

# 星形成則の多変数化に向けて

小 麥 真 也

〈国立天文台チリ観測所 合同アルマ観測所

Alonso de Cordova 3107, Vitacura, Providencia, Santiago de Chile〉

e-mail: skomugi@alma.cl



銀河の中で、星がどのようにガスから産まれるのかを定式化する「星形成則」の研究。近年になってこの法則には、ガスと形成された星の量以外にも重要な要素があることが明らかになってきた。この隠れた変数を特定するためにはガスや星の量を精密に測定することが重要で、かつ環境の影響を複雑に受けにくい「クリーンな」実験場が必要だった。筆者らは偶然にもそんな実験場を2億光年彼方に見つけ、miniTAOによる星形成活動の超精密測定を行うことに成功した。本稿では60年以上続く星形成則の研究にもたらされた新たな切り口と、そこから期待される星形成研究の進展について解説する。

## 1. 星形成則とは

われわれの住む銀河系は星だけでできているのではなく、星の材料となる水素ガスにも満ちている。このガスがどのような過程を経て星に変化するのかについて、天文学ではいまだおぼろげな描像しか得られていない。ある組成、密度、温度のガスが存在したときにどのような環境で何年経てばどの質量の星がいくつできるか、という問いは明らかに多くの変数を含む問題であり、答えるのは容易ではない。一方で、大きな視点で見たときには「ガスが多ければ星も多くできる」というのは確かだ。このある意味自明な経験的事実を定式化したのが星形成則である。この星形成則を精密化することで星形成過程のより細かな描像についても答えることができるだろう、と筆者は考えている。

### 1.1 シュミットの洞察

1959年、米パロマー天文台のマーテン・シュミット博士はある単著論文を発表した<sup>1)</sup>。彼は銀河系の星の形成率（1年あたりに形成する星の総

質量）はガスの体積密度の $n$ 乗に比例する、と仮説を立てた。そしてその仮定のもとで、銀河系の中性水素ガスと若い星の分布などを利用して $n$ は2程度であると結論づけた。つまり、ガスが2倍ある領域では星は4倍産まれるということである。この論文では星形成則が指数関数であるとの前提に立っていたが、観測技術的な制限からそれ自身を証明することはできなかった。当時、銀河のガスの量を測る方法は希薄な中性水素の輝線以外に、また星形成率を導出する方法も未発達だったために彼の研究は“早すぎた”のだ。

### 1.2 ケニカットの展開

シュミット博士の論文はその後30年間、あまり注目されることはなかった。1970年代になってミリ波の電波観測技術が発達し、一酸化炭素の輝線を使って密度の濃い分子ガスを測ることが可能になってからやっと、天の川銀河や系外銀河のガスを系統的に調べることが行われるようになった。そして1989年、アリゾナ大学スチュワード天文台のロバート・ケニカット博士が出版した論文<sup>2)</sup>はシュミット博士の結果の「再発見」と言え

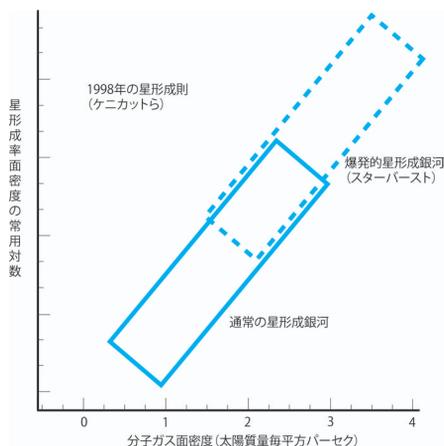


図1 銀河のシュミット・ケニカット則の範囲とおよその分散。

るものだった。彼はそれまでに行われた系外銀河の一酸化炭素の観測をまとめ、数十個の銀河の分子ガスの面密度と、水素電離輝線から求めた星形成率の面密度を比べたのだ。結果は衝撃的なほどに指数関数との整合性を示していた。指数の値は2-3と誤差が大きかったが、その数年後にデータを加えて改訂された論文<sup>3)</sup>ではかなり正確に $n=1.4$ が示された。同時に指数関数以外の形も検討されていたが、こんにち星形成則といった場合にはほぼこの指数関数の形を指す。そしてこの指数関数を、われわれはシュミット・ケニカット(SK)則(図1)と呼んでいる<sup>\*1</sup>。SK則は星の材料であるガスと、その産物である星の定量的な関係を示すという意味で絶大な効力をもっていた。観測的にはガスあるいは星形成率を測ることでもう片方の値も予測することができるという利点があり、また理論分野では銀河のシミュレーションを行う際に星形成を起す条件として、あるいはSK則を再現できるかでシミュレーションの正当性を主張する根拠として現在も広く使われている。

