

测定 ^{14}C 年代的液体闪烁计数系统

余家栋

(中国科学院海洋研究所)

提要 本文提出了低本底高品质因数液体闪烁计数系统的一些技术关键。根据这些关键,本实验室达到了使测年上限好于 30000 年的水平。与著名的 Beckman LS 9800 液闪相比较,证明了本系统是测量 ^{14}C 地质样品的一种高性能且价格便宜的仪器。

一、引言

自从 ^{14}C 年代法的创始人 W.F.Libby 在美国加州大学贝克莱实验室提出他的理论以来,随着核探测技术和样品制备水平的不断提高,数据处理技术的飞速发展,尤其是经过考古学的验证, ^{14}C 年代法已经成为第四纪海洋地层研究的一种重要手段。液体闪烁计数法是利用放射性衰变-荧光-电子转换原理的先进的核探测技术。近年来因在医学、生物学方面广泛应用,一批象 Beckman LS 9800 Type Liquid Scintillation system 这样高性能的仪器问世,研究者需借鉴于它们的设计,吸取它们的技术精华,尤其是必须再进一步降低本底提高品质因数,才能应用到 ^{14}C 年代测量中来,保证有较小的测量误差以及尽可能大的测年范围。为了达到此目的,本文提出的液闪系统从电路设计、元件选用、模块调试直到数据处理的编程,无不围绕此核心问题,作出了相应的措施,并且为样品的实测结果所肯定。

下表列出了 LS 9800 和本系统主要技术指标的实测结果。

从表中看出,本系统以牺牲效率作代价,努力降低本底,提高了品质因数。

二、原理及关键

(一) 原理

按我国糖碳标准, ^{14}C 年代测量的年龄公式是:

$$Y = 8267 \log_e \frac{(n_s - n_b)G_s}{1.362(n_s - n_b)G_s} \quad (1)$$

误差公式是:

$$Y = 8267 \sqrt{\frac{n_s + n_b}{(n_s - n_b)^2 T} + \frac{n_s + n_b}{(n_s - n_b)^2 T}} \quad (2)$$

式中 n_s 、 n_t 、 n_b 分别是糖碳、样品、本底的每分钟计数, G_s 、 G_t 分别是糖碳、样品苯的克重, T 是总测量时间,例如 1000 分钟, T 的长短由定标器的定时开关设定。在 ^{14}C 放射性半衰期为 5730 年的前提下,利用样品苯的计数介于糖碳和本底之间可推算出样品的年龄。

为了满足第四纪地质、古地理、古气候研究几万年之内的事件的要求,粗略估算公式 (1),对于 5ml 左右的苯样品,欲使最大可测年限达 3 万年以上,则样品纯计数 $N_s - N_b$ 大约是 0.5 cpm 的数量级,如果本底为 27cpm,那末自身的放射性涨落就足以掩盖真正的测量值。对于

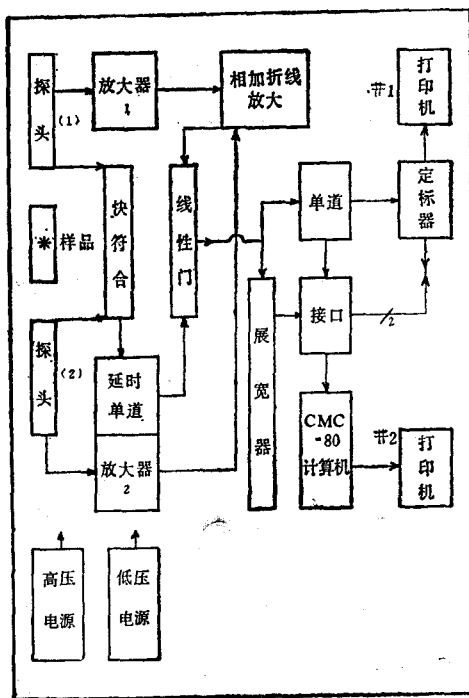
LS 9800 与本系统比较表

Tab. the system specification compared with Beckman LS 9800

型 号	本底(CPM)	效率(%)	品质因数
LS 9800 Type	27	97	409
本系统	<4.0	>68	>1150

年代测量而言,把本底降到 5cpm 以下且效率足够高,乃是十分重要的。本系统实测的效率 68%,本底 3.98,品质因数 1160,在几万年测年范围内,样品与本底计数有足够大的差异可分辨。

