2011년 노벨물리학상: 슈퍼스타와 우주 가속팽창의 발견

DOI: 10.3938/PhiT.20.054

이 명 균

Physics Nobel Prize in 2011: Superstars and Discovery of an Accelerating Universe

Myung Gyoon LEE

I present a review of the history and the background of observational cosmology involving supernovae that led to the Physics Nobel Prize in 2011. Type Ia supernovae, when properly used, are a powerful tool for studying the dynamical history of the universe. Two supernova research teams found around 1998 that distant supernovae at several gyalight-years are about 30 percent fainter than expected for a non-accelerating universe, indicating that the universe is accelerating now. Discovery of the accelerating universe gave birth to the concept of dark energy, becoming one of the most remarkable breakthroughs in modern cosmology. Three astronomers who worked with supernovae (the superstar of superstars) became superstars in 2011, winning the Noble Prize.

발견은 언제나 신나고 즐거운 일이다. 그러나 발견은 어렵다. 발견을 하기 위해서는 새로운 생각이 필요하다. 새로운 생각으로 발견을 즐기던 미국과 호주에 있는 세 명의 천문학자가 2011년 노벨물리학상을 받았다. 미국 버클리 캘리포니아 주립대학교의 솔 펄머터(Saul Perlmutter) 교수(52세)가 상금의 반을, 그리고 호주국립대학교의 브라이언 슈미트 교수

(44세)와 미국 존스홉킨스대학교의 애덤 리스 교수(42세)가 나머지 상금의 반을 받았다. 이들은 슈퍼스타를 연구하다가 슈퍼스타가 되었다. 별 중에 슈퍼스타는 초신성이다. 아무것도 보이지 않던 하늘에서 갑자기 나타나는 초신성은 은하만큼 밝아지기 때문에 슈퍼스타 중의 슈퍼스타이다. 이 세 명의 천문학자들은 멀리 있는 초신성 관측을 통하여 50억 년 전부터 우주의 팽창속도가 점점 빨라지고 있다는 것을 발견한 공로를 인정받아 노벨상을 수상했다. 노벨상 수상자 중 나이가 가장 적은 리스 교수는 1992년에 매사추세츠 공과대학(MIT)을 물리 전공과 역사 부전공으로 졸업하고 1996년에 하버드 대학교에서 천문학 박사학위를 받았다. 그리고 2년 후인 1998년에 High-z Supernova Search 연구진과 함께 기념비적인 논문을 발표하고 수많은 상을 받은 후 올해 노벨물리학상을 수상했다.

펄머터 교수가 이끄는 초신성우주론 연구진(Supernova Cosmology Project)과 슈미트와 리스 교수가 이끄는 매우 멀리 있는 (고 적색이동) 초신성탐사 연구진(High-z Supernova Search)은 독립적으로 초신성 관측연구를 통하여 비슷한 결

저자약력

이명균 교수는 서울대학교 천문학과를 졸업하고 미국 University of Washington에서 천문학박사를 받았다. 허블이 재직했던 카네기 천문대에서 연구원(1990-1993)으로 활동한 후 1993년부터 서울대학교 물리천문학부 천문학전공 교수로 있다. (mglee@astro.snu.ac.kr)

Fig. 1. (a) Saul Perlmutter (US), a leader of Supernova Cosmology Project. (b) Brian Schmidt (Australia), a co-leader of High-z Supernova Search Team. (c) Adam Riess (US), a co-leader of High-z Supernova Search Team. [(a) 초신성우주론 연구진의 책임자인 솔 펄머터(미국). (b) 원거리 초신성 연구진의 공동책임자인 브라이언 슈미트(호주) (c) 원거리초신성연구진의 공동책임자인 애덤 리스(미국).]

과를 얻었다. 이전에는 우주의 팽창속도가 시간이 가면서 점점 줄어들 것으로 예상하고 있었는데 이들의 연구결과는 그 반대를 보여주었다. 즉 우주의 팽창 속도는 점점 늘어나고 있다는 것이다. 우주를 가속 팽창하게 하는 에너지는 보이지 않아서 암흑에너지(dark energy)라고 부르는데, 오늘날 암흑 에너지가 우주의 대부분을 차지하고 있다고 추정된다. 이들의 연구 결과가 발표된 1998년 이후로 우주론에는 새로운 시대가 전개되었다. 즉 암흑에너지 우주론의 시대가 열린 것이다. 이 연구는 천문학자뿐만 아니라 수많은 물리학자와 수학자들의 연구를 촉발시켰다.

