



2018年7月26日

早稲田大学/東京大学大学院理学系研究科

理化学研究所/金沢大学

銀河中心「巨大ガンマ線バブル」の謎に迫る 1000 万年前の大爆発を X 線で検証

早稲田大学理工学術院の片岡淳（かたおかじゅん）教授らの研究チームは、東京大学・理化学研究所・金沢大学と共同で、銀河中心から噴出するガンマ線バブルと X 線で見られる巨大ループ構造が、ともに 1000 万年前に起きた大爆発の痕跡である証拠を突き止めました。バブルが膨張する際に周囲の高温ガスを圧縮・加熱し、巨大ループ構造を形成したと考えられます。研究チームは 2013 年から 5 年にわたり、日本の X 線天文衛星「すざく」を中心とした系統的な観測と解析を行いました。いまは穏やかな銀河系も 1000 万年前には活発に爆発を繰り返し、激しい進化を遂げてきた様子が明らかになりました。

ほとんどの銀河の中心には巨大ブラックホールが潜っており、銀河系にも太陽の 400 万倍の質量を持つブラックホールが存在することが知られています。遠方には活動銀河やクエーサーなど非常に活発で明るい銀河が存在しますが、銀河系や近傍銀河の多くは活動性を示さず、いわば「休火山」のような状態です。昔は銀河系も明るく輝いていたのか？いつ・どのように活動を止めたのか？この基本的な問いに答えることは、様々な銀河の形成と進化を探る上でも極めて重要です。近年、フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡により、銀河中心から南北約 50° に噴き出す巨大なガンマ線バブル（通称：フェルミ・バブル）が発見され、大きな話題を呼んでいます。一方で、電波や X 線でも全天にまたがる巨大ループ構造が知られていますが、その大きさや形状から、太陽系近くの天体（超新星残骸）が偶然重なって見えているだけ、とする説が主流でした。研究チームは巨大ループがフェルミ・バブルを包み込む形状である点に着目し、2013 年より日本の「すざく」衛星や米国のスウィフト衛星を用いて全天 140 箇所の X 線観測とデータ解析を行いました。これにより、この巨大ループ構造はフェルミ・バブル形成時の名残であり、一連の爆発で圧縮・加熱された高温ガス（銀河ハロー）であると結論しました。

2013 年より研究成果は 7 編のシリーズ論文として発表され、その最終成果が米国天文学会の運営する科学雑誌『Astrophysical Journal』に 2018 年 7 月 25 日（現地時間）に掲載されました。

論文名：Diffuse X-ray emission from the northern arc of Loop I observed with Suzaku

Astrophysical Journal 誌ほか 6 編（末尾に記載）

ポイント

- フェルミ・バブルを囲む巨大ループ構造を X 線ではじめて詳細に観測
- 巨大ループは爆発で圧縮・加熱された高温ガス（銀河ハロー）と結論
- 流体シミュレーションを用いて 1000 万年前に起きた銀河中心の爆発を再現

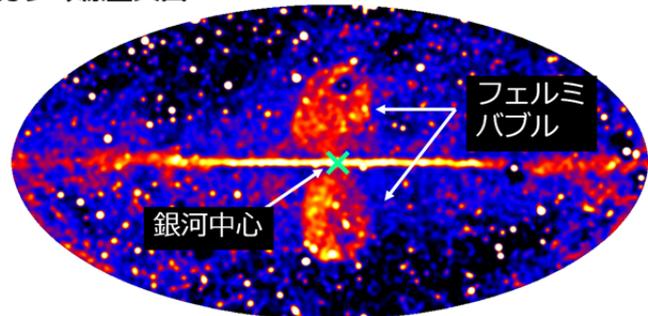
1. 研究の背景

ほとんどの銀河の中心には巨大ブラックホールが存在し、その質量も太陽の 10 万倍から 100 億倍と様々です。そして銀河はブラックホールの質量により、明るさの上限値（限界光度）が決まっています。遠方の活動銀河（※注 1）ではブラックホールに落ち込む物質の多くをジェットとして噴き出し、限界光度ギリギリで輝く特殊な天体も存在します。一方で、銀河系の中心にあるブラックホールは現在ほとんど活動をしておらず、いわば休火山のような状態です。実際、明るさは限界光度の 10 億分の 1 以下と暗く、ジェットのような構造も見られません。この違いは、銀河やブラックホールの性質によるものか、あるいは同じ銀河でも時間とともに進化するのか、天文学に残された最大の謎の一つです。