### 1.3 星形成則の分散と分子雲進化

SK則を物理的に解釈しようという努力は長く続いていた<sup>\*2</sup>が、一つ大きな疑問が残っていた。SK則には観測の誤差だけでは説明できない分散があったのだ。星形成率やガス密度を求めることはそもそも難しく、観測の誤差自体も怪しかったという事情もあり、当初はこの分散は注目されなかった。ところが2000年代後半になってこの分散の正体が少しずつわかってきた。それぞれの銀河の中で細かく領域を分けてSK則を作った場合には分散が大きくなるのである。このように銀河を空間的に細かく分解して星形成とガスを比べるのは骨の折れる仕事だが、2010年に小野寺ら<sup>4)</sup>とシュルーバら<sup>5)</sup>が同時に「小さな空間スケールになればなるほどSK則の分散は大きい」ことを確立した。しかも、100パーセク程度のスケールではSK則はほぼ崩壊してしまう。この「100パーセク」というのは、巨大分子雲のサイズだ。分子雲は太陽の数十万から数百万倍の質量のガスの塊で、星の主な形成現場である。SK則の分散の原因は、個々の分子雲の特性にあることを示していた。

分子雲の特性とは何だろうか。それは分子雲の質量であるかもしれないし、あるいは組成(重元素の割合)かもしれないし、分子雲周りの輻射場の強度かもしれない。しかしわれわれが目にしたのは、分子雲の進化段階によるという説<sup>4)</sup>である。分子雲は数千万年の時間をかけて進化する<sup>6)</sup>と考えられており、まだ星を活発に作っていない初期段階ではガスが大量にあるが、徐々に星を形成するに従ってガスが散逸したり電離したりして、その形態とともにガスの量と星形成率が変化する。銀河にある無数の分子雲はそれぞれの進化段階にいるため、大きなスケールで平均してしまえば「ガスが多ければ星形成率も高い」と言えるが、個々の分子雲を区別しているような状況では

\*1 あるいはケニカット・シュミットとも。どちらでも良いし、片方だけでも良い。

\*2 特定の星形成過程がどのような指数 $n$ をとるか、といった解釈の仕方が典型的。

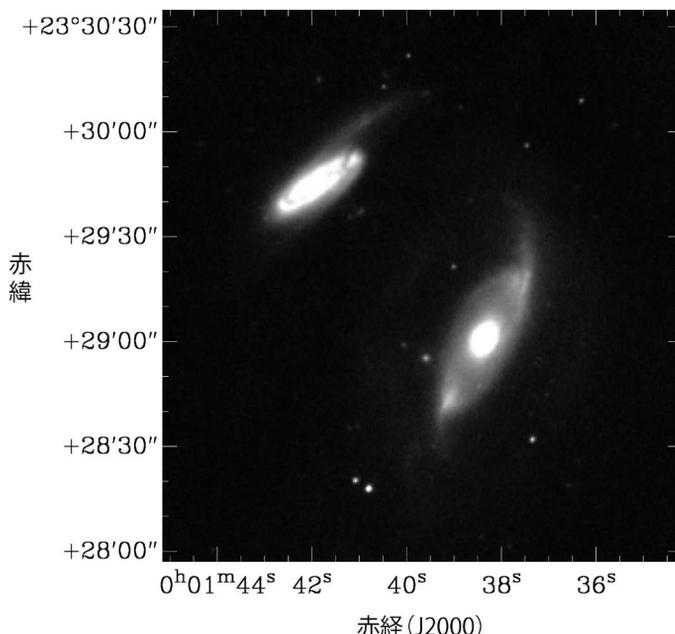


図2 タフィー I の近赤外線画像. 北側 (上部) ある銀河が UGC12915, 南側が UGC12914.

