

伽玛射线暴源的新分布： BATSE 的观测结果*

徐 达 维 史 天 一

(北京师范大学物理系 北京 100875)

摘 要

介绍了康普顿 γ 射线天文台上 BATSE 有关暴源分布观测的新发现。这一发现对 80 年代以前所普遍接受的 γ 射线暴起源于银盘内中子星的模型提出了严重挑战，并阐明了几种以 BATSE 结果为基础的暴源分布模型。

关键词 伽玛射线源：暴源 — 伽玛射线源：观测 — 宇宙飞行器

1 引 言

宇宙伽玛射线暴 (cosmic Gamma-ray burst, 简称 GRB) 是一种短时标、突发的高能爆发现象。1973 年 Klebesadel 等人在美国天体物理杂志上首次发表了观测到 16 个来自宇宙空间的 GRB 事例^[1]。20 年来，人们对这一新的天体现象进行了广泛的实验观测和理论研究，发射了许多装有能探测 GRB 仪器的卫星，对暴源位置、暴的时间特性和流量等进行了大量的观测。在此基础上，对暴源分布、能谱的形成、能量的产生机制等提出了许多理论模型。但由于 GRB 现象本身的复杂性 (它的突发性、持续时间短、发生在无法预测的位置上等)，很多根本性问题并未解决，例如最基本也是最重要的暴源离我们的距离都不能确定，因而爆发能量究竟有多大也没有定论。为了更深入地观测和研究 GRB 现象，1991 年 4 月美国宇航局发射了 Compton 伽玛射线天文台 (Compton gamma-ray observatory, 简称 Compton GRO)，其中的 Burst and Transient Source Experiment (简称 BATSE) 仪器是专门为了监测 GRB 而设计的。Compton GRO 升空以来，观测到大量 GRB 现象，在暴源分布上得到了完全出乎意料的与以前观测大相径庭的结果，这重新激起对 GRB 研究的广泛兴趣，使 GRB 问题成为当前高能天体物理研究中一个新的热点和前沿领域。在本文中扼要介绍 Compton GRO 的 BATSE 仪器及其观测结果，以及由此而得出的各种可能暴源分布模型。为了更好地说明 BATSE 对

1993 年 11 月 30 日收到

国家自然科学基金资助项目

GRB 观测结果, 对比 BATSE 前后情况, 我们首先在第二部分中简要说明 BATSE 以前的 GRB 观测状况。第三部分介绍 Compton GRO 和 BATSE 以及观测结果。第四部分讨论由观测结果得到的各种可能的暴源分布以及它们存在的问题。最后对 GRB 研究给予简短的展望。

2 BATSE 以前对 GRB 的观测状况

BATSE 以前已发现了 500 多个 GRB, 这些暴大致可以分成两类^[2]。一类称为经典暴 (classical bursts), 这类暴的特点是: 暴的持续时间较长, 由几秒到十几分钟, 暴的时间特性具有多峰结构; 能谱较硬, 并有吸收和发射特征线^[3], 能谱硬度随时间迅速变软, 以及没有观测到重暴现象。另一类是所谓软重暴 (soft repeaters), 这一类暴实际上只有三个, 其中 1979 年 1 月 7 日暴已重爆了一百多次。软重暴的持续时间通常都短于 1s。它们只有简单的单峰时间特性, 能谱较软而且不随时间改变, 一般没有特征线 (除 1979 年 3 月 5 日有发射线外)。

