

2004春物理学会 29pZE-5

無衝突衝撃波における非熱的粒子加速: 研究の現状

寺沢敏夫(東大理)

宇宙空間は γ 線バースト、超新星爆発、太陽フレア等々の爆発現象に満ち、それに伴う衝撃波がいたるところに形成されている。しかし、宇宙プラズマの希薄さはクーロン二体衝突に基づく相互作用を微弱なものとし、こうした衝撃波の緩和過程において主役を演じるのは二体衝突に替わる集団的相互作用である。こうした状況を表す「無衝突衝撃波」の概念が導入されたのはプラズマ物理学揺籃期の1960年代初めに遡る。本講演では「無衝突衝撃波」をめぐる話題のうち、特に非熱的粒子の加速にかかわるテーマを選び、四半世紀の研究史を振り返るとともに現状を紹介したい。

目次

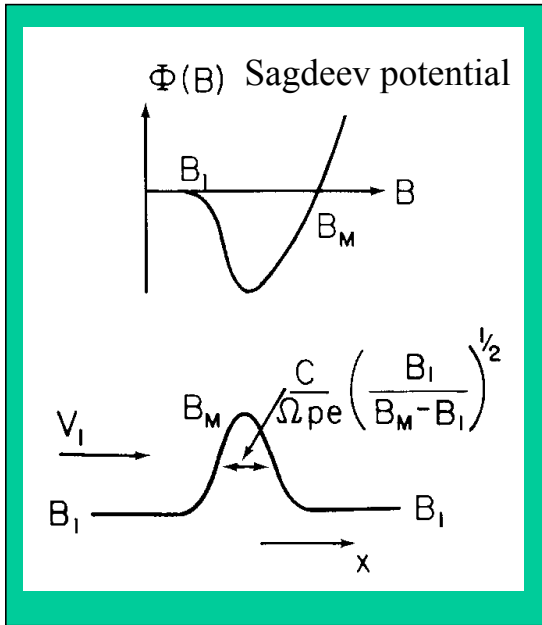
- (1) 研究揺籃期～1970年代半ば
- (2) 1970年代末～1980年代初頭
- (3) 1980年代半ば～1990年代初め
- (4) 1990年代半ば～現在

以下、ほぼ時代順に研究の流れをお話したい。
ただし具体例として示すデータは自前の新しいものを用いる場合が多い。

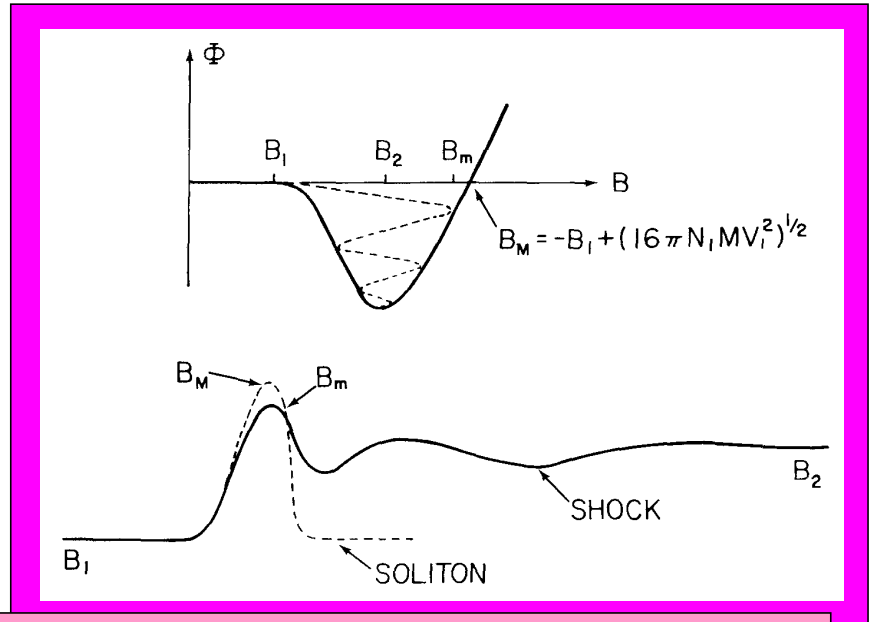
Tidman & Krallの頃の議論

散逸 (異常電気抵抗、粘性など)

衝撃波解への移行

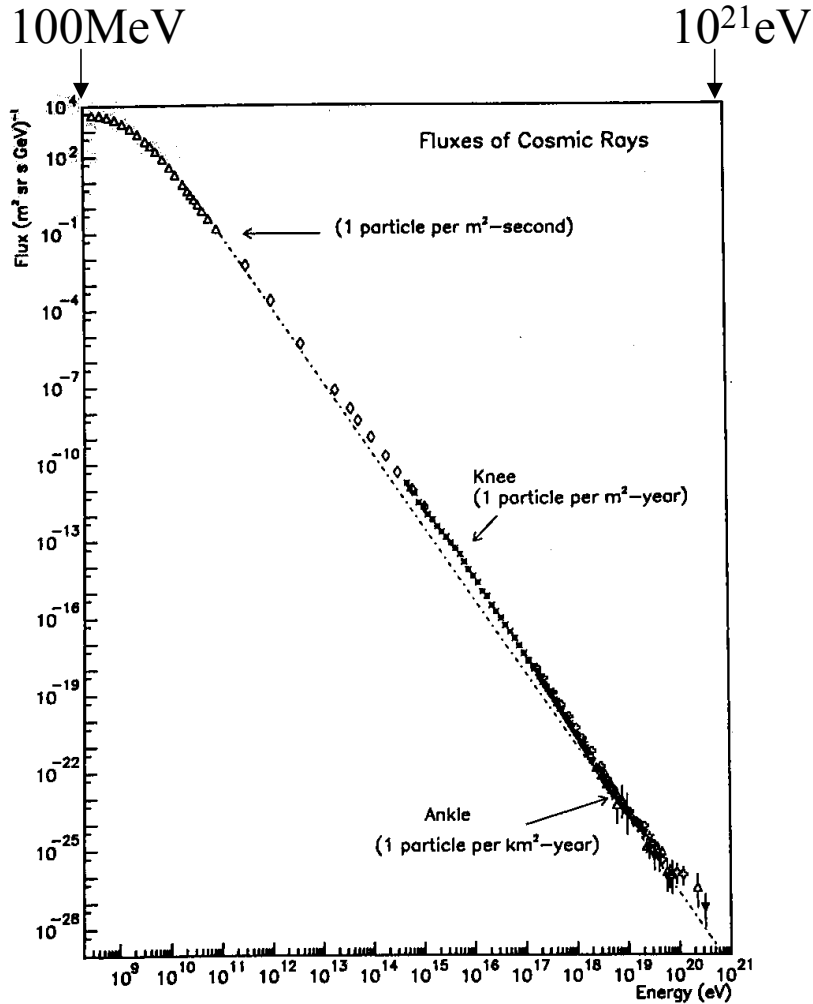


磁気音波ソリトン
(散逸なし)

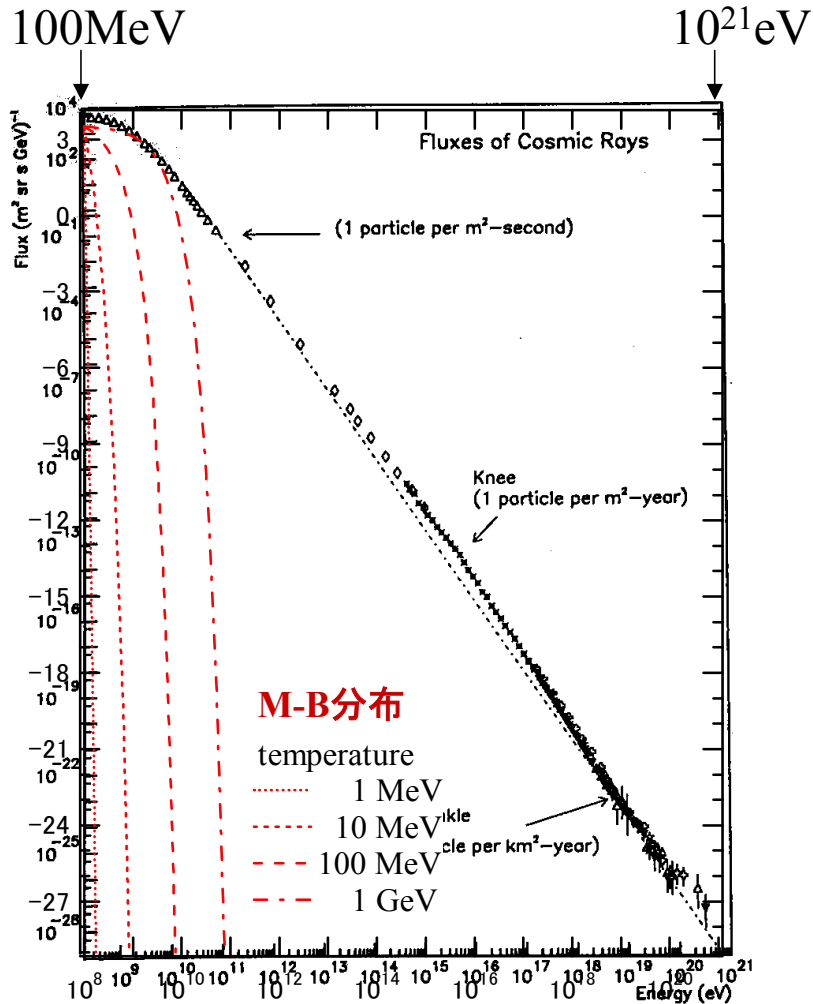


低マッハ数の衝撃波構造の理解には現在も有効な考え方
現在の興味:より乱流的な高マッハ数衝撃波の形成

宇宙線粒子のエネルギースペクトル(10^8 -- 10^{21} eV)

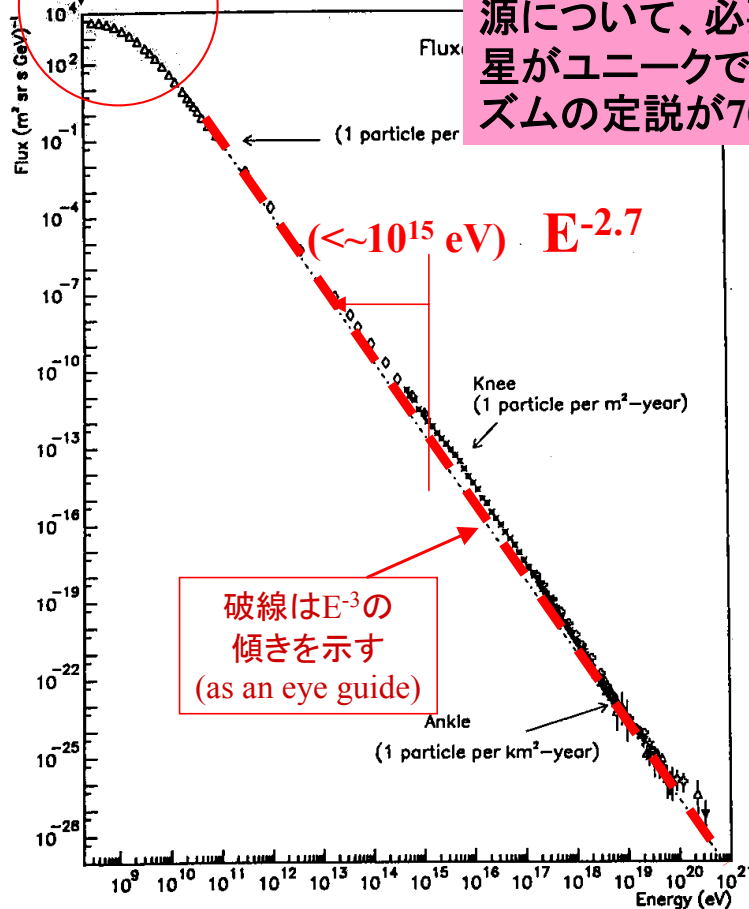


宇宙線粒子のエネルギースペクトル(10^8 -- 10^{21} eV)



宇宙線粒子のエネルギースペクトル($10^8 - 10^{21}$ eV)

太陽風による
減速効果
~10GeV以下



銀河系内成分と考えられる 10^{15} eV以下の宇宙線の源について、必要なエネルギー量の考察から超新星がユニークであると考えられていたが、加速メカニズムの定説が70年代末までなかった

→ 衝撃波統計加速

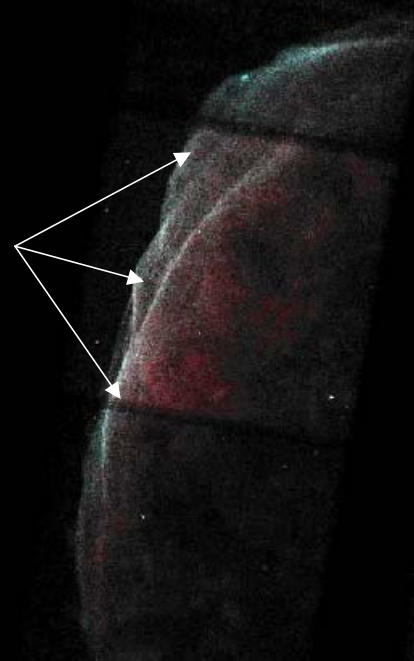
20世紀最後の四半世紀における宇宙プラズマ物理学における最大の成果の一つ

超新星残骸 SN1006からのX線 ... TeV電子によるシンクロトロン放射

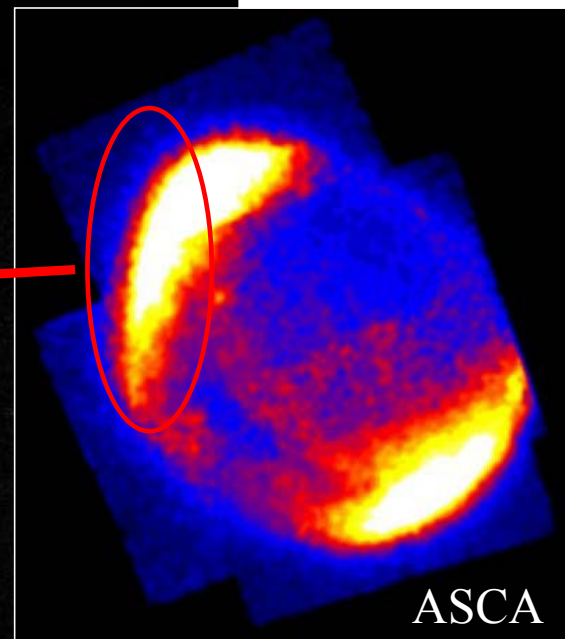
最近のChandra衛星によるX線観測 Bamba et al. (2002)

NE-Rim

Shock Fronts



Koyama et al., 1995



衝撃波速度 ~ 3000 km/sなので熱的電子のエネルギーはたかだか数 \sim 数十keV

電子が \sim TeVまで加速されていることの証拠

超新星残骸 SN1006からのX線 ... TeV電子によるシンクロトン輻射

最近のChandra衛星によるX線観測 Bamba et al. (2002)

無衝突衝撃波について解明すべきこと:

熱化(散逸)のプロセスは何か?

