

우주의 풍경(landscape)과 늪(swampland): 우주상수문제에 대한 현대 물리학의 논쟁

염동한

부산대학교 물리교육과

요약

본 논문에서는 우주상수와 관련한 현대 물리학의 논쟁에 대해 논의한다. 2000년을 전후로 서스킨드를 비롯한 주류 끈 이론 학자들은, 끈 이론이 제공하는 다양한 우주상수들의 총체로서 우주적 풍경(cosmic landscape), 이러한 우주상수들을 현실화하는 영구적 가속팽창(eternal inflation)과 그 결과로서의 다중우주(multiverse), 그리고 우리 우주가 특정한 우주상수를 갖는 우주에 존재해야 하는 이유를 설명하는 인류원리(anthropic principle)를 사용해, 우리 우주에 존재하는 다양한 미세조정문제를 자연주의적 방법으로 설명할 수 있는 방법을 제공하였다. 그런데 이와 관련해 끈 이론 내부에서 비판이 제기되었고, 그 비판자들에 의하면, 그 동안 생각해왔던 우주적 풍경(landscape)의 대부분은 실제로는 끈 이론이 허용하지 않는 늪(swampland)에 지나지 않는다고 한다. 본 논문에서는 이러한 논쟁을 소개하고, 그 의미와 앞으로 전개될 논쟁에 대해 조망해 본다.

I. 서론: 우주상수문제

과학자들에 의하면, 우리 우주는 자연법칙과 초기조건을 통해서 설명될 수 있을 것이다. 주어진 자연법칙 아래에서 초기조건 선택은 우리를 비롯한 생명과 지성의 존재여부에 결정적인 영향을 미치게 될 것이다. 그래서 전통적으로, 자연법칙의 존재와 관련한 우주론적 논쟁, 그리고 생명과 지성의 존재를 가능하게 하는 초기조건 미세조정과 관련한 목적론적 논증이 신의 존재를 이성적으로 입증하기 위해 제안된 바 있고, 또 그 반대로 신의 존재가 필요 없다는 것을 보이기 위해 우주론적 논증과 목적론적 논증이 성립하지 않는다는 것을 보이려는 노력도 있어왔다. 이러한 논증들을 다시 현대 물리학의 용어로 표현한다면, 과연 우리 우주에는 우리가 인식할 수 있는 정합적인 자연 법칙이 존재하는가, 그리고 우리 우주가 이러한 모습으로 보이도록 하기 위한 우주의 초기조건 및 그 결과로 얻어지는 자연의 상수들은 통계적으로 개연적인 범위 안에서 자연법칙을 통해 설명될 수 있는가의 질문으로 귀결될 것이다. 본 논문에서는 이러한 자연의 상수 중에서 우주상수(cosmological constant)라 불리는 상수와 관련한 논쟁을 소개하고자 한다.

1990년대 이래 초신성 폭발 및 우주배경복사의 관측을 통해, 우리 우주가 가속팽창하고 있다는 것이 입증되었다. 이러한 가속팽창을 설명하기 위해서, 중력을 기술하는 아인슈타인의 장 방정식에는 어떤 종류의 에너지 항이 더해져야 한다. 에너지 항을 도입하는 데에는 여러 가지 방법이 있으나, 그 중에서 가장 단순한 방법은 우주상수라 불리는 항을 도입하는 것이다.

만일 이론적으로 우주상수를 완벽하게 결정할 수 있는 방법이 있었다면 가장 좋았을 것이다. 그러나 먼저 우리는 우주상수를 결정할 수 있는 이론을 가지고 있지 않으며, 아마도 가장 확률적으로 선호하는 우주상수의 값은 0일지도 모른다. 다른 한 편, 우주상수가 진공의 에너지에 해당한다면, 이론적인 방법으로 우주상수를 대략적으로 추정을 해볼 수는 있는데, 문제는 이러한 우주상수 또는 에너지 항의 값이 이론적으로 자연스럽다고 생각되는 값보다 10의 120승 정도 작아야 한다는 점이다. 이것은 지금까지 우리가 알고 있던 이론물리학의 방법으로 우주상수를 설명하는 것이 아주 부자연스럽다는 것을 의미한다. 이렇게 우주상수의 값과 관련한 이론적 곤란함을 물리학자들은 우주상수문제(cosmological constant problem)라고 부른다. 이것은 우리 우주에 존재하는 미세조정문제의 한 가지 형태이며, 또한 이론적인 예측과 실험적인 관측 사이의 엄청난게 큰 불일치를 드러내는 것이기도 하다.

