

Super-KamiokaNDE 太阳中微子最新进展

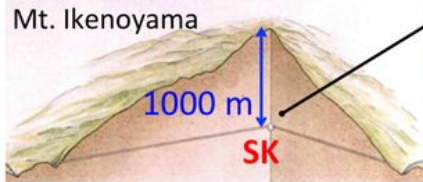
实时太阳中微子观测 25 年 1996–

续本达

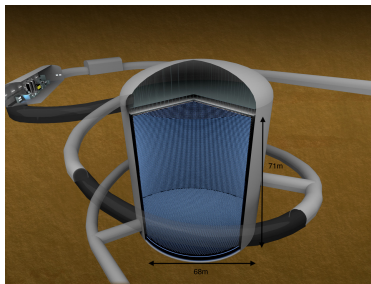
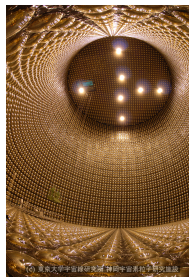
清华大学
工程物理系
高能物理研究中心

2024-01-21 中山大学

神冈



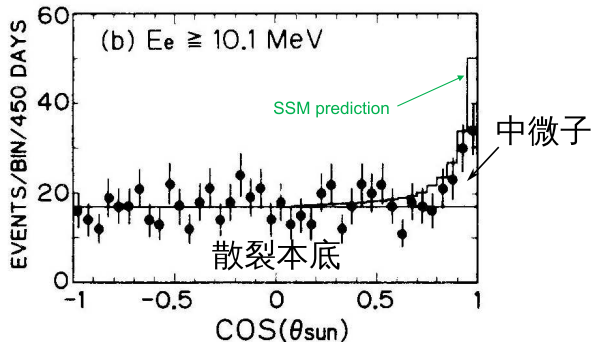
神冈的进化：神冈 ⇒ 超级神冈 ⇒ 顶级神冈



	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

- 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

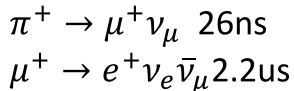


Observed number of solar neutrinos was about 50.

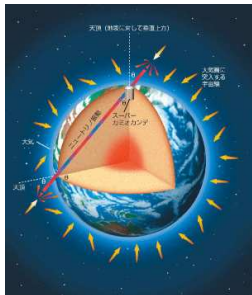
It was almost half of the expectation from the

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

- ν_μ 消失提供“太阳中微子缺失”的解。

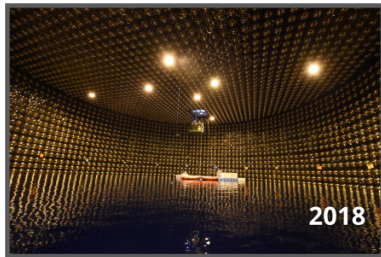
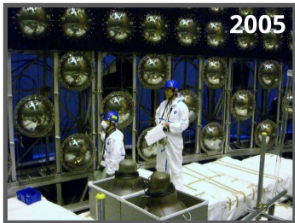
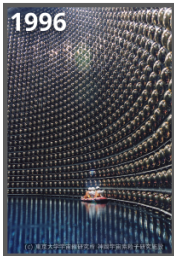
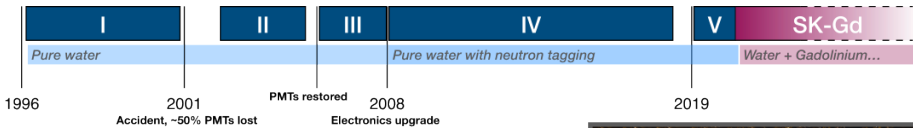


