

우주 기원과 진화 문제에 해답을 준 COBE 프로젝트

박찬경 · 박창범

최근 미국 NASA의 존 매더(John Mather) 박사와 UC 버클리의 조지 스무트(George Smoot) 교수는 우주배경복사의 스펙트럼을 정밀하게 관측하고 배경복사의 미세한 온도변화를 발견하여 현대우주론 발전에 크게 기여한 공로로 2006년 노벨 물리학상 수상자로 선정되었다. 본 설명문에서는 우주의 기원과 진화 연구에 결정적 실마리를 제공한 우주배경복사가 무엇인지 알아보고, 이번 노벨 물리학상을 안겨준 코비(COBE) 프로젝트의 주요 결과와 최근 WMAP에 의한 우주배경복사 탐사의 결과를 요약하고자 한다.

현대우주론의 시작과 대폭발 우주모형

우주란 무엇이고 언제 어떻게 생겨났으며 어떤 모습을 하고 있을까? 우주는 유한할까, 무한할까? 이와 같은 근본적인 물음에 대한 답을 얻기 위해 인간은 오랜 세월동안 끊임없이 노력해왔다. 우주론은 과학적 사고와 관측 자료 분석을 통하여 우주의 생성과 진화에 관한 의문점을 풀어가는 과학의 한 분야이다.

현대우주론은 아인슈타인(Einstein)이 1915년 일반상대성 이론을 확립하고, 1917년 균일 등방한 정적인 우주모형을 제안하면서 시작되었다.^[1,2] 1920년대에 들어와 프리드만(Friedmann)은 우주의 팽창과 수축을 포함하는 더욱 일반적인 우주 진화식을 유도해 내었고,^[3] 로버트슨(Robertson)과 워커(Walker)는 프리드만 우주모형의 이론적 토대를 보완하여^[4] 현재 프리드만-로버트슨-워커(FRW) 우주모형으로 불리는 균일 등방한 우주에 관한 물리적 모형을 완성하였다. 1929년 허블(Hubble)은 외부은하의 후퇴속도와 거리의 비례관계($v = H_0 r$; 허블의 법칙)로부터 우주의 팽창을 발견하였는데,^[5] 이보다 앞서 르메

트르(Lemaitre)는 허블의 법칙을 이론적으로 유도하였을 뿐만 아니라 물질, 에너지가 한 점에 집중된 상태에서 우주가 생겨나 팽창해왔다는 내용의 대폭발 우주모형을 처음으로 생각해냈다.^[6] 허블의 우주팽창 발견은 대폭발 우주모형을 뒷받침하는 결정적인 증거로 생각되고 있다.

1948년 가모프(Gamow)는 뜨거운 대폭발로 우주가 생겨났다면 우주를 꽉 채우고 있는 열적평형상태의 강한 빛이 존재했을 것이며 그 빛의 흔적이 현재에는 절대온도 약 5도(K)의 차가운 흑체복사로 남아있을 것이라고 예측하였으나 큰 주목을 끌지 못하였다.^[7] 그 후 1965년 펜지아스(Penzias)와 윌슨(Wilson)은 고감도 전파검출기로 장거리통신 실험과 전파발생원 탐사를 하던 중 전파 잡음이 탐사 방향과 계절에 상관없이 일정하게 잡히는 현상을 우연히 발견하였는데,^[8] 당시 미국 프린스턴 대학의 디키(Dicke)도 과거 고밀도 고온도 상태였던 우주를 꽉 채우고 물질과 평형상태에 있던 빛이 현재에 차가운 흑체복사로 남아 있을 것이라 예측하고 이 신호를 검출하기 위한 실험을 준비 중이었다.^[9] 안테나온도 3.5 ± 1.0 K으로 측정된 이 미지의 신호는 대폭발 모형에서 그 존재가 예측되어 왔던 우주배경복사로 밝혀졌으며 그 공로로 펜지아

참고문헌

- [1] Einstein, A., Annalen der Physik **49** (1916); English translation in *The Principle of Relativity*, W. Perrett & G.B. Jeffery (Dover Publications, Inc., 1953).
- [2] Einstein, A., Sitzungsberichte der Preussischen Akad. d. Wiss., 142-152 (1917); English translation in *The Principle of Relativity*.
- [3] Friedmann, A., Zeitschrift fur Physik **10**, 377 (1922); Friedmann, A., Zeitschrift fur Physik **21**, 326 (1923); English translations in *Cosmological Constants: Papers in Modern Cosmology*, ed. J. Bernstein & G. Feinberg (Columbia University Press, 1986).
- [4] Robertson, H.P., Proceedings of the National Academy of Science **15**, 822-829 (1929); Reprinted in "Cosmological Constants: Papers in Modern Cosmology".
- [5] Hubble, E., Proceedings of the National Academy of Science **15**, 168 (1929); Reprinted in "Cosmological Constants: Papers in Modern Cosmology".
- [6] Lemaitre, G., MNRAS **91**, 483 (1931) (1927년 Annales de la Société Scientifique de Bruxelles에 실렸던 논문을 영어로 번역해 출판한 것); Lemaitre, G., Nature, May, 9 (1931).
- [7] Alpher, R.A., Bethe, H., & Gamow, G., Phys. Rev. **73**, 803 (1948).
- [8] Penzias, A.A., & Wilson, R.W., ApJ **142**, 419 (1965).
- [9] Dicke, R.H., Peebles, P.J.E., Roll, P.G., & Wilkinson, D.T., ApJ, **142**, 414 (1965).

저자약력

박찬경 박사는 2003년 서울대학교 지구환경과학부 천문학 전공으로 박사 학위를 받은 뒤, 2003년 9월부터 현재까지 고등과학원 물리학부 연구원으로 근무하고 있다. 연구 분야는 우주배경복사와 우주 특이속도장이다. (parko@kias.re.kr)

박창범 교수는 1991년 프린스턴 대학에서 천체물리학으로 박사학위를 받은 뒤, 캘리포니아 공과대학 연구원(1990-1992), 서울대학교 천문학과 교수(1992-2003)를 거쳐, 현재 고등과학원 물리학부 교수로 근무하고 있다. 연구 분야는 우주배경복사, 우주거대구조, 우주론적 수치모의실험 등이다. (cbp@kias.re.kr)

스와 윌슨은 1978년 노벨 물리학상을 받았다. 우주배경복사 발견으로 대폭발 우주론은 그 후 비약적으로 발전하였다.

