

물질-반물질 비대칭성: 존재의 기원

박완일*

전북대학교 과학교육연구소, 전북대학교 융합과학연구소, 전북대학교 사범대학 과학교육학부, 전주 54896

Matter-Antimatter Asymmetry: the Origin of Our Existence

Wan-il Park*

Institute of Science Education, Institute of Fusion Science, and Division of Science Education, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

초 록: 우리 우주의 근본적 속성 중 하나인 물질-반물질 비대칭성에 대해, 그 정의와 관측으로부터 알려진 특성, 생성을 위한 조건들, 그리고 여러 가지 생성방법들을 소개한다. 이로부터 중등학교 현장교사들과 학생들의 우리 우주에 대한 지식의 지평을 넓히고자 한다.

중심어: 우주론, 물질-반물질 비대칭성

Abstract: We briefly introduce the matter-antimatter asymmetry of the Universe, describing the definition of the asymmetry, observational facts, conditions for genesis, and various methods of genesis. We hope this enlarge the knowledge of secondary school teachers and students to the Universe.

Keywords: Cosmology, Matter-antimatter asymmetry

1. 서 론

지난 2012년 7월 4일 유럽 입자물리 연구소(CERN)에서는 새로운 입자의 발견에 대한 발표가 있었다 [1,2]. 이 입자는 입자물리학 표준모형의 힉스(Higgs) 입자였으며[3,4], 이로써 표준모형을 구성하는 기본 입자들이 모두 발견되었다. 입자물리학 표준모형은 원자 이하의 미시세계를 매우 잘 기술한다. 하지만, 거시세계의 여러 관측결과들은 표준모형 이상의 새로운 이론이 필요하다는 것을 분명하게 드러내고 있다.

우리 우주가 가진 물질-반물질 비대칭성이 그 대표적인 예 중 하나이다. 이 비대칭성은 우리의 물질세계가 존재할 수 있게 만든, 존재의 기원이라고 할 수 있다. 표준모형의 틀 안에서도 물질-반물질 비대칭성을 만들어 낼 수 있다. 그러나, 계산된 값은 관측값에 비해 비할 수 없이 작다는 것이 밝혀졌다[5,6]. 이것은 표준모형 만으로는 우리 세계의 특성을 정확하게 설명하기 어려우며, 따라서 새로운 이론모형이 필요하다는 것을 의미한다.

한편, 현대우주론은 우주를 기술하는 데 있어서,

*Corresponding Author: Wan-il Park
Phone: +82-63-270-2779
Email: wipark@jbnu.ac.kr



All the content in Journal of Science & Science Education(JSSE) is Open Access, meaning it is accessible online to everyone, without fee and authors' permission. All JSSE content is published and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Under this license, the authors retain full ownership of their work, while permitting anyone to use, distribute, and reproduce the content in any medium, as long as the original authors and source are cited. For any reuse, redistribution, or reproduction of a work, users must clarify the license terms under which the work was produced.

소위 원시가속팽창(인플레이션(inflation))을 가정한다 [7]. 이것은 우주의 나이가 10^{-10} 초 보다 훨씬 적었을 어떤 시기에 일어났어야 할 우주의 가속팽창이다. 이러한 가속팽창을 가정하는 이유는 아인슈타인의 일 반상대성 이론에 근거한 고전적 빅뱅우주론이 가진 몇 가지 난점들을 손쉽게 해결할 수 있기 때문이다. 원시가속팽창의 가장 큰 특징은 공간의 막대한 팽창을 통해 공간을 평평하게 만들 뿐만 아니라, 일정한 영역(인플레이션 당시에 인과율이 적용되는 영역)에 존재하던 물질들을 모두 지워버린다는 것이다. 여기에는 물질-반물질 비대칭성도 포함된다. 즉, 물질-반물질 비대칭성이 우주의 어떤 초기조건으로 주어진다고 하더라도, 성립하기 어려울 정도의 큰 초기값을 가지지 않는 한, 원시가속팽창에 의해 그 비대칭성이 지워져서 관측결과를 설명하기가 어렵다는 것이다. 따라서, 우리 세계를 존재할 수 있게 한 물질-반물질 비대칭 성은 원시가속팽창 이후에 새로이 생성되어야 한다.

