

尘埃消光对伽玛射线暴余辉的影响*

吕谷靖¹ 邵 琅^{1,2†} 金志平¹ 韦大明¹

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 河北师范大学物理系 石家庄 050016)

摘要 为了研究尘埃消光对伽玛射线暴余辉的影响, 基于严格的 Mie 理论和最新的星际尘埃光学性质, 进行了高精度的数值计算, 并分析具有不同物理参数的尘埃所产生的消光曲线. 结果表明, 介质密度和金属丰度是决定消光总量的主要物理参数, 而尘埃颗粒大小的分布则是产生不同消光曲线轮廓的重要物理参数. 如果尘埃颗粒相互聚集形成导致尺度增大, 将产生较平或者较灰的消光曲线, 同时绝对总量将减少; 相反, 如果尘埃颗粒由于某种原因发生离解导致尺度变小, 将产生较陡的消光曲线, 同时消光总量将增加. 这些结果将对理解光学暗暴的形成机制提供重要的启示.

关键词 伽玛射线暴: 普通, 尘埃, 消光

中图分类号: P 172; **文献标识码:** A

1 引言

伽玛射线暴 (Gamma-ray burst, GRB) 是已知宇宙中能量最猛烈的一类恒星级爆发现象. 目前, 美国 Swift 空间卫星专门对此进行观测, 共带有 3 个波段的探测器: BAT (15 ~ 150 keV), XRT (0.3 ~ 10 keV) 和 UVOT (光学和紫外)^[1]. BAT 每年大约能捕捉到 100 个 GRB, 并能很快通过 XRT 进行 X 射线观测并准确定位. 然而, UVOT 只在约 60% 的 GRB 中发现光学余辉, 并且一部分已观测到的光学余辉流量也比理论预言的要弱, 这类光学比较弱甚至没有光学辐射的 GRB 便被称为暗暴^[2].

暗暴的形成机制是 GRB 研究领域的一个疑难问题. 主流观点认为, GRB 周围尘埃的消光是产生暗暴的主要原因^[3-4], 但对其理论研究尚处在探索阶段. GRB 余辉的消光曲线比较复杂, 有的呈现出类似小麦哲伦星云 (Small Magellanic Cloud, SMC) 的消光特征, 即消光曲线比较陡, 有的则呈现出银河系 (Milky Way, MW) 的消光特性, 即有明显的 2 175 Å 吸收峰^[3], 有的则出现活动星系中常见的很平的消光曲线, 即灰消光^[5-6]. 多样化的消光特性显然无法用现有的消光曲线的样本模型进行拟合, 如何从理论上分析不同消光曲线中反应出的物理机制, 是当前研究的一个前沿. 本工作采用最新的尘埃物理计算方法, 重点研究尘埃消光对 GRB 余辉的影响. 通过分析不同的物理参数对消光曲线

2010-11-08 收到原稿, 2010-12-02 收到修改稿

* 国家自然科学基金 (10621303, 10973041, 11073057) 和国家重点基础研究发展规划项目 (2007CB815404) 资助

† lang@pmo.ac.cn

的影响, 可以重现观测中出现的多种消光曲线, 为光学暗暴和灰消光等观测现象的研究提供理论依据.

2 尘埃消光的物理机制

假定尘埃可以近似成一个半径为 a 、复折射因子为 \tilde{m} 的球形颗粒, 对于波长为 λ 的入射光, 根据 Mie 理论^[7], 其消光截面为

$$\sigma_{\text{ext}} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}\{a_n + b_n\}, \quad (1)$$

散射截面为

$$\sigma_{\text{sca}} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (2)$$

吸收截面则为 $\sigma_{\text{abs}} = \sigma_{\text{ext}} - \sigma_{\text{sca}}$, 其中 $k = 2\pi/\lambda$, 散射系数 a_n 和 b_n 为

$$a_n = \frac{\tilde{m}\psi_n(\tilde{m}x)\psi'_n(x) - \psi_n(x)\psi'_n(\tilde{m}x)}{\tilde{m}\psi_n(\tilde{m}x)\xi'_n(x) - \xi_n(x)\psi'_n(\tilde{m}x)}, \quad (3)$$

$$b_n = \frac{\psi_n(\tilde{m}x)\psi'_n(x) - \tilde{m}\psi_n(x)\psi'_n(\tilde{m}x)}{\psi_n(\tilde{m}x)\xi'_n(x) - \tilde{m}\xi_n(x)\psi'_n(\tilde{m}x)}, \quad (4)$$

其中无量纲尺度因子为 $x = ka = 2\pi a/\lambda$, $\psi_n(x)$ 和 $\xi_n(x)$ 为 Riccati-Bessel 函数.