ところが近年、銀河系もかつて激しく活動をしていた痕跡が、続々と見つかりつつあります。2010 年にフェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡（※注 2）が発見したガンマ線バブル（通称：フェルミ・バブル）は銀河中心から南北 50°、差しわたし 5 万光年（= 銀河系の約半分の大さき）に及ぶ巨大な泡構造で、その姿は遠方の活動銀河を彷彿とさせます（図 1a）。もし、バブルが爆発的に形成されたとすると、大昔には銀河中心が今より 1 億倍は明るかったと推測されます。当然、そのような大爆発はガンマ線だけでなく、他の波長にも多くの「爪痕」を残しているはずです。本研究では、特に電波や X 線の全天マップで見られる巨大なループ構造に着目しました（図 1b）。

全天に広がる巨大ループの存在は、1970 年代より天文学者の間では広く知られていました。この正体については、太陽系のごく近傍にある天体が巨大に見えているだけ、とする説が一般的です。最も有力な候補として、約 400 光年先にある星団“サソリ座ケンタウルス”の超新星残骸（※注 3）と考えられてきました。一方で、研究チームの祖父江は、この巨大構造は距離にして約 30,000 光年、はるか遠方の銀河中心付近に存在し、過去の銀河系の大爆発により形成されたとする新たな説を提唱しました。しかしながら、ループまでの距離の推定に決め手を欠くこと、また当時は X 線のスペクトル情報が欠如していたため、「銀河中心爆発説」は形勢不利のまま、二つの仮説が 40 年間も両立して現在に至っています。

(a) ガンマ線全天図



(b) X線全天図

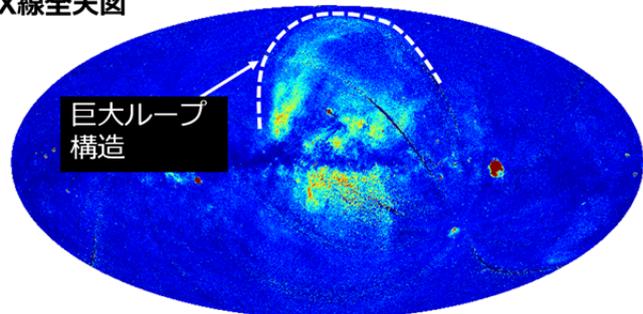


図 1: (a) ガンマ線で観測した全天マップとガンマ線バブル
(b) X 線で観測した全天マップと巨大ループ構造

2. 方法

このたび、早稲田大学を中心とする本研究チームは日本のX線天文衛星「すざく」および米国のスイフト衛星を用いてフェルミ・バブルを包み込む高温ガスや巨大ループ構造をX線で網羅的に観測し、その距離や放射の起源を決定することに成功しました。2013年のプロジェクト開始から解析したデータは全天で140箇所及び、世界的にも類を見ない大規模なサーベイプロジェクトとなります。特に「すざく」衛星は1キロ電子ボルト以下の広がったX線放射の検出に優れた感度を持ち、X線を放射するガスの温度や強度、含まれる金属量、さらには星間ガスの吸収量を正確に決めることができます。低エネルギーのX線は距離が遠いほど大きな吸収を受けるため、吸収の有無はループ構造までの距離を測る良い指標となります。図2(左)に巨大ループ周辺での観測位置、また図2(右)に典型的なX線スペクトルを示します。解析したすべての領域において、X線スペクトルは(1)太陽系近傍のガスによる熱放射(2)遠方の高温ガスによる熱放射(3)一様なX線背景放射、の3つの足し合わせで説明することができました。ここで(1)は近傍にあるガスからの放射のため吸収の影響は受けず、また(3)は遠方にある活動銀河の足し合わせと考えられる一様放射です。そのため、残された(2)の遠方の高温ガスによる熱放射が今回の主題となります。一般に、銀河は「ハロー」とよばれる高温ガスで包まれており、銀河系の場合はほぼ一様かつ約200万度のガスが満ちています。この定常的に存在する銀河ハローからの放射と、巨大ループ構造からの高温放射を比べることで、その生成起源に迫りました。