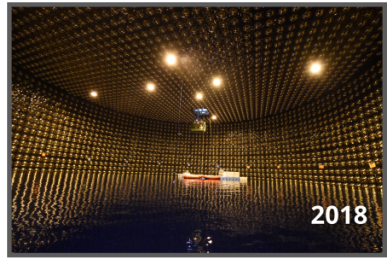
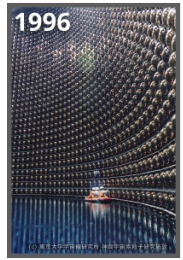
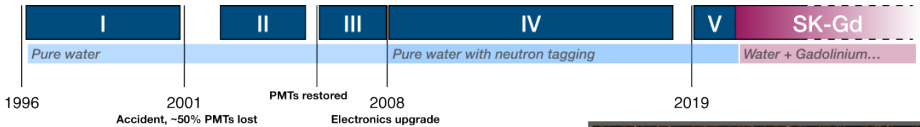
- ν_μ ν_e 比例应为2



- 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

超级神冈

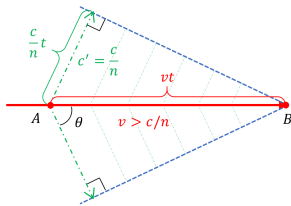
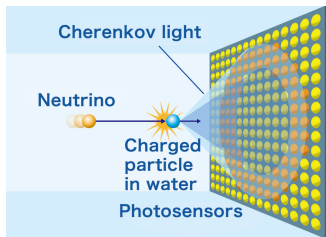




- 今天探讨 arXiv:2312.12907 Solar neutrino measurements using the full data period of Super-Kamiokande-IV

切伦科夫光的产生包含两个阶段：

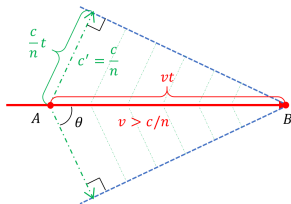
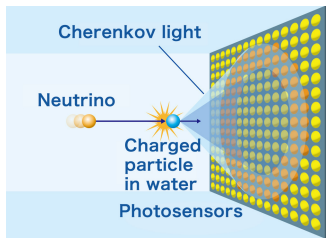
- 带电粒子使得介质的原子极化；
- 退极化过程发出的电磁辐射相干形成切伦科夫辐射



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

切伦科夫光的产生包含两个阶段：

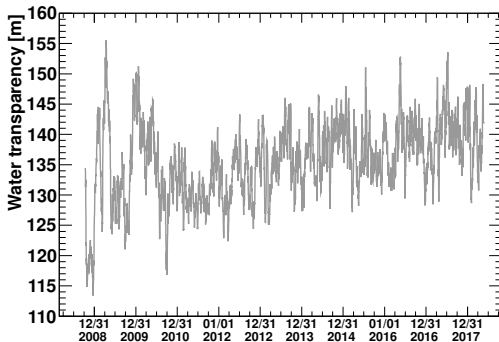
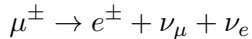
- 带电粒子使得介质的原子极化；
- 退极化过程发出的电磁辐射相干形成切伦科夫辐射



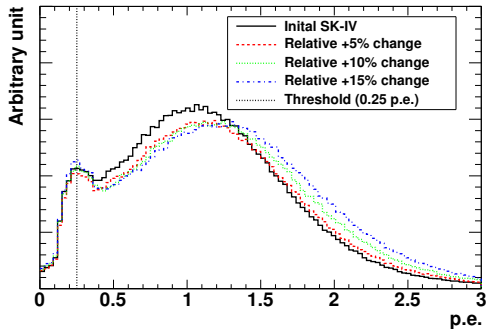
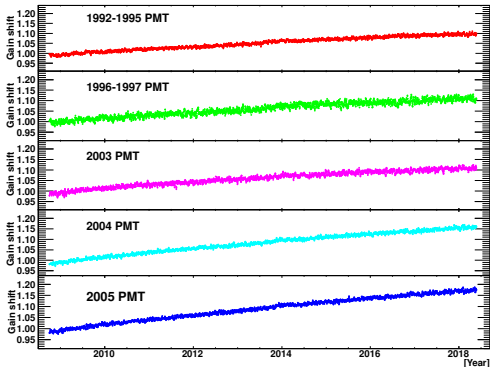
$$\cos \theta = \frac{ct/n}{vt} = \frac{c}{nv} = \frac{1}{\beta n} \quad (1)$$