针对 Mie 理论的数值计算方法现已成熟, 随着计算机技术的高速发展, 过去只有超级计算机才能进行的无穷级数求和, 现在的主流 PC 机已经能够胜任. 数值分析表明, (1)~(4) 式的无穷级数求和只需精确到 $N = x + 4x^{1/3} + 2$ 项即可保证足够高的精度, 其中 x 为上面提到的无量纲尺度因子^[8]. 目前已有通用的 FORTRAN 数值算法^[8-9], 特点是计算速度很高 (对于 $x \approx 10^3$ 的单次计算, 在 Intel 2.6 GHz PC 机上只需几秒钟), 但由于精度无法适时调整, 进行多波段计算尤其是 x 很大时 (在 X-ray 波段对于较大的尘埃颗粒, x 可超过 10^5) 数值不稳定且计算时间成指数增长. 为了计算多波段大尺度范围的尘埃颗粒的吸收和散射截面, 只能通过两种以上的近似解析方法来拼接^[8]. 为了研究较大尺度尘埃对 X 射线散射及吸收的特征, 本工作采用最新的 Mathematica 高级语言程序算法 MieSolid 实现可调精度的数值计算, 牺牲了一定的计算速度 (对于 $x \approx 10^4$ 的单次计算, 在 Intel 2.6 GHz PC 机上约需 1h), 但可以实现大范围参数空间的自适应计算, 极大地提高精度¹.

星际介质中的物质种类很多, 大部分尘埃物质的组成和光学性质无法直接从实验或观测中得到, 主要通过实验数据、理论模型和天文观测三者相互联合来测定. 目前已知硅酸盐类 (silicate) 和石墨类 (graphite) 物质是星际介质的两个主要组分^[10]. Draine 等人对它们的光学性质进行了系统的研究, 两种物质多波段复折射因子的最新结果见图 1^[11-14]. 石墨的光学性质高度各向异性, \tilde{m} 的取值依赖于与晶体轴的夹角. 在计算它的截面时通常采用 “1/3 - 2/3” 近似, 即假定石墨由两种各向同性的物质混合而成, 其中 1/3 的组分

¹Zimmer C, Aragon S R. Mie Scattering and Absorption from Bubbles and Spheres. Mathematica Journal, to be submitted.

与电场平行 (parallel) 于晶体轴的石墨相似, 2/3 的与电场垂直 (perpendicular) 于晶体轴的石墨相似^[15]. 图 1 结果中包含了 X 射线吸收刃的影响 (见 \tilde{m} 的虚部 $\text{Im}(\tilde{m})$), 硅酸盐的吸收刃比较丰富, 包含了镁 (Mg)、铁 (Fe)、硅 (Si) 和氧 (O) 的多级吸收刃, 而石墨只在 282 ~ 310 eV 间出现碳的 K 级吸收刃^[14].