SK則は直接その影響を受け、ガス密度と星形成率の関係はばらばらになってしまうだろう。この説が正しいかどうかを検証するにはどうしたらいいだろうか。答えは簡単で、もし分子雲の進化段階がすべて同じであるような銀河があれば、その銀河でのSK則には有意な分散はないはずだ<sup>\*3</sup>。問題は、そんな都合の良い銀河があるかどうかである。

## 2. ストップウォッチ銀河、タフィー I

分子雲の進化段階がすべてそろっている銀河などというものは通常考えにくい。しかし、もしあるときに分子雲のそれまでの進化がすべてリセットされ、進化のストップウォッチがまた一斉にスタートしたばかりであるような銀河ならばどうだろう。われわれは、銀河の衝突はちょうどそのようなリセットが可能な現象にあたると思った。銀河同士の衝突は宇宙で最も激しい現象の一つだ。

衝突のスピードによってはガスは電離してしまい、それまでの分子雲の進化は「なかったことになる」可能性が高い。しかしどんな銀河衝突でも良いわけではない。衝突によるストップウォッチのリセットはすべての分子雲で同時でなければいけないから、衝突は銀河の円盤面同士が真っ正面から短い時間で衝突しなければならない。また、分子雲ごとに進化のスピードは異なるだろうから、一斉再スタートからあまり時間が経ってはいけなない。

実はタフィー I という銀河がこのすべてを満たしている。タフィー I は UGC12914 と UGC12915 という二つの渦巻き銀河からなる (図2) が、約 2,000 万年前に正面衝突したことが知られている<sup>7)</sup>。分子雲の進化にかかる時間が数千万年と考えられていることを思うと、この時間であれば分子雲は何世代も星形成を行うほどの時間はない。しかも都合のよいことに、UGC12914 と UGC12915

\*3 「SK則に分散があるなら分子雲の進化段階が異なる」の対偶にあたる。

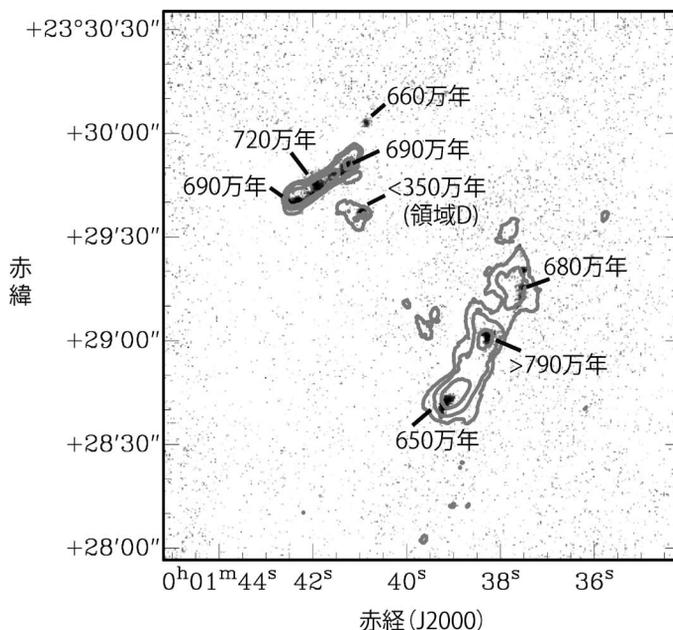


図3 タフィーIのPa $\alpha$ 画像. 等高線は一酸化炭素輝線の強度を表している. 領域ごとの年齢を示してある.

の円盤の相対的な傾きはたったの $15^\circ$ <sup>8)</sup>で、衝突速度の450 km 毎秒から計算すると衝突開始からお互いを通り抜けるまでに約200万年以下しか必要ない。この時間は分子雲にとっても「一瞬」だろう。条件はそろっている。タフィーIはつい最近に分子雲のストップウォッチが一斉に押された、非常にまれな実験場である可能性が高い。あとはこれを確かめ、SK則の分散が小さいかどうかを見極めれば良い。

