

令和元年5月28日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05024

研究課題名(和文) 星間・銀河間ガスで加速された準熱的粒子による非平衡放射と加熱

研究課題名(英文) Particle Acceleration and Heating by the Turbulence in the Interstellar / Intracluster Gas and Nonequilibrium Radiation due to Quasi-Thermal Electrons

研究代表者

政井 邦昭 (Masai, Kuniaki)

首都大学東京・理学研究科・教授

研究者番号：80181626

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：銀河団の形成過程で銀河団衝突によって生じた乱流は銀河団ガスの粒子をin-situ加速すると考え、Fokker-Planck方程式を用いて、粒子のエネルギースペクトルの形成過程と乱流の減衰に伴う時間発展を調べた。加速された電子によって観測と矛盾しない電波強度を得るとともに、運動量空間での移流・拡散過程で小角度散乱による高次項まで考慮することで、冷却コア程度の密度で電子温度が約2倍になる加熱が起こりうることを示した。また、このときの乱流速度や硬X線放射が観測と矛盾しないことも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流による加速は、衝撃波加速と相補的に、宇宙の高エネルギー粒子加速において重要な物理過程であり、衝撃波に比べて加速時間がかかるが硬いスペクトルをつくれるという特徴がある。銀河団ガスでは、衝撃波と同様に、乱流による加熱が期待されるが、分布関数で実証した例は少なく、あっても拡散係数に変更を加えるものであった。本研究では、拡散係数を高次の項まで考慮することで加速・加熱を統合的に示すことができた。インジェクション項を持たない2次Fermi加速過程をより適切に扱う一つの方法を示したと言え、広く、宇宙の高エネルギー粒子や星間・銀河間ガスの加熱の理解に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Particle acceleration by the turbulence is investigated with a Fokker-Planck code which calculates the advection and diffusion in the momentum space, and applied to the intracluster gas of galaxy clusters. We have developed the code considering higher-order terms due to small-angle scattering into the advection and/or diffusion coefficients, intending to describe heating as well as acceleration. For the turbulence of 500 km/s decaying to less than 170 km/s in 1 Gyr through inverse cascade, it is found that the cool core of a cluster is heated to about twice the temperature before, and accelerated electrons emit synchrotron radio as intense as observed from radio halos. Also found is that while the radio emission lasts for a long time, hard X-ray emission declines quickly after the turbulence decay.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：乱流 2次Fermi加速 Fokker-Planck方程式 準熱的粒子 銀河団 電波ハロー 冷却コア 非平衡放射

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発の運動エネルギーは、直接的には、衝撃波によって周囲の物質を加熱し一部の粒子を高エネルギーまで加速して超新星残骸を形成する。一方で、衝撃波の伝播に伴って発生した乱流により超新星爆発の一部のエネルギーが星間ガスに蓄えられ、間接的に加熱や緩やかな粒子加速（2次Fermi加速）に寄与することが考えられる。このようなアイデアに基づいて、以前われわれは銀河リッジからのX線放射を説明する一つのモデルを提案した (Dogiel et al. 2002, Masai et al. 2002)。その後の研究でこの放射は星間ガスからのものでなく点源の重ね合わせで説明される可能性が出て来たが、アイデアそのものは重要と考えている。実際、超新星爆発の頻度も高いと考えられる爆発的星生成銀河では、銀河風のようなディスクから広がったX線放射や γ 線放射が観測されており、星間ガスのエネルギーが大きいことが示唆される。

乱流による超熱的粒子の生成は銀河団の銀河間ガスでも重要である。銀河団の衝突-合体、小規模銀河群の吸収-合体というダイナミックな銀河団の形成過程においてガスは衝撃波や乱流の影響を受ける。ガスの温度は重力ポテンシャルと同程度なので、小規模の銀河群を吸収し合体する場合には、銀河群の低密度ガスに比較的大きなMach数の衝撃波が伝播し1次Fermi加速によって電波レリクのように銀河団外縁部に電波放射を形成すると考えられる。一方、同規模の質量の銀河団どうしの衝突ではMach数が小さく衝撃波加速はあまり期待できないが、乱流によるin-situ加速が電波ハローのように銀河団の広い領域で起こりうる。合体過程にあると思われる銀河団のガスが比較的高温であることから、加速された電子の一部は乱流の減衰に伴って熱的分布に移行することが期待されるが（ガスの加熱）、理論的には未だ説明されていない。例えば、加速によってベキ型の分布が形成され乱流の減衰後もベキ型の分布が残ると主張する論文 (Dogiel et al. 2007)、ベキ型の分布は形成されるがより高温の熱的分布に移行すると主張する論文 (Petrosian & East 2008) があるが、後者は分布関数の時間発展を直接的に示したわけではない。銀河団の衝突-合体に伴う乱流は、中心部のブラックホールの活動と相補的に、電波ハローの起源やコアの放射冷却の問題を解決する鍵と考えられるが、分布関数に基づいて整合的に粒子加速・加熱過程を実証した理論的研究は未だない。

