

ブラックホール天体での宇宙線加速と 高エネルギー放射

木村 成生

〈東北大学学際科学フロンティア研究所 〒981-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: shigeo@astr.tohoku.ac.jp

我々の住む宇宙には宇宙線と呼ばれる高エネルギーの粒子が存在していますが、その起源天体はまだわかっていません。宇宙線は周囲の物質と相互作用して高エネルギー宇宙ニュートリノを放射します。近年になり、高エネルギー宇宙ニュートリノの存在も明らかとなりましたが、その起源もまた謎となっています。宇宙線や高エネルギー宇宙ニュートリノの起源天体として、ブラックホールが駆動する高エネルギー天体が活発に議論されています。ブラックホールは周囲の物質を降着することで膨大な重力エネルギーを解放し、様々な高エネルギー現象を引き起こします。本記事では宇宙線加速を含むブラックホールが駆動する高エネルギー現象に関する私の研究の一部を紹介します。

1. 宇宙線と宇宙ニュートリノ

我々の住む宇宙は宇宙線と呼ばれる高エネルギーの荷電粒子で満たされていて、その大半は陽子を含む原子核です。そのエネルギー分布は 10^9 eVから 10^{20} eVの10桁以上にわたってべき型をしています。その起源天体と生成機構は発見から100年以上が経過した現在も未解明です。特に、 10^{15} eVを超えるような高エネルギー宇宙線の起源天体と生成機構についてはほとんどわかっていません。荷電粒子である宇宙線は星間磁場により簡単に進行方向を曲げられてしまうため、宇宙線の観測から起源天体を調べることは困難です。また、宇宙線の大部分を担う原子核は観測しやすい電磁波である電波・赤外線・可視光線・X線をほとんど出さないため、これらの信号から宇宙線の起源を確定させることも容易ではありません。

宇宙線は周囲の物質や輻射と相互作用することでガンマ線とニュートリノを放射します。高エネ

ルギー宇宙線が生成するようなガンマ線は銀河間空間を伝播中に宇宙赤外線背景放射や宇宙マイクロ波背景放射などの低エネルギーの光子と相互作用して吸収されてしまうため、系外天体のガンマ線の観測による高エネルギー宇宙線の起源天体の同定は困難となります。一方、宇宙線が生成する高エネルギーニュートリノは伝播中に吸収されることなく直進してくるため、高エネルギーニュートリノを放射している天体を同定することができれば、そこには高エネルギー宇宙線が存在することの確たる証拠となります。2013年、IceCube実験が高エネルギー宇宙ニュートリノの証拠を報告し [1], 高エネルギーニュートリノ天体物理学が幕を開けました。IceCube実験はその後も宇宙ニュートリノを継続して検出し続けており、高エネルギー宇宙ニュートリノの存在は確かなものとなりましたが、その起源天体は現在もわかっていません。

宇宙線や宇宙ニュートリノの起源はブラックホールや中性子星のような極限的な高密度天体で

あると考えられています。特に、ブラックホールは宇宙で最も効率良くエネルギーを解放できる天体だと考えられており、銀河系外宇宙線の起源天体としてブラックホール天体が最も活発に議論されています。ブラックホールへとガスを降着させると、その静止質量エネルギーの約10%を放射として取り出すことができます。また、降着により解放した重力エネルギーの大半を極域にある一部の物質へと受け渡すことができれば、それらの物質は細く絞られたプラズマ噴出流である相対論的ジェットとして系から放出されます。近年の磁気流体シミュレーションによると、ブラックホールの回転エネルギーを引き抜くことで、ジェットのエネルギーは降着物質の質量エネルギーと同程度となる場合があることもわかってきました [2]。恒星の中心で発生する水素燃焼反応によるエネルギー生成効率は静止質量エネルギーの0.7%程度なので、ブラックホール降着現象による放射やジェットへのエネルギー変換は圧倒的に効率が良いことがわかります。本稿では、銀河系外のブラックホール天体である活動銀河核とガンマ線バーストにおける高エネルギー現象に関する研究を紹介します。

2. ブラックホール降着流からの高エネルギー放射

私が宇宙線や高エネルギー天体現象に強い興味を持ったのは、修士2年の頃、高エネルギー宇宙物理の授業を受講した時でした。地球では実現できない極限環境における複雑な天体現象の本質を抜き出し、解析的に様々な現象を評価・計算して理解できる点が魅力的でした。また、「宇宙で最も速い荷電粒子群」が古くから観測されているのに、その起源天体も生成機構もまだ謎に包まれているということも興味深い点でした。

銀河系外の宇宙線や宇宙ニュートリノの起源天体として、ガンマ線バーストやブレーザーといった相対論的ジェットをもつ天体が主に議論されて

きています。相対論的ジェット天体は、ガンマ線帯域で非熱的な放射が観測されているため、非熱的な宇宙線電子がいることはほぼ確実です。電子が加速されているなら、陽子も同時に加速していると考えるのが自然です。しかし、ガンマ線で検出されているブレーザーやガンマ線バーストとIceCube実験が捉えている宇宙ニュートリノ信号の相関解析の結果、これらの天体は観測されているニュートリノ信号の支配的な起源ではないことがわかってきました [3, 4]。