그렇다면 대폭발 모형과 우주배경복사는 과연 무엇일까? 대부분의 과학자들은 우리우주가 약 137억 년 전 극도로 뜨거운 상태에서 대폭발과 급팽창을 겪으며 생겨났다고 생각하고 있다. 대폭발 우주모형에 따르면, 태초의 뜨거운 우주 속에는 빛, 전자, 양성자와 같은 수많은 기본 입자들이 서로 뒤섞여 충돌하며 열적평형상태를 유지하고 있었다. 열적평형상태의 빛은 플랑크의 흑체복사 스펙트럼을 갖는다고 알려져 있으며 흑체복사의 온도만 알면 특정 진동수에서 빛의 세기를 정확히 알아낼 수 있다. 이 흑체복사의 온도는 우주가 팽창함에 따라 내려가는데 이는 공기를 단열 팽창시키면 공기가 차가워지는 원리와 비슷하다.

우주의 나이가 38만 년 정도 되었을 때, 팽창하며 식어가던 우주의 온도(T)는 약 3000 K 정도로 내려갔고, 이온화돼 있던 수소와 헬륨 원자핵과 자유롭게 날아다니던 전자는 서로 달라붙게 돼 중성원자를 형성하였다.¹⁾ 빛과 술하게 충돌하던 전자가 급격히 사라져버리자 빛은 물질과 더 이상 부딪치지 않고 자유롭게 우주공간을 퍼져 나가기 시작하였는데, 이 시기를 빛의 분리시기(decoupling era) 또는 재결합시기(recombination era)라고 한다. 이 빛은 흑체복사의 스펙트럼 성질을 그대로 간직한 채 아직까지도 우주를 떠돌아다니며 식어가고 있다. 우주 전체에 균일하게 퍼져 있는 이 빛을 우주배경복사(宇宙背景輻射, cosmic microwave background radiation)라고 한다. 우주배경복사는 현재 2.73 K인 차가운 흑체복사로 존재하며, 대폭발에 의한 우주 기원설을 뒷받침하는 직접적인 증거로 생각되고 있다.

코비 프로젝트

1. 코비 위성

매더와 스무트는 코비(COBE, COsmic Background Explorer)²⁾라 불리는 우주배경복사 탐사 프로젝트를 성공으로 이끈 장본인이다. 이미 1970년대에 대폭발 이론을 검증할 목적으로 우주의 마이크로파 관측용 인공위성 프로젝트를 제안하였던 매더와 스무트는 1989년 코비 위성을 쏘아 올릴 때까지 관측 장비와 자료 분석법 개발 등에 많은 시간과 노력을 쏟았다. 우주배경복사 관측에서 인공위성이 지상관측 기기보다 유리한 이유는 우주에서 날아오는 수 cm 파장의 마이크로파는 지구 대기권 분자에 일부 흡수되어 정확한 관측을 어렵게 하기 때문이다.

코비 프로젝트는 1990년대 초 우주론 연구의 새로운 지평을

1) 재결합시기에 빛의 에너지는 대략 $kT \sim 0.26$ eV 정도로 수소원자의 이온화 에너지인 13.6 eV보다 훨씬 작지만 광자의 개수가 바리온보다 10^9 배나 많았다. 따라서 빛의 열적분포에서 고에너지 쪽 기여도가 상당히 컸으며 재결합시기 직전까지 3000 K 정도 온도라도 수소원자를 충분히 이온화시킬 수 있었다.

2) <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>



그림 1. 1989년 미국 나사가 발사한 코비(COBE) 위성의 모습. 코비 위성에는 우주배경복사의 스펙트럼을 잴 FIRAS, 전체 하늘에 걸쳐 우주배경복사 온도의 미세요동을 7° 해상도로 측정한 DMR, 우주의 큰·원적외선 복사의 세기를 잴 DIRBE, 세 관측 기제가 실려 있다.
(출처: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>)

열었다. 코비 위성에는 세 가지 관측 기제가 실려 있었다(그림 1). 우주배경복사 스펙트럼을 다양한 파장에서 측정할 수 있는 원적외선 분광측광기 FIRAS(Far Infrared Spectrophotometer),^[10] 우주배경복사 온도의 미세요동을 측정하는 마이크로파 차분복사계 DMR(Differential Microwave Radiometer),^[11] 우리우주의 퍼진 적외선 배경복사의 세기를 측정하는 적외선 배경복사 측정 실험 장치 DIRBE(Diffuse Infrared Background Experiment)^[12]가 그들이다. 코비 위성은 최대 4년 동안 하늘의 모든 방향에서 오는 배경복사의 스펙트럼과 온도를 빠짐없이 측정하였다.

2. 코비 위성의 관측 결과

현재 우주배경복사는 약 5 cm 파장에서 가장 세게 나타난다. FIRAS는 우주배경복사의 세기를 여러 파장(1~20 cm)에서 측정하였다. 매더 박사 팀은 우주배경복사의 세기를 플랑크의 흑체복사 스펙트럼 식과 비교하여 우주배경복사가 절대 온도 2.725 ± 0.002 K인 흑체복사의 스펙트럼을 정확히 따른다는 것을 밝혀냈다.^[10] 처음 9분 동안 관측된 자료를 바탕으로 얻어진 우주배경복사의 스펙트럼은 1990년 1월 미국 천문학회에서 발표되었으며 측정된 스펙트럼이 플랑크의 흑체복사 스펙트럼과 정확히 일치한다는 결과에 청중들은 환호하

참고문헌

- [10] Mather, J.C., *et al.*, *ApJ* **354**, L37 (1990).
- [11] Smoot, G.F., *et al.*, *ApJ* **396**, L1 (1992).
- [12] Hauser, M.G., *et al.*, *ApJ* **508**, 25 (1998).

