

多丝正比室的逃逸门技术

沈长铨 沈培若 叶宗男

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

李小南

(郑州大学物理系)

摘 要

为进行空间硬X射线天文观测, 研制了一个高空气球载的高压氙(Xe)多丝正比室硬X射线谱仪, 采用了逃逸门技术. 本文介绍逃逸门技术的原理, 并描述该谱仪实现逃逸门技术的方法及实际性能. 该谱仪在87年高空气球飞行观测中获得了有效的实验数据.

一、引 言

近年来, 随着空间运载工具的不断进步, X和 γ 射线天文观测十分活跃, 有很多新的发现. 由于天体发射的硬X射线到达地球附近的流强大多很弱, 而空间宇宙射线和X、 γ 射线背景在探测器上形成的本底很强, 加上硬X射线穿透力强, 不能象可见光那样进行聚焦和成像, 因此, 先进的硬X射线空间望远镜必须有良好的观测灵敏度(即大灵敏面积、高探测效率和低本底噪声)、良好的能量分辨率、重量轻(以便载入空间进行观测)、位置灵敏(以便成像观测)等特性. 高压Xe多丝正比室兼有这些特性, 而逃逸门技术又能进一步改善能量分辨率, 减小本底, 使之成为一种性能优良的硬X射线望远镜^[1,2,3]. 为了用高空气球进行硬X射线天文观测, 我们研制了一个高压Xe多丝正比室硬X射线谱仪, 并且

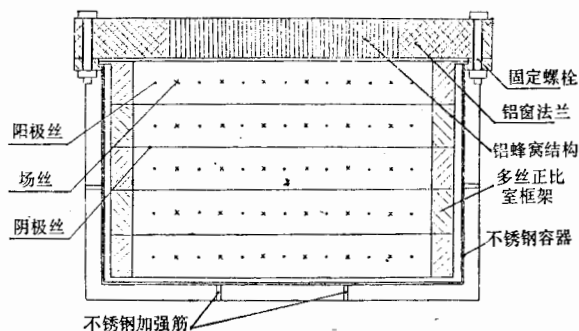


图1 高压Xe多丝正比室结构示意图

实现了逃逸门技术。

二、逃逸门技术的原理

高压 Xe 多丝正比室如图 1 所示,其详细描述见参考文献[4]。它是一个五层多丝正比室,同一层的每相邻两根阳极丝中间有一根场丝。场丝与阴极丝均为地电压,阳极丝接正高压。这样,每根阳极丝被阴极丝和场丝包围在一个横截面为 $3 \times 3\text{cm}^2$ 的方柱内,相当于一个无壁的单丝正比管,称之为一个“单元”。室内充 3 个大气压的混合气体 (Xe 95% + CH₄5%)。

若入射正比室的 X 射线光子与室内气体分子发生作用,而且沉积能量大于噪声阈,这个光子就被探测到了。能量 200keV 以下的硬 X 射线与 Xe 原子的主要作用是光电效应。这一能区的光子与少量 CH₄ 的作用可忽略不计。如果入射的 X 光子能量 E_x 大于 Xe 的 K 壳层电子结合能 $E_K = 34.6\text{keV}$, 则其光电作用的方式如图 2 所示^[5,6]。该图对 L 壳层及更外面壳层的空穴没有细述,因为它们的荧光产额很小,而且即使其中能量最大的 L 荧光在 Xe 中的平均自由程也小于 $0.6\text{cm} \cdot \text{atm}$, 对于高压、大丝距的正比室来说,可近似看作就地转换成光电子。

