

粒子加速機構： 1次加速過程・2次加速過程の比較研究

寺澤 敏夫 (宇宙線研)

旅費査定額: 10万円

メンバー表

東京大学 宇宙線研究所・教授・寺澤敏夫

東京大学 総合文化研究科・D3・宮本英明

東京大学 理学系研究科・教授・星野真弘、D3・平井真理子

東京工業大学 理工学研究科・助教・浅野勝晃、特任助教・片岡龍峰、

学振PD・村瀬孔大、D2・小尾義男、M2・永田久美子、藤沼淳、M1・樋口千夏、山越陽介

KEK・准教授・井岡邦仁

名古屋大学 理学研究科・特任助教・天野孝伸

大阪大学・教授・高原文郎

広島大学・助教・山崎了

九州大学 総合理工学研究科・准教授・羽田亨、助教・松清修一

University of New Hampshire・教授・Martin A. Lee

Max-Planck Institut fuer extraterrestrische physik/University of Munich・教授・Manfred Scholer

情報提供

招聘実施

KEK・研究員・大平豊

M. Scholer教授: 2010.11.2-12.1

M. A. Lee教授: 2010.11.2-2011.01.10

研究目的

衝撃波統計加速標準理論の枠を越えた研究の新しい発展をめざす。今年度の共同研究において集中的に議論を行ってきたのは、

- 電子加速問題（松清、Scholer, 天野、寺澤）
- 衝撃波面の非定常性と粒子加速（Scholer, 松清）
- 非線形効果（星野、寺澤）
- 古典的拡散過程からの逸脱（羽田）
- 中性粒子のイオン化・加速領域への注入効果
（大平、松清、Scholer, Lee）
- 磁気リコネクションに伴う加速効果（星野）
- 二次オーダー統計加速の寄与（浅野、Lee）
- 宇宙線エネルギースペクトルの形成（大平、山崎）
- SEP（太陽高エネルギー粒子）の加速モデル（片岡）

2010.11.11-12 粒子加速ミニワークショップ(於柏) 内容

M.Scholer: Nonstationarity of the Quasi-Perpendicular Bow Shock:

Comparison between Cluster Observations and Simulations

M.A.Lee: Issues and Puzzles at Earth's Bow Shock

羽田亨(九大) : DSA model with non-Gaussian Transport

松清修一(九大) : Behaviours of Nonthermal Electrons in Nonstationary Quasiperpendicular Shocks

寺澤敏夫: Notes on whistler wave excitation

共同利用旅費による出張サポート

科研費などによる研究打ち合わせ

2010.11.17 大平豊(KEK): Runaway Cosmic Ray Spectrum

2010.11.26 天野孝伸(名大): On the Shock Acceleration of Electrons

2010.12.20 片岡龍峰(東工大): Production of Solar Energetic Particles (予定)

共同研究と関連する集中講義(Scholer教授、Lee教授)

2010.11. 22-23(於・東大本郷) 参加者23名

1. Particle acceleration at collisionless shocks in the heliosphere (S)
2. The heliosphere and energetic particle transport (L)
3. Stochastic acceleration (L)
4. Dissipation in quasi-perpendicular and quasi-parallel collisionless shocks (S)
5. Interstellar gas, IBEX, pickup ions and anomalous cosmic rays (L)

2010.11.11-12 粒子加速ミニワークショップ(於柏) 内容

M.Scholer: Nonstationarity of the Quasi-Perpendicular Bow Shock:

Comparison between Cluster Observations and Simulations

M.A.Lee: Issues and Puzzles at Earth's Bow Shock

羽田亨(九大) : DSA model with non-Gaussian Transport

松清修一(九大) : Behaviours of Nonthermal Electrons in Nonstationary Quasiperpendicular Shocks

寺澤敏夫: Notes on whistler wave excitation

科研費などによる研究打ち合わせ

2010.11.17 大平豊(KEK): Runaway Cosmic Ray Spectrum

2010.11.26 天野孝伸(名大): On the Shock Acceleration of Electrons

2010.12.20 片岡龍峰(東工大): Production of Solar Energetic Particles (予定)

共同研究と関連する集中講義(Scholer教授、Lee教授)

2010.11. 22-23(於・東大本郷) 参加者23名

1. Particle acceleration at collisionless shocks in the heliosphere (S)
2. The heliosphere and energetic particle transport (L)
3. Stochastic acceleration (L)
4. Dissipation in quasi-perpendicular and quasi-parallel collisionless shocks (S)
5. Interstellar gas, IBEX, pickup ions and anomalous cosmic rays (L)

2010.11.11-12 粒子加速ミニワークショップ(於柏) 内容

M.Scholer: Nonstationarity of the Quasi-Perpendicular Bow Shock:

Comparison between Cluster Observations and Simulations

M.A.Lee: Issues and Puzzles at Earth's Bow Shock

羽田亨(九大) : DSA model with non-Gaussian Transport

松清修一(九大) : Behaviours of Nonthermal Electrons in Nonstationary Quasiperpendicular Shocks

寺澤敏夫: Notes on whistler wave excitation

科研費などによる研究打ち合わせ

2010.11.17 大平豊(KEK): Runaway Cosmic Ray Spectrum

2010.11.26 天野孝伸(名大): On the Shock Acceleration of Electrons

2010.12.20 片岡龍峰(東工大): Production of Solar Energetic Particles (予定)

共同研究と関連する集中講義(Scholer教授、Lee教授)

2010.11. 22-23(於・東大本郷) 参加者23名

1. Particle acceleration at collisionless shocks in the heliosphere (S)
2. The heliosphere and energetic particle transport (L)
3. Stochastic acceleration (L)
4. Dissipation in quasi-perpendicular and quasi-parallel collisionless shocks (S)
5. Interstellar gas, IBEX, pickup ions and anomalous cosmic rays (L)