이 문제를 이론물리학자들은 어떻게 이해하려고 하며, 여기에는 어떤 논쟁이 있는가? 여기에 대해서 살펴해보도록 하자.

II. 미세조정문제를 해결하기 위한 끈 이론의 해답

1. 우주적 풍경 (cosmic landscape)

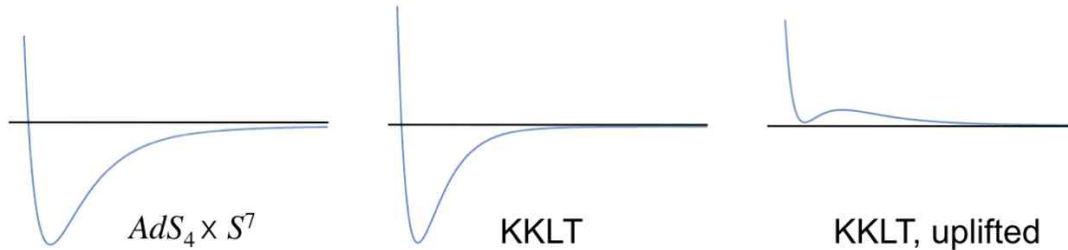
우주상수문제에 대해서 오늘날 다양한 견해가 논의되고 있다. 그 중에서 한 가지 유력한 견해는 주류 끈 이론 (string theory) 학자들에 의해서 제안된 것이다. 끈 이론이란, 중력과 양자역학을 통합하는 양자중력이론의 가장 강력한 후보자로서 1980년대 무렵에 대두되었다. 끈 이론에 대한 연구를 통해 성공적인 연구 성과들이 많이 누적되어 왔으며, 2000년대를 전후로 해서, 끈 이론 분야의 주류 물리학자들은 끈 이론으로부터 우리 우주가 어떻게 구성될 수 있는지에 대해서 관심을 가지게 되었다.

최초의 끈 이론은 보손(boson)만을 기술할 수 있고, 자연에 존재하는 페르미온(fermion)은 기술할 수 없었다. 따라서 끈 이론은 반드시 초대칭(supersymmetry)을 가져야 하는데, 초대칭을 가지는 끈 이론은 정합성을 위해 시공간이 10차원이 될 것을 요청한다는 것이 알려져 있다. 따라서 우리가 지금 관찰하는 4차원을 제외한 나머지 6차원은 우리가 볼 수 없도록 작게 감겨있어야 한다(compactification).

문제는 이렇게 차원을 감아 넣고 나면, 감겨진 차원들이 다시 풀려날 수 있다는 것이었다. 감아 넣은 차원들을 풀려나지 않게 묶어놓을 수 있는 힘은 어떻게 공급할 것인가? 이 문제와 관련해서, 1990년대 이후 발견된 다양한 종류의 막(membrane)들이 중요한 역할을 하게 된다는 것을 발견하게 된다. 끈 이론 내부에 존재하는 것으로 알려진 막들은 다양한 종류의 장 및 진하를 가질 수 있는데, 이러한 막들을 적당히 집어넣고 함께 차원을 감으면, 장들의 효과에 의해서 감겨진 차원들이 풀려나지 않고 안정적인 구조를 가질 수 있게 된다는 것이다.

이렇게 막을 감아 넣고 나면, 장들의 효과에 의해 우리가 관찰하는 4차원 시공간에 진공의 에너지가 추가로 주어지게 되며, 이것은 마치 4차원 세계의 우주상수와 같은 역할을 하게 된다. 문제는 이러한 에너지는 6차원을 감아 넣을 때, 우리가 막을 몇 개를 감아 넣는가에 섬세하게 의존하고 있다는 사실이다. 따라서 우리는 막의 개수를 조절함으로써, 우리 우주의 우주상수도 미세하게 조정할 수 있을 것이다. 이렇게 끈 이론에서 다양한 종류의 우주상수가 허용되는 현상을 우주적 풍경(cosmic landscape)이

라고 부른다. 우주적 풍경이 만들어낼 수 있는 우주상수의 개수는 10의 500승 개 이상이 될 것이라 추정하며, 따라서 이러한 우주상수들은 불연속이지만 연속체에 거의 가까운 (discretum) 분포를 형성하게 될 것이다.