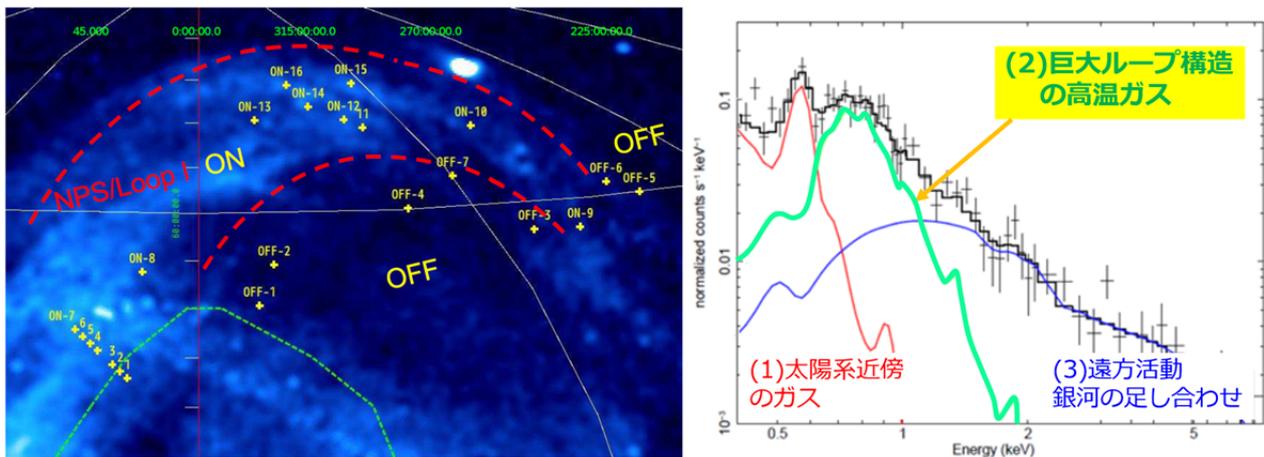


図2: (左) 巨大ループ周辺におけるX線観測位置。ONがループ状、OFFが外側の領域。緑の点線はフェルミ・バブルの境界。(右) ON位置における典型的なX線スペクトル。緑の成分が巨大ループによる放射

3. 結果

巨大ループ上の観測点と外側について、高温ガスの温度と強度(放射率)を比較した例を図3(左)に示します。ループの外側では吸収された約200万度の弱いガスが観測され、これらは銀河ハローからの放射であると示唆されます。しかしながら、巨大ループ構造の上ではガスの温度が約300万度と50%ほど高く、またX線強度からガスの密度が2~3倍も高いことが分かります。さらに吸収の量から、ループ構造が太陽系近傍にあるのではなく、銀河系のかなり遠方に存在することが分かりました。ガスの密度が高いことは何らかの膨張により圧縮されたガスが吹きたまっていることを意味します。もし、銀河中心の爆発で生じた衝撃波が銀河ハローを圧縮・加熱したと仮定すると、その膨張速度は約300 km/sと見積もられ、現状の大きさまでフェルミ・バブルが広がるのに約1000万年の時間を要します。

