

轻水切伦科夫探测器的中子探测调研报告

中子物理导论第二次大作业

杨哲涵

司书屹

工程物理系

2024-09-29

中微子质量的认识 2

Super-Kamiokande 8

Super-K 的中子探测 12

总结 21

参考文献 23

中微子质量的认识

发现

1914 年,Chadwick 发现 β 衰变能谱是连续的,这一发现在 1927 年又被 Ellis 和 Wooster 证实.当时人们怀疑在这个过程中,是否存在能量不守恒.

随后,Pauli 在 1930 年的一封信中提到,设想存在一种中性弱相互作用费米子,就可以解决这个问题.Pauli 当时把这种粒子称为“neutron”.

不过 Chadwick 在 1932 年发现了我们今天所了解的“neutron”,随后 Fermi 把 Pauli 提到的“neutron”重命名为“neutrino”.在 1933 年,Fermi 和 Perrin 独立得出结论,中微子不应当有质量. [1]

中微子振荡现象

1967-1969 年间,Pontecorvo 等人提出 ν_e 和 ν_μ 是两种中微子质量本征态的混合态.

1975-1976 年间,Eliezer 和 Swift 等人将中微子振荡理论发展成熟.

中微子振荡作为一种量子现象,其参数可以类比不同本征基矢间的表象变换矩阵.

记中微子 3 种味的本征态为 $|\nu_\alpha\rangle$, $\alpha = e, \mu, \tau$, 3 种质量的本征态为 $|\nu_i\rangle$, $i = 1, 2, 3$.



Figure 1: 中微子的三种味

描述中微子振荡的矩阵被称为 PMNS 矩阵(Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata Matrix),常记为 U .

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle$$

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

对于某个本征态为 $|\nu_j\rangle$ 的中微子,其行进 t 时间后可以如此描述

$$|\nu_j(t)\rangle = e^{-i(E_j t - \vec{p} \cdot \vec{x})} |\nu_j(0)\rangle$$

上式取自然单位制($c = \hbar = 1$)

$$E_j = \sqrt{p_j^2 + m_j^2} \cong E + \frac{m_j^2}{2E}$$

将 t 换成传播距离 L 后有

$$|\nu_j(L)\rangle = e^{-i\frac{m_j^2 L}{2E}} |\nu_j(0)\rangle$$

中微子振荡现象

上面均采用质量本征态描述,那么在味本征态描述下

$$\begin{aligned}
 P_{\alpha \rightarrow \beta} &= |\langle \nu_{\beta} | \nu_{\alpha}(L) \rangle|^2 \\
 &= \left| \sum_j U_{\alpha j}^* U_{\beta j} e^{-i \frac{m_j^2 L}{2E}} \right|^2 \\
 &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j>k} \text{Re}\{U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^*\} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{jk}^2 L}{4E} \right) , \\
 &\quad + 2 \sum_{j>k} \text{Im}\{U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^*\} \sin \left(\frac{\Delta m_{jk}^2 L}{2E} \right)
 \end{aligned}$$

这便给出了味变化的概率.

我国的大亚湾核反应堆中微子实验测量[2] 得到
 $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.092 \pm 0.016(\text{stat.}) \pm 0.005(\text{syst.})$

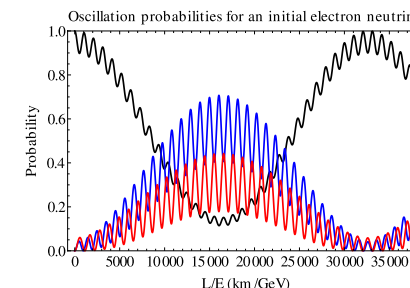


Figure 2: ν_e 振荡

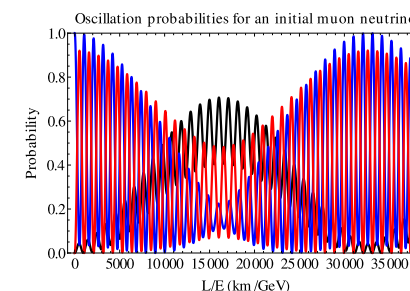
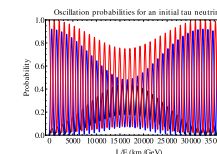


Figure 3: ν_{μ} 振荡

Figure 4: ν_τ 振荡

中微子振荡现象

其他已经测得的参数有

- $\sin^2(2\theta_{12}) = 0.0846 \pm 0.021$
- $\sin^2(2\theta_{23}) > 0.92$ at 90% confidence level
- $\Delta m_{21}^2 = (0.753 \pm 0.018) \cdot 10^{-4} \text{ eV}^2$
- $|\Delta m_{31}^2| \approx |\Delta m_{32}^2| = (24.4 \pm 0.6) \cdot 10^{-4} \text{ eV}^2$

目前未知的参数有

- $\delta, \alpha_1, \alpha_2$
- 质量顺序, 即 Δm_{31}^2 的正负

Super-Kamiokande

概述

Super-Kamiokande(Super-Kamioka Neutrino Detection Experiment)是世界上最大的切伦科夫探测器(直径 39.3m,高度 41.4m,填充 50000t 超纯水).