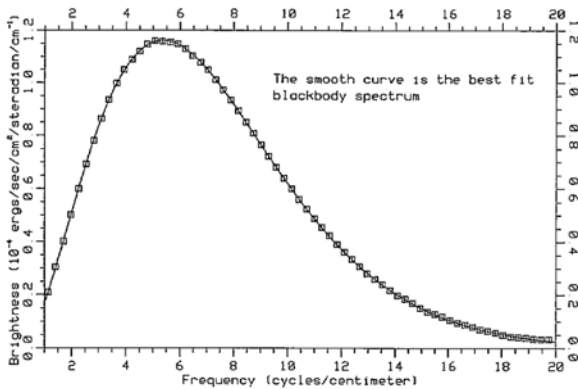


그림 2. FIRAS가 우리은하 좌표계의 북극 지역, 1~20 cm 파장 범위에서 처음 9분 동안 측정해 얻은 우주배경복사의 세기(사각형)와 절대온도 2.725 K 플랑크 흑체복사 스펙트럼 (곡선). (출처: [10])

며 기립 박수를 보냈다고 한다(그림 2).

우주거대구조, 은하단, 은하, 별, 태양계에 이르기까지 갖가지 규모의 우주 구조들은 모두 물질의 중력수축에 의하여 생겨났다. 만약 초기 우주의 물질분포가 균일하였다면 이들은 생성될 수 없으며, 중력수축에 의한 구조형성은 반드시 물질분포의 요동(fluctuation)이 존재해야만 가능하다. 과학자들은 우주거대구조의 씨앗이 존재하였을 것이라는 점과 우주배경복사가 빛의 분리시기 불균일한 물질분포에 대한 정보를 담고 있을 것이라는 점으로부터 우주배경복사의 온도는 하늘을 바라보는 방향에 따라 절대온도 2.73 K의 10만분의 1 정도 달라지는 미세한 온도 변화(수십 μK)를 지니고 있을 것으로 예측해 왔다.^[14] 이를 우주배경복사 온도의 비등방성(anisotropy)이라고 한다. 우주배경복사의 비등방성은 재결합 시기($t_0=38$ 만 년) 우주의 모습을 찍은 사진이자 우주 구조형성의 초기조건을 담고 있는 암호문이다.

DMR은 하늘의 두 방향에서 오는 복사세기의 차를 잴으로써 배경복사 온도의 미세요동을 측정하는 데 성공하였고, 스무트 교수팀은 1992년 우주배경복사 비등방성의 발견을 처음으로 학계에 보고하였다. 우주배경복사의 온도는 2.73 K으로 천구 상에 균일 등방하게 분포한다. 여기에서 우주배경복사의 평균 온도를 제거하면, 한쪽 방향에서는 온도가 상대적으로 높고(3.4 mK) 그 반대 방향에서는 온도가 낮은 쌍극자(dipole) 성분이 크게 나타난다. 이는 우주배경복사 장에 대한 태양계의 총체적 운동이 도플러효과를 발생시켜 생긴 것으로 우주배경복사 비등방성과는 무관하다. 이 쌍극자 성분을 제거하고 나면 우주배경복사의 온도요동이 얻어진다(20쪽 그림 5 참조). 그러나 우리은하의 중심과 나선팔에서 나오는 강한 방출선이 우주배경복사 온도요동을 크게 오염시켜 수평선 모양으로 큰 띠를 이루고 있다. 우주배경복사의 온도요동

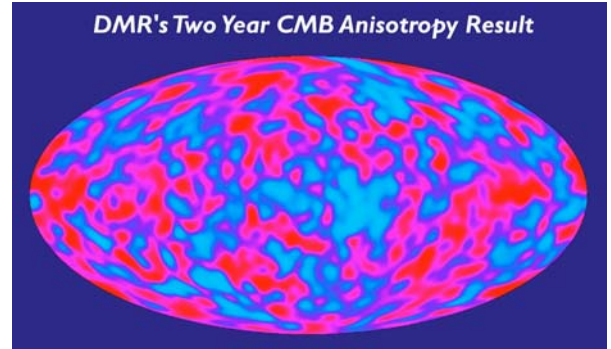


그림 3. DMR의 온도요동 지도에서 우리은하의 강한 방출선을 제거하여 우주배경복사 비등방성 성분만 보여주는 지도.

(출처: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe>)

표 1. COBE-DMR의 주요결과.^[13]

쌍극자 성분 (dipole, $l=1$)	$\Delta T = 3.358 \pm 0.024 \text{ mK}$ (l, b) = ($264.31^\circ \pm 0.16^\circ$, $48.05^\circ \pm 0.10^\circ$)
사극자 성분 (quadrupole, $l=2$)	$4 \mu\text{K} < Q_{\text{rms}} < 28 \mu\text{K}$ (95% 신뢰도) $Q_{\text{rms-PS}} = 15.3^{+3.8}_{-2.8} \mu\text{K}$ ($P(k) \propto k^n$, $n = 1.2 \pm 0.3$) $Q_{\text{rms-PS}} _{n=1} = 18 \pm 1.6 \mu\text{K}^{[3]}$

자료를 분석할 때에는 우리은하의 방출선 모형으로 강한 방출선의 효과를 줄인 뒤 고위도 지역의 자료만을 사용한다.

그림 3은 DMR의 여러 주파수 대 온도요동 자료를 조합하여 우리은하의 강한 방출선을 제거하고 우주배경복사 비등방성 성분만을 나타낸 것이다. 코비 위성이 발견한 우주 원시 요동의 통계적 특성은 급팽창 우주모형의 예측과 잘 맞고 있다. 코비가 7° 해상도(달 크기의 14배)로 얻어낸 배경복사 온도요동의 높이는 7°에서 90° 규모까지 거의 비슷하다. 한 가지 주목할 것은 배경복사 지도에서 1° 이상 떨어진 두 지점은 서로 인과적으로 신호를 주고받을 수 없는데도 큰 각 규모에서 온도요동의 높이가 비슷하다는 것이다. 이 현상은 우주가 생겨났을 때 섭동이 거의 균일한 요동이 급격한 팽창을 겪었고, 우리우주는 그러한 요동의 일부분이라고 해야만 설명이 가능하다. 1981년 구스(Guth)에 의해 처음 제안된 급팽창 우주모형은 DMR의 관측결과로 확고한 지지를 얻게 되었다.^[15]

표 1은 DMR이 4년 동안 관측한 자료에서 얻어낸 최종결과를 요약한 것이다. 배경복사 장에 대한 태양의 운동으로 유발된 쌍극자 온도요동의 크기와 방향, 7° 이상의 규모에서 측정된 사극자(quadrupole) 온도요동의 수준이 정리되어 있다.