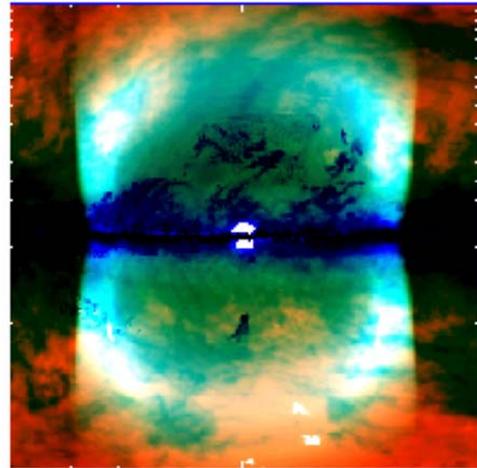
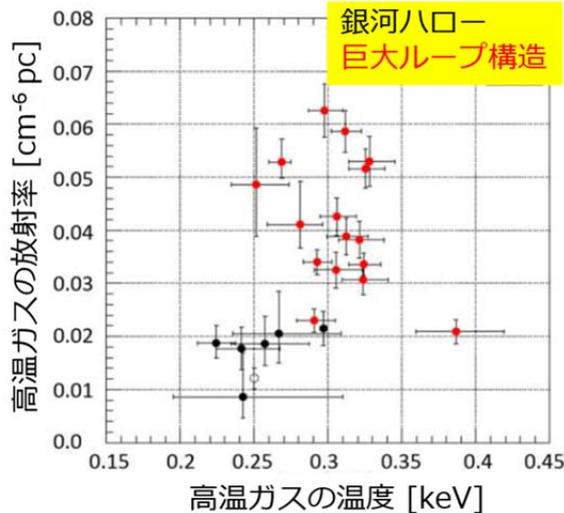


図 3: (左) 巨大ループ上および周辺における高温ガスの温度と輝度。ループ上は膨張による加熱・圧縮で明るく、温度も高い (右) 流体シミュレーションで再現した巨大ループ構造からの X 線放射

つまり、1000 万年前に銀河中心で起きた爆発により、フェルミ・バブル、さらには外側の巨大ループが一気に形成されたと考えられます。爆発の起源として、銀河中心付近での大量の星形成、あるいは活動銀河ジェットに類似したエネルギー注入が考えられます。

以上の考察が妥当であることを確認するため、流体シミュレーションを用いて 1000 万年前の爆発を模擬した計算機実験を行いました。ここでは最初に温度 200 万度の銀河ハローが球状に存在し、その中心で 10^{56} erg といった巨大なエネルギーが爆発によって解放されたと仮定します。これは、一般的な超新星爆発で解放されるエネルギーの 10 万倍という、とてつもない大きさです。図 3 (右) に現在 (= 爆発から 1000 万年後) のガス分布から期待される X 線の全天マップを示します。予想通り、掃き集められた銀河ガスは密度が高く、縁の部分ではループ構造を形成しながら約 300 万度まで加熱されます。X 線で明るいループ構造はこの高温・高密度に圧縮されたガスによるものと考えられ、ループの外側の電波放射は、膨張時に生じた衝撃波により加速された電子からの放射と考えられます。最後に、今回の研究から明らかになったフェルミ・バブルと巨大ループ構造、太陽系の位置関係を図 4 に示します。

4. 研究の波及効果や社会的影響

悠久不変に見える宇宙も長い歴史の中では激しい進化を繰り返し、その多様性を育んできたと考えられます。ひとくちに銀河といっても、渦巻き銀河や楕円銀河、不規則銀河などさまざまな種類があり、近接する銀河同士が相互作用することで、スターバースト（星形成）銀河と呼ばれる新たな形態へ発達し、銀河同士が合体を繰り返す現場も多々観測されています。これらの多様な銀河がどのように形成され、進化したかは未だ謎が多く、現代天文学の中でも最も活発な研究が行われている分野です。

銀河全体の 1 割を占める活動銀河は膨大なエネルギーをコンパクトな中心部（ブラックホール周辺）から放出する特殊な銀河であり、その形成や進化については多くの謎に包まれています。一方で、エネルギーの源はブラックホールに落ち込む物質の重力エネルギーの解放によると考えられ、活動銀河はすなわち「燃料がたくさんある」特別な銀河と言い換えることができるかもしれません。逆に、ブラックホール周辺のガスやちりを食べ尽くすと、活動銀河も通常の銀河に「進化」することも考えられます。

