

Super-KamiokaNDE 实验的太阳与大气中微子最新结果

实时中微子观测 25 年 1996–

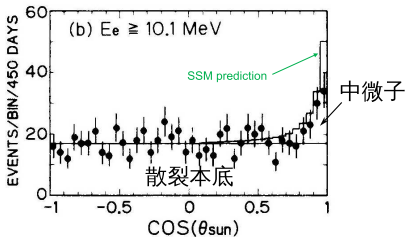
续本达

清华大学
工程物理系
高能物理研究中心

2024-05-09 西昌

确认了 Homestake 观察到的“中微子缺失”

Based on 450 days' Kamiokande data taken from Jan.1987 to May 1988



Observed number of solar neutrinos was about 50.

It was almost half of the expectation from the

Standard Solar Model (SSM) K.S.Hirata et al., Phys. Rev. Lett. 63(1989) 16

回顾：中微子消失之谜的解决和振荡的确立

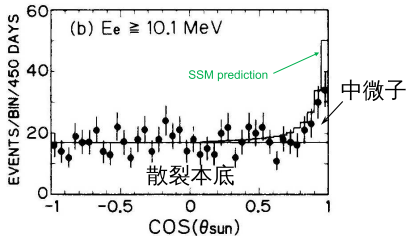
Super-Kamiokande
实验的太阳与
大气中微子最
新结果

续本达

太阳中微子
大气中微子
探测器刻度
总结展望

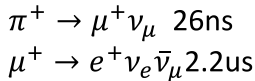
确认了 Homestake 观察到的“中微子缺失”

Based on 450 days' Kamiokande data taken from Jan.1987 to May 1988



Observed number of solar neutrinos was about 50.
It was almost half of the expectation from the
Standard Solar Model (SSM) K.S.Hirata et al., Phys. Rev. Lett. 63(1989) 16

ν_μ 消失提供“中微子缺失”的解。

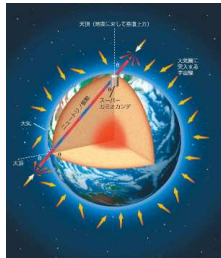


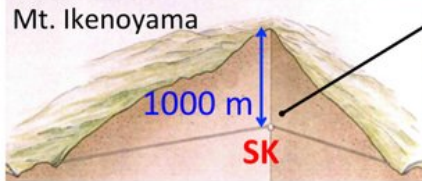
• $\nu_\mu \nu_e$ 比例应为2

• Kamokande 观察到中微子变味的迹象：

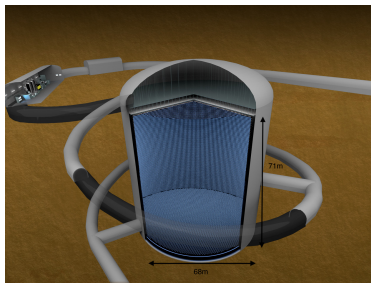
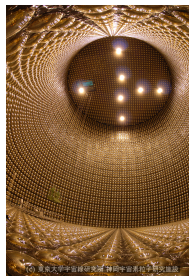
- 从上飞来的中微子符合比例
- 从地下飞来的中微子不符合比例

• 1998年：Super-Kamokande 最终确认





神冈的进化：神冈 ⇒ 超级神冈 ⇒ 顶级神冈



	高	直径	质量	PMT	时间
Kamiokande	16.0 m	15.6 m	3 kt	~ 1000	1983–1995
Super-Kamiokande	41.4 m	39.3 m	50 kt	~ 11200	1996–
Hyper-Kamiokande	64 m	74 m	260 kt	~ 40000	预计 2027 年建成

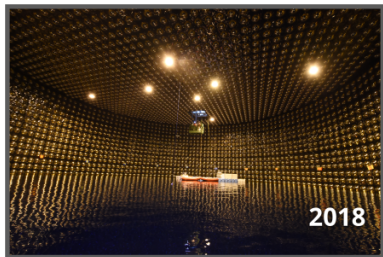
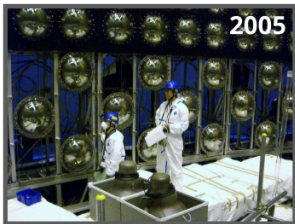
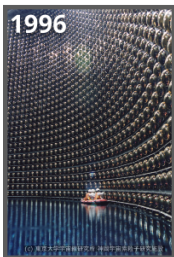
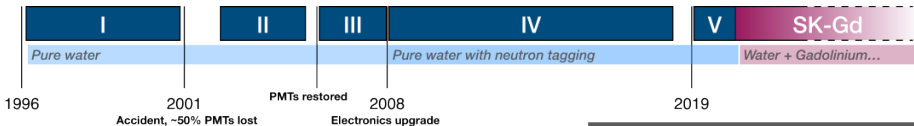
续本达

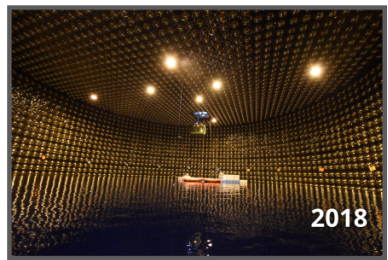
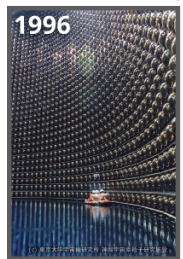
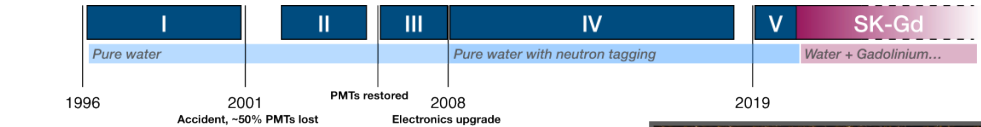
太阳中微子