2. 研究の目的

星間ガスや銀河団ガスの様々な条件下で、乱流による加速・加熱で形成される電子の分布関数を調べることで、また、乱流の減衰に伴う分布関数の時間発展を調べ、その過程での非平衡放射を調べることを目的とする。乱流による磁場の乱れによって熱的粒子の一部が加速され超熱的成分（準熱的粒子および非熱的粒子）が生成される。準熱的粒子はCoulomb散乱が効いて加速過程に留まることのできない粒子群で、粒子のエネルギー分布において熱的粒子（Maxwell分布）と非熱的粒子（power-law分布）の中間領域に生成される。このような加速過程は、1次のFermi加速のような衝撃波での加速と異なり、加速率が散乱体の速度/光速の2乗に比例する比較的緩やかな2次加速の過程である。

非熱的粒子はバックグラウンド熱的粒子と殆ど相互作用しない（それゆえ加速領域に留まることができ高エネルギーまで加速されうる）ので加熱や非平衡放射への寄与が小さい。これに対し準熱的粒子は、熱的粒子との衝突が無視できず加速領域に留まれない粒子群で、熱的粒子との相互作用によって非平衡放射をするので、非熱的成分が顕著でない高温プラズマにおいて隠れた重要な加速過程となる。「隠れた」というのは、このような非平衡放射のスペクトルが一見やや高温の熱的スペクトルに見え、従来の検出器の分解能・エネルギー帯域では準熱的な粒子の存在が判りにくかったからである。本研究計画は、NuSTARが観測を開始し熱的成分から非熱的成分まで広い帯域でシームレスな観測データが得られるようになったこと、計画期間内にASTRO-H (Hitomi) による観測が始まり、非分散での、したがって星間ガスや銀河団ガスのような広がったX線源に適した高分解のスペクトル観測と硬X線での撮像観測が可能になることを踏まえている。

準熱的粒子の関わる非平衡放射の特徴は、電離平衡にあるMaxwell分布粒子の放射で近似すると、実際よりもやや高い温度・密度の成分を含む多温度プラズマからの放射に見えることである。高温ガス中で乱流によって準熱的粒子が生成されているとき、一般的な多温度平衡放射モデル（熱的粒子による光学的に薄いプラズマからの放射）を当てはめればガスの温度・密度、とくに密度を過大評価することになり、ガスの放射冷却や圧力平衡など、ガスの熱的構造の議論に影響を及ぼす。乱流で加速される粒子のエネルギースペクトルをできるだけ精確に定量的に求めることが必要で、熱的成分から非熱的加速粒子まで整合的に求めること、加速の証拠として観測されうる放射の特性を明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

乱流による粒子加速が銀河団ガスの熱的構造・進化に及ぼす影響を定量的に調べるため、Boltzmann方程式から出発して加速粒子の分布関数を求めるFokker-Planck方程式コード、熱的粒子-準熱的粒子の相互作用を計算する非平衡放射コードの開発を行う。Fokker-Planck方程式

を解くことで運動量空間での輸送（移流，拡散）を計算し，乱流による2次のFermi統計加速による粒子のエネルギースペクトルを求め，熱的粒子と非熱的粒子の中間領域に生成される準熱的粒子が乱流の減衰に伴いどのように時間発展するか調べる．また，この過程で生じる非平衡放射や，銀河の星間ガスで乱流加速がある場合の放射スペクトルを計算し，観測結果との比較や観測的研究への示唆を行う．また，併せて非熱的粒子による電波放射，硬X線～ γ 線放射も計算し，銀河団の電波レリクや電波ハローの観測と比較することで，非熱的成分と整合的に，乱流による粒子加速やガスの加熱の効果を定量的に明らかにする．

