

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20540231

研究課題名（和文） 活動天体における粒子加速と非熱的放射の理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical Study of Particle Acceleration and Non-Thermal Emission in Active Astronomical Objects

研究代表者

高原 文郎（TAKAHARA FUMIO）

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：20154891

研究成果の概要（和文）：超新星残骸、パルサー星雲、活動銀河中心核などを対象として、相対論的エネルギーを持った非熱的粒子の加速機構の研究を行った。無衝突衝撃波で生じる各種のプラズマ不安定などの物理的素過程の研究とともに、ガンマ線観測との比較検討を行い、衝撃波での粒子加速過程、加速された粒子の拡散過程、X線やガンマ線の放射スペクトルの形成機構について多くの興味ある結果を得た。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the acceleration mechanisms of relativistic non-thermal particles in supernova remnants, pulsar wind nebulae and active galactic nuclei. We have studied elementary physical processes such as various plasma instabilities in collisionless shocks and made comparisons with gamma-ray observations. We have obtained many interesting results on particle acceleration and diffusion processes as well as X-ray and gamma-ray spectra.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：粒子加速、無衝突衝撃波、超新星残骸、相対論的ジェット、活動銀河、パルサー、ビーム不安定、ジッター放射

1. 研究開始当初の背景

（1）宇宙における相対論的エネルギーを持った非熱的粒子の加速機構の解明は長年の大きな課題である。その基礎となるのは1970年代末期に提案された衝撃波による統計加速機構であり、30年にわたってさまざまな観点から研究されてきた。この機構はべき型のエネルギースペクトルを予言するなど多くの長所を持っているものの、定量的な予言、観測との比較の点から見るといまだに

さまざまな未解決の問題を抱えている。一方、近年空気チェレンコフ望遠鏡 HESS などによる多数の銀河系内 TeV ガンマ線源の発見、Chandra X線衛星による超新星残骸や活動銀河ジェットの高分解能観測によって、粒子加速に関する興味ある観測事実が多数発見されてきた。2008年度には GeV ガンマ線衛星 Fermi が打ち上げられる予定で、観測と比較検討できる現実的な粒子加速機構の研究がまさに焦眉の課題となっていた。こ

これらのガンマ線観測は超新星残骸、活動銀河中心核、ガンマ線バーストといったよく知られた天体のほかに、それまでガンマ線では未検出の天体についても新たな興味ある問題を提起すると期待されていた。

(2) 具体的には以下のような問題意識を持っていた。

① 超新星残骸は銀河宇宙線の有力な候補であるが、理論的予言は 3×10^{15} eVという折れ曲がりエネルギーには2桁程度不足する。観測的にも加速された宇宙線によるパイ粒子起源のガンマ線観測は未だに確立されていなかった。Bellは加速された宇宙線のつくる電流によって磁場が数桁も増幅されることにより、加速されるエネルギーが大きくなるという興味深い主張をしていたが、この仮説を理論的に深く検討し、超新星残骸の観測に照らして検証することが重要な課題となっていた。

② 衝撃波粒子加速では、電子の加速は簡単ではない。衝撃波構造をつくるのは主にイオンであり、質量の軽い電子はジャイロ半径が極めて小さく、断熱的にふるまうと予想されるので、衝撃波面を往復するような大きな運動量(10MeV程度)まで入射することが困難であるからである。しかし、超新星残骸の衝撃波面と思われるフィラメントからのシンクロトロン放射はかなりの量の電子が100TeV程度までは加速されていることを示している。如何にして電子を加速過程に注入するかは理論の答えるべき大きな課題である。この一つの可能性として、衝撃波前面に励起された非線形静電波動に捕捉された電子が運動電場の方向に高いエネルギーまで加速されるというサーフィン加速機構が提案されてきた。しかしこの機構は純粋に一次元の場合のみに有効であって、二次元シミュレーションでは励起される波の位相がそろわないため、実際には全く起こらないことが我々によって示されたところであった。

