

감마선 폭발체의 생성 환경: 에너지 영역별 잔유휘광의 거리 분포 비교

김성은[†], 장현영
경북대학교 자연과학대학 천문대기과학과

GAMMA-RAY BURST FORMATION ENVIRONMENT: COMPARISON OF REDSHIFT DISTRIBUTIONS OF GRB AFTERGLOWS

Sung-Eun Kim[†] and Heon-Young Chang

Dept. of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
E-mail: einshu@mail2.knu.ac.kr

(Received August 5, 2005; Accepted September 1, 2005)

요 약

감마선 폭발체는 1973년 처음으로 알려진 후 현재까지 많은 과학자들에 의해 연구되고 있다. 짧은 지속 기간을 가진 감마선 폭발체에 비해 비교적 긴 시간 척도를 가진 잔유휘광의 분광 분석 자료는 감마선 폭발체 생성 환경 연구에 중요한 정보를 제공한다. 그러나, 모든 감마선 폭발체에서 모든 영역의 잔유휘광이 관측되는 것은 아니다. 전파나 엑스선 영역의 잔유휘광 관측 불능은 검출기나 광대역 모니터의 한계로 인한 문제로 보고 있으며, 광학 잔유휘광 관측 불능은 광원내부 또는 소속 은하내의 먼지 그리고 성간 매질의 흡수에 의한 것으로 보고 있다. 우리는 이러한 잔유휘광이 관측되지 않은 경우에 대해 의문을 가지고, 광학 관측으로 거리가 정해진 감마선 폭발체의 거리에 따른 에너지 영역별 잔유휘광 개수 분포를 비교 분석해 보았다. 그 결과 우리는 엑스선 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들이나 광학 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들의 거리 분포가 같다는 것을 알 수 있었다. 이같은 결과로부터 우리는 광학 잔유휘광이 성간 물질에 의한 소광으로 관측되지 않을 수 있다는 이론은 타당치 못하다는 결론을 주장해 본다.

ABSTRACT

Since gamma-ray bursts (GRBs) have been first known to science societies in 1973, many scientists are involved in their studies. Observations of GRB afterglows provide us with much information on the environment in which the observed GRBs are born. Study of GRB afterglows deals with longer timescale emissions in lower energy bands (e.g., months or even up to years) than prompt emissions in gamma-rays. Not all the bursts accompany afterglows in whole ranges of wavelengths. It has been suggested as a reason for that, for instance, that radio and/or X-ray afterglows are not recorded mainly due to lower sensitivity of detectors, and optical afterglows due to extinctions in intergalactic media or self-extinctions within a host galaxy itself. Based on the idea that these facts may also provide information on the GRB environment, we analyze statistical properties of GRB afterglows. We first select samples of the redshift-known GRBs according to the wavelength of afterglow they accompanied. We then compare

[†]corresponding author

their distributions as a function of redshift, using statistical methods. As a results, we find that the distribution of the GRBs with X-ray afterglows is consistent with that of the GRBs with optical afterglows. We, therefore, conclude that the lower detection rate of optical afterglows is not due to extinctions in intergalactic media.

Keywords: gamma ray bursts, afterglows, miscellaneous - cosmology - methods, statistical

1. 서 론

감마선 폭발체는 Klebesadel et al.(1973)에 의해 처음으로 발표된 후 30여년이 지난 현재까지 그들의 본질과 기원을 설명하기 위한 수많은 이론들이 제안되고 있음에도 불구하고, 그 유래에 대한 불안함은 여전히 남아있다(Woosley 1993, Paczyński & Xu 1994, Rees & Mészáros 1994, Katz 1994, Mészáros & Rees 1997, Wijers et al. 1997, Paczyński 1998, Sari et al. 1998, MacFadyen & Woosley 1999, Guetta et al. 2001, Kobayashi & Zhang 2003, Zhang et al. 2003, Kallman et al. 2003, Paczyński & Haensel 2005).