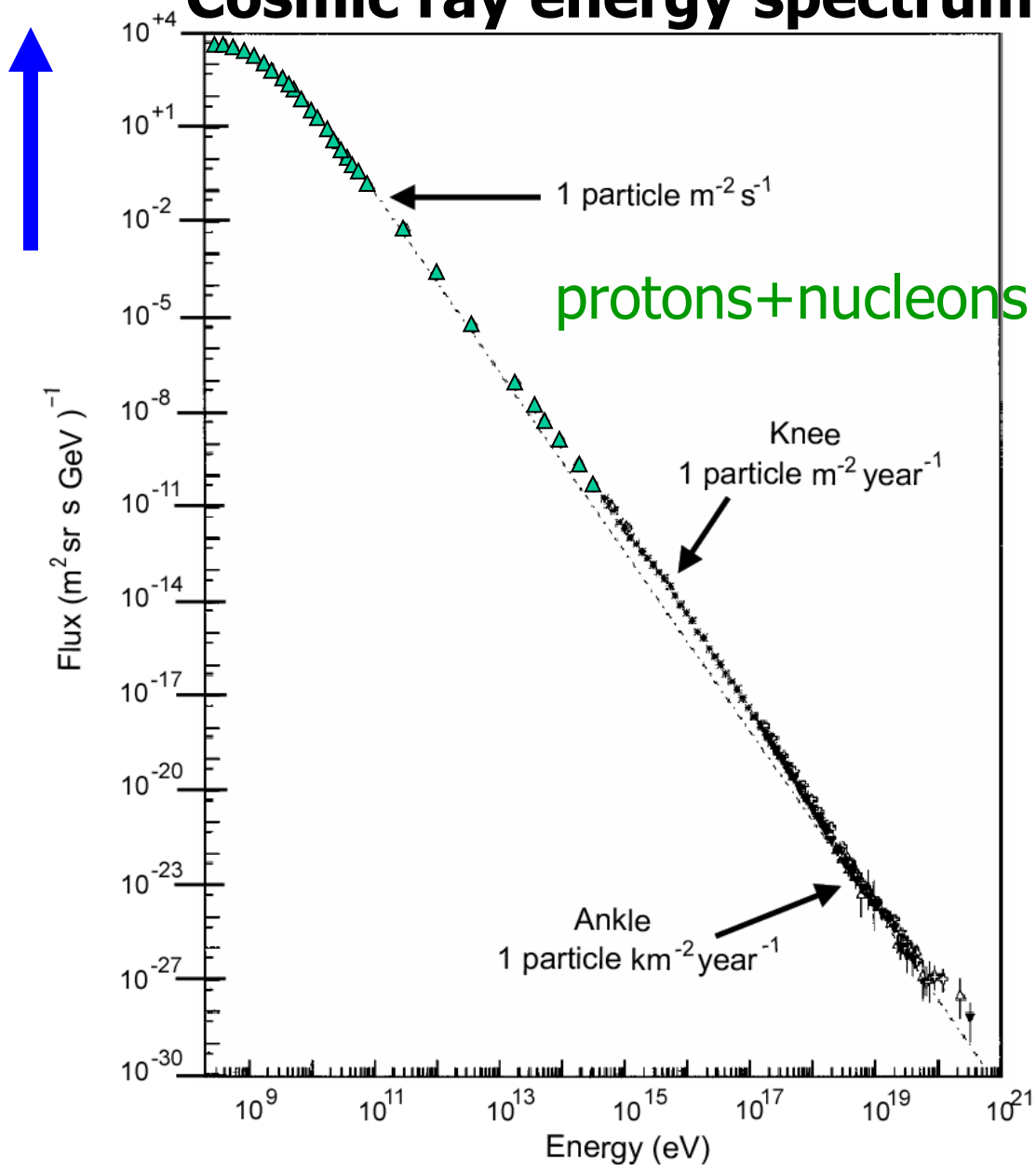
研究目的

衝撃波統計加速標準理論の枠を越えた研究の新しい発展をめざす。今年度の共同研究において集中的に議論を行ってきたのは、

- 電子加速問題（松清、Scholer, 天野、寺澤）
- 衝撃波面の非定常性と粒子加速（Scholer, 松清）
- 非線形効果（星野、寺澤）
- 古典的拡散過程からの逸脱（羽田）
- 中性粒子のイオン化・加速領域への注入効果
（大平、松清、Scholer, Lee）
- 磁気リコネクションに伴う加速効果（星野）
- 二次オーダー統計加速の寄与（浅野、Lee）
- 宇宙線エネルギースペクトルの形成（大平、山崎）
- SEP（太陽高エネルギー粒子）の加速モデル（片岡）

