

A Review of the Effects of Dark Matter on Big-Bang Nucleosynthesis

Dukjae JANG* · Myung-Ki CHEOUN†

Department of Physics, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

(Received 3 July 2016 : revised 13 July 2016 : accepted 14 July 2016)

We present a brief review regarding the effect of dark matter on Big-bang nucleosynthesis (BBN). Light elements up to ${}^9\text{Be}$, whose abundances has been determined by using astrophysics spectroscopy and analysis of chondrites, are believed to have been produced during the BBN epoch. Therefore, the standard particle model, as well as models beyond the standard cosmological model, most produce results that are consistent with the abundances of elements produced during BBN. The need for such consistency can be used to put effective constraints on some of the parameters in such models. This paper addresses how dark matter (DM) affects element production and how important parameters of DM can be constrained by using BBN network calculations and observational data. For example, in this paper, the effects on BBN due to some dark-matter candidates, such as X-particles, sterile neutrinos and axions, along with constraints on the parameters from the BBN, are discussed.

PACS numbers: 26.35.+c, 95.35.+d

Keywords: Big-bang Nucleosynthesis, X-particle, Axion, Sterile neutrino, Dark matter

빅뱅 핵합성에서의 암흑물질의 효과 연구에 대한 고찰

장덕재* · 천명기†

승실대학교 물리학과, 서울 06978, 대한민국

(2016년 7월 3일 받음, 2016년 7월 13일 수정본 받음, 2016년 7월 14일 게재 확정)

이 논문에서는 빅뱅(Big-bang) 당시의 핵합성에 우리가 가정하고 있는 암흑물질이 얼마나 그 영향을 미칠 수 있는가를 최근의 논문들을 중심으로 개괄하고자 한다. 빅뱅 당시에 생성된 원소는 온도의 급격한 강하로 인하여 ${}^9\text{Be}$ 까지로 알려져 있다. 이 원소들은 우주 및 태양계의 정확한 분광 관측 및 미분화 화석 등의 분석에 의하여 존재비율이 비교적 정확하게 알려져 있으며 관련 핵반응도 실험적으로 확인이 되어 있는 상황이다. 따라서 어떠한 새로운 우주모델 혹은 입자 모델들도 관측된 초기 우주의 원소 존재 비율을 만족해야 하므로, 빅뱅 핵합성 이론은 새로운 모델들의 자유 변수를 제한시킬 수 있는 귀중한 분야이다. 본 논문에서는 최근의 X-입자(X-particle), 비활성 중성미자(sterile neutrino) 및 액시온(Axion) 등에 의한 초기우주 핵합성 비율의 변화 연구를 통하여 암흑물질이 초기 우주의 원소 생성에 어떤 식으로 영향을 미칠 수 있는가를 살펴보기로 한다.

PACS numbers: 26.35.+c, 95.35.+d

Keywords: 빅뱅 핵합성, X-입자, 액시온, 비활성 중성미자, 암흑 물질

*E-mail: havevirtue@ssu.ac.kr

†E-mail: cheoun@ssu.ac.kr



I. 서론

1940년대 후반 Alpher, Gamow, Bethe는 초기 우주의 고온 고밀도 상태가 핵합성을 가능하게 할 것이라는 이론을 제기했다 [1]. 고온에서 시작된 우주는 팽창함에 따라 급격하게 식어가게 되고, 온도 및 시간이 $T = 3 \text{ MeV} - 10 \text{ keV}$ ($t = 0.1 \sim 10^4 \text{ sec}$) 정도에 이르렀을 때 수소와 헬륨, 리튬 같은 가벼운 핵들의 합성이 일어난다. 1965년 위의 이론을 지지하는 우주배경복사가 Penzias와 Wilson에 의해 관측되었고, 더불어 우주관측에 의한 원소의 존재비율이 확인 됨에 따라 빅뱅 핵합성 이론 (Big-bang nucleosynthesis, BBN)은 빅뱅 이론의 초석이 되었다. 이론적으로 계산한 초기우주에서 생성된 헬륨의 수소에 대한 비율은 약 0.25다. 이는 실제 관측 결과와 비교했을 때, 오차 범위 안에 들어오는 값이다 (Fig. 1). 표준 빅뱅 핵합성 이론은 비록 ${}^7\text{Li}$ 원소의 이론값이 관측값보다 3~4 배 정도 크게 나오는 이유를 설명하지 못하고 있지만, 수소와 헬륨 등의 원소가 초기우주에서 생성되는 메커니즘을 (Fig. 2) 관측 오차내에서 구현한다.

