

# 天文观察用超软 X 射线探测器的标定\*

赵屹东 崔明启 朱佩平 黎 刚

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

唐和森 张仁健 谷正海 顾福源

官一中 刘善昭 史习昭 张 南

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

**摘要** 在北京同步辐射装置 3W1B 光束线上,对天文观测用超软 X 射线(0.2keV—3.5keV)正比计数管探测器进行了系统地标定.得到了正比计数管的死时间、计数率坪曲线、能量线性、能量分辨、窗材料透过比曲线;借助于已标定过的光电二极管探测器,测量了正比管探测器的能量响应效率,标定不确定度在 10%—18%之间.另外,还对正比管系统在卫星上的六道记录和在实验室里的多道记录进行了对比,两种记录方式符合得很好.

**关键词** 软 X 射线 正比计数管 探测器标定 同步辐射

## 1 引言

宇宙  $\gamma$  爆是  $\gamma$  射线天文学中最引人注目的现象,属于国际前沿领域的研究课题.  $\gamma$  爆是在进行核爆炸监测时无意中发现来自宇宙空间的  $\gamma$  射线突然增强的现象. 其  $\gamma$  射线辐射非常强,而 X 射线辐射一直被认为非常弱,不易观测到.  $\gamma$  爆的持续时间一般为几秒、十几秒、几十秒;  $\gamma$  爆的强度变化时标很短,上升时间一般为毫秒级甚至亚毫秒级. 这样短的时标表明产生  $\gamma$  爆源的尺度一定很小,一般都认为  $\gamma$  爆源与中子星相关<sup>[1]</sup>. 近二十年来宇宙  $\gamma$  爆的观测研究受到各国的高度重视,尤其关于  $\gamma$  爆的起源究竟是在银河系内还是在银河系外至今还是个谜. 如果能观测到  $\gamma$  爆中的 X 射线辐射,情况将会有重大改变. X 射线,特别是软 X 射线,常常是以黑体辐射的形式出现. 中子星单位面积的辐射功率可以用斯特藩-玻尔兹曼定律根据 X 射线观测温度求得,而中子星的表面积又可以估算出来. 因此  $\gamma$  爆源的 X 射线光度就可以确定,再根据观测到的 X 射线流量就可以直接得到距离信息. 另一方面, X 射线的定位精度也比  $\gamma$  射线高得多,有助于对其它天体与其成协情况的认证. 可见,  $\gamma$  爆的 X 射线研究有至关重要的意义<sup>[1]</sup>. 由中国科学院紫金山天

2000-12-28 收稿

\* 国家高技术空间天文子项目(921-2)专题资助

文台研制的超软 X 射线探测器是 921-2 空间天文子项目的一个重要组成部分,目的就是探测宇宙空间  $\gamma$  爆中的软 X 射线辐射.

超软 X 射线探测器主体是鼓形结构流气式正比计数管系统,工作气体为导丁烷,压强限定为 13332.2Pa,能量范围 0.2keV—3.5keV. 正比计数管系统能量分辨较差,尤其在软 X 射线波段(200eV,  $E/\Delta E \sim 1^{[2]}$ ),这就要求必须对观测到的数据做解谱处理. 通常的解谱方法是输入一系列已知能量的线谱,分别得到探测器(在此为正比计数管)在每一能点的响应,建立该探测器的能量响应函数. 根据这个探测器的能量响应函数,对由它直接观测到的数据进行解谱. 所以,在搭载宇宙飞船上天之前,必须对正比计数管进行系统地标定. F.P.Santos<sup>[3-6]</sup>曾报道过用 Monte Carlo 法模拟 Xe 的吸收,进而计算充 Xe 正比管的能量响应,但只适用于 3keV 以上能区. 目前,对软 X 射线正比计数管探测器系统能量响应效率、能量分辨、方向特性、坪特性(工作电压的选择)及死时间等综合特性进行全面系统地标定还未见报道. 同步辐射光源是目前世界上公认的理想光源,它具有从可见光、软 X 射线到硬 X 射线的连续能谱分布,并具有高准直性、高亮度、确定的脉冲时间结构等一系列优异特性. Keith Jahoda<sup>[2]</sup>等曾在同步辐射光源上用 99eV—277eV 的单色光测正比计数管的脉冲高度谱. 此次中国科学院高能物理研究所与中国科学院紫金山天文台合作,在北京同步辐射装置 3W1B 光束线上对天文观察用超软 X 射线探测器进行了系统的标定.

