



2017年1月16日

報道関係者各位

慶應義塾大学

天の川を撃ち抜く超音速の『弾丸』を発見 — 正体は「野良ブラックホール」か? —

慶應義塾大学大学院理工学研究科の山田真也（やまだまさや・修士課程2年）と同理工学部物理学科 岡 朋治 教授らの研究チームは、国立天文台ASTE 10 m望遠鏡および野辺山45 m電波望遠鏡を用いて、天の川銀河の円盤部で発見された超高速分子ガス成分「Bullet（弾丸）」の電波分光観測を行い、その詳細な空間構造・運動・物理状態を明らかにしました。その結果、このBulletは5000年から8000年前に起きた局所的な現象によって駆動された（動かされた）成分である事が分かりました。Bulletの膨大な運動エネルギーと空間・速度構造、そして今現在この方向に天体が見られない事を考え合わせると、駆動源は一時的に活性化したブラックホールである可能性が高いと考えられます。現在、天の川銀河には、1億個から10億個のブラックホールが浮遊していると考えられています。今回の発見は、これまで観測する手段のなかった、伴星^{*1)}を持たない「野良ブラックホール」の存在を示唆する極めて先駆的なものです。

本研究成果は、1月1日発行の米国の天体物理学専門誌『The Astrophysical Journal Letters』オンライン版に掲載されました。

1. 本研究のポイント

- ・天の川銀河円盤部で発見された超高速分子ガス成分「Bullet（弾丸）」の詳細な分子スペクトル線観測を行い、その詳細な空間構造・運動・物理状態を明らかにした。
- ・Bullet内に極めてコンパクトな高速度成分とやや低速度の膨張運動を行う成分を確認、これは5000～8000年前に起きた局所的エネルギー注入の痕跡であると結論。
- ・上記の空間・速度構造と膨大な運動エネルギー、そして対応天体の不在から、Bulletの駆動源が一時的に活性化したブラックホールである可能性を指摘。

2. 研究背景

我々の住む天の川銀河には数千億個の恒星と大量の星間ガスが含まれ、中心付近に棒状構造を含む直径約10万光年の円盤構造をしています。この銀河系円盤部は約220 km/sの速度で回転しており、円盤部にあまねく広がった星間ガスが放つスペクトル線のドップラー偏移から、ガスの視線速度^{*2)}を観測する事ができます。星間ガスはさらに、近傍の大質量星からの星風や超新星爆発によって、その物理状態・化学組成とともに運動状態に影響を受けることが知られています。

研究チームは、1つの超新星爆発が星間ガスに与える運動エネルギーを精密に直接測定する目的で、太陽から約1万光年の距離にある超新星残骸W44の詳細な観測的研究を進めていました。その過程で、W44に付随する分子雲中に超新星残骸の膨張運動から大きくかけ離れた、空間的にコンパクトな高速度成分を発見しました（図1ab）。「Bullet（弾丸）」と名付けられたこの直径約2光年の高速度成分は、120 km/sもの異常な速度幅を呈し、天の川銀河の回転方向とは完全に逆方向の速度を有していました（2013年8月9日 慶應義塾大学プレスリリース）。この速度幅は、星間空間での音速を二桁以上上回るものです。

