

称号及び氏名 博士(理学) 小西 諒太郎

学位授与の日付 2023年3月31日

論文名 Triggering Mechanism of the Central Starburst and Roles of the Magnetic Fields in NGC 253  
(NGC 253 中心部におけるスターバースト誘発機構と磁場の役割の解明)

論文審査委員 主査 大西 利和  
副査 細越 裕子  
副査 三浦 大助  
副査 村岡 和幸

# Triggering Mechanism of the Central Starburst and Roles of the Magnetic Fields in NGC 253

(NGC 253中心部におけるスターバースト誘発機構と磁場の役割の解明)

大阪府立大学大学院 理学系研究科  
物理科学専攻 博士後期課程  
小西諒太郎

## 背景と研究目的

宇宙には多種多様な銀河が存在する。中でも、短期間に多量の星を生み出すことで銀河の力学・化学進化を劇的に進めるスターバースト銀河の起源を理解することは宇宙史における銀河の進化を明らかにする上で重要である。NGC 253は銀河中心部でスターバーストを起こしている最も距離の近い銀河である。NGC 253中心部では、活発な星形成活動に起因する星風や超新星爆発によってスターバーストアウトフローと呼ばれる銀河面外に吹き飛ばされた水素分子ガスが観測されているため(e.g., Bolatto et al. 2013)、スターバーストが分子ガスの空間・速度分布を支配するという説がある。一方、星形成が不活発でスターバーストを起こしていない天の川銀河(我々人類が住む銀河)とNGC 253で銀河中心分子層(中心部直径数百pcの分子ガス集中領域)のサイズやガス密度分布が類似することから、分子ガスはスターバーストの影響を受けないという説も存在する(Sakamoto et al. 2011)。このように一見矛盾した二つの説が提案される背景には、星形成に関与する母体分子雲と星団によって吹き上げられたガスが入り混じることで銀河中心分子層のガスの空間・速度分布が複雑になっていることに加え、スターバーストを誘発するプロセスが明らかになっていないという問題がある。

スターバースト誘発プロセスとして、天の川銀河中心部の研究から、磁気ループによる分子雲衝突モデルが有望視されている。銀河には一般に磁場が存在しており星間ガスは弱電離しているため、磁場は星間ガスに凍結している。銀河円盤部よりガス密度の高い銀河中心部では磁場の強さも銀河円盤部より一桁以上高くなっており、磁気浮力で形成されたループ状磁場がガスを持ち上げる。それらが磁力線に沿って落下し、根元で追突することでミニスターバーストを誘発するというメカニズムが磁気ループモデルである(e.g., Fukui et al. 2006, Enokiya & Fukui 2022)。このメカニズムが系外銀河においても普遍的であるかは、望遠鏡の分解能不足が原因でこれまで不明であったが、近年ALMA望遠鏡が登場したことで距離の近い銀河であれば10 pcを切る視力が得られるため検証が可能となった。

本論文は、ALMA望遠鏡の観測データを駆使することでNGC 253中心部のガスダイナミクスを明らかにし、星形成活動と合わせて理解することで、銀河中心部におけるスターバーストの誘発起源と磁場の役割を解明する。そのために、1. 銀河中心部の幾何構造の解明、2. 星形成のホットスポットの同定、3. 銀河中心部の加速されたガスを駆動するエネルギー源の探査、の三つの研究を行った。一つ目の研究では、物理的・化学的性質の異なる分子ガスをグループ化していくつかの構造に分離することで、相互作用するガスと視線上に偶然重な

ったガスとを分離し、幾何モデルを推定した。二つ目の研究では、一つ目の研究で検討されたガスの幾何モデルと星形成領域とを比較することで星形成が起こりやすくなる環境や条件を考察し、三つ目の研究では幾何構造の一部分である加速されたガスに注目することで磁気活動の影響が見られるかどうかを検証した。

## 研究1. 一酸化炭素輝線データを用いたNGC 253中心分子層の三次元幾何構造の推定

研究1では、水素分子ガス量のトレーサーである一酸化炭素(CO)輝線データから位置-位置-速度空間上で一続きのガス構造(コヒーレント構造)を抽出することで、NGC 253中心分子層を構成する主要ガスの幾何構造と運動を理解した。

