

フェルミ・バブルから探る銀河系中心の過去の活動性

片岡 淳

〈早稲田大学理工学術院総合研究所・先進理工学研究科 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1〉
e-mail: kataoka.jun@waseda.jp

戸谷 友則

〈京都大学大学院理学研究科・宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉
e-mail: totani@kuastro.kyoto-u.ac.jp

井岡 邦仁

〈高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・理論センター 〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1〉
e-mail: kunihito.ioka@kek.jp

近年のフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡の活躍により、銀河面から垂直に南北50°（銀河中心からの距離にして全長5万光年）にも広がる巨大な泡構造“フェルミ・バブル”が発見されました。バブルは銀河面から南北対称に噴水のように広がって見えますが、現在の銀河系中心ブラックホールはたいへん暗く、活動をほぼ休止しています。バブルはいつ、どのように形成されたのでしょうか？ この基本的な問いに答えるべく、本稿ではまずガンマ線で見たバブルの構造を詳細にレビューし、X線や電波をはじめとする多波長データと比較します。系内に残された数々の「痕跡」から銀河系中心の過去の活動をさかのぼり、ガンマ線放射機構や高エネルギー宇宙線の生成に与えるさまざまな示唆について議論します。

1. はじめに

われわれの銀河系だけでなく、多くの銀河の中心には太陽の10万倍から10億倍を超える巨大なブラックホールが潜んでいると考えられています。質量降着による激しい活動性を示すブラックホールは活動銀河核と呼ばれ、降着流の一部をジェットとして宇宙空間のはるか遠く、数百万光年の彼方まで運ぶものさえあります。一方で、多くの近傍銀河では、われわれの銀河中心のようにほとんど活動性を示さない「休火山」のようなブ

ラックホールが眠っていることも示唆されています。これらのブラックホールがいつ・何が原因で活動を止めたのか？ そもそも昔は本当に活動していたのか？ この基本的な謎を探ることは、銀河の形成や進化、さらには活動銀河と通常銀河を統一的に理解するうえで、極めて重要な課題です。

2008年の夏に打ち上げられたフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡（以下、フェルミ衛星）は3年間の観測ですでに2,000個を超えるガンマ線天体を発見し、現在もその数は増加の一途をたどってい

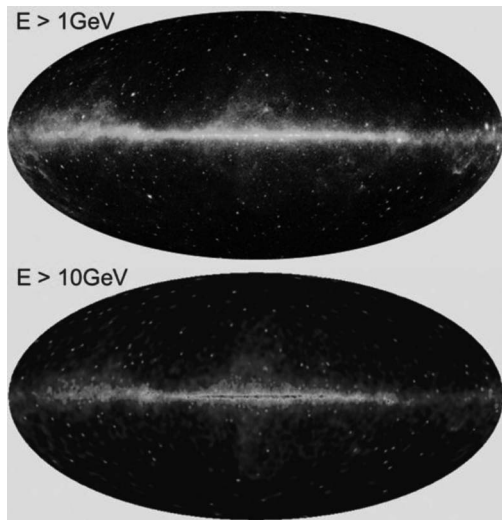


図1 フェルミ衛星3年間の観測で得られた全天マップ。(上) $E > 1 \text{ GeV}$ (下) $E > 10 \text{ GeV}$ 。下のマップでは、銀河面の上下に伸びる、泡状の構造がうっすらと見て取れる。

ます。これまで知られていた、ジェットが視線方向を向いた活動銀河核（ブレイザー¹⁾）に加え、広がった電波銀河のローブ^{2), 3)}、近傍のスターバースト（爆発的星形成）銀河⁴⁾などを発見、さらには銀河系内の超新星残骸⁵⁾やパルサー、球状星団⁶⁾、X線連星など⁷⁾、続々と新しい「ガンマ線天体」を発見しました。一方で、銀河面に付随して広がった放射⁸⁾や系外のガンマ線背景放射⁹⁾（詳しくは2章）についても詳細な研究が進んでいます。ガンマ線データの統計が溜まるにつれ、個々の天体と背景放射を差し引いてもなお残る、“不可思議な”構造の存在が明らかになってきました。この構造は、銀河中心を吹き出しとし、銀河面の南北に広がる巨大な泡（バブル）のように見えるため「フェルミ・バブル」と呼ばれています。

本稿では、まず2章でフェルミ衛星の発見したガンマ線の巨大構造を詳細にレビューし、電波・X線との比較を行います。3章では、銀河中心に残る活動の痕跡から、「何がバブルを作ったのか？」その核心に迫ります。4章ではバブルのガ

ンマ線放射機構と宇宙線の生成、さらにはダークマターとの関連について議論し、5章で今後の展望をまとめたいと思います。

2. フェルミ・バブルの観測

2.1 ガンマ線の全天マップ：バブルの兆候

本章ではすでに出版された成果^{10), 11)}を中心に、最近の結果も交えながら、フェルミ・バブルの特徴について紹介したいと思います。

まず、フェルミ衛星の観測した3年分の全天マップを図1に示します。上が1 GeV以上、下が10 GeV以上のマップです。（1 GeV = 10^9 電子ボルト。この時点で、注意深い人にはバブルが見えると思います！特に10 GeV以上のマップをご覧ください）。銀河座標表示では中心がわれわれの銀河系中心、左右に広がった明るい帯が銀河系円盤内の放射となります。高銀緯にある多くの点源はブレイザーなどの活動銀河核、またはミリ秒パルサーからの放射です。低銀緯の天体の多くはパルサーや超新星残骸などですが、銀河面に付随して広がった放射は天体ではなく、宇宙線が星間ガスや光子と反応して作る拡散ガンマ線です。例えば、核子-核子衝突で生じた π 中間子の崩壊、電子が原子核のクーロン力で曲げられる際の制動放射、低エネルギー光子を電子が叩き上げる逆コンプトン散乱が主な起源です⁸⁾。ほかにも全天からほぼ一様にやってくる「宇宙ガンマ線背景放射」があり、多くは個々に分離できない微弱な天体の足し合わせと考えられますが⁹⁾、その正体は謎に包まれています。特に低銀緯においては銀河系内拡散ガンマ線の寄与を正しく見積もることが極めて重要です。フェルミ・チームでは拡散ガンマ線の寄与を、星間ガスの分布や地球上で測られた宇宙線スペクトルをもとに見積もっています⁸⁾。

