

液体闪烁体衰减长度和光产额的测量^{*}

刘金昌¹⁾ 李祖豪 杨长根 王贻芳 曹俊 张智勇 丁雅韵
李金 关梦云 钟玮丽 孙亚轩

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 简要介绍了用于反应堆中微子实验的液体闪烁体的成分, 描述了液闪衰减长度和光产额的测量原理、方法、装置及过程, 给出了不同配比的液闪的光产额和衰减长度的测量结果, 并对液闪光产额和衰减长度的性能及影响因素进行了研究. 测量结果表明, 这些液闪可以满足中微子实验的需求.

关键词 液体闪烁体 光产额 衰减长度

1 引言

中微子物理是近年来新兴的研究热点, 中微子的相互作用MNS矩阵包含6个参数, 其中的两个半参数仍然等待下一步的中微子物理实验的确认和测量^[1-5], 中微子物理每取得一个进步, 必将对粒子物理的标准模型产生重要的影响. 当前, 最重要的是测量中微子的混合角 θ_{13} , 它不仅仅是中微子物理的基本参数之一, 也将对下一代长基线中微子振荡实验测量CP破坏量、研究中微子物质效应和中微子质量层次有重要的指导意义. θ_{13} 角的测量主要是基于反应堆的非加速器物理实验.

液体闪烁体简称液闪, 已经成功地被应用于许多基于反应堆的中微子物理实验, 这主要是由于它具有流动性, 可以方便的根据实验的要求设计成不同的形状, 而且由于其造价相对低廉, 非常适合用于大体积的探测器中. 在过去的反应堆中微子实验中, CHOOZ^[3]和Palo Verde^[4]实验的中心探测器的探测介质就是液闪. 如果在我国进行类似的中微子实验, 液闪同样会有广泛的应用.

对于用于反应堆中微子物理实验的液闪, 光产额和衰减长度是表征其性能的最重要的两个参数, 这两个参数决定了液闪的本征能量分辨率.

当前, 混合角 θ_{13} 的最好结果来自CHOOZ^[3]:

$\sin^2 2\theta_{13} < 0.14$. 根据理论推测 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的最可能值为0.03, 因此, 下一步 θ_{13} 的测量灵敏度必须提高一个量级左右 $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.01$. 对于探测介质液闪也要有相应的要求: 除了增加探测器的体积外, 也要提高液闪的衰减长度和光产额.

2 液闪的组成

液闪通常至少由两种有机物质组成, 一种是溶剂, 另外一种发光物质. 目前, 溶剂通常用偏三甲苯、均三甲苯、直链烷基苯等. 在国外, 用于反应堆中微子实验的液闪的有机溶剂主要采用偏三甲苯, 主要考虑较容易络合钷, 例如, CHOOZ和Palo Verde. 但是, 随着技术的进步, 均三甲苯也可以做到这一点, 而且, 相比偏三甲苯, 由于其分子化学键的对称性, 化学性质比偏三甲苯稳定, 不容易被氧化, 并且腐蚀性偏小. 实际上, 这两种物质对液闪而言物理性能相差不大. 发光物质是PPO, 在三甲苯作为溶剂的液闪中, 它有非常高的转换效率(超过80%)和短的衰变时间(约几纳秒).

除了以上这两种最基本的物质以外, 有时会根据实验需要, 在液闪中加入一些其他物质. 例如, 有时根据光电倍增管的光谱响应, 需要加入一些波长位移剂. 在大体积的液闪探测器中, 波长位移剂一般选用

2006-05-16 收稿

* 国家自然科学基金(10475086, 10535050)资助

1) E-mail: liujinc@mail.ihep.ac.cn

bis-MSB; 在中微子实验中, 液闪一般被装在有机玻璃罐中, 由于均三甲苯会腐蚀有机玻璃, 通常要在均三甲苯中加入较多的白油或十二烷等进行稀释. 这样做, 还会使造价变得更便宜, 提高光学衰减长度, 但是不足之处是光产额会略有减少; 有时为了某些实验的特殊要求, 还必须在液闪中加入一定的稀土金属元素. 例如, 基于反应堆的 CHOOZ 中微子实验, 其基本过程为逆 β 衰变:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n, \quad (1)$$

