제Ia형 초신성과 우주 폭발 현상들

DOI: 10.3938/PhiT.20.055

임 명 신

Type-Ia Supernovae and Explosions in the Universe

Myungshin IM

Type-Ia supernovae lie at the center of the research that established the acceleration of the universe. Here, I introduce what supernovae are, and how we classify different kinds of supernovae. Then, the property of the light curve of Type-Ia supernovae is described, with an emphasis on the light curve property that made it possible to use Type-Ia supernovae as standardized candles for an observational study of the acceleration of the universe. I also mention recent interesting research activities on supernovae and other explosions in the universe, such as the recent discovery of the Type-Ia supernova in a nearby galaxy M101, and the study on the origin of cosmic dust in the universe by using a gamma-ray burst.

초신성의 종류와 발생 기작

초신성이란 별이 폭발하면서 죽을 때 밝게 빛나는 현상을 뜻한다. 예로부터 우리나라에서도 객성이라는 이름으로 초신성이 관측이 되었으며, 1604년(선조 37년)에 나타나 그 광도

저자약력

임명신 교수는 서울대학교 물리학과를 졸업한 후(1990), 미국 존스홉킨스 대학에서 천문학 이학박사학위를 취득하였다(1995). 우주망원경연구소와 릭천문대 포스트닥, 칼텍 Spitzer 적외선우주망원경연구소 선임연구원을 거쳐 현재 서울대학교 물리천문학부 천문전공에 재직 중이다. 2008년 6월부터 초기우주천체연구단(창의적연구진흥사업)을 이끌고 있다.
(mim@astro.snu.ac.kr, <http://ceou.snu.ac.kr>)

변화와 하늘에서의 위치가 조선왕조실록에 상세히 기록된 일명 ‘케플러 초신성’은 그 좋은 예이다. 별은 질량에 따라 죽는 모습이 다른데 죽는 모습에 따라 그 종류를 크게 제Ia형 초신성과 제II형 초신성으로 대표되는 핵붕괴형 초신성(core-collapse supernova)으로 나눌 수 있다.

태양보다 약 8배 이상 무거운 별은 핵붕괴형 초신성(Core-collapse Supernova)이라는 폭발로 생을 마감하게 된다(그림 1, 아래 패널). 무거운 별을 자체중력에 의한 붕괴로부터 지켜주는 것은 별 내부의 핵융합 반응에 의하여 생기는 에너지이다. 그러나 별 중심부의 핵융합과정이 한 단계씩 진행되다

(a) Type-I Supernova

(b) Type-II Supernova

Fig. 1. A picture describing two different mechanisms for supernova explosion. Type-Ia supernova explosion occurs in a binary star system (the upper panel). After a more massive star evolves into a white dwarf, the white dwarf gets ignited when it engulfs too much material from its companion star (possibly a red giant or a main sequence star). On contrary, Type-II supernova explosions occur by a core-collapse of a massive star (more than 8 times more massive than the Sun) [Taken from “Astronomy Today 2e” (1997) by Chaisson & McWilliam]. [초신성의 발생기작 두 가지. 제Ia형 초신성은 태양경도의 질량을 가지고 있는 비교적 가벼운 별들이 쌍으로 있을 때 일어난다(위 패널). 쌍성을 이루는 한 별이 먼저 진화하여 백색왜성이 되면 뒤이어 진화하고 있는 별(적색거성이나 주계열성)의 대기를 빨아들이게 된다. 이 때 질량유입이 너무 급격하게 이루어지면 백색왜성의 폭발이 일어나게 된다. 반면, 핵붕괴형 초신성(예: 제II형 초신성)의 경우 태양보다 8배 이상 무거운 별의 중심핵이 붕괴하면서 초신성 폭발이 일어난다.]

Fig. 2. Supernova classification. The supernovae are classified into Type-I and Type-II depending on the existence of Hydrogen absorption line in their spectra. The detailed classification is done from metal spectral lines or the light curve shape [From K-band Arcetri Obscured Supernova Search (<http://www.arcetri.astro.it/science/SNe/intro.html>)]. [초신성 분류법. 초신성은 스펙트럼에 수소 흡수선이 안보이나 보이냐에 따라 제I형과 제II형 초신성으로 나누어진다. 이 분류는 더 무거운 원소들의 흡수선 유무나 광도곡선의 모양에 따라 더 세분화되기도 한다.]