除了降低本底扩大测年范围之外,另一个系统指标是品质因数,它对年龄较年青的样品的误差公式影响极大。从公式(2)看出,根号内第一项与第二项有相近的数量级,而第一项的台劳展开式的一级近似为 $K_1 + K_2/Q$, 其中 K_1, K_2 是常数, Q 比例于 N_s^2/N_b , 即是品质因数。因此,为了在测年范围内有足够小的统计误差,力求高的品质因数是必要的。



低本底高品质因数液体闪烁计数系统的电路方框图

Fig. The circuit schematic of the low background and high quality factor liquid scintillation counter system

同时要有低本底和高品质因数,并非轻而易举¹⁾。对于年代测量,不象同位素示踪那样讲究探测效率,本系统把这一指标降低,逊于 Beckman LS 9800,但另外两个指标则提高了很多,满足了本实验室的测量要求。

(二) 系统电路

系统电路方框如图所示。

三、具体措施

1. 老铅屏蔽室 铅屏蔽是克服宇宙射线对本底贡献的常规方法。铅中含有同位素 ^{210}Pb , 为了实现低本底,在本系统中采用了从拆船厂买来的注册为 40 多年的旧船老铅,经熔炼制成铅室;既有效地屏蔽了宇宙射线,又减少了 ^{210}Pb 对本底的贡献。

2. 聚四氟乙烯样品瓶 样品瓶材料内含的放射性对本底是有贡献的。玻璃中主要有 ^{40}K , 虽然 95 号玻璃是低钾的,但终究是有影响的;采用聚四氟乙烯瓶好多了,不过放大器增益要相应的另作调正。

3. 低暗电流低本底光电倍增管 探测器的关键部件是光电倍增管。国外名牌液闪系统大多采用美国 RCA 或英国 EMI 公司产品;限于本实验室条件,采用了核工业部 261 厂生产的 GDB52-LD 光电倍增管,挑选了一对性能相近的管子。实测结果说明,国产的低暗电流低本底光电倍增管的质量是属于上等的。

4. 双管快符合电路 再好的光电倍增管电路不可避免的有热噪音,但噪音和干扰脉冲在时间上都是随机的。如果采用双管快符合,尤其在电路中严格挑选隧道二极管,使它的快符合时间小于 20ns,那么对于样品瓶内的核衰变事件,两支光电倍增管的输出应当相关有一个脉冲;而单独管子的随机输出在 20ns 之内恰好同时发生并到达快符合电路的几率为零,用此办法可以去掉随机干扰,分辨出真正的信号,这正是线性门所须的选通门控信号。

5. 双通道脉冲放大器 通过增益调节,可以消除两管的不对称性,也可与折线放大器相匹配,使线性放大器的输出正好落在单道甄别器的窗口上;而窗口能量对准 ^{14}C 的能谱,一般取甄别阈 0.5—4.5V。通过脉冲形成时间的调

1) 沈德勋等,1983。FJ-2101 型液体闪烁计数器本底计数的降低。

正, 可以使线性门上的信号脉冲和快符合选通脉冲作时间上的对准, 对提高系统的品质因数有较大的意义。

6. 消“串光”电路结构 所谓串光是指光电倍增管光阴极的偶发光子穿过样品到达另一管子、形成两管同时接收造成一次虚假的衰变计数, 但是两路光的强度有差异, 脉冲大小也有明显的区别, 在接口电路中可以掐去。

7. 程序可移的最佳能谱窗口 本系统在测 3 万年内的样品时, 由于计数清晰可辨, 窗口大小是固定的。为了延伸可测年限, 微机程序会对已测数据作优化处理。令公式(2)根号内的表达式为目标函数, 从固定窗口开始搜索, 寻找最佳窗口, 求得最小误差下的计数; 这样做当然

统计误差小一些, 从技术上讲是必要的; 但实际上因样品受形成历史进程中的不可知因数的干扰, 测年理论本身带有一定程度的假说性。无限追求可测范围目前是不可取的。

四、结 论

本系统自研制完成以来, 运行正常, 由它提供的数据为地质学家所引用。

本系统本底品质因数指标虽好于 LS9800, 如能把效率再提高一些, 自动换样机构由 25 个改成 300 个, 计算机的处理功能更丰富强大些, 当然更好; 但是, 作为仪器设计者, 有时则更多考虑性能价格比。

A LIQUID SCINTILLATION SYSTEM FOR MEASURING ^{14}C AGE

Yu Jiadong

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

Abstract

This paper presents some technical keys of the liquid scintillation counter with low-background and high-quality factor. By using these keys, a better than 30000 years level can be obtained in measuring ^{14}C samples. Compared with the well-known Beckman LS 9800 Type Liquid Scintillation System, the system has a high performance at a lower price for measuring ^{14}C geological samples.