

# 太阳中微子

路浩奇

中科院高能物理研究所

中微子夏令营

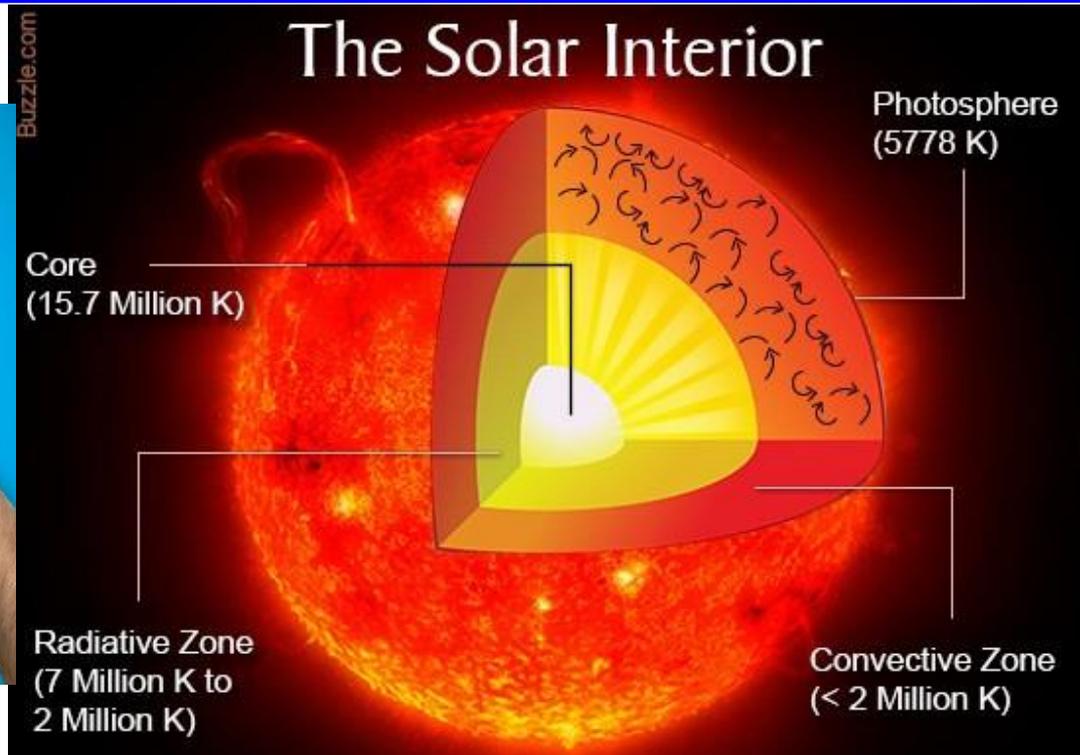
2024-07-06

# 提纲

---

- 太阳的研究
- 太阳中微子的探测
- 未来的实验
- 总结

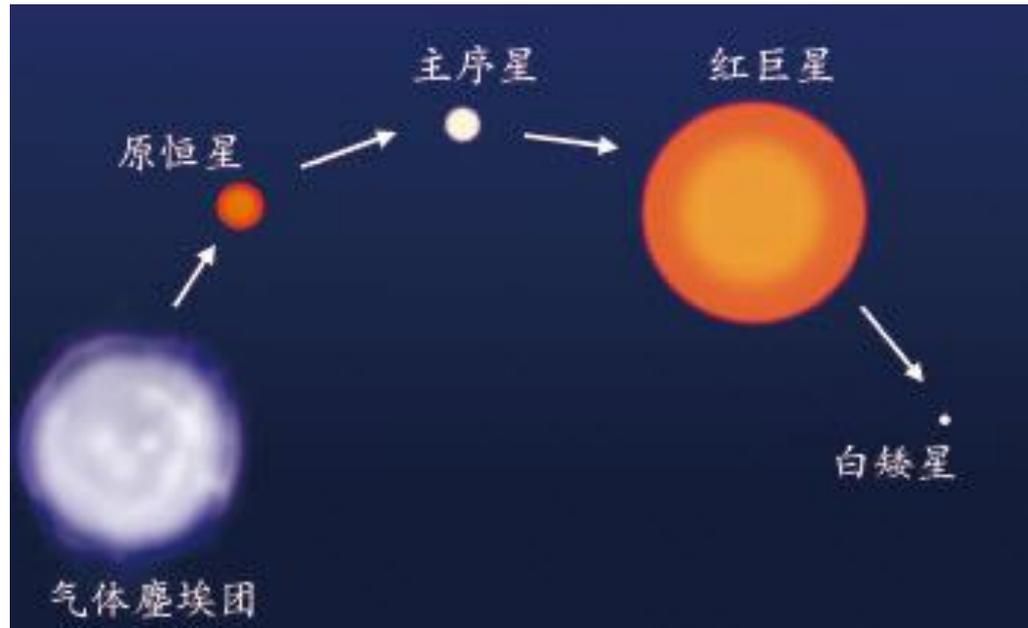
# 太阳



- 人们的好奇心去思考：
  - 希望去了解它内部的结构和演化规律；
  - 是否可以通过不同的方法来研究它。

# 1.1 标准太阳模型

- 标准太阳模型(Standard Solar Model)
  - 是基于太阳内部物理过程和核反应理论的理论模型;
  - 描述太阳内部结构、核反应过程中微子产生等方面的物理性质;
  - SSM基于一系列物理原理和假设, 包括核聚变反应、能量传输机制、热力学平衡等, 以及对太阳内部密度、温度和组成等参数的研究。



# 标准太阳模型

## 恒星演化基本理论

- 球对称
- 流体静力学平衡
- 能量：核反应，膨胀收缩
- 元素演化
- 核反应
- 对流
- 微观扩散等过程；

## 标准太阳模型输入参数

1. 核参数
  - 核反应、核截面 (?)
2. 太阳亮度 (✓)
3. 太阳年龄 (✓)
4. 状态方程
  - 压强、密度
5. 元素丰度
  - 光球总金属与氢的质量比 ( $Z/X$ )
6. 辐射透明度
  - 化学组分、原子过程

太阳质量

$$M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{ g}$$

在  $t=0$  时，具有均匀的成分，演化要求在

$$\tau_{\odot} = 4.57 \times 10^9 \text{ 年}$$

匹配一些参数，例如，光度

$$L_{\odot} = 3.8418 \times 10^{33} \text{ erg/s}$$

半径

$$R_{\odot} = 6.9598 \times 10^{10} \text{ cm}$$

太阳表面的金属与氢的质量比

$$Z/X \sim 0.02$$

引力时间尺度：引力能与亮度的比值

$$t_{\text{gravity}} \approx \frac{GM_{\odot}^2}{R_{\odot}L_{\odot}} \approx 10^7 \text{ 年}$$

原子时间尺度：光子随机走出太阳核心

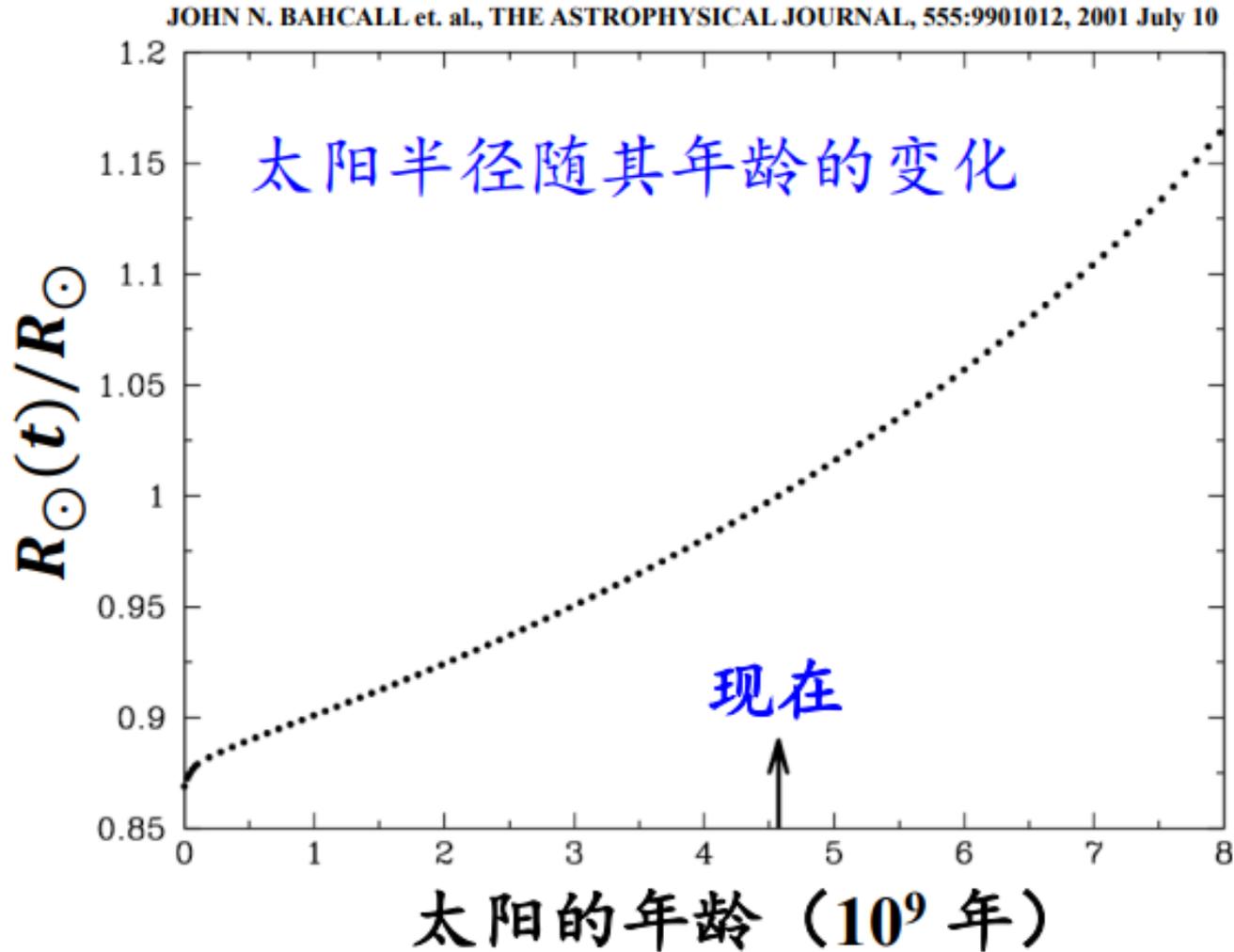
$$\lambda \sim 0.01 \text{ cm} \rightarrow t_{\text{atmoic}} \sim \left(\frac{R_{\odot}}{\lambda}\right)^2 \frac{\lambda}{c} \sim 10^5 \text{ 年}$$

核时间尺度：

$$t_{\text{nuclear}} \approx 0.7\% \times 10\% \times \frac{M_{\odot}c^2}{L_{\odot}} \sim 10^{10} \text{ 年}$$

质子质能转化率 变为红巨星的质量变化

# 标准太阳模型

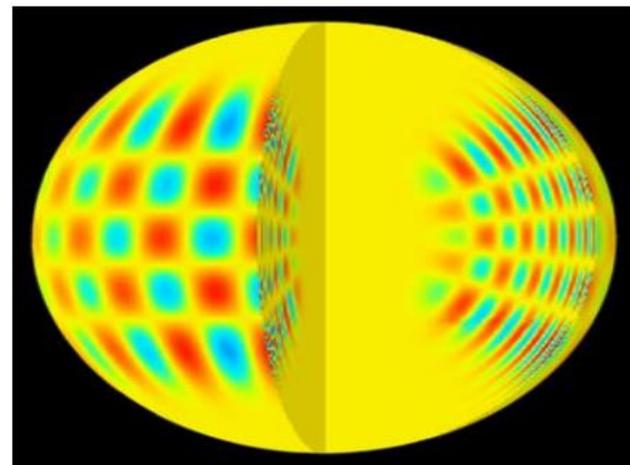
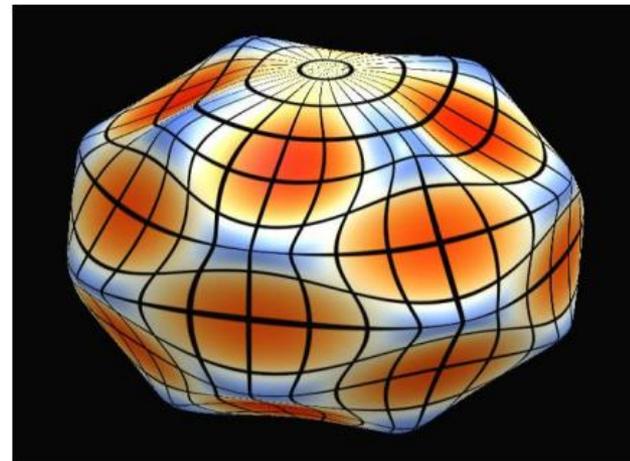


# 1.2 太阳内部结构探测--日震学

- 太阳日震学是一种类似地球地震学的方法，通过分析太阳表面的震荡波，可以揭示太阳内部的温度、密度、压力和运动状态等信息。
- 研究恒星的振动；
  - 特征震动模式：驻波
  - 特征震动的数学描述；
  - 球对称系统的波动方程，分离变量解

$$A(r, \theta, \varphi, t) = \sum_{n,l,m} R_{l,n}(r) Y_{l,m}(\theta, \varphi) \exp(i\omega_{l,m,n}t)$$

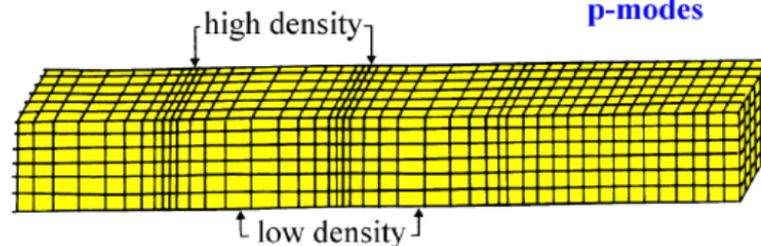
- 流体静力学平衡 + 微扰 + 绝热



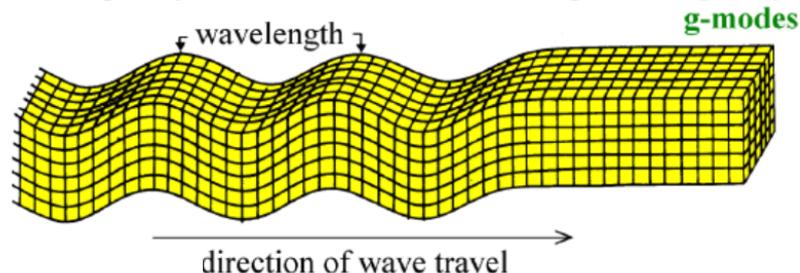
# 1.2 太阳内部结构探测--日震学

- 恒星的振动
- 波的分类
  - 压力驱动: p模式
  - 重力驱动: g模式

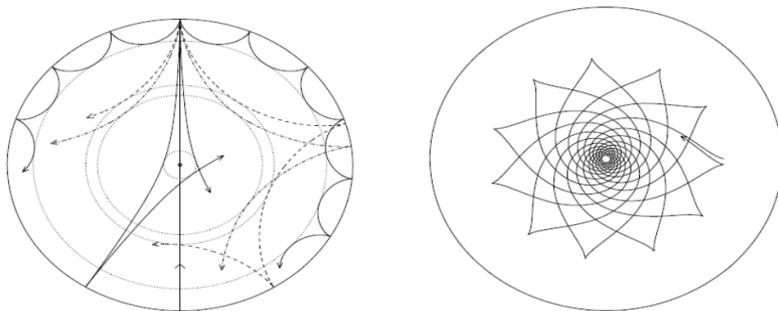
sound waves (longitudinal) - restoring force is pressure  
**p-modes**



internal gravity waves (transverse) - restoring force is gravity  
**g-modes**



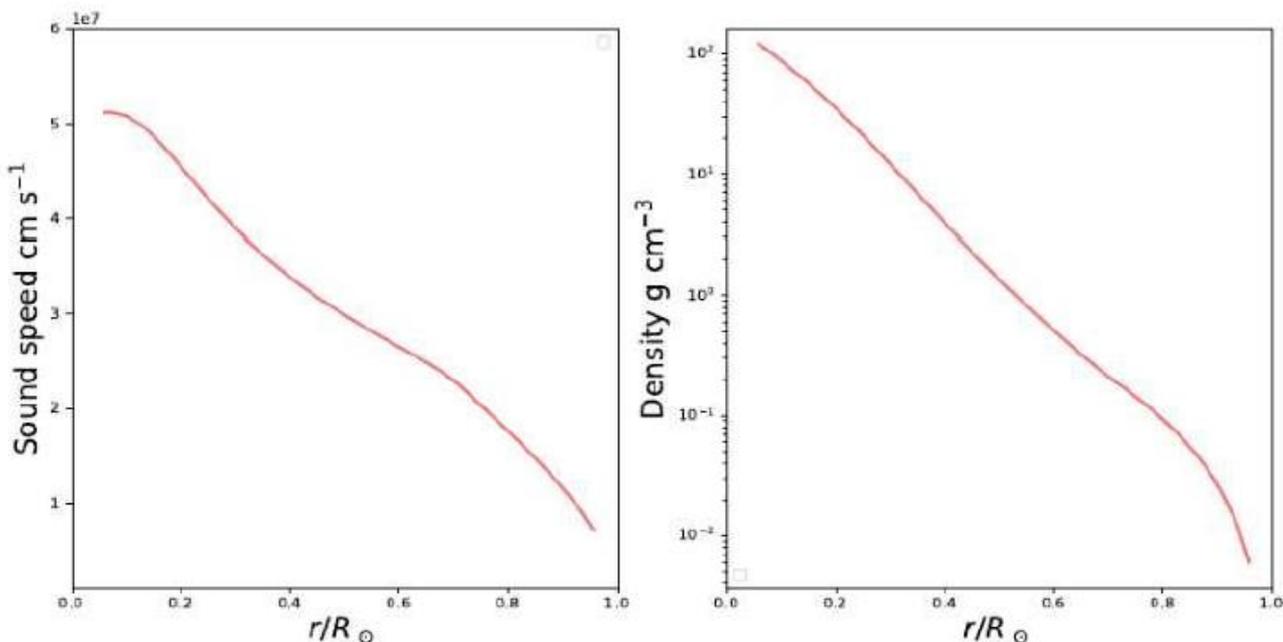
- p模式和g模式振动的传播:



- 不同球谐指数l不同频率(n)，振动的传播区域不同

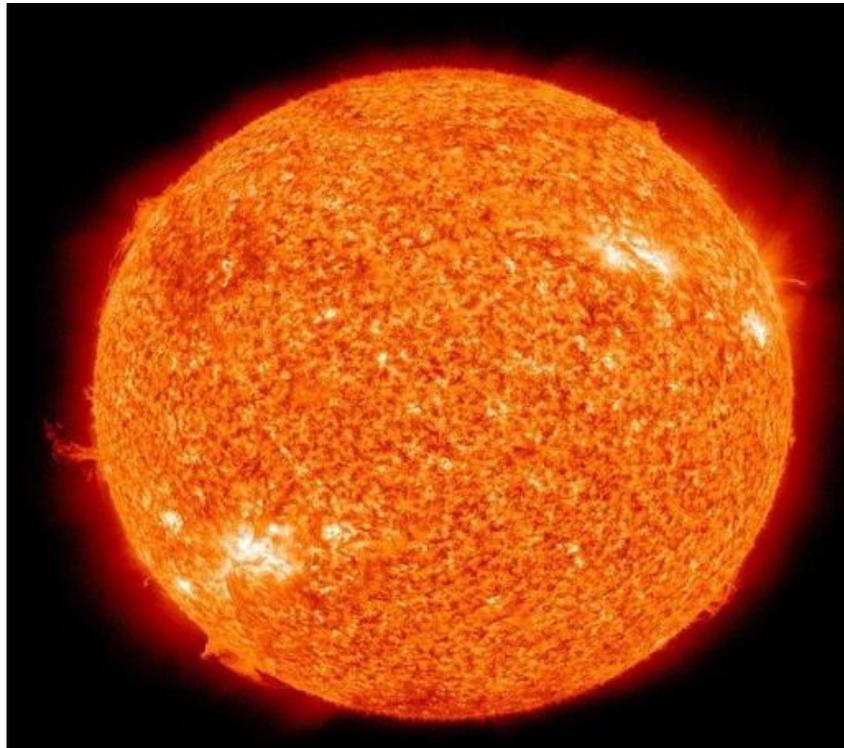
# 1.2 太阳内部结构探测--日震学

- 通过大量的观测站对太阳的震动频率进行观测；
- 大量观测频率可以重构太阳内部结构——日震学反演,对参考太阳模型进行修正使其模型频率与观测符合；
- 得到太阳内部结构（如声速、密度、对流区氦丰度）的日震学反演结果。



# 1.3 太阳内部结构的观测—光谱

- 光谱的观测
  - 光谱的分析;
  - 谱线的拟合-辐射流体动力学大气模型;
  - 太阳元素的组成



## Energy Production in Stars\*

H. A. BETHE

*Cornell University, Ithaca, New York*

(Received September 7, 1938)

It is shown that the *most important source of energy in ordinary stars is the reactions of carbon and nitrogen with protons*. These reactions form a cycle in which the original nucleus is reproduced, *viz.*  $C^{12} + H = N^{13}$ ,  $N^{13} = C^{13} + \epsilon^+$ ,  $C^{13} + H = N^{14}$ ,  $N^{14} + H = O^{15}$ ,  $O^{15} = N^{15} + \epsilon^+$ ,  $N^{15} + H = C^{12} + He^4$ . Thus carbon and nitrogen merely serve as catalysts for the combination of four protons (and two electrons) into an  $\alpha$ -particle (§7).

The carbon-nitrogen reactions are unique in their cyclical character (§8). For all nuclei lighter than carbon, reaction with protons will lead to the emission of an  $\alpha$ -particle so that the original nucleus is permanently destroyed. For all nuclei heavier than fluorine, only radiative capture of the protons occurs, also destroying the original nucleus. Oxygen and fluorine reactions mostly lead back to nitrogen. Besides, these heavier nuclei react much more slowly than C and N and are therefore unimportant for the energy production.

The agreement of the carbon-nitrogen reactions with observational data (§7, 9) is excellent. In order to give the correct energy evolution in the sun, the central temperature of the sun would have to be 18.5 million degrees while

integration of the Eddington equations gives 19. For the brilliant star Y Cygni the corresponding figures are 30 and 32. This good agreement holds for all bright stars of the main sequence, but, of course, not for giants.

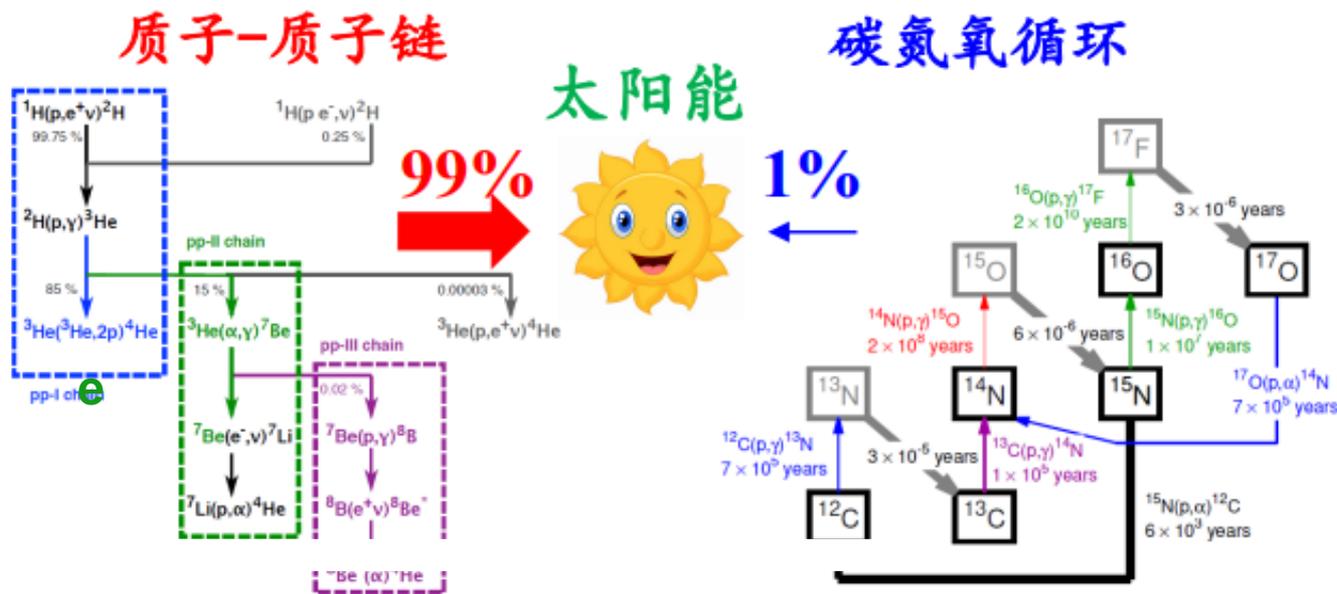
For fainter stars, with lower central temperatures, the reaction  $H + H = D + \epsilon^+$  and the reactions following it, are believed to be mainly responsible for the energy production. (§10)

It is shown further (§5-6) that *no elements heavier than He<sup>4</sup> can be built up in ordinary stars*. This is due to the fact, mentioned above, that all elements up to boron are disintegrated by proton bombardment ( $\alpha$ -emission!) rather than built up (by radiative capture). The instability of Be<sup>8</sup> reduces the formation of heavier elements still further. The production of neutrons in stars is likewise negligible. The heavier elements found in stars must therefore have existed already when the star was formed.