가 매우 안정된 원소인 철이 만들어지는 단계에 이르게 되면 더 이상 핵융합에 의한 에너지 생성이 일어나지 않게 된다. 그렇게 될 경우 중심핵 주변 물질들이 중력에 의하여 광속에 가까운 매우 빠른 속력을 가지고 중심부로 떨어지는데 이렇게 떨어진 물질들은 단단한 중심핵과 충돌하면서 충격파를 만들어 낸다. 이 충격파로 인하여 별이 파괴되고 초신성 폭발이 일어나게 된다. 초신성 폭발 이후 별의 중심핵은 중성자별이나 블랙홀로 남게 된다. 무거운 별들은 중심부 질량밀도와 온도가 매우 높아 핵융합을 위한 연료들을 빨리 소진하기 때문에 비교적 빨리(약 1백만 년에서 1억 년 사이) 그 생을 마감하게 된다. 그러한 이유 때문에 핵붕괴형 초신성은 젊은 별들이 태어났다 곧 소멸되는 일이 다반사로 일어나는 지역에서 자주 발견되며(별 형성 지역이라고 한다), 그 외에도 우주의 나이가 매우 적은 시기에도 존재했을 것으로 보이는 천체라 할 수 있다. 핵붕괴형 초신성은 제Ia형, 제Ic형, 제IIP형, 제IIIn형 등 그 종류가 매우 다양하다(그림 2).

반면 태양과 비슷한 수준의 질량을 가진 비교적 가벼운 별들은 초신성 폭발이 없이 차츰차츰 식은 후 전자의 축퇴압(degenerate pressure)으로 그 크기가 지탱되는 백색왜성으로 생을 마감한다. 그러나 두 개의 가벼운 별들이 함께 있는 쌍성(binary star)에서는 백색왜성이 아니라 초신성 폭발이 별 진화의 종착역이 될 수 있다. 이렇게 쌍성에서 나타나는 초신성을 제Ia형 초신성이라고 부른다. 제Ia형 초신성이 일어나는 기작은 다음과 같다(그림 1 위 패넬). 별은 질량이 클수

록 더 빨리 진화를 하기 때문에, 태양만한 크기의 별들로 이루어진 쌍성의 경우 쌍성을 이루는 두 개의 별들 중 더 무거운 별이 먼저 진화를 하여 탄소를 주성분으로 하는 백색왜성이 된다. 반면 동반성은 느리게 진화하다가 밀도가 낮으나 그 크기는 매우 큰 적색거성(태양의 경우 적색거성이 되면 지구 궤도 이상으로 그 크기가 증가한다)으로 변하는데, 부풀어 오른 적색거성의 항성대기는 중력에 의하여 백색왜성으로 끌려 들어가게 된다(이를 질량유입 현상이라고 한다). 항성대기의 유입이 급속하게 일어나면, 백색왜성은 질량증가 속도를 이겨 내지 못하고 구조적으로 불안정한 상태가 되면서 폭발하게 되는데, 이것이 제Ia형 초신성이다. 이 설명에서는 늦게 진화한 동반성이 적색거성으로 변한 후 그 옆의 백색왜성에서 초신성 폭발이 일어난다고 하였으나, 쌍성을 이루는 두 개의 별들이 충분히 가까이 있을 경우에는 가벼운 쪽 별이 적색거성으로 변하기 이전에도 백색왜성으로의 질량유입이 이루어지면서 초신성 폭발이 일어날 수도 있다. 즉 주계열성이라고 하는 적색거성 이전 단계의 동반성을 가진 백색왜성도 제Ia형 초신성으로 죽음을 맞이할 수 있다는 것이다. 제Ia형 초신성 폭발이 일어나면 백색왜성은 산산조각이 나는 것으로 알려져 있다. 태양보다 8배 이하의 질량을 갖는 가벼운 별들이 백색왜성이 되려면 꽤 오랜 기간이 소요되기 때문에 (약 수억 - 10억 년 이상), 제Ia형 초신성은 별이 활발하게 생성되고 있는 은하 외에도 나이 많은 별들로만 이루어진 타원은하에서도 관측이 된다. 제Ia형 초신성의 최대밝기는 보통 은하 한 개의 밝기와 거의 맞먹을 정도로 매우 밝은데, 이것은 제II형 초신성보다 1등급(약 2.5배) 정도 더 밝은 수준이다.