さて、それでは全天マップから個々の天体と拡散ガンマ線（モデル）の寄与を差し引いてみましょう。図2は1.6年分のデータをもとに（左上）

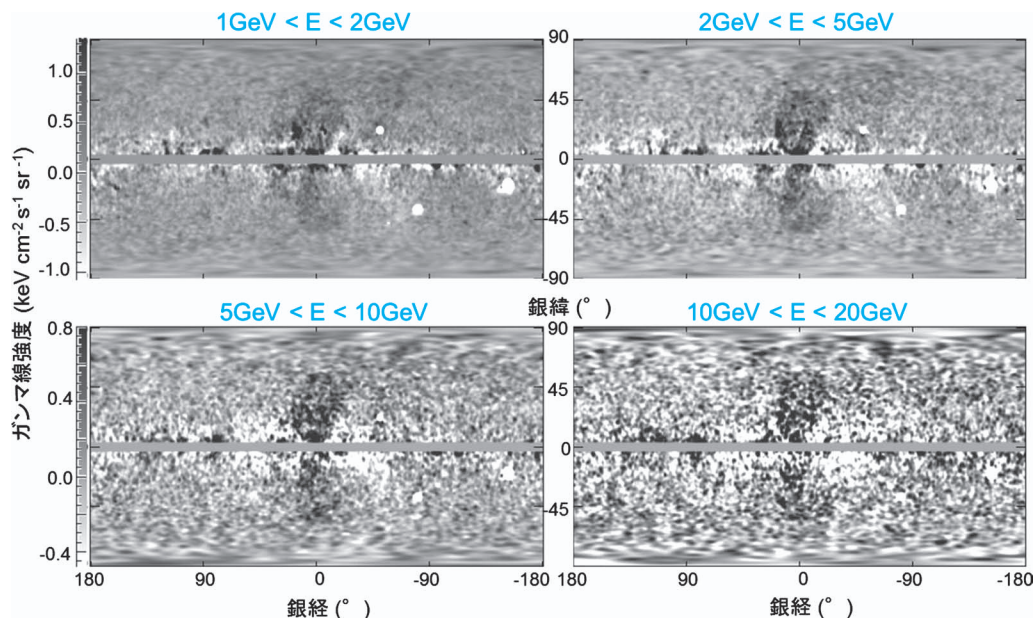


図2 点源と拡散ガンマ線の寄与を差し引いた、全天マップ (文献11より転載)。フェルミ衛星1.6年分のデータ解析によるもので (左上) $1 \text{ GeV} < E < 2 \text{ GeV}$ (右上) $2 \text{ GeV} < E < 5 \text{ GeV}$ (左下) $5 \text{ GeV} < E < 10 \text{ GeV}$ (右下) $10 \text{ GeV} < E < 20 \text{ GeV}$ 。すべてのエネルギー帯で銀河面から垂直に伸びる巨大なバブル構造が明瞭に見える。

1-2 GeV, (右上) 2-5 GeV, (左下) 5-10 GeV, (右下) 10-20 GeVの四つの異なるバンドで描いた「残差」の全天マップです¹¹⁾。銀河面の南北に浮かび上がる鉄アレー状の分布が、特に高エネルギーほど顕著に見取れます。ここではもちろん、仮定したモデルの不定性が問題となります。文献^{10), 11)}とは独立に、フェルミ・チーム内でも最新のデータを用いて異なるダストモデルなどを用いた詳細な検証が行われていますが、結果はおおむね一致します。ガンマ線バブルの存在は、もはや疑いの余地がないものとなっています。

2.2 ガンマ線で見えたバブルの特徴

図2で見たとおり、バブルは銀河面から南北 (銀緯方向) に $\pm 50^\circ$ 、東西 (銀経方向) に $\pm 20^\circ$ と巨大です。これを銀河中心に付随する構造だと仮定すれば全長は約5万光年にも及び、銀河系の直径の約半分にも相当します。バブルが高エネルギーほど顕著で見えやすい事実は、スペクトルが非常に硬く (高エネルギー側ほど明るく)、拡散

ガンマ線よりも高いエネルギーまで伸びていることを示唆します。詳細な解析から、スペクトルの光子指数 (スペクトルをべき関数 $dN/dE \propto E^{-\Gamma}$ でフィットしたときの Γ) は2.0程度であることがわかりました。また、1GeV付近でカットオフして低エネルギー側の光子が減少していることが示唆されています¹¹⁾ (4章; 図6)。

ガンマ線は見かけの明るさがほぼ一様で、バブル全体から放射されており、根本の部分が特に明るいとか、中に際立って目立つブロップなどの構造も見られないようです。一方で、バブルの境界は非常にシャープな縁 (エッジ) をもつことがわかってきました。図3はバブル周辺の各点の明るさを、バブルの縁からの距離の関数として示したものです¹¹⁾。原点、つまりエッジの付近で急激に明るさが落ち込んでいる様子がわかります。落ち込みの鋭さは 2° 程度の幅に見えますが、現状の幅は全天マップの解像度 (データをどれだけの幅で積分するか) で決まっており、本来はもっと

