

初代星バイナリーの形成過程 輻射の影響について

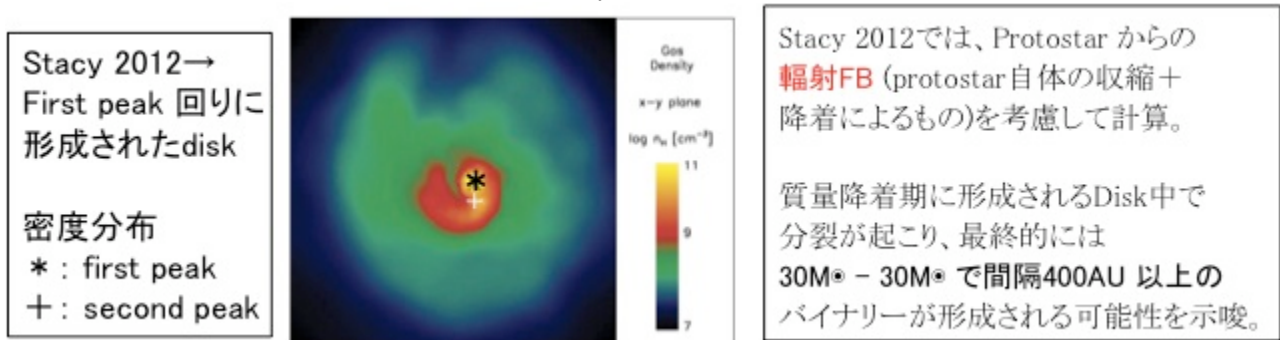
筑波大学 数理物質科学研究科 物理学専攻
宇宙物理理論研究室 博士前期課程2年
久保田 明夏

2012年8月1日 - 4日

1 背景と概要

初代星は宇宙最初の天体であり、宇宙再電離や重元素汚染により宇宙の構造形成に影響を及ぼすため重要である。初代星形成の重要な先行研究である Yoshida et al. 2006 ではガス雲が分裂することはないと結論づけた。しかしその後、原始星形成後の質量降着期に円盤内で分裂が起こり複数の初代星が形成される可能性が指摘された。その一つである Stacy et al. 2012 では 30 太陽質量程度の星同士の連星系が形成される可能性が示された。またこの研究では原始星からの輻射がガスへ及ぼす影響も考慮されている。(図 1.1)

図 1.1: Stacy et al. 2012 の結果



星からの輻射はガスを加熱、電離、解離することでガスの収縮、降着に影響を及ぼすため重要である。しかし先行研究では、ガス雲の得る角運動量などを正確に取り入れるために宇宙論的な初期条件からスタートしており、質量分解能が荒くなってしまうという問題があった。そのため、ひとつの粒子(格子)内で optical depth が大きくなってしまい、電離や解離の影響を正確に解けず、モデルを用いるしかなかった。

しかし、電離波面(IF)の伝搬は、電離加熱と冷却剤の破壊による星形成へのネガティブな影響と、M型IFに伴う衝撃波によるガスの圧縮により解離光子を遮蔽するポジティブな影響の両面において、密度ピークが星になれるかどうかに関与するため重要である。

本研究では、円盤中で first peak が主系列星となり UV 光子を出し始めた場合、second peak に及ぼす影響を見積もる。特徴的なのは、主系列星とひとつの密度ピークのみをクローズアップしてシミュレートすることで、高い質量分解能の計算を行う点である。それにより Stacy2012 などの宇宙論的なシミュレーションではモデルとして入れていた、電離波面の伝搬を正確に解くことができる。今回は先行研究として本研究より密度の低い段階をシミュレートした Hasegawa et al. 2009 の紹介と計算の本研究の途中経過を発表した。

2 先行研究

Hasegawa, Umemura & Susa 2009 (HUS09) では、あるダークマターハロの中心で重力収縮を始めたガス雲が、隣のダークマターハロで生まれた主系列星から受ける影響についてパラメーターサーチを行っている。(図 3.1 の左図) 主系列星 (MS) の質量はその星からの輻射のスペクトルに関わるため、太陽質量の 25、40、80、125 倍の 4 種類についてそれぞれ調べているが、今回は典型的な結果として 80 太陽質量の時を例に説明する。

