

NGC 4039の潮汐腕における 巨大分子雲と星形成

ダニエル エスパダ

〈国立天文台チリ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: daniel.espada@nao.ac.jp



衝突銀河における潮汐腕は、準静的な渦状腕とは異なる環境下での分子雲形成とそれに続く星形成活動を研究する良い材料である。私たちは、アルマ望遠鏡の科学評価観測で得られた触角銀河のCO(2-1)輝線のデータから、潮汐により形成されたと思われる分子雲ガスの腕をNGC 4039の南側とオーバーラップ領域の間に発見した。この腕は長さ3.4キロパーセク、幅 ≤ 200 パーセク、典型的な速度幅 $\Delta V \approx 10-20$ km/sをもっている。腕に沿って10個の塊が分布しており、そのほとんどは分解できていない。塊の平均面密度は1平方パーセクあたり10-100太陽質量、質量は $(1-8) \times 10 M_{\odot}$ であった。これらの構造は糸に通したビーズのような分布をしており、それぞれの「ビーズ」の間隔は約350パーセクであった。これは巨大分子雲の典型的な間隔に近い。また今回発見した構造の6" (600パーセク) 分解能での星形成効率は、円盤銀河や他の潮汐腕などのそれに比べておよそ10倍高いものであった。空間分布と運動解析からこの腕はNGC 4039の西側の渦状腕とつながっていると考えられるが、高解像度シミュレーションで予言される構造とは形状が異なっている。

1. はじめに

私たちが住む太陽系は、天の川銀河の一員である。天の川銀河は、太陽のような恒星が約1,000億個と大量の星間物質（原子／分子ガスや星間塵）からなっている。そして天の川銀河の外には、さまざまな性質をもつ銀河が数千億個も存在すると考えられている。これら銀河の性質、あるいは銀河の成長を考えるうえで欠かせないのは、銀河同士の衝突だ。私たちが住む天の川銀河も将来的にはアンドロメダ銀河と衝突するといわれているが、宇宙にはまさに衝突しつつある銀河が数多く見つかっている。銀河が衝突したときに何が起きるのか、それを明らかにするために観測と数値シミュレーションで盛んに研究が行われている。

銀河衝突が起きると、潮汐作用によって銀河の形がゆがみ、新たな腕が形成されることがある。

こうしてできた腕に含まれるガスの性質や星形成活動の様子は、密度波理論（例えば文献1）などで予想される「普通の」銀河の腕とは異なっていると考えられている。潮汐腕の形成は衝突銀河における星形成率（SFR）を高めると考えられていることもあり²⁾、分子雲の分裂や星形成過程の解明にとって、潮汐腕に含まれる分子雲についての研究は重要である。銀河衝突に伴って長く伸びるテイル（潮汐テイル）については、これまで中性水素が放つ電波でよく観測されている。しかしそうした潮汐テイルの中では、CO分子輝線でトレースされる分子ガスは数個の不連続な塊でのみ検出される³⁾⁻⁵⁾。驚くべきことに、こうした衝突銀河の「かけら」における星形成活動は銀河円盤部とほぼ同程度と推測されている⁶⁾⁻⁸⁾。

衝突銀河のうち最もよく研究されているのは、触角銀河（NGC 4038/9、図1）だろう。これは触

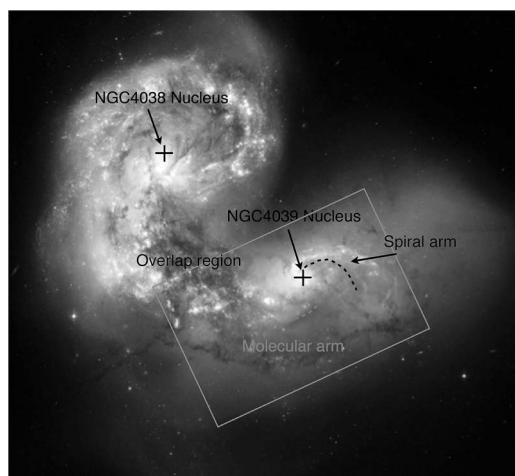


図1 ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した触角銀河³⁷⁾. NGC 4038/9の中心核とオーバーラップ領域, NGC 4039の渦状腕と今回の観測で発見された潮汐腕を示している. 図中の長方形が今回の観測領域.