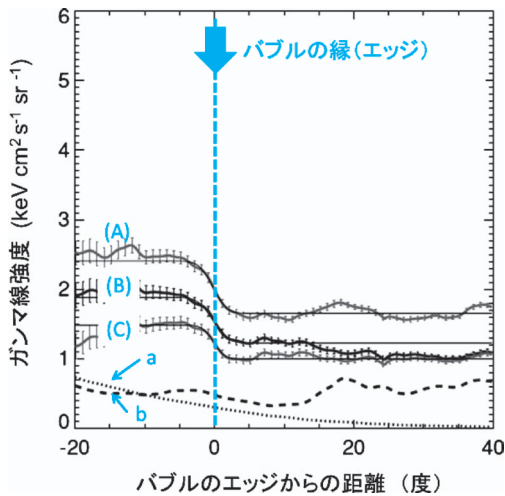


図3 フェルミ・バブル（南側）のエッジから動径方向にガンマ線強度を射影した図。エネルギー範囲は1-5 GeV（文献11より転載）。a: ダストから期待されるガンマ線強度, b: ディスクから期待されるガンマ線強度。(A)は生の（差引前の）ガンマ線データ, (B)はダスト成分を引いたもの（=A-a）, (C)はダスト成分とディスク成分を引いたもの（=A-a-b）。いずれの場合においても、シャープなエッジ構造が見て取れる。

シャープなのかもしれません。さらなる統計の向上と、他波長によるエッジ部分のフォローアップ観測が期待されます。

2.3 電波・X線との相関

実は、ガンマ線で見たフェルミ・バブルと同様な巨大構造が、すでに他波長でも知られています。これらの巨大構造の形成に関するより詳細な議論は3章に譲るとして、ここでは電波で見た“WMAP haze”とX線で見た“North Polar Spur (NPS)”について紹介したいと思います。

WMAP hazeはその名のとおおり、宇宙マイクロ波背景放射の観測で顕著な成果を上げた米国WMAP衛星が最初に発見した構造です。Hazeは日本語で霞（かすみ）という意味で、まさにマイクロ波で霞のように広がる、淡い巨大構造が発見されました。最近では2009年に欧州から打ち上げられたプランク（Planck）衛星でも同様な構

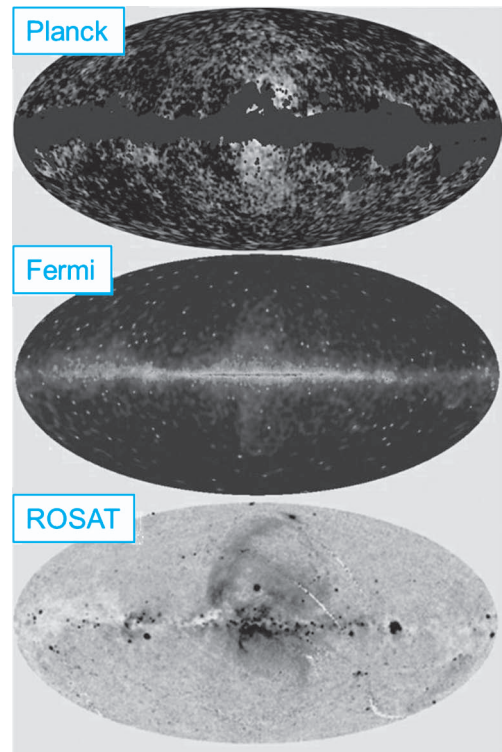


図4 さまざまな波長における全天マップの比較。(上) Planck衛星によるサブミリ波マップ (NASA webサイト¹²⁾より転載) (中) フェルミ衛星による10 GeV以上の全天マップ (下) ROSAT衛星による1.5 keV X線マップ。

造が確認され、NASAよりプレスリリースされています¹²⁾。図4のようにフェルミ・バブルとWMAP hazeを比べてみると銀河面から南北に伸びる構造はほぼ同様ですが、WMAP hazeのほうが広がり小さい（高銀緯まで“かすみ”が伸びない）ようです。いずれにせよ、波長にして12桁も離れた電波とガンマ線で、ほぼ同様な巨大構造が見られることは、宇宙の神秘を感じずにはおられません。

波長を変えてX線で見ると、1990年代に活躍したドイツのローサット（ROSAT）衛星により2 keV以下の軟X線で全天サーベイが行われています。X線では銀河中心の北側、南側で様相がだいぶ異なり、北側にはNPSもしくはNorthern

Arcと呼ばれる巨大なアーム状の構造が見られ、まるでフェルミ・バブルを包み込むような形状をしています。アームのX線放射は熱的なプラズマによるものですが、この構造に沿った巨大な電波構造も知られています。さらに、掲載図からはわかりにくいですが、銀河面からバブルが立ち上がる根本（バルジ）付近からも、バブルに沿う形で弱いX線放射の超過が見られます。これまで多くの論文では、NPSは太陽系近傍のローカルな超新星爆発によるもので、銀河中心とは無関係と考えられてきましたが、偶然としては少々できすぎのようです。フェルミ・バブルの発見以来、これまでばらばらに議論されてきたさまざまな波長の「巨大構造」の関連性を信じ、統一的に理解しようとする研究者が（筆者ら自身を含め）増加しつつあります。次章では、フェルミ・バブルをはじめ銀河中心の活動性を示唆する観測的証拠を整理し、問題の核心に迫りたいと思います。

3. 何がバブルを作ったのか？：銀河系中心の過去の活動性

3.1 バブルのエネルギーとタイムスケール

文献11では、バブルを生み出すエネルギーをX線観測のデータから見積もっています。バブルを満たす熱いガスの温度が $kT \sim 2 \text{ keV}$ （約2,000万度）、粒子密度が 10^{-2} cm^{-3} であり、バブルの大きさ3万光年から、バブルを満たすガスのエネルギーは 10^{54-55} erg となります。バブル内の希薄ガスに転化するエネルギーの割合はそれほど多くないでしょうから、バブルを作る全エネルギーはこれよりさらに大きいでしょう。銀河系からガスが重力を振り切って脱出するには、少なくとも秒速数百 km の膨張速度が必要で、その膨張のタイムスケールはおおよそ 10^7 年となります。このような壮大なエネルギー放出が、過去に銀河系中心で起きたこととなります。

