초신성 및 여러 폭발 현상 연구

● 윤성철[1], 임명신[1], 이재준[2], 이호규[2]

서울대학교[1], 한국천문연구원[2]

1. 과학 목적 및 요약

본 관측 제안팀은 적색이동이 비교적 큰 천체(z > ~1)에서 발생하는 것들을 포함한 다양한 형태의 초신성과 중성자별의 병합이 만드는 적색신성(red nova)과 같이 특이한 폭발 현상의 분광관측을 수행하고자 한다.

주로는 GMACS를 이용한 중분산 분광관측(R~2000), 그리고 몇몇 특이 초신성의 세밀한 연구를 위해서는 G-CLEF를 이용한 고분산 분광관측을 제안한다. 관측 파장범위는 NIR-arm의 파장대를 포함하는 350nm-1500nm이며, 동시 관측 파장대는 관측 대상의 성질에 따라 조정될 것이다. 관측 대상은 LSST를 비롯한 다양한 초신성 탐사 관측 및 중력파 탐사 관측에서 발견되는 천체 중에서 GMT 관측에 가장 적합한 것들을 선택할 것이다.

이 연구를 통해 초기우주 연구에 중요한 역할을 할 매우 밝은 초신성(super-

luminous supernovae)과 극초신성(hypernova)을 비롯한 다양한 초신성의 모체성 성질과 폭발 기작 규명, 중성자별의 병합 등과 같은 특이한 폭발 현상의 원인 규명 및 이론적 예측의 검증, 적색이동이 큰 초신성과 가까운 초신성의 비교를 통한 우주의 화학적 진화 및 별 형성의 역사 연구, 그리고 궁극적으로는 최초 별의 폭발 현장을 확인할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 배경 및 필요성

초신성 및 감마선 폭발체는 별 진화의 마지막 단계에 발생하는 폭발적인 현상이다. 초신성은 현대 천문학에서 여러 가지 이유로 매우 중요하다. 초신성 폭발을 통해 헬륨보다 무거운 중원소의 상당 부분이 우주 공간으로 공급이 되고, 따라서 초신성은 우주의 화학적 진화를 이끄는 동인이다. 초신성은 매우 밝은 현상이기 때문에 적색이동이 큰 천체에서도 비교적 쉽게 발견할 수 있다. 초신성을 이용한 거리 측정을 통해 우주상수를 결정하기도 하며, 장차 초기우주에서 폭발하는 초신성의 발견은 최초의 별 탄생 이후 초기우주의 진화를 연구하는 데 있어서 큰 역할을 할 전망이다.

초신성의 관측적 특성은 매우 다양하다. 최대 광도는 태양의 수억 배에서 수천억 배에 달하며, 초신성으로서 밝게 빛나는 기간 역시 그 종류에 따라 수십 일에서 수백 일에 이른다. 초신성의 분광선의 형태와 종류도 다양한데, 그중에서도 수소, 헬륨, 규소 등의 흡수선이나 방출선 존재 여부에 따라 초신성을 분류하기도 한다[표 1].

항성진화이론은 표 1에 제시된 다양한 초신성의 기원을 다음과 같이 성공적으로 설명할 수 있었다. 1) Ia형 초신성은 백색왜성의 핵폭발이며, 백색왜성과 일반 별의 쌍성계에서의 질량 강착이나 두 백색왜성의 병합을 통해 발생한다(Hillebradt & Niemeyer 2000). 2) 나머지 초신성의 대부분은 초기질량이 태양의 8배 이상인 무거운 별들의 최종 진화 단계에서 철 핵이 붕괴하여 발생한다(핵붕괴 초신성; core-collapse supernovae; Woosley et al. 2002). 3) 핵붕괴 초신성의 다양한 종류(IIP/L/b, Ib/c)는 모체에 남아 있는 수소 표피층의 양이 결정한다. 즉,

표 1. 분광 및 광도곡선의 특성에 따른 초신성의 분류.
여기서 분광의 특성은 주로 초신성의 광도가 최대치에 이르게 된 시점의 상황을 설명하는 것이다.