입자물리학의 표준모형을 확장한 새로운 이론모형 이 필요한 이유는 물질-반물질 비대칭성 이외에도, 중성미자의 맛깔상태 진동[8], 암흑물질의 존재, 원시 가속팽창의 구현 등 여러 가지가 있다. 이에 따라, 다양한 종류의 확장모형들이 존재하고, 관측과 부합하는 정도의 물질-반물질 비대칭성을 생성하는 방식도 여러 가지가 있다. 이것은 다른 의미로 이미 다양한 종류의 가설들이 있음에도 불구하고 확증된 이론은 아직 없다는 것이다. 한편, 대부분의 이론모형들에서 비 대칭성이 생성되기 위해서는 “Sakharov 조건들[9]” 이라고 불리는 기본조건들이 만족되어야 한다. 하지만, 이 조건들이 만족된다고 할지라도 관측과 부합하는 크기의 비대칭성의 생성이 보장되는 것은 아니며, 대개의 경우 주어진 이론모형의 특정 매개변수 영역에 서만 옳은 값을 얻을 수 있다.

우주의 물질-반물질 비대칭성은 고에너지 물리 학 현상론 뿐만 아니라 우주론의 중요한 연구주제 중의 하나이다. 이것은 물질의 기원에 대한 연구주제 이며, 새로운 물리이론이 반드시 구현할 수 있어야 하는 우주의 특성이다. 이 논문에서 우리는 물질-반 물질 비대칭성의 정의와 관측된 사실들, 비대칭성을 생성하기 위한 기본조건, 그리고 그 기본조건들을 만 족하며 비대칭성을 생성할 수 있는 여러 가지 방법

들에 대해 간략하게 소개하고자 하며, 이를 통해 중. 고등교육 현장 교육자들의 지식의 확대 및 교육역량 강화에 기여하고, 학생들의 우리 우주에 대한 지식의 지평을 넓히는데 도움을 주고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2장에서 비 대칭성의 정의를 설명하고, 3장에서는 몇 가지 주요 관측으로부터 결정된 비대칭성의 값에 대해 간략하 게 설명하며, 4장에서 비대칭성이 없는 인플레이션 직후의 우주에서 비대칭성을 가지는 우주가 되기 위한 “Sakharov 조건들”에 대해 기술한다. 5장에서는 “Sakharov 조건들”을 만족시키면서 물질-반물질 비대칭성을 생성하는 몇 가지 방법들에 대해 설명하 고, 6장에서 결론을 맺는다.

II. 물질-반물질 비대칭성

우리가 ‘물질’이라고 부르는 것은 우리의 세계를 구성하고 있는 기본입자들(즉, 양성자, 중성자, 그리 고 전자)로 구성된 것들이다. 어떤 ‘물질’을 정의하고 나면, 그에 대응하는 ‘반물질’은 물질이 가진 모든 전하에 대해 반대되는 전하를 가지는 물체이다. 여기 서, 전하는 전기전하뿐만 아니라, 어떤 입자가 가지는 모든 국소 및 전역 대칭성에 대한 해당 입자의 전하를 의미한다. 이러한 반물질의 존재는 디랙방정식[10] 에 의해 처음 예견되었으며, 몇 년 후에 그 존재가 확인되었다[11].

반물질의 간단한 예로, 전자를 한 가지 물질로 본 다면, 전자와 질량은 같지만 반대의 전하를 가지는 양전자는 전자의 반물질이다. 또한, 양성자를 물질이 라고 한다면, 양성자와 질량이 같고 전하는 반대인 반양성자는 양성자의 반물질이다. 중성자는 전기적 으로 중성이어서 반대전하를 가지는 반중성자가 중 성자와 동일하다고 생각할 수 있으나, 양성자나 중성 자와 같은(원자핵을 구성하는) 핵자들은 사실 쿼크들 의 결합으로 되어 있으며, 모든 알려진 쿼크들이 0이 아닌 전기전하를 가진다는 사실을 생각하면 중성자 의 반물질로서 반중성자가 존재할 수 있다는 것을 쉽게 이해할 수 있다. 광자는 전기전하가 0이며, 그 외에 어떤 전하도 가지지 않는다. 따라서 광자는 물 질과 반물질이 서로 동일한 입자이다. 중성미자는

중성자와는 달리 기본입자로서 전기적으로는 중성이지만 전기전하 이외의 다른 전하를 가진다. 따라서, 중성미자와 반중성미자는 동일하지 않다.

물질과 반물질은 서로 반대의 전하를 가지기 때문에 대개 게이지 상호작용에 의해 서로 쌍소멸하여 질량이 없거나 극히 작은 다른 물질로 변환된다. 특히, 우리 세계의 양성자, 중성자, 그리고 전자는 모두 빛으로 쌍소멸할 수 있다. 따라서, 물질과 반물질 양이 서로 다를 경우에만 빛으로 쌍소멸하지 않고 남은 잔존량이 있을 수 있다.

