

TEXONO 中微子实验屏蔽效果的 Monte Carlo 研究*

陈栋梁^{1,2} 李金¹ 毛泽普¹ 邱进发¹ 王子敬³

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2 (解放军防化指挥学院 北京 112205)

3 (中研院物理研究所 台北 11529)

摘要 TEXONO 实验采用 CsI (Tl) 晶体量能器测量反应堆低能中微子的能谱和通量, 确定中微子 $\bar{\nu}_e$ 的反常磁矩并为中微子振荡实验做技术准备. 详细描述了屏蔽体的安排, 本底的主要来源, 基于 GEANT3 软件包做了 Monte Carlo 研究, 得到屏蔽体对本底的屏蔽效果.

关键词 反应堆低能中微子 屏蔽体 本底 Monte Carlo 研究

1 引言

TEXONO 实验采用 CsI (Tl) 晶体量能器测量反应堆低能中微子的能谱和通量, 确定 $\bar{\nu}_e$ 的反常磁矩并为中微子振荡实验做技术准备. 入射中微子 ($\bar{\nu}_e$) 与探测器中的电子散射, 用晶体探测器测量反冲电子的能量进而得到 $\bar{\nu}_e$ 的能谱, 下限可达 30keV 左右. 有关实验和探测器可参考文献[1,2].

中微子电子散射截面极小, 反应事例率很低, 500kg 的 CsI (Tl) 晶体探测器的事例率仅为 200/d. 为减少本底采取了多种措施. 设计良好的屏蔽体和采用外层 CsI (Tl) 晶体反符合是其中两项重要措施. 为此, 使用了欧洲核子中心 (CERN) 设计和发展的 Monte Carlo 模拟软件——GEANT3, 对这两项措施进行了模拟研究^[3].

本文详细地讨论了这两项措施并给出 Monte Carlo 模拟研究的结果.

2 TEXONO 实验屏蔽体^[4]

TEXONO 实验在台湾第二核电厂 NP2 的两座核反应堆附近进行. 探测器与这两座反应堆中心的距离分别为 28m 和 102m. 安置在核电厂建筑大厅的底部. 我们对其自然环境

2001-07-27 收稿, 2001-10-16 收修稿稿

* 海峡两岸自然科学基金 (19975050 和 87-2112-M-001-034, 88-2112-M-001-007) 共同资助

的 γ 射线本底做了测量. 图 1 给出了实验结果, 并与一般实验室 γ 射线本底做了比较. 核电厂内大量的混凝土建筑中的铁里含有 ^{60}Co 等, 低能 γ 射线放射性比较高. 而 3MeV 以上的本底低于一般实验水平, 这是因为多层混凝土屋顶和楼板屏蔽了一些宇宙线.

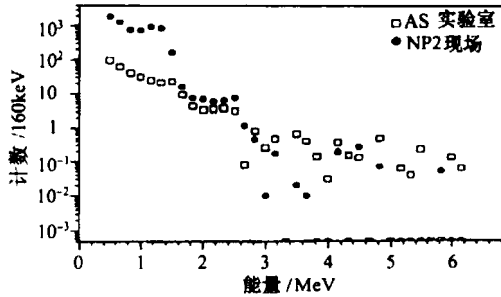


图 1 NP2 核反应堆附近和一般实验室 γ 射线本底能谱

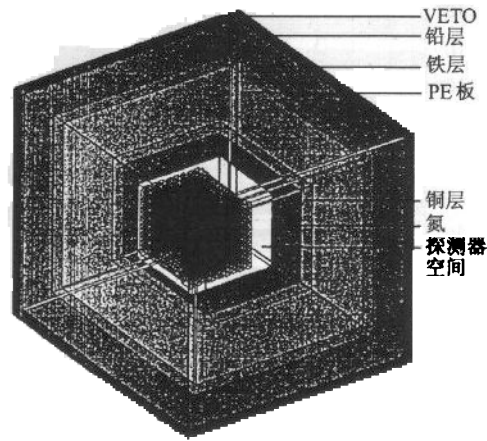


图 2 TEXONO 实验屏蔽体示意图

图 2 是 TEXONO 实验设计的屏蔽体示意图, 从外到里分别是 VETO 用塑料闪烁体, 15cm 厚的铅, 5cm 厚的铁, 25cm 厚的含硼聚乙烯板 (PE 板), 5cm 厚的无氧铜, 最内部放置探测器. 在铜与探测器之间充有氮气防止空气中氧气造成的本底, 表 1 是探测器和屏蔽体结构的部分参数.

