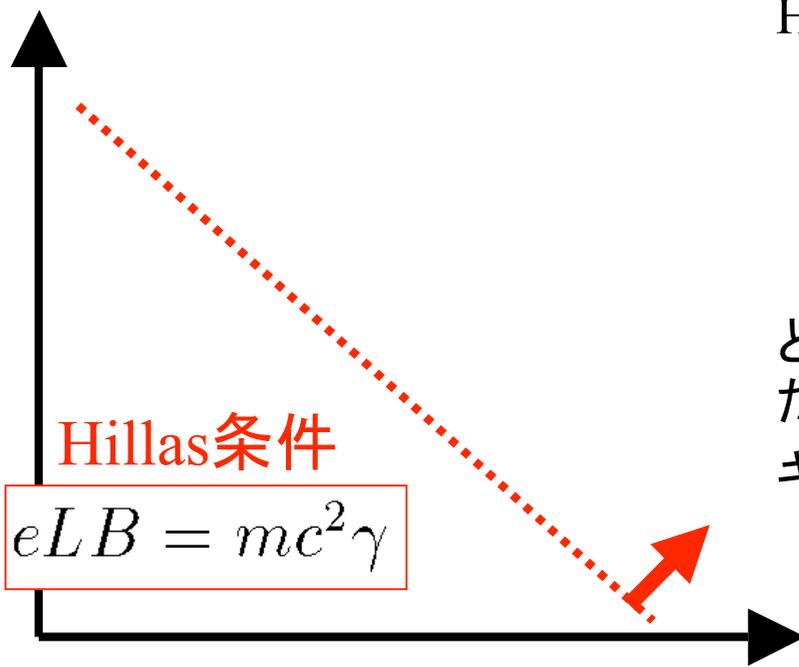


GRB,AGNのように、相対論的 beamingが重要と思われる天体の考察には注意が必要:

B はcomoving系の値



$\log B$



Hillas条件は 観測者の系での値

$$e \left(\frac{L}{\Gamma} \right) B = \frac{mc^2 \gamma}{\Gamma}$$

と書くべき。
ただし、この式だけなら Γ は両辺でキャンセルして、普通と同じ式:

$$eLB = mc^2 \gamma$$

輻射がはいるとそうはいかない(時に混乱あり)

GRBでのUHECR加速可能性

GRB (prompt emission) について典型的な値:

$$\Gamma=100, L=10^{14}\text{cm}, B=10^{3-6}\text{G}$$

観測者の系での値

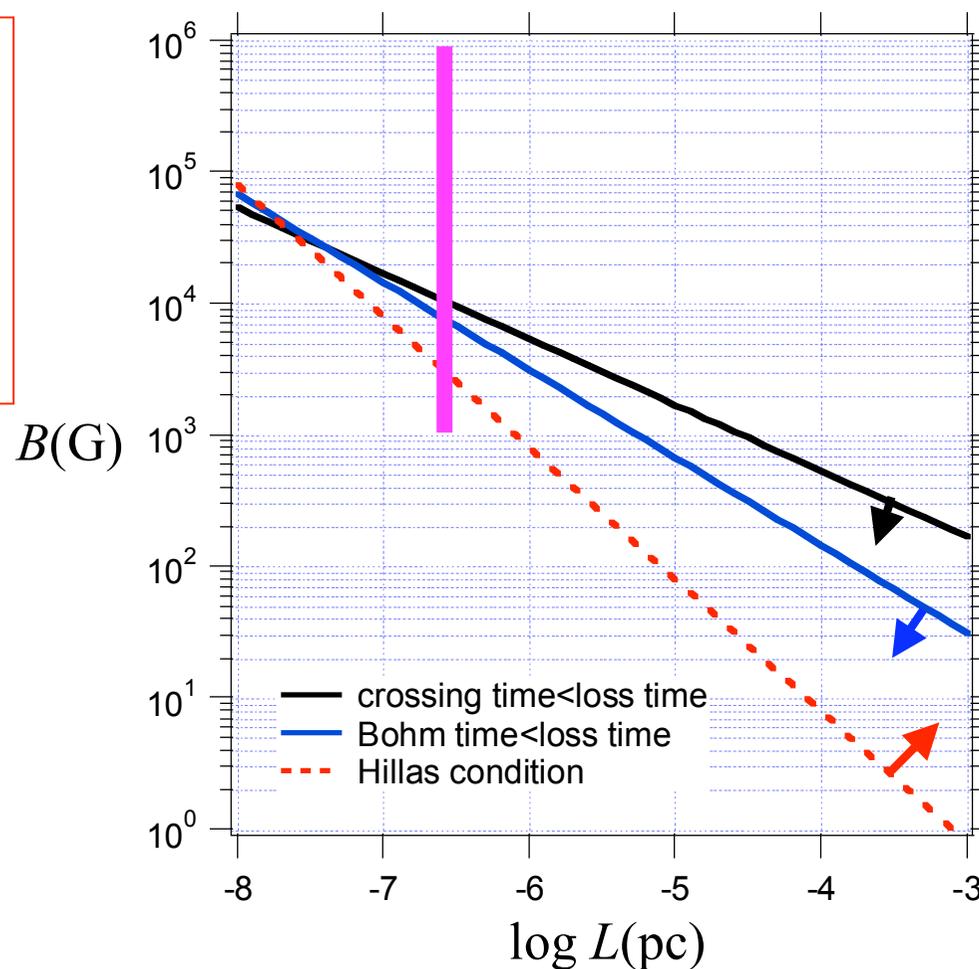
Comoving系で $L/\Gamma=10^{12}\text{cm}=3\times 10^{-7}\text{pc}$ 、 10^{18}eV までの加速

