우주배경복사

Cosmic Microwave Background Radiation

J. Hwang
2006.10.30

현대 우주론 역사

중력 (Gravity):

1687 뉴톤 (Newton)
1915 아인슈타인 (Einstein)

우주론 (Cosmology):

1917 아인슈타인: 정적인 우주모형.
1922 프리드만 (Friedmann): 동적인 우주모형.
1929 허블 (Hubble): 우주 팽창 발견.
1965 펜지아스-윌슨 (Penzias-Wilson): 우주배경복사 발견.
1992 코비 (COBE) 위성:
우주배경복사 스펙트럼, 온도 비등방도 발견.
1997 수퍼노바를 이용해 최근 우주의 가속팽창 발견.

우주 거대구조

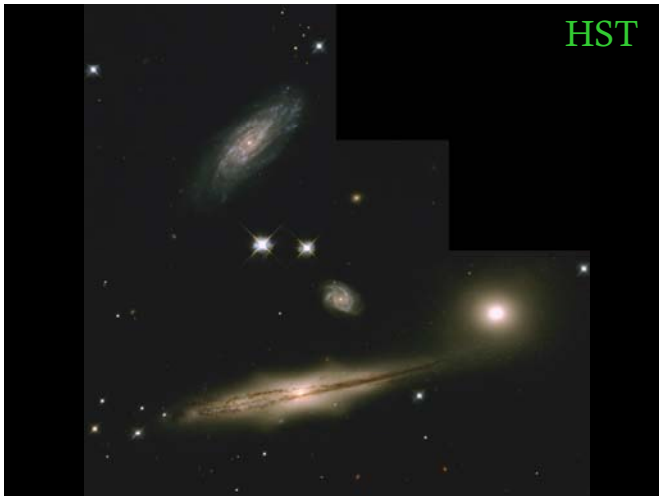
- 은하들은 수백만 광년 보다 큰 규모에서는 대략 균일하게 분포.
- 작은 규모의 구조는 균일한 분포에서 조금 벗어남.
- 더 작은 규모에는 비선형 구조.
- 은하들의 시선방향 운동이 우리로부터 거리에 비례하여 멀어짐: 허블법칙.
- 최근 (50억년쯤 전부터) 우주팽창속도가 가속함.