私が宇宙線研究に興味を持ち始めた頃、降着円盤の中で磁気リコネクションや乱流により宇宙線が加速されるというシミュレーションが行われ始めました [5, 6]。この頃は降着流からの高エネルギー放射を考えた研究は少なく、理論的にありそうなのに議論されていない印象でした。そこで、これまで行っていた星・惑星形成研究から博士過程の研究テーマを「ブラックホール降着流における宇宙線」へと変更することに決めました。本節では、その頃から続けている活動銀河核の降着流からの高エネルギー放射の研究について述べます。

2.1 ブラックホール降着流の分類

ブラックホールは周囲のガスを降着させることで重力エネルギーを解放して明るく輝き、活動銀河核やX線連星として観測されます。ブラックホールへと落ち込む降着流は一般に角運動量を持っているため、直接ブラックホールへと落ち込むことはできません。したがって、ブラックホール天体が定常的に輝くためには、降着ガスから角運動量を輸送する過程が必要です。この過程として最も有望なものは円盤内で駆動される乱流です。ブラックホールのまわりを差動回転するガス円盤は磁気流体力学的に不安定であることが線形解析からわかっており（磁気回転不安定性 [7]）、この不安定性が成長することによって降着プラズマ中で乱流が発達する様子が多くの磁気流体シミュレーションで確認されています [8, 9]。

ブラックホールへの降着円盤では、ブラックホールへと落ち込むガスの量（質量降着率）によって状態が変化することが知られています（図1左）。質量降着によるエネルギー解放率（降着光度： $L_{\text{acc}} \approx \dot{M} c^2$ ）が降着円盤からの放射の明るさを決めます。降着光度がエディントン光度（ L_{Edd} ）と同程度の明るい活動銀河核の場合（ $L_{\text{acc}} = L_{\text{Edd}}$ ）、降着円盤が効率的に輻射冷却し、幾何学的に薄く光学的に厚い標準降着円盤となります [10]。標準降着円盤からの放射は紫外線にピークをもつ熱放射だと考えられますが、実際の明るい活動銀河核からはそれ以外にベキ型のX線放射も観測されています。このX線成分は、標準円盤の上空またはブラックホール近傍に存在するコロナと呼ばれる希薄な高温プラズマが放射していると考えられています。一方、降着光度がエディントン光度より十分に小さい低光度活動銀河核（ $L_{\text{acc}} \ll L_{\text{Edd}}$ ）では、降着ガスは輻射による冷却が非効率となって、標準降着円盤が形成されない代わりに幾何学的に厚く光学的に薄い高温降着流が形成されると考えられています [11]。低光度活動銀河核からは紫外線に対するX線の強度が比較的強くなっており、標準円盤が存在しないこ

と無矛盾です [12]。

2.2 ブラックホール降着流での宇宙線加速

硬X線の観測から、高温降着流や高温コロナでは電子温度は10億度から100億度程度の超高温となっていることがわかっています。また、ベキ型の放射を作るためには、これらの降着プラズマは密度が小さく光学的に薄い必要があります。このような高温で希薄なプラズマではクーロン散乱による熱化が非効率で、陽子の温度と電子の温度が異なる2温度プラズマとなります。また、クーロン散乱が非効率なため、陽子のエネルギー分布は熱的なマクスウェル分布から外れ、非熱的な分布を持つことが可能となります。一方、活動銀河核の降着流で電子が非熱的に加速されるかどうかは自明ではありません。高温降着流中の相対論的な温度を持つ熱的電子はシンクロトロン自己吸収による熱化が効率的です。高温コロナでは比較的電子温度が低く密度が高いため、クーロン散乱による熱化が効率的となります。

陽子に対してクーロン散乱が効かない高温降着流などの無衝突プラズマ中でも磁気回転不安定性は発達することが示されており [5, 13]、高温降着流も磁気乱流が発達しているの考えるのが自然

