

超巨大ブラックホール近傍から 放射される高エネルギー粒子

木村 成生

Kimura Shigeo S.

1. 宇宙線と宇宙 γ線・ニュートリノ背景放射

私たちの住む宇宙は宇宙線と呼ばれるほぼ光速で 飛び交う荷電粒子で満たされており,その主要成分 は陽子を含む原子核である。地球に飛来する宇宙線 は1GeV(GeV=10⁹電子ボルト)から10¹¹GeV付 近まで10桁以上にわたってべき関数型(x^αの形) のエネルギー分布をしている。宇宙には非常に効率 良く荷電粒子を加速している天体があることは間違 いない。しかし,その起源天体と粒子の加速機構は 発見から100年以上が経過した現在も未解明の問題 となっている¹¹。

宇宙線は宇宙に存在する磁場によって曲げられて しまうため、宇宙線の観測から起源天体を同定する ことは困難である。宇宙線は周囲の物質と相互作用 してγ線やニュートリノといった電荷を持たない粒 子を生成するため、γ線やニュートリノの起源天体 を同定することで宇宙線の起源天体へと迫ることが できる。宇宙はγ線やニュートリノでも満たされて おり、現在の検出器では個々に分解できない遠方の 天体からの寄与が重ね合わさった宇宙背景放射とし て観測されている。γ線は10⁻³GeVから10³GeV程度, ニュートリノは 10⁴ GeV から 10⁷ GeV 程度のエネル ギー帯域で宇宙背景放射が検出されている²⁻⁴⁾。 0.1 GeV から 10³ GeV のγ線の主な起源はブラック ホールから噴出している相対論的なプラズマ流と爆 発的に星を形成している銀河であると考えられてい るが⁵⁾. その他の帯域の宇宙γ線背景放射と宇宙 ニュートリノ背景放射の起源は分かっていない。筆 者らの研究グループは、10⁻³GeVの宇宙γ線背景放 射と宇宙ニュートリノ背景放射の起源として,超巨 大ブラックホール周囲の高温プラズマを提案してい る⁶⁾。以降の章でこのシナリオについて紹介する。

2. 活動銀河核とブラックホール降着流

天の川銀河を含むほぼすべての銀河の中心部に は、太陽の100万倍から100億倍程度の質量を持っ た超巨大ブラックホールが存在していると考えられ ている⁷⁾。超巨大ブラックホールの存在は、天の川 銀河中心部の恒星の運動を精密観測することで確認 されている^{8,9)}。2019年には近傍の巨大銀河 M87 の 中心部の電波撮像によってブラックホールの影が捉 えられた¹⁰⁾。これにより超巨大ブラックホールの 存在はより強固なものとなり、2020年のノーベル 物理学賞は、ブラックホールの存在を理論的に示し た Penrose 氏と観測的に初めて超巨大ブラックホー ルの存在を示した Genzel 氏と Ghez 氏に与えられた。

超大質量ブラックホールへと星間物質が落ち込む と、膨大な重力エネルギーを解放して落ち込んだ物 質は加熱され、高温のプラズマ状態となる。これは 例えるなら高い位置から水を落下させることで発電 する水力発電のようである。ブラックホールへと落 ち込むプラズマ流のことを降着流と呼ぶ。降着流で は解放した重力エネルギーは主に陽子が受け取ると 考えられる。ブラックホールへと落ち込む物質の量 が多い時には、降着流内部で電子と陽子が十分に衝 突するため、解放した重力エネルギーが電子へと受 け渡される。電子は効率的に電磁波を放射して冷却 するため、解放した重力エネルギーは効率的に電磁



図1 高温降着流の概念図

高温プラズマ中の陽子は乱流電磁場により加速され、周囲の物質と相互 作用してニュートリノを放射する。電子は超高温に加熱され、電波から Y線にわたる多波長の電磁波を放射する