非熱的粒子の生成(加速)はどのようにして起きるか?

またその限界(最高エネルギー)はいくらか?

超新星などの高マッハ数($M > \sim 100$)衝撃波の研究とともに
直接探査可能な地球周辺の衝撃波研究が重要

(マッハ数は普通2~10。ごく稀に20に達する。)

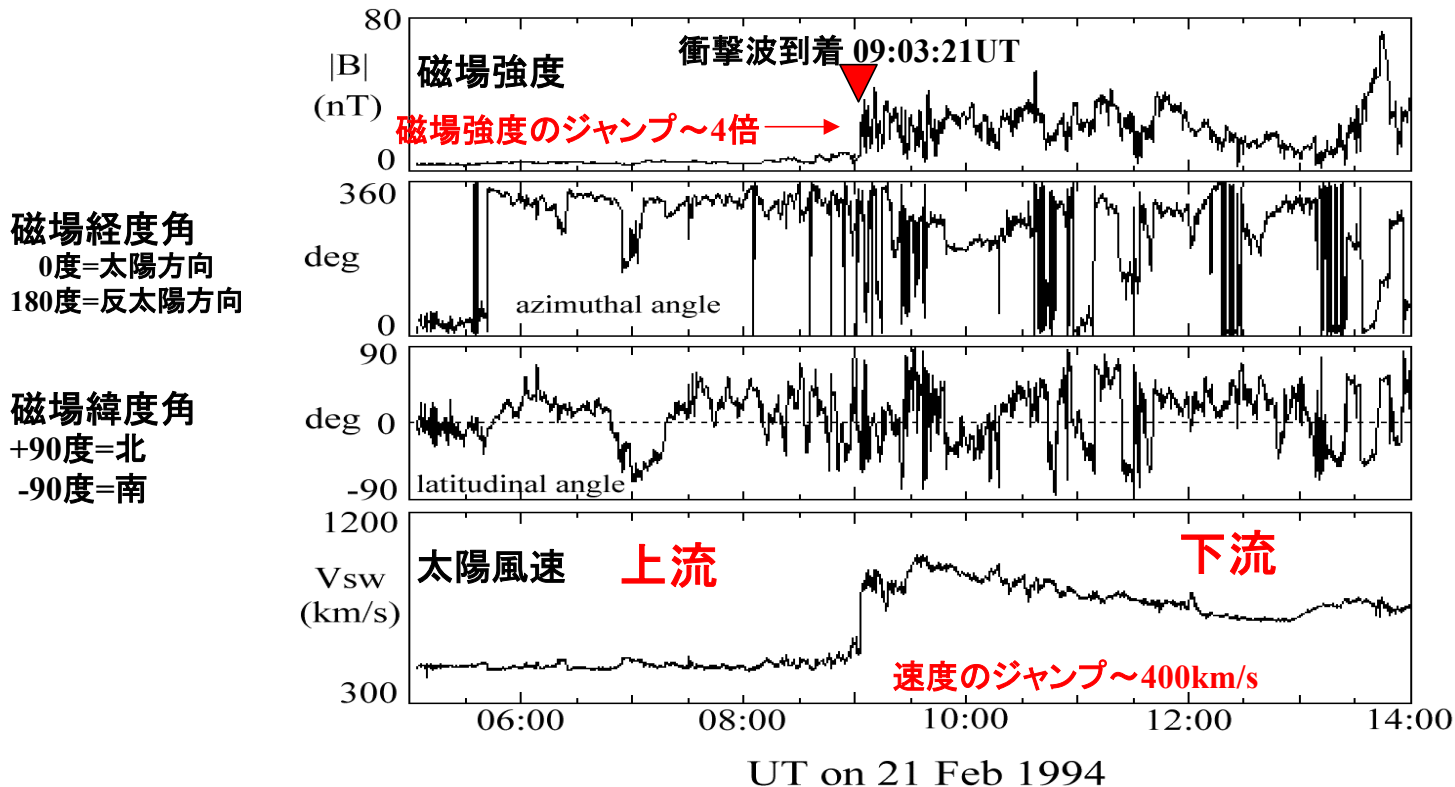
のエネルギーはたかたか数~数十keV

電子が~TeVまで加速されていることの証拠

GEOTAIL衛星により観測された惑星間空間衝撃波

2000年までの観測史上、6番目に被加速陽子(>10MeV)のフラックスが大きかった衝撃波。地球に磁気嵐を引き起こし、放送衛星に軽度の障害を与えた。(アルフェンマッハ数~6)

約32時間前の太陽フレアに伴って放出され、1AUに到達した



速度空間分布関数 $f_p(V)$ の実測(太陽風陽子・ α 粒子)

200eV/q~8keV/q

SWi Ram-A (3D data) PSD(MKS) 940221 / 85011-85111 (accumulate 5 sets) msec0=31811752

Np= 5.0020, V=(-522.0, -23.2, -56.4) Tyy,zz=(63.2, 48.6)

B=(3.6, -3.9, -5.0)

Babs= 7.7 phiB= -47.5 thetaB= -43.7

no BKGD correction

衝撃波上流側 08:50:11~1分間

vmax=1240.6

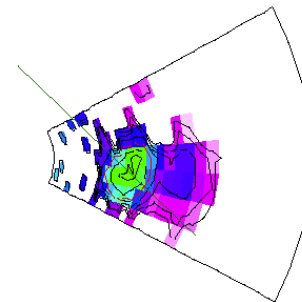
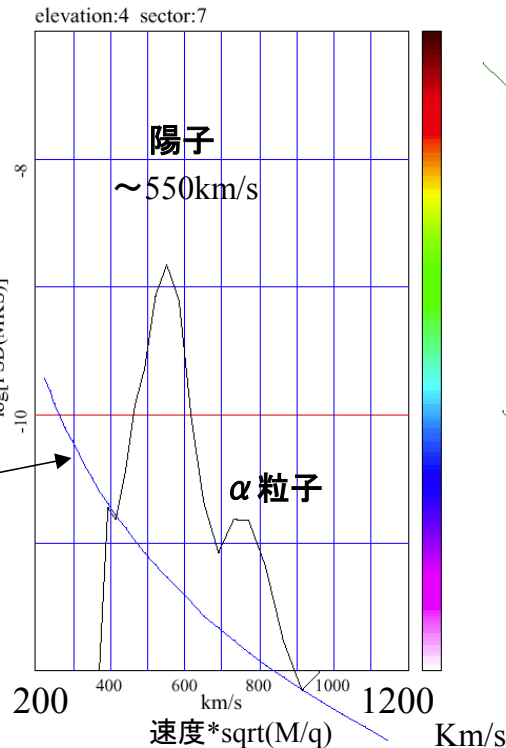
GEOTAIL搭載
静電型分析器
による

緯度方向に7つのセンサーを持ち、エネルギー方向の掃引は23ミリ秒ごと。一方、衛星のスピンの(3秒)を用いて経度方向の掃引を行っている。こうして得られた3次元分布関数は、テレメトリ容量の関係で、12秒間機上で積分された後、地上に送られる。

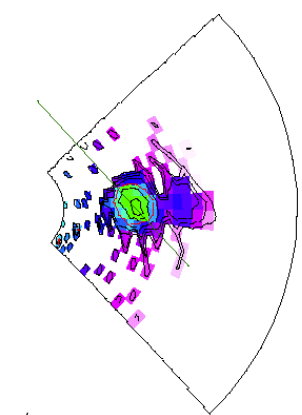
1D cut
 $\log f_p(V)$



↓
 $\log[\text{PSD(MKS)}]$
one count level

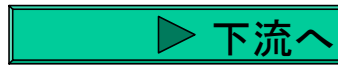


子午面断面



赤道面断面

→反太陽方向



速度空間分布関数 $f_p(V)$ の実測(太陽風陽子・ α 粒子)

200eV/q~8keV/q

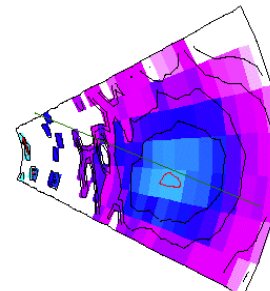
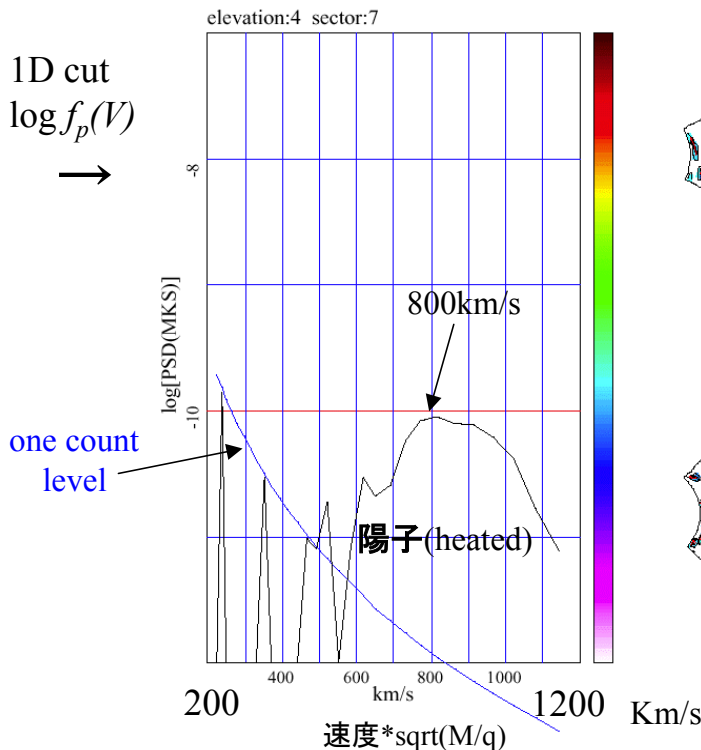
SWi Ram-A (3D data) PSD(MKS) 940221 / 90322-90422 (accumulate 5 sets) msec0=32602836
 Np= 14.2900, V=(-827.2,-125.8, -70.4) Tyy,zz=(222.8, 194.6)
 B=(10.6, -14.6, -7.6)
 Babs= 26.2 phiB= -54.1 thetaB= -22.9
 no BKGD correction

GEOTAIL搭載
 静電型分析器
 による

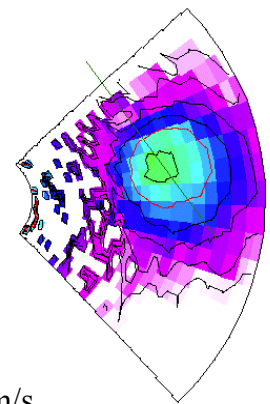
緯度方向に7つ
 のセンサーを持ち、エネルギー方向の掃引は23ミリ秒ごと。一方、衛星のスピンの(3秒)を用いて経度方向の掃引を行っている。こうして得られた3次元分布関数は、テレメトリ容量の関係で、12秒間機上で積分された後、地上に送られる。