角銀河がわずか22メガパーセクと近い位置にあり⁹⁾, 高解像度(1秒角がおおよそ100パーセクに相当)観測で潮汐腕の分子ガスの様子を詳しく調べることが可能だからである. 触角銀河を構成する二つの渦巻銀河はおおよそ4億~6億年前に衝突したと考えられており^{2), 10)}, 巨大な銀河同士が衝突する「メジャーメジャー」のうち最も「若い」例の一つである. 中性水素ガスの潮汐テイルは南北に約70キロパーセクと大きく伸びており¹¹⁾, 数値シミュレーションのパラメータを制限するのによく使われている²⁾.

CO分子の低励起輝線($J=3-2$ 以下)による触角銀河の高解像度($<5''$)観測は, オーウェンズバレー干渉計(OVRO), プラトロー・デ・ビュール干渉計(PdBI), サブミリ波干渉計(SMA)によって行われている¹²⁾⁻¹⁴⁾. CO分子輝線でトレースされる分子ガスはおもにNGC 4038/9の二つの中心核の周り, NGC 4038の西側, 二つの銀河が重なっている部分に分布しており, 多くのスーパースタークラスターを伴っている¹⁵⁾.

本稿では, NGC 4039で初めて見つかった潮汐

腕の分子ガスの性質について報告する¹⁶⁾. この潮汐腕は非常に細長く伸びており, フィラメント構造の中での巨大分子雲形成について議論する格好の材料である.

2. アルマ望遠鏡によるCO(2-1)輝線の観測

本研究で私たちは, アルマ望遠鏡の科学評価(Science Verification)観測で取得された触角銀河のCO(2-1)輝線データを解析した. このデータは一般に公開されており, アルマ望遠鏡のサイエンスポータルから入手することができる. ここでは簡単に観測とデータ解析の概要を述べる. 観測は, 14台の直径12 mアンテナとバンド6受信機を用いて2011年5月と6月に行われた. 触角銀河を構成する二つの銀河をカバーするため, 南側の銀河は17視野, 北側の銀河は13視野を並べるモザイク観測を行っている. 本稿では, このうち南の銀河NGC 4039と二つの銀河が重なった領域(オーバーラップ領域)を含む南側のモザイクデータの解析結果について述べる. 干渉計の分解能は $1''.68 \times 0''.85$, 観測領域の大きさはおおよそ $1'.5 \times 0'.9$ である(図1).

3. 分子ガス腕の分布と運動

CO(2-1)輝線の積分強度図を図2に示す. CO分子輝線は特にNGC 4039の中心部と二つの銀河が重なり合うオーバーラップ領域で強いことがわかる. オーバーラップ領域でのガスの分布は大きく分けて五つの分子雲複合体に集中しており, その場所はアルマ望遠鏡で観測したCO(3-2)輝線のマップや他の望遠鏡によるCO輝線観測結果とよく一致する¹²⁾⁻¹⁴⁾.

CO(2-1)マップ(図2)には, NGC 4039からオーバーラップ領域にかけて伸びる1本の腕状の構造が見て取れる. その長さは34秒角であり, 触角銀河の距離では3.4キロパーセクに相当する. この腕状構造は部分的には南北方向に分解さ

