

우주거대구조를 이용한 우주가속팽창의 검증

DOI: 10.3938/PhiT.20.057

송 용 선

Constraints on Cosmic Acceleration Using Large-scale Structure Formation

Yong-Seon SONG

We introduce alternative methods to probe cosmic acceleration by using large-scale structure formation of the universe. A baryon acoustic oscillation (BAO) develops through the tension between the gravitation force and radiative pressure and leaves a peak structure on spectra during the radiation-dominated epoch. The measured peak structure is exploited as a 'standard ruler' to determine angular diameter distance to the targeted galaxy. Constraints on the cosmic acceleration are enhanced by a combination of supernovae and BAO. In addition to the standard ruler method, the integrated Sachs-Wolfe effect (ISW) imprinted on the large-scale structure can be used to probe the signature of cosmic acceleration, which confirms the presence of cosmic acceleration in an alternative way.

우주가속팽창을 바라보는 새로운 창

지금까지 초신성 관측을 통하여 발견된 우주가속팽창에 대해서 알아보았다. 과학을 하는 사람들에게 가장 중요한 것은 평범한 사실이라도 한 번 더 의심해 보는 것이다. 새로운 발견에 고무되긴 했지만 대다수의 우주론자들은 좀 더 차분하

게 발견된 사실을 검증하기 위한 노력을 해야 한다는 사실에 공감하고 있었다. 여러 가지 문제들이 있었지만 그 중에서 흥미있었던 반론 중의 하나는, '우리가 과연 초신성의 관측을 통하여 우주가속팽창을 직접 본 것인가'라는 질문이었다.

이 질문에 관련된 흥미있는 제안들 중에서 하나를 소개한다. 우리가 실제로 본 것은 초신성이 기대했던 것보다 더 어두워지는 현상이었다. 우주가 가속팽창한다는 것은 관측된 사실이라기보다는 우리가 본 현상을 이론적으로 해석한 것이다. 만일 주어진 관측을 다르게 설명할 수 있는 이론이 있다면 우리가 우주가속팽창을 보았다고 단정지를 수는 없다. 예를 들어서 우주에 엑시온이라는 입자들이 있으면 빛이 자기장이 있는 은하를 통과할 때 밝기가 어두워질 수가 있다. 그렇다면 굳이 우주가속팽창이 없어도 초신성의 밝기가 어두워지는 현상을 설명할 수 있을 것이다.^[1]

이렇게 관측된 사실에 대한 해석의 문제가 제기되기 시작하면서, 관측 우주론자들에게 새로운 과제가 주어지게 된다. 초신성 이외의 다른 방법으로 우주가속팽창의 존재여부를 검증할 필요가 있게 된 것이다. 이론 우주론자들이 가속팽창의 이유를 설명하기 위해서 노력하고 있던 같은 시간에, 관측 우주론자들은 우주가속팽창을 볼 수 있는 또 다른 창을 찾기 위한 노력을 기울인다.

제안된 여러 가지 방법들 중에서 가장 주목 받았던 것은 우주거대구조를 이용한 방법이었다. 천문학에서는 구조의 크기에 따라 관측대상이 달라지게 된다. 태양계의 크기에서는 태양이나 행성들의 운동과 성질 등을 연구할 수 있다. 이것을 은하의 크기로 확대하면 은하 안에 있는 별이나 성운 등이 관측 대상이 될 것이다. 그리고 눈에 보이지는 않지만 은하들이 군집을 이루고 있는 은하단의 크기까지 확장할 수도 있다. 여기까지가 눈으로 확인할 수 있는 구조를 관측할 수 있는

저자약력

송용선 교수는 연세대학교 물리학과를 졸업하고 캘리포니아 대학에서 천체물리학 박사학위를 받았다. 시카고 대학 연구원과 포츠머스 대학 선임연구원을 거쳐, 현재 고등과학원 물리학부에 조교수로 재직 중이다. (ysong@kias.re.kr)

REFERENCES

- [1] Csaba Csaki, Nemanja Kaloper and John Terning, Phys. Rev. Lett. **88**, 161302 (2002).

최대 크기이고, 이 이상을 넘어가게 되면 눈에 보이는 구조물은 찾을 수가 없게 된다. 그런데 관측 우주론자들이 주목한 거대구조는 바로 이 은하단보다 더욱 큰, 눈에 보이지 않는 구조물을 의미한다.

이 거대크기 영역에 무엇이 있는지 알기 위해서는 간략하게 우주의 역사를 짚어 볼 필요가 있다. 우리는 우주가 균일하다고 교과서에서 배운다. 하지만 우리가 보는 세상은 결코 균일하지 않다. 은하처럼 질량이 집중되어 있는 곳이 있는 반면, 은하와 은하 사이의 공간처럼 텅 비어있는 곳도 있다. 균일하다고 가정한 이 우주공간에서 어떻게 비균일한 구조가 (요동 또는 섭동) 생성되는 것일까?

