

大質量星団形成過程の解明

藤井通子

東京大学大学院理学系研究科

1. 背景

星は、**分子雲**と呼ばれる主に水素から成る低温の星間ガスをゆりかごとして生まれる。分子雲の中でも特に密度の高い領域では、ガスが自己重力によって収縮し、やがて星となることが知られている。多くの星は単独よりも集団で生まれることが、近年の観測からわかりつつある。星が集団で生まれると、**アソシエーション**や**星団**と呼ばれる多くの星からなる系へと成長すると考えられている。このように、銀河内の星の多くは、分子雲から星団やアソシエーションとして生まれるため（以下、まとめて星団と呼ぶ）、分子雲での星形成を経た星団形成過程を明らかにすることは、銀河内での星形成過程の解明に繋がる重要な研究テーマである。

また、**大質量星**の形成場所としても、星団は注目されている。大質量星は、周囲のガスを電離したり、輻射圧や星風で周囲のガスを押し下げるため、星が集団で形成する際には、他の星の形成を阻害し、分子雲での星形成を終わらせる役割を果たすと考えられている。このような大質量星が周囲のガスに与える影響をまとめて、**大質量星からのフィードバック**と呼ぶ。このように、星団形成は、主に、分子雲の収縮、複数の星の形成、大質量星からのフィードバック、星形成の終了、という過程に分けられるが、これらは複雑に絡み合っている。そのため、星団形成シミュレーションでは、これらの過程を全て取り入れて計算する必要がある。

2. 新しいシミュレーションコード

星団形成シミュレーションにおいて、分子雲のシミュレーションは流体計算、星の運動についてはN体計算を用いて行われる。流体計算には、粒子を用いて流体を表現する Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法と、メッシュを用いる方法があるが、本研究ではSPH法を用いる。分子雲からの星団形成シミュレーションでは、まず、分子雲のシミュレーションから始め、密度が高くなった場所に、sink 粒子と呼ばれる粒子を置き、その粒子が条件を満たした周りのガス粒子を吸い込むよう設定し、星形成を扱うことが多い。しかし、計算結果が、ガス粒子を吸い込む半径 (sink 半径) やガス粒子の質量分解能に依存してしまうため、星一つ一つの形成を再現し、形成した星が観測されているような質量関数を再現するようシミュレーションを行うためには、非常に高分解能の計算を行う必要がある。そのため、大質量星団形成を扱うことは難しい。

一方、近年では、複数の星をまとめた数十太陽質量の星をまとめたものを1粒子として置き、大質量星団形成シミュレーションを行う例が増えている。複数の星をまとめて1粒子で表現する手法は、系全体が星団よりも数桁大きな規模となる銀河のシミュレーションではよく用いられている。この手法は simple stellar population (SSP) **近似**と呼ばれている。SSP 近似では、1星粒子がある質量関数に従った複数の星を含むと仮定し、フィードバックは、その中に含まれる複数の星からの合計を周りのガスに与える。1星粒子が1つの星団を表すような手法である。計算量を減らすことができる代わりに、質量の異なる星一つ一つの運動や、質量によって異なる強さのフィードバックをそれぞれの場所で与える、といった効果を無視することとなる。

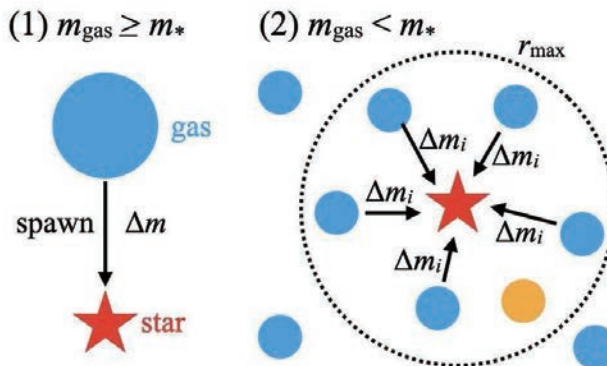
星団では、星同士の近接遭遇による星の軌道の変化が頻繁に起こり、連星の形成や、連星と周囲の星の3体相互作用による高速度星の形成が起こることが知られている。このような星団の**力学的進化**は、星団の形成中に始まり、最終的に形成する星団の密度やサイズ等に影響を与えると考えられる。上記のような星団内での強い重力散乱を扱うためには、星の軌道を高次の積分法を用いて計算する必要があるが、これまでの星団形成シミュレーションではそのような扱いはほとんどされていない。また、SSP 近似を用いる場合、星の軌道を正しく扱うことはできない。