빅뱅 핵합성 이론의 연구가치는 단순히 초기 우주에서의 핵합성 과정을 설명하는 것만으로 그치지 않는다. 앞서 보듯이 빅뱅 핵합성 이론의 가장 큰 장점 중 하나는 이론값과 비교해볼 수 있는 관측 데이터 [2-5]가 존재한다는 것이다. 이 관측 결과는 우주 배경 복사와 함께 현재로서 인류가 관측한 가장 오래된 우주의 신호이다. 이러한 빅뱅 핵합성 이론의 신호는 새로운 물리 현상을 설명하는 모델에 구속 조건을 부여할 수 있다. 예를 들어 새로운 물리현상을 기술하는 모델이 만들어졌을 때, 그 모델은 초기 우주에서 일어나는 현상 역시도 관측 결과와 맞게 설명할 수 있어야 한다. 이것은 빅뱅 핵합성 이론이 단순히 초기 우주 핵합성의 이해를 넘어 새로운 물리현상을 시험해 볼 수 있는 도구가 됨을 뜻한다.

만약 초기 우주에서 암흑 물질들이 존재했다면, 그 암흑 물질들은 빅뱅 핵합성 시기를 거치며 초기 우주에서의 핵합성에 직·간접적으로 영향을 주었을 것이다. 따라서 암흑 물질에 연구에 대해서도, 빅뱅 핵합성 이론은 암흑물질 모델을 시험해볼 수 있는 도구가 될 수 있다. 현재 베일에 가려져 있는 암흑 물질에 대해서는 정확한 관측 결과나 실험 결과가 없기 때문에 수 많은 이론적인 모델들이 존재한다. 본 논문에서는 이러한 여러 암흑 물질 모델들 중 입자 암흑 물질 (particle dark matter) [6], X^- 입자 (Long-lived (-) charged massive particles) [7], 비활성 중성미자 (sterile neutrino) [8], 액시온 (Axion) [9] 등을 고려한 4가지 모델들이 우주 핵합성에 어떻게 영향을 줄 수 있는지에 대해 돌아볼 것이다.

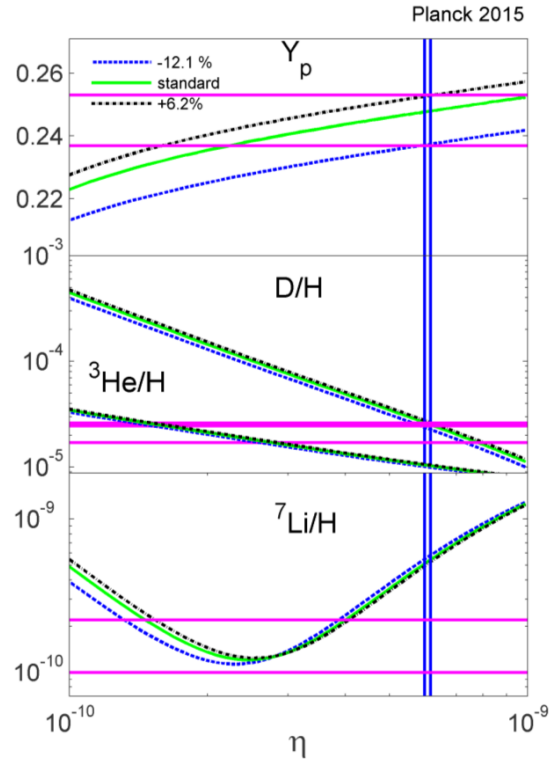


Fig. 1. (Color online) Abundances of light nuclei as a function of baryon to photon ratio (η) [10]. The solid green lines are theoretical prediction for the standard BBN. The dot dashed black and the dashed blue lines are the results for BBN with dark radiation model. The blue vertical line is the baryon to photon ratio deduced from the cosmic microwave background (CMB). The horizontal purple lines are observational data of primordial abundances.

II. 본론

암흑 물질 모델들을 초기 우주 핵합성에서 구현하기 위해서는 우선적으로 암흑 물질 모델이 초기 우주 핵합성에 어떤 영향을 주는지 분석해야 한다. 그러기 위해서는 초기 우주에서의 핵합성이 어떤 조건들에 의해 어떻게 결과가 변화하는 지를 아는 것이 중요하다. 본론에서는 초기 우주 핵합성에 영향을 주는 주요한 물리적 현상들을 알아보고, 암흑 물질들이 빅뱅 핵합성 결과에 미치는 영향들에 대해 설명할 것이다.

1. 우주 팽창 비율과 초기 우주 핵합성의 관계

초기 우주의 진화는 다음과 같이 아인슈타인의 방정식의 해인 프리드만 방정식으로부터 기술된다.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}. \quad (1)$$

a 는 우주의 크기 척도 (scale factor)이며, G 는 중력상수, ρ 는 에너지 밀도, k 는 곡률 상수 (표준 빅뱅 핵합성 이론에서는 평평한 우주 모형을 사용하므로 k 값은 0으로 놓는다), Λ 는 우주 상수를 의미한다. 식 (1)에서 $\frac{\dot{a}}{a}$ 을 허블 팽창 비율 (Hubble expansion rate) 또는 우주 팽창 비율 (cosmic expansion rate)이라 부르는데, 이는 우주가 얼마나 빠르게 팽창하는가에 대한 정보를 주는 척도이다. 일반적으로 이 척도는 H 로 표기된다.

