현대우주론과 일반상대론

DOI: 10.3938/PhiT.24.011

황 재 찬

Modern Cosmology and General Relativity

Jai-chan HWANG

We describe the relations between modern cosmology and general relativity in a historical context. We reveal some ironies imbedded in Einstein's final correction in 1917 of his gravitational field equation in the context of cosmology, which has apparently opened a new era of modern physical cosmology. The ugly (according to Einstein) correction term was introduced only to build a static cosmology, which turned out to be flat contradicting the observation. However, the correction term itself has saved modern cosmology from the genuine creativity of nature, which is continuously revealed by astronomical observations. Whether the present precision cosmology is also a correct one is often ignored by practitioners but is still a pressing open question left for future theoretical and observational pursuits.

아인슈타인중력

세계관으로서 우주론이 과학만의 관심영역은 아닙니다. 여러 인간사회의 신화와 종교도 우주의 기원과 상태에 대한 다양한 우주론을 말합니다. 인간은 삶에서 우주론을 필요로 하는 듯합니다. 서구 천문학의 역사에서 천동설과 지동설도 우주론이라고 할 수 있습니다. 현대물리우주론(줄여서 현대우주론)은 과학, 특히 물리과학이 말해주는 우주론의 한 부분입니다. 빅뱅으로 알려진 현대우주론의 역사는 아인슈타인(Albert Einstein)의 중력이론인 일반상대성이론(줄여서 일반상대론)과 함께 시작

저자약력

황재찬 교수는 서울대학교 천문학과를 졸업하고, 미국 텍사스대학교에서 천문학 박사를 받았으며 지금은 경북대학교 천문학 교수로 재직하고 있다. 전공은 우주론이며 우주생물학과 인간의 미래에 관심을 가지고 있다. (jchan@knu.ac.kr)

되었습니다. 여기에는 여러 가지 역설이 담겨 있습니다.

아인슈타인은 1905년 서로 등속운동을 하는 관성계 사이의 물리법칙을 기술하는 특수상대론을 발표합니다. 1907년부터 이를 가속운동을 하는 비관성계 혹은 중력계로 확장하려 하고, 1915년에 이론을 완성합니다. 그해 11월 4일과 11일 두 차례에 걸쳐 장방정식을 개정하여 발표하고 지금 알려진 최종형태는 11월 25일에 발표합니다. 그 사이인 11월 18일에는 일반상대론의 첫 번째 검증인 수성의 근일점이동을 성공적으로 설명하고, 몇 년 후 일식에서 충격적으로 검증될 해의 중력 때문에 별빛이 휘어지는 값을 정확하게 예측합니다. 1905년이 아인슈타인이 이룩한 기적의 해(Annus Mirabilis)였다면 1915년 11월은 그의 또 다른 기적의 달(Mensis Mirabilis)이 될 법합니다. 올해로 꼭 100년이 되는군요.

일반상대론은 아인슈타인의 장방정식으로 기술됩니다. 그 방정식은 가속하는 계인 비관성계도 다룬다는 의미에서 일반상대론이지만 사실은 중력을 특수상대론과 정합적이 되도록 꾸민 상대론적 중력이론입니다. 당기는 힘의 근원으로서 질량을 선언하고 그에 따른 운동을 기술하는 뉴턴의 중력과 역학법칙과는 달리 장방정식은 오른쪽에는 물질의 상태 그리고 왼쪽에는 그에 부합하는 시간과 공간의 곡률로 구성되어 있습니다. 기하학으로는 19세기에 리만(Bernhard Riemann)이 완성한 리만 기하학을 사용합니다. 공간의 곡률은 공간이 굽은 상태, 시간의 곡률은 시간의 빠르기가 변하는 정도라고 이해할 수 있습니다. 시간과 공간의 상황이 주변 물질의 상태에 영향을 받는다는 것입니다. 뉴턴역학의 미시세계 극한을 대체한 양자역학이 뉴턴역학을 포함하는지는 불확실한데 반해 아인슈타인중력은 빛의 속도가 무한대인 극한에서 정확히 뉴턴의 중력과 역학법칙을 포함합니다. 앞서 1915년에만 세 차례 방정식을 고쳤다고 했는데 그때마다 곡률에 해당하는 방정식의 왼쪽, 그러니까 시공간기하학이 과감하게 변경됩니다.

아인슈타인은 1917년 2월 8일 발표된 우주론적 상황을 고려한 논문에서 그의 방정식을 또 한 차례 개정합니다. 이번에는 정적인 우주를 만들기 위해 우주상수라고 하는 항을 장방정식의 왼쪽, 즉 곡률부분에 새로운 항으로 추가합니다. 이 논

문으로 현대우주론이 시작된 것은 분명하지만 아인슈타인과 현대우주론의 관계는 여러 가지 역설로 가득합니다. 이 추가 항이 장방정식에 대한 아인슈타인의 최종 개정일 수도 있고, 아인슈타인이 이 개정을 후회하고 우주상수를 철회하였다고도 하며, 어떤 사람은 이 추가된 항은 아인슈타인 식의 오른쪽, 그러니까 우주상수는 물질의 특수한 상태로 재해석될 수 있다고도 주장합니다. 하여튼 지금 보면 단지 잘못된 이유로 도입된 이 추가 항은 우주론의 초기 발전에 방해가 된 셈인데, 우여곡절 끝에 우주론의 가장 최근 발전이 바로 이 항의 발견으로 이어진 것은 반전이자 역설입니다.