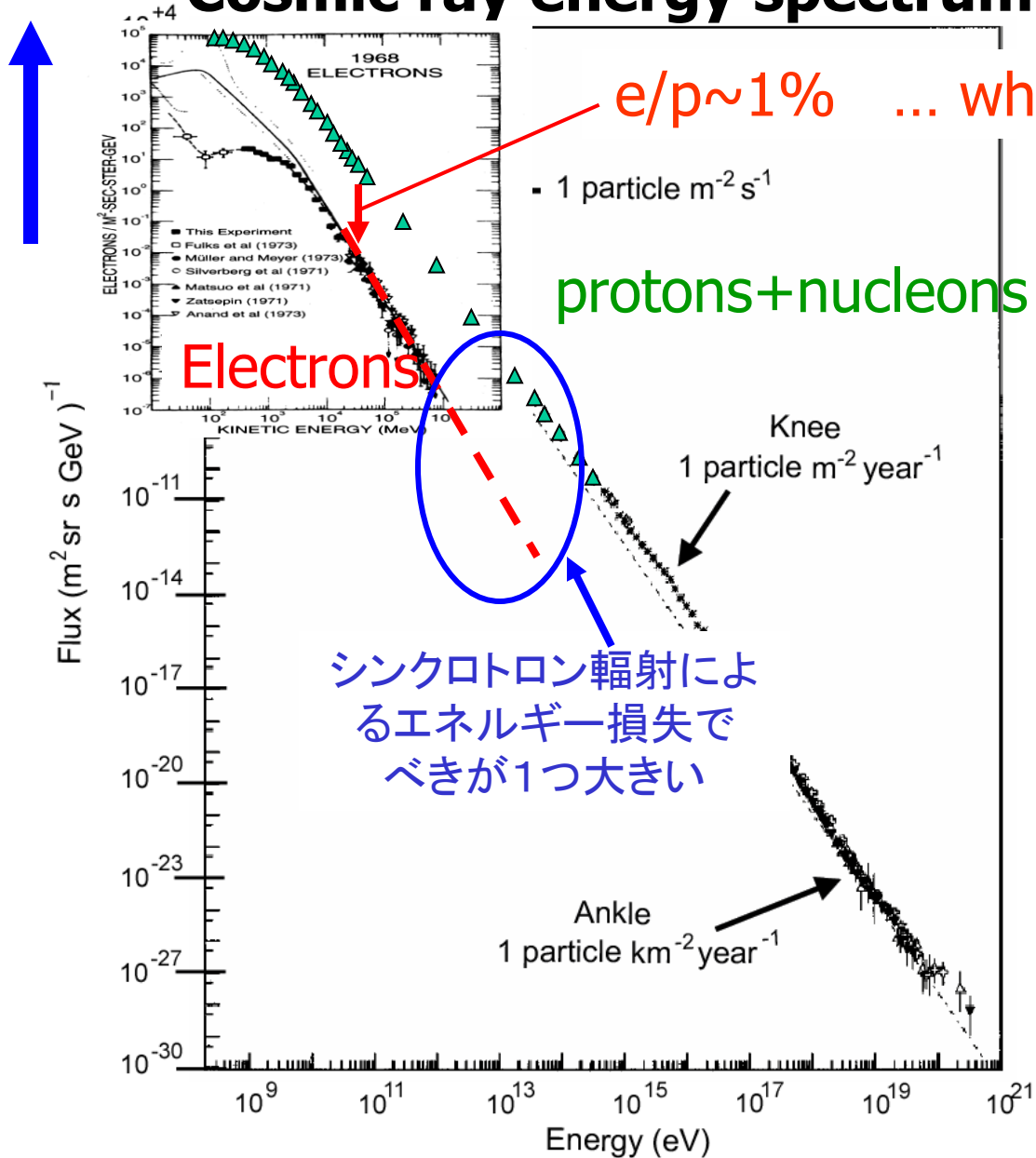
CR Flux

Cosmic ray energy spectrum



CR Flux

Cosmic ray energy spectrum

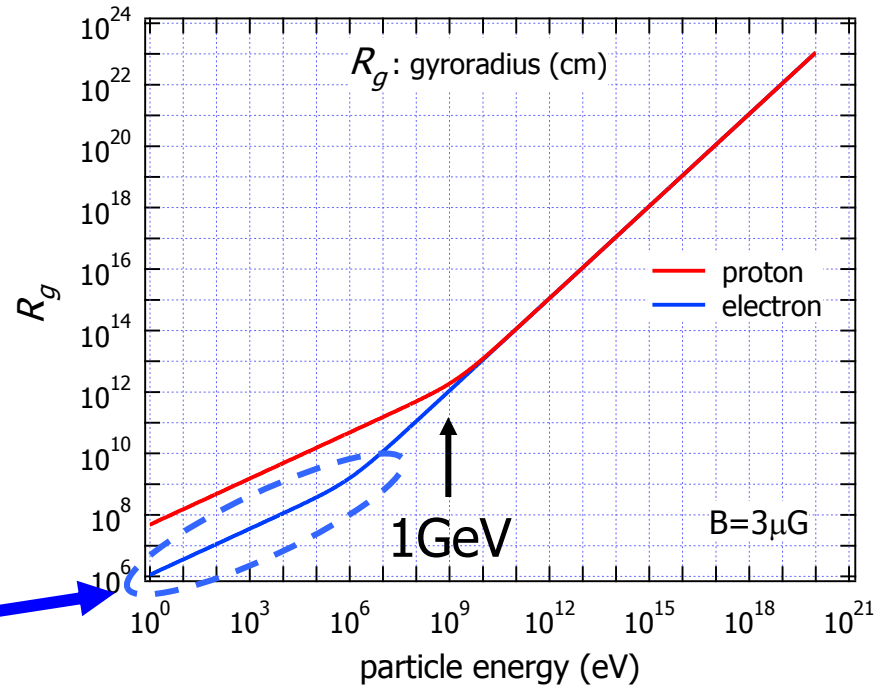


Ingredient in the DSA process:

Terasawa

cyclotron resonance between turbulence and particles

gyroradius of particles, $R_g \sim \lambda$, wavelength of the turbulence

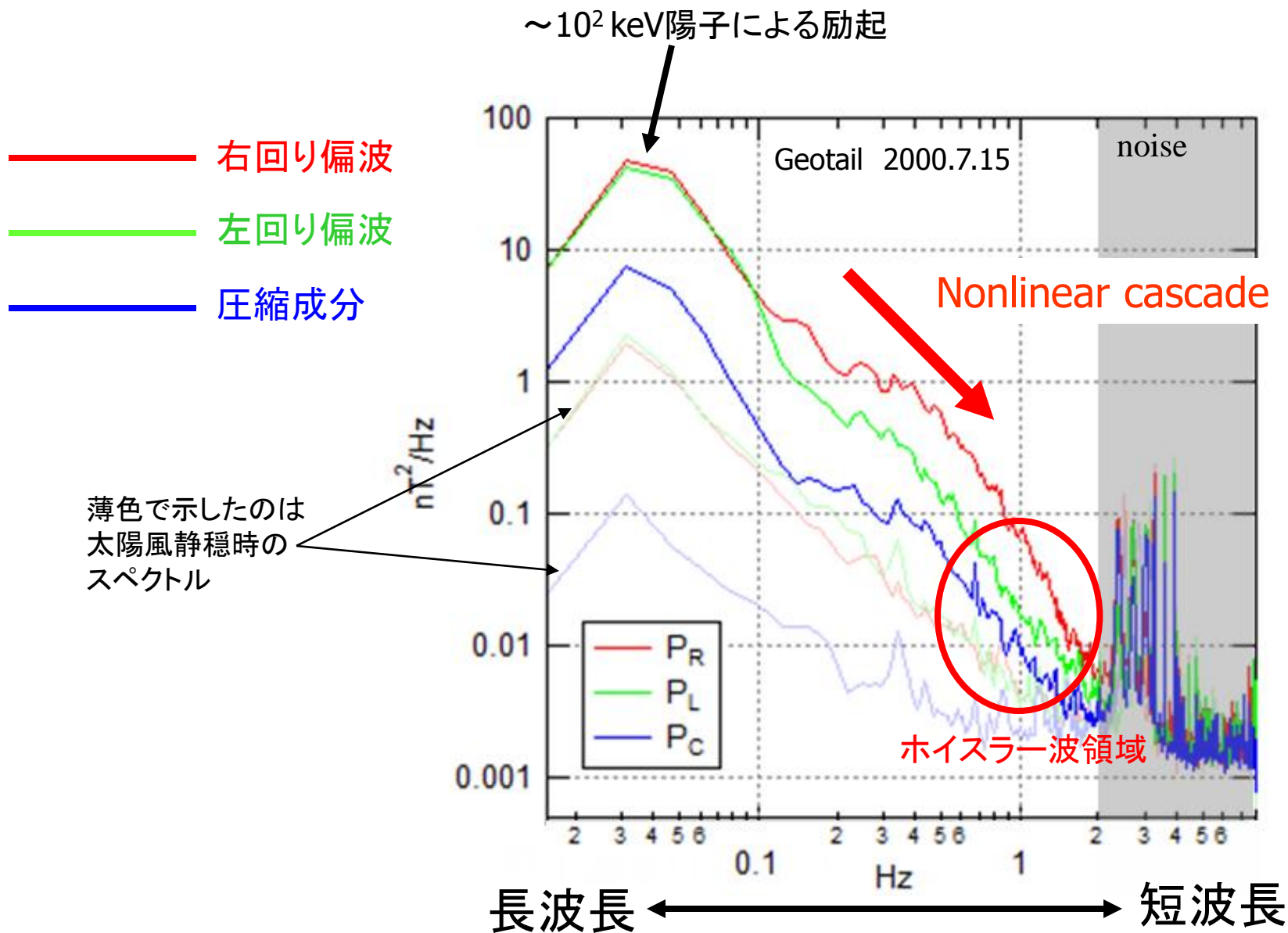


電子と共鳴するのは短波長の波
=ホイスラー波
励起しにくい

Since energy dependence of R_g becomes indistinguishable between protons and electrons above $\sim 10^{10}$ eV (10GeV), differentiation between protons and electrons should occur in the low energy regime ($< \sim 1\text{GeV}$)

... electron injection problem

太陽風中の衝撃波上流域での乱流スペクトル(磁場成分)



For an eddy of spatial scale ℓ (with the characteristic velocity v_ℓ), we have

$$\begin{aligned} \text{interaction time : } t_{\text{cas},\ell} &\sim \frac{\ell}{v_\ell} \\ \text{energy cascade rate : } \epsilon_\ell &\sim \frac{v_\ell^2}{t_{\text{cas},\ell}} \sim \frac{v_\ell^3}{\ell} \end{aligned}$$

Assuming that $\epsilon_\ell = \text{const}$, we obtain $v_\ell^3 = \epsilon_\ell \ell = \frac{\epsilon_\ell}{k}$.

Then the energy spectrum $E(k) \equiv \frac{v_\ell^2}{\Delta k} \sim \frac{v_\ell^2}{k} = \frac{\epsilon_\ell^{2/3}}{k^{5/3}}$

Whistler wave turbulence (Cho & Lazarian, 2009)

Between the velocity and magnetic perturbations, we have the relation

$$-en_e \vec{v}_\ell = \text{rot} \vec{b}_\ell \quad \text{or} \quad v_\ell \propto \frac{b_\ell}{\ell}$$

Therefore,

$$\begin{aligned} \text{interaction time : } t_{\text{cas},\ell} &\sim \frac{\ell}{v_\ell} \propto \frac{\ell^2}{b_\ell} \\ \text{energy cascade rate : } \epsilon_\ell &\sim \frac{b_\ell^2}{t_{\text{cas},\ell}} \sim \frac{b_\ell^3}{\ell^2} \end{aligned}$$

今後の課題：
乱流理論を組み込んだ
加速モデルの構築へ

$$\begin{aligned} \text{in } b_\ell^3 &= \epsilon_\ell \ell^2 = \frac{\epsilon_\ell}{k^2} \\ \text{in } \frac{b_\ell^2}{\Delta k} &\sim \frac{b_\ell^2}{k} = \frac{\epsilon_\ell^{2/3}}{k^{7/3}} \end{aligned}$$

