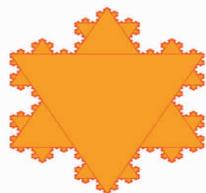


文章编号:1005-4642(2021)08-0022-05

拓展
与创新



核衰变统计规律实验定标器的研制与测试

梁飞翔^{a,b}, 曾健安^a, 陈梓豪^a, 杨秦月^a, 唐 强^{a,b}

(中山大学 a. 物理学院; b. 物理学国家级实验教学示范中心, 广东 广州 510275)

摘 要:结合基于光电倍增管的辐射探测器,采用数字电位器替代传统的调节方式,研制了用于大学核物理实验的定标器,降低了学生实验中仪器的故障率.以 Sr90 为放射源,使用该定标器进行核衰变统计规律实验,通过控制单次探测辐射粒子的数目,分别验证了放射性原子核衰变过程中的泊松分布和高斯分布统计规律.该实验可以加深学生对原子核物理知识的理解,增强对核衰变统计规律的认识,并且掌握最基本的辐射探测方法.

关键词:核衰变;定标器;光电倍增管;统计规律;泊松分布;高斯分布

中图分类号: O571.3

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.08.004

放射性材料与技术已经广泛地应用于核工业、医疗、探测等方面^[1-3].学习核物质放射性不仅可以增强学生对核衰变统计规律的认识,而且对掌握辐射探测器的工作原理有重要的指导作用.在高校核物理实验中,通过调节高压、阈值和放大倍数等参量测量辐射探测系统的性能^[4],频繁地调节操作会导致仪器性能变化甚至损坏仪器.本文研制了全数字化的定标器,采用数字电位器,配合数字显示,使得仪器操作非常简便,增强了定标器的耐用性和稳定性,更加适合本科生的实验操作.数字信号相比于模拟信号而言,具有信号稳定、抗干扰能力强、无噪声积累等优点.使用新型定标器 β 探头接收 Sr90 放射源的辐射信号,验证了放射性统计分布的规律.

1 系统设计

1.1 定标器硬件设计

定标器的功能硬件包括脉冲信号放大器、单道、定时计数器、前放供电电路和高压模块,与光电倍增管(PMT)辐射探测器组成完整的辐射计数系统,用于测量放射性强度.定标器电路主要包含单片机、电源、高压模块、放大器、单道、D/A 转换器、显示端(2 个串口连接的电脑和显示屏)和用户输入端,如图 1 所示.

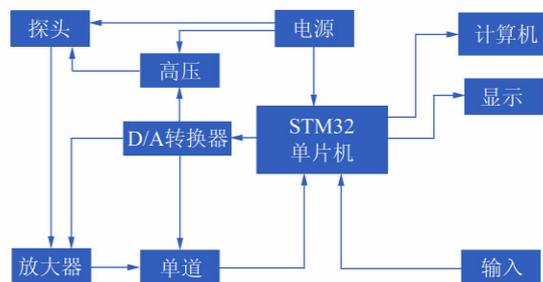


图 1 定标器的硬件电路图

系统采用高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用设计的 ARM 处理器 STM32F103 作为核心,利用芯片内的定时器和计数器实现核脉冲的计数和统计.

单次测量过程如下: Sr90 放射源发生核衰变产生的 β 粒子被 PMT 俘获并且产生电流脉冲;通过放大器将该脉冲放大并且利用单道进行筛选,将该信号反馈至 STM32; STM32 通过 D/A 模块反馈并且控制 PMT 的高压值、放大器的放大倍数以及单道的阈值和道宽.

为实现精简和友好的输入控制界面,在输入部分设计了具有参量切换和数值调节的电位器,实现所有参量的输入,如图 2 中控制面板左下角

收稿日期: 2021-05-31; 修改日期: 2021-06-10

作者简介: 梁飞翔(1991—),男,河北河间人,中山大学物理学院实验师,博士,研究方向为凝聚态物理、磁性相变材料. E-mail: liangfx6@mail.sysu.edu.cn



较大的绿色按钮。按下参量切换按钮,可以在 8 个参量(计数时间、计数次数、停顿时间、电压极向、挡位、高压、阈值、道宽)之间进行切换。选定参量后,旋转设置按钮,调节数值大小。待所有试验参量设置完毕后,按下启动按钮,开始探测辐射粒子并计数。



