

# HXMT 卫星低能 X 射线望远镜

陈 勇 崔苇苇

(中国科学院高能物理研究所 100049)

## 1. 引言

软 X 射线是天体物理研究的重要能段之一，很多天体的 X 射线辐射都在这一能段有辐射，如热辐射、同步辐射和 X 射线荧光等。

空间软 X 射线望远镜构型一般可分为聚焦型和准直型两类。聚焦型望远镜采用掠入射聚焦镜头，将 X 光汇聚成像，可获得天体的图像、能谱和时变等信息。准直型望远镜采用准直器限制望远镜的视场，阻挡来自其他方向的杂散光进入探测器，一般多用于时变和能谱观测，也可采用扫描调制等方法粗略成像。

聚焦型望远镜灵敏度高，角分辨率好；但结构复杂，造价昂贵。准直型望远镜灵敏度不高，不适合弱源观测；但由于没有镜片的反射，探测效率高，易于组成大面积阵列；望远镜结构简单，造价较低。

探测器主要有气体探测器（如 RXTE 和 ROSAT 卫星）、CCD 探测器（如 Chandra 和 XMM-Newton 卫星）和微通道板探测器（如 ROSAT 和 Chandra 卫星）等，其基本原理都是利用光电效应来探测 X 射线，对于非成像探测器，其性能主要有时间分辨和能量分辨。时间分辨是指分辨两个光子的最小时间间隔，在 X 射线双星时变观测中，常要求探测器时间分辨较高（毫秒甚至微秒量级）。能量分辨描述了探测器对 X 射线光子能量的测量精度，一般用 Fe-55 放射源 5.9keV 峰的半高全宽所对应的能量来描述，X 射线天体辐射常有线谱，能量分辨对线谱观测很重要。气体探测器时间分辨可达微秒量级，能量分辨在 1keV 左右；CCD 探测器能量分辨好，可达  $150\text{eV}@5.9\text{keV}$ （即 5.9keV 峰的半高全宽为 150eV），但一般时间分辨较差，一般为几十毫秒到几秒，在观测强源时，多个光子有可能打在同一个像素内，即产生堆积效应。微通道板探测

器利用高压使电子倍增，基本无能量分辨，探测效率也较低，一般用于高精度成像。

低能 X 射线望远镜（简称 LE）是 HXMT 的重要载荷之一。相比于其他两个载荷，高能 X 射线望远镜（HE）和中能 X 射线望远镜（ME），LE 观测的 X 射线能量较低，为 0.7 ~ 15 keV，LE 将在这一能段，进行大天区 X 射线巡天成像，对黑洞、中子星进行能谱和时变观测，并监测天空的高能爆发现象。

LE 采用了结构紧凑的准直器和探测器阵列。探测器采用 SCD (Swept Charge Device, 扫式电荷器件)，在具有高能量分辨的同时，也有良好的时间分辨。LE 这一独特性能，可以避免事例堆积效应，即使对最亮的 X 射线源天蝎座 X-1，也可直接进行观测，不产生显著的堆积，堆积率（即发生堆积的事例与总事例之比）小于 1%。

LE 主要由三台全同的探测器机箱和一台电控箱组成，三台探测器机箱互成  $120^\circ$  夹角，在扫描观测时，天体源会在时间上产生调制信号，不同方位的源会产生不同的调制信号，经算法解调，可确定天体源的位置。

LE 由 24 个 CCD236 模块（96 路）组成了探测器阵列，总探测器面积达  $384\text{cm}^2$ 。每个模块的上方，都有一个准直器用来限制视场。准直器可分为长准直器和短准直器两类：长准直器有 21 个，又细分为大视场、小视场和全遮挡等三类，通过不同视场的组合，可以实时测量粒子背景和弥漫 X 射线背景；短准直器有 3 个，每个机箱各一个，构成了 LE 的全天监测器，探测器面积  $48\text{cm}^2$ ，用于在巡天观测模式下进行全天监测。

LE 的三台探测器机箱由一台电控箱控制，电控箱和卫星平台接口，可实现遥测遥控、指令和数据传

输等功能。

## 2. 载荷设计

LE 探测器机箱（图 1）结构上可分为上机箱和下机箱两部分：上机箱安装探测器和准直器等，遮光罩外贴铈玻璃镜片进行被动辐射制冷，使探测器工作在低温（ $-30 \sim -80^{\circ}\text{C}$ ）环境，还布置了多根热管加强传导，并使温度均匀。下机箱主要为电子学，实现数据采集功能。上下机箱之间采用隔热设计，通过挠性电路板实现电连接。

