

GRS 1915+105的X射线能谱分析及黑洞自旋测量*

王苑^{1,2,3} 苟利军^{1,2,3†} 赵雪杉^{1,2,3} 冯叶^{1,2,3} 贾楠^{1,2,3} 廖振玄^{1,2,3}
李玉丰^{1,2,3}

(1 中国科学院国家天文台 北京 100101)

(2 中国科学院国家天文台计算天体物理重点实验室 北京 100012)

(3 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

摘要 GRS 1915+105是银河系内的低质量黑洞X射线双星, 其能谱和黑洞自旋已经得到了广泛的研究. 自2018年6月开始, 其X射线流量下降到了低流量水平, 其间偶尔会产生多波段的耀发. 利用Insight-HXMT (Insight-Hard X-ray Modulation Telescope, 简称为慧眼) 卫星在2020年8月30日到2020年10月13日之间对GRS 1915+105 的观测数据, 研究了其能谱特性, 发现在此次爆发过程中, X射线能谱可以用一个康普顿化的多温黑体谱很好地拟合. 整个爆发的硬度强度图(Hardness-Intensity Diagram, HID)一直处于软态. 采用GRS 1915+105的最新动力学参数 $M = 12.4^{+2.0}_{-1.8} M_{\odot}$, $i = 60^{\circ} \pm 5^{\circ}$, $D = 8.6^{+2.0}_{-1.6}$ kpc (M 、 $M_{\odot}$ 、 i 和 D 分别表示黑洞质量、太阳质量、盘倾角和距离), 得到其无量纲黑洞自旋 a_* 的一个下限 $a_* > 0.9990$, 确认了GRS 1915+105是一个具有极端自旋的黑洞. 考虑本地吸收体的作用, 在模型中加入了吸收成分“tbpcf” (表示一个被部分遮蔽的吸收成分模型), 其等效氢柱密度高达 10^{23} cm^{-2} , 与“康普顿厚”的特征一致.

关键词 恒星; 黑洞; X射线; 双星; 黑洞物理

中图分类号: P145; **文献标识码**: A

1 引言

自旋和质量是天体物理黑洞两个最重要的基本参量. 与质量相比, 对黑洞自旋的测量更加困难, 这是因为自旋通常与引力最强的区域相关. 对自旋的测量可以帮助理解相对论性喷流的起源^[1]、建立黑洞及其附近的物理图像^[2]并检验广义相对论^[3-5]. 目前测量黑洞自旋的方法主要有连续谱拟合法、反射谱拟合法、引力波测量法和偏振测量

法, 应用最广泛的是反射谱拟合法和连续谱拟合法. 连续谱拟合法通常假设黑洞的吸积盘是一个相对论性的薄盘, 并且黑洞吸积盘的内边缘(R_{in})一直延伸到黑洞的最内稳定轨道半径(R_{ISCO})处($R_{\text{in}} = R_{\text{ISCO}}$), 基于这一假设, 对吸积盘的热辐射成分进行拟合, 进而测量黑洞自旋^[6]. 其中, R_{ISCO} 是一个关于无量纲自旋参数 a_* ($\equiv a/M = cJ/GM^2$, 其中 M 和 J 分别代表黑洞的质量和角动量, a 、 c 和 G 分

2022-03-09收到原稿, 2022-04-14收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U1838114)、科技部重点研发项目(2016YFA0400801)资助

†lgou@nao.cas.cn

别表示黑洞自旋、光速以及万有引力常数)的单调函数^[7].

大多数黑洞X射线双星为暂现源, 根据其能谱的特性, 通常可以分为4种主要的谱态: 高/软态、低/硬态、宁静态和中间态^[8]. 一般情况下, 黑洞X射线双星都处于宁静态. 随着吸积盘上物质的堆积, 黑洞X射线双星将发生爆发, 一次正常爆发的光度一般大于 $10^{38} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$. 整个爆发过程在硬度强度图(Hard-Intensity Diagram, HID)中表现为一个“q”型的图案^[9]. GRS 1915+105 (之后简称为GRS 1915)是一颗低质量X射线双星, 由Granat天文台于1992年8月15日首次发现^[10], 此后一直处于爆发的状态. 在2018年7月, GRS 1915的X射线流量经历了一次显著的下降^[11–12]; 次年3月, 其X射线流量再一次下降^[13–14], 这似乎表明它即将结束长达26 yr的爆发. 然而, 在2019年3月14日, GRS 1915在不同波段上都有耀发现象的产生^[15]. 不同卫星的观测结果表明, GRS 1915似乎进入了一种全新的低X射线流量的谱态, 其特征是具有一个部分遮蔽的本地吸收成分, 其等效氢柱密度 $N_{\text{H}} > 3 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$, 比通常用于拟合GRS 1915的星际吸收成分的等效氢柱密度高出一个数量级^[16–19].

自1992年爆发以来, GRS 1915的能谱和自旋已经得到了广泛的研究^[20–23]. 在GRS 1915的X射线流量下降到一个较低的水平之后, 更多的研究将重点放在了GRS 1915低/硬态的特征、喷流和吸积盘的结构以及准周期振荡现象上^[24–27]. 在2020年8月, GRS 1915似乎迈入了一个崭新的爆发周期, 其X射线流量最高可达 $10^{38} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[15]. 本文的主要目的是通过对这一全新爆发的观测数据进行分析研究, 得到GRS 1915的X射线能谱特性以及初步的自旋测量结果.