分子ガスが高温・高密度になっている銀河中心分子層ではガスの励起状態が高いため、回転準位の高い $^{12}\text{CO}(3-2)$ 輝線でコヒーレント構造を同定するのが望ましい。しかし、 $^{12}\text{CO}(3-2)$ は光学的に厚いため視線方向上に複数のコヒーレント構造が重なり合っており、分離は不可能であった。そこでまず、光学的に薄く、分子ガスの骨格に対応する低温高密度ガスをトレースする $^{13}\text{CO}(1-0)$ 輝線データを用いて銀河中心分子層を形作る主要なコヒーレント構造のそれぞれの領域を決定した。その後、 $^{12}\text{CO}(3-2)$ データから上記のコヒーレント領域を差し引いた残差データを作成し、その中から新たな高励起のコヒーレント構造を同定した。最後に、低励起ガスを捉える $^{12}\text{CO}(1-0)$ 輝線データでも同様の操作を行い、低励起のコヒーレント構造を同定した。同定は、逆正接関数と直線関数でフィッティングできる一続きの構造に対して行い、伸びた構造のストリームと塊状のクランプに分類した。

同定の結果、コヒーレント構造は14のクランプと14のストリームに分類され、大部分は銀河回転運動を示した。回転運動を示すコヒーレント構造の総体は二重リング構造をしており、二つのリングの間は薄いガスで満たされ、内側リングの内部は高密度ガスで満たされていた。この高密度領域にはさらに密度が高い中央スターバースト領域が存在していることがわかった。また、大部分のクランプは、ストリーム構造同士を繋ぐブリッジとして存在していることがわかった。

## 研究2. 分子励起状態と高密度ガス分布を用いた星形成ホットスポットの同定

研究2では、研究1で同定されたコヒーレント構造と星形成領域とを比較することでスターバーストの誘発機構を検討した。

分子ガスは衝撃波によって圧縮されると、高密度ガスの生成が促進されガスの励起状態が高くなり、最終的に星形成が活性化する。各コヒーレント構造が上記のどの進化段階にあるのかを調べるために、衝撃波ガス、高密度ガス、高励起ガスのそれぞれのトレーサーとして用いられる、HCN(4-3)、SiO(2-1)、 $^{12}\text{CO}(3-2)/^{12}\text{CO}(1-0)$ 輝線強度比データの分布を調べ、コヒーレント構造と比較した。また、研究1で得た幾何構造のどこに高密度ガス領域や星形成領域が集中するのか調べた。

その結果、星形成ホットスポットはコヒーレント構造同士の接続点と中央スターバースト領域でのみ発見された。また、衝撃波はコヒーレント構造同士の接続点でのみ検出され、ガスの励起状態は銀河中心に近いほど高いことがわかった。これらの結果から、どちらのホットスポットも分子雲衝突を通して星形成が誘発されており、コヒーレント構造同士の接続点

では高速度衝突で、中央スターバースト領域では高効率なガス供給で星形成が活発化されていることがわかった。

### 研究3. 分子ガスストリームの駆動源の解明

銀河中心部には銀河回転運動を行う主要ガス成分以外に特異な速度分布を持つガスが存在する。研究3では、特異な速度分布を示すコヒーレント構造(ストリーム5の一部)に着目し、その加速源について検討した。

この構造はループ状の空間分布を示し、銀河中心分子層のガス質量の4%を占めている。その両端(両根元)はガス視線速度の分散が増大しており、両根元を繋ぐループブリッジ領域は線形な速度勾配を示した。さらに $^{12}\text{CO}(3-2)/^{12}\text{CO}(1-0)$ 輝線強度比から、両根元に高励起ガスの付随が確認された。

このような特異な空間・速度構造や高励起ガスの形成機構として棒状星分布による重力ポテンシャルモデル(e.g., Binney et al. 1991)や超新星爆発モデル(e.g., Bolatto et al. 2013)、磁気浮上モデル(e.g., Fukui et al. 2006)等を検討した。その結果、NGC 253の棒状星分布ではループを十分に加速できず、超新星爆発モデルはループの線形な速度構造と力学エネルギーを説明できなかったが、磁気浮上モデルは観測とよく整合することがわかった。磁気ループの生成に必要な推定磁場強度0.5 mGは、天の川銀河中心部の磁場強度よりも低かった。天の川銀河中心部よりNGC253中心部の方が磁場強度が高いと考えられるため、磁気ループがNGC 253 中心部の環境で十分生成可能であることがわかった。本研究から、磁気浮上によって加速されたコヒーレント構造を系外銀河で初めて検出した。

### 議論とまとめ

天の川銀河と比較して、NGC 253では中心分子層のコヒーレント構造の銀河回転速度は0.7倍で、外縁部にも豊富にガスが存在していた。つまり、NGC 253ではガスの銀河回転速度が小さいためガスが中心部に落ちやすく、外縁部から銀河中心への質量供給が現在も続いているために密度が上昇し、星形成が促進されていると考えられる。また、天の川銀河の磁気ループに比べNGC 253のループでは根元のガス密度が一桁ほど高く、星形成が起きやすい環境であることがわかった。Enokiya & Fukui (2022)は、天の川銀河中心部において磁気ループの根元もしくはストリームの接合点で分子雲衝突が起きて星団が形成されると提案したが、今回の観測結果はその延長として衝突速度が速い場合にはスターバーストが誘発されることを示した。