물질은 원자로 구성되어 있고, 원자는 핵과 전자를 가지고 있다. 핵은 양성자 또는 양성자와 중성자로 구성되어 있는데, 양성자와 중성자의 질량은 전자질량($m_e=0.5\text{MeV}/c^2$)의 대략 2000배 크고, 그들 사이의 질량차이는 약 $1.3\text{MeV}/c^2$ 이다. 따라서, 물질의 질량 대부분은 ‘중입자’라고 불리는 양성자와 중성자에 의해 주어진다. 물질과 반물질 각각의 양은 중입자의 개수 밀도(n_b)와 반중입자의 개수밀도($n_{\bar{b}}$)에 의해 주어지고, 그들 사이의 비대칭성은 대개 다음과 같은 식으로 정의한다.

$$\eta \equiv \frac{\Delta n_b}{n_\gamma} \equiv \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} \quad (1)$$

여기서, n_γ 는 광자의 개수밀도이다. 팽창하는 우주에서 n_b , $n_{\bar{b}}$, 그리고 n_γ 모두 시간에 의존하지만, 우주 팽창에 따른 상대론적 자유도의 변화를 제외하는 경우, η 는 그 값의 변화를 유발하는 상호작용이 멈춘 후부터 우주의 팽창에도 불구하고 상수로 남아있게 된다[12].

III. 관측된 비대칭성의 크기

우리의 관측가능한 우주는 (정의에 따라) 물질만으로 구성되어 있으며, 반물질은 실험실 또는 천문현상에서 생성되는 것만이 존재한다. 따라서, 식 (1)에 의해 정의된 물질-반물질 비대칭성의 크기는 물질의 잔존량에 해당한다.

우주의 물질-반물질 비대칭성의 크기(또는 물질의 양)는 여러 가지 방법으로 측정될 수 있으나, 여기서는 핵합성이론을 토대로한 계산과 우주배경복사 섭

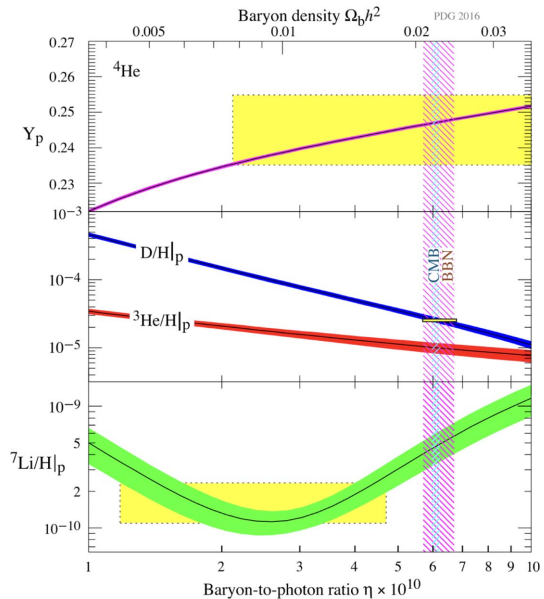


그림 1. 물질-반물질 비대칭성의 크기(η)의 함수로서, 핵합성이론에서 예측되는 가벼운 원소의 계산값. 노란 상자는 관측값의 범위를 나타내고 있다. 따라서, 분홍색 빗금친 부분이 핵합성이론과 관측이 서로 부합하는 영역이다. 파란색 빗금친 부분은 우주배경복사의 분석에 의해 산출된 값의 범위이다[13]

동의 분석을 통한 계산에 대해 살펴보도록 한다. 먼저, 팽창하는 우주에서, 표준모형에 기반을 둔 핵합성이론으로부터, 핵합성이 일어날 즈음의 원시우주에서 가벼운 원소들(H, D, ^3He , ^4He , ^7Li)의 양을 계산할 수 있다[12].

이 계산결과는 그림 1에 보인 바와 같이 물질-반물질 비대칭성의 크기, η 값의 함수로 주어진다. 한편, 현재 우주의 관측을 통해서도 가벼운 원소들의 원시우주에서의 양을 추출할 수 있다. 이것은 그림 1의 노란 상자로 표시되어 있으며, 듀테리움(D)의 관측결과에 의해 η 의 값이 상당히 제한된다는 것을 알 수 있다.

우주배경복사(Cosmic Microwave Background Radiation)의 섭동에 대한 분석에서도 물질-반물질 비대칭성의 크기를 알 수 있다. 일반적인 물질은 전자기파인 복사파와 상호작용한다. 따라서, 우주배경복사가 생성될 당시 물질분포는 우주배경복사의 미세한 비등방적 섭동의 스펙트럼에 그 흔적을 남긴다. 우주배경복사 섭동의 스펙트럼은 섭동의 전천지도에 대해