GRB 能谱可以从几个 keV 延伸到几十个 MeV 以上, 但它的能量主要集中在伽玛射线范围内。10keV 以下 (属于 X 射线范围) 能量只占总能量的 2% 左右。能谱中除连续谱外, 在经典暴中还有特征线存在。特征线有两种, 一种是在 350—450keV 范围的发射线, 1979 年 3 月 5 日软暴也有发射线, 通常认为它们是由正负电子对湮灭为两个光子的谱线经过强引力场红移 (红移量 z 约为 0.2—0.5) 造成的。这是 GRB 起源于强引力场中子星表面的一个证明, 约有 1/5 的经典暴存在这样的发射线。另一种是在 20—70keV 范围内存在的吸收线。约有 1/4 的暴有这样的特征线, 它们通常被解释为在强磁场中电子基态跃迁到第一朗道能级时吸收光子造成的。但多年来对这一解释一直有争议, 认为同时还应观测到更高朗道能级吸收线。1987 年 Ginga 卫星上伽玛射线探测器果然观测到在 1987 年 3 月 3 日暴的能谱上 20keV 和 40keV 处有两条吸收线。之后在 1988 年 2 月 5 日暴中也观测到类似的两条吸收线^[4]。因此关于强磁场中回旋吸收线的解释基本上得到肯定。回旋吸收线的存在是 GRB 起源强磁场约为 2×10^{12} G 的证据。根据上述观测特性, 通常认为 GRB 起源于强磁化中子星表面或附近^[3], 这也与 BATSE 以前观测到的 GRB 源的分布相一致。

在 BATSE 以前观测到的暴源的空间分布是各向同性的, 即在银道坐标上没有向银心和银道面的集中。由于还没有一个观测到的 GRB 可以确定无疑地和已知的天体相对应, 为了获得有关暴源距离信息, 通常研究 $\log N(> C_{\max}) - \log C_{\max}$ 分布, 其中 C_{\max} 表示最大计数率, $N(> C_{\max})$ 表示探测器观测到计数率大于 C_{\max} 的暴源数。因为对于一个暴来说, 探测器接收到最大计数率 C_{\max} 和距离平方成反比。对于按距离均匀分布的暴源来说, 暴的数目与距离立方 (即体积) 成正比。因此 $N(> C_{\max}) \sim C_{\max}^{-3/2}$ 。所以如果暴源沿距离分布是均匀的, 则 $\log N(> C_{\max}) - \log C_{\max}$ 图上应是一条斜率为 $-3/2$ 的直线。但 BATSE 以前的观测表明 $\log N - \log C_{\max}$ 在较小 C_{\max} 处低于斜率为 $-3/2$ 的直线, 如图 1 所示^[2]。虽然这一结果似乎表明暴源沿距离分布是不完全均匀的, C_{\max} 小的暴数量少, 但由于 BATSE 以前的探测器灵敏度都较低, 一些较弱的暴 (C_{\max} 较小)

已经到了探测器的选择边缘。因此很可能一些较弱的暴未能记录下来。并且通过气球探测到一些弱暴可以使 $\log N - \log C_{\max}$ 的曲线在低处提高^[5]，所以，在 BATSE 以前，观

测结果虽然不能完全肯定暴源沿距离分布是均匀的，但大多数人认为它们应是均匀的。

综合 BATSE 以前对暴源空间分布(包括径向和角向分布)的观测结果可以得到如下有关 GRB 源分布的认识:即认为 GRB 是发生在离我们较近的银盘内, 盘的标高约为几百 pc 至 1kpc。我们以往观测到的 GRB 就发生在以地球为中心的半径为几百至一千 pc 范围内。这个范围内, 暴源分布既是各向同性, 又是均匀的。这样的暴源分布与上面提到 GRB 起源于中子星的假设也是一致的。因为在银盘内中子星也具有这样的分布。上述看法在 BATSE 以前为大多数天文学家所接受。在此基础上对 GRB 的能源、爆发机制、能谱的形成和解释提出了各种理论模型, 进行了广泛的研究。但也有极少数天文学家认为 GRB 可能发生在很遥远的宇宙空间, 这样的暴源分布将是各向同性但并不均匀^[6]。为了最后确认 GRB 空间分布特性,