ホイスラー波の乱流理論
はようやくできつつある

波数ベクトル分布の
異方性を考えると
もっときつい巾となる
($\sim k^4$: 観測と一致)

研究目的

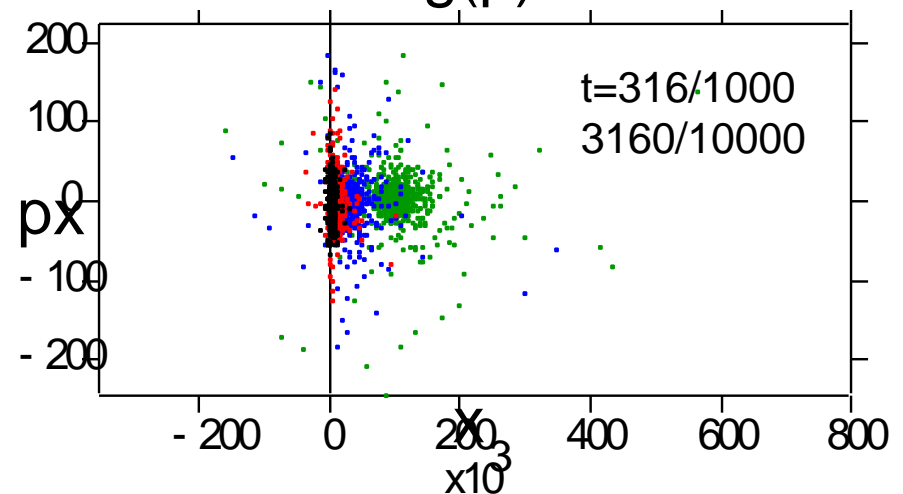
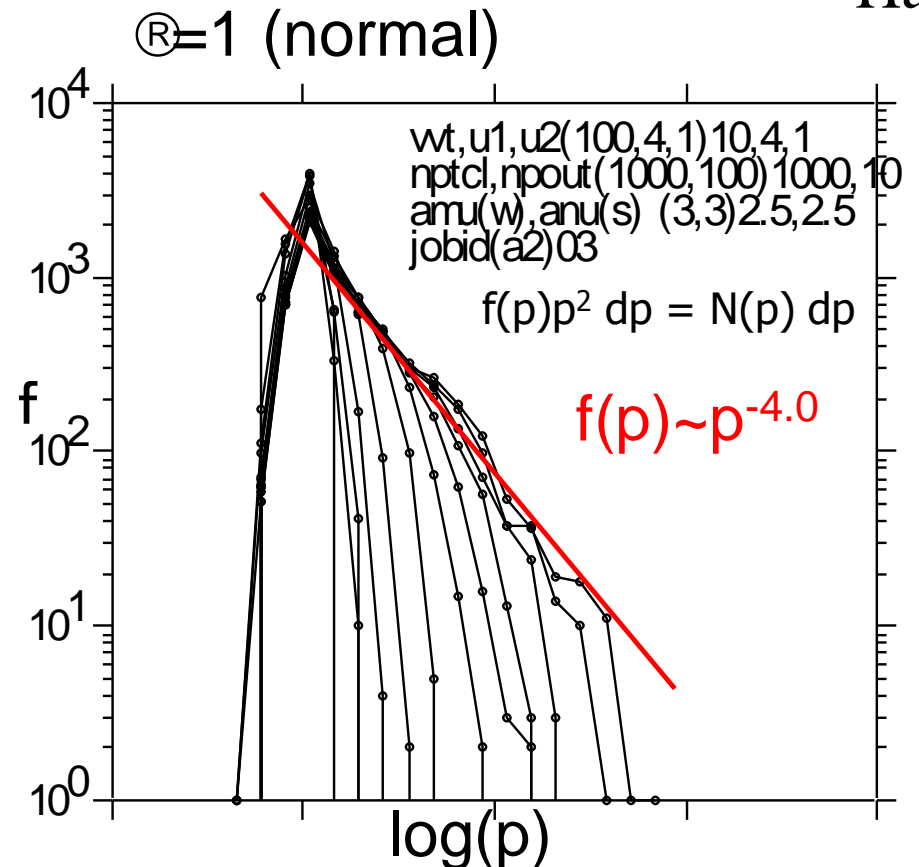
衝撃波統計加速標準理論の枠を越えた研究の新しい発展をめざす。今年度の共同研究において集中的に議論を行ってきたのは、

- 電子加速問題（松清、Scholer, 天野、寺澤）
- 衝撃波面の非定常性と粒子加速（Scholer, 松清）
- 非線形効果（星野、寺澤）
- 古典的拡散過程からの逸脱（羽田）
- 中性粒子のイオン化・加速領域への注入効果
（大平、松清、Scholer, Lee）
- 磁気リコネクションに伴う加速効果（星野）
- 二次オーダー統計加速の寄与（浅野、Lee）
- 宇宙線エネルギースペクトルの形成（大平、山崎）
- SEP（太陽高エネルギー粒子）の加速モデル（片岡）

DSA of WS particles

Test particle simulation

- follow particle trajectories in a given shock field
- strong (isotropic) scattering assumed.
- walk (ballistic motion) and stick (trapping) duration probability specified by (μ, ν) .



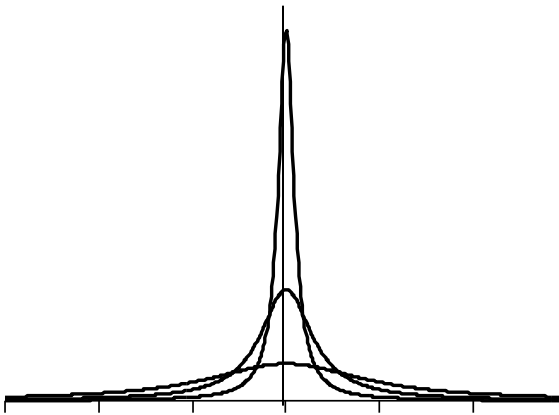
sub/normal/super-diffusion

$$\langle \Delta x^2 \rangle \sim \tau^\beta$$

trapping
=sub-diffusion

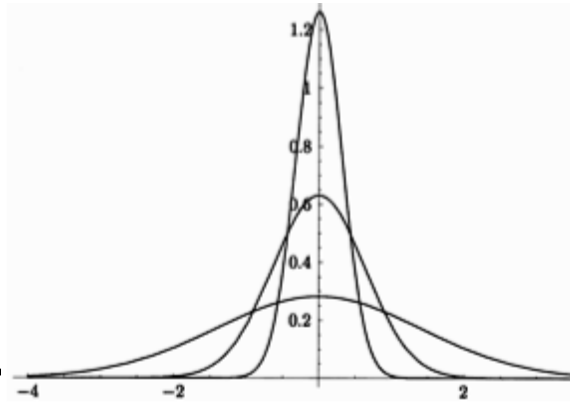
normal diffusion

ballistic motion
=super-diffusion



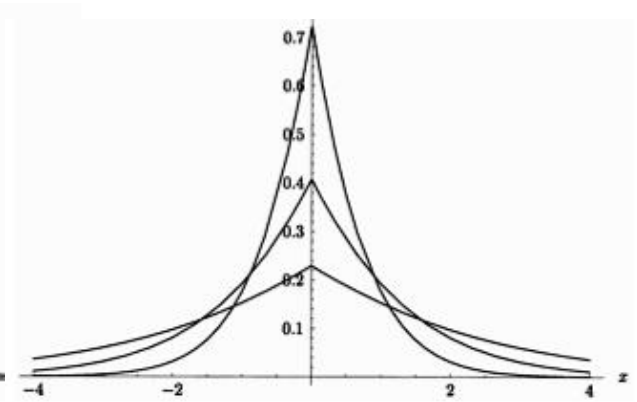
$$P(x,t) = \frac{1}{\pi t} \frac{1}{(x/t)^2 + 1}$$