本研究の目標は、星一つ一つを分解し、星一つ一つの軌道を高精度で積分し、星団形成時の力学進化を正しく取り入れた大質量星団形成シミュレーションを行うことである。本研究では、1. 大質量星団を扱うために、sink 粒子は用いず、銀河形成シミュレーションで使われる確率的な星形成の手法を用いて星形成を扱い、2. SSP 近似は用いず、星一つ一つをその質量の粒子をして再現し、3. 星の運動は高精度で数値積分することで、星団の力学進化を正しく扱う、ことを目標としたコードを開発する。以下、個々の手法について詳しく記述するが、コード開発は、主に銀河形成シミュレーション用に開発された SPH/N 体計算コード「ASURA」(Saitoh 2009, 2017) [1][2]を用いて行う。

3. 確率的星形成

銀河形成シミュレーションと同様に、温度と密度の閾値を決め、それらを満たしたガス粒子に対して乱数を振り、局所的な自由落下時間に依存した星形成確率と比べ、そのガス粒子が星形成するかどうかを決める。もし、星形成する場合、その星の質量は、やはりあらかじめ決めておいた質量関数(観測的に得られたもの)からランダムに選ぶ。ただし、ランダムに選ばれた星の質量が、周囲のガス粒子の総質量を超えないように制限をかける。そうすることで、ガスが十分でない領域で、質量保存則を満たさない大質量星を形成しないように制限する。

形成する星の質量が決まったら、決められた範囲のガス粒子から、形成する星の質量に相当する分の質量を一律に減らし、新しい星を形成させる(図1)。このとき、ガス粒子から最大5割の質量までしか減らせないように制限し、星形成後のガスのふるまいが不安定にならないようにしている。

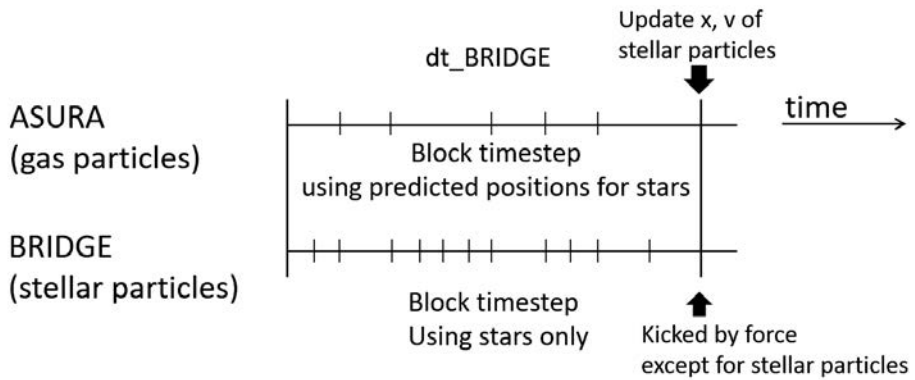


第1図: 星形成時の手続きの模式図。

形成する星の質量がガス粒子の質量より小さい場合は、左図のように、1ガス粒子から1星粒子に質量を分け与えて形成する。形成する星の質量が1ガス粒子より大きい場合は、 r_{\max} 以内にあるガス粒子から質量を分け与えて1つの星を形成する。