이것을 이해하기 위해서 우주론자들은 우주표준모형이라는 것을 제안했다. 태초에 빅뱅이라고 불리는 대폭발이 있을 후 우주가 서서히 식어가는 모형이다. 이 모형을 뒷받침해주는 증거는 폭발 후 380,000년 후에 우주의 전 공간으로 퍼져나간 우주배경복사(Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR)와 4억년 후부터 생겨나기 시작한 별이나 은하들의 분포 등이 될 수 있다. 우주배경복사 이전과 흔히 암흑시대라고 불리는 380,000년부터 4억 년 사이에는 아직 아무것도 관측된 바 없다. 특정시대의 사료가 없는 역사학자들처럼 우주론자들도 이론을 증명할 모든 자료를 확보한 것은 아니다. 하지만 우주가속팽창의 발견 이전에는 관측이 가능한 시간대에서 측정된 자료들은 모두 우주표준모형을 옹호하고 있었다.

우주거대구조의 역사

그렇다면 우주표준모형에서 설명하는 비균일구조의 기원은 무엇인가? 우주론자들은 질량이 같은 입자들이 팽창하는 격자에 놓여 있는 무한한 균일구조물을 제시한다. 우리가 이 균일한 격자의 한 곳에서 사방을 둘러보면 모든 방향으로 같은 질량 분포를 보게 될 것이다. 따라서 사방으로 작용하는 중력도 같게 되어, 그 어떤 방향으로도 쏠림이 생기지 않는다. 그런데 초기 격자에 작지만 비균일한 결함이 있었다고 가정해보자. 그렇다면 결함이 있는 곳에 위치한 입자는 특정방향으로 다소 다른 중력의 힘을 받아서 균일점을 벗어나 한쪽으로 움직이게 된다. 그 움직임이 진행할수록 질량의 비균일도가 증가하고 입자에 작용하는 지역적인 중력이 점차 증가한다. 그런 작용이 임계점을 넘어가게 되면 팽창하려는 힘보다도 지역적인 중력의 힘이 커지게 되어 팽창에서 분리되게 된다. 이렇게 임계점을 넘은 지역들이 시간이 지나면 은하 등이 생성되는 고밀도 지역으로 진화하는 것이다.

그림 1은 우주의 역사를 보여준다. 태초에 우주팽창의 기원이 된 빅뱅이 일어나고, 곧 우주가 급속히 팽창한다는 인플레이

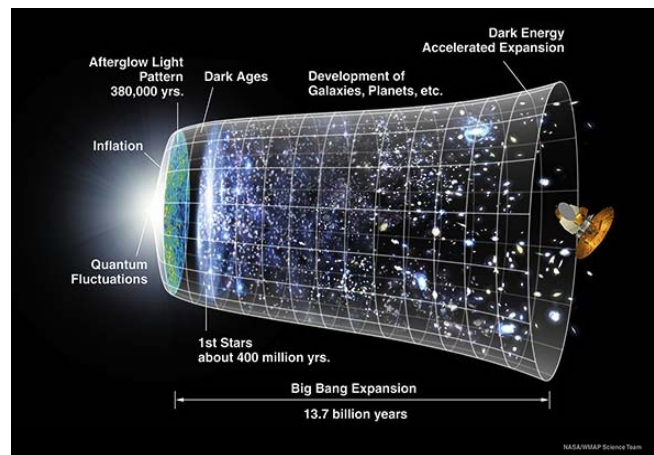


Fig. 1. History of the universe is presented from big bang to cosmic acceleration epoch. Image Credit: NASA, WMAP Science Team. [빅뱅부터 우주가속팽창기까지의 우주역사. Copyright-NASA, WMAP 과학부]

이션이 일어난다. 이 인플레이션은 우주가 균일하다는 가정과 공간적인 인과성이 일관되지 않는다는 점을 설명하기 위해서 도입되었다.^[2] 왜냐하면 현재 관측 가능한 우주가 과거에 인과적으로 연결되어 있지 않았다면, 서로 관계가 없던 두 지역이 현재에 균일한 밀도를 가지고 나타나는 것을 설명하기 어렵기 때문이다. 이 인플레이션 모형을 검증할 수 있는 증거자료를 확보했다고 보기는 어렵다. 하지만 이 가설은 우주표준모형이 가지고 있는 우주 균일성의 기원을 성공적으로 설명할 뿐만 아니라, 위에서 언급한 균일한 격자의 초기 결함의 기원도 만족스럽게 제시해준다. 이 인플레이션 기간 중에 발생한 격자의 결함이 다시 물리적인 작용이 발생할 때까지 보존되어 밀도 요동의 씨앗이 되는 것이다.