초신성을 제I형과 제II형으로 분류하는 것은 초신성의 스펙트럼에 수소원자의 흡수선이 보이냐 안보이나에 따라 이루어진다. 즉 수소의 흡수선이 보이지 않으면 제I형 초신성, 보이면 제II형 초신성으로 분류하게 된다(그림 2). 제I형 초신성은 제Ia, 제Ib, 제Ic로 세분화되는데 이때 기준은 헬륨(He), 규소(Si)와 같이 수소보다 무거운 원소들의 흡수선 유무가 된다. 관측연구가 활발히 진행되면서 초신성의 종류는 아직도 계속 세분화되고 있는 추세이다. 세부적인 분류는 이렇게 스펙트럼에 나타나는 원소 흡수선에 바탕을 두지만 앞서 언급한 바와 같이 실제 초신성 형성 기작을 가지고 분류를 하게 된다면 초신성들을 제Ia형과 핵붕괴형 초신성(제Ib 및 제Ic형 초신성 포함)으로 나누는 것이 더 타당하다고 할 수 있겠다.

초신성들은 발생 직후 서서히 밝아지고 2 - 3주 후에 최대 밝기를 갖게 되며, 그 후 다시 어두워지게 된다. 초신성의 밝기가 시시각각 변하는 모양을 광도곡선이라고 하는데, 초신성의 종류에 따라 광도곡선의 모양이 결정된다. 특히 제II형 초신성의 세부류는 광도곡선의 모양에 의존하게 되는데, 최대광

도에 다다른 후 광도가 선형적으로(linear) 꾸준히 어두워지는 제II형 초신성은 제III형(여기서 L은 Linear의 머리글자) 초신성, 밝기가 어두워지다가 거의 일정한 밝기를 오랫동안 유지하게 되면(plateau) 제III형(여기서 P는 Plateau의 머리글자) 초신성으로 종류를 세분하게 된다.

제Ia형 초신성이 밝게 빛나기 위한 에너지원은 초신성 폭발 때 만들어지는 철보다 무거운 방사선 동위원소, 특히 니켈(Ni)과 코발트(Co)의 방사선 붕괴이다.^[1-3] 초신성 폭발 초기에는 니켈의 붕괴에 의하여 빛나다가, 후기에 가면 니켈의 붕괴로 생겨난 코발트가 방사선 붕괴 에너지원을 대체한다. 이러한 밝기 변화는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 어느 정도 설명이 가능한 수준이 되었다.

제Ia형 초신성의 광도곡선

우주의 가속팽창연구에 사용된 제Ia형 초신성의 경우에는 그 최대밝기가 비교적 일정하다는 것이 알려져 있는데, 왜 그런지는 아직 속 시원하게 밝혀지지는 않았다. 일단 백색왜성의 최대 질량이 태양의 약 1.4배(찬드라세카르 한계라고 부른다)를 넘어서는 순간에 이러한 일이 일어나기 때문에 최대 밝기가 비슷하게 나타나는 것으로 보인다. 광도곡선의 최대 밝기는 제Ia형 초신성마다 조금씩 다른데, 이것은 백색왜성을 이루는 탄소원자의 함량에 따라 결정이 되는 것으로 추정된다. 광도곡선의 폭과 최대밝기 사이에 상관관계가 있다는 점이 경험적으로 알려져 있으며 이 상관관계는 우주의 가속팽창을 밝혀내는 데 매우 중요한 역할을 하였다.^[4-7] 최대밝기가 일정할 경우 이로운 점은 이것을 소위 표준광원(standard candle)이라고 하는, 멀리 있는 천체까지의 거리를 재는 도구로 사용할 수 있다는 점이다. 천체의 밝기는 거리의 제곱에 반비례한다는 것을 알고 있기 때문에 원래 밝기만 제대로 알고 있다면 천체의 겉보기 밝기로부터 그 천체의 거리를 알아낼 수 있다. 따라서 멀리 있는 천체를 연구하는 관측 우주론에서 표준광원은 매우 중요한 도구이다. 그림 3은 이 점을 잘 보여준다. 그림 3의 위 패널은 여러 개의 제Ia형 초신성 광도곡선을 보여준다. 이 그림으로부터 제Ia형 초신성 광도곡선은 다양한 최대밝기를 가지고 있음을 알 수 있는데, 이 때문에 얼핏 보면 Type-Ia 초신성은 표준광원으로는 부적합하다는 결론을 내릴 수도 있다. 그렇지만 그림 3, 위 패널을 자세히 살펴보면 광도곡선의 폭이 넓을수록 초신성의 최대밝기가 더 크다는 경향성을 볼 수 있다. 실제로 이에 대한 정량적인 분석을 한 결과 최대밝기와 광도곡선의 폭 사이에는 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 최대밝기와 광도곡선의 폭에 대한 상관관계 보정을 한 후 광도곡선을 그린 것이 그림 3의

