

## 초기우주에서 숨은물질 액시온의 편위발생

김래혁, 신정우

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《소립자론과 마당론에 대한 연구에도 힘을 넣어야 합니다. 소립자론과 마당론은 물질세계의 본질을 해명하기 위한 기초원리적인 과학분야이므로 리론물리학부문에서는 마땅히 여기에 힘을 넣어야 합니다.》(《김정일전집》 제4권 410~411페이지)

오늘날 천문관측자료들은 많은 량의 우주물질들이 숨은물질이라고 하는 바리온족에 속하지 않는 약하게 호상작용하는 소립자들로 이루어져있다는것을 보여주고있다. 그러나 숨은물질의 존재는 소립자물리학의 표준모형틀거리내에서는 설명할수 없으므로 새로운 모형에 기초한 연구를 진행하여야 한다.

### 1. 초기우주에서 액시온

숨은물질의 유력한 후보중의 하나는 이른바 Peccei-Quinn(PQ)대칭성[1]의 자발파괴로부터 얻어지는 골드스톤보존인 액시온이다. 력사적으로 액시온은 강한호상작용의 CP(전하공액 및 우기성)보존을 자연스럽게 설명하기 위하여 받아들였지만 액시온이 다른 물질들과 매우 약하게 결합한다는 사실로부터 이 액시온이 숨은물질로 될수 있다는 견해가 제기되었다.

현재의 액시온마당이 CP보존값인  $\theta=0$ 점에 있지만 초기우주에서 액시온마당의 초기값이 령이라고 가정하는것은 잘 맞지 않는다. 사실 PQ대칭성이 자발적으로 파괴된다면 액시온의 축퇴된 방향들중에서 어느것이 우선적인 방향인지를 알수 없으므로 액시온마당의 방향은 확률적으로 결정된다. 모든 초기값들이 똑같은 확률을 가지고있으므로 인과적으로 련결되지 않는 구역들에서는 초기값들이 서로 차이나게 된다. 인플레이손에 의하여 이 인과적으로 련결되지 않은 구역들이 우주크기까지 확장되며 따라서 인플레이손이 발생하기 전이나 발생과정에 액시온이 나타나는 물림새에서는 관측가능한 우주전체에서 편위각들이 똑같을것이다. 액시온마당은 PQ상변환후에 이 초기에네르기밀도를 가지고 질량없는 스칼라마당과 함께 시간발전하다가 QCD(양자색력학)상변환단계에 이르러 이상호상작용에 의하여 유효포텐샬을 만들어내게 된다. 다음 이 유효포텐샬은 복귀힘으로 작용하면서 액시온마당의 간섭성진동을 만들게 된다. 결과적으로 마당의 이 진동은 압력없는 물질 즉 비상대론적 물질과 같이 거동하며 따라서 숨은물질로 된다.

한편 편위물림새를 논의할 때 액시온등곡률요동문제가 중요하게 제기된다. 하이젠베르크불확정성관계에 따르면 인플레이손이 발생하는 동안에 인플레이손마당의 요동은 하블척도에 비례한다. 이 등곡률요동들은 계량의 요동과 등가이므로 우주의 모든 곳에서 나타난다. 이 모든 에네르기밀도들은 단일요동에 종속되며 관측되는 CMB(우주미크로배경복사)온도요동을 일으킨다. 그러나 액시온과 같이 질량없는 스칼라마당의 경우에는 다른

종류의 요동이 존재한다. 인플레이션이 발생하는 동안에 여러 구역들이 인과적으로 연결되지 않고 독립적으로 요동하며 따라서 스칼라마당은 하블척도보다 더 큰 거리에서 서로 다른 값을 가지게 된다.

인플레이션발생후에 이 구역들은 마당이 약간의 비등방성을 가지게 하면서 지평선에 다시 들어오게 된다. 우주의 서로 다른 부분들에서 액시온마당은 조금씩 다른 값을 가지고 그에 대응하여 서로 다른 잔존량들이 얻어질것이다. 액시온마당의 서로 다른 값이 서로 다른 수의 잔존액시온들을 발생시키므로 이 등곡률요동은 에네르기밀도대신에 액시온수밀도를 변화시킨다. 단일 및 등곡률요동은 이것들이 에네르기성분들에 각이하게 영향을 주므로 CMB실험들에 의해 구별할수 있다. CMB에서 등곡률요동이 없다는 실험적관측으로부터 액시온파라미터들의 가능한 값범위는 큰 제한을 받는다.

한편 선행연구에 따르면 PQ대칭성이 인플레이션이 발생하기 전이나 발생과정에 파괴되는 물림새에서 QCD액시온의 존재는 대규모인플레이션가정과 모순된다.[1] 그렇다면 비QCD액시온에 대해서는 어떻게 되겠는가? 비QCD액시온의 질량이 QCD척도에 의해서 조정되지 않으므로[2] 등곡률요동으로 인한 액시온파라미터들에 대한 제한조건을 완화시킬수 있다. 아직까지 비QCD액시온의 정확한 거동에 대해서는 알려진것이 없으므로 논문에서는 두가지 극한경우 즉 질량이 상수인 경우와 림계온도에서 갑자기 질량을 얻게 되는 경우를 고찰하였다.

