

星間 28a 「第一世代星の形成過程におけるダークマター対消滅の影響」

平野 信吾 (東京大学 M1)

1. 概要

第一世代星の形成・進化の道筋を解明することは現代天文学の重要な課題の1つである。第一世代星の誕生によって宇宙暗黒時代は終わり、その星の内部では後の世代の星形成において必要となる重元素が合成される。また第一世代星はその最期で比較的質量の大きなブラックホールとなり、これが未だ形成プロセスが不明とされている超大質量ブラックホールの種になるのではないかと考えられている。このシナリオは赤方偏移 $z\sim 6-7$ という宇宙初期のクエーサーについての説明になるのではないかと期待されている。このように第一世代星は宇宙の構造形成・化学進化を考える上で諸処に大きく影響するため、その性質や最終的な姿を理解することは重要な課題と言える。

大規模な数値シミュレーションを用いて、初期宇宙から第一世代星が形成されるまでの様子が明らかにされつつある (Abel et al. 2002 [1]; Yoshida et al. 2006 [10]; Gao et al. 2007 [3])。これらの研究によると、第一世代星は、赤方偏移 $z\sim 10-50$ の頃に質量 $10^5-10^6 M_{\text{SUN}}$ のダークマターハローの中で形成される。このハローにはダークマターが約 85%、バリオンが約 15%含まれており、この値は宇宙全体の組成比と大きく変わらない。この内部でバリオンが化学的冷却過程によって収縮していき、ハローの中心部分に原始星が形成される。

Spolyar et al. (2008) [7] は第一世代星の成長過程における新たなシナリオを提案した。数値シミュレーションによる研究から、第一世代星の内部でダークマターが高密度になることに、彼らは注目した。ダークマターのモデルとして WIMP (Weakly Interacting Massive Particles) を採用すると、この粒子は同粒子と反粒子の関係にあるため同じ粒子同士で対消滅反応を起こす。ダークマター密度が高いほどこの対消滅反応が起きる頻度は大きくなるため、第一世代星の内部はこの対消滅反応が効率よく起きる場所だと考えられる。彼らはこの WIMP ダークマターの対消滅反応から生じるエネルギーが核反応から発生するエネルギーに代わって星の重力収縮を支えるという、新たな星の状態を提案した ("Dark Star")。このモデルについては数値計算による研究が行われており (Natarajan et al. 2008 [6]; Iocco et al. 2008 [4]; Spolyar et al. 2009 [8])、最終的に従来の第一世代星モデルよりもかなり大質量まで成長することがわかってきた。

本研究では、恒星進化コードを用いて Dark Star モデルの数値計算を行った。今回はこの計算結果を紹介し、Dark Star モデルの性質についての紹介とする。またモデルのパラメータを変えた場合についての結果の比較も行う。最後に今後の課題と展望を述べる。

2. 計算方法

今回、我々は恒星進化コードを用いて **Dark Star** モデルの数値計算を行った。10 M_{SUN} のゼロ金属量星を初期条件として、時間経過と共に質量降着によって星の質量が成長していく様子を計算した。表面温度が 10^5K 程度になると周囲のガスを電離して質量降着を妨げる仕組みが働き出すので (McKee & Tan 2008 [5])、この時点で計算を止めた。また今回は核反応エネルギーを計算に含んでいないが、計算中の星の中心温度は核反応が対消滅反応に対して優位にならない十分な低温状態となっているため、この仮定は適当といえる。

星の内外のダークマター密度分布の計算には Blumenthal et al. (1986) [2] で用いられている方法を用いた。これは近似的にダークマターの断熱収縮を計算する方法であり、今回の計算ではバリオンの質量降着率に依存して値が変化する。計算されたダークマターの密度分布を用いると、単位時間・単位体積あたりの対消滅エネルギーは次のように表される。ここで $\langle\sigma v\rangle$ はダークマター対消滅の反応率、 m_χ はダークマターの質量、 ρ_χ はダークマターの密度を表す。

$$Q_{DM} = \frac{\langle\sigma v\rangle_{ann} \rho_\chi^2}{m_\chi} \quad [\text{GeV}/\text{cm}^3/\text{sec}] \quad (1)$$

