

# 超新星残骸の衝撃波 における粒子加速

大阪大学 山崎 了

With

馬場彩、吉田龍生、寺沢敏夫、高原文郎、小山勝二

Knee energy ( $10^{15.5}\text{eV}$ ) 以下の宇宙線は  
銀河系内の超新星残骸が起源と考えられている。

## 加速できる最高エネルギー

$$E_{\text{max}} \sim e B R \sim 10^{15} \text{ eV} \quad B_{\mu\text{G}} R_{\text{pc}}$$

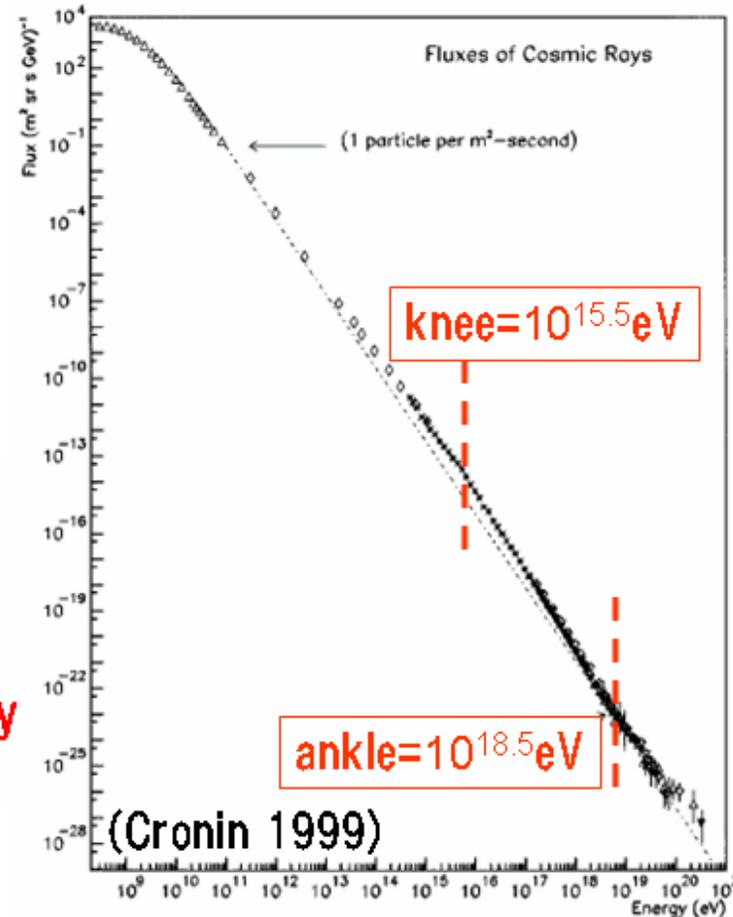
どのくらい作る必要あるか？

$$\frac{1 \text{ eV cc}^{-1} \times 10^{66} \text{ cc}}{10^7 \text{ yrs}} \sim 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$$