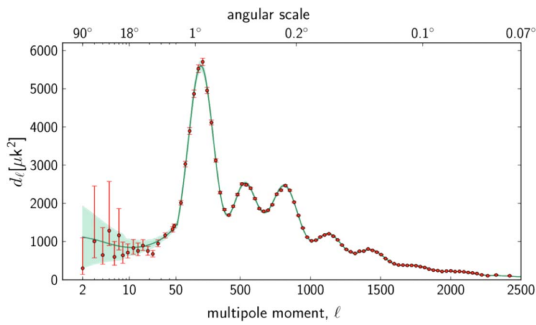


그림 2. 우주배경복사 섭동의 각도 파워스펙트럼[14]. 여기서 l 은 구면조화함수의 궤도양자수에 해당

각도-파워스펙트럼 분석을 통해 얻게 되는데, 아래 그림 2와 같이 연속적으로 돌출되는 봉우리 형태로 나타난다. 여기서 첫 번째 봉우리의 위치는 우주의 곡률과 연관되어 있고, 두 번째 봉우리의 높이는 보이는 물질(중입자들)의 밀도, 그리고 세 번째 봉우리의 높이는 암흑물질의 밀도와 연관되어 있다. 이러한 물리량들을 소위 Λ CDM이라는 표준우주론 모형의 맞춤(fitting)변수로 택하여 그 변수들의 관측과 부합하는 최적의 값을 산출함으로써 물질-반물질 비대칭성의 크기를 알아낼 수 있다.

그림 1의 겹치는 두 개의 세로 띠가 보여주고 있는 바와 같이, 핵합성이론 및 관측으로부터 산출된 비대칭성의 값과 우주배경복사의 분석을 통해 산출된 값은 서로 매우 잘 일치하며, 그 값은 대략

$$\eta^{obs} \sim 6 \times 10^{-10} \quad (2)$$

이다. 이것은 대략 광자 10억 개당 하나의 중입자(양성자 또는 중성자)가 있다는 것을 의미한다. 관측을 통해 알려진 놀라운 사실 중 하나는 그림 3에 보인 바와 같이 우주를 구성하는 에너지원의 대략 5%만이 우리가 알고 있는 물질이며, 그 외의 대부분은 알수 없는 물질같은 성분(암흑물질)과 물질도 아니고 복사에너지도 아닌 또다른 종류의 에너지원(암흑에너지)으로 구성되어 있다는 것이다[14]. 이들 알 수 없는 에너지원의 정체를 밝히는 것은 물질-반물질 비대칭성의 생성원리와 더불어 현대 고에너지 물리학과 우주론의 수수께끼들이며, 주요 연구주제들이다.

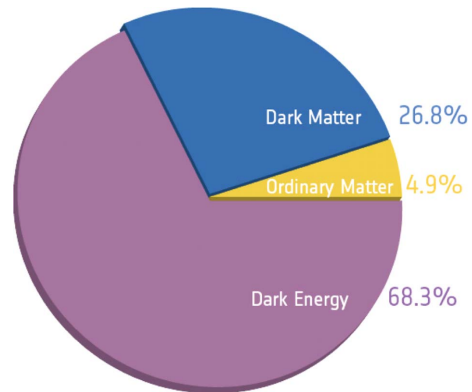


그림 3. 현재 우주의 에너지 분포[14]

IV. 비대칭성의 생성조건: Sakharov 조건들

물질과 반물질이 대칭적으로 존재하던 우주에서 물질-반물질 비대칭성이 생성되기 위해서는 대개의 경우 “Sakharov 조건들 [5]”이라고 불리는 다음의 세 가지 조건이 만족되어야 한다.

- (ㄱ) 중입자수(또는 경입자수)가 깨지는 상호작용이 존재.
- (ㄴ) 전하반전에 대한 대칭성의 깨짐과 전하 및 공간반전에 대한 대칭성의 깨짐.
- (ㄷ) 열평형으로부터의 분리.

첫 번째 조건은 쉽게 이해가 된다. 물질과 반물질(또는 중입자와 반중입자)이 동일한 양만큼 있었던 대칭적 우주에서 비대칭성을 생성하기 위해서는 반드시 중입자수 또는 반중입자수가 변하는 과정이 필요하다. 두 번째 조건도 몇 가지 사실만 받아들이면 어렵지 않게 이해할 수 있다. 고에너지 물리학 이론의 토대가 되는 양자장론은 (중력효과가 무시되는 상황에서) 특수상대론과 부합해야 하며, 따라서 로렌츠 대칭성을 가져야 한다. 이러한 이론은 소위, CPT-대칭성을 가진다. 여기서, C는 전하반전, P는 공간반전, 그리고 T는 시간반전 변환을 나타낸다. CPT-변환은 입자의 전하를 바꾸기 때문에 물질을 반물질로 바꾸는 변환이다[15]. P-변환은 입자의 손지기상태(즉, 오른손잡이 또는 왼손잡이)를 바꾸며, T-변환은 시간을 역행시킨다. CPT-대칭성을 가진다는 것은, C와 P,

