

《天体物理学》

第十章 γ 射线暴

(from GRB to FRB?)

讲授：徐仁新

北京大学物理学院天文学系

什么是 γ 射线暴?

- 宇宙学尺度上发生恒星级天体爆发现象

激烈程度仅亚于大爆炸

- 研究历史:

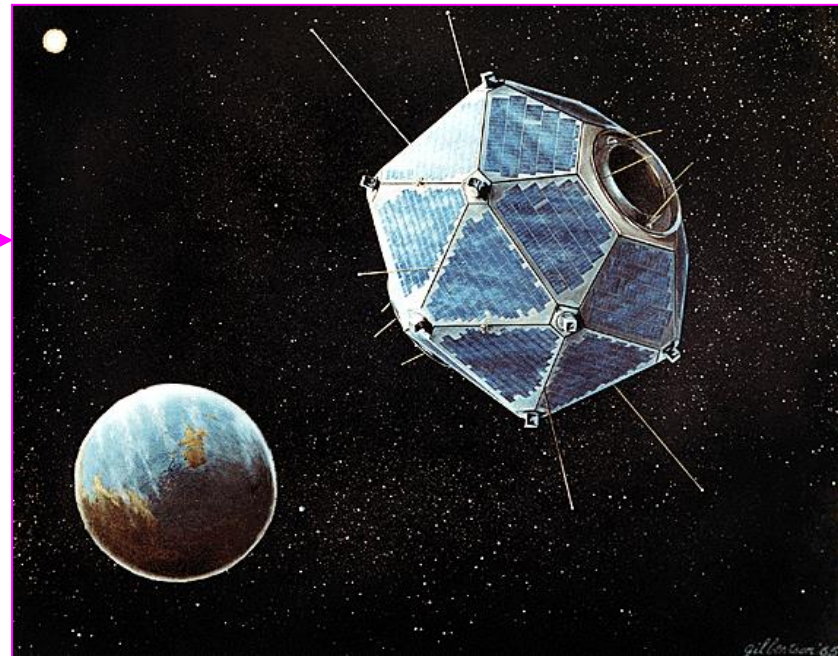