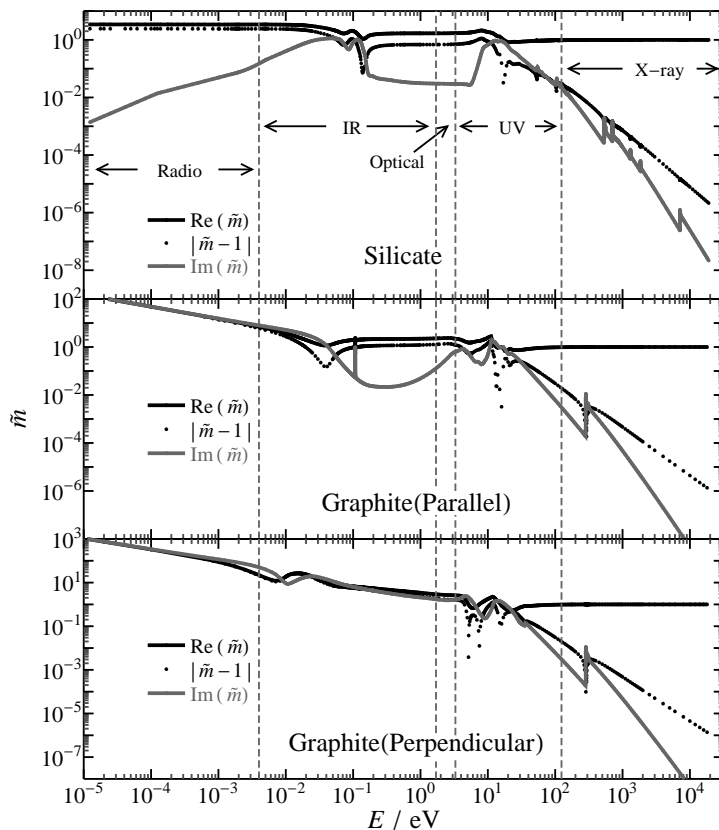


图 1 球状硅酸盐和石墨的多波段折射因子 \tilde{m} 随入射光子能量 E 的变化. 黑实线和灰实线分别表示的是复折射因子的实部和虚部, 点线表示的是文献中常用的 $|\tilde{m} - 1|$ 值

Fig. 1 Complex refractive indices \tilde{m} of spherical silicate and graphite as a function of the energy of an incident photon. The real part and imaginary part of the complex refractive indices are in black and gray solid lines, respectively, and the value of $|\tilde{m} - 1|$ that is frequently used in literatures is in dotted line

根据上述硅酸盐和石墨的光学性质, 我们可以通过精确的 Mie 理论计算得到它们的吸收和散射截面随颗粒大小 a 和入射光子能量 E 的变化. 由图 2 可见, 单一的 MieSolid 代码计算结果 (Rigorous Mie) 和之前的多种近似方法 (Mie, Rayleigh-Gans [RG] 和 Geometric Optics [GO]) 拼接的结果在大部分参数空间内符合得很好, 并且能谱分辨率更高, 对吸收刃结果的计算更精确. 美中不足的是, 当尘埃颗粒尺度超过 $1 \mu\text{m}$ 的时候, 会在紫外和软 X 波段出现不稳定性, 对此, 将来有必要进一步完善代码. 由于标准尘埃模型中大尺度

尘埃颗粒比例很少, 在我们的当前工作中, 可以根据现有的近似结果采用插值法回避中间这一发散区域, 对最后结果的影响将可以忽略不计.