ガス雲の中心密度が n_{on} を超えた時点で MS が光り始めたとし、MS とガス雲のキヨリを D とする。主系列星からの輻射は黒体放射を仮定するが、電離光子の役割を調べるため、電離光子だけを切った場合、入れた場合の 2 種類の計算を行っている。

ガス雲が自己重力で収縮を続けるためには、圧力上昇を抑制するガスの冷却過程が重要である。初代星を形成するガス雲には金属元素が含まれないため、水素分子による冷却が主になる。よって冷却剤である水素分子を破壊する、解離反応や電離反応が星を形成できるかどうかには重要である。電離と解離の効果は図 2.1 にまとめた。

図 2.1: 電離光子と解離光子の関係



HUS09 の結果は図 2.2 の様になる。左の図で、 \square は電離光子が入った計算・入っていない計算の両方でガスが重力崩壊を起こしつづれたことを示し、 \times はどちらの計算でもつづれなかったことを示している。

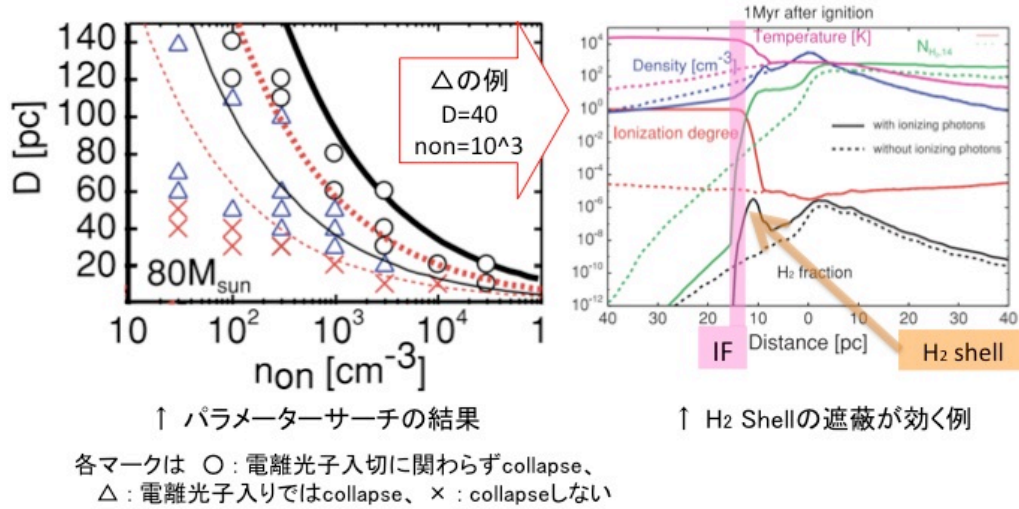
のパラメーターセットでは、図 2.2 右のグラフに示す様に、M 型の電離波面の前方に発生する衝撃波面によってガスが圧縮され、水素分子のシェルが形成されるため、解離光子が遮蔽され中心部では冷却が続き、自己重力でつぶれることができる。また、この際には衝撃波によるガス雲表面のはぎ取りが起こる。本研究では、考慮する物理は HUS09 と同じであるが状況が違う。その点を次の章で言及する。

3 本研究の特徴とシミュレーション設定

3.1 本研究の特徴 : 先行研究との違いとモチベーション

ここ数年の宇宙論的初期条件からスタートした初代星形成のシミュレーションでは、初代星形成段階における星形成のシナリオは以下の様に考えられている。自己収縮を始めた原始ガス雲(金属量 0 のガス)はガス雲が run away collapse を起こしている暴走収縮期(前期解段階)では分裂は起こらない。(Yoshida et al. 2006 など)中

図 2.2: Hasegawa, umemura & Susa 2009 の結果



心に原始星（冷却が効かなくなり、自己重力による収縮と圧力勾配による膨張が釣り合い、静水圧平衡なった状態のコア）ができた後に外層が降着して主系列星段階に入るまでの質量降着期（後期解段階）で、降着円盤内で分裂が起こる。