초기 우주의 고온 고밀도의 상태는 기본 입자들의 상호작용이 평형상태에 있을 수 있는 조건을 제공한다. 그러나 우주가 점차 식어가며 이 평형상태는 깨지게 되고, 초기 우주에서 생성되는 입자의 최종 비율이 결정된다. 따라서 입자들 간의 상호작용의 평형상태가 깨지는 시점이 중요한데, 그 조건은 아래 식 (2)와 같이 우주 팽창 비율 H 와 입자들의 상호작용 비율 Γ 에 의해 주어진다 [13].

$$\Gamma \sim H. \quad (2)$$

예를 들어, 입자 A가 입자 B로 가는 반응이 일어난다고 가정해보자. 초기 우주의 고온 고밀도 상태는 두 입자 간의 평형상태를 가능하게 하기 때문에, $A \rightarrow B$ 반응과 $B \rightarrow A$ 반응 모두가 가능하다. 그러나 우주가 점차 팽창해가며 우주의 팽창 비율 H 가 입자들 간의 상호작용 Γ_{AB} 보다 커지게 되면, 평형 상태가 깨지게 되고 두 입자간의 비율은 달라지게 된다. 즉, 입자들의 상호작용 비율과 우주 팽창 비율은 초기 우주에서 입자들의 평형 상태로부터 최종 비율에 이르는 과정에 대한 정보를 제공한다.

특히, 식 (1)에 의하면 H 는 우주의 에너지 밀도에 비례한다. 고온의 초기 우주에서 입자들이 복사 (radiation) 형태로 돌아다니는 시기의 우주 에너지 밀도 ρ_r 은 다음과 같이 온도 T 에 대한 식으로 표현된다.

$$\rho_r = \frac{\pi^2}{30}g_*T^4. \quad (3)$$

g_* 는 입자의 자유도와 관계된 식으로 아래와 같이 주어진다.

$$g_* = \sum_{i=boson}g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^4 + \frac{7}{8}\sum_{i=fermion}g_i \left(\frac{T_i}{T}\right)^4. \quad (4)$$

이는 새로 가정된 입자의 자유도가 우주의 팽창 비율을 변화시킬 수 있음을 의미한다.

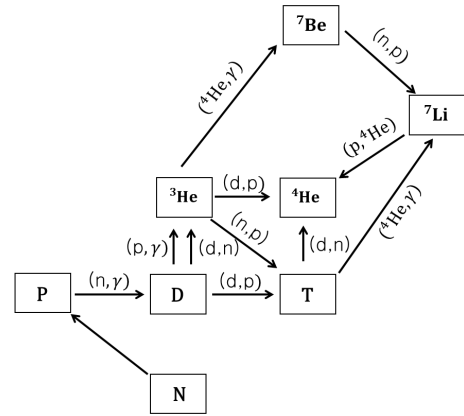


Fig. 2. Main nuclear reactions in the BBN. Although there are more minor nuclear reactions, their contributions are known to be small.

2. 우주의 에너지 밀도를 증가시키는 암흑 물질

만약 새로운 암흑물질 입자 χ 가 초기 우주에서 가정될 경우, 식 (4)에서와 같이 입자 χ 가 갖는 자유도는 우주 팽창 비율을 증가시키는 효과를 만든다 [6]. 그로 인해 더 급격히 식어가는 초기 우주는 양성자와 중성자 사이의 평형 상태를 보다 더 빠른 시기에 깨뜨리고, 이는 더 많은 ^4He 를 생성하게 한다 (식 (9)와 식 (10) 참고). 결국 암흑물질 모델에서 오직 χ 의 자유도만 자유 변수로 지정할 경우, ^4He 의 관측 결과를 통해 χ 의 자유도 값을 제한시킬 수 있다.

중성미자의 진동 실험에서의 이상 현상으로부터 예측되고 있는 비활성 중성미자 (sterile neutrino, ν_s)는 암흑물질의 후보로 언급되는데, 비활성 중성미자 역시 에너지 밀도에 기여하는 방식으로 우주 팽창 비율을 바꾸고 빅뱅 핵합성에 영향을 줄 수 있다. 비활성 중성미자가 초기 우주에서 가정될 경우, 우주의 에너지 밀도는 다음과 같이 표준 모형에서의 우주 에너지 밀도 $\rho_{standard}$ 에 비활성 중성미자의 에너지 밀도 ρ_{ν_s} 항을 더한 형태로 표현된다.