実は、そうした銀河系中心の過去の活動性を示唆する観測的兆候は、別にフェルミ・バブルが初

めてではなく、これまでもさまざまな観測データから議論されてきました。特に、この分野に関してはわが国の研究者による長年の貢献が著しい点も特筆すべきでしょう。米国の強力なグループが派手に主張し始めると世界がそれに流されるのはいささか仕方のないことではありますが、銀河系中心の過去の活動という点に関して言えば、フェルミ・バブルはこれまでの議論に新たな観測的証拠の一つを加えただけとも言えます。以下ではそれらを簡単に紹介しましょう。銀河系中心付近のさまざまなスケールでの現象を模式的に図5にまとめているので適宜ご参照ください。

3.2 過去の活動性の「爪痕」

約30年も昔、1984年に祖父江・半田ら¹³⁾は電波観測で銀河系中心から約200 pcに広がるアウトフローのような構造（Galactic Center Lobe; GCL）を発見しました。Bland-Hawthornら¹⁴⁾は、この膨張エネルギーを、赤外線観測によるダスト質量などに基づいて 10^{55} erg 程度と見積もっています。もっと歴史をさかのぼると1972年に、海部ら¹⁵⁾やScoville¹⁶⁾は銀河系中心を取り巻き、膨張しつつある分子雲ガスのリング（Expanding Molecular Ring; EMR）を報告しています。実に興味深いことに、この膨張分子雲リングの大きさとエネルギーは上記GCLのものとはほぼ一致します。

さらに大きなスケールでの兆候として、祖父江¹⁷⁾やBland-Hawthorn¹⁴⁾は、約1万光年にも及ぶNPSなどの構造が、時間スケールで 10^7 年、エネルギーとしては 10^{56} erg に及ぶ銀河系中心からのアウトフローだと主張しています。一方でこのNPSについては上述したように、銀河系中心起源ではなく、太陽系に近い超新星残骸とする説のほうがこれまで有力でした。詳しくは、祖父江氏による月報解説記事¹⁸⁾をご覧ください。膨張分子雲リングについても、後に膨張は銀河円盤の運動に起因する見かけの効果とする説も提出されて、銀河系中心からのアウトフローという解釈は

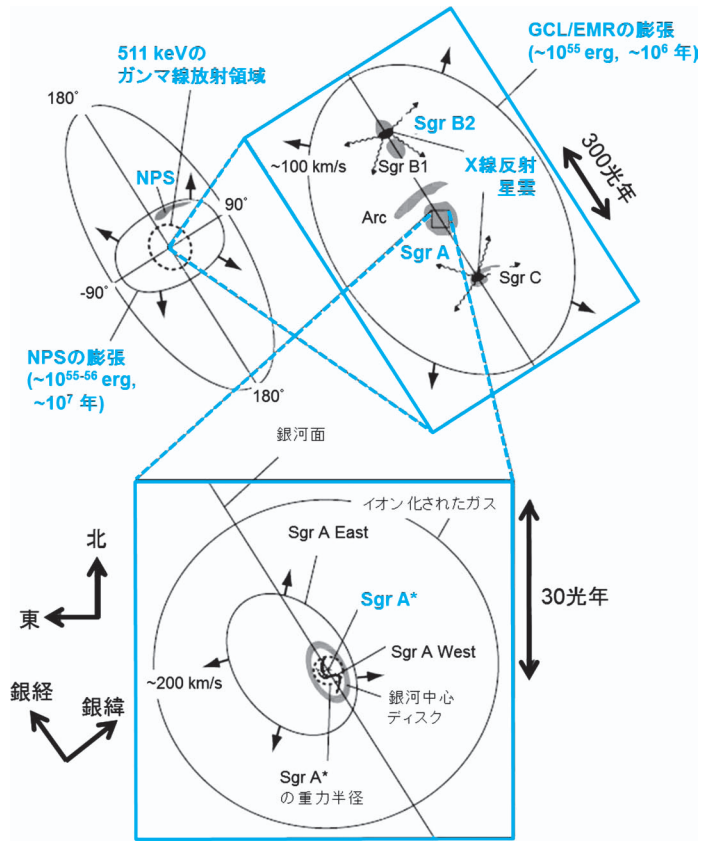


図5 銀河系中心付近における、さまざまな空間スケールでの構造とそのエネルギー、タイムスケールの概観図 (文献24より転載：詳細は3章を参照)。銀河系中心の過去の活動を示す「爪痕」が随所に見られる。

劣勢だったようです。しかし、今回フェルミ・バブルを報告したグループもNPSは銀河系中心起源と見ていますし、改めて、これらさまざまな観測結果を銀河系中心からのアウトフローとして統一的に見直してみる必要があります。ちなみに、上記の月報記事で祖父江氏は銀河系中心説の孤軍奮闘を嘆き「今まで30年経ったのだから、これから30年は情勢が変わらないのかもしれない。気長に待つことにするか」と達観して述べておられますが、意外と早く情勢が変わるときがきたようです。

もう一つ、ガスアウトフローと違い、銀河系中心の巨大ブラックホール (Sgr A*) が、昔は現在よりはるかに明るかったという観測的兆候もあ

ります。1996年、小山ら¹⁹⁾ は「あすか」を用いたX線観測で、Sgr A*から約300光年の距離にある分子雲Sgr B2が中性鉄輝線で輝いていることを発見しました。これは冷たい分子雲が強いX線にさらされたときにその反射で出る放射ですが、付近にそれだけ強いX線源がないことから、小山らは約300年前にSgr A*が10³⁹ erg/sというX線光度で輝いていたと提唱しました。これは、現在のSgr A*のX線光度の、実に10万倍から100万倍というすさまじいものです。その後の観測²⁰⁾ や最近の「すざく」による観測²¹⁾ などでも、このシナリオの根拠が整いつつあります。この事実と、上述のアウトフローは何か関連があるのでしょうか？