우주의 가속 팽창 발견은 1925년 미국 윌슨산 천문대의 천문학자 허블이 외부은하의 존재를 밝히고 1929년에 우주가 팽창하고 있다는 것을 발견한 것과 비견될 만한 놀라운 업적이다. 천문학 분야가 노벨물리학상에 포함된 것은 1953년 허블이 사망한 이후이다. 그동안 천문학 분야에 수여된 노벨물리학상은 우주배경복사, 펄사(pulsars, 깜박이별), 백색왜성, 전파천문학 등에 관한 연구자에게 수상되었다.

이 특집의 첫 번째에서 초신성을 이용하여 우주 가속 팽창을 발견하는 원리와 과정, 연구 성과의 의미, 그리고 미래를 살펴보고, 두 번째에서 초신성의 정체와 종류, 세 번째에서 초신성 연구 이전에 우주의 가속 팽창을 밝힌 연구를 소개한다. 네 번째에서 우주의 거대구조를 이용한 우주의 가속 팽창 연구를, 그리고 마지막으로 우주 가속팽창의 원인 규명과 미래 과제를 소개한다.

우주론의 전주곡

1. 아인슈타인의 고민과 실패

아인슈타인(Einstein)은 1915년에 중력을 기술하는 일반상대성 이론을 발표했다. 그는 이를 무기로 하여 1917년에 최초의 우주 모형을 만들었다. 중력이 있는 시공에서는 모든 물질이 시간이 지나면 한 점으로 모이게 된다. 그런데 아인슈타인은 그 당시 알려진 별들의 운동 연구 결과를 보니 별들은 평균적으로 멀어지거나 가까워지지 않았다. 그는 이로부터 우주는 크기가 변하는 않는다고 결론을 내렸다. 이는 그가 유도한 운동 방정식에 심각한 문제를 제기했다. 하여 그는 중력에 반대되는 효과(밀어내는 힘, 척력)를 나타낼 수 있도록 임의로 상수항을 추가했다. 이 항을 오늘날 우주 상수라고 부른다. 그러나 아인슈타인은 마음이 편하지 않았다. 왜냐하면 우주 상수는 물리적으로 전혀 근거 없었기 때문이다. 아인슈타인의 우주 모형은 정적 우주모형(static model)이라고 부른다. 아인슈타인은 이 유명한 논문의 마지막에 이렇게 적었다. “우주

상수는 물질 분포를 거의 정적으로 만들기 위해서만 필요하다. 별들이 작은 속도로 움직인다는 사실은 우주에서 물질의 분포가 거의 정적이라는 것을 의미한다. (That term is necessary only for the purpose of making possible a quasi-static distribution of matter, as required by the fact of the small velocities of the stars.)” 아인슈타인은 일반상대성 이론이라고 하는 강력한 도구를 가지고 있었지만 그 당시에는 우주를 제대로 알 수 없었다. 우주를 제대로 알게 된 것은 허블 이후이다.

2. 우주 팽창의 발견과 판도라의 상자

1925년 허블(Hubble)은 안드로메다 은하가 우리 은하 바깥에 있는 외부 은하임을 밝혔다. 이는 우리 은하가 우주의 일부에 불과하며 안드로메다 은하와 같은 “섬우주(island universes)”가 우주에는 수없이 많다는 것을 보여주었다. 4년 후인 1929년에 허블은 은하의 거리가 멀어질수록 후퇴속도가 더 빨리 커지는 허블 법칙을 발표했다. 이 법칙은 균일하고 등방적인 우주가 팽창하고 있다는 것을 보여준다. 허블은 은하를 이용하여 우주의 역학을 최초로 조사할 수 있었다. 허블은 1929년 논문을 다음과 같이 마무리 짓고 있다. “본 연구에서 발견한 선형관계(은하의 후퇴속도와 거리 관계)는 가까운 거리에서만 적용되는 근사적인 관계라는 점을 강조하고 싶다(it may be emphasized that the linear relation found in the present discussion is a first approximation representing a restricted range in distance).” 이로써 외부은하천문학이 시작되었고 관측우주론이 등장하게 되었다. 아인슈타인은 이 소식을 듣고 자신의 정적 우주모형이 잘못 되었음을 깨달았다. 그리고 우주 상수항을 ‘임의로 추가한 것은 인생에 있어서 최대 실수’라고 말한다. 그러나 아인슈타인이 만든 우주 상수는 아인슈타인의 마음대로 판도라의 상자에 다시 담을 수 없었다.