图 2 核衰变统计规律定标器实物图

为了实现全数字化控制和操作,系统采用 AD5324 芯片作为 D/A 转换器,在 STM32 的控制下,输出 4 路控制信号:高压、放大倍数、单道的上阈值和下阈值。通过数字电位器设置相关参量值,传递给 STM32,从而控制传输给 D/A 转换器的变量值,实现关键参量的调整。

储存和通讯:STM32 内部包含 Flash,可以保存 9 999 个 32 位测试数据,同时具有掉电保护信息不丢失的功能,即使实验过程中断电或者误操作导致某次统计数据失败,也不会影响之前的测量数据,从而降低了实验过程中由于仪器故障导致的实验失败概率。通过串口连接到显示面板显示结果,由实验操作者手动记录实验数据。学生可以直接对记录的数据进行分析,统计放射性物质的衰变规律。另外,还可以通过串口与计算机相连,快速读取数据并进行分析。

1.2 软件设计

采用 MDK 设计了 STM32 的单片机程序,包括串口程序模块、定时器、计数器、D/A 转换器及用户输入模块等。嵌入式软件程序示意图如图 3 所示。

测量过程如下:

- 1) 接通电源后,根据用户操作执行命令。
- 2) 用户先进行参量设置,参量设置完毕后,按下启动按钮(图 2 中右侧 5 个按钮中的红色按

钮),初始化寄存器。

3) 开始测量后,ARM 处理器根据参量设定中的计数时间进行统计计数,显示面板上实时显示计数结果并记录。

4) 软件根据记录参量设定中的计数次数判断是否完成测量,如果未完成,则开始下次计数;如果计数完成,本次实验结束,回到用户设置参量步骤。

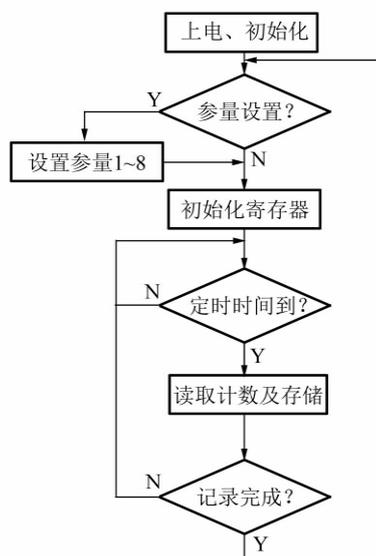


图 3 嵌入式软件程序示意图

在串口中断进行计算机读取数据的操作。当计算机发出读取指令时,STM32 根据指令参量将保存在存储器的数据上传至计算机。

2 实验设计

根据光电倍增管的工作原理,倍增极之间的电压差越大,最后倍增得到的电子越多,得到的脉冲电信号越强^[5],可见闪烁体探头的工作状态与加在倍增管上的高压存在一定的增益关系。因此在使用光电倍增管闪烁体探头前,需要先测量其电压工作曲线。

测定电压工作曲线的一般方法是:缓慢调节高压,找出刚刚有计数值时的电压,并从该电压开始以特定的电压步长依次测量计数值,做计数值随电压的变化曲线。选取计数值较为平稳区域的中心,以此作为光电倍增管的工作电压。

除了工作电压外,定标器的工作状态还与计

数时间、阈值、道宽、放大倍数等参量有关,采用类似的方法得到其他合适的参量值。

为检验测量数据的可靠性,确保测量仪器正常运行,并且测量条件保持稳定,将实验数据与理论分析相比较。实验中通过控制单次测量到发生核衰变的放射性原子的平均值 \bar{m} 的大小,来分别检验放射性统计分布(泊松分布和高斯分布)的规律。当 $\bar{m} < 10$ 时,验证数据是否符合泊松分布;当 $\bar{m} > 100$ 时,验证数据是否符合高斯分布。为减小误差,在同一条件下测量大量数据,采用多种分析方法来检验数据是否符合统计分布规律^[6-7]。