한편, 1차 세계대전이 1914년 7월 28일에서 1918년 11월 11일 사이에 벌어졌다고 하니 일반상대론과 현대우주론의 탄생은 모두 기관총과 참호전 그리고 독가스로 기억되는 세계대전이 한창이던 와중에 진행된 일입니다. 동서양 고전 사상의 시조로 꼽히는 공자와 소크라테스가 살던 시기가 각각 춘추전국시절과 펠로폰네소스 내전시절이었음을 기억한다면 시공과 우주에 대한 아인슈타인의 사상사적인 기여가 근대문명이 자랑스럽게 이룩했다는 산업혁명의 기술력이 총 동원된 인류사적 대 참화 도중에 나타난 것은 우연한 일치일까요?

아인슈타인중력은 천문학적 현상들을 다루기에 적합한 이론으로 널리 받아들여집니다. 이 이론은 약한 중력장에서 적용되는 포스트-뉴턴 근사법¹⁾에 근거하여 태양계와 두 천체 상황에서 뚜렷한 검증기록을 보유하고 있습니다. 아인슈타인중력이 지난 100년간 과학적이며 기술적인 발전에 기반을 둔 어떠한 실험 검증에서도 실패한 바가 없음은 공식적인 사실입니다. 하지만 강한 중력이나 은하규모를 포함하는 큰 규모에서는 이 이론에 대한 어떠한 검증도 없었음 또한 분명한 사실입니다. 따라서 실험으로 검증된 규모와 비교하면 아인슈타인중력의 우주론적 적용에는 10^{15} 배라는²⁾ 실로 경이로운 외삽추론과 그에 버금가는 강렬한 믿음이 필요합니다. 아인슈타인중력이 우주론에서 일반적으로 받아들여지는 이유는 약한 중력에서의 성공적인 검증, 그리고 아인슈타인의 유명세와 이론의 명성에 기반을 두고 있다고 볼 수 있습니다. 따라서 일반상대론은 현대우주론에서 자주 채택하는 중력에 대한 중대한 가정으로 볼 수 있습니다. 그리고 여기에서 현대우주론을 구성하는 정합적인 세계관이 나옵니다.

아인슈타인의 우주론

1917년 아인슈타인의 논문은 분명 현대우주론의 시작으로

- 1) 아인슈타인중력의 효과를 뉴턴 중력에 추가된 보정항으로 취급하는 근사법으로 속도를 빛의 속도로 나눈 차원이 없는 값을 보정항 전개에 씁니다.
- 2) 우주의 나이동안 빛이 지난 거리인 호라이즌 규모를 지구에서 해까지 거리인 천문단위로 나눈 값입니다.

볼 수 있습니다. 하지만 역설은 아인슈타인이 우주론을 전개하려 의도한 것이 아니었다는 것에서부터 시작됩니다.

아인슈타인은 그의 장방정식에 이르는 여정에서 중력질량과 관성질량이 실험적으로 동일하다는 사실(이를 등가원리(Equivalence principle)라고 합니다)과 거시적 우주가 국소적인 부분에 영향을 미친다는 마하의 원리(Mach principle)에 도움을 받았다고 말합니다.

중력질량은 뉴턴중력에서 질량은 멀리 떨어진 상태에서도 당기는 힘을 낸다는 신비스러운 설정에서 등장하는 질량이고 관성질량은 힘을 받은 물체는 질량에 비례하여 가속에 저항한다는 뉴턴의 역학법칙에 등장하는 질량입니다. 두 질량은 개념적으로 전혀 다른 것이지만 그 둘의 값이 사실상 같다는 것은 갈릴레오가 간파하고 있었습니다. 갈릴레오와 관련된 피사의 사탑 두 낙하물체 사고실험은 바로 이 두 질량의 실험적 동일성에 대한 것입니다. 아인슈타인은 이 동일성으로부터 국소적으로 중력계가 가속계와 동일하다는 점을 깨닫습니다. 따라서 관성계를 다루는 특수상대론을 가속계를 다루는 일반상대론으로 확장하는 것이 사실은 중력을 상대론적으로 다루는 것입니다. 우리는 이 동일성만으로도 중력장에서 빛의 경로가 휘어지고 중력이 강한 곳에서 시간이 상대적으로 느리게 간다는 것을 보일 수 있습니다. 물론 제대로 된 값은 아인슈타인 장방정식의 풀이에서 나옵니다.