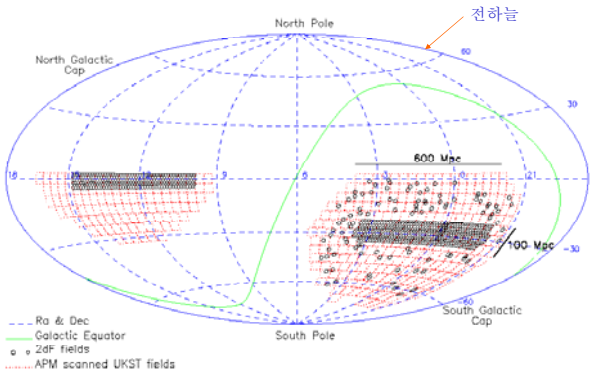
은하수 (우리은하)와 마젤란 은하들

안드로메다 은하, 넘보라 (자외선) 촬영

은하, 천억 개 정도 별의 집단

http://hubblesite.org/galle

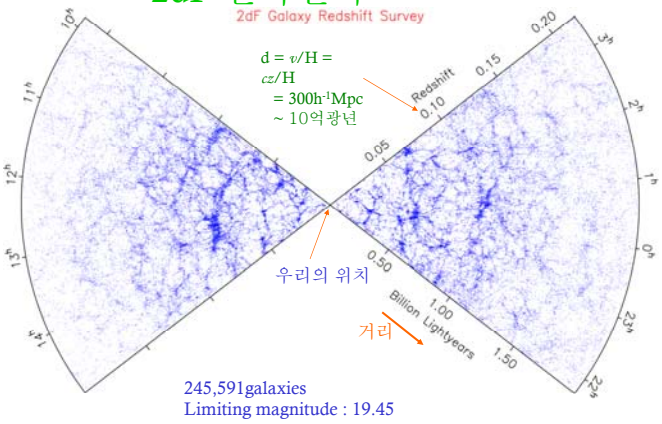




2dF 관측영역

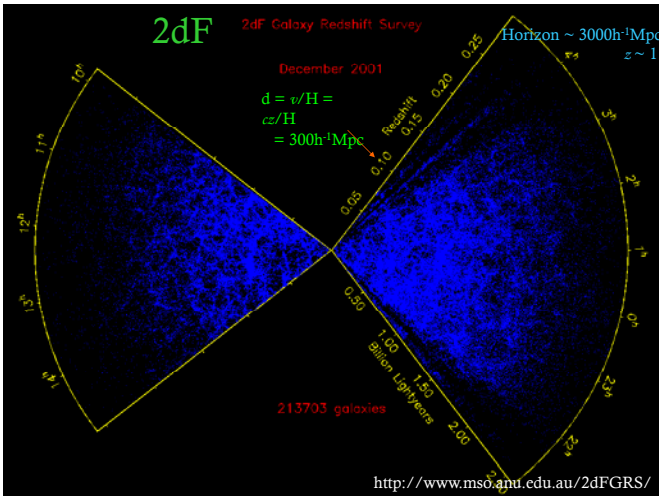
http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/

2dF 관측결과

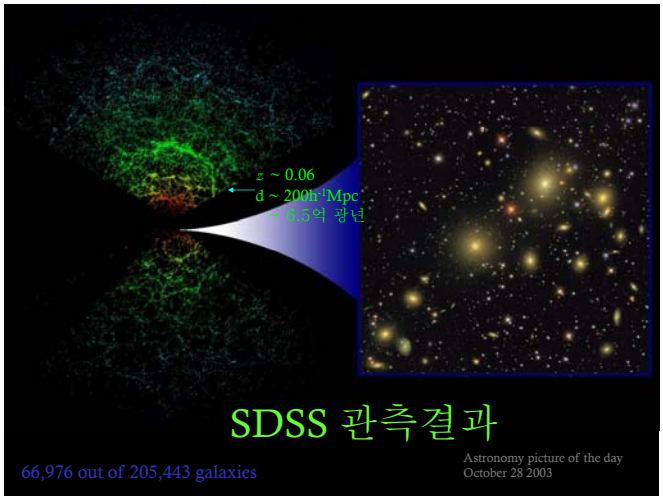


http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/

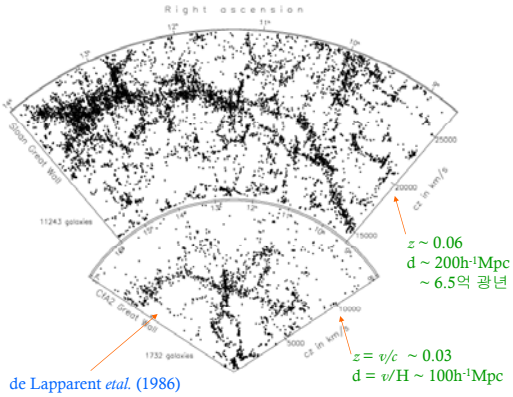
2dF



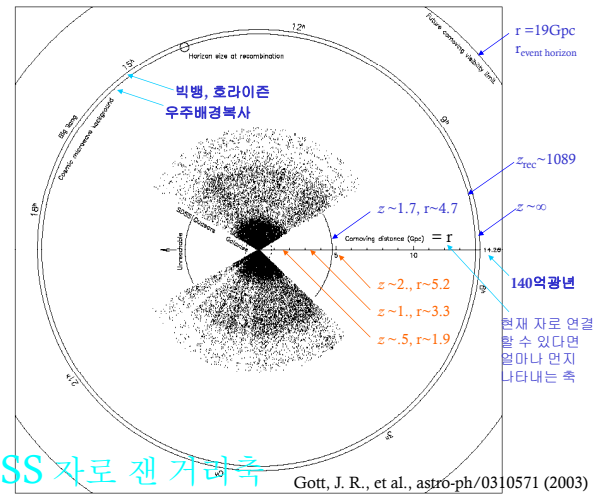
http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/



