

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 $1\,\mathrm{GeV}$ ($\mathrm{GeV}=10^9$ 電子ボルト)から $10^{11}\,\mathrm{GeV}$ 付近まで $10\,\mathrm{fm}$ 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 $100\,\mathrm{fm}$ 年以上が経過した現在も未解明の問題となっている 1^0 。

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10⁻³ GeV から10³ GeV 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 10^3 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^{-3} GeV 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

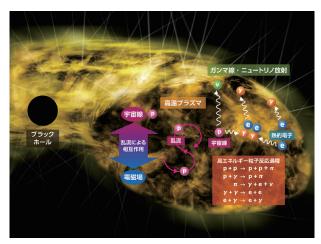


図1 高温降着流の概念図

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 7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 ($\mathbf{図1}$)。

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い。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 10⁻³ GeV 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 10³ 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

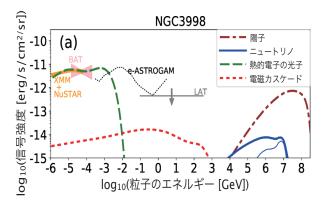


図 2 低光度活動銀河核 NGC3998 からの粒子スペクトル

100 億℃の熱的電子が 10°以下から 10³GeV の光子を放射し、宇宙線陽子は 10²GeV 付近まで加速され、10°GeV 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。10°GeV 程度の光子は将来の γ 線観測衛星により検出可能である。黒の点線は γ 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 γ 線も γ 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10⁷ GeV 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 10^6 GeV 付近の宇宙 γ 線背景放射と 10^6 GeV 付近の宇宙 γ 線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 10^6 GeV から 10^4 GeV の光子が放射されることが知られており13、 10^4 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



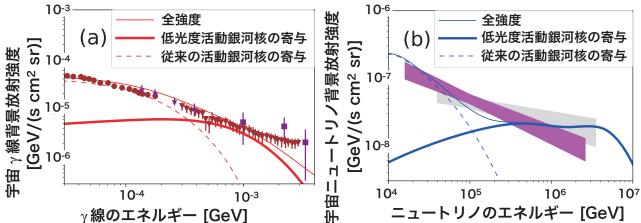


図3 宇宙 γ線背景放射スペクトル (左図) と宇宙ニュートリノ背景放射スペクトル (右図)

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 10^3 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 10^3 GeV より小さいと考えられていた $15^{(15)}$ 。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 $16,17^{(17)}$ 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)
- 3) 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)
- 7) Kormendy & Ho, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, **51**, 511-653 (2013)
- 8) Ghez, et al., The Astrophysical Journal, **689**, 1044-1062 (2008)
- 9) Gillessen, et al., The Astrophysical Journal, **692**, 1075-1109 (2009)
- 10) 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)