

High redshift gamma-ray bursts as a probe of the early universe and first stars

魏俊杰, 吴雪峰, 王发印, 刘柱, 戴子高 and 张冰

Citation: 中国科学: 物理学 力学 天文学 **48**, 039505 (2018); doi: 10.1360/SSPMA2017-00248

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSPMA2017-00248>

View Table of Contents: <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSPMA/48/3>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[High energy emission from gamma-ray bursts](#)

SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica **45**, 119505 (2015);

[Spectral lags in different episodes of gamma-ray bursts](#)

SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy **56**, 1437 (2013);

[Constraints on Cardassian universe from Gamma ray bursts](#)

SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy **53**, 1720 (2010);

[How to understand high-energy gamma-ray bursts?](#)

Chinese Science Bulletin **63**, 2450 (2018);

[Duration distributions for different softness groups of gamma-ray bursts](#)

SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy **53**, 1375 (2010);



高红移爆发源作为早期宇宙和第一代天体的探针

魏俊杰^{1,2*}, 吴雪峰¹, 王发印³, 刘柱⁴, 戴子高³, 张冰^{5,6}

1. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008;

2. 广西相对论天体物理重点实验室, 南宁 530004;

3. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210046;

4. 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

5. 北京大学物理学院天文系及科维里天文与天体物理研究所, 北京 100871;

6. 美国内华达大学拉斯维加斯分校物理天文系, NV 89154, 美国

*联系人, E-mail: jjwei@pmo.ac.cn

收稿日期: 2017-09-15; 接受日期: 2017-10-24; 网络出版日期: 2018-01-23

国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB845800)、国家自然科学基金(编号: 11673068, 11603076, 11725314)、中国科学院先导科技专项(编号: XDB23040000, XDA15052100)、中国科学院青年创新促进会(编号: 2011231, 2017366)、中国科学院前沿科学重点研究项目(编号: QYZDB-SSW-SYS005)、江苏省自然科学基金(编号: BK20161096)和广西相对论天体物理重点实验室基金资助项目

摘要 伽玛暴是宇宙中最为明亮的爆发现象, 由于它们的高光度, 人们可探测到发生在极早期宇宙处的伽玛暴. 高红移伽玛暴可作为宇宙深处的灯塔, 它们是探索早期宇宙性质的理想工具. 利用高红移伽玛暴可以限制暗能量和宇宙学参数, 测量高红移的恒星形成率, 揭示第一代天体的性质, 研究宇宙再电离和金属增丰历史. 因此, 高红移伽玛暴的观测具有重要的科学意义. 相比目前的探测卫星, 爱因斯坦探针(EP)拥有更高的灵敏度和更宽的观测视场, 且主要观测能段为软X射线波段(0.5–4 keV), 非常适合高红移伽玛暴的观测. 考虑EP的能力和观测模式, 并且借助能够很好解释目前Swift卫星的伽玛暴观测样本的理论模型, 详细计算了未来EP对高红移伽玛暴的可能探测率. 我们预测EP对 $z > 6$ 伽玛暴的探测率约为 $20 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, 对 $z > 8$ 伽玛暴的探测率约为 $6 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, 对 $z > 12$ 伽玛暴的探测率约为 $1 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 估计在3年的运行时间内, EP将能探测到约65个 $z > 6$ 的伽玛暴, 其中包括 ~ 20 个 $z > 8$ 的伽玛暴和 ~ 3 个 $z > 12$ 的伽玛暴. 总之, EP有望显著提高高红移伽玛暴的观测能力, 这些丰富的观测信息将很有可能揭开早期宇宙的部分科学谜团.

关键词 伽玛射线暴, 高红移, 早期宇宙, 第一代天体

PACS: 98.70.Rz, 98.62.Py, 98.80.Es, 97.20.Wt

1 引言

伽玛射线暴(伽玛暴, Gamma-Ray Burst, GRB)是在短时标内来自宇宙深处的伽玛射线突

然增强的一种爆发现象. 根据其持续时间 T_{90} 的长短, 伽玛暴通常可以分为长暴($T_{90} > 2 \text{ s}$)和短暴($T_{90} < 2 \text{ s}$)两类^[1]. 长暴一般被认为是起源于大质量恒星($\geq 25M_{\odot}$)的核塌缩, 而短暴的前身星则认

引用格式: 魏俊杰, 吴雪峰, 王发印, 等. 高红移爆发源作为早期宇宙和第一代天体的探针. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039505
Wei J J, Wu X F, Wang F Y, et al.. High redshift gamma-ray bursts as a probe of the early universe and first stars (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 039505, doi: [10.1360/SSPMA2017-00248](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00248)

为是双致密星体的合并. 伽玛暴作为宇宙中最为明亮的天体, 由于它的高亮度, 人们可以观测到发生在很高红移处的伽玛暴, 目前已测得最高红移达9.4 (GRB 090429B)^[2], 表明高红移伽玛暴可作为宇宙灯塔探索早期宇宙. 利用伽玛暴的一些经验光度关系^[3-6], 可对暗能量状态方程和宇宙学参数作出限制. 理论上认为长暴与大质量恒星的死亡有关, 而且观测上也已经证实长暴会与超新星成协^[7,8], 因此长暴可以用来测量高红移的恒星形成率. 此外, 伽玛暴还提供了研究第一代恒星的绝佳机会. 原则上, 伽玛暴的余辉辐射可在 $z \sim 20$ 处被探测到^[9,10]. 这些高红移的余辉辐射携带了大量关于早期宇宙再电离和金属增丰的信息, 从余辉的观测中可以得知许多早期宇宙的性质. 总之, 高红移伽玛暴是研究早期宇宙的有效探针.

Ia型超新星可被用作标准烛光来测量宇宙的几何学和动力学, 它们在宇宙学方面的研究取得了巨大成功. 但是, Ia型超新星研究宇宙学有两个先天性的缺陷: (1) Ia型超新星本身光度决定了能探测到的SN Ia最大红移不可能超过2, 因此超新星只能用来测量低红移的宇宙, 高红移的宇宙性质则无法从Ia型超新星得知; (2) 超新星的光学观测不可避免地受到尘埃消光的影响, 尘埃消光的不确定性限制了超新星研究宇宙学的精确度. 最近的研究表明, 伽玛暴可作为超新星宇宙学在高红移处的有力补充, 用伽玛暴研究宇宙学已经有了许多尝试性的工作^[6,11-14]. 用伽玛暴研究宇宙学的主要优势有以下3点: (1) 伽玛暴作为宇宙中最为明亮的爆发事件, 在很高的红移处依然可以被探测到, 伽玛暴的最高红移记录已超过类星体和星系的红移记录; (2) 伽玛光子在传播过程中不受尘埃消光的影响, 用伽玛暴研究宇宙学就这一点来说有先天性的优势; (3) 统计上发现伽玛暴存在一些能谱或光变的经验光度关系^[3-6], 这些经验关系可以用来宇宙学研究. 此外, 暗能量状态方程和宇宙学参数对高红移的观测数据非常敏感, 结合高红移伽玛暴的数据可对它们做出更好的限制.