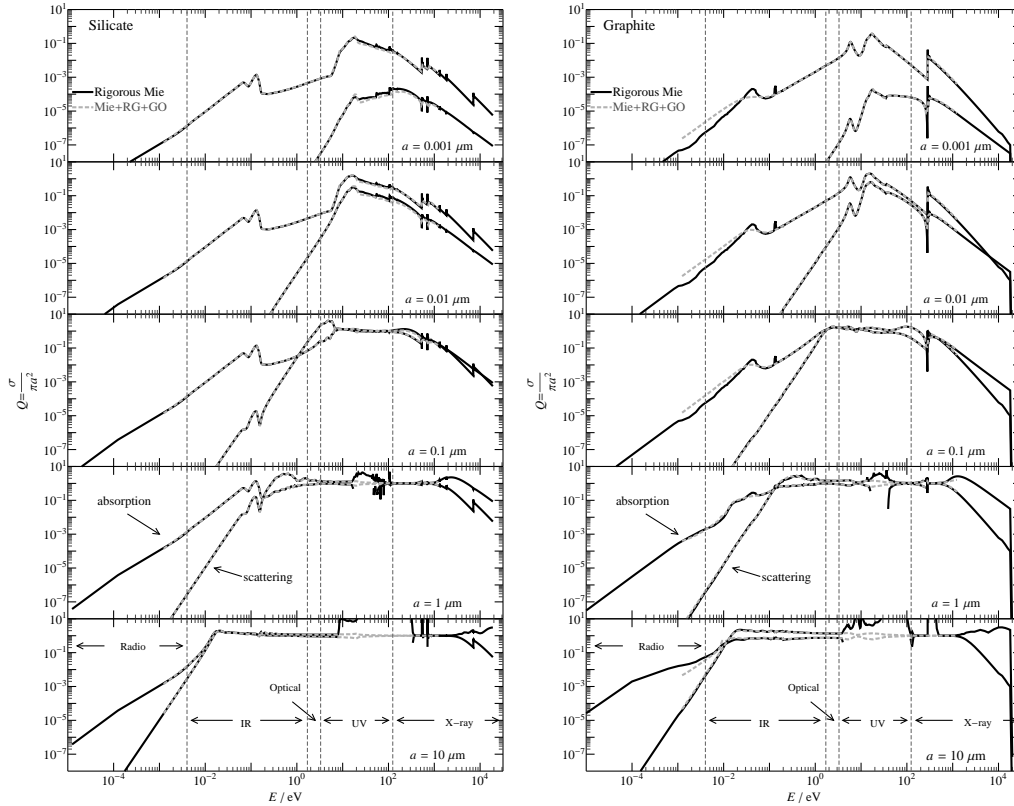


图 2 球状硅酸盐和石墨的吸收和散射截面随频率的变化

Fig. 2 Variations of absorption and scattering cross sections of spherical silicate and graphite

计算结果表明 (如图 2), 当典型尘埃颗粒相对比较小的时候 ($a < 0.1 \mu\text{m}$), 吸收是消光的主要机制, 大部分辐射转变为周围的热能, 而散射将相对偏弱, 这也是之前工作中忽视的一个问题. 散射主导的时候, 尤其是在 X 射线散射中起重要作用的, 应该是颗粒尺度比较大的 ($a > 0.1 \mu\text{m}$) 那部分尘埃, 且颗粒尺度越大, 散射效应越明显, 这可能对 X 射线散射在 GRB 余辉中的研究工作带来重要影响 [16–17].

3 GRB 余辉的消光

假定 GRB 暴周尘埃颗粒的大小在 (a_{\min}, a_{\max}) 之间成幂率分布 [18], 满足

$$\frac{dN_i}{da}(a) = A_i \times N_{\text{H}} a^{\beta} \quad (a_{\min} \leq a \leq a_{\max}), \quad (5)$$

其中, dN_i/da 表示单位半径间隔内的硅酸盐 ($i = 1$) 和石墨 ($i = 2$) 的柱密度, A_1 和 A_2 分别是度量两者的绝对柱密度的系数, N_{H} 为氢原子的柱密度, β 为无量纲的幂率指

数, 则单位氢原子质量的尘埃颗粒质量^[12], 即等效的金属丰度为

$$f_d = \frac{4\pi}{3m_H} \frac{a_{\max}^{\beta+4}}{\beta+4} \left[1 - \left(\frac{a_{\min}}{a_{\max}} \right)^{\beta+4} \right] \sum_i A_i \rho_i, \quad (6)$$

其中 $\rho_1 = 3.3 \text{ g/cm}^3$ 和 $\rho_2 = 2.3 \text{ g/cm}^3$ 分别为硅酸盐和石墨的质量密度, m_H 为氢原子质量. 这里, f_d 、 A_1 和 A_2 不是完全独立的, 下面将以 f_d 和 A_1/A_2 作为两个独立参数讨论. 消光光深则为

$$\tau(\lambda) = \int \sum_i \sigma_{\text{ext}}^i(\lambda) \frac{dN_i}{da} da, \quad (7)$$

消光星等则为 $A(\lambda) = 1.086\tau(\lambda)$.

在相对论外流体中经激波加速后电子的同步辐射发出的 GRB 余辉能谱在光学至 X 射线波段通常为单一的幂率谱, 这里简单假定为 $F_\nu \propto \nu^{-1}$ (如图 3 的灰直线)^[19]. 氢原子的柱密度是决定紫外至软 X 射线波段消光的主要物理量, 图 3 中, 从上到下的实线、点线、短虚线和长虚线分别代表 N_H 值为 10^{20} cm^{-2} 、 10^{21} cm^{-2} 、 $10^{21.6} \text{ cm}^{-2}$ 和 10^{22} cm^{-2} . 其他物理参量均取星际介质中的典型值, 其中, 金属丰度 f_d 为 0.01, 硅酸盐和石墨比例 A_1/A_2 为 1, 颗粒大小分布参数 $\beta = -3.5$, $a_{\min} = 0.005 \mu\text{m}$, $a_{\max} = 0.25 \mu\text{m}$. 一般来说, 氢原子柱密度 N_H 的大小决定了绝对消光量的大小, 在一些外部介质致密的区域 N_H 很高 (通常 $N_H > 10^{22} \text{ cm}^{-2}$), GRB 余辉的光学及软 X 射线辐射将会遭到灾难性的吸收.