1967: Vela卫星发现 →

1973: 发表16颗 γ 暴源

1991: CGRO升空

1997: 发现长暴余辉

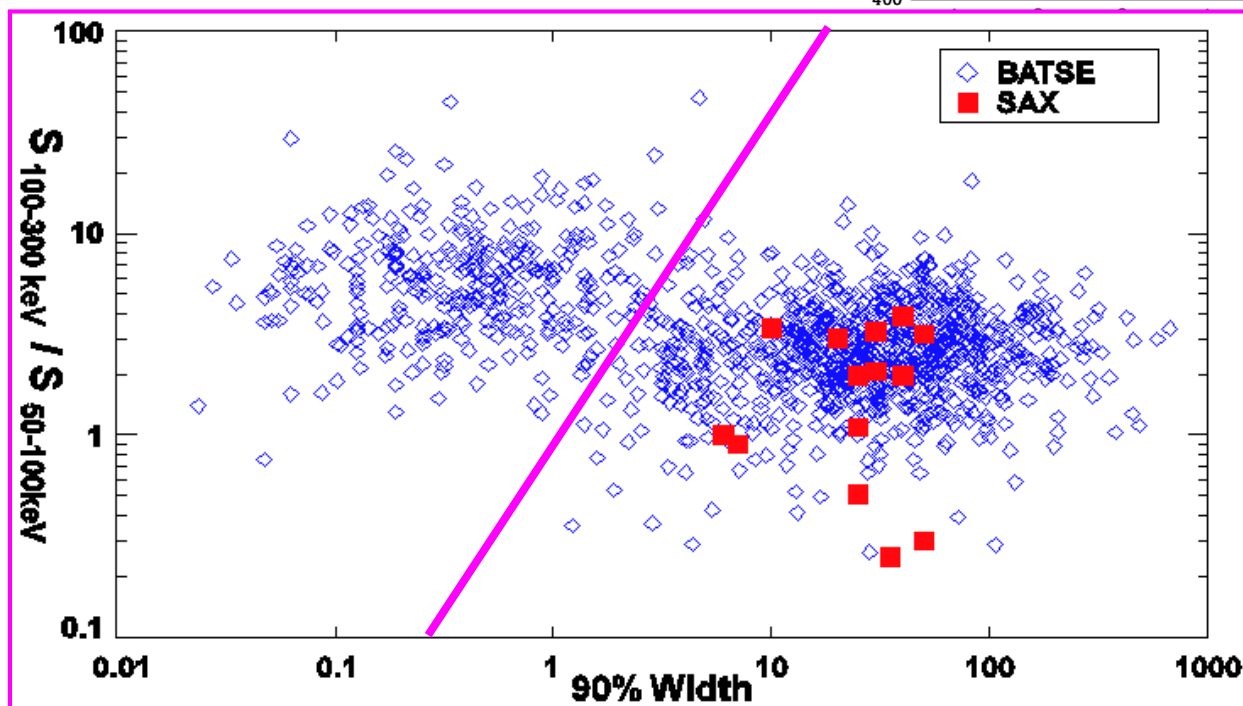
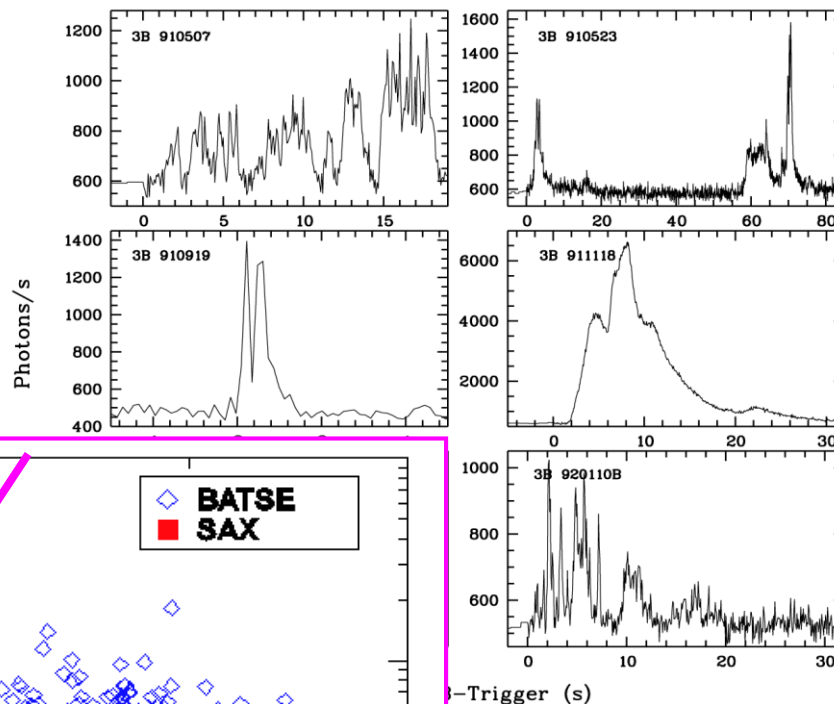
2004: Swift升空短暴余辉