高红移($z > 6$)恒星形成率在天体物理中的各个领域都有非常重要的应用. 然而由于高红移处星系比较暗弱, 再加上尘埃消光不确定性的影响, 直接测

量高红移的恒星形成率是非常困难的. 观测上发现由大质量恒星塌缩形成的长伽玛暴会与超新星成协^[7,8], 表明伽玛暴的诞生与大质量恒星的死亡有关. 而且大质量恒星的寿命比较短, 一般为几百万年(My), 在宇宙学时标内可以认为大质量恒星的诞生和死亡是一瞬间的, 可以把它们的死亡率近似为形成率. 因此, 高红移处的伽玛暴是测量高红移恒星形成率的有力工具, 即利用恒星的死亡率来反推恒星的形成率. 但是, 最近的Swift卫星观测表明, 伽玛暴的爆发率并不是严格正比于恒星形成率, 而是与恒星形成率相比还有一个未知的红移演化项^[15-19]. 伽玛暴爆发率与恒星形成率在观测上的不一致可以用一个随红移增强演化的表达式来描述, 即 $(1+z)^\delta$, 其中 $\delta \sim 0.5 - 1.5$ ^[17]. 为了解释这个不一致的物理起因, 人们提出了很多解释, 包括宇宙金属丰度的演化^[20,21]、初始恒星质量函数的演化^[22,23]、伽玛暴光度函数的演化^[24,25]等. 当然, 如果能够弄清楚引起伽玛暴爆发率和恒星形成率之间额外红移演化项的物理机制之后, 就可以用伽玛暴的数据来很好地限制高红移的恒星形成率.

红移在6-20之间的早期宇宙是目前宇宙学中最受关注的时期. 其间第一代明亮的天体开始形成并电离“黑暗宇宙”(称为宇宙再电离, 即宇宙的星系际中性氢原子被电离为氢离子). 第一代恒星, 也称为星族III (Population III, Pop III恒星), 被认为是在红移为 $z \sim 20$, 质量约为 $\sim 10^6 M_\odot$ 的迷你暗物质晕中形成的^[26,27]. 它们由基本上没有被污染的、具有零金属丰度的原始星云塌缩形成, 具有较大的质量, 典型质量为 $\sim 40 M_\odot$ ^[28], 甚至可高达100倍太阳质量^[29]. Pop III恒星在早期宇宙的演化中起到了关键性的作用, 包括影响宇宙再电离和金属增丰历史. 一些研究表明, Pop III恒星在死亡时会产生类似伽玛射线暴的高能辐射, 这些伽玛暴被称为Pop III伽玛暴, 它们比普通伽玛暴要更加明亮, 爆发能量也更大^[30-32]. 由于距离遥远, 第一代恒星基本上不可能被现在的仪器观测到. 唯一可行的方法是探测Pop III伽玛暴, 以此来揭示第一代天体的性质.

金属增丰的历史对宇宙的结构形成有很重要的影响. 如果早期的金属增丰超过临界金属丰度 $Z_{\text{crit}} \sim 10^{-4} Z_\odot$, 金属增丰会导致恒星形成模型发生

变化, 恒星形成模型由Pop III恒星转化到正常的Pop II/I恒星^[33,34]. Pop III恒星与Pop II/I恒星之间的转变对伽玛暴的理论红移分布^[35]、宇宙再电离^[36]和低金属丰度恒星的化学组成^[37]有重要意义. 因此, 研究早期的金属增丰的拓扑结构, 探讨何时何区域的金属丰度会超过临界丰度是非常重要的. 人们已经提出利用高红移伽玛暴的余辉观测来测量 $z > 6$ 处的星系际介质的金属丰度^[38]. 实际上, 伽玛暴或类星体光谱上的吸收过程和吸收线都是了解高红移宇宙的物理和化学性质的最主要途径. 但是, 在 $z > 6$ 处的明亮类星体的数目很少^[39]. 幸运的是, 人们目前已观测到了好几个高红移伽玛暴, 而且长暴的前身星被认为是大质量恒星, 高红移伽玛暴的数量理论上是不会少的, 因此可以通过分析高红移伽玛暴光谱上的吸收线来得知早期宇宙的温度、密度、化学组成和动力学等信息^[38,40]. 例如, Kawai等人^[41]证认了GRB 050904余辉光谱中的几条金属吸收线, 从而发现该暴发生在金属增丰区域. Salvaterra等人^[42]测量到发生在 $z = 8.2$ 处的GRB 090423余辉谱中的两条吸收线, 这些线主要是由处于低电离状态的金属元素吸收形成.

Gunn等人^[43]指出在 $z < 5$ 处的星系际介质几乎完全被电离化. 星系际介质的再电离被认为是发生在 $z \sim 6 - 20$ 的早期宇宙期间, 精确测量宇宙的再电离是现代宇宙学的一个重要课题^[44,45]. 类似于类星体的做法, 通过拟合Ly- α 森林的红端阻尼翼(Red Damping Wing), 高红移伽玛暴已经被用来测量星系际介质的中性氢比例, 因此伽玛暴可对再电离红移作出很好的限制^[46-50]. 相比类星体, 伽玛暴研究宇宙再电离历史有许多优势: (1) 伽玛暴的可观测红移远大于类星体; (2) 伽玛暴通常位于普通的宇宙区域, 较少受到本地的电离效应或成团结构的影响; (3) 伽玛暴余辉的光谱是很干净的幂律谱, 金属吸收线可以很容易地从光谱中提取.

除了以上研究课题之外, 高红移伽玛暴其实还可以用来研究早期宇宙的其他方面, 包括限制暗物质粒子质量和原初密度场的非高斯性. 伽玛暴的红移分布可对暗物质粒子质量作出限制. 利用伽玛暴 $z > 4$ 的子样本, de Souza等人^[51]对温暗物质粒子质量在95%置信度区间内的限制为 $m_{\chi} > 1.6-$

1.8 keV. 原初密度场的非高斯性会随着高红移伽玛暴 $z > 6$ 的所占比例的变化而发生变动.

综上所述, 高红移伽玛暴对研究早期宇宙是非常重要的, 因为它们不仅可以作为宇宙距离的标准烛光, 还可以提供关于早期宇宙的恒星形成史、金属丰度及增丰过程以及宇宙再电离的丰富信息. 然而, 目前探测到的高红移伽玛暴数目仍然十分有限, 使得对早期宇宙的研究进展受到一定程度的制约. 要探测更高红移(譬如红移10以上)的伽玛暴需要更高的灵敏度和更大的视场. 这正是爱因斯坦探针(Einstein Probe, EP)的优势所在, EP有望显著提高高红移伽玛暴的观测能力. 借助EP将来可能探测到的丰富的高红移伽玛暴数据, 人们可对暗能量状态方程和宇宙学参数做出更好的限制; 能够有效弄清楚引起伽玛暴爆发率和恒星形成率之间额外红移演化项的物理机制, 从而可以用伽玛暴的数据来很好地测量高红移的恒星形成率; 通过探测Pop III恒星在死亡时所产生的类似伽玛射线暴的高能辐射, 即Pop III伽玛暴, 以此来揭示第一代天体的性质; 研究宇宙再电离和金属增丰历史.