これまでのNGC 253中心部の研究では、ガス運動の起源を考える際に星団の影響のみが考慮されてきたが、本研究から磁場がスターバースト誘発機構の一因となっていることがわかった。また、同定された全てのコヒーレント構造にうねり構造が検出されたことから、磁場がガスの運動に与える影響は大きいと考えられる。観測、磁気流体力学シミュレーションを通して、磁場が銀河中心部で常に、活発な星形成を生み出す要因となっていることが確かめられた場合、その影響は銀河中心分子層の進化を理解する上で欠かせないものとなるだろう。

## 文献リスト

### [論文雑誌]

1. “Discovery of a Giant Molecular Loop in the Central Region of NGC 253”,  
**R. Konishi**, R. Enokiya, Y. Fukui, K. Muraoka, K. Tokuda, and T. Onishi,  
The Astrophysical Journal, 929, 63, (16pp), 2022
2. “Tracing Coherent Gas Structures in the Central Region of the Starburst Galaxy NGC 253 I: position-position-velocity gas distribution”,  
R. Enokiya, **R. Konishi**, Y. Fukui, K. Tachihara, K. Muraoka, and T. Onishi,  
The Astrophysical Journal submitted, 2023
3. “Tracing Coherent Gas Structures in the Central Region of the Starburst Galaxy NGC 253 II: gas excitation and star formation”,  
**R. Konishi**, R. Enokiya, Y. Fukui, K. Tachihara, K. Muraoka, and T. Onishi,  
The Astrophysical Journal submitted, 2023

# 学位論文審査結果の要旨

学位論文題目

Triggering Mechanism of the Central Starburst and  
Roles of the Magnetic Fields in NGC 253

(NGC 253中心部におけるスターバースト誘発機構と磁場の役割の解明)

提出者氏名 小西 諒太郎

我々の銀河系では、1年あたり数個程度（星形成率: 数太陽質量/年）の恒星が形成されている。一方、星形成率が10-1000太陽質量/年、と星が非常に活発に形成されている銀河もあり、「スターバースト銀河」と呼ばれている。力学的・化学的進化が劇的に進むため、宇宙史における銀河の進化を解明する上で非常に重要な天体である。スターバースト銀河には、銀河衝突の相互作用領域で激しい星形成を示すものと、中心部のみで爆発的な星形成を起こすものがある。後者のスターバーストの起源については、長年にわたって盛んに議論されてきたが、いまだ未解決の問題となっている。ALMA 望遠鏡の登場により、遠方に存在するスターバースト銀河の中心部の分子ガスの分布を空間分解して観測することがようやく可能となってきた。

本論文では、中心部でスターバーストが確認されている銀河 NGC253 の ALMA での高分解能観測データの解析を行った。中心部のガスダイナミクスを明らかにし、星形成活動と合わせて理解することで、銀河中心部におけるスターバーストの誘発起源と磁場の役割を解明することを目的としている。活発な星形成活動の原因として、大質量星の形成に伴う大規模な星風等によるフィードバック効果（誘発的星形成）や、星間ガス雲同士の衝突・圧縮の効果が考えられている。申請者は、電波観測で得られる分子ガスの視線方向の速度を利用して、視線上に重なった構造を分離し、その幾何構造と運動を明らかにした。それぞれの独立した分子ガス構造が接続する点には高密度ガスが集中しており、ガスの励起状態も高かった。これは、分子ガスの構造同士の接続点で生じる分子雲衝突によって衝撃波が発生し、分子ガスの高密度化・高励起化が起これ、爆発的な星形成に至った、と解釈することができる。さらに、特異な速度分布を持つループ状の構造に着目し、その特異な空間・速度構造やそこでみられる高励起ガスは、磁場が強い銀河系中心部で見つかっている磁気浮上ループと同様の性質を示していることを明らかにした。銀河面に存在するフィラメント（紐）状の分子雲の中心部が、磁場によって浮上することによりループ状となり、浮上した中心部からループの両端に分子ガスが落下することにより、分子雲同士の衝突が起これ、そこで星形成が活発になっていることを提案した。

以上のように本研究は、スターバースト銀河中心部の速度構造や力学エネルギーに磁場が大きく関与しており、それが大規模な星形成の原因になっていることを示した重要な研究であると考えられる。

以上により、本委員会は本論文を学位論文として十分な内容を有しているものとして判断した。

主査 大西 利和  
細越 裕子  
三浦 大助  
村岡 和幸