Finally, the suggested mechanism of energy production is used to draw conclusions about astrophysical problems, such as the mass-luminosity relation (§10), the stability against temperature changes (§11), and stellar evolution (§12).

# 1.4 太阳中微子产生

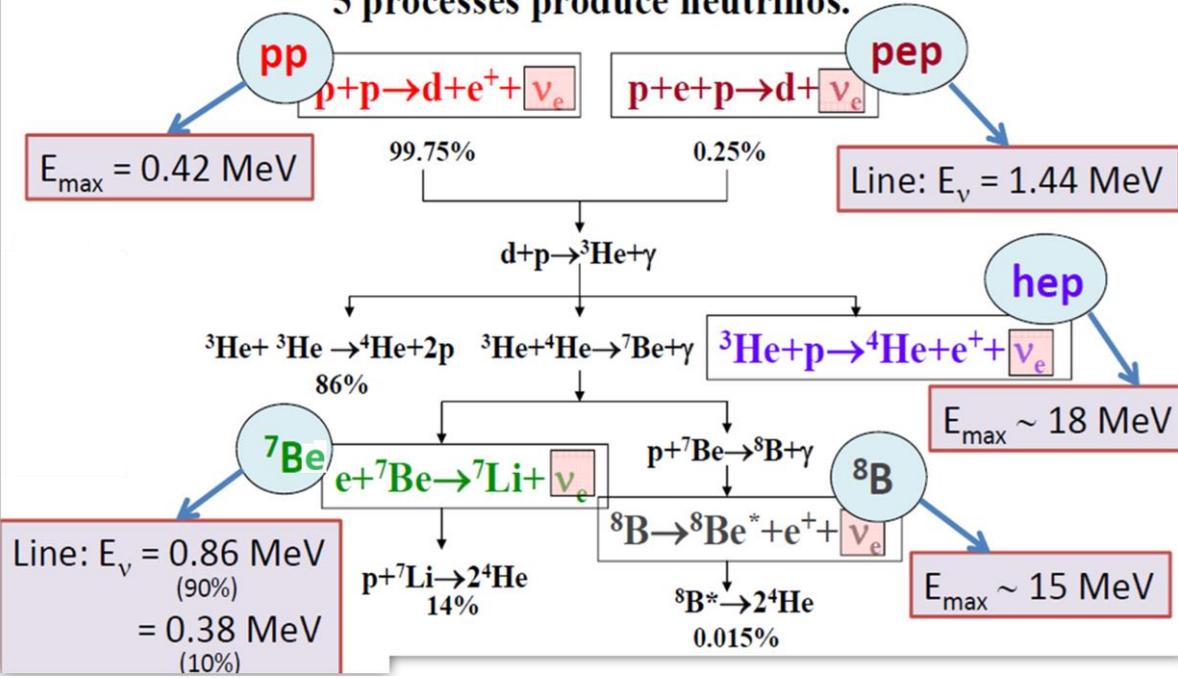
- 太阳在原恒星阶段，引力收缩导致其核心温度和物质密度达到热核聚变反应条件。
- 太阳中微子的生成主要包括2个反应链条。



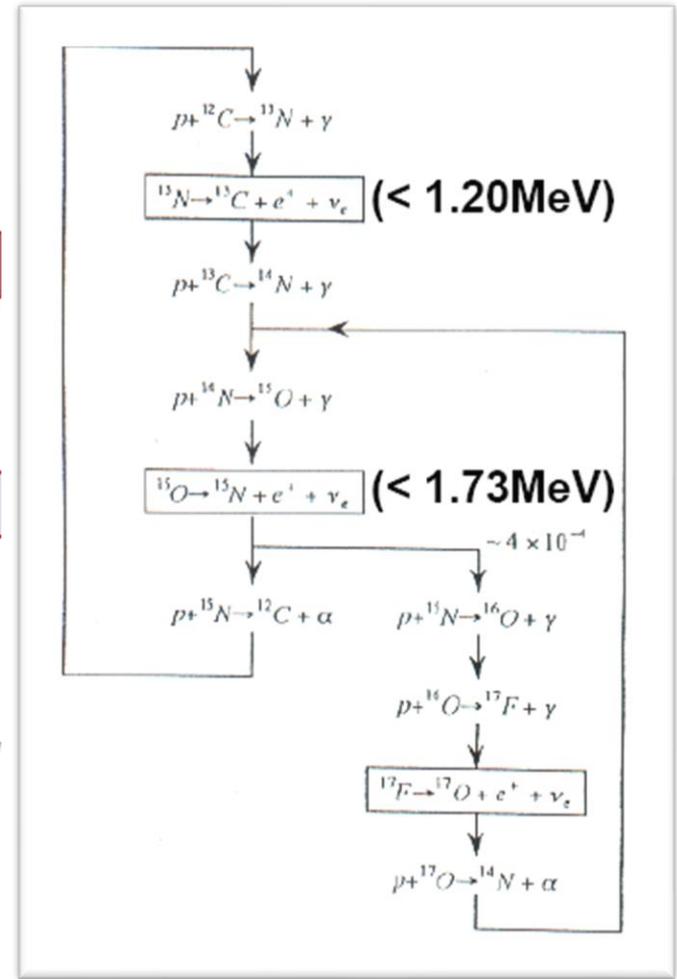
- 太阳内部产生的中微子可以作为探针
  - 研究太阳内部的组成和演化情形;
  - 提供一个有力的研究工具;

# • 质子-质子链

5 processes produce neutrinos.



# • 碳-氮-氧循环链



## SOLAR NEUTRINOS. I. THEORETICAL\*

John N. Bahcall

California Institute of Technology, Pasadena, California

(Received 6 January 1964)

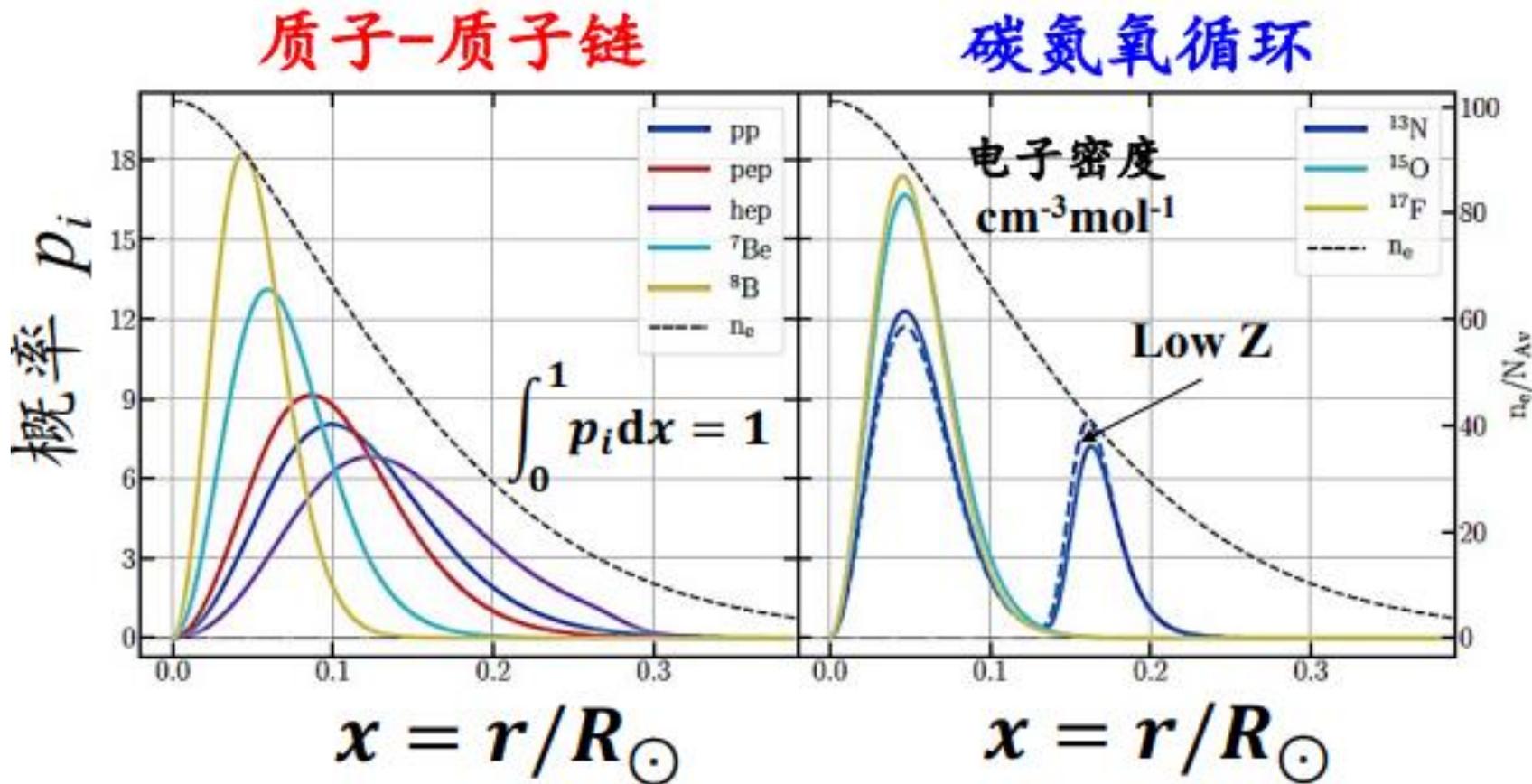
The principal energy source for main-sequence stars like the sun is believed to be the fusion, in the deep interior of the star, of four protons to form an alpha particle.<sup>1</sup> The fusion reactions are thought to be initiated by the sequence  ${}^1\text{H}(p, e^+\nu){}^2\text{H}(p, \gamma){}^3\text{He}$  and terminated by the following sequences: (i)  ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ ; (ii)  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}(e^-\nu){}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ ; and (iii)  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}(e^+\nu){}^8\text{Be}^*(\alpha){}^4\text{He}$ . No direct evidence for the existence of nuclear reactions in the interiors of stars has yet been obtained because the mean free path for photons emitted in the center of a

star is typically less than  $10^{-10}$  of the radius of the star. Only neutrinos, with their extremely small interaction cross sections, can enable us to see into the interior of a star and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in stars.

The most promising method<sup>2</sup> for detecting solar neutrinos is based upon the endothermic reaction ( $Q = -0.81$  MeV)  ${}^{37}\text{Cl}(\nu_{\text{solar}}, e^-){}^{37}\text{Ar}$ , which was first discussed as a possible means of detecting neutrinos by Pontecorvo<sup>3</sup> and Alvarez.<sup>4</sup> In this note, we predict the number of absorptions of

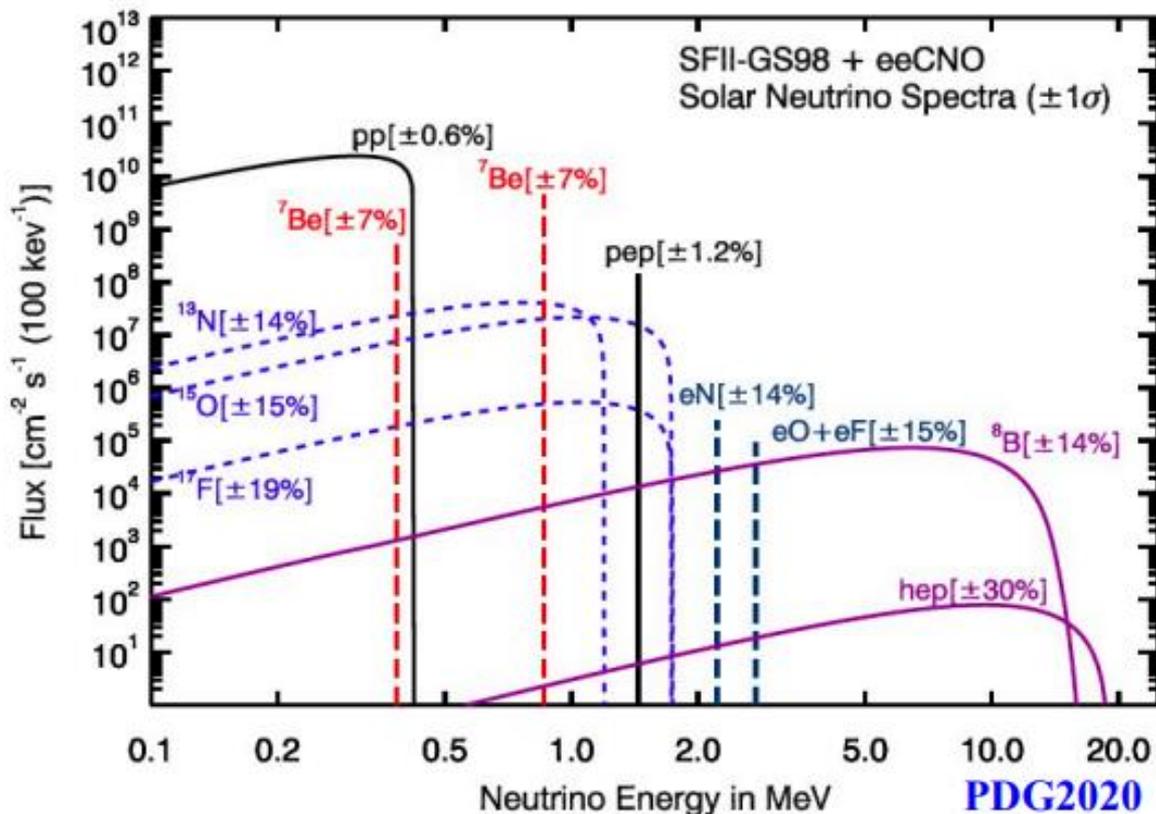
# 中微子在太阳内部的分布

- 太阳中微子作为信使，携带了发生在太阳内部的热核反应信息。



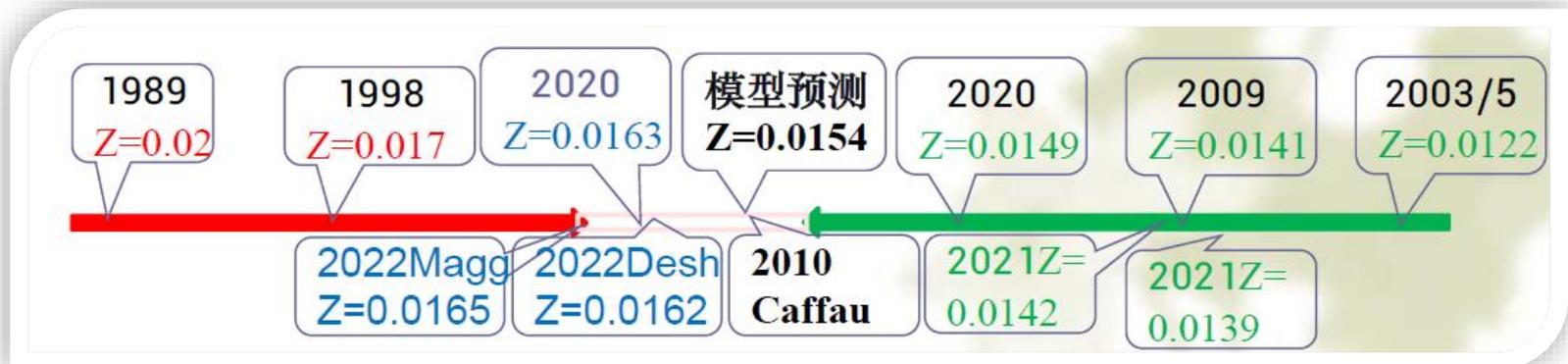
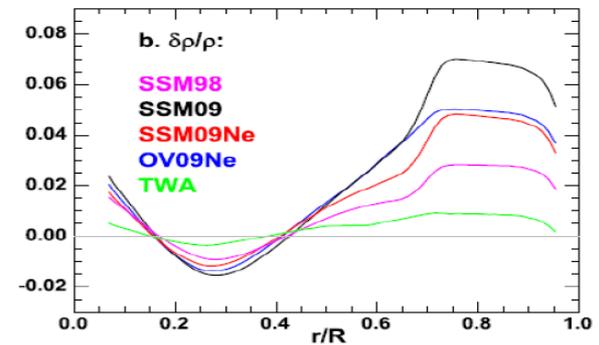
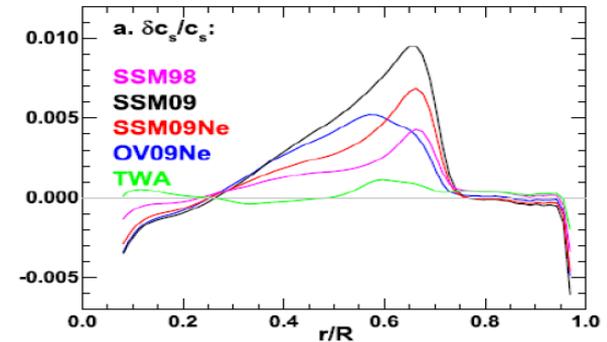
# 太阳中微子能谱和流强

- 从太阳中微子的核反应过程中，太阳标准模型提供了精确的太阳中微子通量和能谱的详细信息。



# 1.5 太阳模型的现存问题

- **当前标准太阳模型存在的问题**
  - 对流区深度，氦丰度，内部声速和密度与日震学反演存在明显偏差；
- CNO中微子流量低于观测值
- **太阳金属丰度问题**
  - HighZ（高金属丰度）和LowZ（低金属丰度）无法确定；
  - 直到今天人们依然没有达成太阳金属丰度的一致意见。

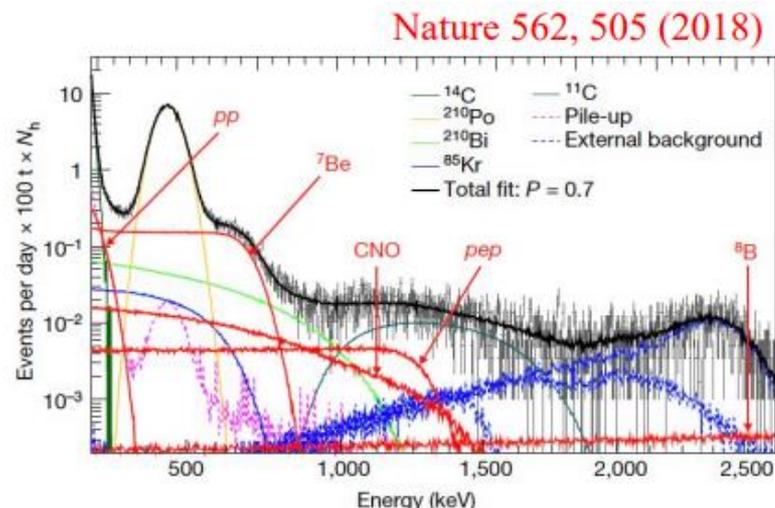
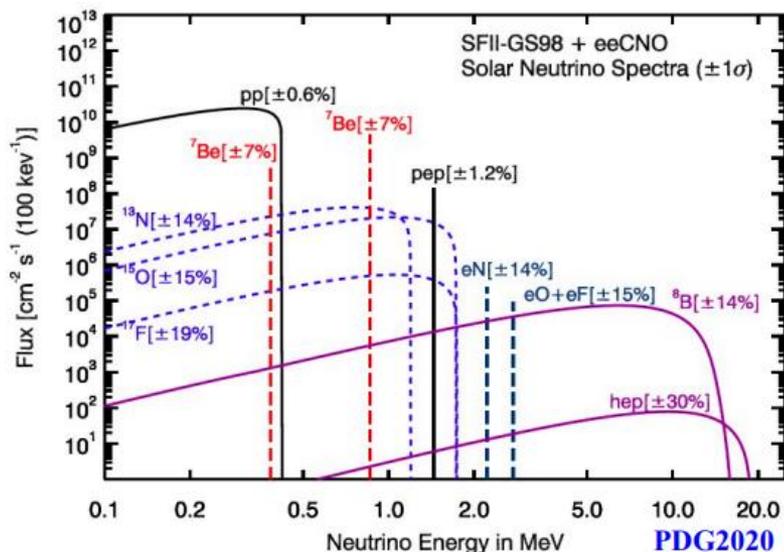


# 2. 实验上对太阳中微子的探测

- 实验探测

  - 信号

    - 几种类型的中微子: pp, Be7, B8, pep, CNO,
    - 观测到的能谱叠加了探测器的响应, 能谱展宽

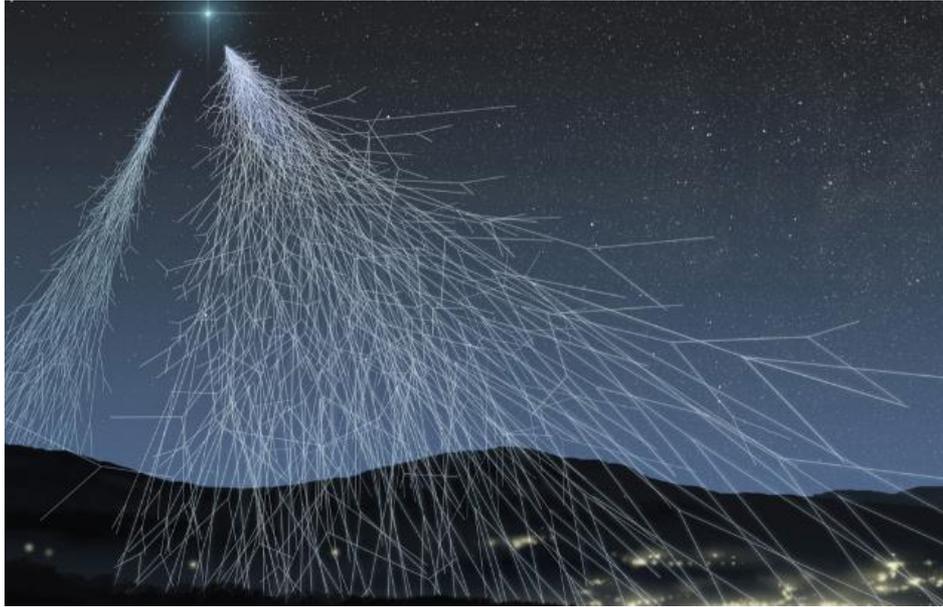


Borexino测量能谱

## 本底---放射性本底

- 太阳中微子研究中，放射性本底是一类非常重要的本底，这些本底信号可能会干扰和影响对太阳中微子的探测，因此在太阳中微子实验中需要对放射性本底进行仔细的研究和控制。
  1. 外部放射性本底：环境和探测器材料中存在的自然放射性元素（如铀、钍等）会产生放射性本底；
  2. 内部放射性本底：实验装置中使用的内部靶物质材料可能会产生本底信号，例如液体闪烁体中的杂质。