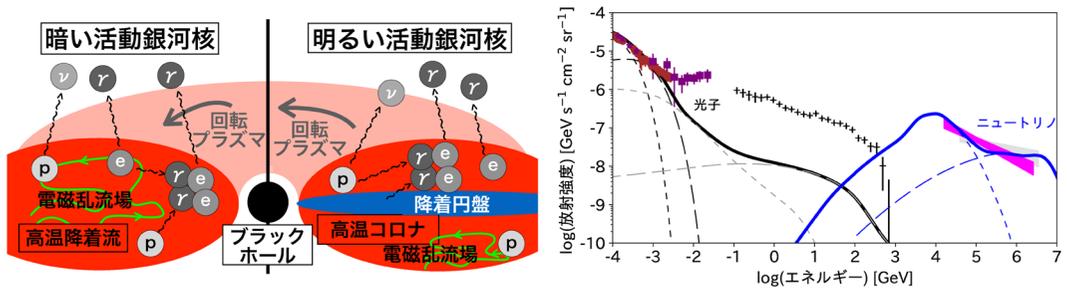


図1 左図：2種類の降着円盤構造の概念図。左側は高温降着流をもつ低光度活動銀河核、右側が標準円盤と高温コロナをもつ明るい活動銀河核。高温降着流や高温コロナでは宇宙線が加速され、周囲の光子や陽子と相互作用してガンマ線やニュートリノを放射します。右図：ブラックホール降着流からの宇宙高エネルギー光子背景放射（黒線）と高エネルギーニュートリノ背景放射（青線）。点線は低光度活動銀河核からの寄与、破線は明るい活動銀河核からの寄与を表します。黒細線は熱的光子による放射、灰色細線は電磁カスケード放射を表します。データ点は様々なガンマ線観測衛星によるデータ、色付き領域はIceCube実験の観測結果を表します。0.01 GeVから 10^3 GeVのガンマ線背景放射には他の天体の寄与が必要となります。右図は文献 [17] から修正して転載。

です。磁気乱流が発達して磁場が強い領域ができると、増幅された磁場は磁気リコネクションによってエネルギーを散逸します。いくつかのグループが高温降着流中の無衝突プラズマを模擬したプラズマシミュレーションを行い、高温降着流内部では磁気リコネクションによって非熱的な宇宙線が加速されることが示されています [5, 14].

上記のシミュレーションで確認されたのは低エネルギーの宇宙線であり、高エネルギー宇宙ニュートリノを生成するには宇宙線をさらに加速する必要があります。降着流内部では、Fermi 二次加速と呼ばれる過程が効率的であると考えられます [15]. 磁化したプラズマ中を漂う宇宙線粒子は磁場の周りをジャイロ運動します。そのジャイロ半径は高エネルギーの宇宙線ほど大きくなります。プラズマ中の磁場が乱れている時、宇宙線はジャイロ半径と同程度のスケールの揺らぎや磁気流体波と相互作用します。宇宙線は磁気流体波の静止系で等方に散乱されるため、磁気流体波に追突するとエネルギーを減らし、磁気流体波と正面衝突するとエネルギーを増やします。そのため、個々の宇宙線粒子はランダムにエネルギーを増減させ、宇宙線粒子のエネルギー分布関数はエネルギー空間で拡散します。その結果、一部の幸運な粒子は高エネルギーへ加速されていきます。降着流内部で生じるこの過程は、次の章で述べるように数値シミュレーションによっても確かめられています。

降着流内部で加速された宇宙線は様々な効果によりエネルギーを失ったり系から逃走したりします。冷却過程として、熱的陽子との非弾性散乱によるパイ中間子生成 ($p+p \rightarrow p+p+\pi$ または $p+p \rightarrow p+n+\pi$), 光子との相互作用によるパイ中間子生成 ($p+\gamma \rightarrow p+\pi^0$ または $p+\gamma \rightarrow n+\pi^+$), 光子との相互作用による電子・陽電子対生成 ($p+\gamma \rightarrow p+e^++e^-$), 陽子シンクロトン放射の4つの過程が考えられます。降着流はコンパクト

な領域なため、光子密度も陽子密度も他の宇宙空間や宇宙線生成領域と比べて高く、陽子の冷却効率が比較的良い系です。また、高温降着流やコロナは幾何学的に厚く、ブラックホールへの落下速度が速いと考えられています [16]. そのため、ブラックホールへの落下による系からの逃走を考慮に入れる必要があります。

我々は上記の効果をすべて考慮に入れて、低光度活動銀河核の高温降着流内部とセイファート銀河の高温コロナでの乱流加速現象を定式化し、活動銀河核の降着流における宇宙線加速を準解析的に計算しました。低光度活動銀河核では観測データが乏しいため、高温降着流内部での物理量の見積もりは理論ベースで進めます。降着流に関連する不定のパラメータは近傍の低光度活動銀河核のX線の観測データを元に校正しました。その結果、典型的な高温降着流では、光子や陽子の密度がそこまで高くないため宇宙線の最高エネルギーは落下による逃走で決まり、典型的には宇宙線は $10^{15} - 10^{16}$ eV 程度まで加速されることがわかりました [17, 18, 19].