종류	수소선	헬륨선	중요 특징	상대 빈도
Ia	×	×	규소선이 강함	20%
Ib	×	○		8%
Ic	×	×	Ia형에 비해 규소선이 약함 몇몇 감마선 폭발체와 연관성이 발견됨	16%
IIP	○	○	광도의 밝기가 수십 일 동안 일정하다가 후에 감소 (즉, 광도곡선에 plateau가 보임)	47%
IIL	○	○	광도가 최대 밝기 이후 선형적으로 감소	2%
IIb	○	○	초기에는 수소선이 발견되지만 후에는 수소선이 사라지고 Ib형과 유사한 분광 형태를 보임	4%
IIn	○	○	강하고 좁은 수소 방출선이 보임	3%

수소 표피층의 질량이 태양 질량 이상일 경우 광도곡선에서 편평한 부분이 존재하는 IIP 형태이며, 수소 질량이 적어질수록 IIL, IIb, Ib/c의 형태로 나타난다(Heger et al. 2003).

그러나 여전히 풀리지 않는 수수께끼로 남아 있는 부분이 많다. 예를 들면 Ia형 초신성은 우주에서 발생하는 가장 밝은 현상 중의 하나이며, 그 최대 밝기와 그 이후 밝기가 감소하는 비율 간에 상당히 좋은 상관관계가 있기 때문에, 우주론에서 가장 중요한 거리측정 도구이다. 그러나 이 상관관계를 만족스럽게 설명하는 이론은 아직 없다. 무엇보다도 Ia 초신성이 찬드라세카 한계질량에서 폭발하는지, 아니면 더 작거나 큰 질량에서 폭발하는지의 여부와, 폭발을 일으킬 수 있는 백색왜성의 다양한 진화 과정 중에서 어떤 경로가 가장 중요한 것인지 여부가 불분명하다(Hillebrandt & Niemeyer 2000). 모체성의 초기 중원소함량이 Ia형 초신성의 광도변화에 어떤 영향을 주는지도 중요한 연구 주제이다. 핵붕괴 초신성의 경우에도 모체성의 어떤 성질이 Ib형과 Ic형의 차이를 만드는지(Dessart et al. 2012a), 혹은 IIn형의 초신성을 만드는지 등도 활발한 연구 주제이다(Ofek et al. 2014).

지난 10여 년간 초신성 탐사 프로그램이 매우 활발해지면서 표 1에 언급된 일반적인 형태의 초신성뿐만 아니라, 기존의 항성진화 모형으로는 전혀 예측

할 수 없었거나 혹은 매우 특별한 환경에서만 발생할 수 있으리라고 예측되는 특이한 초신성들도 자주 발견되고 있다. 몇 가지 예를 든다면, 감마선 폭발체(gamma-ray bursts; Gehrels et al. 2009), 극단적으로 어둡거나 밝은 Ia형 초신성(cf. Parrent et al. 2014), 초신성의 역학적 에너지가 일반적인 초신성의 10배 이상인 극초신성(hypernovae; cf. Gal-Yam 2012), 질량이 태양의 150배 이상인 별에서 발생하는 짝불안정 초신성(Pair-Instability Supernova; PISN; cf. Gal-Yam 2012) 등이 있다. 이런 특이 형태 초신성 중에는 일반적인 초신성보다 10배에서 100배가 밝은 것들이 많고 심지어 감마선 폭발체의 후광(afterglow)은 초신성보다 100만 배까지 밝은 경우가 있기 때문에 이들 천체의 정체와 발생 기작은 초기우주의 연구에 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