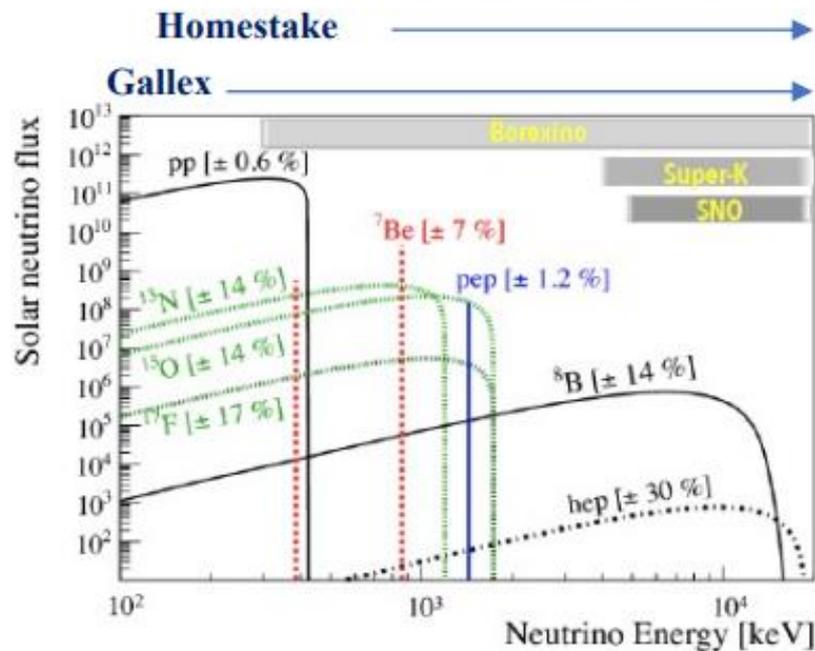
# 本底---宇宙线缪子引入的本底



- 宇宙线缪子通常是由宇宙线与大气层中的原子核相互作用而产生的，是宇宙线中的一种重要成分。宇宙线缪子具有极高的穿透能力，它与物质相互作用可以产生大量的次级粒子引入本底。
- 一般实验为了降低本底都要将探测器放入深地，比如江门实验探测器处于地下650米，可以将宇宙线流强从地面约 $100-200\text{Hz}/\text{m}^2$ ，降低到 $0.004\text{Hz}/\text{m}^2$ 。

## 2. 实验上对太阳中微子的探测

- 使用不同的探测介质（方法）来探测
  - 放射化学
  - 水契仑科夫探测器
  - 液闪烁体探测器

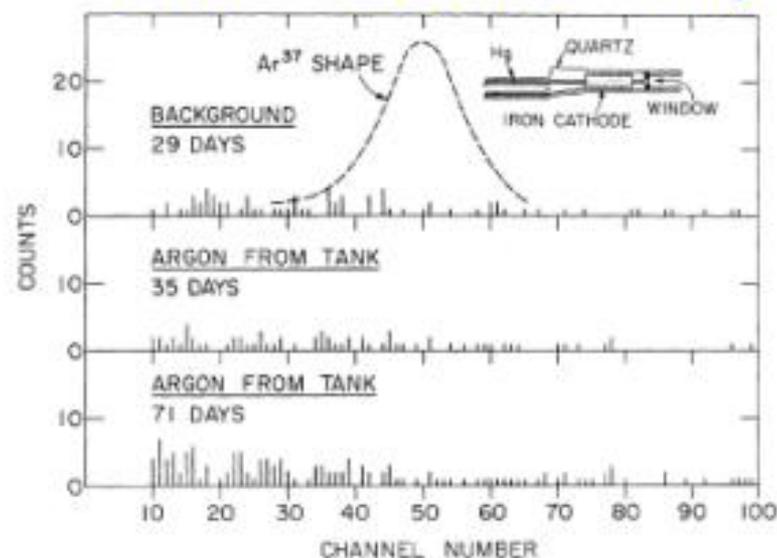
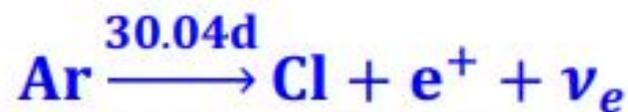
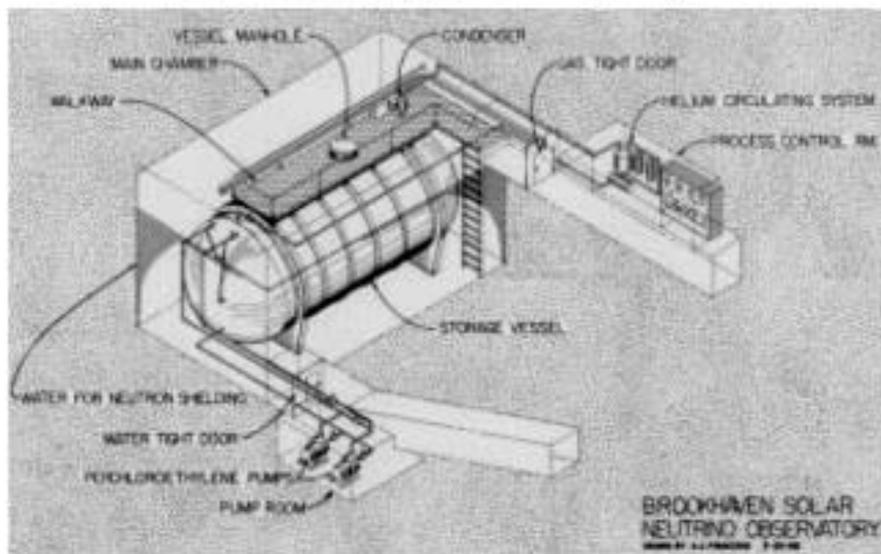


# 放射化学法

中微子反贝塔反应（能量阈 0.814 MeV）

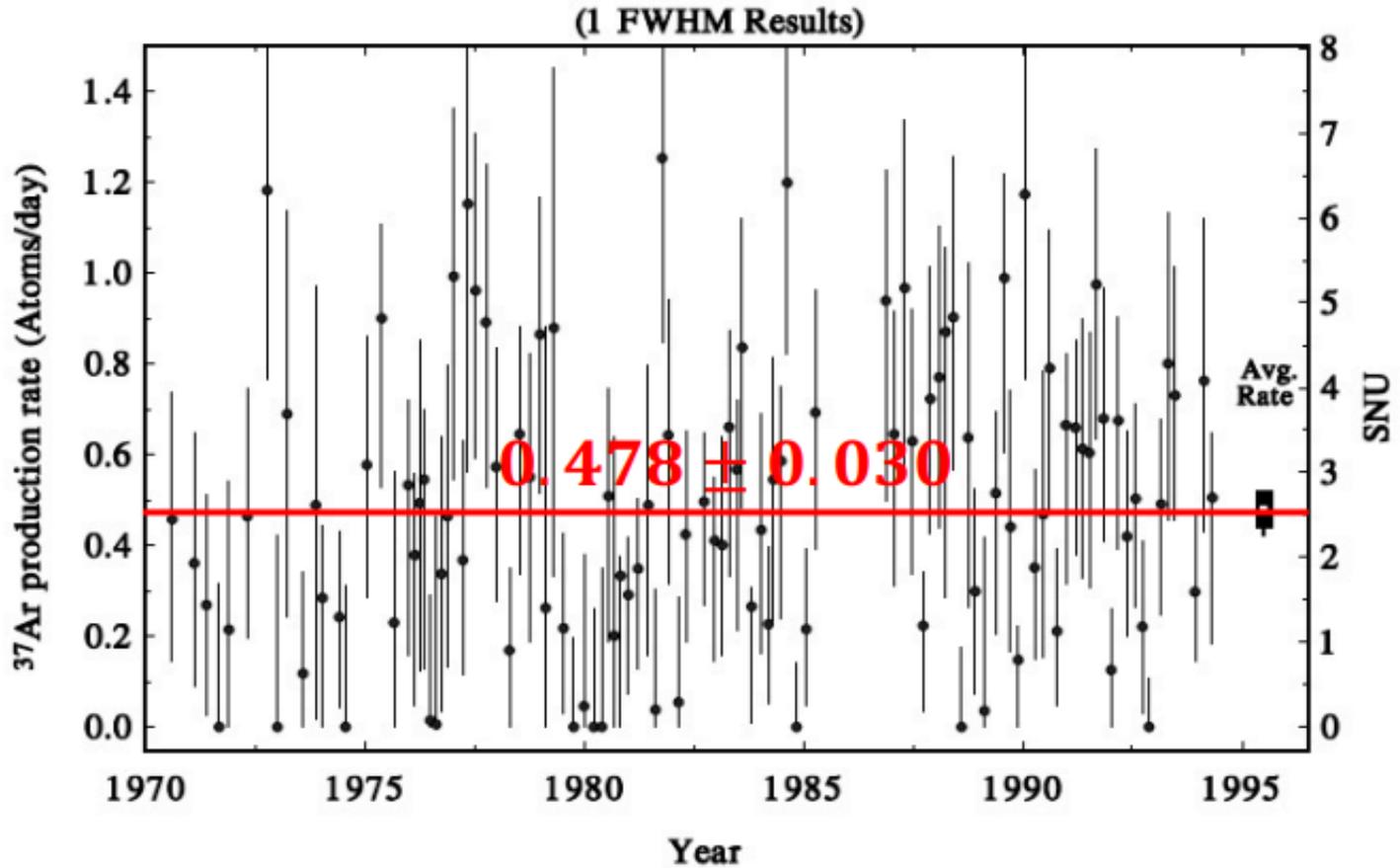


Homestake (1967-1994)



# 放射化学法

- 观测事例数



# 放射化学法

Homestate 用了 615 吨  $C_2Cl_4$

$$N(^{37}\text{Cl}) \sum_i \int_{0.814 \text{ MeV}}^{15 \text{ MeV}} \phi_i(E_\nu) \sigma(E_\nu) dE_\nu \quad \text{预期}$$
$$= \frac{\lambda_{\text{Ar}} N(^{37}\text{Ar}; t_{\text{exposure}})}{\varepsilon [1 - \exp(-\lambda_{\text{Ar}} t_{\text{exposure}})]} - b \quad \text{观测}$$

$$N(^{37}\text{Cl}) = 2.16 \times 10^{30}, \lambda_{\text{Ar}} = 0.0198 \text{ d}^{-1}$$

1 SNU (太阳单位) =  $10^{-36}$  俘获/靶核/秒

测量值

SSM (Bahcall 2001)

$2.56 \pm 0.23$  SNU

$7.6_{-1.1}^{+1.3}$  SNU

$$\text{偏差: } \frac{7.6 - 2.56}{\sqrt{1.1^2 + 0.23^2}} = 4.5\sigma \quad \text{太阳中微子问题!}$$

当时有名的问题: 太阳中微子的消失之谜?

**SEARCH FOR NEUTRINOS FROM THE SUN\***Raymond Davis, Jr., Don S. Harmer,<sup>†</sup> and Kenneth C. Hoffman

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973

(Received 16 April 1968)

A search was made for solar neutrinos with a detector based upon the reaction  $\text{Cl}^{37}(\nu, e^-)\text{Ar}^{37}$ . The upper limit of the product of the neutrino flux and the cross sections for all sources of neutrinos was  $3 \times 10^{-36} \text{ sec}^{-1}$  per  $\text{Cl}^{37}$  atom. It was concluded specifically that the flux of neutrinos from  $\text{B}^8$  decay in the sun was equal to or less than  $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  at the earth, and that less than 9% of the sun's energy is produced by the carbon-nitrogen cycle.

**PRESENT STATUS OF THE THEORETICAL PREDICTIONS  
FOR THE  $^{37}\text{Cl}$  SOLAR-NEUTRINO EXPERIMENT\***John N. Bahcall<sup>†</sup> and Neta A. Bahcall<sup>‡</sup>

California Institute of Technology, Pasadena, California

and

Giora Shaviv<sup>§</sup>

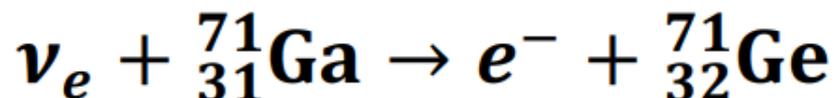
Cornell University, Ithaca, New York

(Received 8 April 1968)

The theoretical predictions for the  $^{37}\text{Cl}$  solar-neutrino experiment are summarized and compared with the experimental results of Davis, Harmer, and Hoffman. Three important conclusions about the sun are shown to follow.

# SAGE( $^{71}\text{Ga}$ )实验

中微子反贝塔反应（能量阈 **0.233 MeV**）



低于 pp 太阳中微子的最大能量。探测方法与 Homestake 实验非常类似

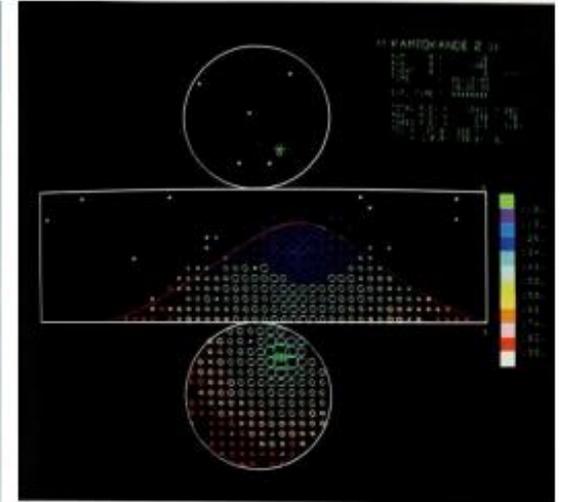
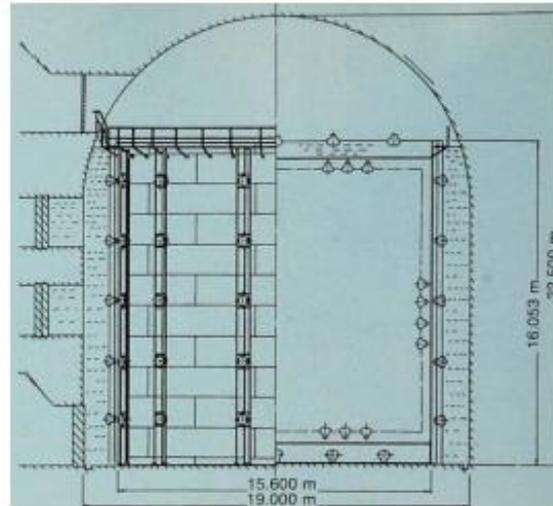


由于 pp 中微子通量与太阳光度有关，因此对这些中微子的测量将是理解太阳核过程起源的关键检验。

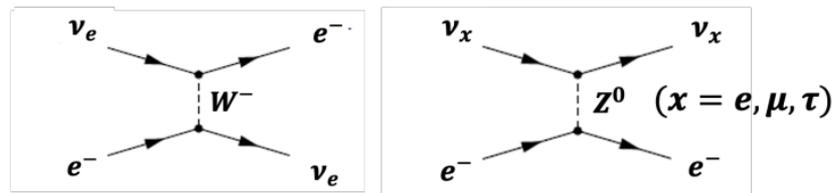
# 神冈实验 (Kamiokande)

神冈实验

- 水契仑科夫探测器;



在水中中微子弹性散射过程 ( $E_{\nu_e} \gg m_e$ )



$$\sigma_E(\nu_e e) \approx 0.9 \times 10^{-43} \frac{E_{\nu_e}}{10 \text{ MeV}} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_E(\nu_{\mu, \tau} e) \approx 0.15 \times 10^{-43} \frac{E_{\nu_e}}{10 \text{ MeV}} \text{ cm}^2$$

主要是电子味道外, 但有其它味道的贡献。

# 神冈实验

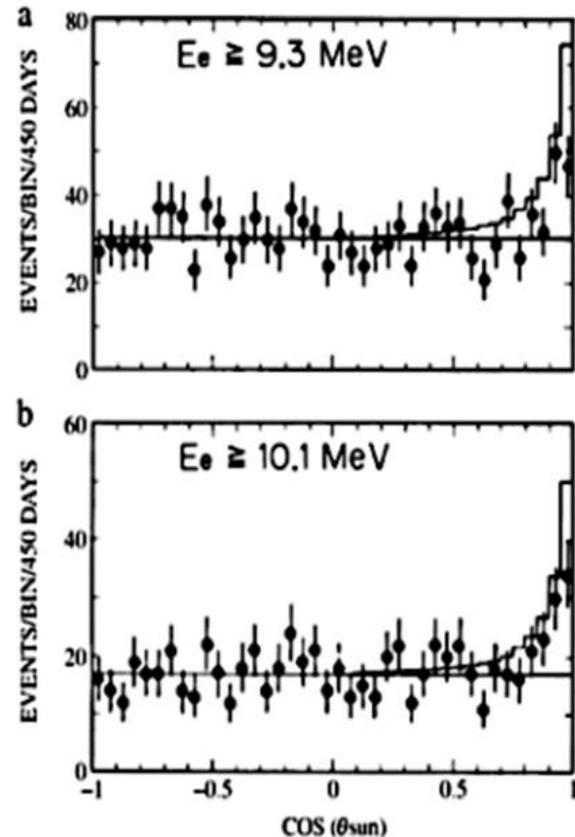
神冈-11首次对太阳中微子进行了实时、定向和能谱观测。

数据

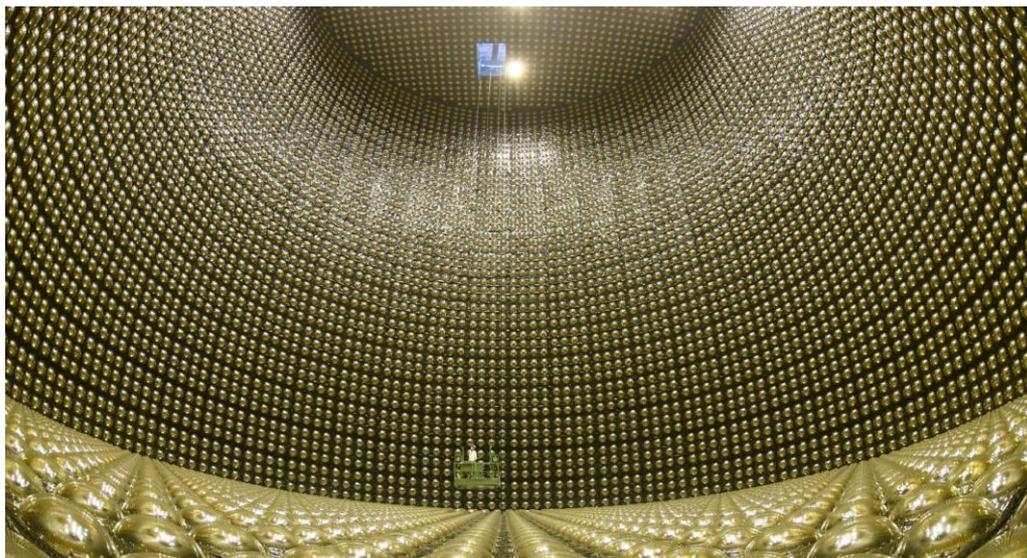
无振荡理论

$$= 0.44 \pm 0.13_{\text{stat}} \pm 0.08_{\text{syst}}$$

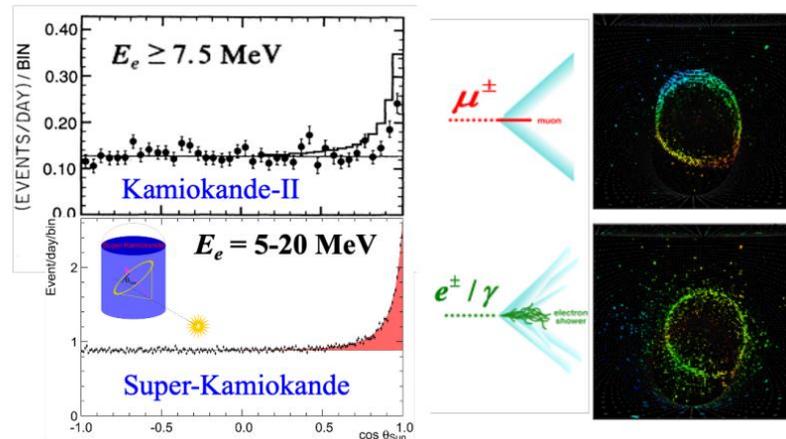
通过后续的实验的测量，我们知道是因为中微子自身的一个振荡特性，从一种味道转换为其他味道的中微子，从而引起的丢失。



# 超级神冈实验 (Super-Kamiokande)



神冈实验的升级版 (从千吨到万吨!)



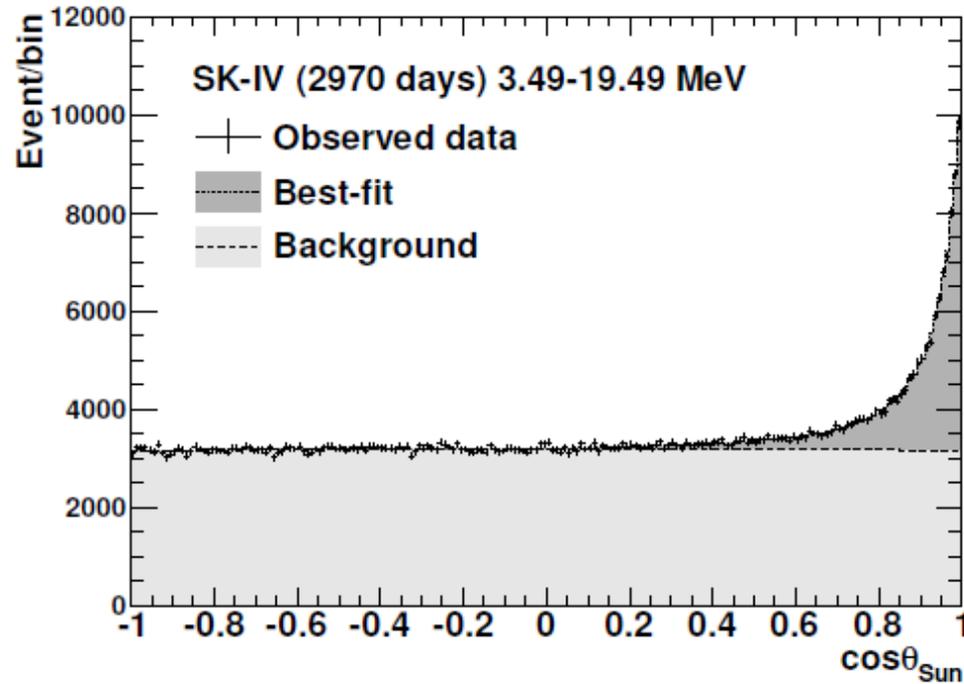
探测器体积大: 22.5 kton fiducial

- 最近的结果: 完成了SK I - IV: 超过20年的数据。
- 主要更新了能量重建和误差的改进
- 从2020年起:
  - SK-V (prep for Gd)
  - SK-VI (0.01% Gd)
  - SK-VII (0.03% Gd)

| Phase             | SK-I      | SK-II       | SK-III     | SK-IV         |
|-------------------|-----------|-------------|------------|---------------|
| Period (Start)    | April '96 | October '02 | July '06   | September '08 |
| Period (End)      | July '01  | October '05 | August '08 | May '18       |
| Livetime [days]   | 1,496     | 791         | 548        | 2,970         |
| ID PMTs           | 11,146    | 5,182       | 11,129     | 11,129        |
| OD PMTs           | 1,885     | 1,885       | 1,885      | 1,885         |
| PMT coverage [%]  | 40        | 19          | 40         | 40            |
| Energy thr. [MeV] | 4.49      | 6.49        | 3.99       | 3.49          |