2 高红移伽玛暴的观测特征

经过10年的观测, Swift卫星目前只探测到5个有光谱证认且红移 $z > 6$ 的伽玛暴. 此外, Swift卫星还探测到3个测光红移 $z > 6$ 的伽玛暴. 这8个伽玛暴的红移信息参见表1, 前面5个伽玛暴为光谱红移, 后3个是测光红移. 这些高红移样本约占总的Swift观测样本的 $\sim 1\%$, 占有测量到红移样本

表1 Swift卫星探测到的 $z > 6$ 的伽玛暴清单

Table 1 List of the GRBs at $z > 6$ detected by Swift

GRB	z	参考文献
050904	6.3	[41]
080913	6.7	[52]
090423	8.2	[42]
130606A	5.9	[48]
140515A	6.3	[49]
090429B	9.4	[2]
120521C	6.0	[53]
120923A	8.5	[54]

的~2.5%.

尽管暴与暴之间的性质都不一样,而且高红移伽玛暴的样本仍然很小,但是还是可以把它们和低红移伽玛暴样本作比较,从而得到高红移伽玛暴的一些有趣特征. Salvaterra等人^[25]比较了 $z < 6$ 伽玛暴与那些明亮的Swift/BAT样本的特征. 图1(a)展示的是 $z > 6$ 伽玛暴在谱峰值能量(E_p)–各向同性能量(E_{iso})关系(即Amati关系)中的位置. 黑点代表的是低红移伽玛暴样本,阴影部分是 E_p – E_{iso} 关系的 3σ 偏差范围. 从图中可以看出,高红移暴很好地满足Amati关系,表明它们的瞬时辐射特征应该是与明亮的低红移暴没有多大区别,两者之间拥有相同的中心能源(或者前身星). 图1(b)比较了 $z > 6$ 伽玛

暴与那些Swift/BAT样本在静止系下2–10 keV的归一化光变曲线. 从图中可以看出,低红移暴和高红移暴的X射线余辉光变曲线行为表现一致,很难去区分它们,表明高红移暴和低红移暴的总能量、微观物理参数和暴周介质特征也是相似的. 图1(c)比较了低红移暴和高红移暴的寄主星系尘埃消光. 从图中可以看出,50%低红移暴的尘埃消光(A_V)小于0.3–0.4星等,只有13%的低红移暴有 $A_V > 2$ 星等. 而高红移暴的尘埃消光值则都很小,因为在高红移处的恒星形成环境里尘埃本来就很少. 另外,同低红移暴不一样的是,所有的高红移暴都有很高的X射线氢柱密度($N_{\text{H,X}}$) (图1(d)). 近些年,人们发现伽玛暴和活动星系核 (AGNs) 的氢柱密度值都会随着红移的

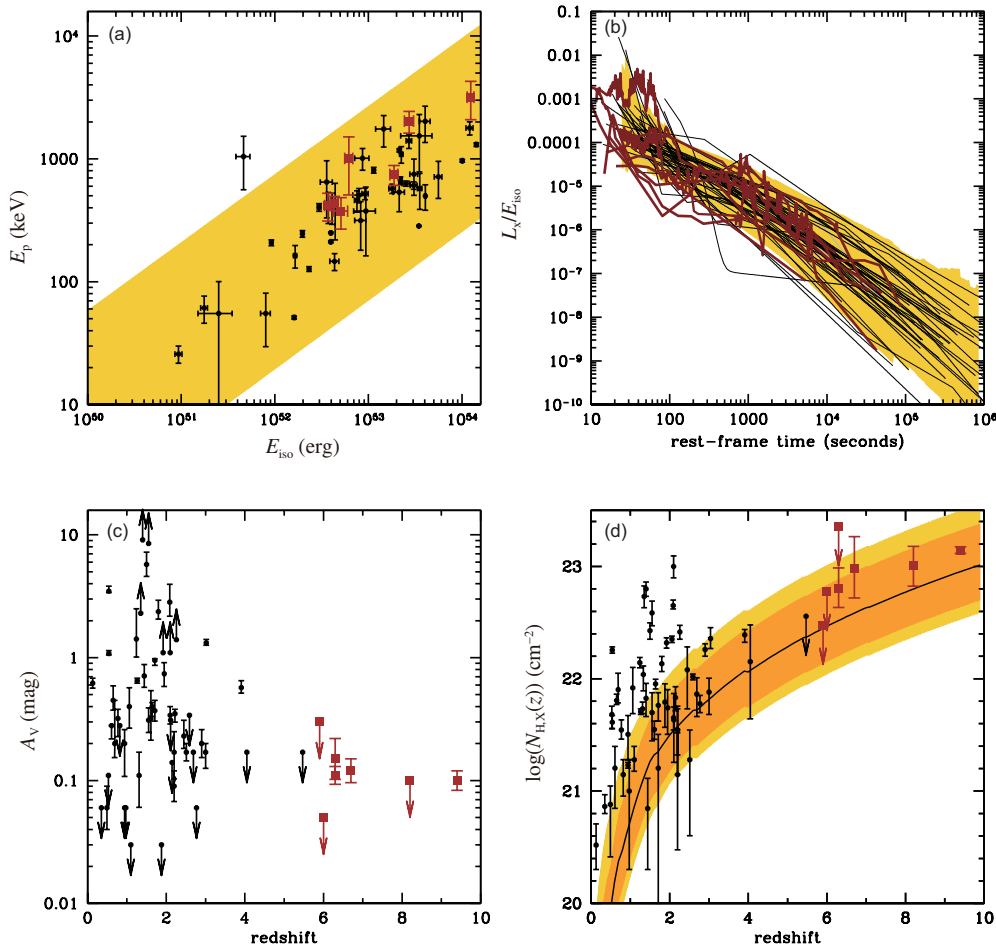


图1 (网络版彩图) (a)–(d) 高红移($z > 6$)伽玛暴(红方块或红曲线)与明亮的Swift低红移暴(黑点或黑线)的特征比较^[55]

Figure 1 (Color online) (a)–(d) Comparison of the properties of $z > 6$ bursts (red squares and lines) with those obtained from the bright Swift/BAT sample (black points and lines) [55].

增加而增大, 显然高红移暴很好地满足这个趋势. 总之, 相比低红移暴, 高红移暴并没有显示出特殊的特征, 它们的能量和余辉特征都非常相似. 即使考虑了宇宙膨胀和探测器选择效应之后, 它们瞬时辐射的持续时间仍然很相似. 正如前面所述, Swift卫星每年大致可以探测到1个 $z > 6$ 的伽玛暴. 考虑BAT仪器的观测视角为1.4 sr, 那么对应的高红移暴的探测率为 $\sim 0.6 \text{ bursts yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 我们自然会问: 这样一个探测率是否会与通过伽玛暴的内禀红移分布和光度函数理论估算出来的高红移暴爆发率保持一致? 图2展示的是所有 $z > 6$ 伽玛暴在Swift/BAT能段15–150 keV里的峰值流量的累积分布, 把该累积分布(阶梯曲线)与考虑伽玛暴光度函数演化(或伽玛暴爆发率密度演化)的模型理论结果作比较 [25].