### 2.1 miniTAOでの観測

2009年の夏、当時JAXAの宇宙科学研究所にいた筆者に天文センターの本原先生から声をかけていただいた。幸運にもminiTAOで観測する機会を与えていただいたのである。残念ながら望遠鏡の不具合のために自分でデータ取得はできなかったが、その後共同研究者の館内君が追加観測をしたうえで一次的な解析まですべて行ってくれた。観測したのはPa $\alpha$ （パッシュェン・アルファ）と呼ばれる水素の再結合線で、若い星から

でた紫外線が周辺の水素を電離することで発生する。通常はH $\alpha$ と呼ばれる輝線が同じように使われるが、Pa $\alpha$ は銀河に広く分布する星間塵による吸収を受けにくい\*4点で正確な星形成率の導出に向いている。この輝線で広い視野を撮像観測できるのは実はminiTAOに搭載されたANIRだけだ。

### 2.2 タフィーIの星形成史

観測されたPa $\alpha$ 輝線から、タフィーIの星形成率を正確に導出した結果、系全体で年間22太陽質量という高い値を示すことがわかった。これまで主張されていた値は観測波長によって数太陽質量（H $\alpha$ や中間赤外線）、高い場合でも12太陽質量（遠赤外線）であった。最も直接的に、かつ減光の少ない波長で若い星からの光を観測できるという点でわれわれの値は信頼性があり、タフィーIがこれまで考えられていたよりずっと活発に星を形成していることが示された。さらに銀河全体の星質量との比較から、タフィーI自身もそれま

\*4 逆にH $\alpha$ は吸収を強く受ける。可視減光で3等程度以上では、Pa $\alpha$ 輝線が最も強くなる。

での平均よりも現在は活発に星形成をしていることがわかった。これはまさに、銀河同士の衝突によって星形成が誘発されたためである。

実はPa $\alpha$ 輝線を使って、分子雲に付随した星形成領域の年齢を求めることができる。輝線自体は若い星からの光が由来だが、同じ波長域の連続波は古い星からの光が主であることがわかっている。Pa $\alpha$ と連続波の強度比を星団進化のモデルと比較することで、星形成領域ができてからの大体の年齢がわかってしまう<sup>9)</sup>。この方法を使ってタフィー I の場所ごとの年齢を求めたのが図3だ。驚くべきことに、激しく星形成している八つの領域のうち、七つがほぼ正確に700万年の年齢を示していた。残り一つは二つの銀河の間にある巨大な星形成領域で、350万年以下の年齢だ。これは非常に解釈のしやすい結果だった。そもそも「タフィー」とはアメリカの東海岸発祥のお菓子の、柔らかくよく伸びる飴のようなものだ。UGC12914とUGC12915の間には衝突が起源と思われる高温プラズマが広がって電波連続波（シンクロトロン放射）を放射しており、これがそのお菓子のように見える。このタフィー部分にあった分子雲（われわれは領域Dと呼んでいる）は銀河衝突後、他の分子雲と同時のストップウォッチで分子雲進化を再スタートしたと考えられる。しかしUGC12915銀河の潮汐力によってやはりタフィーのように引き延ばされ、自己重力による収縮が妨げられた結果、進化レースに遅れて星形成を始めることになったと解釈できるのだ。

### 3. 星形成則に新たな変数を

タフィー I の星形成領域は、銀河同士の間にある一つの領域Dを除いてすべて同じ年齢にあることがわかった。これはまさにわれわれが期待していたことで、「SK則の分散は分子雲の進化段階の違いによって起きる」という仮説が正しいのな