需要对更多的 GRB 样品进行观测, 特别是

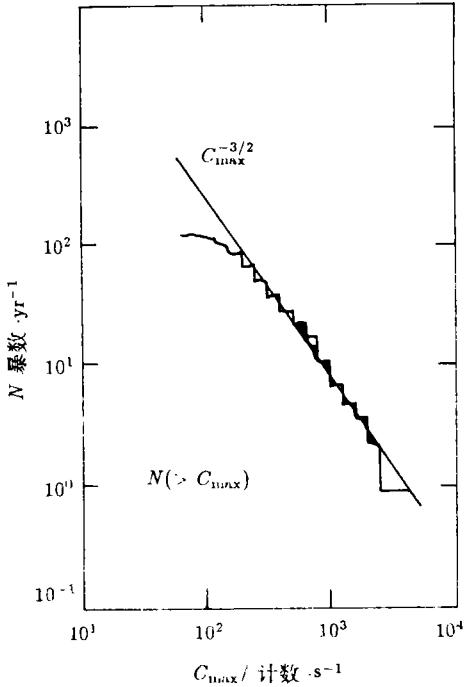


图 1^[2]

对那些以前的探测器不能探测到的弱暴进行观测, 这就要提高探测的灵敏度。此外, BATSE 以前的绝大多数 GRB 探测仪器不能独自地测定暴的方位, 因此很难确定弱暴的空间分布。而 BATSE 仪器正是针对上述问题加以改进的。

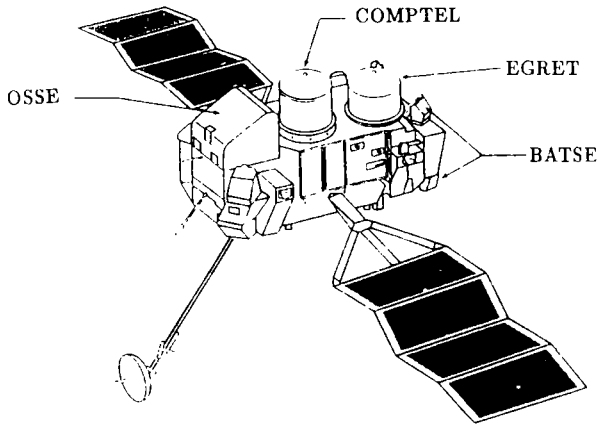
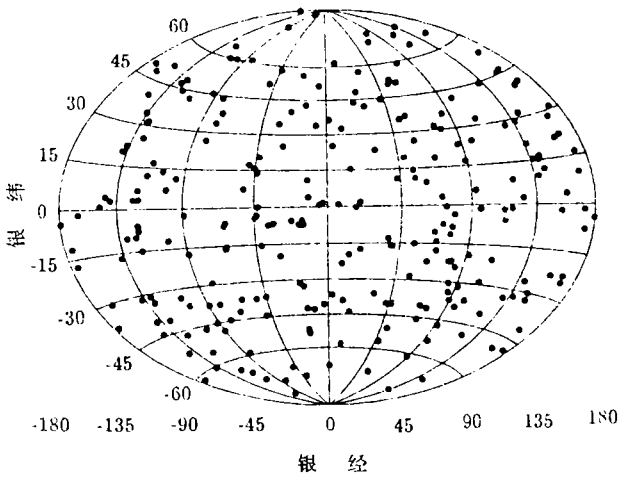
3 BATSE 和 GRB 源分布的新发现

Compton GRO 重量为 16 吨, 它由四部分仪器组成, 即 BATSE, COMPTEL (Compton 望远镜), EGRET (高能伽玛射线实验望远镜) 和 OSSE (方位闪烁谱仪实验), 见图 2^[7]。

Compton 覆盖了由 15keV—30GeV 能量范围的 γ 射线的测量。OSSE 的视场范围较窄, 可对具体源和低能 γ 射线进行研究, 它的探测能量范围为 100keV—10MeV, 主要用于太阳 γ 射线和中子星的观测。COMPTEL 和 EGRET 都是宽视场仪器, 对中高能 γ 射线进行高灵敏度的测量。COMPTEL 的能量范围在 1—3MeV, 而 EGRET 覆盖的能量范围从 20MeV—30GeV。BATSE 用于连续监视全天 γ 暴事件。它由 8 个分布在 Compton 各个角落上的非准直宽场探测舱组成。每个探测舱包含一个厚 1.27cm, 直径 50.8cm 的大面积 NaI 闪烁晶体, 它可以探测 20keV—2MeV 能量范围的 γ 光子。源