3. 우주의 나이 문제

허블이 우주의 팽창을 밝힐 때 조사한 영역은 우주 전체에서 매우 작은 영역에 불과했다. 그리고 허블이 발표한 허블 법칙에 따르면 우주의 팽창률을 나타내는 허블 상수의 값이 570 km/s/Mpc이다. 이 허블 상수의 역수로부터 우주 나이를 구하면 2억 년에 불과했다. 이는 당시 알려진 지구의 나이보다 작았다. 우주의 나이가 지구의 나이보다 작다는 것은 심각한 문제가 있음을 보여준다. 그러나 이 문제의 원인을 아무도 알 수가 없었다.

4. 헤일 망원경(Big Eye)의 등장과 관측우주론의 기대

1948년에 미국 캘리포니아주에 있는 팔로마 천문대에 구경 5미터인 당시 세계 최대 망원경이 세워졌다. 이 망원경은 천문학자의 이름을 따라 헤일 망원경이라고 하는데 별명은 “왕눈(Big Eye)”이다. 이렇게 거대한 망원경이 세워지자 천문학자들은 더욱 먼 우주를 연구하게 되었다. 이 당시 관측우주론의 목표는 두 가지 우주변수의 값을 결정하는 것이었다. 첫 번째는 우주의 팽창률을 나타내는 허블 상수이고, 두 번째는 우주의 팽창속도가 줄어든 것을 나타내는 감속 변수(deceleration parameter)이다. 그 당시 천문학자들은 우주가 팽창하고 있지만 시간이 지나면서 팽창속도가 줄어든 것이라고 예측했다. 그래서 감속 변수라는 개념을 도입하고 우주가 감속 팽창할 때에 양의 값을 갖도록 정의했다. 그러나 이후 오랜 기간에 걸쳐 많은 노력을 기울였음에도 불구하고 이 소박하게 보였던 목표는 달성하지 못한다.

5. 허블 상수 논쟁

관측 우주론에서 가장 많은 논쟁의 대상이 된 것은 허블 상수이다. 샌디취(Sandage)와 드 보쿨뢰르(de Vaucouleurs)와 같은 천문학자들의 노력으로 허블 상수 측정에 많은 발전이 있었다. 그러나 천문학계에서 허블상수의 측정값으로 한쪽에서는 50 km/s/Mpc를 주장하고 다른 쪽에서는 100 km/s/Mpc를 주장하였다(Mpc는 메가파섹으로서 3,260,000광년에 해당한다). 다양한 방법을 사용하여 수많은 연구가 이루어졌음에도 불구하고 1990년대 이르러서도 허블 상수 값의 측정 범위는 50 – 80 km/s/Mpc이었다. 허블 상수가 50 km/s/Mpc인 경우 이에 해당하는 우주 팽창 나이는 200억 년이며, 허블 상수가 80 km/s/Mpc인 경우에는 우주 팽창 나이는 100억 년이다. 이 당시 우주에서 나이가 제일 많다고 알려진 구상 성단의 나이는 약 150억 년이므로 허블상수가 80 km/s/Mpc인 경우에는 우주 나이 문제가 여전히 존재한다. 초신성으로 과연 이 문제를 해결할 수 있을까?

초신성 우주론의 등장

1. 초신성의 정체

밤하늘에 갑자기 나타난 것처럼 보이는 별을 우리나라에서는 옛날에 손님별(객성)이라고 불렀다. 서양에서는 이런 별을 신성(nova)이라고 불렀다. 신성보다 훨씬 밝은 별을 초신성이라고 한다. 초신성은 무거운 별이 진화하다가 최후의 단계에서 폭발하면서 생기거나, 두 별로 이루어진 쌍성계에서 별 하나가 폭발하면서 생긴다. 전자를 제II형 초신성이라 하고, 후자를 제Ia형 초신성이라 한다.