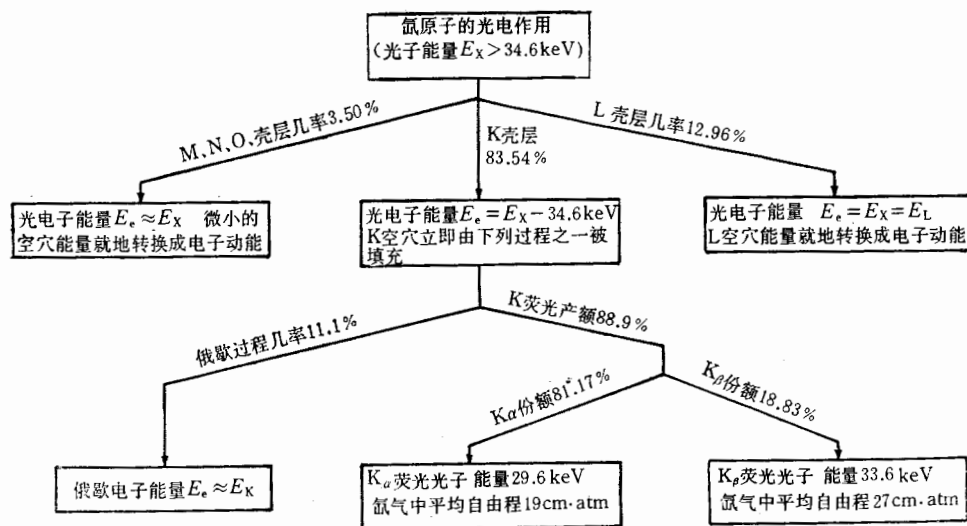


图 2 能量大于 34.6 keV 的硬 X 射线光子与 Xe 原子光电作用示意图。

由图 2 可见,能量大于 34.6 keV 的入射 X 光子在 Xe 原子上发生光电效应后有 $83.54\% \times 88.9\% = 74.3\%$ 的几率是产生一个 K 特征荧光光子,其余能量变为一个或几个自由电子(光电子或俄歇电子)的动能,并通过电离过程沉积在作用点附近。K 荧光光子在工作气体内被吸收前平均经过相当长的距离。因此,这样的事例往往在多丝正比室内的两个地点产生能量沉积。这两个地点如果处在两个单元内,就会有两根阳极丝“同时”有信号输出,而且其中之一的幅度相应于 Xe 的 K 荧光能量。利用 K 荧光信号作为事例筛选的必要符合条件,这就是逃逸门技术。光电作用的其它各种过程都导致入射光子能量

全部损耗于作用点附近,都被逃逸门判选标准所排斥。因此,74.3%是逃逸门技术探测效率的上限。实际上由于一些K荧光逃出多丝正比室或在原初作用单元内就被吸收,这些事例将被逃逸门技术所拒绝。因此,逃逸门技术的实际选择效率比这一上限值低,单元的尺寸、氙气压等都对它有影响。由于各种作用过程的随机性,逃逸门Xe多丝正比室的实际探测效率只能用实验测定和蒙特卡罗模拟计算求得。我们作模拟计算的初步结果示于图3,用几个能量的放射源实测数据对计算作了检验。图中曲线A为不用逃逸门技术时的探测效率,此时靠边的各单元仅作反符合。曲线B为用逃逸门技术时的探测效率,此时靠边的各单元虽然仍作反符合,但对Xe的K荧光也开了“门”,也就是说这一路信号若是荧光信号,则不再作为反符合信号,而是与其它各路的荧光信号等同地起探测作用,以此来提高逃逸门探测效率。

逃逸门技术虽然使多丝正比室的探测效率有所损失,但却带来了两个优点:改善了能量分辨率,降低了本底。此外,由测得的能谱计算X射线源的发射谱时,也不必再作逃逸峰校正了,因而减小了误差,提高了能谱测量的可靠性。

多丝正比室不用逃逸门技术时的能量分辨率 R 为

$$R = \frac{\Delta E}{E}. \quad (1)$$

其中 E 为入射光子能量, ΔE 为测得的能谱中能量为 E 的峰的半高全宽度 (FWHM)。

使用逃逸门技术后,由于Xe的K荧光能量 E_f 是精确已知的,因而K荧光信号幅度的涨落可以避免,能量分辨率 R' 为

$$R' = \frac{\Delta E_c}{E_c + E_f} = \frac{\Delta E_c}{E}. \quad (2)$$

其中 E_c 为光电子与外层俄歇电子能量和, E_f 为K荧光能量。由于 $E_c < E$, 必然有 $\Delta E_c < \Delta E$, 因此 $R' < R$ 。逃逸门技术就是这样改善了能量分辨率。