衝撃波下流側 09:03:22~1分間

vmax=1240.6



子午面断面



赤道面断面

→反太陽方向

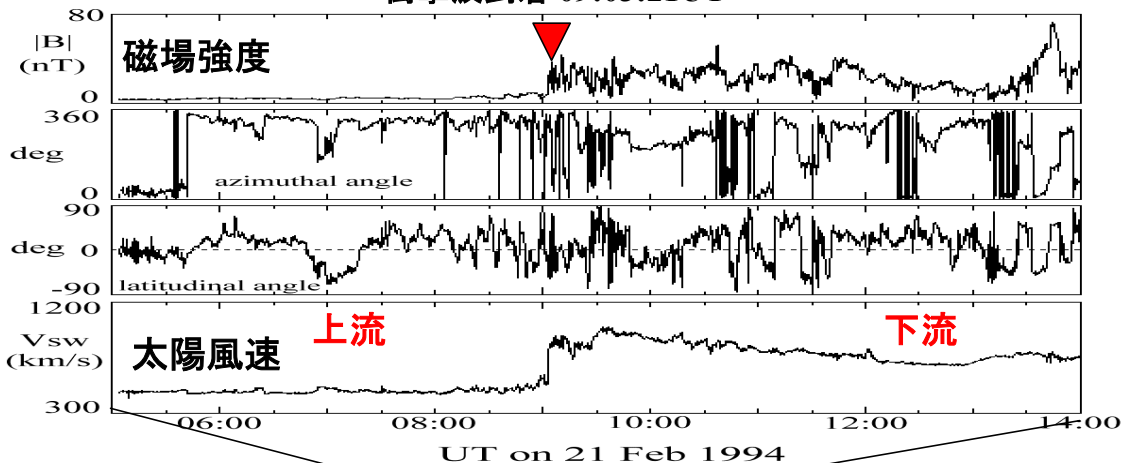


GEOTAIL衛星により観測された惑星間空間衝撃波

衝撃波到着 09:03:21UT

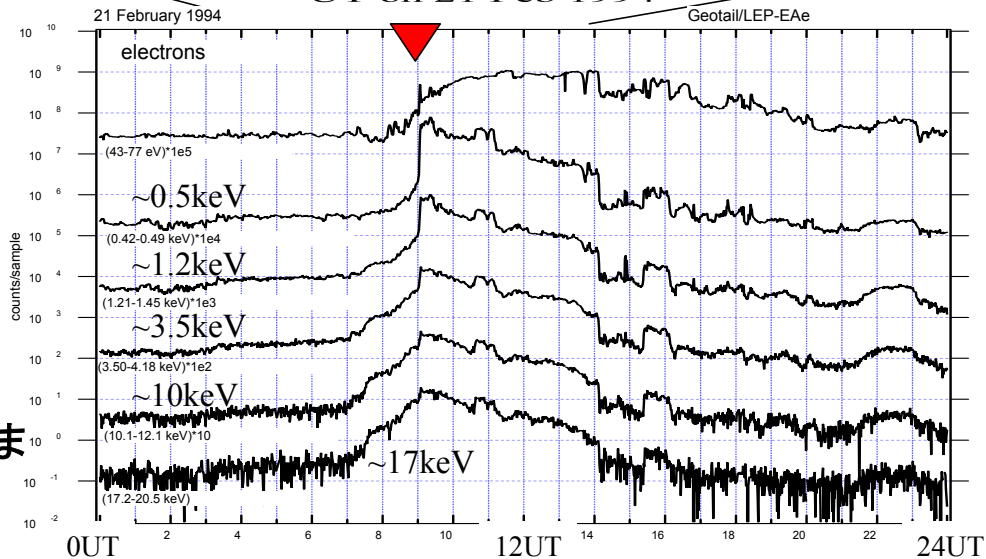
磁場経度角
0度=太陽方向
180度=反太陽方向

磁場緯度角
+90度=北
-90度=南



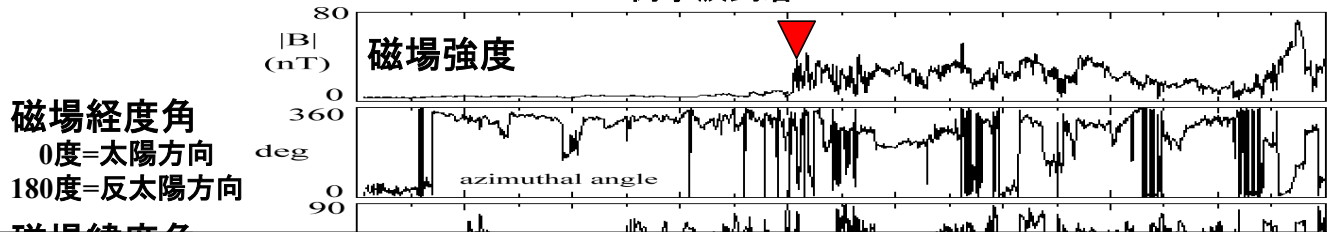
→
非熱的電子の
フラックス

陽子の増大も~30MeVま
で見られた



GEOTAIL衛星により観測された惑星間空間衝撃波

衝撃波到着 09:03:21UT



無衝突衝撃波について解明すべきこと:

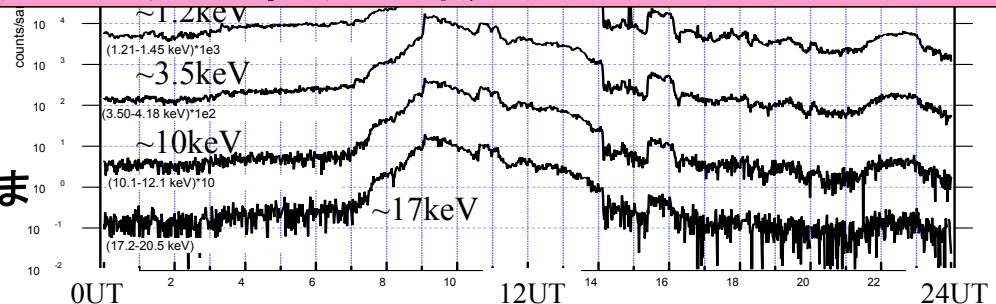
熱化(散逸)のプロセスは何か?

非熱的粒子の生成(加速)はどのようにして起きるか?

またその限界(最高エネルギー)はいくらか?

超新星衝撃波と共通の問題意識

非熱的電子の
フラックス



陽子の増大も~30MeVま
で見られた

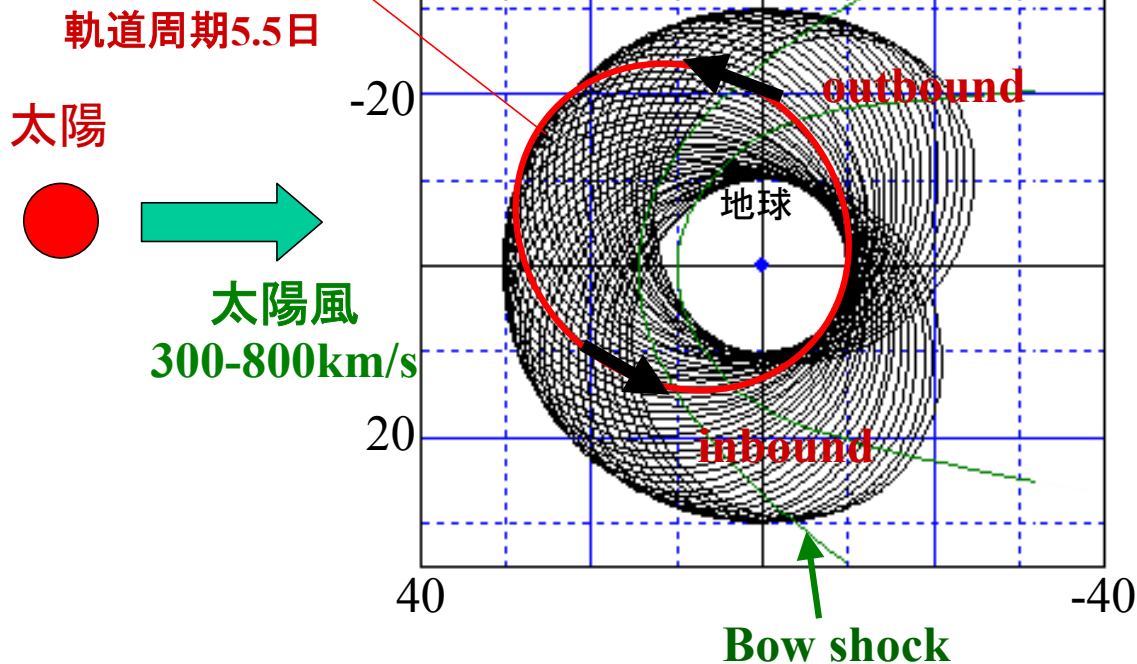
目次

- (1) 研究揺籃期～1970年代半ば
- (2) 1970年代末～1980年代初頭
- (3) 1980年代半ば～1990年代初め
- (4) 1990年代半ば～現在

(2) 1970年代末～1980年代初頭

二つの大きな進展があった。一つは人工衛星観測の精密化による無衝突衝撃波内部構造の解明であり、もう一つは衝撃波統計加速理論＝宇宙線超新星衝撃波起源論の確立である。バウショック観測から、衝撃波構造は上流磁場の衝撃波角（波面の法線方向と磁場のなす角）により決定されていることが明らかになった（ほぼ45度を境に準平行領域と準垂直領域に分類される）。準垂直衝撃波に関しては、衝撃波面におけるイオン反射の有無を分ける臨界マッハ数の存在が観測的に証明された。他方、準平行衝撃波は磁場の乱れが大きく、非熱的粒子の統計加速の舞台であることが明らかにされた。後者の準平行衝撃波研究は宇宙線起源研究と影響しあいながら同時進行的に発展し、無衝突衝撃波により、極めて自然にべき型エネルギースペクトルが形成されることが明らかにされた。

人工衛星Geotailの軌道(1995/3-1995/11の例) (距離の単位は地球半径)



軌道運動に伴い、outbound,inboundの2回、bow shockを観測すると期待される。しかし、人工衛星の軌道速度は数km/s以下だが、bow shockは数十～数百km/sではためくことがあるので、実際にshockを横切る回数はそれより多い。

衝撃波構造の 衝撃波角 θ_{BN}

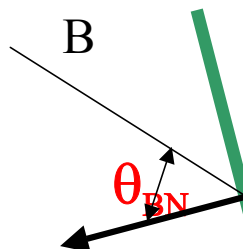
依存性

(ただしこの角度の観測的決定には数~十数度の誤差が避けられない)