1, 观测现象

时间特性

- 探测率: (1~2)/天
- 多峰轮廓:
- 持续时间分布: 长暴与短暴

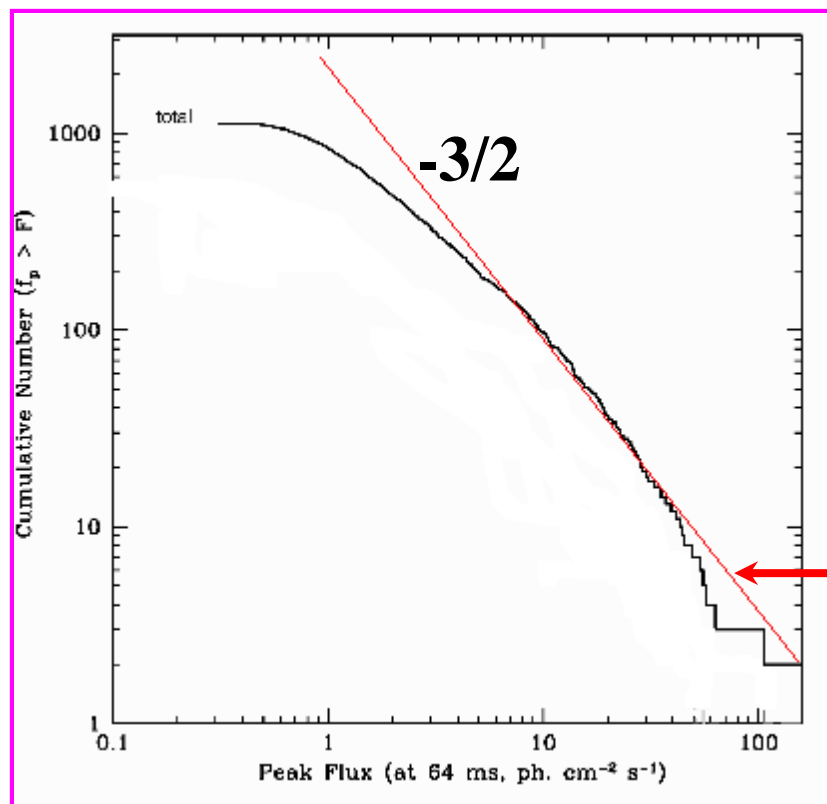


大约以2s为界

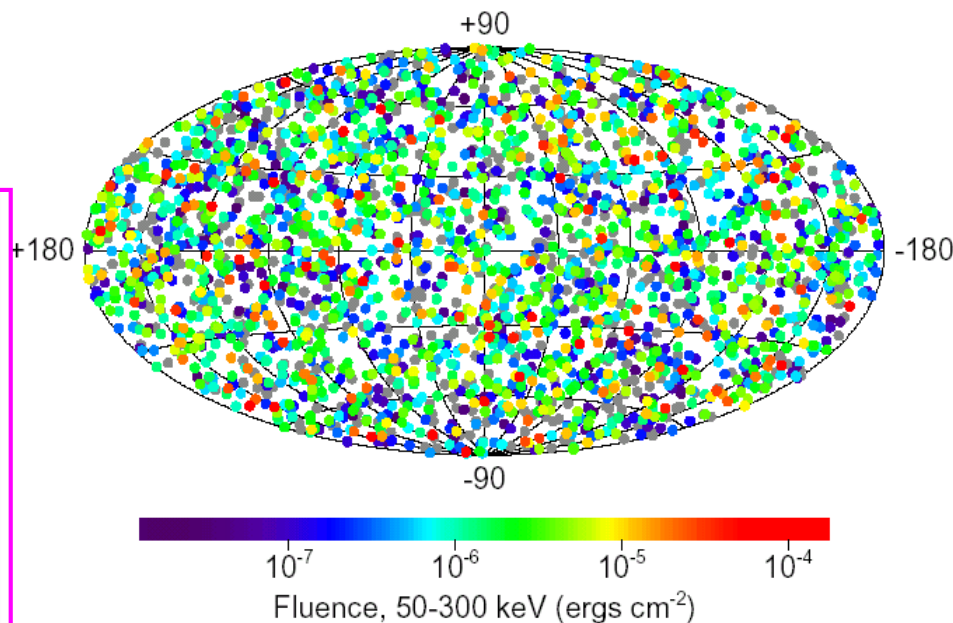
1, 观测现象

空间分布

- 各向同性非均匀分布



2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



三维Euclid空间均匀分布