反应产物有正电子和中子. 正电子湮没为两个 0.511MeV γ 光子, 而对于中子的俘获, 是在液闪中加入约 1g/L 的金属钆, 它与慢化中子有非常大的反应截面. 使中子在液闪中的俘获时间由 200 μ s 减少到约 30 μ s. 同时, 钆通过俘获中子生成钆的同位素, 这个同位素通过衰变, 释放总和为 8MeV 的 3—4 个 γ 光子. 一般天然放射性能量小于 4MeV, 即这个特征信号能与天然放射性分的很开, 而且与先前的快的正电子信号, 有非常好的时间关系, 这是辨认中微子信号非常有用的工具^[3]. 通常, 在这类的实验中, 钆的浓度一般不会超过 2g/L.

3 液闪光产额的测量

图 1 是实验中测量光产额的系统. 光产额的测量为相对测量, 给出的是液闪光产额对标准蒽晶体光产额的比值.

液闪样品装在透紫外的直径为 5cm 的杯子中, 高度为 3cm, 与蒽晶体体积相同. 在图 1 的电子学系统中, 用于做门的一路信号是从 PMT 的打拿级引出的正脉冲信号, 因此这一部分电子学实际上是一个正脉冲甄别器.

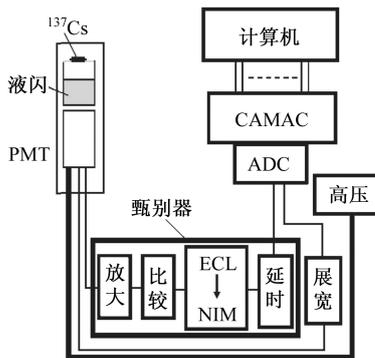


图 1 光产额测量系统

图 2 是液闪 (2g/L 的钆, 20% 均三甲苯, 80% 十二烷, 5g/L 的 PPO, 10mg/L 的 bis-MSB) 的能谱图. 用

公式 (2) 对液闪能谱数据进行拟合, 解谱后得到全能峰、康普顿谱和指数分布的噪声本底.

$$N = C \left\{ w \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2} \right] + (1-w) \frac{1}{1 + \exp \left[C_0 \left(x - \frac{x_0}{1 + \frac{0.511}{2E_\gamma}} \right) \right]} \right\} + \exp(-C_1 x + C_2), \quad (2)$$

其中 x 为 ADC 道数, x_0 为光电峰的位置, E_γ 是放射源的能量, C, C_0, C_1, C_2, σ 是拟合参数, w 为权重, 最后一部分为指数本底.

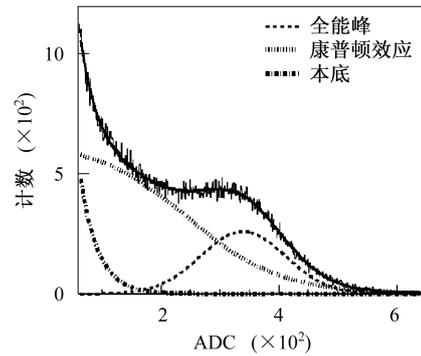


图 2 液闪的能谱图

在相同的条件下, 再测量蒽晶体的能谱. 拟合后, 液闪和蒽晶体的光电峰的位置分别记为 x_{0LS}, x_{0AN} , 得到液闪的相对光产额为 x_{0LS}/x_{0AN} . 例如, 图 2 中液闪的光电峰 $x_{0LS}=339.4$, 蒽晶体的光电峰 $x_{0AN}=859.0$, 则相对光产额 $x_{0LS}/x_{0AN}=0.395$.

