

氏名	阿左美 進也
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第10199号
学位授与年月日	令和4年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Suppression of H₂ formation due to Ly α feedback in early cosmological objects
(宇宙論的初期天体における Ly α フィードバックによる H₂ 分子形成抑制効果)

主査	筑波大学教授	博士(理学)	大須賀 健
副査	筑波大学教授	理学博士	梅村 雅之
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	森 正夫
副査	筑波大学准教授	博士(物理学)	矢島 秀伸
副査	甲南大学教授	博士(理学)	須佐 元

論 文 の 要 旨

宇宙論的初期天体は現在の銀河とは異なり金属元素が含まれていないため、水素原子もしくは水素分子(H₂)が主な冷却材となる。水素原子冷却が支配的な場合には、ガスの温度は 8,000 K 程度となるが、H₂ 冷却が支配的な場合には、ガスの温度は数百 K まで下がる。H₂ 冷却が支配的な場合には、質量が 10³ M_⊙ (M_⊙は太陽質量)以下の PopIII 星が形成されると考えられているが、水素原子冷却が支配的な場合には、質量が 10⁴⁻⁶ M_⊙の超大質量星(SMS)が形成されると考えられている。このような、水素原子冷却が支配的で、重力収縮が可能なガス雲を ACH(Atomic Cooling halo)と呼ぶ。先行研究により、SMS は一般相対論的重力不安定により同程度の質量を持った大質量ブラックホールを形成すると考えられており、この大質量ブラックホールは高赤方偏移 $z > 7$ で観測されている超大質量ブラックホール(SMBH)へと成長する種ブラックホールの候補の一つとして考えられている。このように、ACH から大質量ブラックホールを形成するシナリオは Direct collapse モデルと呼ばれている。初期天体で H₂ 形成を抑制し、ACH の Direct collapse へつながるメカニズムとして考えられているのは、外部からの紫外線放射による H₂ の光解離である。H₂ の光解離に必要な紫外線は Lyman-Werner (LW) 放射と呼ばれており、11.2-13.6 eV のエネルギーを持つ。この外部紫外線は、ガス雲の周りで既に形成された星から放出される。ACH 中の H₂ を抑制するために必要な外部紫外線輻射強度の臨界値についての研究はこれまで様々行われてきたが、その値は確定していない。近年、Johnson & Dijkstra (2017) により、水素原子冷却の際に放出される Ly α 光子がこの臨界値に大きな影響を与えることが示唆された。初代天体中の H₂ は H⁻イオンを材料として形成されるため、Ly α 光子が H⁻イオンを光脱離することにより H₂ 形成が抑制される。Johnson & Dijkstra (2017) は、Ly α 光子による H⁻イオンの光脱離により、H₂ 形成を可能とする外部紫外線輻射強度の上限臨界値を低下させることができることを示した。ガス雲の質量が 10⁶ M_⊙ のモデルにおいて、臨界値の低下率は最大で 80 %になる。しかしながら、彼らは one-zone モデルを用い

てACHの進化計算を行っており、Ly α 輻射輸送に対しても非常に簡単なモデルを仮定した。

本論文では、外部紫外線輻射強度の上限臨界値を正確に求めるために、一次元球対称の下で流体とLy α 輻射輸送および非平衡化学進化をカップルした計算を行った。Ly α 光子の重要な性質として、系全体での光学的厚みが非常に大きくなりやすいことが挙げられる。水素原子に対するLy α 光子の吸収断面積は $\sigma \sim 10^{-14} \text{cm}^2$ と大きいので、Ly α 光子の中心振動数での光学的厚みが大きくなる状況が発生しやすい。さらに、水素原子の $2p \rightarrow 1s$ 遷移のEinstein A係数は $A_{21} = 6.28 \times 10^8 \text{s}^{-1}$ と非常に大きいので、吸収されたLy α 光子はすぐに再放出される。そのため、この吸収・再放射プロセスを散乱プロセスとして考えることができる。Ly α 光子のもう一つの重要な性質として、散乱による振動数変化が挙げられる。この散乱過程は原子静止系でコヒーレント散乱になる。したがって、原子が動いていない状況では、散乱断面積は自然減衰によるLorentzプロファイルを持つことになる。しかしながら、原子は熱運動をしているため、この運動によるDopplerシフトを考慮する必要がある。この振動数シフトはLy α 光子の伝播に対して非常に重要な効果である。なぜなら、散乱断面積は振動数に対して変化が大きく、振動数中心と中心から少し離れた振動数での散乱断面積は 10^5 程度の違いがあるからである。本論文では振動数シフトを含めたLy α 光子の輻射輸送を拡散方程式によって扱った。流体計算では、HLLC近似リーマン解法を用いて数値流速を扱い、Runge-Kutta monotonicity preserving method (RK-MP)を用いて時間発展を解いた。初期条件は、maximum expansionで設定し、ガス雲の初期の個数密度、温度、速度をそれぞれ、 $n_{\text{init}} = 0.1 \text{cm}^{-3}$, $T_{\text{init}} = 100 \text{K}$, $v_{\text{init}} = 0$ と設定した。

