

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：55401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800099

研究課題名(和文)活動銀河核ジェット残骸の多波長スペクトルから迫る無衝突衝撃波の物理

研究課題名(英文) Exploring the collisionless shocks by using multi-wavelength spectra of AGN fossil shell emission

研究代表者

川勝 望 (KAWAKATU, NOZOMU)

呉工業高等専門学校・自然科学系分野・准教授

研究者番号：30450183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：相対論的ジェットと周囲のガスとの相互作用により形成される“活動銀河核(AGN)ジェット残骸(繭とシェルで構成)”の力学進化とその残骸からの熱的・非熱的放射を統合的に解き、AGNジェット残骸からの多波長スペクトルの時間進化を調べた。これにより、AGNシェルでの粒子加速や磁場増幅の素過程について議論を行った。さらに、AGNジェット残骸の力学モデルから制限される繭の全圧と繭の状態方程式から、繭のプラズマ組成に制限する方法を考案し、ジェットパワーの既に分かっている電波銀河4天体に適応した。その結果、全ての4天体に対して、電子・陽電子ペアプラズマの混在が必要不可欠であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We theoretically evaluate the evolution of the emission from both the lobe and the shell, which are composed of shocked jet matter (i.e., cocoon) and a shocked ambient medium (i.e., shell). Based on a simple dynamical model of expanding lobe and shell, we clarify how the broadband spectrum of each component evolves before and after the cessation of the jet activity. (i) As a result, overall emission from the shell overwhelms that from the lobe at a wide range of frequencies from radio up to gamma-ray soon after the jet activity has ceased. Our result predicts a new class of dead radio sources that are dominated by shell emission. (ii) We examine the plasma composition of relativistic jets in four Fanaroff-Riley type II (FR II) radio galaxies by analysing the total cocoon pressure in terms of partial pressures of thermal and non-thermal electrons/positrons and protons. We find that the positron-free plasma comprising protons and electrons is ruled out.

研究分野：数物系科学

キーワード：理論天文学 無衝突衝撃波

1. 研究開始当初の背景

近年の観測から、銀河の中心には太陽質量の100万~10億倍もの超巨大ブラックホール(SMBH)が普遍的に存在し、さらにSMBH近傍(活動銀河核:以降AGNと呼ぶ)から相対論的なジェットが噴出していることが分かってきた。相対論的ジェットは周囲の高温で希薄なガスとの相互作用により“無衝突衝撃波”を形成すると考えられている。しかしながら、粒子加速メカニズム、磁場の乱れ具合や熱化過程を代表とする“無衝突衝撃波の物理”は、非線形・非平衡過程や多次元性などが複雑に絡み合っているためにほとんど明らかになっていない。太陽風や超新星残骸の観測から一部の物理量に制限が付き始めているが、流速が光速に近いAGNジェット起源の無衝突衝撃波に関する情報は極めて少ない。この問題を解決するためには、AGNジェットとその周囲のガスとの相互作用により形成される“AGNジェット残骸”からの熱的・非熱的放射の多波長スペクトルが、ジェット残骸の成長とともにどのように変化するかを理論的に調べ、観測と詳細な比較を行うことが必要である。これらの研究は、ジェットのパワー、年齢、ジェットの組成(ペアプラズマ、電子・陽子プラズマ)といった相対論的ジェットの形成や進化の問題とも密接に関係する。

国内外の研究動向 無衝突衝撃波の物理を調べる手段の1つとして、電磁粒子シミュレーションが有力であり、国内外で精力的に行われている。しかし、シミュレーション結果が初期条件や多次元性に依存するなど、無衝突衝撃波の本質的な理解に至っていないのが現状である。

研究の位置づけ 宇宙では至るところで無衝突衝撃波が起こり、それによる高エネルギー現象が数多く観測されている。本研究では、AGNジェット残骸が無衝突衝撃波の素過程を探る新しい実験場であることを示すことを最終的な目標としている。理論モデルと観測との詳細な比較から無衝突衝撃波の物理に迫る本研究は、数値シミュレーションを用いた研究と相補的な関係にある。