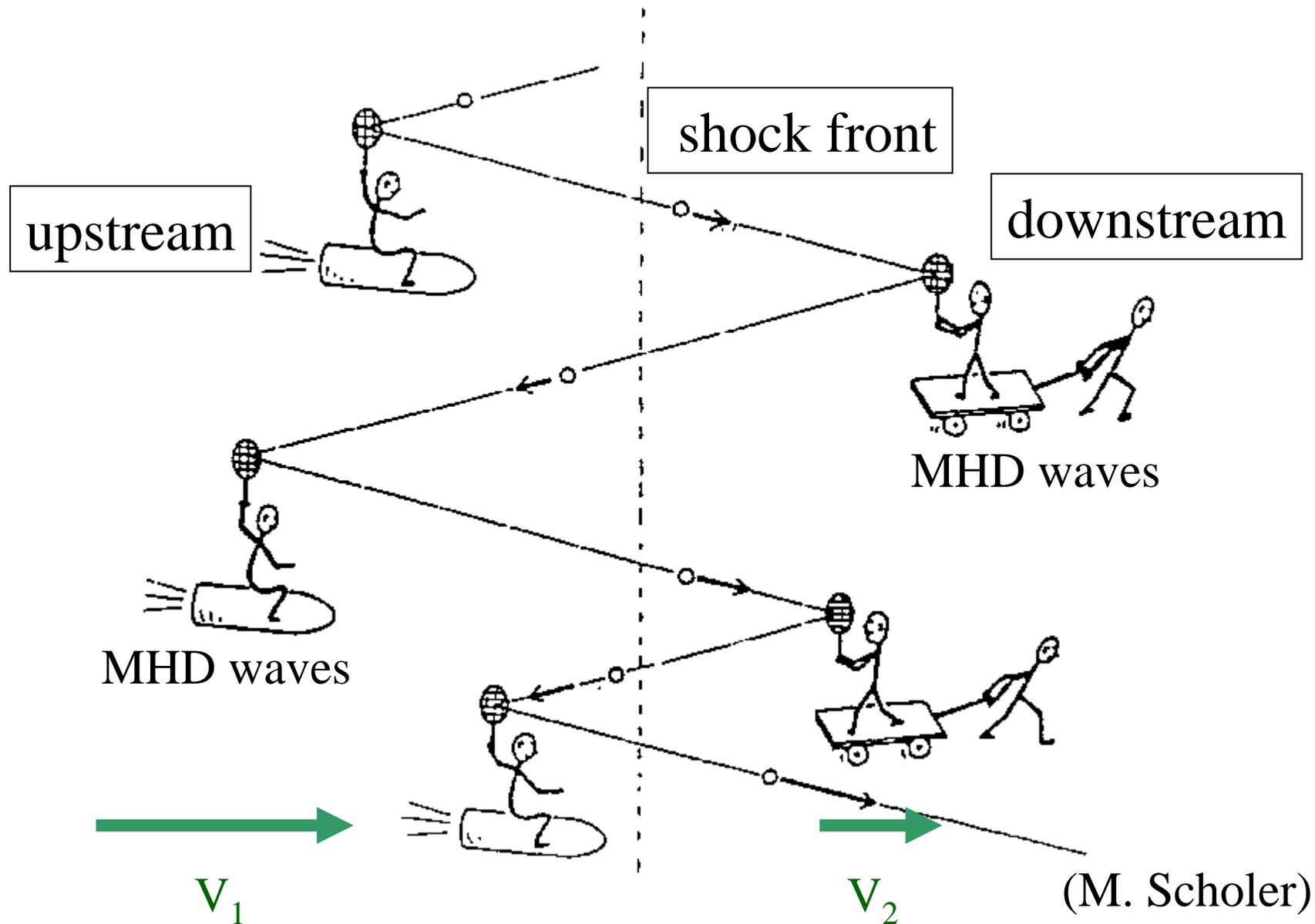
銀河の体積  
拡散 timescale  
CR luminosity

これは超新星残骸(SNR)でまかなえる。

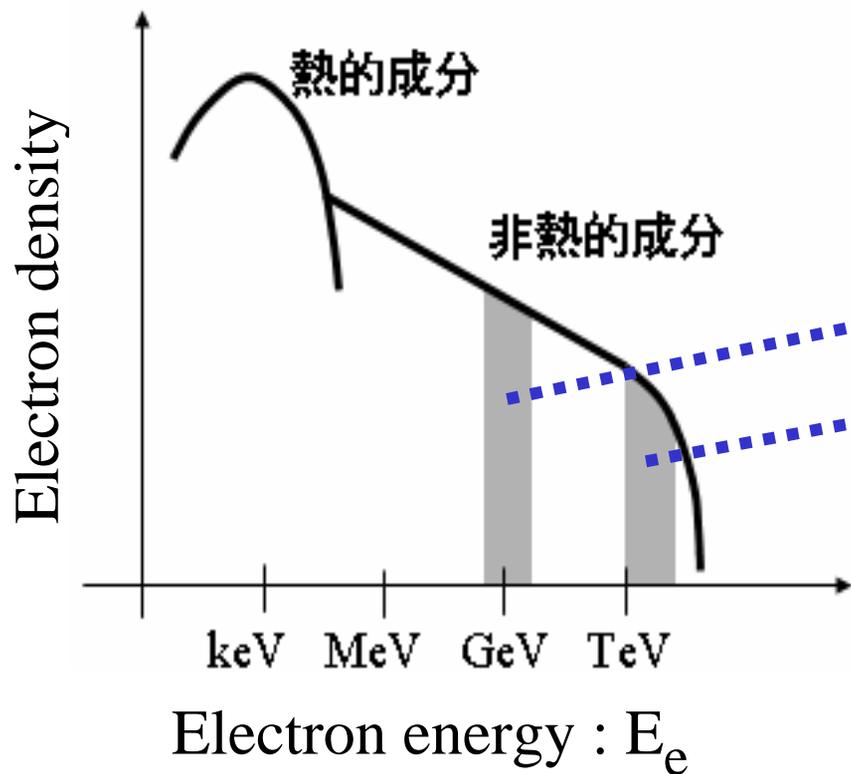
$$10^{51} \text{ erg} \times (\text{変換効率} \sim 1\%) \times (\text{SN rate} \sim 1/30 \text{ yrs}) \\ \sim 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$$