表 1

材料	参数	厚度/cm	外层空间尺寸/cm			密度/(g/cm ³)	备注(组成)
			横	高	深		
VETO		5	210	185	190	1.032	塑料闪烁体
铅		15	200	175	180	11.35	
铁		5	170	145	150	7.87	
PE 板		25	160	135	140	1.032	(CH ₂) _n
铜			110	85	90	8.96	OFHC
氮			100	75	80	0.808	
探测器区域			70	60	64		PMT, CsI(Tl)靶
PMT 及前放			100	75	80		510 个, 空间预留
CsI(Tl)靶			40	46	60.6	4.53	17 × 15

3 γ 射线的屏蔽效果及其探测器中的响应

实验需要考虑的 γ 射线有: 环境本底的 γ 射线; 宇宙线 μ 子与屏蔽层材料反应所产生的 γ 射线; 中子俘获产生的特征 γ 射线; 材料中还有 γ 射线放射性的成分等. 这些 γ 射线

本底中,除中子俘获产生的特征 γ 射线可以通过特征能量加以鉴别外,其他来源的 γ 射线很难通过一般分析手段鉴别清楚.但可以用 Monte Carlo 模拟的方法进行计算,了解探测器对各种本底的响应,进而有效地评估不同的本底在不同的能量范围里对反应堆中微子实验的影响.

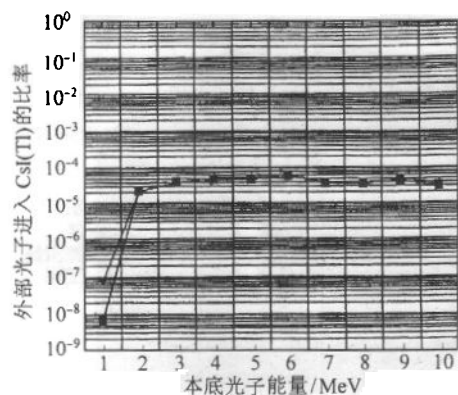


图3 外部入射 γ 射线进入晶体后的衰减
—◆— 光子能量 >0 , —■— 光子能量 $>1\text{MeV}$.

3.0MeV时,进入到内部探测器的粒子的数量要减少到原来的 4×10^{-5} ,而 $E > 3.0\text{MeV}$ 的减弱系数也小于 10^{-4}

3.2 屏蔽材料中的 γ 射线本底^[5,6]

屏蔽材料以铅为主,铅中的 γ 射线除本身含有放射性物质外,还有相当数量的 γ 射线本底来源于宇宙线 μ 粒子.宇宙线 μ 粒子的能量比较高,穿过混凝土建筑物后又穿过屏蔽体,特别是屏蔽体中的铅,发生反应并有 γ 射线和中子等次级产物.为了解这些在屏蔽体中的 γ 射线本底,包括 μ 子诱发的 γ 射线对实验的影响,利用 GEANT3 对此进行了研究.为简化模拟计算且考虑到尽量扩大 γ 射线穿透的可能性,假设 γ 射线本底是均匀地在铅中产生,只选择指向探测器的那部分 γ 射线计算到达探测器几率.分别独立地选择能量 $E = 1, 2, 3 \dots 10\text{MeV}$ 各 10^6 个事例,统计进入屏蔽体内部探测器的 γ 粒子数目,其结果如图4所示,图中上面的线表示进入晶体探测器后的能量 $E_\gamma > 0\text{MeV}$ 的情况,而下面的线表示 $E_\gamma > 1\text{MeV}$ 的比率.

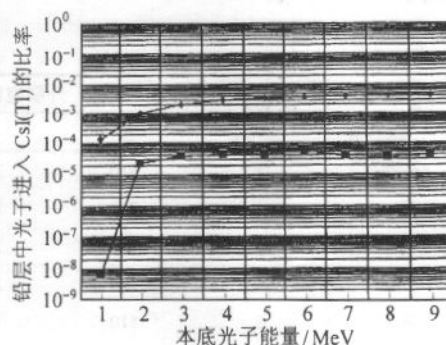


图4 铅层中 γ 射线进入CsI(Tl)晶体的几率
—◆— 光子能量 >0 , —■— 光子能量 $>1\text{MeV}$.