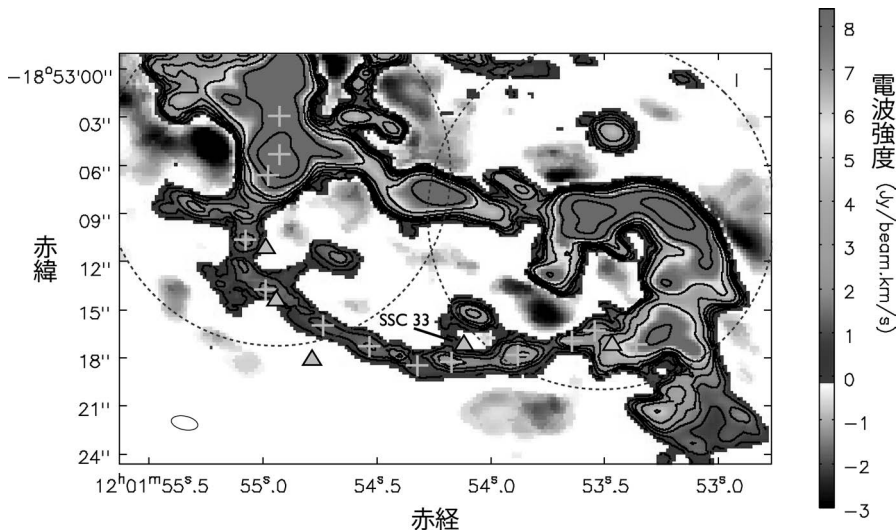


図2 腕状構造周辺のCO(2-1)輝線積分強度図. 十字印は局所的な温度のピークが見られる箇所, 三角形は潮汐腕に沿って存在するスーパースタークラスターの位置を示す. 年齢が見積もられたSSC 33にもラベルを付けている. 図3に示す星形成則で「腕状構造」に分類しているのは, この図の破線の円に含まれない領域である.

れているが, 典型的には: 200パーセクの分解能では分解できないほど細いものである. この腕状構造のCO(2-1)エネルギー流束は60 Jy km/sであり, 南側のモザイク領域の全エネルギー流束の4%を占める. 同じ構造はアルマ望遠鏡で観測されたCO(3-2)輝線マップでも部分的には見えているが, シグナル・ノイズ比はずっと低い. これはNGC 4039やオーバーラップ領域から遠い領域では高い励起状態まで一酸化炭素が励起されにくいことによるものと考えられる.

この腕状構造の速度は1,600-1,750 km/sまで分布しているが, 個々の点での速度分散は10-20 km/s程度である. これは, フェイス・オンの他の銀河円盤に含まれる分子雲での値(5-10 km/s, 文献17)に比べてやや大きい. オーバーラップ領域では, ~70 km/sにも及ぶ大きな速度分散が観測されており, これは過去の結果^{13), 14)}と一致する. 腕状構造の中心速度は場所によって連続的かつ緩やかに変化し, その範囲は1,650-1,750 km/sである. この中心速度の変化はNGC 4039の渦状腕へと連続的につながっている

が, オーバーラップ領域の最も明るい巨大分子雲複合体には複数の速度をもつ成分が重なっていて, 腕状構造とのつながりは不明瞭である.

CO(2-1)輝線から推測される腕状構造の水素分子ガスの面密度は, 典型的には1平方パーセクあたり10-100太陽質量であった. 一方オーバーラップ領域では1平方パーセクあたり1,000太陽質量にも及ぶ高い面密度をもっていることがわかった.

図2に示したとおり, 腕状構造に沿って10個程度の分子ガス塊があることが分かった. これらの塊の質量は $1-8 \times 10^6$ 太陽質量であり, 大質量のものはNGC 4039に近い位置に分布している. 同じくCO(2-1)輝線の観測から, 文献14は分子雲の質量分布に明瞭な折れ曲がりを見出した. $\sim 3 \times 10^6$ 太陽質量よりも大質量の側は, 活発な星形成活動を起している. 今回腕状構造の中に見つかった分子ガス塊の質量は, この折れ曲がりの質量をまたいで両側に分布している. また, 分子ガス塊の大きさが約100パーセク, 典型的な速度分散が10 km/sであることから, ビリアル質量は

7×10^6 太陽質量となる。つまり、CO(2-1) 輝線の積分強度から求めた質量とビリアル質量が近いことから、NGC 4039に近い分子ガス塊はほぼ重力的に束縛されていると考えられる。より高い分解能での観測を行うことで、これらの分子ガスの物理的性質についてより詳しく知ることができるだろう。

これらの分子ガス塊の間隔（各塊の輝線積分強度ピーク間隔）は、視線に対する銀河の傾きが無視できると考えれば、どれもほぼ同じで約350パーセクであることがわかった。これは、文献18で予言された分子雲腕に沿った「ひもに通したビーズ構造」とよく似た構造である。典型的な長さ350パーセク、幅200パーセクとすると、各塊の長さに対する幅の比 λ/D はおおよそ2である。