初めに、外部紫外線輻射とLy α 輻射によるH $_2$ 形成抑制効果を確認した。外部紫外線輻射が存在しない場合には、ガス雲の断熱収縮期においてH $_2$ が形成され、ガス雲の温度は急激に減少する。そのため、この状況では、Ly α 光子が放出される温度まで達することはない。一方で、十分に強い外部紫外線輻射が存在する場合には、Ly α 輻射の有無にかかわらず、ガス雲中のH $_2$ 形成を抑制できるため、ガス雲は高温を保ちながら収縮できる。外部紫外線輻射強度によるH $_2$ 形成抑制を考える際には、H $_2$ の自己遮蔽が重要になる。ガス雲の収縮とともにH $_2$ の柱密度が上昇し、その結果、中心における外部紫外線輻射の輻射強度が自己遮蔽効果により減少する。そのため、ガス雲の収縮とともに、H $_2$ の光解離率は減少していく。一方で、温度を高温に保って収縮した場合には、個数密度が $n > 10^3 \text{cm}^{-3}$ の領域において、衝突性解離によるH $_2$ 形成抑制効果が効き始める。これより、衝突性解離が有効になる時期まで外部紫外線輻射によりH $_2$ 形成を抑制できるかどうかが重要になる。また、Ly α 光子が放出されるためには、少なくともACHの水素原子冷却による等温収縮が始まる時期まで、H $_2$ 形成を抑制する必要がある。等温収縮が始まるのは、おおよそ $n = 10^2 \text{cm}^{-3}$, $T = 8000 \text{K}$ となる時期である。Ly α 光子によるH $_2$ 形成抑制効果を確認するために、Ly α 光子の効果を含めた場合と、含めなかった場合について計算し比較を行った。Ly α 光子の効果を含めた場合には、等温収縮が始まる時期からH $^+$ イオンの割合がLy α 光子の効果を含めなかった場合に対して減少し始め、それに従い、H $_2$ の割合も減少していく。したがって、外部紫外線輻射強度の値を同じに設定した場合でも、Ly α 光子を含めることによりH $_2$ の割合を小さくできることが確認できた。このように、外部紫外線輻射強度の値をLy α 光子により小さくできるという先行研究の結果を確認できたが、本計算の結果、先行研究ではLy α 光子の効果を通り過ぎて過大評価していることが明らかとなった。主な理由として、次の二つが挙げられる。一つは、Ly α 光子の全光度の違いであり、二つ目はLy α 光子の放射率分布の違いである。先行研究での全光度の見積もりは、one-zoneモデルでの密度進化を用い

て、中心一様コアが等質量で収縮することを仮定し、重力エネルギーが Ly α 光子として解放されるとして、全光度を評価していた。しかしながら、一次元球対称の流体計算では中心一様コアの質量は収縮とともに減少していくため、全光度は先行研究の簡単なモデルよりも小さくなることがわかった。また、放射率の半径分布に関しては、先行研究では boost factor として与えており、時間的に一定の値を用いている。しかしながら、この値は時間依存しており、H $_2$ の割合が最大値になる時期において、中心での boost factor が最小値となることがわかった。これは、H $_2$ の割合が大きくなり、H $_2$ 冷却の効果が無視できなくなることにより、中心でのガス雲の温度が 7000 K 程度まで減少することが原因として挙げられる。このことから、この時期における boost factor は中心の温度が 8000 K 程度に保たれている他の時期に比べて小さくなる。以上の理由から、H $_2$ の割合が最大になる時期において、Ly α 光子の中心での平均輻射強度は 3 ~ 5 倍程度小さくなる。これにより、外部紫外線輻射強度の臨界値の低下も小さくなることがわかった。

次に、外部紫外線輻射強度の臨界値の低下と ACH の初期質量の関係を調べるために、ACH の初期質量を $M_{\text{init}} = 3 \times 10^6 M_{\odot} \sim 10^8 M_{\odot}$ の範囲で変えた計算を行なった。その結果、Ly α 光子の効果を含まなかった場合には、質量が大きくなるにしたがって H $_2$ の柱密度が大きくなるため、自己遮蔽により外部紫外線輻射強度の臨界値が大きくなった。一方で、Ly α 光子の効果を含めることにより、Ly α 光子の光度および光学的厚みは質量の増加とともに大きくなるため、質量がより大きなガス雲において、Ly α 光子による外部紫外線輻射強度の臨界値の低下が大きくなることがわかった。これにより、質量が大きくなるにつれて、臨界値はほぼ一定の値となることが分かった。そして、この結果を他の研究でも利用できるよう、外部紫外線輻射強度の臨界値の質量依存性を表すフィッティング関数を導出した。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本論文は、Ly α 光子の効果に注目し、重力収縮する原始ガス雲において、水素原子冷却が支配的となって超大質量星形成に至るために必要な外部紫外線輻射強度の臨界値を計算したものである。Ly α 光子の振動数シフトを含めた輻射輸送方程式は、微分積分方程式になるため、扱いが難しく計算コストも非常に大きくなるため、これまで Ly α 光子輻射輸送と流体を結合した研究は行われてこなかった。本論文では球対称の設定の下、拡散方程式に基づく Ly α 輻射輸送と流体および非平衡化学進化をカップルした計算を初めて行った。計算の結果、Ly α 光子による H $_2$ 形成抑制効果により外部紫外線輻射強度の臨界値は輻射輸送を解かなかった先行研究とは大きく異なること、またガス雲の初期質量が大きいところで、ほぼ一定値に近づくことを明らかにした。この結果は、初期宇宙における大質量星形成ならびに引き続いて起こるとされている大質量ブラックホール形成に大きな影響を与えるものであり、その学術的意義は高く評価される。

〔最終試験結果〕

令和4年2月7日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。