# 超级神冈

- B8中微子事例的测量

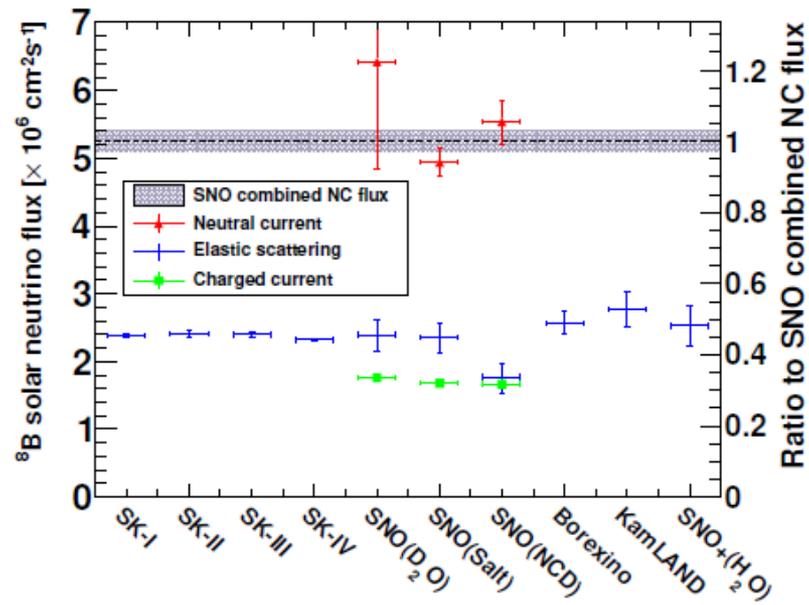
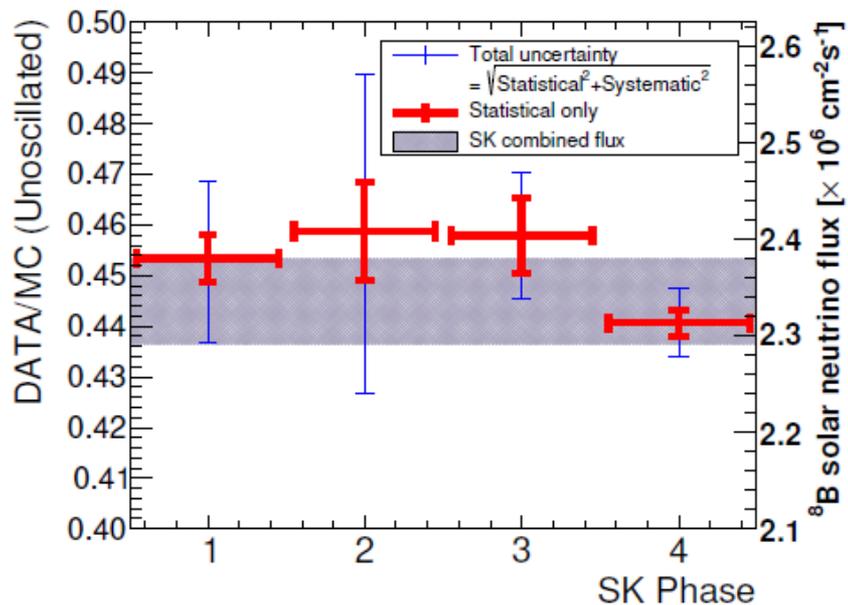


$$65443_{-388}^{+390}(\text{stat.}) \pm 925(\text{syst.})$$

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

# 超级神冈

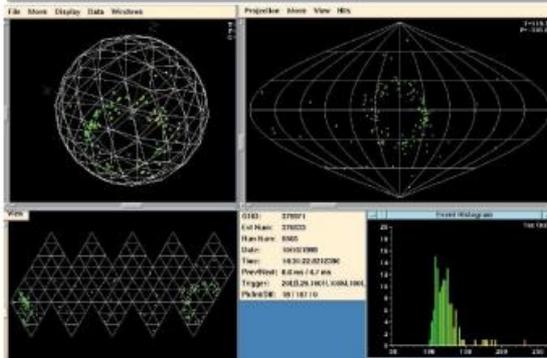
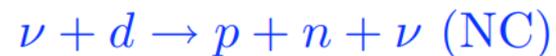
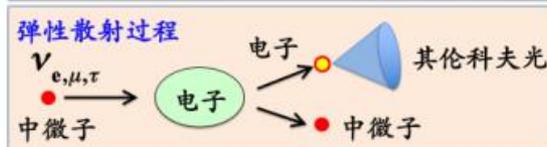
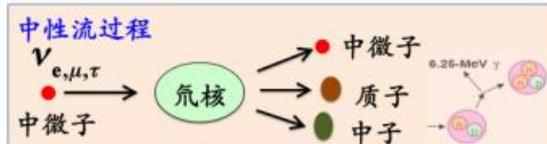
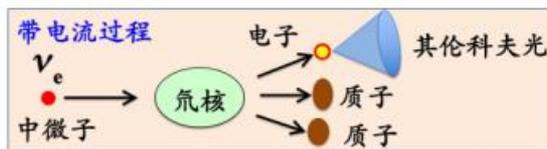
- 各个阶段测量的通量结果



# SNO实验

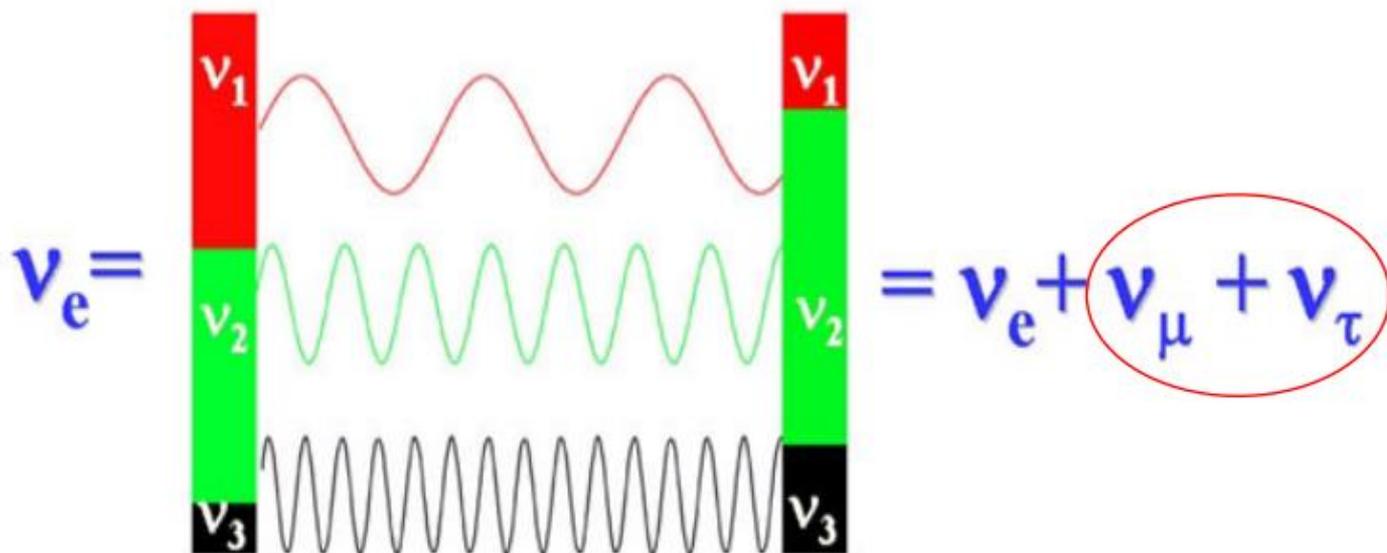
## • SNO实验(重水)

对三种味道太阳中微子都敏感的实验!



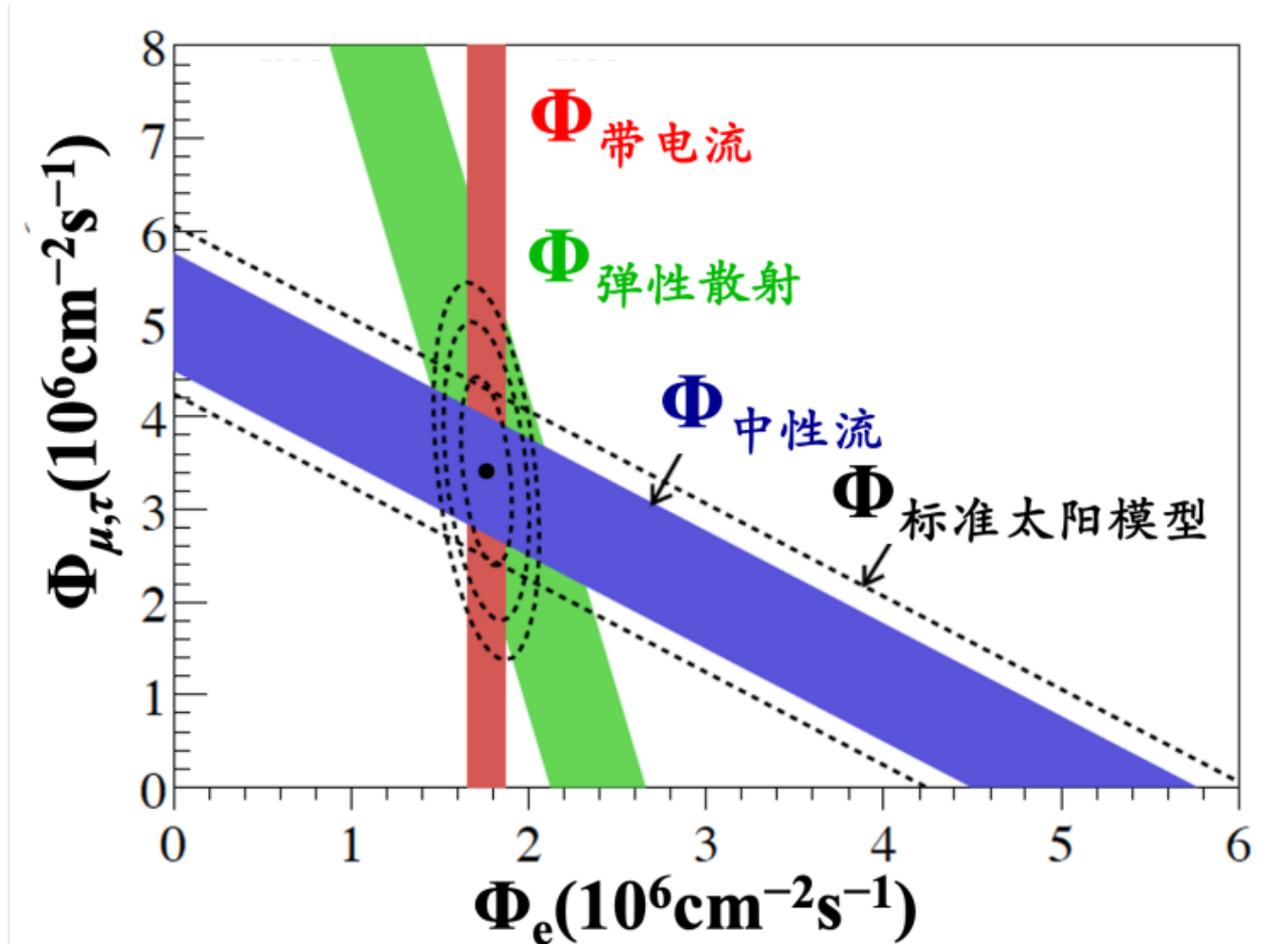
# SNO实验

SNO 实验把电子味道改变的太阳中微子由常规实验“看不见”或“不敏感”变为“看得见”！



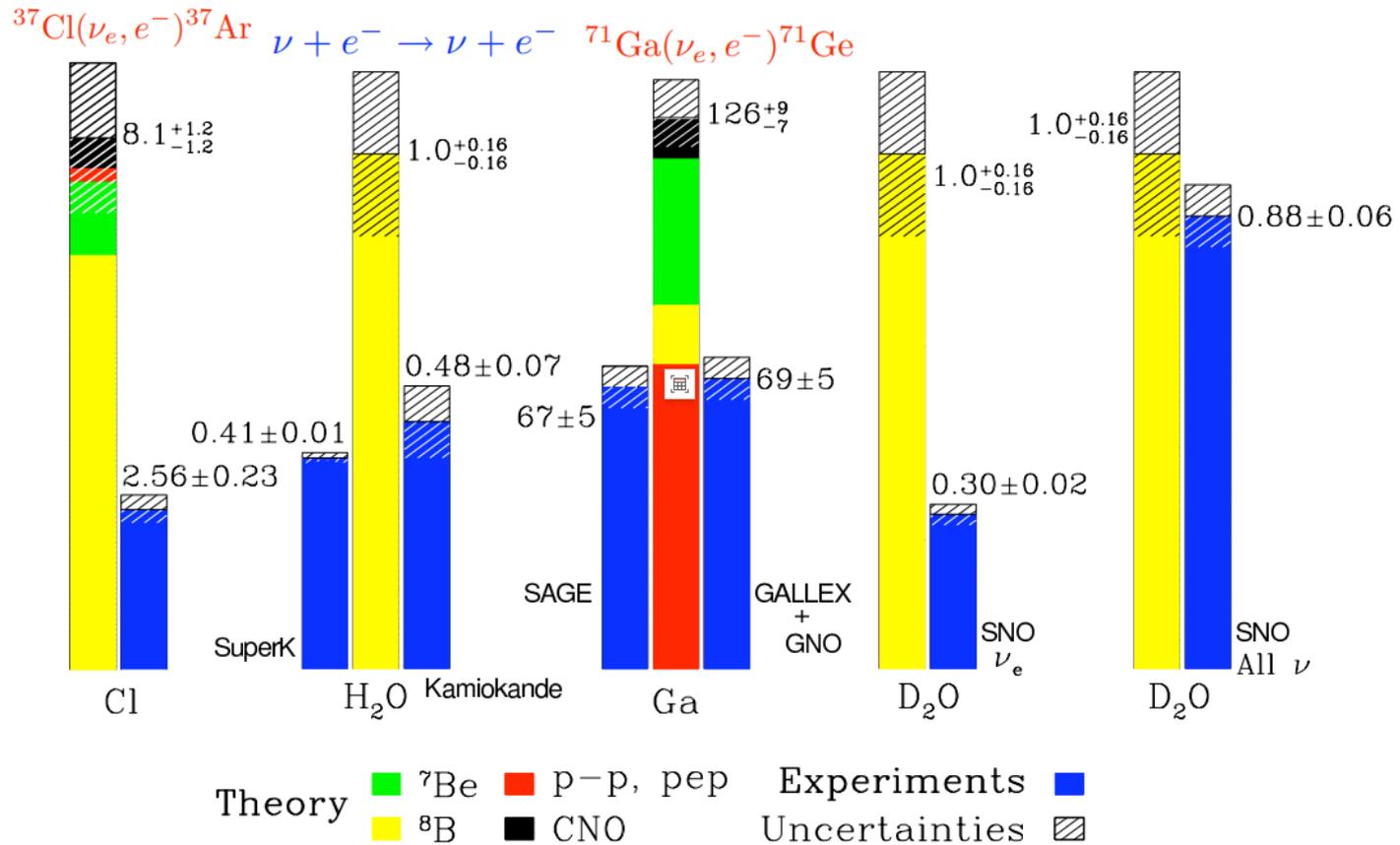
# SNO

- SNO的太阳中微子通量测量结果



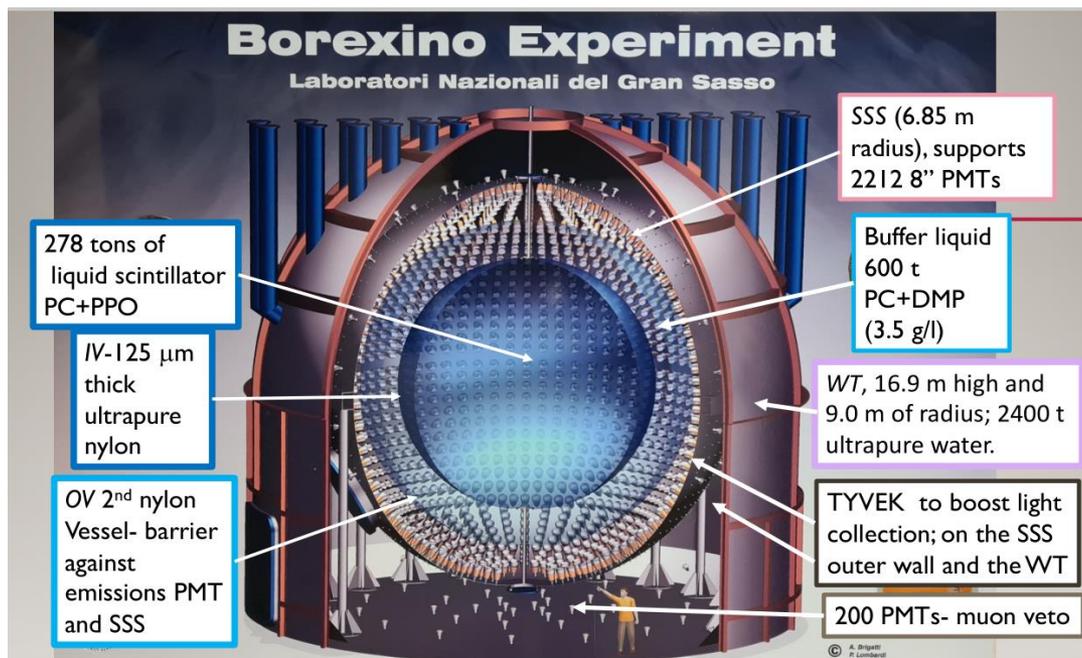
# 实验测量与模型预期的对比

Total Rates: Standard Model vs. Experiment  
Bahcall-Serenelli 2005 [BS05(OP)]

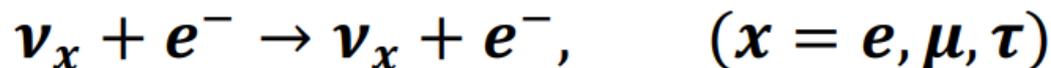


# Borexino实验

- 液闪类型的探测器



中微子过程

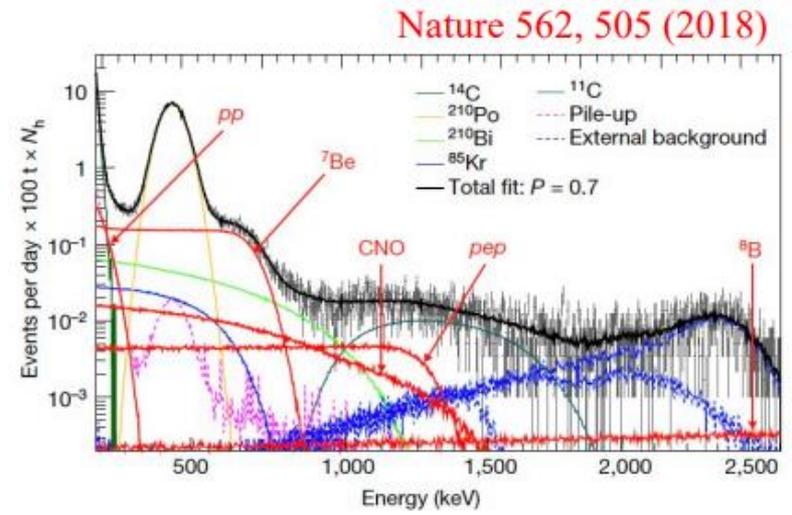
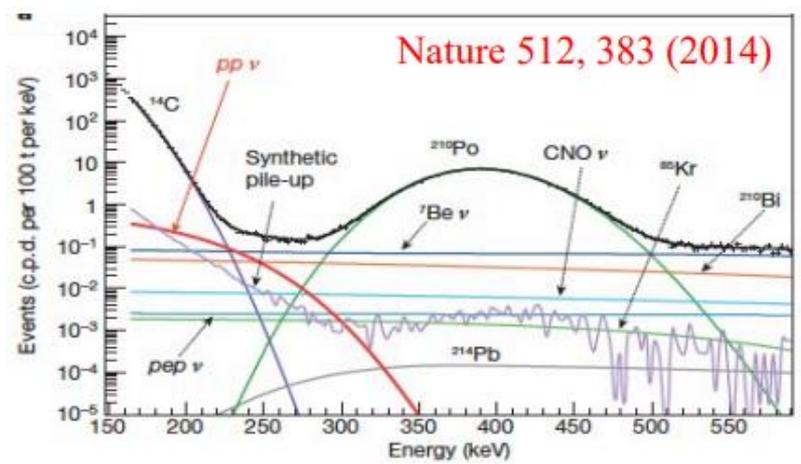


本底最低的中微子实验，能阈 **0.2 MeV**。

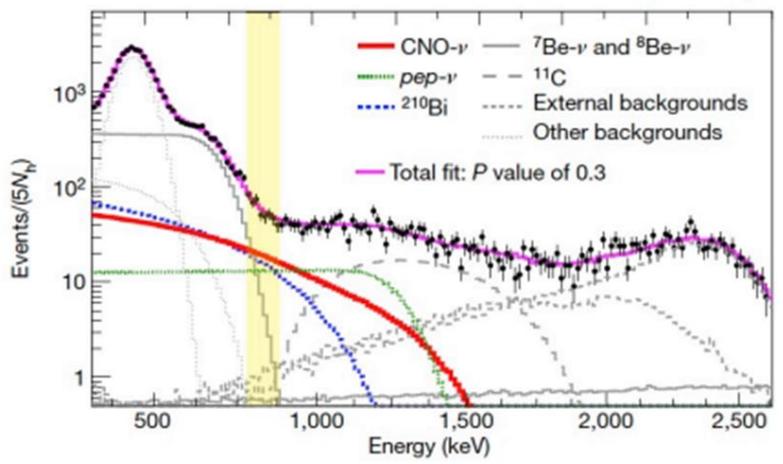
# 放射性本底的控制

| Radio isotope                           | Source                                      | Software reduction                                 | Achieved Phase1  | Achieved Phase2  |
|---|---|--|--|--|
| $^{14}\text{C}$                         | Intrinsic PC                                | Threshold<br>Fit on the<br>shape                   | $\approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ }^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$                 |  |
| $^{238}\text{U}$<br>$^{235}\text{Th}$   | Dust, particulate<br>all materials          | $\alpha/\beta$ tagging<br>fit                      | $(1.67 \pm 0.06) \cdot 10^{-17}$<br>$(4.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-18} \text{ g/g}$ | $< 9.5 \cdot 10^{-20}$<br>$< 7.2 \cdot 10^{-19} \text{ g/g}$ |
| $^{85}\text{Kr}$                        | Air, nuclear<br>weapons                     |  | $30 \pm 5 \text{ cpd}/100\text{t}$   | $6.8 \pm 0.8$<br>$\text{cpd}/100\text{t}$                    |
| $^{39}\text{Ar}$                        | Air, cosmogenic                             | fit  | $\ll 1 \text{ cpd}/100\text{t}$  |  |
| $^{210}\text{Po}$                       | Embedded on<br>surfaces<br>Vessel emanation | fit  | $500\text{-}100 \text{ cpd}/100\text{t}$                                       | Natural decay  |
| $^{222}\text{Rn}$ and<br>its<br>progeny | In the<br>underground air<br>and water      | $\alpha/\beta$ tagging,<br>delayed<br>coincidences | $< 1 \text{ cpd}/100\text{t}$  |  |

# 太阳中微子的观测



Nature 587, 582 (2020)

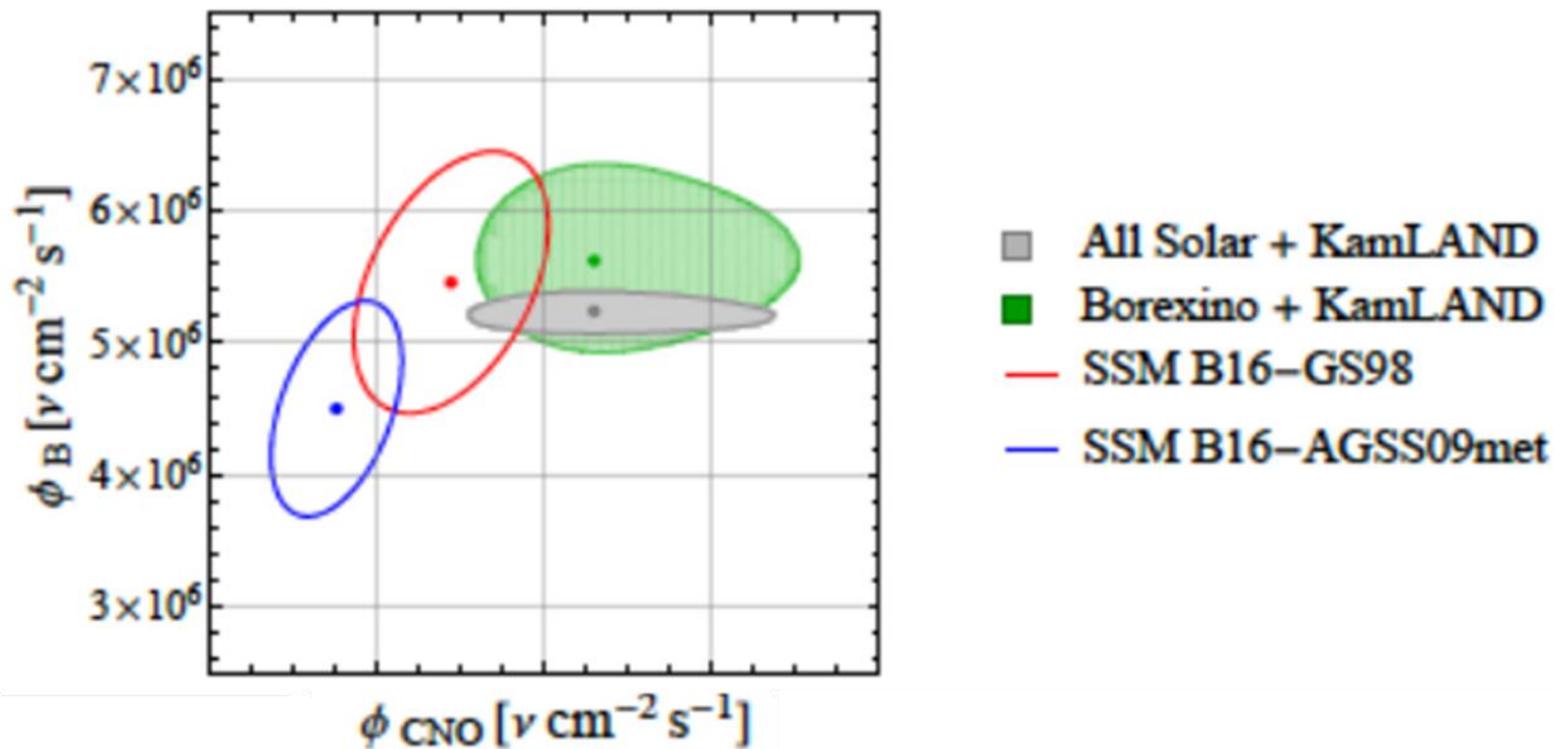


- 不仅测量到了pp链上的太阳中微子，也观测到了CNO链上的太阳中微子信号。

# 不同类型太阳中微子的通量

|                   | Borexino rates<br>(cpd/100t)    | Borexino fluxes<br>( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) | SSM HZ<br>Fluxes<br>( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) | SSM LZ<br>Fluxes<br>( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) | (HZ-LZ)/HZ.<br><br>Dependence<br>on T |
|-------------------|---------------------------------|--|---|---|---------------------------------------|
| pp                | $134 \pm 10_{-10}^{+6}$         | $(6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3}) \times 10^{10}$         | $5.98(1 \pm 0.006) \times 10^{10}$                    | $6.03(1 \pm 0.005) \times 10^{10}$                    | -0.8%<br><br>$T^{-0.9}$               |
| ${}^7\text{Be}$   | $48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$    | $(4.99 \pm 0.11_{-0.12}^{+0.06}) \times 10^9$        | $4.93(1 \pm 0.06) \times 10^9$                        | $4.50(1 \pm 0.06) \times 10^9$                        | 8.9%<br><br>$T^{1.1}$                 |
| pep               | $2.43 \pm 0.36_{-0.22}^{+0.15}$ | $(1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08}) \times 10^8$        | $1.44(1 \pm 0.009) \times 10^8$                       | $1.46(1 \pm 0.009) \times 10^8$                       | -1.4%<br><br>$T^{1.4}$                |
| ${}^8\text{B}$    | $0.220_{-0.016}^{+0.015}$       | $5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03} \times 10^6$         | $5.46(1 \pm 0.12) \times 10^6$                        | $4.50(1 \pm 0.12) \times 10^6$                        | 17.6%<br><br>$T^{2.4}$                |
| ${}^{13}\text{N}$ | $6.7_{-0.8}^{+1.2}$             | $6.7_{-0.8}^{+1.2} \times 10^8$                      | $4.89(1 \pm 0.016) \times 10^8$                       | $3.51(1 \pm 0.15) \times 10^8$                        | 27.9%<br><br>$T^{1.9}$                |
| ${}^{15}\text{O}$ |                                 |  |   |   |                                       |