10^{18}eV の陽子加速の必要条件

$$L_{\text{pc}}^{1/2} B < 5.39$$

$$L_{\text{pc}}^{2/3} B < 0.315$$

$$L_{\text{pc}} B \geq 0.000803$$



GRBでのUHECR加速可能性

Γ の大きなGRB (prompt emission)

$$\Gamma=1000, L=10^{14}\text{cm}, B=10^{3-6}\text{G}$$

加速条件はかなり楽になる

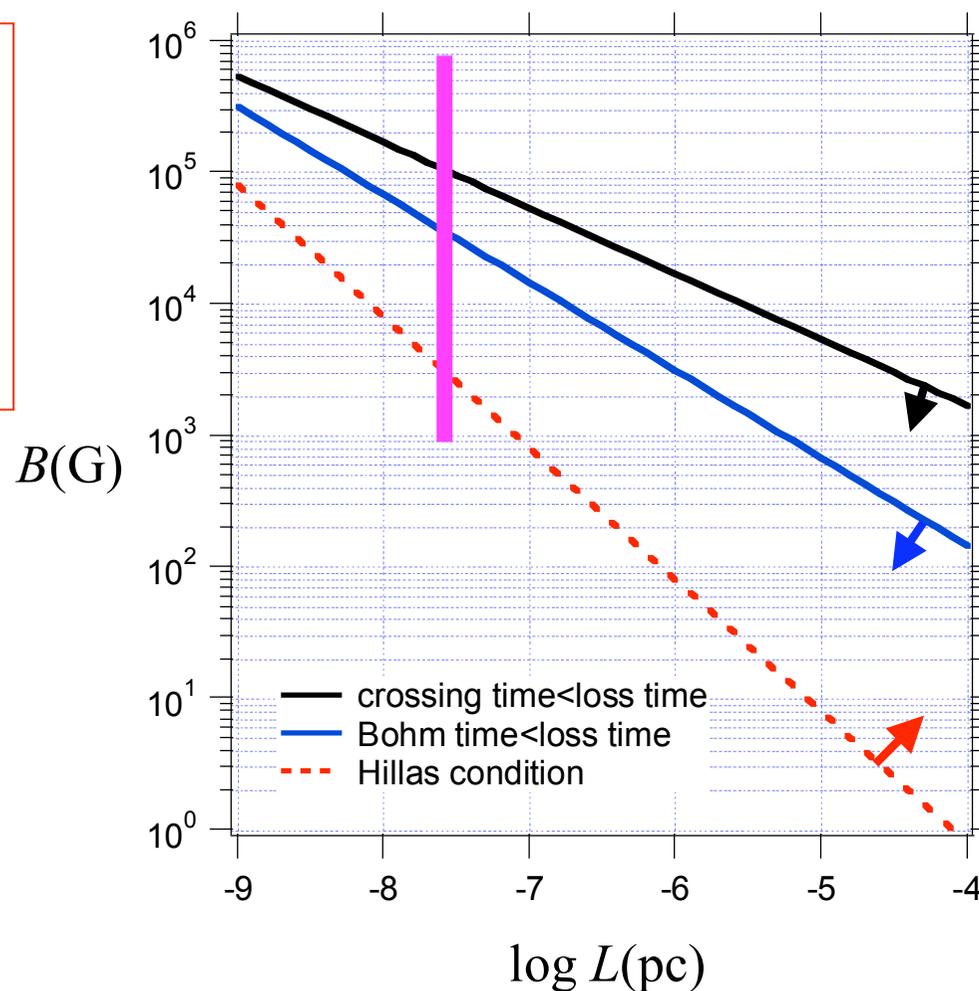
Comoving系で $L/\Gamma=10^{11}\text{cm}=3\times 10^{-8}\text{pc}$ 、 10^{17}eV までの加速

10¹⁷eVの陽子加速の必要条件

$$L_{\text{pc}}^{1/2} B < 17.0$$

$$L_{\text{pc}}^{2/3} B < 0.315$$

$$L_{\text{pc}} B \geq 0.0000803$$

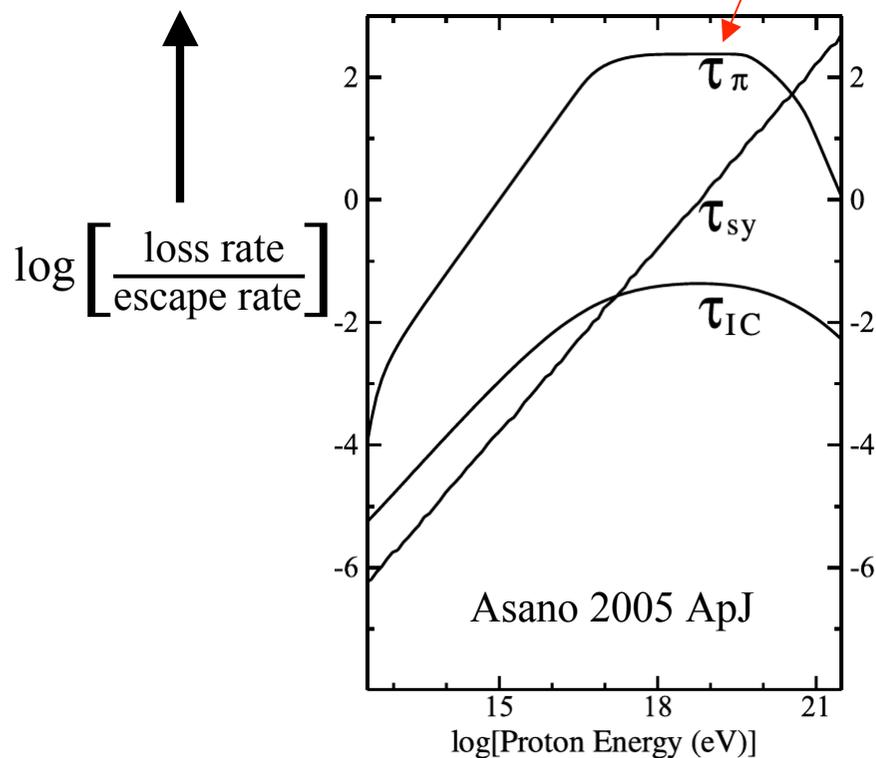
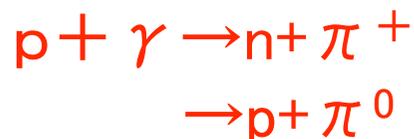