SDSS

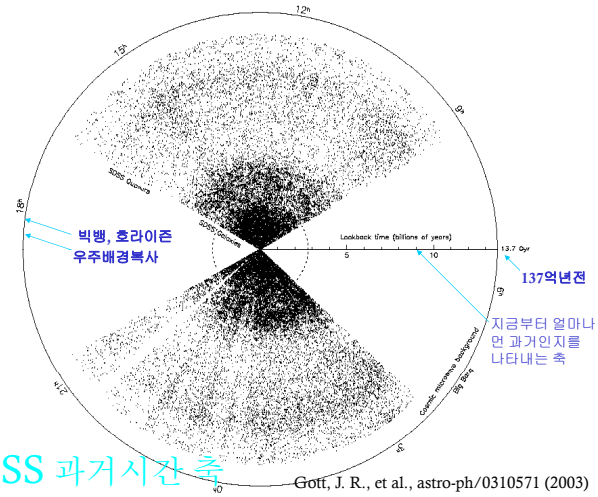


http://www.sdss.org/



SDSS 자로 잰 거리축

Gott, J. R., et al., astro-ph/0310571 (2003)



SDSS 과거시간 축

Gott, J. R., et al., astro-ph/0310571 (2003)

우주배경복사

- 1965년: 펜지아스와 윌슨이 우주배경복사를 우연히 발견.
  1978년, Penzias-Wilson 노벨 물리학상.
- 1990년: COBE 위성이 우주배경복사의 흑체 성질 발견.
- 1992년: COBE 위성이 우주배경복사의 온도 비등방도 발견.
  2006년, Mather-Smoot 노벨 물리학상.

윌슨 과
펜지아스

A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE
AT 4080 Mc/s

Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5° K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and

A. A. Penzias
R. W. Wilson

May 13, 1965
Bell Telephone Laboratories, Inc
Crawford Hill, Holmdel, New Jersey

발견 전의 상황

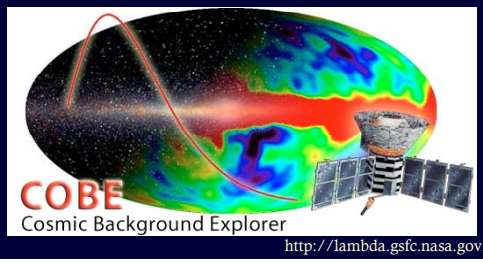
- 1948년, Alpher-Herman: He합성으로부터 5K 배경복사 예측.
- 1961년, Ohm (Bell Lab): 3K로도 해석 가능한 잡음 보고.
- 1963년, Doroshkevich-Novikov: Gamov 이론에서 1-10K 예측.
  막상 인용된 Gamov의 논문에는 이에 대한 언급이 없고,
  Ohm의 보고서를 잘못 해석하여, 복사가 없다는 결론을 내림.
- 1964년, Penzias-Wilson (Bell Lab): Ohm이 사용한 통신위성용 전파 (마이크로파) 망원경으로 전파천문학을 연구 하기 위해 Ohm이 보고한 잡음을 제거하려는 노력을 1년 이상 시도함.
- 같은 시간, 60km 떨어진 프린스톤 대학의 Dicke-Peebles-Roll-Wilkinson: 앞선 연구를 모른 체, 10K를 예측하고 발견준비.
- 1941년, McKeller: 별 사이 구름 CN선에서 2.3K 배경복사 발견.
  1950년, Herzberg의 교과서에도 언급될 정도로 잘 알려짐.