3.3 尽管实验中专门选用了低放射性本底的玻璃制作的光电倍增管

探测器的材料中 γ 射线本底的主要来源仍然是光电倍增管及少量电子线路板等.屏蔽体对这些材料的放射性已无任何作用,会直接进入CsI(Tl)晶体并被探测到.采用外层

CsI (Tl) 晶体来接受这些讯号并且以反符合的办法来消除这些本底. 因此, 需要了解不同能量的 γ 射线对 CsI (Tl) 晶体的穿透能力, 进而确定所需要的反符合晶体探测器的厚度. 我们模拟计算了反符合晶体的厚度分别为 10cm, 7.5cm, 5cm 和 2.5cm 时, 对 γ 射线的屏蔽效果. 图 5 给出探测器材料中各向同性地放射出各种不同能量的 γ 射线, 穿过不同晶体厚度时被内层探测器探测到的效率. 计算表明, 当用 5cm 厚的 CsI (Tl) 晶体做反符合时, 光电倍增管放射出的能量范围在 1—5MeV 的射线, 仅有 1%—2% 能进入内部探测器并被探测.

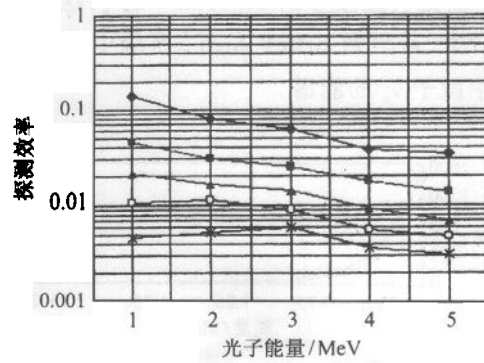


图 5 PMT 区域 γ 射线经不同厚度 CsI 晶体后的探测效率

—◆— L = 0.0cm, —■— L = 2.5cm, —▲— L = 5.0cm,
—□— L = 7.5cm, —*— L = 10.0cm.

实际上光电倍增管及电子线路板等材料中的 γ 射线成分中, 更多是低能 γ 射线. 选择 5cm 厚的 CsI (Tl) 晶体为反符合时, 对低能 γ 射线的阻止效果更好. 为更清楚了解这一点, 我们计算了一组 γ 射线能量为 30keV—300keV 的情况, 表 2 给出不同能量下在 5cm 厚的 CsI (Tl) 晶体反符合内部探测效率.

表 2

γ 射线能量/keV	30	60	100	300
Single-hits(探测效率)		0.00006	0.000205	0.00285

4 宇宙线造成的本底^[7]

按照水平面下宇宙线 μ 子的角度与能量分布公式

$$\frac{dN_{\mu}}{dE_{\mu}} \approx \frac{0.14E^{-2.7}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{GeV}} \times \left\{ \frac{115.0\text{GeV}}{115\text{GeV} + 1.1E\cos\theta} + \frac{45.9\text{GeV}}{850\text{GeV} + 1.1E\cos\theta} \right\},$$

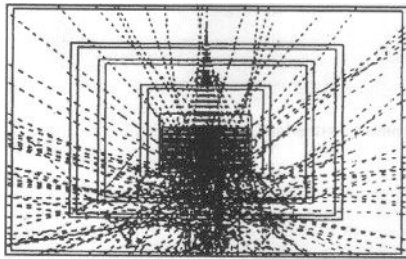


图 6 μ 子从各方向进入探测器并发生作用的模拟

随机抽样 10000 个 μ 事例. 假设从探测器最外层正上方垂直入射的 μ 子将依次穿过 1.5m 的水泥层、反符合闪烁探测器、铅层、铁层、PE 层、铜层、CsI (Tl) 晶体, 并与之发生反应而后逃离出屏蔽体的探测器. 图 6 给出 μ 子从各方向进入探测器并发生作用的模拟.