电控箱给探测器机箱提供二次电源，同时通过 LVDS 和三个探测器机箱通讯，并通过 1553B 和 LVDS 与卫星平台通讯。

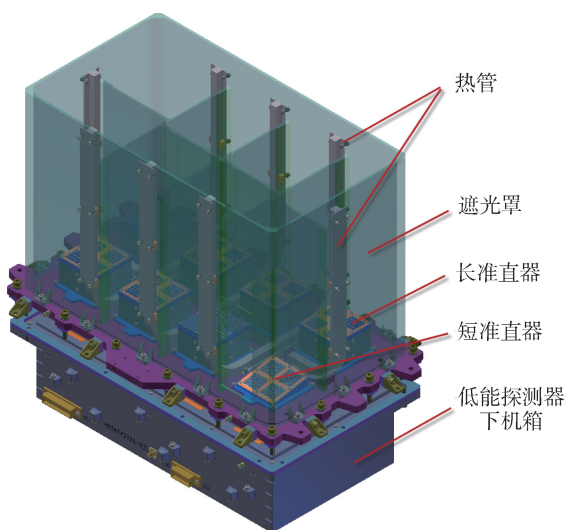


图 1 低能探测器机箱结构

### 2.1 探测原理

LE 在 SCD 上方设置有准直器，准直器上表面覆有遮光膜，下表面覆有防尘膜（图 2）。

准直器可以限制探测器的视场，只有来自特定角度范围内的 X 射线可以到达 SCD 探测器。遮光膜则可以遮挡可见光和紫外线，这些波段的光子如果照射到 SCD 探测器，会产生噪声及干扰；遮光膜很薄，X 射线光子可穿透。来自于准直器及遮光膜的细小多余物，即使是几十微米的小导电颗粒，如果掉落在探测器表面上，也有可能造成探测器工作异常，为此 LE 专门设计了防尘膜以解决这一问题。

进入到 SCD 的 X 射线光子，会在灵敏区内产生光电子及俄歇电子等，这些电子的能量总和一般等于入射光子的能量，这些电子进而会在半导体中产生多个电子-空穴对，产生一个电子-空穴对的能量平均为  $3.65\text{eV}$ 。在位于 SCD 表面的电极所产生的电场作用下，电子-空穴对中的电子会被收集到电极下，形成一个电荷包，在电极驱动电压的作用下，电荷包会沿特定的路径逐电极转移至片上的读出端放大器，并形成电压信号输出。

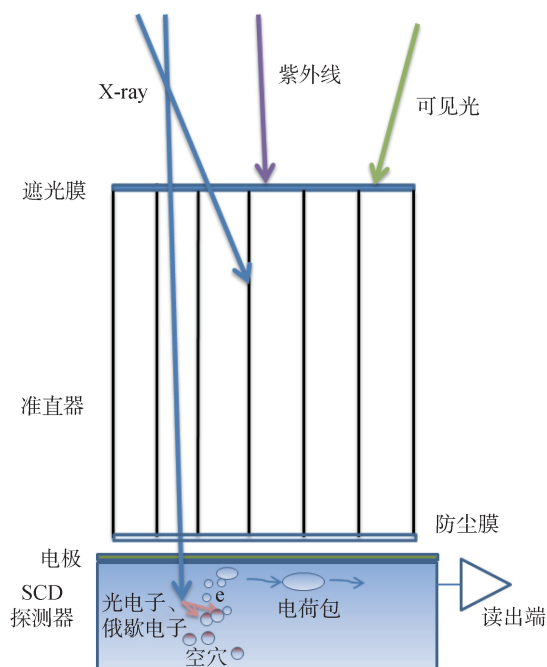


图 2 LE 探测器工作原理示意图

### 2.2 准直器

每探测器机箱有 8 个准直器，7 个长准直器和 1 个短准直器。

每个长准直器的主体结构都是相同的，分为四个象限，其中三个象限为小视场，另一个象限为大视场。准直器上覆盖有不同的压框，有的压框会把某个象限遮住，就形成全遮挡视场。短准直器高度较矮，视场很大，但不太规则，为  $50 \sim 60^{\circ} \times 2 \sim 6^{\circ}$ ，在遮光罩侧面也相应地预留了孔洞，用于全天监测。