# Diffusive shock acceleration

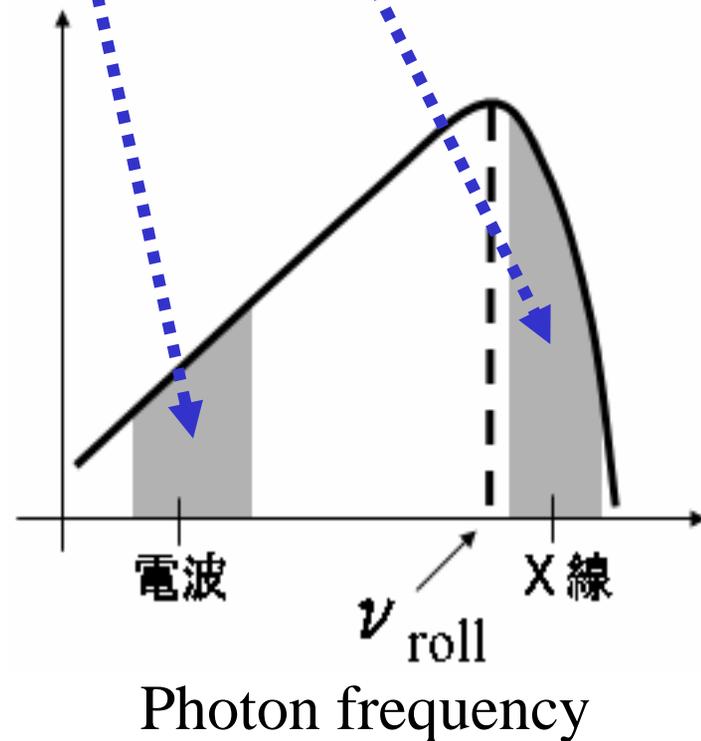


# Synchrotron X-rays from $E_{max}$ electrons

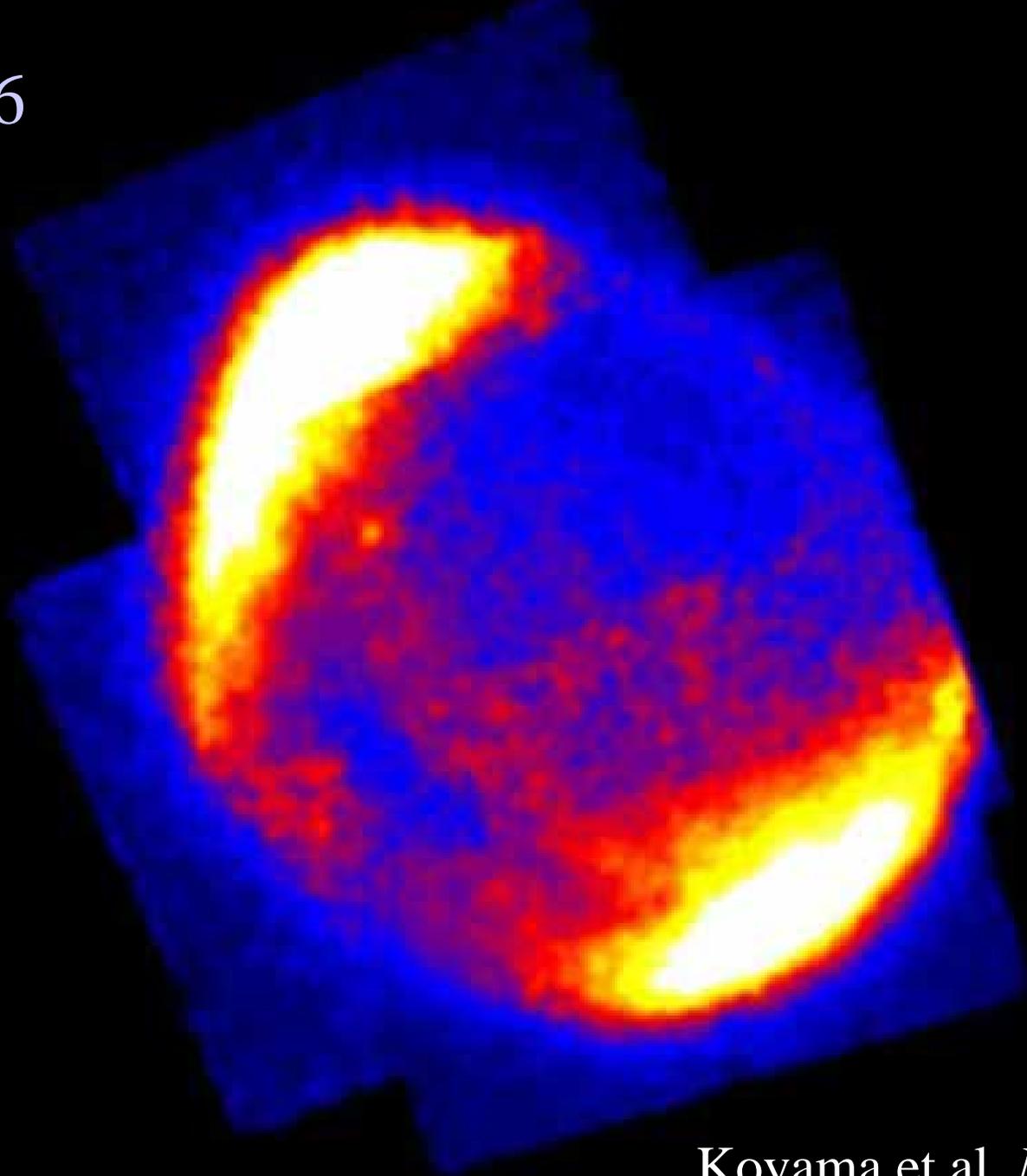


$$h\nu_{\text{roll}} \sim 2 \text{ keV} \left( \frac{B}{10 \mu\text{G}} \right) \left( \frac{E_e}{10^2 \text{ TeV}} \right)^2$$

シンクロトロン放射flux



SN1006



ASCA

Koyama et al. *Nature* 1995

# *Spectral index of accelerated particles*

Diffusion-convection eq.  $f(t, \mathbf{x}, p)$  : CR分布関数

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u^i \nabla_i f - \nabla_i (\kappa^{ij} \nabla_j f) - \frac{1}{3} (\nabla_i u^i) p \frac{\partial f}{\partial p} = 0$$