準垂直

$\sim 45^\circ$

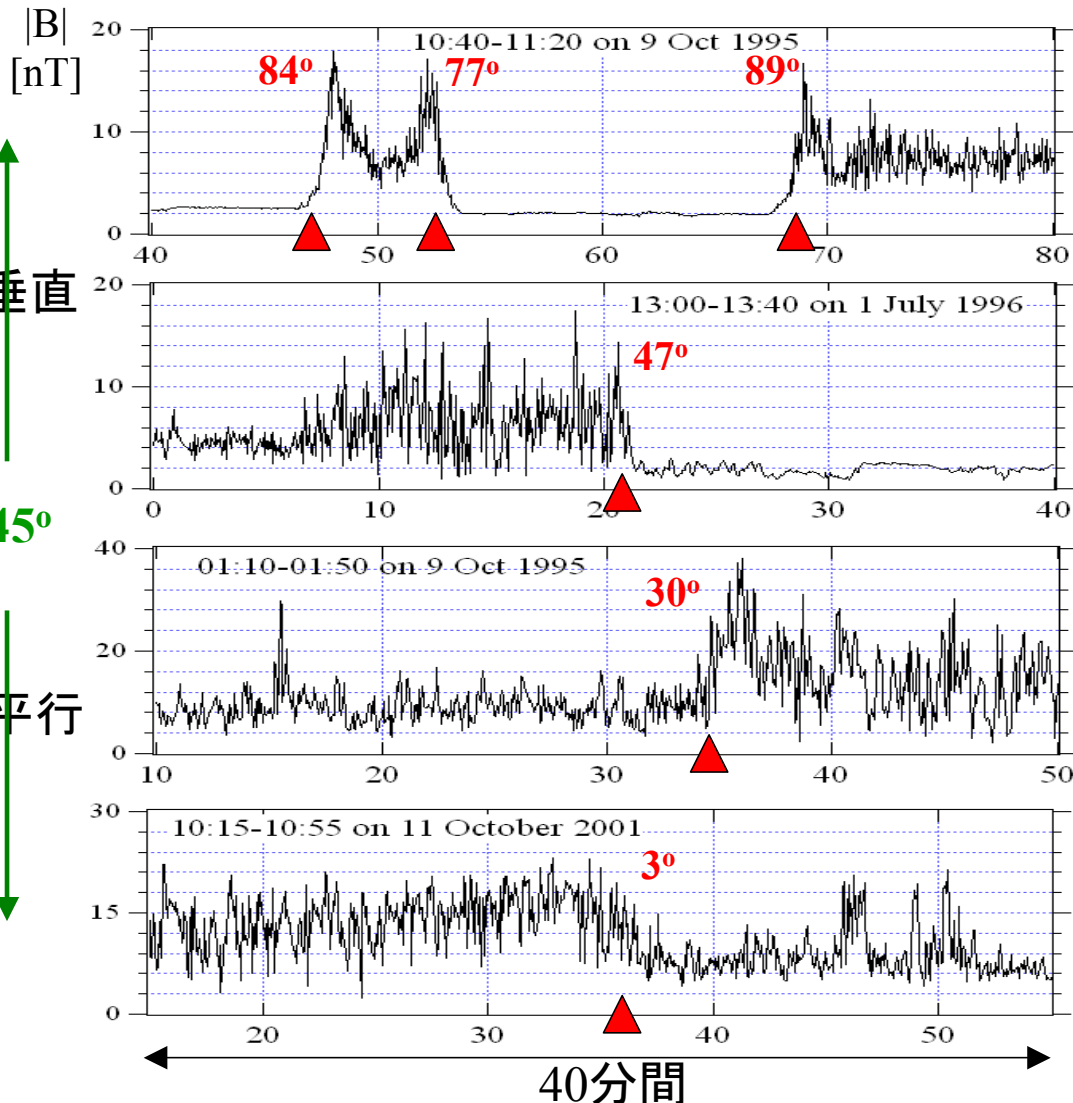
準平行



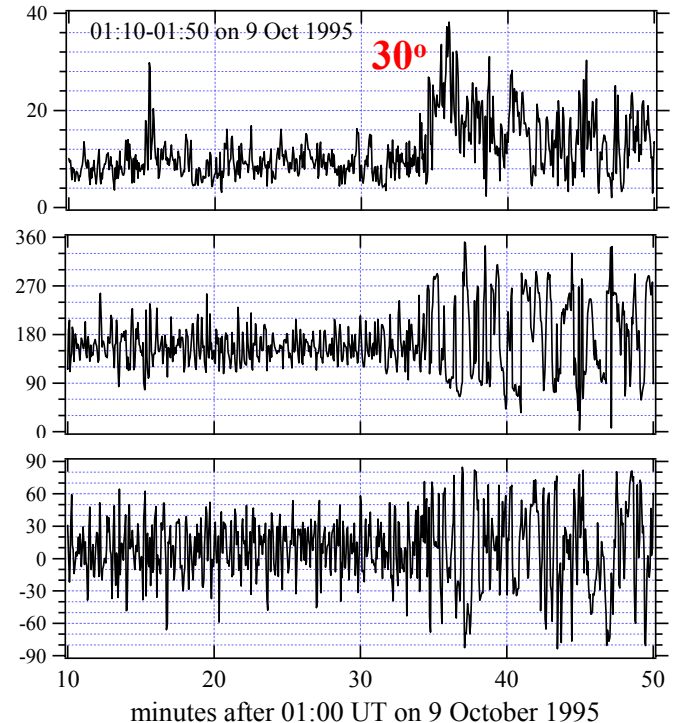
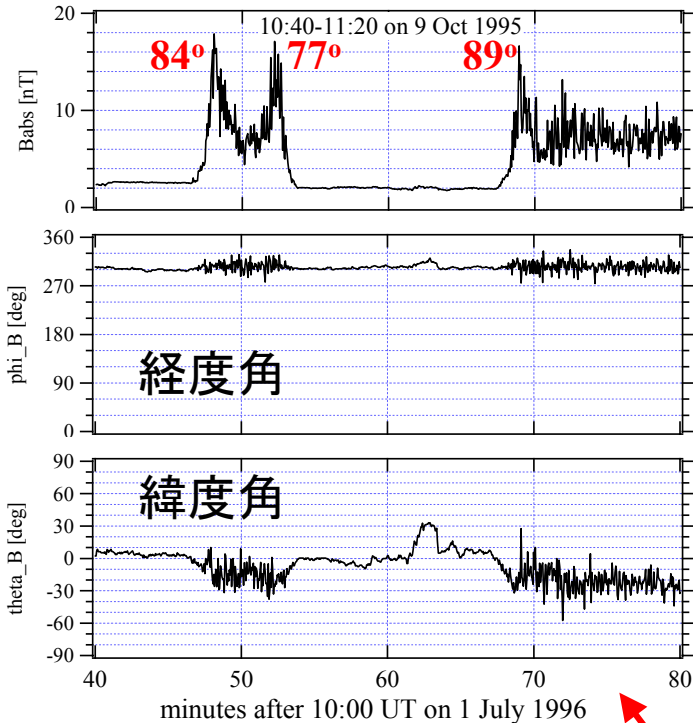
shock normal

bow shock surface

solar wind flow

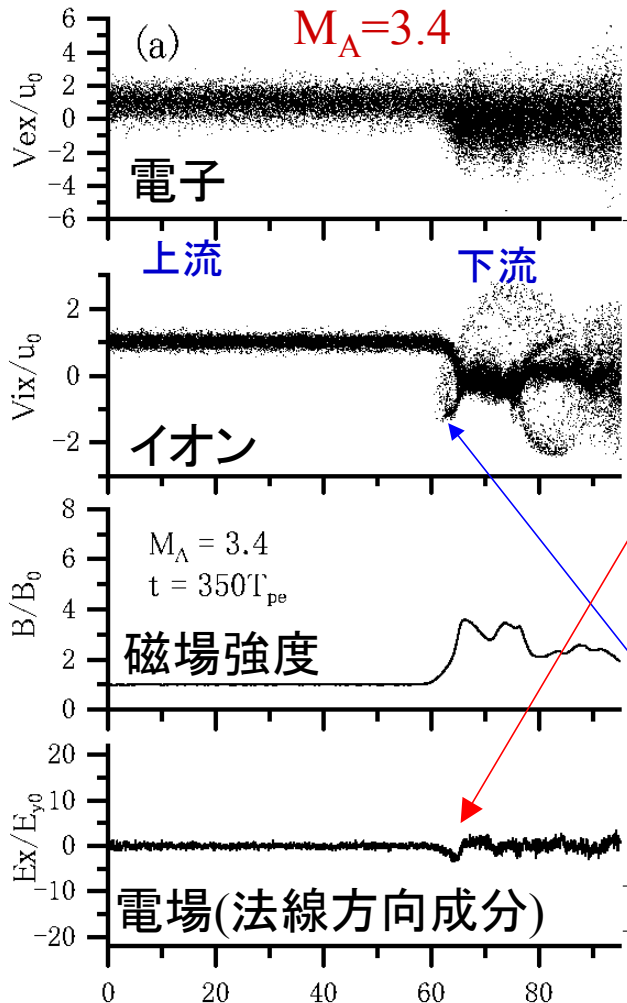


準垂直(quasi-perpendicular) vs 準平行(quasi-parallel)



衝撃波構造の解明はまず準垂直衝撃波から着手され、その後、準平行衝撃波へと進められた

(垂直衝撃波のシミュレーション結果)



$E_x < 0$ なる電場形成

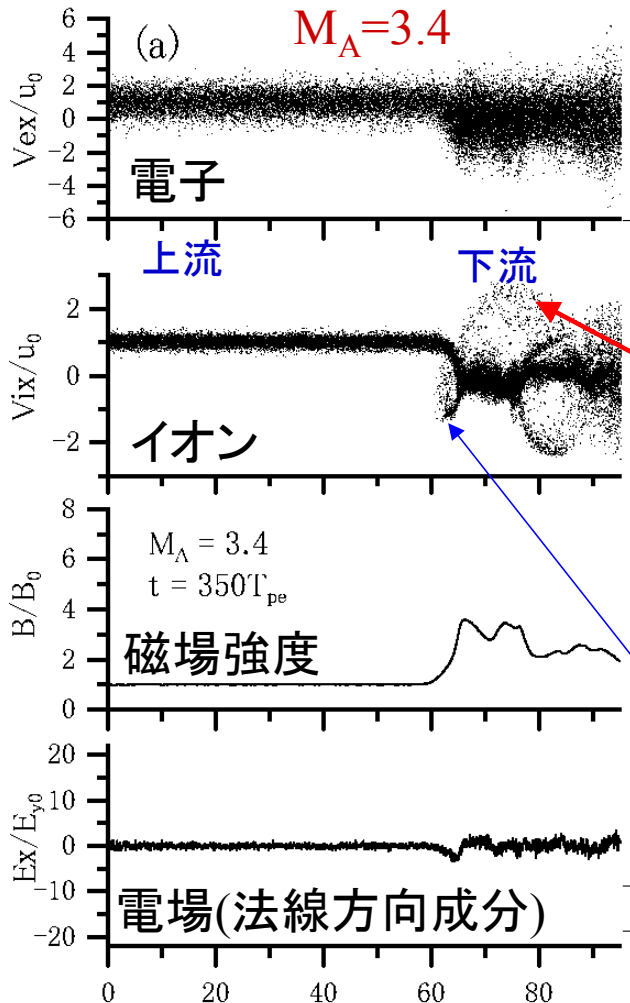
一般化されたオームの法則、

$$\vec{E} = -\frac{1}{c}\vec{V} \times \vec{B} + \frac{1}{nec}\vec{J} \times \vec{B} - \frac{1}{ne}\vec{\nabla} P_e$$

イオンを減速する向きの電場 E_x 成分を作る。熱的分布するイオンのうち低エネルギー部分のものは静電ポテンシャル $\delta\phi = -\int E_x dx$ を超えることができず、反射される。

(少数派「落ちこぼれ」イオン)

Remark: low Mach number shocks

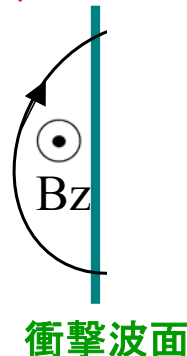


(垂直衝撃波のシミュレーション結果)

反射されたイオンは加速されて衝撃波面に戻るので、今度は $\delta\phi$ を超えることが可能である

$$-\frac{1}{c}\vec{V} \times \vec{B}$$

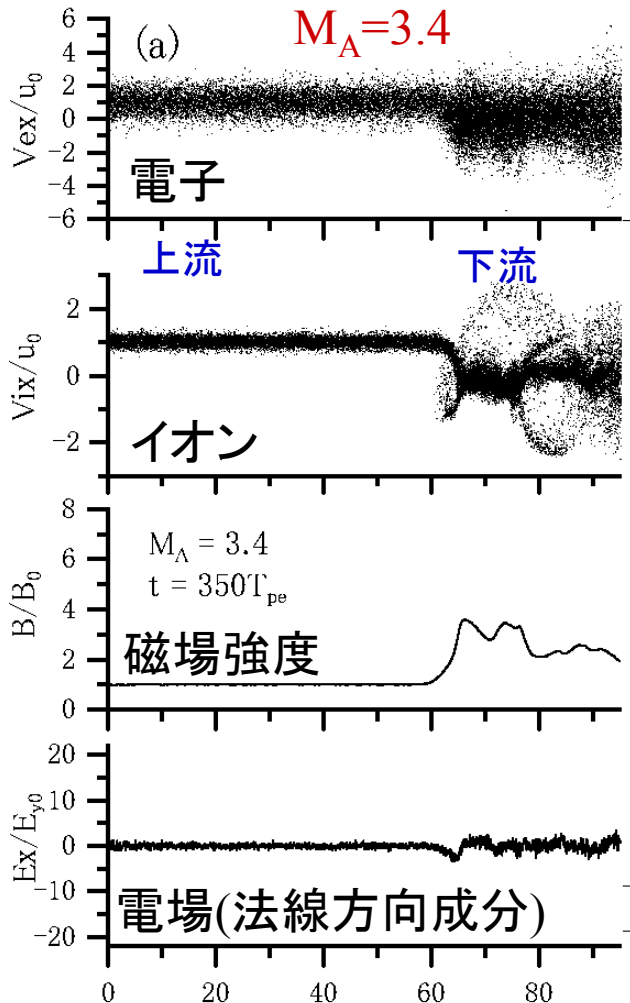
電場の向き



これらのイオンは下流側で高エネルギーをもち多数派のイオンとは違う振る舞いをし、追加的散逸に寄与する
(「落ちこぼれ」から「エリート」へ)

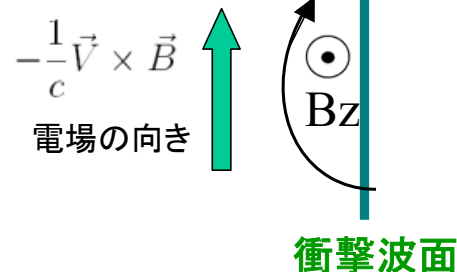
(少数派「落ちこぼれ」イオン)

Remark: low Mach number shocks



(垂直衝撃波のシミュレーション結果)