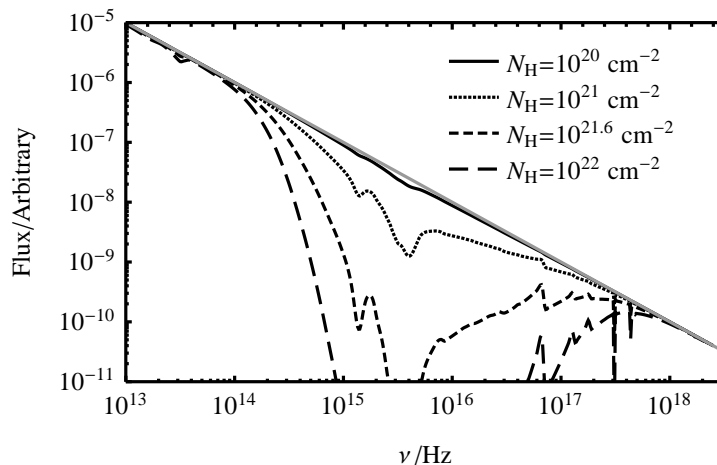


图 3 暴周尘埃对伽玛暴余辉能谱的吸收随氢原子柱密度 N_H 的变化. 灰直线代表余辉的本征能谱

Fig. 3 Extinction of GRB afterglow by circum-stellar dust grains with different column density of hydrogen nuclei N_H . Gray straight line represents the intrinsic spectrum of the afterglow

除了氢原子柱密度, 可能对介质的消光曲线 (包括绝对消光总量和消光曲线轮廓) 产生影响的因素还有很多, 这里主要考虑其中起主要作用的几个物理量: 硅酸盐和石墨的相对组分 A_1/A_2 , 金属丰度 f_d , 尘埃颗粒大小分布参数 β 和 a_{\max} . 硅酸盐和石墨的相对组分 A_1/A_2 对消光曲线的影响如图 4 所示, 其中, 实线、点线、短虚线和长虚线分别代表

$A_1/A_2 = 0.6, 1.0, 1.6$ 和 2.0 . 其他参数仍取典型值 $f_d = 0.01$, $N_H = 10^{21.3} \text{ cm}^{-2}$, $\beta = -3.5$, $a_{\min} = 0.005 \mu\text{m}$, $a_{\max} = 0.25 \mu\text{m}$. 从图中可以看到, A_1/A_2 的变化主要体现在 2175 \AA 处的吸收峰高度的影响, 而已知这一吸收特征主要是由较小尺度的石墨颗粒引起的^[15], 因此 A_1/A_2 越大, 吸收峰越低. 一般来说, 尘埃物质的组分对消光曲线的影响不是很大, 不是造成不同 GRB 余辉中观测到消光曲线差异分明的主要原因.

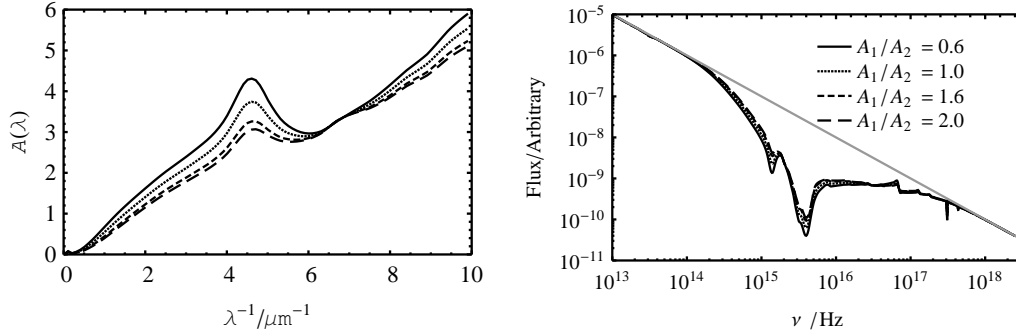


图 4 暴周尘埃对伽玛暴余辉能谱的吸收随硅酸盐和石墨相对组分 A_1/A_2 的变化. 左图为消光曲线, 右图为消光后的余辉能谱. 右图中的灰直线代表余辉的本征能谱

Fig. 4 Extinction of GRB afterglow by circum-stellar dust grains with different relative abundance between silicate and graphite A_1/A_2 . Left panel is the extinction curve, and right panel is the attenuated afterglow spectrum. Gray straight line in the right panel represents the intrinsic spectrum of the afterglow