우주 대폭발 이후 380,000년경에는 물질에 묶여 있던 빛이 해방되어 자유로이 공간으로 퍼져나간다. 이 복사 에너지를 우주배경복사라고 부르는데, 그림 1을 보면 인플레이션에 의해서 만들어진 초기 요동의 결과를 볼 수 있다. 노란색으로 표시된 지역은 주변보다 온도가 높은 부분이고 파란색으로 표시된 지역은 주변보다 온도가 낮은 부분이다. 관측된 우주배경복사의 평균온도가 2.73 K 정도인데, 이 평균온도에서 벗어나는 비등방성은 대략 0.0001% 정도로 관측되었다. 이 값은 우주표준모형에서 예측한 이론값과 일치하는 것이다. 우주배경복사 지도에서 보이는 온도 요동의 존재는 우주 초기에 밀도 요동이 이미 존재하고 있었다는 것을 보여준다. 이런 밀도 요동이 시간이 지나면서 진화하여 우주의 거대 구조가 형성되었다.

REFERENCES

- [2] Alan H. Guth, Phys. Rev. D **23**, 347 (1981).

우주배경복사가 일어난 이후 4억 년까지 암흑의 시대가 전개된다. 마치 그리스 로마의 문명이 중단되고 중세의 암흑기가 도래한 것처럼, 텅 빈 공간만이 있는 듯하다. 하지만 사실은 380,000년경의 0.0001% 요동이 계속 성장하고 있는 과정이다. 단지 그 요동이 너무 작아서 팽창에서 분리되어 눈에 보이는 비선형적인 구조물을 만들고 있지 못할 뿐이다.

이제 대폭발 이후 4억 년이 지나면, 그림 1에서 볼 수 있듯이 초기 별들과 은하들이 생겨나기 시작한다. 우주의 평균 밀도가 드디어 임계점을 넘어 팽창에서 분리되는 지역이 생겨나기 시작하는 것이다. 하지만 현재까지도 은하단의 크기인 10 Mpc 이상에서는 여전히 이 눈에 보이지 않은 우주거대구조가 성장하고 있다. 이 우주거대구조가 가지고 있는 장점은 아직 비선형적인 작용을 받지 않아서 이론적으로 예측가능한 관측량이라는 것이다. 그렇기 때문에 우주를 설명하는 다양한 이론들을 검증할 수 있는 유용한 도구가 될 수 있다.

관측 우주론자들은 바로 이 우주거대구조에서 우주가속팽창의 효과를 볼 수 있다는 것을 알아냈다. 여러 가지 다양한 방법들이 있는데, 크게 초신성처럼 거리를 측정하는 방법과 구조자체에 미치는 우주가속팽창의 효과를 관측하는 방법으로 분류할 수 있다.

우주의 표준 자(Standard ruler)

우주거대구조에는 초신성과 같은 표준 광원은 없지만, 표준 자(Standard ruler)라고 불리는 관측대상을 찾을 수가 있다. 이 표준 자를 사용하여 거리를 재는 원리는 간단하다. 아주 기다란 고깔모자를 쓰고 있는 아이들을 생각해 보자. 아이들의 평균적인 머리 크기를 알고 있으면, 간단하게 고깔모자의 꼭지점의 각도를 재어서 이 고깔모자의 높이를 계산할 수 있을 것이다. 같은 원리로 이미 길이를 알고 있는 표준 자를 먼 거리에 놓고 표준 자가 보이는 각도를 측정하면 그 자가 놓여져 있는 곳까지의 거리를 알 수가 있다.

그렇다면 우주거대구조 속에 숨어있는 표준 자는 무엇일까? 앞의 글에서 우주의 비균일성을 설명할 때 이 비균일성이 갑자기 생겨난 것이 아니고 태초의 씨앗에서 시간을 두고 진화한 것이라고 설명했다. 바로 여기에 보물을 발견할 수 있는 지도가 있다. 편평했던 대지에 태초에 지각변동이 생겨서 커다란 봉우리들이 융기했다고 생각해 보자. 이때 융기된 봉우리들이 시간이 지나면 침식과 풍화의 과정을 거치면서 변하게 되겠지만, 기본적인 구조가 달라지지는 않을 것이다. 융기할 당시의 봉우리들간의 거리는 시간이 지나면서 침식이 진행되더라도 큰 차이가 없을 것이다. 이 봉우리들의 간격을 미리 알고 있다면 우리는 이 구조물로부터의 거리를 환산할 수 있다.