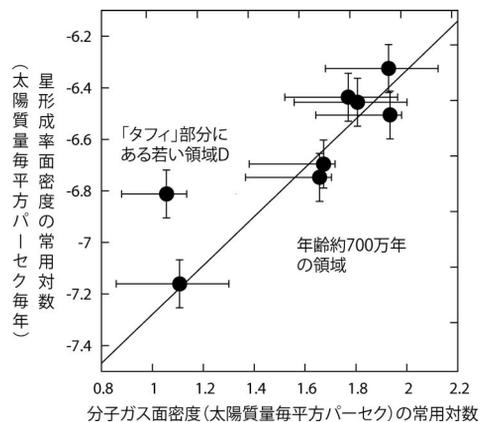


図4 タフィー I のSK則。

らば、領域D以外で作るSK則は分散が小さく、そして領域Dはそこから外れることが期待される。果たしてどうだろうか。

精密なSK則を出すためにはガスの量も正確に評価する必要がある。われわれは米オーウェンズバレー天文台の電波干渉計で取得された高分解能の一酸化炭素輝線のデータ<sup>10)</sup>を使い、さらに銀河ごとに最適化された変換係数<sup>\*5</sup>を使って<sup>11)</sup>分子ガスの密度に変換した。miniTAOで観測されたPa $\alpha$ 輝線から出された星形成率と比較して導出したSK則が図4だ。見てのとおり、年齢が同じ領域はすべて観測誤差の範囲で傾き1の直線上に乗っており、唯一、年齢が若い領域Dだけがほかから大きく外れている。あまりに素直な結果で疑いたくなくなってしまうが、これは「SK則の分散が分子雲の進化段階の違いによって起きる」という仮説を強くサポートする結果となった。タフィー I という銀河のケーススタディーではあるものの、従来の星形成率とガス密度の間の単純な指数関数という星形成則の描像は分子雲の進化段階を含むように改訂されなければならないことを示している。

\*5 多数の一酸化炭素輝線を用いた、Large Velocity Gradientと呼ばれる解析方法。

## 4. 銀河の星形成研究の展望

星形成の活動性を決めるのにガスの量が重要だという従来の指数関数型の星形成則（SK則）は、ある意味当然のことを言っている。われわれが今回検証した、分子雲の進化段階がこの関数に影響を及ぼすという主張は実は星形成則の物理過程について何か示唆を与えるものではなく、あくまでSK則の「見た目」が分子雲の進化段階で変わってしまうということを示している。星の形成過程にガスの組成や物理状態が強い影響を及ぼしているのはほぼ間違いなく、本来はこれらを変数として星形成則を再構築したいというのが筆者の願いである。しかしそのためにはさまざまな状態にある個々の分子雲を元にして星形成則を考える必要があり、その際には分子雲の進化段階によっても関数は変化するだろう、というのが本研究の結果である。筆者の目指す星形成則の多変数化とはつまり銀河における星相とガス相の間の変換バランスを記述する関数系を作るということにほかならない。それができれば、1980年代後半からのケニカットらによるSK則と同様に銀河形成・進化、理論シミュレーション以外の分野にも広範に影響を及ぼすことができると考えている。

### 謝 辞

この研究にあたっては、筆者に観測立案の機会を与えてくださり、データ解析なども全面的に支援して下さったTAO/ANIRチームの皆さんに御礼を申し上げたいと思います。また、チャナンツール山頂での観測のための旅費は宇宙科学研究

所の赤外グループから補助をいただいています。本稿の科学的内容は *Astrophysical Journal* 757, 138, 2012 に掲載されています。

### 参考文献

- 1) Schmidt M., 1959, *ApJ* 129, 243
- 2) Kennicutt R. C. Jr., 1989, *ApJ* 344, 685
- 3) Kennicutt R. C. Jr., 1998, *ApJ* 498, 541
- 4) Onodera S., et al., 2010, *ApJ* 722, 127
- 5) Schrubba A., et al., 2010, *ApJ* 722, 1699
- 6) Kawamura A., et al., 2009, *ApJS* 184, 1
- 7) Condon J. J., et al., 1993, *AJ* 106, 1095
- 8) Giovanelli R., et al., 1986, *AJ* 92, 250
- 9) Diaz-Santos T., et al., 2008, *ApJ* 685, 211
- 10) Iono D., et al., 2005, *ApJS* 158, 1
- 11) Zhu M., et al., 2007, *AJ* 134, 118

### Towards a Multi-Parameterization of the Star Formation Law

Shinya KOMUGI

*National Astronomical Observatory of Japan  
Chile Observatory/Joint ALMA Observatory,  
Alonso de Cordova 3107, Vitacura, Santiago  
de Chile*

Abstract: The star formation law has been long known as a power law relation between the gas density and star formation rate density in galaxies. Recent studies, however, have pointed to the existence of another parameter affecting this law. Characterizing this parameter requires an accurate measurement of the gas and the star formation rate, in a rare cosmic laboratory that is clean from other environmental effects. In this article I review our recent findings on this long debated issue, and what is expected of the next generation star formation law.