この式を星全体で積分することで、対消滅の全エネルギーが求まる。

Dark Star モデルの計算のために追加されるのは以上であり、このときモデルのパラメータは実効的に2つとなる。1つはダークマター密度を計算する際に影響するバリオンの質量降着率であり、もう1つは式(1)に現れているダークマターの物理量である。後者は $\langle\sigma v\rangle$ と m_χ の2つがあるが、1つの式にしか現れないため一方を変化させればもう一方を変化させた場合を計算する事と同じである。ここでは m_χ に値に代表させて変化を表す。

次節で数値計算の結果を示す。まず、以下のパラメータを採用した計算結果を紹介する。質量降着率は Gao et al. (2007) [3] での宇宙論的数値シミュレーションから得られた値であり、物理量は WIMP ダークマターモデルにおける標準的な値となっている。

$$\begin{aligned} m_\chi &= 100[\text{GeV}] \\ \langle\sigma v\rangle_{ann} &= 3 \times 10^{-26} [\text{cm}^3/\text{s}] \\ \frac{dM}{dt} &= 0.18 M^{-0.6} [M_{\text{SUN}}/\text{yrs}] \end{aligned} \quad (2)$$

次に、質量降着率を変えた場合の計算結果との比較を行う。比較する計算モデルには Tan & McKee (2004) [9] から得られる質量降着率を用いた。最後に物理量を $m_\chi = 50 \text{ GeV}$ に変えた場合の計算結果との比較を示す。

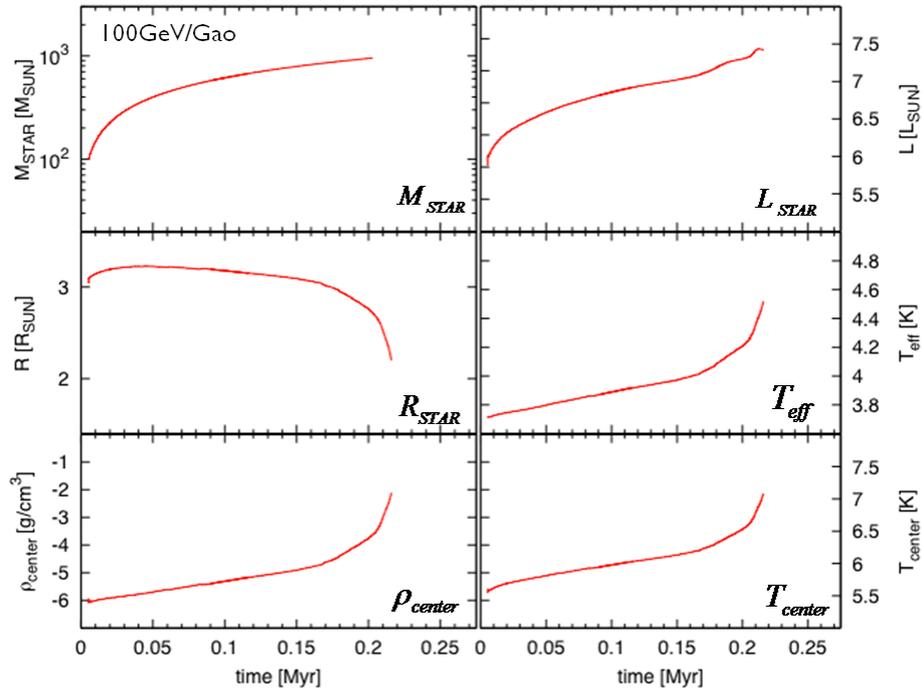


図 1 : 基準パラメータにおける Dark Star モデルの数値計算結果(縦軸対数)

