# GMT를 이용한 Ia 초신성의 광도진화 연구와 이를 통한 암흑에너지의 본질 및 진위 규명

● 이영욱, 강이정, 김영로, 정철

연세대학교

## 초 록

암흑에너지가 존재한다는 가장 직접적인 증거는 Ia형 초신성을 이용한 먼 은하의 거리 측정으로부터 온다. 이러한 결론에 사용된 핵심 가정은 Ia형 초신성의 밝기가 표준화된 광도에서 모두 같다는 것이다. 그러나 최근 연구 결과에서 모은하의 형태학적 분류나 질량과 같은 특성에 따라 Ia형 초신성의 광도 차이가 존재한다는 사실이 점차 드러나고 있다. 만약 이것이 사실이라면 Ia형 초신성 연구에서 파생된 암흑에너지에 대한 결과는 치명적 오류를 가지게 된다. 이러한 가능성을 보다 직접적으로 연구하기 위해 본 관측팀은 $0.2 < z < 1.0$에 위치한 Ia형 초신성의 조기형 모은하에 대한 GMT-GMACS 분광관측을 제안하고자 한다. 이로부터 항성종족의 평균 나이가 유사한 조기형 모은하 표본이 확보되면 현재 초신성을 이용한 연구에서 가장 큰 문제인 광도진화 효과가 배제된 상태에서 암흑에

너지의 존재와 특성에 관한 연구가 가능하게 된다.

## 1. 과학 목적 및 요약

암흑에너지가 존재한다는 가장 직접적인 증거는 Ia형 초신성을 이용한 먼 은하의 거리 측정으로부터 온다. 이러한 결론에 사용된 핵심 가정은 Ia형 초신성의 밝기가 표준화된 광도에서 모두 같다는 것이다(Riess et al. 1998; Permultter et al. 1999). 그러나 최근 연구 결과에서 모은하의 형태학적 분류나 질량과 같은 특성에 따라 Ia형 초신성의 광도 차이가 존재한다는 사실이 점차 드러나고 있다(Hicken et al. 2009; Neill et al. 2009; Sullivan et al. 2010). 이는 모은하를 이루는 항성종족의 나이나 다른 특성에 따라 초신성의 광도가 변할 수 있음을 시사하고, 만약 이것이 사실이라면 Ia형 초신성 연구에서 파생된 암흑에너지에 대한 결과는 치명적 오류를 가지게 된다.

이러한 가능성을 보다 직접적으로 연구하기 위해 본 관측팀은 $0.2 < z < 1.0$에 위치한 Ia형 초신성 모은하에 대한 분광관측을 제안하고자 한다. 이로부터 항성종족의 평균 나이가 유사한 조기형 모은하 표본이 확보되면 현재 초신성을 이용한 연구에서 가장 큰 문제인 광도진화 효과가 배제된 상태에서 암흑에너지의 존재와 특성에 관한 연구가 가능하게 된다. 관측할 초신성 모은하 표본은 Dark Energy Survey(DES)나 Large Synoptic Survey Telescope(LSST) Survey로부터 가져올 것이며, 이 중 소광 효과에 의한 영향을 적게 받고 저해상도 스펙트럼의 흡수선 분석으로부터 항성종족의 평균 나이와 중원소함량 측정이 가능한 조기형 모은하에 대해 GMT-GMACS를 이용한 분광관측을 수행할 것이다.

## 2. 연구 필요성, 배경 및 동향

### 1) 연구의 배경 및 필요성

우주의 70%를 차지하는 것처럼 보이지만 막상 그 정체를 알 수 없는 암흑에너지(Dark energy)! 과연 암흑에너지는 정말 존재하는 것인가? 아니면 Ia형 초신

성의 광도진화(Luminosity evolution) 효과를 제대로 반영하지 못해 생겨난 허구인가? 우리는 25m 대형 광학망원경을 사용한 분광관측으로부터 초신성이 속한 은하 내 항성종족의 나이와 중원소함량을 측정하고, 이로부터 초신성의 광도진화 효과가 은하의 거리 측정에 미치는 영향을 조사하여 암흑에너지의 진위 및 본질을 규명하고자 한다.