[그림 1] 끈 이론에서는 차원을 감아 넣을 때 기본적으로 우주상수가 0보다 작은 결과를 얻게 된다(왼쪽). 차원을 감아넣는 방식으로 잘 알려진 KKLT 모형에서는 비섭동적 효과를 사용해 우주상수를 0보다 큰 값으로 들어올릴 수 있게 한다(오른쪽). (Polchinski, 2015)

2. 영구적 가속팽창(eternal inflation)과 다중우주(multiverse)

문제는 이렇게 막의 개수를 미세조정한다는 것 역시 우주상수문제에 대한 자연스러운 설명은 되지 못한다는 것에 있다. 왜 하필이면 우리 우주를 설명하는 막들은 그렇게 특정한 숫자만큼 존재한다는 말인가? 이 질문에 대한 답을 주기 위해, 스탠포드의 물리학자 레너드 서스킨드(Leonard Susskind)는 인류원리(anthropic principle)에서 비롯된 설명을 시도한다 (Susskind, 2003).

서스킨드의 설명을 이해하기 위해서는, 이에 앞서 현대 우주론에서 중심가설로 정립된 인플레이션 우주론(inflationary cosmology)에 대해서 살펴볼 필요가 있다. 1960년대를 전후로 실험적으로 정립된 빅뱅우주론(big bang cosmology)에는 몇 가지 이론적 부자연스러움이 있었다. 그런데 빅뱅 직후에 급팽창이라는 과정을 도입하면 이러한 부자연스러움을 해결할 수 있다는 아이디어가 1980년 무렵 앨런 구스(Alan Guth)를 비롯한 몇 학자들에 의해 제안되었다. 초기 우주의 급팽창은 우주배경복사(cosmic microwave background)의 비등방성(anisotropy)에 관한 특별한 예측을 주게 되는데, 이러한 예측이 1990년대 이후로 이어진 수많은 실험들에 의해 상당히 높은 수준으로 확인된 바 있다. 아직까지 인플레이션의 대안적 이론들을 완전히 제거하지는 못한다는 의미에서 인플레이션 이론이 입증되었다고 말할 수는 없지만, 아무튼 인플레이션 우주론은 현재 가장 강력하고 예측력 있는 이론으로서 우주론계의 중심가설로 정립되어 있다.

그런데 인플레이션은 유한한 시간 안에 끝이 날 수도 있지만, 끝이 나지 않을 수도 있다. 이렇게 끝이 나지 않는 인플레이션을 영구적 가속팽창이라고 한다. 영구적 가속팽창이 일어나기 위한 초기조건은 아무리 확률적으로 낮더라도, 일단 일어나기만 한다면 끝나지 않을 것이므로, 영구적 가속팽창의 존재는 이론적으로 아주 자연스러운 결과인 것처럼 보였다. 그리고 한 걸음 더 나아가, 가속팽창이 영구적으로 일어나면, 우주의 총 부피는 한 없이 커질 것이고, 그 중의 일부는 양자 터널링(quantum tunneling)에 의해 다른 형태를 가진 우주들을 생성할 수 있을 것이다.

이제 이러한 배경 하에서, 우주적 풍경과 영구적 가속팽창이라는 아이디어를 결합해보자. 먼저, 우주

적 풍경에 의해 우리 우주의 값을 포함하는 다양한 스펙트럼의 우주상수가 원리적으로 가능해진다. 그 다음, 우주는 영구적 가속팽창에 의해, 무한대로 한없이 팽창하고 있는데, 이 팽창의 과정에서 양자역학적 터널링에 의해 우주적 풍경이 원리적으로 허용하는 모든 우주상수들을 '실제로' 존재하게 만든다. 즉, 우주적 풍경에 의해 허용된 가능태(可能態)가 영구적 가속팽창에 의해 현실태(現實態)로 되는 것이다. 이렇게 영구적 가속팽창에 의해 우주적 풍경을 현실화한 세계의 전체를 '관측가능한 우주'(Universe)와 대비시켜, '다중우주'(multiverse)라고 부른다. 다중우주는 공간적으로 우리가 도달 가능한 영역 밖에 존재하므로, 사실상 이에 대한 관측은 불가능하다. 그러나 다른 한 편, 다중우주의 어딘가에는 이론적으로 가능한 우주상수를 가진 우주는 반드시 존재하게 되어있다. 즉, 가능한 것은 어딘가에 반드시 실재하게 된다는 것이다.