## 2 标定实验及结果

### 2.1 实验设计

3W1B 光束线有关参数和技术指标为:光子能量范围:50eV—1600eV;能量分辨率 ( $\Delta E/E$ ):  $8 \times 10^{-3}$ — $4 \times 10^{-2}$ ;光子通量:  $1 \times 10^8$ — $1 \times 10^9$  phs/mA·s 0.1 % BW;样品处光斑:  $(10 \times 3)$ mm<sup>2</sup>. 标准探测器采用美国国家计量局(NIST)标定过的硅光电二极管 (AXUV-100G, IRD, USA), 1999 年初我们又用自标定法进行了再标定<sup>[7]</sup>. 图 1 为标定实验装置示意图,从变线距光栅单色器<sup>[8]</sup>引出的单色同步光经两个垂直狭缝和滤光片组后到达正比管. 我们通过减小狭缝和在光路中插入衰减片的办法,确保超软 X 射线探测器工作在非

表 1 各能段 X 光滤光片配置

能量 (eV)	材料	滤光片 1		滤光片 2	
		厚度 ( $\mu\text{m}$ )	材料	厚度 ( $\mu\text{m}$ )	材料
130—250	Mo	0.63			
250—280	C	0.53	C	0.26	
350—450	Ti	1.39			
500—700	Fe	1.08			
700—850	Ni	0.99			
900—1300	Mg	2.24	Be	10	
1350—1500	Al	1.51	Be	10	

饱和状态下;由于光栅单色器出射光中混有高次谐波成分,为提高同步辐射单色光光谱纯度,对应不同的能段在光路上插入相应的滤光片以抑制高次谐波,各能段滤光片配置见表 1;在标准探测器和滤片组之间加上  $\phi 1\text{mm}$  光阑,目的在于限制光斑水平尺寸;标准探测器工作在积分模式,用低噪声电缆驳接至弱电流放大器(6517, Keithley, USA) 读出其电流信号;正比管计数率由定标器(BH1220, 中国北京核仪器厂)读出,谱形采用多道分析器(ND951, ND, USA)获取。