등가원리는 말이 원리이지 단지 관성질량과 중력질량의 측정값이 동일하리라는 것입니다. 사실에 권위를 부여하기 위해서 인지 과학에서는 종종 밝혀지지 않은 사실을 이런 식으로 표현합니다. 두 질량의 측정값이 다르다는 것이 실험으로 아직 확인되지 않았는데, 아인슈타인중력이 옳다면 두 질량은 실험적으로 구별될 수 없습니다. 따라서 아인슈타인중력이 틀렸음을 보이는 손쉬운 방법은 어떤 한 물체에 대해 중력질량과 관성질량이 다르다는 것을 보이는 겁니다. 하나는 당기는 힘을 측정하고 다른 하나는 밀어서 안 떠밀리려는 성질을 측정하면 되니 (진공인 상태에서 한 장소에서 두 물체의 중력에 따른 운동이 동일함을 보여도 됩니다) 실험적으로는 두 개념이 완전히 구별되지만 정밀한 실험은 쉽지 않습니다. 등가원리가 옳다는, 즉 두 질량이 완전히 같다는 것을 보일 수 있는 실험은 원리상 불가능합니다. 얼마나 광범위한 물체에서 얼마만한 정밀도로 같거나 다를 수 있는가의 문제입니다.

한편 마하의 원리는 좀 애매합니다. 먼 곳을 포함한 온 우주가 국소 관성계와 물리법칙에 영향을 미칠 가능성에 대한 논의는 아직도 현대물리학에 반영되지 않습니다. 아인슈타인은 자신이 흄(David Hume)과 마하(Ernst Mach)에게서 많은 영향을 받았다고 말합니다. 인과론에 대한 흄의 비판에 노출된다면 지금의 물리학자들도 놀랄 것입니다. 인과론은 물리학이 특

별히 관심을 쏟는 주제이자 핵심적인 가정입니다. 이 가정에 대한 흠의 비판이 어떠한 현대의 물리학으로도 극복할 수 있는 성질의 것이 아니라는 점을 깨닫는다면 충격을 받을지도 모릅니다.

아인슈타인은 자신이 막 완성한 중력이론에 마하의 원리가 반영되어 있다고 믿었던 듯합니다. 마하의 원리가 아인슈타인 중력에 정말 반영되어 있는지는 마하의 원리 자체가 애매모호하기 때문에 여러 측면이 있고 불분명하지만 부정적입니다.

아인슈타인이 자신의 중력이론을 완성한 다음 해인 1916년 1월 13일 슈바르츠실드(Karl Schwarzschild)는 구형 질량 하나가 있는 경우 아인슈타인 식의 완전풀이를 제출합니다. 그는 1차 대전 중 러시아 전선에서 얻은 수포창에 걸린 상태에서 풀이를 구하고 그해 5월 11일 42세의 나이로 사망합니다. 1915년 12월 22일 러시아 전선에서 보낸 편지로 이 풀이를 받은 아인슈타인은 자신의 복잡한 비선형 편미방정식의 한 완전한 풀이가 이렇게 쉽게 나온 것에 상당히 놀랐다고 말합니다. 특히 슈바르츠실드의 풀이에 따르면 질량에서 무한히 먼 지역은 곡률이 영인 민코프스키 공간이라는 점이 자신의 중력이론이 마하의 원리와 상충하는 것이 아닌지를 검토하게 만듭니다. 5월 14일 슈바르츠실드의 장례식에 다녀온 날 베소(Michele Besso)에게 보낸 아인슈타인의 편지는 그가 작업에 착수했음을 보여줍니다.

그의 중력이론이 마하의 원리에 부합함을 분명히 하기 위해 1917년 논문에서 아인슈타인은 곡률이 양이며 물질이 그 공간을 고르게 채우고 있는 유한한 부피를 가지는 정적인 공간을 우주 모형으로 상정합니다. 곡률이 양인 3차원 공간은 부피가 유한합니다. 마하의 원리를 위해서는 유한한 공간이 더 적합하겠지요. 양의 곡률과 정적인 상태를 선택한 것도 가정이지만 현대 우주론에서 정말 중요한 것은 물질이 고르게 분포하고 있다는 가정입니다. 아인슈타인은 논문에서 “오직 큰 규모의 구조만 고려한다면, 우리는 물질들이 거대한 공간에 걸쳐서 고르게 분포하고 있다고 표현할 수 있을 것이다.”라고 아주 손쉽게 말합니다. 하지만 이러한 가정에 어떠한 관측적인 근거가 있었던 것은 아닙니다. 파이어아벤드(Paul Feyerabend)는 『방법에의 도전』에서 “아인슈타인의 첫 우주론 논문은 순수하게 이론적인 연습으로서 단 하나의 천문학적 상수도 포함하고 있지 않다.”라고 지적합니다. 1917년 당시에 별들은 은하수에 몰려 있었으며 공식적으로는 외부은하라는 것이 있는지조차 알려져 있지 않았습니