表 1 一些样品的相对光产额的比较

样品	相对光产额
1 2.0g/L 的钆 100% 均三甲苯 0% 白油 5g/L 的 PPO 10mg/L 的 bis-MSB	0.567
2 2.0g/L 的钆 40% 均三甲苯 60% 白油 5g/L 的 PPO 10mg/L 的 bis-MSB	0.494
3 2.0g/L 的钆 40% 偏三甲苯 60% 白油 5g/L 的 PPO 10mg/L 的 bis-MSB (Bicron 公司产品)	0.486
4 0g/L 的钆 20% 均三甲苯 80% 十二烷 5g/L 的 PPO 10mg/L 的 bis-MSB	0.470
5 1.0g/L 的钆 20% 均三甲苯 80% 十二烷 5g/L 的 PPO 10mg/L 的 bis-MSB	0.404
6 2.0g/L 的钆 20% 均三甲苯 80% 十二烷 5g/L 的 PPO 10mg/L 的 bis-MSB	0.395
7 1.5g/L 的钆 20% 均三甲苯 80% 直链烷基苯 5g/L 的 PPO 10mg/L 的 bis-MSB	0.538
8 2.0g/L 的钆 20% 均三甲苯 80% 直链烷基苯 5g/L 的 PPO 10mg/L 的 bis-MSB	0.528
9 1.0g/L 的钆 100% 直链烷基苯 5g/L 的 PPO 10mg/L 的 bis-MSB	0.491

在表1中,液闪样品2是在液闪样品1中加入一定比例的稀释液(白油),液闪的光产额有一定程度的下降;液闪样品2与液闪样品3只有溶剂的差别,用偏三甲苯比用均三甲苯配制的液闪光产额略小,即对光产额而言,两者相差不多;液闪样品4,5,6,溶剂、发光物质与稀释液都相同,只改变含钷量,随着钷的增加,光产额也下降;液闪样品7,8使用了另外一种溶剂直链烷基苯,它的性质稳定,对有机玻璃没有任何腐蚀,尽管均三甲苯仍然只有20%,但光产额却比液闪样品4,5,6用十二烷稀释的液闪高了很多,因为直链烷基苯不仅是稀释液还作为液闪的主要溶剂,这就解决了一般稀释液带来的光产额的降低;液闪样品9的溶剂完全是直链烷基苯,光产额降低不多,而且是十分安全的液闪。

4 衰减长度的测量

光通过不同厚度介质与光强的关系为

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)}, \quad (3)$$

其中 λ 为样品衰减长度.一般而言,衰减长度随着光波长的变化而变化,波长越长,衰减长度越长.测量液体衰减长度的装置图如图3所示.蓝光发光二极管作为光源,用脉冲发生器驱动.脉冲光经过透镜和光阑后变成平行光.光电倍增管安装在1m长的圆柱形钢管的另一端,收集光信号.实验中,保持光源不变,开始在样品管中加满液体,每次释放15—20cm液体逐步改变液体的高度,测量ADC输出道数.用公式(3)拟合这些值,就得到该样品的衰减长度.如图4(a)和图4(b)所示:纵坐标为归一化的对数坐标,同一类型的点为实验所得到的数据点.拟合这些数据点,最后得到衰减长度 λ .

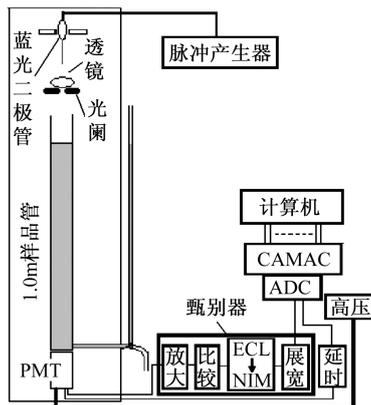


图 3 液体闪烁体衰减长度测量系统

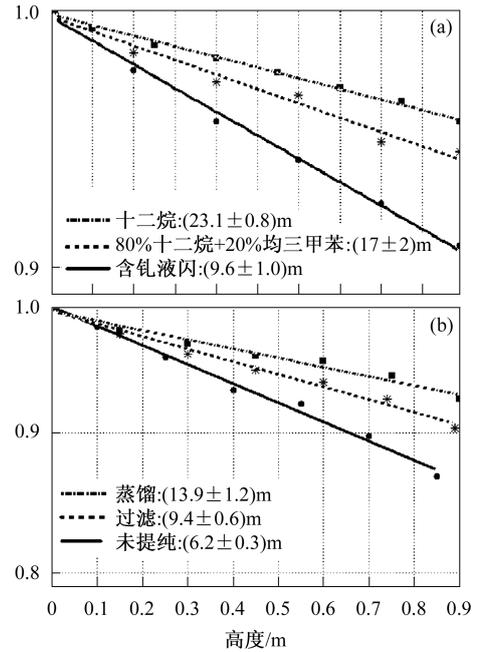


图 4 (a) 不同条件下的均三甲苯的衰减长度曲线;
(b) 液闪及其组成物质的衰减长度曲线

溶液中的杂质会吸收光子,从而严重影响液闪的性能.因此希望液闪及其原料尽量纯净.图4(a)显示的是经过不同处理的均三甲苯的衰减长度,从图中可以看出,经过提纯后,衰减长度有很大的提高.