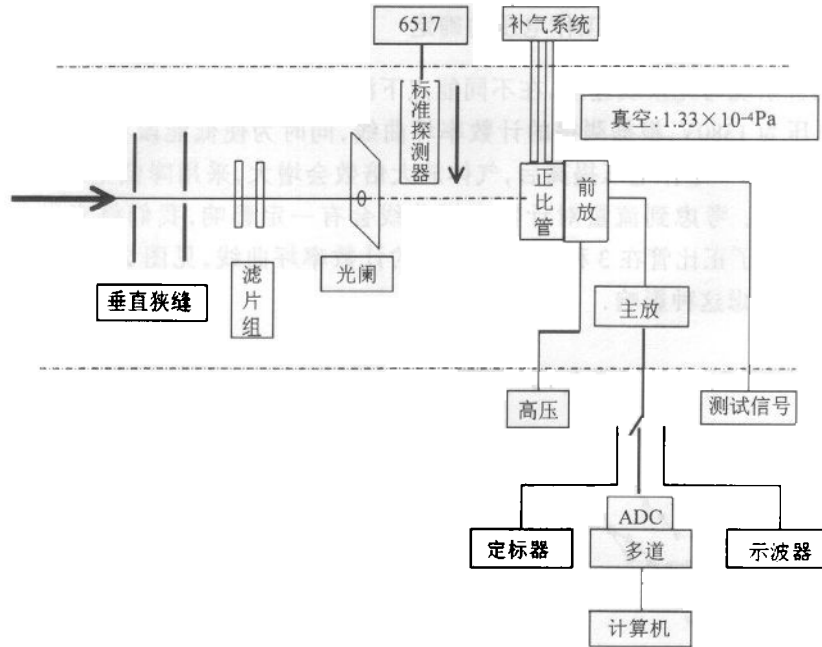


图 1 标定实验装置示意图

## 2.2 实验结果

### 2.2.1 死时间的测量

为保护正比管窗口,同时也为避免放射源进入真空室后扩散造成放射性沾污,死时间是在系统上线之前在一个大气压下测的,仅供参考.我们用双源法<sup>[9]</sup>估测正比管的死时间:假定  $\tau$  为系统死时间,  $g$  为表观计数率,则每秒有  $g\tau$  时间探测器是没有响应的;若  $n$  为每秒穿过探测器窗口的光子数,有

$$n - g = ng\tau, \tag{1}$$

或

$$n = \frac{g}{1 - g\tau}. \tag{2}$$

采用两个  $^{55}\text{Fe}$  放射源,首先将放射源 A 置于正比管前,记下正比管的计数率  $g_A$ ;加上放射源 B,记下正比管的计数率  $g_{AB}$ ;去掉放射源 A,记下正比管的计数率  $g_B$ ;再去掉放射源 B,记下背底计数率  $b$ . 有

$$n_A + n_B = n_{AB} + b, \tag{3}$$

其中  $n_i (i = A, B, AB)$  的意义与 (1), (2) 式中的  $n$  相同. 右侧加上  $b$  是因为左边有两次计数, 每次都包含背底计数. 将式 (3) 写成 (2) 的形式

$$\frac{g_A}{1 - g_A \tau} + \frac{g_B}{1 - g_B \tau} = \frac{g_{AB}}{1 - g_{AB} \tau} + \frac{b}{1 - b\tau}, \quad (4)$$

由 (4) 式可计算出死时间. 待标探测器在  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$  气压下工作时死时间约为  $\tau = 6.0 \mu\text{s} (\pm 0.4 \mu\text{s})$ .

### 2.2.2 坪特性曲线的测量及工作电压的确定

将正比管系统与光束线连接, 在不同能点下测计数率坪曲线, 测量结果见图 2(a). 原定的工作电压为 1380V, 根据测得的计数率坪曲线, 同时为使低能段有较高的效率, 将工作电压改为 1570V. 工作电压提高后, 气体放大倍数会增大, 采用降低主放增益的方法避免主放输出饱和. 考虑到流量对计数率坪曲线会有一定影响, 我们将光子能量固定在 200eV, 分别测量了正比管在 3 种不同流量下的计数率坪曲线, 见图 2(b), 结果坪移小于 10V, 所以不必考虑这种影响.