GRBでのUHECR加速可能性

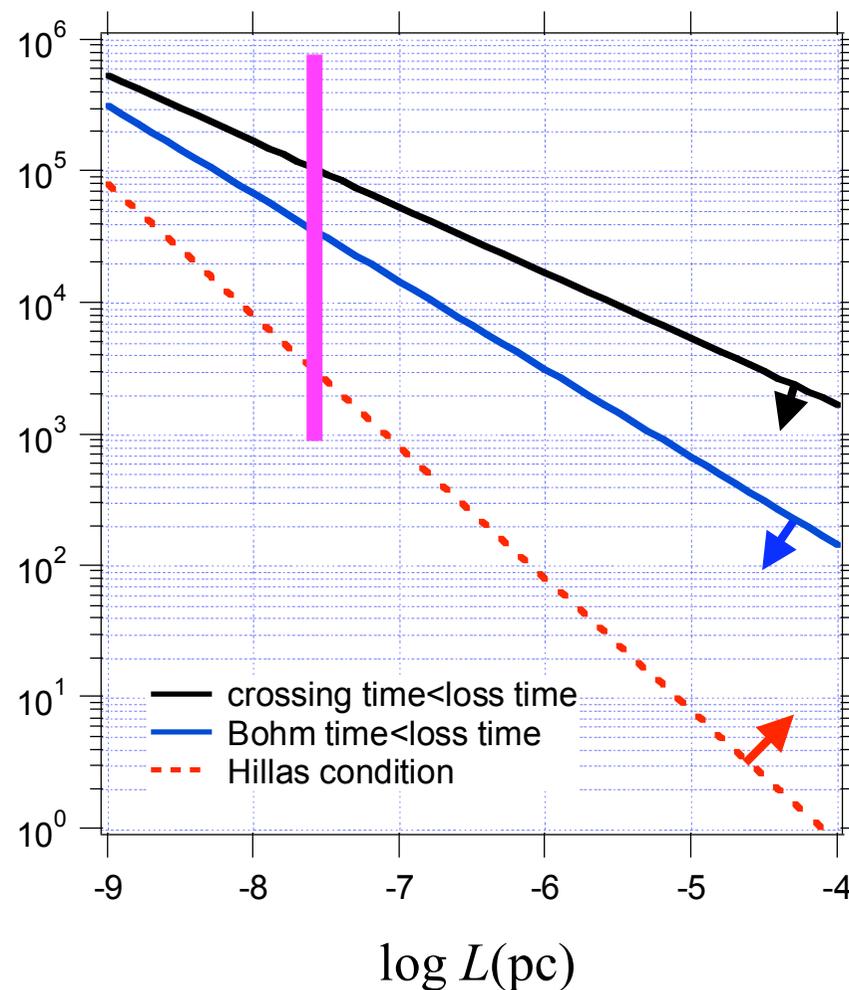
留意点:ここで論じているのは加速の必要条件である。
Synchrotron輻射以外の冷却過程も考慮する必要がある。



特に、photopion process (π) が重要



ただし、 π, sy, IC 各プロセスの相対的重要性はモデルのパラメタの詳細に依存

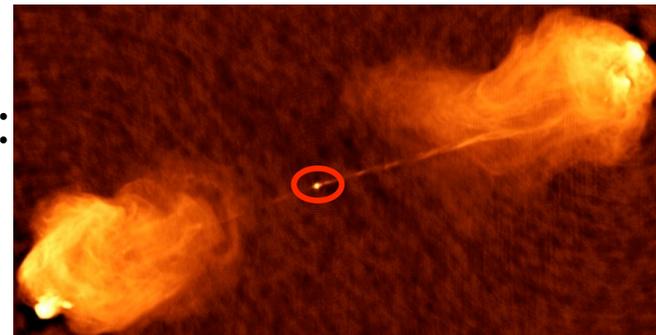


AGNでのUHECR加速可能性

AGNの場合 (knot: 右図では分解できない中心核近傍):

$$\Gamma=10, L=10^{16}\text{cm}, B=1\text{G}$$

観測者の系での値



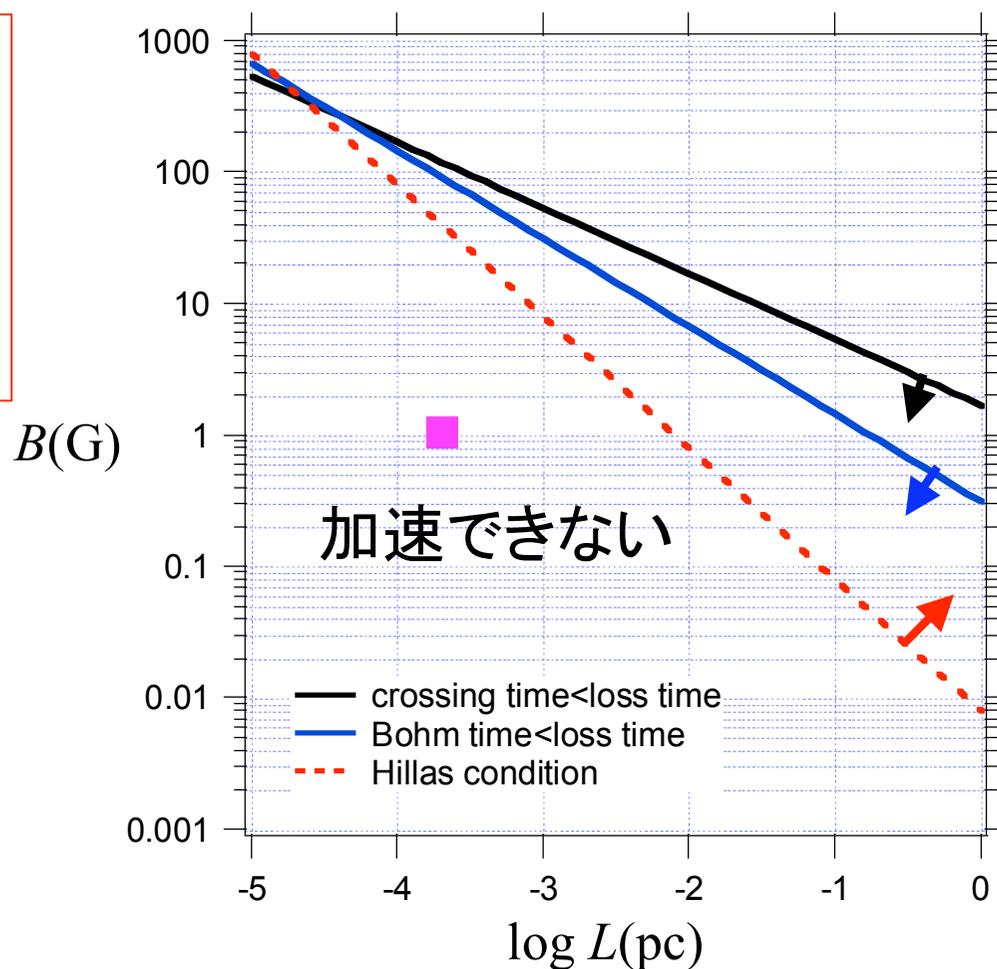
Comoving系で $L/\Gamma=10^{15}\text{cm}=3\times 10^{-4}\text{pc}$ 、 10^{19}eV までの加速