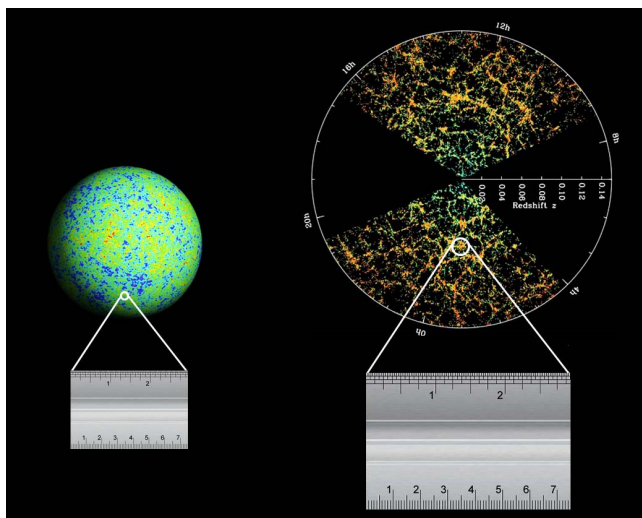


Fig. 2. A sketch for a standard ruler imprinted on the large scale structure formation is presented. The same baryon acoustic oscillation structure is observed on the CMBR maps (left side) and the distribution of SDSS galaxies (right side). Image Credit: NASA, WMAP Science Team and SDSS. [우주거대구조에서 찾을 수 있는 표준 자. 같은 우주구조를 우주배경복사(좌측)와 은하의 분포(우측)에서 볼 수 있다. Copyright-NASA, WMAP Science Team and SDSS.]

우주거대구조에서는 이 지각변동과 같은 현상이 380,000년 이전에 생겨나기 시작한다. 빛이 물질의 구속에서 해방되어 자유로이 복사되는 380,000년 이전에는 마치 용수철에 붙어있는 두 물체처럼 빛과 물질이 서로 엉켜있었다. 물질에는 두 가지 종류가 있는데 하나는 빛과 엉키지 않는 암흑물질이고 다른 하나는 우리들의 눈에 보이는 배리온이라고 하는 물질인데, 이 배리온이라는 물질이 빛과 하나로 묶여 있었다. 우선 암흑물질의 중력이 배리온을 끌어 당기는데, 너무 근접하게 되면 배리온에 묶여 있는 빛이 주는 압력이 커져서 다시 바깥으로 튕겨져 나가게 된다. 이러한 움직임이 반복되면서 거대구조에 봉우리와 계곡들을 만들게 되는 것이다. 이렇게 한 번 만들어진 봉우리들은 지각이 융기한 봉우리들처럼 시간이 흘러도 사라지지 않는다. 이런 현상을 배리온 음파 진동(BAO: Baryon Acoustic Oscillation)이라고 부른다.

먼저 우리가 할 일은 지질학자처럼 우주의 봉우리들이 융기할 당시에 남아있던 흔적을 찾는 것이다. 그림 2에서 왼쪽을 보면 우리가 발굴해야 할 유적이 보인다. 이 비치불처럼 생긴 작은 구는 WMAP^[3]이 관측한 미세한 온도 차이를 보여준다. 바로 이곳에서 반복되는 봉우리 같은 태초의 구조물들을 발견할 수 있다. 이 발굴 과정에서 알아낸 정보를 이용하여 고깔모자의 높이를 측정하는 것과 같은 작업을 우주공간에서 할 수 있는 것이다. 이제 표준 자의 크기를 알고 있으므로 특정지역의 은하 분포에서 이러한 구조를 다시 찾아낼 수 있다면, 우리는 은하들이 분포하고 있는 곳까지의 거리를 측정할 수 있다.^[4]

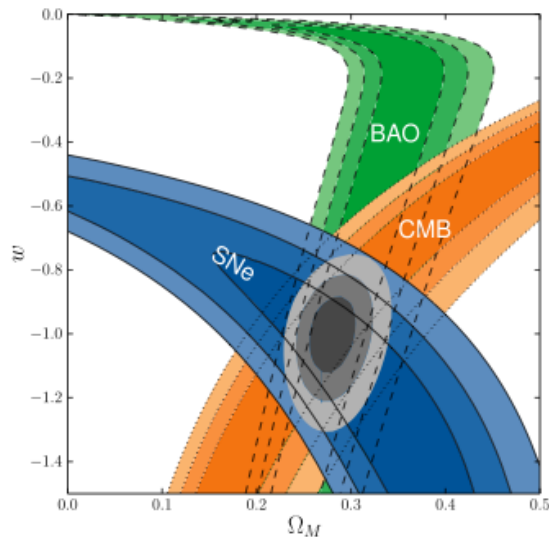


Fig. 3. Constraints on cosmic acceleration based on SN (Standard candle) and BAO (Standard ruler) are presented. Blue contours represent constraints using SN alone, green contours represent constraints using BAO, and grey contours represent constraints using both SN and BAO simultaneously. Image Credit, Percival *et al.*, 2009. [초신성(표준 광원)과 BAO(표준 자)를 이용한 우주가속팽창 검증. 파란색으로 칠해진 부분은 초신성을 이용한 결과이고, 초록색으로 칠해진 부분은 BAO를 이용한 결과이며, 회색으로 칠해진 부분은 두 관측을 모두 합해 놓은 결과이다. Copyright-Percival *et al.*, 2009]