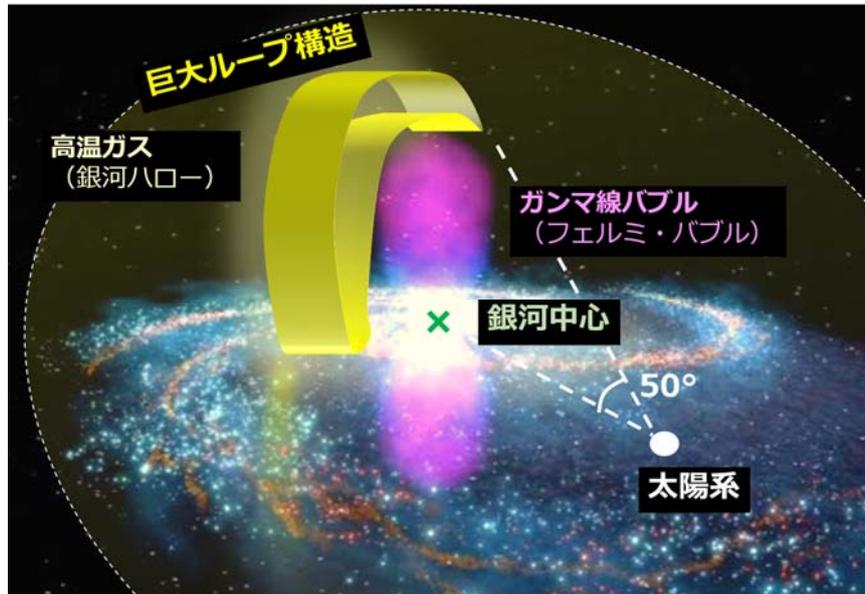


図 4: 本研究で得られた銀河中心巨大構造（フェルミ・バブルと巨大ループ）と太陽系の位置関係。1000 万年前の銀河中心大爆発でフェルミ・バブルが形成され、巻き上げられた高温ガスが圧縮・加熱されたものと考えられる

すなわち、活動銀河は銀河のある特殊な活動期、人間でいえば青年期～壮年期の様子を見ているだけに過ぎないのかもしれませんが。銀河系も現在は非常に暗く、ブラックホール周辺にも落ち込む燃料がほとんどありません。しかしながら、フェルミ・バブルや今回検証した巨大ループ構造は、過去に銀河系が活動銀河に匹敵するほど、膨大なエネルギーを宇宙空間に放出していた証です。銀河の寿命は、一般に数十億年～100 億年ほどと考えられます。そのわずか 1% (～1000 万年) といった短い期間に、銀河系が大きな進化を遂げたのは予想外の驚きです。

5. 今後の課題

本研究では銀河系に残された痕跡をもとに、銀河の活動性と進化の謎に迫りました。可視光や紫外による吸収線の観測により、フェルミ・バブルの内部には今回観測されたよりもさらに速度の速い、1000 km/s ものガスの流れが存在することが明らかになりました（※注4）。風船に例えると、本研究で観測した 300 km/s はゴム風船が外側にゆっくりと膨らむ速度、1000 km/s は風船に注入されるガスの速度に相当します。実際、図3（右）のシミュレーションからもバブルの内部は非常に高温で速度の速いガスで満ちていることが予想されますが、残念ながら希薄すぎて直接観測はできません。将来、高エネルギーのX線で感度の高い観測を行うことで、この希薄かつ高温なX線放射を捉えることが望まれます。また、2021年に打ち上げが予定されるX線天文衛星XARMには、エネルギー分解能の高いカロリメータと呼ばれる検出器が搭載され、ガスの温度や金属量、速度に新たな制限を与えることが期待されます。

さらに、研究対象は銀河系だけに限られません。ほとんどの銀河がその一生の中で多様な進化を遂げていると期待されます。実際、フェルミ・バブルに類似した構造は幾つかの銀河で観測され、隣のアンドロメダ銀河でも同様なバブルを検出したとの報告もあります（※注5）。それぞれの銀河に残る痕跡を頼りに、時間軸方向に進化をたどる新しい天文学のアプローチが可能となるかもしれません。



【論文情報】

- ・掲載誌 : Astrophysical Journal
- ・論文名 : Diffuse X-ray emission from the northern arc of Loop I observed with Suzaku
- ・著者 : Masahiro Akita, Jun Kataoka, Makoto Arimoto, Yoshiaki Sofue, Tomonori Totani, Yoshiyuki Inoue, Shinya Nakashima