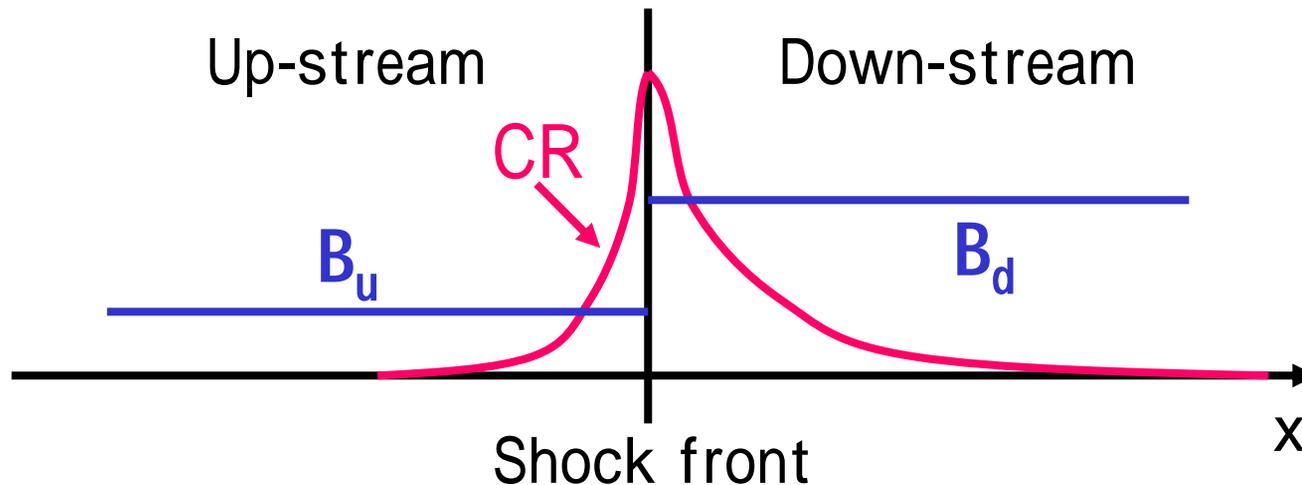
$$N(E) dE \propto E^{-p} dE, \quad p = \frac{r + 2}{r - 1}$$

$$r = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}, \quad M_1 \rightarrow \infty$$

(1) Non-relativistic fluids :  $\gamma = 5/3$ ,  $r = 4$ ,  $p = 2$

(2) Relativistic fluids :  $\gamma = 4/3$ ,  $r = 7$ ,  $p = 1.5$

# 最高エネルギー $E_{max}$ 付近の粒子の空間分布



L:  $E_{max}$  を持つ粒子の存在領域の空間スケール

$$t_{adv} \sim L/u, \quad u: \text{流体速度}$$
$$t_{dif} \sim L^2/K, \quad K: \text{拡散係数}$$

$$t_{adv} \sim t_{dif} \quad \text{より、} \quad L \sim K/u$$

# Accelerated particles の back-reaction

## Nonlinear model

加速効率が大きいと宇宙線粒子の圧力が背景プラズマのダイナミクスに影響を与える。

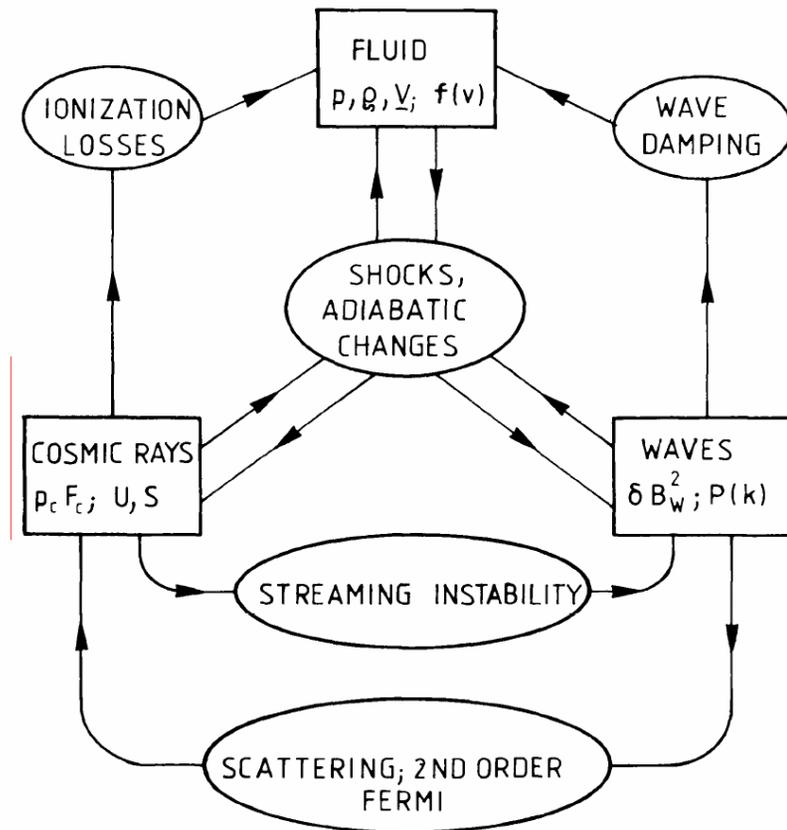
$$\rho \left( \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \right) \vec{u} + \vec{\nabla} (P_g + P_c) = 0$$

$$P_c := \int dp 4\pi p^2 \frac{p}{3} v f(p)$$

$f(p)$  : CR分布関数

Diffusion-convection eq.