그림 2의 오른쪽에는 최근에 슬로온 디지털 전천탐사(Sloan Digital Sky Survey: SDSS) 관측을 통하여 발견한 은하들의 분포가 있다. 우주론자들은 이 은하 분포에서 표준 자에 해당하는 구조를 찾아낼 수 있었다. 2009년 SDSS팀은 그 은하 분포에서 얻은 구조를 사용하여 배리온 음파 진동의 거리를 측정하는데 성공했다.^[5] 이 결과를 사용하면 우주가속팽창의 존재를 더 큰 신뢰도로 검증할 수 있게 된다. 초신성의 빛이 어둡게 보이는 관측결과를 설명할 수 있는 우주가속팽창 이외의 다른 이론으로는 왜 표준 자도 멀리 보이는지 설명하기 어렵게 되는 것이다. 현재는 우주가속팽창만이 두 가지 현상을 모두 일관성 있게 설명할 수 있는 유일한 이론이다.

표준 광원과 표준 자 모두를 이용한 검증

이러한 해석을 정량적으로 표현하기 위해서 우주론자들은 우주가속팽창을 나타내는 변수를 도입했다. 그림 3의 가로축은 질량을 가진 물체의 구성비를 표현하는 변수값이고, 세로축은 압력과 밀도 사이의 비례관계를 나타내는 w 변수이다 (압력= $w \times$ 밀도). 이 우주의 각 구성 성분들은 그 성질에 따라서 고유한 w 값을 갖는다. 질량을 가진 물질의 경우 압력과 관련된 열역학적 에너지보다 정지 질량에너지가 훨씬 크기 때문에 압력이 거의 영에 가깝다. 이 경우에는 쉽게 $w=0$

으로 이 물질의 성질을 표현할 수 있다는 것을 알게 된다. 그리고 질량이 거의 없는 빛과 같은 이상적인 상대성물질의 경우는 w 값이 $1/3$ 이다.

이 고유한 상수값은 각 물질의 밀도가 시간에 따라 어떻게 변하는지를 결정한다. 먼저 $w=0$ 인 질량이 있는 물질의 경우에는 간단하게 밀도는 3차원 부피에 반비례한다. 다음 $w=1/3$ 인 질량이 0에 가까운 상대성 물질의 경우에는 밀도는 부피^{4/3}에 반비례한다. 즉 w 값이 증가할수록 우주의 팽창에 따른 밀도의 변화가 크게 된다는 것을 알 수 있다.

우주가속팽창 변수 w 를 0보다 작은 값으로 줄여 나가면 밀도의 변화율이 감소하다가 w 가 -1 이 되는 순간에 밀도의 변화율이 사라지게 된다. 이것은 상당히 흥미있는 경우인데, 우주팽창에 의해서 부피가 증가해도 에너지의 밀도가 변하지 않는다는 것이다. 이것은 바로 우주상수의 정의와 일치한다. 따라서 우주상수를 통계적으로 다룰 때 $w=-1$ 로 표현하게 된다. 여기서 $w=-1$ 은 압력이 음수가 된다는 것인데, 물리적으로는 압력에 반대되는 장력으로 이해하면 될 것이다. 이 w 변수를 사용하면 우주가속팽창의 신뢰도를 쉽게 정량화할 수 있는 장점이 있다. w 값이 $-1/3$ 보다 크면 우주는 감속하게 된다. 예를 들어서 w 값이 0인 물체와 $1/3$ 인 빛이 우주를 가득 채우고 있는 경우에는 우주가 감속팽창한다. 그리고 w 값이 $-1/3$ 보다 작은 경우에는 우주가 가속팽창을 하게 된다.

그림 3에서 파란색으로 칠해진 부분이 최근에 허블우주망 원경으로 새로 관측한 초신성까지 포함해서 모두 557개의 초신성을 이용한 결과를 보여준다. 가장 안쪽에 있는 곡선은 통계적으로 65%의 신뢰도를, 중간에 있는 곡선은 95%의 신뢰도를, 그리고 가장 바깥쪽에 있는 곡선은 99%의 신뢰도를 의미한다. 여기서 가장 바깥에 있는 곡선과 우주가속의 분기점인 $w=-1/3$ 을 비교하면 이 그림이 무엇을 의미하는지 알 수 있을 것이다. 가장 바깥에 있는 파란 곡선도 이 우주가속팽창의 영역 안에 있다. 즉 99% 이상의 신뢰도를 가지고 우주가속팽창을 믿을 수 있다는 통계적인 해석이 가능하다.^[5]

이 w 변수를 이용하면 기존의 초신성에 의한 검증에 표준 자에 의한 검증을 더한 경우 우주가속팽창에 대한 통계적인 신뢰도가 증가한다는 것을 쉽게 설명할 수 있다. 그림 3에서

REFERENCES

- [3] WMAP Collaboration (D. N. Spergel *et al.*), *Astrophys. J. Suppl.* **170**, 377 (2007).
- [4] Hee-Jong Seo and Daniel J. Eisenstein, *Astrophys. J.* **598**, 720 (2003).
- [5] Beth A. Reid, Will J. Percival, Daniel J. Eisenstein, Licia Verde, David N. Spergel, Ramin A. Skibba, Neta A. Bahcall, Tamas Budavari, Masataka Fukugita, J. Richard Gott *et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **404**, 60 (2010).