발견의 영향

- 정상우주론에 대한 빅뱅우주론의 승리.
- 뜨거운 초기우주의 증거.
  ⟶ 초기우주에 대한 연구가 많아짐.
- 스펙트럼은?
  ⟶ 초기우주의 특성.
- 비등방도는?
  ⟶ 초기우주 당시에 있던 우주구조의 특성.
- 1968년 우주배경복사에 우주구조 때문에 생긴 비등방도가 있을 것으로 예측됨.
  이론은 처음에는 10^{-3} 수준일 것으로 예측 되었고 그 후 20여 년간 이론과 관측의 추격과 경쟁이 진행됨.
- 마이크로파는 지구대기에 다소 불투명하여 정밀한 측정을 위해서는 인공위성 관측이 필요함.

COBE 인공위성

- 2000여명의 과학자와 기술자가 관련된 거대 프로젝트.
- 스펙트럼은?
  ⟶ 거의 완벽한 흑체로 밝혀짐.
- 비등방도는?
  ⟶ 결국 10^{-5} 수준에서 발견됨.

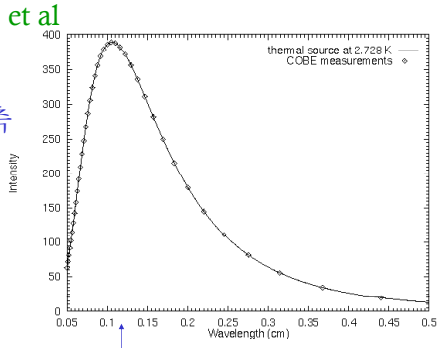


http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/co

우주배경복사 스펙트럼

Mather, et al (1990)

9분 관측



마이크로파

COBE (1990)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 354:L37–L40, 1990 May 10
© 1990. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

A PRELIMINARY MEASUREMENT OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND SPECTRUM BY THE *COSMIC BACKGROUND EXPLORER* (*COBE*)[1] SATELLITE

J. C. MATHER,[2] E. S. CHENG,[2] R. E. EPLEE, JR.,[3] R. B. ISAACMAN,[3] S. S. MEYER,[4] R. A. SHAFER,[2] R. WEISS,[4] E. L. WRIGHT,[5] C. L. BENNETT, N. W. BOGGESS,[2] E. DWEK,[2] S. GULKIS,[6] M. G. HAUSER,[2] M. JANSSEN,[6] T. KELSALL,[2] P. M. LUBIN,[7] S. H. MOSELEY, JR.,[2] T. L. MURDOCK,[8] R. F. SILVERBERG,[2] G. F. SMOOT,[9] AND D. T. WILKINSON[10]

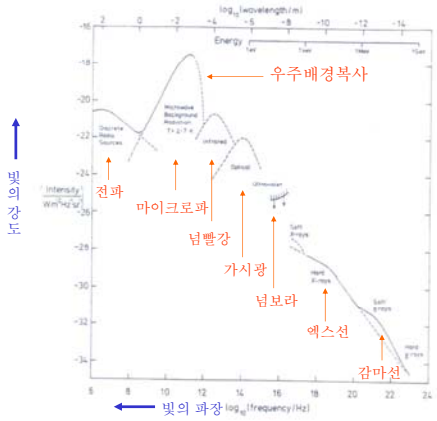
Received 1990 January 16; accepted 1990 February 19