코비 팀은 하늘의 모든 방향에서 오는 원적외선 복사의 세기를 측정한 DIRBE 자료를 분석하여 우주적외선배경복사

참고문헌

- [13] Bennett, C.L., *et al.*, *ApJ* **464**, L1 (1996).
- [14] Peebles, P.J.E., & Yu, J.T. *ApJ* **162**, 815 (1970).
- [15] Guth, A., *Physical Review D* **23**, 347-356 (1981).
- [16] Harrison, E.R., *Physical Review D* **1**, 2726 (1970).

3) $Q_{\text{rms-PS}}$ 는 거대규모 물질요동의 파워스펙트럼을 $P(k) \propto k^n$ 꼴로 가정했을 때 추정된 사극자 온도요동 파워스펙트럼이고, $Q_{\text{rms-PS}}|_{n=1}$ 는 $n=1$ 로 가정했을 때 얻어진 값이다. $n=1$ 인 파워스펙트럼을 Harrison-Zeldovich 파워스펙트럼이라고 하며 초기 파워스펙트럼이 규모에 상관없이 일정했음을 뜻한다(scale-invariant; [16])

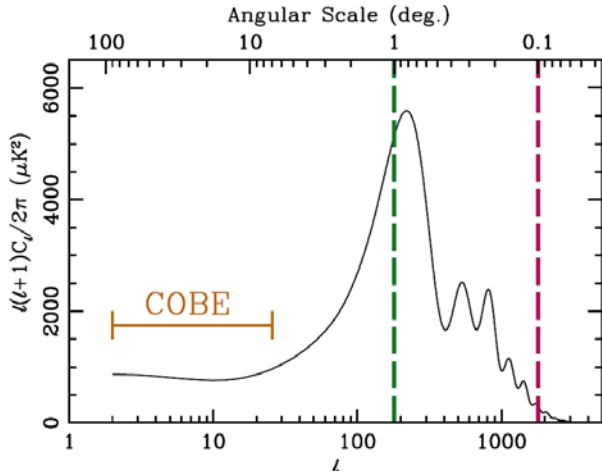


그림 4. 우주배경복사 온도요동의 파워스펙트럼. 평탄한 Λ CDM 우주모형을 가정하였다(표 2). 코비가 관측한 7° 이상의 규모는 갈색으로 표시되어 있다. 녹색, 붉은색 파선은 각각 1° 와 0.1° 규모를 나타낸다.

(cosmic infrared background)도 처음으로 검출하였다.^[12] 재결합 시기 이후 수억 년이 지나면 중성 수소와 헬륨의 중력수축에 의한 핵융합반응이 일어나 최초의 별과 은하들이 형성된다. 이 때 우주 공간으로 대량 방출된 강한 빛이 우주의 팽창으로 파장이 길어져 현재 원적외선 영역에서 관측된다. DIRBE가 검출한 우주적외선배경복사는 우주 초기에 형성된 별과 은하가 방출한 빛이 누적된 것으로 재결합 시기 이후 은하 형성에 관한 유용한 정보를 우리에게 주고 있다.

우주배경복사의 비등방성

1. 우주배경복사 비등방성을 통계적으로 표현하기

우주배경복사의 비등방성 현상을 과학적으로 분석하기 위해서는 비등방성에 관한 통계량을 수학적으로 기술할 필요가 있다. 단순한 급팽창 우주모형에 따르면, 우주배경복사의 온도요동과 같은 우주 원시요동은 정규성을 띤 무작위 장(Gaussian random fields)이 구현된 것이다. 정규성을 띤 무작위 장의 통계적 특성은 파워스펙트럼(power spectrum)으로 완전히 기술할 수 있다.

구면상의 온도요동 $\Delta T(\theta, \phi)$ 는 구면조화함수(spherical harmonics)로 다음과 같이 전개된다(θ 와 ϕ 는 구면좌표계의 좌표).

$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (1)$$

식 (1)은 복잡한 요동의 분포가 다양한 파장을 가진 파동들의 합으로 해석될 수 있음을 보여주고 있다. 이 때 l 은 구의 둘레를 l 등분한 값을 파장으로 갖는 파동 성분을 뜻하며, 각 l 에 부여된 m 은 파장 $180^\circ/l$ 인 파동의 개별 성분을 뜻한다

($-l \leq m \leq +l$). 즉, 배경복사 온도요동 지도에서 l 에 해당하는 파동은 $2l+1$ 개 성분으로 구성된다. 우주배경복사의 평균 온도 2.73 K는 $l=0$ 성분(평균), 그림 3에 나타난 쌍극자 요동은 $l=1$ 성분이다. 자료 분석에서는 보통 $l=0,1$ 성분을 제외하며 90° 보다 작은 파장 범위인 $l \geq 2$ 성분만 고려한다. a_{lm} 은 특정 l, m 성분 파동의 진폭으로 해석된다.

우주배경복사의 온도요동의 파워스펙트럼(angular power spectrum)은 온도요동을 구면조화함수로 전개하였을 때 얻어지는 계수 a_{lm} 의 통계적 분산으로 다음과 같이 정의된다.

$$C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l a_{lm} a_{lm}^* \quad (4)$$

즉, 파워스펙트럼 C_l 은 구면 상의 요동 중 파장이 $180^\circ/l$ 인 파동들의 진폭의 분산이며, C_l 의 값이 크면 배경복사 온도요동 중 l 성분의 온도 높낮이가 크다. 파워스펙트럼 그래프에서는 C_l 보다는 l 의 로그 구간 당 파워인 $l(l+1)C_l$ 이 더 많이 사용된다. 코비가 관측한 7° 이상 규모($l \leq 25$)의 우주배경복사 비등방성에서는 $l(l+1)C_l$ 값이 일정하다(그림 4).