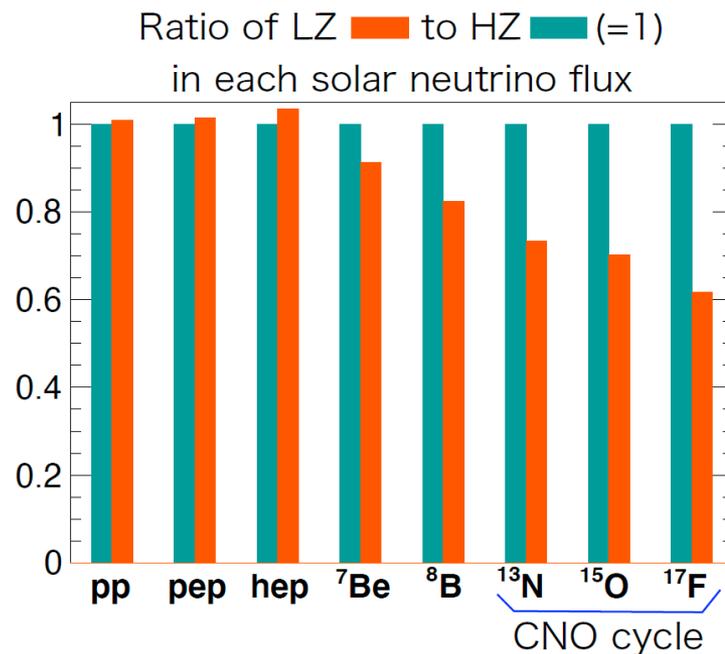
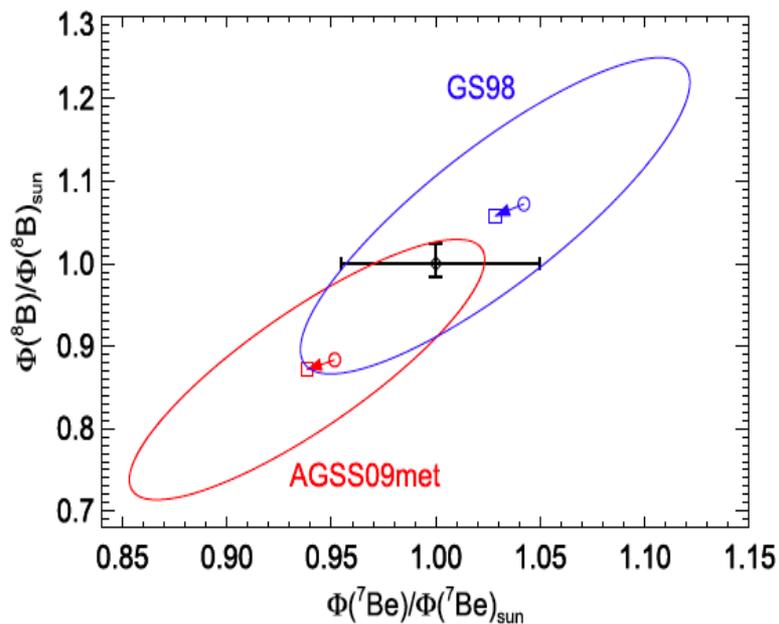
# High-Z和low-Z puzzle



- Borexino有favor high-Z的倾向。

## 2.2 太阳中微子问题和相关物理

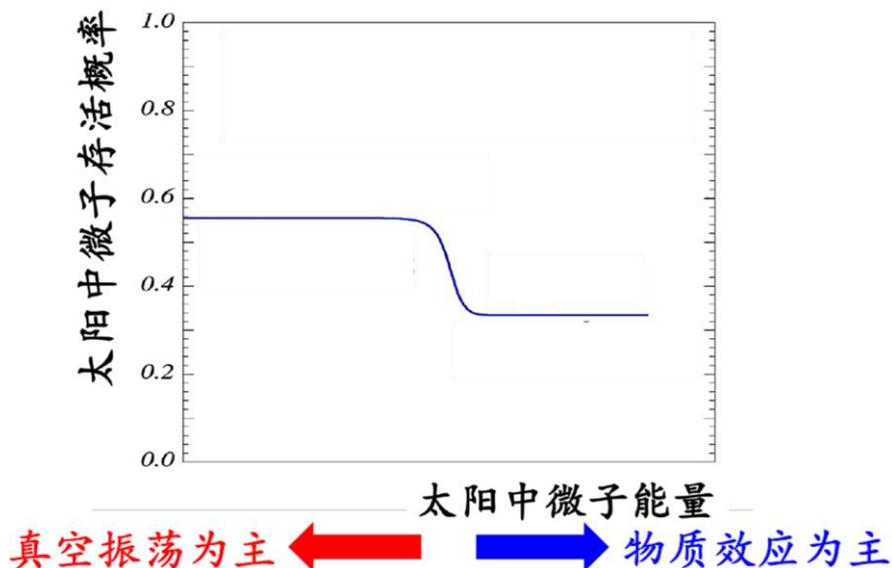
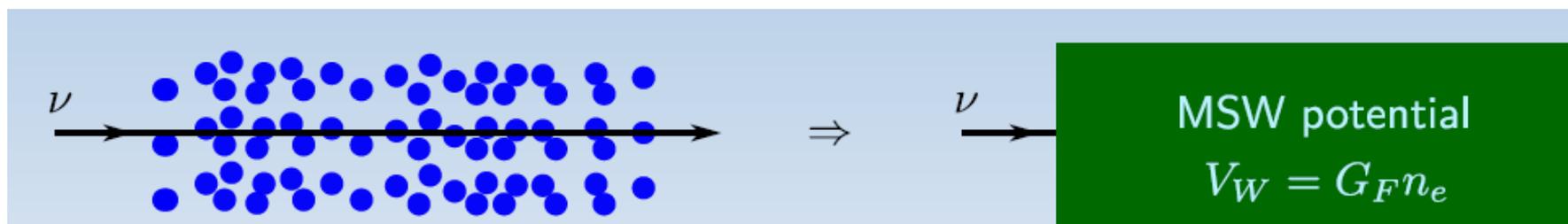
- 金属丰度问题 (Hz和LZ的问题)
  - 通过太阳中微子测量的通量来约束的情况。
  - 现有的测量还是灵敏度不够不能区分。



# 物质效应

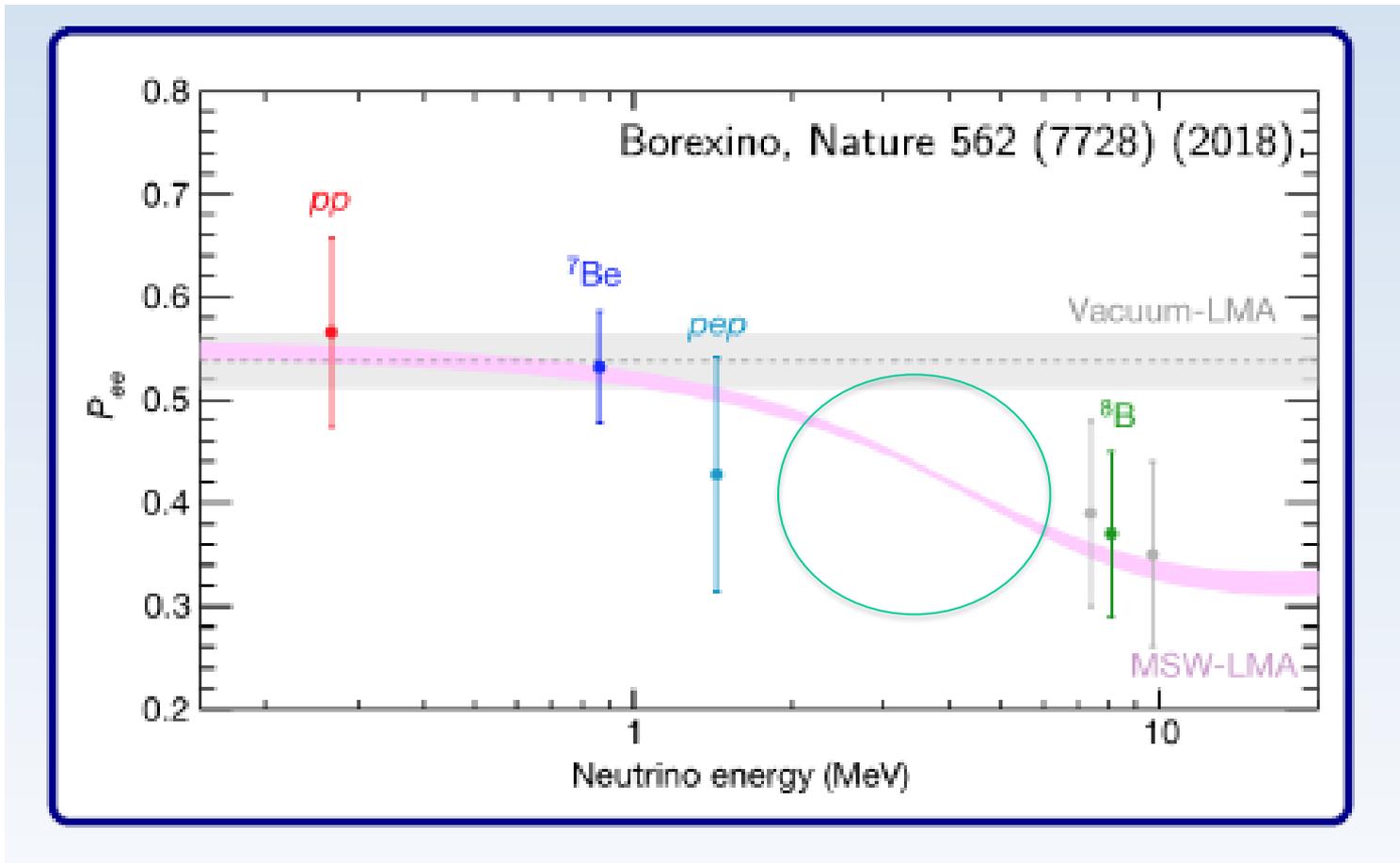
中微子穿过物质过程中

MSW机制 (Mikheyev, Smirnov 和 Wolfenstein) :  $\nu_e$  与物质中的电子 e 的弱作用, 使其感受到一个正比于电子密度  $n_e$  的有效势

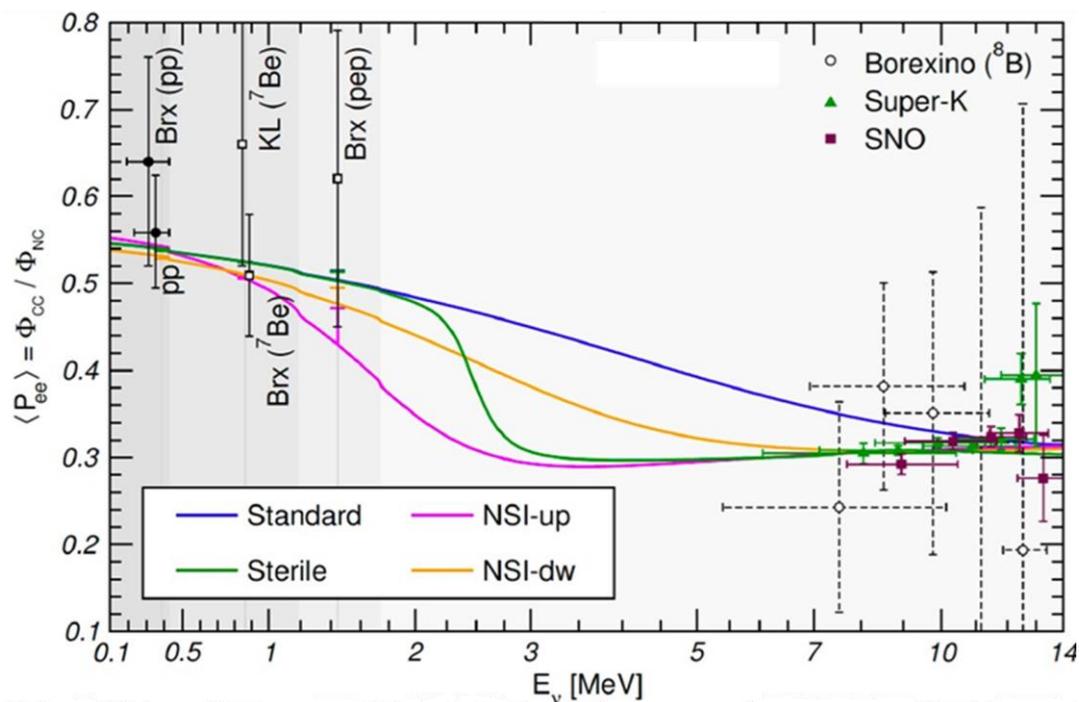


# 物质效应和新物理

- Borexino测量不同种类中微子振荡几率的示意图。
- 在3MeV左右的转换区域没有数据点，这个区域正好是需要检验MSW效应和新物理的区域（upturn的检验）。

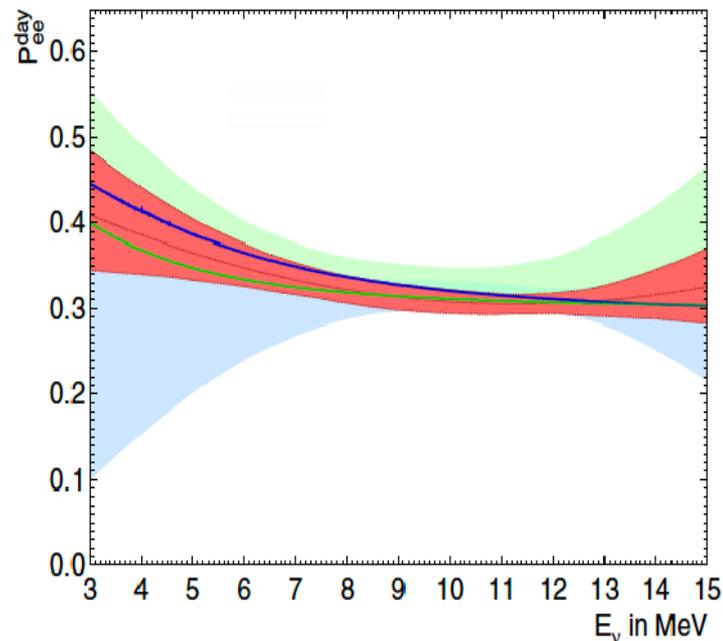
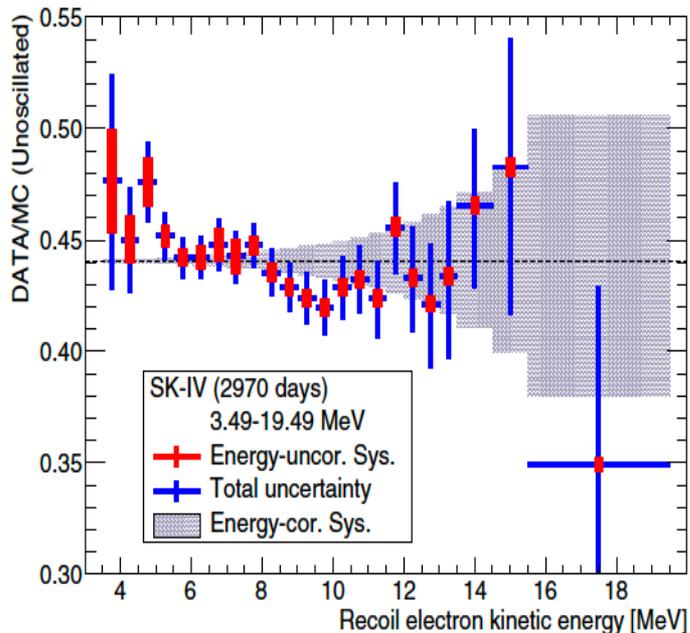
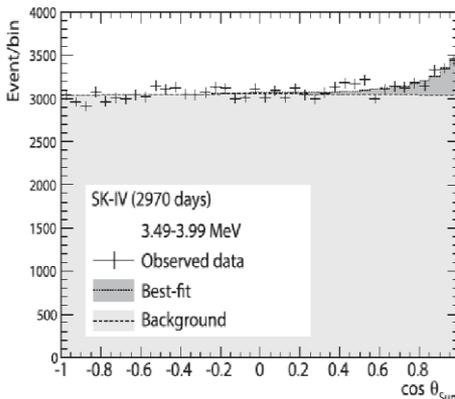
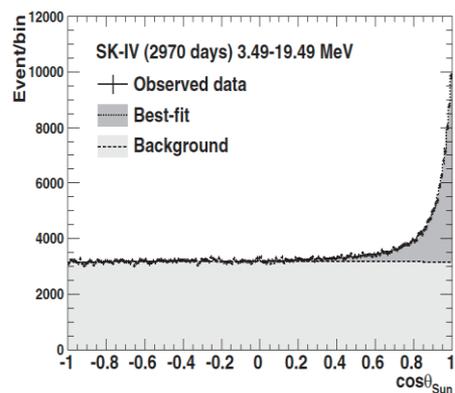


- 不同实验测量的结果,中间没有数据约束的区域
- 有不同的可能行
  - 标准模型
  - NSI非标准相互作用
  - 惰性中微子



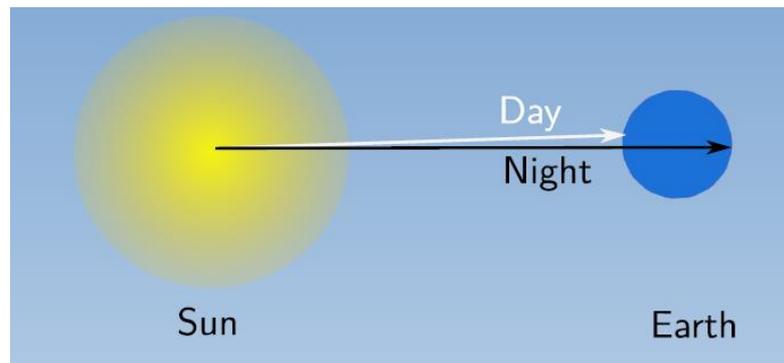
# 超级神冈B8 solar中微子的测量

- 测量阈值: 3.5 MeV
- 能谱在低能段:
  - Upturn is favored at  $1.2 \sigma$ . Jointly with SNO data, at  $2.1 \sigma$ .