インジェクションを仮定せず，粒子のスペクトルをバックグラウンド熱的成分から非熱的加速粒子まで整合的に求めることが本研究の重要課題である．銀河リッジX線放射の研究以来，乱流による2次統計加速のFokker-Planck方程式による定式化を進めてきた．これは，位相空間での粒子保存の下，空間的な分布は一様等方とし，運動量空間での輸送を解いて分布関数の時間発展を断熱的に追いかけるものである．乱流に伴う磁場などの散乱体が無い場合は，定常解としてMaxwell分布が実現されることを確かめている．この計算スキームでは，バックグラウンド熱的粒子の初期密度・温度と，散乱体の速度の2乗/平均間隔の比が粒子のスペクトルを決める主なパラメータになる．

乱流加速の場合は衝撃波加速のような単調なベキ型の非熱的エネルギー分布にはならないが，シンクロトロン電波を放射するに足るGeV電子があれば銀河団の電波ハローを説明することができる．本研究では，併せて，熱的分布に近いエネルギーをもつ加速電子によるガスの加熱が課題である．現象論的には，運動量空間での輸送において移流項が抑制されればガスの加熱が起きると考えられるが，整合的な物理過程に基づく根拠が必要である．熱的粒子による散乱過程を見直し，熱的分布側に遷移する準熱的粒子のスペクトルを精確に追う．

4. 研究成果

(1) 粒子の分布関数を計算するFokker-Planckコード

乱流による粒子加速は2次のFermi加速である．加速された粒子と銀河団の熱的進化との関係を調べるため，熱的粒子から非熱的粒子まで整合的に分布関数を計算して加速と加熱を記述するFokker-Planckコードを開発した．この過程で数値計算上の人工的な加熱を排除する数値解法（Crank-Nicholson法，Chang-Cooper法）を試した結果，Crank-Nicholson法では解の収束は速いが人工的な加熱が見られること，一方，Chang-Cooper法は解の収束は遅いが比較的よくエネルギーを保存することが分かった．このコードに限らず，インジェクション項の無いこの種の計算では，拡散項の積分方法や方程式の解法に依存して，微妙に異なるエネルギースペクトルが得られることが確認できた．

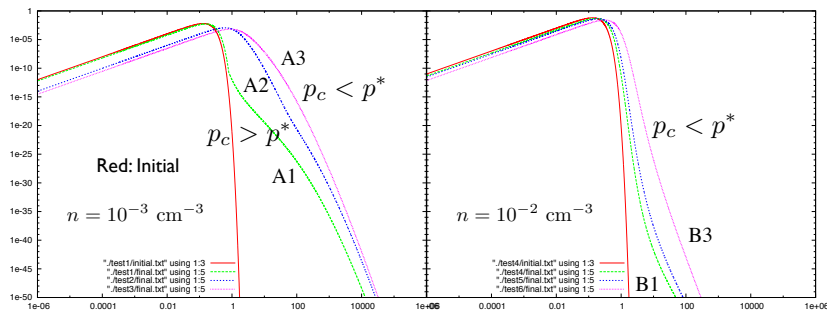


図1 拡散係数の加速とCoulomb衝突が等しくなる運動量を p^* として，拡散係数にカットオフ運動量 p_c を入れた場合の加速粒子の分布関数．

乱流加速に基づく電波ハローに関する先行研究では2つの矛盾した結果：乱流の減衰後も加速粒子は非熱的なままである（Dogiel et al. 2007），乱流は始めから高温の熱的分布を形成する（Petrosian & East 2008, Chernyshov et al. 2012）が得られている．この差が何に起因するかを明らかにし，われわれのコードで双方の結果を再現することを試みた．高温の熱的分布を形成するような計算では，拡散係数の加速項が運動量の小さい領域で急減あるいはカットオフされている．われわれのコードでも同様の結果が得られ，拡散係数の加速項とCoulomb衝突項が互いに等しくなるときの運動量を p^* とすると，カットオフ運動量 p_c が大きい場合（ $p_c > p^*$ ）は加熱は殆どないまま加速によって高エネルギーテイルがつくられやすく，一方，カットオフ運動量が小さい場合（ $p_c < p^*$ ）は加速と同時に，あるいはガス密度が高い場合には殆ど加速せずに，加熱が起きることが示された（図1）．Fokker-Planckコードによる分布関数の計算から，銀河団ガスの密度がコアで $10^{-2}/\text{cm}^3$ であることを考えると，銀河団での粒子の加速・加熱には400km/s程度以上の乱流速度が必要になることも確認できた．