10¹⁹eVの陽子加速の必要条件

$$L_{\text{pc}}^{1/2} B < 1.70$$

$$L_{\text{pc}}^{2/3} B < 0.315$$

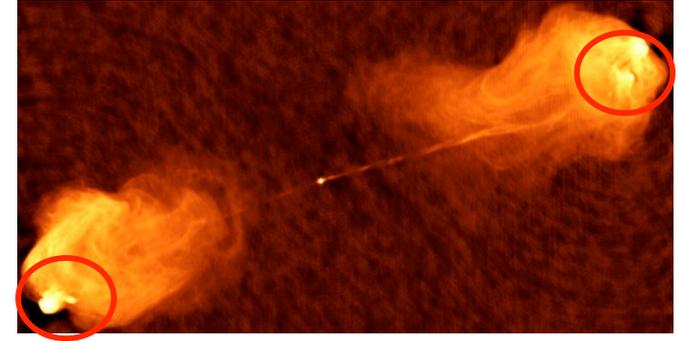
$$L_{\text{pc}} B \geq 0.00803$$



AGNでのUHECR加速可能性

AGNの場合 (hot spot):

$$\Gamma=1, L=1-10\text{kpc}, B=1\text{mG}$$



hot spotは観測者系で非相対論的運動、 10^{20}eV までの加速

10^{20}eV の陽子加速の必要条件

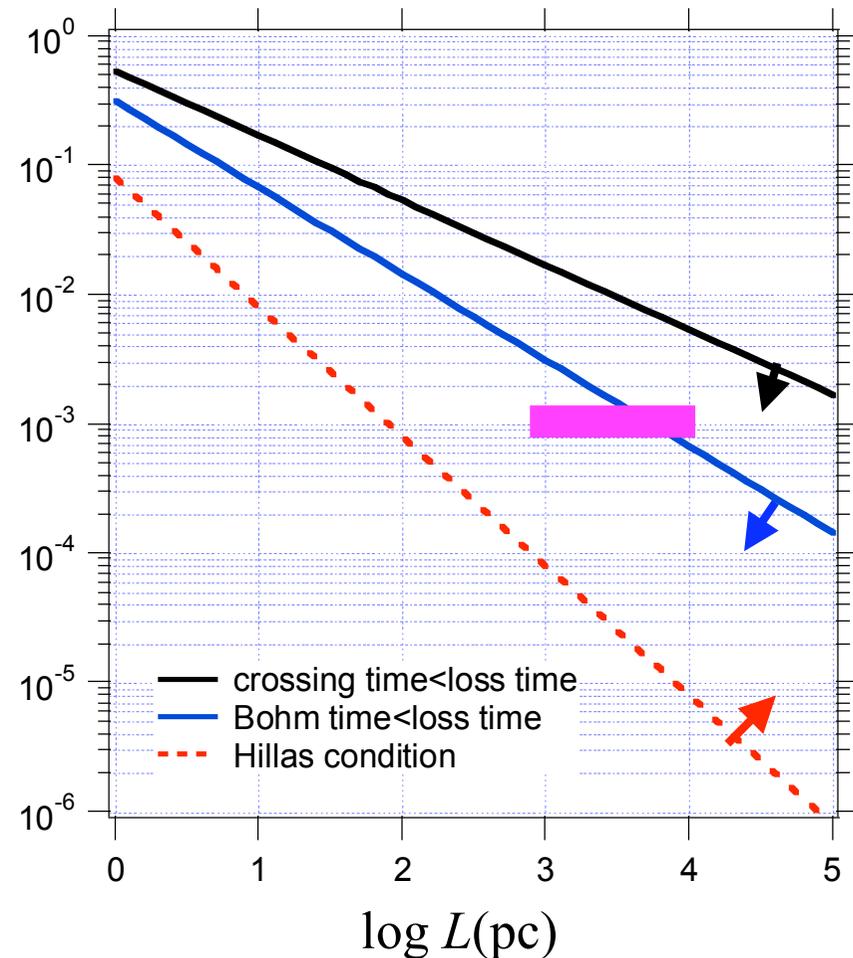
$$L_{\text{pc}}^{1/2} B < 0.539$$

$$L_{\text{pc}}^{2/3} B < 0.315$$

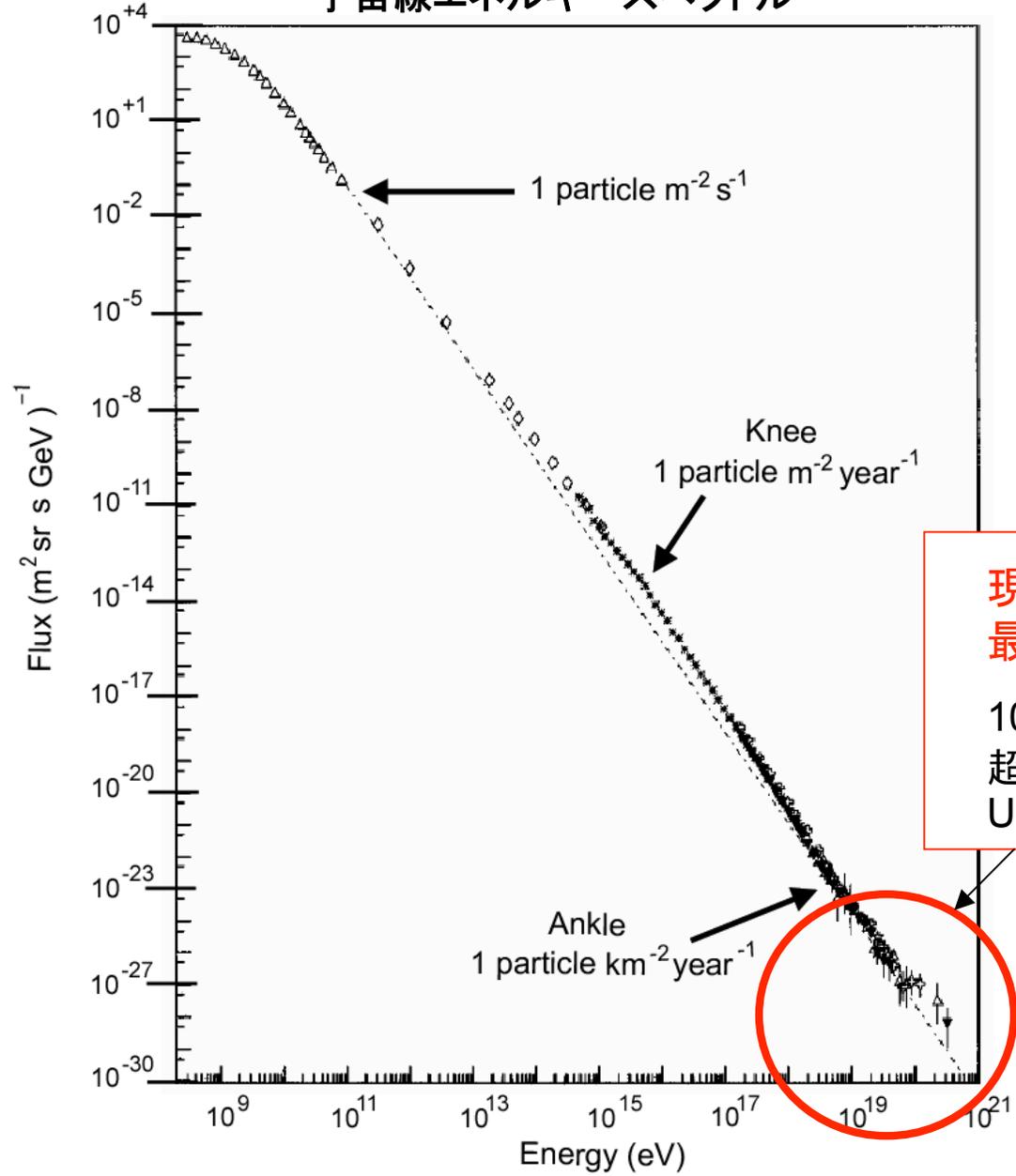
$$L_{\text{pc}} B \geq 0.0803$$