3.3 バブルの起源：巨大ブラックホールか、爆発的星形成か？

銀河系中心で巨大なエネルギーを生み出すシナリオとしては、主に二つが考えられます。一つは、激しい星形成（スターバースト）に伴い、数多くの超新星爆発によってエネルギーが供給されること。もう一つは、銀河系中心にある400万太陽質量という巨大ブラックホールSgr A*にガスや星が落ち込むことで、莫大な重力エネルギーが解放されることです。後者は、よく知られた活動銀河中心核と同じメカニズムです。上記のさまざまな過去の活動性の兆候は、どちらで説明されるのでしょうか？ X線反射星雲は当然ブラックホール起源となります。一方で、300光年以上のスケールのアウトフローは、どちらのシナリオが妥当かは入念に検討する必要があります。

スターバーストの場合、超新星爆発のエネルギーから、 10^6 年で 10^{55} erg、つまり 10^{49} erg/年というエネルギー生成率に必要な星形成率が求まり、およそ $1 M_{\odot}$ /年 (M_{\odot} は太陽質量) となります。松永ら²²⁾の銀河系中心付近の若い星の観測から、実際に過去に活発な星形成活動があったと言われているが、その見積もりは最大でも $0.1 M_{\odot}$ /年です。オーダーとして近いとも言えますが、1桁ほど足りないようにも見えます。また、スターバースト銀河では実際にアウトフローが観測されていますが、それは主にH α 輝線で観測されます (M82などが有名です)。銀河系中心方向にはそのような兆候が見られません。

一方、ブラックホール説を取った場合、少なくとも現在のSgr A*を見る限り、質量降着は非常に少ないことが問題です。しかし、過去に降着率が高かった可能性はもちろんあります。現在のSgr A*からの放射は、降着率が少ないブラックホールで標準とされるRIAF (radiatively inefficient accretion flow; 詳細は例えば文献23参照) という降着円盤モデルでよく説明できます。戸谷²⁴⁾は、このSgr A*のモデルに基づき、過去

1,000万年にわたり質量降着率が現在の1,000倍ほど高い状態が典型的であったなら、 10^{49} erg/年というアウトフローのエネルギー生成率が説明でき、さらに、X線反射星雲が示唆する現在より10-100万倍高かったというX線光度も説明できることを指摘しました (RIAF では、X線光度は質量降着率の約2乗で変化します)。もともと、戸谷の論文は銀河系中心におけるもう一つの謎である「511 keV電子陽電子対消滅ガンマ線」の起源を考察したものでした。実際、これぐらい降着率が高ければ511 keVガンマ線も無理なく説明できることになり、一石三鳥です。ブラックホール起源のアウトフローはスターバーストの場合に比べて速度が大きく、質量は少なめですから、H α 輝線が弱い事実も説明できそうです。

ではなぜ、今のSgr A*は活動性が低いのでしょうか？ Sgr A*の活動性が他の一般的な銀河中心核と比べて異常に低いことは以前から広く認識されています。現在より1,000倍ほど高い状態が普通だとしても、他の一般的な銀河と比べて特に高いとは言えないのです。何らかの原因で、Sgr A*の現在の降着率が異常に低くなっていると考えると良いかもしれません。その有望なシナリオは、Sgr A*のすぐ近くで、Sgr A*を包含するように存在する超新星残骸、Sgr A Eastです。ブラックホールのすぐ近くで起きた超新星爆発の影響で降着流が破壊され、現在は活動性が弱まっているという可能性が考えられます²⁴⁾。

以上、銀河系中心の過去の活動性に関するさまざまな可能性を検討してきましたが、いまだいずれのシナリオも決定打に欠けるというのが実情です。さらなる観測が求められています。

4. ガンマ線の放射機構と宇宙線の生成

4.1 ガンマ線の放射機構：レプトンモデル

では、いったい何が「フェルミ・バブル」のガンマ線を放射しているのでしょうか？ これまで大きく分けて二つのモデルが考えられています。

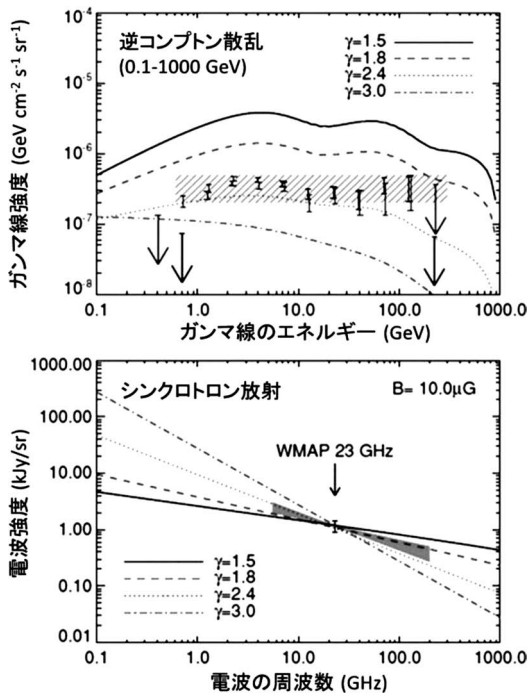


図6 レプトンモデルを仮定し、電波とガンマ線のスペクトルを、同じ電子からのシンクロトロン放射（電波）と逆コンプトン放射（ガンマ線）でフィットした場合の結果（文献11より転載）