$$\rho = \rho_{standard} + \rho_{\nu_s}. \quad (5)$$

상호작용을 거의 하지 않을 것으로 가정되는 비활성 중성미자의 반응 비율이 작기 때문에, 비활성 중성미자의 평형 상태가 깨지는 시점은 초기 우주 핵합성이 일어나는 시기보다 더 이전의 시간이다. 그 이후 초기 우주 핵합성이 일어나는 시점에 영향을 미칠 비활성 중성미자의 양은 볼츠만 방정식 (Boltzmann equation) [13]을 통해 계산 가능하다. 여기서 중요한 물리적 양은 비활성 중성미자가 다른 입자와 얼마만큼 상호작용 하는가에 대한 정보다. 이는 중성미자 물리학에서 비중있게 다뤄지는 비활성 중성미자의 혼합 각 (mixing angle)과 관련이 있는데, 빅뱅 핵합성 관측

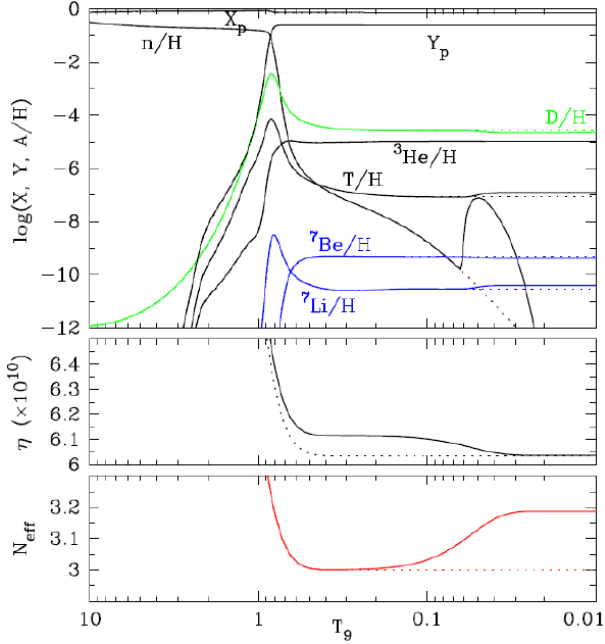


Fig. 3. (Color online) Uppermost panel shows primordial abundances including a sterile neutrino model as a function of temperature. Middle panel is the baryon to photon ratio as a function of temperature. By the decay of sterile neutrino, baryon to photon ratio is also changed. Lowermost panel indicates relevant effective neutrino numbers depending on the energy density of sterile neutrino. All results are from Ref. 8.

값으로부터 그 값의 범위를 제한할 수 있다. 또한 비활성 중성미자가 만약 붕괴 반응을 통해 비열광자(non-thermal photon)를 만든다면, 우주 팽창 비율 변화에만 기여하지 않고 초기 우주 핵합성 반응에도 직접적으로 영향을 줄 수 있다 (Fig. 3).

3. 중성자 양성자 비율과 Axion 모델

앞서 언급한 우주 팽창 비율이 핵 합성 변화에 미치는 간접적인 영향이라면, 이번 목차에서는 핵합성에 직접적으로 기여할 수 있는 물리적 요인들에 대해 살펴볼 것이다. 핵은 기본적으로 양성자와 중성자로 구성된다. 때문에 초기 우주의 핵합성이 일어나기 이전, 양성자와 중성자 간의 비율 (n/p)은 초기 우주 핵합성에서 중요하게 고려해야 할 부분이다. 초기 우주의 높은 온도는 양성자와 중성자를 아래 반응식과 같이 평형 상태에 있게 하지만,

$$n \leftrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (6)$$

$$\nu_e + n \leftrightarrow p + e^-, \quad (7)$$

$$e^+ + n \leftrightarrow p + \bar{\nu}_e, \quad (8)$$

우주가 점차 식어가면서 두 입자 간의 평형상태는 깨지게 된다. 마찬가지로 양성자와 중성자의 비율 역시 두 입자 사이의 상호작용이 평형상태로부터 평형이 깨지는 시점으로 가면서 결정된다. 평형 상태에서 중성자와 양성자의 비율은 아래의 식에 따라 정해진다 [13].

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp(-Q/T). \quad (9)$$

n_n 과 n_p 는 각각 중성자와 양성자의 개수 밀도(number density)를 의미하며, Q 는 양성자와 중성자 사이의 질량차이로 약 1.293 MeV 정도다. 또한 식 (2)로부터, 양성자와 중성자 간의 평형이 깨지는 온도는 약상호작용 비율 Γ_w 와 우주 팽창비율 H 에 의해 결정된다. 그 온도는 약 0.7 MeV 정도로, 이를 식 (9)에 대입하면 평형상태가 깨진 이후의 양성자와 중성자의 비율이 약 1/7로 수렴함을 보일 수 있다. 모든 중성자가 양성자와 결합해 ^4He 을 만든다면, 위에서 구한 양성자와 중성자의 비율을 바탕으로 간단하게 초기 우주에서 합성되는 ^4He 의 비율이 계산된다.