(2) 銀河団の放射冷却コアへの乱流加速・加熱の応用

銀河団コアのガスの放射冷却時間は単純に計算すると宇宙年齢より短くなって力学的に不安定になることが考えられるが、電波ハローの起源が銀河団衝突で乱流加速された電子による放射なら、加速された粒子の一部が熱化することでガスの温度が上がりコアは安定化する。非熱的粒子については電波ハローを説明する \sim GeV電子が生成できれば十分で、スペクトルがベキ型になる必要はない。一方、冷却コアの加熱や非平衡放射では、熱的粒子 \sim 準熱的粒子のスペクトルが重要になる。加速された粒子がCoulomb衝突によって熱化、つまり加熱が起きるには、運動量空間で移流が抑制され拡散が支配的になることが本質的である。拡散過程の見直しを進め、加速が起きたときに初期のCoulomb衝突項からのずれを小角度散乱を考慮して拡散係数・移流係数を高次まで計算した。その結果、先行研究のようなカットオフ運動量を持ち込まなくとも、加熱された分布関数が得られることを明らかにした(図2左)。

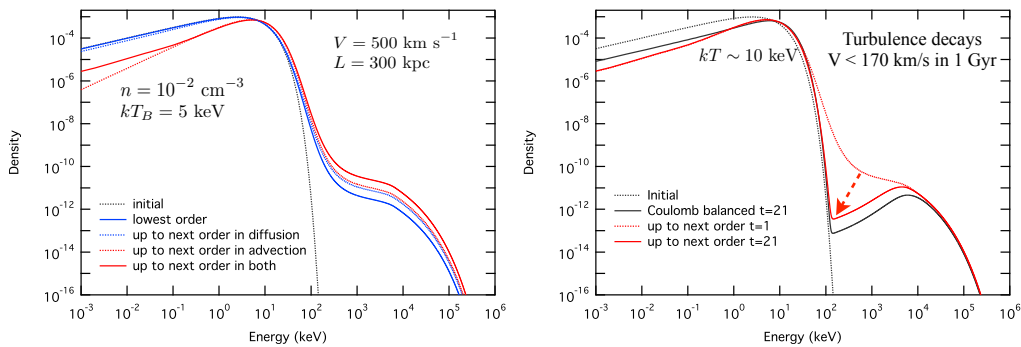


図2 左：拡散係数，移流係数を各々，および両方を，高次のオーダーまで計算した場合の加速粒子の分布関数。右：拡散係数・移流係数を高次まで計算した加速粒子の分布関数の乱流の減衰に伴う時間発展。

このとき，とくに移流係数の高次のCoulomb衝突項が低エネルギー粒子に作用して，全体として初期温度の約2倍の温度に上昇することが分かった。また，加熱は密度が高い方が起きやすく，低エネルギー粒子とのカップリングが強いことと相まって，銀河団コアの冷却ガスに効果的に働くことが期待される。ただし，加熱後のスペクトルは，温度はwell-definedと云えるものの，完全なMaxwell分布ではなくわずかにずれた形をもつことが明らかになった。図2右から分かるように，加熱された粒子の分布関数(赤の実線)は近似的に $kT \sim 10$ keVのMaxwell分布になるが， $kT = 10$ keVの真のMaxwell分布(黒の実線)からは低エネルギー側がずれた分布になっている。熱的粒子と加速粒子の相互作用で生じる準熱的粒子によって非平衡放射状態であれば，衝突励起が抑制されるので放射強度に比して粒子のエネルギー損失が抑えられ，実効的な放射冷却時間が延びてやはりコアは力学的に安定になる。

この計算では，乱流の初期スペクトルをKolmogorovとし，乱流は逆カスケードにより減衰して1Gyrのうちに速度は170km/s以下になると考えている(図2右)。X線天文学衛星HitomiによるPerseus銀河団の観測では，中心部での乱流の速度は200km/s以下であることが示され，本研究のモデリングと矛盾しない結果が得られている。また，乱流の減衰に伴って，準熱的粒子が熱的粒子と高エネルギー粒子に分離消失して行く様子が見られる(赤矢印)。このことは，GeV電子が関わるGHz電波ハローは乱流が減衰した後も比較的長く続くが， ~ 100 keV電子が関わる硬X線放射は乱流の減衰とともに短時間で消えてしまうことを示唆する。