초록색으로 칠해진 부분이 위에서 설명한 표준 자를 이용한 검증 결과다. 두 관측 결과를 모두 함께 고려하면 그림 3에서 회색으로 칠해진 결과를 얻게 된다. 이렇게 두 결과를 모두 포함한 결과와 우주가속팽창 분기점인 $w = -1/3$ 을 비교해 보면, 왜 초신성 이외의 다른 관측방법이 필요한지 이해할 수 있다. 그 정확도가 비교할 수 없을 정도로 증가하는 것이다. 표준 자에 의한 우주가속팽창의 검증은 초신성에 의한 우주가속팽창 발견의 신뢰도를 더 높여 준다. 다음 글에서 더 구체적으로 설명하겠지만, 이렇게 향상된 정밀도는 우리가 우주가속팽창을 원인을 규명하는 데 있어서 핵심적인 역할을 담당한다.

우주거대구조 속에 남아있는 제3의 증거

우주가 가속팽창되면서 은하들간의 거리가 더 멀어지게 된다는 쉬운 개념만으로 표준 광원이나 표준 자 관측의 결과를 이해할 수 있었다. 이 두 가지 방법을 사용해도 충분히 우주가 가속팽창된다는 사실을 검증할 수 있었지만, 관측 우주론자들은 여기에 만족하지 않았다. 그들은 거리를 측정하는 방법 이외의 것으로도 우주가속팽창의 결과를 확인하기를 원했던 것이다. 바로 이 과정에서 다음 글에서 상세하게 설명할 미래과제를 도출하는데, 이 글에서는 아직 관측되지 않은 것보다는 이미 관측된 자료를 중심으로 알아본다.

그림 1의 우주의 역사에서 380,000년경의 우주복사에너지 관측을 보면 각 지역의 미세한 온도 차이는 이미 이때 결정되고, 이 정보가 오른쪽에 위치한 망원경에 도달한다는 것을 알 수 있다. 그림 4에서 왼쪽에 있는 노란색 공이 380,000년경에 출발한 빛이라고 생각하자. 만약 관측자까지의 공간이 텅 비어 있다면 이 빛은 아무 변화 없이 있는 그대로 관측자에게 도착하겠지만 (오른쪽 상단에 있는 하얀색 공), 암흑시대 이후의 우주를 보면 복잡한 구조물들이 가득 차 있다는 것을 알 수 있다. 빛이 이런 구조물들을 통과할 때 어떤 변화를 일으키는 지 살펴보면 독특한 우주가속팽창의 효과를 볼 수가 있다.

크기에 따라서 여러 가지 구조물들이 있겠지만, 여기서는 아주 커다란 구조물을 살펴본다. 그림 4에서 보이는 것처럼 빛이 출발해서 도착할 때까지의 전 구간에 걸쳐 커다란 계곡과 같은 구조물이 있다고 가정하자. 우주가속팽창의 원인이 되는 중력감소 효과가 없다면 노란 공이 정상에서 계곡의 끝까지 여행한 후 다시 같은 높이의 정상까지 도착한 후 우리에게 관측될 것이다. 이 경우에 마찰력이 없다면 노란 공이 계곡까지 떨어지면서 얻은 에너지와 다시 경사면을 올라가면서 얻은 에너지 사이의 차이가 없으므로, 이 거대 구조물에 의한 효과와 이 구조물이 없을 때의 효과가 다르지 않을 것이다. 이것을 스펙트럼으로 표시하면, 그림 4에 정사각형 안

