续本达

神冈 超级神冈 重 事本 太测 子 例底 阳量 方 既 子 式 展 望

# 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

续本达

#### 神区

超级神冈 重建与刻度 事本 太测 中 方 天 展 望 3

神冈

・ロ・・西・・ヨ・・ヨ・ シック

2/35

## 神冈地下实验室



续本达

3/35

续本达

#### 神区

超级神冈 重建与刻度 事本() 如子 太)测中微子 太)测中方 贡献 总结展望

# 神冈的进化:神冈 ⇒ 超级神冈 ⇒ 顶级神冈



	高	直径	质量	PMT	时间
Kamiokande	$16.0\mathrm{m}$	$15.6\mathrm{m}$	$3{ m kt}$	$\sim 1000$	1983–1995
Super-Kamiokande	$41.4\mathrm{m}$	$39.3\mathrm{m}$	$50{\rm kt}$	$\sim 11200$	1996–
Hyper-Kamiokande	$64\mathrm{m}$	$74\mathrm{m}$	$260{\rm kt}$	$\sim 40000$	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



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

续本达

#### 神区



#### KamiokaND 太阳中微子 新进展

续本达

#### 神冈

## • $\nu_{\mu}$ 消失提供"太阳中微子缺失"的解。

 $\pi^+ 
ightarrow \mu^+ 
u_\mu$  26ns  $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu 2.2$ us

•*ν<sub>μ</sub> ν<sub>e</sub>* 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

续本达

神冈 超级神冈 重 事本 太测 中 总 病 阳量 贡 展 望

# 超级神冈

▲□▶ ▲□▶ ▲ 臣▶ ▲ 臣▶ ─ 臣 ─ のへで



续本达





续本达



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

## 实验原理: Cherenkov 辐射

KamiokaNDI 太阳中微子 新进展

续本达

神冈 超级神冈 重建与刻度 事本 太阳量 方 贡 配 立 贡 献 望

## 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



(1)

## 实验原理: Cherenkov 辐射

#### KamiokaNDE 太阳中微子最 新进展

续本达

## 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



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  $\theta = \theta + \Delta \theta$ 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。





神冈 超级神冈 重 事本 気測 生 例度 中微子 太阳 中 太子 献 望 纪结展 望

### • PMT 的增益缓慢增大,不同年度生产的 PMT 的趋势一致。



续本达

IF [2] 超建与刻度 事本 太测 中微子 成子 新献 望

重建与刻度

续本达

 $\Delta t = t_i - t_{tof} - t_0$   $\Delta t = t_i - t_{tof} - t_0$ 

• 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。

> Electron kinetic energy — 3.49 MeV

----- 6.49 MeV 9.49 MeV

----- 14.49 MeV

.................

probabil 1.0

Relative

0.6

0.4

0.2

0.0

# 

0.6 0.8 1.0 cosθ,



续本达

probabil  $\Delta \mathbf{t} = \mathbf{t}_{i} - \mathbf{t}_{tof} - \mathbf{t}_{0}$ [(1 ∇)] [0] 10<sup>-1</sup> Relative 0.8 Electron kinetic energy 3.49 MeV 0.6 ..... 6.49 MeV 9.49 MeV After pulses ----- 14.49 MeV 0.4 10<sup>-3</sup> 0.2 10-4 50 100 150 200 250 Timing residual A t [nsec] 0.0 0.8 1.0 COSA

夹角。

• 进行最大似然估计,通过模拟退火法寻找全局最优解。

• 扣除飞行时间的残差的分布。

顶点与方向重建

• 顶点指向点亮 PMT 与电子方向的

< □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > <

13/35

续本达

神冈 超级神冈 **重**事本 太测 中 点 原 田重 贡 展 京 展 望





< □ > < □ > < □ > < ⊇ > < ⊇ > < ⊇ > < ⊇ > < ⊇ > < ⊇ / 20 < 0 < 0 < 14 / 35

续本达

神冈 超级神冈 **重建与刻度** 事本太测中微 、 阳量 贡展 望 5 5





<ロト < 団ト < 巨ト < 巨ト < 巨ト 14/35



- 能量从 4.4 MeV 到 18.9 MeV
- 电子能标刻度

重建与刻度



15 / 35





э 16 / 35

٠

15 Vertex z [m]

+ x=-12.4m

+ x=-8.1m

+ x=-3.9m

10

±0.5%

重建与刻度

续本达

z (m)