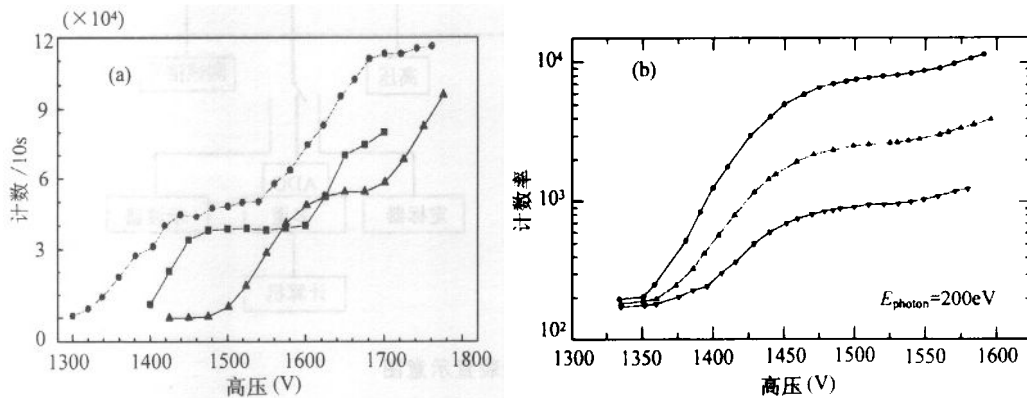


图 2 (a) 正比计数管在不同能点的坪曲线;  
(b) 正比管在 3 种不同流量下的计数率坪曲线 ( $E_{\text{photon}} = 200\text{eV}$ )  
(a)  $\bullet$  1500eV,  $\blacksquare$  700eV,  $\blacktriangle$  200eV; (b)  $\nabla$  800c/s,  $\blacktriangle$  2000c/s,  $\bullet$  9000c/s.

### 2.2.3 能量线性及能量分辨率的测量

在 200eV—1800eV 之间取 13 个能点, 分别用多道记录正比管对应每个能点的谱, 测量正比管系统的能量线性. 测量结果如图 3(a) 所示, 纵坐标为能量, 横坐标为道数, 线性拟合标准差为 1.2%. 正比管能量分辨率测量结果见图 3(b), 对应的能点及分辨率都已标在图中. 必须说明的是, 由于光束线单色性不是很好, 正比管的能量分辨率要好于测得值. 500eV 没有合适的滤光片, 只好用  $1.08 \mu\text{m}$  的铁, 致使入射光谱向高能方向倾斜, 而且二次谐波成分有所显露, 以致测得的分辨率与相邻能点出入较大. 而 1400eV 则是因为单色器系统中衍射光栅表面粗糙度变差, 导致出射光高能段带宽增大, 这不是加滤光片所能解决的.

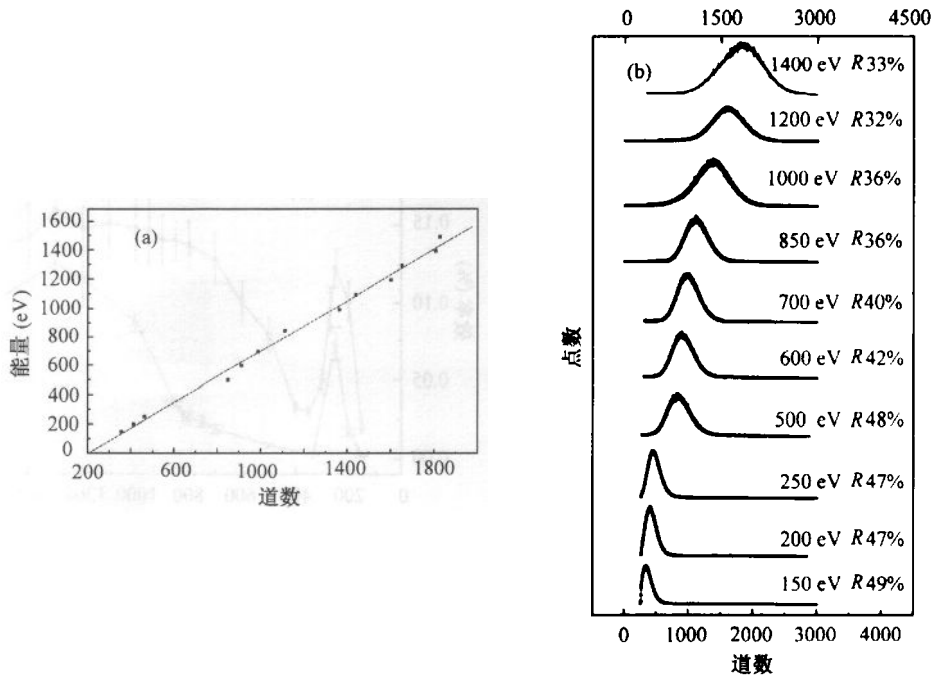


图 3 正比管系统的能量线性和能量分辨

(a)●实验数据,——线性拟合.