그리고 T 변환이 모두 수행되었을 때, 이론에 변화가 없다는 것을 뜻한다. 만일, 입자의 붕괴와 관련된 상호작용들 전체가 C -변환이나 CP -변환에 대해 대칭이라면, 입자의 붕괴율 및 대응하는 반입자의 붕괴율은 서로 같고, 따라서 물질-반물질 사이의 비대칭성을 생성하기 어렵다. 이것은 다음과 같은 간단한 경우의 예를 통해 쉽게 이해할 수 있다. 양성자(p^+)가 양전자(e^+)와 광자(γ)로 붕괴할 수 있다고 가정해 보자. 이 과정은 $p^+ \rightarrow e^+ + \gamma$ 로 표시할 수 있으며, 반양성자의 붕괴는 $\bar{p}^- \rightarrow e^- + \gamma$ 로 표시된다. 양성자와 전자는 스핀이 $1/2$ 인 페르미온이고, 광자는 스핀이 1인 보손이다. 따라서, 손지기까지 나타낸다면 왼손잡이 양성자와 왼손잡이 반양성자는 다음과 같이 붕괴한다.

$$p_L^+ \rightarrow e_R^+ + \gamma_L, \bar{p}_L^- \rightarrow e_R^- + \gamma_L \quad (3)$$

여기서, 주목할 사항은 위 두 붕괴과정은 C -변환 관계에 있으며, C -변환에 대해 붕괴과정에 참여하는 입자들의 손지기 상태가 바뀌지 않는다는 것이다. 한편, 우리 세계에서 물질을 구성하는 모든 입자들은 오른손잡이 상태와 왼손잡이 상태를 모두 가지고 있다. 따라서, 다음과 같은 붕괴도 동등하게 발생한다.

$$p_R^+ \rightarrow e_L^+ + \gamma_R, \bar{p}_R^- \rightarrow e_L^- + \gamma_R \quad (4)$$

이러한 붕괴를 일으키는 상호작용들이 C -변환에 대해 대칭이라면, 양성자의 붕괴율과 반양성자의 붕괴율 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\Gamma_L^+ = \Gamma_L^-, \Gamma_R^+ = \Gamma_R^- \quad (5)$$

반면, CP -변환에 대해서 대칭적인 경우에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\Gamma_L^+ = \Gamma_R^-, \Gamma_R^+ = \Gamma_L^- \quad (6)$$

이제, 양성자의 중입자수를 1이라고 하면, 앞에서 가정한 양성자와 반양성자의 붕괴과정에서 생성될 수 있는 물질-반물질 비대칭성의 정도는 다음과 같이 정의된 중입자수 비대칭성 ΔB 로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta B &= (\Gamma_L^+ + \Gamma_R^+) - (\Gamma_L^- + \Gamma_R^-) \\ &= (\Gamma_L^+ + \Gamma_R^+) - (\Gamma_R^+ + \Gamma_L^-) \\ &= (\Gamma_L^+ - \Gamma_L^-) + (\Gamma_R^+ - \Gamma_R^-) \end{aligned} \quad (7)$$

따라서, $\Delta B \neq 0$ 이 되려면, C -변환(식 (7)의 두 번째 줄)과 CP -변환(식 (7)의 세 번째 줄) 모두에 대해 입자의 붕괴를 일으키는 상호작용들 전체의 대칭성이 깨져 있어야 한다. 이러한 조건은 일반적으로 붕괴에 참여하는 물리적 과정이 하나 이상 존재하고, 각각의 유효상호작용의 세기를 나타내는 매개변수들이 상대적인 위상차를 가져야 한다는 것을 의미한다.

세 번째 조건인 열평형으로부터의 분리가 필요한 이유는 간단하게 이해할 수 있다. 우선, 여기서 열평형을 이루고 있는 입자들은 우리세계를 구성하는 기본(혹은 근본)입자들이다. 만일 어떤 입자의 붕괴로부터 우리 우주의 중입자수(또는 경입자수)의 비대칭성이 생성된다면 붕괴로부터 생성된 입자들은 우리 세계를 구성하는 입자들이어야 하며, 이들은 대개 바로 열평형 상태에 도달하게 된다. 붕괴를 일으키는 그러한 상호작용이 열평형상태에 있다면, 상호작용이 일어나는 한 방향의 과정(예를 들어 입자의 붕괴)에서 물질-반물질 비대칭성이 생성될 수 있으나, 그 역과정도 동등한 수준으로 일어나기 때문에 처음 생성되었던 비대칭성이 유지되지 않고 지워지게 된다. 따라서, 물질-반물질 비대칭성을 만들어 내기 위해서는, 관련된 상호작용이 열평형으로부터 분리되어, 비대칭성을 만들어 내는 방향으로의 과정이 주요하게 발생할 수 있어야 한다.