Fig. 2. Formation of Type Ia Supernova in a binary system. As the white dwarf accretes mass from its companion giant star, its mass increases. When the mass of the white dwarf exceeds a critical mass (about 1.4 solar mass), it explodes, producing a Type Ia supernova. (source: NASA). [쌍성계에서 제Ia형 초신성이 생성되는 과정. 쌍성계에서 별이 진화하여 거성과 백색왜성이 된다. 거성의 물질이 백색왜성으로 들어가면서 백색왜성의 질량이 증가한다. 백색왜성의 질량이 태양의 1.4배보다 커지면, 폭발하면서 제Ia형 초신성이 된다.]

2. 초신성은 표준 광원이 될 수 있을까?

절대 밝기가 알려진 광원을 표준 광원(standard candles)이라고 한다. 표준 광원은 멀어질수록 어둡게 보이므로 겉보기 밝기를 측정하면 이로부터 광원의 거리를 측정할 수 있다. 초신성은 시간에 따라 밝기가 변하므로 표준 광원으로 사용할 수 없다고 생각하기 쉽다. 그러나 초신성의 특성을 이용하면 초신성을 표준 광원으로 사용할 수 있다. 초신성의 밝기를 시간에 따라 표시한 그림을 광도곡선이라고 한다. 초신성의 광도곡선을 보면 초신성은 별이 폭발한 후 2-3주에 걸쳐 빠르게 수천만 배까지 밝아지면서 밝기가 최대가 된다. 이때의 광도를 초신성 최대 광도라고 한다. 이 최대 광도는 은하의 밝기와 비슷하다. 초신성은 최대 광도에 이른 후 수개월 또는 수년에 걸쳐 서서히 어두워진다. 1604년에 발견된 케플러 초신성은 우리 선조들이 7개월 동안 맨 눈으로 관측한 기록이 남아있다. 초신성 중에서 제Ia형 초신성은 최대 광도가 대략적으로 일정($M_V = -19.3$ 등급, 이는 하늘에서 쉽게 볼 수 있는 1등성 밝기의 1억 배에 해당한다)하다는 점이 알려져 있어 비교적 쉽게 표준광원으로 사용할 수 있다. 초신성은 매우 밝기 때문에 매우 멀리 있는 은하까지의 거리를 측정할 수 있으므로 관측 우주론에서 중요한 역할을 하고 있다.

Fig. 3. CCD images of SN 1999dm, a supernova (a faint star above the bright galaxy in the central area), discovered in the nearby galaxy cluster Abell 2065 by the Seoul National University supernova search team using the 1.8m telescope at the Bohyunsan Observatory in Korea in 1999. The supernova was not visible in the January 17 image, became bright in the June 18 image, and became very faint in the August 12 image. [서울대 초신성 연구진이 은하단(Abell 2065)에서 발견한 초신성(SN 1999dm)의 영상. 보현산천문대의 1.8미터 망원경으로 1999년 1월 17일에 찍은 영상에서는 없었으나 같은 해 6월 18일 영상에서 초신성(화살표 아래의 작은 점)이 발견되었다. 두 달 후인 8월 12일 찍은 영상에서는 초신성이 매우 어두워졌다.]

3. 노벨상에 이르는 징검다리: 오차 줄이기

1990년대 초 전까지는 제Ia형 초신성의 최대 광도를 측정해 보니 분산이 0.5등급 정도였다. 이는 우주론에 적용하기에 너무 큰 오차이다. 그러나 1990년 초에 초신성이 밝을수록 시간이 가면서 광도가 서서히 변한다는 점을 알게 되었다. 이를 이용하여 초신성의 최대 광도를 구하는 방법을 개발한 결과 분산이 0.15등급으로 줄어들었다. 그리고 나서야 초신성이 정밀우주론을 연구할 수 있는 막강한 도구가 되었다.