우주의 가속 팽창 발견에 대한 공로로 Saul Perlmutter, Brian Schmidt, 그리고 Adam Riess는 2011년에 노벨 물리학상을 수상하였다. 이 연구로부터 제시되는 암흑에너지의 직접적인 증거는 Ia형 초신성을 이용한 먼 은하의 거리 측정과 그로부터 얻어지는 Hubble diagram, 즉 은하의 거리와 적색이동 그림의 해석에서 나온다. 그런데 위에 언급한 세 명의 천문학자와 그의 동료들이 암흑에너지를 유추하는 과정에서 세운 핵심 가정은 광도곡선에 따라 보정된 초신성의 절대광도가 적색이동 혹은 은하 내 항성종족의 나이에 따라 변하지 않는다는 것이다. 그들은 이를 증명하기 위해 초신성이 발견된 27개 모은하의 형태학적 분류로부터 이 진화 효과가 무시할 정도라고 보고하였지만(Schmidt et al. 1998; Perlmutter et al. 1999), 최근의 향상된 자료는 더 이상 이 결과를 지지하지 않고, 오히려 Ia형 초신성의 광도가 모은하의 여러 성질에 대해 상관관계를 보이고 있다는 것이 점차 알려지고 있다(Hicken et al. 2009; Neill et al. 2009; Sullivan et al. 2010; Gupta et al. 2011; Suzuki et al. 2012).

이를 보다 직접적으로 조사하기 위해 우리 연구팀은 현재 구경 2.5m 망원경을 이용하여 가까운 조기형 모은하들의 분광관측을 수행해오고 있다. Hubble residual과 모은하의 상관관계에 대한 우리의 예비 분석 결과에 의하면, Ia형 초신성의 광도는 은하의 나이가 젊을수록 더 어두워지는 경향을 보인다. 이를 확인하기 위해 우리 연구팀은 6.5m 대형망원경을 이용하여 보다 먼 거리에 있는 모은하 표본들을 추가하고 있으며, 기존 관측 자료의 신호대잡음비(S/N) 역시 개선할 예정이다.

### 2) GMT의 필요성

조기형 모은하의 흡수선을 이용한 항성종족 분석을 위해서는 최소 S/N~50 이상의 양질의 스펙트럼이 필요하다. $0.01 < z < 0.05$ 사이에 위치한 가까운 은하의 경우 2.5m 및 6.5m급 망원경을 이용한 관측을 통해 동일한 주제로 이미 연

구를 수행하고 있으며, Gemini 8.1m 망원경을 이용하여 관측 대상을 z~0.2까지 확대할 예정이다. 하지만 z~0.2 이상의 먼 은하에 대해 항성종족 분석에 필요한 수준(S/N > 50)의 분광자료를 얻기 위해서는 15-25m급 구경의 망원경이 반드시 필요하다. 또한 남반구에서 수행 예정인 DES 및 LSST의 관측을 통해 발견될 Ia형 초신성의 모은하 표본의 추가 분광관측을 수행하기 위해서도 남반구에 위치할 GMT가 위치상 적합하다.

### 3) 국내외 연구 동향

모은하의 성질에 따라 Ia형 초신성의 광도가 어떻게 변하는지에 대한 연구는 현재 미국과 영국을 중심으로 한 몇몇 그룹에서 활발히 이루어지고 있다. 과거에는 단순히 모은하의 형태에 따라 Ia형 초신성의 밝기에 차이가 있는지를 연구하였으나, 최근의 연구 경향은 모은하의 성질을 좀 더 자세히 연구해서 그 성질들과 Ia형 초신성의 보정된 절대광도에 어떠한 상관관계가 있는지를 연구하는 것이다(Hicken et al. 2009; Neill et al. 2009; Sullivan et al. 2010; Gupta et al. 2011; Suzuki et al. 2012). 그러나 현재 진행되고 있는 연구들은 모두 관측 샘플을 추출하기에 용이하고 상대적으로 관측이 수월한 만기형 은하의 방출선 분석에 집중되어 있다. 따라서 Ia형 초신성의 광도진화를 직접 확인하기 위해 필요한 항성종족의 나이를 얻을 수는 없고, 최근의 별 생성률을 얻는 데 그치고 있다. 하지만 본 관측 제안에서는 이와는 달리 은하 내 항성종족의 평균 나이를 정확히 얻을 수 있는 조기형 은하의 흡수선 관측과 분석을 통해 모은하 내 항성종족의 나이를 직접 구하고자 한다.