一つは電子によるレプトンモデル、もう一つは核子によるハドロンモデルです。

レプトンモデルでは、高エネルギーの宇宙線電子がガンマ線を放射すると考えます¹¹⁾。宇宙線電子は周りに存在する光、例えば宇宙マイクロ波背景放射や星の光、と衝突することで、これらを高いエネルギーまで叩き上げます。いわゆる逆コンプトン散乱という過程です。まだまだ観測誤差が大きいのですが、星の光が強くなる銀河面に近い根本付近でも特にガンマ線バブルが明るい兆候はなく（2章）、叩き上げられる光は宇宙マイクロ波背景放射が主であると考えられます。ガンマ線の強度を説明するには、宇宙線電子の密度がわれわれの太陽系近傍の2-10倍あれば可能です。これは3.1章で見積もったエネルギーの約1%に相当します。必要な電子分布のべき指数 γ は2.0-

2.5程度と見積もられます（図6）。1 GeVより低エネルギー側のガンマ線のカットオフは、対応する電子分布にもカットオフが存在することを示唆します。「硬い」電子分布が、最近発見された太陽系近傍の宇宙線電子の超過²⁵⁾にも見られることは、たいへん興味深いことです。

レプトンモデルでは、電子からのシンクロトロン放射でWMAP haze（2章）の電波放射を説明できます。シンクロトロン放射は宇宙線電子が磁場によって軌道を曲げられたときに出来ます。必要な磁場は銀河の典型的な磁場と同程度（ $\sim \mu\text{G}$ ）で十分です。WMAP hazeがフェルミ・バブルに比べて小さいのは、銀河面から離れるにつれて磁場が弱くなることで説明がつきます。WMAPで偏光が観測されていないことから、磁場は乱れていることが示唆されます。図6に示すように、同じ電子分布（ $\gamma=2.0-2.5$ ）を用いてガンマ線と電波のスペクトルを同時に再現できます¹¹⁾。ただし、1 GeVより低エネルギー側のガンマ線のカットオフが観測誤差でないとする、ガンマ線と電波のスペクトルを矛盾なく説明するのが少し難しくなります。

レプトンモデルでは、宇宙線電子の冷却時間（放射でエネルギーを失う時間）が短いため、常に宇宙線電子を供給し続けるか、繰り返して何度も供給する必要があります。もし冷却時間（典型的には10万年）の間に宇宙線電子の供給がなければ、電子はエネルギーを失い、ガンマ線で光れなくなります。これはバブルの起源に対する重要な手がかりになります。また、定常的に宇宙線電子の供給があったとしても、冷却によって高エネルギー電子の量が減るので、ガンマ線のスペクトルにも折れ曲がりが生じると考えられます²⁶⁾。現状では観測誤差の影響でスペクトルの詳細な形状までわかりませんが、今後モデルを特定するための重要な特徴の一つになります。さらに、冷却時間が短いため、加速できる電子の最高エネルギーも低くなり、TeV（ $=10^{12}$ eV）ぐらいと見積もら

れます。つまり、ガンマ線もTeVあたりでカットオフすることが期待されます。このようなTeVガンマ線の特徴は、近い将来CTA（5章参照）によって探ることができるはずで

4.2 ガンマ線の放射機構：ハドロンモデル

もう一方のハドロンモデルでは、陽子などの宇宙線核子によるガンマ線放射を考えます²⁷⁾。宇宙線陽子がバブル内の星間ガスと衝突すると、 π 中間子が生成され、その崩壊によってガンマ線が放射されます。もともとの宇宙線陽子が高エネルギーなため、崩壊ガンマ線も高エネルギー側にブーストされます。そのため、ガンマ線のスペクトルは宇宙線陽子のスペクトルをコピーすると期待されます。WMAP hazeの電波放射も、 π 崩壊からの電子・陽電子がシンクロトロン放射することで説明がつかます。必要となるエネルギーは3.1章で見積もったエネルギーの約10%、そしてガス密度は銀河平均より薄い 10^{-2} cm^{-3} 程度で構いません。

このように意外なほどハドロンモデルはレプトンモデルと似た予言をしますが、違いもあります。一つ目は、ガンマ線スペクトルの低エネルギー側に、 π 中間子の静止質量エネルギー（約140 MeV）に対応したカットオフが入るはずで

す。今後、低エネルギー側の観測誤差を減らすことが重要になります。二つ目は、ハドロンモデルでは冷却時間が宇宙年齢ぐらゐ長くなります。宇宙線陽子が冷えないので観測されている硬いスペクトルを再現しやすくなります。同時に、冷却によって粒子加速が妨げられないので、TeVを超えるガンマ線放射が期待されます。これらは将来、CTAによって調べることができるはずで

す。三つ目は、 π 崩壊によるニュートリノ放射です。崩壊ガンマ線同様、ニュートリノも高エネルギーにブーストされます。もし宇宙線陽子のスペクトルがさらに高エネルギーまで続いているれば、南極にあるIceCube実験によって $\sim 100 \text{ TeV}$ 以上で観測できます²⁸⁾。現時点では何も受かっていません

ので、バブル内の宇宙線陽子は高エネルギー側で数が減っていることが示唆されます。対応するガンマ線の折れ曲がりCTAで観測可能かもしれませんが（レプトンモデルとの区別が難しくなるかもしれませんが）。

ハドロンモデルとして一番「過激な」シナリオは、フェルミ・バブルが100年来の謎である宇宙線の起源であるとする説です²⁹⁾。特に、 10^{15} eV (knee) から 10^{18} eV (ankle) の間の宇宙線は、起源が全くわかっていません。スペクトルが連続的であることから銀河系内起源である可能性が高いのですが、超新星残骸など既知のソースではkneeより上のエネルギーまで粒子を加速できないという問題があります。フェルミ・バブルは非常に巨大な加速器なため、原理的にはankle付近まで粒子加速できます。これまで巨大すぎてその存在に気づいていなかったというわけです。もちろん、このシナリオにも考慮すべき点があります。まず、観測されている宇宙線の方向分布を単純には説明できません。バブル方向からの宇宙線が多くなると期待されるのですが、観測ではほぼ等方です。また、上述したようにIceCubeによってバブル内の宇宙線が高エネルギーにいくほど量が減っていることが示唆されています。これらを解決できるかどうかは今後の研究にかかっています。