本研究の目的は、この時に生まれた分裂片が星になることができるのかどうかを見積もることである。

特に初めにできた原始星がMSになった後、HUS09 の状況と同じ様に、M型電離波面の前方に発生する衝撃波の影響で分裂片のはぎ取りが起こる可能性がある。表面のはぎ取りは、ガス雲が主系列星になった時の質量（ZAMS Mass : Zero Age Main Sequence Mass）がどの程度になるのかに影響を及ぼす。この影響も見積もりたい。

本研究とHUS09との違いは、MSとガス雲の距離Dと、中心のMSがガス雲が n_{on} のときに光り始めたとした時の n_{on} の2つに表れている。HUS09でのDは、典型的なDMhalo間距離である数十～百pcであった。一方、本研究ではあるDMhalo中で生まれた中心星周りの円盤内で分裂が起きた場合を考えているため、Dは典型的な分裂片間の距離を考える。例えば、Grief et al. 2011(G11)では中心星周りの降着円盤は数千AU程度の大きさなので、Dはそれを超えることは無い。また、典型的な分裂片間の距離は数十～数百AUになっているため、その値を採用する。

また n_{on} に関しては、HUS09では $\sim 10^4 [cm^{-3}]$ 程度までを計算している。一方、分裂時はガス雲の密度は $10^4 [cm^{-3}]$ より高いため n_{on} はより大きい領域を考える。具体的には、先行研究よりどの程度の密度で分裂片が発生したかを調べる必要がある。

例えば、G11では、分裂片の質量は0.1-10太陽質量であるので、ジーンズ質量の観点から、分裂時には $10^{10-14} [cm^{-3}]$ と高い密度に達している必要がある。G11の下記図では分裂時にこの程度の密度を達成している様に見える。

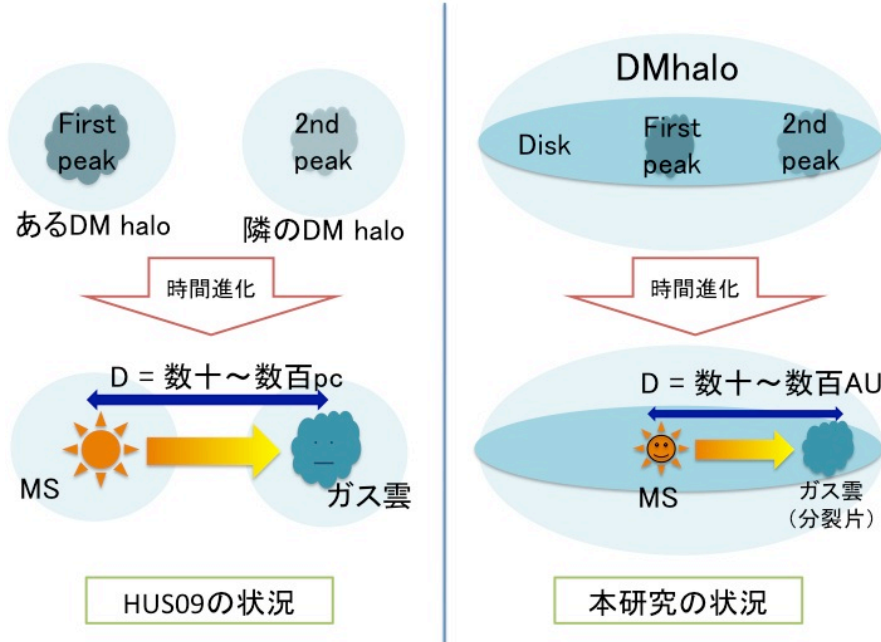
よって、分裂片の進化を追うためには、このような高密度なガス雲の進化を計算する必要がある。この試みに対しては、3.3章で説明するような困難があり、計算できる様にコードを開発中である。

3.2 シミュレーション

輻射輸送とガスの力学・化学進化を同時に（無矛盾に）解く三次元SPHコードである“START”を使用させて頂く。（Hasegawa&Umamura2010）

STARTコードではガスの力学進化は以下の式で計算される。それぞれ、質量保存の式（式3.1）、運動量保存の式（式3.2）、エネルギー保存の式（式3.3）、状態方程式（式3.4）である。ここで各記号は、密度 ρ 、圧力 p 、

図 3.1: Hasegawa, Umemura & Susa 2009 と本研究の状況比較



流体素片の速度ベクトル \mathbf{v} 、重力ポテンシャル Φ 、流体素片の単位質量辺りの内部エネルギー u 、正味の冷却率 Λ 、平均分子量 μ 、陽子質量 m_p 、比熱比 γ である。