$$F \propto 1/D^2 \Rightarrow D \sim F^{-1/2}$$

$$N \propto D^3 \Rightarrow N \sim F^{-3/2}$$

1, 观测现象

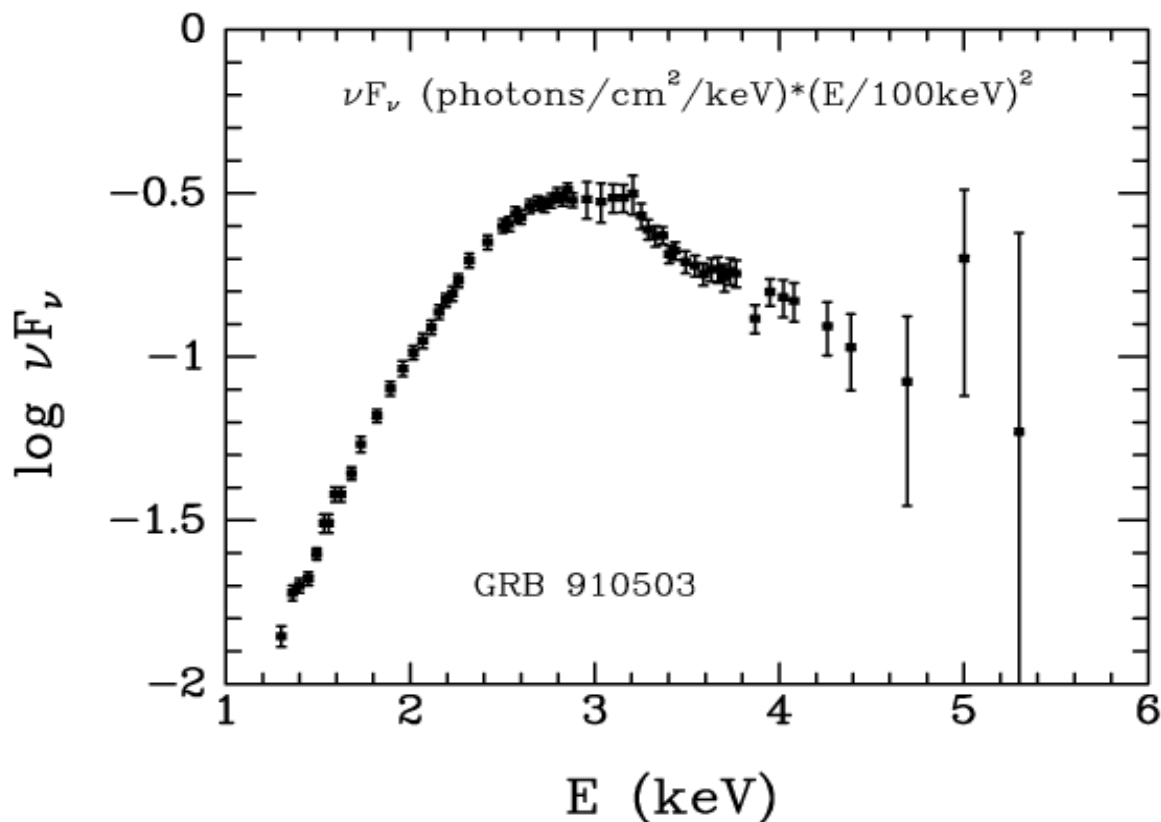
能谱特征

- 光子分布于~10keV到10MeV间
- 在1MeV以上无明显截断
- 谱指数 $\alpha = 1.8-2$:

$$N(E) \propto E^{-\alpha}$$

例如:

GRB910503



1, 观测现象

余辉

- γ 暴发后在其它波段相应位置所测得的辐射称为余辉

包括：X射线、光学、射电余辉等

- 一例：GRB970508

- 流量 F 随时间 t 指数衰减：

$$F(t) \propto t^{-\beta}, \quad (\beta = 0.9-1.1)$$

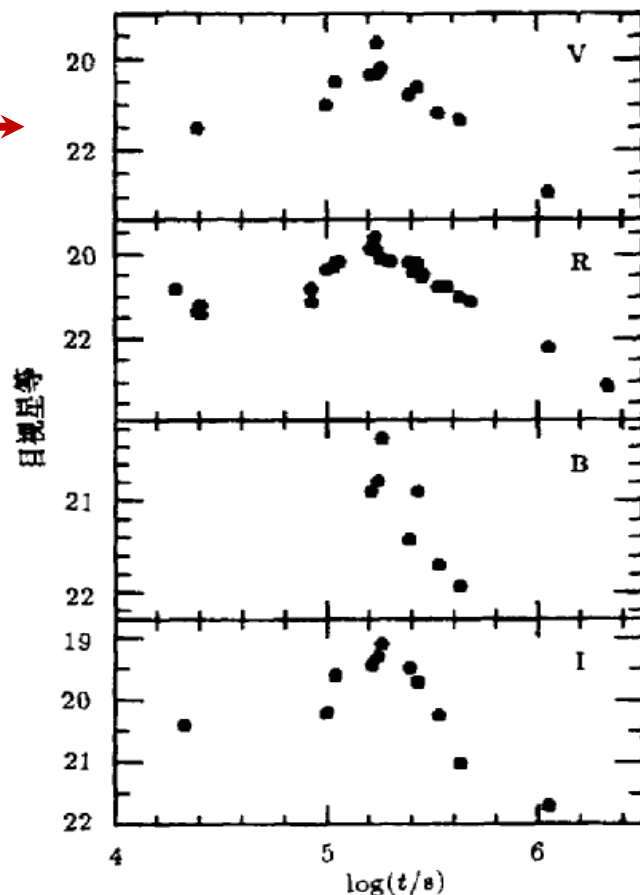
- γ 暴源的宿主星系 \rightarrow 红移

- 若各向同性，可估计光子辐射总能量

$$E_{\gamma} = 4\pi D^2 F \approx 10^{52} \left(\frac{D}{10^4 \text{ Mpc}} \right)^2 \left(\frac{F}{10^{-6} \text{ erg/cm}^2} \right) \text{ erg}$$

$$E_{\gamma} \sim 10^{49}-10^{55} \text{ erg}, \quad L_{\gamma} \sim 10^{47}-10^{53} \text{ erg/s}$$

高达 10^{54} erg量级，注意 $M_{\odot} c^2 = 1.8 \times 10^{54} \text{ erg}$



2, 火球模型

火球

- γ 暴光变时标 $\sim \text{ms} \rightarrow$ 爆发起初发生尺度 $c\delta t \sim 300\text{km}!$

巨大能量开始集中于很小体积：高能量密度区 \rightarrow “**火球**” !

$$\rho \approx \frac{E_\gamma}{(c\delta t)^3} \approx aT^4 \Rightarrow T \approx 4\text{MeV} \left(\frac{E_\gamma}{10^{51}\text{erg}} \right)^{1/4} \left(\frac{\delta t}{1\text{ms}} \right)^{-3/4}$$

- 温度高于MeV火球内的作用： $\gamma + \gamma \leftrightarrow e^\pm$ 。必定存在大量电子对
- 火球的光深的估计：

作用截面 \sim Thomson截面 σ_T ，符合标准 $(E_1 E_2)^{1/2} > m_e c^2$ 的光子占比例 f_p ；能量密度为 $\sim FD^2/R_i^3$ ，有效碰撞产生电子对的光子数密度为 $\sim f_p FD^2/(R_i^3 m_e c^2)$ ，自由程 $\sim [f_p \sigma_T FD^2/(R_i^3 m_e c^2)]^{-1} \Rightarrow$

$$\tau \approx \frac{f_p \sigma_T FD^2}{R_i^2 m_e c^2} \approx 7.7 \times 10^{13} f_p \left(\frac{F}{10^{-7}\text{erg/cm}^2} \right) \left(\frac{D}{3\text{Gpc}} \right)^2 \left(\frac{\delta t}{1\text{ms}} \right)^{-2}$$