3 实验结果与分析

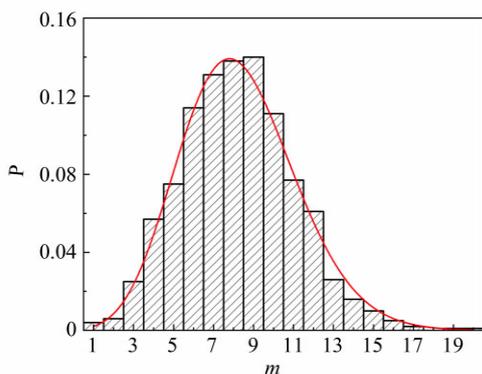
3.1 测定合适参量

在开始测试放射源 Sr90 的放射性统计规律之前,需要把定标器的参量调节到合适的工作区间,以保证测量数据的真实性和有效性。需要调节的参量主要有 PMT 工作电压、阈值、道宽、放大倍数等。

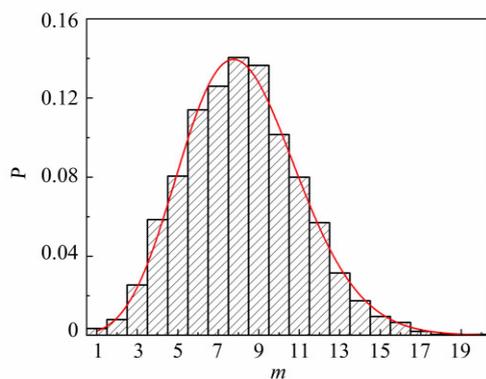
3.2 单次低计数时核衰变规律符合的泊松分布

3.2.1 数据测量与处理

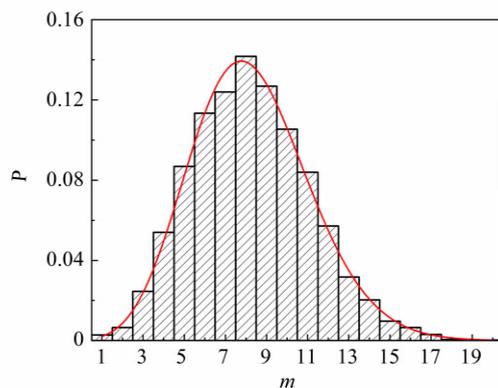
调节各参量,使定标器单次计数值的平均值在 7~8 之间,数据分布在 0~20 区间。具体参量设置如下:计数时间为 1 s, PMT 高压为 650 V, 选择负极向电压,放大倍数为 700, 阈值和道宽分别为 100 mV 和 500 mV。分别测量 1 000, 2 000, 3 500 个数据, 得出计数值与频率的关系。利用 Origin 软件, 分别对 3 组数据进行泊松拟合, 测量数据和拟合结果如图 4 所示, 拟合相关系数分别为 $R_1^2 = 0.991$, $R_2^2 = 0.994$, $R_3^2 = 0.996$ 。由图 4 可知, 测量数据点越多, 核衰变统计越符合泊松分布。



(a) $N=1\ 000$



(b) $N=2\ 000$



(c) $N=3\ 500$

图 4 频率与计数值的关系曲线(泊松拟合)

3.2.2 误差分析

以计数 $N=3\ 500$ 的测试数据为例, 发生核衰变的放射性原子的平均值 \bar{m} 和标准偏差 s_x 为: $\bar{m}=8.25$, $s_x=2.86$ 。再以标准高斯分布模型计算出标准偏差为 $s=2.87$ 。2 个标准偏差的相对偏差为 0.35%。

s 只反映统计涨落的影响, 而 s_x 不仅反映统计涨落的影响, 还包括其他偶然因素造成的数据离散分布。两者一致, 说明测量过程中, 除粒子的统计涨落影响外, 其他因素不造成影响或者影响可被忽略。