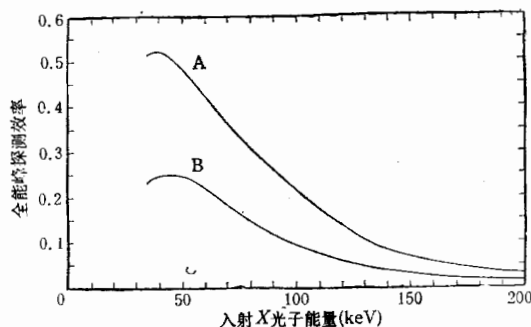


图3 高压Xe多丝正比室的探测效率。曲线A为不用逃逸门技术时的效率,曲线B为用逃逸门技术时的效率。

逃逸门技术以单独输出的K荧光信号为判选条件,而K荧光只在硬X射线光电作用中才产生,因而不产生K荧光的大量本底事例都被排除了。

三、逃逸门电路

为了简化电子学线路和减小逃逸门判选的死时间,把阳极丝编组.同一组的阳极丝并联起来,共用一路前置放大器和线性放大器,作为逃逸门电路的一路信号输入.全部阳极丝编成五组.两侧靠边和底层的单元编为第5组,作反符合屏蔽.中间的二十个单元分为4个组(见图4),分组的原则是使相邻单元编入不同的组,同一组的各单元相距尽可能远,以利于提高逃逸门探测效率.

数据获取由球载微机控制^[7].为了减小探测器的死时间,多丝正比室的各路输出信号经放大后先由逃逸门电路进行硬件快速的一次判选,合格事例由逃逸门电路向CPU发出中断申请,同时用硬件快速启动相应各路ADC进行模数转换.球载微机以Z80为CPU,采用STD总线和模块式结构,它以中断方式对探测器事例进行二次逃逸门判选和处理.

图5为逃逸门电路原理框图.图中只画出了第4、5两路,所省略的第1、2、3路与第4路相同.每路前置放大器输出的信号经线性

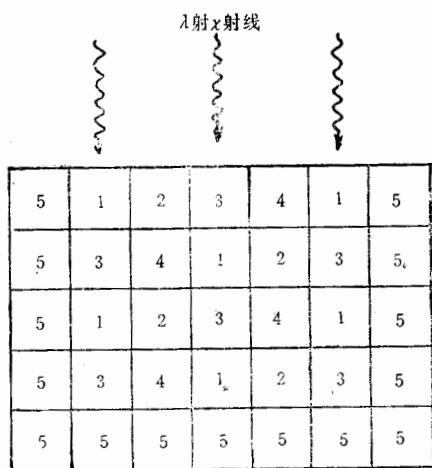


图4 阳极丝编组方式示意图

放大后输至噪声甄别器和单道分析器.这个单道分析器就是判断Xe的K荧光信号的一个窄“门”.对于第1至4路,当某路探测到单独的K荧光信号,该路的单道分析器就输出“门内信号”以阻止该路的取样保持电路进行采样,导致该路ADC输出为零;这个门信号又使荧光光子计数器加1,配合微机实现K荧光精确能量换算.如果某路无门内信号,却有高于噪声甄别阈的信号(称“门外信号”),则可触发该路取样保持电路采样,使这路的ADC能对信号进行正常模数转换.

第5路前端的放大器、噪声甄别器和单道分析器与其它各路相同.但它的门外信号不作模数转换而用作反符合信号,控制电路不为这一事例发出中断申请,并使各路峰值保持、取样保持电容放电,荧光光子计数器清零,整个电路在 $15\mu\text{s}$ 内恢复常态.第5路若有门内信号,则阻塞该路的反符合功能,并与其它各路的门内信号一样地起作用.这样增大了对荧光光子的探测空间,提高了逃逸门的探测效率.

第1至4路的信号和第5路的门内信号都启动中断申请信号,同时使逃逸门电路进入“封门”状态,直至球载微机的中断服务子程序将该事例处理完毕,各峰值保持和取样保持电容放电完毕,各路ADC及荧光光子计数器全部清零.这样的事例引起的死时间为 $82\mu\text{s}$.

