

Direct Collapse モデルにおける輻射流体的 feedback に関する研究

幸田泰明 (京都大学)

利用カテゴリ XC-Trial

赤方偏移 $z \sim 7$ において $10^9 M_{\odot}$ の質量をもつ SMBH (Super Massive Black Hole) が見つかった (Mortlock et al. 2011)。SMBH は宇宙誕生から、非常に短い時間で形成され成長してきたことがわかる。この形成を説明する理論の一つに Direct Collapse モデルがある。 $z \sim 15$ かつ virial 温度 8000 K 程度の DMH (Dark Matter Halo) において、atomic cooling でエネルギーを失ったガスが重力で崩壊していき、中心に $10^6 M_{\odot}$ 程度の Seed BH ができるということをこのモデルは主張している。これまでの研究では、宇宙論的なシミュレーションが主に行われてきた。その代表例は Shlosman et al. 2016 である。この研究では、クーラン条件を克服するために DMH の中心に sink を置き、その質量の成長を追うことで Seed BH が実際に $10^6 M_{\odot}$ になることを示した。しかし、sink を設定することは、その中で行われている輻射流体 feedback を無視していることを意味している。この効果を考慮すると最終的にできる Seed BH の質量は Shlosman et al. 2016 の結論から下方修正される可能性が高い。この減少分を宇宙論シミュレーションの中で計算するのは不可能である。なぜならば、輻射流体 feedback を計算するには BH 付近を分解できなくてはならないが、ここではクーラン条件における速度がほぼ光速に達しているため、クーラン時間を小さくせざるを得ず、宇宙論的な時間（ここだと 1 Myr 程度）をシミュレーションするのは時間がかかりすぎるからである。そこで、上の宇宙論的シミュレーションの結果を境界条件として考慮しつつ、BH 付近を分解できるシミュレーション (Ohsuga et al. 2005, Kawashima et al. 2009) で、輻射流体効果を見積もる研究計画を立てた。このシミュレーションコードでは宇宙論的計算はできないが、BH 付近の輻射流体計算を行うことができる。宇宙論的な影響力を境界条件（このシミュレーションの外側の境界の入射フラックス）に織り込むのである。境界条件（宇宙論的な影響）が変化する時間は BH 付近で定常状態が達成される時間よりも十分に長いので、定常状態を達成しその流体の運動を観察することで feedback の影響を見積もる。ここでは、この研究の初期段階として、まずこのシミュレーションコードをテストした結果を記述する。

テストの目的 このテストの目的は2つある。一つ目は、今までシミュレーションで計算してきた境界の大きさと違っていたのでその差異による計算時間に与える影響の検証のためである。今までは super Eddington 降着の文脈での計算だったので、境界はせいぜい 10^3 rs (Schwarzschild 半径) だった。しかし、Direct Collapse モデルの文脈で用いようと思うと、宇宙論的シミュレーションの影響をできるだけ正確にするためには、最低 10^4 rs の境界は必要である。境界を広くとるとことは計算する領域が大きくなるので、定常状態を達成するのに時間がかかってしまう。二つ目は分解能をどの程度下げると、結果の信頼性はどの程度損なわれるかの検証である。計算時間を短くする方法の一つは分解能を下げることだが、そうすると結果の信頼性は損なわれる。これを検証することで、初期研究として許容できるレベルの信頼性は保持しながら計算時間を削ることができる様子を明らかにすることができる。

このシミュレーションでは設定できるパラメータとして、内側の境界（事象の地平面付近）、外側の境界、降着量（外側の境界から入れる単位時間当たりのガスの量）、動径方向と角度方向のメッシュの数、ブラックホールの質量、アルファ粘性、初期角運動量（外側境界から降着させる際に最初に与える角運動量）がある。meshの切り方は、動径方向はlogであり、角度方向は線形かcosか選べる。

境界を大きくした影響 まず外側の境界を大きくしたときどの程度計算時間が変化し、数値はどの程度変化するかを調べた。パラメータの設定としては、meshの数は動径を32角度を32、ブラックホール質量は $10 M_{\odot}$ 、降着量は $10^3 L_{\text{Edd}}/c^2$ (L_{Edd} = エディントン光度 c^2 = 光速)、アルファ粘性は0.1、初期角運動量は $100 r_s$ でケプラー回転するだけの量、内側の境界は $2 r_s$ を設定した。外側の境界としては $10^3, 10^4, 10^5 r_s$ を調べた。宇宙論シミュレーションの結果から、角運動量は小さいことが分かっているので、今回はそれを考慮した数値に設定した。これらは物理的にはほぼ同じ状況だが、計算範囲とセルの物理的体積が異なる。

まず定常状態達成を決めるタイムスケールは主に2種類ある。粘性と自由落下である。テストの結果定常状態が達成されるには自由落下時間の2倍程度時間が必要ということが分かった。角運動量が小さく外側の境界が大きいので自由落下時間が支配的であり、ガスが外側境界から落としてBH付近で折り返し外側境界に帰ってきて計算領域から出ていくまでには自由落下時間の2倍必要であると思われる。また各設定ごとの luminosity や kinetic luminosity を計算し比較した結果、ほぼ変わらないことが分かった。これは、これらの量がほぼBH付近で決定され、BH付近の分解能はlog切りなので各設定によってあまり変化しないのが原因と考えられる。以上からlogで計算する限り、メッシュ数は変えずに外側領域を大きくしてもそれなりの信頼性を保って計算できることが分かった。

分解能を下げた影響 次に、外側境界を固定したうえでメッシュ数を変えた時の影響を調べた。パラメータの設定としては、ブラックホール質量は $10 M_{\odot}$ 、降着量は $10^3 L_{\text{Edd}}/c^2$ 、アルファ粘性は0.1、初期角運動量は $100 r_s$ でケプラー回転するだけの量、内側の境界は $2 r_s$ を設定し、外側の境界としては $500 r_s$ を調べた。計算したメッシュ数は(動径, 角度) = (32, 96), (48, 96), (96, 96), (96, 32), (96, 48), (96, 96)。このように動径方向と角度方向を別々に変えたのは、それぞれの影響を見分けるためである。これらは物理的には同じ状況を計算している。

各設定ごとの flux と kinetic flux を比較した。角度の分解能を下げても結果はほとんど変わらなかったが、動径方向は32と96で50%程度変化した。角度を荒くしてもセル体積は線形で荒くなるだけだが、動径方向は3乗で荒くなるので、影響が大きくなると思われる。この分のずれを許容するのであれば計算時間は5, 6分の1に削減できることも分かった。