Super-K 的前身为 1982 年小柴昌俊(Koshiba)建设的神冈探测器.探测目标包括质子衰变(没有实现),太阳中微子,大气中微子,超新星中微子.

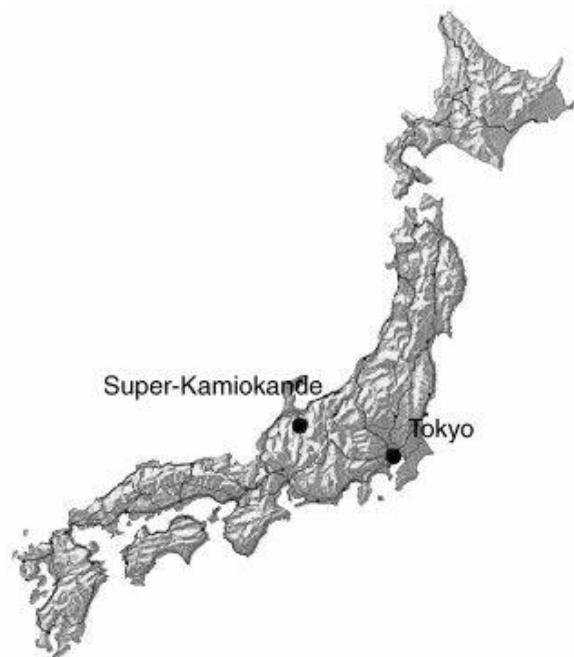


Figure 5: 神岡町(岐阜県)

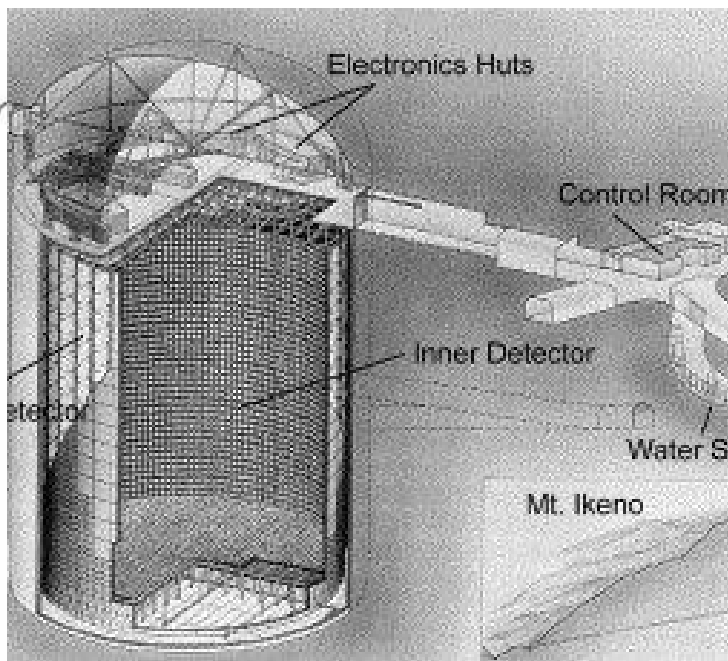


Figure 6: Super-K 示意图

Super-K 建造于 1000 米厚的岩层下的废弃矿井,对宇宙线 muon 的屏蔽效果等效于 2700 米的水深.观测到的宇宙线 muon 通量为 $6 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. [3]

结构

Super-K 有两层 PMT 探测器, 称为 ID(Inner Detector)和 OD(Outer Detector)[3]

ID 装有 32 吨水,朝内安装有 11 146只 50 cm PMT (Hamamatsu R3600)

OD 用来反符合探测,朝外安装有 1 885只 20 cm PMT (Hamamatsu R1408)