球载微机的逃逸门判选中断服务子程序先读荧光光子计数,将它乘上荧光能量 E_i ,再读各路ADC输出值,并累加起来,得出该事例的能量值,在能谱的相应道内加一个计

B1
B2
B3
E

5- [#

4- [

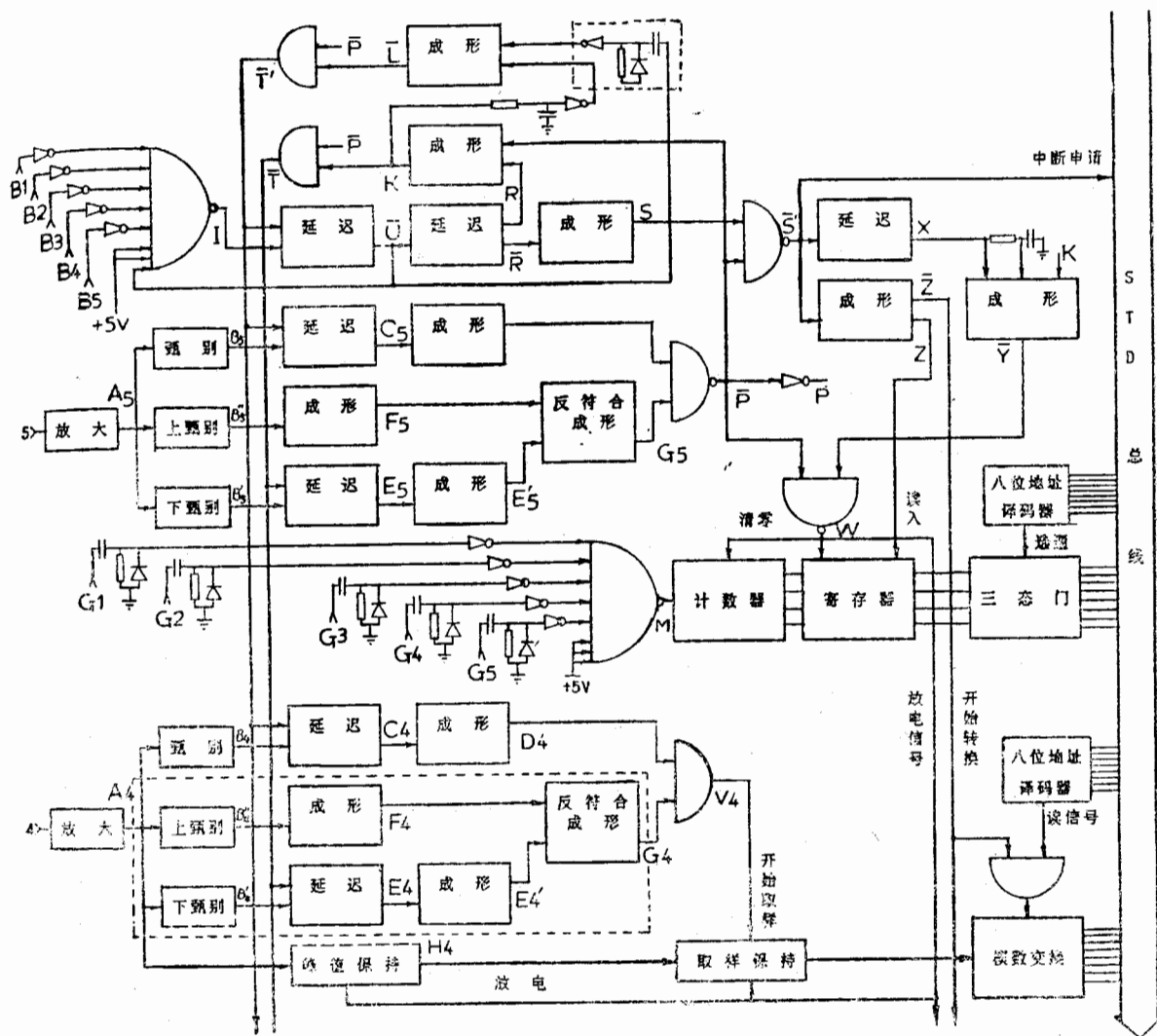


图 5 逃逸门电路框图

数。如果荧光计数 $n \geq 1$ ，则计入有效能谱内；如果 $n = 0$ 而且总能量大于 34.6keV ，则计入无逃逸光子能谱内。总能量若小于 34.6keV ，则不适于逃逸门判选，同样计入有效能谱中。总能量大于 200keV 的事例，都计入最高一道。