감마선 폭발체는 많은 관측적 사실들에 의해, 보통 무거운 별들의 죽음과 관련되어 발생한다고 믿어진다. 작고 밀집된 영역의 어마어마하게 큰 질량을 가진 광원에서 폭발하였으며 이 폭발로 인해 화구의 상대론적인 팽창이 일어나 성간 또는 별 주위 물질과 격심한 충돌을 일으키는 것으로 보인다(Mészáros & Rees 1993, Rees & Mészáros 1994). 이로 인한 휘광은 엑스선, 광학, 전파 등에서 일반적으로 며칠에서 몇달동안 관측되는데 이를 소위 “잔유휘광”라 부른다(Rees & Mészáros 1992, Paczyński & Rhoads 1993, Sari & Piran 1995, Costa et al. 1997, van Paradijs et al. 1997, 2000, Frail et al. 1997, Waxman 1997a,b, Piran 2000). 감마선 폭발체 잔유휘광의 광도 곡선과 스펙트럼 양상은 그 주위의 성간 매질(ISM) 또는 항성풍의 특성(밀도 곡선과 화학원소 함량비) 등을 면밀히 조사할 수 있는 중요한 정보이다(Wang & Loeb 2000, Dai & Lu 2002, Piro et al. 2000, Schaefer et al. 2003). 소속 은하 내부에 위치한 감마선 폭발체와 동시에 그 감마선 폭발체 소속 은하에 관한 특성 연구는 우주 전체의 별 생성 역사와 감마선 폭발체 본질에 대해 가치있는 정보를 준다(Fruchter et al. 1999, Bloom et al. 2002). 이렇듯 약 30ms ~ 1000s 정도의 짧은 지속 기간을 가진 감마선 폭발체에 비해 훨씬 더 긴 시간 척도를 가진 잔유휘광의 관측은 감마선 폭발체 생성 환경 연구에 중요한 정보를 제공한다. 그러나, 모든 감마선 폭발체에서 전체 에너지 영역의 잔유휘광이 관측되는 것은 아니다.

전파나 엑스선 영역에서 잔유휘광이 관측되지 않은 경우는 검출기 또는 광대역 모니터의 감도 한계로 인해서이고, 광학 영역에서 잔유휘광이 관측되지 않은 경우는 광원내부 또는 소속 은하 내의 먼지 그리고 성간 매질의 흡수에 의한 것으로 보고 있다(Kulkarni et al. 2000, Frail et al. 1999). 그렇다면 우리는 과연 앞서 언급한 바와 같이 잔유휘광 관측이 되지 않은 경우들을 그대로 받아들이기엔 충분한가에 의문을 가졌다. 본 연구는 이러한 의문을 해결하고자 수행되었다. 이를 위해 우리는 수천 개의 감마선 폭발체 중 광학 관측으로 거리가 정해진 감마선 폭발체들을 선택하기로 한다. 그 감마선 폭발체를 엑스선, 광학, 전파 영역의 잔유휘광으로 분류하여 거리에 따른 개수 분포로 나타내어 보고 그들을 비교 분석해 보기로 한다. 2장은 본 연구에 사용된 자료와 분포 분석을 위해 사용한 검사

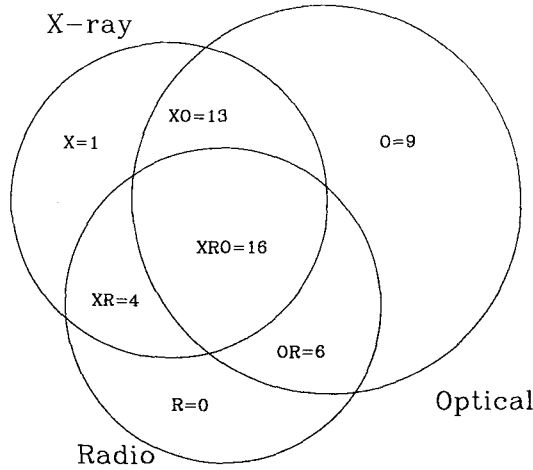


그림 1. 광학 관측으로 거리가 정해진 감마선 폭발체들을 에너지 영역별 잔유휘광으로 나타낸 도표.

들을 정리하였고, 3장은 분석 결과를 논의하였으며, 4장에서 우리는 토의 및 결론으로 정리하였다.