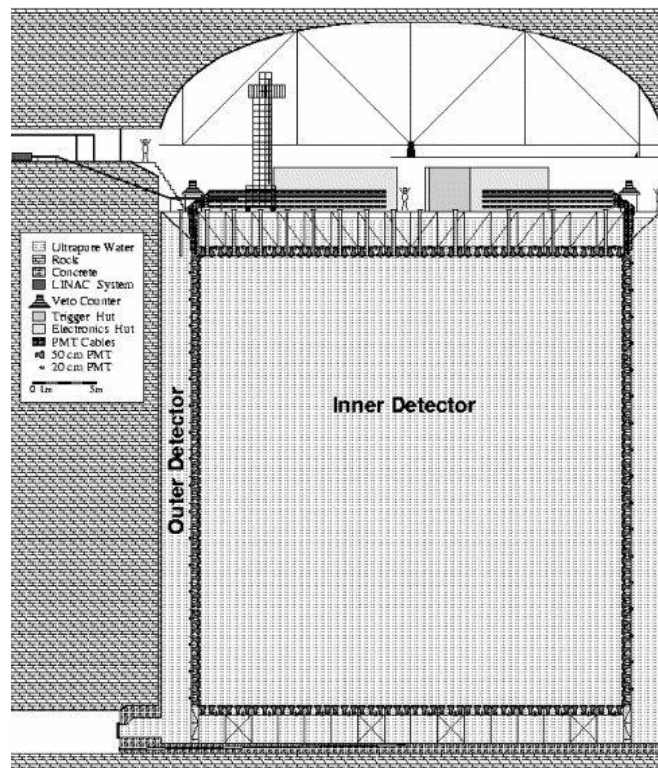


Figure 7: Super-K 剖面

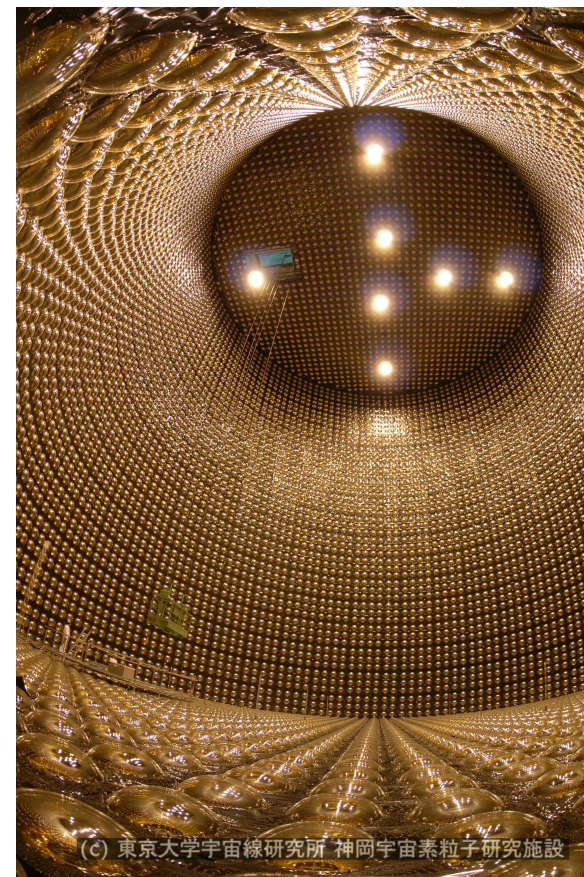


Figure 8: Super-K 广角摄影

Table 1
Detector configuration for the SK experiment phases up to the current time. The values in parentheses below the number of PMTs in the ID show percent photo-coverage of the surface.

Phase		SK-I	SK-II	SK-III	SK-IV
Period	Start	1996 Apr.	2002 Oct.	2006 Jul.	2008 Sep.
	End	2001 Jul.	2005 Oct.	2008 Sep.	(running)
Number of PMTs	ID	11146 (40%)	5182 (19%)	11129 (40%)	11129 (40%)
	OD	1885			
Anti-implosion container		No	Yes	Yes	Yes
OD segmentation (Fig. 33)		No	No	Yes	Yes
Front-end electronics		ATM (ID)			QBEE
		OD QTC [1] (OD)			

Figure 9: Super-K 运行阶段

Figure 9 摘自 14 年论文[4],实际上,SK-IV 运行到 2018 年.同年 Hyper-K 设计报告发布.

- 发现了大气中微子振荡的证据[5],SNO 实验在这之后做出了关键性贡献(证实了三种味的中微子总量是一定的).为此梶田隆章(Kajita)与 McDonald 分享了 2015 年诺贝尔奖
- 测量了太阳中微子通量[6],确定了太阳中微子振荡参数[7]

Super-K 的中子探测

中子探测基本原理

中子不带电,因此通过物质时和物质中的电子不发生作用,不能直接引起电离,而是通过与原子核相互作用产生能引起电离的次级粒子才能被记录.