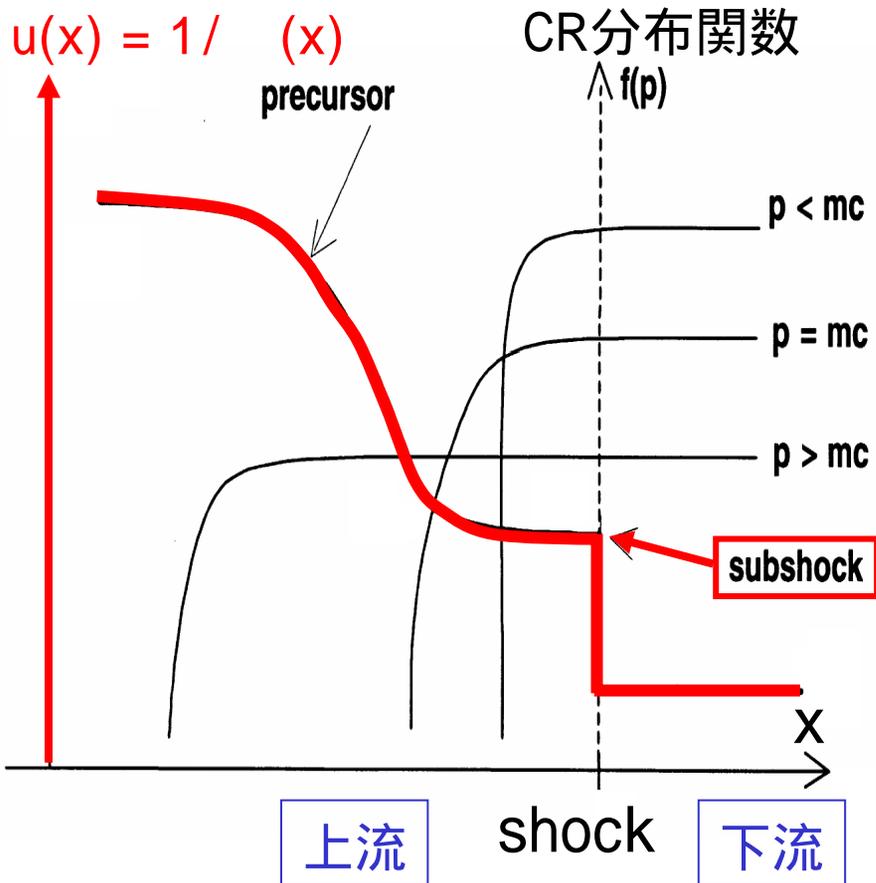
$$\frac{\partial f}{\partial t} + u^i \nabla_i f - \nabla_i (\kappa^{ij} \nabla_j f) - \frac{1}{3} (\nabla_i u^i) p \frac{\partial f}{\partial p} = 0$$



Axford et al. (1982)

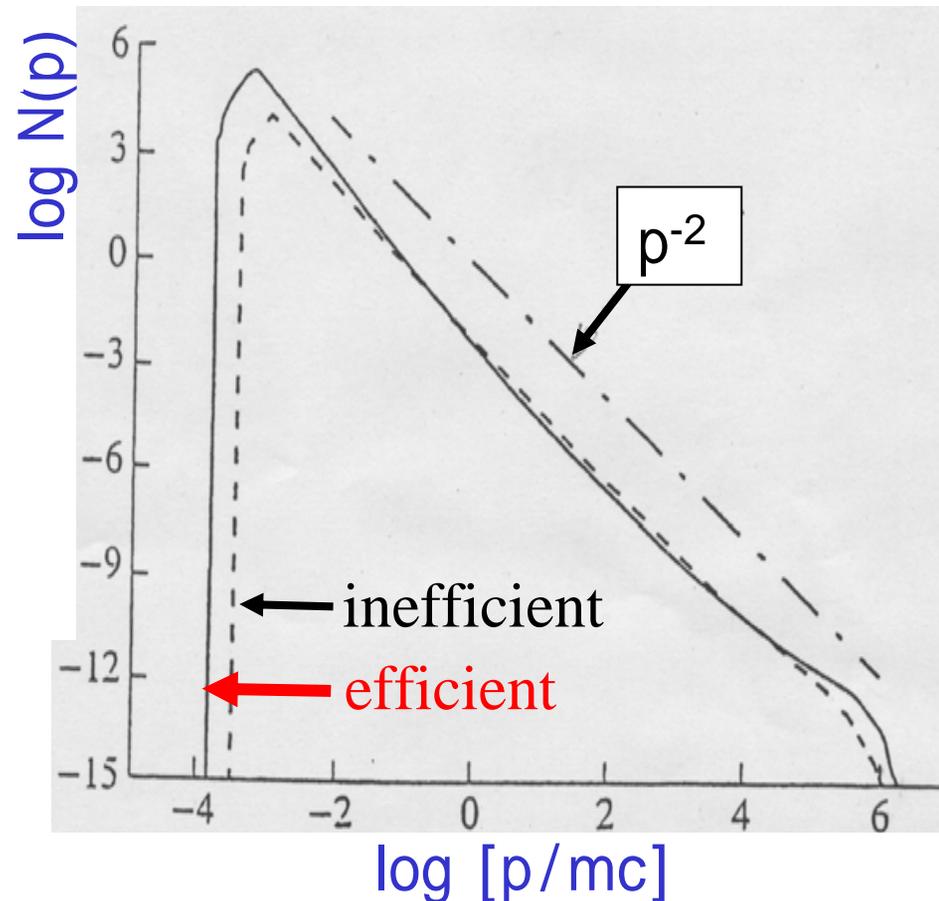
# CR粒子の背景流体やスペクトルに与える影響

## 衝撃波面付近の速度場と分布関数の空間構造



Berezhko & Ellison (1999)

