

# 惰性气体 $\beta$ - $\gamma$ 符合测量系统 探测器能量及分辨率刻度

贾怀茂, 王世联, 李奇, 王军, 赵允刚, 张新军, 樊元庆

(禁核试北京国家数据中心和北京放射性核素实验室, 北京 100085)

**摘要:**  $\beta$ - $\gamma$  符合法是全面禁止核试验条约(CTBT)放射性核素核查中惰性气体氙测量的一种重要方法, 探测器能量及分辨率刻度是其首要解决的关键技术。本工作详细介绍了  $\beta$ - $\gamma$  符合测量系统 NaI(Tl) 闪烁体和塑料闪烁体探测器能量及分辨率刻度的方法和结果, 采用  $\gamma$  放射性核素点源刻度 NaI(Tl)  $\gamma$  射线能量及分辨率, 利用  $^{137}\text{Cs}$  661.66 keV  $\gamma$  射线康普顿散射电子刻度塑料闪烁体  $\beta$  射线能量及分辨率, 并与  $^{131}\text{Xe}^m$  内转换电子刻度的  $\beta$  射线能量分辨率结果进行了比较。结果表明: 用  $^{137}\text{Cs}$  康普顿散射电子刻度塑料闪烁体  $\beta$  射线能量是一种简便可行的方法, 但用其刻度的  $\beta$  射线分辨率比实际的大。

**关键词:** 放射性气体氙;  $\beta$ - $\gamma$  符合; 能量刻度; 全面禁止核试验条约

中图分类号: O571.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)10-1233-05

## Energy and Resolution Calibration of Detectors for Noble Gas $\beta$ - $\gamma$ Coincidence System

JIA Huai-mao, WANG Shi-lian, LI Qi, WANG Jun,  
ZHAO Yun-gang, ZHANG Xin-jun, FAN Yuan-qing

(CTBT Beijing National Data Centre and Radionuclide Laboratory, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The  $\beta$ - $\gamma$  coincidence technique is a kind of important method to detect radioactive xenon isotopes for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT). The energy and resolution calibration of detectors is the first key technique. This paper describes in detail the energy and resolution calibration methods of NaI(Tl) and plastic scintillator detectors for the noble gas  $\beta$ - $\gamma$  coincidence system SAUNA II-Lab. NaI(Tl) detector's energy and resolution for  $\gamma$ -ray were calibrated with  $\gamma$  radioactive point sources. Plastic scintillator detector's energy and resolution for  $\beta$ -ray were calibrated by Compton scattering electrons of  $^{137}\text{Cs}$  661.66 keV  $\gamma$ -ray. And the results of  $\beta$ -ray energy resolution calibrated by Compton scattering electrons of  $^{137}\text{Cs}$  were compared with the results of conversion electron of  $^{131}\text{Xe}^m$ . In conclusion, it is an easy and feasible method of calibrating plastic scintillator detector's energy by Compton scattering electrons of  $^{137}\text{Cs}$ , but detector's resolution calibrated by Compton scattering electrons is higher

than factual result.

**Key words:** radioactive xenon;  $\beta$ - $\gamma$  coincidence; energy calibration; Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty

全面禁止核试验条约(CTBT)国际监测系统(IMS)放射性核素监测网络由全球 80 个放射性核素台站和 16 个放射性核素实验室组成,其中,40 个台站同时具备大气颗粒物和惰性气体氙的监测能力。核爆炸过程中产生的惰性气体裂变产物(主要包括氙、氪和氙)比较容易泄漏到大气中,由于放射性氙同位素的半衰期适中,且裂变产额较大,因此,CTBT 将 $^{131}\text{Xe}^m$ 、 $^{133}\text{Xe}^m$ 、 $^{133}\text{Xe}$  和 $^{135}\text{Xe}$  4 种氙同位素作为放射性核素监测的重点之一<sup>[1]</sup>,4 种氙核素作为核爆炸识别特征核素有不同用途,它们中任何一个或全部都有可能出现在气体样品中,所以,准确测量它们的活度浓度和比值非常重要。