大气中微子

探测器刻度

总结展望

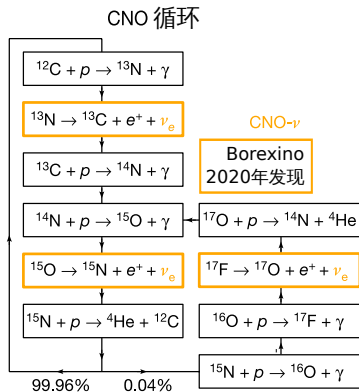
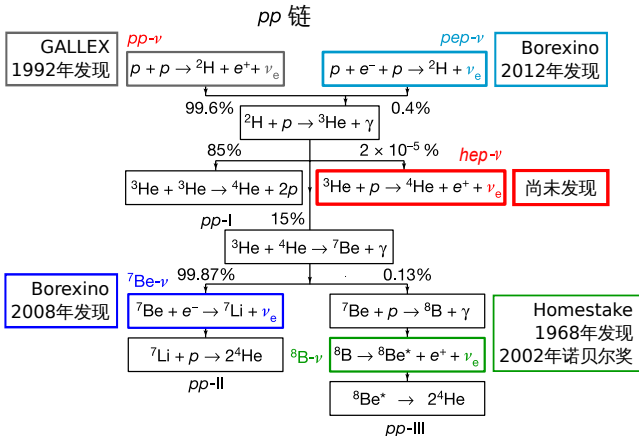


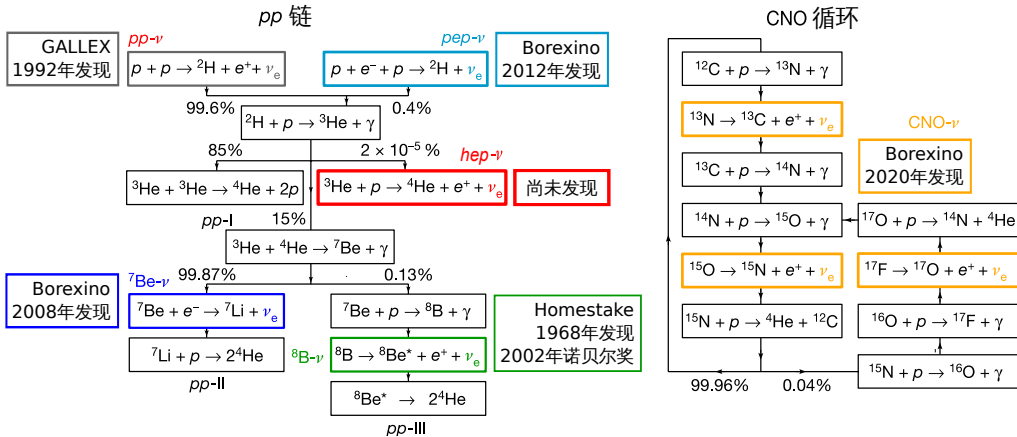


- Phys. Rev. D 109, 092001 Solar neutrino measurements using the full data period of Super-Kamiokande-IV
- Phys. Rev. D 109, 072014 Atmospheric neutrino oscillation analysis with neutron tagging and an expanded fiducial volume in Super-Kamiokande I -

太阳中微子

太阳中微子的发历程





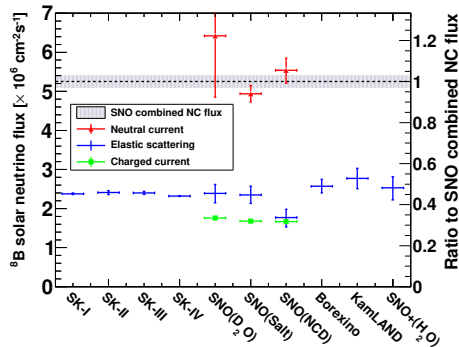
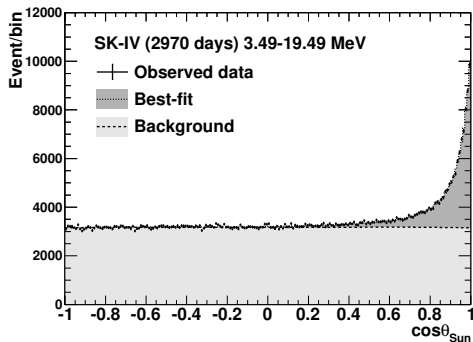
- 超级神冈 (SK) 对 3 MeV 以上能区敏感 (${}^8\text{B}$ 和 hep ν)

超级神冈各阶段及其他实验的 ^8B 测量结果

Super-KamiokaNDE
实验的太阳与
大气中微子最
新结果

续本达

太阳中微子
大气中微子
探测器刻度
总结展望



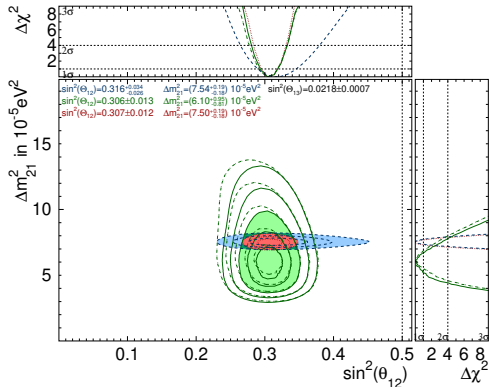
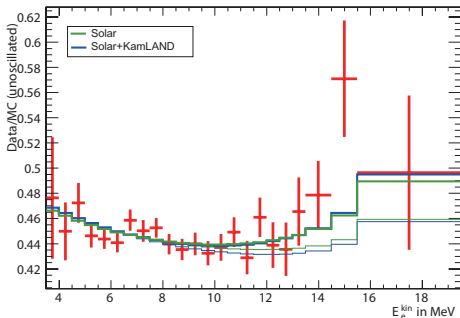
$$N_{8\text{B}} = 65443_{-388}^{+390}(\text{stat.}) \pm 925(\text{syst.})$$

$$\Phi_{8\text{B}} = (2.314 \pm 0.014 \pm 0.040) \times 10^6 / \text{cm}^2\text{s}$$