열평형으로부터의 분리는 어떻게 구현될 수 있을까? 가장 간단한 방법은 비대칭성을 생성하는 입자가 열탕(thermal bath) 안의 입자들과 전혀 상호작용하지 않는 것이다. 그런데, 실제적으로는 열탕 안에 있는 입자들이 우리 세계를 구성하는 입자들이어야 하기 때문에, 열탕과의 상호작용이 전혀 없는 경우는 쓸모가 없다. 흥미롭게도, 열탕 안의 입자들과의 상호작용이 있는 경우에 열탕으로부터 분리는 우주가 팽창한다는 사실 때문에 구현될 수도 있다. 예를 들어, 우주가 정적이라면 상호작용의 세기가 아무리 작아도 오랜 시간이 지나면 상호작용이 일어날 수 있다. 반면, 팽창하는 우주에서는 상호작용의 발생가능성이 우주의 팽창속도에 의존한다. 팽창속도가 너무 크면, 입자들이 만나 상호작용을 하기 전에 서로 멀어진다. 따라서, 비대칭성을 생성하는 어떤 입자가 우주 역사의 초기에 생성될 수 있고, 우주의 급격한 팽창으로 인해

열평형으로부터 분리된 상태에서 붕괴한다면 비대칭성을 생성하는 한 방향의 과정만 실현되는 셈이 된다. 그러나, 붕괴하는 입자의 질량이 우주의 온도(즉, 열탕의 온도)에 비해 충분히 크지 않으면, 결국 역방향 과정이 가능해 질 수도 있다. 대개의 경우, 우주의 온도가 붕괴하는 입자의 질량의 1/10정도 이하로 떨어지면 역방향 과정은 일어나기 어려워지며, 열평형으로부터의 분리가 이루어진다[12].

Sakharov 조건들은 물질-반물질 비대칭성을 생성하기 위한 필요조건이며, 관측과 부합하는 크기의 비대칭성을 생성하기 위한 충분조건은 아니다. 즉, Sakharov 조건들이 모두 만족된다고 해도 자동적으로 충분한 비대칭성이 생성될 수 있는 것은 아니다. 최종적으로 얻게 되는 비대칭성의 크기는 각 조건들이 만족되는 정도 또는 강도에 달려있다. 예를 들어, 비대칭성의 생성과 관계된 어떤 상호작용이 C 와 CP -변환 모두에 대해 대칭성을 깨는 복소수 위상을 가지고 있다고 하더라도, 대칭성을 깨는 정도가 약하면 충분한 크기의 비대칭성을 얻기 어렵다. 또한, 비대칭성을 생성하는 과정이 열평형으로부터 분리되어 있는 정도 또는 분리되는 속도도 결과에 영향을 미친다.

이 장에서 우리는 물질-반물질 비대칭성을 생성하기 위한 기본 조건들을 살펴보았다. 이 조건들은 양자장론에 근거를 둔 고에너지 물리학이론이 로렌츠 대칭성을 가져야 하고, 그것이 소위 CPT -대칭성을 가진다는 것을 의미한다는 사실을 기본 전제로 하였다. 그런데, 그와 같은 CPT -대칭성이 반드시 우주 진화의 전 과정에서 만족되어야 하는 것은 아니다. 즉, 일시적으로 CPT -대칭성이 깨지는 상황이 있을 수 있으며, 이 경우 물질-반물질 비대칭성의 생성이 관련된 상호작용이 열평형 상태에 있을 때에라도 일어날 수 있다.

V. 비대칭성 생성의 여러 가지 방법들

Sakharov 조건들을 구현하는 방식에 따라 물질-반물질 비대칭성을 생성하는 다양한 방법이 있다. 대개의 경우, 첫 번째와 두 번째 조건은 이론모형이 가지는 상호작용 자체의 특성에 해당한다. 세 번째 조건

은 주어진 이론모형에서 매개변수들의 선택에 의존하기도 하고, 모형에 존재하는 어떤 스칼라장의 동역학적 위치와 행동에 의존하기도 한다. 따라서, 대부분의 경우, 세 번째 조건이 구현되는 방식에 따라 물질-반물질 비대칭성의 생성방법을 크게 다음과 같이 구분할 수 있다[16].