在空间的方位可以通过比较这些探测器的计数率来确定，因此 BATSE 可以完全独自确定暴源的方位。探测器流量阈值为 $10^{-7} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，比以前的探测器降低一个量级。在探测器后面有三个巨型光电倍增管，一旦观测到 GRB 事件，BATSE 就会将大量数据传回地面，同时给其他三个仪器送去信号，对该事例进行更宽能带的研究。

在 BATSE 观测最初发现的 261 个 GRB 事例中，发现它们在空间的分布是各向同性的（至今已发现的 GRB 达到 800 个，仍然是各向同性的分布），见图 3^[8]。

图 2^[7]图 3^[8]

通常采用测量银道坐标中偶极矩和四极矩的平均值 $\langle \cos\theta \rangle$ 和 $\langle \sin^2 b \rangle$ 来估计暴源分布各向同性性质。 θ 是暴源和银心之间的角度。对于各向同性分布， $\langle \cos\theta \rangle = 0$ 。现在

对 261 个 GRB 事例得到的 $\cos\theta$ 平均值为:

$$\langle \cos\theta \rangle = 0.008 \pm 0.035 \quad (1)$$

b 是银道坐标的纬度, 对于各向同性的分布, $\langle \sin^2 b \rangle = 0.333$, 而对图 3 中 261 个 GRB 事例, 得到四极矩平均值为:

$$\langle \sin^2 b \rangle = 0.313 \pm 0.011 \quad (2)$$

由此可见, GRB 在空间分布的确是高度各向同性的, 既无偶极分布, 也无四极分布。

BATSE 研究小组采用 V/V_{\max} 来分析暴源随距离分布情况。由于它采用相对比值, 所以消除了仪器本身所带来的对测量的影响。其中 V 表示延伸到暴所在处的体积, V_{\max} 表示同一个暴延伸到仍然可以被探测器接收到的体积。由于体积和距离三次方成正比, 而探测器接收到的计数率与距离平方成反比, 所以有:

$$\frac{V}{V_{\max}} = \left(\frac{C_{\max}}{C_{\min}} \right)^{-3/2} \quad (3)$$

其中 C_{\max} 是探测器接收到的最大计数率, C_{\min} 是它的点火阈值计数率。BATSE 小组公布了最初 140 个暴的 $\log N \left(> C_{\max}/C_{\min} \right) - \log \left(C_{\max}/C_{\min} \right)$ 图和 $N - V/V_{\max}$ 图, 见图 4(a) 和 (b)^[9]。

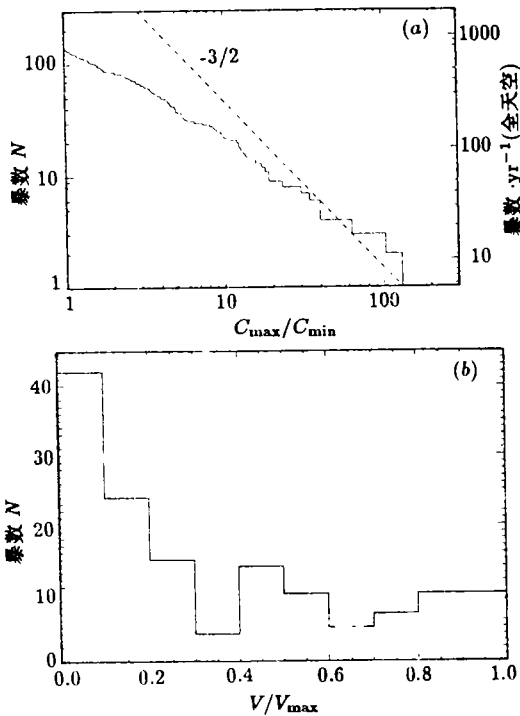


图 4^[9]