^8B 测量到了新的精度

- 不考虑振荡时 ^8B 通量结果

- 反应堆中微子实验的约束: $\sin^2 \theta_{13} = 0.0220 \pm 0.0007$

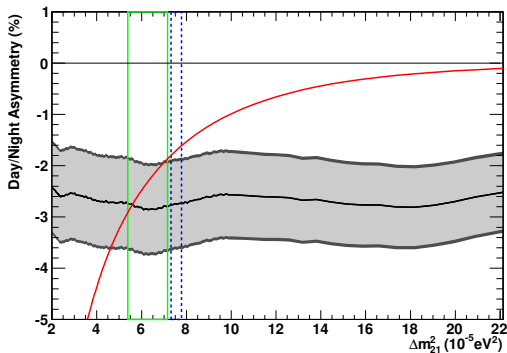
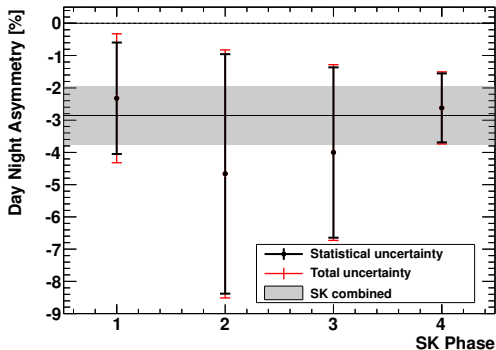


- 直方图为考虑 MSW 的预测 (需要拟合的 Δm_{21}^2)。
- 粗实线考虑了不确定度。

所有 solar 数据, KamLAND 数据, 所有 solar+KamLAND 数据

- 地球的电子数密度远低于太阳，对应的 MSW 过渡区被拉高至 ~ 100 MeV。

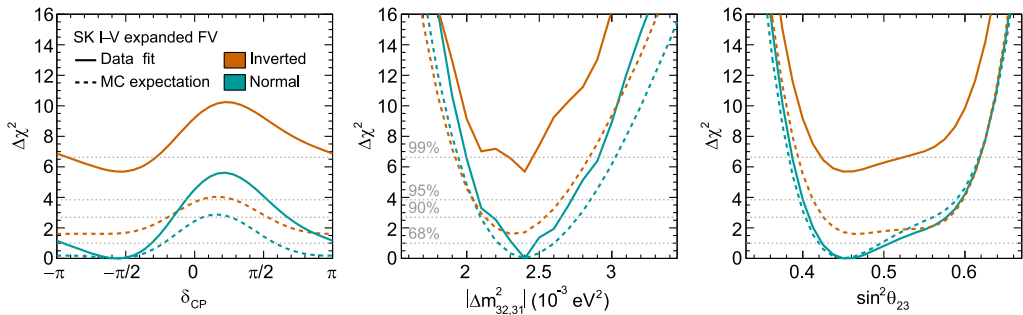
- 地球的电子数密度远低于太阳，对应的 MSW 过渡区被拉高至 ~ 100 MeV。
- 太阳中微子仅在高能区有约 3% 的日夜不对称效应。晚上事例率升高。



- 观测到大于 3σ 的迹象。
- 地球物质效应的证据。

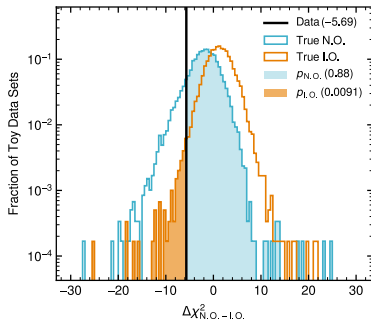
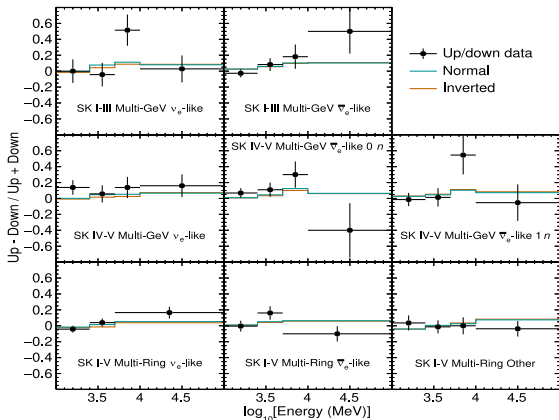
- Expected: $-1.72\% @ 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$
- Combined Fit: -2.74%

大气中微子



	$ \Delta m_{32,31}^2 [10^{-3} \text{eV}^2]$	$\sin^2 \theta_{23}$	δ_{CP}	$\Delta \chi_{\text{IO-NO}}^2$
Normal	2.40	0.45	-1.75	5.69
Inverted	2.40	0.45	-1.75	

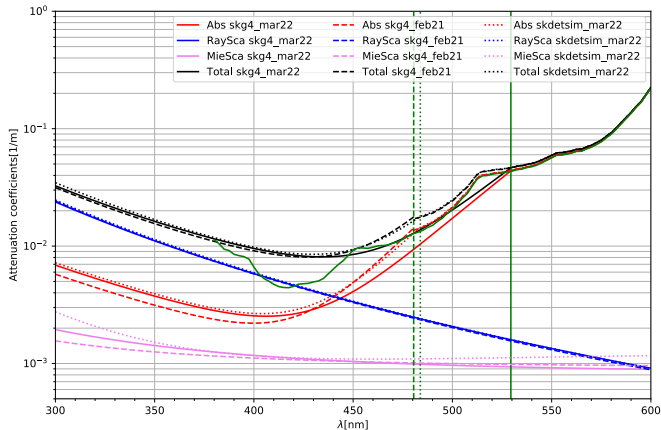
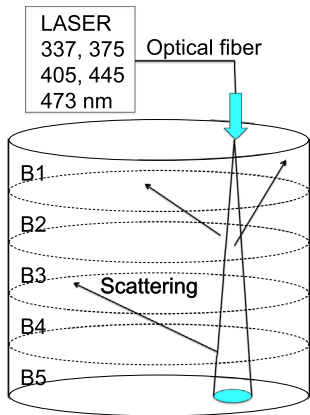
- ① 使用了 $\sin^2 \theta_{13} = 0.0220 \pm 0.0007$ 的约束, δ_{CP} 拟合结果更接近 $\pi/2$ 。
- ② SK 的结果和其他实验在 90% 的置信度符合。