2. 우주배경복사 비등방성의 물리

빛이 물질과 분리되기 이전, 빛과 바리온(보통물질)은 고온·고압 환경에서 빛-바리온 유체로 한 몸을 이루고 있었다. 이 때 빛은 주로 전자와 끊임없이 콤프턴산란(Compton scattering)을 하고 있었다. 당시 우주에는 불균일한 물질분포로 인한 중력포텐셜 요동이 존재하였고 빛-바리온 유체는 수축과 팽창을 반복하면서 다양한 파장의 음파(sound wave)를 형성하고 있었다. 재결합 시기가 되자 빛의 진행을 가로막던 전자는 중성 수소와 헬륨이 형성되면서 사라져버렸고 이후 빛은 자유롭게 여행을 떠나게 된다. 빛이 물질과 분리될 당시 물질의 요동과 운동 상태에 대한 정보는 우주배경복사 비등방성에 그대로 남아있다. 우리는 우주배경복사 온도요동의 파워스펙트럼으로부터 재결합시기 우주의 물리적 상태를 파악할 수 있다.

우주배경복사 온도요동 파워스펙트럼의 특징은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다(그림 4). 첫째는 1° 보다 큰 규모, 둘째는 1° 보다 작고 0.1° 보다 큰 규모, 셋째는 0.1° 보다 작은 규모이다. 1° 는 빛-바리온 유체 속의 음파가 대폭발 이후 재결합 시기까지 진행한 거리(음파의 지평선) 규모에 해당한다. 음파의 지평선(sound horizon) 크기는 빛 속도의 60% ($c/\sqrt{3}$) 속도를 가진 음파가 38만 년 동안 진행해 간 거리이다.

1° 보다 훨씬 큰 파장의 물질요동은 재결합시기 당시에는 서로 신호를 주고받지 못해 중력진화를 겪지 못했다. 이 초거대규모의 요동은 그 규모가 크든 작든 요동의 진폭이 거의 일정할 것

로 예상돼 왔다.⁴⁾ 이 영역을 Sachs-Wolfe 평지(plateau)라고^[17] 하며 코비 위성은 7° 해상도로 이 영역의 우주배경복사 비등방성을 관측하였다(그림 4). 이 영역의 배경복사 온도는, 밀도가 높은 곳에서는 빛이 깊은 중력포텐셜을 거슬러 올라올 때 에너지를 많이 잃으므로 상대적으로 낮아지고 밀도가 낮은 곳에서는 중력포텐셜이 낮아 에너지를 덜 잃으므로 높아진다(그림 3).

1°보다 작은 규모의 요동은 초거대규모 요동과 다른 물리적 상황에 놓여있다. 음파의 지평선 안쪽에서는 요동들이 서로 신호를 주고받을 수 있어 중력수축이 일어난다. 따라서 밀도가 높은 곳에는 물질이 모이고 밀도가 낮은 곳에서는 물질이 빠져나가는 상황이 발생한다. 한편 빛-바리온 유체가 중력수축에 의해 고밀도 지역으로 압축되면 빛의 복사압에 의한 반발력이 작용하여 유체의 중력수축을 멈추게 하고 반대로 팽창시킨다. 팽창하던 유체는 어느 시점에 이르면 중력에 끌려 팽창을 멈추고 다시 수축한다. 즉, 초기 우주에서 빛-바리온 유체는 가만히 있지 않고 중력과 복사압이 적절히 균형을 맞추며 수축 팽창하는 음파진동(acoustic oscillation)을 한다. 반면 암흑물질은 복사압이나 기체압의 영향을 받지 않으므로 음파진동을 하지 않고 중력수축만 한다.

피리를 불면 피리 길이의 두 배를 자연수로 나눈 값을 파장으로 갖는 음파들이 조화를 이루면서 소리를 낸다.^[18] 빛-바리온 유체 속에도 음파의 지평선 크기를 자연수로 나눈 값을 파장으로 갖는 파동들이 존재한다. 음파 지평선 크기를 파장으로 갖는 기본음파는 재결합시기 당시 암흑물질과 같은 방향으로 최대 수축 또는 팽창 상태에 있었다. 최대 수축(팽창) 지역은 빛-바리온 유체가 최대(최소) 밀집한 지역으로서 평균에 비하여 에너지가 높은 광자들이 상대적으로 많다(적다). 결과적으로 배경복사의 온도는 다른 지역에 비해 높아지거나 낮아져 1° 규모 요동의 진폭이 크게 증가하고, 이는 파워스펙트럼에서 첫째 봉우리를 형성한다(그림 4).

기본음파의 파장을 자연수로 나눈 값을 파장으로 갖는 단파장 음파들도 파워스펙트럼에서 일련의 봉우리를 형성한다. 암흑물질이 복사압의 영향을 받지 않고 계속 중력수축을 한 데 반해, 빛-바리온 유체의 단파장 음파들은 파장이 짧을수록 진동주기가 작아 재결합시기 이전에 수축과 팽창을 한 번 이상 거듭하였다. 따라서 암흑물질과 빛-바리온 유체가 재결합시기에 동시에 최대 수축(팽창) 상태에 놓이기 어려우며 빛-바리온 유체의 음파는 기본음파보다 상대적으로 낮은 진폭을 갖는다. 그 결과 파워스펙트럼의 둘째, 셋째 봉우리는 첫째 봉우리보다 낮게 나타난다. 봉우리들의 상대적인 높낮이는 우

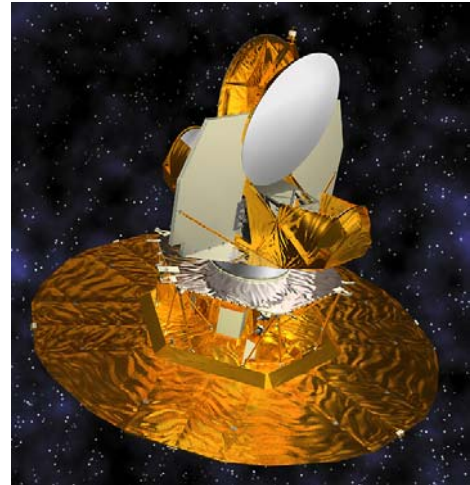


그림 5. 2001년 미국 NASA에 의해 우주 공간에 띄워진 WMAP 위성. (출처: <http://lambda.gsfc.nasa.gov>)

주의 암흑물질과 바리온의 양에 매우 민감하게 변화하기 때문에 우주모형을 검증하는 데에 매우 유용하다.

