

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540277

研究課題名(和文)電子・陽電子プラズマ中の相対論的無衝突衝撃波と粒子加速の運動論的研究

研究課題名(英文) Particle Acceleration in Relativistic Electron-Positron Collisionless Shocks

研究代表者

加藤 恒彦 (Kato, Tsunehiko)

国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・専門研究職員

研究者番号：90413955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：無衝突衝撃波の大規模粒子シミュレーションを行い、衝撃波の形成過程と粒子加速過程について運動論的な観点から研究した。その結果、衝撃波上流領域で磁場の乱れを伴った大振幅波が励起されることや、一部の粒子が加速され冪型のエネルギースペクトルを形成すること、加速過程は粒子がジャイロ周期程度の短い時間で衝撃波面を往復する速いフェルミ型加速であることなどが明らかになった。また、衝撃波粒子加速のプラズマ粒子シミュレーションに関する数値的な問題についても研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We investigate formation of collisionless shocks and particle acceleration mechanism operating around those shocks with large-scale plasma particle simulations. We show that large amplitude electromagnetic waves with strong magnetic field fluctuations are generated in the upstream region of the shock, a part of plasma particles are accelerated to high energies around the shock front and form power-law like energy spectra, and this particle acceleration mechanism is a fast Fermi-type mechanism in which accelerated particles go back and forth around the shock front within the times of the order of their gyro periods. In addition, we study some numerical problems in plasma particle simulation method which can occur especially in simulations of particle acceleration in collisionless shocks.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学、宇宙プラズマ物理学

キーワード：プラズマ 衝撃波 粒子加速 粒子シミュレーション 不安定性

1. 研究開始当初の背景

宇宙には宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子が存在し、地球にも降り注いでいる。そのエネルギーの広がりには  $10^8\text{eV}$  から  $10^{20}\text{eV}$  にもわたり、そのエネルギー分布が冪型をしていることが大きな特徴である。宇宙線がどこでどのようにして作られるのかということは、その発見から 100 年が経つ現在においても未だ解決されていない重要な問題である。約  $10^{15}\text{eV}$  以下のエネルギーの宇宙線については、銀河系内の超新星残骸の衝撃波で加速されるとする説が有力であるが、その詳細な物理過程はまだ明らかにはなっていない。また、近年の PAMELA による観測により、 $10\text{GeV}$  から  $100\text{GeV}$  のエネルギー領域で、超新星残骸の宇宙線だけでは説明できない陽電子成分の超過も観測され、その起源について様々な議論が起こっている。

宇宙空間に存在して衝撃波が形成される媒体となるプラズマは、非常に希薄で粒子間のクーロン衝突がほとんど起こらない「無衝突プラズマ」と呼ばれるものである。そのため、そこで形成される衝撃波も、プラズマ粒子間の衝突ではなく、プラズマの運動論的な集団現象（不安定性で励起される電磁的波動と粒子との相互作用により引き起こされる現象など）がその散逸過程を担う「無衝突衝撃波」である。このような衝撃波で起きる粒子加速過程は、衝撃波で作られる電磁場の構造や波動、高エネルギー粒子自身がプラズマ中に励起する波動などが複雑に関係する非熱的・運動論的非線型現象である。したがって、無衝突衝撃波の形成過程と粒子加速過程を第一原理的に調べるためには、プラズマの運動論的な取り扱いができるプラズマ粒子シミュレーションが最も適した手法の一つである。しかし、個々の粒子の運動を取り扱うためにその計算量は膨大であり、スーパーコンピュータの進歩によって近年ようやく定量的な研究ができるようになってきた。

2. 研究の目的

本研究では主に以下の点を目的とした。  
 (1) 無衝突衝撃波の形成過程をなるべく第一原理的に、つまり運動論的なプラズマ過程として明らかにする。具体的には、衝撃波の散逸を担うプラズマの不安定性の詳細や、生成される波動、散逸を受けた衝撃波下流のプラズマのエネルギー分布（熱平衡分布に近いかな否か）などを明らかにする。  
 (2) 同時に、衝撃波で働く粒子加速機構を衝撃波の形成過程とセルフコンシステントに取扱い、その物理過程を明らかにする。特に、加速過程の詳細や、下流の熱的プラズマの一部がどのようにして粒子加速過程に投入（インジェクション）されるかという点、そして冪型のエネルギー分布を持つ高エネルギー粒子が生成されるかどうかについて詳しく見る。さらに、付随する問題として、(3) 衝撃波周辺での磁場の乱れの生成過程について調べる。これ