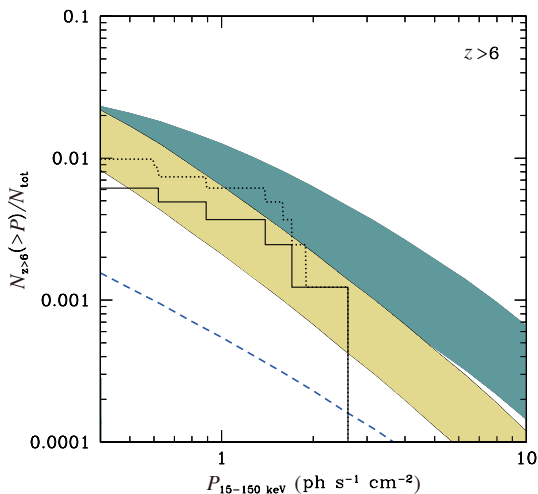


图2 (网络版彩图)高红移($z > 6$)伽玛暴在Swift/BAT能段15–150 keV的峰值流量分布. 实线(点线)阶梯代表有光谱红移(有光谱红移和测光红移)的伽玛暴分布. 阴影部分代表考虑伽玛暴光度函数演化(或密度演化)及其不确定性后的模型预言的可能范围. 深色(浅色)阴影对应的是密度(光度)演化模型. 虚线代表不考虑演化的模型结果, 显然该模型低估了高红移伽玛暴的探测数目 [55]

Figure 2 (Color online) Peak flux distribution of high redshift bursts ($z > 6$) as measured in the 15–150 keV Swift/BAT band. The solid (dotted) step represents the distribution of bursts with spectroscopic (spectroscopic and photometric) redshift. The shaded regions show model predictions, taking into account the uncertainties in the determination of the evolution of the GRB luminosity function (or density). Dark (light) color corresponds to the density (luminosity) evolution model. The dashed line is obtained assuming no evolution and clearly underestimates the number of high- z observations at all peak fluxes [55].

从图2中可以看出, 这些模型可以很好地重现 $z > 6$ 伽玛暴的峰值流量分布; 但是在低流量处, 模型预言会有点点超出. 不过在低流量处的理论超出很好理解, 因为较暗的伽玛射线流量通常对应的就是较暗的光学余辉 [56], 因此一些高红移暗暴会由于它们的余辉很难被探测到而导致缺失. 通过把最佳模型拟合结果外推到更暗弱的流量处 [57,58], 发现理论上 $z > 6$ 的伽玛暴约占总伽玛暴数目的10%, 表明高红移处的伽玛暴爆发率还是比较大的, 还是很有希望探测到更多的高红移暴. 探测高红移伽玛暴已成为下一代伽玛暴观测卫星(包括EP)的主要科学目标之一.

3 EP探测前景及预期成果

伽玛暴是高红移天体中比较常见的一类天体, 高亮度使得它们能够在恒星开始形成时刻就被探测到. 为了能够充分挖掘伽玛暴探索早期宇宙的潜能, 人们需要有足够大的高红移伽玛暴样本来做研究, 探测到更多的高红移伽玛暴已然成为未来伽玛暴卫星的重要科学目标之一. 在观测者坐标系下, 由于红移效应, 高红移伽玛暴的瞬时辐射的峰值能量理应比低红移暴更软. 然而由于目前探测卫星的灵敏度较低, 使得我们只能观测到高红移处伽玛暴光度函数的亮端, 因此观测到的高红移暴的平均观测峰值能量是 $< E_{P,obs} > \sim 150 \text{ keV}$, 与低红移暴的峰值能量相似. 为此, 人们殷切期盼能够有携带软X射线望远镜且拥有更大观测视场和更高灵敏度的探测卫星横空出世.

要充分解决在第1节中所罗列的几个关于早期宇宙的重要科学问题, 需要借助大量的高红移伽玛暴样本. 为了比其他几个探针(如类星体和高红移星系)更具压倒性的优势, 至少需要探测到上百个 $z > 6$ 的伽玛暴, 其中包括几十个 $z > 8$ 的伽玛暴. 借助经长暴观测检验过的理论模型, Ghirlanda等人 [58]详细计算了拥有不同能段和灵敏度的探测器对高红移伽玛暴的探测率. Salvaterra [55]参考Ghirlanda等人 [58]文中的详细计算过程, 计算了拥有不同观测能段的仪器每年至少探测到10个 $z > 8$ 伽玛暴所应必备的最低灵敏度和视

场, 见图 3. 例如, Swift 卫星的观测能段是 15–150 keV, 灵敏度为 $\sim 0.4 \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 从图 3 中可以看出, Swift 卫星永远不可能达到每年探测到 10 个 $z > 8$ 伽玛暴的目标. 另外, Swift 卫星的视场(Field Of View, FOV)是 1.4 sr, 从图 3 中还可以看出, 为了达到每年探测到 10 个 $z > 8$ 伽玛暴的目标, Swift 卫星至少需要比现有的灵敏度高出 100 倍! 一个拥有和 Swift 卫星相同视场 FOV (即 1.4 sr) 且观测能段是 0.2–5 keV 的 X 射线望远镜只需灵敏度为 $\sim 0.1 \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 就可以达到每年探测到 10 个 $z > 8$ 伽玛暴的目标. 值得一提的是, 这些仪器不仅可以探测高红移暴, 还可以探测到许多的低红移暴.

总之, 利用高红移伽玛暴来研究早期宇宙需要未来拥有更高灵敏度和更宽视场的 X 射线望远镜来观测选择可靠的高红移候选体. 这正是 EP 的优势所在. EP 是为研究软 X 射线天体物理学而专门研制的一个小型天文卫星, 它可以像 Swift 卫星那样具有触发爆源的能力. 瞬时视场约为 $60^\circ \times 60^\circ$ 的宽视场望远

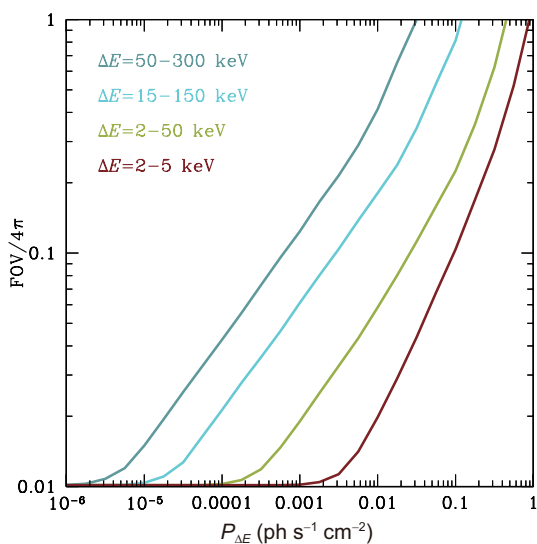


图 3 (网络版彩图)为了达到每年探测到 10 个 $z > 8$ 伽玛暴的目标, 拥有不同观测能段的仪器所必备的最低灵敏度和视场 FOV. 不同颜色的曲线代表不同的能段. 详细计算过程参考文献[58]. 图片取自文献[55]

Figure 3 (Color online) Required sensitivity, in terms of minimum peak flux $P_{\Delta E}$ that can be detected in a given energy band ΔE , and field-of-view (FOV) to detect 10 GRB yr^{-1} with $z > 8$. Different lines represent different energy bands as labeled in the plot. See ref. [58] for the details of the calculation. Adopted from ref. [55].