2 数据处理

Insight-HXMT (Insight-Hard X-ray Modulation Telescope, 简称为慧眼)卫星自从2017年6月15日发射升空以来, 就开始了对GRS 1915不定期的

定点观测. 慧眼卫星主要搭载的仪器为高能(High-Energy (HE) 20–250 keV)、中能(Medium-Energy (ME) 5–30 keV)和低能(Low-Energy (LE) 1–15 keV) 3个探测器^[28–31]. 为了研究GRS 1915最新的爆发周期, 选择慧眼卫星在2020年8月30日至2020年10月13日期间对GRS 1915的定点观测数据. 表1给出了GRS 1915在这一爆发周期内的基本情况, 从左至右依次为: 观测号(Obs.Id)、观测日期、观测时间、曝光时间(Exp, LE/ME)、净光子计数率(Rate, LE/ME)和硬度比(Hardness Ratio, HR). 其中, 计数率的能段分别取LE的2–10 keV和ME的10–25 keV能段, 硬度比为LE的6–10 keV与2–6 keV能段的计数率之比.

利用慧眼卫星的数据处理软件HXMTsoft V2.04, 使用hpipeline命令, 按照慧眼卫星数据处理手册中的标准流程, 从LE和ME的原始观测数据中抽取光谱, 同时生成背景光谱和响应文件. 利用Heasoft V6.28软件, 使用grppha命令将光谱的最小计数率设置为 $100 \text{ cts} \cdot \text{bin}^{-1}$. 根据慧眼卫星仪器响应和背景光谱测量的不确定度, 将LE和ME的探测器系统误差分别设置为1%和2%^[30–31].

3 光谱分析和拟合结果

从表1可以看出, 在所选的观测周期内, LE的计数率最高为 $43.95 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$; ME的计数率最高只有 $9.10 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$; HR基本都在0.25以下(除了最后3条), 符合软态的特征.

图1是GRS 1915在整个观测时间内的硬度强度图. 从图中可以看出, HR基本都在0.25以下, 计数率普遍小于 $100 \text{ cts} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.1 非相对论性的模型

利用Xspec V12.11.1能谱分析软件, 选择LE的2–10 keV和ME的10–25 keV能段的光谱进行分析. 为了得到能谱的基本参数, 同时为进一步拟合筛选可用的光谱, 首先使用非相对论性模型constant*tbabs*tbpcf* (simpl*diskbb + gaussian)来对光谱进行拟合.

表 1 GRS 1915+105的慧眼卫星观测记录
Table 1 Insight-HXMT observational journal of GRS 1915+105

Obs.Id	Date (2020)	Time	Exp/s	Rate ^a /(cts · s ⁻¹)	HR ^b
P0301012001	Aug 30	01:01:52	1279/1966	22.82/6.30	0.22
P0301012002	Aug 31	10:25:31	1168/2466	19.53/6.23	0.23
P0301012003	Sep 1	18:13:47	2035/2618	25.04/7.19	0.23
P0301012004	Sep 2	18:05:03	2649/2764	20.33/5.57	0.24
P0301012005	Sep 3	17:56:22	2192/2530	23.89/6.51	0.23
P0301012006	Sep 4	19:23:13	1438/1949	23.34/6.32	0.23
P0301012008	Sep 7	01:28:07	1783/2245	23.70/7.45	0.25
P0301012009	Sep 8	14:03:37	1796/2818	31.57/7.34	0.23
P0301012010	Sep 9	05:58:17	1448/2358	26.79/7.01	0.24
P0301012011	Sep 10	10:36:50	2177/2920	37.12/7.68	0.23
P0301012012	Sep 11	10:29:07	2929/2973	33.00/7.06	0.24
P0301012013	Sep 12	15:07:59	1257/2069	37.08/7.16	0.21
P0301012014	Sep 14	14:52:42	2155/2261	32.82/7.88	0.20
P0301012015	Sep 15	14:44:55	2334/2261	35.82/7.61	0.22
P0301012017 ^c	Sep 18	00:01:31	1197/3404	34.10/7.41	0.24
P0301012017	Sep 18	00:01:31	957.6/1975	34.52/7.74	0.24
P0301012018 ^c	Sep 19	01:28:32	1609/2482	37.89/8.44	0.23
P0301012018	Sep 19	01:28:32	658.3/1988	40.96/8.71	0.24
P0301012019	Sep 21	02:46:39	1457/3570	39.03/8.29	0.21
P0301012020	Sep 23	21:33:46	2292/4225	43.95/9.10	0.21
P0301012021	Sep 25	13:18:45	2463/3925	37.91/8.75	0.21
P0301012023	Sep 29	04:45:43	2093/3680	35.85/6.74	0.25
P0301012024	Oct 1	14:00:18	1726/2742	22.78/5.39	0.19
P0301012025	Oct 3	20:04:32	2204/2629	17.43/5.27	0.21
P0301012026	Oct 5	15:01:14	1269/2905	8.51/4.45	0.27
P0301012029	Oct 12	01:23:14	1855/4975	2.31/2.30	0.33
P0301012030	Oct 13	12:24:30	2992/3009	3.26/2.75	0.37

^a Rate is the counts rate of LE (2–10 keV) and ME (10–25 keV).