$$^4\text{He} \approx \frac{4(n_n/2)}{n_n + n_p} = \frac{2(n_n/n_p)}{1 + n_n/n_p} = 0.25. \quad (10)$$

양성자와 중성자의 질량 차이는 현재 실험 결과로부터 알려져 있는 값이다. 그러나 암흑 물질로 가능성이 높은 액시온은 양성자와 중성자의 질량 차이를 만들어낼 수 있는데, (양자색역학(quantum chromodynamics, QCD)의 CP 대칭성 깨짐(CP violation) 관련)으로부터 유도되었기에 가능한 시나리오임), 그것으로 빅뱅 핵합성 관측 결과와 비교한 연구가 있다 [9]. QCD 라그랑지안의 θ 항으로부터 중성자와 양성자의 질량 차이 식은 다음과 같이 유도된다 [14].

$$m_n - m_p = c_+ \frac{m_d^2 - m_u^2}{(m_u^2 + m_d^2 + 2m_u m_d \cos \theta)^{1/2}}. \quad (11)$$

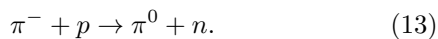
m_n 과 m_p 는 각각 중성자와 양성자의 질량이며, c_+ 는 실험으로부터 결정되는 상수, m_u 와 m_d 는 각각 u , d 쿼크의 질량을 의미한다. 위 식에서 θ 의 값이 초기 우주에서의 액시온 암흑 물질의 적색편이로부터 유도된다고 하면 [9], 현재의 θ 값은 매우 작기 때문에 액시온 암흑 물질에 의한 중성자와 양성자의 질량 차이 효과를 관측할 수 없다. 그러나 초기 우주에서는 θ 값이 양성자와 중성자의 질량 차이를 만들어내며, 그것이 중성자와 양성자의 비율을 바꾸고 빅뱅 핵합성에 영향을 주게 된다. 이 모델과 빅뱅 핵합성의 관측 결과를 이용하면, 액시온의 물리적 성질들을 제한할 수 있다 [9]. 이외에도 액시온에 관해서는 많은 모델들이 연구되고 있다. 예를 들어, 액시온이 마찰에 의한 우주 급팽창(cosmic inflation)에 영향을 주는 모델이나 또는 보즈-아인슈타인(Bose-Einstein) 응집 형태로의 액시온 모델 역시 초기 우주 핵합성에 영향을 미치는 경우가 있다.

4. 핵반응에 기여하는 암흑 물질들

초기 우주가 식어감에 따라 중성자와 양성자 간의 약한 상호작용의 평형상태가 깨지고 나면, 핵 반응을 통해 본격적인 핵합성이 일어나게 된다. 핵 반응에 의해 생성되는 핵들의 비율을 계산하기 위해서는 초기 우주에서 연쇄적으로 일어나는 여러 핵들의 반응을 모두 고려하여 계산해야 한다. 이런 핵반응들의 네트워크 계산은 수치계산으로 할 수 있는데 이에 대해서는 공개되어 있는 가와노 코드 (Kawano code) [11, 12]가 있다. 여러 핵들의 반응이 연쇄적으로 일어나는 초기 우주에서의 핵합성 과정은 네트워크 계산에 의해 진행된다. 일반적으로 $N_i(A_i Z_i) + N_j(A_j Z_j) \leftrightarrow N_k(A_k Z_k) + N_l(A_l Z_l)$ 에 대해서 i 핵종에 대한 변화 식은 다음과 같은 식에 의해 이뤄진다.

$$\frac{dY_i}{dt} = \sum_{j,k,l} N_i \left(-\frac{Y_i^{N_i} Y_j^{N_j}}{N_i! N_j!} [i, j]_k + \frac{Y_l^{N_l} Y_k^{N_k}}{N_l! N_k!} [l, k]_j + \dots \right). \quad (12)$$