镜(Wide-Field X-Ray Telescope, WXT)是 EP 的主要载荷, 其主要观测能段为 0.5–4 keV. 在相同灵敏能区内的 FXT (Follow-up X-ray Telescope)是 EP 的后随望远镜. 其视场约为 $1^\circ \times 1^\circ$, 但具有比 WXT 更大的有效面积和灵敏度, 以实现对其的深度观测. 由于第一代恒星的质量可能较大, 产生的伽玛暴的 X 射线余辉辐射持续时间延长, 可能达到 10000 s. 要探测到第一代天体产生的伽玛暴, 要求 X 射线的灵敏度为 $< 1 \text{ mCrab}$, 视场需要 1 个立体角或更大. EP 正好可以满足这些要求. 因此, 预测未来爱因斯坦探针卫星对高红移(如红移 > 6 或 8)伽玛暴的探测率是非常有意义的.

我们也参考文献[58], 借助能够很好地解释 Swift 卫星的伽玛暴观测样本的理论模型, 试着重复 Salvaterra [55] 的计算结果. 我们的计算结果见图 4, 基本可以重复图 3, 证明我们代码的正确可行性.

Ghirlanda 等人 [58] 的主要计算步骤如下:

(1) 伽玛暴的红移分布与伽玛暴的爆发率和额外红移演化项有关(红移上限设为 $z = 20$):

$$\psi(z) \propto (1+z)^\delta \psi_*(z), \quad (1)$$

其中 $\psi_*(z)$ 是恒星形成率 [21,59]:

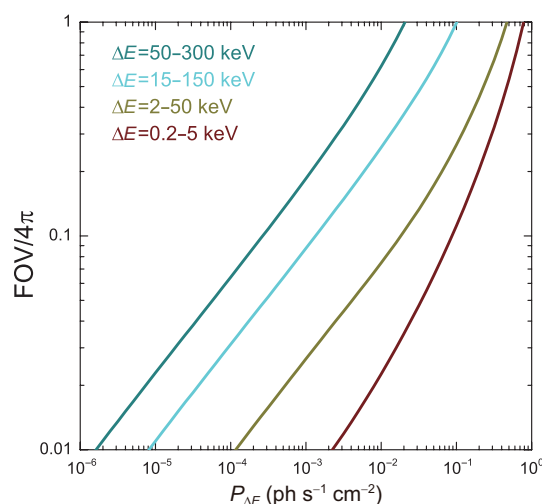


图 4 (网络版彩图)同图 3 类似, 为了达到每年探测到 10 个 $z > 8$ 伽玛暴的目标, 拥有不同观测能段的仪器所必备的最低灵敏度和视场 FOV. 详细计算过程参考文献[58]

Figure 4 (Color online) Same as Figure 3, required sensitivity that can be detected in a given energy band ΔE , and FOV to detect 10 GRB yr^{-1} with $z > 8$. See ref. [58] for the details of the calculation.

$$\psi_{\star}(z) = \frac{0.0157 + 0.118z}{1 + (z/3.23)^{4.66}}, \quad (2)$$

其中 $\psi_{\star}(z)$ 的单位是 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$. 为了解释Swift卫星完备样本的观测红移分布, Salvaterra等人^[25]发现, 红移演化指数 δ 的最佳值为 $\delta = 1.7 \pm 0.5(1\sigma)$. 这里的计算 δ 取为1.7.

(2) 假定伽玛暴光度函数是一个拐折幂律函数^[25]:

$$\phi(L_{\text{iso}}) \propto \begin{cases} (L_{\text{iso}}/L_{\text{cut}})^x, & L_{\text{iso}} < L_{\text{cut}}, \\ (L_{\text{iso}}/L_{\text{cut}})^y, & L_{\text{iso}} > L_{\text{cut}}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $x = -1.50$, $y = -2.32$, $L_{\text{cut}} = 3.8 \times 10^{52} \text{ erg s}^{-1}$, L_{iso} 是各向同性峰值光度.

(3) 为了计算一定能段范围的流量, 需要给定伽玛暴的能谱. 假设所有暴的能谱都可以用Band函数来描述^[60]. Band谱的低能和高能谱指数分别取为 $\alpha = -1$ 和 $\beta = -2.3$ ^[61-63].

(4) 谱峰值能量 E_{peak} 则由 $E'_{\text{peak}} - L_{\text{iso}}$ 关系估算^[5]. 这里采用的 $E'_{\text{peak}} - L_{\text{iso}}$ 关系表达式为^[64]

$$\log(E'_{\text{peak}}) = -25.33 + 0.53 \log(L_{\text{iso}}), \quad (4)$$

其中 $E'_{\text{peak}} = E_{\text{peak}}(1+z)$ 是静止坐标系下的谱峰值能量.

(5) 在特定的能段范围 $\Delta E = [E_1, E_2]$ 里, 每个暴的峰值光子流量 P 为

$$P_{\Delta E} = \frac{L_{\text{iso}}}{4\pi d_L(z)^2} \cdot \frac{\int_{E_1}^{E_2} N(E) dE}{\int_{1 \text{ keV}/(1+z)}^{10^4 \text{ keV}/(1+z)} E N(E) dE}, \quad (5)$$

其中 $N(E)$ 是观测坐标系下的光子谱, $d_L(z)$ 是光度距离.

最后, 伽玛暴的模拟样本根据Swift/BAT探测到的真实样本作归一化. Salvaterra等人^[25]采用的是峰值流量 $P \geq 2.6 \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (15-150 keV)的Swift/BAT样本. Ghirlanda等人^[58]从现有的Swift样本中(截至2014年7月共有773个长暴)提取了204个 $P \geq 2.6 \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的伽玛暴. 考虑Swift的典型视场是1.4 sr和观测时间约为9.5年, 可以估算Swift对 $P \geq 2.6 \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的伽玛暴的探测率约

为 $\sim 15 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 根据该探测率对模拟样本作相应的归一化.

参考文献^[58]的计算过程以及基于EP的观测模式(观测能段0.5-4 keV; 视场 $60^\circ \times 60^\circ$, 约为1.1 sr; 灵敏度取为 $10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 并且考虑到EP的平均有效观测时间效率 $\sim 70\%$ (EP在每一轨期间有一段时间要关机, 如地球遮挡、太阳等, 过SAA区也关机, 平均总的有效观测时间为运行时间的 $\sim 70\%$), 我们计算了未来EP对高红移伽玛暴的探测率: (1) 对 $z > 6$ 伽玛暴的探测率为 $\sim 20 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$; (2) 对 $z > 8$ 伽玛暴的探测率为 $\sim 6 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$; (3) 对 $z > 12$ 伽玛暴的探测率为 $\sim 1 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 图5(实线)展示的是EP对高红移($z > 6$, $z > 8$ 或 $z > 12$)伽玛暴的探测数目(N)随观测时间(T_{obs})的变化. 可以预言, 未来EP运行3年可探测到 ~ 65 个 $z > 6$ 的伽玛暴, 其中包括 ~ 20 个 $z > 8$ 的伽玛暴和 ~ 3 个 $z > 12$ 的伽玛暴.