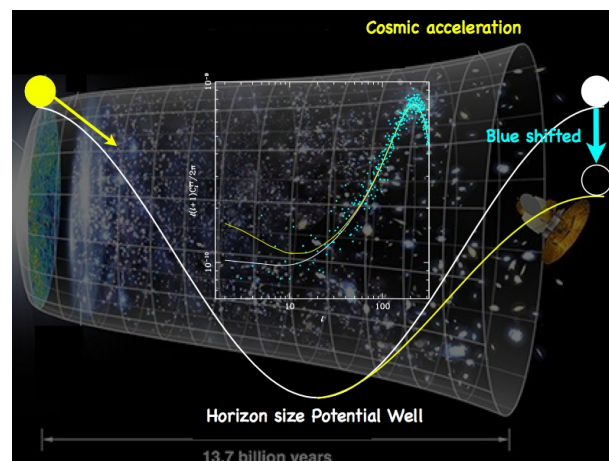


Fig. 4. A sketch for integrated Sachs Wolfe effect (ISW) is presented in the background of history of the universe. A yellow ball on the left side represents a photon left at the last scattering surface, and a white and a black balls on the right side represent photons arriving at the observer without dark energy or with dark energy cases, respectively. The correspondent CMBR anisotropy spectra are presented in the box. A white and a yellow curves represent spectra without dark energy or with dark energy cases, respectively. [우주역사를 보여주는 그림을 배경으로 누적 삭스-울프 효과의 원리를 설명하고 있다. 좌측에 있는 노란색 공은 우주배경복사가 시작되는 지점에 있고, 우측에 있는 하얀색 공은 우주가속팽창이 없었을 경우 관측되는 광자를 의미하며, 아래에 있는 검은색 공은 우주가속팽창이 있었을 경우에 관측되는 광자를 나타낸다. 이 두 가지 다른 경우에 관측되는 스펙트럼이 가운데 그려져 있다.]

에 그려진 하얀색 곡선이 우주가속팽창이 없는 경우에 우리가 기대할 수 있는 이론값이다. 이 그림에서 왼쪽으로 갈수록 더 큰 구조물에 의한 효과를 볼 수 있는데, 하얀색 곡선은 단순한 평행선만을 보여준다.

우주가속팽창이 있는 경우에는 결과가 달라진다. 다시 그림 4에 있는 거대 구조물로 돌아가서 노란 공이 정상에서 계곡까지 떨어질 때까지는 우주가속팽창이 일어나지 않으므로 위의 경우가 같다. 그런데 계곡에서 다시 경사면을 올라갈 때, 다른 상황이 발생하게 된다. 우주가 가속팽창하면서 중력감소 효과가 일어나게 되는 것이다. 노란공이 경사면을 올라오면서 가파른 경사면이 점차 완만해지게 되어, 노란 공이 정상에 올라왔을 때는 처음 시작했던 곳보다 낮은 곳에서 여행을 마칠 것이다 (오른쪽 노란색 경사면 상단에 위치한 검은색 공). 당연히 이 경우에는 얻은 에너지보다 잃은 에너지가 적어 망원경에 더 많은 에너지를 가진 것으로 관측된다(청색 이동).

이 효과를 스펙트럼을 통해서 보면, 그림 4에 있는 정사각형 안의 노란색 곡선의 좌측 날개가 올라가 있는 것으로 나타난다. 바로 빛이 우주거대구조를 통과하는 과정에서 얻은 에너지의 효과가 관측된 것이다. 따라서 우주가속이 없을 경우에 기대할 수 있는 하얀색 곡선에서 얼마나 많은 차이로

이 왼쪽날개가 올라가는가를 측정하면 우주가속팽창의 크기도 관측할 수 있게 된다. 파란색 점으로 표시된 것은 실제 우주배경복사 관측위성인 WMAP으로 관측한 결과인데, 하얀색 곡선보다는 노란색 곡선이 관측 결과와 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 여기서 노란색 곡선은 75%의 우주상수를 가정했을 때 얻을 수 있는 이론값이다.

이런 현상을 누적 삭스울프효과(Integrated Sachs Wolfe Effect)라고 하는데, 우주배경복사 관측만을 사용하면 우주가속팽창을 60–70% 정도의 신뢰도로 검증할 수 있다.^[3] 이것은 거대 구조물의 전체적인 효과만을 보았을 때이고, 정밀도를 증가시키기 위해서 거대 구조물의 단면을 볼 수도 있다. 노란 공이 여행하는 중간지점에서 은하들을 관측하고 이 은하들과 노란 공이 지나온 궤적의 상관관계를 이용하면 95%의 신뢰도로 우주가속팽창을 검증할 수 있다는 결론도 얻었다. 여기서 사용한 은하 분포는 그림 2에서 보여준 SDSS에서 관측된 은하들도 포함시킨 것이다.^[7]

비록 초신성이나 표준 자를 사용한 방법보다 그 정확성이 떨어지지만, ISW 효과를 이용한 재검증은 상당히 중요한 의미를 갖는다. 우주가속팽창의 효과가 거리측정 이외의 다른 방법으로도 확인되었다는 사실이다.