波へと変換され,銀河の中心部が非常に明るく輝く 活動銀河核として観測される。活動銀河核の降着流 の典型的な温度は10万℃程度である¹¹⁾。

一方. ブラックホールへと落ち込む物質の量が少 ない時,降着流で陽子と電子の衝突が十分起こらず, 陽子から電子へとエネルギーが輸送される前にプラ ズマがブラックホールへと落ち込んでしまう。この 場合,ブラックホール近傍では陽子の温度は1兆℃ に達する。このような降着流を高温降着流と呼ぶ¹¹⁾。 高温降着流中の電子は加熱された陽子との衝突に よって少量のエネルギーを受け取り、100億℃程度 まで加熱されると考えられている。このような高温 の電子からは次節で述べるように様々な波長帯の電 磁波が放射され、暗い活動銀河核(低光度活動銀河 核)として観測される(図1)。太陽系が存在する 天の川銀河の中心部のブラックホールに落ち込む物 質量は少なく、ブラックホール周囲には高温降着流 が存在すると信じられている¹¹⁾。高温降着流の内 部では陽子同士の衝突も非効率であり、プラズマ中 の粒子は温度で決められた典型的なエネルギーより もはるかに大きなエネルギーを持つことが可能とな る。つまり、非熱的な宇宙線が生成されることとな る。宇宙線陽子は周囲の熱的陽子又は光子と相互作 用してニュートリノを生成する(図1)。

高温降着流のような粒子同士の衝突が非効率なプ ラズマを無衝突プラズマという。無衝突プラズマは 地上の実験室では実現が困難な物理状態にあるが, 宇宙ではしばしば見られる。X線, γ線, ニュート リノといった高エネルギー信号は, そのような極限 環境下で発生する物理現象を調べる重要な道具であ り,理論モデルと観測データを比較することでブ ラックホール周囲の状況を推測することができる。 次節では高温降着流から放射されるγ線とニュート リノを詳述する。

3. 高温降着流からのγ線・ニュートリノ放射

高温降着流では電子が相対論的な温度. つまり熱 運動の速度がほぼ光速となるまで加熱される。銀河 中の星間物質は磁化しているため、降着流も磁化し ていると考えるのが自然である。磁化した回転プラ ズマは磁気流体力学的に不安定な状態にあり、降着 流の磁気エネルギー密度はガスのエネルギー密度と 同程度となるまで磁場が増幅される¹¹⁾。すると、相 対論的な温度の電子はシンクロトロン放射過程で効 率的に電波を放射する。この電波は高温降着流中の 熱的電子と相互作用し.熱的電子からエネルギーを 受け取って高エネルギーの光子となる。典型的には 1回の散乱で光子のエネルギーは10から100倍にな る。一部の光子は何度も熱的電子に散乱されてから 外部へと放射される。この過程をコンプトン化とい う。電子の冷却過程であるシンクロトロン放射もコ ンプトン化過程も温度に強く依存する過程であり, 高温のものほど急激に冷却が効く。また、どちらも 相対論的な効果が重要であり、非相対論的な温度の 場合には冷却効率が悪い。そのため、高温降着流の 熱的電子の熱運動のエネルギーは電子の静止質量エ ネルギー程度、つまり 10⁻³GeV 程度に保たれる。こ のエネルギーに対応する温度は約100億℃である。 降着流から逃走するγ線の典型的なエネルギーは電 子の運動エネルギーと同程度の10⁻³GeV程度となる。 したがって, 高温降着流からは効率的に 10⁻³ GeV 程 度のγ線が放射されることになる。筆者らは高温降 着流から放射される光子のエネルギースペクトルを 前記の過程を定式化することで数値的に計算し、天 の川銀河近傍の低光度活動銀河核の X 線観測データ を再現できることを示した(図2)。熱的電子から放 射される光子のスペクトルはコンプトン化過程に よって 10⁻³ GeV 付近まで伸びるべき関数型となって おり,近傍の低光度活動銀河核からのγ線は将来の