当然, 目前我们的预期结果还是过于乐观, 在我们的计算过程中还存在一些不确定性: (1) 高红移伽玛暴爆发率的不确定性. 现在人们一般是用各种外推方法或者理论预期来计算高红移伽玛暴的爆发率, 显然使用不同的理论模型计算得到的伽玛暴爆发率是有一定差异的. (2) 伽玛暴的能谱特征会一定程度影响我们的预测结果. 在计算中, 取典型的非热谱(即Band函数)作为伽玛暴的能谱. 如果增加其他X射线辐射成分(如光球成分), 这就会影响我们的计算结果. (3) EP的灵敏度肯定不是用一个简单的阈值流量($10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)就可以表征, 而是依赖于较为复杂的仪器响应函数.

为了保守起见, 我们还计算了 $\psi(z) \propto (1+z)^{1.2} \psi_{\star}(z)$ 的情形, 即红移演化指数 δ 取为其最佳值的 1σ 下限: $\delta = 1.2$. 对于该情形, 未来EP: (1) 对 $z > 6$ 伽玛暴的探测率为 $\sim 11 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$; (2) 对 $z > 8$ 伽玛暴的探测率为 $\sim 3 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$; (3) 对 $z > 12$ 伽玛暴的探测率为 $\sim 0.4 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 图5(虚线)展示的是对于该情形EP对高红移($z > 6$, $z > 8$ 或 $z > 12$)伽玛暴的探测数目(N)随观测时间(T_{obs})的变化. 可以预言, 未来EP运行3年可探测到 ~ 36 个 $z > 6$ 的伽玛暴, 其中包括 ~ 10 个 $z > 8$ 的伽玛暴和 ~ 1 个 $z > 12$ 的伽玛暴. 虽然我们的预期结果

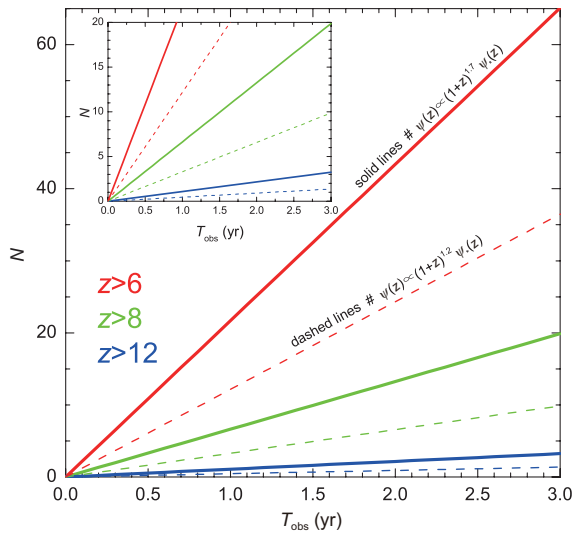


图5 (网络版彩图)EP对高红移($z > 6$, $z > 8$ 或 $z > 12$)伽玛暴的探测数目随观测时间的变化

Figure 5 (Color online) Expected number of high-redshift ($z > 6$, $z > 8$, or $z > 12$) GRBs detected by EP as a function of the mission lifetime.

还存在一些不确定性,但是我们的结果对EP还是具有一定的鼓舞作用.

此外,还利用Swift/BAT触发的伽玛暴样本,结合EP的灵敏度进行模拟,看看这些BAT触发的伽玛暴能否被EP触发和探测到.图6展示的是Swift BAT/XRT探测到的GRB 090423的光变曲线,红移为 $z = 8.2$ [42].考虑EP的灵敏度,我们的模拟发现这个BAT触发的GRB 090423也能够被EP/WXT在 $z = 8.2$ 处探测到(图7(a)).如果将 $z = 8.2$ 的GRB 090423放到更高红移处,我们的模拟表明EP/WXT

依然可以在更高红移处探测到该暴.图7(b), (c)分别展示的是GRB 090423在 $z = 12$ 和15处被EP/WXT探测到的模拟光变曲线.

值得一提的是,高红移伽玛暴和早期宇宙也是下一代国际大型天文观测设备(30 m级望远镜、JWST, SKA, Athena+等)的核心观测目标.而EP将为这些观测设备提供目标,引导其观测.

4 结论

高红移伽玛暴是研究早期宇宙的有效探针,可作为宇宙距离的标准烛光,它们还携带了大量关于早期宇宙的恒星形成史、金属丰度及增丰过程以及宇宙再电离的信息.为了能够充分挖掘伽玛暴探索早期宇宙的潜能,人们需要有足够大的高红移伽玛

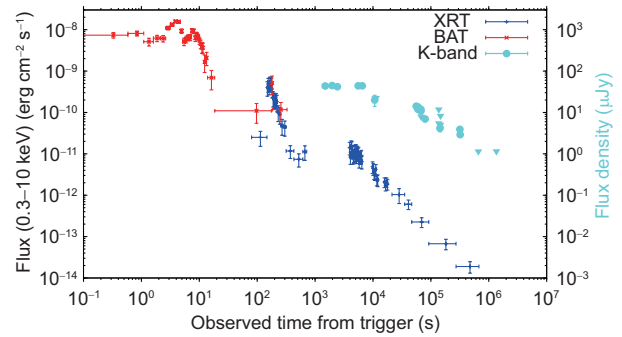


图6 (网络版彩图)Swift卫星探测到的GRB 090423的多波段光变曲线 [42]

Figure 6 (Color online) Light curve of GRB 090423 as observed by Swift/BAT (red crosses), Swift/XRT (blue plus) and in the NIR (cyan points). Adopted from ref. [42].

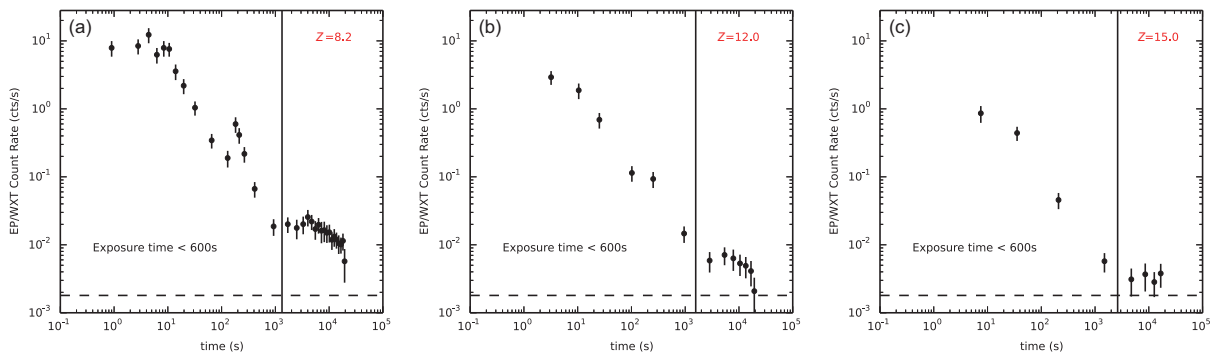


图7 (网络版彩图)EP/WXT对GRB 090423在不同红移处的模拟探测

Figure 7 (Color online) Light curves of GRB 090423 as simulated by EP/WXT at different redshifts.

暴样本来研究,但是现有的观测样本还非常少. 探测高红移伽玛暴已然成为下一代卫星(包括EP卫星)的重要科学目标之一.