Fig. 3. Light curves of Type-Ia supernovae. The upper panel shows that the light curves can have a variety of shapes and the maximum brightnesses. The bottom panel shows the light curves modified taking into account the correlation between the maximum brightness and the light curve width. After the modification, the maximum brightness of different supernovae is standardized, which allowed the use of the Type-Ia supernovae to study the acceleration of the universe [Perlmutter, Physics Today (2003)]. [제Ia형 초신성의 광도곡선. 위 패널은 제Ia형 초신성들이 다양한 광도곡선모양과 최대밝기를 가질 수 있음을 보여준다. 아래 패널은 이렇게 다양한 광도곡선을, 광도곡선의 폭과 최대밝기 사이의 상관관계를 이용하여 보정한 후의 모습을 보여준다. 이러한 보정을 거친 광도곡선은 거의 일정한 최대밝기를 가지게 되는데, 이렇게 “표준화”된 광도곡선을 사용하여 우주의 가속팽창에 대한 연구가 이루어졌다.]

아래 패널이다. 놀랍게도 이 보정 후에는 제Ia형 초신성의 다양한 최대밝기가 한 값으로 통일됨을 알 수 있다. 즉 제Ia형

REFERENCES

- [1] S. A. Colgate and C. McKee, *Astrophysical Journal* **157**, 623 (1969).
- [2] R. P. Kirshner and J. B. Oke, *Astrophysical Journal* **200**, 574 (1975).
- [3] R. Barbon, E. Cappellaro and M. Turatto, *Astronomy & Astrophysics* **135**, 27 (1984).
- [4] M. M. Phillips, *et al.*, *Astrophysical Journal Letters* **413**, L105 (1993).
- [5] M. Hamuy, *et al.*, *Astronomical Journal* **109**, 1 (1995).
- [6] A. G. Riess, W. H. Press and R. Kirshner, *Astrophysical Journal Letters* **483**, L17 (1995).
- [7] S. Perlmutter, *et al.*, *Astrophysical Journal* **483**, 565 (1997).

초신성은 표준광원로는 사용이 부적합하더라도 표준화된 광원(standardized candle)로는 사용이 가능하다는 결론을 내릴 수 있다. 이번에 노벨상을 받은 두 그룹은 제Ia형 초신성이 표준화된 광원으로 사용될 수 있다는 점을 알아내면서 제Ia형 초신성을 이용한 거리 측정법의 정밀도를 획기적으로 향상시킬 수 있었고 이를 수십억 광년 떨어진 곳에 있는 제Ia형 초신성들까지의 거리 측정에 사용함으로써 우주의 가속팽창 사실을 확립할 수 있었다.^[8-10] 제Ia형 초신성을 좀 더 잘 표준화하여 멀리 있는 천체까지의 거리를 더 정밀하게 측정하려는 노력들은 아직도 계속 되고 있다. 예컨대 초신성 주위의 공간먼지 때문에 초신성 빛이 가려져서 초신성의 정확한 밝기측정이 어려울 수도 있는데 근적외선에서의 관측이 이루어지게 되면 공간먼지 때문에 일어나는 소광효과를 최소화시킬 수가 있어 거리 측정의 정밀도를 더욱 높이는 것이 가능해진다. 실제로 근적외선에서의 광도곡선을 연구해보면 근적외선에서의 제Ia형 초신성의 최대밝기는 광도곡선의 폭과 상관이 없다는 흥미로운 연구결과도 발표되고 있다.^[11] 그 외에도 제II형 초신성을 표준광원으로 사용하려는 노력들도 있으나 현재까지의 연구결과에 따르면 제II형 초신성을 가지고는 제Ia형 초신성을 이용한 방법만큼 정밀한 거리측정이 불가능하다는 것이 중론이다.^[12]