다. 물질이 균일하고 등방하게 분포한다는 모형은 실제 우주와는 물론 차이가 있습니다. 이 가정은 보이는 우주의 큰 규모에서 성립할 것으로 기대되며 그보다 작은 규모에서는 물질 분포가 이러한 이상적인 모형에서 벗어납니다. 우주의 큰 규모에서 은하들이 과연 고르게 분포하고 있는지 여부는 아직도 관측으로 꾸준히 따져보아야만 하는 주제입니다. 결코 이론, 즉 가정으

로 재단하고 쉽게 넘어갈 성질의 문제가 아닙니다. 그 이유는 그 후 큰 성공을 자부하는 현대우주론의 전체 구성이 바로 이 가정 위에 구축되어 있기 때문입니다. 이렇게 물질이 고르게 분포한다는, 더 정확히는 균일하고 등방하게 분포한다는, 우주론적 가정을 밀른(E. A. Milne)이 ‘우주론원리(cosmological principle)’라고 했으며 지금도 종종 그렇게 말합니다. 무슨 원리라고 말한다고 해서 그 위압적인 용어에 주눅들 필요가 없다는 점은 말씀 드렸지요. 결국 관측으로 판정해야 할 가정일 뿐입니다.

물질이 고르게 분포한다면 곡률도 고르게 분포할 것이고 기하학적으로 이러한 공간에는 정성적으로 세 가지 종류가 있습니다. 곡률의 부호가 양이거나 음 혹은 그 사이 한 가지로 영인 경우가 그것입니다. 아인슈타인은 그 중 유한한 부피를 가진 공간을 위해 양의 곡률을 선택한 겁니다. 사실 공간의 유한성 여부가 꼭 곡률과 관련된 것은 아닙니다. 이 점은 그 후에 진정한 현대우주론의 창시자인 프리드만(Alexander Friedmann)이 파악하는데 뒤에 말씀드립니다.

현대우주론의 역사

프리드만을 진정한 현대우주론의 창시자라고 한 이유는, 마땅히 현대우주론의 시작이라고 할만한 1917년 논문에서 아인슈타인이 우주에 대한 자신의 믿음을 유지하기 위해 중력이론을 다시 개정하는 작업을 했지만 그의 우주론은 결국 관측과 배치되는 것으로 드러났기 때문입니다. 아인슈타인은 우주의 팽창이 발견되기 전까지 동적인 우주모형을 거부합니다.

물질과 곡률에 대한 아인슈타인의 가정을 장방정식에 넣으면 공간이 멀어지거나 줄어드는 동적인 상황이 발생합니다. 당시 38세인 아인슈타인은 자신의 이론이 보여주는 결과를 받아들이지 않고 정적인 우주모형을 유지하기 위해 우주상수를 장방정식에 추가합니다. 자신의 중력이론을 고친 것이지요. 양의 값을 가진 우주상수는 거리에 비례하여 미는 힘을 내는 반 중력과 같은 역할을 하며 당기는 중력을 내는 물질과 양의 곡률을 가지고 있는 그의 우주모형을 당분간 정적인 평형상태에 있도록 만들 수 있습니다. 이 평형은 불안정한 것으로 밝혀집니다. 드지터(Willem de Sitter)는 같은 해인 1917년 우주상수만으로 이루어진 모형에서 거리에 비례하는 적색이동이 나타나 는 것을 보이고 뒤에 이것은 공간의 팽창 때문임이 밝혀집니다. 아인슈타인의 우주모형은 결국 팽창하거나 수축하게 되어 동적인 모형은 불가피합니다. 당기는 힘 혹은 미는 힘이 작용하는 한 불안정은 피할 수 없는데 아인슈타인이 이 점을 눈치 채지 못한 점은 의아합니다. 이 점은 나중에 뉴턴중력에서도 당연한 것으로 밝혀지며, 어쩌면 뉴턴도 예상하고 있었음이 알

려집니다.

1922년 6월 프리드만은 우주상수까지 고려한 아인슈타인중력으로 균일·등방인 우주모형의 진화 식과 풀이를 발표합니다. 이것을 프리드만 우주모형이라고 합니다. 같은 해 9월 아인슈타인은 프리드만의 결과에 오류가 있다고 같은 저널에 발표합니다. 다음 해 5월 아인슈타인은 자신이 계산 실수를 했다고 발표하며 프리드만의 풀이도 수학적으로 가능하다고 인정하지만 프리드만에게 입힌 타격은 회복될 수 없었습니다. 프리드만은 1925년 37세 나이로 결핵으로 사망합니다.