3. 인류원리(anthropic principle)적 설명

그 다음 자연스러운 질문은, 왜 우리가 다중우주 속에서 하필이면 그 우주상수를 가지는 우주에 존재하는가 하는 점이다. 이에 대해 한 가지 알려진 사실은, 우주상수가 우리 인간의 존재와 밀접한 관련을 가진다는 것이다. 우주상수가 현재 우리가 관측하는 값보다 100배 이상 커지게 되거나 0보다 작은 값을 가지게 되면, 우주의 팽창이 너무 빨라지거나 우주가 수축하게 되어서, 우주의 나이만큼 영속적으로 존재할 수 있는 관찰자가 허용되지 않게 된다. 우리가 '하필이면' 우리 우주에 살고 있는가 하는 질문이 성립하기 위해서는, 적어도 그 관찰자의 존재가 전제되어야만 하며, 따라서 관찰자의 존재를 허용하는 우주의 조건은 아무리 그 확률이 낮고 개연성이 떨어지더라도, 요청되어야만 한다. 따라서 우주상수가 지금과 같은 정도로 그렇게 작아야만 하는 것은, 관찰자의 존재를 위해서 반드시 필요하다. 이것이 '하필이면' 우리 우주의 우주상수가 부자연스럽게 작은 것에 대한 설명이 된다는 것이다. 관찰자의 존재를 우주상수에 대한 설명에 도입했다는 점에서, 이러한 설명을 인류원리적 설명이라고 한다.

4. 인류원리적 설명에 대한 비평

서스킨드가 도입한 우주적 풍경(가능태), 영구적 가속팽창(가능태의 현실태로의 전환), 그리고 인류원리적 설명은 우리 우주에 존재하는 모든 미세조정문제를 설명할 수 있을지 모르는 막강한 자연주의적 방법론인 것처럼 생각되었다.

그러나 여기에 대한 몇 가지 비판도 존재하였다. 먼저, 왜 우리는 '영속적인' 관찰자만을 생각해야 하는가 하는 점이다. 우리가 질문을 하기 위해 관찰자가 존재해야 한다면, 이러한 관찰자는 100년 가까이 생존하면서 수천 년 이상 언어와 문화를 존속시킬 수 있는 이러한 인류가 될 필요는 없을 것이다. 어쩌면 양자 요동에 의해서 확률은 낮지만 일시적으로 존재할 수 있는 어떤 관찰자(이른테면, Boltzmann brain)가 있고, 다중우주 전체에서 인간과 같은 관찰자보다 일시적인 관찰자가 좀 더 확률이 높다면, 인류원리적 설명은 설득력을 잃게 될 것이다.

이 비판과 관련될 수 있는 다른 질문은, 과연 다중우주가 과학적 대상이 될 수 있는가, 즉 예측 가능한 값을 적어도 원리적으로 부여할 수 있는 수학적 측도가 존재하는가 하는 점이다. 앞에서 말한 것처럼, 다중우주 자체는 실험적으로 측정할 수 없다. 그러나 과학적인 대상이라면, 적어도 원리적으로 정합

적인 예측을 보여줄 수는 있어야 한다. 그런데 다중우주는 크기가 무한대이기 때문에, 확률을 부여함에 있어서 무한대를 어떻게 길들일 것인가의 문제가 발생하게 된다. 이것을 다중우주의 측도 문제라고 부르며, 여기에 대해서 합의된 견해는 아직까지 알려져 있지 않다.

III. 우주의 풍경(landscape)과 늪(swampland): 끈 이론은 우주상수를 설명할 수 있는가?

그런데 2018년을 전후로, 이 문제에 대한 좀 더 근본적인 비판이 끈 이론 내부에서 제기되었다. 하버드의 물리학자 쿰럼 바파(Cumrum Vafa)를 비롯한 보수적인 끈 이론 학자들에 의하면, 지금까지 끈 이론에서 계산된 우주적 풍경의 모델들에는 사실 모두 이론적인 정당화가 부족했다고 한다 (Obied et al., 2018). 우주적 풍경과 관련해 지금까지 이루어졌던 계산의 중간 중간에 여러 가정 및 근사가 사용되었는데, 이러한 가정과 근사가 좀 더 근본적인 이론으로부터 정당화되지 않을 것이라고 그들은 생각한 것이다.