4. 積分法

星粒子の積分は、6次精度のエルミート法で行う。ガス粒子の積分は、ツリー法を用いて、2次精度のリープフロッグ法で行う。どちらも、粒子ごとに刻み幅を変えることができる独立時間刻みを使用する。星粒子がガス粒子から受ける重力は、一定時間刻みごとに、速度キックとして与えられる。この手法は、「BRIDGE」法(Fujii et al. 2007) [3]として、実装された手法の拡張である。ツリー法とリープフロッグ法の組み合わせは、高速で、多くの粒子を短時間で積分できるが、星同士の近接遭遇を積分するには、高次の方法が向いている。そのため、ガス粒子には ASURA に組み込まれているツリー法とリープフロッグ法を用いて系全体を積分し、星粒子については、一定時間ごとに BRIDGE にコピーし、一定時間(dt_BRIDGE の間)、直接計算法と6次エルミート法を用いて高精度に積分して、位置と速度を更新した後、ASURA 側にその結果を返す。さらに、星粒子については、重力ソフトニングによる近距離での重力を人為的に弱める手法を用いずに計算を行う。また、この一定時間の間は、ASURA、BRIDGE それぞれで独立に、より小さい刻み幅で積分を行う。



第2図：積分法の模式図。

ASURA では、ガス粒子のみを積分する。BRIDGE では、星粒子のみを積分する。一定時間刻み(dt_BRIDGE)で、星粒子の位置は ASURA 側にコピーされ、星粒子はガス粒子の重力による速度変化を受ける。その間の時間は、それぞれの粒子の時間刻みで積分される。

5. 大質量星からのフィードバック

大質量星からのフィードバックとして、HII 領域(大質量星周りで水素ガスが電離されている領域で、その温度は1万Kに達する)、星風、超新星爆発が考えられる。超新星爆発は、大質量星が形成して数百万年以上が経過した後には起こるため、星団形成過程では、HII 領域と星風がまず影響を及ぼす。そこで、この2つを実装する。

HII 領域については、正しくは、輻射輸送を解いて、輻射流体計算を行う必要がある。しかし、計算コストが大きいため、本研究では、星から単位時間あたりに放出される光子数と周囲のガスの密度から、電離される半径(Strömgren 半径)を計算し、その半径内のガス粒子にエネルギーを与えて1万Kまで温度を与えることでHII 領域の形成をモデル化する。この方法は、銀河形成シミュレーションで用いられており、ASURA にも実装されていたが、今回、星の質量ごとに単位時間当たりの光子数(Lanz & Hubeny 2003) [4]を計算できるよう改良を行った。

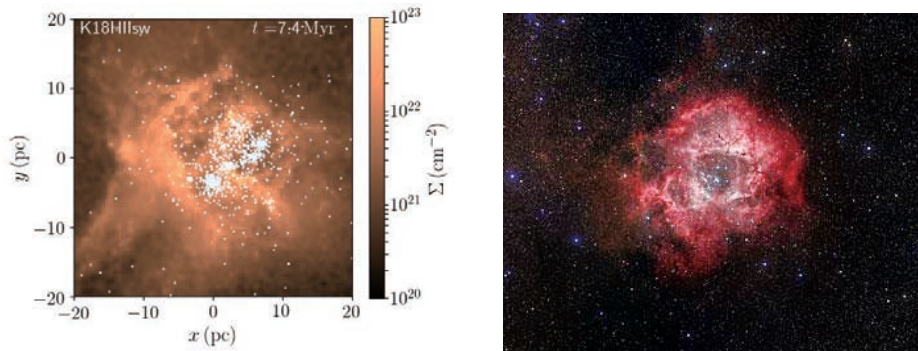
HII 領域では輻射圧によるガスの加速が起こる。モデル(Renaud et al. 2013) [5]を用い、光

子数に比例した速度で、HII 領域内のガス粒子に外側に向かう速度を与えることで、輻射圧による運動を実装した。

星風によるフィードバックは、輻射圧と同じ手法で実装し、輻射圧による速度変化に対する星風による速度変化の割合をパラメータとして与える。

6. 初期条件

初期条件には、星団形成シミュレーションでよく用いられる乱流を与えた一様密度の球を用いる。メッシュ法を用いた輻射流体計算で行った結果と比較するため、Kim et al. (2018) [6] と同様の分子雲のサイズ(20 pc)と質量(10^5 太陽質量)でテスト計算を行った。重力ソフトニングは 0.075 pc とし、ガス粒子の質量を 0.1 太陽質量とした。