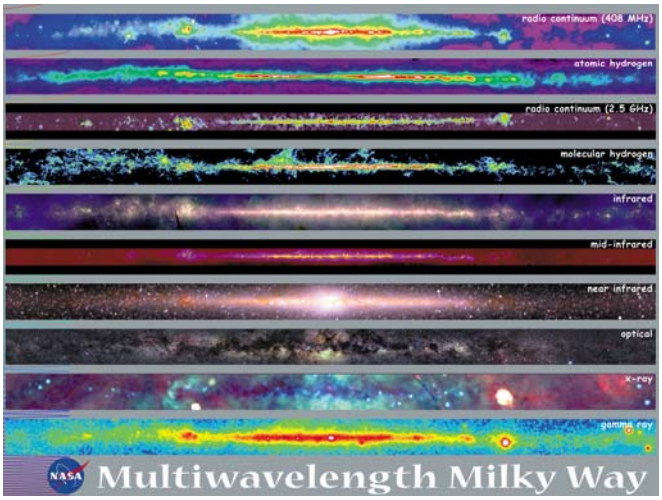
ABSTRACT

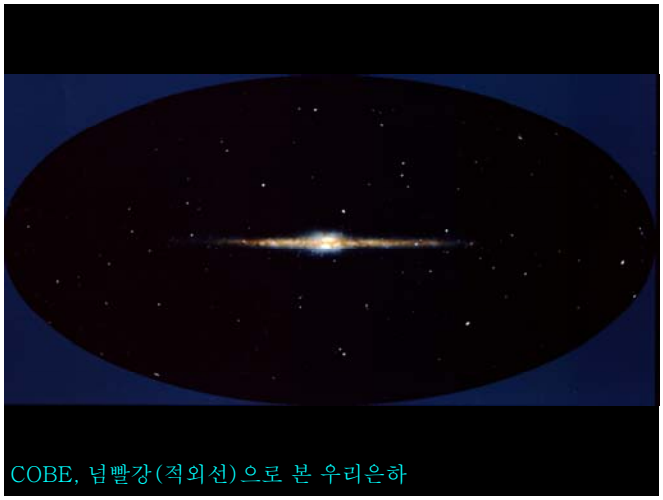
We present a preliminary spectrum of the background radiation between 1 and 20 cm^{-1} (1 cm to 0.5 mm wavelength) from regions near the north Galactic pole, as observed by the FIRAS instrument on the *COBE* satellite. The spectral resolution is 1 cm^{-1}. The spectrum is well fitted by a blackbody with a temperature of 2.735 ± 0.06 K, and the deviation from a blackbody is less than 1% of the peak intensity over the range 1–20 cm^{-1}. These new data show no evidence for the submillimeter excess previously reported by Matsumoto *et al.* in 1988 in the cosmic microwave background. Further analysis and additional data are expected to improve the sensitivity to deviations from a blackbody spectrum by an order of magnitude.

Subject heading: cosmic background radiation

평균한 빛의 전체 스펙트럼





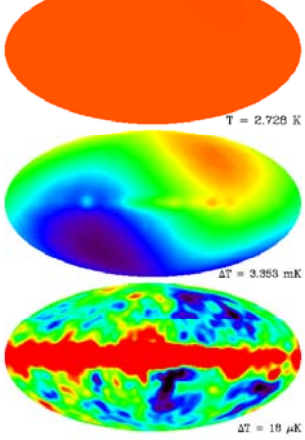


COBE, 넘빨강(적외선)으로 본 우리은하

우주배경복사 온도 비등방도

Smoot, et al (1992)

2년 관측



마이크로파

등방
2.725 K

Dipole
$\delta T/T \sim 10^{-3}$ 수준

Multipole
$\delta T/T \sim 10^{-5}$ 수준

COBE (1992)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 396:L1–L5, 1992 September 1
© 1992. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

STRUCTURE IN THE *COBE*[1] DIFFERENTIAL MICROWAVE RADIOMETER FIRST-YEAR MAPS

G. F. SMOOT,[2] C. L. BENNETT,[3] A. KOGUT,[4] E. L. WRIGHT,[5] J. AYMON,[2] N. W. BOGGESS,[3] E. S. CHENG,[3] G. DE AMICI,[2] S. GULKIS,[6] M. G. HAUSER,[3] G. HINSHAW,[4] P. D. JACKSON,[3] M. JANSSEN,[6] E. KAITA,[7] T. KELSALL,[3] P. KEEGSTRA,[7] C. LINEWEAVER,[2] K. LOEWENSTEIN,[7] P. LUBIN,[8] J. MATHER,[2] S. S. MEYER,[9] S. H. MOSELEY,[3] T. MURDOCK,[10] L. ROKKE,[7] R. F. SILVERBERG,[3] L. TENORIO,[2] R. WEISS,[9] AND D. T. WILKINSON[11]