^b HR, the hardness ratio, is defined as C/A , where C and A are the net counts rate of 6–10 keV and 2–6 keV of LE, respectively.

^c P0301012017 and P0301012018 are both separated into two sub-observations, because of their long periods. They should be treated as four single observations when they are used to extract spectra.

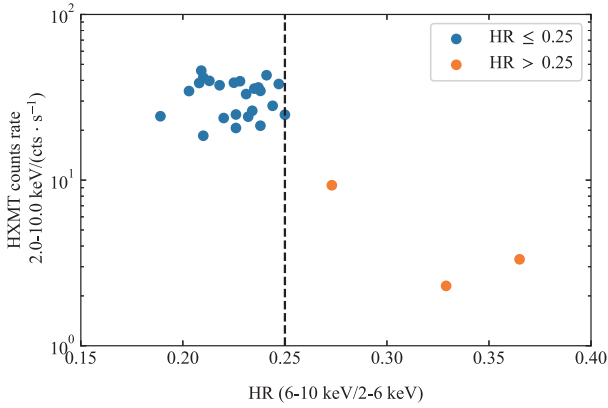


图 1 GRS 1915+105在整个观测周期内的硬度强度图

Fig. 1 Hardness-Intensity diagram of GRS 1915+105 during the whole observation period

由表1可以看出, ME的计数率较低, 为此首先采用非相对论性的盘成分(diskbb)和幂律成分(powerlaw)进行拟合, 利用F检验(即联合假设检验, 通常用于检验某一变量是否可以被排除于模型之外)判断引入幂律成分的必要性. 接着, 采用经验的康普顿化模型(simpl)作为幂律成分^[32], 加上盘成分(diskbb)、星际介质吸收成分(tbabs)、一个部分遮蔽的本地吸收成分(tbpcf)^[33]、用于拟合铁发射线的高斯成分(gaussian)来组成非相对论性的拟合模型, 得到初步的拟合结果. 其中, 将星际介质吸收成分(tbabs)的氢柱密度固定为 $N_H = 5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ^[34-35]. 此外, 利用simftest检验判断引入高斯成分的必要性. 本地吸收成分(tbpcf)的部分遮蔽因子(pcf)固定为1 (由于pcf变量只对tbpcf的等效氢柱密度有影响, 为进一步简化模型将pcf固定为1).

表2列出了非相对论性模型的拟合结果, 从左至右依次是: 观测号、本地吸收成分的 N_H 、谱指数 Γ 、散射因子 f_{sc} 、盘成分的温度 T_{in} 、高斯成分的等值宽度EW (Equivalent Width)、校准因子constant、拟合结果的约化卡方值 χ^2_ν 和相应的自由度.

从表2可以看出, 非相对论性模型的平均约化卡方在0.9左右, 说明拟合结果是可靠的. 表中的两条横线分别代表 $f_{sc} = 0.25$ 和 $f_{sc} = 0.3$. 谱指数 Γ 和

散射因子 f_{sc} 的起伏较大, 其中 Γ 最小为1.71, 最大为3.60; f_{sc} 最小为0.174, 最大为0.532. 幂律成分的拟合结果较差, 这可能是由于ME在10–25 keV能段内的净光子计数率很小.

3.2 相对论性的模型

将diskbb模型替换为kerrbb模型, 得到相对论性模型constant*tbabs*tbpcf* (simpl*kerrbb + gaussian), 来对光谱进一步拟合, 得到初步的自旋测量结果.

首先, 根据 f_{sc} 的大小($f_{sc} < 0.25$, f_{sc} 是软光子被散射到高能幂律端的比例)来对光谱进行筛选. 当 $f_{sc} < 0.25$ 时, 吸积盘内盘的半径会保持相对稳定, 最多只有百分之几的变化, 因而自旋也会保持相对稳定^[36]. 按照这一筛选标准, 从非相对论模型的拟合结果中挑选出6条 $f_{sc} < 0.25$ 的光谱. 考虑到 f_{sc} 的拟合结果误差较大, 又加入了6条 $0.25 < f_{sc} < 0.3$ 的光谱. 用相对论性的盘成分kerrbb替换diskbb组成相对论性模型, 并对所有筛选出的光谱进行拟合, 得到进一步的能谱特性和自旋测量结果. 其中, Kerrbb模型使用的动力学参数(包括黑洞质量、盘倾角和距离)为 $M = 12.4^{+2.0}_{-1.8} M_\odot$ ($M_\odot$ 表示太阳质量)、 $i = 60^\circ \pm 5^\circ$ 、 $D = 8.6^{+2.0}_{-1.6} \text{ kpc}$ ^[37]. 此外, 本地吸收成分(tbpcf)的部分遮蔽因子(pcf)被放开, 高斯成分的线宽固定为0.2 keV (窄线), Γ 固定为2.5 (软态). 将ME的constant参数固定为1. 最后, 将谱指数 Γ 和constant的归一化参数分别固定在不同的值, 考察对于其他参数的影响.

表3列出了相对论性模型的拟合结果, 从左至右依次是: 观测号、本地吸收成分的氢柱密度、遮蔽因子、散射因子、无量纲自旋 a_* 、质量吸积率 $\dot{M}$ 、拟合结果的约化卡方值和相应的自由度.