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho\nabla \cdot \mathbf{v} \quad (3.1)$$

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p - \nabla\Phi \quad (3.2)$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{p}{\rho}\nabla \cdot \mathbf{v} - \frac{\Lambda}{\rho} \quad (3.3)$$

$$p = \frac{k_B T}{\mu m_p} \rho = (\gamma - 1)\rho u \quad (3.4)$$

式 3.3 の右辺第 1 項は圧力による仕事と流体の運動によって得るエネルギーであり、第 2 項は冷却と加熱の効果をし合わせた正味の冷却率になっている。

次に考慮されている化学進化について述べる。化学種は 6 種で、電子 e 、陽子 p 、水素原子 $H \cdot H^-$ 、水素分子 $H_2 \cdot H_2^+$ である。加熱冷却過程に関しては、水素分子の振動回転遷移による冷却の他に、電離・解離、Optically thick な状態での Line cooling も考慮している。

最後に、今回の計算は計算は筑波大学計算科学研究センターの First で計算を行っている。

本発表の段階では、本計算は始まっていない。なぜなら、次の 3.3 章で説明する様に、高密度領域で電離波面を正確に追うことの難しさがあるからである。そこをクリアするために、行っているコードの改善と違ったアプローチでの計算方法の案を 4 章で説明する。

3.3 初期条件作り

この章では、本計算をするための初期条件作りについて述べる。3.1 章で見た様に、G11 から読み取った値を参考に初期条件を設定する。

DM halo 中心でできた星周りの円盤内の分裂片の典型的な値として、 D は数十～数百 AU とし、分裂片の質量を 10 太陽質量程度として n_{on} は $10^{10} [cm^3]$ 程度の値を採用する。このときガス球を一様とすると、半径は 400AU 程度となる。

次に、式 3.5 で Stromgren 長を定義する。

$$str \equiv \frac{N_{ion}}{4\pi D^2} \times \frac{1}{\alpha_B n^2} \quad (3.5)$$

ここで、 N_{ion} は単位時間あたりの電離光子数を表し、 $N_{ion}/4\pi D^2$ は単位時間にガス球の単位面積あたりに入射する光子数を表す。また、 α_B は on the spot 近似を使った時の再結合率を表し、 n は全種族合わせた水素の数密度を表す。on the spot 近似とは、再結合時に基底状態に結合した組み合わせは、その時に放出した光子がすぐに隣の水素原子を電離すると考える近似で、そうすることで、基底状態への再結合はもともとカウントしない再結合率を定義することができる。それが α_B である。この値は、 $2.59 \times 10^{-13} [cm^3/s]$ とする。

str を求めるためには、MS からの輻射 N_{ion} と D を設定する必要がある。MS からの輻射は単位時間あたりの電離光子数で 10^{50} 程度に設定する。これは Lyman-Werner バンドのフラックスで言うと、 $5 \times 10^{23} [erg/s]$ 程度に相当する。また、 D として数十～数百 AU を採用し、 n を n_{on} の $10^{10} [cm^3]$ とすると、 str の値は $10^{-5} - 10^{-1} AU$ のオーダーとなる。

ここで、先程設定したガス球の値と stromgren 長 (str) を比較することで、この設定で電離波面を分解し、伝搬を計算することができるのかどうかを見積もる。

粒子数が 2^{18} (26 万程度) としているので、1 次元方向の SPH 粒子数は 2^6 個 (64 個) しかない。よって、ガス球の半径は 400AU の状態では 1 粒子の大きさ h は 10AU 程度である。一方、 str は $10^{-5} - 10^{-1} AU$ なので、これでは電離波面を分解できない。

よって、このままでは、行いたい計算をすることができないので、粒子数を増やし、分解能を上げることを考えたい。しかし、 h を str を分解できる様にするためには、粒子数を次元方向に 2-6 桁上げる必要があり、3 次元で 6-18 桁粒子数を増やすことになる。これは現実的でないので、粒子数を上げるという対応では問題を解決できない。