$$\beta = 2$$



$$P(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4t}\right)$$

$$\beta = 1$$



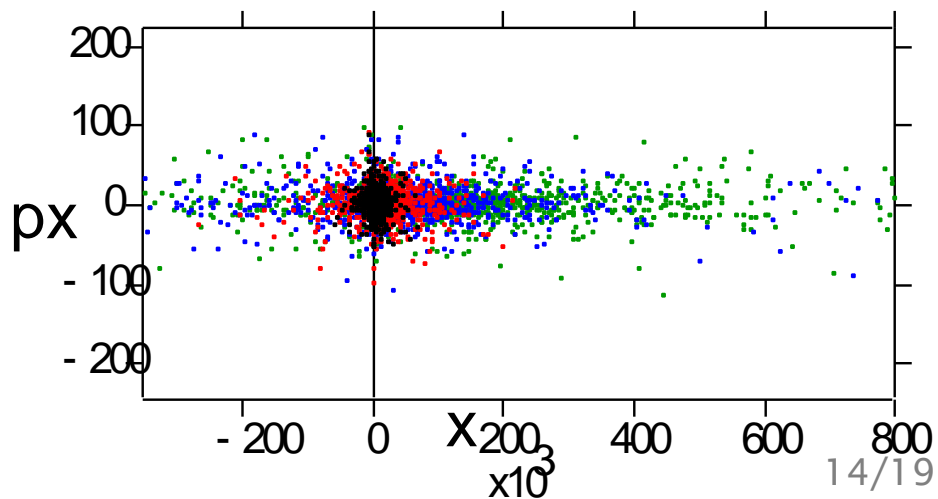
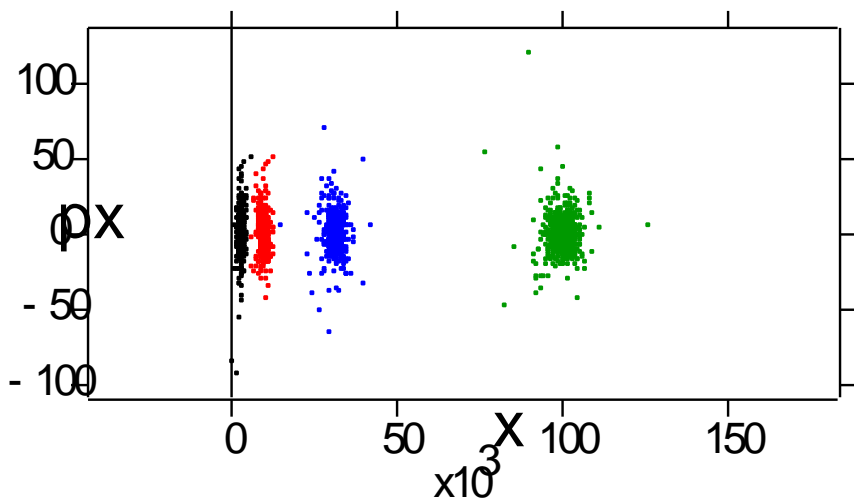
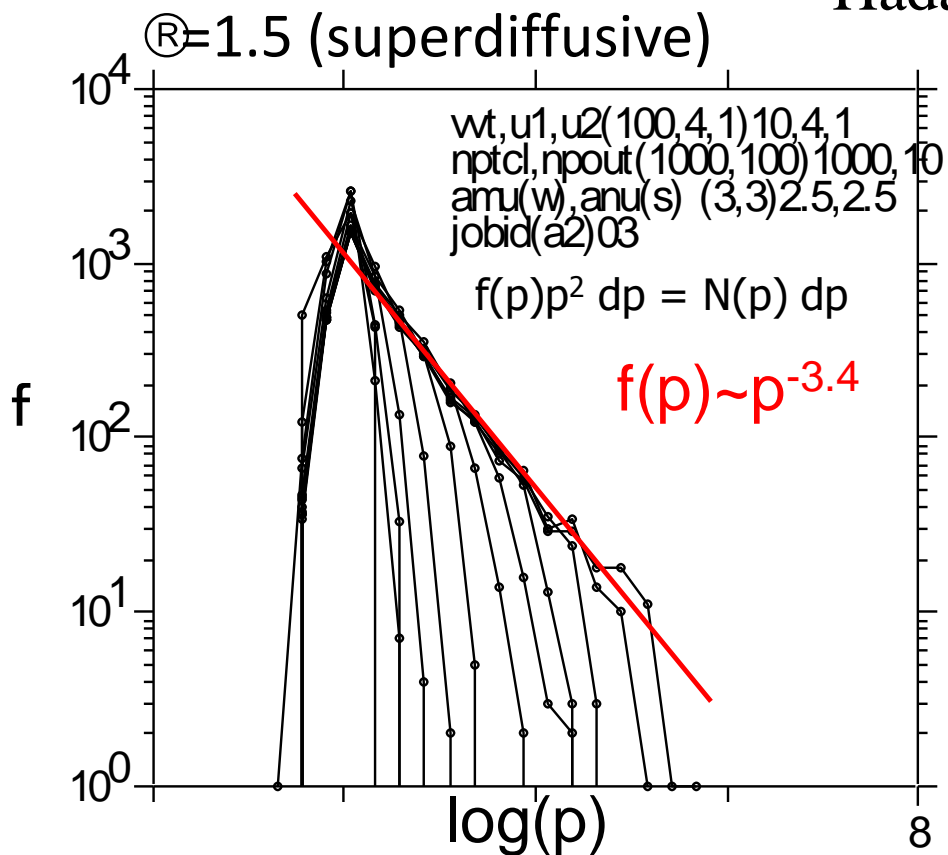
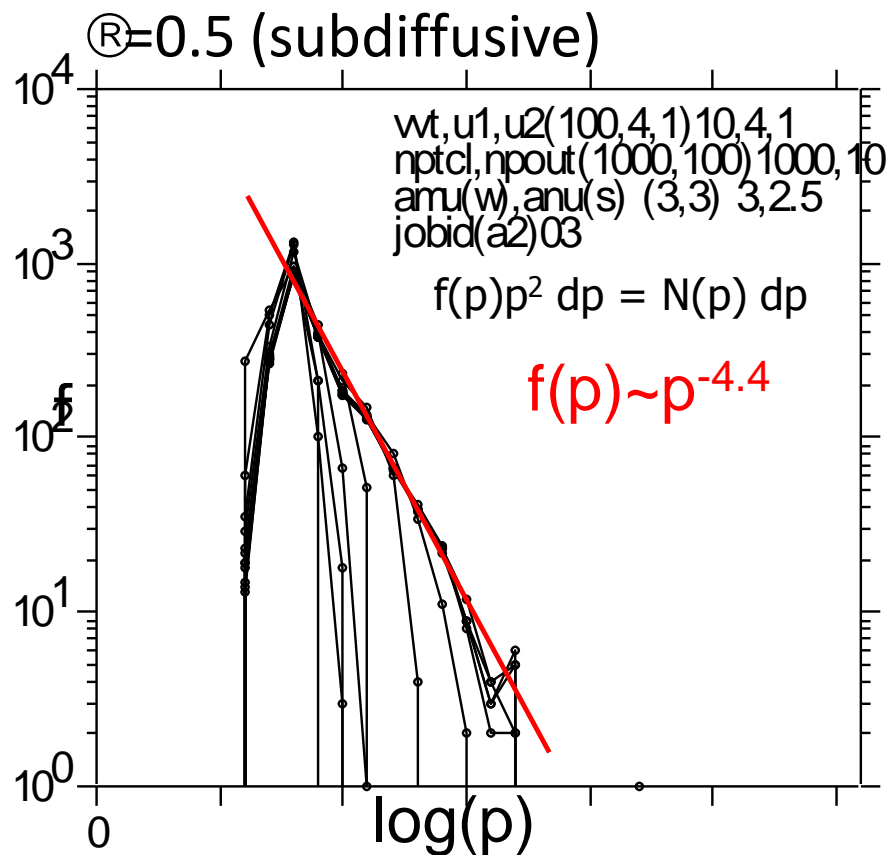
$$P(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi t}} \int ds \frac{1}{\sqrt{s}} \exp\left(-\frac{x^2}{4s} - \frac{s^2}{4t}\right)$$