从表3可以看出, 拟合结果的平均约化卡方为1.06, 比非相对论模型的卡方值高出11%. 6条光谱的黑洞自旋平均下限为 $a_* > 0.9990$ (3σ , 其中 σ 表示标准差, 即变量位于均值附近的正负3个标准差内, 只有不到0.3%的概率位于这一范围之外). 将本地吸收成分的部分遮蔽因子pcf放开拟合, 其氢柱

密度值上升到了 10^{23} cm^{-2} , 比GRS 1915的星际吸收成分的等效氢柱密度高出一个数量级, 与“康普顿厚”的活动星系核的特征一致^[38–40].

图2是相对论性模型拟合的能谱和残差. 从图中可以看出, 残差点均匀地落在0点附近的水平带

状区域中, 并且波动范围较为稳定, 这表明使用的模型是合理的. 另外, 可以看到在6–7 keV之间有一个向上凸起的铁发射线成分, 因此引入高斯成分是必要的.

表 2 constant*tbabs*tbpcf* (simpl*diskbb + gaussian)模型对于光谱的最佳拟合参数
Table 2 Best-fit parameters for spectra with the model constant*tbabs*tbpcf* (simpl*diskbb + gaussian)

Obs.Id	$N_{\text{H}}/(10^{22} \text{ cm}^{-2})$	Γ	f_{sc}	T_{in}	EW/keV	Constant ^a	χ^2_{ν} (d.o.f)
P0301012005	$2.67^{+0.39}_{-0.38}$	$2.17^{+0.45}_{-0.46}$	$0.178^{+0.118}_{-0.061}$	$1.73^{+0.10}_{-0.13}$	0.23	$0.92^{+0.08}_{-0.07}$	0.84(768)
P0301012008	$2.72^{+0.44}_{-0.42}$	$2.27^{+0.48}_{-0.50}$	$0.235^{+0.171}_{-0.088}$	$1.88^{+0.14}_{-0.17}$	0.18	$0.87^{+0.07}_{-0.07}$	0.86(668)
P0301012010	$3.66^{+0.52}_{-0.49}$	$2.48^{+0.49}_{-0.52}$	$0.219^{+0.194}_{-0.091}$	$1.68^{+0.15}_{-0.21}$	0.48	$0.95^{+0.11}_{-0.09}$	0.86(615)
P0301012012	$2.66^{+0.28}_{-0.28}$	$2.98^{+0.76}_{-0.79}$	$0.207^{+0.241}_{-0.108}$	$1.89^{+0.11}_{-0.16}$	0.18	$0.83^{+0.05}_{-0.05}$	0.81(874)
P0301012014	$2.29^{+0.31}_{-0.30}$	$2.63^{+0.50}_{-0.50}$	$0.174^{+0.122}_{-0.070}$	$1.72^{+0.08}_{-0.10}$	0.19	$1.05^{+0.08}_{-0.07}$	0.80(840)
P0301012018	$3.06^{+0.33}_{-0.32}$	$2.72^{+0.49}_{-0.49}$	$0.205^{+0.145}_{-0.080}$	$1.78^{+0.09}_{-0.12}$	0.16	$0.83^{+0.05}_{-0.05}$	0.95(794)
P0301012003	$2.48^{+0.40}_{-0.38}$	$2.75^{+0.45}_{-0.51}$	$0.291^{+0.217}_{-0.122}$	$1.77^{+0.13}_{-0.17}$	0.22	$0.92^{+0.07}_{-0.06}$	0.89(766)
P0301012006	$2.92^{+0.51}_{-0.48}$	$2.93^{+0.66}_{-0.74}$	$0.256^{+0.354}_{-0.138}$	$1.69^{+0.15}_{-0.23}$	0.26	$1.06^{+0.11}_{-0.10}$	0.86(577)
P0301012009	$2.49^{+0.37}_{-0.34}$	$2.85^{+0.45}_{-0.51}$	$0.285^{+0.238}_{-0.149}$	$1.69^{+0.12}_{-0.19}$	0.29	$0.85^{+0.07}_{-0.06}$	0.92(771)
P0301012013	$3.04^{+0.38}_{-0.36}$	$3.16^{+0.48}_{-0.53}$	$0.272^{+0.216}_{-0.120}$	$1.60^{+0.11}_{-0.14}$	0.19	$0.88^{+0.07}_{-0.07}$	0.92(688)
P0301012024	$1.42^{+0.48}_{-0.44}$	$2.40^{+0.26}_{-0.29}$	$0.278^{+0.130}_{-0.090}$	$1.39^{+0.12}_{-0.15}$	0.34	$0.87^{+0.10}_{-0.09}$	0.87(663)
P0301012025	$0.88^{+0.05}_{-0.05}$	$1.88^{+0.07}_{-0.06}$	$0.265^{+0.001}_{-0.001}$	$1.49^{+0.10}_{-0.09}$	0.39	$0.81^{+0.10}_{-0.09}$	0.77(682)
P0301012001	$2.75^{+0.60}_{-0.53}$	$2.70^{+0.35}_{-0.41}$	$0.333^{+0.243}_{-0.137}$	$1.47^{+0.16}_{-0.20}$	0.34	$0.95^{+0.11}_{-0.10}$	1.00(557)
P0301012002	$3.59^{+0.90}_{-0.70}$	$2.79^{+0.22}_{-0.30}$	$0.379^{+0.268}_{-0.142}$	$1.26^{+0.20}_{-0.24}$	0.87	$1.24^{+0.22}_{-0.16}$	0.84(517)
P0301012004	$2.91^{+0.46}_{-0.43}$	$2.87^{+0.53}_{-0.62}$	$0.306^{+0.332}_{-0.150}$	$1.71^{+0.15}_{-0.33}$	0.23	$0.93^{+0.08}_{-0.08}$	0.86(797)
P0301012011	$2.92^{+0.28}_{-0.25}$	$3.60^{+0.26}_{-0.42}$	$0.466^{+0.466}_{-0.190}$	$1.56^{+0.13}_{-0.13}$	0.25	$0.87^{+0.06}_{-0.05}$	0.86(874)
P0301012017	$2.52^{+0.42}_{-0.40}$	$3.13^{+0.30}_{-0.48}$	$0.414^{+0.461}_{-0.180}$	$1.65^{+0.16}_{-0.21}$	0.33	$0.79^{+0.07}_{-0.07}$	0.96(553)
P0301012019	$3.79^{+0.41}_{-0.41}$	$3.31^{+0.23}_{-0.30}$	$0.382^{+0.235}_{-0.132}$	$1.37^{+0.13}_{-0.18}$	0.55	$1.03^{+0.10}_{-0.08}$	0.91(763)
P0301012020	$2.78^{+0.33}_{-0.35}$	$3.16^{+0.13}_{-0.26}$	$0.471^{+0.370}_{-0.162}$	$1.30^{+0.19}_{-0.21}$	0.71	$0.91^{+0.08}_{-0.07}$	0.93(915)
P0301012021	$2.59^{+0.43}_{-0.34}$	$2.89^{+0.29}_{-0.32}$	$0.300^{+0.234}_{-0.103}$	$1.44^{+0.15}_{-0.29}$	0.78	$1.05^{+0.13}_{-0.10}$	0.92(924)
P0301012026	$0.32^{+1.34}_{-0.32}$	$1.71^{+0.17}_{-0.22}$	$0.532^{+0.263}_{-0.146}$	$1.45^{+0.28}_{-0.47}$	0.58	$0.77^{+0.16}_{-0.10}$	0.91(433)