2.2.4 正比管窗材料透过比曲线的测量及能量响应效率效率的标定

正比管窗口材料选用超薄聚丙烯膜,此膜不含氧分子,具有较高的透过率和较好的气密性.膜厚度为 1.0 $\mu\text{m}$  或 2.0 $\mu\text{m}$ ,厚度偏差小于 0.2 $\mu\text{m}$ .在膜上镀 100—150 $\text{\AA}$  铝,以增加导电性,防止电荷堆积.膜的支撑采用双层网支撑法:膜敷在 1 线/mm Ni 支撑网上,Ni 丝宽度约为 60 $\mu\text{m}$ ;由于窗口较大( $\phi 51\text{mm}$ ),Ni 支撑网外面又粘上网状铝加强筋,加强筋宽度约为 0.8mm,单元尺寸为 10 $\times$ 10mm,加强筋与正比管阳极丝成 45 度角.由于骨架尺寸过大,用来测透过率的参考窗材料有支撑网但不含加强筋骨架,图 4(a)为测量结果.从图中可以看出,C 的吸收对正比管的效率影响极大,膜厚度从 2.0 $\mu\text{m}$  减为 1.1 $\mu\text{m}$  对提高正比管在低能段的探测效率很有利.能量响应效率从 7% (280eV) 提高到 10% (600eV),见图 4(b).做漏气率检查实验,压强为 13332.2Pa 时厚度 2.0 $\mu\text{m}$  膜漏率为 14.67Pa/min,厚度 1.1 $\mu\text{m}$  膜漏率为 17.33Pa/min,符合规定的漏率标准.最终选用 1.1 $\mu\text{m}$  厚的膜做窗口.

以标定过的光电二极管探测器 AXUV100G (IRD.USA) 做为标准探测器,测量入射到标准探测器的光电流,用公式

$$F = \frac{i}{e\eta} \tag{5}$$

计算出入射到探测器的光子数  $F$ . 其中  $i, e, \eta$  分别为光电二极管探测器光电流、基本电荷量、二极管探测器的量子效率的标定值.使光电二极管探测器退出光路,测量正比管系统的计数率  $C$ . 则  $\eta_{\text{PC}} = C/F$  为正比管的能量响应效率.虽然二极管与正比管相距较远

(约 1.5m), 但两个狭缝都仅开几十微米, 光阑孔径为  $\phi 1\text{mm}$ , 而且同步辐射光的发散度很小(小于  $2\text{mrad}$ ). 二极管探测器的灵敏面积为  $(10 \times 10)\text{mm}^2$ , 正比管的更大, 为  $\phi 51\text{mm}$ . 所以能保证两个探测器的入射光光通量相同. 测量结果见图 4(b).

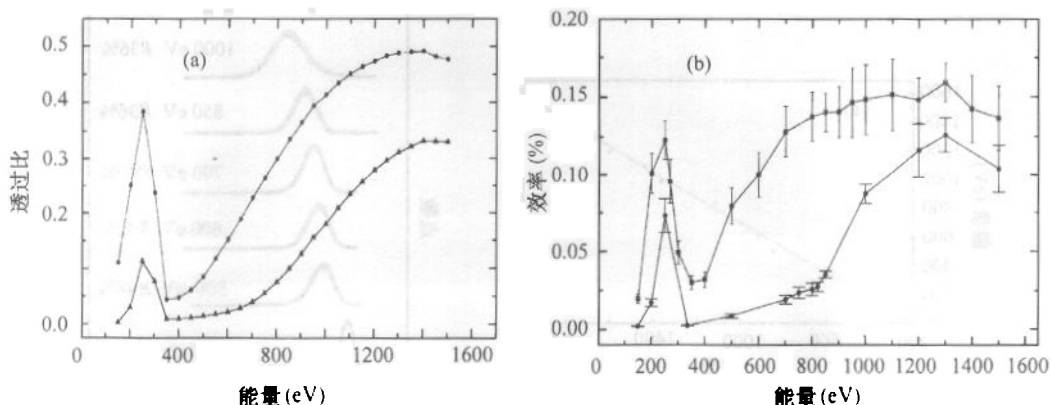


图 4 窗材料透过比和正比计数管能量响应效率标定结果

···●—1.1 $\mu\text{m}$ , —▲—2.0 $\mu\text{m}$ , ■—CH膜厚 1.1 $\mu\text{m}$ , ●—CH膜厚 2.0 $\mu\text{m}$ .