3. 計算結果

3.1. 基準モデル

図 1 は基準としたパラメータにおける Dark Star モデルの数値計算結果であり、重要な物理量をまとめたものである(星の全質量以外のプロットは縦軸対数)。初期状態 ($10 M_{\text{SUN}}$) で既に大きな対消滅エネルギーが発生しており、そのため星は大きく膨張し ($R > 10^3 R_{\text{SUN}}$)、低温になっている ($T_{\text{eff}} < 10^4 \text{ K}$, $T_{\text{cen}} < 10^6 \text{ K}$)。この時、表面温度は質量降着を妨げない程度に十分低く保たれている。断熱収縮によって星内部のダークマターが十分供給される限りこの状態は継続し、約 0.2 Myr の間続いている。この間、星の重力収縮はダークマター対消滅エネルギーによって支えられていることになる (Dark Star Phase)。

最終的にダークマターの断熱収縮による供給率を対消滅による消費率が上回ると、対消滅エネルギーでは星が支えきれなくなる。すると星は収縮を始め、星内部のダークマター量は急速に減少していく。中心温度が $T_{\text{cen}} \sim 10^7 \text{ K}$ となったところで計算を止めたが、このとき星の質量は $10 \rightarrow 900 M_{\text{SUN}}$ まで成長していた。これは従来の第一世代星モデルの場合の最終的な質量 ($\sim 100\text{-}200 M_{\text{SUN}}$) に比べて非常に大きな値である。

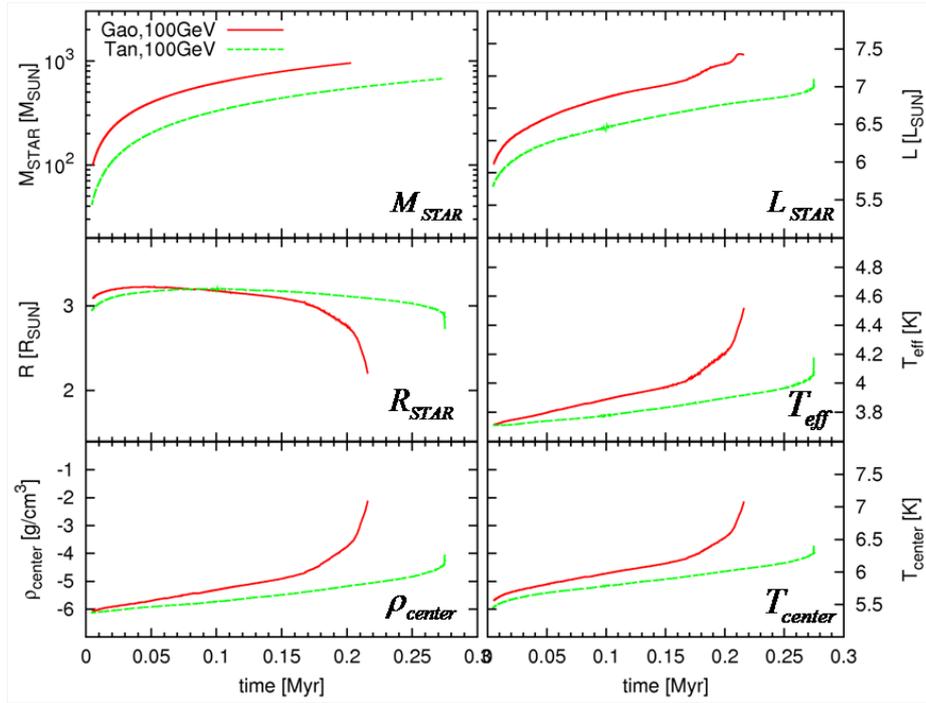


図 2 : 質量降着率の違いによる比較

赤線 : Gao et al. (2007)

緑線 : Tan & McKee (2004)