放射性氙同位素测量通常采用  $\beta$ - $\gamma$  符合法或 HPGe  $\gamma$  能谱法, $\beta$ - $\gamma$  符合法由于采用了符合技术,有效降低了环境放射性本底影响,探测灵敏度较高。 $^{131}\text{Xe}^m$ 、 $^{133}\text{Xe}^m$ 、 $^{133}\text{Xe}$  和 $^{135}\text{Xe}$  4 种放射性氙同位素  $\beta$ - $\gamma$  符合关系参见文献<sup>[2]</sup>。其中, $^{131}\text{Xe}^m$ 、 $^{133}\text{Xe}^m$  的 30.4 keV X 射线与相应内转换电子产生符合,而 $^{133}\text{Xe}$  的 31.6 keV X 射线也会与  $\beta$  射线产生符合,因此,在  $\beta$ - $\gamma$  符合能谱中的 30 keV X 射线符合能区内,会同时存在 $^{131}\text{Xe}^m$ 、 $^{133}\text{Xe}^m$  和 $^{133}\text{Xe}$  的贡献。所以, $\beta$ - $\gamma$  符合法测量放射性氙同位素时,若想准确分析出符合能谱中 $^{131}\text{Xe}^m$ 、 $^{133}\text{Xe}^m$ 、 $^{133}\text{Xe}$  和 $^{135}\text{Xe}$  的贡献,探测器能量及分辨率刻度是需首要解决的技术。

## 1 $\beta$ - $\gamma$ 符合系统探测器

禁核试北京放射性核素实验室引进了 1 套瑞典 GAMMADATA 公司生产的  $\beta$ - $\gamma$  符合系统 SAUNA II-Lab,用于测量放射性气体氙同位素活度浓度,图 1 为探测器结构示意图。

探测器由 1 个 NaI(Tl)闪烁体和 1 个塑料闪烁体组成,NaI(Tl)探测器为  $\phi 101.6\text{ mm} \times 101.6\text{ mm}$  的圆柱体,晶体中间沿轴向的垂直方向开一直径 35 mm 的通孔,将塑料闪烁体放入其中;塑料闪烁体为 Bicron 公司生产的

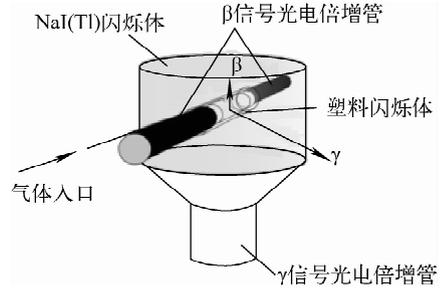


图 1  $\beta$ - $\gamma$  符合探测器示意图

Fig. 1 Scheme of  $\beta$ - $\gamma$  coincidence detector

BC404 型圆柱形闪烁体,直径 15 mm,长 54 mm,闪烁体中间为圆柱形空腔,壁厚 1 mm。 $\beta$ - $\gamma$  符合探测器被 10 mm 厚铜板、5 mm 厚锡板和 100 mm 厚低本底铅砂依次由内到外整体屏蔽,测量时将气体样品转移到塑料闪烁体空腔内,NaI(Tl)测量  $\gamma$  和 X 射线(接近  $4\pi$ ),塑料闪烁体测量  $\beta$  射线及内转换电子,可同时得到  $\gamma$  门控  $\beta$  符合能谱、 $\beta$  门控  $\gamma$  符合能谱和二维  $\beta$ - $\gamma$  符合能谱。

## 2 NaI(Tl) 闪烁体能量及分辨率刻度

使用  $\gamma$  放射性核素点源刻度 NaI(Tl)闪烁体能量和分辨率。 $^{131}\text{Xe}^m$ 、 $^{133}\text{Xe}^m$ 、 $^{133}\text{Xe}$  和 $^{135}\text{Xe}$  4 种放射性氙同位素及氦子体 $^{214}\text{Pb}$  发射的  $\gamma$  射线能量范围为 30~352 keV,因此,选取刻度的  $\gamma$  点源为 $^{241}\text{Am}$  (59.54 keV)、 $^{133}\text{Ba}$  (31.63、81.00、356.01 keV)、 $^{152}\text{Eu}$  (41.00、121.78、244.70、344.28 keV)和 $^{137}\text{Cs}$  (661.66 keV),射线能量取自文献<sup>[3]</sup>,X 射线能量为加权平均值。刻度时分别将  $\gamma$  点源放置在 NaI(Tl)探测器顶部外表面中心处,表 1 列出实验测量得到的 NaI(Tl)  $\gamma$  射线能量及分辨率结果。