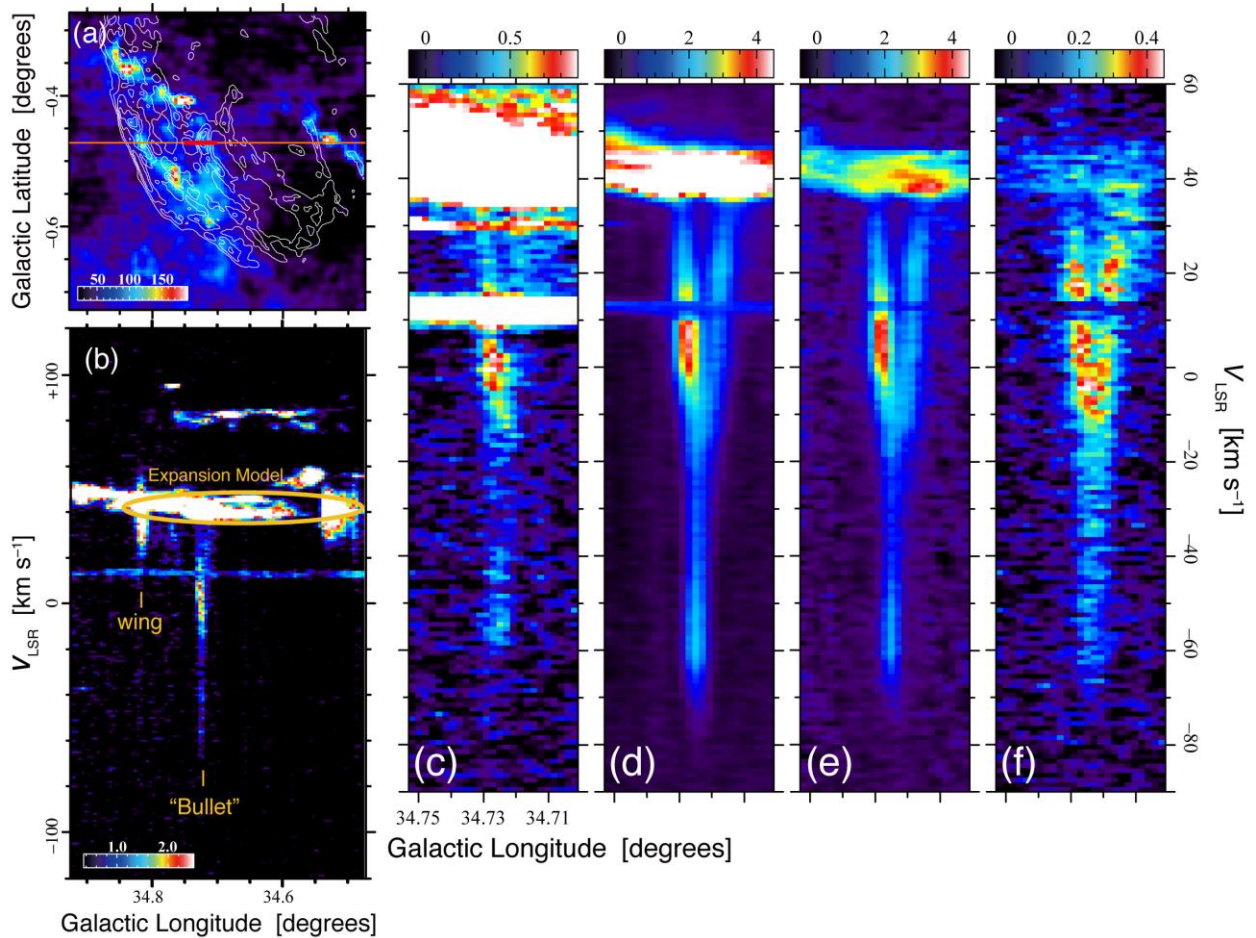


図 1) (a)超新星残骸 W44 方向の CO $J=3-2$ スペクトル線強度(カラー)と 1.4 GHz 連続波強度(等高線)の分布。(b) 銀緯 -0.472° における CO $J=3-2$ スペクトル線強度の銀経-速度図。(c-f) Bullet 部分の銀経-速度図。左から順に CO $J=1-0$ 、CO $J=3-2$ 、CO $J=4-3$ 、 $\text{HCO}^+ J=1-0$ 。銀経-速度図とは観測領域内の特定の位置でのガスの速度分布を示したものであり、この図で上下に伸びる構造は速度幅が非常に大きいことを示している。

3. 研究内容・成果

今回、研究チームは Bullet の起源を探る目的で、国立天文台 ASTE 10 m 望遠鏡および野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて、分子スペクトル線による詳細なイメージング観測を行いました。観測するスペクトル線としては、星間空間で比較的存在度の高い一酸化炭素分子(CO)とホルミルイオン(HCO^+)のそれぞれ複数の回転遷移スペクトル線を採用しました。同種分子の複数の遷移を測定する事で、分子ガスの密度や温度などの物理状態を評価する事ができます。

観測の結果、Bullet からは CO では観測した全ての遷移が検出される一方で、 HCO^+ スペクトル線は低エネルギー準位間遷移のみが検出されました。この状況は、同じ領域で検出される W44 超新星残骸に圧縮された分子ガスとは決定的に異なり、Bullet では圧縮過程よりも加熱過程の方がより効率的に働いている事を示しています。