- 中微子质量正序和反序区分度有限。
- 统计误差占主导。

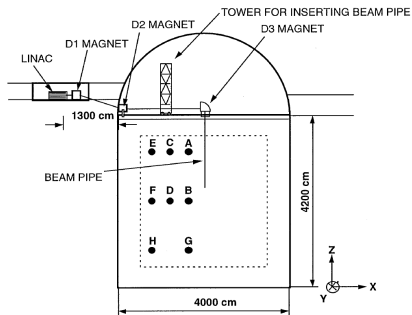
- 正序和反序区分度低
- $CL_s = \frac{p_{IO}}{1-p_{NO}}$
- 置信度 92.3% 倾向于正序

探测器刻度

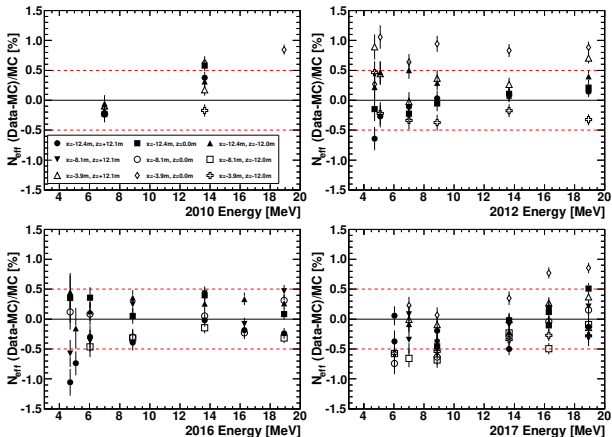
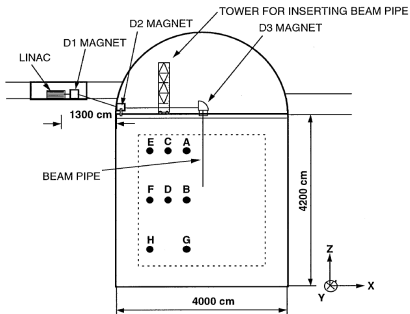


- 对吸收，Mie 散射，Rayleigh 散射函数分别参数化。
- 使用多个固定波长的激光器入射，调整 MC 中的上述参数使得和数据吻合。

- SK 使用蒙卡估计能量分辨率及不确定度，需要蒙卡和探测器的能标符合。
- 直线加速器得单能电子
- X-Z 平面固定点向下出射
- 4.4 MeV 到 18.9 MeV 单能



- SK 使用蒙卡估计能量分辨率及不确定度，需要蒙卡和探测器的能标符合。
- 直线加速器得单能电子
- X-Z 平面固定点向下出射
- 4.4 MeV 到 18.9 MeV 单能



总结展望



- ① SK 运行 25 年，积累了大量太阳 (50/天) 和大气 (10/天) 中微子事例。



- ① SK 运行 25 年，积累了大量太阳 (50/天) 和大气 (10/天) 中微子事例。
- ② 25 年间探测器经过多次升级，对探测器的理解完全。
 - 中方贡献电子学时钟、触发。



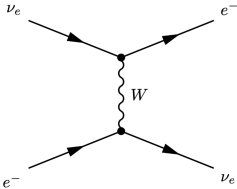
- ① SK 运行 25 年，积累了大量太阳 (50/天) 和大气 (10/天) 中微子事例。
- ② 25 年间探测器经过多次升级，对探测器的理解完全。
 - 中方贡献电子学时钟、触发。
- ③ 给出了最精确的 ^8B 和大气中微子振荡测量。

- 最高能太阳中微子 hep ：最低通量，被 ${}^8\text{B}$ 中微子覆盖。
 - 最后一种还未被发现的太阳中微子。
 - 检验非标准太阳模型 (pp 链中 hep 中微子分布更宽)。
- 通过改进重建方法和优化刻度，提高能量分辨率。



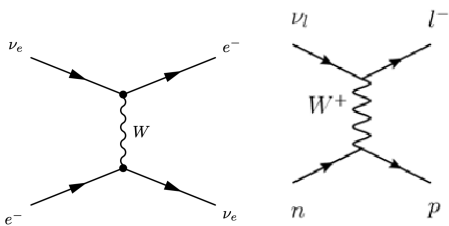
末态 e^- 可测，初态 e^- 静止， ν_e 方向指向太阳。

$$E_\nu = \frac{m_e^2}{2(E_e - P_e \cos \theta)}$$



末态 e^- 可测，初态 e^- 静止， ν_e 方向指向太阳。

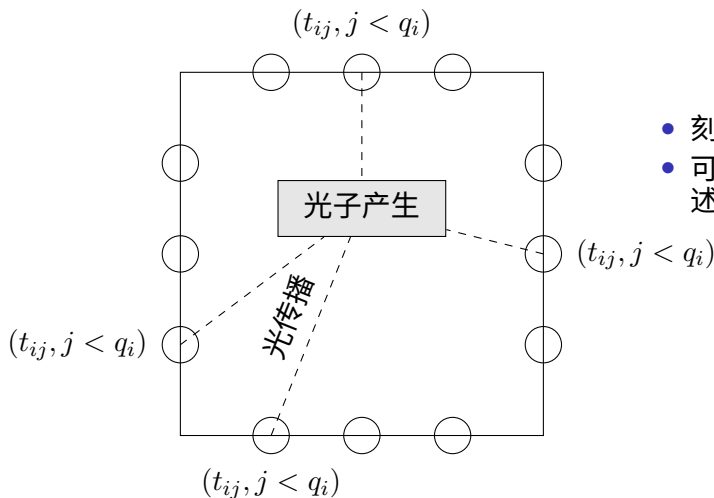
$$E_\nu = \frac{m_e^2}{2(E_e - P_e \cos \theta)}$$