- 初始火球**光深非常大**，充分碰撞 \rightarrow 黑体谱？

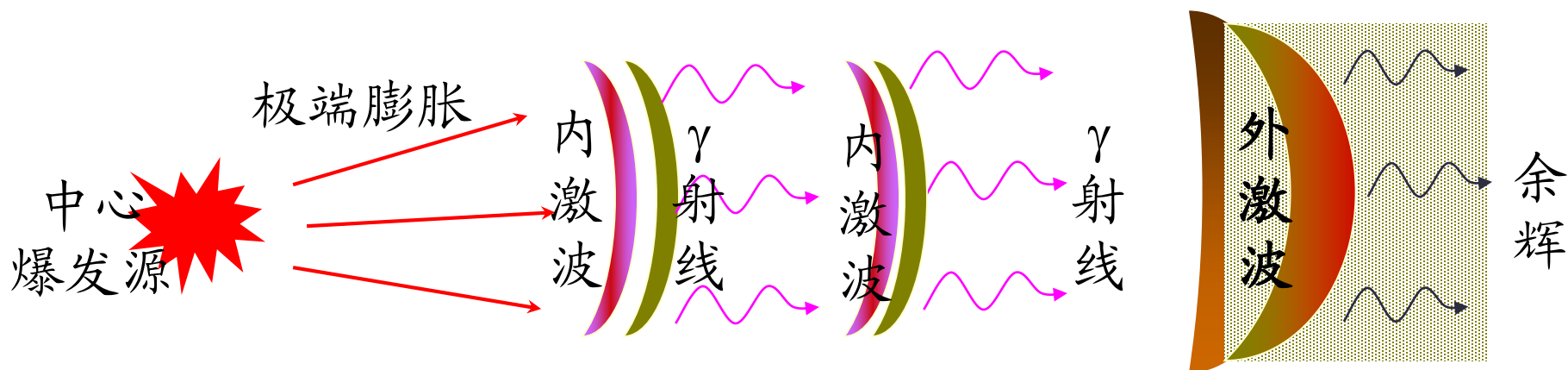
2, 火球模型

极端相对论性火球

- 静态火球与观测矛盾:

黑体辐射谱v.s.幂率谱? 无 $\sim 1\text{MeV}$ 截断? 无湮灭线 $\sim 0.5\text{MeV}$?

- 火球内巨大辐射压 \rightarrow 火球**极端相对论性膨胀**



- 火球在膨胀至尺度 R_e 时的光深: ($\alpha \sim 2$)

$$\tau \approx \frac{f_p \sigma_T F D^2}{\gamma^{2\alpha} R_e^2 m_e c^2} \approx \frac{7.7 \times 10^{13}}{\gamma^{(4+2\alpha)}} f_p \left(\frac{F}{10^{-7} \text{ erg/cm}^2} \right) \left(\frac{D}{3 \text{ Gpc}} \right)^2 \left(\frac{\delta t}{1 \text{ ms}} \right)^{-2}$$

$\gamma \sim 10^2$:
光薄!

3, 爆发机制

“重子污染”问题

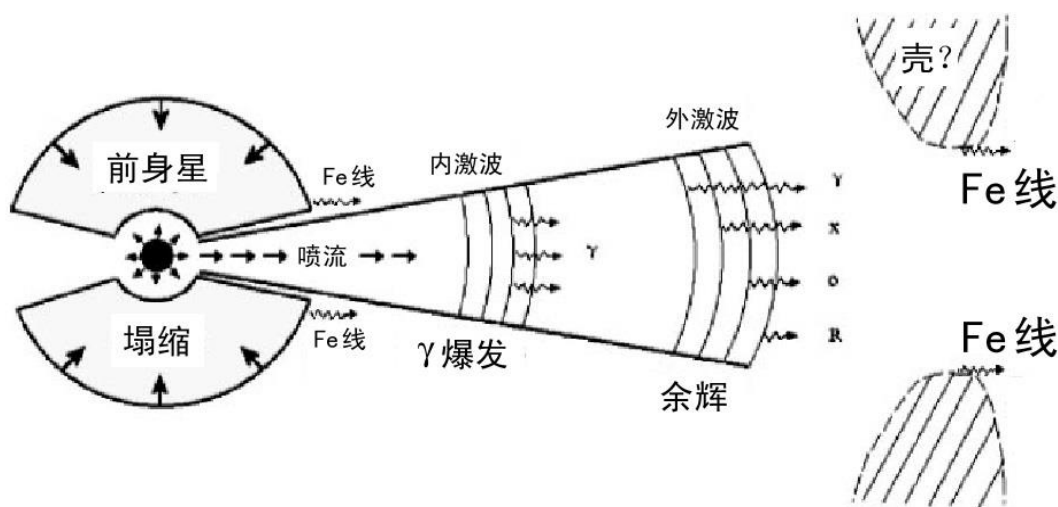
重子 M_b 所携带能量 $\sim \gamma M_b c^2$ 。 γ 暴总能量 $E_0 > \gamma M_b c^2 \Rightarrow$

$$M_b < \frac{E_0}{\gamma c^2} \approx 6 \times 10^{-5} M_{\text{sun}} \left(\frac{E_0}{10^{52} \text{ erg}} \right)$$