このように等間隔でフィラメント状構造が分裂する、という現象は、銀河の腕スケールよりもっと小さいスケール（例えば個々の星を作る分子雲コアの分裂など）で話題にされることが多い。もしこの分裂が自己重力によるものだとすれば、隣り合う塊の間隔はおおよそジーンズ長になるはずである。ジーンズ長はガス圧（熱運動による圧力と乱流による圧力）、磁場の強さ、および回転速度に依存する。モデル計算によれば λ/D は典型的には2-4となり、より回転が速い場合や磁場が強い場合には小さな値となる^{19), 20)}。上で議論した今回の観測結果は、このモデル計算とよく一致する。

このような分子ガスの腕で見られるフィラメント状構造は、巨大分子雲複合体の典型的な間隔を知るための良い材料である。つまり、パーセクスケールからキロパーセクスケールに至る分子ガスの分裂における典型的なサイズスケールを知ることができるのだ。天の川銀河におけるフィラメント状分子雲の観測からは、分裂の間隔はフィラメント直径の約3倍であることが知られている²¹⁾。天の川銀河や近傍銀河における巨大分子雲複合体の間隔は大きなばらつきがあり、数百パーセクから1キロパーセクに及ぶ^{22), 23)}。星形成領域はこ

れより大きなスケールでビーズ状に連なっており、典型的には数キロパーセクの間隔と0.5-1キロパーセクの直径をもっている^{18), 24)-26)}。

今回発見した腕状構造の特徴は、衝突していない普通の銀河の渦状腕のそれによく一致する。しかし腕状構造の幅だけは、Hアルファ線の観測から求められる渦状腕の典型的な幅（400-1,500パーセク）よりも狭くなっている²⁷⁾。この腕状構造については天球面上の傾きが不明であるものの、一つのピッチアングルで再現することは難しいため、この構造は銀河衝突に伴う潮汐作用によって作られた、あるいは少なくともその影響を受けたものであろうと考えている。

4. 星形成則と星団の形成

腕状構造の中の星形成活動を調べるために、遠紫外線と波長24マイクロメートルの赤外線画像から1平方キロパーセクあたりの星形成率(Σ_{SFR})を求めた。紫外線のデータはNearby Galaxy Survey²⁸⁾で得られたものをもとに星間減光も考慮して用いた。24マイクロメートルのデータは、スピッツァー赤外線望遠鏡の赤外線カメラMIPSで得られたものを使っている²⁹⁾。

図3に、今回の観測で得られた星形成率とガスの面密度の関係を示す。図中には、星形成効率一定の線も同時に示している。今回の観測範囲内のほとんどの領域は、星形成効率 10^{-7} - 10^{-9} yr⁻¹の間に入っている。今回発見された腕状構造全体を平均した星形成効率は $\log(\text{SFE} [\text{yr}^{-1}]) = -8.2 \pm 0.3$ であり、これはNGC 4039領域のそれ($\log(\text{SFE} [\text{yr}^{-1}]) = -8.8 \pm 0.3$)と同程度であるが、オーバーラップ領域よりは1桁ほど小さい。一方、普通の銀河における平均的な星形成効率は $\log(\text{SFE} [\text{yr}^{-1}]) = -9.3$ ^{30), 31)}であるから、これよりは数倍程度大きいことになる。

触角銀河には、若くて明るい星団が少なくとも700個知られている^{15), 32)}。しかし、今回発見された腕状構造の周りではスーパースタークラス

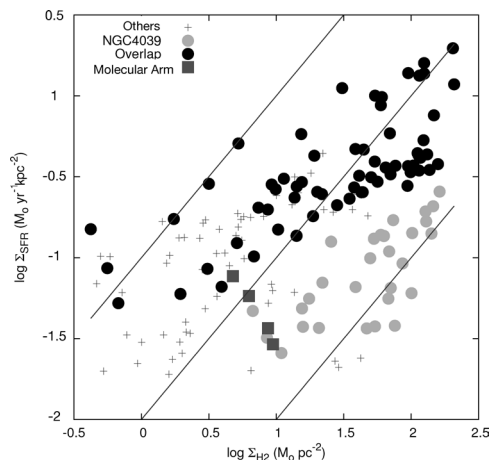


図3 1平方キロパーセクあたりの星形成率（SFR、縦軸）とH₂面密度（横軸）の関係（シュミット・ケニカット則）。四角が今回発見された潮汐腕，濃い丸印がオーバーラップ領域，薄い丸印がNGC 4039を示す。観測領域内の他の場所は十字印で示されている。直線は星形成効率一定の線を表し，上から 10^{-7} 、 10^{-8} 、 10^{-9} yr⁻¹である。