예들 들어, 전장에서 설명한 것처럼 막을 감아 넣는 과정에 대해서 살펴보자. 지금까지 잘 알려진 바에 의하면, 여분의 차원에 막을 넣고 차원을 감아 넣을 때, 양자효과들을 잘 다스릴 수 있는 방법이 알려져 있다. 이 때, 몇 가지 수학적 전제가 주어지면, 결과적으로 나타나는 진공의 에너지는 반드시 0이거나 0보다 작아야 한다. 여기까지는 끈 이론 학계에서 잘 알려진 결과이다. 문제는 우리가 살고 있는 세상의 진공의 에너지는 0보다 크기 때문에, 앞에서 전제된 어떤 가정을 위반시켜야 한다는 점이다. 이것이 불가능하지는 않으며, 몇 가지 방식으로 가능한데, 그 중의 하나는 4차원에서의 비섭동적 효과를 집어넣는 것이다 (Kachru, 2003). 그러면 비섭동적 효과들에 의해 초대칭성이 위반되면서 0보다 큰 우주상수를 얻는 것이 가능해졌던 것이다.

바파를 비롯한 학자들은 여기에서 비섭동적 효과를 넣는 과정이 불확실했다고 비판한다. 사실 우리는 10차원 시공간 전체를 포함한 비섭동적 효과를 넣고 그것을 4차원으로 환원시켜서 살펴봐야 했는데, 이런 방식으로 다루는 것이 어렵기 때문에, 4차원에서 이미 알려진 비섭동적 효과들만으로 근사적인 계산을 취했던 것이다. 그러나 이 근사들의 문제점들이 발견되면서, 0보다 큰 진공의 에너지를 얻는 과정 자체에 대해 의문이 생긴다는 것이다.

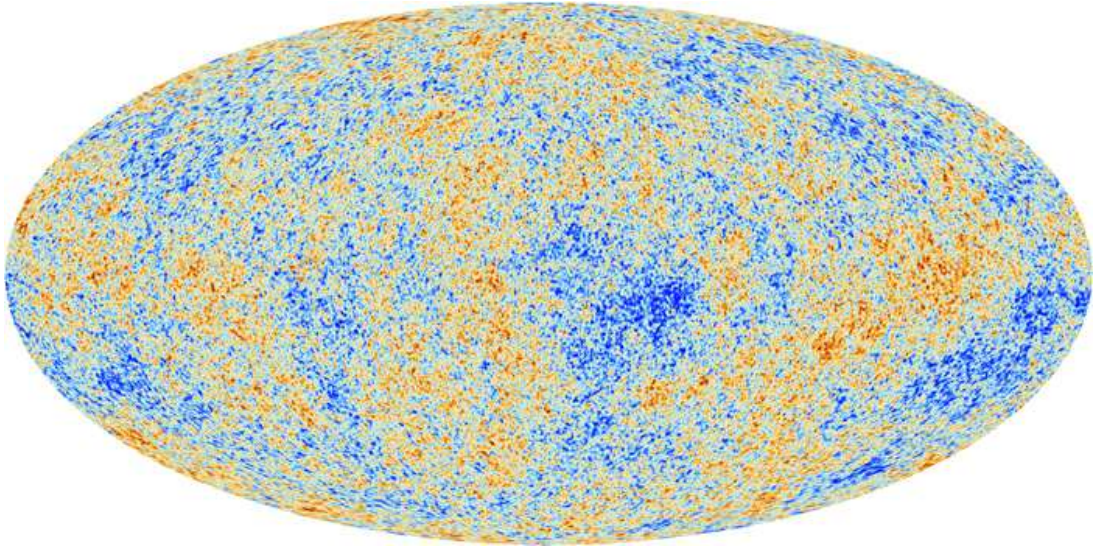
따라서 지금까지 믿어왔던 우주적 풍경이 실은 풍경이 아니라 늪(swampland)이었을 뿐이고, 끈 이론이 실제로 허용하는 우주적 풍경은 훨씬 더 제한된 영역의 우주만을 허용할 것이라고 그는 주장한다. 그들의 주장에 의하면, 아마도 끈 이론은 양의 값을 가지는 우주상수는 단 하나도 허용하지 않을 것이고, 어쩌면 우주 초기에 있었을 것이라 생각되는 슬로우-롤 인플레이션(slow-roll inflation)도 끈 이론이 허용하지 않을 것이라고 한다.