## CR energy spectrum



Berezhko et al. (1996)

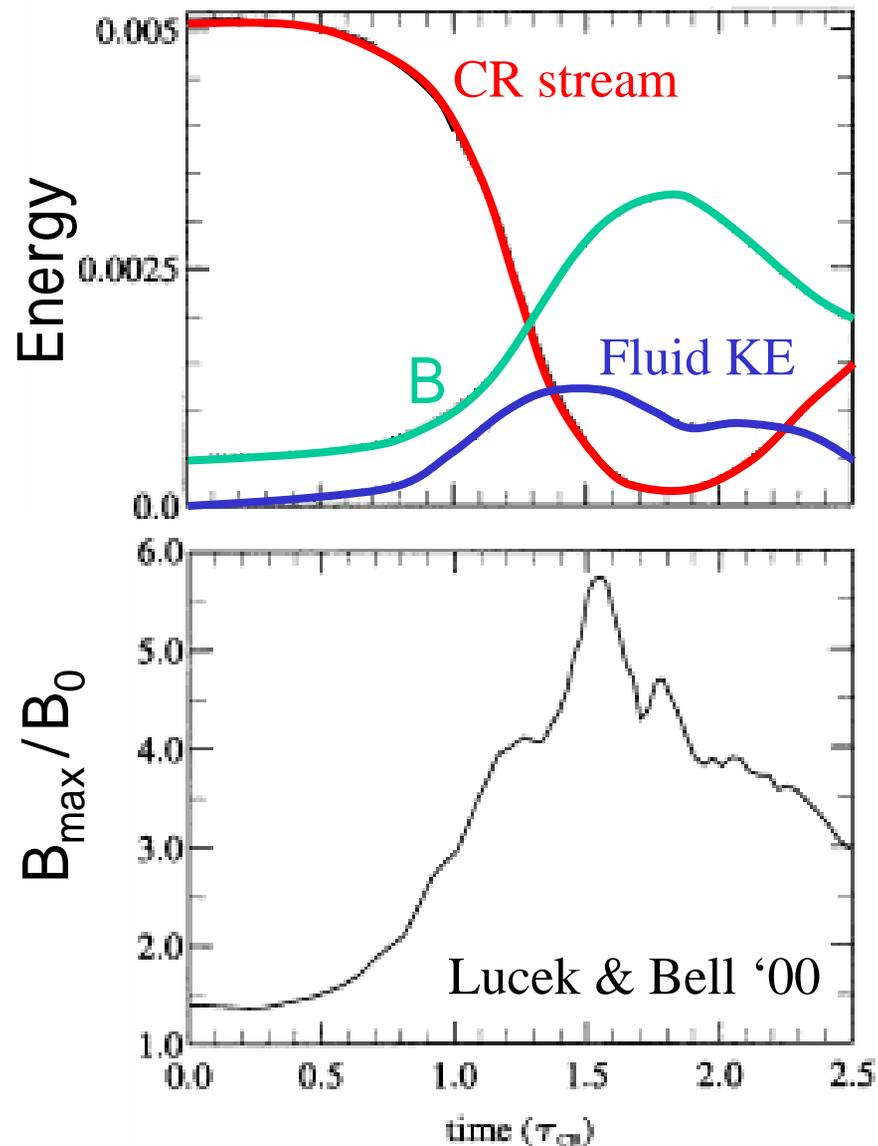
# CR粒子の衝撃波近傍の磁場に与える影響

## Lucek & Bell (2000)

Accelerated ions と 背景ion  
の間での2流体不安定により  
磁場がamplifyされる可能性  
を指摘。

Oka et al. 2004:

線型段階は正しそうだが、  
磁場のsaturation level は  
現在のところ未説明。



# 磁場の配位が加速効率を決める

磁場が大きい

gyro半径小さい

磁場の乱流度大きい

被加速粒子は散乱されやすい

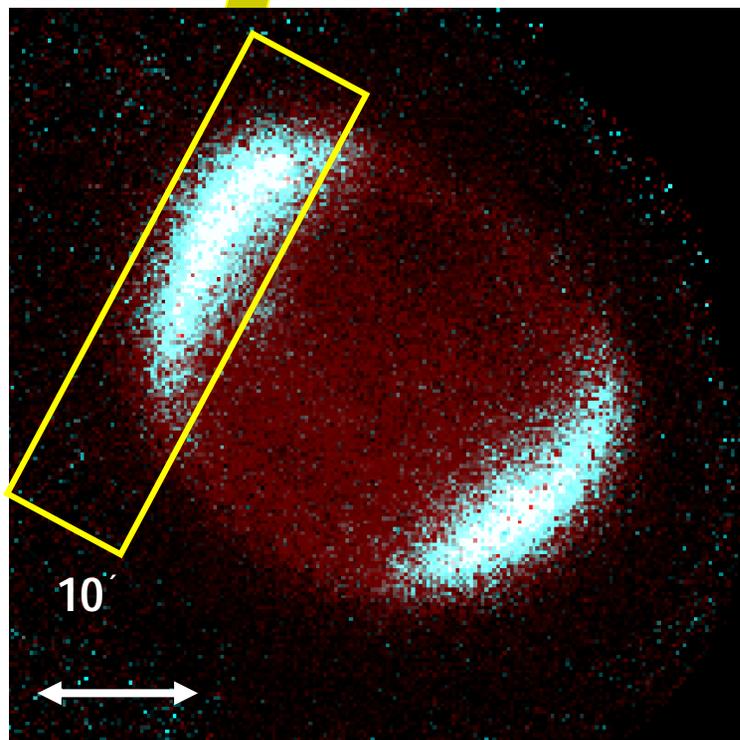
被加速粒子の拡散係数小さくなる

加速効率上がる

拡散係数に対する情報は、加速された粒子の空間分布に顕著に現れる。

→ Chandraの高空間分解詳細観測

# SN 1006 のX線イメージ



SN 1006 by ASCA



SN1006 NE shell

effective exposure : 68 ks

Chandra

0.3 - 2.0 keV

2.0 - 10.0 keV

(Bamba et al. 2003)

# SN 1006 のX線イメージ

熱的プラズマ:

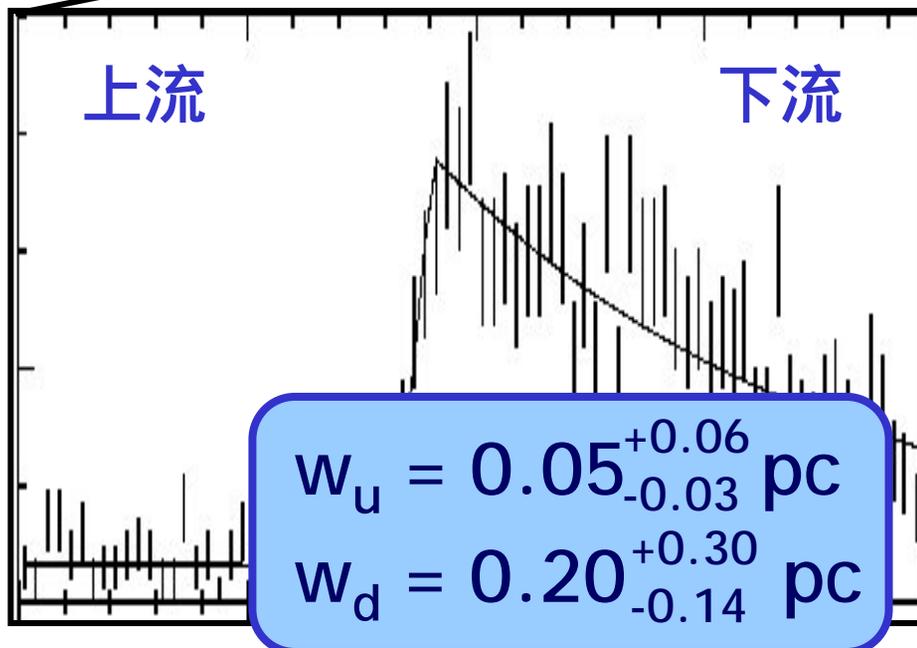
$$kT = 0.24^{+0.02}_{-0.03} \text{ keV}$$

広がった空間分布

シンクロトロン放射:

$$\nu_{\text{rolloff}} = 2.6^{+0.07}_{-0.07} \times 10^{17} \text{ Hz}$$

狭い空間分布

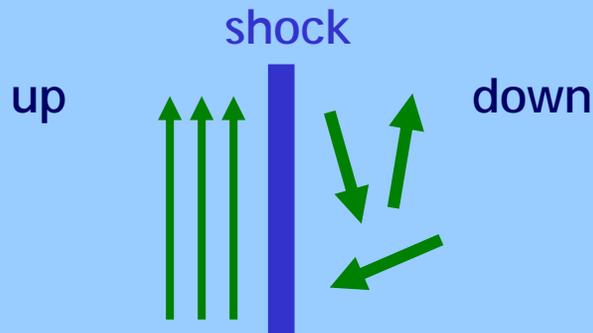


# シンクロトロンX線の局所集中の説明

Inefficient acc.

(relatively) weak  
( $\sim 30 \mu\text{G}$  downstream)  
perpendicular } B

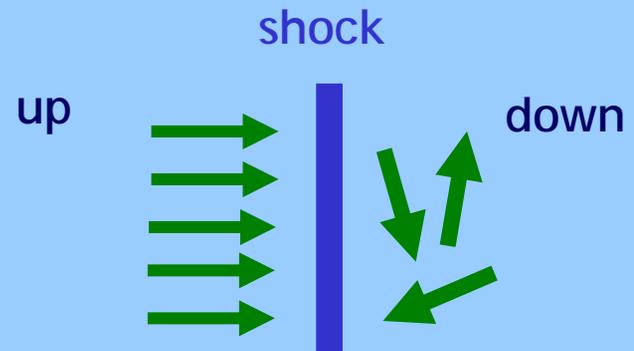
( Bamba et al. 2003  
Yamazaki et al. 2004 )