同時に観測結果からは、Bullet の詳細な空間・速度構造が明らかにされました。その位置-速度空間での挙動は、明瞭な“Y”字型で特徴づけられます(図 1c-f)。この“Y”字の上部は速度約 50 km/s の膨張運動を現しています。一方で、下部の直線部分は観測の解像度(0.7 光年)以下の空間的広がりしか持たないコンパクトな構造でした。Bullet の質量は 7.5 太陽質量、運動エネルギーは 10^{48} erg^{※3)}

にも達し、膨張速度と大きさから計算される年齢は 5000～8000 年となります。これらの値は、これまで認識されているいかなる種類の天体でも説明が不可能です。

以上の観測事実から、研究チームは以下のような二つのシナリオを提案しています。

[爆発モデル]：超新星残骸の衝撃波が点状重力源を通過、衝撃波後方の高密度層の一部が重力源へと降着し、重力エネルギーが解放される（図 2a）。この過程（Bondi-Hoyle-Littleton 降着^{*4)}）によるエネルギー解放量は、重力源がブラックホールの場合に最大となり、Bullet の運動エネルギーを賄うためにはブラックホール質量は 3.5 太陽質量^{*5)}以上でなければならない。

[突入モデル]：高速の点状重力源が超新星衝撃波後方の高密度層に突入、重力で引き寄せられた部分が加速される（図 2b）。この過程も Bondi-Hoyle-Littleton 降着として定式化され、ガスに与えられるエネルギー量は、やはり重力源がブラックホールの場合に最大となる。Bullet の運動エネルギーを賄うためにはブラックホール質量は 36 太陽質量以上でなければならない。

上記いずれのシナリオにおいても、Bullet の駆動源としてブラックホールが本質的な役割を果たします。つまり現状で想定される Bullet の駆動源は、伴星を持たない単独のブラックホールであるという事になります。

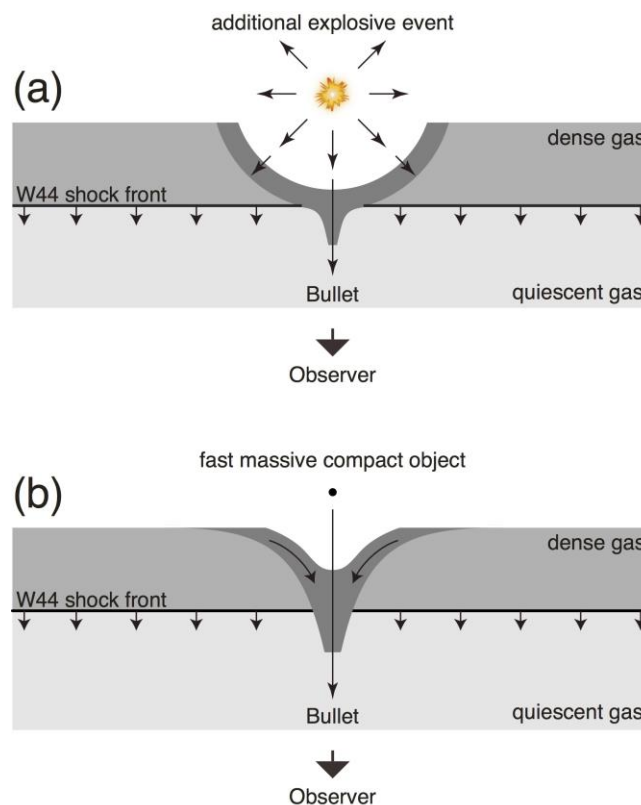


図 2) 二つの Bullet 形成シナリオの模式図。(a) 爆発モデル、(b) 突入モデル。

4. 今後の展開

現在の観測結果からは、Bullet がどちらのシナリオに沿って形成されたかを判断する事はできません。電波干渉計を使用した高解像度イメージングにより、ブラックホールのごく近傍からの電波放射が検出される可能性があります。それによって、ブラックホールと Bullet の正確な位置関係が明らかになり、Bullet 形成シナリオの判定が可能になるかもしれません。