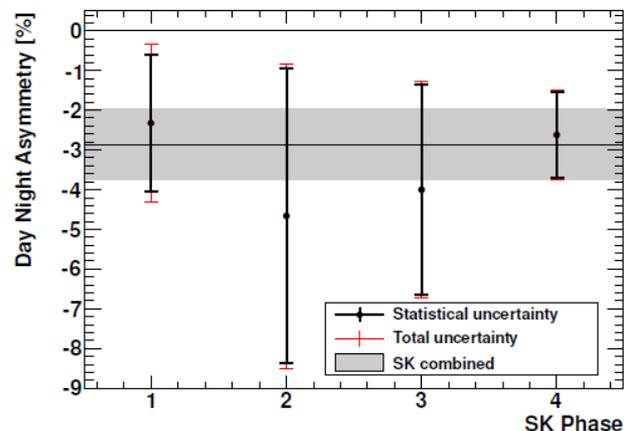
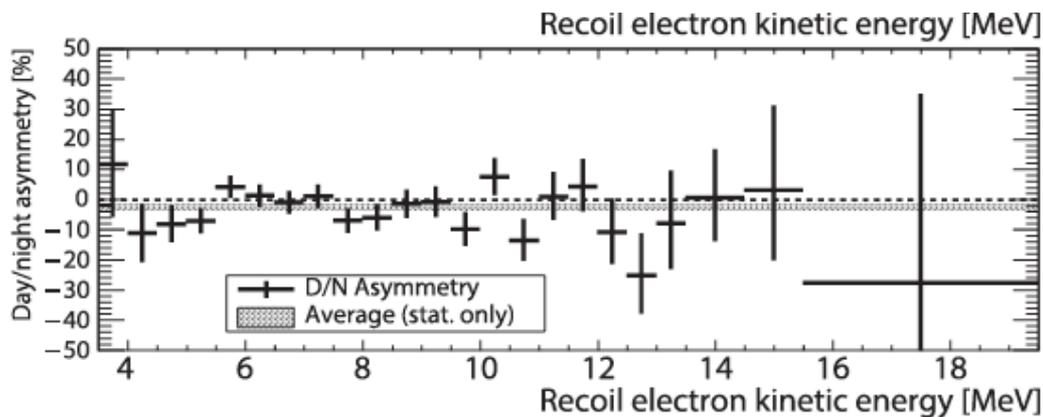


# 超级神冈日夜效应

- 太阳中微子到达地球，由于地球自转，探测器白天和晚上观测到中微子有所差异。
  - 主要差异在于差了一个地球的传播距离；
  - 中微子在地球内的物质效应；
- **超级神冈**
  - 观测到3%的效应；
  - $3\sigma$ 的灵敏度。



$$A_{D/N}^{SK, \text{fit}} = -0.0286 \pm 0.0085 (\text{stat.}) \pm 0.0032 (\text{syst.}).$$

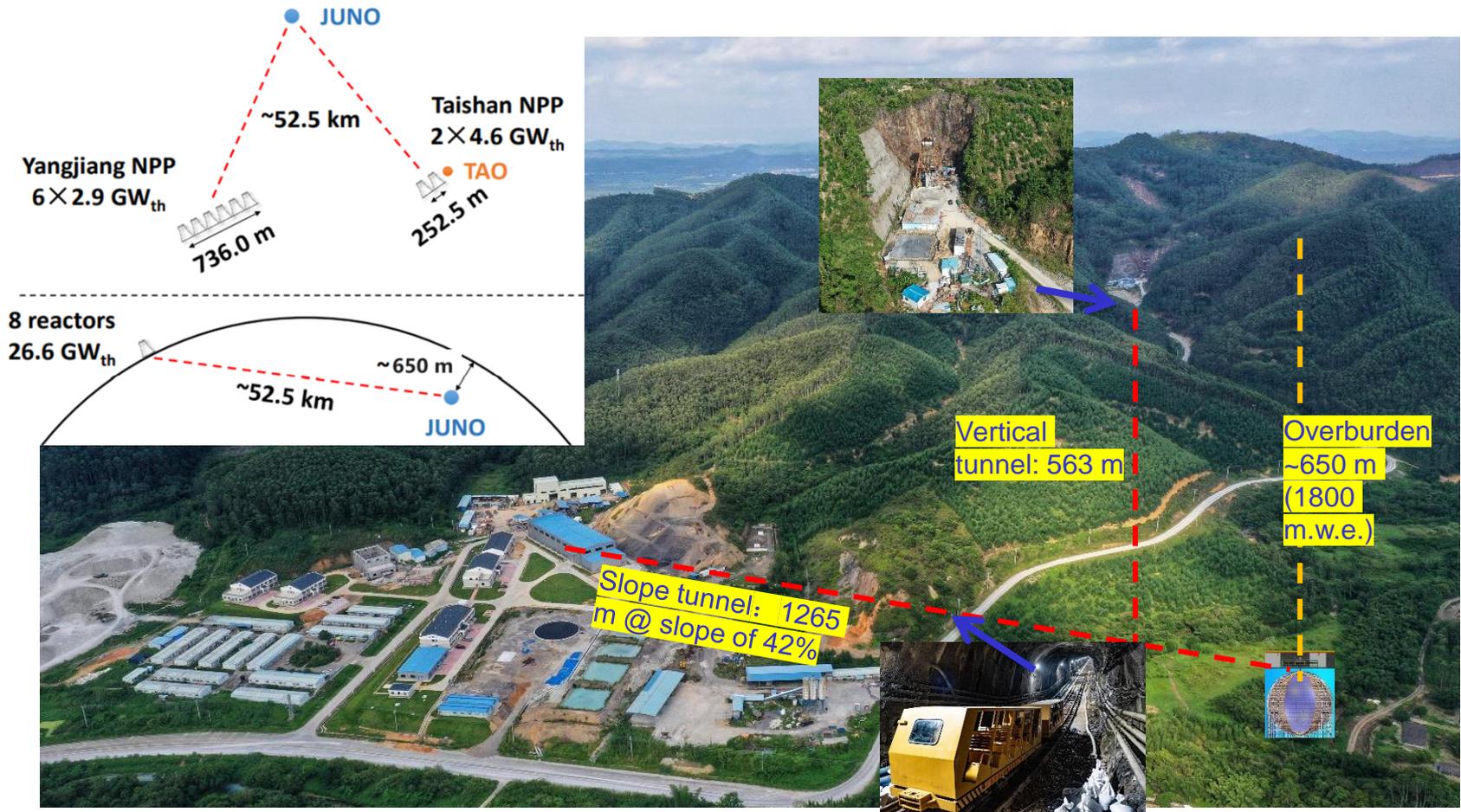




---

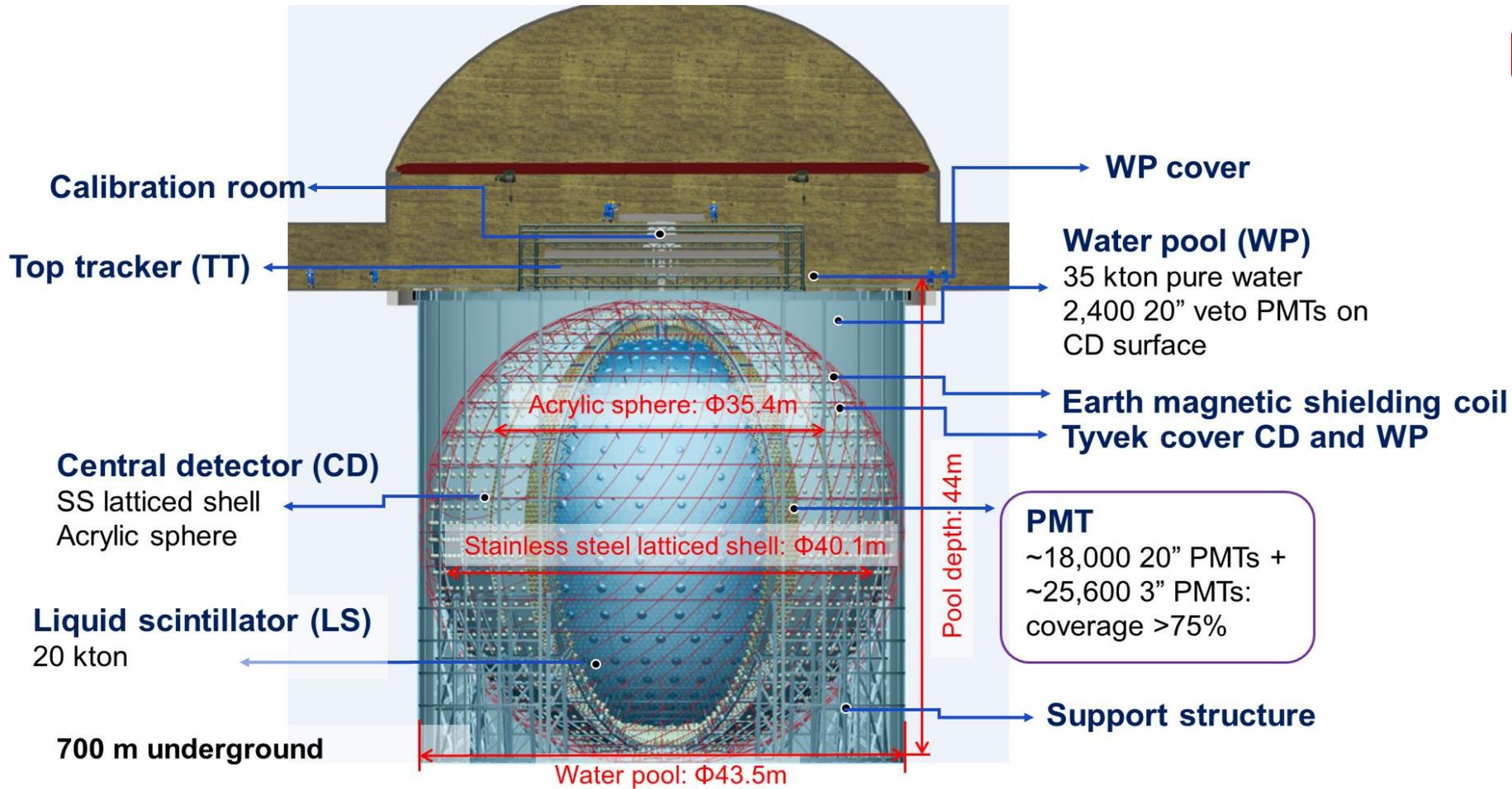
# 3. 未来的实验

# 3.1 江门中微子实验



探测器2024年底即将完成安装。

# 江门探测器示意图



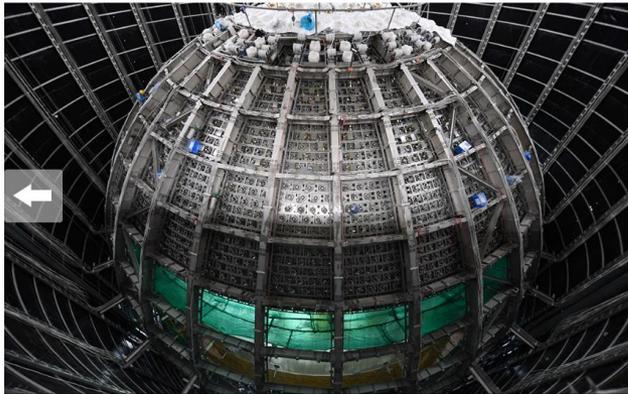
# 3.1 江门中微子实验

江门中微子实验大科学装置，曾多次在人民日报，人民网等多家国内媒体，同时也曾在nature杂志等国外网站上报道。



人民网 >> 图片频道

江门中微子实验探测器：地下700米的大科学装置【11】



位于地下700米的江门中微子实验探测器呈现巨大的球形结构（6月14日摄，无人机照片）。

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 回 来源：新华社 2023年06月16日10:07

江门中微子实验位于广东省江门市开平市，是由中科院和广东省共同建设的大科学装置，以测定中微子质量顺序、精确测量中微子混合参数为主要科学目标，并进行其他多项科学前沿研究。

## 创新攻关 脚步不停（科技自立自强）

人民融媒体 2022-05-06 06:09

本文转自：人民日报



广东江门中微子实验站建设现场。  
刘悦湘摄

核心阅读

刚刚过去的“五一”假期，很多科技工作者在各自岗位上度过。从北京航天飞行控制中心的任务大厅到地下700米的广东江门中微子实验站，从之江实验室的模拟火星试验场到湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站……科技工作者坚守一线、潜心科研，为加快建设科技强国，实现高水平科技自立自强而持续奋斗着。



www.nature.com



nature

Search

Log in

Content

About

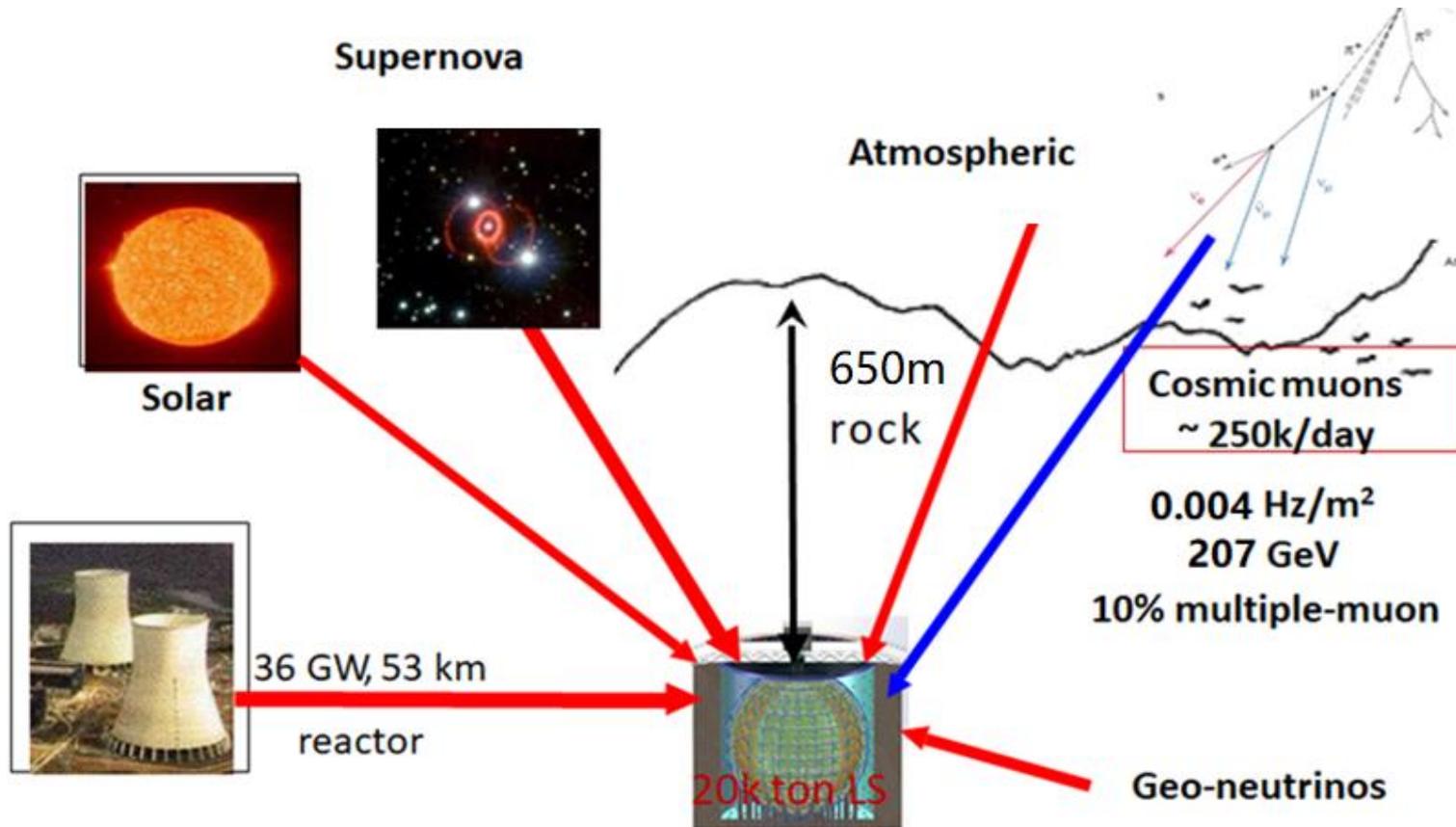
Publish



## China's giant underground neutrino lab prepares to probe cosmic mysteries

Due to come online this year, the JUNO facility will help to determine which type of neutrino has the highest mass — one of the biggest mysteries in physics.

# 江门实验的物理研究



J. Phys. G 43 (2016) no.3, 030401  
Part. Nucl. Phys. 123 (2022), 103927

# 江门中微子实验 (JUNO)

20 kt 液体闪烁体

→ 体积是Borexino的70倍，统计量大。

→  $3\%/\sqrt{E}$  能量分辨，好于Borexino (5%)，能谱测量更加精确；

- 能量阈值

- 可以做到0.2MeV甚至更低；

- 好于水切伦科夫探测器SuperK

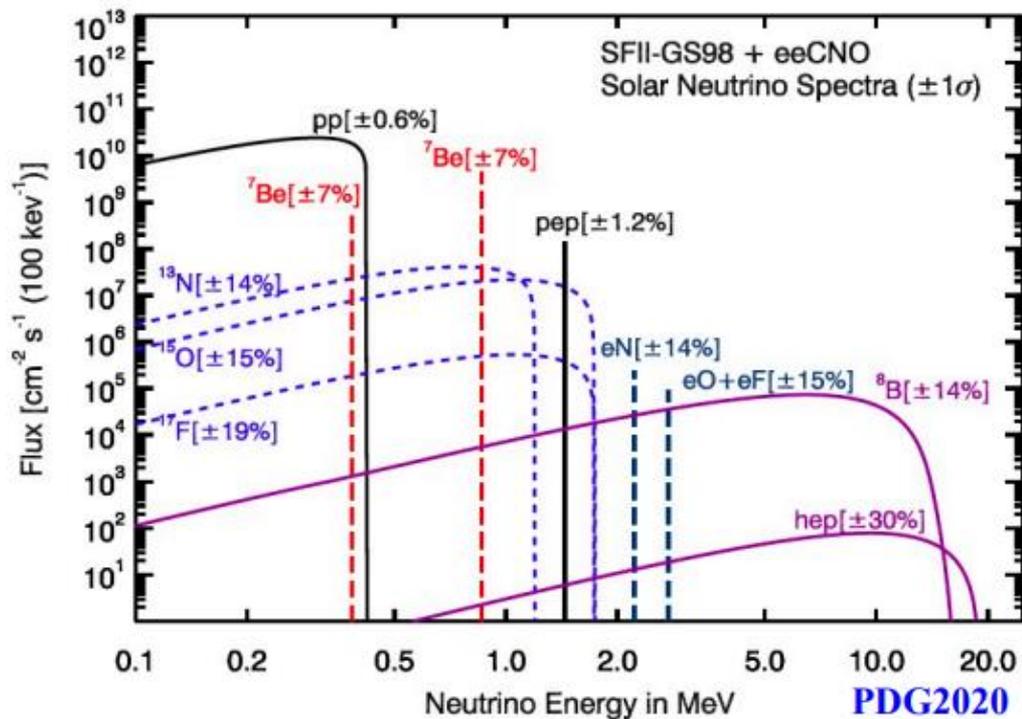
- 天然放射性本底

- 达到Borexino初期水平

- 适合开展太阳中微子所有产生链的流强探测！

# 江门实验太阳中微子的探测

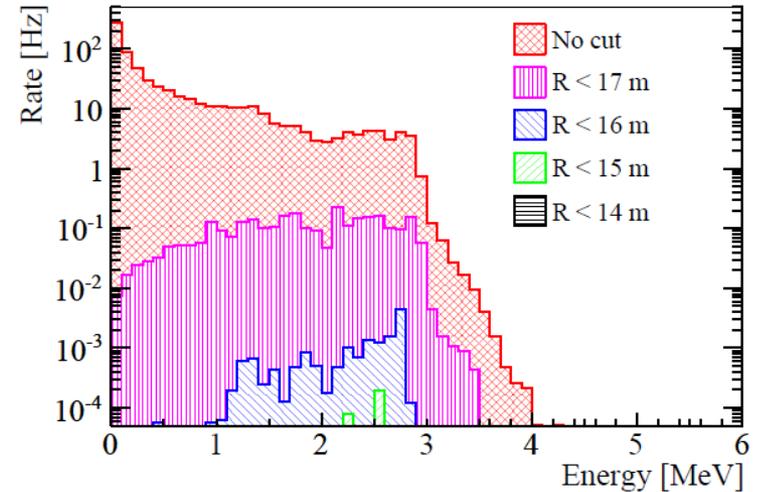
- 太阳中微子探测器信号
- 本底
  - 放射性引入的本底；
  - 宇宙线缪子引入的本底



# 外部天然放射性本底

## ■ 外部材料本底

| 主材料   | U/Th含量                        | 参考                          |
|-------|-------------------------------|-----------------------------|
| 有机玻璃  | < 1 ppt                       | Ref: NIMA1004 (2021) 165377 |
| 不锈钢网架 | < 1 ppb                       | Same supplier with Daya Bay |
| PMT玻璃 | ~200 ppb                      | Ref: NIMA 898 (2018) 67-71  |
| 超纯水   | Radon < 0.1 Bq/m <sup>3</sup> | Ref: RDTM (2018) 2:48       |
| 岩石    | 10~30 ppm                     | 4 m水层, 5 mm HDPE隔离          |



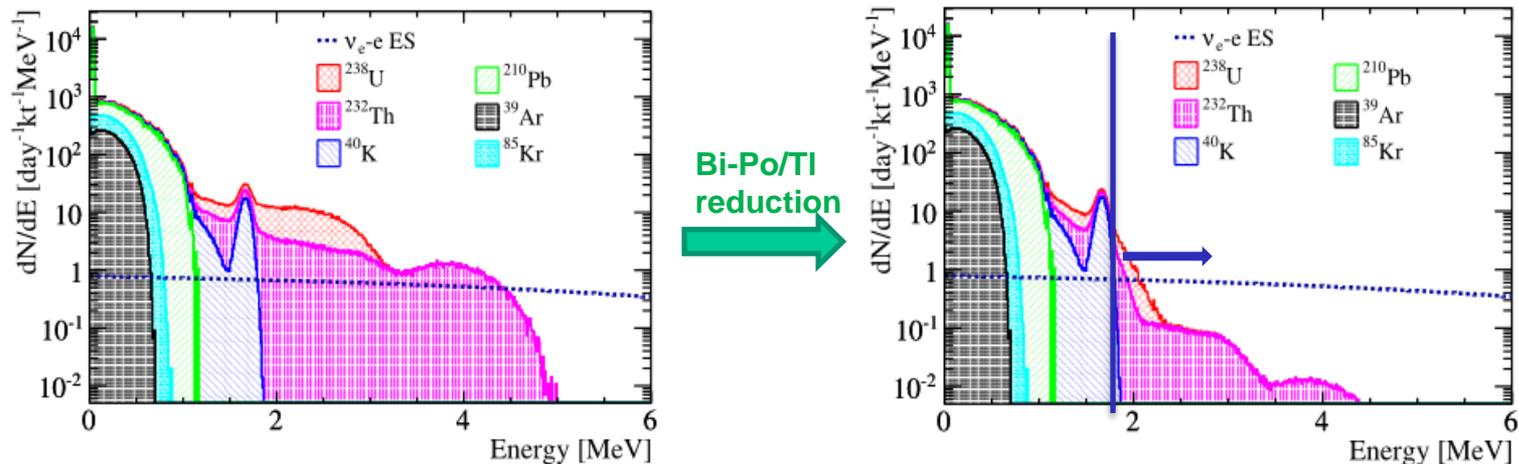
## ■ 中子在外部材料上的俘获

- ✓ 高能gamma: 中子在金属、PMT玻璃和有机玻璃上的俘获产生
- ✓ 残留本底: < 0.001 cpd with  $R < 16.5$  m

## ■ 降低此类本底的做法

- ✓ 进行数据分析的时候将探测器靠外部的体积去掉 (FV cut) 以降低此类本底。

# 液闪中放射性本底



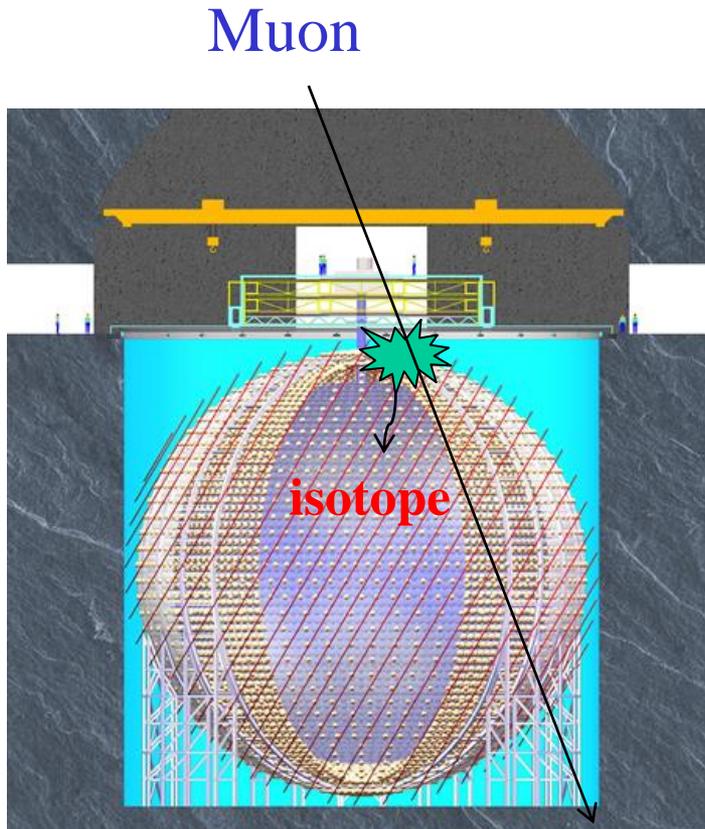
内部放射性本底:

1. 生产制作过程中本底压低和控制材料放射性;
2. 数据得到后, 根据放射性衰变的特性, 有一些衰变链可以有关联信号, 也可以压低本底。

<sup>238</sup>U: 10<sup>-17</sup> g/g<sup>8</sup>  
<sup>232</sup>Th: 10<sup>-17</sup> g/g  
<sup>40</sup>K: 10<sup>-18</sup> g/g  
<sup>210</sup>Pb: 10<sup>-24</sup> g/g  
<sup>14</sup>C: 10<sup>-17</sup> g/g  
<sup>39</sup>Ar/<sup>85</sup>Kr: 1 μBq/m<sup>3</sup>  
<sup>210</sup>Po: 2600 cpd/kt

# 宇宙线引入的本底

- Muon的流强  $\sim 0.004\text{Hz}/\text{m}^2$ ;
- 平均能量  $\sim 207\text{GeV}$



| Muon multi. | ratio |
|-------------|-------|
| 1           | 90%   |
| 2           | 7.35% |
| 3           | 1.7%  |
| 4           | 0.6%  |
| 5           | 0.23% |
| 6           | 0.06% |