・関連する参考論文

- (1) J.Kataoka, M.Tahara, T.Totani, Y.Sofue, L.Stawarz, Y.Takahashi, Y.Takeuchi, H.Tsunemi, M.Kimura, Y.Takei, C.C.Cheung, Y.Inoue, T.Nakamori
"Suzaku Observations of the Diffuse X-Ray Emission across the Fermi Bubbles' Edges",
Astrophysical Journal, (2013), vol.779, pp.57-72
- (2) J.Kataoka, M.Tahara, T.Totani, Y.Sofue, Y.Inoue, S.Nakashima, C.C.Cheung
"Global Structure of Isothermal Diffuse X-Ray Emission along the Fermi Bubbles",
Astrophysical Journal, (2015), vol.807, pp.77-89
- (3) M.Tahara, J.Kataoka, Y.Takeuchi, T.Totani, Y.Sofue, J.S.Hiraga, H.Tsunemi, Y.Inoue, M.Kimura, C.C.Cheung, S.Nakashima
"Suzaku X-Ray Observations of the Fermi Bubbles: Northernmost Cap and Southeast Claw Discovered With MAXI-SSC",
Astrophysical Journal, (2015), vol.802, pp.91-103
- (4) Y.Inoue, S.Nakashima, M.Tahara, J.Kataoka, T.Totani, Y.Fujita, Y.Sofue
"Metal enrichment in the Fermi bubbles as a probe of their origin",
Publications of the Astronomical Society of Japan, (2015), vol.67, pp.56-63
- (5) Y.Sofue, A.Habe, J.Kataoka, T.Totani, Y.Inoue, S.Nakashima, H.Matsui, M.Akita
"Galactic Centre hypershell model for the North Polar Spurs",
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, (2016), vol.459, pp.108-120
- (6) J.Kataoka, Y.Sofue, Y.Inoue, M.Akita, S.Nakashima, T.Totani
"X-Ray and Gamma-Ray Observations of the Fermi Bubbles and NPS/Loop I Structures",
Galaxies, (2018), vol.6, pp.27-46

【研究メンバー】

- ・早稲田大学理工学術院 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻
教授 片岡 淳、秋田 誠博（論文投稿当時、修士課程 2 年）
- ・東京大学大学院理学系研究科 天文学専攻
名誉教授 祖父江 義明、教授 戸谷 友則
- ・理化学研究所
数理創造プログラム 研究員 井上 芳幸
開拓研究本部 玉川高工エネルギー宇宙物理 研究室 研究員 中島 真也
- ・金沢大学 理工研究域 数物科学系
助教 有元 誠



【補足情報】

※注 1

銀河全体の約 1 割を占める特殊な銀河で、エネルギーの大半を銀河中心のコンパクトな領域（ブラックホール周辺）から放出し、激しい時間変動を特徴とする。

※注 2

日米欧が協力して 2008 年に打ち上げたガンマ線観測用の天文衛星で、過去最高の感度で現在も宇宙を観測している。

※注 3

恒星がその一生を終え、最期に爆発した後に残る残骸の構造。

※注 4

Fox, A. J et al., "Probing the Fermi Bubbles in Ultraviolet Absorption: A Spectroscopic Signature of the Milky Way's Biconical Nuclear Outflow", *Astrophysical Journal*. 799, L7-12, (2015)

※注 5

Pshirkov, M. S. et al., "Evidence of Fermi bubbles around M31", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459, L76-80, (2016)

【内容に関するお問い合わせ先】

早稲田大学理工学術院 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻
教授 片岡 淳

Tel : 03-5286-3081 E-mail : kataoka.jun@waseda.jp

【報道に関するお問い合わせ先】

早稲田大学広報室広報課

Tel : 03-3202-5454 E-mail : koho@list.waseda.jp

東京大学大学院理学系研究科広報室

Tel : 03-5841-0654 E-mail : kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

理化学研究所広報室報道チーム

Tel : 048-467-9272 E-mail : ex-press@riken.jp

金沢大学総務部広報室

Tel : 076-264-5024 E-mail : koho@adm.kanazawa-u.ac.jp