$B(\text{G})$

ただし、ここでは等方分布する粒子によるシンクロトロン損失を考えた。ピッチ角 ~ 0 度、かつ磁場が滑らかなら損失は \downarrow となるだろう。(残るのは curvature radiation, photopion, IC)。



宇宙線エネルギースペクトル



現在の宇宙物理学の
最大の謎

10²⁰eV(=16J)に達する
超高エネルギー宇宙線
UHECRの存在

最高エネルギー宇宙線の加速

寺澤 敏夫・浅野 勝晃
(東京工業大学)

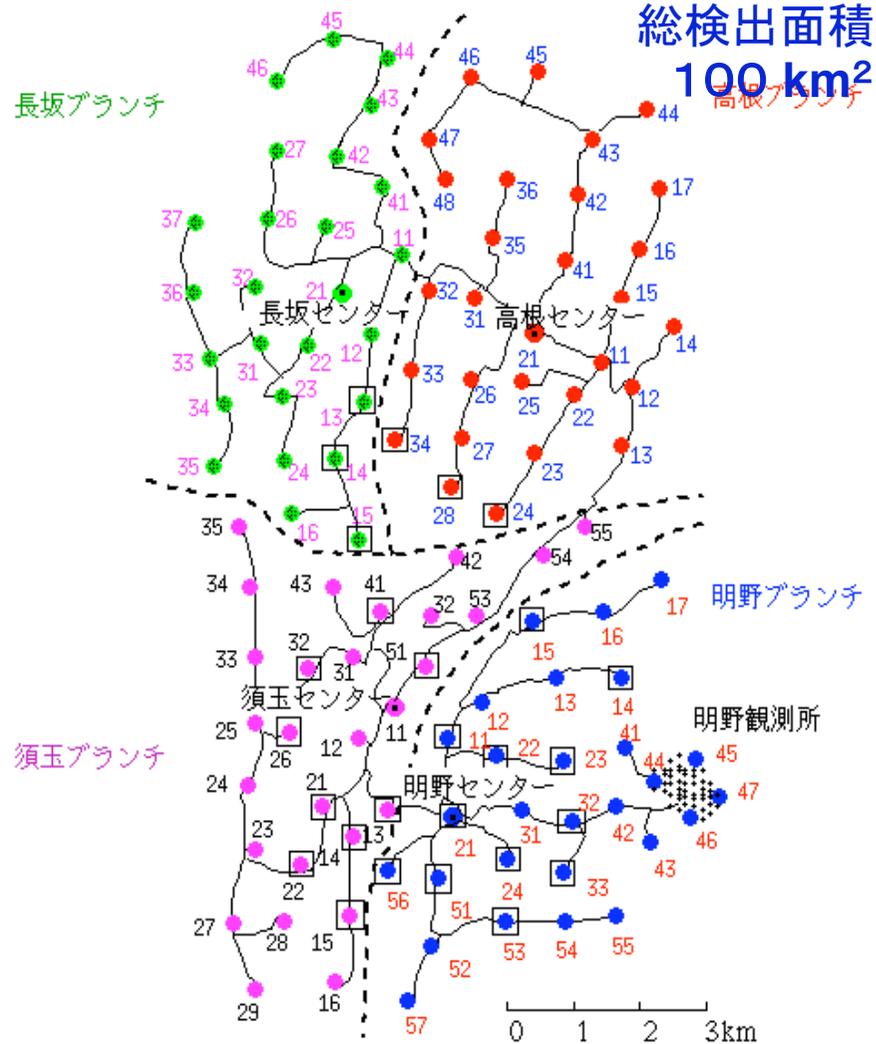
やはり、新しい観測に期待するところが大きい

地表粒子検出器

AGASA=Akeno Giant Air Shower Array
(山梨県明野村)

総検出面積
100 km²

- 111 Electron Detectors
- 27 Muon Detectors
- Optical fiber cables
- Operation 1991-2004