由于带电粒子在介质中不断减速，当速度 $v < c/n$ 时，带电粒子运动停止辐射切伦科夫光，因此切伦科夫光往往是环状的（在 θ 与 $\theta + \Delta\theta$ 的圆锥区域内， $\Delta\theta$ 反映了粒子的减速情况。

- 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。

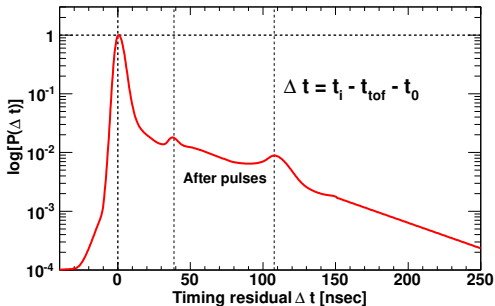


- PMT 的增益缓慢增大，不同年度生产的 PMT 的趋势一致。

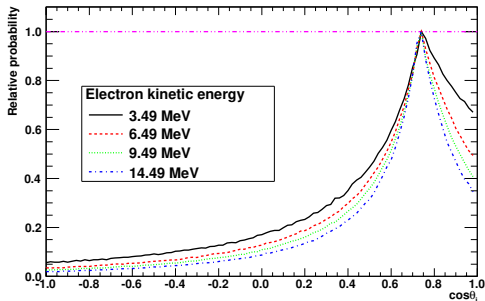


重建与刻度

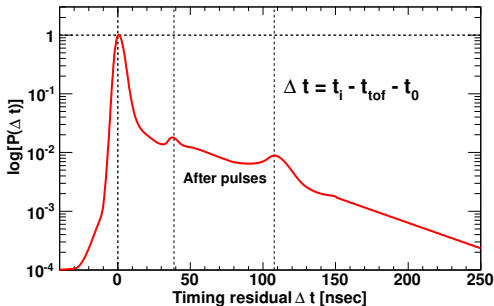
- 扣除飞行时间的残差的分布。



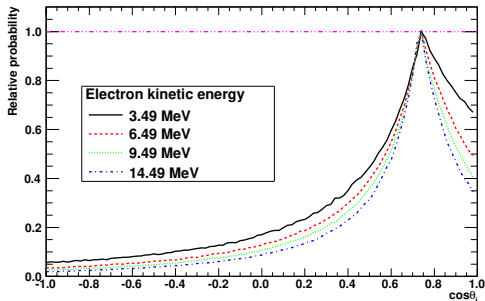