③ 理論的には、衝撃波における電子の加熱機構でさえ不定であることはあまり広くは認識されていないようである。単純に考えると電子は断熱圧縮を受けるだけで低温から出発し、その後イオンからのクーロン加熱でX線を放射する温度まで上昇するということになる。しかし、我々のシミュレーションが示したように少なくともブーネマン不安定で電子は上流速度に対応する温度までは加熱される事がわかっている。その後の発展はパラメータによるが、それ以上加熱されるとX線から決めた観測的な電子温度を超えるので電子加熱はそこで終わるものと考えられる。過去の研究ではここでイオン音波不安定が発生し、さらに電子を加熱することが示唆されているので、この矛盾を解明

することが課題として残っていた。

④ 活動銀河ジェットからのX線放射は通常シンクロトロン放射とされているが、その場合電子のエネルギーは100TeV程度まで達していなければならない。冷却時間は非常に短いので、観測される空間分布を説明するためには、衝撃波が至るところに存在していない限り、衝撃波加速以外の機構も必要とされる。活動銀河ジェットのような相対論的運動が存在する状況では、アルフベン速度が光速に近くなることが考えられる。このときには乱流磁場強度さえ強ければ、実は二次フェルミ過程は衝撃波加速に劣らず効率のよい加速過程となりえる。二次加速がどのような寄与をしているかが興味ある問題意識として浮上しつつあった。

⑤ 超新星残骸や活動銀河ジェットから観測されるX線は通常シンクロトロン放射とされるが、非常に短いスケールの磁場揺らぎの強度が強ければ、ジッター放射による可能性も十分考えられる。最近の無衝突衝撃波のシミュレーションは、衝撃波形成機構としてはワイベル不安定による磁場形成が本質的であるとの結果を示している。シミュレーションでは、ワイベル不安定による磁場は衝撃波面から離れると早くに減衰しているが、現実的な状況では衝撃波形成に至らなくても大スケールの乱流があれば、至るところで速度分布の非等方が存在してワイベル不安定の励起による小スケールの磁場が存在する可能性もあると考えられる。このような場合の放射スペクトルがシンクロトロン放射とどのように違ってくるかが興味ある問題となっていた。

2. 研究の目的

(1) このような背景のもとで、マイクロなプラズマ過程、マクロな電磁流体過程を踏まえて、衝撃波粒子加速過程を見直し、さらに衝撃波以外での加速過程をも理論的に検討し、観測的事実との比較検討を行うことを目的とする。プラズマビーム不安定などの物理的素過程の研究を行うとともに、天体の対象としては超新星残骸、活動銀河中心核に加え、新たな展開が予想されるパルサー星雲、マイクロクェーサーなども考える。これらの天体に対するモデルを構築して、観測との比較検討を行うことで粒子加速に関わる物理を解明する研究を行う。

(2) 具体的な研究目標としては以下の課題が挙げられる。

① 電子のジャイロ半径スケール、イオンのジャイロ半径スケールといったマイクロなスケールの過程を解析的および数値的に調べ、その結果を基礎にして、電子とイオンの加熱過程および加速過程への入射機構を解明する。次に、その結果形成されるマイクロな電磁場の

情報をもとに、統計加速過程を考察する。

②以上の物理過程を基礎にしながら、超新星残骸における電子、イオンの加熱・加速を上マイクロ過程をもとに考察して、一次フェルミ過程の中に組み込み、観測との比較検討を行う。活動銀河ジェットについては相対論的な二次フェルミ加速過程をも考慮に入れた同様の研究を進める。また、電磁場の乱れをミクロスケールからマクロスケールまで考えて、ジッター放射が本当に効くかどうか検討する。

③これらの結果を、超新星残骸、パルサー星雲、活動銀河中心核などの高エネルギー天体に適用し、観測との比較検討を行うことにより、具体的天体の状況下での粒子加速と関連物理過程の様相を解明する。