마지막으로 0.1°보다 작은 규모($l > 1800$)에서는 파워스펙트럼이 급격히 감소한다. 이는 재결합이 일어나는 시간 동안 작은 규모의 요동 정보를 담고 있는 빛이 전자와 산란하면서 정보를 잃어버리기 때문이다.

정밀우주론 시대: WMAP

코비 위성이 우주배경복사의 비등방성을 검출한 이후, 다양한 각 규모에서 배경복사의 온도요동을 측정하고자 많은 실험들이 행해졌다. 대표적인 실험에는 FIRS, Tenerife, MAX, QMAP, Saskatoon, CAT, OVRO 등이 있으며 주로 지상, 풍선 관측의 형태로 행해졌다. 1990년대 후반에 들어와 MAXIMA, Boomerang과 같이 풍선을 이용한 고감도, 고해상도 우주배경복사 실험이 행해져 파워스펙트럼의 정밀도가 획기적으로 개선되었으며, 2001년에는 미국 NASA에 의해 WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)⁵⁾ 위성이 쏘아 올려지면서 현대우주론은 정밀우주론의 시대로 접어들었다(그림 5; [19]).

코비의 뒤를 이어 발사된 WMAP은 우주배경복사의 온도요동을 23~94 GHz 주파수 영역에서 0.21° 고해상도로 더욱 정확히 관측하여 표준우주모형을 구성하는 우주론적 계수들(cosmological parameters)이 수 % 정밀도로 결정될 수 있도록 하는 등 우주론 연구에 획기적인 발전을 가져왔다.^[20,21]

참고문헌

- [17] Sachs, R.K., & Wolfe, A.M., *ApJ* **147**, 73-90 (1967).
- [18] Hu, W., & White, M. *Scientific American*, February (2004) (우주배경복사 온도요동에 관한 물리적 현상을 피리와 연관시켜 설명한 해설논문).
- [19] Bennett, C.L., *et al.*, *ApJS* **148**, 1 (2003).

4) 급팽창 이론에 따르면 우주가 생겨났을 당시 넓은 범위에 걸쳐 규모에 상관없이 일정한 수준의 단열적(adiabatic) 요동이 존재했다. 단열적 요동은 모든 종류의 밀도 요동 값의 부호가 서로 같은 성질을 지니고 있다($\delta\rho_i/\rho_i \propto \delta\rho_j/\rho_j$).

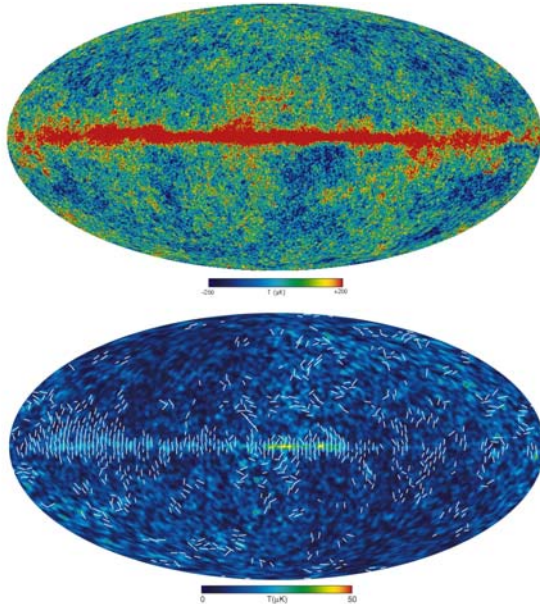


그림 6. WMAP이 관측하여 얻어낸 우주배경복사 온도요동(위)과 편광 세기(아래) 지도. 이 지도는 94 GHz 주파수 대에서 얻어졌으며 해상도는 0.21° 이다. WMAP의 온도요동 지도는 COBE/DMR이 얻은 것과 매우 유사하다. 편광 세기는 $P = (Q^2 + U^2)^{1/2}$ 로 정의된다. 이 때 Q , U 는 선형편광 성분을 표현하는 스토크스 계수(Stokes parameter)이다. 주변(자신 포함) 픽셀의 신호 대 잡음 비가 우수한 픽셀 위에는 막대가 그려져 있어 편광의 방향과 세기를 보여주고 있다. (출처: <http://lambda.gsfc.nasa.gov>)

그림 6은 WMAP 위성이 94 GHz 주파수 대에서 3년 동안 관측하여 얻어낸 우주배경복사의 온도요동(위)과 편광(아래) 지도이다. 재결합시기에 빛이 전자와 마지막으로 산란하면 전자 주변의 빛 분포 중 사극자(quadrupole) 성분에 의해 선형 편광 현상이 발생한다. 편광 현상은 배경복사 온도요동에 비해 인과적 연결 범위가 작아 1° 보다 훨씬 작은 규모에서 주로 발생하며 세기도 온도요동의 1~10% 수준이다.^[22] 그 이유는 재결합시기의 마지막 짧은 순간에 일어난 빛-전자 산란만이 편광에 기여하기 때문이다. 우주배경복사의 편광 현상은 DASI 실험에 의해 2002년 처음으로 검출되었다.^[23]

우주배경복사의 편광 현상은 재결합시기 이후에도 발생한다. 우주 나이가 약 4억 년 정도 되면 중성 수소와 헬륨의 중력수축으로 별과 은하가 최초로 생겨난다. 이 때 방출된 강한 빛은 수소를 전부 이온화시켜 우주공간에 자유전자를 대량 공급한다. 이를 우주의 재이온화(reionization)라고 한다. 재결합시기 이후 자유롭게 여행하던 빛은 이 전자와 다시 산란하여 편광을 일으킨다. 이 현상은 재결합시기에 비해 우리와 가까운 시기에 일어나기 때문에 수십 도 이상의 각 규모에서 관측된다. 한 가지 주목할 만한 것은 우주배경복사의 온도요동과 편광이 상관성(cross-correlation)을 지닌다는 것이다. 이는 편광의 세기와 방향이 전자 주변의 온도분포와 밀접한 관련이 있기 때문이다.