- 顶点指向点亮 PMT 与电子方向的夹角。



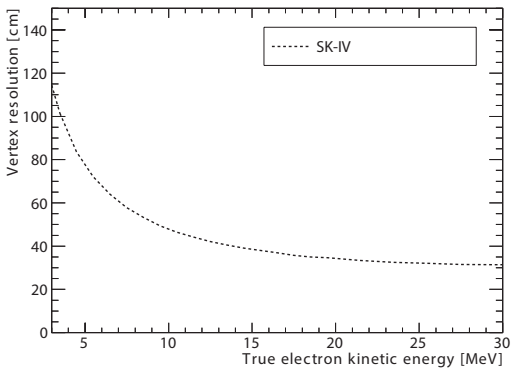
- 扣除飞行时间的残差的分布。



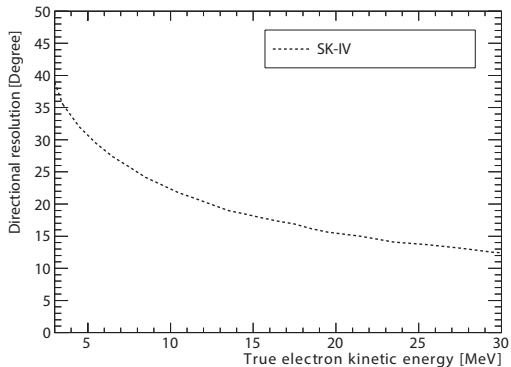
- 顶点指向点亮 PMT 与电子方向的夹角。



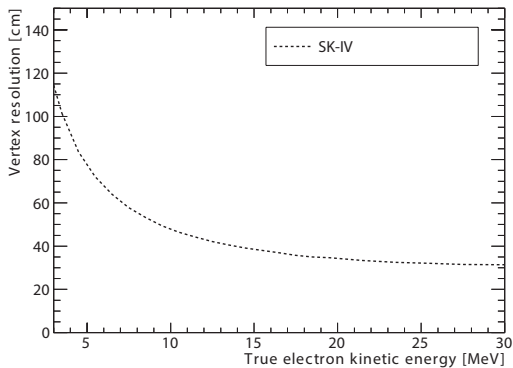
- 进行最大似然估计，通过模拟退火法寻找全局最优解。



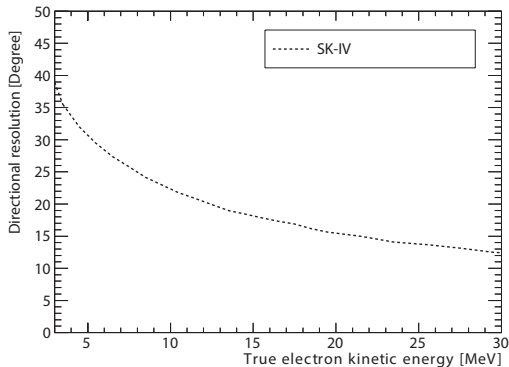
顶点分辨率



角分辨率



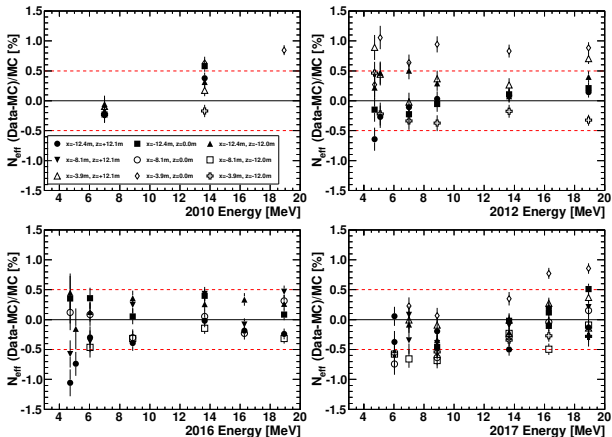
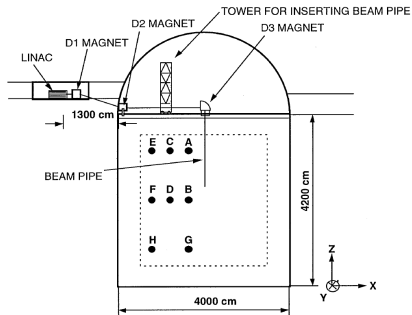
顶点分辨率