이러한 초신성의 다양성 연구에서 분광관측은 필수적이다. 분광을 통해 일차적으로는 표 1에서 언급한 초신성의 종류를 확인할 수 있을 뿐만 아니라, 초신성 폭발 직후부터 초신성의 가장 중심부가 보이는 성운 단계에 이르기까지의 분광 특성의 변화는 초신성의 모체성의 성질과 폭발 기작에 관한 많은 정보를 담고 있다. 예를 들어, Ia형 초신성이 성운 단계에 이르렀을 때의 분광관측 자료는 백색왜성의 중심부에 중성자 함량이 많은 원소의 존재 여부를 조사할 수 있고(Hoeflich et al. 2004), 이를 통해 Ia형 초신성의 폭발이 백색왜성-백색왜성 쌍성계의 격렬한 병합 과정에서 일어난 것인지, 아니면 비교적 긴 시간에 걸친 질량 강착을 통해 일어난 것인지를 확인할 수 있다. 또 다른 예로는 일반적인 초신성보다 백 배에서 천 배가 밝은 극초신성의 폭발 기작을 밝히는 데에도 분광관측이 필수적이다. 이와 같이 비정상적으로 밝은 초신성의 기원으로 짝불안정(pair-instability) 기작과 매그네타(magnetar) 기작 등이 언급되고 있는데, 짝불안정 초신성은 니켈을 비롯한 다량의 중원소를 만들어내는 반면 매그네타를 통해 만들어지는 극초신성은 일반적인 핵붕괴 초신성의 경우와 크게 다르지 않다(Dessart et al. 2012b). 분광관측은 어떤 종류의 중원소가 초신성에서 만들어졌는지를 가장 직접적으로 확인하고, 이에 관계된 기작이 무엇인지를 판정할 수 있는 가장 중요한 도구이다.

중성자별의 병합이 만드는 적색신성(red nova) 현상처럼 아직 발견되지는 않았지만, 이론적으로는 예측이 되는 현상들을 관측적으로 확인하기 위해서도 분광관측이 중요한 역할을 한다. 광도곡선이나 여러 파장대의 관측에서 얻는 천체의 색지수 정보만으로는 그 정체를 분명하게 판정할 수 없기 때문이다. 특히 중

성자별의 병합은 강력한 중력파를 만들어내는 현상이므로, 이런 연구는 중력파 원의 검증에도 매우 중요하다(Tanaka & Hotokezaka 2013).

초기우주에서 발생하는 초신성의 발견은 최초의 별 탄생과 초기우주의 진화를 연구하는 데 큰 역할을 할 것이다(Yoon et al. 2012). 적색이동이 6-7 이상인 천체에서 발견될 초신성이나 감마선 폭발체의 후광 확인과 이에 대한 분광관측은 매우 도전적인 과제이며, 또 GMT를 이용하여 시도할 수 있는 중요한 연구 주제이다.

2) GMT의 필요성

초신성이나 여러 폭발 현상의 분광관측에 GMT가 필요한 경우는 크게 세 가지이다. 1) 적색이동이 큰 천체에서 발생하는 초신성 및 감마선 폭발체 연구, 2) 비교적 가까운 곳에 발생한 초신성의 성운 단계에서의 분광 연구, 3) 중성자별의 병합이 만들어 내는 적색신성과 같이 비교적 어두운 폭발 현상의 연구 등이다.

예를 들어 짝불안 초신성(PISN)이나 마그네타(magnetar) 초신성들은 매우 드물게 나타나는 현상이다. 따라서 현재까지 대부분의 관측은 적색이동이 비교적 큰 천체에서 발견되었기 때문에 분광관측의 경우 좋은 신호대잡음비를 갖는 자료를 얻기가 매우 어려웠다. 무엇보다 특이한 초신성들의 폭발 기작을 알아내기 위해서는 초신성 방출체의 내부 깊숙한 곳을 연구할 수 있는 성운 단계에서의 분광관측이 매우 중요하지만, 성운 단계에 도달한 시점에서 초신성의 광도는 최대 밝기에 비해 훨씬 어둡기 때문에 거대망원경을 이용한 관측이 필수적이다. Ia형이나 Ib/c형 초신성의 경우도 상황이 비슷하다. Ia 혹은 Ib/c형 초신성에 대한 많은 분광 연구가 존재하지만 대부분은 제한된 시간에 제한된 파장대에서 수행한 관측에 머물러 있고, 광도가 최대에 이르기 전부터 성운 단계에 이르기까지 일관성 있는 분광관측이 진행된 연구는 상대적으로 적다. 가장 큰 이유는 폭발이 일어난 직후와 최대 광도를 지나 성운 단계에 도달했을 때 좋은 신호대잡음비를 갖는 분광관측을 수행하기에는 밝기가 너무 어둡기 때문이다. GMT는 이런 어려움을 극복하게 해줄 것이다. 아울러 적색이동이 매우 큰 초기우주의 초신성 현상 연구, 특히 최초의 별이 만드는 최초의 초신성 발견을 위해서도 GMT가 필수불가결하다.