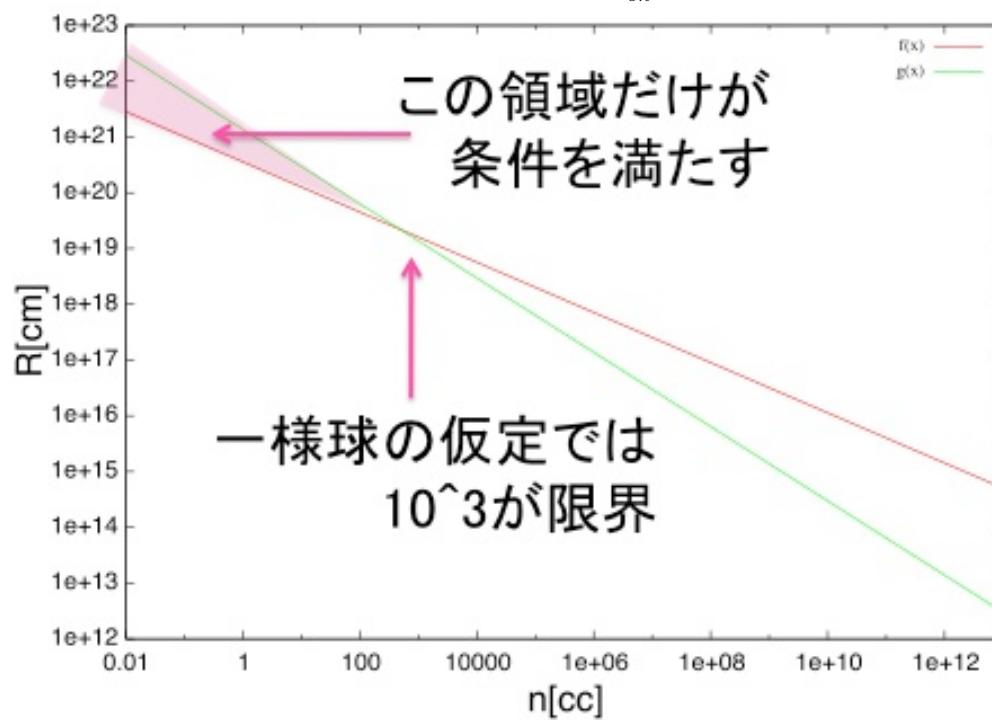
では、現在の粒子数で電離波面を分解できる、 D と n_{on} の組み合わせはどういったものなのかを検討してみる。ここで課す条件は、以下の 4 つである。

- (1) ガス球の質量は、重力崩壊を起こすための条件： $M > M_J$
- (2) 電離波面を分解するための条件： $str > h$
- (3) ガス球と MS が近すぎたり遠すぎたりするのは現実的でないので： $D \simeq$ ガス球の半径
- (4) 簡単のためガス球は一様球とする

このとき、全ての条件を満たす D と n_{on} の組み合わせは、図 3.2 の赤い領域である。これより、現在の粒子数では D が数十 pc で n_{on} が $10^3 [cm^3]$ 程度の組み合わせまでしか、計算できない。

よって、より高密度な領域で電離波面を分解するような計算方向を考える必要がある。現在、次の 4 章で述べる方法について、検討を行っている。

図 3.2: 4つの条件を満たす D と n_{on} の組み合わせ



4 まとめと今後の課題

本研究では初代星形成過程において、中心星周りの円盤内でできた分裂片が受ける、中心のMSからの輻射の影響を考察する。特に先行研究では解けていない電離波面の伝搬をとき、電離光子の及ぼす影響を正確に見積もることを目的としている。現在の粒子数では $10^3 [cm^3]$ 以上の高密度な初期条件で計算することは困難であることが分かった。

今後の方針としては以下の二つを検討中である。

- (1) 星全体でなくMSからの輻射があたる部分をシェルとして計算し電離波面周辺の分解能を上げること
- (2) 質量降着期では外層の密度が下がって行くため、この段階の分裂片にガスに輻射をあててみる

参考文献

- [1] A. Stacy, Thomas H. Greif & V. Bromm 2012 , MNRAS, 422, 290
- [2] K. Hasegawa, M. Umemura & H. Susa 2009 , MNRAS, 395, 1280
- [3] T. H. Greif , V. Springel et al. 2011 , ApJ, 737, 75