## 2. 비QCD액시온이 기본숨은물질로 될수 있는 가능성

먼저 질량이 상수인 경우를 보자. 만일 진동이 시작되는 온도  $T_o$ 가 림계온도  $T_c$ 보다 훨씬 작다면 질량을 상수로 볼수 있다. 실험으로 현리론에 의하면 액시온형립자들은 재가열 후에 높은척도비섭동효과에 의하여 질량을 가질수 있다. 질량이 상수이므로 운동방정식은 쉽게 풀수 있다. 결과는

$$a(t) = a(t_0) \Gamma \left( \frac{5}{4} \right) \left( \frac{2}{m_a} \right)^{1/4} J_{1/4}(m_a t) t^{-1/4} \quad (1)$$

$$\langle \rho(t) \rangle = a_0^2(t_0) \frac{\sqrt{2m_a}}{\pi} \Gamma^2 \left( \frac{5}{4} \right) t^{-3/2} \quad (2)$$

이다. 그러면 잔존량은

$$\Omega_a = 6 \times 10^{-5} g_{ad}^{-1/4} \theta_0^2 \left( \frac{f_a}{M_P} \right)^2 \sqrt{\frac{M_P m_a}{T_\gamma^2}} \quad (3)$$

로 평가된다. 이것을 리용하면 액시온질량의 상한을 다음과 같이 평가할수 있다.

$$m_a \leq 10^{29} [\text{GeV}]^5 \left( \frac{1}{H_I} \right)^4 \quad (4)$$

대규모인플레이션에 대하여 식 (4)는

$$m_a \leq 10^{-18} \text{eV} \quad (5)$$

로 된다. 그러므로 비QCD액시온의 질량이 식 (5)를 만족시킨다면 인플레이션이 발생하기 전이나 발생과정에 대칭성이 파괴되는 물림새에서 비QCD액시온의 존재는 대규모인플레

이 손가정과 모순되지 않는다.

한편 림계온도가 진동온도보다 작은 경우에 과도과정에서의 거동은 액시온잔존량에 영향을 준다. 비QCD액시온의 정확한 거동을 모르므로 림계온도에서 액시온밀량이 갑자기 커지는 극한경우를 보자.

$m_a t_c \gg 1$  이므로 진동은 시작부터 단열적이다. 베셀함수의 점근형식을 리용하여 주기 평균된 에네르기밀도를 쉽게 결정할수 있다.

$$\langle \rho \rangle = a_0^2(t_0) \frac{m_a^2}{2} \left( \frac{t_c}{t} \right)^{3/2} \quad (6)$$

단열조건은 밀량을 얻은 직후에 만족되므로  $t = t_c$ 에서의 잔존량을 평가해볼수 있다.

$$\Omega_a = 6 \times 10^{-4} \frac{\theta_0^2}{g_{ad}} \frac{f_a^2 m_a^2}{T_\gamma T_c^3} \quad (7)$$

대규모인플레이손에 대하여

$$m_a^2 \leq 7 \times 10^{-41} [\text{GeV}]^{-1} T_c^3 \quad (8)$$

이다. 이것이 다른 하나의 모르는 파라미터  $T_c$ 를 포함하고있으므로  $T_c < T_o$ 를 리용하여

$$m_a^2 > 4 \times 10^{-38} [\text{GeV}]^{-2} T_c^4 \quad (9)$$

을 얻을수 있다. 식 (8)과 (9)를 결합하면 다음의 결과를 얻는다.

$$T_c \leq 10^{-3} \text{GeV} \quad (10)$$

현리론에서 나오는 액시온형립자들의 경우에 림계온도가 QCD척도보다 커진다고 가정하므로 위의 결과가 틀린것처럼 보일수도 있다. 그러나 비QCD액시온은 현리론에만 국한되는것이 아니므로 식 (10)은 가능한 조건으로 된다.

## 맺 는 말

1) 비QCD액시온에 대하여  $T_o \ll T_c$ 가 성립한다면 비QCD액시온은 도처에서 상수밀량을 가진것처럼 취급할수 있으며 그 밀량이  $10^{-18} \text{eV}$ 보다 가뻤다면 비QCD액시온은 대규모인플레이손과 량립할수 있다.

2)  $T_o > T_c$ 의 경우에 잔존량과 관련된 속박조건으로부터  $T_c \leq 1 \text{MeV}$ 가 얻어지며 이로부터 QCD척도보다 작은 척도에서 어떤 비섭동효과가 있어야 비QCD액시온이 기본숨은물질로 될수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. Villadoro; Lecture Notes on QCD Axion Physics, ICTP, 67~71, 2016.
- [2] D. J. E. Marsh; arXiv:1510.07633[astro-ph.CO], 2016.

## **Misalignment Production of Dark Matter Axions in the Early Universe**

*Kim Thae Hyok, Sin Jong U*

We considered the behavior of the solutions of the equation of motion for the axion and its implications in two extremal cases of the mass dependence for non-QCD axions and investigated the bound of the axion parameters from isocurvature fluctuations and the compatibilities of non-QCD axions with the large scale inflation.

Key words: axion, dark matter