4. 초신성 찾기

초신성은 아무런 예고도 없이 어느 날 갑자기 하늘 어디에 선가 나타나는 손님 별이다. 넓고 넓은 하늘 어디에서 이런 초신성을 찾을 수 있을까? 한 은하에서 초신성은 50년 정도에 하나씩 태어난다. 그러므로 한 은하를 50년 동안 관찰하면 초신성 1개 정도를 발견할 수 있다. 실제로 우리 은하에서는 1604년에 초신성이 마지막으로 발견되었고 그 이후 현재까지 초신성이 발견된 바 없다. 그러므로 초신성을 많이 찾기 위해서는 많은 수의 은하를 계속 주시해야 한다. 은하들이 많이 몰려 있는 은하단은 좋은 대상이다. 실제로 필자와 박창범 교수(현 고등과학원)를 포함한 서울대학교 천문학과 초신성탐사팀은 1999년에 가까운 은하단 Abell 2065에서 초신성 SN 1999dm을 발견한 바 있다 (Lee *et al.*, 1999). 그림 3은 이 초신성의 발견 전후에 찍은 사진을 보여준다. 초신성은 슈퍼스타이지만 멀리 있을 때는 어두운 별처럼 보인다. 이 초신성은 우리나라에서 최초로 발견한 외부은하의 초신성이다.

Fig. 4. HST images of distant supernovae before (upper row) and after (lower row) supernova explosion. (source: NASA, ESA, and A. Riess) [매우 먼 은하에 있는 초신성을 허블우주망원경으로 찍은 영상. 위줄은 초신성이 나타나기 전, 아래줄은 초신성(화살표로 표시한 별)이 나타난 이후의 모습을 보여준다.]

가까운 초신성은 밝아서 작은 망원경으로 발견할 수 있다. M51, M101과 같은 가까운 은하에서 생긴 초신성은 서울대학교 천문대에 있는 소형망원경으로도 관찰할 수 있다. 매우 멀리 있는 초신성을 찾기 위해서는 허블우주망원경과 같은 망원경이 필요하다. 그림 4는 허블우주망원경으로 찾은 먼 초신성의 사진을 보여준다. 가운데 있는 초신성은 초신성의 집인 나선 은하보다 더 밝게 보인다.

우주 가속팽창의 발견과 노벨상

2011년 노벨물리학상을 받은 연구 업적은 펄머터 교수가 이끄는 Supernova Cosmology Project 연구진과 슈미트와 리스 교수가 이끄는 High-z Supernova Search 연구진이 발표한 다음과 같은 세 편의 논문에 대표적으로 포함되어 있다. 첫째, 우주 나이 반에 해당하는 거리에 있는 초신성의 발견 (Perlmutter *et al.*, 1998, Nature, Discovery of a Supernova Explosion at half the Age of the Universe), 둘째, 42개 초신성을 이용한 밀도 변수와 우주 상수의 측정 (Perlmutter *et al.*, 1999, Astrophysical Journal, Measuring of Omega and Lambda from 42 High-redshift Supernovae), 셋째, 가속 우주와 우주 상수에 대한 초신성 관측 증거 (Riess *et al.*, 1998, Astronomical Journal, Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant) 등이다.

두 연구진은 독립적으로 다양한 지상망원경과 허블우주망원경을 사용하여 수십억 광년 떨어진 은하에서 제Ia형 초신성을 탐사한 결과 각각 16개와 42개를 발견하였다. 그들은 발

Fig. 5. Cover page of Science magazine 1998 Dec 18 issue. Discovery of the accelerating universe was selected as the breakthrough of the year. [사이언스 잡지 1998년 12월 18일호의 표지. 사이언스 지는 우주의 가속팽창 발견을 1998년의 최대 발견으로 선정했다.]

견된 초신성을 계속 관측하여 초신성이 가장 밝아졌을 때의 밝기가 우주 팽창속도가 일정한 경우에 비하여 약 30퍼센트 어둡다는 것을 발견했다. 이는 이들의 거리가 우주 팽창속도가 일정한 경우에 비하여 15퍼센트 더 멀다는 것을 보여준다. 이 결과는 수십억 광년부터 현재까지 우주의 팽창속도가 가속되고 있다는 것을 의미한다. 이는 우주의 팽창 속도가 점점 감속되고 있을 것이라는 이전의 예측과 반대되는 결과였다. 과학논문을 실는 Science지는 이 결과의 중요성을 파악하고 1998년 최대의 발견으로 선정되었다고 표지에 실었다. 그림 5는 이 잡지의 표지이다.