4.3 粒子加速の機構

ガンマ線を放出するには、レプトンモデルにせよハドロンモデルにせよ、高エネルギーの粒子が必要になります。いったいどこで粒子加速が起こっているのでしょうか？ その手がかりとなるのが見かけの明るさ分布です。バブルは一見、一様な明るさ分布をもちます（2章）。実はこれが見たいへん不思議なことなのです。

例えば、銀河中心で粒子加速が起こり、宇宙線が上下方向に吹き出たとしましょう。しかし、この場合、膨張するにつれて宇宙線はエネルギーを失います。タイヤのチューブから空気が勢いよく

吹き出ると温度が下がる原理と同じです。これでは明るさは一様になりません。

次にバブルのエッジが考えられます。エッジはシャープなので、バブルが膨張して星間物質と衝撃波を起こしていると思われまふ。衝撃波は粒子加速の有力な現場です。近づく2枚の板の間のピンポン球のように粒子も加速されます。ところが、これではエッジ周辺のみ明るくなつてしまひ、一様の明るさになりません。

バブル全体で加速が起こつたという可能性もあります。例えば、銀河中心のブラックホールからアウトフローが何度も出ていくつも衝撃波が起こる場合や^{26), 29)}、バブル内が乱流状態になってピンポン球をいろんな方向に叩いているような二次加速が起こっている場合です²⁹⁾。それでも、宇宙線の密度が空間的に一様になるので、視線方向に一番長いバブルの中心方向が明るくなつてしまひます。

それゆゑ、バブルの明るさ分布を一様にするには、エッジでの加速とバブル全体での加速をちょうどよく混ぜる必要があります³⁰⁾。バブル全体での加速には、複数の衝撃波や二次加速が考えられますが、衝撃波構造は見えていないし、二次加速には大きな理論的不定性があります。異なるエネルギーで明るさ分布を測定するなど、さらなる研究が求められます。

4.3 ダークマター・その他の現象

これまで述べてきたボトムアップ的なシナリオのほかに、もともと静止質量エネルギーが大きい未知の粒子ダークマターが対消滅や崩壊をしてガンマ線を放出するというトップダウン的なシナリオもありえます。この場合、ダークマター分布がガンマ線分布を決めますが、通常、ダークマターは球状の銀河ハローとして広がっていると考えられていますので、バブルの形状を説明するのは困難です。ダークマターが卵のように細長い分布形状をしていて、ダークマターから作られた高エネルギー電子が銀河円盤に垂直な磁場に沿って非等

方に拡散すれば、何とか卵形のガンマ線分布にすることはできます¹⁰⁾。現状の観測には大きな誤差があるので否定はできませんが、最新のデータを用いた解析でも、球状ないしは卵型というよりバブルに近い形状が見えています。また、偏光の観測から乱れた磁場が示唆されるので、若干苦しいシナリオと言えます。

実は、他の天体でもフェルミ・バブルと似た構造が見つかっています。一つは他の銀河のバブル(ローブ)です。特に中心のブラックホールが活動している銀河ではバブルが付随していると予想されます。実際、フェルミ衛星によって電波銀河 Cen A の周りに200万光年もの巨大ローブが発見されました^{31), 3)}。しかしスペクトルはフェルミ・バブルのほうが硬く、違いがなぜ生じるのかはわかっていません。また、近傍の銀河に存在する太陽質量程度の小さいブラックホールにもX線ローブが見つかっています。こちらは熱的な放射が卓越しており、多様性の起源が謎となっています³²⁾。

5. 今後の展開

本稿は、フェルミ・バブル発見の興奮「いまだ冷めやらぬ」3名が、それぞれの視点と議論からその生成機構や銀河系中心の活動性について、熱い議論を展開しました。本稿3章で述べたとおり、銀河系中心の活動性に関する研究は、1970年代から常に日本が世界をリードしてきたテーマであり、今後もこの流れを絶やさない努力が必要です。以下では今後の戦略について、簡単にまとめてみたいと思います。

まずX線での観測ですが、ローサット衛星が2 keV以下で優れた全天マップを取得したことは2章で紹介したとおりです。このようなマップの取得は、現在主流である集光型の観測装置では視野が狭いため難しく、全天サーベイ型の新たな装置が必要です。幸い、日本には宇宙ステーション搭載の全天X線監視装置MAXIが2009年より稼

働しており、X線CCDカメラ（SSC）と大面積比例計数管（GSC）の連携で0.5 keVから30 keVの観測を始めています。MAXIの取得した全天マップを、フェルミ・バブルと定量比較することは近々に実現可能で非常に興味深いテーマです。

バブルのエッジ構造など、限られた視野をより深く観測するには「すざく」衛星が最適です。「すざく」は2005年に打ち上げられた日本で5番目のX線天文衛星で、広い観測エネルギー帯域（0.4-600 keV）と優れた感度を特徴とします。特に、検出器のバックグラウンドが低く安定していることから、「暗く」「広がった」放射の探査では米国チャンドラ衛星、欧州ニュートン衛星を大きく凌駕します。われわれは「すざく」7期目の公募観測において、北側バブル（8観測）・南側バブル（6観測）のエッジを横断する観測を提案し、いずれも採択されています。これにより、今までになく高感度かつ「2 keV以上の硬X線で」フェルミ・バブルの探査をすることが可能となります。今回の観測では南北ともに高銀緯をターゲットとし、北側はバブルとNPSが相互作用する（と期待される）エッジ部分を、南側はバブルの最南端を横断することで、その放射機構に迫ります。果たして、バブル内の宇宙線電子からの非熱的放射は発見され、X線でもシャープなエッジが見られるのでしょうか。「すざく」による早急な成果が待ち遠しいところです。将来的には、2014年に打ち上げ予定のAstro-H衛星による0.3-600 keVまでの高感度・広帯域X線観測が大きな期待を集めます。特にバブルがX線でも非常に硬いスペクトルをもつ場合、10 keV以上の領域で、硬X線撮像検出器（Hard X-ray Imager）の格好のターゲットになるかもしれません。