2. 에너지 영역별 잔유휘광의 거리 분포 비교

2.1 자료

잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체는 현재까지 250여개(1997~2005년)에 이른다. 이 중 우리는 광학 관측으로 거리가 정해진 감마선 폭발체를 분석해 볼 것이다. 본 연구에 사용된 자료는 GCN(the Gamma ray bursts Coordinates Network)과 IAUC(International Astronomical Union Circular) 등으로부터 알려진 것으로(<http://www.mpe.mpg.de/~jcg/grbgen.html>), 거리가 측정된 감마선 폭발체의 자료 49개를 사용하였다. 거리가 불명확한 것은 제외한 개수이다.

2.2 거리가 정해진 감마선 폭발체의 에너지 영역별 잔유휘광 개수 분포

그림 1은 광학 관측으로 거리가 정해진 감마선 폭발체들을 에너지 영역별 잔유휘광으로 나누어 도표로 그린 것이다. 그림 1에서 우리는 거리가 정해진 감마선 폭발체 잔유휘광은 광학 영역에서 가장 많이 관측되었음($XA = \frac{34}{49}$, $OT = \frac{44}{49}$, $RA = \frac{26}{49}$)을 알 수 있다. 이것은 예상된 것으로 우리가 광학 관측으로 거리가 정해진 자료를 선택하였기 때문이다. 그림 1의 자료를 다음과 같은 방식으로 나누어 각각의 감마선 폭발체들을 거리에 대한 개수 분포도로 나타내 볼 것이다. 또한 개수 분포도의 bin-size(Δz)를 0.1, 0.25, 0.5 등으로 변화시켜 나타내 보기로 한다. 잔유휘광이 관측된 모든 감마선 폭발체들을 Total, 엑스선 영역에서 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들을 XA, 광학 영역에서 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들을 OT, 그리고 전파 영역에서 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들을 RA로 명시하였다. 그림 2는 Δz 를 0.25로 한 Total(49개)을 거리에 대한 개수 분포도로 나타낸 것이다. 그림 3 역시 그림 2와 같이 XA(34개), OT(44개), RA(26개)를 거리에 대한 개수 분포도로 나타낸 것이다. 가장 많은 감마선 폭발체가 분포하고 있는 z 값을 알아보기 위해, 각각의 평균값과 중간값,

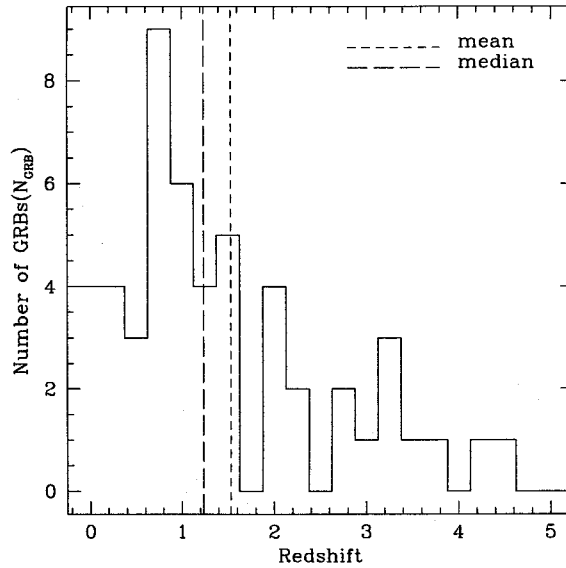


그림 2. Total의 거리에 대한 개수 분포도. 긴 파선은 중간값($\mu_{\frac{1}{2}}$)을 나타내며, 짧은 파선은 평균값(μ)을 나타내고 있으며, Δz 는 0.25이다. $\mu = 1.5317$, $\mu_{\frac{1}{2}} = 1.2357$, $\sigma_{\mu} = 0.16$ 이다.

평균편차를 계산해 보았다. 그림 2, 3에서 우리는 Total의 z 에 대한 평균값이 약 1.53($\sigma_{\mu} = 0.16$)으로 나타났으며 XA는 약 1.43($\sigma_{\mu} = 0.18$), OT는 1.63($\sigma_{\mu} = 0.17$), RA의 경우 1.17($\sigma_{\mu} = 0.15$) 등으로 주로 $z \sim 1$ 근처에 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 특히 z 에 대한 XA와 OT의 평균값은 Total의 평균값에 근사하나 RA의 평균값은 근사하지 않음을 볼 수 있다. 그림 3의 각 개수 분포도 사이의 유사 관계가 있는지 없는지 구별하기 어려우므로 본 연구에서는 χ^2 검사를 사용하여 검증해 보았다.