앞에서 이미 설명했듯이 구면 상의 복잡한 요동은 파장이 긴

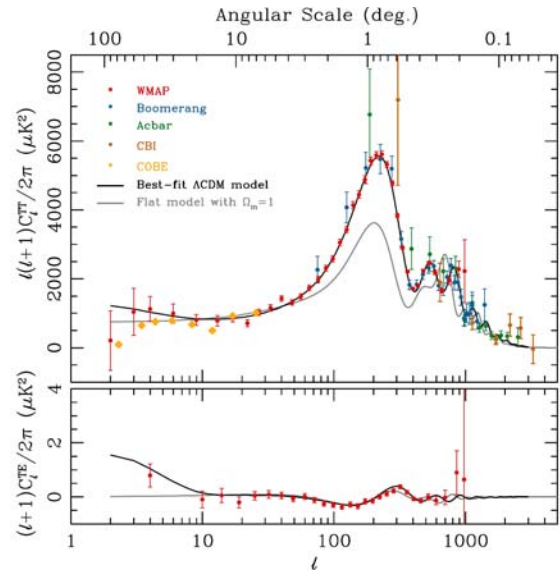


그림 7. 최근 WMAP 위성이 해상도 0.21° 로 3년 동안 관측해 얻은 자료에서 측정한 우주배경복사의 온도요동(위)과 온도-편광 상관성(아래)의 파워스펙트럼 (빨간색). 코비 위성은 7° 보다 큰 규모의 파장을 갖는 요동만을 관측했다(노란 다이아몬드). 그 외 Boomerang(파란색), Acbar(지상관측), CBI(지상 간섭계) 실험 결과를 각각 파란색, 녹색, 갈색으로 표시하였다. 굵고 검은 곡선은 암흑물질과 암흑에너지로 차있는 평탄한 Λ CDM 우주모형($\Omega_m = 0.24$, $\Omega_\Lambda = 0.76$)의 이론적 예측 곡선이다(표 2 참조). 회색 곡선은 암흑에너지가 없는 평탄한 CDM 우주모형($\Omega_m = 1$)의 이론적 예측 곡선으로 WMAP의 관측 결과와 잘 맞지 않음을 보여준다.

것부터 짧은 것까지 다양한 파동으로 분류해 낼 수 있으며, WMAP이 관측한 배경복사의 온도요동도 파장이 $90^\circ \sim 0.21^\circ$ 인 다양한 파동의 조합으로 기술할 수 있다. 그림 7은 WMAP의 3년 관측 자료로부터 측정한 우주배경복사 온도요동(위)과 온도-편광 상관성(아래) 파워스펙트럼이다(빨간색, [24]). 온도요동의 파워스펙트럼 그래프에는 코비 DMR 자료에서 얻은 파워스펙트럼(노란 다이아몬드; [25])과 최근 Boomerang(파란색; [26]), Acbar(녹색; [27]), CBI(갈색; [28]) 실험에서 얻은 결과들이 함께 표시되어 있다.

7° 규모 이상의 요동만 관측한 코비 위성의 결과는 매우 평탄한 파워스펙트럼을 보이는데 이는 급팽창 우주론에서 예측된 결과이다. 같은 영역에서 코비와 WMAP의 결과는 서로 일치한다. 20° 이상($l < 10$)의 규모에서 온도-편광 상관성 파워스펙트럼이 급격히 증가하는 것은 재이온화 시기에 일어난 배경복사의 편광 때문이다. 이 영역에서 파워스펙트럼의 높이와 위치는 재이온화의 세기와 시기에 대한 간접적인 정보를 준다.

참고문헌

- [20] Spergel, D.N., *et al.*, *ApJS* **148**, 175 (2003).
- [21] Spergel, D.N., *et al.*, *astro-ph/0603449* (2006).
- [22] Hu, W., *New Astronomy* **2**, 323 (1997).
- [23] Kovac, J.M., *et al.*, *Nature* **420**, 772 (2002).
- [24] Hinshaw, G., *et al.* (2006), *astro-ph/0603451*.
- [25] Tegmark, M., *ApJ* **464**, L35 (1996).
- [26] Jones, W.C., *et al.*, *ApJ* **647**, 823 (2006).
- [27] Kuo, C.L., *et al.*, *ApJ* **600**, 32 (2004).
- [28] Mason, B.S., *et al.*, *ApJ* **591**, 540 (2003).

5) <http://map.gsfc.nasa.gov>

표 2. WMAP 3년 자료를 분석해 얻은 우주론적 계수(평탄한 우주모형 가정^[21]).

우주론적 계수	기호	WMAP 측정값
허블 상수	h ($H_0 = 100h$ km/s/Mpc)	$0.734^{+0.028}_{-0.038}$
물질 밀도	Ω_m	$0.238^{+0.030}_{-0.041}$
바리온(보통물질) 밀도	$100\Omega_b h^2$	$2.233^{+0.072}_{-0.091}$
우주의 나이	t_0	$137.3^{+1.3}_{-1.7}$ 억 년
재이온화 광학적 깊이 ⁸⁾	τ	$0.088^{+0.028}_{-0.034}$
재이온화 시기 (적색이동)	z_r	$10.9^{+2.7}_{-2.3}$

WMAP 우주배경복사 온도요동의 파워스펙트럼에서 한 가지 중요한 특징은 $l = 220$ 가까이에 첫째 봉우리가 위치한다는 것이다. 파워스펙트럼에서 첫째 봉우리의 위치는 우주의 기하학적 구조와 밀접한 관련이 있다. 우주가 평탄하면 $l = 220$ 에, 닫혀 있으면 $l < 220$ 에, 열려 있으면 $l > 220$ 에 위치한다. 따라서 WMAP 파워스펙트럼의 첫째 봉우리 위치로부터 우리우주가 매우 평탄함을 알 수 있다.

WMAP과 다른 고해상도 실험의 결과에 따르면, 우주배경복사의 온도요동은 약 1° 규모에서 파워가 가장 세며 작은 규모로 갈수록 파워가 증감을 거듭하면서 낮아진다. WMAP은 1° 이하 규모에서 나타나는 우주배경복사 온도요동과 편광이 우주 초기에 존재한 단열적(adiabatic) 요동의 음파진동으로부터 생겨났다는 것을 정확히 밝혀냈으며,^[19,20] 이는 급팽창 우주모형을 지지하는 결정적인 증거로 생각되고 있다.