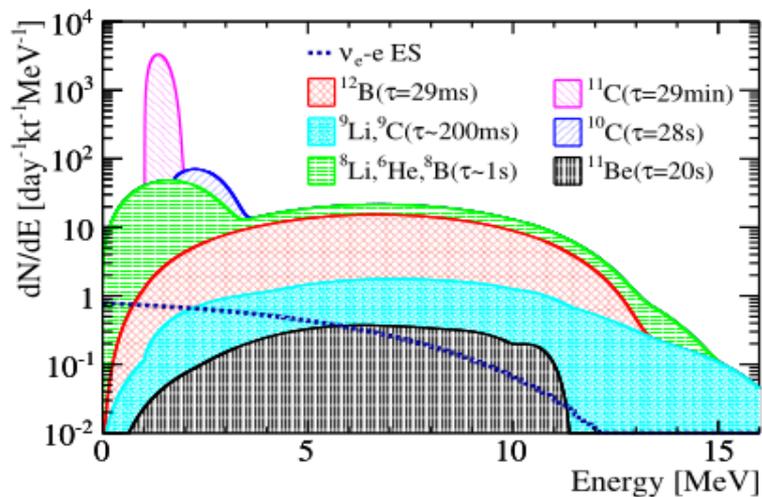
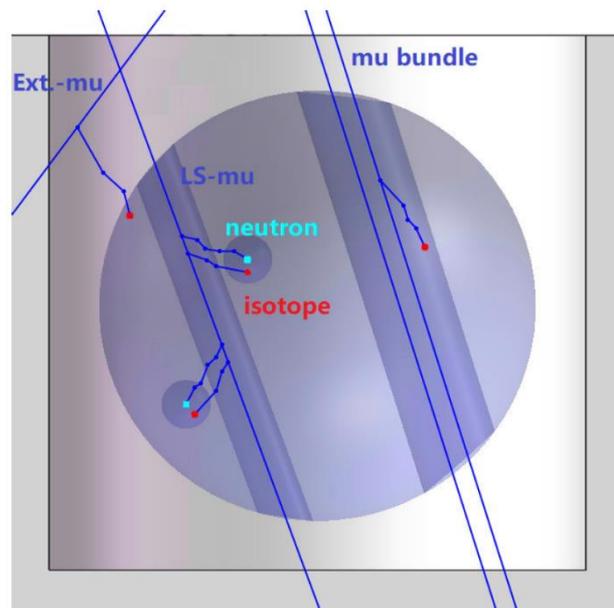
# 宇宙线引入的本底事例率评估

基于muon rate和事例率进行评估。

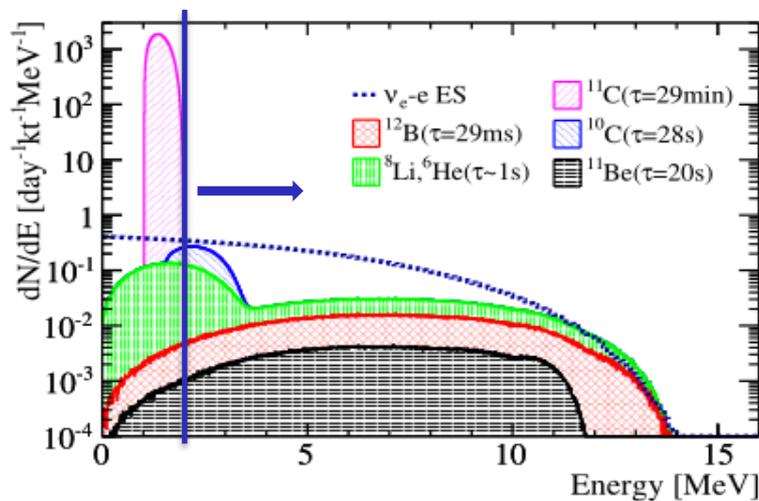
| Isotope | MC Yield(day) | Data Extra./day) |
|---------|---------------|------------------|
| B12     | 916.8         | 2282.0           |
| Li8     | 627.9         | 649.0            |
| C10     | 707.2         | 877.7            |
| He6     | 455.7         | 2185.6           |
| B8      | 30.1          | 446.8            |
| Li9     | 58.8          | 117.0            |
| Be11    | 8.0           | 58.5             |
| C9      | 17.8          | 159.6            |
| N16     | 0.48          | ---              |

# 本底压低策略

将来in-situ可测量：宇生同位素产额、距离muon径迹的分布、伴随产生中子的比例



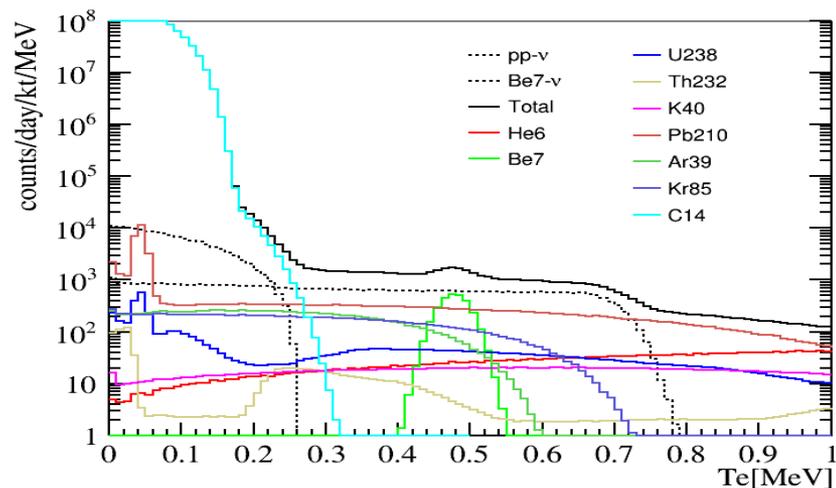
$\mu$  track + TFC reduction



# 太阳pp中微子探测

- pp中微子的探测是研究太阳的一个有力工具:
  - SSM (太阳亮度)
    - Uncertainty of prediction:  $\sim 0.6\%$
    - 测量误差:  $\sim 10\%$  (Borexino)
    - 日震学观测:  $< 0.1\%$ , Borexino+亮度约束:  $0.5\%$
  - 研究中微子低能真空区域的振荡
- pp中微子探测上的主要挑战
  - 需要低的探测阈值;
  - 本底的控制和压低
    - $^{14}\text{C}$  本底在pp中微子能区的堆积
  - 能量在低能区的刻度
  - 系统误差的考虑
  - 触发, 事例鉴别和能量响应

JUNO at  $^{14}\text{C}$   $10^{-18}$  g/g



# pp和<sup>14</sup>C本底的鉴别

本底控制 → 开发算法鉴别<sup>14</sup>C pile-up

*pp-v*: single cluster

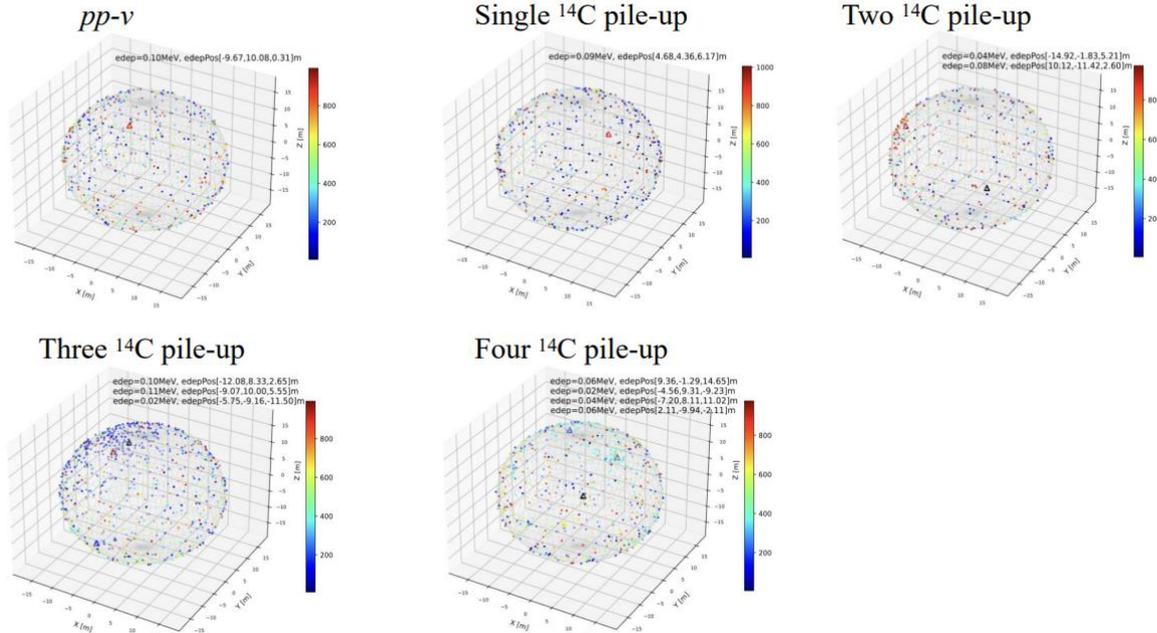


<sup>14</sup>C pileup event: more than one cluster



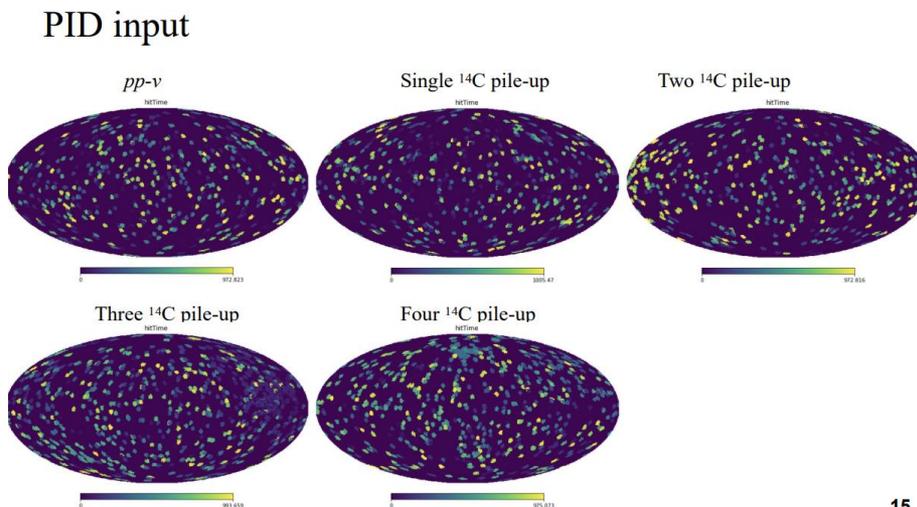
Multiple <sup>14</sup>C events in the same time window

- 机器学习，神经网络方法



# pp--机器学习训练

- 事例的训练



15

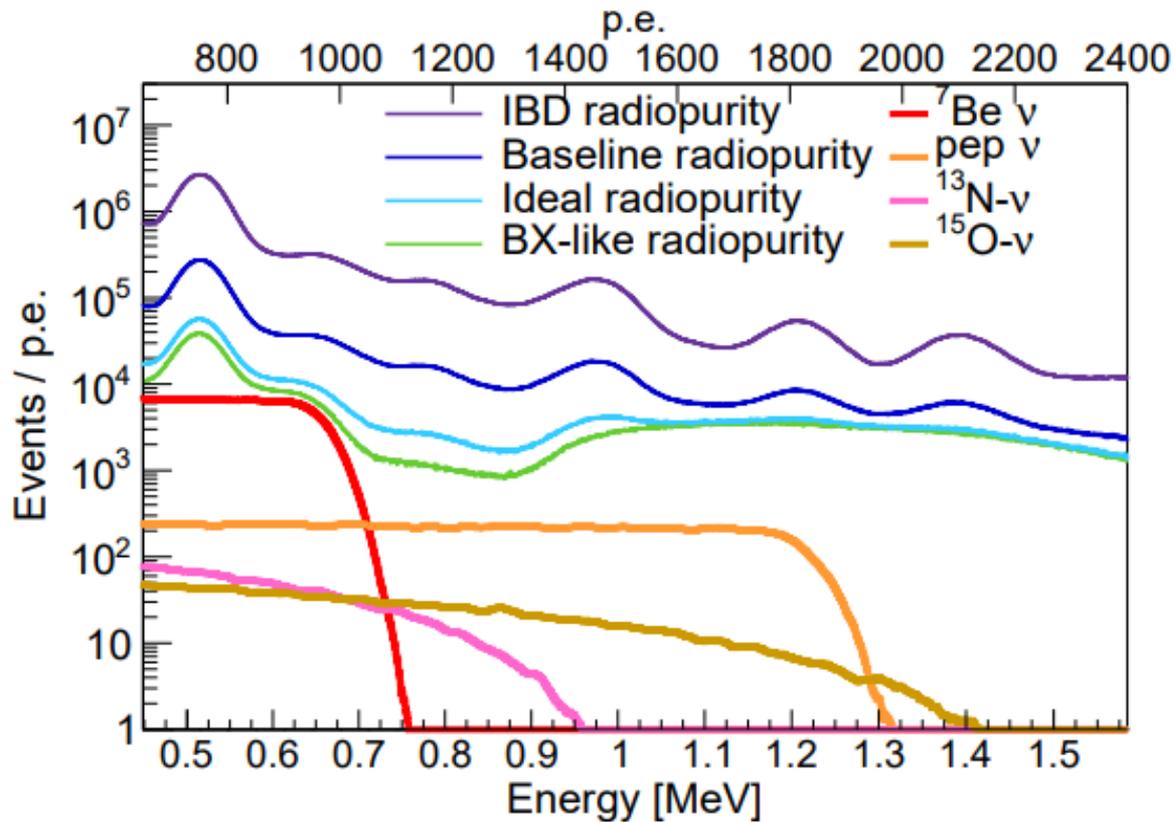
- 分析的初步结果:

*Preliminary*

|                        |                                | Efficiency    |                                 |                            |
|------------------------|--------------------------------|---------------|---------------------------------|----------------------------|
|                        | raw S/B<br>( $10^{-17}$ [g/g]) | After trigger | After PID                       | S/B<br>( $10^{-17}$ [g/g]) |
| pp                     | --                             | 46%           | 8.28%<br>(46% $\times$ 18%)     | --                         |
| Single <sup>14</sup> C | 1 : 104063                     | 22%           | 0.022%<br>(22% $\times$ 0.1%)   | 1 : 276.5                  |
| Double <sup>14</sup> C | 1 : 3454.5                     | 32%           | 0.032%<br>(32% $\times$ 0.1%)   | 1 : 13.35                  |
| Triple <sup>14</sup> C | 1 : 57.3                       | 44%           | 0.0308%<br>(44% $\times$ 0.07%) | 1 : 0.21                   |
| Four <sup>14</sup> C   | 1 : 0.63                       | 53%           | $\sim$ 0%<br>(53% $\times$ 0%)  | --                         |

# Be7, pep, CNO中微子的探测

感兴趣的区域是(ROI): 0.45-1.6 MeV

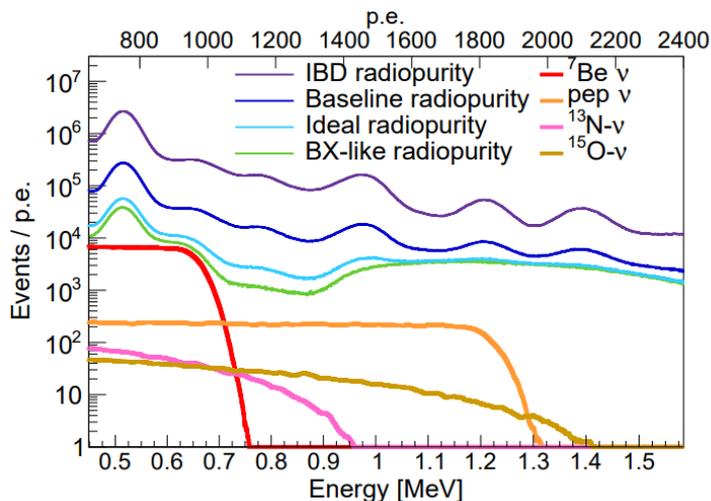


# 宇宙线引入同位素本底

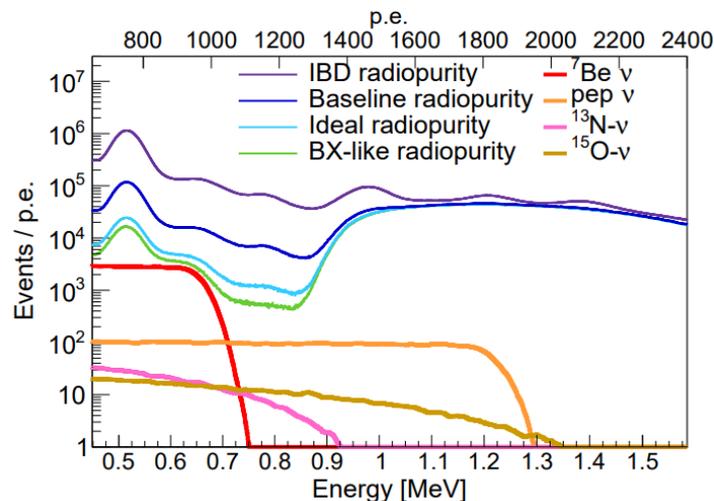
- ${}^7\text{Be}$ , pep, CNO中微子分析能区
  - ${}^{11}\text{C}$  ( $\tau=29\text{min}$ ),  ${}^{10}\text{C}$  ( $\tau=27.8\text{s}$ ),  ${}^6\text{He}$  ( $\tau=1.16\text{s}$ ) 是此能区主要本底。
  - ${}^{11}\text{C}$ 半衰期很长, 很难通过简单muon反符合策略去除
    - 用TFC方法, 将数据分成TFC-subtracted和TFC-tagged, 在fitter中同时做拟合

| Isotope           | $R_{\text{Scaling exp.}}$<br>[cpd/kton]                         | $R$<br>[cpd/kton]                 | $\langle R \rangle$<br>[cpd/kton] | $\langle R \rangle_{\text{ROI}}$<br>[cpd/kton] |
|-------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| ${}^{11}\text{C}$ | $R_{\text{Bx}} = 274 \pm 3$<br>$R_{\text{KL}} = 1106 \pm 8$     | $1890 \pm 199$<br>$1959 \pm 254$  | $1916 \pm 157$                    | $1761 \pm 144$                                 |
| ${}^{10}\text{C}$ | $R_{\text{Bx}} = 6.2 \pm 2.2$<br>$R_{\text{KL}} = 21.1 \pm 1.8$ | $41.4 \pm 15.3$<br>$36.5 \pm 5.7$ | $37.1 \pm 5.3$                    | $0.25 \pm 0.04$                                |
| ${}^6\text{He}$   | $R_{\text{Bx}} = 11.1 \pm 4.5$<br>$R_{\text{KL}} = 15.4 \pm 2$  | $74 \pm 31$<br>$26.6 \pm 4.9$     | $27.8 \pm 4.8$                    | $12.7 \pm 2.19$                                |

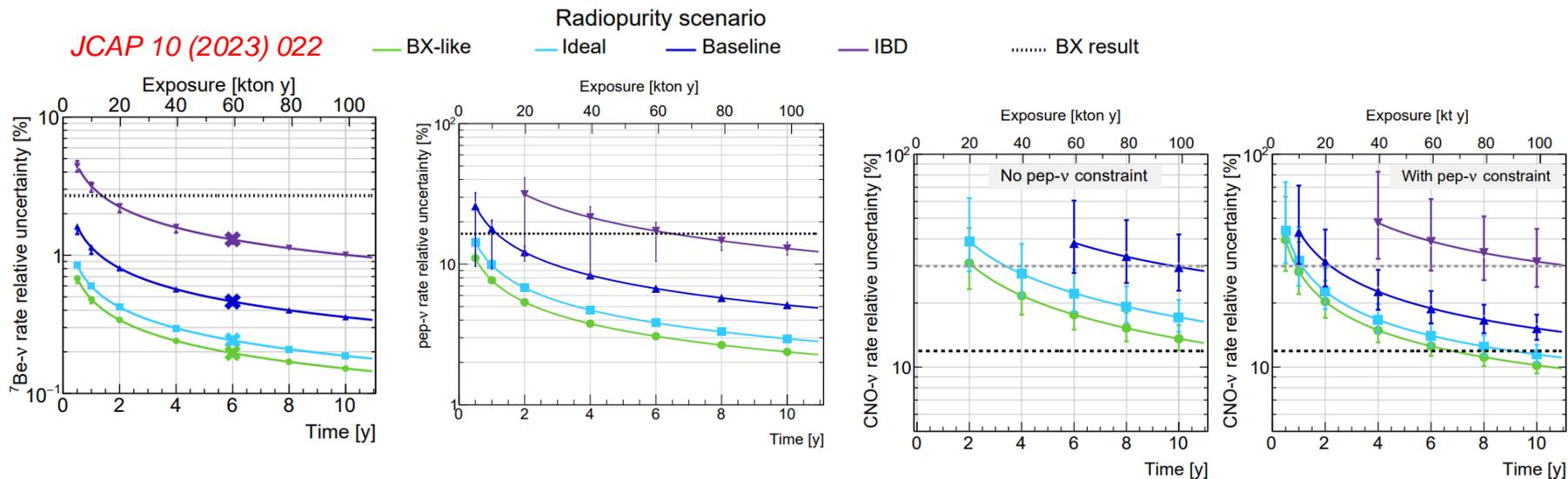
## TFC-subtracted



## TFC-tagged



# $^7\text{Be}$ , pep, CNO中微子流强灵敏度



|          | $^7\text{Be}$ | pep   | CNO        |         |
|----------|---------------|-------|------------|---------|
|          |               |       | 无pep约束     | 有pep约束  |
| Borexino | 2.7%          | 17%   | +30%, -12% |         |
| 6年数据     | 0.25%-0.5%    | 4%-7% | 20%-40%    | 15%-18% |
| 10年数据    | 0.2%-0.35%    | 3%-5% | 16%-30%    | 12%-16% |

精度范围对应Baseline-ideal scenarios, 分析未加入系统误差

# $^7\text{Be}$ 和CNO- $\nu$ 相关物理

- $\text{Be}^7$ 中微子  $\rightarrow$  g-mode
  - 可以了解太阳内核;
  - 理论需求: 小时量级周期, 幅度精度要求未知
- CNO 中微子
  - 理论预期比观测结果低;
  - 太阳金属丰度问题?