3.2. 質量降着率が異なる場合

図 2 は質量降着率には Gao et al. (2007) [3]を採用している基準モデルの計算結果と Tan & McKee (2004) [9]の質量降着率を用いた計算結果とを一緒にプロットしたものである。質量降着率はそれぞれ以下の式で表される。

$$\frac{dM}{dt} = 0.18M^{-0.6}[M_{SUN} / yrs] \quad \text{Gao et al. (2007)} \quad (3)$$

$$\frac{dM}{dt} = 0.023M^{-0.4}[M_{SUN} / yrs] \quad \text{Tan \& McKee (2004)} \quad (4)$$

式(3)に比べると式(4)は一桁ほど小さい。質量降着率が小さい場合、星の質量の成長が遅くなり、その間星の重力収縮を支えるために余計に対消滅を起こすため、消費されるダークマターの量が増加する。そのため質量降着率が大きな場合と比べて、星の質量が同じ時に星内部に含まれるダークマター量が少なくなってしまう。従って大きな質量降着率のモデルに比べて小さなモデルでは、星の質量がより小さな時点で重力収縮と対消滅エネルギーとのバランスが崩れて星は収縮に転じることになる。このことは計算結果にも現れており、図 2 を見ると、質量降着率が小さい場合の方が **Dark Star Phase** の期間は長くなり、最終的な質量は小さくなっている。

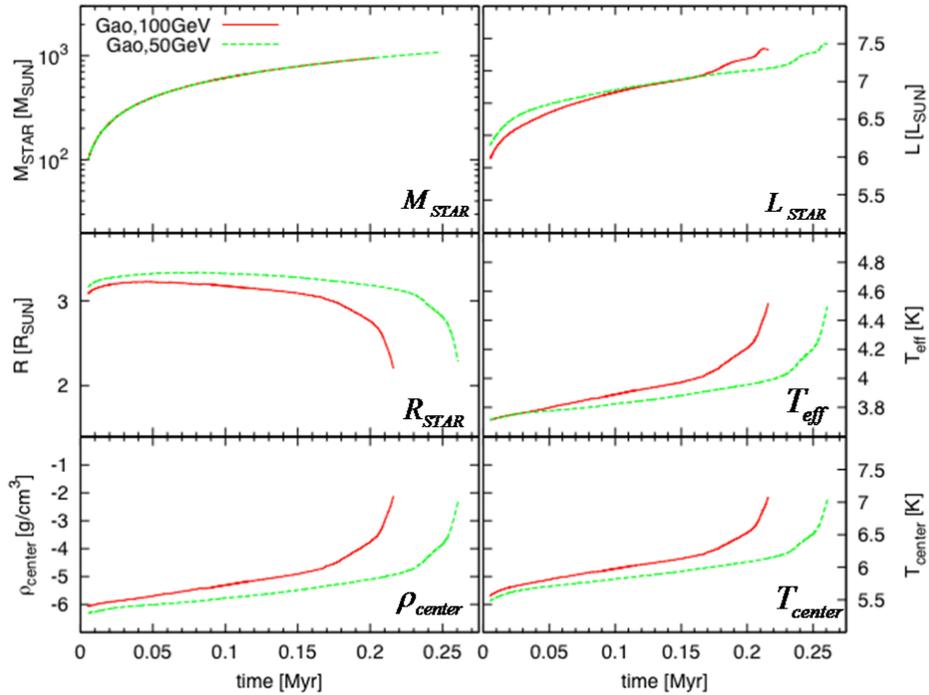


図 3 : ダークマター質量による違い

赤線 : $m_\chi=100$ GeV

緑線 : $m_\chi=50$ GeV

3.3. ダークマターの質量が異なる場合

図 3 はダークマター質量が $m_\chi=100, 50$ GeV の 2 つの場合の計算結果を並べたものである。式(1)より、対消滅から発生するエネルギーがダークマターの質量に反比例するため、より質量が小さな方がエネルギーは大きくなり、従って **Dark Star** としての性質は強まると考えられる。