$$\beta = 1/2$$

$$n(x,t) = \int_{-\infty}^{\infty} dx' \int_{-\infty}^t dt' P(x-x', t-t') Q(x', t')$$

$$= Q_0 P(x,t)$$

$$P(x,t) = \frac{1}{t^{\beta/2}} \Phi\left(\frac{x}{t^{\beta/2}}\right)$$

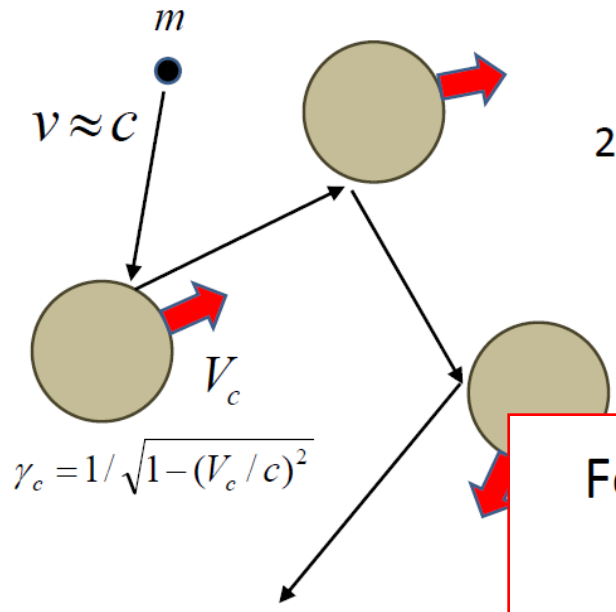


研究目的

衝撃波統計加速標準理論の枠を越えた研究の新しい発展をめざす。今年度の共同研究において集中的に議論を行ってきたのは、

- 電子加速問題（松清、Scholer, 天野、寺澤）
- 衝撃波面の非定常性と粒子加速（Scholer, 松清）
- 非線形効果（星野、寺澤）
- 古典的拡散過程からの逸脱（羽田）
- 中性粒子のイオン化・加速領域への注入効果
（大平、松清、Scholer, Lee）
- 磁気リコネクションに伴う加速効果（星野）
- 二次オーダー統計加速の寄与（浅野、Lee）
- 宇宙線エネルギースペクトルの形成（大平、山崎）
- SEP（太陽高エネルギー粒子）の加速モデル（片岡）

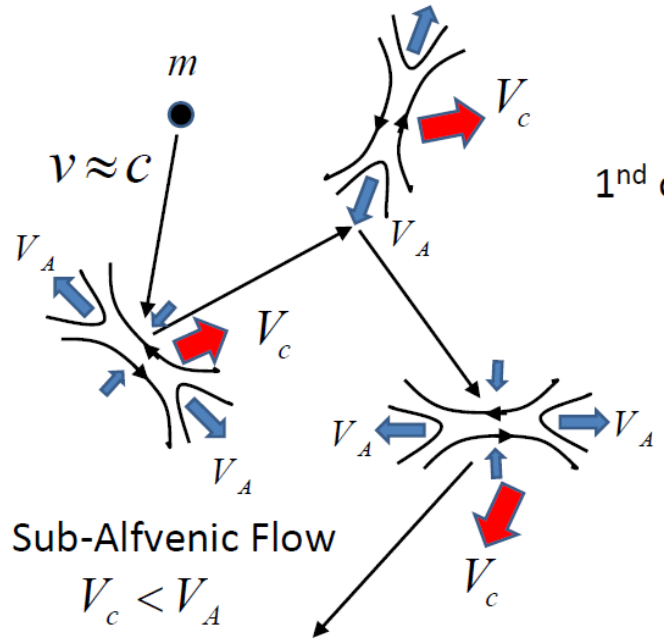
Original Fermi Acceleration



2nd order Acceleration

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = 4\gamma_c^2 \left(\frac{V_c}{c}\right)^2$$