2.3 평균값, 중간값, 평균편차, χ^2 검사

평균값(μ)은

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_i^N x_i \tag{1}$$

이다. 중간값($\mu_{\frac{1}{2}}$)은

$$P(x_i < \mu) = P(x_i > \mu) = \frac{1}{2} \tag{2}$$

로 정의되는 μ 값을 의미한다. 평균편차(σ_{μ})는

$$\sigma_{\mu} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_i^N (x_i - \mu)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \sqrt{N} \tag{3}$$

이다. 식 (1), (2), (3)에서 N 은 자료의 총 개수이고 x_i 는 i 번째 자료이며 P 는 확률이다.

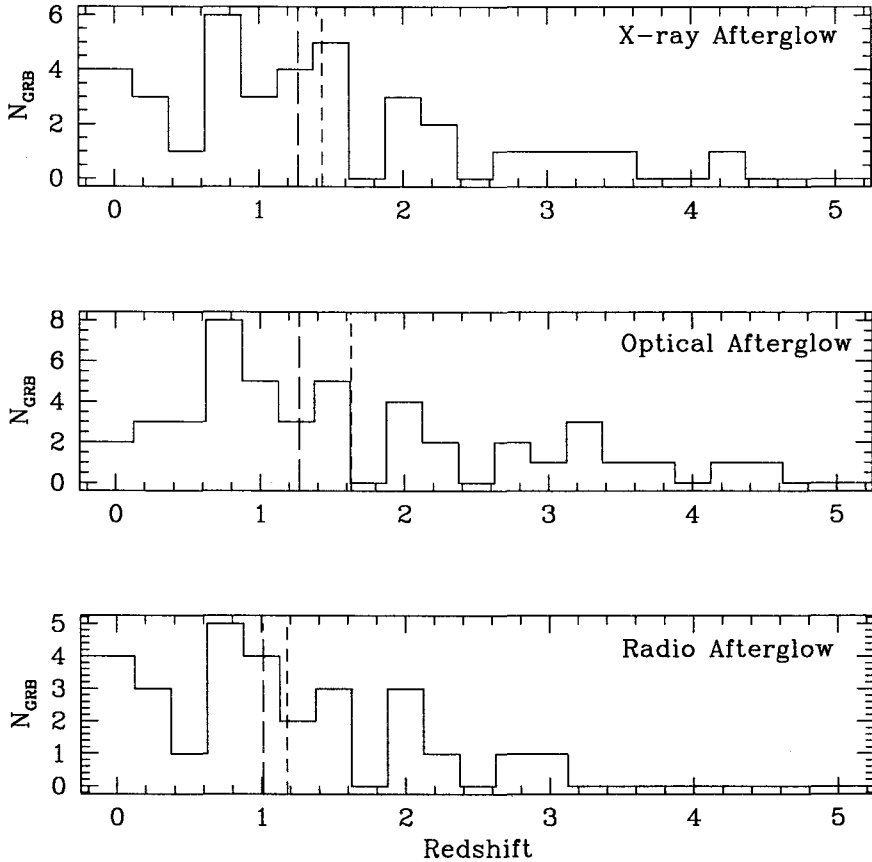


그림 3. XA, OT, RA의 거리에 대한 개수 분포도. 엑스선 잔유휘광의 경우 $\mu = 1.43$, $\mu_{\frac{1}{2}} = 1.27$, $\sigma_{\mu} = 0.18$, 광학 잔유휘광의 경우 $\mu = 1.63$, $\mu_{\frac{1}{2}} = 1.27$, $\sigma_{\mu} = 0.17$, 전파 잔유휘광의 경우 $\mu = 1.17$, $\mu_{\frac{1}{2}} = 1.01$, $\sigma_{\mu} = 0.15$ 이다.