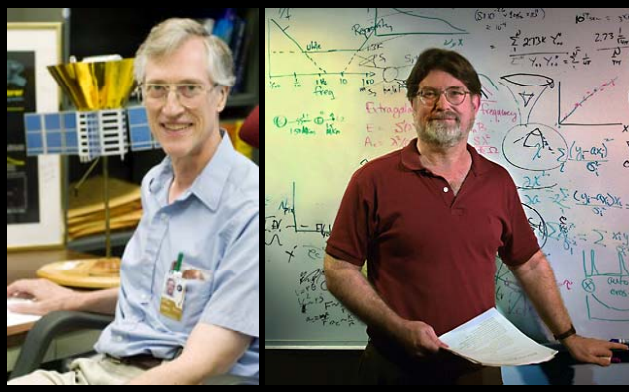
Received 1992 April 21; accepted 1992 June 12

ABSTRACT

The first year of data from the Differential Microwave Radiometers (DMR) on the *Cosmic Background Explorer* (*COBE*) show statistically significant (> 7 σ) structure that is well described as scale-invariant fluctuations with a Gaussian distribution. The major portion of the observed structure cannot be attributed to known systematic errors in the instrument, artifacts generated in the data processing, or known Galactic emission. The structure is consistent with a thermal spectrum at 31, 53, and 90 GHz as expected for cosmic microwave background anisotropy.

The rms sky variation, smoothed to a total 10° FWHM Gaussian, is 30 ± 5 μK ($\Delta T/T = 11 \times 10^{-6}$) for Galactic latitude $|b| > 20°$ data with the dipole anisotropy removed. The rms cosmic quadrupole amplitude is 13 ± 4 μK ($\Delta T/T \approx 5 \times 10^{-6}$). The angular autocorrelation of the signal in each radiometer channel and cross-correlation between channels are consistent and give a primordial fluctuation power-law spectrum with index $n = 1.1 \pm 0.5$, and an rms-quadrupole-normalized amplitude of 16 ± 4 μK ($\Delta T/T \approx 6 \times 10^{-6}$). These features are in accord with the Harrison-Zel'dovich (scale-invariant, $n = 1$) spectrum predicted by models of inflationary cosmology. The low overall fluctuation amplitude is consistent with theoretical predictions of the minimal level gravitational potential variations that would give rise to the observed present day structure.