两个末态 l^- 和 p 都可测，初态 n 静止。

- 19 MeV 附近，以概率形式尝试求解

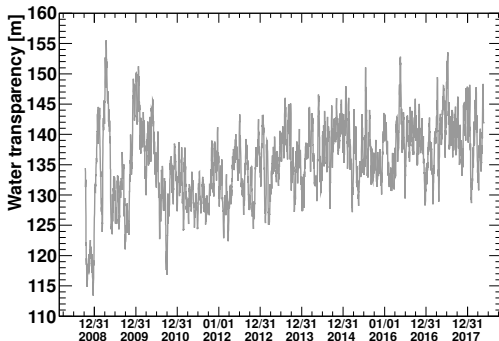
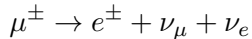
使用轻子与质子的四动量更好地约束入射中微子四动量。



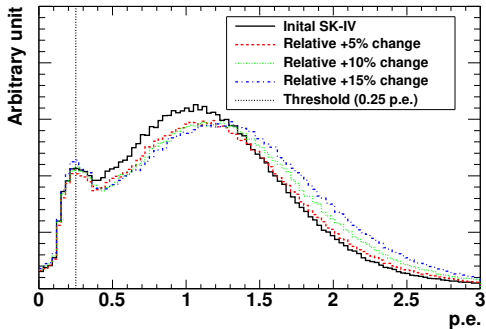
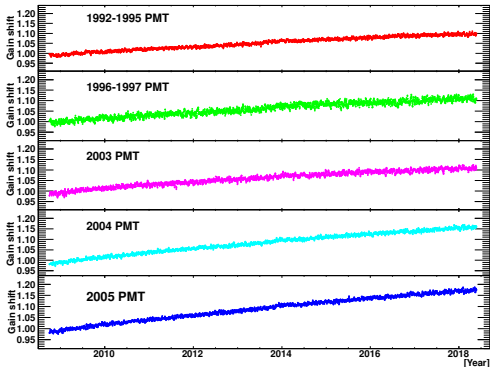
- 刻度 → 精调蒙卡参数
- 可以解析地用微分方程描述光场吗?
- 解析建模光的散射和吸收
- 高阶项使用高效的数值积分 (arXiv:2401.15698)

BackUp: 超级神冈

- 水循环：除放射性杂质（Rn），增加透明度。
- 使用激光刻度系统测量散射与吸收。
- 使用停止在探测器中的缪子测量。

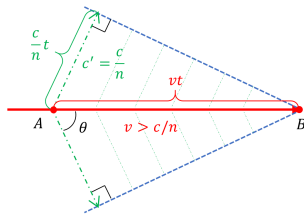
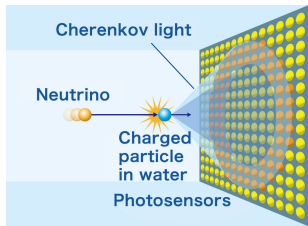


- PMT 的增益缓慢增大，不同年度生产的 PMT 的趋势一致。



切伦科夫光产生经历两个阶段：

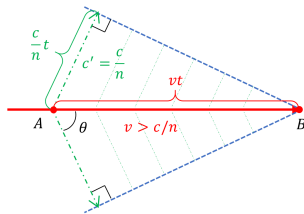
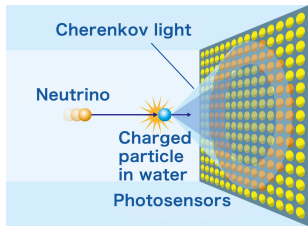
- 带电粒子使介质原子极化
- 退极化的电磁辐射相干



$$\cos \theta = \frac{ct/n}{vt} = \frac{c}{nv} = \frac{1}{\beta n}$$

切伦科夫光产生经历两个阶段：

- 带电粒子使介质原子极化
- 退极化的电磁辐射相干



$$\cos \theta = \frac{ct/n}{vt} = \frac{c}{nv} = \frac{1}{\beta n}$$

- 带电粒子在介质中损失能量减速
- 速度 $v < c/n$ 时，停止辐射切伦科夫光
- 切伦科夫“光环”

续本达

BackUp: 超级神冈

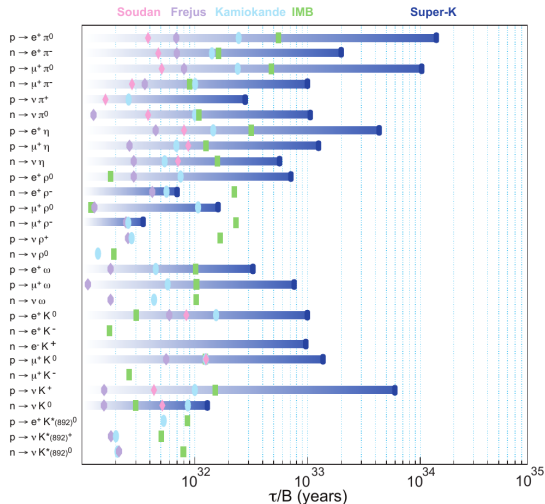
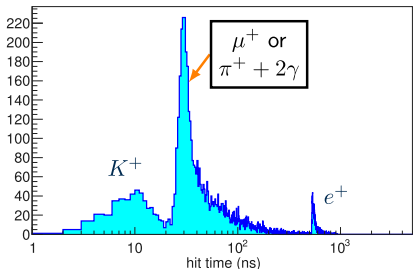
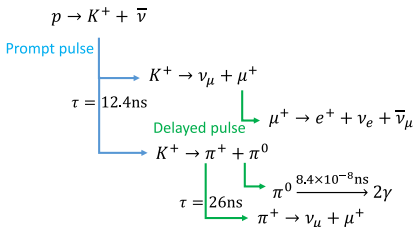
BackUp: Solar neutrino 事例判选与本底