^a ‘Constant’ is the energy-independent multiplicative factor of ME detector.

表 3 constant*tbabs*tbpcf* (simpl*kerrbb + gaussian)模型对于光谱的最佳拟合参数
Table 3 Best-fit parameters for spectra with the model constant*tbabs*tbpcf* (simpl*kerrbb + gaussian)

Obs.Id	$N_{\text{H}}/(10^{22} \text{ cm}^{-2})$	pcf ^a	f_{sc}	a_*	$\dot{M}/(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$	χ^2_{ν} (d.o.f)
P0301012005	$22.54^{+1.25}_{-1.95}$	$0.78^{+0.01}_{-0.01}$	$0.165^{+0.008}_{-0.010}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0013}$	$0.136^{+0.007}_{-0.001}$	0.95(770)
P0301012008	$26.79^{+2.34}_{-1.46}$	$0.80^{+0.01}_{-0.01}$	$0.181^{+0.007}_{-0.012}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0014}$	$0.145^{+0.008}_{-0.001}$	0.97(670)
P0301012010	$26.52^{+2.19}_{-1.06}$	$0.82^{+0.01}_{-0.01}$	$0.138^{+0.004}_{-0.008}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0007}$	$0.173^{+0.006}_{-0.002}$	1.11(617)
P0301012012	$27.91^{+1.52}_{-0.57}$	$0.78^{+0.01}_{-0.01}$	$0.112^{+0.003}_{-0.005}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0002}$	$0.205^{+0.002}_{-0.002}$	1.23(937)
P0301012014	$24.70^{+1.76}_{-1.06}$	$0.74^{+0.01}_{-0.01}$	$0.143^{+0.004}_{-0.007}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0007}$	$0.180^{+0.006}_{-0.002}$	0.92(842)
P0301012018	$25.35^{+1.63}_{-0.87}$	$0.78^{+0.01}_{-0.01}$	$0.116^{+0.003}_{-0.005}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0004}$	$0.220^{+0.003}_{-0.003}$	1.15(796)

^a ‘pcf’ is the partial covering fraction parameter of ‘tbpcf’.