χ^2 검사는 binned된 다른 두 분포를 비교할 때 상당히 유용하게 사용되는 방법으로 χ^2 값은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(R_i - S_i)^2}{R_i + S_i} \tag{4}$$

R_i 는 첫번째 자료 묶음의 i 번째 bin에 들어가는 사건의 개수, S_i 는 두번째 자료 묶음의 i 번째 bin에 들어가는 사건의 개수이다. 그리고, 임의의 두 분포 사이의 차이를 확률값으로 나타낸 것이 χ^2 확률 함수($Q(\chi^2 | \nu)$)

$$Q(\chi^2 | \nu) = Q\left(\frac{\nu}{2}, \frac{\chi^2}{2}\right) \tag{5}$$

로, 불완전 감마함수이다. 편의상 본 연구에서는 $Q(\chi^2 | \nu)$ 값을 Prob으로 명시하도록 하겠다. 여기

표 1. Total과 다른 세 에너지 영역과의 χ^2 검사 결과. ν 는 자유도이며, *Prob*은 확률이다(Total: 엑스선, 광학, 전파 등 어떤 영역에 상관없이 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들, XA: 엑스선 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들, OT: 광학 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들, RA: 전파 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들).

	ν	χ^2	<i>Prob</i>
Total-OT	16.0	1.10	0.99
Total-XA	16.0	6.21	0.98
Total-RA	16.0	9.78	0.87

표 2. XA, OT, RA 간의 χ^2 검사 결과(XA: 엑스선 잔유휘광이 관측된 모든 감마선 폭발체들, OT: 광학 잔유휘광이 관측된 모든 감마선들 폭발체들, RA: 전파 잔유휘광이 관측된 모든 감마선 폭발체들, XO: 엑스선 뿐만 아니라 광학 영역에서도 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들, OR: 광학 뿐만 아니라 엑스선 영역에서도 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들).

	0.25(Δz)			0.1(Δz)			0.5(Δz)		
	ν	χ^2	<i>Prob</i>	ν	χ^2	<i>Prob</i>	ν	χ^2	<i>Prob</i>
XA-OT	16.0	6.07	0.98	29.0	11.03	0.99	10.0	5.57	0.84
XA-RA	14.0	4.73	0.98	25.0	8.53	0.99	9.0	3.48	0.94
OT-RA	16.0	10.97	0.81	29.0	17.36	0.95	10.0	8.83	0.54
XO-OR	14.0	5.34	0.98	24.0	8.33	0.99	9.0	3.36	0.94
XO-XR	14.0	5.39	0.97	24.0	12.33	0.97	9.0	4.21	0.89
OR-XR	11.0	1.74	0.99	19.0	8.00	0.98	7.0	1.71	0.97

서, ν 는 자유도 개수를 의미하며, *Prob*은 작은 값을 가질수록 두 분포 사이의 차이가 크다는 것을 의미한다.

3. 결 과

표 1은 그림 2, 3의 각 개수 분포도들을 이용하여 서로 다른 두 분포 사이에 유사성이 있는지 없는지를 알아보고자 실행한 χ^2 검사 결과를 보여 주고 있다. Total과 OT의 거리에 대한 개수 분포도 사이의 *Prob*이 0.99임을 보아 두 분포가 상당히 유사하다는 결론을 내릴 수 있다. XA와 Total과의 거리에 대한 개수 분포도 사이의 *Prob* 역시 0.98로 OT 못지않게 두 분포가 유사하게 나타나고 있다. 반면, RA와 Total의 거리에 대한 개수 분포도 간의 *Prob*은 0.87로 두 분포는 다름을 알 수 있다. 그러나, 이 결과만으로는 각각의 감마선 폭발체 분포가 다르다고 판단할 수 없다. 왜냐하면, 그림 1의 도표에서 보이는 바와 같이 Total에 대해 OT, XA, RA 순으로 상대적인 개수가 적기 때문이다. 그래서 우리는 표 2에서 Δz 를 변화시키며 XA, OT, RA 등의 거리에 대한 개수 분포도들 각각의 χ^2 검사 결과를 나타내 보았다.