프리드만은 우주의 기하학뿐 아니라 토폴로지의 가능성도 고려하였다고 합니다. 기하학이 공간의 국소적(local)인 성질에 대한 것이라면 토폴로지는 공간의 전체적(global)인 성질을 나타냅니다. 예를 들어 유클리드 공간에서 공간의 기하학적 성질은 어디에서나 동일합니다. 즉 공간곡률은 어디에서고 영입니다. 하지만, 이 공간이 무한한지 여부는 기하학적인, 즉 부분적인, 성질로는 알 수 없습니다. 2차원 유클리드 공간조차 여러 가지 방식으로 유한할 수 있습니다. 그 한 예로 좌우와 위아래가 동일시 된 컴퓨터 화면보호기의 평면이 그러합니다. 곡률이 없고 경계도 없지만 유한합니다. 아인슈타인중력은 시공의 기하학을 물질과 연결시켰기에 공간의 전체적인 성질인 토폴로지에 대해서는 아무런 제한을 가하지 않습니다. 시간에 대해서도 마찬가지입니다. 특수하게 단순한 경우가 아니라면 전체의 성질은 물리학의 영역을 넘어섭니다. 이 말은 관찰로 전체의 성질을 알 수 없다는 것이 아닙니다. 역사적으로 성립되어온 물리학 이론은 일반상대론을 포함하여 부분의 성질을 다루도록 구성되었기 때문에 전체의 성질은 경계조건(시간으로 치면 초기조건)으로 부과된 하며 이것을 물리이론으로 결정짓지는 않습니다. 실제 우주의 토폴로지가 어떤지는 이에 대한 물리이론이 존재하느냐의 여부와 무관합니다. 그 가능성은 관측으로 알아보는 수밖에 없습니다. 이 점에서 아인슈타인중력이 마하의 원리와 어떤 관계인지 궁금하지만, 모든 물리이론은 국소적이고, 현대우주론을 시작하게 만든 마하원리는 불행하게도 더 이상 현대우주론의 주 관심사가 아닙니다. 우주의 토폴로지와는 주제는 프리드만의 선구적인 지적 이후 거의 잊혀 있다가 최근 현대우주론의 중요한 주제로 다시 등장합니다.

1927년 르메트르(George Lemaitre)는 프리드만의 업적을 모른 채 동적인 우주모형을 재발견합니다. 그해 한 학회에서 다른 독일인 참석자와 함께 아인슈타인을 택시에서 만난 르메트르가 자신의 우주론에 대한 의견을 묻자 아인슈타인은 프리드만 때와 마찬가지로 “그대의 계산은 옳지만 물리는 형편없소.”라며 묵살했다고 합니다. 이때 아인슈타인이 프리드만의 업적을 언급했지만 독일을 모르는 르메트르가 제대로 알아듣지 못했을 것이라는 추측이 있습니다. 르메트르는 1927년 프리드만의 식과 함께 당시 알려진 관측으로부터 2년 후 허블(Edwin Hubble)

이 발표하게 될 우주 팽창률과 비슷한 값을 유도하고 이를 벨기에의 잘 알려지지 않은 학술지에 불어로 발표합니다만, 학계에는 알려지지 않았다고 합니다. 허블이 우주의 팽창을 발표한 후인 1931년 르메트르의 논문이 영어로 번역되지만 웬지 팽창률 부분이 누락되었고 팽창하는 우주의 발견은 온전히 허블의 몫으로 돌아갑니다. 1927년 논문에는 없던 프리드만의 독일어 논문이 1931년 번역에서는 인용됩니다. 최근 번역자가 르메트르였음이 밝혀졌습니다. 프리드만은 압력이 없는 물질을 고려했는데, 르메트르는 압력이 있는 경우를 연구하고 뜨거운 초기우주의 가능성을 제시하여 빅뱅우주론의 창시자가 됩니다.

팽창우주에 대한 증거는 1920년대부터 축적되지만 1929년 허블이 결정적으로 발표합니다. 1919년 일식원정으로 태양 중력으로 빛이 휘어지는 값을 관측하여 아인슈타인중력을 검증하고 아인슈타인을 일약 세계적인 명사로 만든 에딩턴(Arthur Eddington)은 1923년 『상대론의 수학이론』에서 드지터의 모형을 설명하며 다음과 같이 말합니다. “우주론에서 가장 당혹스러운 문제 중 하나는 나선형 성운들의 거대한 속도다. 그들의 시선방향 평균속도는 초당 600 km에 달하며 태양계로부터 멀어지는 경향을 강하게 보인다.” 성운의 분광 적색이동은 슬라이퍼(Vesto Slipher)가 1912년부터 관측하며, 이 성운들에 대한 거리는 허블이 알아냅니다. 허블이 사용한 거리측정법은 리비트(Henrietta Leavitt)가 1912년 발견합니다. 팽창률을 허블보다 2년 먼저 발표한 르메트르는 슬라이퍼의 적색이동과 허블의 거리자료를 사용합니다.

드지터, 프리드만, 르메트르는 동적인 우주에 대해 거부감이 없었는데 왜 유독 아인슈타인은 정적인 우주에 집착했는지는 분명치 않습니다. 아인슈타인은 직관의 중요성을 강조합니다. “물리학자의 지고의 과제는 그것으로부터 순수하게 추론하여 우주가 건설될 수 있는 보편적 기본 법칙에 도달하는 것이다. 이 법칙들에 이르는 논리적인 길은 없다. 경험에 대한 공감적 이해(sympathetic understanding)에 기반을 둔 직관만이 거기서 데려갈 수 있다. 나는 우주의 근본법칙에 대한 내 이해를 이성을 통해 도달하지 않았다.” 일반상대론에 이르는 과정에서 아인슈타인의 직관은 등가원리와 마하원리, 뉴턴중력이나 특수상대론과의 정합성, 리만기하학, 그리고 기존에 설명되지 않은 수성의 근일점 이동값의 안내를 받았습니다.