Efficient acc.

very strong  
( $\sim 100 \mu\text{G}$  downstream)  
parallel } B

(Berezhko et al. 2004)



Anyway,

下流磁場は乱流状態 (Bohm limit)  
加速効率是非常に良い (equipartition)

# Summary & Discussions

SN 1006 に対しては、  
inefficient acc.(弱い磁場)、 efficient acc.(強い磁場)  
の両方の場合とも観測結果を無矛盾に説明できる。

加速効率の論争に決着をつけるために重要な観測:

電波/X線の偏光

磁場の方向

Hard-X ~ GeV/TeV -ray

放射スペクトルのpower-lawからのズレを見る。

(でもGeVは galactic diffuse 大きい?)

ニュートリノ

hadronic process の証拠。

X線プラズマ診断

被加速粒子の影響による背景プラズマの温度降下?

# Efficient or inefficient acceleration?

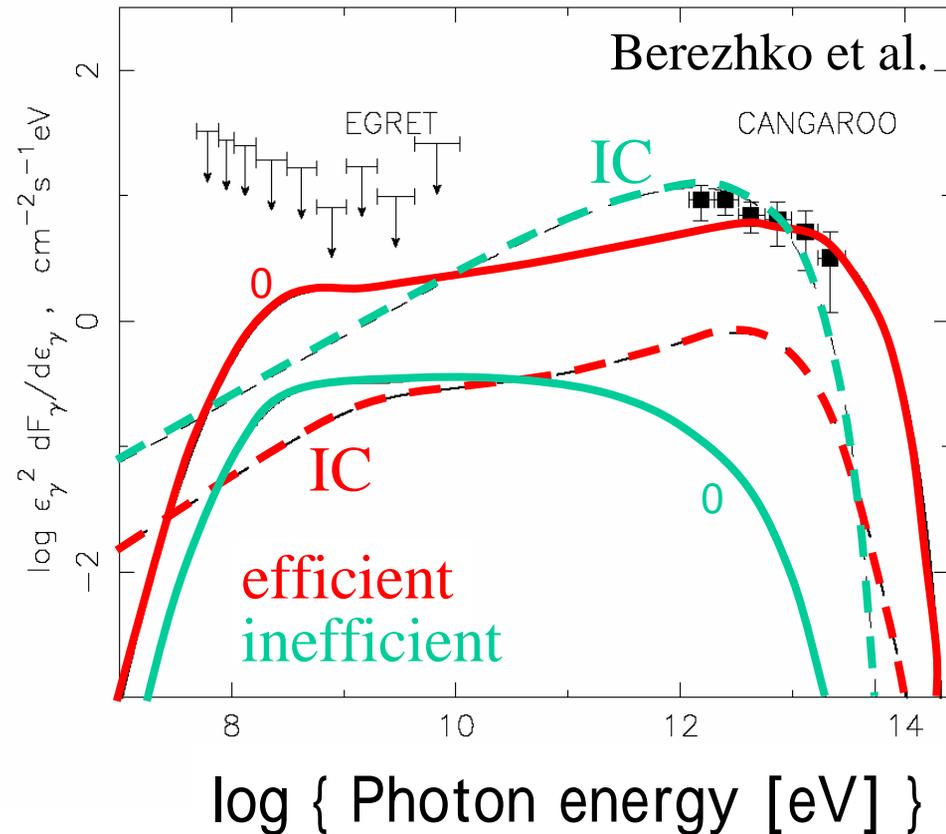
## Origin of TeV $\gamma$ -rays

磁場が弱いとき ( $\sim$  a few  $\mu$  G)  
inefficient acceleration

Accelerated electrons による  
CMB の IC (leptonic origin)

磁場が強いとき ( $\sim$  100  $\mu$  G)  
efficient acceleration

Accelerated protons による  
 $\pi^0$  decay (hadronic origin)



## The maximum energy of accelerated protons

$$E_{\max} = \frac{3eBu_s^2 t_{\text{age}}}{20\xi c} = 4.3 \times 10^{12} \text{ eV } \xi^{-1} \left( \frac{B}{\mu\text{G}} \right) \left( \frac{u_s}{3000 \text{ km/s}} \right)^2 \left( \frac{t_{\text{age}}}{10^3 \text{ yr}} \right)$$



## 超新星残骸での宇宙線加速 —銀河宇宙線の起源に迫る—

馬 場 彩

〈理化学研究所牧島宇宙放射線研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: bamba@crab.riken.jp

山 崎 了

〈大阪大学大学院理学研究科 宇宙進化グループ 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉

e-mail: ryo@vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp

宇宙線の加速機構および加速起源は、その発見以来 100 年の謎である。われわれは X 線天文衛星「チャンドラ」で超新星残骸 SN 1006 衝撃波面を観測し、高エネルギー電子からのシンクロトロン放射が過去の観測結果と従来の加速理論から予想されていたものよりもはるかに細くフィラメント状に集中していることを世界で初めて発見した。この観測事実を説明するためには、(i) 衝撃波法線に垂直、または (ii) 圧縮増幅された磁場の存在が必要である。われわれの研究は、宇宙線加速理論に観測面から定量的制限を与える新たな手法として注目されている。