γ線観測衛星によって検出可能である(図2)。

高温降着流の内部では宇宙線陽子が加速されると 考えられている。降着流の内部はプラズマ不安定性 によって乱流状態となっており,強く磁化したプラ ズマ中で乱流が存在すると,その乱流場と宇宙線粒 子が相互作用し,宇宙線粒子がランダムにエネル ギーを増減させる¹²⁾。その結果,一部の幸運な粒 子は加速され続け,非常に高エネルギーの粒子とな りうる。これを乱流加速過程と呼ぶ。筆者らは高温 降着流での乱流加速過程を定式化し,数値的に高温



図2 低光度活動銀河核 NGC3998 からの粒子スペクトル 100 億℃の熱的電子が 10⁶以下から 10³GeV の光子を放射し,宇宙線陽 子は 10³GeV 付近まで加速され, 10⁶GeV 程度のニュートリノを放射する。 XMM+NuSTAR や BAT はそれぞれの X 線観測衛星で得られた信号強度 を示している。理論モデルは X 線データと整合的である。10⁶GeV 程度 の光子は将来の 7 線観測衛星により検出可能である。黒の点線は 7 線観 測衛生計画 e-ASTROGAM の予想感度である。この系から電磁カスケー ドにより放射される 1-100GeV 程度の 7 線も 7 線検出器 LAT のデータと 整合的である。文献 6) より転載

降着流内部での宇宙線分布を求めた。その結果,宇 宙線粒子は熱的電子が放射している光子と相互作用 してエネルギーを失うまで加速され,典型的な高温 降着流は10⁷GeV 程度まで宇宙線陽子を加速できる ことが分かった(図2)。ブラックホールへ落ち込 む物質の量が比較的大きな高温降着流では光子が多 く存在するため,加速された宇宙線陽子の最大エネ ルギーは小さくなる。陽子が光子と相互作用した時 に放射されるニュートリノのエネルギーは陽子のエ ネルギーに比例するため,明るく電磁波を放射して いる高温降着流の方がより低いエネルギーのニュー トリノを放射することになる。

前記の結果をもとに、筆者らは高温降着流が 10⁻³ GeV 付近の宇宙 γ線背景放射と 10⁶ GeV 付近の 宇宙ニュートリノ背景放射の起源であるというシナ リオを提案している。可視光の天文観測から得られ ている低光度活動銀河核の数密度を用いて、宇宙を 満たす γ線とニュートリノのエネルギー密度を計算 し、観測されている宇宙 γ線背景放射強度と宇宙 ニュートリノ背景放射強度と比較した。その結果、 筆者らのシナリオでは、 γ線データとニュートリノ データの両方を 1 つの天体種別で再現することがで きた (図 3)。明るい活動銀河核の降着流からは 10⁶ GeV から 10⁴ GeV の光子が放射されることが知 られており¹³⁾、10⁴ GeV 程度のニュートリノが放射 されると期待されている¹⁴⁾。明るい活動銀河核の 寄与を足し合わせると、筆者らのシナリオでは



低光度活動銀河核からの宇宙背景放射強度スペクトル

図3 宇宙 y線背景放射スペクトル(左図)と宇宙ニュートリノ背景放射スペクトル(右図)

誤差棒つきの点と色付きの領域が観測されている宇宙背景放射データ、太い実線が理論モデルにより得られた高温降着流からのγ線・ニュートリノ背景 放射強度⁶⁾である。点線は明るい活動銀河核からの寄与¹¹⁾を表し、細い実線はそれら2つを足し合わせた放射強度である 10⁶ GeV から 10³ GeV の光子データと観測されてい るすべてのエネルギー帯域のニュートリノデータを 説明できることも明らかとなった。幅広いエネル ギー帯域の宇宙高エネルギー粒子が超巨大ブラック ホール近傍の高温プラズマから放射されている可能 性がある。