さらに長期的には、日本が大きな貢献をする国際協力プロジェクトCTA（Cherenkov Telescope Array）が現在進行中です。CTAは、世界で一つという大規模なTeVガンマ線望遠鏡群により、現在より1桁以上高い感度と、より広い観測エネ

ルギー領域（20 GeVから100 TeV以上）を達成しようとする野心的な計画です。現在、ヨーロッパを中心に急ピッチで検討が進んでおり、実現すればフェルミ衛星が発見したのと同程度の、1,000以上のTeVガンマ線天体の発見が期待されます。2章で述べたとおり、フェルミ・バブルは非常に「硬い」スペクトルをもち、10 GeVでも有意な折れ曲がり観測されていません。このまま放射が伸びればCTAでも十分検出が可能はずで、宇宙線加速をはじめとする、さまざまな新しい知見を与えてくれるはずです。

…最後に、少しばかり蛇足を。皆さんお気づきかと思いますが、フェルミ・バブルの形は某政党のロゴマークに驚くほどそっくりです！確認してみてください。今回のフェルミ・バブルのブームが、平成初頭のバブル景気や、某政党の人気のように「泡」と消えることがないように、心より祈っております！（筆者一同）

謝 辞

数十年先を見据えた先駆的なアイデアで分野を牽引し、本稿に対しても極めて有用なコメントをいただきました海部宣男氏・祖父江義明氏・小山勝二氏に心より感謝いたします。本稿の趣旨をよく理解し、さまざまな図の転載・使用を快諾してくれたハーバード大学のMeng Su氏、共同研究者である日本フェルミ衛星グループ・メンバー、特に水野恒史氏、また赤外観測における星形成の立場から有用なコメントをいただきました長田哲也氏、松永典之氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 片岡 淳, 高橋忠幸, 谷畑千春, 窪 秀利, 2002, 天文月報 95, 373
- 2) 片岡 淳, 2005, 天文月報 98, 680
- 3) 片岡 淳, 深沢泰司, Lukasz Stawarz, 佐藤理江, 林田将明, 2010, 天文月報 103, 486
- 4) 内山泰伸, 2010, 天文月報 103, 374
- 5) 片桐秀明, 内山泰伸, 釜江常好, 田島宏康, 田中孝明, 山崎 了, 2010, 天文月報 103, 438
- 6) 中森健之, 河合誠之, 金井義和, 高橋弘充, 2010, 天文月報 103, 324
- 7) 田中孝明, 河合誠之, 高橋弘充, 内山泰伸, 2010, 天文月報 103, 430
- 8) 水野恒史, 2010, 天文月報 103, 366
- 9) 深沢泰司, 片岡 淳, 高橋忠幸, 2010, 天文月報 103, 494
- 10) Dobler G., et al., 2010, ApJ 717, 825
- 11) Su M., et al., 2010, ApJ 724, 1044
- 12) http://www.nasa.gov/mission_pages/planck/news/planck20120213.html
- 13) Sofue Y., and Handa T., 1984, Nature 310, 568
- 14) Bland-Hawthorn J., Cohen M., 2003, ApJ 582, 246
- 15) Kaifu N., Kato T., Iguchi T., 1972, Nature 238, 105
- 16) Scoville N. Z., 1972, ApJ 175, L127
- 17) Sofue Y. 2000, ApJ 540, 224
- 18) 祖父江義明, 2006, 天文月報 99, 582
- 19) Koyama K., et al., 1996, PASJ 48, 249
- 20) Murakami H., et al., 2000, ApJ 534, 283
- 21) Nobukawa M., Ryu S. G., Tsuru T. G., Koyama K., 2011, ApJ 739, L52
- 22) Matsunaga N., et al., Nature 477, 188
- 23) Narayan R., McClintock J. E., 2005, ApJ 623, 1017
- 24) Totani T., 2006, PASJ 58, 965
- 25) Chang J. et al., 2008, Nature 456, 362
- 26) Cheng K. S., et al., 2011, ApJ 731, L17
- 27) Crocker R. M., Aharonian F., 2011, Phys. Rev. Lett. 106, 101102
- 28) Lunardini C., Razzaque S., 2011, Phys. Rev. Lett. 108, 221102
- 29) Cheng K. S., et al., 2012, ApJ 746, 116
- 30) Mertsch P., Sarkar S., 2011, Phys. Rev. Lett. 107, 091101
- 31) Abdo A., et al., 2010, Science 328, 725
- 32) Pakull M. W., Soria R., Motch C., 2010, Nature 466, 209

Giant Gamma-Ray Bubbles Discovered with Fermi-LAT: Probing the Past Activity of Our Galactic Center

Jun KATAOKA

Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

Tomonori TOTANI

Department of Astronomy, School of Science, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Kunihito IOKA

KEK Theory Center and the Graduate University for Advanced Studies, Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

Abstract: Fermi-LAT has discovered two giant gamma-ray bubbles, extending over 50 degrees above and below the Galactic center (GC). The morphology is spatially correlated with “WMAP haze,” and the edges of the bubbles also line up with North Polar Spur in the ROSAT X-ray maps. We discuss possible episode of creating such giant bubbles with energy injection of the GC in the past. A very hard gamma-ray spectrum suggests these bubbles are likely site of high energy cosmic-ray acceleration.