3) 국내외 연구 동향

한국에서는 초신성의 분광 연구가 미국이나 유럽 등의 선진국에 비해 활발하게 진행되고 있지는 않다. 하지만 서울대학교의 임명신 교수팀이 초신성 및 감마선 폭발체, 그리고 여러 stellar transient를 찾는 연구를 진행하고 있다. 올해 말부터는 KMTNet(Korea Micro- lensing Telescope Network)을 이용한 초신성 탐사 연구(PI: Prof. D-S. Moon)를 활발하게 수행할 예정이고, 이는 한국에서 초신성의 관측 연구가 경쟁력 있는 수준으로 발전할 기회이다. 서울대학교 윤성철 교수팀은 초신성 모체성의 모형 계산 및 초신성의 광도곡선과 스펙트럼의 이론적인 연구를 진행 및 계획 중에 있다. 이를 통해 축적될 경험과 인력은 GMT를 이용한 초신성의 분광 연구를 수행할 수 있는 발판이 될 것이다. 아울러 GMT가 가동을 시작한 직후인 2022년경에는 LSST(Large Synoptic Survery Telescope)가 가동할 예정이며 여기서 발견될 수많은 초신성이나 transient들 중에서 다양하고 흥미로운 GMT 분광관측 관측 대상을 선택할 수 있을 것으로 예측된다. 또 서울대 이형목, 임명신 교수팀을 중심으로 Advanced LIGO와 같은 차세대 중력파 탐사 프로그램을 통해 중성자별의 병합과 같은 중력파원을 광학적으로 찾는 일을 계획 중에 있으며 이런 연구에서도 GMT가 큰 역할을 할 것이다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

분광관측은 장차 있을 LSST나 혹은 기타 초신성 및 transient, 중력파 탐사 등을 통해 발견될 다양한 폭발 현상들 중에서 1) 적색이동이 매우 큰 천체($z > \sim 1$)에서 발생하는 초신성이나 감마선 폭발체의 후광, 2) 장차 있을 중력파 관측과 연계하여 중력파원과 연관이 있을 것으로 추측되는 transient, 3) 그리고 비교적 가까운 곳에서 발생한 초신성 중에서 특별히 성운 단계에 도달했을 때 고분산 분광관측이 필요하다고 판단되는 현상을 우선적으로 선별하여 분광관측을 시도할 것이다. LSST의 경우는 1년에 25만 개 이상의 초신성을 발견할 것으로 예상이 되며, 일반적인 초신성의 100배 이상 밝은 특이한 것들은 광도가 최대에 이르렀을 때 적색이동이 2 정도까지의 체적 내에서 GMT로 일 년에 1,000개 정도

가 원칙적으로 관측이 가능할 것이다. 물론 초신성 탐사에서 발견될 확률은 이보다는 적을 것이고 탐사 프로그램에 따라 큰 차이가 있을 것이다. 중력파원의 후보인 중성자별의 병합은 200Mpc 이내에서 1년에 약 3번 발생하리라 추측된다.