图 4(a) 表明在低端 (C_{\max}/C_{\min} 较小) 暴数目明显小于均匀分布时斜率为 $-3/2$ 的直线。这说明暴的分布随距离是不均匀的。右边的纵坐标表明每年探测到的 GRB 数目, 对于 BATSE 来说, 每年为 800 个左右。 V/V_{\max} 的取值范围是在 0 和 1 之间, 如果暴源按距离均匀分布, 那末它的平均值 $\langle V/V_{\max} \rangle = 0.5$, 但图 4(b) 表示的 143 个 GRB 的 V/V_{\max} 平均值:

$$\left\langle \frac{V}{V_{\max}} \right\rangle = 0.348 \pm 0.024 \quad (4)$$

明显小于 0.5。这同样证明 GRB 在空间分布是不均匀的, 而且近处的暴多于远处的暴。之后对 241 个 GRB 样品得到的 $\langle V/V_{\max} \rangle$ 为 0.33 ± 0.02 。对于 BATSE 暴源分布的观测结果, 有两点值得指出: 一是 BATSE 测得的 GRB 事例中有 80% 左右是以前的

探测器所未能发现的 (因为现在的仪器灵敏度比过去高一个量级) 流量较小的暴。如果暴源是均匀分布的, 那末以前观测中看到的流量较小的暴少的现象应得到纠正, 即应该得到暴源均匀分布的结论, 但 BATSE 结果却是否定的, 这说明暴源分布的确是不均匀的。二是由于仪器灵敏度提高, BATSE 能观测到更大距离处的暴, 在超过银盘距离后, 显然在垂直于盘方向上暴分布将明显少于其他方向, 所以如果 BATSE 以前暴源模型是正确的, 现在应显示非各向同性的结果 (BATSE 以前观察到各向同性结果是在盘的厚度范围内)。但 BATSE 的结果却也是否定的, 尽管它观测到很多流量小的暴, 但仍是高度各向同性的。总之 BATSE 观测给出了极其明确的结果: GRB 源在空间是各向同性, 但不是均匀分布的。

这个结论令人震惊之处是在银河系内任何一类已知的天体没有这种分布, 因而推翻了 BATSE 以前为绝大多数天文学家所确认的 GRB 起源于银盘内中子星的结论。

4 GRB 源分布的新模型

在 BATSE 的结果否定了旧有暴源分布后, 立即提出了可能的新的暴源分布模型。总起来讲可以归为三类。

4.1 银河系延展的晕 (halo) 模型^[7]

这种模型认为 GRB 起源于银河系延展的晕内中子星。由于地球位于偏离银心约 8kpc 处, 为了保持观测到的暴具有各向同性的形式, 要求这些晕内中子星离我们至少应有 50kpc。这距离相当于到大麦哲伦云的距离。晕内的中子星或者是由银盘中超新星爆发后形成的中子星逃逸而来的, 或者就是在晕中诞生的。如果 GRB 确实起源于这种晕, 按 BATSE 探测器阈值为 $S = 10^{-7} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 计算, 爆发需要的能量 $E = 4\pi D^2 S \approx 10^{41} \text{erg}$ 。其中 D 为到达晕的距离。这比 BATSE 以前银盘内 GRB 所需能量高出约 4 个量级。通过中子星震和其他在银盘模型中所采用的能量释放机制, 有可能获得这样高的能量。但晕模型本身也还有一些问题。其中之一是由于延展晕的距离已经达到邻近星系范围, 那末为什么没有观测到来自这些星系例如大麦哲伦云或仙女座星系的 GRB? 从统计上来讲, 应该看到由此产生的非各向同性分布。另外一点是这个模型要求银河系内有比通常假定的更多的中子星存在, 这也就意味着有更多的超新星爆发, 因而在星际空间应留下更多的铁和其他重元素, 但现在没有。另一种可能是假定中子星不仅可以由超新星爆发也可以由其他机制产生, 但对这一点目前也只是假设而已。

4.2 宇宙学距离模型

这种模型早在 1986 年就由普林斯顿的 Paczynski 提出过^[6], 但在 BATSE 以前并不被人们所重视。BATSE 的结果自然和宇宙学模型是相吻合的。这种模型认为 GRB 源都是十分遥远的 (达到几百 Mpc), 在这样大尺度范围内, 任何观测者都可看成位于宇宙中心, 因而观测结果自然是各向同性的。由于宇宙膨胀, 天体向外退行速度与距离有关, 因而天体分布将随距离增大而减少, 所以它们的分布是不均匀的。宇宙学模型首先遇到的是能量问题。与晕模型相比, 现在暴源的距离增加了差不多 5 个量级。因此, 所需能量将增加 10 个量级, 达到 10^{51}erg 。什么样的机制能在很短的时间内释放出如此巨大的能