测量结果的不确定度主要有如下几个来源:

1) 光源单色性相对不确定度为 1%—7%; 2) 标准二极管探测器量子效率相对不确定度为 6%—12%; 3) 光源稳定性造成的误差小于 0.5%; 4) 定标器读数偏差约为 2%—5%; 5) 6517 弱电流计测量光电流读数偏差小于 2%, 二极管探测器在弱信号时涨落较大. 光电流测量相对不确定度在 5%—10% 之间; 6) 其它因素引起的误差估计为 5%.

总相对不确定度在 10%—18% 之间. 图 4(b) 中不同能段的误差变化不很规律, 是由于不同能段的光源单色性、测量信号的信噪比差异较大.

#### 2.2.5 正比管方向特性及横向均匀性

正比管方向特性: 见图 5(a), 以正入射为零度, 调节正比管的俯仰角度, 从 250eV 到 1600eV 测了 6 个能点. 为使不同能点对应的曲线具有可比性, 每条曲线的纵坐标为相对计数. 从图 5(a) 可见, 正比管在正负  $31^\circ$  左右效率才急剧下降, 说明其接收角不小于  $60^\circ$ .

正比管横向均匀性: 见图 5(b), 每 5mm 测一个点, 将正比管平移了 50mm. 从 250eV 到 1600eV 共测了 6 个能点, 纵坐标也是相对计数. 图 5 中间的起伏是由窗口的加强筋引起的.

#### 2.2.6 两种记录方式的对比

由于受到卫星数据传送带宽的限制, 同时天文观测也没有必要把能段分得那么细, 超软 X 射线探测器采用六道记录方式. 表 2 给出了具体能道划分及期望脉冲高度, 表 3 为实测六道记录道边界两侧能点与多道分析器记录道数及示波器脉冲幅度的比较, 表 3 中脉冲幅度为示波器谱形观测的中心值. 值得说明的是, 原定探测器能量区为 350eV—5keV; 在标定过程中发现, 若适当提高工作电压, 正比计数管的能量响应效率在更低能段

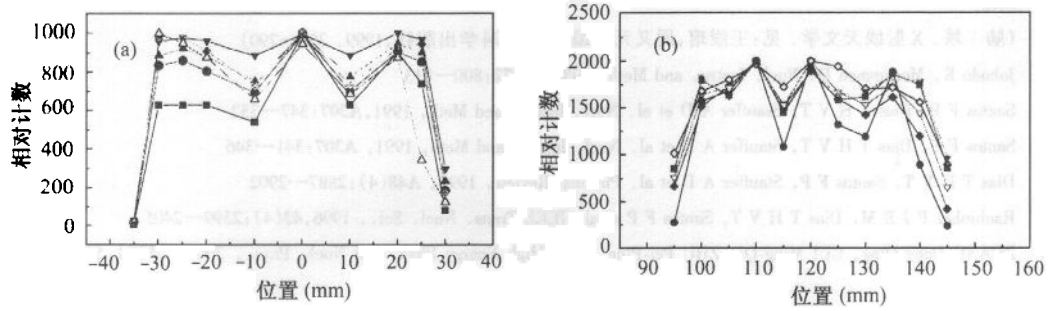


图 5 (a)正比计数管在不同能量下的方向特性;(b)正比计数管在不同能量下的横向均匀性

(a) ■250eV, ●400eV, ▲800eV, ▼1000eV, ◆1300eV, △1600eV;

(b) ●250eV, ◆400eV, ▼800eV, ◇1000eV, ▼1300eV, ■1600eV.

(280eV 以下)也较高;而更低能量 X 射线的探测,对研究宇宙  $\gamma$  爆的起源非常有利,因此,将探测器的工作能区改为 200eV—3.5keV,实际上可向下延伸到 150eV. 另外,3W1B 光束线高能端目前只能到 1600eV,所以第 5,6 两道没办法实测. 比较表 2 与表 3,1—4 道道边界两侧能点的测量结果与预想的相吻合得很好.