重子总量不能太高，否则需要的 γ 暴总能量要增加！

大质量恒星塌缩导 γ 暴？

短暴？



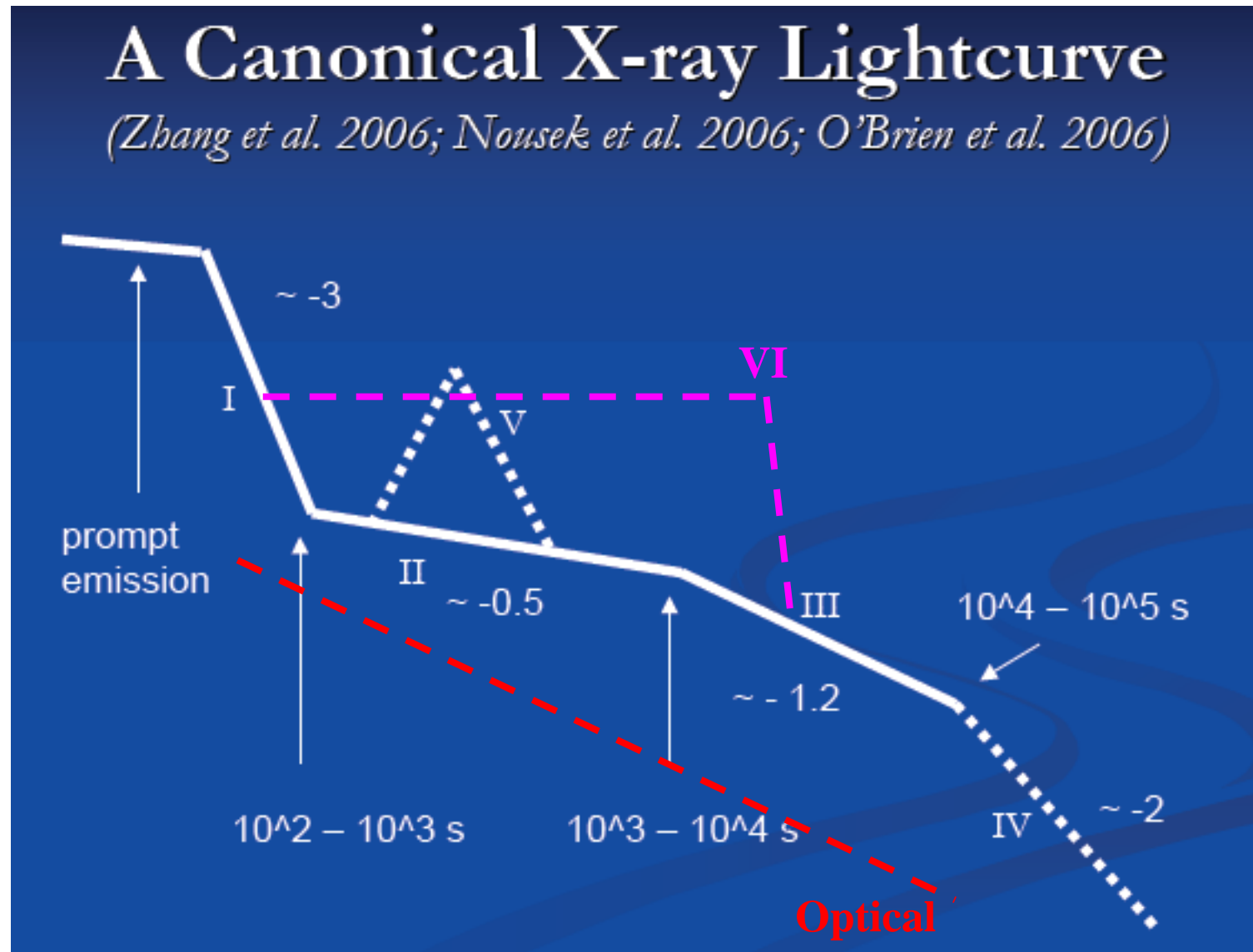
其它模型：

NS-NS或NS-BH合并

NS经转慢/冷却或直接
塌缩成BH

长暴？

4, Swift时代 γ 射线暴研究



总 结

0, 什么是 γ 射线暴?

1, 观测现象

2, 火球模型

3, 爆发机制

4, Swift时代 γ 射线暴研究

作业

习题：(本章末)