実際の計算結果もこのようになっている。ダークマター質量が小さいモデルの方が星は大きく膨張して低温・低密度になっている。対消滅エネルギーが大きくなるため更に大質量の状態まで支える事ができるようになるため、**Dark Star Phase** は延長し (0,2→0,25 Myr) 、最終的な質量も増加する (900→1100 M_{SUN}) 。

4. まとめと今後の課題

WIMP ダークマターの対消滅エネルギーを考慮に入れる事で、第一世代星がその進化の途中で **Dark Star** という状態になり、従来の進化シナリオとは異なる状態へと成長するのではないかというアイデアが提唱された。今回、恒星進化コードを用いて **Dark Star** モデルの数値計算を行ったところ、微量のダークマターによって星が支えられる状態が実現し、それが長期間持続する事が示された。その間 **Dark Star** の表面温度は低く保たれるため、質量降着は妨げられずに持続し、第一世代星は大質量 ($\sim 900 M_{\text{SUN}}$) に成長することができる。この計算結果は先行研究の結果ともよく合致する。

また **Dark Star** モデルに関わる2つのパラメータを変えたモデルを計算したところ、バリオンの質量降着率が小さくなると **Dark Star Phase** は長く・最終質量は小さくなる傾向が、ダークマター質量を小さくすると **Dark Star Phase** は長く・最終質量は大きくなる傾向が得られた。いずれの場合も従来のモデルよりも大質量まで成長するので、このパラメータ範囲では **Dark Star** としての性質は失われないことがわかった。

今後の課題としては、まず今回も行ったパラメータを変えたモデル計算について、より広い範囲でパラメータを取り、パラメータによる **Dark Star** の性質の変化についてまとめるつもりである。今回のパラメータ範囲では第一世代星は必ず **Dark Star Phase** となるが、どのようなパラメータでもこの性質は保たれるのかを確認する。

次に、今回は計算に含めなかった核反応からのエネルギーを追加して原始星から **Dark Star Phase** を通って主系列に移行する様子の計算を行う。大質量の第一世代星が最終的にどのような状態になるのかについても計算を進めたい。

5. 参考文献

- [1] T. Abel, G. L. Bryan, M. L. Norman, *The Formation of the First Star in the Universe*, Science. 295 (2002) 93.
- [2] G. R. Blumenthal, S. M. Faber, R. Flores, & J. R. Primack, *Contraction of Dark Matter Galactic Halos due to Baryonic Infall*, Astrophys. J. 301 (1986) 27.
- [3] L. Gao, N. Yoshida, T. Abel, C. S. Frenk, A. Jenkins, V. Springel, *The first generation of stars in the Λ cold dark matter cosmology*, MNRAS 378 (2007) 449.
- [4] F. Iocco, A. Bressan, E. Ripamonti, R. Schneider, A. Ferrara, P. Marigo, *Dark matter annihilation effects on the first stars*, MNRAS 390 (2008)1655.
- [5] C. F. McKee & J. C. Tan, *The Formation of the First Stars II. Radiative Feedback Processes and Implications for the Initial Mass Function*, Astrophys. J. 681 (2008) 771.
- [6] A. Natarajan, J. C. Tan, B. W. O'Shea, *Dark Matter Annihilation and Primordial Star Formation*, Astrophys. J. 692 (2009)574.
- [7] D. Spolyar, K. Freese, P. Gondolo, *Dark Matter and the First Stars : A New Phase of Stellar Evolution*, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 1101.
- [8] D. Spolyar, P. Bodenheimer, K. Freese, P. Gondolo, *Dark Stars : A New Look at the First Stars in the Universe*, arXiv:0903.3701 (2009).
- [9] J. C. Tan & C. F. McKee, *The Formation of the First Stars I. Mass Infall Rates, Accretion Disk Structure, and Protostellar Evolution*, Astrophys. J. 603 (2004) 383.
- [10] N. Yoshida, K. Omukai, L. Hernquist, T. Abel, *Formation of Primordial Stars in a Λ CDM Universe*, Astrophys. J. 613 (2006) 406.