5.1. 무거운 입자의 붕괴에 의한 비대칭성 생성

이것은 전통적으로 많이 다루어진 방법이며, Sakharov 조건들의 적용이 분명하게 드러나는 방법이다. 이 방법에서 열평형으로부터의 분리는 다음과 같은 방식으로 구현된다. 먼저, 어떤 무거운 입자가 있다고 해보자. 이 입자와 열탕(thermal bath) 안의 표준모형 입자들과의 상호작용이 충분히 약하면 입자의 붕괴율이 충분히 작아진다. 즉, 해당 입자가 오랫동안 붕괴하지 않고 존재할 수 있게 된다. 우주온도가 입자의 질량에 비해 충분히 작아질 때까지 입자가 붕괴하지 않고 남아 있다면, 입자의 붕괴에 의한 비대칭성의 생성은 가능한 반면, 그 역과정은 발생율이 현저히 떨어져서, 결국 일정량의 비대칭의 생성이 가능해진다. 이러한 상황을 구현할 수 있는 다양한 이론모형들이 있으며, 현재 까지도 새로운 모형들이 제안되고 있다.

5.2. 상전이를 이용한 비대칭성의 생성

이론모형의 특성에 따라 우주가 진화하는 동안 다양한 우주적 상전이가 발생할 수 있다. 여기서, 우주적 상전이라는 것은 우주의 상태가 바뀌는 것을 의미하는데, 많은 경우 어떤 스칼라장의 진공기대값(공간평균값)이 달라지는 것과 관계된다. 대개의 경우, 상전이는 대칭성-깨짐을 유발할 뿐만 아니라, 관련된 입자들에게 질량을 주는 작용을 한다. 또한, 상전이의 경계(즉, 예를 들어, 스칼라장의 진공기대값이 달라지는 영역)에서 CP -대칭성을 깨는 위상변화가 나타날 수 있다. 그와 같은 상전이의 대표적인 예가 입자물리학 표준모형의 힉스기작(Higgs-mechanism)이다. 단순화해서 본다면, 힉스기작은 스칼라장이 우주초기에는 0의 진공기대값을 가지다가 우주의 팽창에 따라 우주가 식어가면서 어느 시점에 0이 아닌 진공기대값을 가지게 되는 상전이이다. 이러한 상전이로

인해 우리 세계를 구성하는 물질들이 질량을 얻게 되며, 특히 소위 쿼크질량항들의 대각화와 연관된 CKM-행렬이 CP-대칭성을 깨는 원천으로 작용할 수 있게 한다. 또한, 중입자수와 경입자수를 동시에 바꾸는 표준모형의 특이과정이 힉스 상전이에 의해 열평형으로부터 분리된다. 그러나, 표준모형 자체만으로는 CP-대칭성을 깨는 효과가 크지 않고, 힉스 상전이에 의한 열평형으로부터의 분리가 그렇게 효율적이지는 않다(상전이 시기에 열평형으로부터의 분리 정도는 상전이가 얼마나 갑작스럽게 일어나느냐에 의존한다.). 그에 따라, 표준모형 자체로 물질-반물질 비대칭성을 생성할 수 있는 모든 조건들이 갖추어져 있기는 하지만, 예상되는 비대칭성의 크기가 관측값에 비해 대략 10^{-17} 배 작다[5,6]. 이러한 이유로, 상전이를 이용하여 비대칭성을 생성하고자 하는 이론모형은 모두 표준모형을 확장하여 힉스 상전이에 영향을 주거나, 아니면 힉스 상전이가 아닌 다른 상전이를 이용한다.

5.3. 복소 스칼라장의 각운동을 이용한 비대칭성 생성

물질-반물질 비대칭성을 생성하는 흥미로운 방법 중의 하나는 스칼라장의 동역학적 행동을 이용하는 것이다[17]. 어떤 스칼라장이 중입자수(또는 경입자수)를 가지고 있을 때, 이 스칼라장은 복소수로 표현되어야 한다. 만일, 이 복소수 스칼라장이 복소평면 상에서 각운동을 가지게 된다면, 해당하는 각운동량은 그 부호와 크기에 따라 해당 스칼라장과 관계된 입자 또는 반입자의 개수밀도와 동등하다. 이러한 관계를 이해하기 위해서는 상대론적 장론에서 스칼라장과 관계된 전하 또는 입자수가 어떻게 표현되는가를 알아야 하지만, 여기서는 그러한 관계가 있다는 것을 받아들이기로 하자. 그렇다면, 복소평면 상에서의 각운동량은 어떻게 만들어 낼까? 각운동량의 생성은 스칼라장의 복소수 위상이 고정되어 있지 않고, 시간에 따라 변할 때 생성될 수 있다. 이것은 스칼라장의 포텐셜에서 스칼라장의 위상에 영향을 주는 항이 하나 이상 존재하고, 그 상대적인 크기가 시간에 따라 바뀔 때 쉽게 구현될 수 있으며, 이들은 CP-대칭성을 깨는 항들이어야 한다.