按每机箱 32 片探测器统计，有 20 片探测器为小视场，6 片为大视场，2 片为全遮挡视场，4 片为全天监测视场，具体分布如图 3。在两个全遮挡视场

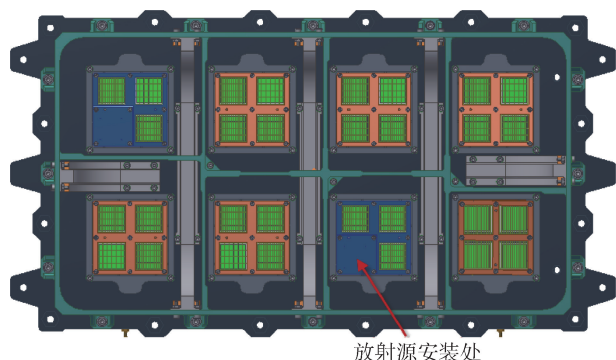


图3 LE准直器视场布局图

准直器中，有一个是大视场被全遮挡，另一个是小视场被全遮挡，小视场的全遮挡准直器内部安置了一枚 Fe-55 放射源，用于在轨标定。

### 2.3 SCD 探测器

LE 采用 e2v 公司生产的 CCD236 探测器。在 LE 设计之初，e2v 公司已推出第一代 SCD 探测器，在此基础上，作为第二代的 SCD，CCD236 在设计过程中

充分考虑了 LE 的需求，主要是更大的单片探测器面积，更高的集成度和更快的整片读出时间。

常见面阵 CCD 的读出，电荷包一般是先进行列转移，然后再行转移，由于需要每个像素的位置信息，所以整片读出速度比较慢，示意图见图 4 左。而 SCD (CCD236) 分为 4 个象限，每象限的电极都呈“L”形，电荷包先沿垂直于电极方向转移至对角线处，再沿对角线转移至中心的读出放大器。SCD 舍弃了位置信息，在某一瞬间，位于同一编号的“L”形电极（即使是不同象限的）下的信号，会同时到达读出端，因此整片读出时间比 CCD 短很多，SCD 更利于强源的观测。

相比于聚焦成像探测器，如 XMM-Newton 的 MOS 和 PN，LE 采用阵列的方式，分散了光子到达的区域，对强源观测能力要强很多。虽然 MOS 和 PN 都可以采用小窗口模式（即减少 CCD 有效成像区域），以求减少整片读出时间，但对高流强点源观测的堆积率与 LE 相比仍很高（图 5）。存在堆积会使能谱畸变，

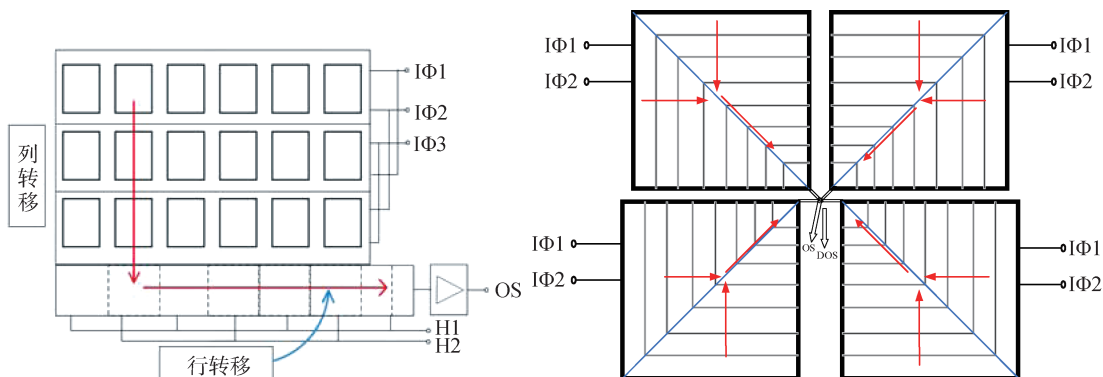


图4 CCD 和 SCD 的电荷转移方式示意图。左图为 CCD，右图为 SCD (CCD236)