ターは5個しか知られておらず，他の領域に比べてその密度は明らかに低い（図2）。この五つのスーパースタークラスターの一つSSC 33の年齢は1,000万年以下であると見積もられている¹⁵⁾。SSC 33はまだ若く，そして腕状構造にも近いことから，腕状構造に含まれる巨大な分子雲複合体に付随していると考えられる。

5. 腕状構造の起源について

今回発見された腕状構造の速度が場所によって緩やかに連続的に変化していることは，この腕状構造がNGC 4039の渦状腕につながるひとまとまりの構造であるということを示していると考えられる。この連続性を考えると，今回発見された腕状構造は，北側の銀河NGC 4038の近傍通過に伴う潮汐作用によって作られたものだと考えるのが妥当である。ハッブル宇宙望遠鏡を用いた観測³³⁾ではこの腕状構造に相当する部分が暗黒星雲として見えており，この論文の筆者は腕状構造はやが

て元の銀河に落ちていくだろうと考えている。

もしこの腕状構造が中性水素原子ガスと分子ガスの両方をもっているなら，中性水素もこの領域に分布しているはずだが，それは観測事実とは一致しない。中性水素の観測は今回のCO(2-1)輝線観測よりも分解能が10倍悪いものしかないが，腕状構造に一致するような構造は見えていない¹¹⁾。潮汐作用以外にこのような腕状構造を作るメカニズムとしては，激しい星形成活動に伴うバブルが挙げられる。しかし，今回観測された腕状構造を作るには超新星爆発1,000万回分のエネルギーが必要であることから，この可能性は考えにくい。

では触角銀河の高解像度シミュレーションと今回の観測結果を比べてみよう。輻射による冷却や星形成，超新星爆発の効果を取り入れ衝突軌道も最新のものをを用いた分解能70パーセクのシミュレーション³⁴⁾では，観測された全体的なガスの分布や速度分布，星形成率をよく再現できている。しかし，中性水素の観測結果に比べてシミュレーションの結果では南側の円盤にかなり多くのガスが含まれている。これはガスの大部分が原子ではなく分子の状態にあるからだろう，と文献34では推測されている。アルマ望遠鏡の観測では，確かに中性水素原子ガスがあまり分布していない領域にも分子ガスが検出されているが，その分布はシミュレーションとは異なっている。一方シミュレーション結果には，オーバーラップ領域を横切ってその東側に伸びるフィラメント状構造が見えている。この構造はシミュレーションで示された若い星の分布にも見えているが，より大きなスケールで見ると，中性水素で見えている北側の潮汐テイルからNGC 4039の東側まで伸びているように見える。これは，今回発見された腕状構造が中性水素の潮汐テイルにつながっている可能性を示唆するものである。観測された構造とより詳細な比較をするためには，数値シミュレーションによるさらなる探究が必要である。

アルマ望遠鏡の高い感度によって，これまで知

られていなかった暗い構造までとらえることができるようになった。今回発見された腕状構造は、衝突銀河では幅広く見られるものかもしれない。アタカマコンパクトアレイ³⁵⁾によって短い基線のデータを取ることができれば、大きく広がった腕状構造のガスの分布や速度構造をより精度よく観測できる。さらなる研究の進展が楽しみである。

(翻訳監修: 平松正顕)