4. 今後の展望

ここまで、低光度活動銀河核のブラックホール降 着流から放射されるγ線とニュートリノについて述 べてきた。過去に 10³ GeV のγ線の起源として提案 されてきたシナリオでは、宇宙線電子からのシンク ロトロン放射や原子核の輝線放射等、非熱的な現象 が議論されており、熱的な宇宙から非熱的な宇宙へ の切り替わりは 10³ GeV より小さいと考えられてい た¹⁵⁾。一方、筆者らのシナリオでは熱的な電子がγ 線を放射するため、熱的な宇宙から非熱的な宇宙へ 切り替わるエネルギーは 10⁻³ GeV よりも高いことを 示唆している。どちらのシナリオが正しいのか、将 来のγ線観測衛星^{16,17)} による検証が待たれる。

天体ニュートリノ信号の起源を明らかにすること は、高エネルギー宇宙線起源天体や高エネルギーγ 線起源天体と密接に関係している。高エネルギー宇 宙線が周囲の物質と相互作用してニュートリノを放 射する時,同時にほぼ同量のγ線が生成される。こ のことから、これまでの高エネルギー宇宙線や高エ ネルギーニュートリノの起源天体候補として, γ線 で明るい天体が主に議論されてきた。しかし, IceCube 実験が明らかにした宇宙ニュートリノ背景放 射の信号の強度は、100 GeV 程度のエネルギーをも つ宇宙 γ線背景放射の信号よりも強く, 単純な理論 モデルでは観測データと矛盾してしまう¹⁸⁾。筆者ら のシナリオでは、高エネルギーのγ線が降着流の内 部で二光子相互作用 $(\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-)$ により吸収され, 100 GeV のγ線で非常に暗い天体となる。そのため、 γ線データとニュートリノデータの両方と整合的な シナリオとなっている。近傍の低光度活動銀河核か らの寄与を足し合わせれば、2030年代のニュートリ ノ実験¹⁹⁾ で低光度活動銀河核からのニュートリノ信 号を検出できる可能性がある。将来のγ線観測衛星

と大型ニュートリノ実験により,ブラックホール周 囲の極限環境下での物理現象と,宇宙高エネルギー 粒子の起源が明らかになることを期待している。

謝辞

本研究は日本学術振興会海外特別研究員制度, 日本学術振興会特別研究員制度,科学研究費補助金 (科研費番号 J1900198:研究代表者木村成生)にサ ポートされていました。

参考文献

- 1) Anchordoqui, *Physics Reports*, **801**, 1-93 (2019)
- 2) Weidenspointner, et al., American Institute of Physics Conference Series, **510**, 467-470 (2000)
- Ackermann, et al., Astrophysical Journal, 799, 86 (2015)
- 4) Aartsen, et al., Physical Review Letter, 125, 121104 (2020)
- 5) Fornasa & Sánchez-Conde, *Physics Reports*, **598**, 1-58 (2015)
- 6) Kimura, et al., Nature Communications, **12**, 5615, (2021)
- Kormendy & Ho, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 51, 511-653 (2013)
- B) Ghez, et al., The Astrophysical Journal, 689, 1044-1062 (2008)
- Gillessen, et al., The Astrophysical Journal, 692, 1075-1109 (2009)
- Event Horizon Telescope Collaboration, *The Astrophysical Journal Letters*, 875, L1 (2019)
- 11) 嶺重慎, ブラックホール天文学(日本評論社)(2016)
- 12) Kimura, et al., Monthly Notice of Royal Astronomical Society, 485, 163-178 (2019)
- 13) Ueda, et al. Astrophysical journal, **598**, 886-908 (2003)
- 14) Murase, et al., Physical Review Letters, 125, 011101 (2020)
- 15) Inoue, *et al.*, Fifth International Fermi Symposium-Proceedings (arXiv: 1412.03886)
- 16) Aramaki, et al., Astroparticle Physics, **114**, 107-114 (2020)
- 17) De Angelis, *et al.*, *Experimental. Astronomy*, 44, 25-82, (2017)
- 18) Murase, et al., Physical Review Letters, 116, 071101 (2016)
- 19) Aartsen, et al., Journal of Physics G, 48, 61 (2021)

(東北大学 学際科学フロンティア研究所)