中子按能量可以分为

低能中子(cadmium cut-off) $0 \sim 0.4\text{eV}$

- 超冷中子(ultra-cold)
- 冷中子(cold)
- thermal
- hot

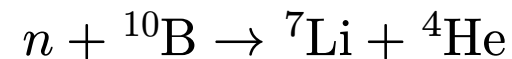
中能中子(epithermal) $< 200\text{keV}$

快中子(fast) $0.2 \sim 20\text{MeV}$

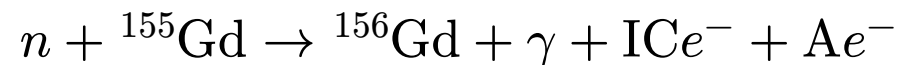
高能中子(high energy) $> 20\text{MeV}$

利用中子与原子核的相互作用的来探测的方法有 [8]

带电粒子发射的放能反应(Exoergic reactions featuring emission of charged particles) $^{10}\text{B}, ^6\text{Li}, ^3\text{He}$



辐射俘获(Radiative capture) (n, γ)



ICe^- 是内转换电子, Ae^- 是俄歇电子

**核裂变
吸能反应**

切伦科夫辐射

Super-K 是轻水切伦科夫探测器,收集中微子发生反应后的带电粒子的切伦科夫辐射光子(Cherenkov Radiation).

对于以 $v_p = \beta c$ 运动的带电粒子,穿过折射率 n 的介质时,若速度超过光在介质中的相速度,会产生锥状向前的辐射,即条件为

$$\frac{c}{n} < v_p < c$$

测量角度即可得到带电粒子的速度

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$

水在 20 摄氏度时 $n = 1.33$,切伦科夫辐射的阈值速度为 $0.75c$,对于电子 $v_p = 0.75c$,有 $E = m_0 \frac{c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = 0.77 \text{ MeV}$,小于此能量的电子无法引发切伦科夫辐射

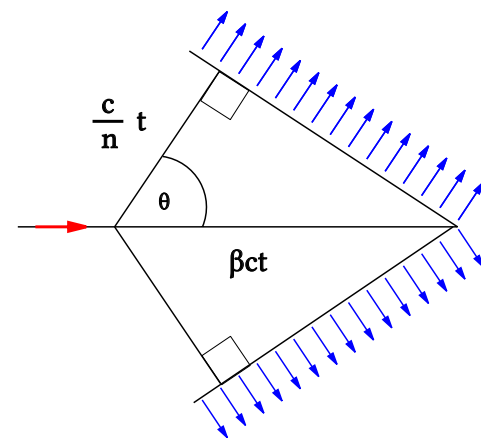


Figure 10: 切伦科夫辐射

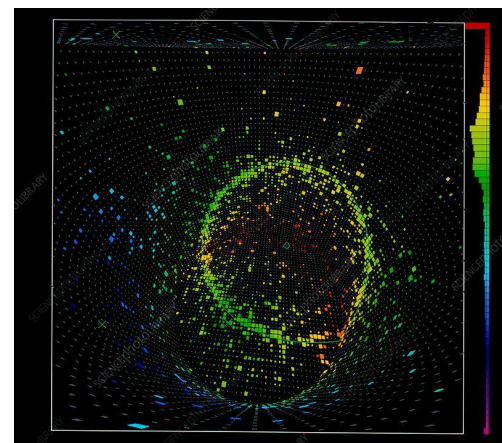


Figure 11: ν_e 事例

为什么需要中子探测

Super-K 缺乏反中微子标记的手段.具体而言

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

在这一步产生的中子在水中经过大概 20 次和自由质子的碰撞,迅速($10\mu s$)热化,能量从 10keV 量级降低到 0.025eV 量级.再经过 $200\mu s$ 左右,中子被氢原子俘获

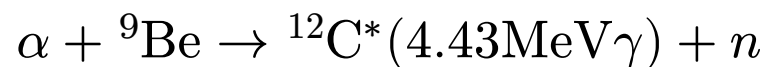
$$n + p \rightarrow d + \gamma + 2.2 \text{ MeV}$$

这里产生的康普顿散射电子能量接近切伦科夫阈值(0.77 MeV),而传统的切伦科夫探测器的触发阈值在5 MeV左右,因此这些中子俘获不会被记录,Super-K 从而不能标记反中微子和质子的俘获 [9]

如果能解决这一问题,会对超新星中微子的研究产生很大帮助,因此在 2009 年的这篇论文中[9],作者提出了两种独立的方法记录中子俘获,并且分析了这两种方法的测试结果.