四、性能及讨论

在实验室用 ^{57}Co 、 ^{241}Am 、 ^{133}Ba 放射源对逃逸门高压 Xe 多丝正比室进行了测试。图 6 为高压 Xe 多丝正比室用逃逸门技术测得的 ^{57}Co 能谱。最右边的一个峰是 ^{57}Co 最强的一条 γ 谱线 (122keV) 的全能峰。图中横坐标单位是“道”，能量标定值为 0.881keV/道 。在图 6 (a) 无逃逸光子事例谱中，还有一个计数比全能峰更高的逃逸峰，其能量为 92keV ，是 122keV 光子光电作用后的 Xe-K 荧光光子逃出多丝正比室的事例形成的。另外在

59keV 处还出现了一个钨的荧光峰。由于室内布有大量钨丝，硬 X 射线与钨发生光电作用后，荧光产额高达 95.7%。绝大部分钨的 K 荧光光子会从钨丝中穿透出来，其中大部分会在多丝正比室内被 Xe 吸收而形成钨的 K 荧光峰。

图 6 (a) 无逃逸光子事例能谱中 122keV 全能峰的能量分辨率为 22%；而图 6 (b) 有效事例能谱中，122keV 全能峰明显变窄，能量分辨率为 13%。可见逃逸门技术确实改善了多丝正比室的能量分辨率。在图 6 (b) 中逃逸峰也消失了，这有利于提高对天体 X 射线源发射谱的观测精度，改善了硬 X 射线天文测量的可靠性。

由于测能谱时所用 ^{57}Co 放射源太强，采用了铅准直器，源周围还用铅片屏蔽，致使所测得的能谱中出现了铅的两条 K 荧光谱线，表现在图 6 (b) 中在 89—97 道附近出现了双尖驼峰。在图 6 (a) 中也同样有这些铅荧光的贡献，只不过被能量相近但计数率更高的 92keV 逃逸峰所掩盖而显示不出来。此外，由于采用了逃逸门技术，会把一些能量接近 Xe 的 K 荧光能量的光电子也误认作荧光，表现在图 6 (b) 中在 30keV 和 60keV 附近能谱畸变，这是逃逸门技术的一个缺点。改善多丝正比室的能量分辨率，使逃逸门电路设置的荧光“门”调窄一些，可以减小这两个畸变区的宽度。由于 ^{241}Am 的 X 射线能量恰处于能谱的畸变区，用逃逸门技术测得的 ^{241}Am 能谱就不再画出，其能量分辨率由不用逃逸门时的实测 ΔE 根据(2)式算出。