これまでの研究成果 申請者は、AGNジェット残骸の力学進化(Kino & Kawakatu 2005; Kawakatu & Kino 2006; Ito, Kino, Kawakatu et al. 2008)、AGNジェット残骸の構成要素であるコクーンからの熱的制動放射(Kino, Kawakatu & Ito 2007; Kino, Ito, Kawakatu & Nagai 2009)やシェルからの非熱的放射(Ito, Kino, Kawakatu & Yamada 2011)など、AGNジェット残骸の力学進化や放射過程に関する理論的研究で成果を出してきた。**着想に至った経緯** ここ数年、AGNジェット残骸の力学進化や放射過程の研究は多数なさ

れてきたが、無衝突衝撃波の素過程に迫るといふ観点での研究はほとんど無いのが実情である。近年、ガンマ線バーストの分野では、無衝突衝撃波を介して加速された非熱的電子だけでなく、熱化した電子からの放射に注目した研究が行われ始めている。このような時期に、無衝突衝撃波という同じ物理現象が起こっているAGNジェット残骸に対して、申請者と共同研究者で行ってきた研究を有機的に組み合わせた熱的・非熱的放射の多波長スペクトル計算は、この分野で世界をリードする大きなチャンスである。さらに、LOFARやALMAによる観測が可能であるこの時期に、本研究を通して、AGNジェット残骸からの放射スペクトルを予言するのに期が熟したと言える。

2. 研究の目的

宇宙には非熱的高エネルギー粒子が普遍的に存在する。しかしながら、その理解に必要な不可欠な“無衝突衝撃波の物理”は現代物理学における未解決問題の1つである。この問題を解明するために、本研究では、相対論的ジェットと周囲のガスとの相互作用により形成される“活動銀河核ジェット残骸”の力学進化とその残骸からの熱的・非熱的放射を整合的に解き、活動銀河核ジェット残骸からの多波長スペクトルの時間進化を計算する。これらの理論計算と空間スケールの異なるジェット残骸を比較することで、無衝突衝撃波を理解する上で重要となる物理量への制限を行い、その素過程を解明する。

本研究では、以下で述べる理論研究と観測研究を融合させることで、無衝突衝撃波の素過程に対する新しい知見を与える。

【理論研究】

(1)熱的電子の個数分布や温度を正確に取り扱い、AGNジェット残骸からの熱的放射スペクトルの計算、(2)電子の加速効率や磁場の乱れ具合を仮定したAGNジェット残骸からの非熱的放射スペクトルの計算、(3)ジェット周辺の輻射場がそのダイナミクスに与える効果の調査を行う。これらとAGNジェット残骸の力学進化モデルを有機的に組み合わせ、AGNジェット残骸からの放射スペクトルの時間進化を求める。

【観測研究】

VLAアーカイブを用いて、AGNジェット残骸の各構成要素(AGNシェル、ホットスポット、コクーン)からの電波スペクトルを取得し解析する。一般に電波ローブやホットスポットが電波帯で明るいため、AGNシェルからの情報を得るのは困難である。しかし、ジェット活動の停止した電波銀河に注目すると、AGNシェルからの放射が電波からサブミリ波帯の広い波長域で卓越することが京都大学の伊藤氏(研究協力者)らの研究で示唆されている。アーカイブで不足する情報はVLAへ観測提案を行い、データの取得・解析を行う。

以上の理論研究と観測研究で得られた結果を詳細に比較することで、無衝突衝撃波を理解する上で重要となる電子温度、加速効率、磁場の乱れ具合などの物理量を定める。

3. 研究の方法

AGN ジェット研究で実績のある国内研究者で協力し、AGN ジェット残骸からの多波長、熱的・非熱的放射スペクトルの理論計算を行う。具体的には、(1)非球対称性を取り入れたAGN ジェットの力学進化計算、(2)AGN ジェット残骸からの放射スペクトル計算、(3)AGN ジェット周辺の輻射場がそのダイナミクスに与える効果の調査を行う。(1)と(2)に関しては、既の実績のある計算コードを使用する。(3)に関しては、プラズマと輻射場との相互作用を現在構築中の輻射輸送計算コードを利用する。最終的に、理論予測と観測結果との詳細な比較を行い、無衝突衝撃波の物理を理解する上で鍵となる物理量(電子温度、加速効率、磁場の乱れ具合)を決定する。