제안하는 과제와 유사한 연구를 수행하는 연구팀은 우리 팀보다 1년 후에 연구에 착수한 미국 UC Berkeley의 Perlmutter 그룹이 유일하다. Perlmutter 팀은 현재 Keck 망원경을 이용해 북반구에 있는 조기형 모은하를 관측하고 있고, 이 팀과의 경쟁을 위해서도 더 큰 망원경을 사용한 연구가 시급하다. Perlmutter 팀은 모은하의 관측 자료를 해석하는 데 반드시 필요한 은하의 종족합성 모델을 함께 다루지 않는 반면, 우리 팀은 은하의 관측과 종족합성 모델을 모두 처리할 수 있는 능력을 보유한 연구팀이기 때문에 자료의 처리와 분석에 있어 보다 일관성 있는 결과가 기대된다. 현재 이 주제에 관한 논문은 아직 국제학술지에 게재된 것이 없고, 모은하의 저분산 스펙트럼과 진화종족합성 모델의 비교를 통해 은하

내 항성종족의 나이를 직접 측정하는 제대로 된 연구 결과도 아직 보고된 것이 없다. 그렇기에 제안하는 관측을 통해 충분히 국제 경쟁력과 파급 효과를 가지는 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

## 3. 연구의 내용 및 방법

### 1) 연구 방법

우리는 25m급의 GMT 망원경을 이용하여 $0.2 < z < 1.0$ 사이에 위치한 Ia형 초신성의 조기형 모은하에 대한 저해상도 분광관측을 제안한다. 이를 통해 충분한 수의 조기형 모은하 샘플이 확보되면, 종족합성 모델과 비교하여 모은하 내 항성종족의 평균 나이 및 중원소함량을 구한다. Look-back time에 따른 진화 효과로 인해 조기형 은하 내 항성종족의 평균 나이는 감소하기 때문에(그림 1) 이에 따른 초신성의 광도진화 효과를 배제하고 연구를 수행하기 위해서는 항성종족의 나이가 유사한 표본을 전 적색이동 구간에서 추출하는 작업을 먼저 수행해야 한다. 이를 위해서는 가까운 거리에 있는 샘플에서는 상대적으로 평균 나이가 젊은 은하를, 먼 거리에 있는 샘플의 경우에는 평균 나이가 많은 은하를 선택하여야

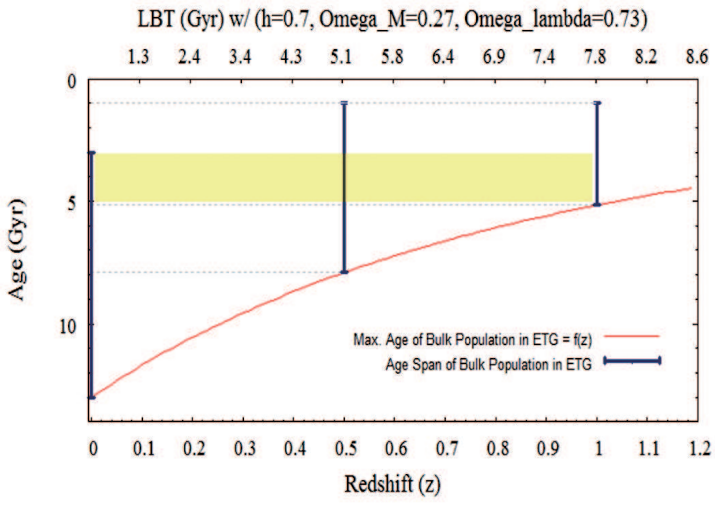


**그림 1.** 적색이동과 look-back time에 따른 조기형 은하 내 항성종족 평균 나이의 변화

한다. 우리 팀이 제안하는 관측을 통한 연구 결과를 통해 소광 효과뿐만 아니라 항성종족의 진화 효과까지 배제된 보다 직접적인 Ia형 초신성 연구가 가능할 것이며 이는 암흑에너지의 진위와 본질을 규명하는 데 결정적인 기여를 할 것으로 기대한다.

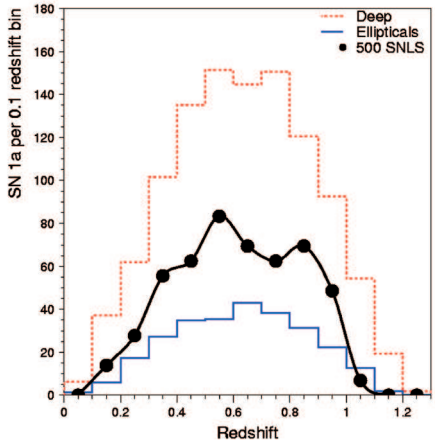


**그림 2.** 각 적색이동 구간에서 DES SN survey를 통해 관측될 것으로 예측되는 Ia형 초신성의 개수 분포도. 적색은 약 1,100개로 예측되는 전체 Ia형 초신성의 분포를 나타낸 것이며, 푸른색은 이 중 조기형 모은하에서 발생할 것으로 예측되는 270여 개의 Ia형 초신성의 분포를 나타낸 것이다(출처 : DES Science Program 제안서).