实验设计

中子源 论文使用了Am/Be(镅-铍)中子放射源($96\mu\text{Ci}$).放射源被置于一个立方BGO 闪烁体内部,这可以产生被标记好的中子



氯化钆 γ 射线重建(方法一)

- 利用氯化钆的中子俘获反应产生的高能 γ 射线
- 优点:顶点,时间,能量重建效率高

强制触发重建(方法二)

- 通过引入新的强制触发逻辑实现
- 缺点:大多数被记录的事例因为能量太低无法重建

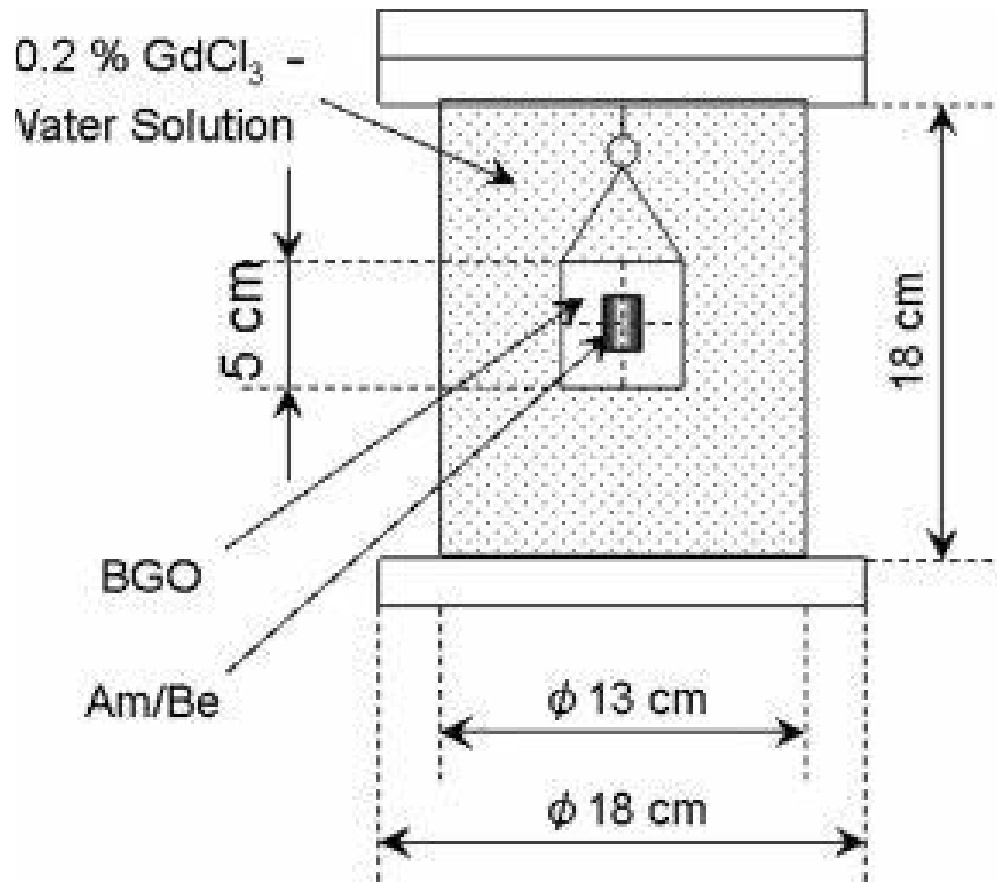


Figure 12: 实验方法一设计

氯化钆 γ 射线重建

使用了 2.4L 0.2% GdCl_3 水溶液,中子在其中被俘获,产生 8MeV 的 γ 射线

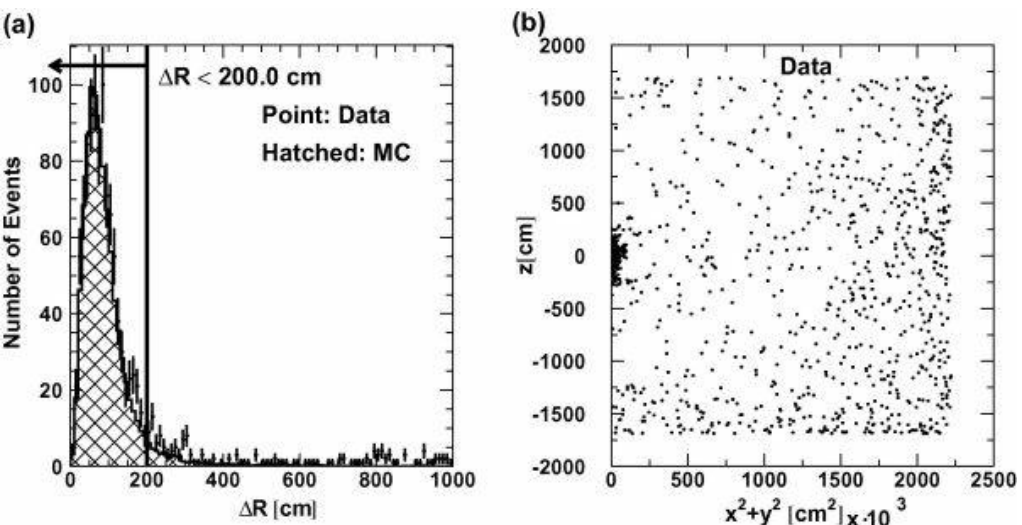
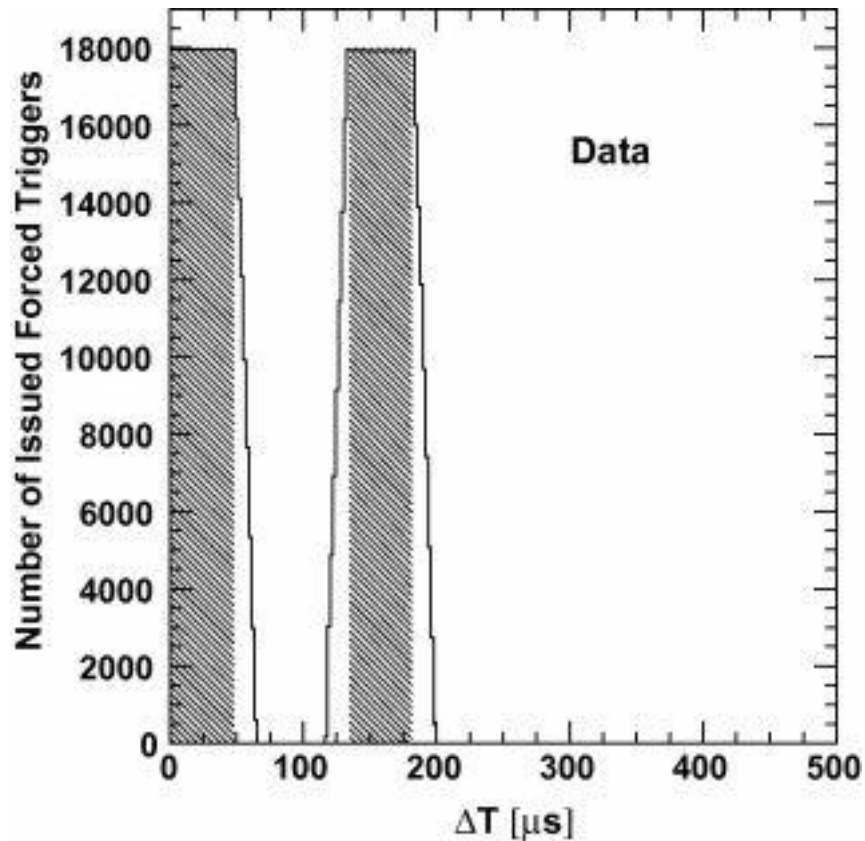