具体的な研究方法は次の通りである。AGN ジェット残骸からの多波長スペクトルから“無衝突衝撃波の物理”に迫るためには、理論と観測との詳細な比較が重要である。理論研究では、AGN ジェット残骸の力学進化と統合的に放射過程を解くことが必要不可欠である。AGN ジェット残骸の力学進化はこれまでに実績のある計算コード(Kino & Kawakatu, 2005; Kawakatu & Kino 2006; Ito et al. 2008)を必要に応じて改良しながら用いる。AGN ジェット残骸からの非熱的放射スペクトルは、最近、研究協力者の伊藤氏(京都大学)が作成したコード(Ito et al. 2011)を使用する。このコードにより、電波から GeV までの多波長スペクトルを計算することができる。また、熱的放射スペクトルに関しては、熱的電子の個数分布(マックスウェル分布)や電子温度、さらに自己吸収や逆コンプトン散乱の効果を正確に取り扱えるコードを研究代表者が中心となって作成している。

また、周辺の輻射場とプラズマとの相互作用、特に輻射抵抗による減速効果を正確に調べることは重要である。しかし、先行研究(e.g., Sikora et al. 1996)では、輻射輸送は正確に取り扱えていなかった。そこで、特殊相対論輻射流体力学コードの構築、およびそれを使って輻射流体方程式を解くことで、ジェットのローレンツ因子 ~ 10 を実現するための条件を調べる。これらはジェットのプラズマ組成とも関連することが予想され、ジェット残骸からの放射スペクトルに与える影響も明らかにする。これに関して、宇宙ジェットの専門家である宇宙研の紀氏(研究協力者)と共同で取り組む。最終的に、これらの計算コードを組み合わせ、力学進化・放射過程を有機的に結び付けたAGN ジェット残骸の理論モデルを構築し、多波長、熱的・非熱的放射スペクトルの進化の理論予想を行う。一方、観測研究では、共同研究者が既

にデータを取得している電波で明るい狭帯線セイファート銀河(Mrk1239, FBQSJ1644, 1H0323)や VLA のアーカイブデータ(3C28, 3C84, 3C295, 3C310, 3C388)を利用して、理論モデルの結果と詳細な比較を行う。そこで、AGN ジェット残骸の観測的研究の専門家である宇宙研究所の土居氏(研究協力者)とイタリアのボローニャ大学イタリアのオリエンティ氏(研究協力者)との協力のもと進めていく。

4. 研究成果

(1)AGN ジェット残骸からのスペクトル
研究目的で挙げたAGN ジェット残骸からの多波長スペクトルを計算するために、AGN ジェット残骸の力学進化モデルに非熱的放射スペクトルコードを組み合わせ、ジェットが噴出している場合だけでなく、ジェットの活動停止後のAGN ジェット残骸の進化も調べられるようにした。この作成したAGN ジェット残骸の力学進化モデルに非熱的放射スペクトルコードを用いて、ジェット活動の停止した天体で予想される多波長スペクトルを計算した。その結果、ジェット活動の停止したAGNは繭の部分より、シェルからの放射が卓越することを定量的に明らかにした。これはジェット活動の停止したAGNを探る強力なツールとなる(図1)。また暗い電波域では次世代の観測装置 Square Kilometer Array (SKA)で検出できることが分かった(Ito, Kino, Kawakatu, et al. 2015)。さらに、AGN シェルでの粒子加速や磁場増幅の素過程を明らかに擦るために、このモデルを近傍の非常に若い電波銀河 3C 84 に適応した。その結果、(i)低密度シェルの場合、逆コンプトン成分が支配的なスペクトルが予想され、Cherenkov Telescope Array (CTA)での検出が期待される。(ii)高密度シェルで磁場の増幅が起こる場合、 $\sim 10^{18}$ eV 程度の高エネルギー宇宙線の生成が予想される(Kino, Ito, Kawakatu, et al. 投稿準備中)。