は粒子のプラズマ中の拡散過程に関係し、粒子加速過程や星間空間への拡散に影響を与えると考えられる。

3. 研究の方法

無衝突衝撃波は、粒子と電磁場の運動論的な相互作用により形成されるものであり、また、粒子加速も熱的な分布から外れた一部の粒子が非熱的な過程により加速されるものである。したがって個々の粒子の速度もきちんと取り扱う運動論的な取り扱いが本質的であり、このような運動論的現象をきちんと取り扱うことができるプラズマ電磁粒子シミュレーション（PIC シミュレーションとも呼ばれる）を主軸として研究を行った。

4. 研究成果

高マッハ数で背景磁場が衝撃波面法線に近い準平行衝撃波における衝撃波の形成とそこで起きる粒子加速について、無衝突プラズマの大規模粒子シミュレーションを行って研究した。その結果、一部の粒子が衝撃波付近で加速されること、また、衝撃波付近で反射や加速をされた粒子が衝撃波の上流に磁場の乱れを伴う大振幅の Alfvén 波を励起することがわかった（図 1）。

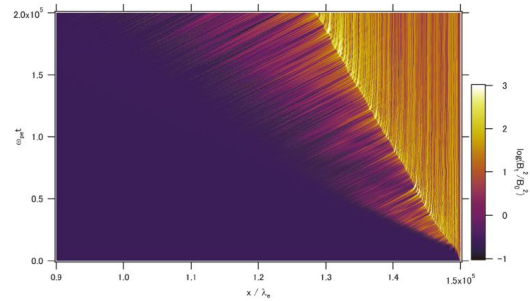


図 1: 衝撃波付近の磁場強度。横軸は位置、縦軸は時間を示す。色は磁場強度を表し、紫で弱く、黄色から白が強い事をあらわす。右下から左上へ衝撃波が伝播する様子がわかる。衝撃波の左側が上流、右側が下流であり、

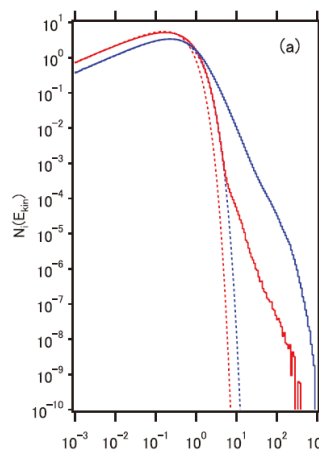


図 2: 衝撃波の下流での粒子のエネルギースペクトル。横軸はエネルギー、縦軸はエネルギースペクトルの値をあらわす。青が陽子、赤が電子で、どちらも冪型の非熱的な高エネルギー成分を示す。点線はそれぞれ熱的なマクスウェル分布である。

衝撃波の上流に強い磁場を伴った大振幅の波が存在することがわかる。

これらの大振幅波が十分に成長すると、その電磁場の横波成分により、衝撃波の局所的な構造は磁場の向きが衝撃波面法線に垂直に近い準垂直衝撃波に近いものとなることを明らかにした。

衝撃波での加速の結果、陽子の一部は冪型のエネルギースペクトルを形成することがわかった（図2の青線）。陽子の加速過程への投入効率（インジェクション・レート）はシミュレーションの計算時間にわたってほぼ一定であり、そのインジェクション・メカニズムには、衝撃波面付近での大振幅波による陽子のトラッピングが重要な役割を果たしている可能性があることを示した。加速過程はフェルミ加速型の加速であり、衝撃波の上流と下流を何度も往復する過程で粒子がエネルギーを獲得していく。ただし、特に高エネルギーに加速された粒子のサンプルでは、衝撃波のそれぞれの領域で拡散的には運動せず、ジャイロ周期のオーダーの非常に短い時間で衝撃波面を往復していることがわかった。したがって、この過程は、いわゆる「拡散的衝撃波粒子加速」ではなく、近年、杉山らによってハイブリッド・シミュレーションで示されていた加速過程（Sugiyama, 2011）に近いものであると考えられる。この後者の過程では加速粒子は拡散過程よりも遥かに短い時間で衝撃波を往復し、加速効率もそれに応じて良くなる。

電子に関しても同様の加速が起き（図3）冪型のエネルギースペクトルが形成されることが観測された（図2の赤線）。電子に関してフェルミ加速的な加速が見られたのは、この計算が初めてであると思われる。