一方、明るいセイファート銀河などの活動銀河核では十分な量の観測データがあるため、様々な波長帯で観測的な相関関係が得られています。これらの経験的相関関係と多重コンプトン散乱がX線の光子指数を決めていると考え、X線の光度を与えると様々な物理量を導くことができるモデルを構築しました。高温コロナでは標準円盤からの紫外線光子の密度が高く、宇宙線の最大エネルギーは紫外線と宇宙線の相互作用で電子・陽電子対を生成する過程で決まり、典型的には 10^{14} eV 程度となることがわかりました [20, 21]. 明るい活動銀河核の方が低光度活動銀河核に比べて宇宙線の最大エネルギーが小さいというのは直感に反するようですが、明るい天体では光子の密度が大きくなるので、より低いエネルギーの陽子に対しても光子と陽子の相互作用による冷却が効き、宇宙線陽子の最大エネルギーが小さくなります。

2.3 ブラックホール降着流からの高エネルギー放射

宇宙線と陽子や光子との相互作用で生成された荷電パイ中間子はミューオンとニュートリノに崩壊し、ミューオンはさらに2つのニュートリノと電子または陽電子へと崩壊します ($\pi^{\pm} \rightarrow 3\nu + e^{\pm}$). 一方、中性パイ中間子は2つの光子へと崩壊します ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$). 宇宙線と物質や光子の相互作用では π^0 と π^{\pm} の生成量はほぼ同じであるため、天体からはほぼ同量の高エネルギーニュートリノと高エネルギーガンマ線が放射されることとなります。

この性質から、宇宙ニュートリノの起源天体に対して制限をつけることができます。IceCube実験が検出している宇宙ニュートリノ背景放射のスペクトルは低エネルギー側で強度が強くなっていて、 10^{13} eV 付近のニュートリノ強度はフェルミ衛星が検出している 10^{11} eV 程度の宇宙ガンマ線背景放射の強度よりも大きくなっています。宇宙論的な距離で生成されたガンマ線は銀河間空間を伝播中に系外銀河が放射する宇宙赤外線背景放射や宇宙マイクロ波背景放射と相互作用して、より低いエネルギーのガンマ線として地球に飛来します。もし宇宙ニュートリノ背景放射の起源天体から中性パイ中間子の崩壊でできたガンマ線が同時に放射されていると、 10^{11} eV 付近のガンマ線背景放射を過剰に作ってしまうことになり、そのような理論モデルはガンマ線観測データと矛盾してしまいます。この問題を避けるためには、宇宙ニュートリノ背景放射の起源天体はガンマ線に対して光学的に厚くなっている必要があります。例えば、低エネルギーの光子が豊富にあり、光子同士の相互作用 ($\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$) によって 10^{10} eV 以上の高エネルギー光子を吸収するような天体が宇宙ニュートリノ背景放射の起源となるべきです。このように、ガンマ線が出てこないニュートリノ源は「隠されたニュートリノ源」と呼ばれています [22].

我々は前節で求めた宇宙線分布と背景の光子・陽子分布を用いて高温降着流とコロナからのニュートリノ放射を計算しました。ニュートリノのエネルギーは宇宙線陽子の5%程度となるため、典型的な高温コロナでは 10^{13} eV 程度、高温降着流では 10^{15} eV 程度のニュートリノが放射されます。様々な光度の天体でのニュートリノ放射を計算し、X線や輝線の観測から得られている活動銀河核の光度関数を用いて宇宙全体のニュートリノ総量を求め、宇宙ニュートリノ背景放射への活動銀河核の寄与を計算した結果、活動銀河核の降着流は観測されている宇宙ニュートリノ背景放射のすべてを説明できることがわかりました (図1右) [17, 18, 20].

ニュートリノと同時に放射されるガンマ線は、背景の光子場と相互作用して電子・陽電子対を生成します。これらの電子・陽電子対がさらにガンマ線を放射し、電磁カスケードが発生します。我々は電子・陽電子対とガンマ線の輸送方程式を一樣近似の枠組みの元で定式化し、降着流から逃走してくるガンマ線スペクトルも計算しました。明るい活動銀河核の高温コロナで生成される高エネルギーのガンマ線は完全に吸収され、フェルミ衛星が検出しているエネルギー帯域のガンマ線は出てくることはできません。したがって、高温コロナは「隠されたニュートリノ源」となります。低光度活動銀河核の高温降着流でも多くの場合には 10^{11} eV の光子は隠されるため、宇宙ニュートリノ背景放射と矛盾することはありません (図1右)。活動銀河核の降着流は、宇宙ガンマ線背景放射と矛盾することなく宇宙ニュートリノ背景放射の起源となれます。

我々のシナリオに基づく、ニュートリノ信号の強度は大まかにX線光度と比例します。我々は近傍のセイファート銀河や低光度活動銀河核をX線光度で明るい順に並べ、今後の観測・実験で活動銀河核降着流からのニュートリノが検出可能か調べました。その結果、次世代のニュートリノ検

出器 (KM3NeT, IceCube-Gen2) によって近傍のセイファート銀河からのニュートリノ信号を高い確度で検出することができることがわかりました [21]. したがって、将来のニュートリノ観測によってこのシナリオは手堅く検証できます. 低光度活動銀河核からのニュートリノはセイファート銀河よりも弱いですが、IceCube-Gen2があれば3から4ニュートリノ事象を近傍の天体の方向から検出できる可能性があります [17, 19].