在液闪配制过程中,必须加入微量的荧光物质和钷,因此对衰减长度有很大的影响.图4(b)中给出了配置液闪过程中,不同液体的衰减长度,液闪的成分为80%十二烷、20%均三甲苯、5g/L的PPO、10mg/L的bis-MSB、2g/L的钷.这种液闪的衰减长度为(9.6±1.0)m.可以满足目前物理实验的要求.

表 2 一些样品的衰减长度

样品	衰减长度 λ /m
1 未过滤均三甲苯	6.2±0.3
2 未过滤偏三甲苯	6.6±0.2
3 Witco公司白油	8.1 ±0.3
4 食品级白油	12.6 ±1.2
5 航空煤油	2.97 ±0.01
6 Bicon公司白油	14.7 ±0.6
7 十二烷	23.1 ±0.9
8 2.0g/L的钷 20%均三甲苯 80%十二烷 5g/L的PPO 10mg/L的bis-MSB	9.4 ±0.6
9 1.0g/L的钷 100%直链烷基苯 5g/L的PPO 10mg/L的bis-MSB	15±2

表2中,样品1,2是均三甲苯与偏三甲苯的比较,从衰减长度角度看,均三甲苯与偏三甲苯是差不多的,但在中国,均三甲苯要便宜很多.样品3,4,5,6,7则列出了可以稀释液闪的一些液体,可以看出,十二烷有非常好的衰减长度.事实上,十二烷也被其他的实

验成功应用, 例如 Kamland 的液闪成分为: 80% 十二烷、20% 偏三甲苯、1.52g/L PPO^[5]. 样品 8, 9 是配成的含钆的液闪, 有非常理想的衰减长度, 可以满足实验的需求.

5 结论

我们实验的测量结果显示: 对于基于反应堆中微

子实验要求的液闪, 根据光产额和衰减长度选择合适的溶剂和发光物质和稀释液, 并对原料进行必要的提纯, 液闪的性能会有很大的提高, 利用国产原料制成掺钆的液闪可以达到国外的液闪水平. 在中国进行反应堆中微子实验, 可以使用中国的产品和技术.

参考文献(References)

- 1 Fukuda Y et al. Phys. Lett., 1998, **B433**: 9; Phys. Rev. Lett., 1998, **81**: 1562; 1999, **82**: 2644; Phys. Lett., 1999, **B467**: 185
- 2 Fukuda Y et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**: 1810, 2430; 2001, **86**: 5651; Phys. Lett., 2002, **B539**: 179; Ahmad Q R et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**: 071301; 2002, **89**: 011301
- 3 Apollonio M et al. Phys. Lett., 1998, **B420**: 397; Phys. Lett., 1999, **B466**: 415
- 4 Boehm F, Busenitz J, Cook B et al. Phys. Rev., 2001, **D64**: 112001
- 5 Eguchi K, Enomoto S, Furuno K et al. Phys. Rev. Lett., 2003, **90**: 021802

Measurement of Attenuation-Length and Light Yield of Liquid Scintillator^{*}

LIU Jin-Chang¹⁾ LI Zu-Hao YANG Chang-Gen WANG Yi-Fang CAO Jun ZHANG Zhi-Yong
DING Ya-Yun LI Jin GUAN Meng-Yun ZHONG Wei-Li SUN Ya-Xuan

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract We briefly introduce the components of liquid scintillator used in neutrino experiment in this paper. The set-up, principles and methods of light yield and attenuation measurements for liquid scintillator are described, and liquid scintillator samples with different components are measured. We also studied the factors which affect the light yield and attenuation length of liquid scintillator. The measurement of our liquid scintillator sample shows it can meet the requirement of neutrino experiment.

Key words liquid scintillator, light yield, attenuation length

Received 16 May 2006

^{*} Supported by NSFC (10475086, 10535050)

1) E-mail: liujinc@mail.ihep.ac.cn