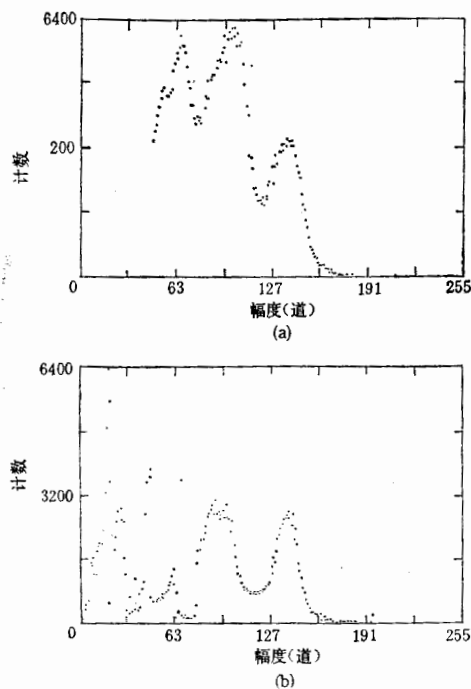


图 6 逃逸门高压 Xe 多丝正比室测得的 ^{57}Co 能谱。(a)无逃逸光子事例能谱。(b)符合逃逸门判选的有效事例能谱。

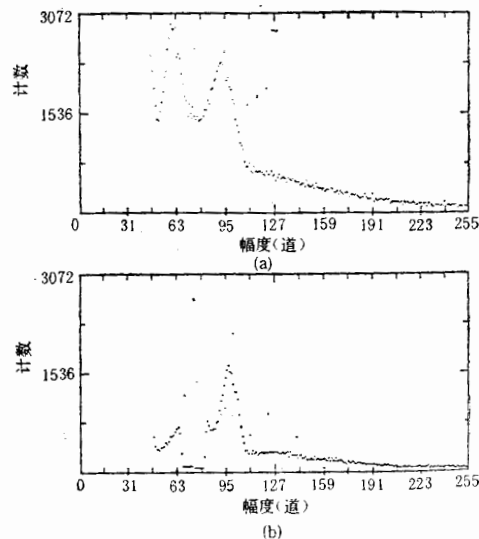


图 7 逃逸门高压 Xe 多丝正比室测得的 ^{133}Ba 能谱。(a)无逃逸光子事例能谱。(b)符合逃逸门判选的有效事例能谱。

图 7 为测得的 ^{133}Ba 能谱，主要是最强的 81keV 的 γ 光子贡献。由于 ^{133}Ba 有很多条硬 X 和 γ 谱线，使能谱的峰变宽、基线抬高，看起来像是本底很高。

在实验室对逃逸门高压氙多丝正比室进行的测试表明, 它的能量分辨率在 35—122keV 能区优于 13%, 对更高能区估计更好一些. 进一步提高能量分辨率的关键是改善各阳极丝气体放大倍数的均匀一致性. Xe 的 K_{α} 和 K_{β} 荧光能量相差约 4keV, 上述逃逸门电路只开了一个荧光“门”, 其中心能量相应于 K_{α} 和 K_{β} 的加权平均值 30.4keV. 如能对 K_{α} 和 K_{β} 分别开“门”, 分别计数, 还可以进一步提高能量分辨率. 此外, 加强逃逸门电路的一些模拟量运算功能, 以减少球载微机对事例的处理时间, 可进一步减小探测器的死时间.

由这个逃逸门高压 Xe 多丝比室组成的硬 X 射线谱仪于 1987 年 8 月 31 日在位于河北省香河县的气球站发放, 由 12 万立方米的高空气球载至 37 公里高空, 进行了成功的观测, 获得了大量有用的数据. 球载全部仪器于次日凌晨安全降落, 完好回收. 观测数据正在整理之中.

作者感谢陆柱国、孟烈、孙跃国、霍安祥等同志的支持和帮助. 孔敏南同志为电路制作了部分单元, 李毅、王红娟同志曾参加部分工作, 一并致谢.

参 考 文 献

- [1] P. Ubertini et al., *Nucl. Instr. & Meth.*, 217(1983), 97.
- [2] G. Bibbo and P. W. Sanford, *Nucl. Instr. & Meth.*, 179(1981), 189.
- [3] D. P. Sharma et al., 20th International Cosmic Ray Conference Vol. 2, OG 9, 1—3 (August 2—15, 1987, Moscow).
- [4] 沈长铨等, *核技术*, 10, No. 6(1987年), 5.
- [5] F. Sauli, “Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers” CERN 77-09 3rd May 1977.
- [6] E. F. Plechaty et al., “Tables and Graphs of Photon Interaction Cross Sections from 1.0 keV to 100 MeV Derived from LLL Evaluated Nuclear Data Library” (1975) UCRL-50400 Vol. 6, Rev. 1.
- [7] 叶宗男、沈长铨, “空间硬 X 射线谱仪数据获取系统”, *核电子学与探测技术*(待发表).

THE ESCAPE GATING TECHNIQUE FOR A MULTIWIRE PROPORTIONAL CHAMBER

SHEN CHANGQUAN SHEN PEIRUO YE ZONGNAN

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

LI XIAONAN

(Physics Department, Zhengzhou University)

ABSTRACT

When hard X-ray is detected by a multiwire proportional chamber filled with Xe or Kr, the intrinsic K-fluorescent photon, which of ten escapes from the original cell and is absorbed in other cell of the chamber, provides an accompanied signal with certain amplitude. A processing technique of such signal, called escape gating technique, can improve both the energy resolution and background rejection efficiency of the detector. In this paper, we describe this technique and its application in our balloon borne hard X-ray spectroscopy successfully launched on 31 August, 1987, at an altitude of 37 km above sea level near Beijing.