加えて、低光度活動銀河核の高温降着流にいる熱的電子が出す放射が、宇宙MeVガンマ線背景放射の起源となり得ることも明らかとなりました (図1右) [17]. 高温降着流中の熱的電子は相対論的な温度になっていて、シンクロトロン放射によってミリ波を放射します. 質量降着率が比較的高い高温降着流では、シンクロトロン光子を熱的電子が何度もコンプトン散乱によって叩き上げるコンプトン化過程が効率的に発生し、ミリ波からガンマ線帯域までハードなべき型の光子分布を作り出します. このコンプトン化で生成された光子の最大エネルギーは電子温度に対応しています. シンクロトロン放射もコンプトン化も放射効率が温度の非常に急峻な関数となっているため、電子温度は降着流の不定なパラメータや物理量にほぼ依存せず約100億度に保たれます. この温度に対応するコンプトン化された光子の最高エネルギーは 10^6 eV程度となります. これは明るい活動銀河核の高温コロナのカットオフエネルギーよりも1桁程度高くなっていて、起源の不明であった宇宙MeVガンマ線背景放射を自然に説明できます. 過去の研究では宇宙MeVガンマ線背景放射は非熱的粒子からの放射で説明する理論がほとんどでしたが、今回のシナリオでは熱的な電子がMeVガンマ線を放射します. 熱的な宇宙から非熱的な宇宙へと遷移しているエネルギーは、これまで考えられていたよりも高いのかもしれませんが.

2022年、IceCube実験は近傍のセイファート銀河NGC1068からニュートリノ信号が来ている強

い証拠を見つけました [23]. 太陽の次に見つかった2番目の定常宇宙ニュートリノ源となります. NGC1068からのニュートリノ信号強度はガンマ線強度と比べて1桁以上高く、「隠されたニュートリノ源」です. したがって、コンパクトな放射領域が必要で、星形成領域や広がった電波ジェットはニュートリノの発生源にはなれません [24]. この天体は降着率が高いため、標準円盤と高温コロナからなる系と思われます. 我々の高温コロナモデルをこの天体に適用した結果、NGC1068からのニュートリノ信号はコロナモデルの枠組みで説明可能であることがわかりました. このシナリオに基づく、NGC1068はIceCube実験で最初に検出されるべきニュートリノ源と予言されます. これは、IceCubeが北天 (declination $\delta > -5$ deg) に感度があり、NGC1068はダストトラスによる吸収を補正したX線強度が北天で最も明るい天体だからです. したがって、高温コロナがニュートリノ放射領域の最有力候補と言えるでしょう. 他のモデルとして、降着衝撃波 [25] や円盤風 [26] が議論されています.

3. ブラックホール降着流での宇宙線加速シミュレーション

私は博士過程の頃に前節のような現象論的な研究の一部を行い、その結果を様々な研究会で講演してきました. 当時は「非標準的な宇宙線加速を考える必要があるモデルだ」、「パラメータが多すぎて何でも言えそうだ」という批判的なコメントが多くきました. 最近では、ブラックホールの影の撮像 [27] やNGC1068からのニュートリノ信号 [23] などから、降着流における非熱的現象というテーマに対する批判的なコメントは少なくなりましたが、当時はこの現象はあまり認知されていなかったように思います. 上記の批判に対して反論するには、自分で数値シミュレーションを行って降着流で宇宙線加速が起こるということを実証した上で普及していくべきだと考えました. そこ

で、ポスドク1年目の頃から降着流での宇宙線加速シミュレーションを始めました。

宇宙線粒子加速シミュレーションでは、Particle-In-Cell (PIC) という手法が主に用いられます。この手法では、熱的粒子を含めたすべてのプラズマ粒子の軌道運動を解くため、計算コストが非常に大きく、天体スケール全体を取り扱うことは不可能です。一方、粒子を粗視化して流体として取り扱う磁気流体シミュレーションでは、天体スケールの乱流場を難なく取り扱うことができます。そこで、我々は磁気流体シミュレーションにより得られた天体スケールの乱流場中で宇宙線粒子の軌道を計算することで降着流内部での宇宙線加速過程を調べました。この手法では、宇宙線はすでに高エネルギーまで加速されていると仮定して計算を始めます。それにより、大スケールの乱流場と宇宙線粒子の相互作用を追うことができるようになり、降着流で実現する宇宙線の最高エネルギーを見積もることが可能になると考えました。

まず、我々はshearing boxという局所近似を用いた計算手法 [28] で降着流内部の乱流場を計算しました [29]。弱い縦磁場に貫かれた円盤のごく一部を切り出したような計算領域を用意し、電磁場の時間発展を計算します。磁気回転不安定性により乱流場が発達し、速度勾配により方位角方