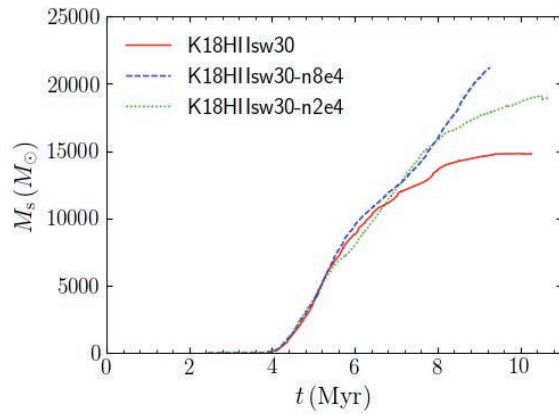
第3図: シミュレーションで得られた星団形成領域(左)と実際の星団形成領域。

左図はシミュレーションで得られた結果。白点は1太陽質量以上の星で、大きさは星の質量を表す。右図は実際の星団形成領域(NGC2246、Credit: John Corban & the ESA/ESO/NASA Photoshop FITS Liberator)。点が星、赤い「もや」がガス。中心部のガスの穴は、大質量星によるフィードバックによってできたものであると考えられている。

7. 結果

図3(左)は、シミュレーションで得られたガスと星の分布である。一方、図3(右)は、実際に観測された星団形成領域(NGC2246、バラ星雲)である。このように、シミュレーションは、分子雲中で複数の星が形成し、大質量星からのフィードバックによって、星団形成領域の中心にガスの穴ができる仮定を再現している。

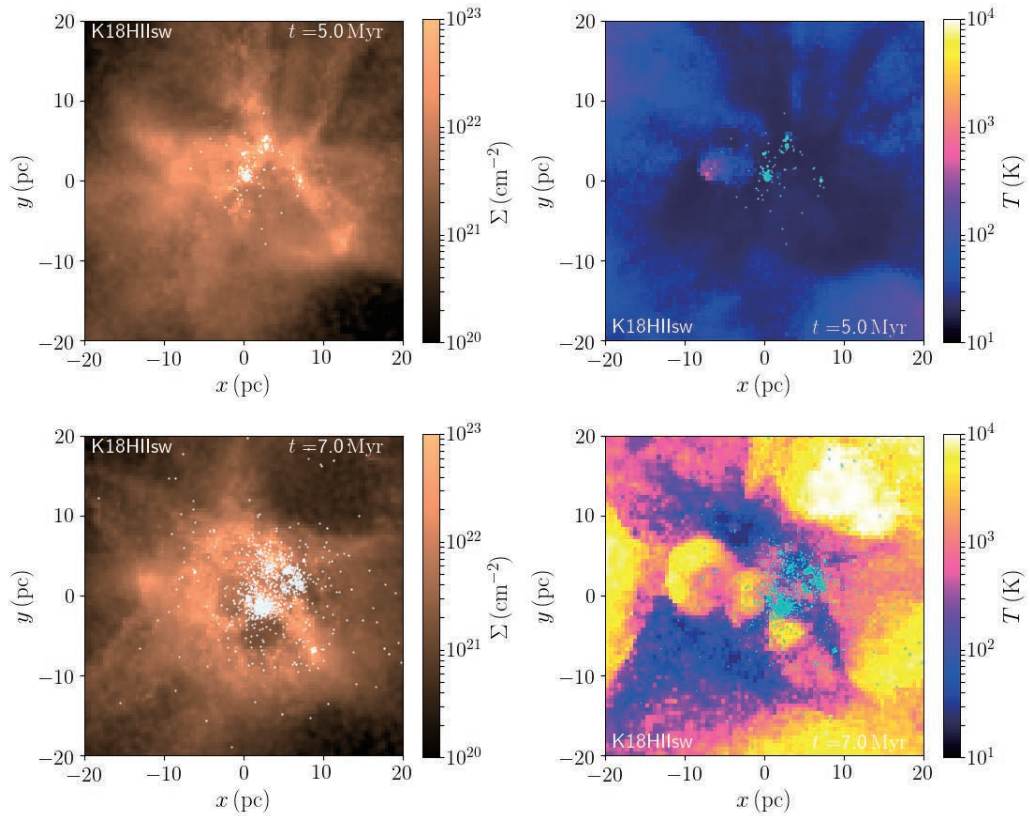
図4は、シミュレーションで形成した星の総質量の時間進化である。各線は、星形成を起こすための密度閾値の違いを示している。結果が密度閾値に依存するのであれば、密度閾値を高く設定するほど、形成する星の総質量が減ると予想されるが、結果は、中間の密度閾値の時に、最も多くの星が形成されている。これは、密度閾値は重要なパラメータではなく、それよりも、いつ、どこで大質量星が形成するか、また、形成した大質量星が連星との3体相互作用で星団外に脱出するタイミングといった、星を一つ一つ分解し、星の近接遭遇を正しく解いた結果表れる効果に依存していることを示している。このように、大質量星の形成するタイミングや、大質量星が星団を脱出するタイミングで結果が2割ほど変わるため、同じような質量、サイズの分子雲であっても、そこから形成する星団の質量は、2割ほどバラつきが出る可能性を示唆している。