金属丰度 f_d 对消光曲线的影响很大, 和氢原子柱密度 N_H 作用类似, 主要决定消光总量, 即金属丰度越高, 消光越剧烈. 如图 5 所示, 实线、点线、短虚线和长虚线分别代表 $f_d = 0.001, 0.004, 0.007$ 和 0.01 . 其他参数取典型值, $A_1/A_2 = 1$, $N_H = 10^{21.3} \text{ cm}^{-2}$,

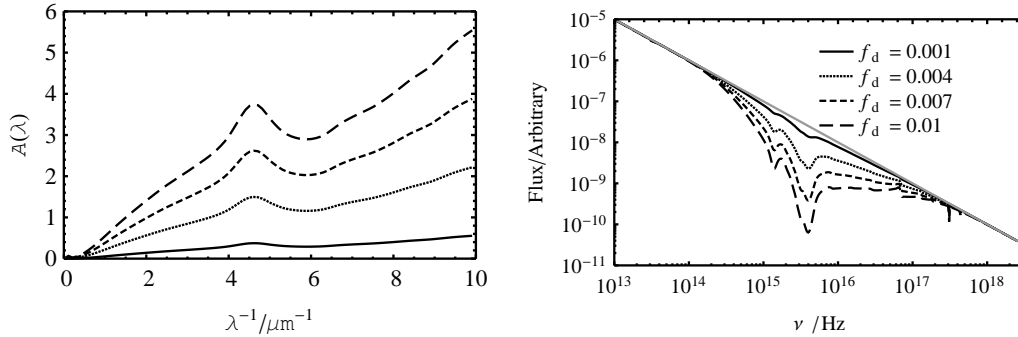


图 5 暴周尘埃颗粒对伽玛暴余辉能谱的吸收随金属丰度 f_d 的变化. 左图为消光曲线, 右图为消光后的余辉能谱. 右图中的灰直线代表余辉的本征能谱

Fig. 5 Extinction of GRB afterglow by circum-stellar dust grains with different metallicity f_d . Left panel is the extinction curve, and right panel is the attenuated afterglow spectrum. Gray straight line in the right panel represents the intrinsic spectrum of the afterglow

$\beta = -3.5$, $a_{\min} = 0.005 \mu\text{m}$, $a_{\max} = 0.25 \mu\text{m}$. GRB 暴周环境比较复杂, 如果是在大质量前身星晚期阶段爆发, 金属丰度可能会比较高, 是尘埃形成的理想场所, 可能是造成剧烈消光及暗暴产生的主要原因.

当然, 计算表明, 决定消光曲线轮廓有显著差异的, 主要是尘埃颗粒尺度的分布指数 β . 主要原因是由于不同尺度的尘埃对不同频率光子的消光的贡献不同, 这是由尘埃散射物理决定的, 受尘埃的组分影响较弱. 如图 6 所示, 实线、点线、短虚线和长虚线分别代表 $\beta = -3.5, -2.5, -1.5$ 和 -0.5 . 其他参数仍取典型值, $f_d = 0.01$, $A_1/A_2 = 1$, $N_H = 10^{21.3} \text{cm}^{-2}$, $a_{\min} = 0.005 \mu\text{m}$, $a_{\max} = 0.25 \mu\text{m}$. 随着尘埃颗粒的尺度越来越大, 小颗粒尺度的尘埃相对变少, 2175\AA 处的吸收峰也变得越来不明显. 另外一个有趣的发现是, β 的变化对光学波段的消光 A_V 影响很小. 这也许可以解释为什么尽管观测到的不同 GRB 消光曲线差异较大, 但 A_V 往往受 N_H 的影响较弱^[4]. 这里计算表明其中的主要原因可能是由于尘埃尺度分布的不同.