우주의 경우에는 자신이 창조한 이론이 열어준 여러 가능성 앞에서 아인슈타인은 틀린 선택을 한 것으로 보입니다. 직관이 분명 중요하지만 경험과 분리된 경우 그것이 우리를 엉뚱한 곳으로 이끌 수 있습니다. 1917년 4월 14일 드지터에게 보낸 편지에서 아인슈타인은 “비록 일반상대론이 우주상수를 허용하지만, 언젠가 분광선 이동을 통한 별들의 운동에 대한 실제적인 지식만이 우주상수가 있을 것인지 여부를 경험적으로 검증할 것임

니다. 신념은 좋은 원동력이지만, 나쁜 심판관입니다”라고 말합니다. 1919년에는 우주상수가 유한한 우주모형을 위해 필요하다고 계속 주장하면서도 이 항이 “이론의 형식적인 아름다움을 심대하게 해친다.”라고 평가합니다. 1923년 바일(Hermann Weyl)에게 보낸 엽서에서는 “우주가 정적이 아니라면 우주상수는 치워버려야 합니다.”라고 말합니다. 실제로 그는 우주의 팽창이 발견된 이후 우주상수를 없애게 된 것을 좋아했다고 합니다.

이렇게 틀린 이유로 무리하게 도입된 우주상수가 결국 최근 발견된 것은 역설의 정점입니다.

아인슈타인이 보낸 위의 편지에 대한 1917년 4월 18일 답장에서 드지터는 신중합니다. “관측은 결코 우주상수가 사라짐을 보일 수 없고, 단지 그 상수가 주어진 값보다 작음을 보일 수 있을 뿐입니다. 지금 제가 말씀드릴 수 있는 값은 10^{-45} cm^{-2} , 혹은 아마도 10^{-50} 보다 작다는 것입니다. 아마도 언젠가는 관측이 우주상수에 대한 정확한 값을 제공하겠지만, 지금으로서 저는 여기에 대한 어떠한 지식도 가지고 있지 않습니다.” 98년이 지난 2015년 현대우주론이 지지하는 우주상수 값은 $1.12 \times 10^{-56} \text{ cm}^{-2}$ 입니다.

돌이켜 보면 현대우주론의 역사에서 우주상수는 허블의 발견 이후에도 계속 중요한 역할을 해 왔습니다. 허블의 발견으로 추정된 우주의 나이는 당시 지구의 나이인 20억 년 정도보다도 작았습니다. 천체까지 거리의 개정으로 우주모형의 나이가 늘어났지만 그 후로도 줄곧 우주상수 없이는 우주모형의 나이가 우주에서 가장 오래된 별 때들의 나이보다 적었음은 관련 학자들은 무시하고 싶었을지언정 피할 수 없는 사실이었습니다. 양의 값을 가진 우주상수는 미는 힘을 내기에, 팽창을 가속시킬 수 있고, 모형의 나이가 길어질 수 있습니다. 우주의 나이 문제라는 사실 우주론에 치명적인 문제가 제기될 때마다 우주상수는 손쉬운 해결책으로 꾸준히 제안되고 있었고, 1998년 슈퍼노바 관측으로 우주의 가속팽창 가능성이 제안되었을 때 학계가 곧 받아들인 데는 그만한 사정이 있었다고 볼 수 있습니다. 그래도 막상 우주의 팽창이 정말 가속한다는 것은 거부감이 들만큼 놀라운 발견입니다. 한편 그 와중에 이론으로 추정한 별 때들의 나이도 함께 줄어들었음은 크게 주목받지 않았습니다.

아인슈타인이 우주상수를 자신의 일생최대실수로 표현했는지는 확인되지 않습니다. 하지만 1946년 르메트르에게 보낸 편지에서 “그러한 상수를 도입하는 것은 이론의 논리적 단순성을 상당히 포기하는 것을 의미합니다. 이 항을 도입한 이래로 나는 항상 양심에 꺼려왔습니다. 나는 이점을 강하게 의식하지 않을 수 없었고, 이런 흉한 일이 자연에 실현되어야 한다는 것을 믿을 수 없습니다.”라고 말합니다. 아인슈타인 스스로 흉하다고 말했던 그 수정 항은 단지 결국 관측과 어긋나게 되는 정적인 우주를 만들기 위해 도입한 것이지만, 어쩌다보니 이 항은 천문관측이 차츰 드러내는 진정한 자연의 창조성으로부터

현대우주론을 구원하는 역할을 꾸준히 해왔습니다.