부정하기 힘들어진 우주가속팽창의 존재

1998년 술 펄머터, 브라이언 슈미트 그리고 아담 리스가 각각 50여 개의 초신성을 이용해서 우주가속팽창을 처음으로 발견한 이후 10여 년간, 관측 우주론자들은 발견된 사실을 검증하기 위해서 많은 노력을 기울여 왔다. 먼저 초신성 관측 팀은 보다 많은 초신성을 발견하여 통계적인 신뢰도를 향상시킬 수 있도록 노력했다. 그리고 이 글에서 살펴본 바와 같이 다른 관측 방법을 이용해서 검증할 수 있게끔 초신성 이외의 방법을 도입하려는 노력도 함께 기울여 왔다. 그러한 노력이 성공을 거두어 우주가속팽창의 존재를 확신할 수 있었고, 우주가속팽창의 원인을 규명하기 위한 미래과제를 정의하는 데 큰 역할을 하게 된다. 이 미래과제와 관련된 자세한 사항은 다음 글에서 다루도록 하고 여기서는 지금까지의 성과에 대해서만 논의한다.

우주거대구조를 통하여 우주가속팽창을 보기 위하여 2000년대 초반에 일련의 제안들이 나오게 된다. 이 중에서 가장 성공적이었던 관측은 슬로운 디지털 전천탐사였는데 2009년에 두 번째 시즌을 마칠 때에 비교적 먼 거리에 있는 은하분포를 1Gpc³의 부피에 걸쳐 관측했다. 이 글에서 보여준 결과는 모두 이 슬로운 디지털 전천탐사의 두 번째 시즌의 결과물들이다. 현재 슬로운 디지털 전천탐사는 세 번째 시즌에 들

어가서 더 먼 거리에서 더 넓은 영역에 걸쳐 은하의 분포를 측정하는 작업을 하고 있다. 내년에 첫 번째 자료를 공개할 예정이고 2015년경에 마무리할 계획을 가지고 있다.

그리고 이 글에서는 구체적으로 다루지 않았지만, 중력렌즈를 이용하여 우주가속팽창의 효과를 관측한 CFHTLS와 COSMOS도 각각 2008년과 2009년에 결과를 공개했다. 다른 관측법과는 달리 중력렌즈의 경우에는 관측이 상당히 힘들고 아직 어떤 보정항이 더 필요한지 알 수가 없으며 관측된 영역이 거대구조를 논하기에는 너무 작기 때문에 그 결과를 두고 신뢰성을 논의하기에는 다소 무리가 있다. 하지만 이 관측자료 역시 다른 관측 결과와 일관성있게 우주가속팽창을 지지한다는 것을 알 수 있었다. 앞으로 기술이 더 발전하게 되면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있다.

우주거대구조의 매력은 우주가속팽창의 효과를 다양하게 관측할 수 있다는 것이다. 초신성처럼 거리에 미치는 효과를 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 거대구조 자체에 미치는 효과를 이용할 수도 있다. 초신성만으로는 우주가속팽창의 존재를 확증하기는 어려웠을지도 모른다. 하지만 이렇게 전혀 다른 방법으로도 우주가속팽창이 확인된 이상, 이제는 더 이상 우주가속팽창이 존재한다는 사실을 부정하기는 어렵게 되었다. 2011년 노벨물리학상은 단순히 이 현상을 처음 발견한 세 사람의 우주론자에게 주어진 것이 아니라, 그 발견을 검증하기 위해서 노력한 수많은 우주론자들에게도 공동 수여된 것이다.

끝으로, 우주거대구조를 통하여 우주가속팽창을 연구한 의미를 정리하며 이 글을 마친다. 첫 번째는 초신성의 빛이 희미해지는 관측 이외의 것으로 우주가속팽창을 볼 필요가 있는 것이다. 그런 이유로 우주론자들은 표준 자를 사용하여 우주가속팽창을 검증하고, 또 거대구조에 남아있는 우주가속팽창의 흔적을 찾기도 했다. 두 번째는 서로 다른 방법을 사용하면 정확성을 높일 수가 있다. 바로 이러한 점이 다음 장에서 구체적으로 설명할 우주가속팽창 연구의 미래과제에 의미를 제시한다. 이제 2011년 노벨상의 수여와 함께 10여 년간 지속되고 있던 우주가속팽창의 존재여부에 대한 논쟁은 종지부를 찍었다고 보여진다. 바로 이 시점이 우주가속팽창 연구의 제 2기를 향해서 나아가는 출발점이라고 보아야 할 것이다. 이제 막 시작한 이 무한한 경쟁에서 우리 한국이 무엇을 할 수 있는가를 다음 글에 구체적으로 논의하기로 한다.

REFERENCES

- [6] Supernova Cosmology Project Collaboration (M. Kowalski (Humboldt U., Berlin) *et al.*), *Astrophys. J.* **686**, 749 (2008).
- [7] Tommaso Giannantonio, Ryan Scranton, Robert G. Crittenden, Robert C. Nichol, Stephen P. Boughn, Adam D. Myers and Gordon T. Richards, *Phys. Rev. D* **77**, 123520 (2008).