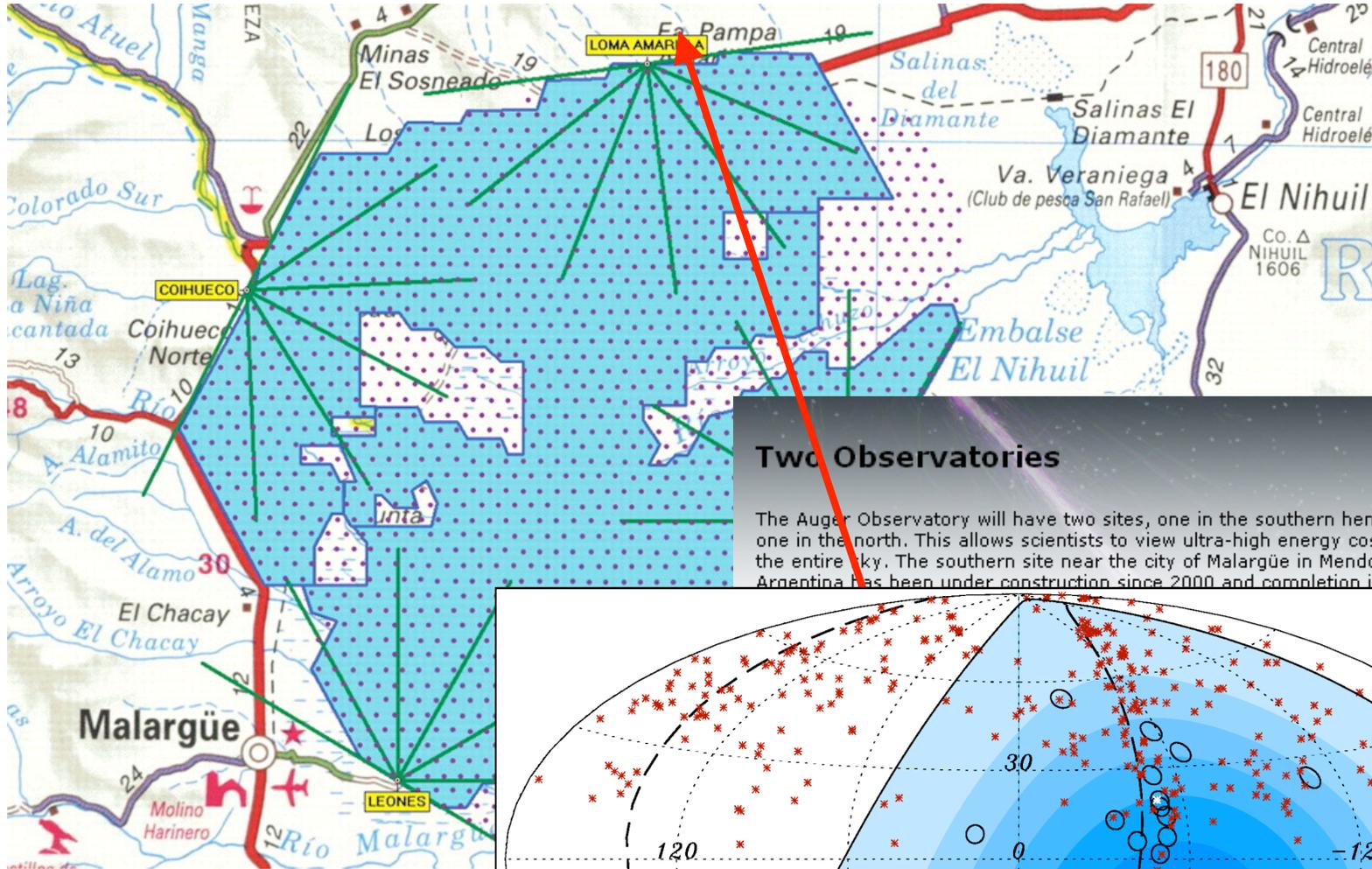


パイオニア観測は日本でなされた: 1991-2004の14年間に
11例の 10^{20} eVイベントを発見

有効面積 5165 km²→AGASAの約50倍

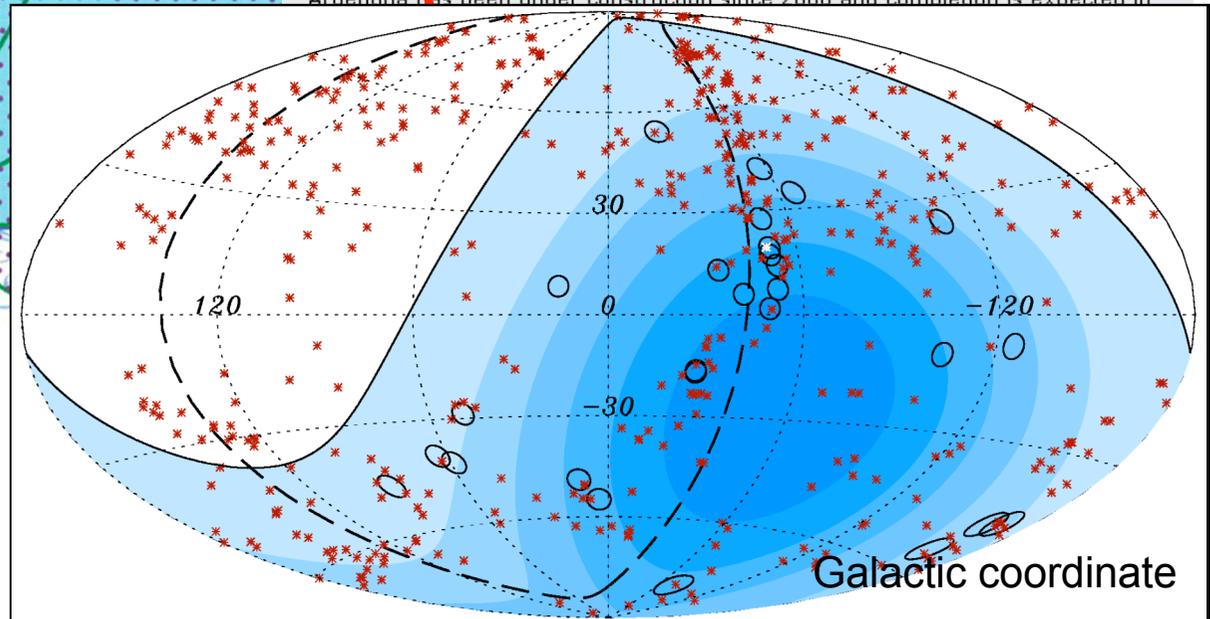
http://www.auger.org/news/PRagn/AGN_correlation_more.html

Auger



Two Observatories

The Auger Observatory will have two sites, one in the southern hemisphere and one in the north. This allows scientists to view ultra-high energy cosmic rays over the entire sky. The southern site near the city of Malargüe in Mendoza province, Argentina has been under construction since 2000 and completion is expected in