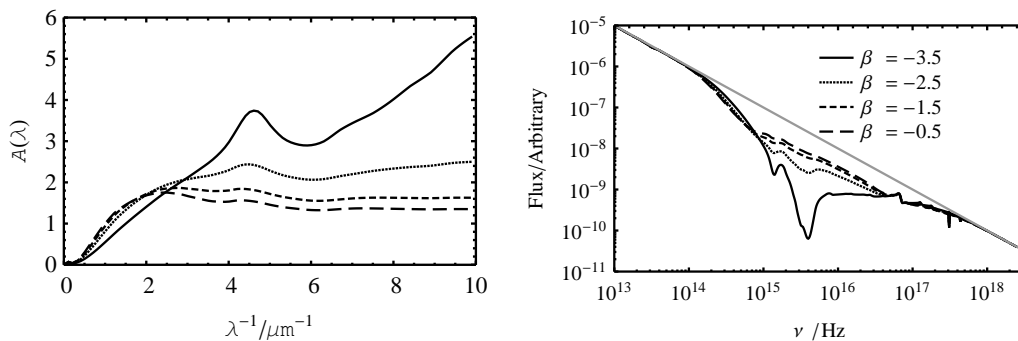


图 6 暴周尘埃颗粒对伽玛暴余辉能谱的吸收随颗粒尺度分布指数 β 的变化. 左图为消光曲线, 右图为消光后的余辉能谱. 右图中的灰直线代表余辉的本征能谱

Fig. 6 Extinction of GRB afterglow by circum-stellar dust grains with different indices of size distribution β . Left panel is the extinction curve, and right panel is the attenuated afterglow spectrum. Gray straight line in the right panel represents the intrinsic spectrum of the afterglow

尘埃颗粒的尺度上限 a_{\max} 也是影响消光总量的一个重要参数. 与前面提到的氢原子柱密度 N_H 和金属丰度 f_d 不同的是, a_{\max} 越大, 消光总量反而越小. 如图 7 所示, 实线、点线、短虚线和长虚线分别代表 $a_{\max} = 10^{-0.5}, 1, 10^{0.5}$ 和 $10 \mu\text{m}$. 其他参数仍取典型值, $f_d = 0.01$, $A_1/A_2 = 1$, $N_H = 10^{21.3} \text{cm}^{-2}$, $\beta = -3.5$, $a_{\min} = 0.005 \mu\text{m}$. 造成这一现象的原因是计算中的隐藏假定, 即尘埃颗粒的质量守恒. 大颗粒的尘埃主要是由小颗粒的尘埃相互吸附聚集而成, 随着大颗粒的尘埃越来越多, 尘埃颗粒的数密度自然会降低, 计算表明, 这会明显减少消光总量, 但随着尘埃尺度的增加, 消光曲线也会变得越来越平, 造成灰消光^[3,20]. 因此, 在 β 和 a_{\max} 的联合作用下, 即会出现, 尘埃尺度偏大的情况下, 消光比较弱并且消光曲线比较平, 即产生灰消光, 这也解释了为什么大部分观测到的即光学比较亮的余辉往往出现这种现象^[3]; 而尘埃尺度偏小的情况下, 则可能产生强烈消光, 即产生暗暴, 同时消光曲线明显偏陡. 因此, 种种的计算结果表明, 尘埃颗粒

大小的差异和演化, 将对 GRB 余辉的消光曲线起着极其重要的影响.

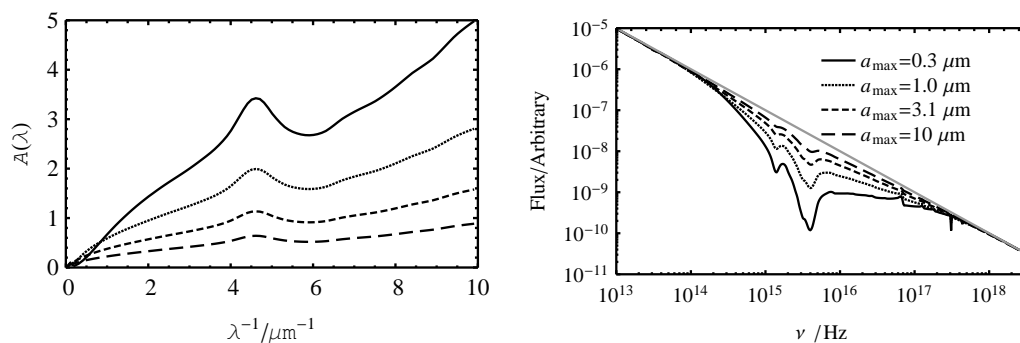


图 7 暴周尘埃颗粒对伽玛暴余辉能谱的吸收随颗粒尺度分布参数 a_{\max} 的变化. 左图为消光曲线, 右图为消光后的余辉能谱. 右图中的灰直线代表余辉的本征能谱

Fig. 7 Extinction of GRB afterglow by circum-stellar dust grains with different parameters of size distribution a_{\max} . Left panel is the extinction curve, and right panel is the attenuated afterglow spectrum.