向の磁場が増幅されます。その中で多数の宇宙線粒子の軌道を計算した結果、宇宙線のエネルギー分布の時間進化はエネルギー空間における拡散現象として記述できることを明らかにしました。この計算からは、高エネルギーの宇宙線加速現象には速度シアが大きな役割を果たしているという示唆が得られました。実空間の運動も拡散でよく記述できますが、方位角方向とその垂直方向で拡散係数が異なる非等方拡散であることもわかりました。これらの結果は、同様の手法を用いた最近の研究でも確認されています [30]。

しかし、高温降着流は幾何学的に分厚く移流も速いため、shearing box近似はあまり良い近似ではないと考えられます。そこで、我々は大域的な磁気流体シミュレーションを用いて同様の計算を行い、より現実的な乱流場中で宇宙線加速過程を調べました [9]。大域的な磁気流体シミュレーションでは、ブラックホールから離れた場所に力学平衡の回転するトーラスを用意し、その中に弱い磁場を埋め込んで計算を始めます。するとトーラス中で磁気回転不安定性によって磁場が増幅され、乱流が発達して角運動量が輸送され、ブラックホールへとガスが落ちていきます。降着流内部の磁場構造は乱流状態となっており (図2左)、平均的な磁気圧はガス圧と比べて10%程度まで増幅されます。磁場は作動回転によって引き伸ば

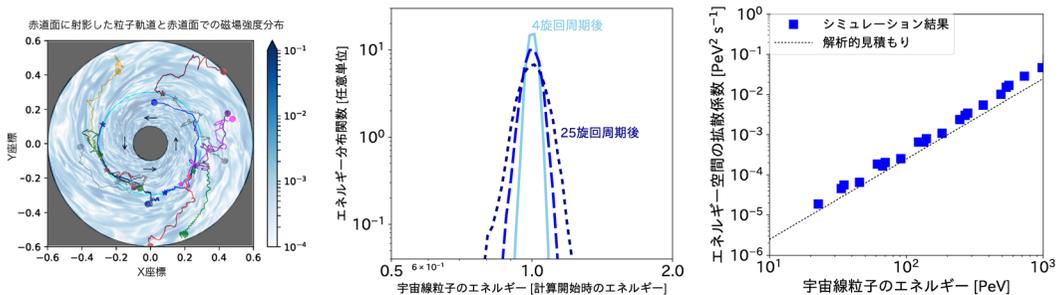


図2 左図：降着流の赤道面での磁場強度分布 (color contour) と典型的な宇宙線粒子軌道の赤道面への射影 (実線)。星は宇宙線粒子の初期位置、丸印が計算終了時の位置を表します。中図：宇宙線のエネルギー分布の時間進化。右図：シミュレーションの結果得られたエネルギー空間での拡散係数のエネルギー依存性。点がシミュレーション結果、点線が解析的見積もりを示しています。中図と右図は文献 [9] から修正して転載。

されるため、方位角方向の磁場成分が卓越していて、その他の方向の磁場成分より3から4倍程度強くくなっています。

上記の計算で得られた磁気乱流データを用いて多数の宇宙線粒子の軌道計算を行った結果、降着流内部での宇宙線加速現象はやはりエネルギー空間での拡散現象で表せることを確認しました(図2中)。エネルギー空間の拡散係数のパラメータ依存性から、今回の計算では宇宙線粒子は最も大きなスケールの波と相互作用していることも明らかとなりました(図2右)。大局的な計算では速度シアによる加速は重要でないこともわかりました。これは、速度シアが重要となるジャイロ半径の大きな宇宙線粒子はすぐに降着流から逃走してしまうためです。また、宇宙線粒子の実空間での運動を調べたところ、宇宙線粒子は方位角方向に運動する傾向にあることがわかりました(図2左)。これは差動回転により方位角方向へと磁場が引き伸ばされており、宇宙線粒子はその磁場に沿った方向へと運動するからです。今回のシミュレーションでは、大多数の宇宙線粒子はブラックホールへと落ち込むことなく、動径方向外側へと逃走していくことも判明しました。これは内側の方が磁場が強いため、宇宙線粒子が内側へと運動しようとする磁気ミラー効果により反射され、外側へと運動の向きを変えるからだと考えています。

これらの計算から、高温降着流での宇宙線加速を明らかにするには、大域的なシミュレーションが必要であることがわかります。しかし、大域的なシミュレーションに必要な解像度を実現するのは簡単ではありません。電磁場のパワースペクトルを計算した結果、今回のシミュレーションでは初期に注入した宇宙線粒子のジャイロ半径程度の波は数値拡散の影響を強く受けていたことがわかりました。現実的な磁気流体波と宇宙線粒子の相互作用を取り入れるには、より高解像度かつ高精度の数値シミュレーションを行う必要があります。