정밀우주론 시대

1917년 논문을 지금의 관점에서 재해석하자면, 아인슈타인의 정적인 우주론이 옳은 것은 아니지만, 우주론원리라는 모형을 손쉽게 다룰 수 있게 해주는 이론적인 지침을 내려주었고, 자연의 창조적인 모습을 드러내는 새로운 관측 때문에 우주론이 어려움에 처할 때마다 편리하게 도피할 수 있는 우주상수를 제공해 준 셈입니다. 현대우주론은 끊임없는 위기의 근원이었던 우주의 나이 문제로부터 결국은 아인슈타인이 처음부터 깔아놓은 복선인 우주상수를 통해 구원받게 됩니다. 이제까지 역사의 반전을 보면 이것이 최종결론인지는 오직 미래만이 알려줄 것입니다.

한편 현대우주론에서 아인슈타인중력의 역할을 결코 과소평가할 수 없습니다. 아인슈타인의 1917년 논문 이전에 현대우주론과 관련 있는 논의는 사실상 없었다고 볼 수 있습니다. 균일하게 펼쳐진 질량 시스템은 불안정할 것이라는 1692년 뉴턴의 편지가 알려져 있을 뿐입니다. 하지만 질량이 균일하게 무한히 펼쳐진 시스템의 추이는 뉴턴중력으로는 확정할 수 없습니다. 아인슈타인중력에 기반을 둔 프리드만의 선구적인 연구 이후에야 여기에 안내를 받아 뉴턴중력에 따른 연구가 가능해졌습니다. 뉴턴방식의 유도는 어디엔가 구형가정이 들어있습니다. 아인슈타인중력에서는 균일하고 무한히 펼쳐진 시스템을 정합적으로 다룰 수 있습니다. 그 결과는 동적입니다. 팽창하는 모형은 유한한 과거에 시작이 있었을 가능성이 있고 호라이즌이 등장합니다. 호라이즌은 그 너머가 물리적으로 우리에게 아무런 영향을 미치지 못한 영역을 선포합니다. 따라서 처음부터 무한히 펼쳐진 시스템을 고려하여야 할 필요가 없어집니다.

현대우주론은 아인슈타인이 처음부터 관측 사실과 무관하게 우주론을 구성하였듯이 그 후 역사적 전개에서도 관측이 요구하는 여러 시련에도 굴하지 않고 단순한 이론에 대한 집념을 쉽게 버리지 않는 태도가 중요했음을 볼 수 있습니다. 이 태도는 지금 현대우주론이 제공하는 세계관을 지탱하는데도 중요한 역할을 하고 있습니다. 이 과정을 통해 현대우주론은 지금은 꽤 정교해 보이는 우주진화 시나리오를 주장하고 있습니다.

현대우주론은 지금 정밀우주론 시대를 맞고 있다고 주장합니다. 정밀하다는 것은 정확하다는 것과는 전혀 다른 말입니다. 정확하다는 말이 옳다는 뜻이라면 정밀하다는 말은 한 가지 모형을 택한다면 관측을 통해 그 모형을 구성하는 변수들의 값을 정합적이고 정밀하게 결정할 수 있다는 뜻입니다. 현대우주론의 모형은 다음과 같이 구성됩니다. 물질 분포와 공간이 균일·등방한 프리드만 배경에 우주 구조로서 물질과 기하의 작은 요동이 추가된 모형을 잡고, 중력으로는 우주상수가 추가된 아인슈타인중력을

택합니다. 우주 구조의 기원으로는 우주가 아주 작았을 때 미시 세계에서 작동했던 양자요동이 지목되고 있습니다. 관측과 일치하는 구조의 씨앗을 제공하기 위해서는 초기우주에 인플레이션이라고 하는 또 다른 가속 팽창 단계가 필요합니다. 관측은 원자가 내는 빛을 통해 이루어지지만, 이것만으로는 여러 관측 자료를 설명하기에 부족하여 많은 양의 빛을 내지 않고 있는 암흑원자와 원자보다 훨씬 많은 양의 암흑물질을 도입합니다. 게다가 모형을 지탱하기 위해서는 암흑물질보다도 훨씬 더 많은 양의 우주상수 혹은 이를 일반화한 암흑에너지가 필요합니다. 이런 식으로 모형을 구축하면 여러 관측을 정합적으로 설명할 수 있고, 관측사실은 모형의 변수들을 수 퍼센트 수준에서 결정합니다.

예를 들어, 2015년 2월 발표된 플랑크위성 2년차 자료에 따르면 우주의 나이(빅뱅 이후 지난 시간)는 137.99 ± 0.38 억 년이라고 합니다. $\pm$ 범위는 68% 신뢰도를 표시합니다. 제가 택한 수치와 함께 나오는 암흑에너지와 물질의 비율은 $69.2 \pm 1.2\%$ 와 $30.8 \pm 1.2\%$ 라고 하며, 물질 중 암흑물질과 원자의 비율은 5대 1 수준입니다. 따라서 원자는 약 5% 정도입니다. 우주팽창에 곡률의 기여는 0.5%보다 작습니다. 과연 정밀한 수치를 말합니다. 그런데 같은 자료에서도 어떤 조합을 택하느냐에 따라 값과 신뢰도의 범위가 약간씩 변하고 다른 자료를 택하면 조금 더 변하기도 하지만 모형의 정합성을 의심할만한 사태는 일어나지 않는다고 합니다. 이러한 현대우주론의 표준모형을 ‘조화(정합)우주론(concordance cosmology)’이라고 합니다.