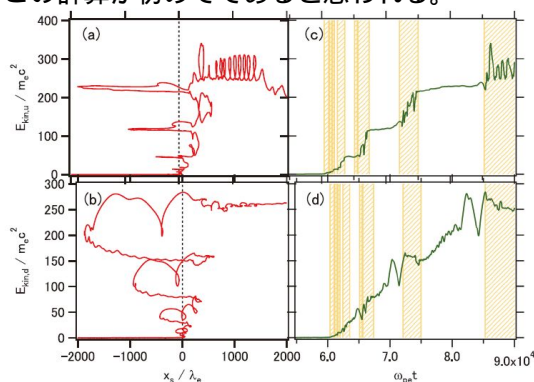


図3：衝撃波付近で電子が加速される様子。(a) 上流静止系で見た電子のエネルギーの進化。横軸は位置、縦軸はエネルギーを表す。赤線が加速電子の履歴。縦の点線は衝撃波面の位置を表す。(b) 下流静止系で見た電子エネルギーの進化。他は(a)と同様。(c) 横軸を時間にとった上流系での電子エネルギーの進化。(d) 下流系での電子エネルギーの進化。(c)と同様。

しかし、電子のインジェクション・レートは一定ではなく、上流に励起された電磁波の振幅が弱まった短い期間にしかインジェクションが起きないことがわかった。これは、上流の波の振幅が大きい時には、既述のように局所的な衝撃波の構造が垂直衝撃波に近くなり、そのため電子が衝撃波面で磁力線に沿って反射されることが難しくなるためであると考えられる。一方、上流から流れてくる一部の電子が、衝撃波に到達する前に衝撃波上流領域で加熱や加速を受けることも明らかになった。これは、上流の大振幅波との

相互作用の結果と考えられる。今回の計算時間の範囲では見られなかったが、より長い時間のシミュレーションを行えば、上流である程度の加速を受けたこのような電子が、衝撃波面で反射されて、定常なインジェクションの実現に寄与する可能性があると考えられる。以上の研究成果は、論文にまとめて投稿し、The Astrophysical Journal 誌に掲載された。

また、上記の研究を行う過程で、粒子法を用いたプラズマシミュレーションでは、使用する粒子数が少ないと、粒子加速過程で加速された高エネルギー粒子が顕著にエネルギーを失っていくことが明らかになった。この問題は、粒子加速のシミュレーションにとって特に重要であるため、これについても研究した。まず、背景にあるプラズマが非相対論的温度で背景磁場が無い場合について、粒子シミュレーションを用いた数値実験を行って調べた。その結果、高エネルギー粒子のエネルギー減衰率は、シミュレーションで使用するプラズマ粒子の電子表皮長あたりの数に反比例し、またシミュレーションの次元にも依存することを示した。さらに、この過程が宇宙線のエネルギー減衰メカニズムとしてプラズマの”Stopping Power”として知られている現象と物理的には同じで、プラズマシミュレーションでは現実に比べてプラズマ粒子が遥かに少ないために、そのエネルギーロス効果が非常に大きく現れることを示した。エネルギー減衰率の大きさを与える理論的な表式を導出し、それがシミュレーションを用いた数値実験の結果と非常に良く一致することを示した。（図4）

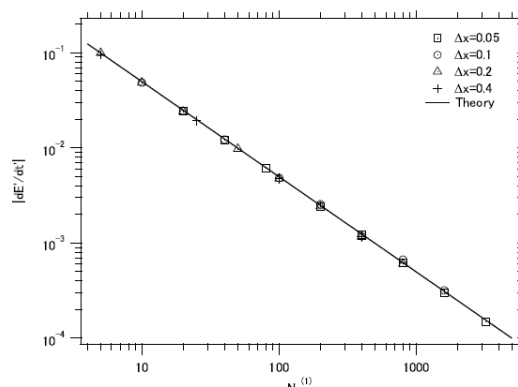


図4：プラズマ粒子シミュレーションにおける高エネルギー粒子のエネルギー減衰率。横軸は電子表皮長あたりのプラズマ粒子数、縦軸は平均のエネルギー減衰率を表す。シミュレーションのグリッドサイズを様々に変えて行った数値実験の結果をシンボルで示している。理論的予想（実線）は減衰率が粒子数に反比例するというので、数値実験の結果はグリッドサイズによらず理論的予想と非常に良く一致していることがわかる。

さらに、背景磁場がある場合やプラズマの温度が相対論的な場合などについても調べ、プラズマの流れに対して垂直方向に強い背景磁場がある場合には、エネルギー減衰率

は磁場が無い場合に比べて減少すること、平行な背景磁場の場合には減衰率はほとんど変わらないことがわかった。相対論的な温度のプラズマの場合には、高エネルギー粒子のエネルギーがプラズマの熱的粒子のエネルギーよりもはるかに大きい場合には、エネルギー減衰率は非相対論的な場合とほとんど変わらず、両者のエネルギーが同程度になると、エネルギーの変動が大きくなり、エネルギーが増加する場合もあることがわかった。上記研究のうち一部の結果については arXiv に投稿している (arXiv:1312:5507)。また、残りの部分も含めて、論文にまとめているところである。このような誇張されたエネルギーロスがあるために、粒子加速を取り扱うプラズマ粒子シミュレーションでは、扱うタイムスケールでこのエネルギーロスが結果に影響を与えないか、十分に注意をする必要があると言える。