量呢？Paczynski 提出，一对衰变中的致密天体（或者两个中子星，或者一个中子星、一个黑洞）往往可以通过中间状态合并成一个黑洞。大部分质量落入原有或者新形成的黑洞中，而中子星吸积盘物质仍能在围绕黑洞的轨道中维持几十秒钟并激发起 GRB。观测到的暴的毫秒结构，反映了吸积盘的轨道周期。这种过程约可释放 10^{54} erg 能量^[6]。不过并不知道这些能量中有多少可以 γ 射线形式放出。宇宙学模型在能谱解释上也有困难。如果 GRB 真的发生在如此遥远而又是发生突变的致密天体合并过程中，那么就很难解释为何能观测到在有些 GRB 的能谱上存在着很细微的回旋线结构。而且，在一些暴中观测到的在 400keV 处的发射线是由正负电子对湮灭经过中子星引力场红移所形成的事实，也很难得到解释。因为如果 GRB 发生在宇宙学距离上前后相差 100 倍范围内，那么相应的宇宙学红移量将可在 0.05 到 1.5 范围内变化。这个红移量超过了中子星引力红移量，它必然对发射线产生影响，但在 GRB 能谱中并未显示出这种影响^[10]。

4.3 银盘和各向同性分布迭加模型

1993 年 Atteia 和 Dezalay 对 BATSE 资料进行了仔细分析，认为 BATSE 结果显示存在着两种空间上不同的暴源分布^[11]。他们将 BATSE 观测到的 241 个 GRB 按 C_{\max}/C_{\min} 的值由小到大排起来，然后人为地增加仪器的阈值 K 到 αK ，即将 C_{\max}/C_{\min} 值除以 $\alpha (> 1)$ 。这样改变 α 就可以计算不同的 V/V_{\max} 的平均值：

$$\left\langle \frac{V}{V_{\max}} \right\rangle = \left\langle \left(\frac{1}{\alpha} \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \right)^{-3/2} \right\rangle \quad (5)$$

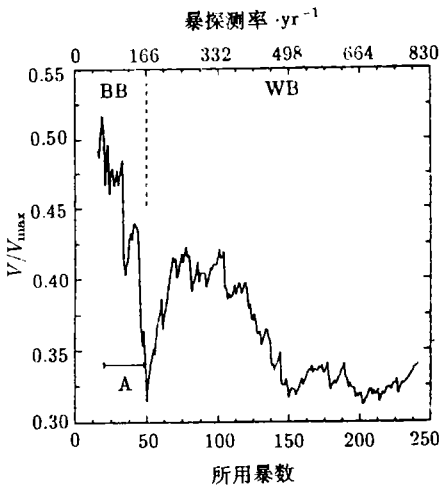


图 5^[11]

上，估计盘的半径大于 30kpc，盘的厚度为 10kpc，相当于一个扁的晕。暗暴的 $\langle V/V_{\max} \rangle$ 没有显示出快速下降，表明源的分布随距离的变化很慢。又由于是各向同性分布，因此不可能起源于银河系内，很可能是在银河系延伸的晕中，或者甚至在宇宙学距离上。总之，Atteia 等人的研究表明，GRB 的空间分布可能不是单一分布，很可能是几种分

图 5^[11] 表示计算给出的结果。图中顶部的横坐标是每年探测到的 GRB 数目，BATSE 的年探测率约为 800。图 5 中令人惊奇的特点是在 $\langle V/V_{\max} \rangle$ 由 0.34 到 0.5 变化过程并不是光滑的。特别在探测率为每年 150 处有一个很深的沟。这恰是 BATSE 以前大部分探测器的年探测率（探测率与仪器灵敏度有联系），也就是说沟左面的暴也可以被 BATSE 以前仪器观测到，称它们为亮暴（bright bursts），而沟右面新增加的暴则称为暗暴（weak bursts），它们只能被 BATSE 观测到（因为 BATSE 的灵敏度比以前的高 1 个量级）。进一步分析表明，亮暴有向银盘集中的倾向，而暗暴则是高度各向同性的分布。对这两类暴源必须分别计算它们的空间分布参数。亮暴分布在厚的银盘