す。また、宇宙線粒子の実空間での変位の分散を調べたところ、通常の拡散よりも早く変位の分散が大きくなる超拡散現象が見られました。局所近似の計算とは定性的な性質から変わってしまっていますが、その原因についてもよくわかっていません。今後、さらなる研究が必要です。

4. ブラックホールジェットからの高エネルギー放射

自分がポスドク研究員になってしばらくした頃、LIGO実験が連星ブラックホールからの重力波事象を検出しました [32]。これを契機に重力波天体からの電磁波やニュートリノ放射の研究も始めました。2017年3月に参加した研究会で、重力波とニュートリノの同時検出は可能なのか議論になっていました。そこで、我々は中性子星を含む高密度星連星合体事象が短いガンマ線バーストの起源だとした場合、それに付随する残光からの高エネルギーニュートリノ事象が重力波と同時に検出可能なのかを見積もることにしました。

観測されている短いガンマ線バーストの光度曲線には、1秒程度の軟ガンマ線帯域で明るい即時放射成分に続いて、100秒程度の長期放射成分、1万秒程度のプラトー放射成分などが存在します(図3左)。長期放射やプラトー放射は標準的なガンマ線バーストの前進衝撃波による残光モデルでは説明がつかず、中心エンジンが予想よりも長期間活動してジェットを射出している傍証となっています(図3中)。我々は、これらの長期活動時に放射されるジェットからのニュートリノ強度を計算し、長期ジェットに付随するニュートリノ強度の方が即時放射のニュートリノ強度よりも強いことを示しました(図3右)。楽観的な場合には、現状のニュートリノと重力波の検出器群を10年程度運用すると60%以上という高い確率でニュートリノと重力波の同時検出の可能性があることを示しました [31]。将来の検出器IceCube-Gen2の時代には95%以上の確率で検出可能と予想され

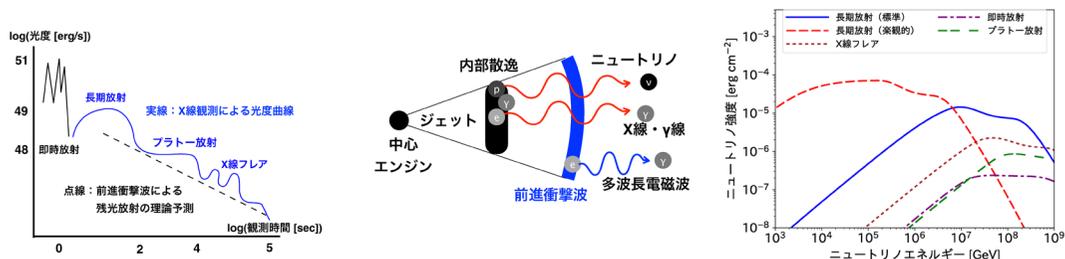


図3 左図：短いガンマ線バーストの光度曲線の概略図。中図：短いガンマ線バーストの中心エンジンの長期活動の概念図。即時放射のあと100秒から1万秒に渡って中心エンジンが活動し、即時放射のジェットが作る前進衝撃波からの放射に加えて長期放射などの成分を作ります。右図：距離300 Mpcで発生する短いガンマ線バーストからのニュートリノ信号のスペクトル。右図は文献 [31] から修正して転載。

るため、ニュートリノが未検出であった場合には謎の多い長期活動ジェットのパラメータに強い制限をつけることも可能となります。

非常に幸運なことに、この計算が終わった頃に連星中性子星合体事象からの重力波検出の噂が流れ、この結果をまとめた論文は投稿後わずか1週間ほどで受理されました。2017年8月のことです。その後、2017年10月には史上初の連星中性子星合体事象からの重力波の検出 (GW170817) と多波長 (電波, 可視赤外, X線, 軟ガンマ線) での電磁波対応天体を観測したという報告があり [33], お祭り騒ぎとなりました。タイミングよくGW170817が発生してくれたおかげで、多くの国際研究会に招待され、AAS Novaでも記事になりました。GW170817の検出がなければ、この論文はここまでの注目を集めなかったことでしょう。

5. おわりに

ここまで、ブラックホール天体からの高エネルギー放射の研究を紹介してきました。近傍のニュートリノ天体として電波で暗い活動銀河核が同定されており、ブラックホール降着流はIce-Cube実験が検出している宇宙ニュートリノの有力な起源と考えられています。そこでの宇宙線加速現象の詳細はまだよくわかっておらず、数値シミュレーションを用いた更なる研究が必要です。また、短いガンマ線バーストはニュートリノと重

力波と電磁波というすべてのメッセンジャーを使って観測できる可能性があり、同時検出が実現すればブラックホールが駆動するジェットの物理の解明に向けて大きく前進できるでしょう。