### 2) 연구 대상

관측 대상은 DES나 LSST Survey에서 발견된 Ia형 초신성 중 모은하의 형태학적 특성이 조기형인 것으로 한정할 것이다. 이는 조기형 은하가 소광 효과에 의한 영향을 적게 받고 항성종족 분포가 균일하며, 흡수선의 관측 결과를 항성종족합성 모델과 비교하여 항성종족의 나이 및 중원소함량을 구할 수 있기 때문이다. DES science program 제안서에 의하면, 전체 관측될 1,100여 개의 Ia형 초신성 중 약 270여 개가 조기형 모은하를 가질 것으로 예측된다(그림 2).

이 외에도 $0.05 < z < 0.2$에 위치한 Ia형 초신성 모은하 중 보다 자세한 분석이 필요한 조기형 은하 표본에 대해서도 분광관측을 추가로 수행하고자 한다. 이를 통해 S/N이 충분히 높은 은하 스펙트럼을 얻고, 나아가 모은하 내에서 Ia형 초신성이 위치한 영역의 분광관측을 통해 보다 정밀한 항성종족 분석을 시도할 수 있을 것이다.

### 3) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

사용하고자 하는 관측기기는 GMACS로 일반적인 다천체분광모드가 아닌, long-slit mode에서 저분산 분광관측을 수행할 예정이다. 관측된 스펙트럼의 분석을 통해 Hβ와 ⟨Fe⟩와 같은 흡수선을 측정할 것이며 이를 종족합성 모델과 비교할 것이다. 이와 같이 학계의 표준적인 방법을 통해 모은하 항성종족의 평균 나이 및 중원소함량의 추정이 가능하다. 필요한 파장 영역은 Lick/IDS 흡수

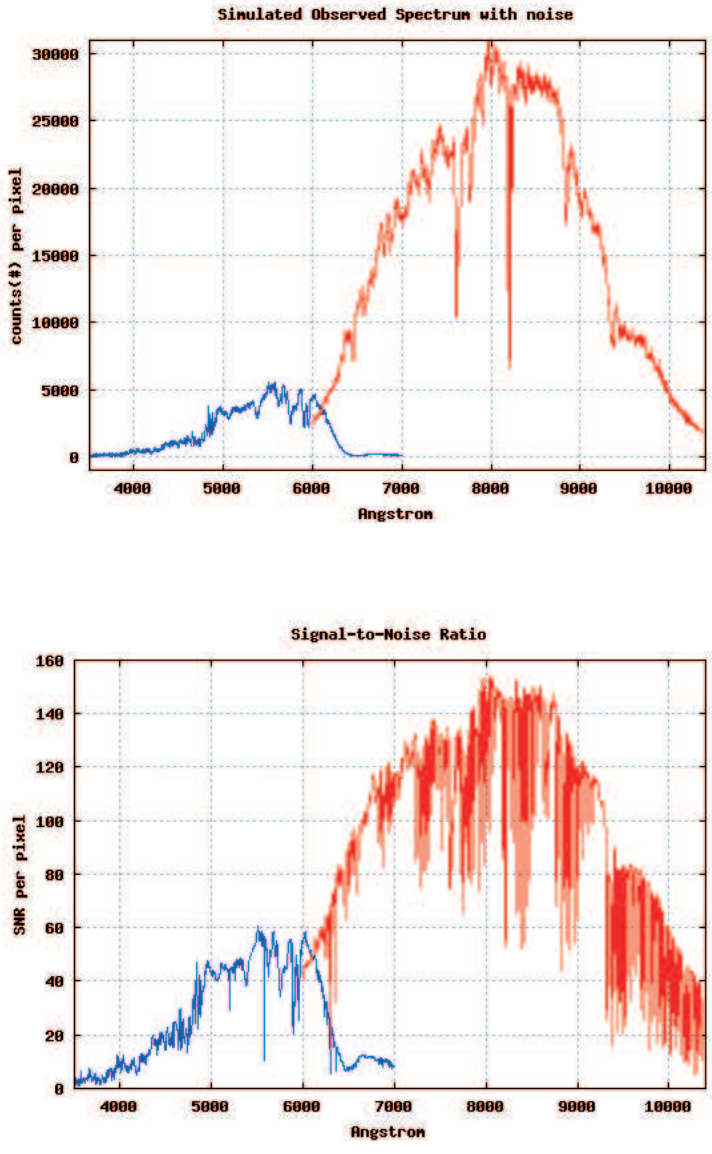


**그림 3.** 4개의 거울이 설치된 GMT-GMAC를 이용하여 z~0.5에 위치한 조기형 은하를 관측하였을 때 예측되는 관측 스펙트럼(좌측) 및 신호대비잡음비(S/N, 우측)의 값. 예측 시 은하의 등급은 r~21 mag, 슬릿 너비는 0.7" 그리고 노출시간을 3,600초로 가정하였다 (출처: GMACS exposure time calculator v1.6).