布叠加形成的。例如像他们提出的,可能由厚银盘的亮暴与各向同性延伸到银晕的暗暴所组成,或者亮暴分布于银河系内,而暗暴则在宇宙学距离上。

1993 年 12 月 Quashnock 和 Lamb 通过对 BATSE 观测资料统计关联的研究,得到三种统计关联,由此得出 GRB 源可在几个月内就发生重暴,并提出 GRB 起源于银河系内^[12,13]。但是这一结论立即遭到 Rutledge 和 Schaefer 等人的反对^[14,15],他们认为 Quashnock 和 Lamb 得到的统计关联是一种对关联量定义的产物,并不能反映真正的关联,因此不能得出 GRB 可在几个月内发生重暴和起源于银河系内的结论。

GRB 现象发现至今已 20 多年了(最早在 1967 年就已经观测到,但直到 1973 年才公布)。但是时至今日,GRB 之谜仍未解开。造成这种局面的主要原因是:它是一种短暂的突发现象,而且至今也未发现它们在宁静时的对应体,导致这些暴离我们究竟有多远都不知道。80 年代末以前的绝大部分研究,都是建立在 GRB 起源于银河系内强磁化中子星这一假设上的,BATSE 提供的资料完全打破了这一假设,可以说使 GRB 的研究又退回到刚发现它时的情况,似乎一切都要从头开始。因此,自 1992 年初 BATSE 首批观测结果发表以来不到两年时间,已经发表了上百篇解释 GRB 起源的论文,这些论文大体上分属于我们上面提到的几种模型。对 GRB 的研究现在处于一个高潮时期,是目前高能天体物理中的一个热门课题,作者希望通过本文的讨论能激起广大天文工作者对这一问题的兴趣和关注,共同探讨这一奇特的高能天体现象。随着人类科学技术的发展,GRB 之谜终将被彻底揭开。

参 考 文 献

- [1] Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A. *Ap. J.*, 1973, 182: L 85
- [2] Higdon J C, Lingenfelter R E. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1990, 28: 401
- [3] 史天一. *天文学进展*, 1991, 9: 96
- [4] Murakami T. *Adv. Space Rev.*, 1990, 10: 63
- [5] Harding A K. *Phys. Rep. Lett.*, 1991, 206: 327
- [6] Paczynski B. *Ap. J.*, 1986, 308: L43
- [7] Gehrels N, Chipman E, Kniffen D A. *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1993, 97: 6
- [8] Fishman G J *et al.* *Astron. Astrophys. Suppl.*, 1993, 97: 17
- [9] Meegan C A *et al.* *Nature*, 1992, 355: 143
- [10] Schwarzschild B. *Phys. Today*, 1992: 21
- [11] Atteia J L, Dezalay J P. *Astron. Astrophys.*, 1993, 274: L1
- [12] Quashnock J M, Lamb D Q. *M. N. R. A. S.*, 1993, 265: L59
- [13] Quashnock J M, Lamb D Q. *M. N. R. A. S.*, 1993, 265: L45
- [14] Rutledge R E, Lewin W H G. *M. N. R. A. S.*, 1993, 265: L51
- [15] Schaefer B E, *Nature*, 1994, 367: 411

(责任编辑 刘金铭)

New Distributions and of Gamma-ray Bursters: the BATSE Observational Results

Xu Dawei Shi Tianyi

(Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract

The new discovery of the burster distribution obtained from BATSE on Compton GRO is introduced in this paper. It is faced on a serious challenge by the discovery that Gamma-ray bursts originate from neutron stars in galactic disk, which was generally accepted before the end of 80s. Based on the BATSE results, some burster distribution models are explained.

Key words Gammar rays: bursts—Gammar rays: observations—space vehicle