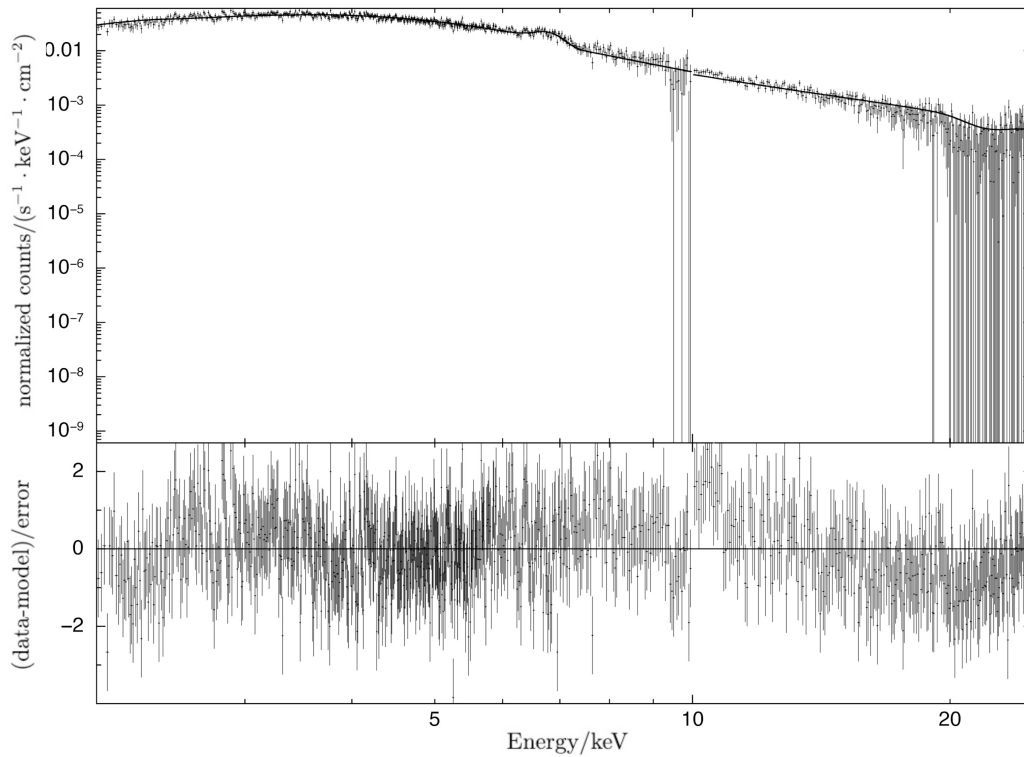


图 2 GRS 1915+105的能谱及残差示意图(P0301012014)

Fig. 2 A representative spectrum and errors of GRS 1915+105 (P0301012014)

4 总结与讨论

4.1 归一化常数和谱指数 Γ 的影响

通常来说, 当LE的归一化常数固定为1时, ME的归一化常数应在1附近变化. 然而, 由于系统误差

的影响, 这两个探测器的校准会有微小的差异^[28]. 在相对论性模型中, 如果将归一化常数的范围设定在0.85到1.15之间, 其参数值会固定在下限0.85, 原因可能是康普顿成分太弱. 因此, 为了简化模型, 将ME的归一化常数固定为1. 另外, 由于在非相对论

性模型的拟合结果中, 谱指数 Γ 的起伏较大, 因此在相对论性模型中, 将 Γ 固定为2.5. 为了考察这两个参数对于拟合结果的影响, 将谱指数 Γ 和归一化常数固定在不同值, 检验对自旋和其他参数的影响, 具体结果如表4和表5所示. 表4和表5从左至右依次

为: 不同的模型、模型的参数、不同的谱指数和归一化常数对应的拟合结果.

从表中可以看出, 当 Γ 和 C_{ME} 分别从2.00和0.80变化到2.80和1.20时, a_* 始终固定在0.9999, 这表明 Γ 和 C_{ME} 的变化对于 a_* 的影响很小, 可以忽略不计.

表 4 不同的 Γ 对其他参数的影响
Table 4 Effects of different Γ on other parameters

Model	Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
simpl	Γ	2.00 (f) ^a	2.30 (f)	2.50 (f)	2.80 (f)
tbpcf	$N_{\text{H}}/(10^{22} \text{ cm}^{-2})$	$35.80^{+1.31}_{-0.57}$	$33.53^{+1.31}_{-0.58}$	$31.98^{+1.32}_{-0.59}$	$28.88^{+1.41}_{-0.60}$
tbpcf	pcf	$0.90^{+0.01}_{-0.01}$	$0.89^{+0.01}_{-0.01}$	$0.88^{+0.01}_{-0.01}$	$0.87^{+0.01}_{-0.01}$
simpl	f_{sc}	$0.037^{+0.001}_{-0.001}$	$0.058^{+0.001}_{-0.002}$	$0.079^{+0.002}_{-0.003}$	$0.139^{+0.003}_{-0.007}$
kerrbb	a_*	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0001}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0001}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0001}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0001}$
kerrbb	$\dot{M}/(10^{18} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1})$	$0.51^{+0.01}_{-0.01}$	$0.47^{+0.01}_{-0.01}$	$0.44^{+0.01}_{-0.01}$	$0.38^{+0.01}_{-0.01}$
gaussian	EW/keV	0.44	0.42	0.38	0.34
	χ^2_{ν} (d.o.f.)	1.80/842	1.52/842	1.35/842	1.13/842

^a 'f' represents a fixed parameter value.