BackUp: 低能事例重建

BackUp: 中方贡献

BackUp: 太阳中微子

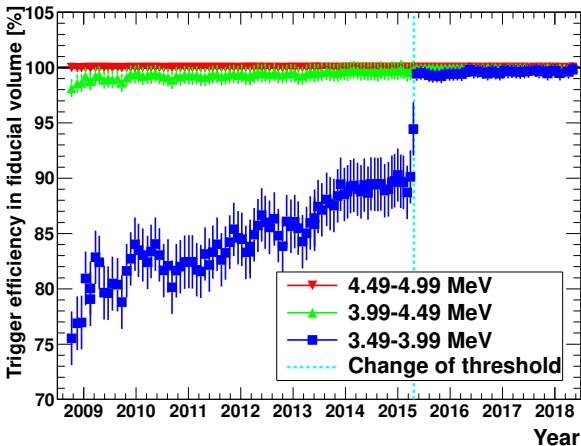
BackUp: LINAC 刻度



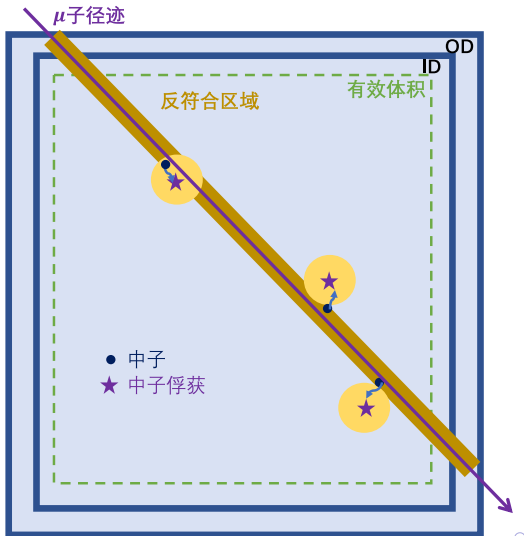
● 精确重建次级粒子可以提升鉴别效率，进一步提高统计量。

BackUp: Solar neutrino 事例判选与本底

- 把触发条件从 34 PMT 降到 31，以覆盖更多 MSW 能量过渡区。



- 缪子速率 2 Hz
- 事例与前一个缪子多重符合：
 - ① 与轨迹的距离
 - ② 时间差
 - ③ 缪子簇射判断：如果能测量中子会很有帮助



续本达

BackUp: 超级
神冈

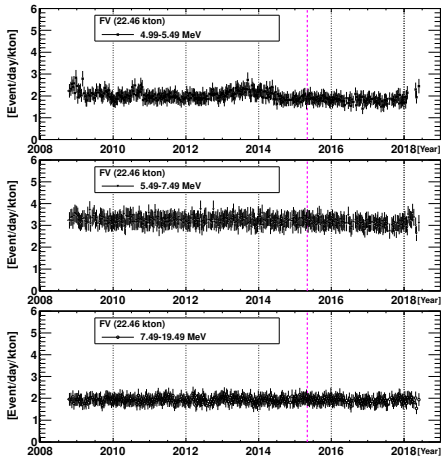
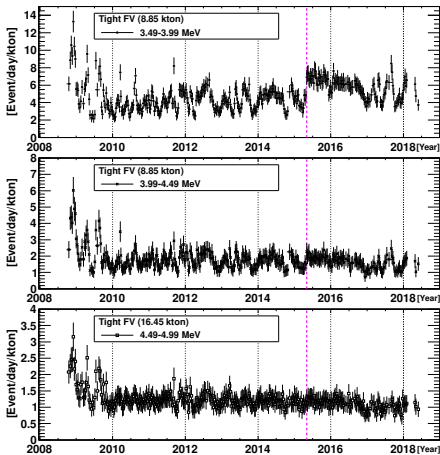
BackUp: Solar
neutrino 事例
判选与本底

BackUp: 低能
事例重建

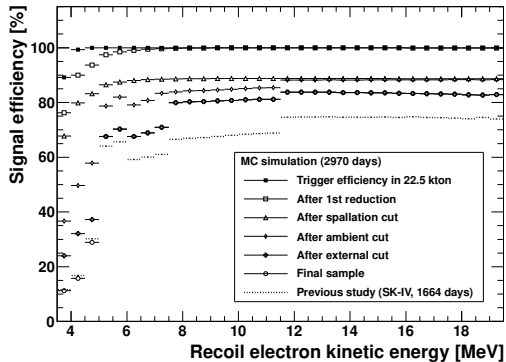
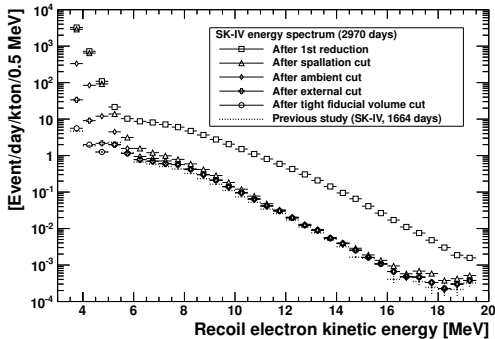
BackUp: 中方
贡献

BackUp: 太阳
中微子

BackUp:
LINAC 刻度



- 探测器稳定，除氡效果明显，触发提升低能效率

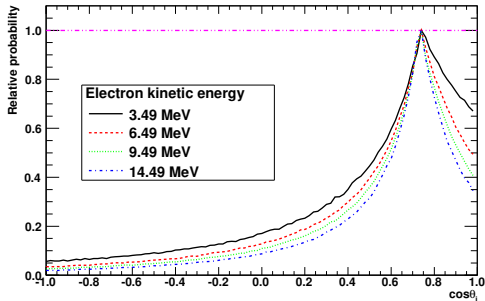
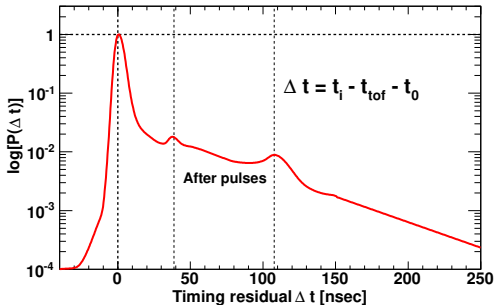


- 散裂 cut 主导

BackUp: 低能事例重建

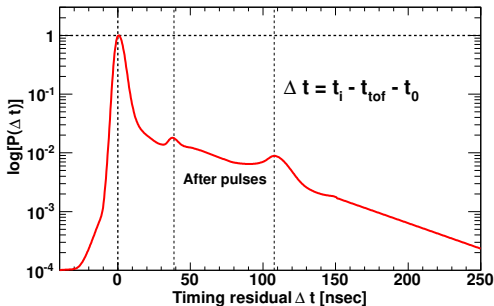
光子击中 PMT 时间 t_i 扣除飞行时间 t_{tof} 的残差的分布 $P(\Delta t)$ 。