IV. 몇 가지 문제점들

1. 끈 이론은 인플레이션 우주론을 배제하는가?

첫 번째로 드러난 문제는, 인플레이션 우주론과 관련된 것이다. 바파의 주장은 처음 나온 직후에 많

은 물리학자들의 관심을 받았다. 그것은 우주상수가 없을 뿐만 아니라, 슬로우-롤 인플레이션도 없을 것이라고 주장했기 때문이었다. 그런데 우주상수와 인플레이션을 가정한 우주배경복사의 분석은 너무도 성공적이었기 때문에, 바과의 주장은 너무 강한 주장으로 보였고, 마치 실험적으로 끈 이론이 반증되어 버릴 수도 있다는 것처럼 보였다. 이어서 제기된 이론적 비판들에 따라, 끈 이론이 부여하는 이론적인 한계가 슬로우-롤 인플레이션의 작동 조건을 어느 정도 포함하게 되면서, 이 긴장관계는 어느 정도 완화되는 것처럼 보인다. 이와 관련해서 이론 및 실험에서의 더 자세한 조사가 필요하다.



[그림 2] 우주상수 및 슬로우-롤 인플레이션 모델에 의한 설명이 우주배경복사의 비등방성에 대한 현재로서는 최선의 설명이다. 그림은 플랑크(Planck) 위성에 의한 관측결과.

2. 추측, 추측, 추측, 그리고 새로운 추측

그런데 우리는 여기에서 그들이 처음 주장을 일부 '후퇴시켰다'는 것이 대체 무슨 의미인지 생각을 해볼 필요가 있다. 이것은 그들의 처음 주장이 이론적으로 증명된 사실이 아니라 '추측'에 지나지 않았기 때문이다. 바과의 주장은 수학적 증명인 것이 아니며, 현재로서는 추측(conjecture)에 지나지 않는다. 즉, 우주의 풍경과 우주의 높을 구분하는 식별조건(criterion)을 이리저리하게 '제안'하고 있는 것이다. 여기에는 어느 정도 이론적인 이유가 있겠지만, 증명이 된 것은 아니다.

사실 이렇게 '추측'에 기반을 두고 이론적인 연구들을 쌓아올리는 것은 어느 순간부터 끈 이론 내부에서 이루어져 온 (어떤 의미에서) 잘못된 관행이다. 블랙홀 상보성(black hole complementarity), 홀로그래피(holography), 반-드지터/등각장론(AdS/CFT) 대응, 게이지-중력 대응, ER = EPR 대응, 작용 = 복잡성(action = complexity) 대응, 초-플랑크 검열(trans-Planckian censorship) 추측 등 끈 이론에서 근래에 1990년대 이후로 주장된 주요 슬로건들은 모두 다 '추측'이다. 물론 끈 이론 전체가 너무 풍부한 구조를 가지고 있고, 수학적으로 완벽한 주장을 말하기 어려울 정도로 복잡하기 때문에 이루어지는 일

일 수 있지만, 아무튼 확실한 기반이 아니고 추측 위에 추측을 쌓는 일을 반복하고 있다는 것은 치명적인 문제일 수 있는 것이다.

3. 끈 이론이 당면한 실험적 한계

이렇게 추측 위에 추측을 쌓고, 추측끼리 다툼을 하고 있는 배경에는, 끈 이론이 실험을 통해 확인할 수 있는 예측가능한 뭔가를 전혀 보여주지 못하고 있다는 문제가 내재해 있다. 심지어는 거대중입자가속기(LHC)에서 초대칭 입자를 발견하지 못하고 있기도 하다. 지금까지 우리는 끈 이론과 관련해 실험으로 확인할 수 있는 것이 전혀 없었기 때문에, 결국 이론에 의지할 수밖에 없었고, 그 이론이 한계에 부딪히자, 그 다음에는 근사와 추측에 의존할 수밖에 없는 것이다.

끈 이론 학계는 뭔가 '연구할 거리'가 있어야 하는데, 그 연구할 거리를 어떻게 공급해줄 것인가? 가장 이상적인 경우는 실험이 어느 정도 이론을 따라가면서 이론에 방향성을 제시해주는 것이다. 그런데 그러한 실험이 전혀 없고, 이론적으로는 할 수 있는 일들이 모두 포화된 상태에 이르렀다면, 그 다음에는 학계의 유행을 따르는 수밖에 없을 것이다.