从统计标准偏差和样品相对偏差的计算值, 可以定性判断实验装置是否存在除统计偏差外的偶然因素。 χ^2 检验法则^[8]从数理统计意义上给出了比较精确的判别方法。

将对放射源 Sr90 重复测量数据 1~20 分为 $j=20$ 组, 用序号表示, $i=1, 2, 3, \dots, j$, 则

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^j \chi_i^2 = \sum_{i=1}^j \frac{(f_i - f_i')^2}{f_i'} = 13.19,$$

$$f_i' = P(m_i)N = N \cdot \frac{j^{m_i}}{m_i!} e^{-j}$$

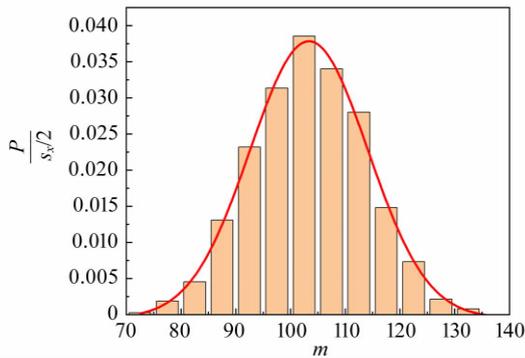
其中, f_i 为各组实际观测次数, f_i' 为各组理论分布次数。

当 $j=20$ 时, 对于具有高斯分布的自由度为 $\nu=j-2=18$. 设定小概率 $\alpha=0.05$, 由 χ^2 分布表查出 $\chi_{\alpha}^2=28.87$, $\chi_{1-\alpha}^2=9.39$, 则 $\chi_{1-\alpha}^2 < \chi^2 < \chi_{\alpha}^2$. 因此可认为, 在 χ^2 检验方法下, 测量的 3 500 个数据满足泊松分布, 说明测量结果在误差允许范围内, 符合核衰变统计规律, 验证仪器的准确性。

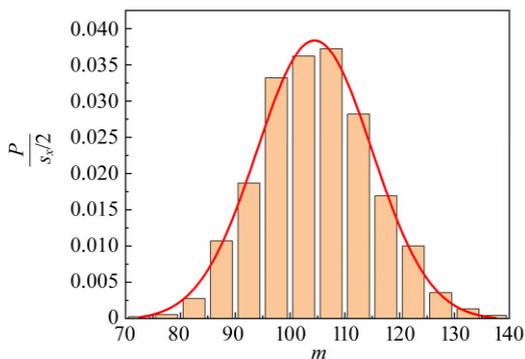
3.3 单次高计数时核衰变规律符合的高斯分布

3.3.1 数据测量与处理

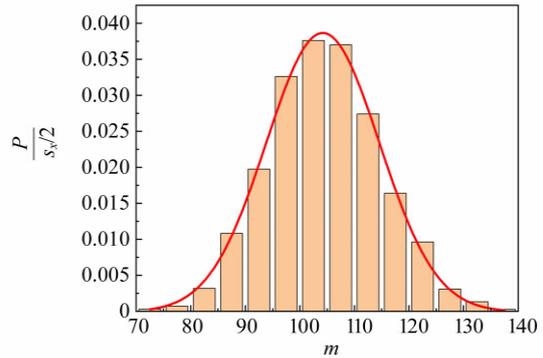
调节 3.1 中所提及的参量, 使单次计数值输出的平均值略大于 100. 具体参量设置如下: 计数时间为 10 s, PMT 高压为 650 V, 选择负极向电压, 放大倍数为 700, 阈值和道宽分别为 100 mV 和 2 000 mV. 分别测量 1 500, 3 500, 5 500 个数据, 得出计数值与频率的关系. 利用 Origin 软件, 将 3 组数据做高斯拟合, 拟合结果如图 5 所示, 拟合相关系数分别为 $R_1^2=0.966$, $R_2^2=0.978$, $R_3^2=0.988$. 由图 5 可知, 测量数据点越多, 核衰变统计越符合高斯分布。



(a) $N=1\ 500$



(b) $N=3\ 500$



(c) $N=5\ 500$

图 5 频率与计数值的关系曲线(高斯分布)

3.3.2 误差分析

以计数 $N=5\ 500$ 的测试数据为例, 发生核衰变的放射性原子的平均值 \bar{m} 和标准偏差 s_x 分别为 $\bar{m}=105.05$, $s_x=10.23$. 再以标准高斯分布计算标准偏差 $s=10.25$. 2 个标准偏差的相对偏差为 0.20%. 这组数据用 2 种方法计算得到的标准偏差很接近, 说明测量中除统计误差外不存在其他误差。