さらに、無衝突衝撃波の粒子法によるシミュレーションで重要になりうる、プラズマに流れのある場合の数値的不安定性についての研究も行った。これは、シミュレーションで用いるグリッドのサイズがプラズマのデバイ長よりもある程度以上大きい場合に起きる問題で、静電的な不安定性が数値的に発生し、その結果として非物理的なプラズマ加熱が起きる、というものである。数値的不安定性が起きるグリッドサイズの具体的な閾値は過去の文献により示されていたが、本研究では、この閾値が実際にはシミュレーションで用いられる粒子の形状や、電磁場の差分化の方法などに依存することを示した。特に、もっとも広く用いられていると思われる手法 (CIC-staggered) の場合には、不安定となる閾値は上述の文献の約 2 倍になることを示した。速度の依存性についても調べ、相対論的な速度を持つ場合には、閾値が小さくなる傾向があることがわかった。以上のことから、流れのあるプラズマの粒子シミュレーションを行う際には、上記のような点に注意をして適切なグリッドサイズを採用することが重要である。この研究についても、論文を執筆中である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

1. Tsunehiko N. Kato,  
“Particle Acceleration and Wave Excitation in Quasi-Parallel High-Mach-Number Collisionless Shocks: Particle-in-Cell Simulation”,  
The Astrophysical Journal, 査読あり,  
802, 2015, 115 (17pp),  
doi:10.1088/0004-637X/802/2/115

[学会発表](計14件)

1. 加藤恒彦, 「PICシミュレーションにおける高エネルギー粒子のエネルギーロス I」, 日本天文学会, 2016年3月14日, 首都大学東京南大沢キャンパス(東京都・八王子市)
2. 加藤恒彦, 「PICシミュレーションにおける高エネルギー粒子のエネルギーロス II」, 理論懇シンポジウム, 2015年12月23日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)
3. 加藤恒彦, 「高マッハ数の準平行衝撃波における粒子の加速過程」, 日本天文学会, 2015年3月20日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)
4. 加藤恒彦, 「PICシミュレーションにおける高エネルギー粒子のエネルギーロス」, 理論懇シンポジウム, 2014年12月24日, 国立天文台三鷹キャンパス(東京都・三鷹市)
5. Tsunehiko N. Kato (invited),  
“Particle Acceleration in Quasi-Parallel High-Mach-Number Shocks”, 8th Korean Astrophysics Workshop on Astrophysics of High-Beta Plasma in the Universe, November 13, 2014, ShineVille Resort (Jeju Island・Korea)
6. 加藤恒彦, 「PICシミュレーションにおける高エネルギー粒子のエネルギーロス II」, 日本天文学会, 2014年9月11日, 山形大学小白川キャンパス(山形県・山形市)
7. 加藤恒彦, 「高マッハ数の準平行衝撃波における粒子加速」, 日本地球惑星科学連合大会, 2014年4月30日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)
8. 加藤恒彦, 「高マッハ数の準平行衝撃波における陽子と電子の加速」, 日本天文学会, 2014年3月22日, 国際基督教大学(東京都・三鷹市)
9. 加藤恒彦, 「準平行衝撃波での粒子加速とPICシミュレーションのエネルギーロスについて」, 理論懇シンポジウム, 2013年12月25日, 東京大学柏キャンパス(千葉県・柏市)
10. 加藤恒彦, 「磁気不安定の非線型発展に伴う無衝突衝撃波」, 日本物理学会, 2013年9月27日, 徳島大学常三島キャンパス(徳島県・徳島市)
11. 加藤恒彦, 「PICシミュレーションにおける高エネルギー粒子のエネルギーロス」, 日本天文学会, 2013年9月12日, 東北大学川内北キャンパス(宮城県・仙台市)
12. 加藤恒彦, 「準平行衝撃波での電子と陽子の加速」, 日本物理学会, 2013年3月29日, 広島大学東広島キャンパス(広島県・東広島市)
13. 加藤恒彦, 「無衝突衝撃波での電子と陽子

の加速」、理論懇シンポジウム、2012 年  
12 月 22 日、つくば国際会議場(茨城県・  
つくば市)

14. 加藤恒彦、「高マッハ数の準平行衝撃波で  
のイオン加速」、日本天文学会、2012 年 9  
月 21 日、大分大学旦野原キャンパス(大  
分県・大分市)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

加藤 恒彦 (KATO, Tsunehiko)

国立天文台・天文シミュレーションプロジ  
ェクト・専門研究職員

研究者番号：90413955