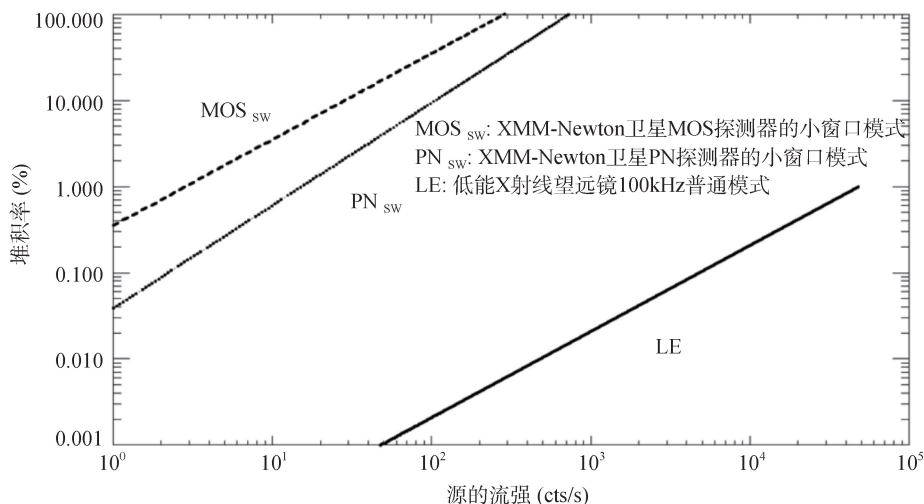


图5 堆积率随源计数率的变化，从上至下依次为 XMM-Newton 卫星的 MOS 探测器、PN 探测器和 HXMT LE 探测器

计数率变低，一般要求堆积率至少在 5% 以下，对于 PN，则要求源的流强要小于每秒 50 个光子。而对于 LE，即使每秒 40000 个光子，堆积率也小于 1%。

CCD236 是一种特殊的 CCD 器件。它通常采用连续读出方式，读出速度快，整片探测器面积为  $4\text{cm}^2$ ，读出时间约 1ms；它在片上增加了一个哑像元输出以减小共模噪声，探测能段低端可扩展至  $0.7\text{keV}$ ，有较好的能量分辨。为了便于实现大面积的探测器阵列，4 片 CCD236 封装到一个 AlN 陶瓷基片上，形成一个面积为  $16\text{cm}^2$  的探测器模块（图 6）。

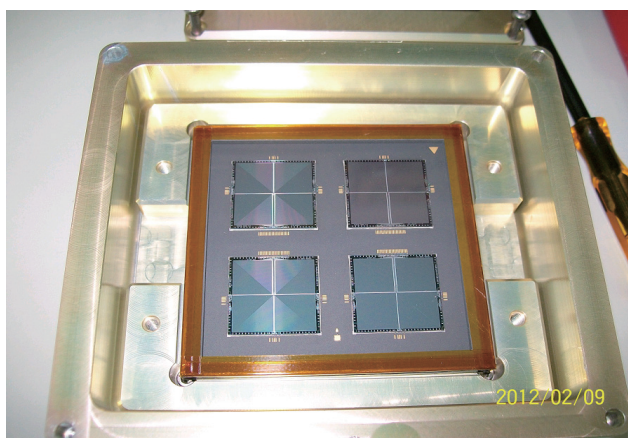


图 6 CCD236 模块照片

## 2.4 遮光膜与防尘膜

LE 探测器对可见光及紫外线都敏感，因此需要对其进行滤光设计。遮光膜需要很薄（一般为数百纳米），以透过 X 射线。LE 采用在准直器上方安装遮光膜的方式进行滤光。此外，为了防止准直器及遮光膜多余物掉落到 SCD 探测器表面，引起 SCD 电极之间的短路，在准直器下方再安装一层防尘膜，避免多余物直接掉落在 SCD 表面。

遮光膜的设计需考虑航天环境，满足力学、噪声、抗原子氧腐蚀等方面的要求。国际上这类遮光膜只有少数几个公司掌握其制作工艺，LE 任务组经过多年不懈努力，掌握了聚酰亚胺膜的原料体系与制备技术、摸索出聚酰亚胺的旋涂制膜技术、发展了在聚酰亚胺膜上电镀支撑镍网的技术。