参考文献

- 1) Dobbs C. L., 2011, EAS Publications Series 52, 87
- 2) Teyssier R., Chapon D., Bournaud F., 2010, ApJ 720, L149
- 3) Taylor C. L., Walter F., Yun M. S., 2001, ApJ 562, L43
- 4) Lisenfeld U., Braine J., Duc P.-A., et al., 2004, A&A 426, 471
- 5) Walter F., Martin C. L., Ott J., 2006, AJ 132, 2289
- 6) Braine J., Duc P.-A., Lisenfeld U., et al., 2001, A&A 378, 51
- 7) Boquien M., Lisenfeld U., Duc P.-A., et al., 2011, A&A 533, A19
- 8) Duc P.-A., Renaud F., 2013, LNP 861, 327
- 9) Schweizer F., Burns C. R., Madore B. F., et al., 2008, AJ 136, 1482
- 10) Mihos J. C., Bothun G. D., Richstone D. O., 1993, ApJ 418, 82
- 11) Hibbard J. E., van der Hulst J. M., Barnes J. E., Rich R. M., 2001, AJ 122, 2969
- 12) Wilson C. D., Scoville N., Madden S. C., Charmandaris V., 2000, ApJ 542, 120
- 13) Ueda J., Iono D., Petitpas G., et al., 2012, ApJ 745, 65
- 14) Wei, L. H., Keto E., Ho L. C., 2012, ApJ 750, 136
- 15) Whitmore B. C., Schweizer F., 1995, AJ 109, 960
- 16) Espada D., Komugi S., Muller E., et al. 2012, ApJ 760, 25
- 17) Combes F., Bécuquart J.-F., 1997, A&A 326, 554
- 18) Elmegreen B. G., Elmegreen D. M., 1983, MNRAS 203, 31
- 19) Nakamura F., Hanawa T., Nakano T., 1993, PASJ 45, 551
- 20) Hanawa T., Nakamura F., Matsumoto T., et al., 1993, ApJ 404, L83
- 21) Schneider S., Elmegreen B. G., 1979, ApJS 41, 87
- 22) Blitz, L., 1993, in Protostars and Planets III, ed. E. H. Levy & J. I. Lunine (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 125
- 23) Koda J., Sawada T., Hasegawa T., Scoville N.Z., 2006, ApJ 638, 191
- 24) Elmegreen D.M., Elmegreen B.G., Kaufman M., et al., 2006, ApJ 642, 158
- 25) Smith B. J., Giroux M. L., Struck C., Hancock M., 2010, AJ 139, 1212
- 26) Mullan B., Konstantopoulos I. S., Kepley A. A., et al., 2011, ApJ 731, 93
- 27) Kennicutt R., Jr., Hodge P., 1982, ApJ 253, 101
- 28) Gil de Paz A., Boissier S., Madore B. F., et al., 2007, ApJS 173, 185
- 29) Rieke G. H., Young E. T., Engelbracht C. W., et al., 2004, ApJS 154, 25
- 30) Komugi S., Sofue Y., Nakanishi H., Onodera S., Egusa F., 2005, PASJ 57, 733
- 31) Bigiel F., Leroy A., Walter F., et al., 2008, AJ 136, 2846
- 32) Whitmore B. C., Zhang Q., Leitherer C., et al., 1999, AJ 118, 1551
- 33) Whitmore B. C., Chandar R., Schweizer F., et al., 2010, AJ 140, 75
- 34) Sakamoto K., Ho P. T. P., Iono D., et al., 2006, ApJ 636, 685
- 35) Iguchi S., Morita K.-I., Sugimoto M., et al., 2009, PASJ 61, 1

Giant Molecular Clouds and Star Formation in the Tidal Molecular Arm of NGC 4039

D. ESPADA

National Astronomical Observatory of Japan
(NAOJ), 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo
181-8588, Japan

Abstract: The properties of tidally induced arms provide a means to study molecular cloud formation and the subsequent star formation under environmental conditions which in principle are different from quasi stationary spiral arms. We report the properties of a newly discovered molecular gas arm of likely tidal origin at the south of NGC 4039 and the overlap region in the Antennae galaxies using the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array science verification CO(2-1) data. The arm extends 3.4 kpc (34'') and is characterized by widths of $\lesssim 200$ pc (2'') and velocity widths of typically $\Delta V \simeq 10-20$ km/s. About 10 clumps are strung out along this structure, most of them unresolved, with average surface densities of $\Sigma_{\text{gas}} \simeq 10-100 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$, and masses of $(1-8) \times 10^6 M_{\odot}$. These structures resemble the morphology of beads on a string, with an almost equidistant separation between the beads of about 350 pc, which may represent a characteristic separation scale for giant molecular associations. We find that the star formation efficiency at a resolution of 6'' (600 pc) is in general a factor of 10 higher than in disk galaxies and other tidal arms and bridges. This arm is linked, based on the distribution and kinematics, to the base of the western spiral arm of NGC 4039, but its morphology is different to that predicted by high-resolution simulations.