선 분석이 가능한 4000-7000Å(rest-frame)이며, $0.2 < z < 1.0$에 위치한 은하의 경우 적색이동으로 인해 최대 5000-14000Å 영역이 필요하다. 다만, 현재 계획

된 GMT early-ecience에서는 약 4000-9000Å 영역에 대한 관측이 가능하므로, GMACS를 이용해 관측한 스펙트럼에서는 Hδ 혹은 Hγ와 같은 짧은 파장에서 수소의 발머 흡수선 및 Fe4383와 같은 중원소 흡수선을 사용할 것이다. 긴 파장 영역까지 모두 포함하기 위해서는 early-science 이후에 추가될 NIRMOS의 사용도 필요할 것으로 보인다.

모은하의 항성종족의 평균 나이를 측정하기 위해 Hδ 혹은 Hγ을 주로 사용하게 되는 경우 해당되는 파장 영역에서 S/N이 최소 50-100 이상 되는 양질의 스펙트럼이 필요하다. 그림 3과 같이 적색이동 0.5에 위치한 조기형 모은하에 대하여 한 시간 노출을 주는 경우, 해당되는 파장 영역인 6000Å 근처에서 S/N ~60 정도의 스펙트럼을 얻을 수 있다. 따라서 항성종족 분석을 위해 각 은하당 최소한 시간의 노출이 필요하다. 다만 어두운 은하들의 경우는 밝기에 따라 같은 대상에 대하여 최소 2-3회 이상의 관측도 필요할 것으로 예상된다. 따라서 통계적인 분석을 위해 필요한 100-270개의 모은하 표본을 얻기 위해서는 최소 20일에서 최대 90일 정도의 관측이 필요하며, DES 및 LSST를 통해 Ia형 초신성 표본이 계속 추가된다면 조기형 모은하에 대한 보다 지속적인 후속 관측도 역시 요구된다.

## 4. 연구 결과의 기대 성과

우주를 구성하는 물질과 에너지의 70%를 차지한다고 보고되었고 이미 노벨상까지 수상하였지만, 막상 그 정체를 전혀 알 수 없는 암흑에너지는 현대천문학은 물론 현대과학의 가장 큰 문제이다. 당연히 그 본질과 진위에 대한 규명은 국제천문학계가 공동으로 해결해야 하는 당면 과제이고, 우리나라 천문학계도 이 문제를 심도 있게 연구할 책임이 있다. 제안하는 연구는 암흑에너지의 발견에 사용된 기본 가정, 즉 광도곡선에 따라 보정된 Ia 초신성의 광도가 적색이동에 따라 진화하지 않는다는 것을 검증하는 것을 1차 목표로 한다.

GMT를 이용한 분광관측을 통해 초신성을 이용한 거리 측정에서 항성종족의 진화 효과가 무시할 정도가 아니라는 것이 확인된다면, 현재의 표준우주모형에 일대 변혁을 가져다줄 수 있는 놀라운 발견이 될 것이다. 반대로 초신성의 광도

진화 효과가 무시할 정도라는 결론에 도달하게 된다면 이는 암흑에너지의 존재에 더욱 강력한 힘을 실어주는 증거로 채택될 것이고, 나아가 초신성의 광도진화 효과가 배제된 상태에서 암흑에너지의 본질을 파악하는 것을 가능하게 하여 관측우주론 연구에 결정적인 기여를 할 수 있을 것이다.

## 5. 인용문헌


Gupta, R.-R., D'Andrea, C.-B., Sako, M., et al. 2011, ApJ, 740, 92
Hicken, M., Wood-Vasey, W.-M., Blondin, S., et al. 2009, ApJ, 700, 1097
Neill, J.-D., Sullivan, M., Howell, D.-A., et al. 2009, ApJ, 707, 1449
Riess, A.-G., Filippenko, A.-V., Challis, P., et al. 1998, AJ, 116, 1009
Schmidt, B.-P., Suntzeff, N.-B., Phillips, M.-M., et al. 1998, ApJ, 507, 46
Sullivan, M., Conley, A., Howell, D.-A., et al. 2010, MNRAS, 406, 782
Suzuki, N., Rubin, D., Ldman, C., et al. 2012, ApJ, 746, 85
Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., et al. 1999, ApJ, 517, 565