表 5 不同的归一化常数对其他参数的影响
Table 5 Effects of different normalization constant on other parameters

Model	Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
constant	C_{ME}^{a}	0.80 (f)	0.90 (f)	1.00 (f)	1.10 (f)	1.20 (f)
tbpcf	$N_{\text{H}}/(10^{22} \text{ cm}^{-2})$	$28.13^{+1.37}_{-0.79}$	$30.16^{+1.34}_{-0.59}$	$31.98^{+1.32}_{-0.59}$	$33.24^{+1.32}_{-0.59}$	$34.43^{+1.33}_{-0.59}$
tbpcf	pcf	$0.87^{+0.01}_{-0.01}$	$0.88^{+0.01}_{-0.01}$	$0.88^{+0.01}_{-0.01}$	$0.89^{+0.01}_{-0.01}$	$0.89^{+0.01}_{-0.01}$
simpl	f_{sc}	$0.119^{+0.003}_{-0.006}$	$0.097^{+0.002}_{-0.004}$	$0.079^{+0.002}_{-0.003}$	$0.070^{+0.002}_{-0.003}$	$0.061^{+0.001}_{-0.002}$
kerrbb	a_*	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0001}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0001}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0001}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0001}$	$0.9999^{+0.0000}_{-0.0001}$
kerrbb	$\dot{M}/(10^{18} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1})$	$0.38^{+0.01}_{-0.01}$	$0.41^{+0.01}_{-0.01}$	$0.44^{+0.01}_{-0.01}$	$0.46^{+0.01}_{-0.01}$	$0.48^{+0.01}_{-0.01}$
gaussian	EW/keV	0.32	0.36	0.38	0.41	0.43
	χ^2_{ν} (d.o.f.)	1.21/842	1.29/842	1.35/842	1.41/842	1.46/842

^a ' C_{ME} ' is the constant parameter of the ME detector.

4.2 与McClintock等^[20]的自旋测量结果的比较

本文使用的动力学参数是Reid等人利用甚长基线阵列(Very Long Baseline Array, VLBA)对GRS 1915的测量结果^[37]. 使用kerrbb模型进行

拟合, 自旋 a_* 固定在了上限值0.9999. McClintock等^[20]使用动力学参数 $M = (14.0 \pm 4.4) M_{\odot}$ 、 $i = 66^{\circ} \pm 2^{\circ}$ 、 $D = 11.0 \text{ kpc}$, 使用kerrbb2模型给出GRS 1915黑洞自旋的一个下限值, 即 $a_* > 0.98$, 本文的拟合结果在这一范围之内.

4.3 黑洞自旋的理论最大值

Thorne^[41]在1974年对吸积在黑洞演化中的作用进行了研究, 其中主要考虑了黑洞对于吸积盘发射出去的光子的捕获, 这些被捕获的光子会导致黑洞自旋上升的效率下降, 从而保证黑洞自旋总是小于1. 经过理论计算, Thorne^[41]得到了一个黑洞通过吸积使自身自旋上升的最大值 $a_{*lim} \simeq 0.998$, 并且提出如果一个黑洞的初始自旋 a_* 非常接近1 ($0.999 \leq a_* \leq 1$), 一小部分的吸积将使得自旋很快下降到0.998; 如果初始自旋小于0.998, 吸积将会使得自旋逐渐上升至0.998. 此外, 光子的这种效应只有在 $a_* > 0.90$ 时, 才会变得显著^[41]. 由于kerrbb模型没有考虑光子的这种效应, 黑洞可以通过吸积周围的物质使自旋一直上升到无限接近1的值. 本文使用kerrbb模型最后测得的黑洞自旋为0.9999, 大于理论最大值0.998, 这是可以接受的. 如前所述, 如果kerrbb模型中考虑了光子对于自旋上升的限制作用, 最后得到的黑洞自旋 a_* 不会超过0.998.

4.4 总结

本文研究了GRS 1915在2020年8月的一次爆发. 利用慧眼卫星的观测数据, 研究了GRS 1915在整个观测周期内的能谱特性. 结果表明, 能谱可以被一个盘成分(diskbb/kerrbb)和一个幂律成分(simpl)的组合很好地拟合. 此外, 模型中还加入了部分遮蔽的本地吸收成分(tbpcf), 其等效氢柱密度高达 10^{23} cm^{-2} . kerrbb模型给出的黑洞自旋下限为 $a_* > 0.9990$ (3σ), 接近最大值1, 验证了GRS 1915是一个极端自旋的黑洞.

致谢 感谢由中国航天局和中国科学院资助的慧眼卫星项目对文章提供的数据支持.