$Y_i = X_i/A_i$ 이며, X 는 핵자의 질량 비 (mass fraction), A 는 원자 번호 (atomic number), N 은 핵의 수를 의미한다. $[i, j]$ 는 반응 비율이며, $[l, k]$ 는 역반응 비율이다. 3체 내지 4체 이상의 상호작용을 고려한다면, 위 반응식에 추가 항을 더해서 계산할 수 있다. 핵 반응 비율에는 경우에 따라 강한 상호작용에 의한 순수한 핵반응, 광자와 관련된 전자기적 핵반응, 약한 상호작용과 관련한 핵반응들이 있다. 따라서 빅뱅 핵합성 당시 미지의 입자로부터 에너지를 갖는 광자나 우주선 (cosmic ray)이 생성된다면, 이들은 핵합성 반응들에 직접적인 기여를 할 수 있다. 이는 쌍소멸을 통해 우주선을 만들어내는 암흑 물질 모델들과도 밀접하게 연관되는 부분이다. 암흑물질 입자 χ 가 빅뱅 핵합성 시기에 잔류하는 상황을 가정해보자. 만약 입자 χ 가 쌍소멸 반응이나 붕괴 반응을 한다면, 입자 χ 로부터 광자, 전자-양전자, 중성미자, 뮤온, 파이온 등의 우주선이 생성될 수 있을 것이다. 생성된 입자들의 양은 표준 우주 모형과 비교해 다른 중입자 당 광자수 (η)를 주며, 이는 핵 통계적 평형 (nuclear statistical equilibrium) 상태에서 핵자들의 질량 비에 영향을 준다 [13]. 뿐만 아니라 입자의 쌍소멸과 붕괴로부터 생성되는 이 우주선들은 각각의 역할에 따라 강한 상호작용과 전자기적 상호 작용으로 나뉘어 초기 우주 핵합성에 영향을 줄 수 있다 [6]. 예를 들어 암흑물질 입자로부터 π^- 입자가 생성된다면,



과 같은 반응이 생길 수 있고, 이 반응은 중성자와 양성자의 비율을 변화시켜 최종 핵의 비율을 바꿀 것이다. 또한 쌍

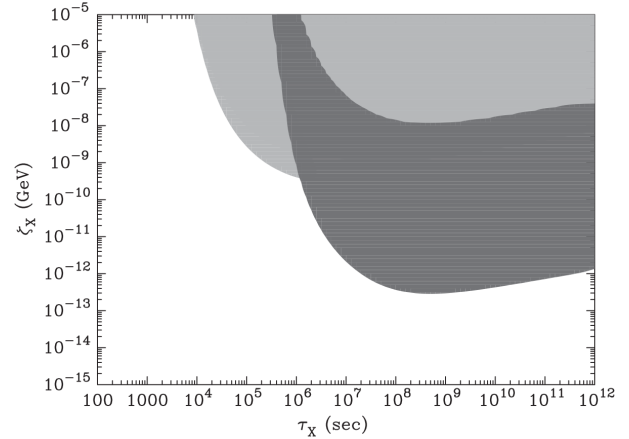
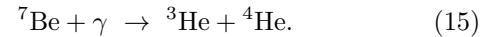
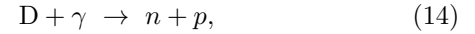


Fig. 4. Contour in the (τ_X, ζ_X) plane with a fixed value of $\eta = 6.1 \times 10^{-10}$ [16]. τ_X is lifetime and ζ_X denotes the abundance parameter of a long-lived massive particle X. The dark and the light shaded regions show excluded areas, respectively, by the over-abundance of ${}^3\text{He}$ and the under-abundance of deuterium.

소멸로부터 생성된 에너지를 갖는 비열광자 (non-thermal photon)는 핵반응에 기여할 수 있는데, 대표적인 반응이 광분해 반응 (photodisintegration)으로 다음과 같은 예가 있다.



암흑 물질 입자 χ 가 쌍소멸이나 붕괴를 통해 만들어내는 입자들이 빅뱅 핵합성 과정의 반응들을 바꾸는 결과를 주기 때문에 χ 의 쌍소멸 비율이나 붕괴 반응, 입자의 질량, 수명 등은 빅뱅 핵합성 계산에서 중요한 역할을 하게 된다. 암흑 광자 (Dark photon) [15], 비활성 중성미자 [8] 혹은 질량을 가진 붕괴하는 입자 [16]들 역시도 붕괴 반응을 통해 초기 우주 핵합성 반응에 기여할 수 있으며, 이들의 수명과 같은 물리적 성질들은 BBN을 통해 제한될 수 있다 (Fig. 4).

5. (-) 전하를 갖는 입자에 의한 ${}^7\text{Li}$ 문제의 해결책

표준 빅뱅 핵합성 이론의 가장 큰 문제는 이론에서 예측하는 ${}^7\text{Li}$ 의 비율이 관측값보다 3~4배 정도 높은 값을 갖는 것이다. 이를 ${}^7\text{Li}$ 문제라 부르는데, 이는 새로운 물리현상이 있을 수 있음을 이야기 한다. 그 새로운 물리현상의 후보 중 하나로써 초대칭성 (supersymmetry, SUSY) 이론에서 예견되는 X^- 입자를 가정한 빅뱅 핵합성 모델이 있다 [7]. 이 모델에서 X^- 입자는 (-) 전하를 가지며 핵자보다 질량이 무겁고 수명이 긴 것으로 가정된다. 수명이