对  $\gamma$  射线能量及对应的道数用二次多项式最小二乘法进行拟合,图 2 示出 NaI(Tl)  $\gamma$  射线能量  $E_\gamma$  刻度拟合曲线,得到的拟合方程为:

$$E_\gamma = 0.14 + 2.84\text{Ch} + 4.96 \times 10^{-4}\text{Ch}^2$$

$$R^2 = 1.00 \quad (1)$$

式中:Ch 为道数。

表 1 NaI(Tl)  $\gamma$  射线能量及分辨率刻度结果  
Table 1 Energy and resolution calibration results of NaI(Tl)  $\gamma$ -ray

核素	$\gamma$ 射线能量/keV	峰值(道数)	半高宽(道数)	分辨率
$^{241}\text{Am}$	59.54	21	3.68	0.18
$^{133}\text{Ba}$	31.63	10	3.17	0.32
	81.00	31	4.42	0.14
$^{152}\text{Eu}$	41.00	13	3.75	0.29
	121.78	43	4.52	0.11
	244.70	84	7.92	0.094
	344.28	118	10.44	0.088
$^{137}\text{Cs}$	661.66	224	16.51	0.074

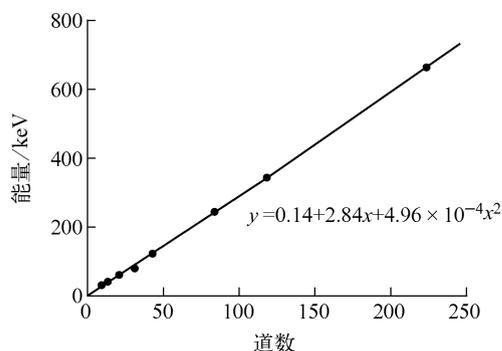


图 2 NaI(Tl)  $\gamma$  射线能量刻度拟合曲线

Fig. 2  $\gamma$ -ray energy calibration fitting curve of NaI(Tl)

根据统计理论<sup>[4]</sup>, 闪烁体能量分辨率  $\eta \propto E_\gamma^{-1/2}$ , 即:

$$\eta = \text{FWHM}/E_\gamma = C/E_\gamma^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $C$  为常数。

对分辨率刻度数据点  $(E_\gamma^{-1/2}, \eta)$  进行线性最小二乘法拟合。图 3 示出 NaI(Tl)  $\gamma$  射线能量分辨率刻度拟合曲线, 得到的拟合方程为:

$$\eta = -0.024 + 1.82E_\gamma^{-1/2} \quad R = 0.95 \quad (3)$$

### 3 塑料闪烁体能量及分辨率刻度

#### 3.1 塑料闪烁体能量刻度

放射性核素发射的  $\beta$  射线除内转换电子是单能外, 其余发射的  $\beta$  粒子能量均是连续的, 因此, 塑料闪烁体的能量刻度较为困难。本工作利用  $^{137}\text{Cs}$  661.66 keV  $\gamma$  射线的康普顿散射电子对其进行能量刻度。由  $\gamma$  光子与物质的相互作用原理可知, 如果康普顿散射光子的能量为  $E_\gamma$ , 则康普顿散射电子能量  $E_\beta$  为:

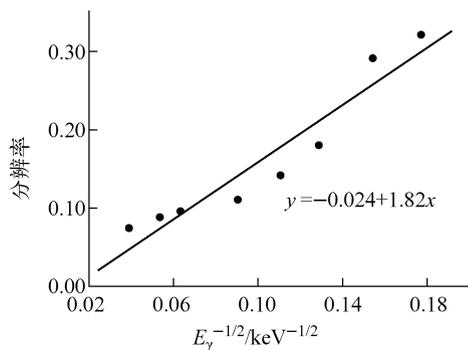


图 3 NaI(Tl)  $\gamma$  射线能量分辨率刻度拟合曲线

Fig. 3  $\gamma$ -ray energy resolution calibration fitting curve of NaI(Tl)