理論的研究に基づくと、天の川銀河には1億個から10億個ものブラックホールが浮遊していると考えられています。一方で、現在ブラックホール候補天体として認識されている天体は60個ほどに過ぎません。つまり、ほとんどの天の川銀河内のブラックホールは、伴星を持たずに単独で浮遊する「野良ブラックホール」なのです。実際研究チームは、特異電波天体「宇宙竜巻」の駆動源もまたそのような野良ブラックホールである可能性を指摘しました(2014年8月18日 慶應義塾大学プレスリリース)。今回の研究によって、自らは明るく輝いていない野良ブラックホールの存在を確認する一つの手法が示されました。これによって、天の川銀河の中に無数に存在する同種天体の、研究の端緒が開かれたと言えます。



図3) 突入モデルに従った、Bullet 形成過程の模式図。

<原論文情報>

本研究成果は、1月1日発行の米国の天体物理学専門誌『The Astrophysical Journal Letters』に掲載されました。論文の題目、および著者と研究当時の所属は以下の通りです。

“Kinematics of Ultra-high-velocity Gas in the Expanding Molecular Shell adjacent to the W44 Supernova Remnant”

山田真也 (慶應義塾大学 大学院理工学研究科 修士課程2年)

岡 朋治 (慶應義塾大学 理工学部 物理学科 教授)

竹川俊也 (慶應義塾大学 大学院理工学研究科 博士課程2年)

岩田悠平 (慶應義塾大学 大学院理工学研究科 修士課程1年)

辻本志保 (慶應義塾大学 大学院理工学研究科 修士課程1年)

徳山碩斗 (慶應義塾大学 大学院理工学研究科 修士課程1年)

古澤舞子 (慶應義塾大学 大学院理工学研究科 修士課程1年)

田鍋圭介 (慶應義塾大学 大学院理工学研究科 修士課程1年)

野村真理子 (慶應義塾大学理工学部 物理学科 研究員)

『The Astrophysical Journal Letters』, January 1, vol.834, issue 1, L3, 6 pp. (2017)
電子版 (プレプリント) URL : <http://ads.nao.ac.jp/abs/2016arXiv161204503Y>
doi: 10.3847/2041-8213/834/1/L3

<リンク>

国立天文台野辺山宇宙電波観測所 <http://www.nro.nao.ac.jp>
野辺山 45m 電波望遠鏡 <http://www.nro.nao.ac.jp/public/teles.html#45m>
慶應義塾大学理工学部 岡 朋治研究室 <http://aysheaia.phys.keio.ac.jp/index.html>

<関連する研究発表>

- ・ 慶應義塾大学プレスリリース (2013年8月9日)
「星間分子雲中を通過する超新星衝撃波の"速度計測"に成功 『速度超過違反』ガスも発見」
https://www.keio.ac.jp/ja/press_release/2013/kr7a4300000ceiy8.html
- ・ 慶應義塾大学プレスリリース (2014年8月18日)
「謎の天体『宇宙竜巻』の駆動メカニズムを解明 分子雲衝突によるブラックホールの活性化」
https://www.keio.ac.jp/ja/press_release/2014/osa3qr0000007suu.html

<用語説明>

- ※1) 伴星 : 二つの恒星が両者の重心の周りを軌道運動している天体を「連星」とよび、通常は明るい方の星を「主星」、暗い方の星を「伴星」と呼ぶ。
- ※2) 視線速度 : 観測されるスペクトル線は、ドップラー効果により観測者との視線方向の相対速度に応じて周波数に変化する。この視線速度は、遠ざかる方向を正として、太陽系近傍にある恒星の平均速度を基準に表示される。
- ※3) erg (エルグ) : エネルギーの単位。1 erg = 10^{-7} J (ジュール)。
- ※4) Bondi-Hoyle-Lyttleton 降着流 : 点状重力源が媒質中を運動する時、近くの媒質が後方の「航跡」に集積された後、重力源へと降着する流れのこと。航跡において向かい合う流体素片同士が角運動量を打ち消し合うため、効率的な質量降着が行われる。F. Hoyle & R. A. Lyttleton (1939)、および H. Bondi & F. Hoyle (1944) によって定式化された。
- ※5) 太陽質量 : 天文学で使われる質量の単位。1 太陽質量 = 1.99×10^{30} kg。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・ 研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 教授 岡 朋治 (おか ともはる)
TEL : 045-566-1833 (携帯 : 090-6499-9129) E-mail : tomo@phys.keio.ac.jp
<http://aysheaia.phys.keio.ac.jp/index.html>

・ 本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (竹内)
TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640
Email : m-koho@adst.keio.ac.jp <http://www.keio.ac.jp/>