若计数值服从高斯分布, 则以 $s_x/2$ 为组距的各相应理论组的频率 P 为

$$P(m_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{m}}} \exp \left[-\frac{(\bar{m}-m_i)^2}{2\bar{m}} \right]$$

以 $\frac{m_i-\bar{m}}{s_x}$ 为横坐标, 将平均值 \bar{m} 置于中央, $s_x/2$ 为组距, 以组频率为纵坐标, 绘制高斯分布柱状图, 并且将相应理论计算的频率绘制在同一坐标中, 如图 6 所示. 从图 6 可以定性判断, 测量数据符合高斯分布, 不存在其他不可忽略的偶然

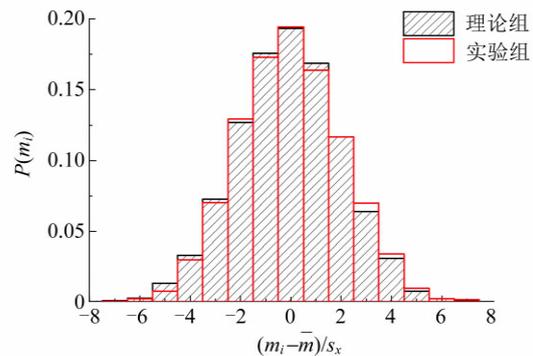


图 6 理论数据与实验数据对比 ($N=5\ 500$)

误差.

4 结束语

根据电子电路技术相关知识,利用 PMT 探测辐射粒子原理,研制了用于近代物理实验中核衰变统计规律的定标器. 以高性能、低成本的 STM32F103 单片机作为数字电路核心控制部件,可以增强信号传输过程的稳定性;采用数字电位器作为输入,增强了本科实验教学仪器的耐用性. 粒子物理与高能物理作为当前基础科学研究的前沿课题,辐射探测技术也将与诸多学科相互交叉,展现出更加丰富的研究内容.

参考文献:

[1] 高柏,林莹,李元锋. 核工业低浓度含铀废水处理技

术进展[J]. 山东化工,2009,38(3):35-38.

- [2] 王哲,林璠琦,孙贤,等. 核技术在新冠疫情防控中的应用评述[J]. 核技术,2020,43(12):120001-1-8.
- [3] 李湘庆,叶沿林. 核物理与核探测、核分析技术的应用[J]. 物理,2012,41(5):301-308.
- [4] 韩冬,王忠,王金爱,等. 辐射探测实验室实验平台的建设[J]. 实验技术与管理,2009,26(5):79-87.
- [5] 郭乐慧,陈萍,李立立,等. 光电倍增管关键技术研究进展[J]. 真空电子技术,2020(4):1-27.
- [6] 李潮锐,文锦辉,熊正焯,等. 物理学实验教程·近代物理实验[M]. 广州:中山大学出版社,2004:174-177.
- [7] 蒋小勤,魏东旭. 核衰变统计规律的研究[J]. 科技信息,2008(28):99,101.
- [8] 盛骤,谢式千,潘承毅,等. 概率论与数理统计[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2008.

Development and test of the calibrator for nuclear decay statistics experiment

LIANG Fei-xiang^{a,b}, ZENG Jian-an^a, CHEN Zi-hao^a, YANG Qin-yue^a, TANG Qiang^{a,b}
(a. School of Physics; b. National Level Experiment Teaching Center for Physics,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The calibrator applied in college nuclear experiments was developed from the radiation detector of the the photomultiplier tube and with the digital potentiometer instead of traditional modulation modes. And the failure rate was greatly reduced. The calibrator was applied in the nuclear decay statistical experiment in which Sr90 was used as a radioactive source. The Poisson and Gaussian distributions were verified in the decay process of radioactive nuclei by controlling the number of single-detected radiating particles. This experiment could inspire the students to deeply understand nuclear physics, to enhance their knowledge of the statistical laws of nuclear decay, and to further master the most basic radiation detection methods.

Key words: nuclear decay; calibrator; photomultiplier tube; statistical law; Poisson distribution; Gaussian distribution

[责任编辑:任德香]