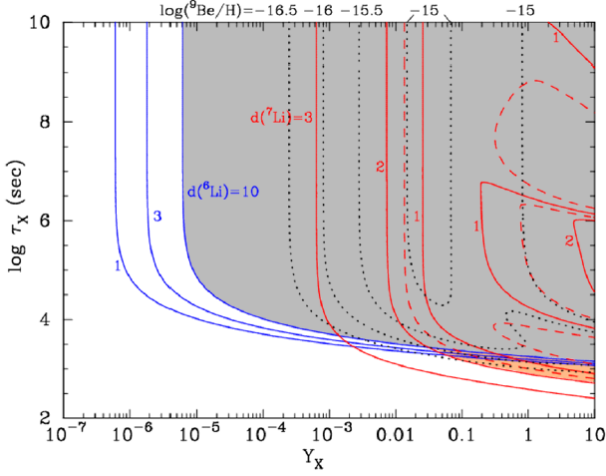


Fig. 5. (Color online) Contour plots of constant lithium abundances relative to the observed values. $Y_X = \frac{n_X}{n_b}$ is the ratio of number abundance of the X particles to the total baryon density and τ_x is decay lifetime of X^- particle. Blue line and red line mean $d(^6\text{Li}) = d(^6\text{Li}^{\text{cal}}/d(^6\text{Li}^{\text{obs}}))$ and $d(^7\text{Li}) = d(^7\text{Li}^{\text{cal}}/d(^7\text{Li}^{\text{obs}}))$, respectively. Free parameters can be constrained by observational data in BBN. Shaded region (purple color) is the parameter space (τ_X, Y_X) consistent with the BBN data. Results are from Ref. 7.

긴 입자는 헬륨 핵합성 이후에 핵들과 결합해 반응하는데, 이때 X^- 입자는 보통의 핵들과는 다른 특이한(exotic) 원자상태를 이루게 된다. 즉 무거운 X^- 입자주위에 보통의 원자핵이 쿨롱 힘에 의하여 구속되는 상태이다. X^- 는 $^7\text{Be}(X^-, \gamma)^7\text{Be}_X(p, \gamma)^8\text{Be}$ 반응에 주된 기여를 하여, ^7Be 의 비율을 줄어든게 하는 역할을 한다. 초기 우주의 핵합성 과정에서 ^7Be 은 붕괴를 통해 ^7Li 을 만드는 과정에 주된 기여를 한다. 다시 말해, ^7Be 은 X^- 와 반응함에 따라 생성되는 비율이 줄어들게 되고, 결국 ^7Be 으로부터 생성되는 ^7Li 의 비율 역시 줄어들게 되는 것이다. 이는 표준 빅뱅 핵합성 이론이 갖는 문제를 암흑 물질의 후보가 될 수 있는 입자의 도입을 통해 해결한 경우다 (Figs. 5, 6).

III. 결론

앞서 살펴본 암흑 물질들의 후보들은 우주의 팽창 비율을 변화시키거나 핵반응에 기여하는 등 초기 우주에서의 핵합성에 직·간접적으로 영향을 주게 된다. 그러나 아직 암흑물질에 대해서는 구체적인 관측 결과나 실험 결과가 존재하지 않기 때문에, 대부분의 암흑물질 모델들은 암흑물질들의 성질을 자유변수로 설정한다. 예를 들면 암흑 물질이 어떤 입자와 얼마만큼의 비율로 반응하는지, 얼마만큼의 질량을 갖는지, 붕괴한다면 수명이 얼마나 되는지 등의 물리적 정보들이 그 자유변수에 속한다. 이런 자유 변수들이 초기