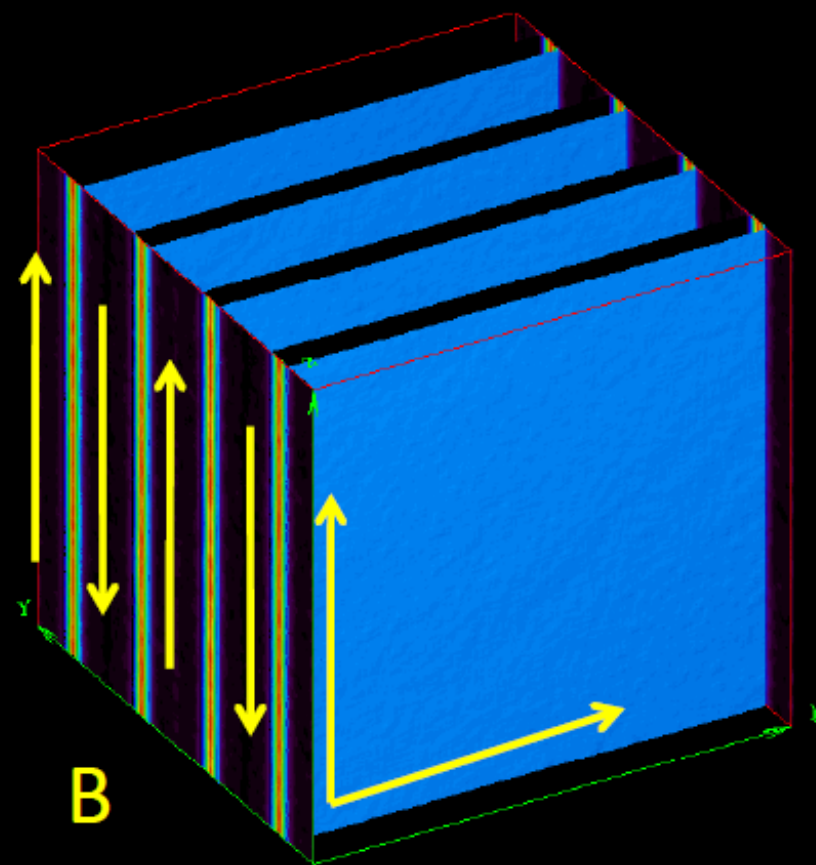
Fermi Acceleration with Reconnection



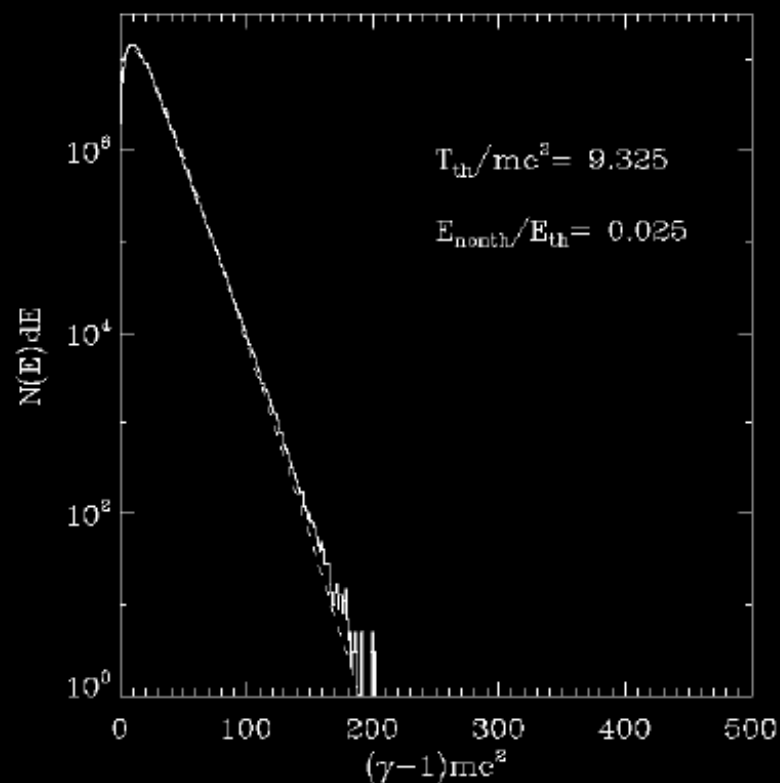
1st order Acceleration

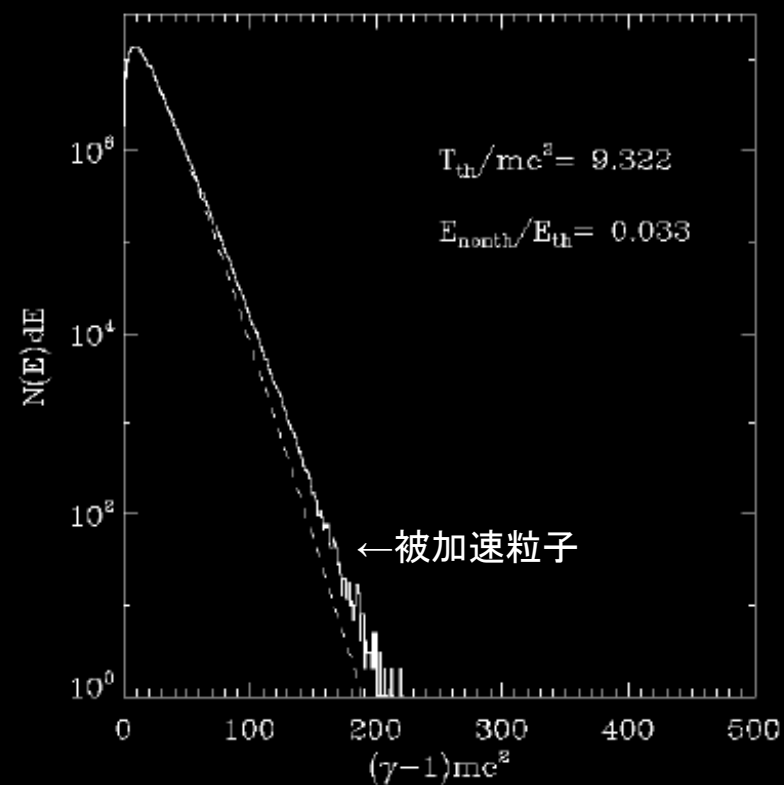
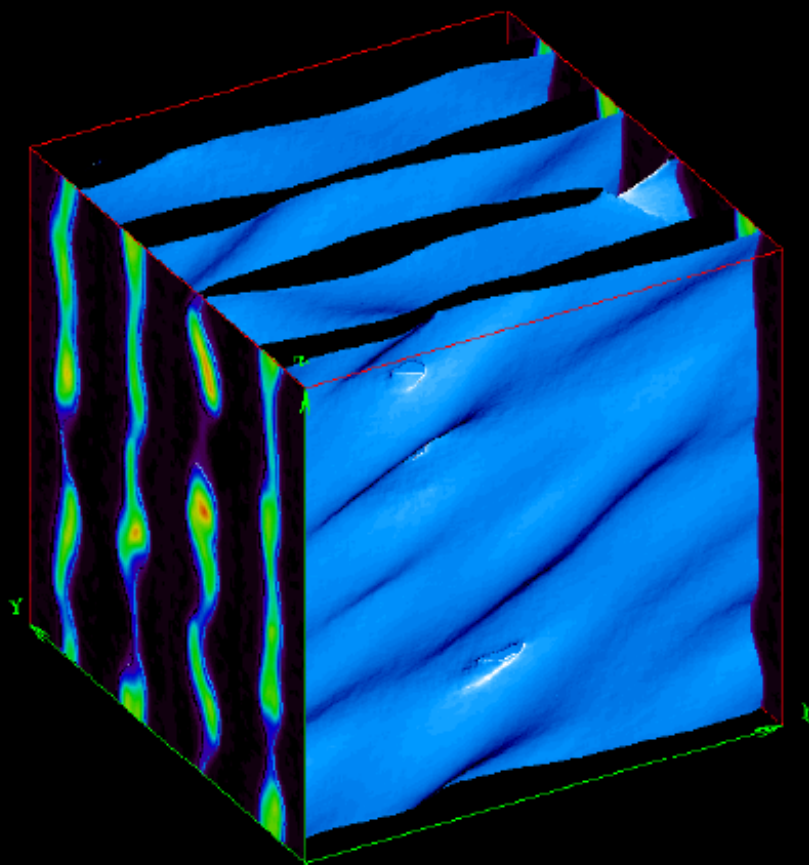
$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} \approx \left(\frac{V_A}{c}\right)$$