下面讨论 μ 子与 CsI (Tl) 晶体的相互作用:

1) μ 在 CsI (Tl) 探测器中生成次级粒子及其能谱通过 GEANT3 的模拟计算, 发现在晶体中生成了 γ, e^+, e^- 和 ν_{μ} 各种次级产物, 但没有发现中子. 次

级 e^- 以低能为主, 平均能量为 0.36MeV, 而次级 γ 的能量大都在 0.5MeV 以下, 如图 7 所

示. 但是有比较多的 0.511MeV 的 γ , 这实际上是由 e^+ 湮没的结果. 正电子 e^+ 的能量范围比较大, 甚至到 10MeV 左右. 次级中微子 ν_μ 的能量更大, 在 $10\text{--}50\text{MeV}$ 的范围中. 图 8 表示中微子 ν_μ 的能谱.

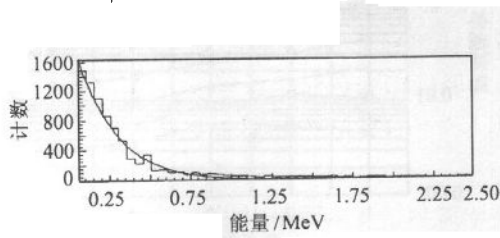


图 7 次级粒子 e^- 的能谱

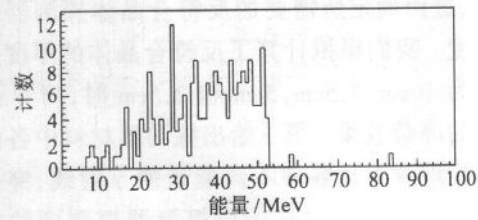


图 8 次级中微子 ν_μ 的能谱

2) μ 子在 CsI (Tl) 晶体探测器中的能量沉积 CsI (Tl) 晶体量能器是由独立晶体探测器组成的 17×15 阵列, 每根晶体读出的信号视为一独立的事例, 或者称之为“Single hit”, ν -e 散射事件也以单击中为鉴别条件之一. 为此计算了 μ 在单个晶体中的能量沉积, 计算结果得到平均能量为 $18\text{MeV}/\text{event}$, 这样大的讯号超出了我们测量范围 ($\leq 8\text{MeV}$), 很容易识别.

5 结论

Monte Carlo 研究表明, 对能量低于 1.5MeV 的 γ 射线屏蔽效果好于 10^{-6} , 随着能量的提高屏蔽效果减弱, 但都好于 10^{-4} . 这十分有利于对以低能为主的 γ 射线本底 (如图 1 所示) 的屏蔽. 总的屏蔽效果大约是 10^{-5} . 这与屏蔽体内外 γ 射线本底总通量比的实地测量结果一致.

CsI (Tl) 晶体对 γ 射线屏蔽的研究表明, $5\text{--}10\text{cm}$ 晶体对低能 γ 射线的屏蔽非常有效. 不仅为实验采用 CsI (Tl) 晶体做主动反符合提供了可靠的依据, 也告诉我们, 应该尽量选择 $5\text{--}10\text{cm}$ 以内的探测器中的事例.

参考文献 (References)

- 1 WONG H T, LI Jin. Moden Phys. Lett., 2000, **A15**:2011—20152
- 2 WONG H T, LI Jin et al. Astroparticle Physics, 2000, **14**:141—152
- 3 Urban L et al. GEANT-Detector Description and Simulation Tool. CERN Geneva, Switherland, 1994
- 4 LAI W P et al. Nucl. Inst. Meth. 2001, **A465**:550—565
- 5 ACEK G Z et al. Physical Review 1986, **D34**:2621
- 6 The TEXONO Collaboration. AS-TEXONO/99-07, 1999
- 7 Apollonio M et al. Phys. Lett., 1998, **B420**:397

Monte Carlo Study on the Effect of Shielding in TEXONO Neutrino Experiment *

CHEN Dong-Liang^{1,2} LI Jin¹ MAO Ze-Pu¹ QIU Jin-Fa¹ Wong T H³

1 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039)

2 (Institute of Chemical Defence, PLA, Beijing 102205)

3 (Institute of Physics, AS, Taipei 11529)

Abstract TEXONO collaboration adopts CsI(Tl) crystal calorimeter to measure the energy spectrum and abnormal magnetic moment of reactor neutrino. The paper describes the design of shielding; the main source of backgrounds and the Monte Carlo Simulation based on the GEANT3 code for the effect of the shielding.

Key words reactor low energy neutrino, shielding, background, monte carlo simulation

Received 27 July 2001, Revised 16 October 2001

* Supported by Science Foundation of Two Sides of Strait(19975050 and 87-2112-M-001-034, 88-2112-M-001-007)