LE 遮光膜是由双面镀铝聚酰亚胺膜和镍网组合而成的复合结构（图 7）。其中铝膜的作用是过滤可

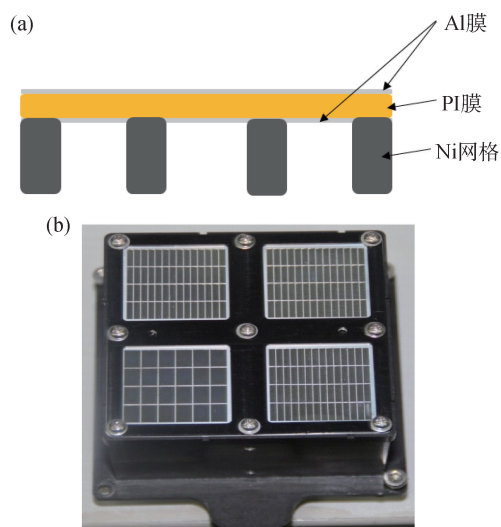


图 7 LE 遮光膜结构示意图 (a) 和安装于准直器上方的遮光膜 (b)

见光并使 X 射线透过遮光膜，铝膜分别镀在聚酰亚胺的正反面，其厚度各为  $100\text{nm}$ ；聚酰亚胺膜的作用是为铝膜提供支撑并加强遮光膜的力学性能，其厚度为  $400\text{nm}$ ，镍网的作用是为整个遮光膜提供支撑和安装接口，其厚度约  $100\mu\text{m}$ 。

LE 防尘膜采用镍网支撑的超薄聚酰亚胺膜，其厚度为  $300\text{nm}$ 。

## 3. 工作模式

LE 为了适应不同外部条件，更好地发挥探测器性能优势，设置了较为复杂的工作模式。

每次读出时，CCD 都会有噪声或者信号输出，噪声可用来确定信号光子的能量，不能随意全部丢弃，但数采系统也无法把噪声全部记录下来。为此，LE 设置了可调节的信号幅度阈值，大于阈值的信号全部记录，对于小于阈值的信号，采用定时抽样的方式记录，以获得噪声峰的位置（对于每个探测器，抽样周期为  $32\text{ms}$  一次）。

LE 读出模式有两类，即连续读出模式和长曝光模式。在连续读出模式下，SCD 处于连续转移并读出的状态，是最常用的模式。而在长曝光模式下，SCD 先会曝光一段时间，这段时间里 SCD 内电荷包不转移，曝光结束后，连续转移 150 个周期，读出并记录事例。长曝光模式可以用来测量探测器的时间响应，还可以检测探测器是否存在失效的“坏”像素。在长曝光期间内，暗

电流会造成噪声积累，一般在低温下（-50℃）应用。

LE 读出频率有 100kHz 和 50kHz 两种。对于连续读出模式和长曝光模式都可以选择其读出频率。在温度较低时，采用 50kHz 会有更高的能量分辨，但整片读出时间会增加一倍。

## 4. 性能和响应

LE 正样进行了性能和响应测试，主要包括能量 - 能道关系、能量响应和时间响应测试。

### 4.1 能量 - 能道关系

利用 X 光管轰击 Cu 靶，对 LE 正样，获得每个探测器的 Cu Ka 线（8.048keV）所对应的幅度随温度的变化。各片探测器的能量 - 能道关系的线性较好，

实测信号幅度随温度的变化很小，约为每摄氏度万分之六，这有利于在轨温度变化情况下的事例能量重建。

### 4.2 能量响应

对于 LE 每个正样探测器机箱，采用 X 光照射铜靶，利用能量 - 能道关系可把探测器的能谱合并，并确定探测器整体的能量分辨。实测各片探测器的能量响应较为一致，机箱 A 的 32 路探测器合并后，能量分辨达 158eV@8.0 keV（图 8），这大致相当于 140eV@5.9 keV，这说明探测器的整体能量分辨略好于 XMM-Newton 和 Chandra。