3. 研究の方法

(1) 衝撃波における電子の加熱・加速過程をマイクロに検討する。これまで、イオンビームの速度が電子の温度を超える時に起こすブーネマン不安定を二次元的に調べ、サーフィン加速が起こらないことを示した。このような広い意味の二流体不安定はこれまで主に一次元の解析に基づいた考察がなされてきた。詳細な数値シミュレーションも多くは一次元のものであり、二次元の場合は人工的に小さなイオン・電子質量比を用いたものや、電子陽電子プラズマで超相対論的な場合がほとんどである。線形解析すら斜め伝播モードにたいしては十分には検討が行われていない。そこで、イオンや電子の多ビーム系に対して斜め伝播モードの系統的な線形解析を行い、その性質を明らかにする。そして、それを正しいイオン電子質量比でシミュレーションして確認するとともに、非線形的振る舞いを解明する。もちろんこれは衝撃波の全体系では無理であり、ごく小部分をとって、周期境界条件を課してその微視的性質を明らかにする。

(2) (1) の結果を超新星残骸での電子の加熱・加速を検討し、電子の加速過程、衝撃波加速のマクロな問題としての、Bell 不安定と呼ばれる非共鳴モードの励起による磁場の増幅の提案がある。この不安定性の機構をさまざまな観点から考察する。また、加速された宇宙線が周囲の星間空間へ逃散していくときには、共鳴的な波の励起が起こることが予想される。これを考慮に入れて、超新星残骸からの宇宙線の逃散過程とその際に予想されるガンマ線放射について調べる。

(3) 電場の揺らぎを持つような場合の二次フェルミ加速過程の定式化を試みる。これまでの二次加速はアルフベン波によるピッチ角散乱を主たる対象としており、静電波動モードは無視されてきている。これを取り入れた定式化を試みる。そしてその結果を活動銀河

核やジェットの観測と比較する。

(4) ジッター放射のスペクトル計算コードを開発し、活動銀河核その他に応用する。

(5) 新たな観測的展開が期待されるパルサー星雲やマイクロクェーサーについても、観測結果に着目しながら研究の展開を試みる。

4. 研究成果

(1) 衝撃波による電子加熱過程に関連して、反射イオンビームの存在化のもとでのプラズマ不安定モードを調べた。電子温度がイオン温度より著しく高い場合には斜め伝播のイオンプラズマ振動が不安定化することを発見した。このモードは強くイオンを加熱して、イオン音波不安定を抑制するため、超新星残骸の衝撃波において、電子温度が過度に加熱されることなく、観測と整合的な値に保たれることを見出した。

(2) 衝撃波で加速された宇宙線イオンの存在により、衝撃波上流プラズマ中に非共鳴の電磁流体不安定が励起されることにより、磁場が大きく増幅されるという Bell 機構について微視的な観点からの検討を進めた。数値シミュレーションの結果、プラズマ物理の観点でもこのモードが存在することを確認し、その性質の検討を進めた。

(3) 超新星残骸の上流プラズマ中の中性粒子は衝撃波面を自由に通過した後、下流で電離されピックアップイオンとなる。通常の下流プラズマとピックアップイオンの間のビーム不安定により磁場の増幅など興味ある現象が起こりえることを論じた。また、超新星残骸衝撃波の上流に、加速された宇宙線により形成されるプリカーサー領域でも、中性粒子のピックアップイオン形成とその粒子加速機構への影響があることを示した。

(4) 期待したようにフェルミ衛星や空気チェレンコフ装置によって、多くの超新星残骸からの GeV-TeV ガンマ線放射が観測された。これらには分子雲が付随しており、年齢もそれほど若くはない。セドフ膨張の終期に加速された陽子が分子雲中で起こす π 粒子生成で説明するモデルを構築した。また、超新星残骸周辺では宇宙線は、アルフベン波の励起により自由には逃げられないことを論じた。超新星残骸で加速された陽子が分子雲中まで到達する過程では、宇宙線の流れによるアルフベン波の励起により拡散が抑止されて、宇宙線は残骸の周囲に長期間閉じ込められ、宇宙線のハローが形成されることをいくつかの方法で示した。