$$E_\beta = 661.66 \text{ keV} - E_\gamma \quad (4)$$

刻度能量时将  $^{137}\text{Cs}$  点源放置在靠近塑料闪烁体外壁附近, 得到  $\beta$ - $\gamma$  符合能谱(图 4),  $^{137}\text{Cs}$  661.66 keV  $\gamma$  射线康普顿散射光子与散射电子在  $\beta$ - $\gamma$  符合能谱上沿对角线方向形成 1 条符合曲线, 在该曲线上  $E_\beta + E_\gamma = 661.66 \text{ keV}$ 。将  $\gamma$  射线每隔 10 道取点, 读出该曲线上对应的  $\gamma$  道数和  $\beta$  道数, 利用式(1)计算出  $\gamma$  光子能量, 根据式(4)即可计算出对应散射电子的能量。

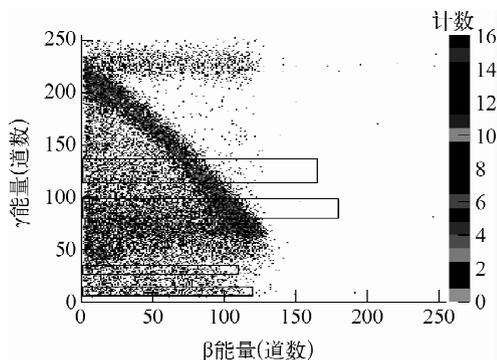


图 4  $^{137}\text{Cs}$  二维  $\beta$ - $\gamma$  符合能谱

Fig. 4 Two dimensions  $\beta$ - $\gamma$  coincidence energy spectrum of  $^{137}\text{Cs}$

从图 4 可看出,  $^{137}\text{Cs}$  661.66 keV  $\gamma$  射线康普顿散射光子与散射电子的符合区域是 1 条曲线, 而不是理论上的直线。用 MCNP 程序模拟计算了塑料闪烁体的  $\beta$  射线探测效率, 结果示于图 5。塑料闪烁体探测效率在  $\beta$  射线低能区基本上接近 100%, 当  $\beta$  射线能量大于 400 keV 后, 塑料闪烁体探测效率急剧降低, 这是因为塑

料闪烁体腔壁厚仅为 1 mm, 能量大于 400 keV 的  $\beta$  射线将会穿透塑料闪烁体, 能量不能完全沉积在塑料闪烁体内, 康普顿散射光子和散射电子二维  $\beta$ - $\gamma$  符合区域形成 1 条曲线。因此, 塑料闪烁体能量刻度时只取能量小于 400 keV 的散射电子, 用二次多项式最小二乘法进行拟合。图 6 示出塑料闪烁体  $\beta$  射线能量刻度拟合曲线, 拟合方程为:

$$E_{\beta} = 10.44 + 2.46Ch + 0.0092Ch^2$$

$$R^2 = 1.00 \quad (5)$$

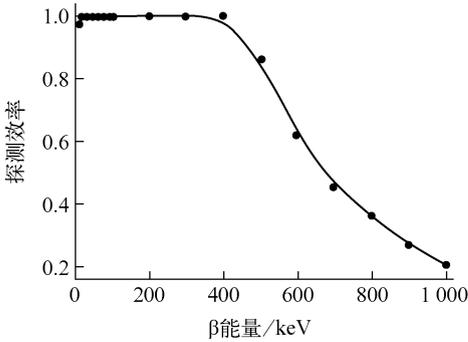


图 5 模拟计算的塑料闪烁体  $\beta$  射线探测效率

Fig. 5  $\beta$ -ray detecting efficiency of plastic scintillator

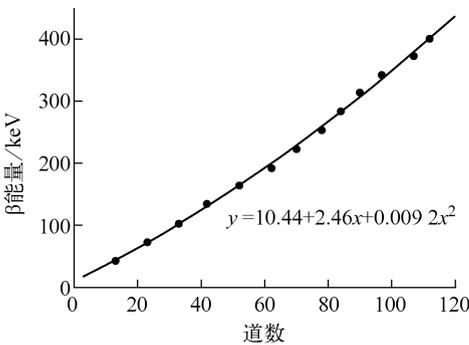


图 6 塑料闪烁体  $\beta$  射线能量刻度拟合曲线

Fig. 6  $\beta$ -ray energy calibration fitting curve of plastic scintillator

### 3.2 塑料闪烁体能量分辨率刻度

同样, 利用  $^{137}\text{Cs}$  661.66 keV  $\gamma$  射线散射光子和散射电子符合能谱刻度塑料闪烁体  $\beta$  射线能量分辨率。刻度时, 散射光子每隔 10 道选取 1 个  $\gamma$  窗,  $\gamma$  窗宽度为 4 道, 从而得到一系列能量的  $\gamma$  门控  $\beta$  符合能谱, 图 7 示出其中 1 个能量的  $\gamma$  门控  $\beta$  符合能谱。对符合能谱进行高斯函数拟合, 得到拟合函数峰值和方差  $\sigma$ 。图 7