10

-10

在计数的基础上修正

3 PMT 的增益与量子效率差异

120 140 160 100 200 220 蒙卡

R<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>)









#### 续本达

神冈 超级神冈 重建句刻度 事**你例判选与** 太阳中微子 中方贡献

# 事例判选与本底

・ロト < 団ト < 三ト < 三ト < 三 </li>
 ・ < □ > < < □ >





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







太阳中微子 测量 中方贡献 总结展望

- 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

事例判选与

本底





▲□▶ ▲□▶ ▲ □▶ ▲ □▶ ▲ □ ▼ の < ?





续本达

本底

#### 续本达

# 太阳中微子测量

23 / 35

## <sup>8</sup>B 中微子事例



续本达

太阳中微子

测量

$$\begin{split} & 65443^{+390}_{-388}(\text{stat.})\pm925(\text{syst.})\\ \Phi_{\text{B}} &= (2.314\pm0.014\pm0.040)\times10^6\text{cm/s} \end{split}$$

э

续本达

神冈 超级神冈 重事本 **太测** 中 方 天 展 望 纪 结 展







<ロト < 回 ト < 巨 ト < 巨 ト < 巨 ト 三 の Q (や 25 / 35



太阳中微子

测量

# 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。



## MSW 过渡区

4000 Event/bin 3500 CTably etetet +\*\* 3000 ++··\*+ 2500 2000 SK-IV (2970 days) 1500 3.49-3.99 MeV Observed data 1000 Best-fit 500 ----- Background C -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 <u>-</u>1  $\cos \theta_{Sun}$ 

• 放射性是主要本底,除氡是关键因素

27 / 35

・ 回 ト ・ ヨ ト ・ ヨ ト

续本达



- 神冈 超级神冈 重建与刻度 事本底 太阳中微子 测量
- 中方贡献 总结展望

# 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。

・ロ・・聞・・叫・ し・ しゃくり

# 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。

[0] minute Print 10/1

续本达

太阳中微子 测量

#### 续本达

# 中方贡献









神冈 超级神冈 重 事人 例判选与 京 低 中微子 大 測 **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

神冈 超级神冈 重建与刻度 一个微子 太测 中微子 **中方贡献** 总结展望 围绕 10 至 30 MeV 能区的物理展开:超新星遗迹中微子寻找。

❶ 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

#### 续本达

神冈 超重事本太测中 刻度 句 的底 阳量 贡 展 望







### ● SK 运行近 25 年,积累了大量太阳中微子事例。

续本达

总结展望

▲□▶▲□▶▲≡▶▲≡▶ ≡ のへ⊙

33 / 35





- SK 运行近 25 年,积累了大量太阳中微子事例。
- 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。

总结展望





- 1 SK 运行近 25 年,积累了大量太阳中微子事例。
- 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<sup>8</sup>B 测量结果。

总结展望

くして 山田 ふかん 山マ ふして





- 1 SK 运行近 25 年,积累了大量太阳中微子事例。
- 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<sup>8</sup>B 测量结果。

总结展望

④ 发现了地球 MSW 物质效应的迹象。

续本达

总结展望

## hep 中微子最高能最低通量:最后一块拼图



#### 续本达



## 展望:动力学解谱(参考王喆报告)



#### 续本达

## 展望:动力学解谱(参考王喆报告)



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

Recoil electron energy, momentum  $(E_e, P_e)$ , mass  $m_e$ , neutrino energy  $E_{\nu}$ , scattering angle  $\theta$ 

< □ > < □ > < □ > < ⊇ > < ⊇ > < ⊇ > < ⊇ > < ⊇ > < ⊇ < つ < ⊙ < ○ 35 / 35

#### 续本达

# 展望:动力学解谱(参考王喆报告)



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

Recoil electron energy, momentum ( $E_e, P_e$ ), mass  $m_e$ , neutrino energy  $E_{
u}$ , scattering angle heta

### SK solar 2016 comment

Unfortunately multiple Coulomb scattering prevents he 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