由于红移效应,大部分高红移伽玛暴的观测峰值能量应该比低红移暴的观测峰值能量更软,主要落在软X射线波段. EP拥有很高的灵敏度和极大的观测视场,且主要观测能段为软X射线波段0.5–4 keV,因此非常适合高红移伽玛暴的观测. 考虑EP的能力和观测模式,并且借助能够很好解释Swift卫星伽玛暴观测样本的理论模型,我们预测了未来EP对高红移伽玛暴的探测率: (1) 对 $z > 6$ 伽玛暴的探测

率为 $\sim 20 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$; (2) 对 $z > 8$ 伽玛暴的探测率为 $\sim 6 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$; (3) 对 $z > 12$ 伽玛暴的探测率为 $\sim 1 \text{ events yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 未来EP运行3年有望探测到 ~ 65 个 $z > 6$ 的伽玛暴,其中包括 ~ 20 个 $z > 8$ 的伽玛暴和 ~ 3 个 $z > 12$ 的伽玛暴. 当然,目前的预期结果还是过于乐观,在我们的计算过程中还存在一些不确定性. 但是,保守估计未来EP运行3年仍然可探测到 ~ 36 个 $z > 6$ 的伽玛暴,其中包括 ~ 10 个 $z > 8$ 的伽玛暴和 ~ 1 个 $z > 12$ 的伽玛暴. EP将提供丰富的高红移伽玛暴观测,而这些丰富的观测信息有望被用来解决早期宇宙的部分重要科学问题.

参考文献

- 1 Kouveliotou C, Meegan C A, Fishman G J, et al. Identification of two classes of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1993, 413: L101–L104
- 2 Cucchiara A, Levan A J, Fox D B, et al. A Photometric redshift of $z \sim 9.4$ for GRB 090429B. *Astrophys J*, 2011, 736: 7
- 3 Amati L, Frontera F, Tavani M, et al. Intrinsic spectra and energetics of BeppoSAX Gamma-ray bursts with known redshifts. *Astron Astrophys*, 2002, 390: 81–89
- 4 Ghirlanda G, Ghisellini G, Lazzati D, et al. The collimation-corrected gamma-ray burst energies correlate with the peak energy of their νF_ν spectrum. *Astrophys J*, 2004, 616: 331–338
- 5 Yonetoku D, Murakami T, Nakamura T, et al. Gamma-ray burst formation rate inferred from the spectral peak energy-peak luminosity relation. *Astrophys J*, 2004, 609: 935–951
- 6 Liang E, Zhang B. Model-independent multivariable Gamma-ray burst luminosity indicator and its possible cosmological implications. *Astrophys J*, 2005, 633: 611–623
- 7 Hjorth J, Sollerman J, Møller P, et al. A very energetic supernova associated with the gamma-ray burst of 29 March 2003. *Nature*, 2003, 423: 847–850
- 8 Stanek K Z, Matheson T, Garnavich P M, et al. Spectroscopic discovery of the Supernova 2003dh associated with GRB 030329. *Astrophys J*, 2003, 591: L17–L20
- 9 Ciardi B, Loeb A. Expected number and flux distribution of gamma-ray burst afterglows with high redshifts. *Astrophys J*, 2000, 540: 687–696
- 10 Gou L J, Meszaros P, Abel T, et al. Detectability of long gamma-ray burst afterglows from very high redshifts. *Astrophys J*, 2004, 604: 508–520
- 11 Dai Z G, Liang E W, Xu D, et al. Constraining Ω_M and dark energy with gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2004, 612: L101–L104
- 12 Ghirlanda G, Ghisellini G, Lazzati D, et al. Gamma-ray bursts: New rulers to measure the universe. *Astrophys J*, 2004, 613: L13–L16
- 13 Schaefer B E. Gamma-ray burst hubble diagram to $z=4.5$. *Astrophys J*, 2003, 583: L67–L70
- 14 Schaefer B E. The hubble diagram to redshift > 6 from 69 gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2007, 660: 16–46
- 15 Daigne F, Rossi E M, Mochkovitch R. The redshift distribution of *Swift* gamma-ray bursts: Evidence for evolution. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 372: 1034–1042
- 16 Guetta D, Piran T. Do long duration gamma ray bursts follow star formation? *J Cosmol Astropart Phys*, 2007, 2007: 003
- 17 Kistler M D, Yüksel H, Beacom J F, et al. An unexpectedly *Swift* rise in the gamma-ray burst rate. *Astrophys J*, 2008, 673: L119–L122
- 18 Wang F Y. The high-redshift star formation rate derived from gamma-ray bursts: Possible origin and cosmic reionization. *Astron Astrophys*, 2013, 556: A90
- 19 Wei J J, Wu X F, Melia F, et al. Cosmological tests using gamma-ray bursts, the star formation rate and possible abundance evolution. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 439: 3329–3341
- 20 Langer N, Norman C A. On the collapsar model of long gamma-ray bursts: Constraints from cosmic metallicity evolution. *Astrophys J*, 2006, 638: L63–L66
- 21 Li L X. Star formation history up to $z = 7.4$: Implications for gamma-ray bursts and cosmic metallicity evolution. *Mon Not R Astron Soc*, 2008,