2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

초신성은 매우 빠르게 팽창하는 천체로(v=~10000km/s), 대부분의 흡수선들은 특별한 경우를 제외하고는 넓은 선폭을 가지고 있다. 일반적으로 초신성 관측에 필요한 분광분해능은 100-300km/s이며 이는 약 R=2000에 해당한다. 초신성 분광에는 GMACS가 허용하는 모든 파장대에서 중요한 흡수선 또는 방출선들이 존재한다. 350nm-1030nm에 걸친 관측을 통해 약한 선들을 분석하기 위해서는 S/N=10-20 정도의 자료가 필요하며 이에 필요한 관측 시간은 등급이 24-26인 경우 약 1시간이다. 물론 구체적인 값들은 선별된 대상에 따라 조금씩 조정해야 할 것이다. 적색이동이 큰 천체(z~1)에서 발견될 매우 밝은 초신성들의 경우는 GMACS가 관측할 수 있는 파장대에는 철, 칼슘, 산소, 실리콘의 흡수선들이 존재할 것으로 보인다(Dessart et al. 2012b). Ic형 초신성의 모체성 표면에 헬륨의 존재 여부를 알려줄 헬륨선은 약 1.1μm에 위치해 있고(Dessart et al. 2012a), 중성자별의 병합이 일으키는 적색신성의 경우에는 0.7~1.8μm 영역에서 여러 중원소들의 흡수선들이 중첩된 매우 넓은 흡수선이 발견될 것으로 예측되기 때문에(Tanaka & Hotokezaka, 2013) GMACS에 NIR-arm으로 관측한 자료가 특별히 더 흥미로운 결과를 줄 것이다. 선별된 초신성들이 최대 밝기에 이르기 전부터 시작하여 성운 단계에 이르기까지 약 4-6단계에 걸쳐 분광관측을 할 수 있다면 일관된 진화의 양상을 살필 수 있을 것이다. 물론 초신성의 적색이동이 예외적으로 큰 천체에서 발견되는 경우는 성운 단계까지의 관측은 힘들 것이며, 이 경우는 관측이 가능한 순간까지만 분광관측을 시도할 것이다.

예외적으로 G-CLEF를 이용한 고분산 분광관측이 필요한 현상들도 있다. 감마선 폭발체 후광의 스펙트럼에는 은하 간 물질들이 만들어내는 Lyα선과 수많은 좁은 흡수선들이 존재하며 적색이동이 매우 큰 천체(z > ~6)를 관측하는 경우 이를 통해 초기우주의 재이온화 과정과 중원소함량에 관한 정보를 얻을 수 있다(Kawai et al. 2006). 특히 G-CLEF를 이용하여 Lyα선을 보는 것은 적색이동이 약

7인 천체까지 가능하고 Lyβ선의 경우는 약 8.6 정도가 한계이다. Lyα선보다 좀 더 긴 파장대에 존재하는 여러 흡수선들(Si II, S II, O I, C II)은 좀 더 작은 적색이동 ($z < 7$)에서만 가능하다. 따라서 적색이동이 6-8인 천체에서 발생하는 감마선 폭발체 후광 관측은 G-CLEF의 좋은 관측 대상이다. 비교적 가까운 은하에서 발생한 초신성들의 경우도 성운 단계가 상당히 진행되었을 때 G-CLEF를 이용한 고분산 분광관측을 하는 것 역시 매우 흥미로운 연구일 것이다. 예를 들어 Ia형 초신성의 모체성이 주계열성 또는 거성과 백색왜성으로 구성된 쌍성계인 경우, 초신성 방출체의 중심부에 적지 않은 양의 수소가 존재할 수 있고 이는 성운 단계에서 매우 좁은 형태의 Hα 방출선으로 나타날 수 있다(Lundqvist et al. 2013). 이런 관측에는 약 $R = 40000$ 정도의 분해능이 필요하다.

4. 연구 결과의 기대 성과

이 연구를 통하여 적색이동이 큰 초신성들의 분광학적 성질을 조사하고, 그 결과를 가까운 우주에서 발생하는 초신성들의 특성과 비교하는 것은 항성진화이론 및 우주의 별 형성 역사를 이해하는 데 큰 진보를 줄 것이다. 무엇보다 적색이동이 큰 천체에서 발생하는 초신성들의 종류에 따른 발생 빈도가 현재의 우주와 유의미하게 다르다면, 이는 별의 형성률, 중원소함량에 따른 별의 진화 효과 등에 관해 중요한 정보를 줄 것이다. 초신성의 성운 단계 관측은 Ib와 Ic형의 모체성 성질이 어떻게 다른지, 또 Ia형의 경우 그 모체성이 주로 백색왜성의 병합을 통해 발생하는지, 아니면 주계열성이나 거성으로부터 질량을 강착하는 백색왜성을 통해 발생하는지 여부를 알려줄 것이다.