参 考 文 献

- [1] Blandford R D, Znajek R L. MNRAS, 1977, 179: 433
- [2] Wong T W, Valsecchi F, Fragos T, et al. ApJ, 2012, 747: 111
- [3] Bambi C, Barausse E. ApJ, 2011, 731: 121
- [4] Bambi C, Modesto L. PhLB, 2013, 721: 329
- [5] Tripathi A, Zhou M L, Abdikamalov A B, et al. ApJ, 2020, 897: 84
- [6] Zhang S N, Cui W, Chen W. ApJ, 1997, 482: L155
- [7] Bardeen J M, Press W H, Teukolsky S A. ApJ, 1972, 178: 347
- [8] Remillard R A, McClintock J E. ARA&A, 2006, 44: 49
- [9] Fender R P, Belloni T M, Gallo E. MNRAS, 2004, 335: 1105
- [10] Castro-Tirado A J, Brandt S, Lund N. GrS 1915+105: No. 5590. Paris: IAU Circular, 1992
- [11] Negoro H, Tachibana Y, Kawai N, et al. MAXI/GSC Observes GRS 1915+105 in the X-Ray Faintest State in the Last 22 Years: No. 11828. The Astronomer's Telegram, 2018
- [12] Motta S, Williams D, Fender R, et al. AMI-LA Observation of Radio Flaring from GRS 1915+105: No. 12773. The Astronomer's Telegram, 2019
- [13] Homan J, Neilsen J, Steiner J, et al. A Sudden Dimming of GRS 1915+105 in X-Rays: No. 12742. The Astronomer's Telegram, 2019
- [14] Rodriguez J, Chenevez J, Cangemi F, et al. INTEGRAL and Neil Gehrels Swift Observations of GRS 1915+105 During Its Recent Low Luminosity Hard State May Indicate the Source is Going towards Quiescence: No. 12755. The Astronomer's Telegram, 2019
- [15] Motta S E, Kajava J J E, Giustini M, et al. MNRAS, 2021, 503: 152
- [16] Miller J M, Balakrishnan M, Reynolds M, et al. GRS 1915+105: A Changing-Look Microquasar: No. 12771. The Astronomer's Telegram, 2019
- [17] Koljonen K I I, Tomsick J A. A&A, 2020, 639: A13
- [18] Miller J M, Zoghbi A, Raymond J, et al. ApJ, 2020, 904: 30
- [19] Balakrishnan M, Miller J M, Reynolds M T, et al. ApJ, 2020, 909: 41
- [20] McClintock J E, Shafee R, Narayan R, et al. ApJ, 2006, 652: 518
- [21] Middleton M, Done C, Gierliński M, et al. MNRAS, 2006, 373: 1004
- [22] Blum J L, Miller J M, Fabian A C, et al. ApJ, 2009, 706: 60
- [23] Miller J M, Parker M L, Fuerst F, et al. ApJ, 2013, 775: L45
- [24] Belloni T M, Bhattacharya D, Caccese P, et al. MNRAS, 2019, 489: 1037
- [25] Neilsen J, Homan J, Steiner J F, et al. ApJ, 2020, 902: 152
- [26] Liu H H, Ji L, Bambi C, et al. ApJ, 2021, 909: 63
- [27] Kong L D, Zhang S, Chen Y P, et al. ApJ, 2021, 906: L2
- [28] Liu C Z, Zhang Y F, Li X F, et al. SCPMA, 2020, 63: 249503
- [29] Zhang S N, Li T P, Lu F J, et al. SCPMA, 2020, 63: 249502

- [30] Chen Y, Cui W W, Li W, et al. SCPMA, 2020, 63: 249505
- [31] Cao X L, Jiang W C, Meng B, et al. SCPMA, 2020, 63: 249504
- [32] Steiner J F, Narayan R, McClintock J E, et al. PASP, 2009, 121: 1279
- [33] Wilms J, Allen A, McCray R. ApJ, 2000, 542: 914
- [34] Guainazzi M, Siemiginowska A, Rodriguez-Pascual P, et al. A&A, 2004, 421: 461
- [35] Ursini F, Bassani L, Panessa F, et al. MNRAS, 2018, 474: 5684
- [36] Steiner J F, McClintock J E, Remillard R A, et al. ApJ, 2009, 701: L83
- [37] Reid M J, McClintock J E, Steiner J F, et al. ApJ, 2014, 796: 2
- [38] Maiolino R, Salvati M, Bassani L, et al. A&A, 1998, 338: 781
- [39] Risaliti G, Maiolino R, Salvati M. ApJ, 1999, 522: 157
- [40] Matt G. A&A, 2000, 355: L31
- [41] Thorne K S. ApJ, 1974, 191: 507

X-ray Energy Spectra Study and Black Hole Spin Estimate of GRS 1915+105

WANG Yuan^{1,2,3} GOU Li-jun^{1,2,3} ZHAO Xue-shan^{1,2,3} FENG Ye^{1,2,3} JIA Nan^{1,2,3}

LIAO Zhen-xuan^{1,2,3} LI Yu-feng^{1,2,3}

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

(2 Key Laboratory for Computational Astrophysics, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

(3 School of Astronomy and Space Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT GRS 1915+105 is a galactic low-mass X-ray binary. Its energy spectra and black hole spin have been extensively studied. Since 2018 July, it has declined into a low-flux X-ray level, occasionally interrupted by multi-wavelength flares. Using the data of Insight-HXMT (Insight-Hard X-ray Modulation Telescope) satellite from August 30 to Oct 13, 2020, the energy spectra characteristics of GRS 1915+105 is investigated. The results show that the energy spectra can be well fitted with a Comptonized multi-temperature blackbody model. The evolution of the hardness-intensity diagram during the outburst remains in the soft state. Adopting new dynamical parameters of GRS 1915+105 (including the black hole mass M , the Sun mass $M_{\odot}$, the inclination angle i , and the distance d): $M = 12.4_{-1.8}^{+2.0} M_{\odot}$, $i = 60^{\circ} \pm 5^{\circ}$, $D = 8.6_{-1.6}^{+2.0}$ kpc, the group obtains a lower limit of the black hole spin, $a_* > 0.9990$, confirming that GRS 1915+105 is an extremely-spinning black hole. Considering the effects of a local absorber, the group adds the absorption component “tbpcf” into the model. Its equivalent hydrogen column density reaches 10^{23} cm^{-2} , which is consistent with the characteristics of “Compton-thick”.

Key words stars: black holes, X-rays: binaries, black hole physics