表 2 超软 X 射线探测器六道记录能道划分

道数	能量范围(keV)	脉冲幅度范围(V)
1	0.2—0.35	0.4—0.7
2	0.35—0.85	0.7—1.7
3	0.85—1.35	1.7—2.7
4	1.35—1.85	2.7—3.7
5	1.85—2.35	3.7—4.7
6	2.35 以上	4.7 以上

表 3 六道道边界两侧能量与多道分析器道数的比较

能量(eV)	峰值道数	脉冲幅度(V)
200	387	0.4
350	491	0.6
850	1110	1.7
1350	1704	2.9
1500	2009	3.5

### 3 小结

借助于同步辐射光源和光电二极管次级标准探测器,对天文观测用正比计数管探测器进行了系统地标定,标定结果已得到项目总体组的确认. 在标定过程中,针对该探测器系统的特性,提出了将探测器工作能区向下移,采用 1.1 $\mu$ m 厚的膜做窗口、提高工作电压以提高感兴趣的低能段的响应效率;降低主放增益以避免主放大器输出饱和等建议并且都被项目总体组采纳.

### 参考文献(References)

1 LU Tan. X-Ray Astrophysics. In: WANG Shou-Guan, ZHOU You-Yuan ed. Beijing: Science Press, 1999. 256—290(in Chi-

nesc)

(陆 垠. X 射线天文学. 见:王绥瑄,周又元主编. 北京:科学出版社,1999. 256—290)

- 2 Jahoda K, Mccammon D. Nucl. Instru. and Meth, 1988, **A272**:800—813
- 3 Santos F P, Dias T H V T, Ssauffer A D et al. Nucl. Instru. and Meth, 1991, **A307**:347—352
- 4 Santos F P, Dias T H V T, Stauffer A D et al. Nucl. Instru. and Meth, 1991, **A307**:341—346
- 5 Dias T H V T, Santos F P, Stauffer A D et al. Physical Review, 1993, **A48**(4):2887—2902
- 6 Rachinhas P J B M, Dias T H V T, Santos F P et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1996, **43**(4):2399—2405
- 7 ZHANG Dong-Qing, CUI Ming-Qi, ZHU Pei-Ping et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, **24**(6):578—584(in Chinese)  
(张东清,崔明启,朱佩平等. 高能物理与核物理,2000, **24**(6):578—584)
- 8 TANG E-Sheng, YAN Yong-Lian, XIA Shao-Jian et al. Journal of Synchrotron Radiation, 1998, **5**:530—532
- 9 Tsoulfanidis N. Measurement and Detector of Radiation. New York: McGraw-Hill BOOK COMPANY, 1989. 68—71

## Calibration of Soft X-Ray Detector for Astronomic Observation

ZHAO Yi-Dong CUI Ming-Qi ZHU Pei-Ping LI Gang

(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China*)

TANG He-Sen ZHANG Ren-Jian GU Zheng-Hai GU Fu-Yuan

GONG Yi-Zhong LIU Shan-Zhao SHI Xi-Zhao ZHANG Nan

(*Zijinshan Observatory, CAS, Nanjing 210008, China*)

**Abstract** A flowing gas proportional counter (FGPC) as the detector for astronomical observation in soft X-ray (0.2—3.5keV) range is calibrated on the 3W1B beamline at Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF). The dead time, counting rate plateau curves, X-ray energy linearity, energy resolution and window transparency of the FGPC have been measured. By means of a calibrated photodiode (AXUV 100G IRD USA, calibrated in NIST) as a standard detector, the efficiency of the FGPC as function of photons energy has been obtained with an uncertainty between 10 %—18 %.

**Key words** soft X-ray, proportional counter, detector calibration, synchrotron radiation

---

Received 28 December 2000

\* Supported by National 921 High Technology Project (921 - 2)