이 연구의 주 대상 중의 하나인 매우 밝은 초신성(super-luminous supernovae)의 정체는 여전히 분명하지 않으며 분광관측을 통한 모체성의 성질 조사는 이와 같은 초신성의 폭발 기작에 관한 중요한 정보를 줄 것이다. 아울러 이렇게 밝은 초신성들과 초기우주에서 자주 발생하리라 예상되는 짝불안정 초신성(pair-instability supernovae)과의 연관성을 밝히는 것은 중원소함량이 낮은 별들의 생성과 진화에 관하여 중요한 제한조건을 줄 것이다.

이런 종류의 초신성들은 매우 밝기 때문에 초기우주의 탐사에 중요한 역할을

할 것이다. 무엇보다도 이 연구의 결과로 최초의 별이 형성된 영역에 근접한 초기우주(z > ~6-7)에서 폭발한 초신성들이 발견되고 그들의 분광학적 특성을 조사할 수 있다면, 우리는 초기우주에서 어떠한 종류의 별들이 생성되었는지를 추측할 수 있고, 또 이를 통해 초기우주의 별 형성 역사와 초신성에 의한 초기우주의 화학적 진화를 연구할 수 있을 것이다. 더 나아가 최초의 별이 적색이동 10 이상에서 폭발한 순간을 포착할 수 있다면, 이는 천문학사에 큰 획을 긋는 역사적인 사건일 것이다.

마지막으로 중성자별의 병합이 만들어내는 적색신성이나 무거운 별의 병합이 만들어내는 약한 폭발 등, 천체물리학적으로 중요한 현상이지만 아직 발견되지 않은, 비교적 어두운 transient들의 관측적 확인은 그 자체로 큰 의미를 갖는다. 예를 들어 중성자별의 병합은 현재 r-process로 만들어지는 중원소의 주요한 근원으로 믿어지고 있기 때문에, 적색신성의 발견을 통해 r-process 원소의 생성 현장을 확인할 수 있다면 우주의 화학적 진화의 큰 난제 하나를 해결하는 데 일조할 것이며 아울러 중력파원의 정체를 확인하는 중요한 일일 것이다.

5. 인용문헌

Dessart, L., Hiller, D.J., Li, C., Woosley, S.E., 2012a, MNRAS, 424, 2139

Dessart, L., Hillier, D.J., Waldman, R., Livne, E., & Blondin, S., 2012b, MNRAS, 426, 76

Gal-Yam, A., 2012, Science, 337, 927

Gehrels, N., Ramirez-Ruiz, E., & Fox, D.B., 2009, ARA&A, 47, 567

Heger, A., Fryer, C.L., Woosley, S.E., Langer, N., & Hartmann, D.H., 2003, ApJ, 591, 288

Hillebradt, W., & Niemeyer, J.C., 2000, ARA&A, 38, 191

Hoeflich, P., Gerardy, C.L., & Nomoto, K., et al. 2004, ApJ, 617, 1258

Kawai et al. 2006, Nature, 440, 184

Lundqvist, P., Mattila, S., & Sollerman, J., et al., 2013, MNRAS, 435, 329

Ofek, E.O., Sullivan, M., & Shaviv, N.J., et al., 2014, ApJ, 789, 104

Parrent, J., Friesen, B., & Parthasarathy, M., 2014, Ap&SS, 351, 1

Tanaka, M., & Hotokezaka, K., 2013, 775, 113

Woosley, S.E., Heger, A., & Weaver, T.A., 2002, Reviews of Modern Physics, 74, 1015
Yoon, S.-C., Dierks, A., & Langer, N., 2012, A&A, 542, 113