Figure 14: 顶点重建

Figure 13: ΔT between prompt and delayed triggers

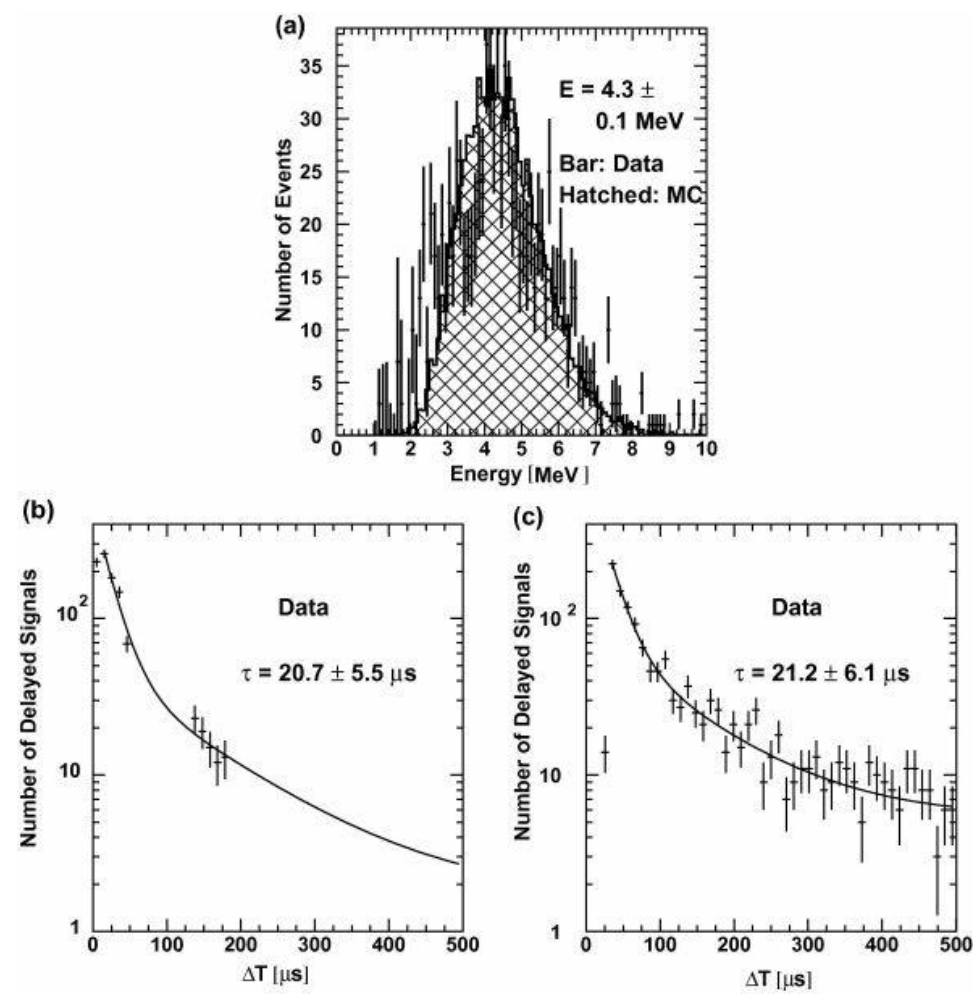


Figure 15: 能量及时间重建

强制触发重建

在 Super-K 的正常数据采集过程中, ID 中源自所有同时发生的 PMT 信号总数(HITSUM)有 3 种触发信号

- 超低能触发(SLE)
- 低能触发(LE)
- 高能触发(HE)

为了测量中子标记效率, 开发了一个与当前 Super-K 电子设备兼容的标准核仪器模块(NIM)