그 후 초신성에 관한 연구 결과가 많이 진행되어 알려진 초신성의 수가 매우 많아지고 거리 한계가 100억 광년까지 이르게 되었는데 이 결과들도 여전히 1998년 결과를 지지하고 있다. 2011년까지 발견된 제Ia형 초신성은 600개가 넘는다(Amanullah *et al.*, 2010). 그림 6은 초신성의 거리지수와 적색이동의 관계를 보여주는데 이런 그림을 허블도(Hubble diagram)라고 한다. 거리 지수(distance modulus)는 겉보기 등급과 절대 등급의 차이로서 측정하는 거리를 나타낸다. 그림의 오른쪽 세로축은 거리를 나타낸다. 적색이동은 우주가 팽창하면서 빛의 파장이 길어지는 양을 나타내는데 이로부터 천체에서 나온 빛이 관측자에게 도달하는 시간을 알 수 있다. 초신성 관측자료는 암흑에너지가 70퍼센트, 물질이 30퍼센트

Fig. 6. A Hubble diagram showing the distance moduli and redshifts for Type Ia supernovae. Dots represent the data given in the Union 2 compilation (Amanullah *et al.*, 2010). Red line, black line and green lines represent a model for accelerating universe ($\Omega_M=0.3$ and $\Omega_A=0.7$), a model for non-accelerating open universe ($\Omega_A=0$, and $\Omega_M=0.3$), and a model for non-accelerating matter universe ($\Omega_A=0$ and $\Omega_M=1.0$). Note that the data for Type Ia supernova are consistent with the accelerating universe model. The numbers above the horizontal axis represent the look-back time in Giga years. [제Ia형 초신성의 거리와 적색이동을 보여주는 그림 (허블도라고 함). 초신성은 거리가 멀수록 어두워지므로 겉보기 밝기를 알면 거리를 구할 수 있다. 적색이동은 후퇴속도를 나타낸다. 초신성 관측자료는 우주가 가속 팽창하고 있다는 것을 보여준다.]

Fig. 7. A schematic picture showing a cosmic tug of war between dark matter and dark energy. Dark matter has a gravitational force, while dark energy has a repulsive force. Dark energy is winning since 7 Gyrs ago, while dark matter was dominant until 7 Gyrs ago. (source: NASA). [중력을 가진 암흑 물질과 우주를 가속팽창시키는 암흑에너지의 힘겨루기 역사. 우주 초기에는 암흑물질이 주도적이었으나 70억 년 전부터 암흑에너지가 이기기 시작하여 현재는 우주가 가속 팽창하고 있다.]

로 이루어진 우주 모형과 잘 일치하고 있지만 암흑에너지가 없는 우주 모형과는 명확한 차이를 보여준다.

Fig. 8. A schematic diagram showing how to measure the Hubble constant in three steps using Cepheids and Type Ia supernovae (source: NASA). [세페이드 변광성과 제Ia형 초신성을 이용하여 단계적으로 허블상수를 결정하는 방법.]

우주 팽창의 역사는 우주를 수축시키는 물질의 중력과 우주를 팽창시키는 암흑에너지의 척력 사이의 힘겨루기에 달려 있다. 최근 연구결과에 의하면 70억 년 전부터 현재까지 우주가 가속 팽창하고 있지만 70억 년 이전까지는 우주가 감속 팽창하고 있었다. 그림 7은 이런 개념을 잘 보여주고 있다. 암흑에너지가 주도하는 우주의 팽창 역사로부터 구한 우주의 나이는 137억 년이며 현재 알려진 허블상수의 값은 73 km/s/Mpc이다. 그러므로 우주의 나이 문제는 더 이상 존재하지 않는다. 암흑에너지는 중력에 반대되는 역할을 하므로 아인슈타인이 판도라의 상자에서 꺼낸 우주상수와 같은 역할을 한다. 즉, 아인슈타인이 원하지 않았지만 21세기 우주론에는 우주상수가 필요하게 된 것이다.