角分辨率

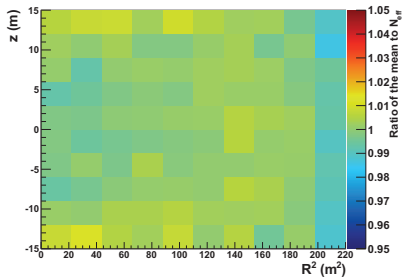
- 需要实际数据验证：单点，单向，单能电子源。

- 能量从 4.4 MeV 到 18.9 MeV
- 电子能标刻度



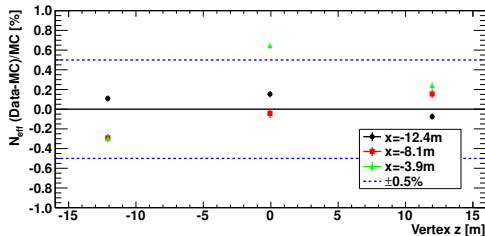
在计数的基础上修正

- 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



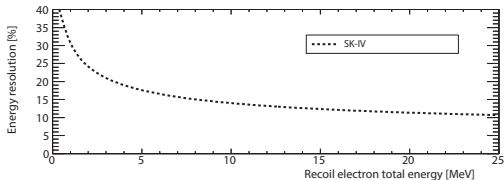
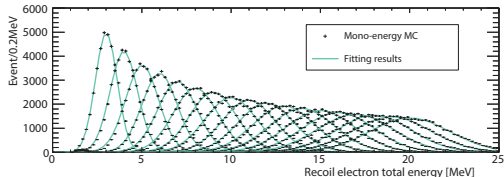
蒙卡

- 能量非均匀性小于 0.5%

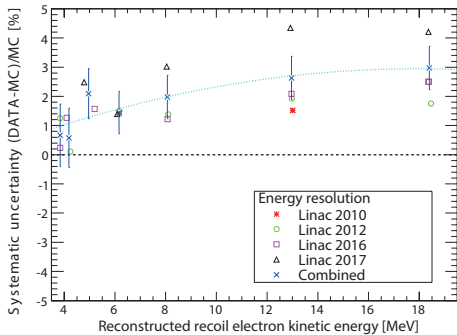


LINAC

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

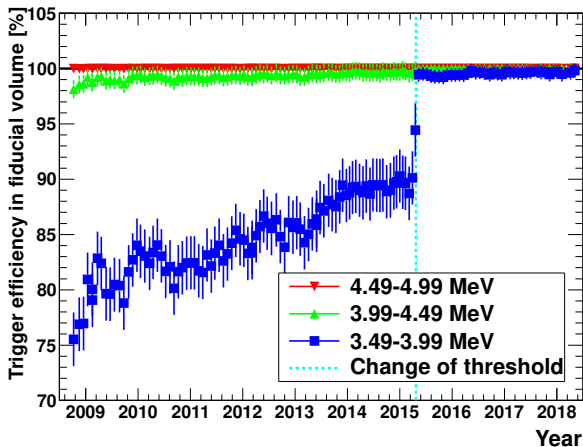


- 单能电子谱形是寻找稀有事例的要素。

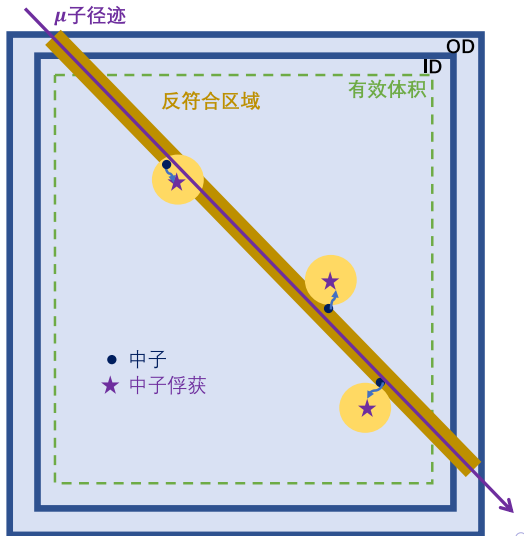


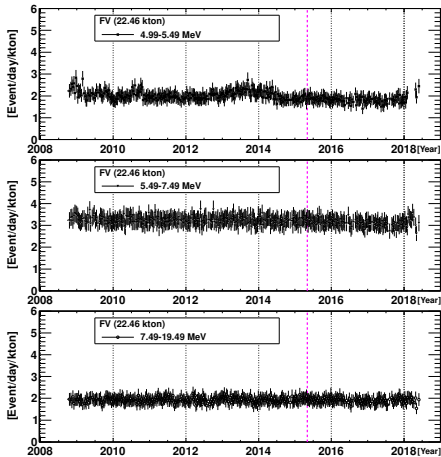
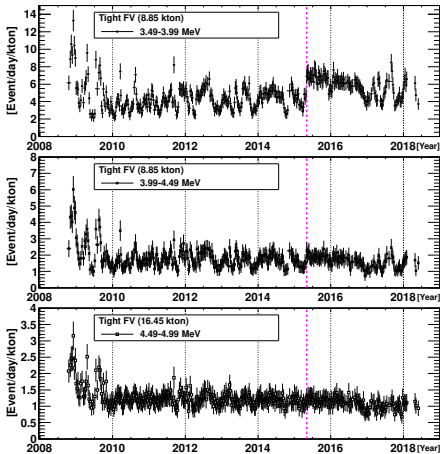
事例判选与本底