(5) パルサー星雲のスペクトル進化のモデル計算を行い、いくつかの天体との比較検討を行った。年齢が古くなっても TeV 放射は減少しない傾向にあることを示した。また、どの天体でも磁場のエネルギーが粒子のエネルギーに比べ数桁小さいこと、電子数供給率

がパルサー磁気圏モデルからの予想値よりも1桁以上大きいことを見出した。

(6) ガンマ線連星 LS5039 のモデルを構築し、TeV, GeV, X線の間の軌道位相に連動した相関反相関を定性的に説明することに成功した。X線放射機構がシンクロトロン放射であるか、逆コンプトン散乱であるかについて考察し、逆コンプトン散乱である可能性が高いことを論じた。

(7) 乱れた磁場中を運動する相対論的粒子からのジッター放射の数値的な研究を行い、放射スペクトルの計算を行った。放射スペクトルについては、2重べき型にシンクロトロン型が重なる形になる興味あるパラメータ領域があることを見出した。いくつかの天体への応用を検討中である。

(8) 活動銀河のフレア現象と類似した我々の銀河中心SGR A*のフレア現象のモデルを提案した。このモデルでは赤外線もX線とともに放出されたブロッブにおけるシンクロトロン放射である。このフレアモデルを拡張して、GeV放射の相対論的電子による逆コンプトンモデルを提案した。

(9) 2次フェルミ加速機構については、静電波動モードを考慮した場合の本格的検討は課題として残った。しかし、活動銀河の相対論的ジェットにおけるフェルミ2次加速の役割について検討を進めたところ、従来のアルフベン波による二次加速も予想外にさまざまな場合に有効であることを発見した。現在これを活動銀河核やジェットの問題に応用する研究を行っている。

(10) 活動銀河中心核における相対論的ジェットの形成機構について、電子陽電子対ファイアボールモデルとともに、相対論的陽子が熱的プラズマと相互作用して作る相対論的中性子の役割について検討した。

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17件)

① M. Kino, N. Kawakatu, F. Takahara, Calorimetry of Active Galactic Nucleus jets: testing plasma composition in Cygnus A, *Astrophysical Journal*, 751, 101 (9pp), 2012, 査読有

② M. Kusunose, F. Takahara, A Leptonic Model of Steady High-energy Gamma-Ray Emission from Sgr A*, *Astrophysical Journal*, 748, 34 (5pp), 2012, 査読有

③ S. J. Tanaka, F. Takahara, Study of Four Young TeV Pulsar Wind Nebulae with a Spectral Evolution Model, *Astrophysical*

Journal, 741, 40 (14pp), 2011, 査読有

④ Y. Fujita, F. Takahara, Y. Ohira, K. Iwasaki, Alfvén wave amplification and self-containment of cosmic rays escaping from a supernova remnant, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415, 3434-3438, 2011, 査読有

⑤ Y. Teraki, F. Takahara, A Novel Emission Spectrum from a Relativistic Electron Moving in a Random Magnetic Field, *Astrophysical Journal Letters*, 735, L44 (5pp), 2011, 査読有

⑥ M. Kusunose, F. Takahara, Synchrotron Blob Model of Infrared and X-ray Flares from Sagittarius A*, *Astrophysical Journal*, 726, 54 (6pp), 2011, 査読有

⑦ Y. Ohira, F. Takahara, Effects of Neutral Particles on Modified Shocks at Supernova Remnants, *Astrophysical Journal Letters*, 721, L43-47, 2010, 査読有

⑧ M. S. Yamaguchi, F. Takahara, Modulation Mechanism of TeV, GeV and X-ray Emission in LS5039, *Astrophysical Journal*, 717, 85-92, 2010, 査読有

⑨ S. J. Tanaka, F. Takahara, A Model of the Spectral Evolution of Pulsar Wind Nebulae, *Astrophysical Journal*, 715, 1248-1257, 2010, 査読有