顶点指向点亮 PMT 的方向 \mathbf{n}_i 与电子方向 \mathbf{n}_e 的夹角 θ_i 分布。

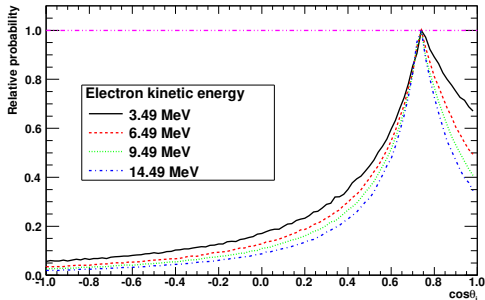


¹使用 SK-I LINAC 刻度数据获得。

光子击中 PMT 时间 t_i 扣除飞行时间 t_{tof} 的残差的分布 $P(\Delta t)$ 。

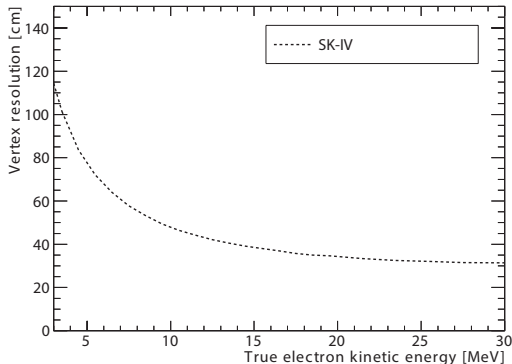


顶点指向点亮 PMT 的方向 \mathbf{n}_i 与电子方向 \mathbf{n}_e 的夹角 θ_i 分布。

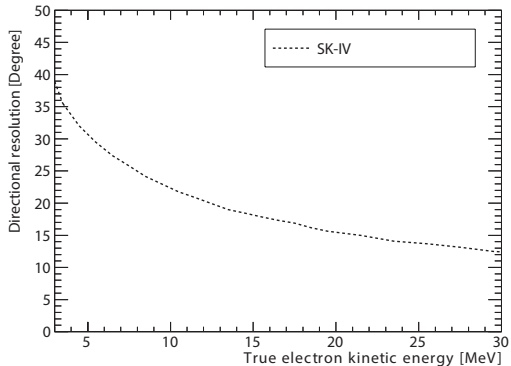


- ① 使用 $P(\Delta t)$ ¹ 构造 Likelihood，进行最大似然估计，通过模拟退火法寻找顶点位置全局最优解。
- ② 使用 θ_i 分布构造 Likelihood，寻找电子方向的最优解。

¹使用 SK-I LINAC 刻度数据获得。

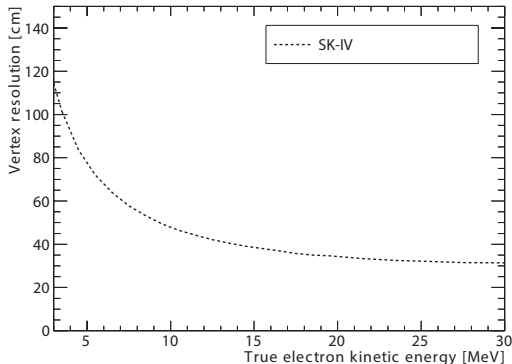


顶点位置分辨率

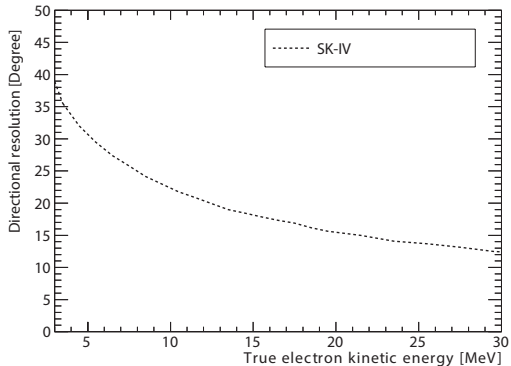


方向角分辨率

²需要使用刻度数据调整 MC 与数据一致。



顶点位置分辨率

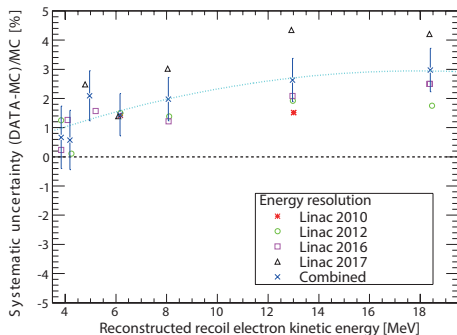
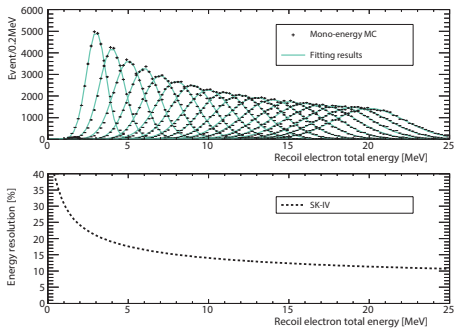


方向角分辨率

① 10 MeV 典型值: 50 cm@10 MeV; 23°@10 MeV

刻度数据和 MC² 对比获得分辨率的不确定度: 单点, 单向, 单能电子源。

²需要使用刻度数据调整 MC 与数据一致。



使用和探测器一致的 MC 计算 $\sigma_E(E)$

$$\sigma_E = -0.0525 + 0.3162\sqrt{E} + 0.04572E$$

- 能量分辨率及不确定度贡献到能量相关的系统不确定度。
- 单能电子谱形是寻找稀有事例的要素。

- 刻度数据和 MC 比较获得能量分辨率的不确定度

BackUp: 中方贡献

围绕 10 至 30 MeV 能区的物理展开：超新星遗迹中微子寻找。

① 强制触发获取中子氢俘获 2.2 MeV 信号（电子学组）

- First study of neutron tagging with a water Cherenkov detector
- <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2009.03.002>