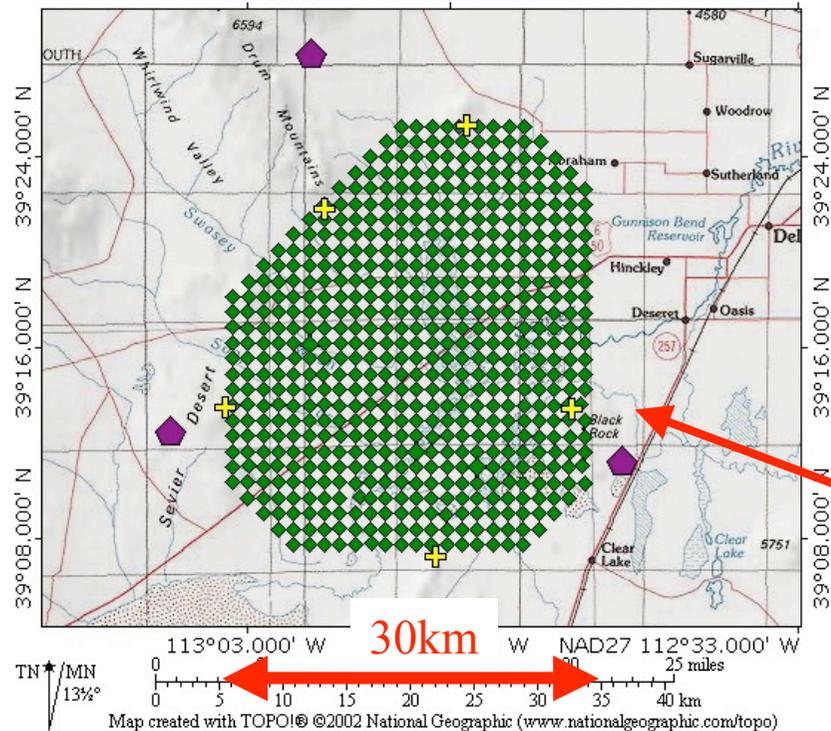


2004～一部運転を開始
2006～本格稼働

昨年建設終了、本観測開始。

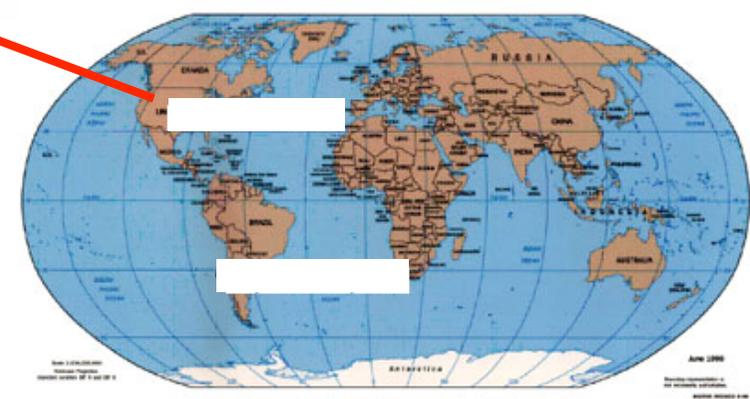
約1000km²(AGASAの10
倍)レスコープアレー(TA)計画
東大宇宙線研・東工大・ユタ大ほか

TOPO! map printed on 07/12/04 from "StakeJun04-01.tpo" and "Untitled.tpg"
113°03.000' W 112°52.000' W NAD27 112°33.000' W



Two Observatories

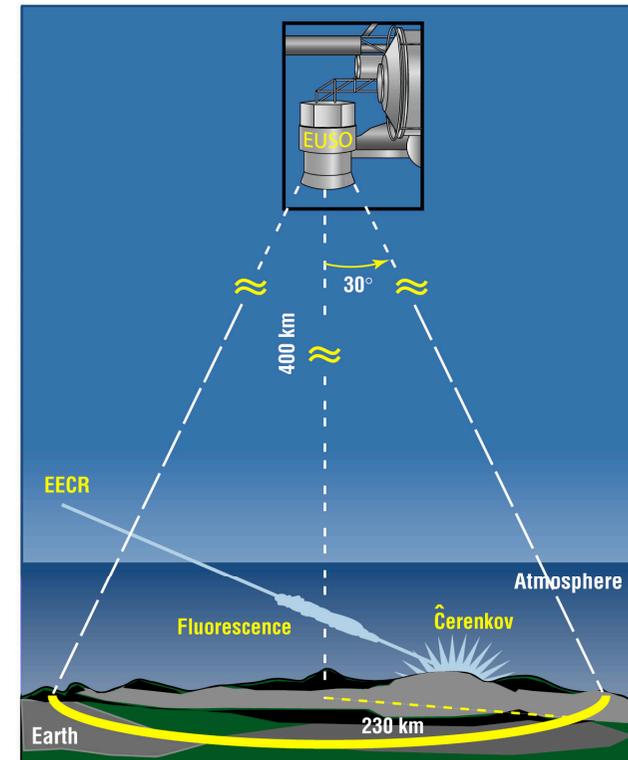
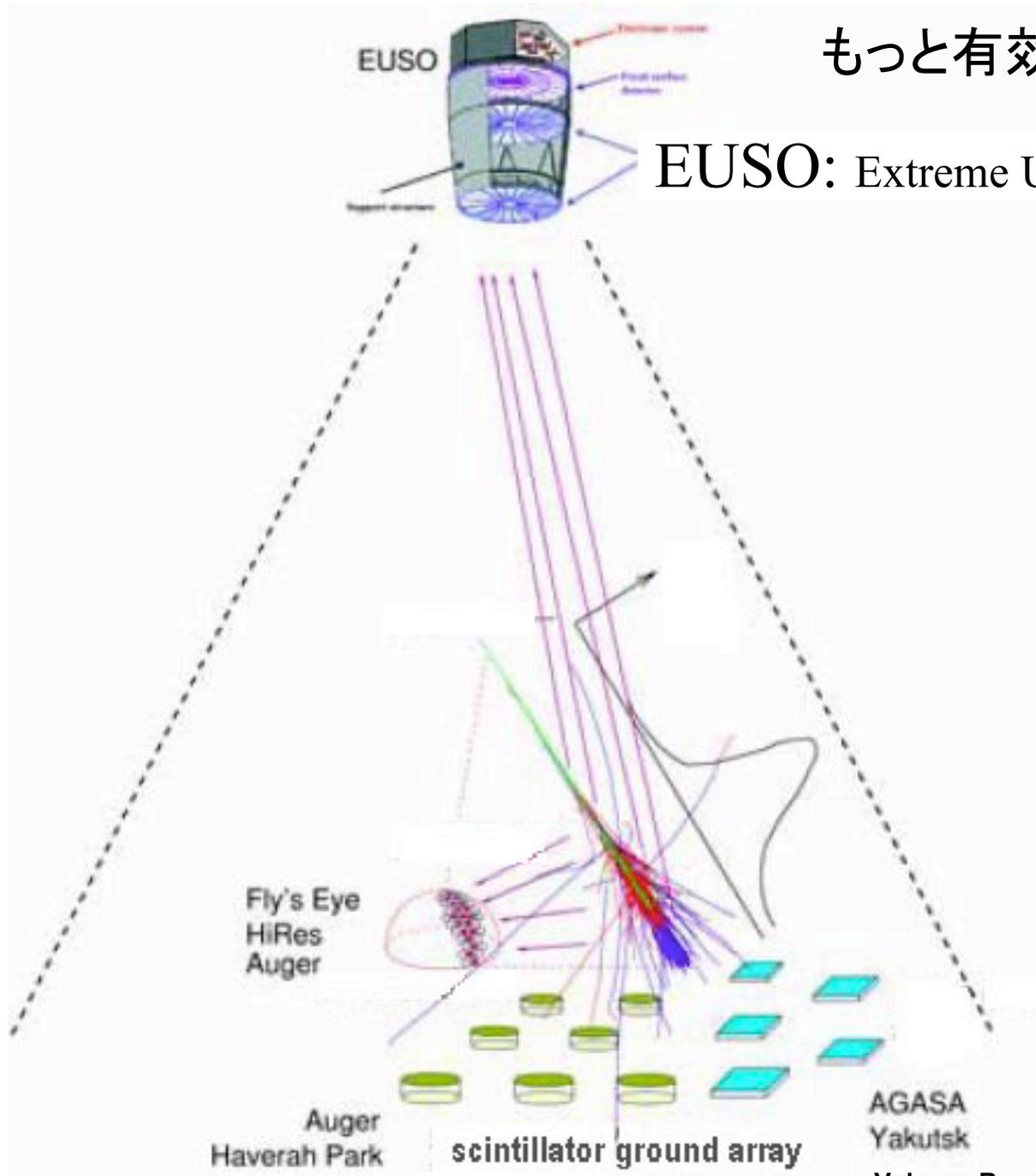
The Auger Observatory will have two sites, one in the southern hemisphere and one in the north. This allows scientists to view ultra-high energy cosmic rays over the entire sky. The southern site near the city of Malargüe in Mendoza province, Argentina has been under construction since 2000 and completion is expected in 2007. The northern site is planned for southeast Colorado, USA, near the city of Lamar.