反射されたイオンは加速されて衝撃波面に戻るので、今度は $\delta\phi$ を超えることが可能である



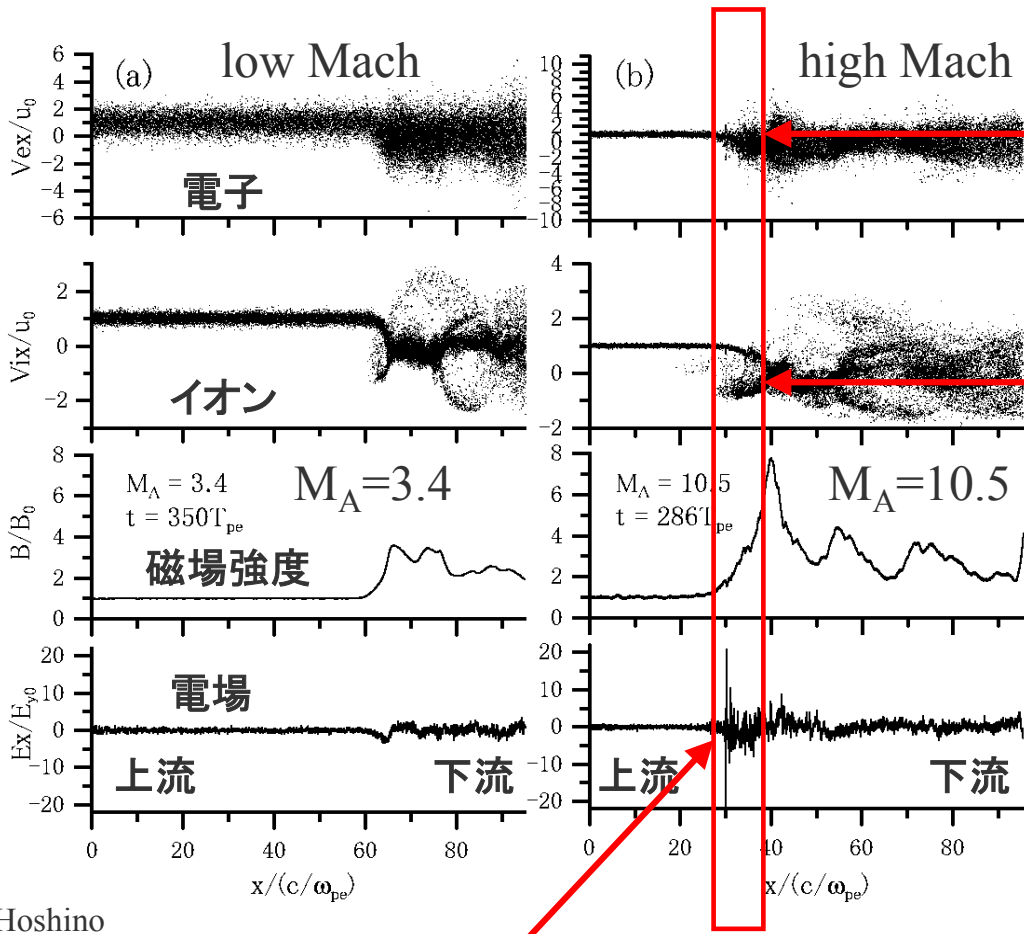
Bow shockなど、地球軌道付近で普通に観測される衝撃波($\beta > \sim 0.1$)の場合、 $\delta\phi$ はイオン慣性長(数十km程度)に渡って分布している。一方、太陽コロナのような**低ベータプラズマ**($\beta \ll 0.1$)中の場合、 $\delta\phi$ の存在範囲が電子の慣性長程度になることがある。



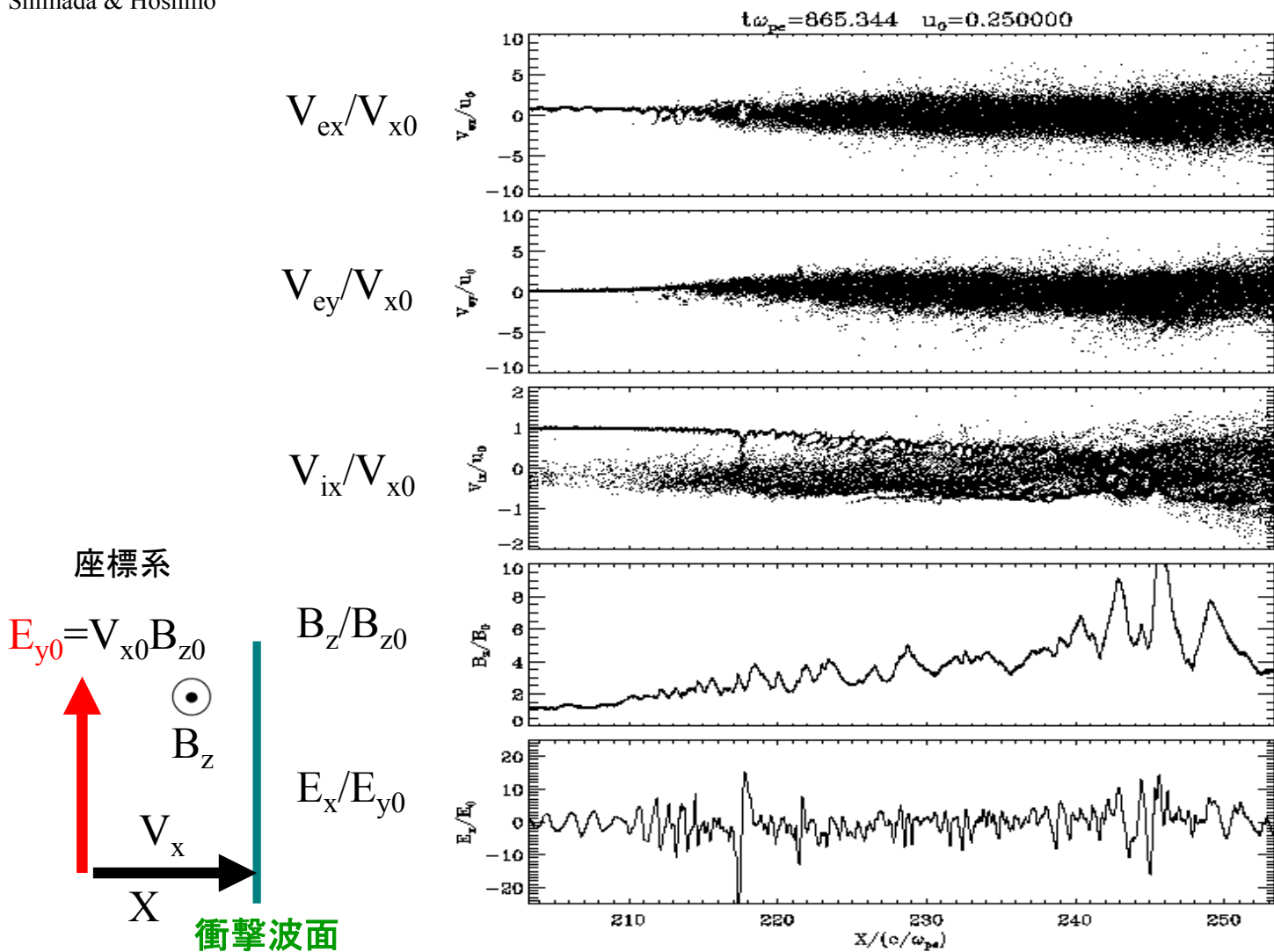
大沢et al.によるサーフィン加速の舞台(直接観測はまだない)

Remark: low Mach number shocks

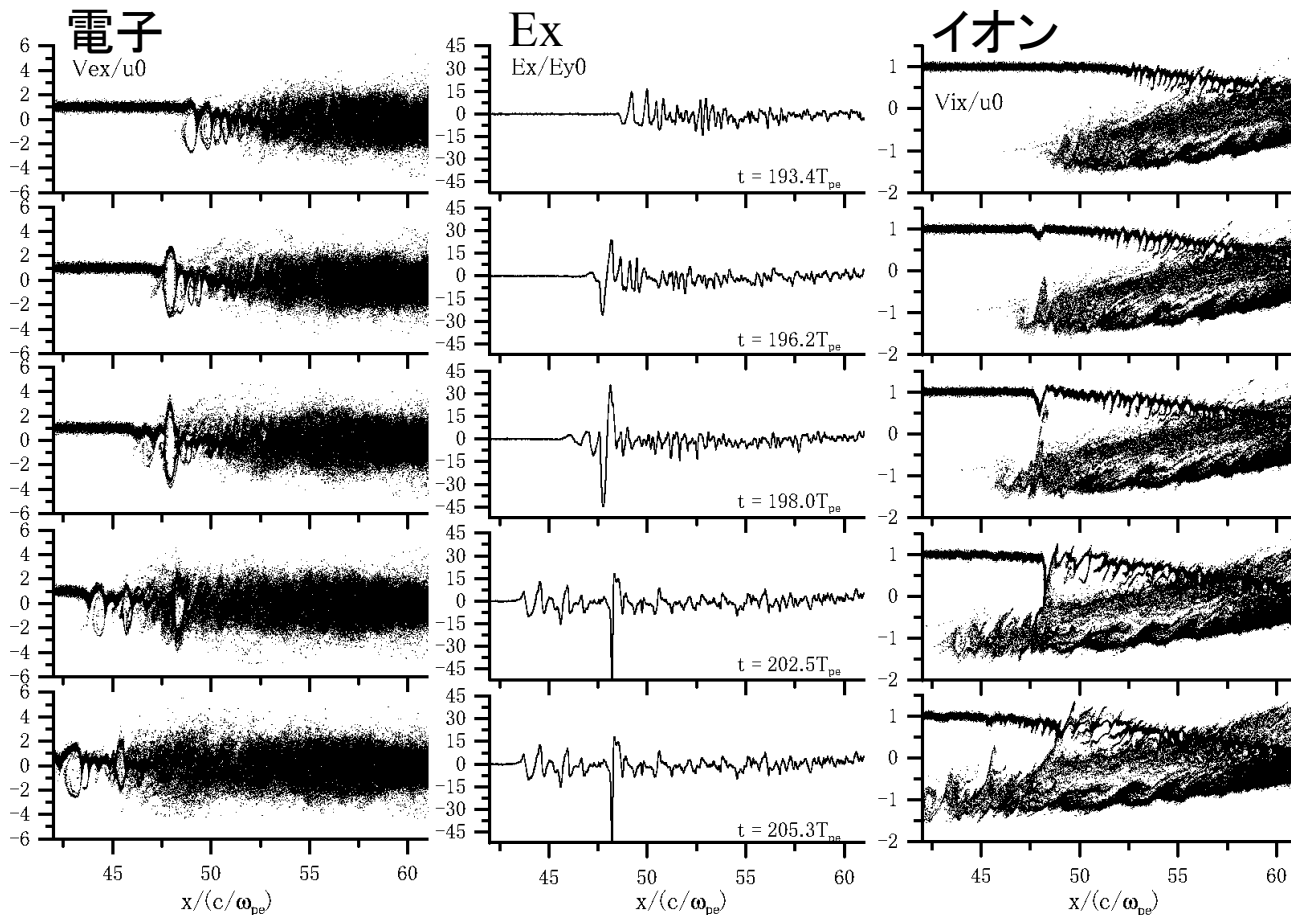
最近の進展: 高マッハ数衝撃波における電子ホール生成



電子・
反射イオン
間の相対
速度が電
子の熱速
度を超える
とBuneman
不安定性
が発生



small scale structure at the shock front (2)

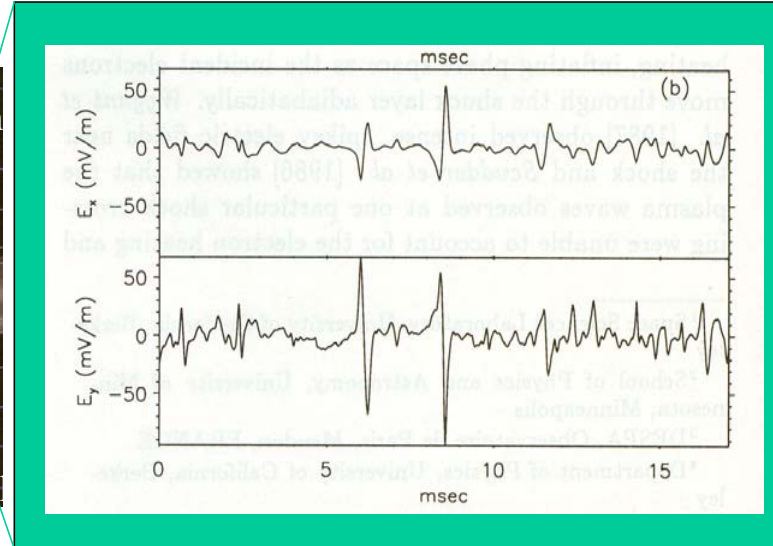
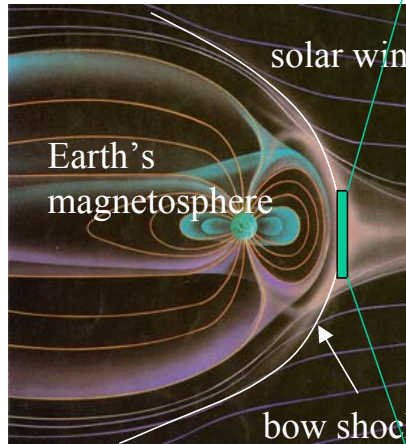


位相空間ホールの形成が電子の加熱に本質的である

電子ホール in Bow shocks

$$E_{\text{soliton}}/E_{\text{sw}} \sim 10 - 100$$

$$\text{quasi-perpendicular, } M_s \sim 9.5$$



(Bale et al. GRL 1998, Matsumoto et al. ASR 1997)

電場波形は特殊な工夫によりmsec以下まで分解に成功

しかし、対応する電子の分布関数観測は時間分解能が12秒であり、
加熱現象の同定にはほど遠い。

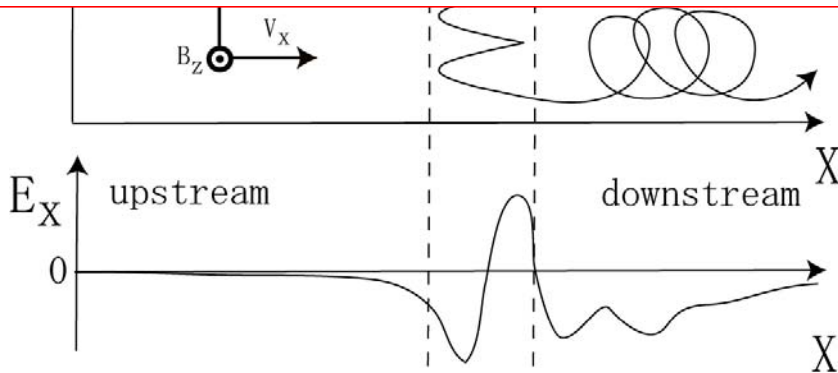
粒子観測の時間分解能の飛躍的向上が必要
(次期磁気圏観測衛星計画“SCOPE”のターゲットの一つ)

電子ホールが注目されているのは、電子の加熱に加え、非熱的な高エネルギー電子の加速にも有効であることがシミュレーションで示されたからである:

古典的サーフィン加速 ... 衝撃波面法線方向に働く静電場
(Mizuno, Shapiro, Ohsawa, ...)