Subject headings: cosmic microwave background — cosmology: observations

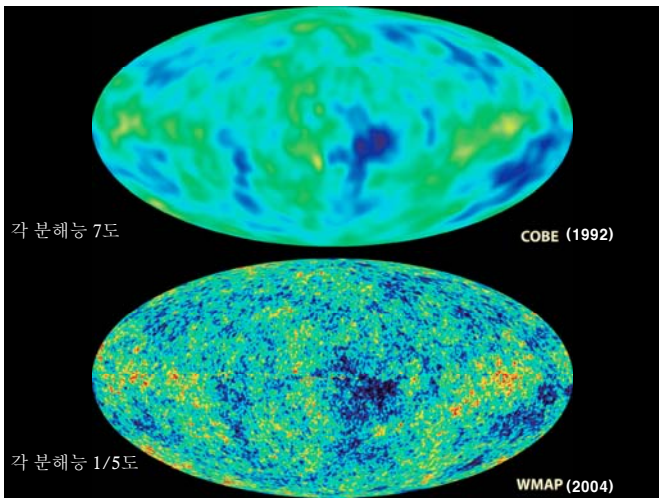


John Mather George Smoot

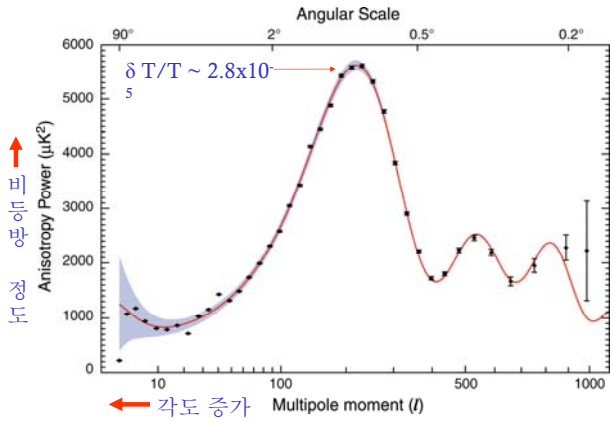
COBE의 발견

- 온도가 2.725K인 거의 완벽한 흑체 (black-body):
  ⟶ 뜨거운 초기우주가 열 평형상태임을 알려줌.
- 천분의 1도 정도에서 이중(dipole) 온도 비등방성:
  ⟶ 아마도 우리의 움직임 때문에 생긴 것임.
- 십만분의 1도 정도에서 다중 (multipole) 온도 비등방성:
  ⟶ 당시 우주구조의 상태를 알려줌.
  빛이 출발할 당시 (우주의 나이가 38만년 정도로 추정) 우주구조로 자라날 흔적.

그 후의 발전



WMAP -2006 온도 비등방도

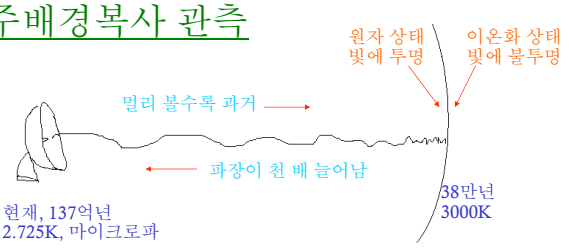


우주배경복사

- 온도가 2.725K인 거의 완벽한 흑체.
- 1cm^{3}에 400개 정도의 광자.
- TV 잡음의 1%.
- 천분의 1도 정도에서 이중 온도 비등방성.
- 십만분의 1도 정도에서 다중 온도 비등방성.

- 현대 우주론에 따르면, 우주배경복사는 우주의 규모가 지금보다 천 배 작고,
  온도는 지금의 천 배 높은 3000K,
  우주의 나이가 38만년일 때를 보여주는 것으로 해석.

우주배경복사 관측



해 관측

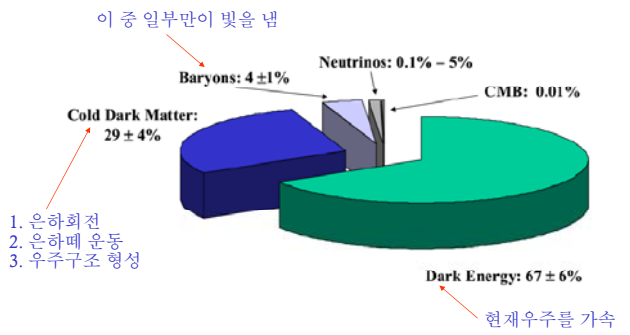
우주를 구성하는 물질

- 빛을 내는 최소한의 원자를 구성하는 물질: ~ 1% 이내.
- 원자의 총량: ~ 1-4%.

- 은하의 회전과 은하떼의 운동에서 추정한, 중력은 있지만 빛을 내지 않고 있는 물질, 암흑물질 (dark matter): ~ 20-30%.

- 최근 우주를 가속시키고 있는, 미는 중력을 내는 가상의 에너지, 암흑에너지 (dark energy): ~ 70%.

우주를 구성하는 물질



Freeman and Turner, astro-ph/0308418 (2003)

전망

- 우주배경복사와 우주구조 관측으로 우주론의 정밀화 진행:
  ⟶ 팽창율, 나이, 공간곡률, 물질의 구성과 양,
  과거와 미래의 진화.

- 암흑물질, 암흑에너지의 정체는?

- 우주의 미래는?
- 우주의 시작은?
- 우주의 경계는?

- 우주에서 인간의 위치는?
- 우주존재의 목적, 의미는?

추천 문헌 (번역):

- 와인버그 "처음 삼분간" (1977).
- 스무트 "우주의 역사" (1993).