※銀河団中心部の局所的なブラックホールの活動で電波ハローの起源や冷却コア問題を解決するのはそれほど単純でないが，冷却コアをもつ力学的に緩和した銀河団のcD銀河に巨大ブラックホールが見られる事実がある。また，銀河団衝突に起因する物理過程についても，研究計画期間中に衝突の際のスロッシングの痕跡が観測的に示唆され，局所的な衝撃波が冷却コアの加熱に関わる可能性が出てきた。そこで，本研究計画終了後の展開も視野に入れて，ブラックホールアウトフローやスロッシングの物理過程についても研究を始めた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2件)

① T. Sato, Y. Maeda, A. Bamba, S. Katsuda, Y. Ohira, R. Yamazaki, K. Masai, H. Matsumoto, M. Sawada, Y. Terada, J.P. Hughes, M. Ishida, Multi-year X-Ray Variations of Iron-K and Continuum Emissions in the Young Supernova Remnant Cassiopeia A, *Astrophys. J.*, 査読有, 836, 2017, 225, 10pp.

② K. Yaji, S. Yamada, K. Masai, Semi-analytical Model for Wind-fed Black Hole High-mass X-ray Binaries - State Transition Triggered by Magnetic Fields from the Companion Star, *Astrophys. J.*, 査読有, 847, 2017, 129, 10pp.

〔学会発表〕 (計 14件)

- ① 政井邦昭, X線望遠鏡に期待する宇宙物理過程の解明 (招待講演), X線望遠鏡研究会 2015, 2015年
- ② 政井邦昭, 清水崇文, 2次Fermi加速/加熱とFokker-Planck方程式, HEAP2015 高エネルギー宇宙物理学研究会, 2015年
- ③ 清水崇文, 木村聖人, 立石琢磨, 政井邦昭, 銀河団ガスにおける乱流による粒子加速と加熱, 日本天文学会 2016年春季年会, 2016年
- ④ 谷治健太郎, 政井邦昭, 山田真也, 恒星風へのフィードバックを考慮した High Mass X-Ray Binary の質量降着モデル, 日本天文学会 2016年春季年会, 2016年
- ⑤ 谷治健太郎, 政井邦昭, 山田真也, High Mass X-ray Binary における恒星風と降着流の整合性, 日本天文学会 2016年秋季年会, 2016年
- ⑥ 谷治健太郎, 政井邦昭, 連星系における光電離を考慮した Bondi-Hoyle-Lyttleton 降着, HEAP2016 高エネルギー宇宙物理学研究会, 2016年
- ⑦ 谷治健太郎, 政井邦昭, 山田真也, 恒星風降着X線連星系における準解析的状态遷移モデル, ブラックホール降着流ミニワークショップ, 2017年
- ⑧ 政井邦昭, 宇宙プラズマ 未だ分かっていない物理過程 (招待講演), 高宇連研究会2017, 2017年
- ⑨ 谷治健太郎, 山田真也, 政井邦昭, 恒星風降着X線連星系における準解析的状态遷移モデル, HEAP2017 高エネルギー宇宙物理学研究会, 2017年
- ⑩ 福田晋久, 谷治健太郎, 政井邦昭, AGN円盤風の変動に基づく銀河規模アウトフローの力学的発展, 日本天文学会 2017年秋季年会, 2017年
- ⑪ 政井邦昭, 集光型望遠鏡の黎明期 -Tenma搭載日本初の1次元集光鏡とEinstein衛星-, X線望遠鏡研究会2017, 2017年
- ⑫ 福田晋久, 谷治健太郎, 政井邦昭, 超巨大質量ブラックホールの活動と銀河の進化に対するその影響, 日本天文学会 2018年秋季年会, 2018年
- ⑬ 政井邦昭, PhoENiXへの期待: 宇宙プラズマ物理の視点から (招待講演), 宇宙プラズマにおける粒子加速ワークショップ, 2018年
- ⑭ 福田晋久, 谷治健太郎, 政井邦昭, 上田佳宏, 超巨大ブラックホールの活動と $M - \sigma$ relation への影響, 日本天文学会 2019年

〔図書〕 (計 0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0件)
- 取得状況 (計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

- (1) 研究分担者 なし
- (2) 研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。