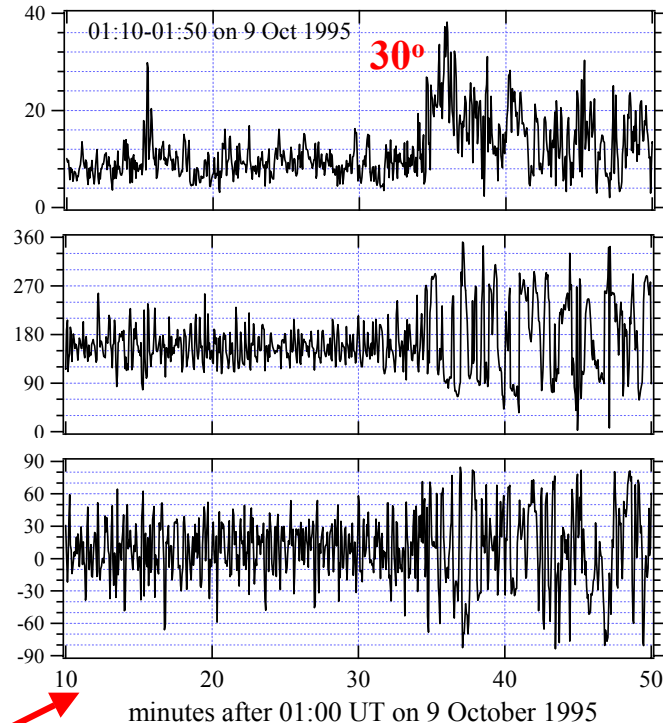
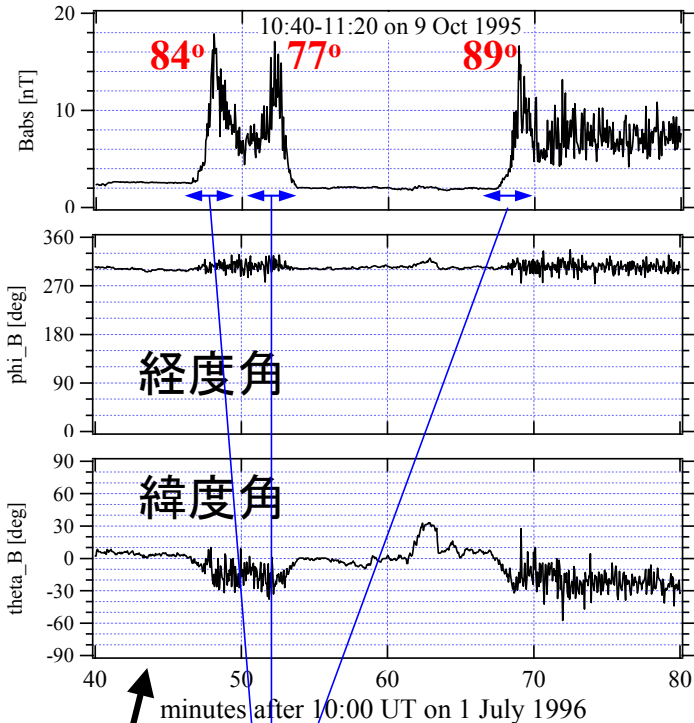
最近のサーフィン加速 ... 衝撃波遷移領域に励起された電子ホールに伴う静電場
(Hoshino and Shimada, ...)

マッハ数の極めて大きな($> \sim 40$)垂直～準垂直衝撃波で顕著と理論的に予想(星野)。今後の観測に期待。



電子ホール

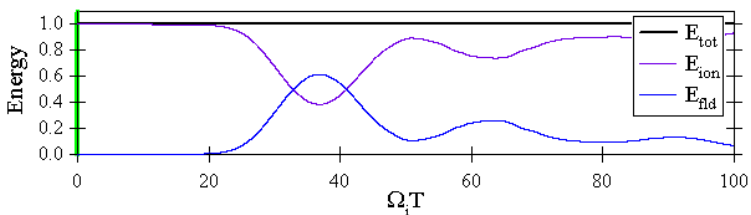
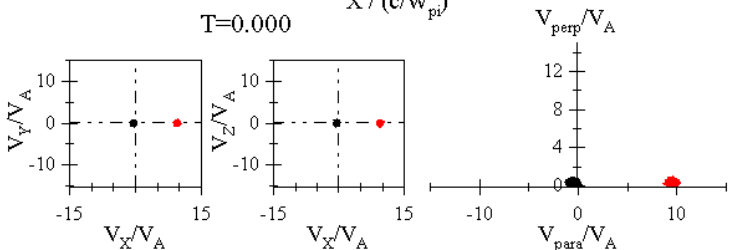
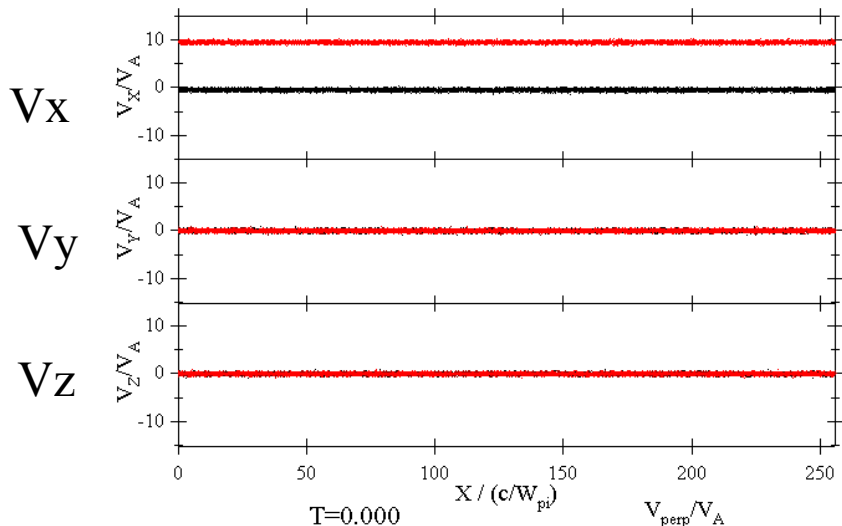
準垂直(quasi-perpendicular) vs 準平行(quasi-parallel)



準垂直衝撃波で反射されたイオンは半ジャイロ回転の後には衝撃波面に戻る ... **ジャイロ半径**より遠くの上流には影響を与えない

一方、**準平行衝撃波**で反射されたイオンは上流に染み出す

上流側に染み出したイオンはビームサイクロトロン不安定性を通じてアルフェン波を励起する



←岡によるシミュレーション結果

初期条件



background ions
密度 n_0

beam ions
 $V_b = 10V_A$
 $n_b = 0.015n_0$

イオン・サイクロトロン周波数

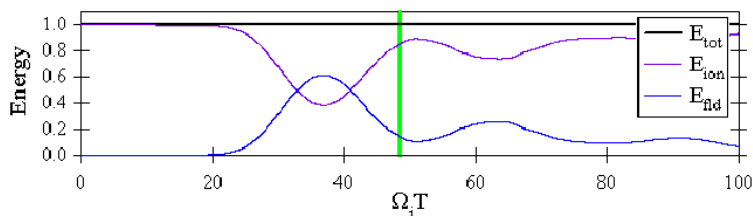
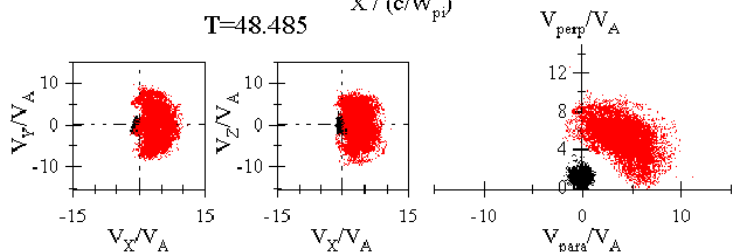
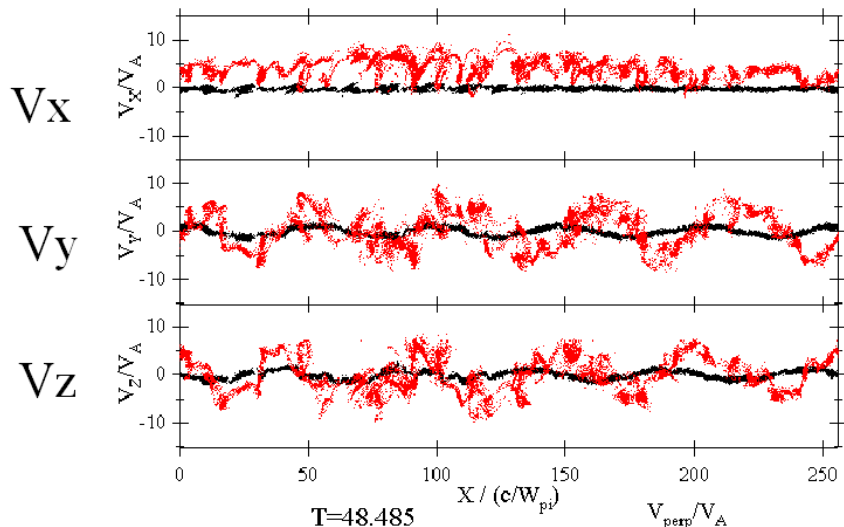
サイクロトロン共鳴条件

$$\omega - kV_b = -\Omega_{ci}$$

を満たすアルフェン波が励起され、その波によりbeam ionsはピッチ角散乱される

→散乱後、プラズマ系で等方化

上流側に染み出したイオンはビームサイクロトロン不安定性を通じてアルフェン波を励起する



←岡によるシミュレーション結果

初期条件



background
ions
密度 n_0

beam ions
 $V_b=10V_A$
 $n_b=0.015n_0$

イオン・サイクロトロン周波数

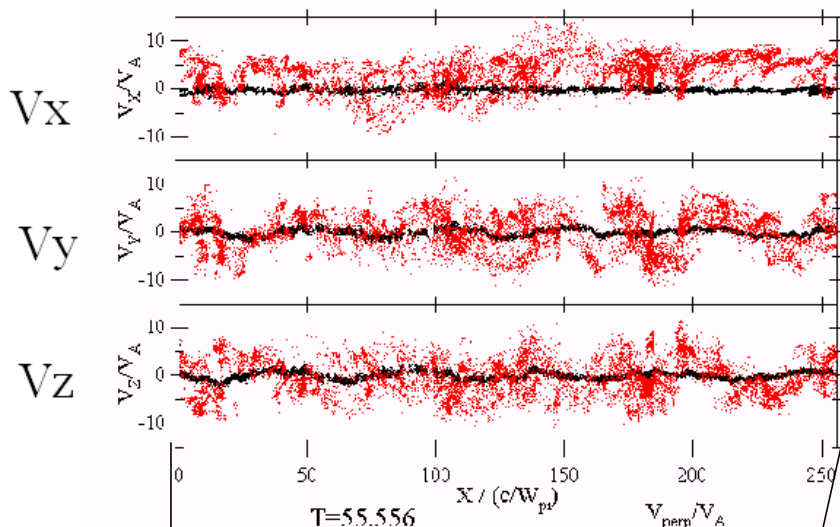
サイクロトロン共鳴条件

$$\omega - kV_b = -\Omega_{ci}$$

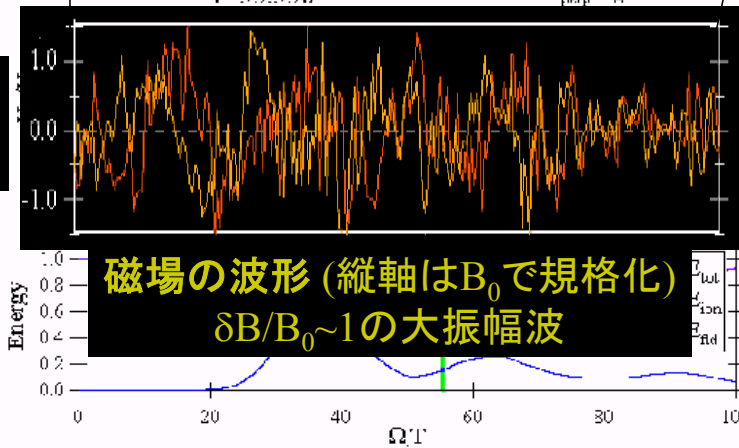
を満たすアルフェン波が励起され、
その波によりbeam ionsはピッチ角
散乱される