振り返ってみると、私がブラックホール天体での高エネルギー現象の研究を始めてから、多くの歴史的発見や天体現象が起っています。本稿で触れたものだけでも、高エネルギー宇宙ニュートリノの検出 [1], 近傍のニュートリノ放射天体の同定 [23], 連星ブラックホールからの重力波の検出 [32], 重力波と電磁波対応天体の検出 [33], ブラックホールの影の撮像 [27] などがあります。触れなかったものも入れるときがありません。今後も大型の実験・観測計画が実現して新たな発見が続くと期待できるので、理論研究を通じて高エネルギー現象や宇宙線の起源の探求を続け、微力ながら業界の発展に貢献していきたいと思います。

謝辞

この度は研究奨励賞という荣誉ある賞をいただき光栄に思います。研究の基礎を教えてくださいました釣部通さん、天体高エネルギー現象の世界へ導き多くの活発な議論をしてくださった当真賢二さん、村瀬孔大さん、シミュレーション研究へと誘ってくださった犬塚修一郎さん、鈴木建さん、富田賢吾さんに深く感謝します。また、学生時代

の指導教員である長峯健太郎さん、現在のメンターである田中雅臣さんにも進路や考え方など多くの助言をいただきました。その他にも多くの共同研究者や友人に恵まれました。この場を借りて感謝を申し上げます。数値計算には国立天文台 CfCA のアテルイ II を使用しました。

最後に、学生時代に多くのことを学ばせてくださった高原文郎さんに深く感謝します。彼の宇宙線加速過程や降着現象に関する授業がなければ、私はブラックホール降着や宇宙線の研究をしていなかったことでしょう。退官後も研究室に頻繁に来て研究指導をしていただきました。彼の早すぎるご逝去は残念でなりません。ご冥福をお祈りいたします。

参考文献

- [1] Aartsen, M. G., et al., 2013, Phys. Rev. Lett., 111, 021103
- [2] Tchekhovskoy, A., et al., 2011, MNRAS, 418, L79
- [3] Aartsen, M. G., et al., 2017, ApJ, 843, 112
- [4] Aartsen, M. G., et al., 2017, ApJ, 835, 45
- [5] Hoshino, M., 2013, ApJ, 773, 118
- [6] Lynn, J. W., et al., 2014, ApJ, 791, 71
- [7] Balbus, S. A., & Hawley, J. F., 1998, Rev. Mod. Phys., 70, 1
- [8] Machida, M., & Matsumoto, R., 2003, ApJ, 585, 429
- [9] Kimura, S. S., et al., 2019a, MNRAS, 485, 163
- [10] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A., 1973, A&A, 24, 337
- [11] Yuan, F., & Narayan, R., 2014, ARA&A, 52, 529
- [12] Ho, L. C., 2008, ARA&A, 46, 475
- [13] Kimura, S. S., et al., 2021, Nat. Commun., 12, 5615
- [14] Quataert, E., et al., 2002, ApJ, 577, 524
- [15] Bacchini, F., et al., 2022, ApJ, 938, 86
- [16] Stawarz, Ł., & Petrosian, V., 2008, ApJ, 681, 1725
- [17] Narayan, R., & Yi, I., 1994, ApJ, 428, L13
- [18] Kimura, S. S., et al., 2015, ApJ, 806, 159
- [19] Kimura, S. S., et al., 2019, Phys. Rev. D, 100, 083014
- [20] Murase, K., et al., 2020, Phys. Rev. Lett., 125, 011101
- [21] Kheirandish, A., et al., 2021, ApJ, 922, 45
- [22] Murase, K., et al., 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 071101
- [23] IceCube Collaboration, 2022, Science, 378, 538
- [24] Murase, K., 2022, ApJ, 941, L17
- [25] Inoue, Y., et al., 2020, ApJ, 891, L33
- [26] Inoue, S., et al., 2022, arXiv:2207.02097
- [27] Event Horizon Telescope Collaboration, 2019, ApJ, 875, L1
- [28] Hawley, J. F., et al., 1995, ApJ, 440, 742
- [29] Kimura, S. S., et al., 2016, ApJ, 822, 88
- [30] Sun, X., & Bai, X.-N., 2021, MNRAS, 506, 1128
- [31] Kimura, S. S., et al., 2017, ApJ, 848, L4
- [32] Abbott, B. P., et al., 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 061102
- [33] Abbott, B. P., et al., 2017, ApJ, 848, L12

High-Energy Phenomena Powered by Black Holes

Shigeo S. KIMURA

Frontier Research Institute of Interdisciplinary Sciences Tohoku University, 6-3 Aramaki, Aza-Aoba, Aoba, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan

Abstract: Our Universe is filled with high-energy charged particles, called cosmic rays, whose origin has been mystery for a long time. Cosmic rays can produce high-energy neutrinos *via* interaction with ambient matter. Recently, cosmic high-energy neutrinos are also discovered, but their origins are still unknown. High-energy phenomena caused by black holes are actively discussed as the origin of cosmic rays and neutrinos. In this article, I will review my work on high-energy phenomena powered by black holes.