M101은하에 나타난 제Ia형 초신성

제Ia형 초신성을 표준화된 광원으로 이용한 연구로 우주의 가속팽창이라는 사실이 밝혀지기는 하였으나 아직도 제Ia형 초신성에 대해서 모르는 것이 많다. 은하의 종류에 따라 제Ia형 초신성의 성질이 약간씩 다르다는 연구결과가 있는가 하면 최대밝기와 광도곡선의 폭 사이의 관계에 대해서도 좀 더 이론적인 정비가 필요하다. 또한 제Ia형 초신성이 터지기 전 쌍성의 모습은 아직까지 관측이 되지 않았기 때문에 제Ia형 초신성 모형에 대한 검증도 덜 된 상태라고 할 수 있다.

상황이 그러하기에 제Ia형 초신성에 대한 연구는 아직도 활발히 진행되고 있다. 특히 매우 가까운 곳에서 제Ia형 초신성이 나타날 경우 제Ia형 초신성을 상세하게 연구할 수가 있어 유용한데, 그러한 기회가 우연히도 이번 노벨물리학상 발표가 있기 약 1달 전 다가왔다. 2011년 8월 24일(세계시 기준), Palomar Transient Factory라는 연구그룹은 우리로부터 불과 2000만 광년이라는 매우 가까운 곳(!)에 위치한 M101 은하에 초신성이 나타난 것을 발견하였다.^[13] 8월 23일까지는 사진에 없던 천체가 그 다음 날 사진에는 선명하게 보였던 것이다(그림 4 참조). 후속관측 연구 결과, 이것이 제Ia형 초신성임이 밝혀졌고 그 후로부터 우리나라를 포함하여 세계각

Fig. 4. A CCD image of a recently discovered Type-Ia supernova in M101 galaxy (the left figure). The picture was taken at the campus observatory of the Seoul National University. The analysis of the Type-Ia supernova light curve by the SNU research team shows that the supernova is a very normal Type-Ia supernova. [최근 발견된 제Ia형 초신성의 사진(왼쪽 그림). 가까운 곳에 있는 M101이라는 은하에 나타난 초신성이며, 이 사진은 서울대학교 관악캠퍼스에 있는 24인치 망원경으로 촬영되었다. 서울대학교 연구팀이 이 초신성의 광도곡선을 분석한 결과는 매우 평범한 제Ia형 초신성임을 알 수 있었다.]

지에서 이 초신성에 대한 후속관측연구가 진행 중에 있다.

이렇게 가까운 곳에서 제Ia형 초신성이 발견된 것은 거의 40년만의 일이며, digital media가 발달하여 관측 자료를 정밀하게 분석할 수 있게 된 이후로는 처음 있는 일이다. 1987년 그보다 더 가까운 곳 마젤란 성운에서 초신성이 발견된 적이 있으나(SN1987A), 그것은 제II형 초신성이었다. M101 은하에 나타난 초신성의 연구를 통하여 알 수 있었던 매우 흥미로운 사실은 이 초신성은 적색거성-백색왜성 쌍성계가 아니라 주계열성(보통 별)과 백색왜성으로 이루어진 쌍성에서 일어난 사건이라는 점이다.^[13,14] 그 동안 제Ia형 초신성이 터지기 전의 모습에 대한 여러 모형이 있었지만 그 중 한 모형에서 예측하는 초신성 모태 별들을 처음으로 관측으로 확인을 할 수 있었던 것이다. 우리나라에서도 서울대학교 관악캠

REFERENCES

- [8] S. Perlmutter, *et al.*, *Astrophysical Journal* **517**, 565 (1999).
- [9] A. G. Riess, *et al.*, *Astronomical Journal* **116**, 1009 (1998).
- [10] B. P. Schmidt, *et al.*, *Astrophysical Journal* **507**, 46 (1998).
- [11] W. M. Wood-Vasey, *et al.*, *Astrophysical Journal* **689**, 377 (2008).
- [12] M. Hamuy and P. A. Pinto, *Astrophysical Journal Letters* **566**, L63 (2002).
- [13] P. Nugent, *et al.*, "Supernova 2011fe from an Exploding Carbon-Oxygen White Dwarf Star", 2011arXiv1110.6201N (2011).
- [14] X. Wang, *et al.*, "Evidence for Type Ia Supernova Diversity from Ultraviolet Observations with the Hubble Space Telescope", 2011arXiv1110.5809W (2011).