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

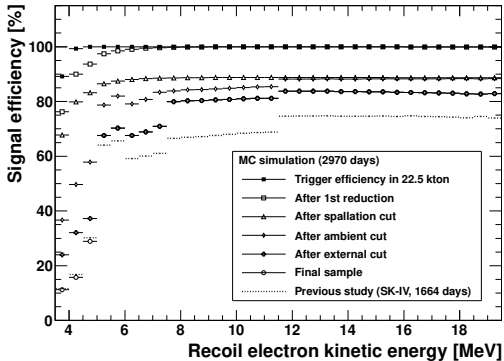
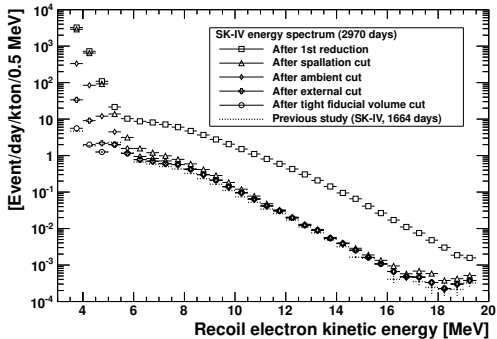


- 缪子速率 2 Hz
- 事例与前一个缪子多重符合：
 - ① 与轨迹的距离
 - ② 时间差
 - ③ 缪子簇射判断：如果能测量中子会很有帮助



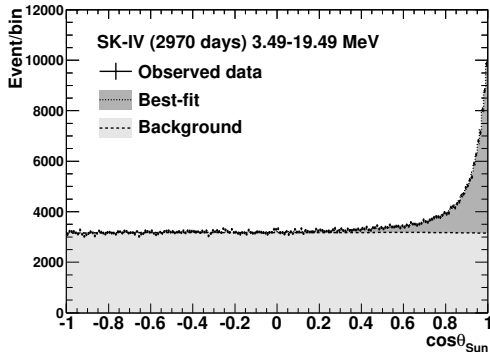


- 探测器稳定，除氦效果明显，触发提升低能效率



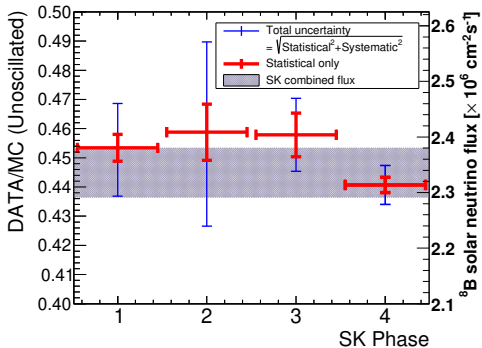
- 散裂 cut 主导

太阳中微子测量

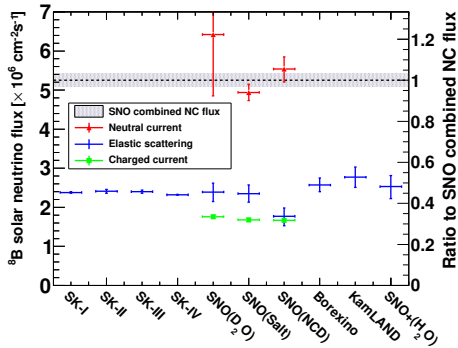


$$65443_{-388}^{+390}(\text{stat.}) \pm 925(\text{syst.})$$

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

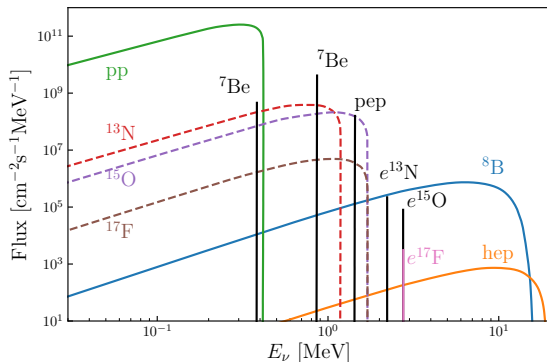


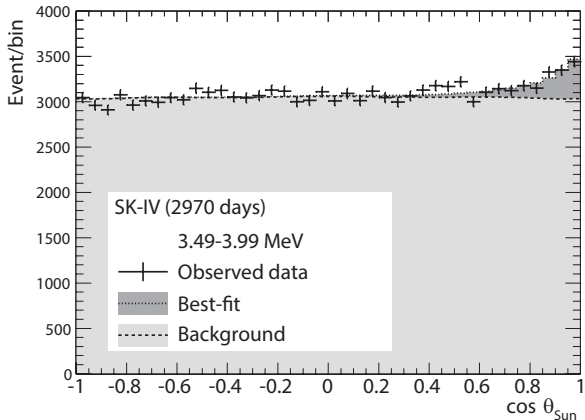
^8B 测量到了新的精度



中微子能谱 (参考许勋杰报告)

- 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。