中粗线为高斯函数拟合曲线。由文献[4]可知:

$$\text{FWHM} = 2.36\sigma \quad (6)$$

根据式(6)即可得到能量分辨率  $\eta$ 。

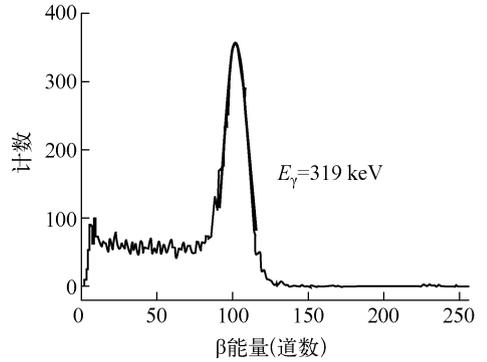


图 7  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  门控  $\beta$  符合能谱

Fig. 7  $\gamma$ -gated  $\beta$  coincidence energy spectra of  $^{137}\text{Cs}$

对能量分辨率刻度数据点  $(E_{\beta}^{-1/2}, \eta)$  进行二次多项式拟合, 图 8 示出分辨率刻度拟合曲线, 得到的拟合方程为:

$$\eta = 0.56 - 17.25E_{\beta}^{-1/2} + 191.22E_{\beta}^{-1}$$

$$R^2 = 1.00 \quad (7)$$

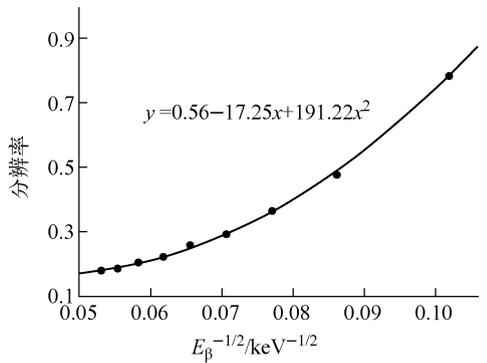


图 8 塑料闪烁体  $\beta$  射线能量分辨率刻度拟合曲线

Fig. 8  $\beta$ -ray energy resolution calibration fitting curve of plastic scintillator

$^{137}\text{Cs}$  661.66 keV  $\gamma$  射线康普顿散射电子的能量也是连续的, 即使  $\gamma$  门控  $\beta$  符合能谱选取的  $\gamma$  窗宽度仅为 4 道, 得到的  $\beta$  能谱依然是多个能量相近的散射电子叠加的结果, 其峰形必然展宽, 使计算出的  $\beta$  射线能量分辨率比探测器实际的分辨率大。为此, 利用  $^{131}\text{Xe}^m$  内转换电子刻度了塑料闪烁体探测器  $\beta$  能量分辨率, 并与  $^{137}\text{Cs}$  散射电子刻度的结果进行比较。

图 9 示出  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  窗取能量为 533 keV 散射光子(对应 129 keV 散射电子)的  $\gamma$  门控  $\beta$  符合能谱。 $^{131}\text{Xe}^m$  发射 129 keV 内转换电子(发射几率 61%),伴随 30 keV X 射线(发射几率 54%)。图 10 示出实验测量的  $^{131}\text{Xe}^m$  X 门控  $\beta$  符合能谱,采用高斯函数拟合能谱峰。表 2 列出用这两种方法得到的塑料闪烁体 129 keV  $\beta$  射线能量分辨率,  $^{137}\text{Cs}$  129 keV 散射电子计算出的能量分辨率比  $^{131}\text{Xe}^m$  内转换电子得到的分辨率大将近 1 倍。