그러면 학계의 유행을 만들기 위해서는 무엇을 해야 하는가? 이것을 위해서는 학계의 리더들이 어떤 추측을 정기적으로 던져줘야 하며, 그 분야의 대부분의 학자들은, 비록 증명이나 정당화가 없더라도, 학계의 리더에 의해서 제안이 되었기 때문에, 그들이 던진 추측들을 확인하는 방식으로 연구를 이어나가게 될 것이다. 비록 선부르게 일반화를 할 수는 없겠지만, 이런 방식이 끈 이론 내부에서 지난 십여년간 이어져 온 한 가지 흐름인 것처럼 보인다.

4. 다중우주에 대한 염증

마지막으로 바과의 비판 및 그의 비판에 동조하는 학자들이 생겨났다는 것은, 서스킨드의 다중우주와 인류원리에 대해 염증을 느끼고 있던 사람들이 생각보다 많이 있었다는 것을 의미할 것이다. 다중우주와 인류원리는 우주에 존재하는 미세조정 문제들을 효과적으로 해결해주긴 하지만, 그와 동시에 '어떤 문제든지 설명해버리기 때문에, 실은 어떤 것도 설명하지 못하는' 현실을 보여주었던 것이다.

비록 유신론자가 아니더라도, 미세조정문제를 설명하는 다중우주와 인류원리에 대해 비판을 할 수 있었고, 또 끈 이론이 가능한 모든 세계를 무엇이든 허용한다는 식의 무제한적인 적용은 지양했어야 했는데, 그렇지 못했던 것이 사실이다. 이렇게 끈 이론의 가능성을 남용했던 현실을 싫어했던 학자들이 바과의 비판에 좀 더 힘을 실어주는 것처럼 보인다.

이것은 영구적 가속팽창과 인플레이션 우주론에 대한 비판과도 맞물려 있다. 어떤 학자들은 영구적 가속팽창의 가능성을 받아들이고 싶지 않았기 때문에, 그리고 다중우주의 측도문제를 없애버리고 싶었기 때문에, 인플레이션 우주론 이외의 다른 대안적 가설을 주장해오기도 했다. 어쩌면 그들의 바과의 주장에 동의하는 것은 바과의 주장을 이해하거나 설득되어서가 아니라, 자기들의 철학적 또는 이론적 관점을 뒷받침해 줄 유력한 학자가 나타났기 때문에, 이에 편승해서 자신의 주장을 강화하려는 심리가 숨어있지 않을까 생각해본다.

IV. 결론

본 논문에서는 우주상수문제에 대한 끈 이론 내부의 논쟁에 대해서 살펴보았다. 서스킨드를 비롯한 2000년대 초중반의 학자들은 우주적 풍경, 영구적 가속팽창 및 다중우주, 그리고 인류원리를 사용해 우주상수 및 그 밖의 모든 미세조정들을 설명할 수 있는 강력한 이론적 방법을 제안하였다. 그런데 이러한 이론적 계산들에 대한 비판이 제기되면서, 우리가 지금까지 생각해왔던 우주적 풍경이 실은 높에 지나지 않을 뿐이고, 끈 이론이 실제로 설명할 수 있는 우주는 아주 제한된 우주일 뿐이라는 주장이 제기되었다.

우주적 풍경과 높에 대한 이러한 논쟁은 오늘날 이론물리학자들이 우주상수를 설명하기 위해 부딪힌 복잡한 상황을 보여주며, 좀 더 일반적으로는, 미세조정문제를 해결할 수 있는 방법으로 여겨진 인류원리적 설명에 대해 심각한 질문이 던져지고 있다는 것을 의미한다. 앞으로 이 문제가 어떻게 진행될지를 살펴보는 것은 흥미로운 관전거리가 되리라 생각한다.

참고문헌

- Polchinski, J. (2015). "Brane/antibrane dynamics and KKLT stability." *Proceedings of SUSY 2015*. [arXiv:1509.05710]
- Susskind, L. (2003). "The anthropic landscape of string theory." in Carr, B. (Ed.) (2003) *Universe or multiverse?*. [hep-th/0302219]
- Obied, G., Ooguri, H., Spodyneiko, L. and Vafa, C. (2018). "De Sitter space and the swampland." [arXiv:1806.08362]
- Kachru, S., Kallosh, R., Linde, A. and Trivedi, S. P. (2003). "de Sitter vacua in string theory." *Phys. Rev. D*68(046005).