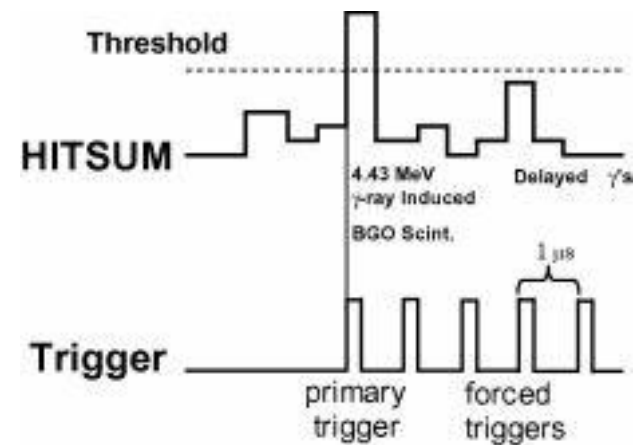


Figure 16: 强制触发信号

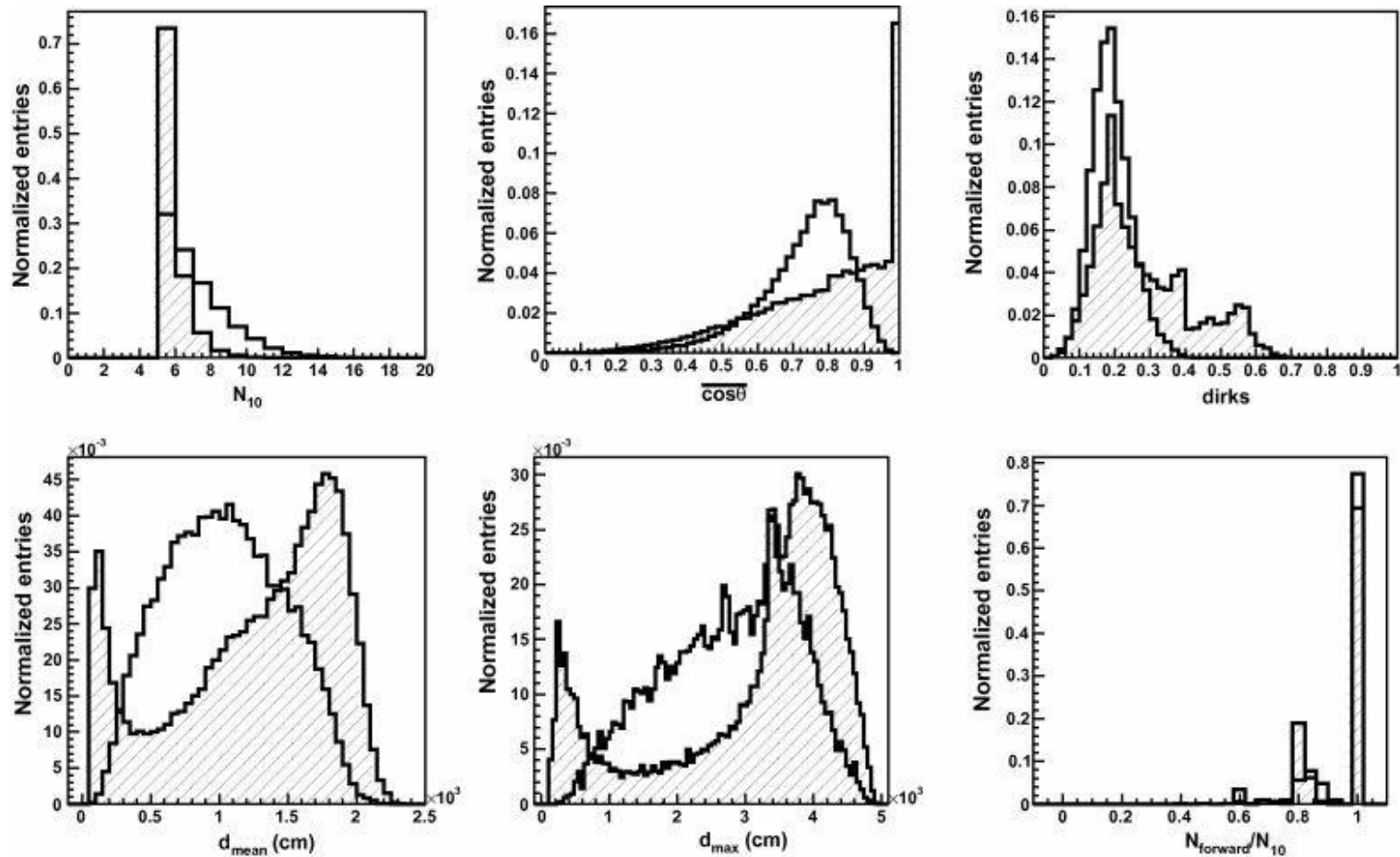


Figure 17: Distributions of discriminating variables for signal (open histogram) and background (hatched)

总结

Super-K 的中子探测

方法一 实现了 66.7% 的中子探测效率,延迟事件的能量阈值为 3MeV,背景降低水平为 2×10^{-4}

方法二 强制触发,搜索自由中子捕获的 2.2MeV γ 射线,其中子探测效率随位置变化,范围在 13.1% 到 24.5% 之间

研究的结果验证了在大型水切伦科夫探测器中使用 10MeV 甚至更低能量阈值的可行性

研究有利于

1. 观察扩散超新星中微子背景,尽管理论估计存在差异,但通过中子标记的 Super-K 应该每年观察到一些超新星中微子事件
2. 从日本核电站收集到的反中微子年事例率可以达 5000 件,分析这些数据可以最精确地测量太阳中微子振荡参数
3. 为自由质子衰变候选提供降低本底的方法

参考文献

- [1] C. Giunti and C.-W. Kim, *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics* (Oxford university press, Oxford, 2007).
- [2] F. P. An et al., Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay, *Physical Review Letters* **108**, 171803 (2012).
- [3] S. Fukuda et al., The Super-Kamiokande detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **501**, 418 (2003).
- [4] K. Abe et al., Calibration of the Super-Kamiokande detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **737**, 253 (2014).
- [5] Y. Fukuda et al., Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos, *Physical Review Letters* **81**, 1562 (1998).

- [6] Y. Fukuda and others, Measurements of the solar neutrino flux from Super-Kamiokande's first 300 days, Phys. Rev. Lett. **81**, 1158 (1998).
- [7] S. Fukuda and others, Determination of solar neutrino oscillation parameters using 1496 days of Super-Kamiokande I data, Phys. Lett. B **539**, 179 (2002).
- [8] A. Pietropaolo et al., Neutron detection techniques from μ eV to GeV, Physics Reports **875**, 1 (2020).
- [9] H. Watanabe et al., First study of neutron tagging with a water Cherenkov detector, Astroparticle Physics **31**, 320 (2009).