이와 같은 비대칭성 생성방법에서 열평형으로부터

의 분리는 스칼라장의 초기 진공기대값에 의존한다. 힉스기작에 의해 우리 세계의 물질들이 질량을 얻는 것과 유사하게, 스칼라장의 진공기대값이 충분히 크면, 스칼라장과 직접 상호작용 입자들은 질량이 매우 커지게 되고, 그 입자들은 열평형 상태에 놓이기 어렵게 된다. 이에 따라, 스칼라장과 열평형에 있는 입자들 사이의 유효상호작용의 크기가 충분히 작아질 수 있고, 결과적으로 스칼라장이 열평형으로부터 분리될 수 있다.

VI. 결 론

우리 우주의 물질-반물질 비대칭성은 우주를 구성하고 있는 수많은 별들과, 은하들, 은하단들, 우주의 거대 구조 등이 존재할 수 있게 된 이유이다. 관측을 통해 알려진 비대칭성의 크기는 $\eta = (n_b - n_{\bar{b}}) / n_\gamma \sim 6 \times 10^{-10}$ 이며, 이러한 비대칭성은 현대우주론이 필요로 하는 원시 가속팽창 이후에 새로 생성되어야 한다. 물질과 반물질이 동일한 양으로 존재하던 우주에서 비대칭성이 생성되기 위해서는 ‘Sakharov 조건들’이 만족되어야 한다. 이 조건들은 비대칭성 생성을 위한 필요 조건이며, 관측과 부합하는 크기를 얻기 위한 충분 조건은 아니다. 비대칭성을 생성하는 방법은 여러 가지가 있으나, 크게 다음의 세 가지로 구분할 수 있다. (1) 무거운 입자의 붕괴에 의한 생성, (2) 상전이과정을 활용한 생성, (3) 스칼라장의 동역학적 행동을 이용한 생성. 표준모형은 그 자체적으로 ‘Sakharov 조건들’을 모두 만족시킬 수 있는 특성을 가지고 있지만, CP-대칭성이 깨지는 정도가 너무 작고, 열평형으로부터의 분리도 약하다. 이에 따라, 표준모형 만으로는 현재 우주의 물질-반물질 비대칭성의 크기를 설명할 수 없으며, 표준모형을 확장한 새로운 물리이론의 구축이 필수적이다. 이와 같은 이유로, 물질-반물질 비대칭성의 생성은 현대 고에너지 물리학의 주요 연구주제 중의 하나이며, 이미 다양한 이론모형들이 제안되어 왔지만, 아직 확증된 것은 없다. 따라서, 그것이 무엇이든 비대칭성 생성이론에 대한 새로운 단서가 발견된다면 우주의 비밀에 다가가는 커다란 도약이 될 것이고, 입자물리학 표준모형 이상으로의 확장을 필요로 하는 물리학 이론에 새로

운 이정표를 제시하게 될 것이다.

참고문헌

- [1] G. Aad et al. [ATLAS], Phys. Lett. B, **716**, 1-29 (2012). [arXiv:1207.7214 [hep-ex]].
- [2] S. Chatrchyan et al. [CMS], Phys. Lett. B, **716**, 30-61 (2012). [arXiv:1207.7235 [hep-ex]].
- [3] S. L. Glashow, Nucl. Phys., **22**, 579 (1961).
- [4] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett., **19**, 1264 (1967).
- [5] M. B. Gavela, P. Hernandez, J. Orloff and O. Pene, Mod. Phys. Lett. A, **9**, 795-810 (1994). [arXiv:hep-ph/9312215 [hep-ph]].
- [6] M. B. Gavela, P. Hernandez, J. Orloff, O. Pene and C. Quimbay, Nucl. Phys. B, **430**, 382-426 (1994). [arXiv:hep-ph/9406289 [hep-ph]].
- [7] A. H. Guth, Phys. Rev. D, **23**, 347-356 (1981).
- [8] M. C. Gonzalez-Garcia and M. Maltoni, Phenomenology with Massive Neutrinos, Phys. Rept., **460**, 1 (2008).
- [9] A. D. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz., **5**, 32-35 (1967).
- [10] P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. Lond., **A117**, 610-624 (1928).
- [11] C. D. Anderson, Science, **76**, 238-239 (1932).
- [12] E. W. Kolb, The Early Universe, Front. Phys., **69**, 1 (1990).
- [13] S. Navas et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D, **110**, 030001 (2024).
- [14] N. Aghanim et al. [Planck], Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters, Astron. Astrophys., **641**, A6 (2020). [erratum: Astron. Astrophys. 652, C4 (2021)]. [arXiv: 1807.06209 [astro-ph.CO]].
- [15] Michael E. Peskin and Daniel V. Schroeder, Westview Press Inc. (1995).
- [16] M. Trodden, eConf., **C040802**, L018 (2004). [arXiv: hep-ph/0411301 [hep-ph]].
- [17] I. Affleck and M. Dine, Nucl. Phys. B, **249**, 361-380 (1985).