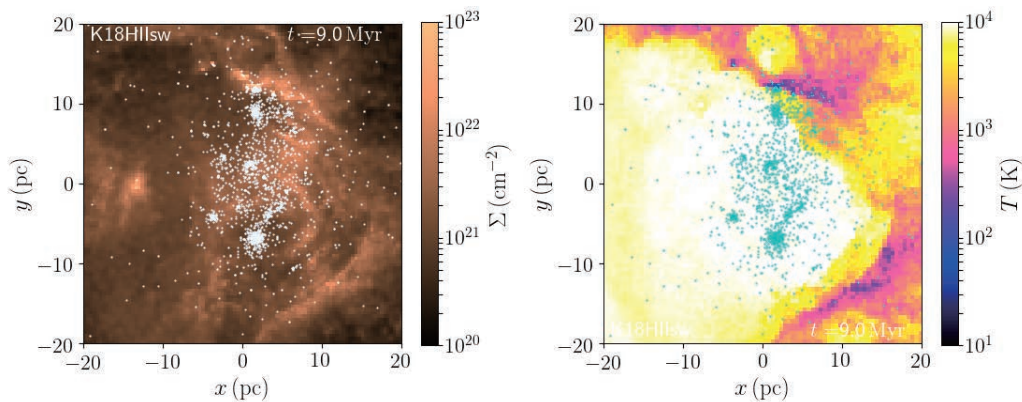


第4図：形成した星の総質量の時間進化。

各線は、星形成を起こすための密度閾値を変えた計算の結果で、この場合、閾値による結果の違いは少ない。

図5は、星団形成領域の面密度マップと温度マップの時間進化を示したものである。温度マップを見るとわかるように、3体相互作用で星団を脱出した大質量星が、周りのガスを電離しながら進んでいくのがわかる。これは、これまでのシミュレーションでは再現できなかった現象である。





第5図：星団のスナップショット。

左列はガスの密度マップ、右列はガスの温度のマップ。点は星を表し、大きさは星の質量に依存する。

8. まとめ

本研究では、大質量星団形成シミュレーションのための新しいコードの開発とそのテストを行った。先行研究にならい、乱流を持つ分子雲のシミュレーションを行った結果、先行研究と同様の結果が得られた。また、星同士の近接遭遇を再現できるようにコードを改良した結果、星の3体遭遇によって一部の大質量星が高速で星団を脱出し、周囲のガスを電離する様子が見られた。今後は、このコードを用いて、分子雲の密度や質量を変えた計算を行い、母体となる分子雲と形成する星団の関係を明らかにする。

謝辞

本研究のシミュレーションはOakbridge-CXの他、国立天文台 天文シミュレーションプロジェクトのATERUI2を利用して行われました。

参考文献

- [1] Saitoh T. R., Daisaka H., Kokubo E., Makino J., Okamoto T., Tomisaka K., Wada K., Yoshida N., PASJ, 61, 481, 2009
- [2] Saitoh T. R., AJ, 153, 85, 2017
- [3] Fujii M., Iwasawa M., Funato Y., Makino J., PASJ, 59, 1095, 2007
- [4] Renaud F., et al., 436, 1836, 2013
- [5] Lanz T., Hubeny I., ApJS, 146, 417, 2003
- [6] Kim J. G., Kim W. T., Ostriker E. C., 2018, ApJ, 859, 68, 2018