在整星热真空试验中，LE 所测 X 射线能谱如图 9，测量到真空罐内壁的多种元素的荧光，能量分辨随

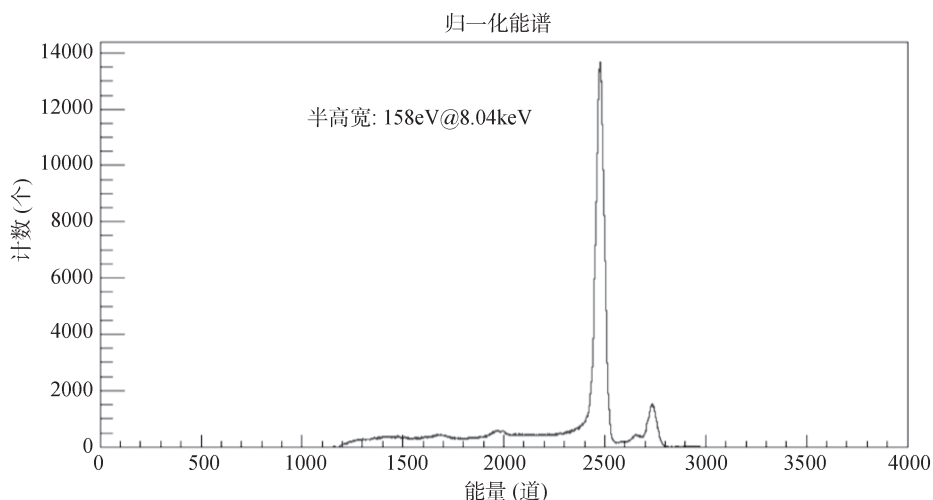


图 8 LE 正样探测器 A 机箱合并能谱图

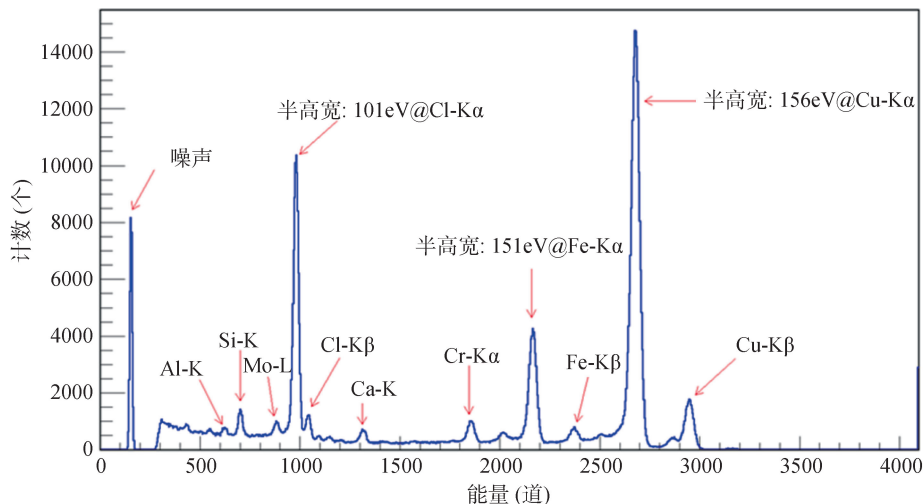


图 9 LE 正样热试验测试能谱

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜；  
她用知识的力量，助我们奋起攀登！

### 欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔

和科苑快讯等栏目。

2016 年《现代物理知识》每期定价 10 元，全年 6 期 60 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。

1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 ~ 2011 年单行本每期 8 元；合订本每本 50 元；2012 ~ 2013 年单行本每期 9 元，合订本每本 60 元；2014 ~ 2015 年单行本每期 10 元。

入射光子的能量降低而变好，LE 在 2.6 keV 处的能量分辨约为 100 eV。这一试验充分说明了 LE 对线谱的分辨能力。

#### 4.3 时间响应

SCD 的时间分辨可用电荷包转移的最长时间（即整片探测器读出时间）来描述。当 LE 读出频率一定时（如 100kHz），CCD236 的整片读出时间取决于其有效像素的个数。

通过长曝光模式可以获得电荷包在各个像素之间转移的时间特性，探测器在均匀 X 光照射下，实测整片读出时间约 1ms。

#### 5. 总结

LE 主要工作在 0.7 ~ 15keV 能段，有较好的时间分辨和能量分辨，抗堆积能力强，整片探测器读出时间约为 1ms，能量分辨约为 160eV@8keV。采用多种视场准直器，可实现定点观测、巡天观测和全天监测等功能。

#### 致谢

王子仁、韩大炜、王娟、陈田祥、胡渭、杨彦估、李炜、霍嘉和张艺等参加 LE 研制工作并为本文提供部分素材，卢方军、张双南等为本文写作提出很好的建议，作者在此表示感谢。