ユタの砂漠地帯
(ソルトレークの南～300km)

もっと有効面積を稼ぐには？

EUSO: Extreme Universe Space Observatory



Ground-based arrays

- (1) Scintillator array
- (2) Fluorescence telescope array

Volcano Ranch

最高エネルギー宇宙線の電波的探査

- 空気シャワーそのものが発生する電波

Askaryan effect (氷、岩塩などの媒質中でのチェレンコフ効果)

- Askaryan effect が測定された(D. Saltzberg et al PRL 86 (2001) 2802)
- 大気中ではその他の電波が優勢
- 入射一次宇宙線エネルギーの2乗に比例した電波強度をもち一次宇宙線が高エネルギーになるほど有望になる
- 電波に対して透明な物質(氷、岩塩、月面)がターゲットとなる
- FORTE, RICE, SALSA, GLUE,

- 空気シャワー粒子が地磁気に巻きついてシンクロトロン放射
(巻きつくといっても1/4周程度) **20 – 100 MHz**

Geo-synchotron radiation

- 大気中では Askaryan effect よりも優勢
- 近年シミュレーターが整備されてきた
- LOFAR (プロトタイプ LOPES 1-32MHz, 4MHz 毎)

まだどれもテスト段階

- 空気シャワー粒子の制動放射によって生じる電波

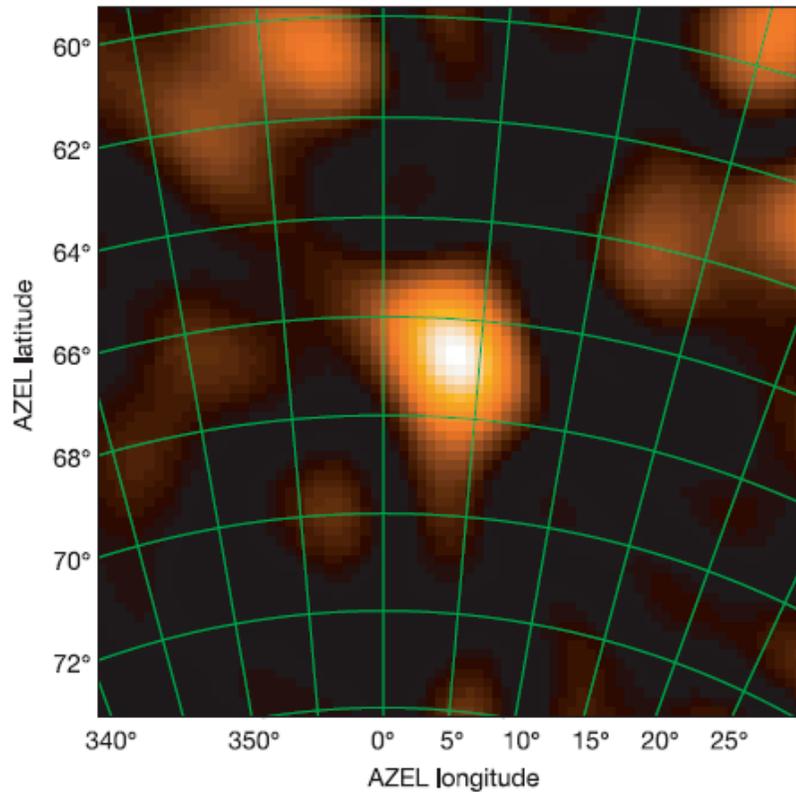
Microwave Molecular Bremsstrahlung Radiation (MBR)

- **RADAR** による宇宙線観測

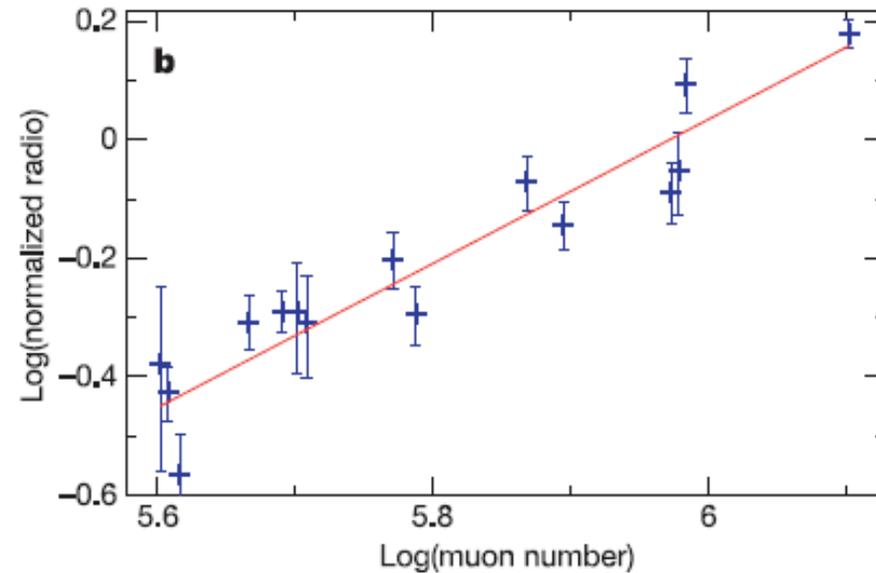
Falcke et al., Nature 435, 313-316

Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers

(地磁気内でのシンクロトロン輻射～数十MHz帯)



宇宙線空気シャワーの電波イメージ
(干渉計による像合成)



電波強度 vs. μ 粒子強度
(LOPES & KASCADE)