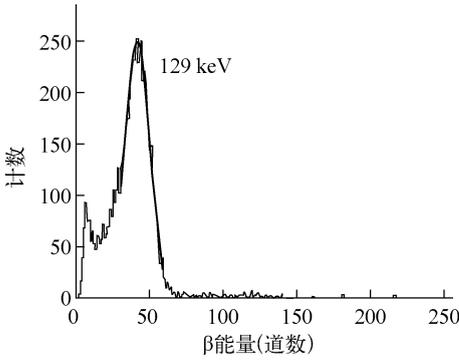


图 9  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ (534 keV)门控  $\beta$  符合能谱

Fig. 9  $\gamma$ (534 keV)-gated  $\beta$  coincidence energy spectrum of  $^{137}\text{Cs}$

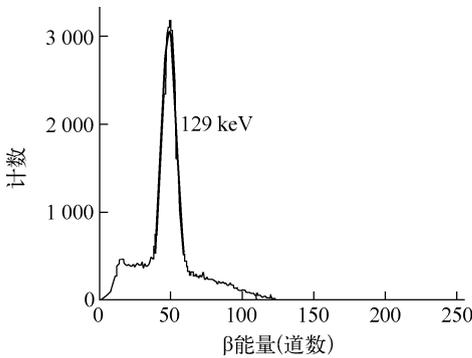


图 10  $^{131}\text{Xe}^m$  X 门控  $\beta$  符合能谱

Fig. 10 X-gated  $\beta$  coincidence energy spectrum of  $^{131}\text{Xe}^m$

表 2 塑料闪烁体 129 keV 散射电子和  $^{131}\text{Xe}^m$  内转换电子能量分辨率比较

Table 2 Energy resolution of 129 keV scattering electron and conversion electron of  $^{131}\text{Xe}^m$

$\beta$ 粒子类型	能量/keV	$\sigma$ (道数)	FWHM(道数)	分辨率
散射电子	129	8.58	20.25	0.49
内转换电子	129	5.26	12.41	0.25

将  $^{131}\text{Xe}^m$  129 keV 内转换电子的能量分辨率结果代入式(2),则计算出塑料闪烁体  $\beta$  分辨率刻度方程为:

$$\eta = 2.88/E_{\beta}^{1/2} \quad (8)$$

### 4 结论

$\beta$ - $\gamma$  符合法作为 CTBT 放射性核素核查中惰性气体氙测量的 1 种重要方法,探测器能量及分辨率刻度是首要解决的技术。NaI(Tl)闪烁体探测器  $\gamma$  射线能量及分辨率刻度可使用  $\gamma$  放射性核素点源,相对容易实现;而放射性核素  $\beta$  衰变发射的  $\beta$  粒子能量均是连续的,获得合适的单能  $\beta$  射线比较困难,所以塑料闪烁体  $\beta$  射线能量及分辨率刻度是目前研究的难点。

利用  $^{137}\text{Cs}$  661.66 keV  $\gamma$  射线康普顿散射电子刻度探测器  $\beta$  能量及分辨率是一种比较方便的方法,本工作研究了用此方法刻度塑料闪烁体  $\beta$  能量及分辨率的可行性。结果表明,用  $^{137}\text{Cs}$  康普顿散射电子刻度塑料闪烁体  $\beta$  能量是一种简便可行的方法,但由于康普顿散射电子的能量也是连续的,所以,用其刻度的能量分辨率比实际的分辨率大。虽然同质异能态放射性核素发射的内转换电子是单能的,但是能够用来刻度  $\beta$  探测器的核素很少,实验中还利用  $^{131}\text{Xe}^m$  129 keV 内转换电子刻度了塑料闪烁体的  $\beta$  射线能量分辨率,取得了比较满意的结果。

### 参考文献:

[1] SAEY P, de GEER L E. Noble gas data processing in support of CTBT verification[R]. Vienna: CTBTO Preparatory Commission, 2003.

[2] RINGBOM A, LARSON T, AXELSSON A, et al. SAUNA—A system for automatic sampling, processing and analysis of radioactive xenon[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, 508: 542-553.

[3] FIRESTONE R B. Table of isotopes[M/CD]. Eighth Edition. California: Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 1998.

[4] 吴治华,赵国庆,陆福全,等. 原子核物理实验方法[M]. 北京:原子能出版社,1996:131-132.