→散乱後、プラズマ系で等方化

上流側に染み出したイオンはビームサイクロトロン不安定性を通じてアルフェン波を励起する

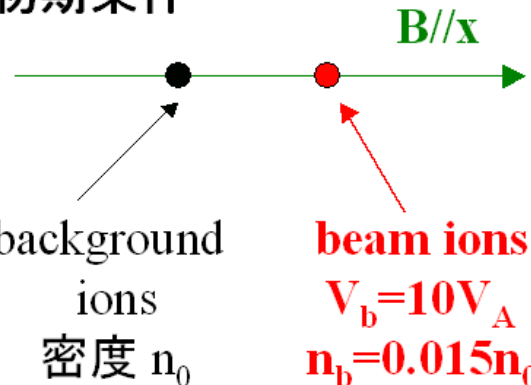


B_y
 B_z



←岡によるシミュレーション結果

初期条件



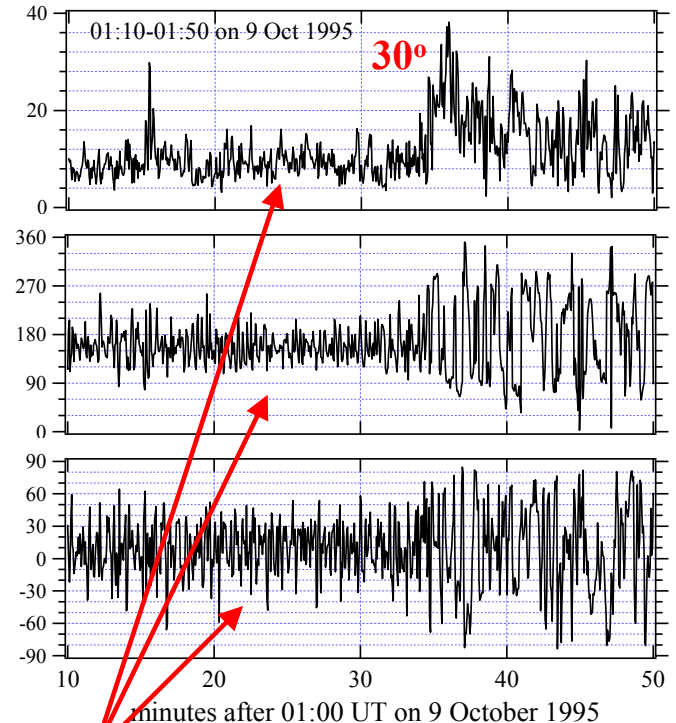
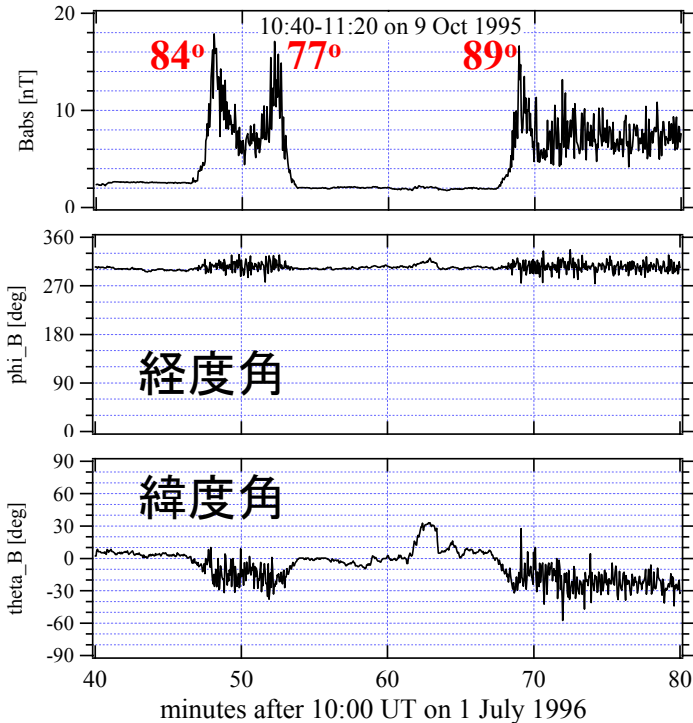
イオン・サイクロトロン周波数

サイクロトロン共鳴条件

$$\omega - kV_b = -\Omega_{ci}$$

を満たすアルフェン波が励起され、
 その波によりbeam ionsはピッチ角
 散乱される
 →散乱後、プラズマ系で等方化

準垂直(quasi-perpendicular) vs 準平行(quasi-parallel)



上流側に染み出したイオンにより励起されたアルフェン波。
 励起後、超アルフェン速の太陽風により流されて衝撃波面に到達、さらに下流側に運ばれる

衝撃波統計加速 (衝撃波Fermi加速)

衝撃波の周りのアルフェン波乱流により、非熱的な粒子(“宇宙線粒子”とよぼう)はピッチ角散乱を受ける。散乱が十分盛んで、宇宙線粒子のピッチ角分布が背景プラズマの共動系でほぼ等方的と見なせるとき、それらの位相空間分布関数 $f(t,x,p)$ は次のFokker-Planck方程式に従う:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \underbrace{(u \cdot \nabla)f}_{\text{背景プラズマの流れ}(u)\text{による輸送効果}} - \underbrace{\nabla \cdot (D_{\parallel nn} \cdot \nabla f)}_{\text{ピッチ角散乱により粒子がランダムウォークする効果(空間拡散項)}} = \frac{1}{3}[\nabla \cdot u] \underbrace{\left[\frac{\partial f}{\partial \ln p} \right]}_{\text{衝撃波におけるプラズマの圧縮}(\text{div } u < 0)\text{に伴う加速効果}}$$

背景プラズマの流れ(u)による輸送効果

ピッチ角散乱により粒子がランダムウォークする効果(空間拡散項)

衝撃波におけるプラズマの圧縮($\text{div } u < 0$)に伴う加速効果

Monte-Carlo simulation

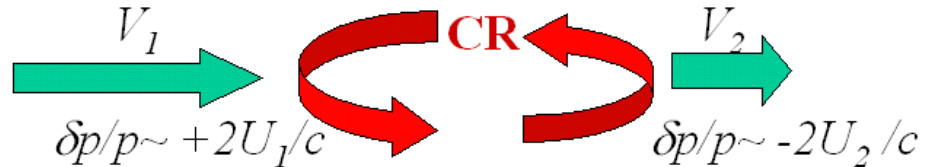
A shock is at $X=0$.
Plasma velocities
are

$$U_1=1 \quad (X<0),$$
$$U_2=0.25 \quad (X>0).$$

Particle velocities
are measured in
the shock rest
frame.

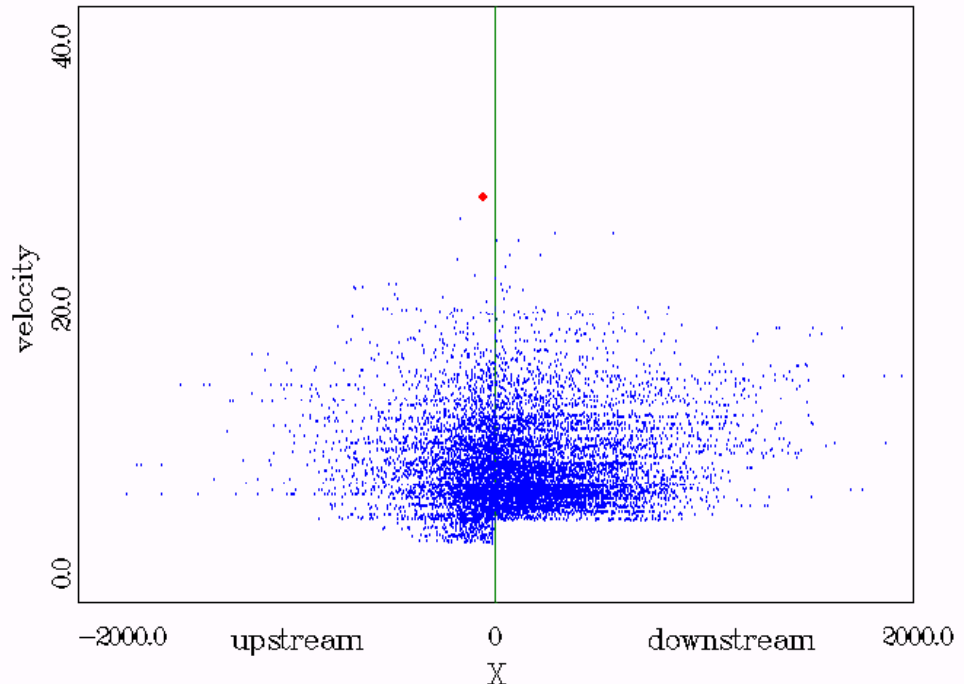
Particles are
continuously
injected at $X=-10$
with $V_{inj}=5$.

head-on collision



tail-on collision

```
Umax Xmin Xmax Xshock Reomp          tau1 tauBek1 dt Xini Vini Vmax BNKFactor
1000 -2000.00 2000.00 0.00 4.000      10.000 0.000 1.0000 -5.00 -5.00 100.00 8888.00000
T= 502.00
```



衝撃波統計加速 (衝撃波Fermi加速)

宇宙線のエネルギースペクトル: $f(p) \cdot p^2 \propto p^{-q}$

$q=(r+2)/(r-1)$ ここに r は衝撃波での圧縮率

**スペクトル指数は衝撃波での圧縮率だけで決まり、
衝撃波の詳細なパラメタによらない。**

(universal spectral index)

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \underbrace{(u \cdot \nabla)f}_{\text{背景プラズマの流れ}(u)\text{による輸送効果}} - \underbrace{\nabla \cdot (D_{\parallel} nn \cdot \nabla f)}_{\text{ピッチ角散乱により粒子がランダムウォークする効果(空間拡散項)}} = \frac{1}{3}[\nabla \cdot u] \left[\frac{\partial f}{\partial \ln p} \right]$$

背景プラズマの流れ(u)による輸送効果

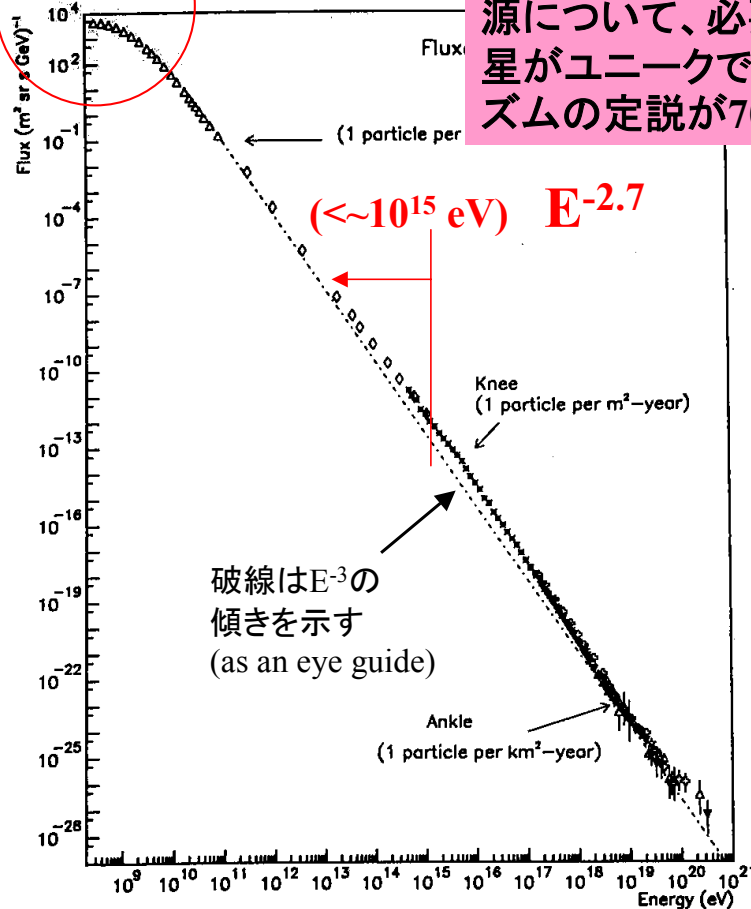
ピッチ角散乱により粒子がランダムウォークする効果(空間拡散項)

衝撃波におけるプラズマの圧縮($\text{div } u < 0$)に伴う加速効果

宇宙線粒子のエネルギースペクトル(10^8 -- 10^{21} eV)

太陽風による
減速効果
~10GeV以下

銀河系内成分と考えられる 10^{15} eV以下の宇宙線の源について、必要なエネルギー量の考察から超新星がユニークであると考えられていたが、加速メカニズムの定説が70年代末までなかった



→ 衝撃波統計加速

20世紀最後の四半世紀における宇宙プラズマ物理学における最大の成果の一つ

目次

- (1) 研究揺籃期～1970年代半ば
- (2) 1970年代末～1980年代初頭
- (3) 1980年代半ば～1990年代初め**
- (4) 1990年代半ば～現在