현대우주론의 주요 목표는 천문관측 자료와 가장 잘 맞는 우주모형을 만들고 그 우주모형을 규정짓는 우주론적 계수들을 정확하게 측정하는 것이다. 물질과 에너지 분포에 섭동을 가해 얻은 표준 FRW 우주모형에서 빛의 분포함수를 시간에 따라 진화시키면 특정 우주모형에서 예측되는 우주배경복사 온도요동과 편광의 파워스펙트럼을 이론적으로 구해낼 수 있다.^[29] 과학자들은 관측 자료에서 구한 파워스펙트럼을 표준우주모형에서 예측한 이론적인 파워스펙트럼(그림 7의 굵은 선)과 비교하여, 관측 자료를 가장 잘 맞추는 우주론적 계수들을 찾아낸다. 우주론적 계수들을 정확하게 측정하기 위해 우주배경복사 자료와 우주거대구조 자료를 함께 분석하는 경우가 많다.^[20,21] 예를 들어, 세계 최대 규모 우주거대구조 탐사 사업인 SDSS(Sloan Digital Sky Survey)⁶⁾는 약 1백만 개 외부은하의 밝기와 스펙트럼을 측정하여 은하들의 3차원 공간분포 지도를 작성하고 있으며 이는 우주물질요동의 파워스펙트럼을 측정하는 데 활용되고 있다.

표 2는 WMAP이 3년 동안 관측해 얻은 우주배경복사 자료에서 구해낸 FRW 모형의 주요 우주론적 계수들이다.^[21] WMAP

팀은, 우리우주가 공간적으로 평탄하며 나이는 137억 년이라는 것, 전체 에너지 중 바리온(보통물질)이 차지하는 비율은 겨우 4% 정도이고, 암흑에너지와 차가운 암흑물질(cold dark matter; CDM)이 각각 76%와 20%나 차지하고 있는 것을 밝혀내었다. 암흑에너지는 아인슈타인이 정적 우주모형에 도입하였던 우주상수 Λ 로 보통 표현되며, 중력의 반대 성질을 지니고 있어 현재 우리우주의 가속팽창에 대한 원인으로 생각되고 있다.⁷⁾ 우리우주를 가장 가깝게 기술하는 이 FRW 모형을 평탄한 Λ CDM 우주모형이라고 부른다.

WMAP의 온도요동 파워스펙트럼에서 사극자($l = 2$) 성분의 파워는 $211 \mu\text{K}^2$ 으로 Λ CDM 모형의 예측 값인 $1250 \mu\text{K}^2$ 보다 훨씬 작고,^[21,24] 사극자와 팔극자($l = 3$) 성분의 온도 높낮이는 우리 은하 평면과 같은 방향으로 분포하는 것으로 알려져 있다.^[30] 작은 l (큰 규모) 성분은 독립적인 파동 성분의 개수가 적고 우리은하의 강한 방출선에 의해 쉽게 왜곡되는 경향이 있어 파워스펙트럼이 정확하게 측정되기 어려운 곳이다. 현재 이와 같은 배경복사의 작은 l 성분의 특이현상에 대해 활발한 연구가 이뤄지고 있는 중이다.^[31]

WMAP이 관측한 우주배경복사 온도요동의 정규성(Gaussianity) 여부에 대한 논란도 뜨겁다. 단순한 급팽창 이론에 따르면 우주의 원시요동은 정규분포를 따른다고 하며, 그 동안 많은 연구를 통해서도 배경복사 비등방성은 0.5° – 10° 규모에서 정규분포를 따르는 것으로 알려져 왔다.^[32] WMAP 팀도 여러 가지 통계량들을 측정한 결과 WMAP이 측정한 배경복사 온도요동이 정규분포를 따른다고 밝혔다.^[33] 그러나 우주배경복사 온도요동이 정규분포에서 벗어난다는 보고들도 많다.^[34] 배경복사 온도요동의 비정규성(non-Gaussianity)의 원인에 대해서는 아직까지 명확히 밝혀진 바가 없으나, 검출된 비정규성이 우주론적인 기원을 가질 경우 급팽창 우주모형의 발전에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다.

우리는 현재 표준우주모형의 우주론적 계수를 정밀하게 측정할 수 있는 정밀우주론(precision cosmology) 시대에 살고 있다. 유럽 ESA에 의해 계획 중인 플랑크(Planck)⁹⁾ 프로젝트가 성공하면 우주론적 계수의 측정 정밀도가 더욱 높아질 전망이다. 2007년 발사 예정인 플랑크 위성은 30~857 GHz 주파수 영역에서 최대 $5'$ 해상도($l \approx 2200$)로 우주배경복사의 온도요동과 편광 현상을 관측할 예정이다.

참고문헌

- [29] Seljak, U., & Zaldarriaga, M., *ApJ* **469**, 437 (1996); Dodelson, S., *Modern Cosmology* (Academic Press, Amsterdam, 2003).
- [30] de Oliveira-Costa, A., Tegmark, M., Zaldarriaga, M., & Hamilton, A., *Phys. Rev. D* **69**, 063516 (2004).
- [31] Park, C.-G., Park, C., & Gott, J.R. (2006), astro-ph/0608129.
- [32] Colley, W.N., Gott, J.R., Park, C., *MNRAS* **281**, 82 (1996) (COBE, $\sim 10^\circ$); Park, C.-G., Park, C., Ratra, B., & Tegmark, M., *ApJ* **556**, 582 (QMASK, $\sim 1^\circ$) (2001).
- [33] Komatsu, E., *et al.*, *ApJS* **148**, 119 (2003).
- [34] Park, C.-G., *MNRAS* **349**, 313 (2004).

6) <http://www.sdss.org>.

7) 평탄한 우주의 경우(표 2), 우주 전체 에너지 중 암흑에너지가 차지하는 비율은 $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m$ 로 주어진다.

8) 재이온화의 세기를 전자에 의한 톰슨산란의 광학적 깊이(τ)로 표시하였다.

9) <http://www.rssd.esa.int/Planck>.