388: 1487–1500

- 22 Xu C Y, Wei D M. The effect of the initial mass function of stars on the burst rate of GRBs. *Chin Astron Astrophys*, 2009, 33: 151–157
- 23 Wang F Y, Dai Z G. An evolving stellar initial mass function and the gamma-ray burst redshift distribution. *Astrophys J*, 2011, 727: L34
- 24 Virgili F J, Zhang B, Nagamine K, et al. Gamma-ray burst rate: High-redshift excess and its possible origins. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 417: 3025–3034
- 25 Salvaterra R, Campana S, Vergani S D, et al. A complete sample of bright *Swift* long gamma-ray bursts. I. Sample presentation, luminosity function and evolution. *Astrophys J*, 2012, 749: 68
- 26 Ciardi B, Ferrara A. The first cosmic structures and their effects. *Space Sci Rev*, 2005, 116: 625–705
- 27 Bromm V, Yoshida N. The first galaxies. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2011, 49: 373–407
- 28 Hosokawa T, Omukai K, Yoshida N, et al. Protostellar feedback halts the growth of the first stars in the universe. *Science*, 2011, 334: 1250–1253
- 29 Hirano S, Hosokawa T, Yoshida N, et al. One hundred first stars: Protostellar evolution and the final masses. *Astrophys J*, 2014, 781: 60
- 30 Bromm V, Loeb A. High-redshift gamma-ray bursts from population III progenitors. *Astrophys J*, 2006, 642: 382–388
- 31 Campisi M A, Maio U, Salvaterra R, et al. Population III stars and the long gamma-ray burst rate. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 416: 2760–2767
- 32 Wang F Y, Bromm V, Greif T H, et al. Probing pre-galactic metal enrichment with high-redshift gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2012, 760: 27
- 33 Bromm V, Ferrara A, Coppi P S, et al. The fragmentation of pre-enriched primordial objects. *Mon Not R Astron Soc*, 2001, 328: 969–976
- 34 Schneider R, Ferrara A, Natarajan P, et al. First stars, very massive black holes, and metals. *Astrophys J*, 2002, 571: 30–39
- 35 Bromm V, Loeb A. The expected redshift distribution of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2002, 575: 111–116
- 36 Wyithe J S B, Loeb A. Reionization of hydrogen and helium by early stars and quasars. *Astrophys J*, 2003, 586: 693–708
- 37 Qian Y Z, Wasserburg G J. A model for abundances in metal-poor stars. *Astrophys J*, 2001, 559: 925–941
- 38 Oh S P. Probing the dark ages with metal absorption lines. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 336: 1021–1029
- 39 Fan X, Carilli C L, Keating B. Observational constraints on cosmic reionization. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2006, 44: 415–462
- 40 Furlanetto S R, Loeb A. Metal absorption lines as probes of the intergalactic medium prior to the reionization epoch. *Astrophys J*, 2003, 588: 18–34
- 41 Kawai N, Kosugi G, Aoki K, et al. An optical spectrum of the afterglow of a gamma-ray burst at a redshift of $z = 6.295$. *Nature*, 2006, 440: 184–186
- 42 Salvaterra R, Valle M D, Campana S, et al. GRB 090423 at a redshift of z approximately 8.1. *Nature*, 2009, 461: 1258–1260
- 43 Gunn J E, Peterson B A. On the density of neutral hydrogen in intergalactic space. *Astrophys J*, 1965, 142: 1633–1641
- 44 Barkana R, Loeb A. In the beginning: The first sources of light and the reionization of the universe. *Phys Rep*, 2001, 349: 125–238
- 45 Robertson B E, Ellis R S, Dunlop J S, et al. Early star-forming galaxies and the reionization of the Universe. *Nature*, 2010, 468: 49–55
- 46 Totani T, Kawai N, Kosugi G, et al. Implications for cosmic reionization from the optical afterglow spectrum of the gamma-ray burst 050904 at $z = 6.3^*$. *Publ Astron Soc Jpn*, 2006, 58: 485–498
- 47 Totani T, Aoki K, Hattori T, et al. Probing intergalactic neutral hydrogen by the Lyman alpha red damping wing of gamma-ray burst 130606A afterglow spectrum at $z = 5.913$. *Publ Astron Soc Jpn*, 2014, 66: 63–63
- 48 Chornock R, Berger E, Fox D B, et al. GRB 130606A as a probe of the intergalactic medium and the interstellar medium in a star-forming galaxy in the first Gyr after the big bang. *Astrophys J*, 2013, 774: 26
- 49 Chornock R, Berger E, Fox D B, et al. GRB 140515A at $z = 6.33$: Constraints on the end of reionization from a gamma-ray burst in a low hydrogen column density environment. arXiv: 1405.7400
- 50 Hartoog O E, Malesani D, Fynbo J P U, et al. VLT/X-Shooter spectroscopy of the afterglow of the *Swift* GRB 130606A: Chemical abundances and reionisation at $z \sim 6$. *Astron Astrophys*, 2015, 580: A139
- 51 de Souza R S, Mesinger A, Ferrara A, et al. Constraints on warm dark matter models from high-redshift long gamma-ray bursts. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 432: 3218–3227
- 52 Greiner J, Krühler T, Fynbo J P U, et al. GRB 080913 at Redshift 6.7. *Astrophys J*, 2009, 693: 1610–1620
- 53 Laskar T, Berger E, Tanvir N, et al. GRB 120521C at $z \sim 6$ and the properties of high-redshift γ -ray bursts. *Astrophys J*, 2014, 781: 1
- 54 Tanvir N R. The highest redshift gamma-ray bursts. arXiv: 1307.6156
- 55 Salvaterra R. High redshift gamma-ray bursts. *J High Energy Astrophys*, 2015, 7: 35–43
- 56 Melandri A, Covino S, Rogantini D, et al. Optical and X-ray rest-frame light curves of the BAT6 sample. *Astron Astrophys*, 2014, 565: A72
- 57 Salvaterra R, Campana S, Chincarini G, et al. Gamma-ray bursts from the early Universe: Predictions for present-day and future instruments. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 385: 189–194
- 58 Ghirlanda G, Salvaterra R, Ghisellini G, et al. Accessing the population of high-redshift Gamma ray bursts. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 448:

2514–2524

- 59 Hopkins A M, Beacom J F. On the Normalization of the cosmic star formation history. *Astrophys J*, 2006, 651: 142–154
- 60 Band D, Matteson J, Ford L, et al. BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I - Spectral diversity. *Astrophys J*, 1993, 413: 281–292
- 61 Kaneko Y, Preece R D, Briggs M S, et al. The complete spectral catalog of bright BATSE gamma-ray bursts. *Astrophys J Suppl S*, 2006, 166: 298–340
- 62 Nava L, Ghirlanda G, Ghisellini G, et al. Spectral properties of 438 GRBs detected by Fermi/GBM. *Astron Astrophys*, 2011, 530: A21
- 63 Goldstein A, Burgess J M, Preece R D, et al. The Fermi GBM gamma-ray burst spectral catalog: The first two years. *Astrophys J Suppl Ser*, 2012, 199: 19
- 64 Nava L, Salvaterra R, Ghirlanda G, et al. A complete sample of bright *Swift* long gamma-ray bursts: Testing the spectral-energy correlations. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 421: 1256–1264

High redshift gamma-ray bursts as a probe of the early universe and first stars

WEI JunJie^{1,2*}, WU XueFeng¹, WANG FaYin³, LIU Zhu⁴, DAI Zi-Gao³ & ZHANG Bing^{5,6}

¹Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

²Guangxi Key Laboratory for Relativistic Astrophysics, Nanning 530004, China;

³School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China;

⁴National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

⁵Department of Astronomy, School of Physics & Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China;

⁶Department of Physics and Astronomy, University of Nevada Las Vegas, Las Vegas, NV 89154, USA

Gamma-ray bursts (GRBs) are the most violent explosions in the universe. Thanks to their extreme brightness, GRBs can be detected up to the edge of the visible universe. As bright beacons in the deep universe, high-redshift GRBs have been considered as an ideal tool to explore the properties of the early universe: including the dark energy and cosmological parameters, star formation rate, first stars, the reionization and metal enrichment history of the universe. So the detection of high- z GRBs has important scientific significance. Compared to current missions, Einstein Probe has a higher sensitivity and a wider field-of-view, operating the soft X-ray band (0.5–4 keV), which would be suitable for the detection of high- z GRBs. With its observational mode and ability, we compute the expected detection rate of high- z GRBs by Einstein Probe by means of a observational tested population synthesis model of Swift GRBs. Our results show that the detection rates are expected to be about 20 events $\text{yr}^{-1} \text{sr}^{-1}$ for $z > 6$ bursts, 6 events $\text{yr}^{-1} \text{sr}^{-1}$ for $z > 8$ bursts, and 1 events $\text{yr}^{-1} \text{sr}^{-1}$ for $z > 12$ bursts, respectively. Over the 3 yr lifetime of the mission, Einstein Probe will able to detect about 65 GRBs at $z > 6$, including ~ 20 GRBs at $z > 8$ and ~ 3 GRBs at $z > 12$. In sum, Einstein Probe would significantly improve the detection of high- z GRBs, and these abundant observational information would probably reveal some scientific mysteries of the early universe.

gamma-ray burst, high-redshift, early universe, first stars

PACS: 98.70.Rz, 98.62.Py, 98.80.Es, 97.20.Wt

doi: [10.1360/SSPMA2017-00248](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00248)