Gray straight line in the right panel represents the intrinsic spectrum of the afterglow

4 结论

本文主要研究尘埃消光对 GRB 余辉的影响, 通过对尘埃物理的理论计算, 研究不同尘埃参数对消光曲线的影响. 我们发现, 决定消光总量大小的主要因素是介质密度和金属丰度, 而决定消光曲线轮廓的物理参数主要是尘埃颗粒的尺度分布参数 β 和 a_{\max} . 当 β 较大或 a_{\max} 也比较大时, 即大尺度的颗粒偏多时, 消光曲线将变平, 光学消光量也比较小; 反之, 当 β 比较小或 a_{\max} 比较小时, 即小尺度颗粒偏多时, 消光曲线将变陡, 同时光学消光将变得更严重, 更可能造成暗暴的形成, 这也能解释为什么多数亮暴的消光曲线都比较平. 所以, GRB 的大质量恒星起源及其周围复杂的前身星环境, 可能是造成暗暴和复杂多变的光学余辉的重要原因. 对余辉消光的观测和分析, 也可能对研究 GRB 的前身星及爆发机制有着重要意义.

致谢 此研究使用了 Princeton 大学 B. T. Draine 计算的星际尘埃数据. 感谢 San Francisco 州立大学 S. Aragon 关于 MieSolid 计算程序的讨论和 Notre Dame 大学 M. A. Caprio 提供 LevelScheme 软件包更新及热情的技术支持.

参 考 文 献

- [1] Gehrels N, Chincarini G, Giommi P, et al. ApJ, 2004, 611: 1005
- [2] van der Horst A J, Kouveliotou C, Gehrels N, et al. ApJ, 2009, 699: 1087
- [3] Stratta G, Fiore F, Antonelli L A, et al. ApJ, 2004, 608: 846
- [4] Schady P, Mason K O, Page M J, et al. MNRAS, 2007, 377: 273
- [5] Stratta G, Perna R, Lazzati D, et al. A&A, 2005, 441: 83

- [6] Chen S L, Li A, Wei D M. *ApJ*, 2006, 647: L13
- [7] van de Hulst H C. *Light Scattering by Small Particles*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1957: 114-130
- [8] Wiscombe W J. *ApOpt*, 1980, 19: 1505
- [9] Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1983: 475-482
- [10] Draine B T. *ARA&A*, 2003, 41: 241
- [11] Draine B T, Lee H M. *ApJ*, 1984, 285: 89
- [12] Laor A, Draine B T. *ApJ*, 1993, 402: 441
- [13] Li A, Draine B T. *ApJ*, 2001, 554: 778
- [14] Draine B T. *ApJ*, 2003, 598: 1026
- [15] Draine B T, Malhotra S. *ApJ*, 1993, 414: 632
- [16] Shao L, Dai Z G. *ApJ*, 2007, 660: 1319
- [17] Shao L, Dai Z G, Mirabal N. *ApJ*, 2008, 675: 507
- [18] Mathis J S, Rumpl W, Nordsieck K H. *ApJ*, 1977, 217: 425
- [19] Shao L, Fan Y Z, Wei D M. *ApJ*, 2010, 719: L172
- [20] Li Y, Li A, Wei D M. *ApJ*, 2008, 678: 1136

Effect of Dust Extinction on the Gamma-ray Burst Afterglows

LV Gu-jing¹ SHAO Lang^{1,2} JIN Zhi-ping¹ WEI Da-ming¹

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *Department of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016*)

ABSTRACT In order to study the effect of dust extinction on the afterglow of gamma-ray bursts (GRBs), we carry out numerical calculations with high precision based on rigorous Mie theory and latest optical properties of interstellar dust grains, and analyze the different extinction curves produced by dust grains with different physical parameters. Our results indicate that the absolute extinction quantity is substantially determined by the medium density and metallicity, however, the shape of the extinction curve is mainly determined by the size distribution of the dust grains. If the dust grains aggregate to form larger ones, they will cause a flatter or grayer extinction curve with lower extinction quantity; on the contrary, if the dust grains are disassociated to smaller ones due to some uncertain processes, they will cause a steeper extinction curve with larger extinction quantity. These results might provide an important insight into understanding the origin of the optically dark GRBs.

Key words gamma-ray burst: general, dust, extinction