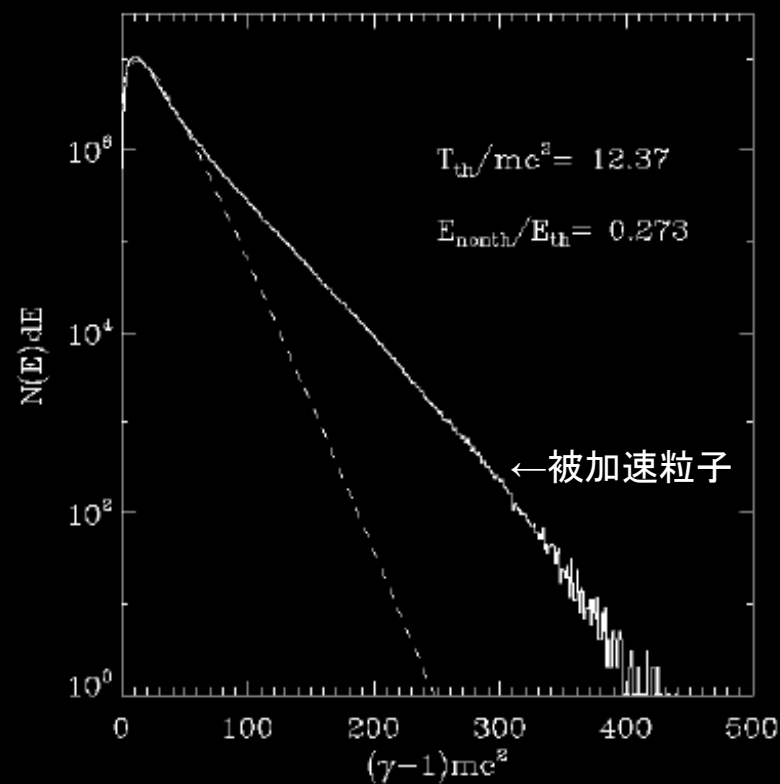
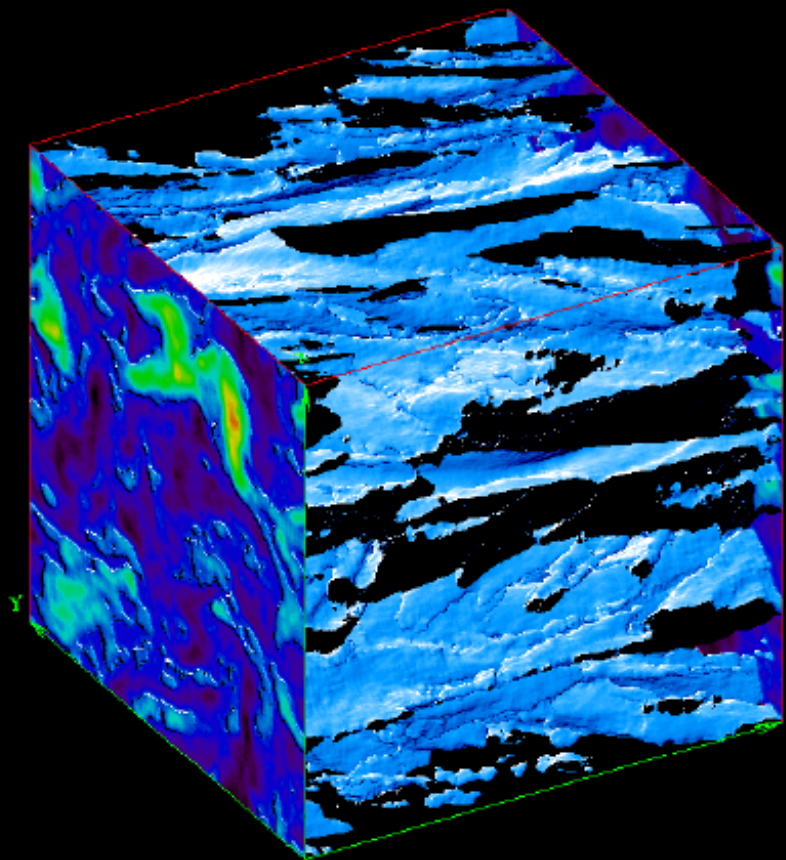
Sub-Alfvénic Flow
 $V_c < V_A$

3D Reconnection with $B_G/B_0=1$ 

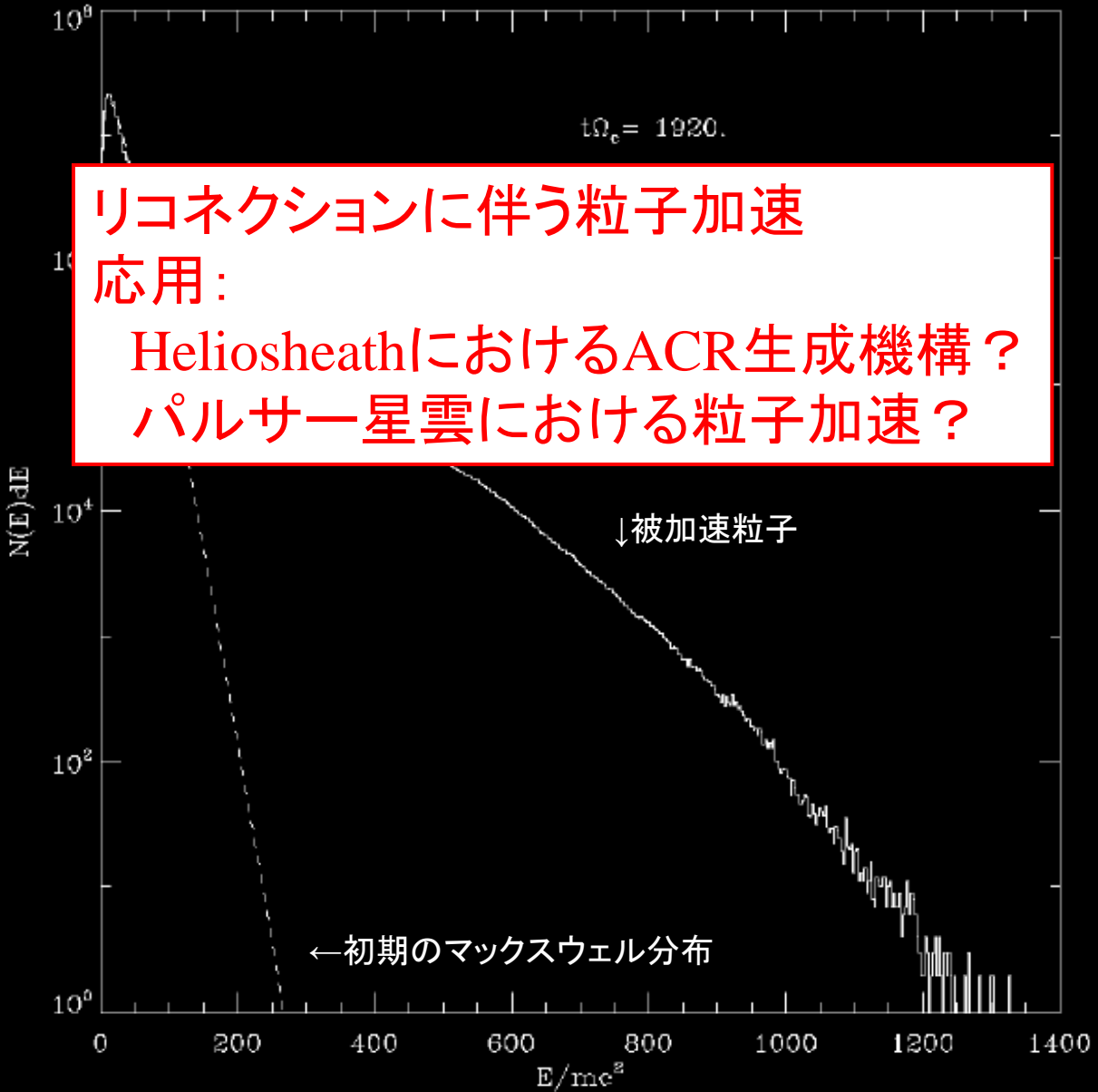
+ Uniform Guide Field



3D Reconnection with $B_G/B_0=1$ 

3D Reconnection with $B_G/B_0=1$ 

エネルギースペクトル $N(E)$



研究目的

衝撃波統計加速標準理論の枠を越えた研究の新しい発展をめざす。今年度の共同研究において集中的に議論を行ってきたのは、

- 電子加速問題（松清、Scholer, 天野、寺澤）
- 衝撃波面の非定常性と粒子加速（Scholer, 松清）
- 非線形効果（星野、寺澤）
- 古典的拡散過程からの逸脱（羽田）
- 中性粒子のイオン化・加速領域への注入効果
（大平、松清、Scholer, Lee）
- 磁気リコネクションに伴う加速効果（星野）
- 二次オーダー統計加速の寄与（浅野、Lee）
- 宇宙線エネルギースペクトルの形成（大平、山崎）
- SEP（太陽高エネルギー粒子）の加速モデル（片岡）

本年度はテーマの頭出しに主眼。今後カバーすべきポイントは、
相対論的衝撃波への応用(UHECR起源)
陽電子供給問題(Pamela, etc)

など