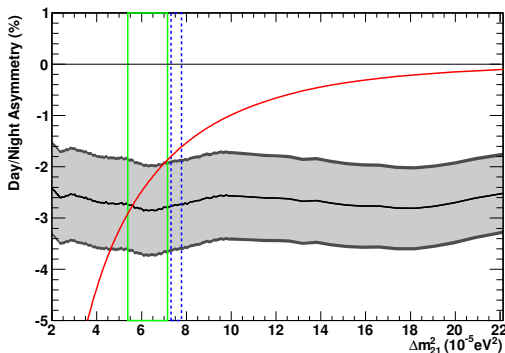
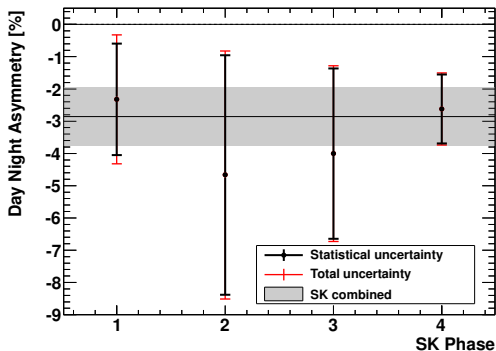


- 放射性是主要本底，除氩是关键因素

- 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。

地球物质效应检验 (参考许勋杰报告)

- 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。

中方贡献

- 加合作组已近 20 年



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>

总结展望



- ① SK 运行近 25 年，积累了大量太阳中微子事例。



- ① SK 运行近 25 年，积累了大量太阳中微子事例。
- 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 运行近 25 年，积累了大量太阳中微子事例。
- 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 测量结果。



- ① SK 运行近 25 年，积累了大量太阳中微子事例。
- 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 ${}^8\text{B}$ 测量结果。
- ④ 发现了地球 MSW 物质效应的迹象。