以下、ほぼ時代順に研究の流れをお話したい。
ただし具体例として示すデータは自前の新しいものを用いる場合が多い。

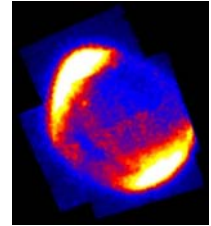
(3) 1980年代半ば～1990年代初め

前の時期に比べると大きな話題には乏しい。しかし、衝撃波統計粒子加速理論の熟成のために必要な期間であったと言える。前の時期には混乱があった統計加速能率の衝撃波角依存性の理解(衝撃波ドリフト加速と統計加速の相対的重要性の理解)、被加速粒子の非線形反作用を受けた衝撃波(nonlinear Cosmic-Ray-Mediated Shocks)の取り扱い法の進展、相対論的衝撃波への理論の拡張など、緩やかだが着実な進展があった。

目次

- (1) 研究揺籃期～1970年代半ば
- (2) 1970年代末～1980年代初頭
- (3) 1980年代半ば～1990年代初め
- (4) 1990年代半ば～現在

以下、ほぼ時代順に研究の流れをお話したい。
ただし具体例として示すデータは自前の新しいものを用いる場合が多い。

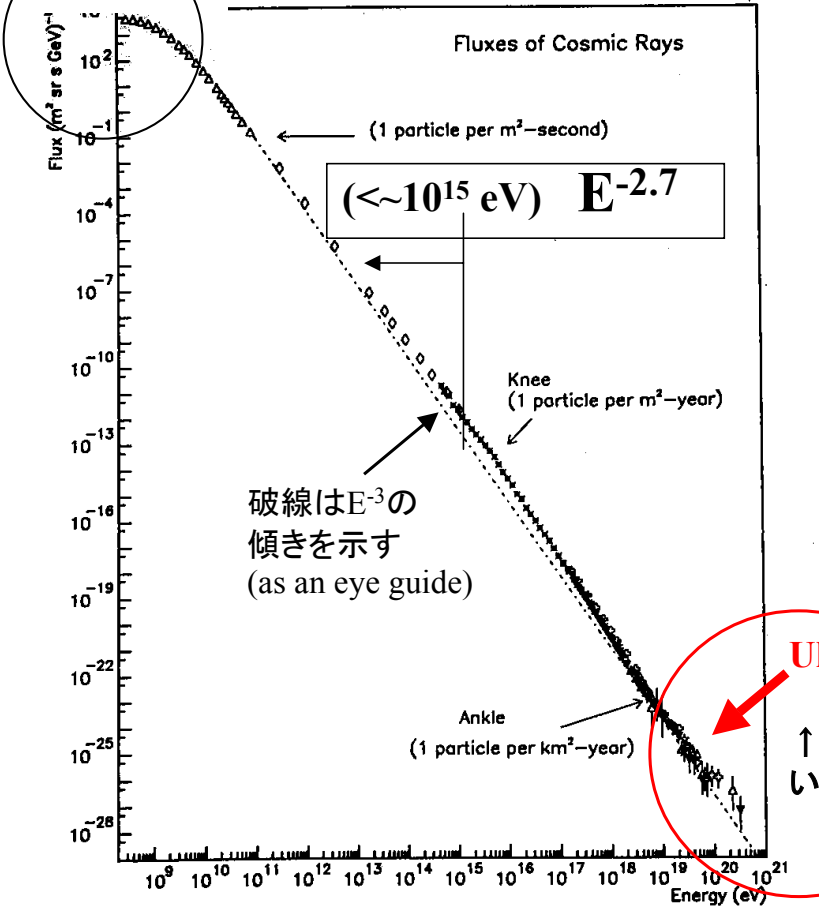


(4) 1990年代半ば～現在

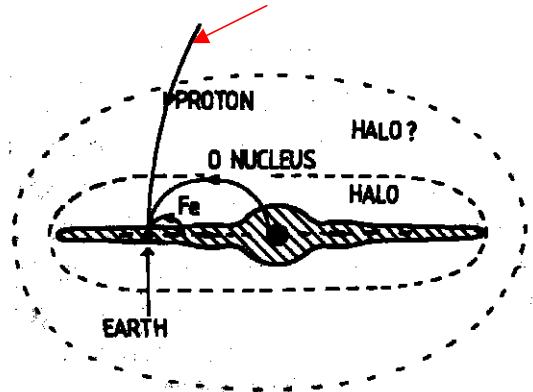
一番のハイライトはX線天文衛星ASCAにより、超新星残骸SN1006の衝撃波におけるTeVにおよぶ高エネルギー電子加速の観測的証拠が得られたことであろう。それに続くSN1006からのTeV γ 線の発見により、衝撃波粒子加速理論の対象は電波領域からガンマ線領域にわたる全波長域に及ぶことになった。一方、**いわゆるGZK限界を越えた 10^{19} eV以上の宇宙線粒子(UHECR)の存在が示唆され、その加速源の追求に関連して相対論的衝撃波での加速機構について多くの研究がなされている。**この動きは、それまで謎であった γ 線バーストが宇宙論的距離における相対論的爆発現象と同定され、相対論的衝撃波がアカデミックな興味の対象から現実の観測対象となったという時代の流れとも関連している。

宇宙線粒子のエネルギースペクトル(10^8 -- 10^{21} eV)

太陽風による
減速効果
~10GeV以下



**7×10^{19} eV proton
の軌跡($B = 2 \mu G$)**



7×10^{19} eV CR in the Galaxy ($B = 2 \times 10^{-6}$ G)
Hillas, A. M., Ann. Rev. Astron. Astrophys. vol. 22, 425-444 (1984)

**Ultra High Energy Cosmic Rays
> 10^{19} eV (UHECR)**
↑ 銀河系外に源があると考えられている

Hillas' argument on the maximum attainable energy

(also by Makishima, 1999)

$$E_{\text{max}} = Ze\beta B L$$

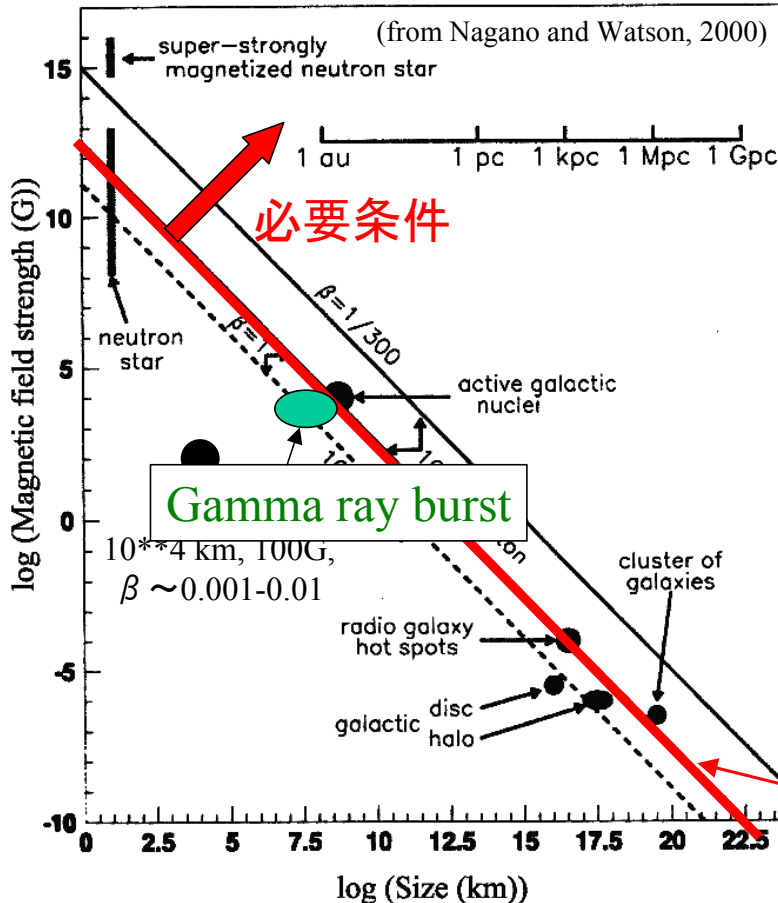
E_{max} : the maximum energy attainable through the acceleration process

Z : Charge number

β : plasma velocity (u/c)

B : magnetic field strength

L : system size



▪ Trapping condition:
($\rho_g \leq L$)

▪ Reconnection

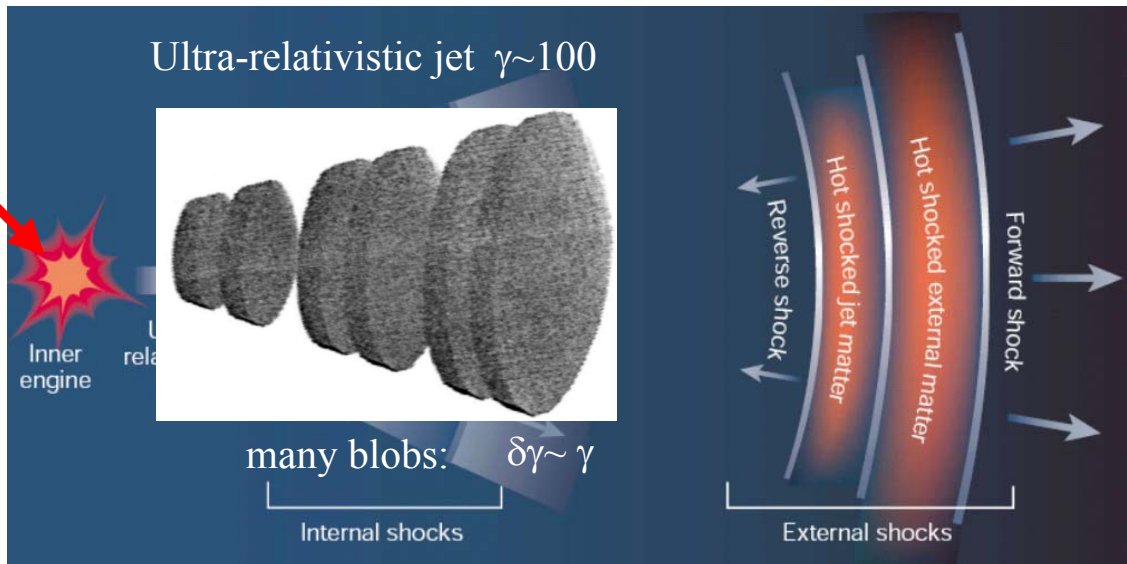
▪ Shock acceleration

$\beta = 1, Z = 1$

Gamma ray burst: internal shock model

(figure by Piran)

hypernova?
neutron star
merger?



$B \sim 10^4 \text{G}$, $10^{12} \sim 10^{14} \text{cm}$

afterglow $\sim 10^{16} \text{cm}$

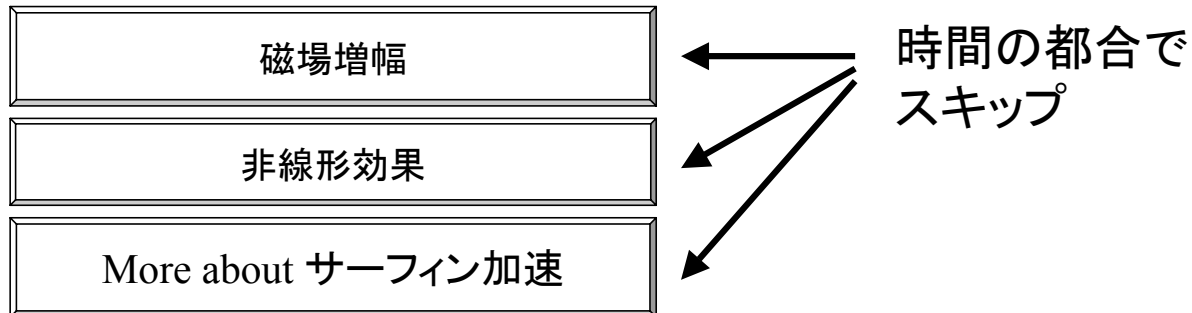
internal collision \rightarrow relativistic shock formation

Jetの固有系で 10^{18}eV まで加速すれば、Lorentz boostにより
外界へは 10^{20}eV のUHECRとして出現するだろう

(4) 1990年代半ば～現在 (続き)

理論的基礎にかかわる依然として未解決の問題点の例:

- 注入問題 (injection problem) とくに電子・陽子比の決定
- 非線形反作用が強い場合の衝撃波構造 (特に磁場増幅の可能性) と被加速粒子エネルギースペクトルの決定
- 古典的な粒子－衝撃波相互作用に加え、サーフィン過程などの新しい相互作用の存在が発見された。しかし、古典的過程と新しい過程の相対的重要度は未知である。



final remark:

無衝突衝撃波にはfast shock、slow shockの二種類があるが、ここではもっぱらfast shockをめぐる話題に触れた。slow shockは別のプラズマ物理学における基本的テーマである磁気リコネクション過程と関連して論じられるべきものである。

また、MHD衝撃波理論の基礎に関わるものとして、intermediate shockの存在をめぐる最近の議論について触れて置かなければならないだろう。これは発展性条件を満たさないものとしてJeffrey-Taniuchiの教科書では否定されたものであるが、人工衛星観測によりそれらしい例が発見され大きな議論を巻き起こした。まだ論争は続いているが、散逸を考えることにより発展性条件の軛は逃れられるとの指摘が重要であると思われる(Hada, 1994)。