퍼스에 있는 소형망원경을 비롯한 여러 망원경들이 이 초신성 관측을 하고 있으며, 현재까지 얻어진 자료를 분석한 결과 M101 초신성은 매우 평범한 Type-Ia 초신성임을 알 수 있었다. 앞으로도 이 초신성에 대한 관측은 10년 이상 계속될 것으로 보인다.

초신성과 관련이 있는 우주폭발들

제Ia형 초신성 말고도 흥미로운 우주의 폭발들은 여럿이 있다. 그 중 매우 재미있는 것이 감마선 폭발(Gamma Ray Burst)이다. 1960년 대 후반 소련(현 러시아)의 비밀 핵실험을 감시하기 위하여 발사된 감마선 폭발 탐지 위성이 지구가 아닌 우주에서 오는 감마선 폭발을 탐지함으로써 감마선 폭발천체의 존재사실이 처음으로 밝혀졌다.^[15] 특히 많은 감마선 폭발들이 제Ib형 또는 제Ic형 초신성을 동반한다는 사실로부터 대부분 감마선 폭발은 무거운 별이 죽을 때 일어나는 현상인 것으로 믿어지고 있다.^[16,17] 감마선 폭발은 순간적으로나마 우주의 모든 은하에서 오는 빛을 합한 것에 버금가는 정도로 매우 밝게 빛나는 천체라 백억 광년 이상 떨어진 곳에 있어도 비교적 작은 연구용 1 m급 망원경을 사용한 관측이 가능하다.^[17,18] 따라서 감마선 폭발은 초기우주를 연구하는 데 매우 요긴하게 사용된다. 감마선 폭발을 표준광원으로 사용하려는 노력들이 있지만^[19] 지금까지의 연구결과에 따르면 감마선 폭발을 이용한 거리측정 방법은 아직까지 제Ia형 초신성을 이용한 방법만큼 정밀하지 않다는 것이 알려져 있다.^[20] 그러나 우주초기에서 일어난 감마선 폭발을 이용하면 다른 흥미로운 사실들을 알 수 있는데, 그 중 하나가 우주먼지의 기원이다.

우주에는 지상에서와 같이 많은 먼지가 있는데, 그것의 주된 기원은 별의 진화 후기에 일어나는 질량방출 현상이다. 그러나 별들이 질량방출을 할 수 있을 만큼 진화하려면 10억 년 가량의 세월이 지나야 하기 때문에 초기우주 우주먼지의 기원에 대한 의견이 분분하였다. 그러나 필자의 연구진은 최근 지구로부터 약 120억 광년 떨어진 곳에 있는 GRB 071025라는 감마선 폭발을 이용한 연구 결과 초기우주의 먼지는 태양보다 수십 배 무거운 별이 핵붕괴형 초신성으로 생을 마감하면서 생성되었다는 사실을 밝힘으로서 초기우주 먼지의 기원에 대한 해답을 제공하였다.^[21] 그 외에도 감마선 폭발 현상은 우주의 별 탄생 역사나, 초기우주의 물질 상태, 지금까지 알려지지 않았던 방법으로 죽는 별들의 모습, 우주 최초의 별들의 성질 등 여러 가지 천문학 난제를 풀기 위한 도구로 활발하게 사용되고 있어 앞으로도 이를 이용한 많은 흥미로운 연구결과들이 발표될 것으로 전망된다.

REFERENCES

- [15] R. W. Klebesadel, I. B. Strong and R. A. Olsen, *Astrophysical Journal* **183**, L85 (1973).
- [16] T. J. Galama, *et al.*, *Nature* **395**, 670 (1998).
- [17] K. Iwamoto, *et al.*, *Nature* **395**, 672 (1998).
- [18] D. A. Frail *et al.*, *Astrophysical Journal Letters* **562**, L55 (2001).
- [19] L. Amati *et al.*, *Astronomy & Astrophysics* **390**, 81 (2002).
- [20] Y. Urata, K. Huang, M. Im, *et al.*, *Astrophysical Journal* **706**, L183 (2009).
- [21] M. Jang, M. Im, I. Lee, *et al.*, *Astrophysical Journal Letters* **741**, L20 (2011).