초신성을 이용하여 우주의 가속 팽창을 발견한 비결

두 연구진이 우주의 가속 팽창을 발견한 비결은 무엇일까? 첫째, 도전 정신이다. 그 당시 우주에서 멀리 떨어진 초신성을 찾고 이를 이용하여 우주의 특성을 조사하는 것은 매우 어려운 과제였지만 이에 과감하게 도전하였다. 둘째, 창의적인 방법을 개발했다. 초신성 연구는 초신성을 찾는 일이 어려운데 이를 효율적으로 찾을 수 있는 방법을 개발하고, 초신성의 관측 오차를 줄이는 방법을 개발했다. 셋째, 과감한 해석이다. 초창기 연구 결과는 초신성의 숫자가 많지 않고 측정오차가 비교적 커서 명확한 결론을 내리기 어려웠으나 신뢰성을 철저히 조사한 후 기존의 관념과 반대되는 과감한 해석을 시도했다. 필자에게 1998년 당시의 관측 결과가 주어졌을 때 이 연구진의 해석과 같은 결론을 내렸을 가능성은 높지 않다. 실제로 1998년 발표 직후에는 우주의 가속 팽창을 받아들이기 보다는 관측 결과를

다르게 해석해야 한다는 의견들이 많았다. 그러나 그 후 후속 연구들이 나오면서 1998년 결과를 점차 받아들이게 되었다. 넷째, 공동연구이다. 초신성 우주론은 지상과 우주의 다양한 망원경을 이용하여 측광 및 분광 관측이 필요한데 이를 위해서는 공동 연구가 필수적이다. 노벨상은 3명이 받았지만 실제로는 세 개인보다는 두 연구진에게 준 것이라 할 수 있다.

미 래

우주의 가속 팽창이 발견된 이후 가속 팽창을 일으키는 암흑에너지의 정체를 밝히는 것이 우주론의 중요 과제가 되었다. 우주의 상태를 나타내는 방정식은 압력과 에너지 밀도 사이의 관계로 표현할 수 있다. 압력 = $w \times$ 에너지 밀도. 여기서 w 는 비례상수인데 에너지의 종류에 따라 그 값이 다르다. 암흑에너지가 만약 우주상수라면 w 의 값은 -1 이다. $-1/3 < w < -1$ 인 경우 제5의 물질이라고 한다. 따라서 암흑에너지의 정체를 밝히기 위해서는 w 의 값을 정확히 알아야 한다. 현재까지 알려진 바로는 w 의 값은 -1 에 가깝기 때문에 암흑에너지는 우주상수일 가능성이 크다. 그러나 최종 결론을 내리기 위해서는 더욱 정밀한 관측이 필요하다. 한편 w 는 적색이동(시간)에 따라 변할 수도 있다.

현재 초신성 우주론은 두 가지 방향으로 진행되고 있다. 첫 번째는 먼 초신성 연구이다. 수십억 광년의 거리에 있는 초신성 수천 개를 이용하여 w 의 값을 정밀하게 측정하는 것이다. 이를 위해서는 광시야 대형 망원경이 필요하며 초신성 전용 우주망원경도 계획하고 있다. 두 번째는 가까운 초신성 연구이다. 거리가 정확하게 알려진 가까운 은하에 있는 초신성을 정밀 관측하여 초신성의 최대광도를 정확하게 측정하는 것이다. 그동안 초신성의 정밀도는 매우 증가했지만 정확도는 개선의 여지가 많다. 초신성의 광도에 미치는 영향도 다양하게 조사할 필요가 있다. 초신성과 세페이드 변광성이 동시에 발견된 은하는 이에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 그림 8은 세페이드 변광성과 초신성을 이용하여 허블상수의 값을 측정하는 전략을 보여주고 있다. 허블우주망원경으로 은하단을 관측하면 멀리 있는 초신성을 효율적으로 찾을 수 있다(그림 9). 최근에 이런 과제가 시작되어 조만간에 많은 초신성이 발견될 것으로 예상된다.

초신성 우주론은 우주배경복사와 우주거대구조 연구 결과

Fig. 9. Color image of a distant massive galaxy cluster MACS J1206.2-0847 obtained with the Hubble Space Telescope. Most of objects seen in this image are galaxies. Numerous supernovae can be found in this kind of massive galaxy clusters (source: NASA). [허블 우주망원경으로 찍은 먼 은하단의 영상. 은하단에는 수백 내지 수천 개의 은하가 있다. 이런 무거운 은하단을 주기적으로 관측하면 초신성을 매우 많이 발견할 것이다.]