5% 정도 되는 원자조차 단지 십분의 일 정도만이 빛을 내는 것으로 알려져 있습니다. 나머지 십 분의 구에 해당하는 암흑원자에 대한 추정치는 다른 암흑부문과 마찬가지로 이론적인 것입니다. 따라서 0.5%만이 빛과 관련된 원자이고 나머지 99.5%는 암흑, 혹은 미지의 상태에 있다는 것이지요. 이러한 암흑부문들을 허용한다면 관측과 정합적인 우주모형을 구성할 수 있고 관측을 통해 그 부분 사이의 비율을 정밀하게 결정할 수 있다는 것이 정밀우주론의 실상입니다. 문제라면 암흑부문이 빛으로 보이는 물질의 200배에 해당하는 99.5%를 차지한다는 점입니다. 단순한 모형의 정합성을 유지하기 위해 다량의 암흑 부문이 필요한 셈입니다.

현대우주론 표준모형은 우주상수를 추가한 아인슈타인중력으로 이루어져 있지만, 암흑 부문, 특히 암흑물질과 암흑에너지에 대하여서는 이론적 추정 이외에는 사실상 알려진 바가 없습니다. 이 사실이 많은 우주론 연구자들을 아인슈타인중력보다 복잡한 다른 중력으로 유혹합니다. 아인슈타인중력의 검증은 규모로는 태양계 정도 수준에서 이루어졌다고 말씀드렸지요. 또 우주상수의 추가도 일반상대론을 개정한 것에 해당한다는 관점도 소개드렸습니다.

아인슈타인중력을 일반화하려는 시도는 1918년 바일의 시도

이후 수없이 많이 있어 왔으며 대부분 아인슈타인중력을 포함하고 있기에 약한 중력 검증을 무사히 통과합니다. 양자효과와는 쉽게 복잡한 보정항을 요구합니다. 아인슈타인 이론은 상대론적 중력으로는 가장 단순한 경우에 속한다고 할 수 있습니다. 지금 표준적인 우주모형이 등장한 셈이지만 더 복잡한 상대론적 중력을 고려하는 것은 이제 우주론에서 일상화된 작업입니다. 하지만 암흑에너지를 위해 중력과 물질을 일반화하고 복잡하게 한 경우조차 표준모형의 가장 간단한 경우보다 관측사실을 더 잘 설명하지 못하고 있는 사실은 흥미롭습니다. 이러한 실상이 현대우주론 표준모형에 대한 자신감을 더해줍니다.

지금의 정밀우주론이 또한 옳은 것인지 여부는 학자들 사이에서는 종종 무시되지만, 아직은 미래의 관측과 이론이 해명해야만 하는 중대한 질문으로 남아 있습니다. 저는 아인슈타인 중력이라는 가정보다는 아인슈타인이 가정한 우주론원리가 성립하는지 여부에 더 관심이 있습니다. 1917년 아무런 관측 근거 없이 단지 문제를 수학적으로 다루기 쉽게 하려고 아인슈타인이 도입한 이 가정이 ‘우주론원리’로 승격되며 갈수록 견제함을 보이는 것은 우주가 보여주는 유머처럼 느껴집니다. 극미 세계에 이어 우주마저 과학에 포섭된 듯 포장된 물리과학의 행보가 인간의 오만을 부추긴다면 역설이 될 수 있습니다.

팽창하는 우주모형은 유한한 과거에 시작이 있었을 가능성과 과학지식의 절대한계인 호라이즌이 존재함을 알려 줍니다. 우주자체의 기원은 과학의 영역을 넘어서지만 우주의 시작이 무슨 의미인지, 시간조차 그때 시작한 것인지, 그리고 호라이즌 너머 우주의 상황이 어떠한지가 우주론의 관심사를 벗어날 수는 없습니다. 이에 대해 현대우주론에서 여러 논의가 있습니다. 하지만 과학이 관찰과 실험에 근거를 둔 것이라면 이러한 논의는 현실적으로 혹은 원리상 관찰과 실험의 영역을 넘어서는 점에 주의해야 합니다. 인간의 호기심을 끝없이 당기는 이 시대를 초월한 매혹적인 주제는, 관찰이나 실험이 가능하지 않은 한, 원리상 물리과학의 적용범위를 넘어섭니다. 관찰과 실험이 원리상 허용되지 않은 영역에 대한 주장은 정당한 철학적 혹은 형이상학적 논의는 될지언정 과학은 아닙니다.

감사

여러 도움 말씀을 주신 점 노혜림 박사님, 박찬경 교수님, 이기웅 교수님께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] The collected papers of Albert Einstein, English translation, Vol. 1-12 (Princeton Univ. Press, 1987-2009).
- [2] Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters, Planck Collaboration, arXiv:1502.01589.