표 2의 χ^2 검사 결과는 우리에게 아주 흥미로운 정보를 준다. 우선, 표 2에서 볼 수 있듯이 우리는 Δz 를 0.1, 0.25, 0.5 등으로 변화시키며 χ^2 값과 *Prob*을 계산해 본 결과 Δz 의 변화에 따라 주는 정보가 다르지 않으므로, Δz 를 0.25로 두고 계산한 결과를 논하도록 하겠다. 그림 1의 도표에서 알 수 있는 에너지 영역별 분포간의 차이성을 [(한 에너지 영역에서만 관측된 감마선 폭발체 개수) / (두 에너지 영역 동시에 관측된 감마선 폭발체 개수)]로 간단히 나타내면, XA와 OT 간의 차이성 비율은 9/29로 약 30%, XA와 RA는 1/20로 약 0.05%, OT와 RA는 9/22로 약 40%를 보인다. 이같은 결과

는 XA - RA가 가장 유사한 분포로 나타나고 XA - OT, OT - RA 순으로 유사도가 낮게 나타남을 보여야 한다. 그러나, 표 1에서 보여 주는 χ^2 검사 결과는 그렇지 않다. XA - OT의 *Prob*이 0.98, XA - RA의 *Prob* ~ 0.98이고, OT - RA의 *Prob* ~ 0.81로 XA - OT의 분포가 도표에서 나타난 30%의 차이성 비율 결과와 달리 아주 높은 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 XA - OT의 분포가 약 30%의 차이성을 보여 주는 도표과는 달리 두 분포가 거의 같음을 나타내고 있다. 다시 말해, 엑스선 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들이나 광학 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들의 분포가 같다는 것이다.

4. 토의 및 결론

서론에서 우리는 엑스선이나 전파영역에서 서로 다른 이유로 관측이 어려울 수 있음을 논한 바 있다. 따라서, 본 연구의 내용만으로 이렇게 서로 다른 이유들에 의해 엑스선과 광학 영역에서 그림 3과 같은 분포가 나타날 가능성을 지적할 수 있겠다. 그러나, 파장이 10^{-1} nm보다 짧은 고에너지의 엑스선과 1cm 이상의 긴 파장을 가진 전파의 특성상 성간 매질(먼지나 가스: 평균적으로 10^6 m³의 성간공간에 티끌이 한 개 정도 들어 있고, 성간 물질 총 질량의 약 1%를 티끌이 차지)에 의한 소광이 일어날 가능성은 낮다. 그러므로, 본 연구에 사용된 자료들은 비교적 덜 오염된 자료로 볼 수 있다.

본 연구에서 우리는 광학 관측으로 거리가 정해진 감마선 폭발체들을 에너지 영역별 잔유휘광으로 나누어 거리에 대한 개수 분포도로 나타내 비교 분석해 보았다. 그 결과, 우리는 엑스선 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들과 광학 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체들의 거리 분포가 같음을 알 수 있었다. 광학 잔유휘광이 엑스선 잔유휘광보다 상대적으로 관측되기 어려운 요인들(즉, 광원내부 또는 소속 은하 내의 먼지나 성간 물질에 의한 소광 등)이 많음에도 불구하고 두 잔유휘광이 관측된 감마선 폭발체 거리분포가 거의 같게 나온 것이다. 이것으로써 우리는 광학 잔유휘광이 성간 물질에 의한 소광으로 관측되지 않을 수 있다는 이론은 타당치 못하다는 결론을 낼 수 있다.

감사의 글: 여러 사항들을 제안하고 특히 에너지별 차등 소광 효과를 지적하여 주신 심사위원님께 감사한다. 그리고 본 논문을 세심히 읽고 토의해 준 강승미, 김한식, 류윤현, 박윤경, 이재현, 이정애에게 감사한다. 이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-003-C00093).

참고문헌

- Bloom, J. S., Kulkarni, S. R., & Djorgovski, S. G. 2002, *ApJ*, 123, 1111
- Costa, E., Frontera, F., Heise, J., Feroci, M., in 't Zand, J., Fiore, F., Cinti, M. N., Dal Fiume, D., Nicastro, L., Orlandini, M., Palazzi, E., Rapisarda, M., Zavattini, G., Jager, R., Parmar, A., Owens, A., Molendi, S., Cusumano, G., Maccarone, M. C., Giarrusso, S., Coletta, A., Antonellik, L. A., Giommik, P., Mullerk, J. M., Piro, L., & Butler, R. C. 1997, *Nature*, 387, 783
- Dai, Z. G. & Lu, T. 2002, *ApJ*, 565, L87
- Frail, D. A., Kulkarni, S. R., Bloom, J. S., Djorgovski, S. G., Gorjian, V., Gal, R. R., Meltzer, J., Sari, R., Chaffee, F. H., & Goodrich, R. 1999, *ApJ*, 525, 81
- Frail, D. A., Kulkarni, S. R., Nicastro, L., Feroci, M., & Taylor, G. B. 1997, *Nature*, 389, 261