hep 中微子最高能最低通量：最后一块拼图

Super-KamiokaNDE
太阳中微子最新进展

续本达

神冈

超级神冈

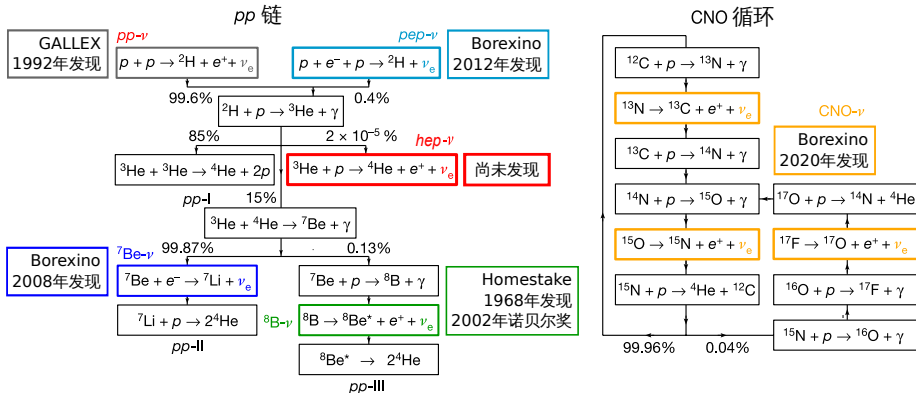
重建与刻度

事例判选与
本底

太阳中微子
测量

中方贡献

总结展望



展望：动力学解谱（参考王喆报告）

Super-KamiokaNDE
太阳中微子最新进展

续本达

神冈

超级神冈

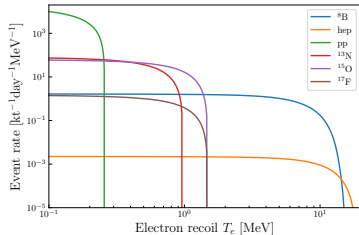
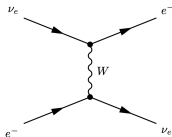
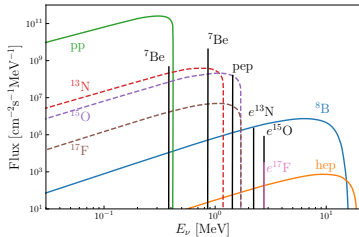
重建与刻度

事例判选与本底

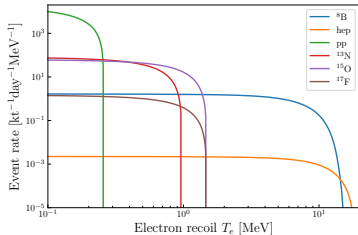
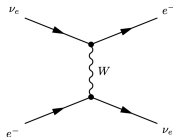
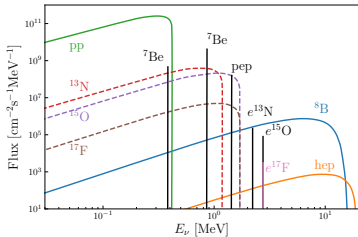
太阳中微子测量

中方贡献

总结展望



展望：动力学解谱（参考王喆报告）

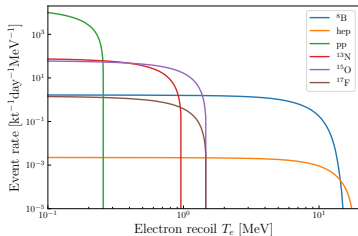
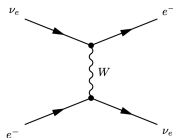
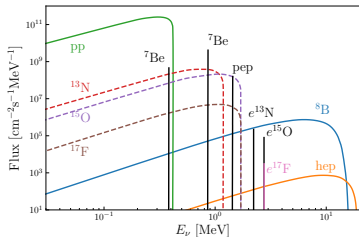


← solve kinetics?

$$E_\nu = m_e^2 / [2(E_e - P_e \cos \theta)] \quad (2)$$

Recoil electron energy, momentum (E_e, P_e) , mass m_e , neutrino energy E_ν , scattering angle θ

展望：动力学解谱（参考王喆报告）



← solve kinetics?

$$E_\nu = m_e^2 / [2(E_e - P_e \cos \theta)] \quad (2)$$

Recoil electron energy, momentum (E_e, P_e), mass m_e , neutrino energy E_ν , scattering angle θ

SK solar 2016 comment

Unfortunately multiple Coulomb scattering prevents the kinematic reconstruction of the neutrino energy in neutrino-electron elastic scattering interactions (at upturn).

- 19 MeV 附近，以概率形式尝试求解