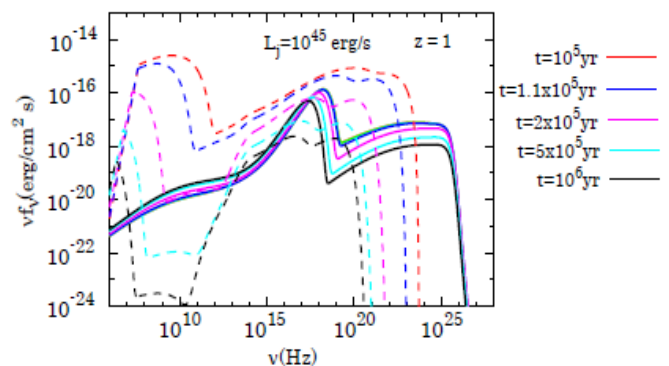
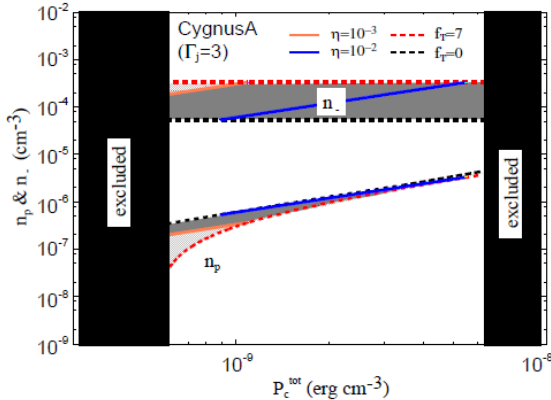


図1: 電波ローブ(点線)とAGN シェル(実線)からの多波長非熱的スペクトル。時間 t はジェット活動が停止してからの時間である。

(2)AGN ジェット組成の研究

AGN ジェット残骸の力学モデルから制限される繭の全圧と繭の状態方程式から、繭のプラズマ組成に制限する方法を考案し、ジェットパワーの既に分かっている電波銀河4天体(Cygnus A, 3C 219, 3C 223 and 3C 284)に適用した。その結果、全ての4天体に対して、電子・陽電子ペアプラズマの混在が必要不可欠であることが分かった(図2)。これはブラックホール近傍での電子・陽電子ペアプラズマ生成・消滅の問題とも密接に関係する(Kawakatu, Kino, Takahara 2016)。

図2 : CygnusA ジェットの組成への制限



ペアプラズマが卓越することを示す。

(3) 活動銀河核近傍 10pc のガスの状態

シェルからの放射を考える際にジェット周辺の環境を調べることは重要である。ターゲットとして選んだのは活動銀河核 3C84 である。この天体の中心<10 pc にある電波ローブはごく最近のブラックホールの活動でできたと考えられ、周囲の熱的なガスと相互作用しながら膨張している。ローブと周囲のガスとの運動量のつり合いを考えると、ローブに注入されたエネルギーが大きいほど、ローブの膨張速度は大きくなる。また周囲のガスの密度が高いほどローブの膨張速度は小さくなる。この関係と VLBI 観測で得られた膨張速度を比較すると、ローブに注入されたエネルギーと周囲のガス密度との間に一定の関係が得られる。その結果、ローブの周囲のガスの密度が十分低く(< 1cm⁻³) ないと、現在の 3C84 の比較的弱い活動を説明できないことがわかった。一方、他の観測から高密度なガス(> 1000cm⁻³)の存在も指摘されているので、ガスの分布は著しく非一様であり、おそらく一部は冷たいガスの円盤を形成していると考えられる。またいわゆる Bondi 降着は、観測で得られたローブの膨張速度から推定される注入エネルギーと矛盾するので、少なくともこの天体では起きていないことがわかった(Fujita, Kawakatu, et al. 2016)。

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 6 件)

Futaka Fujita, Nozomu Kawakatu,, Isaac Shlosman, 2016, AGN Jet Power, Formation of X-ray Cavities, and FR I/II Dichotomy in Galaxy Clusters, o Publications of the Astronomical Society of Japan, 68(2), 26-46 (査読有)

DOI: 10.1093/pasj/psw012

Nozomu Kawakatu, Motoki Kino, Fumio Takahara, 2016, Evidence for a significant mixture of electron/positron pairs in FR II jets constrained by cocoon dynamics, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 457(1), 1124-1136 (査読有)

DOI: 10.1093/mnras/stw010

Motoki Kino, Hirotaka Ito, Nozomu Kawakatu, Monica Orienti, Nagai Hiroshi, Wajima Kiyooki, Ito Ryosuke (2016), Fossil shell emission in dying radio loud AGNs , Astronomische Nachrichten, 337(1-2),47-52 (査読有)

DOI: 10.1002/asna.201512263

Yutaka Fujita, Nozomu Kawakatu,, Isaac Shlosman,, Hirotaka Ito, 2016, The young radio lobe of 3C 84: inferred gas properties in the central 10 pc Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 455(3), 2289-2294 (査読有)