⑩ Y. Fujita, Y. Ohira, F. Takahara, Slow Diffusion of Cosmic Rays Around a Supernova Remnant, *Astrophysical Journal Letters*, 712, L153-L156, 2010, 査読有

⑪ Y. Fujita, K. Hayashida, H. Takahashi, F. Takahara, Suzaku Observation of Diffuse X-Ray Emission from the Open Cluster Westerlund 2: a Hypernova Remnant?, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61, 1229-1235, 2009, 査読有

⑫ Y. Fujita, Y. Ohira, S. J. Tanaka, F. Takahara, Molecular Clouds as a Probe of Cosmic-Ray Acceleration in a Supernova Remnant, *Astrophysical Journal Letters*, 707, L179-L183, 2009, 査読有

⑬ Y. Ohira, T. Terasawa, F. Takahara, Plasma Instabilities as a Result of Charge Exchange in the Downstream Region of Supernova Remnant Shocks, *Astrophysical*

Journal Letters、703、L59-L62、2009、査読有

④Y. Ohira, B. Reville, J. G. Kirk, F. Takahara, Two-Dimensional Particle-In-Cell Simulations of the Nonresonant, Cosmic-Ray-Driven Instability in Supernova Remnant Shocks, *Astrophysical Journal*, 698, 445-450, 2009、査読有

⑤K. Asano, F. Takahara, A Relativistic Electron-Positron Outflow from a Trepid Fireball, *Astrophysical Journal Letters*, 690, L81-L84, 2009、査読有

⑥Y. Ohira, F. Takahara, Oblique Ion Two-Stream Instability in the Foot Region of a Collisionless Shock, *Astrophysical Journal*, 688, 320-326, 2008、査読有

⑦M. Kusunose, F. Takahara, Synchrotron Self-Compton Model for PKS 2155-304, *Astrophysical Journal*, 682, 784-788, 2008、査読有

[学会発表] (計67件)

①高原文郎、高エネルギー宇宙物理学の未解決問題、第12回高宇速研究会(招待講演)、2012年3月28-30日、奈良女子大学

②高原文郎、AGNジェットでの乱流加速、粒子加速に関する小研究会、2012年3月1-2日、東大宇宙線研究所

③高原文郎、高エネルギー現象、第24回理論懇シンポジウム(招待講演)、2011年11月5-7日、国立天文台

④高原文郎、AGNジェット形成理論、多波長放射で探る活動銀河中心核ジェット研究会(招待講演)、2011年9月26-27日、国立天文台

⑤F. Takahara, Y. Teraki, Radiation Spectra from Relativistic Electrons in Turbulent Magnetic Fields, *International Meeting Understanding Relativistic Jets*, 2011年5月23-26日、Krakow, Poland

⑥高原文郎、宇宙線加速に関わる理論的課題、ガンマ線天文学～日本の戦略研究会(招待講演)、2010年11月16-17日、東大宇宙線研究所

⑦F. Takahara, Physics of AGN Jets: physical properties and central engine, *International Workshop Towards a root of*

AGN jets: Recent progress (招待講演)、2010年12月14-15日、国立天文台

⑧高原文郎、EGRETからFermiへ—理論的課題、日本天文学会春季年会、2010年3月25日、広島大学

⑨F. Takahara, K. Asano, A fireball mechanism of relativistic outflow production in AGN, *International workshop The high-energy astrophysics of outflows from compact objects*, 2008年12月5-13日、Ringberg Castle, Germany

⑩F. Takahara, Buneman and ion two-stream instabilities in the foot of Collisionless shocks, *International Meeting Kinetic Modeling of Astrophysical Plasmas*, 2008年10月5-9日、Krakow, Poland

[図書] (計1件)

①高原文郎、培風館、特殊相対論(新物理学シリーズ41)、(2012)、198頁

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高原文郎 (TAKAHARA FUMIO)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 20154891