와 결합하면 우주의 특성을 더욱 정밀하게 측정할 수 있다. 현재까지 알려진 바로는 다행히도 우주는 편평 공간이다. 덕분에 그동안 우리가 사용하던 유클리드 기하학을 그대로 사용하면 된다. 허블상수의 최근 값은 73 km/s/Mpc 이다 (Freedman and Madore, 2010). 우주의 나이는 137억 년으로서 우주의 나이 문제는 더 이상 존재하지 않는다. 우주의 전체 에너지 중 암흑에너지가 73퍼센트나 차지하며 물질은 27퍼센트이다. 물질은 암흑물질과 배리온 물질로 나누어지는데 암흑물질이 우주 전체 에너지의 23퍼센트를 차지하며, 배리온 물질(원자로 이루어진 보통 물질)은 4퍼센트에 불과하다 (Frieman *et al.*, 2008, Komatsu *et al.*, 2011). 우주에서 빛을 내는 물질은 우주 전체의 1퍼센트도 되지 않는다. 밤하늘에서 아름다운 별과 은하 등 다양한 천체를 보고 있지만 우리는 빙산의 일각만을 보고 있는 것이다. 우주의 96퍼센트를 차지하는 암흑에너지와 암흑물질의 정체는 아직도 모르고 있다. 암흑 에너지와 암흑 물질의 정체를 명확히 밝히면 노벨상을 수상할 것이다. 그러나 중력 법칙을 약간 수정하면 암흑물질과 암흑 에너지의 존재가 필요하지 않을 수도 있다는 연구도 있어 어느 날 갑자기 암흑 물질과 암흑 에너지의 개념이 사라질 수도 있다. 현대 우주론에서 최대의 수수께끼는 암흑 에너지와 암흑 물질이 우주의 대부분을 차지하고 있다는 것이지만, 더욱 큰 수수께끼는 이들의 정체를 아직도 모르고

Fig. 10. A photo of Myung Gyoong Lee in the sketch of the Giant Magellan Telescope (25 m) which will be ready at Las Campanas in Chile around 2020. Korean astronomers will use 10 percent of the observing time in this telescope. [거대마젤란 망원경(Giant Magellan Telescope)의 개념도 앞에서 있는 필자. 거대마젤란 망원경은 구경 25미터이며 우리나라, 미국, 그리고 호주가 공동으로 2020년경 칠레에 건설할 예정이다.]

있다는 점이다. 이 수수께끼를 푸는 것에 도전하고 싶지 않은가?

우리나라에는 현재 가장 큰 광학망원경이 보현산 천문대에 있는 구경 1.8미터 망원경이다. 이는 소형망원경으로서 일본의 아마추어들이 사용하는 망원경보다 작다. 이 망원경으로는 가까운 초신성만 관측할 수 있다. 우리나라의 경제력과 비슷한 나라들은 모두 4미터에서 10미터급 망원경을 보유하고 있으며 이번 노벨상 수상자들도 이런 큰 망원경을 이용하여 개가를 올릴 수 있었다. 그러나 2020년경이 되면 우리나라도 구경 25미터 거대 마젤란 망원경(그림 10)을 사용할 수 있게 된다. 그렇게 되면 우리나라 천문학자들도 노벨상 급 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대되어 미래는 매우 밝다.

REFERENCES

- [1] R. Amanullah, *et al.*, *Astrophysical Journal* **716**, 712 (2010).
- [2] W. L. Freedman and B. F. Madore, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* **48**, 673 (2010).
- [3] J. A. Frieman, *et al.*, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* **46**, 385 (1998).
- [4] A. Goobar and B. Leibundgut, *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science* **61**, 251 (2011).
- [5] M. G. Lee, *et al.*, *IAU Circular*, 7237, Supernova 1999dm in Abell 2065 (1999).
- [6] E. Komatsu, *et al.*, *Astrophysical Journal Supplement Series* **192**, 18 (2011).
- [7] S. Perlmutter, *et al.*, *Nature* **391**, 51 (1997).
- [8] S. Perlmutter, *et al.*, *Astrophysical Journal* **517**, 565 (1999).
- [9] A. Riess, *et al.*, *Astronomical Journal* **116**, 1009 (1998).