围绕 10 至 30 MeV 能区的物理展开：超新星遗迹中微子寻找。

① 强制触发获取中子氢俘获 2.2 MeV 信号（电子学组）

- First study of neutron tagging with a water Cherenkov detector
- <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2009.03.002>

② 基于中子标记，对水散裂本底产物的测量（张洋）

- First measurement of radioactive isotope production through cosmic-ray muon spallation in Super-Kamiokande IV
- <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.012004>

围绕 10 至 30 MeV 能区的物理展开：超新星遗迹中微子寻找。

① 强制触发获取中子氢俘获 2.2 MeV 信号（电子学组）

- First study of neutron tagging with a water Cherenkov detector
- <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2009.03.002>

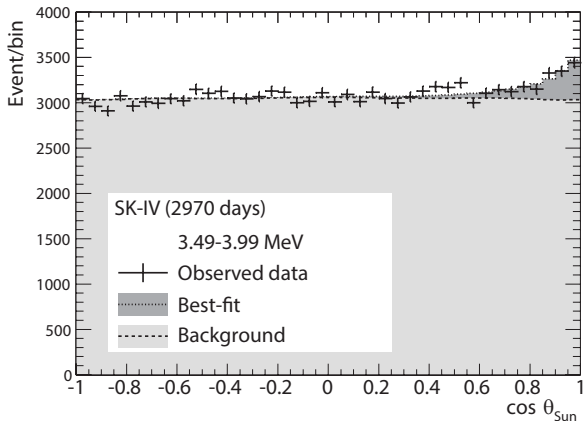
② 基于中子标记，对水散裂本底产物的测量（张洋）

- First measurement of radioactive isotope production through cosmic-ray muon spallation in Super-Kamiokande IV
- <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.012004>

③ 基于中子标记，测量大气中微子-氧核中性流反应截面

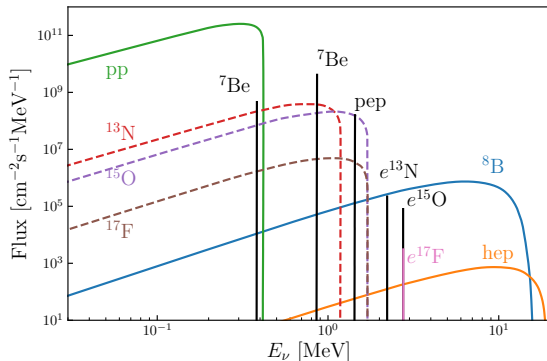
- Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current quasielastic cross section using atmospheric neutrinos at Super-Kamiokande
- <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.032005>

BackUp: 太阳中微子

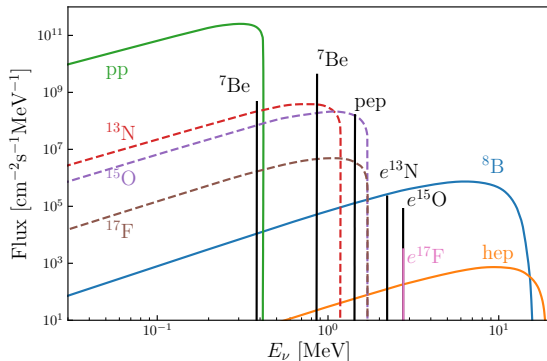


- 放射性是主要本底，除氡是关键因素

- hep ν 通量极低，各个实验目前只有通量上限结果（不确定度 30%）



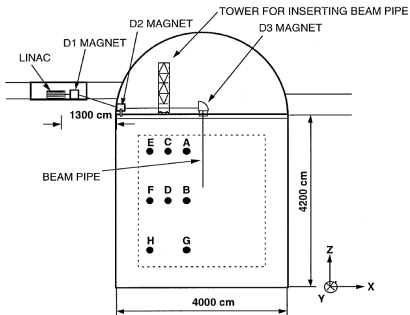
- hep ν 通量极低，各个实验目前只有通量上限结果（不确定度 30%）



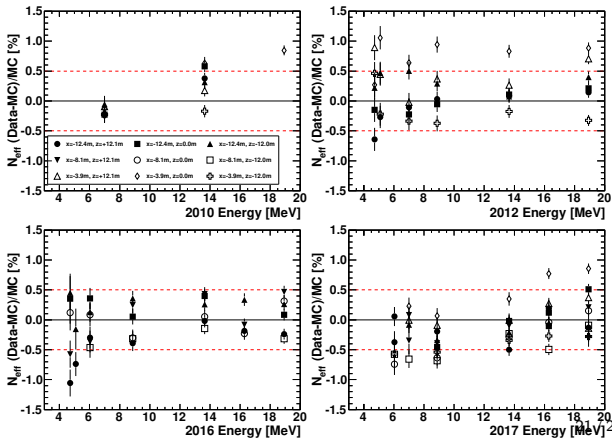
- 3 MeV 是从真实到物质效应振荡模式转换的中点。
- 检验 MSW 效应，新物理。

BackUp: LINAC 刻度

- 方向: -Z

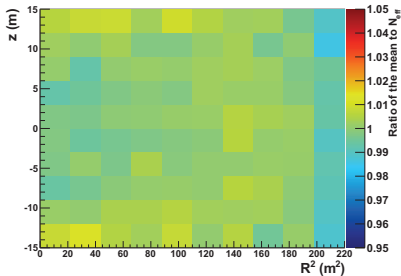


- 位置: X-Z 平面上的 9 个固定点
- 能量: 从 4.4 MeV 到 18.9 MeV
- 电子能标刻度: MC 和 DATA 的修正光子数



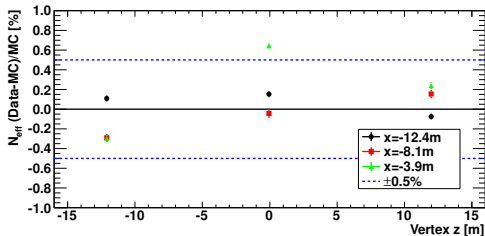
在计数的基础上修正

- ① 反射与散射的延迟
- ② PMT 暗噪声
- ③ PMT 的增益与量子效率差异



蒙卡

- 能量非均匀性小于 0.5%



LINAC