DOI: 10.1093/mnras/stv2481

Hirotaka Ito, Motoki Kinoi, Nozomu Kawakatu, Monica Orienti, (2015) , Fate of Dead Radio-loud Active Galactic Nuclei: New Prediction of Long-lived Shell Emission, The Astrophysical Journal, 806(2), 241-250

DOI: 10.1088/0004-637X/806/2/241

Motoki Kino, Hirotaka Ito, Nozomu Kawakatu, Monica Orienti (2013), New class of very high energy -ray emitter: radio-dark mini-shells surrounding in AGN jets, The Astrophysical Journal, 764(2), 134-138 (査読有)

DOI: 10.1088/0004-637X/764/2/134

[学会発表](計 13 件)

川勝望, 和田桂一「活動銀河核の活動性と銀河核ガス円盤の幾何学構造の関係」, 日本天文学会春季年会, 首都大学東京, 2016年3月

藤田裕, 川勝望, Isaac Shlosman, 伊藤裕貴「活動銀河核 3C84 の近傍 10pc のガスの状態の推定」, 日本天文学会春季年

会, 首都大学東京, 2016年3月
白方光, 川勝望, 和田桂一, 榎基宏, 岡本崇, 長島雅裕, 「超大質量ブラックホールに付随する circum nuclear disk がブラックホール成長に与える影響についての準解析的銀河形成モデルを用いた研究」, 日本天文学会春季年会, 首都大学東京, 2016年3月
川勝望「AGNの活動性と sub-kpc の遮蔽構造について」, AGN 銀河の中心 1kpc 1pc スケールでの質量降着機構の理解に向けて, 国立天文台, 2015年12月(招待講演)
濟藤 祐理子, 美濃和 陽典, 今西 昌俊, 川口 俊宏, 諸隈 智貴, 峰崎 岳夫, 長尾 透, 大井 渚, 川勝 望, 松岡 健太, 鮫島 寛明, 「z-3 の QS09 天体で探る超巨大ブラックホールと母銀河の共進化」, 日本天文学会秋季年会, 甲南大学, 2019年3月
川勝 望, 和田桂一「超巨大ブラックホール成長と銀河核ガス円盤の関係」, 日本天文学会春季年会, 大阪大学, 2015年3月
川勝 望「超巨大ブラックホール形成はどこまで分かってきたか? : 現状と今後の課題」, 九州天文若手ゼミナール, 九州大学, 2014年7月
泉拓磨 (東京大学), 河野孝太郎 (東京大学), 川勝 望「ALMA で探る SMBH と銀河中心高密度ガス円盤の共進化」, 銀河進化研究会 2014, 国立天文台, 2014年6月
川勝 望「活動銀河核の物理」, 甲南大学宇宙物理研究室セミナー, 2013年9月
川勝 望, 紀 基樹「逆コンプトン赤外線 で探るコクーンに潜む相対論的熱的電子」, 『日本天文学会秋季年会』, 東北大学, 2013年9月
川勝 望「Physics of AGN cocoons」, 『East-Asia AGN Workshop 2013』,

Sapporo, Japan, 2013年8月
(2013.8.20-23)
白川友紀, 本多正尚, 戸田さゆり, 川勝望, (2013), 筑波大学「理数学生応援プロジェクト」と入試経路, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2013年6月
川勝 望「Exploring thermal emission from AGN jet remnants with LOFAR/SKA」, 『SKA Science Workshop in East Asia 2013』, Nagoya, Japan 2013年6月

[その他]

ホームページ等

<http://researchmap.jp/read0132583/>

アウトリーチ活動

・祝日イベント「ブラックホールの不思議」(大和ミュージアム) 呉工業高等専門学校の出前授業の一環として、小中学生向けの講演を行った。2014年2月11日

・呉工業高等専門学校 公開講座「ブラックホールについて学んでみよう!」
科学やもの作りの魅力を伝える講座の1回分として、ブラックホールについての講演を行った。小学生からご年配の方まで16名の参加があった。2015年7月11日

・一般講演「天の川に潜むブラックホールのお話」(呉工業高等専門学校)
日本宇宙少年団やまと分団の活動の一環として、小学生から中学生の団員に宇宙の魅力を伝えた。2015年12月19日

6. 研究組織

(1) 川勝 望 (KAWAKATU NOZOMU)
呉工業高等専門学校・自然科学系分野・准教授
研究者番号: 30450183