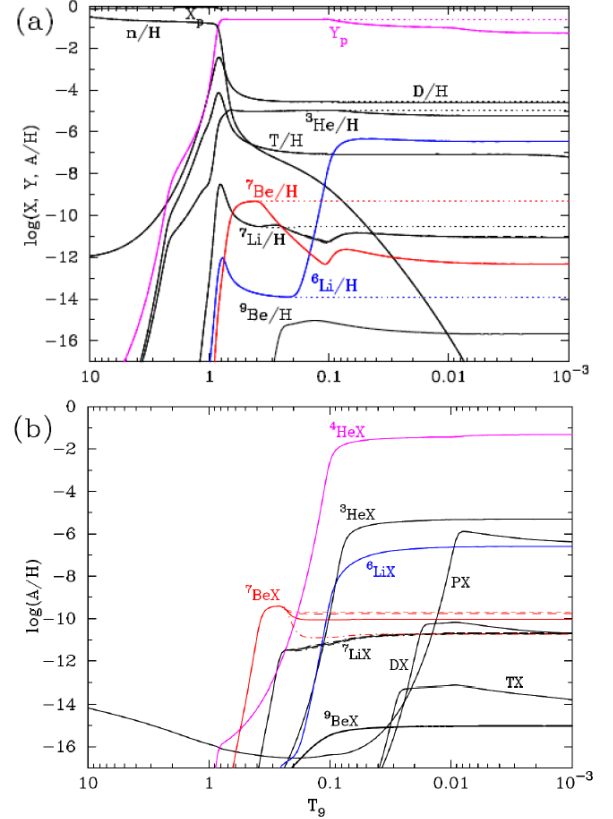


Fig. 6. (Color online) Calculated abundances of light nuclei (a) and X-nuclei (b) as a function of T_9 . X_p and Y_p are the mass fractions of ^1H and ^4He , in total baryonic matter, while the other curves correspond to number abundances with respect to that of hydrogen. The abundance and lifetime of the X^- particle are taken to be $Y_X = n_X/n_b = 0.05$ and $\tau_x = \infty$, respectively. The dotted lines in panel (a) show the results of the standard BBN model. Deviations from the dotted line in (a) stem from the X-nuclei by the X-particle. Results are from Ref. 7.

우주의 핵합성에서 어떻게 영향을 주는지에 대해 분석이 가능하다면, 빅뱅 핵합성의 관측 결과는 자유변수의 범위를 제한할 수 있다. 지금도 여러 이론적 배경을 바탕으로 암흑 물질들의 성질들이 이론과 실험 분야에서 연구되고 있으며, 이에 따라 수 많은 암흑 물질 모델들이 생겨나고 있다. 이러한 암흑 물질 모델들은 빅뱅 핵합성의 관측 결과와 이론적 배경들을 통해 검증될 수 있으며, 더 나아가 표준 빅뱅 핵합성 이론을 넘어 초기 우주에서의 새로운 메커니즘을 이해하는데 도움을 줄 것이다. 덧붙여, 빅뱅 핵합성 이론은 암흑 물질 연구 분야뿐만 아닌 QCD의 결합상수 변화 모델이나 일반상대론의 수정으로부터 유도된 우주론 모형 등을 검증하는 데에도 이용된 예가 있다 [17,18]. 이는 빅뱅 핵합성 연구가 암흑 물질 연구와 더불어 초기 우주와 관련된 더 넓은 연구 분야로 확장될 수 있음을 뜻한다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 the National Research Foundation of Korea (Grant No. NSF2014R1A2A2A05003548) 의해서 도움 받았습니다. 그리고 이 논문의 진행에서 Motohiko Kusakabe 박사의 많은 도움을 받았음을 밝혀드립니다.

REFERENCES

- [1] R. A. Alpher, H. Bethe and G. Gamow, *Phys. Rev.* **73**, 803 (1948).
- [2] R. Cooke, M. Pettini, R. A. Jorgenson, M. T. Murphy and C. C. Steidel, *Astrophys. J* **781**, 31 (2014).
- [3] T. M. Bania, R.T. Rood and D. S. Balser, *Nature* **415**, 54 (2002).
- [4] Y. I. Izotov, T. X. Thuan and N. G. Guseva, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **445**, 778 (2014).
- [5] L. Sbordone, P. Bonifacio, E. Caffau, H. -G Ludwig and N. T. Behara *et al.*, *Astron. Astrophys.* **522**, A26 (2010).
- [6] K. Jedamzik and M. Pospelov, *New J. Phys.* **11**, 105028 (2009).
- [7] M. Kusakabe, K. S. Kim, M-K. Cheoun, T. Kajino and Y. Kino *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **214**, 1 (2014).
- [8] H. Ishida, M. Kusakabe and H. Okada, *Phys. Rev. D* **90**, 083519 (2014).
- [9] K. Blum, R. T. D’Agnolo, M. Lisanti and B. R. Safdi, *Phys. Lett. B* **737**, 30 (2014).
- [10] N. Sasankan, M. R. Gangopadhyay, G. J. Mathews and M. Kusakabe, arXiv:1607.06858 [astro-ph.CO]
- [11] L. Kawano, NASA STI/Recon Technical REPORT No. 92, 25163 (1992).
- [12] M. S. Smith, L. H. Kawano and R. A. Malaney, *Astrophys. J. Suppl.* **85**, 219 (1993).
- [13] E. W. Kolb and M. S. Turner, *The Early Universe* (Westview Press, 1994), Chap. 4 and Chap. 5.
- [14] L. Ubaldi, *Phys. Rev. D* **81**, 025011 (2010).
- [15] A. Fradette, M. Pospelov, J. Pradler and A. Ritz, *Phys. Rev. D* **90**, 035022 (2014).
- [16] M. Kusakabe, T. Kajino and G. J. Mathews, *Phys. Rev. D* **74**, 023526 (2006).
- [17] M.-K. Cheoun, T. Kajino, M. Kusakabe and G. J. Mathews, *Phys. Rev. D* **84**, 043001 (2011).
- [18] M. Kusakabe, S. Koh, K. S. Kim and M.-K. Cheoun, *Phys. Rev. D* **93**, 043511 (2016).