- Fruchter, A. S., Thorsett, S. E., Metzger, M. R., Sahu, K. C., Petro, L., Livio, M., Ferguson, H. Pian, E., Hogg, D. W., & Galama, T. 1999, *ApJ*, 519, L13
- Guetta, D., Spada, M., & Waxman, E. 2001, *ApJ*, 557, 339
- Kallman, T. R., Mészáros, P., & Rees, M. J. 2003, *ApJ*, 593, 946
- Katz, J. 1994, *ApJ*, 432, L107
- Klebesadel, R. W., Strong, I. B., & Olson, R. A. 1973, *ApJ*, 182, L85
- Kobayashi, S. & Zhang, B. 2003, *ApJ*, 582, L75
- Kulkarni, S. R., Berger, E., Bloom, J. S., Chaffee, F., Diercks, A., Djorgovski, S. G., Frail, D. A. Galama, T. J., Goodrich, R. W., & Harrison, F. A. 2000, *AIPC*, 526, 277
- MacFadyen, A. I. & Woosley, S. E. 1999, *ApJ*, 524, 262
- Mészáros, P. & Rees, M. J. 1993, *ApJ*, 405, 278
- Mészáros, P. & Rees, M. J. 1997, *ApJ*, 482, L29
- Paczyński, B. 1998, *ApJ*, 494, L45
- Paczyński, B. & Haensel, P. 2005, *MNRAS*, 362, L4
- Paczyński, B. & Rhoads, J. 1993, *ApJ*, 418, L5
- Paczyński, B. & Xu, G. 1994, *ApJ*, 427, 708
- Piran, T. 2000, *Phys. Rep.*, 333, 529
- Piro, L., Garmire, G., Garcia, M., Stratta, G., Costa, E., Feroci, M., Mészáros, P., Vietri, M. Bradt, H., & Frail, D. 2000, *Science*, 290, 955
- Rees, M. J. & Mészáros, P. 1992, *MNRAS*, 258, 41
- Rees, M. J. & Mészáros, P. 1994, *ApJ*, 430, L93
- Sari, R. & Piran, T. 1995, *ApJ*, 455, L143
- Sari, R., Piran, T., & Narayan, R. 1998, *ApJ*, 497, L17
- Schaefer, B. E., Gerardy, C. L., Hoflich, P., Panaitescu, A., Quimby, R., Mader, J., Hill, G. J. Kumar, P., Wheeler, J. C., & Eracleous, M. 2003, *ApJ*, 588, 387
- van Paradijs, J., Groot, P. J., Galama, T., Kouveliotou, C., Strom, R. G., Telting, J., Rutten, R. G. M., Fishman, G. J., Meegan, C. A., Pettini, M., Tanvir, N., Bloom, J., Pedersen, H. Nørdgaard-Nielsen, H. U., Linden-Vørnle, M., Naber, J., van der Steene, G., Bremer, M. Naber, R., Heise, J., in 't Zand, J., Costa, E., Feroci, M., Piro, L., Frontera, F., Zavattini G., Nicastro, N., Palazzi, E., Benret, K., Hanlon, L., & Parmar, A. 1997, *Nature*, 386, 686
- van Paradijs, J., Kouveliotou, C., & Wijers, R. A. M. J. 2000, *ARA&A*, 38, 379
- Wang, X. & Loeb, A. 2000, *ApJ*, 535, 788
- Waxman, E. 1997a, *ApJ*, 485, L5
- Waxman, E. 1997b, *ApJ*, 489, L33
- Wijers, R. A. M. J., Rees, M. J., & Mészáros, P. 1997, *MNRAS*, 288, L51
- Woosley, S. E. 1993, *ApJ*, 405, 273
- Zhang, W., Woosley, S. E., & MacFadyen, A. I. 2003, *ApJ*, 586, 356