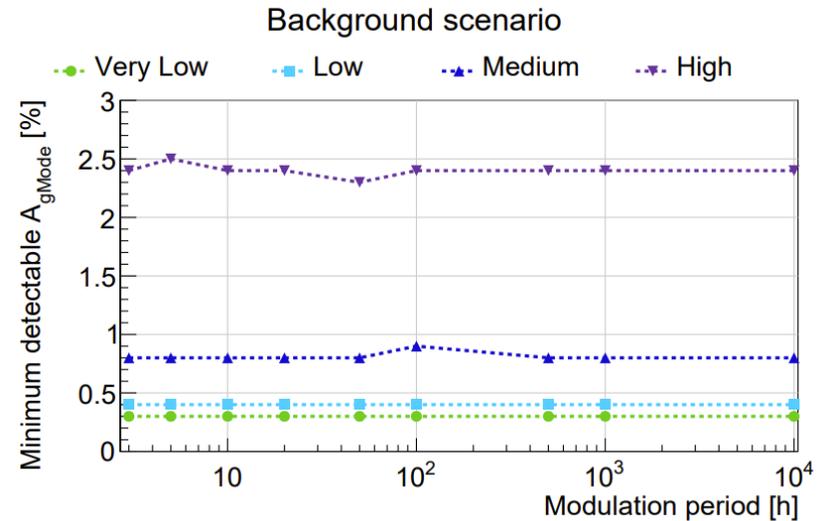
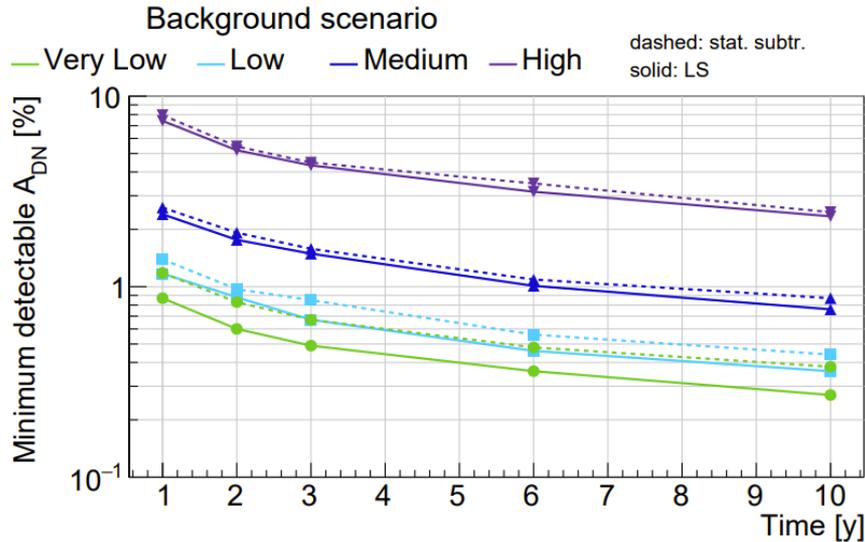
|                    | GS98        | SSM09Ne     | TWA         | the Sun       |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| $(Z/X)_s$          | 0.0229      | 0.0188      | 0.0188      | 0.0188(12)    |
| A(Li)              | 2.44        | 2.60        | 0.82        | 1.05(10)      |
| pp/ $10^{10}$      | 5.96 (0.5%) | 5.99 (0.5%) | 5.98 (0.5%) | 5.97 (0.5%)   |
| pep/ $10^8$        | 1.45 (0.9%) | 1.46 (0.9%) | 1.47 (0.9%) | 1.45 (0.9%)   |
| $^7\text{Be}/10^9$ | 4.91 (6%)   | 4.70 (6%)   | 4.84 (6%)   | 4.80 (5%)     |
| $^8\text{B}/10^6$  | 5.35 (12%)  | 4.89 (12%)  | 5.13 (12%)  | 5.16 (2%)     |
| CNO/ $10^8$        | 5.15 (12)   | 3.87 (15%)  | 3.88 (15%)  | 6.6 (5.7-8.6) |

# $^7\text{Be}$ 中微子物理

- 日夜不对称性 (地球物质效应)
  - 最好的精度: 0 with 0.95% precision by Borexino

- g-modes

- Current best: 10% by SNO B8 (*Astrophys. J.* 710 (2010) 540)



10 y data

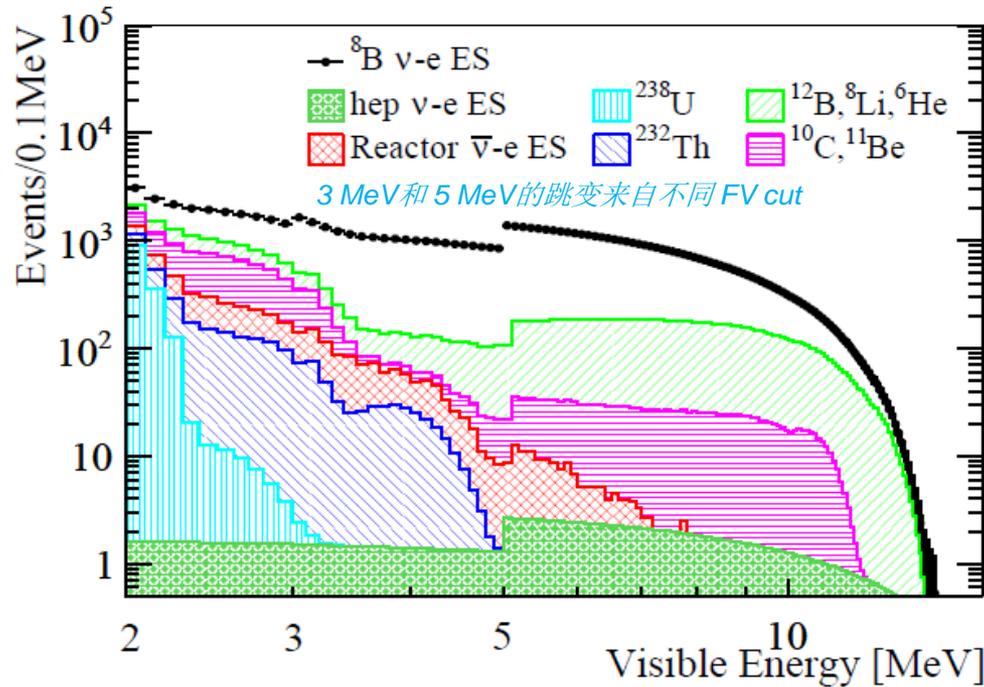
# B8-v

- 不同的反应道

| No. |      | 20 kt · 10 y   | Threshold [MeV] | Signal                                | <sup>8</sup> B | hep  |
|-----|------|--|-----------------|---------------------------------------|----------------|------|
| 1   | ES 😊 | $\nu + e \rightarrow \nu + e$ [1]  | 0               | kinetic $e^-$                         | 3e5            | 639  |
| 2   | CC   | $\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^- + {}^{12}\text{N}(1^+; gnd)$ [14]                               | 16.827          | kinetic $e^-$                         | 0              | 0.41 |
| 3   |      | 😊 $\nu_e + {}^{13}\text{C} \rightarrow e^- + {}^{13}\text{N}(\frac{1}{2}^-; gnd)$ [15]                   | 2.2             | kinetic $e^- + {}^{13}\text{N}$ decay | 3768           | 14.3 |
| 4   | NC   | $\nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + {}^{12}\text{C}(1^+; 15.1\text{MeV})$ [14]                      | 15.1            | $\gamma$                              | 0.25           | 4.9  |
| 5   |      | Overlap with TBD $\nu + {}^{13}\text{C} \rightarrow \nu + n + {}^{12}\text{C}(2^+; 4.44\text{MeV})$ [16] | 6               | $n$ capture + $\gamma$                | 67.1           | 1.2  |
| 6   |      | $\nu + {}^{13}\text{C} \rightarrow \nu + {}^{13}\text{C}(\frac{1}{2}^+; 3.089\text{MeV})$ [15]           | 3.089           | $\gamma$                              | 14.4           | 0.07 |
| 7   |      | 😊 $\nu + {}^{13}\text{C} \rightarrow \nu + {}^{13}\text{C}(\frac{3}{2}^-; 3.685\text{MeV})$ [15]         | 3.685           | $\gamma$                              | 3165           | 13.5 |
| 8   |      | $\nu + {}^{13}\text{C} \rightarrow \nu + {}^{13}\text{C}(\frac{5}{2}^+; 3.854\text{MeV})$ [15]           | 3.854           | $\gamma$                              | 2.89           | 0.02 |

# $^8\text{B}$ 太阳中微子ES 反应道

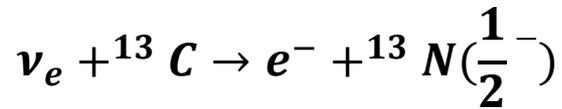
- 信号特征：单信号



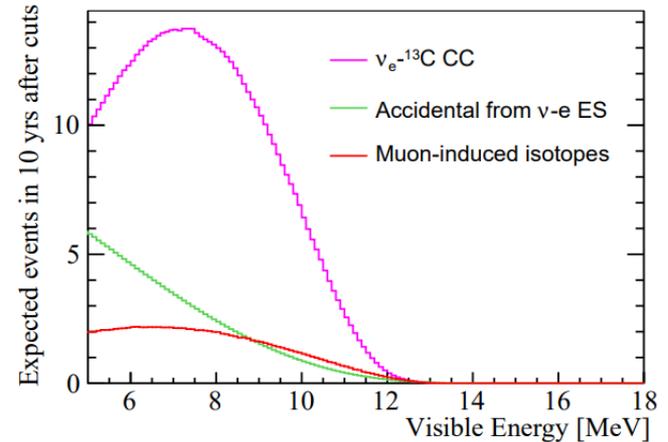
$$\Delta m_{21}^{2*} = 4.8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \text{ and } \Delta m_{21}^{2\dagger} = 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

| cpd/kt      | FV      | $^8\text{B}$ signal eff. | $^{12}\text{B}$ | $^8\text{Li}$ | $^{10}\text{C}$ | $^6\text{He}$ | $^{11}\text{Be}$ | $^{238}\text{U}$ | $^{232}\text{Th}$ | $\bar{\nu}$ -e ES | Total bkg. | Signal rate at       |                            |
|-------------|---------|--------------------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------|----------------------|----------------------------|
|             |         |                          |                 |               |                 |               |                  |                  |                   |                   |            | $\Delta m_{21}^{2*}$ | $\Delta m_{21}^{2\dagger}$ |
| (2, 3) MeV  | 7.9 kt  | ~51%                     | 0.005           | 0.006         | 0.141           | 0.084         | 0.002            | 0.050            | 0.050             | 0.049             | 0.39       | 0.32                 | 0.30                       |
| (3, 5) MeV  | 12.2 kt | ~41%                     | 0.013           | 0.018         | 0.014           | 0.008         | 0.005            | 0                | 0.012             | 0.016             | 0.09       | 0.42                 | 0.39                       |
| (5, 16) MeV | 16.2 kt | ~52%                     | 0.065           | 0.085         | 0               | 0             | 0.023            | 0                | 0                 | 0.002             | 0.17       | 0.61                 | 0.59                       |
| Syst. error | 1%      | <1%                      | 3%              | 10%           | 3%              | 10%           | 1%               | 1%               | 2%                |                   |            |                      |                            |

# $^8\text{B}$ 太阳中微子CC道探测

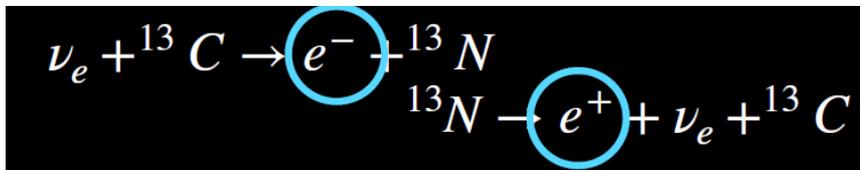
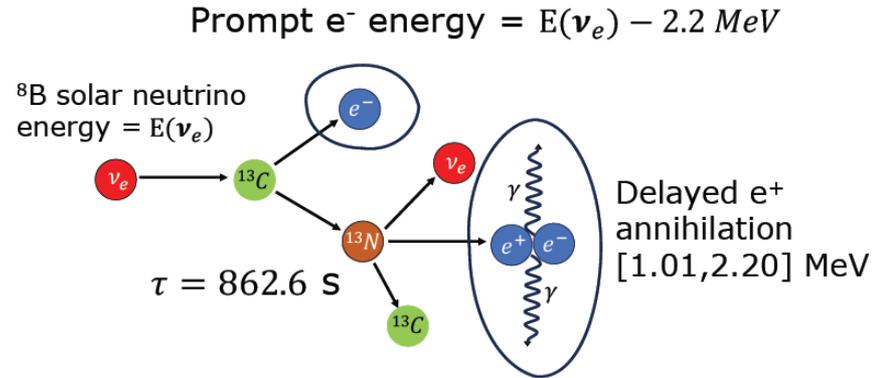
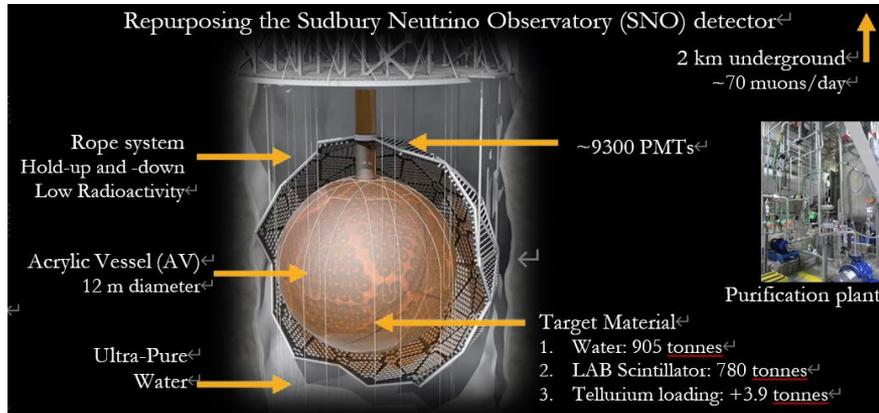


- 信号特征：快慢符合信号
  - 快信号：电子动能
  - 慢信号： ${}^{13}\text{N}$ 衰变 ( $\beta^+$ ,  $\tau = 863$  s)
- 优化事例挑选条件

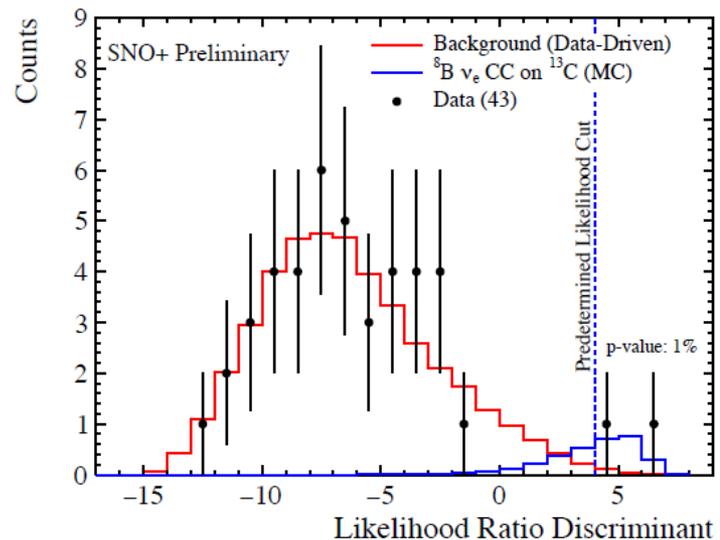


|                     | Cuts                                   | CC signal efficiency | CC signal | Background for CC channel |                       |            |
|---------------------|--|----------------------|-----------|---------------------------|-----------------------|------------|
|                     |  |                      |           | Solar ES                  | Muon-induced isotopes |            |
|                     |  |                      |           | Accidental                | Accidental            | Correlated |
| –                   | –                                      | –                    | 3929      | –                         | –                     | –          |
| Time cut            | $\Delta T < 900$ s                     | 65%                  | 2554      | $10^{10}$                 | $10^{13}$             | $10^{12}$  |
| Energy cut          | $5 \text{ MeV} < E_p < 14 \text{ MeV}$ | 79%                  | 1836      | $10^9$                    | $10^{10}$             | $10^9$     |
|                     | $1 \text{ MeV} < E_d < 2 \text{ MeV}$  | 91%                  |           |                           |                       |            |
| Fiducial volume Cut | $R < 16.5$ m [30]                      | 81%                  | 1487      | $10^7$                    | $10^7$                | $10^8$     |
| Vertex cut          | $\Delta d < 0.47$ m                    | 87%                  | 1293      | 328                       | $10^5$                | $10^6$     |
| Muon veto           | Muon and TFC veto [30]                 | 50%                  | 647       | 164                       | 53                    | 58         |
| Combined            | –                                      | 17%                  | 647       | 275                       |                       |            |

# SNO+(在 $^{13}\text{C}$ 上的CC反应)



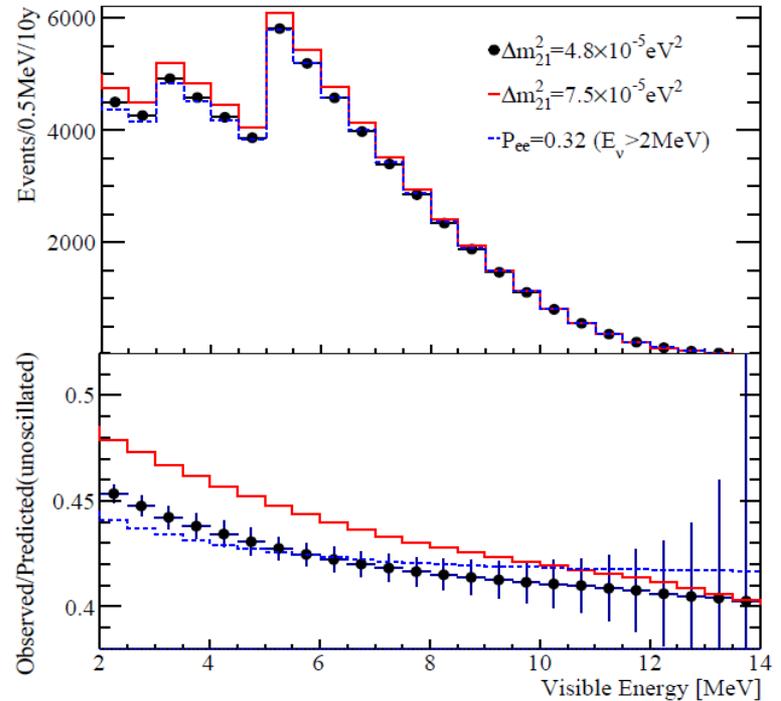
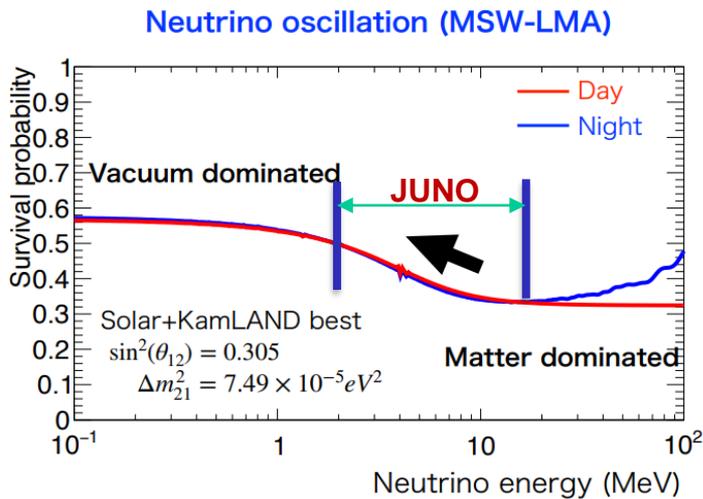
| EXPECTED   | BOX  | LIKELIHOOD |
|------------|------|------------|
| BACKGROUND | 0.31 | 0.17       |
| SIGNAL     | 1.83 | 1.79       |



观测到2个CC事例。

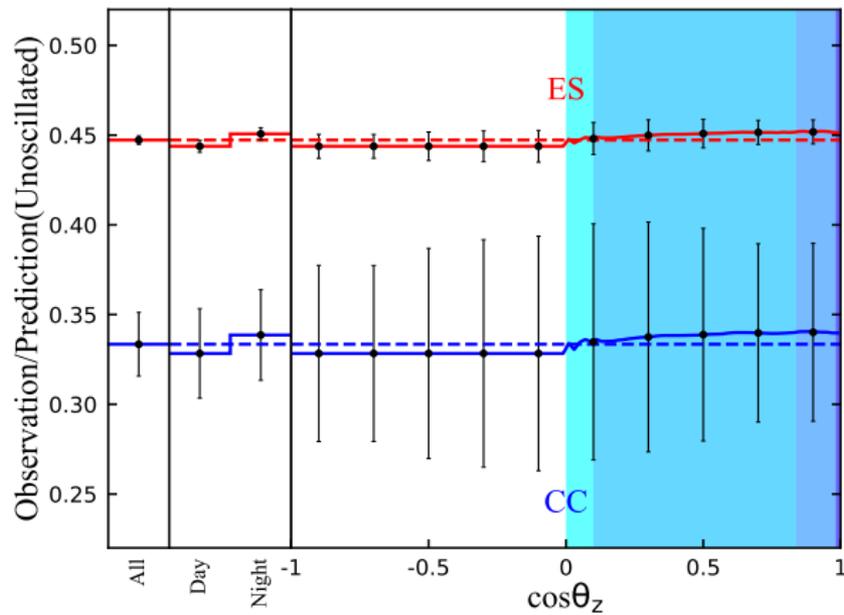
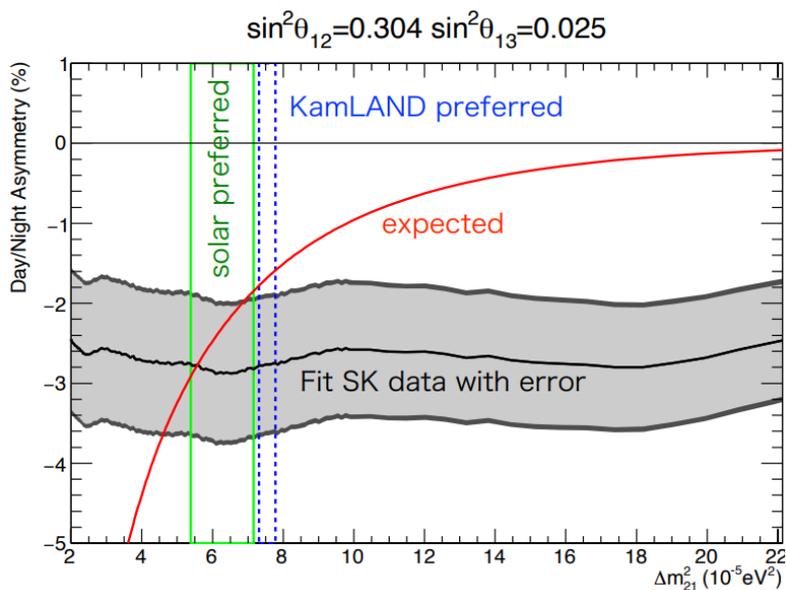
# B8-v: upturn

Upturn: 分析能区 [2,16] MeV, 阈值低于 SuperK 的 3.5 MeV, 几乎完全覆盖 upturn 能区



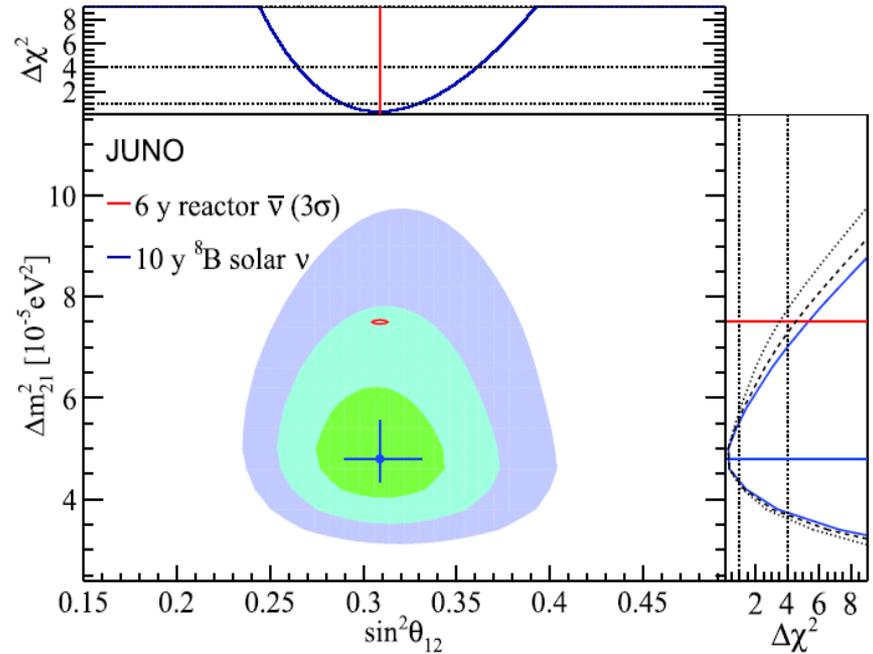
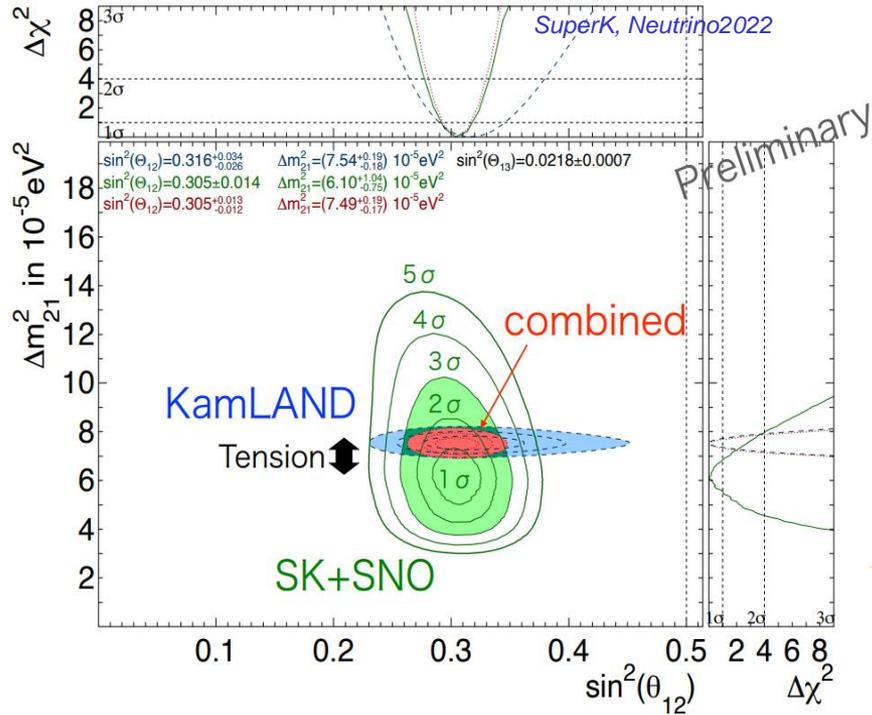
- 排除平的  $P_{ee}$ :  $2.7 \sigma$  with  $\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ , and the statistic-only sensitivity can reach  $5 \sigma$ .

# $^8\text{B}$ 日夜效应



- 进一步检验标准振荡模型，比如日夜效应和中微子存活几率upturn等
  - 日夜效应：10年  $(-2.9 \pm 0.9)\%$  for  $\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ ，和SuperK 20年数据结果相当
  - 主要灵敏度来自ES反应道(大统计量)

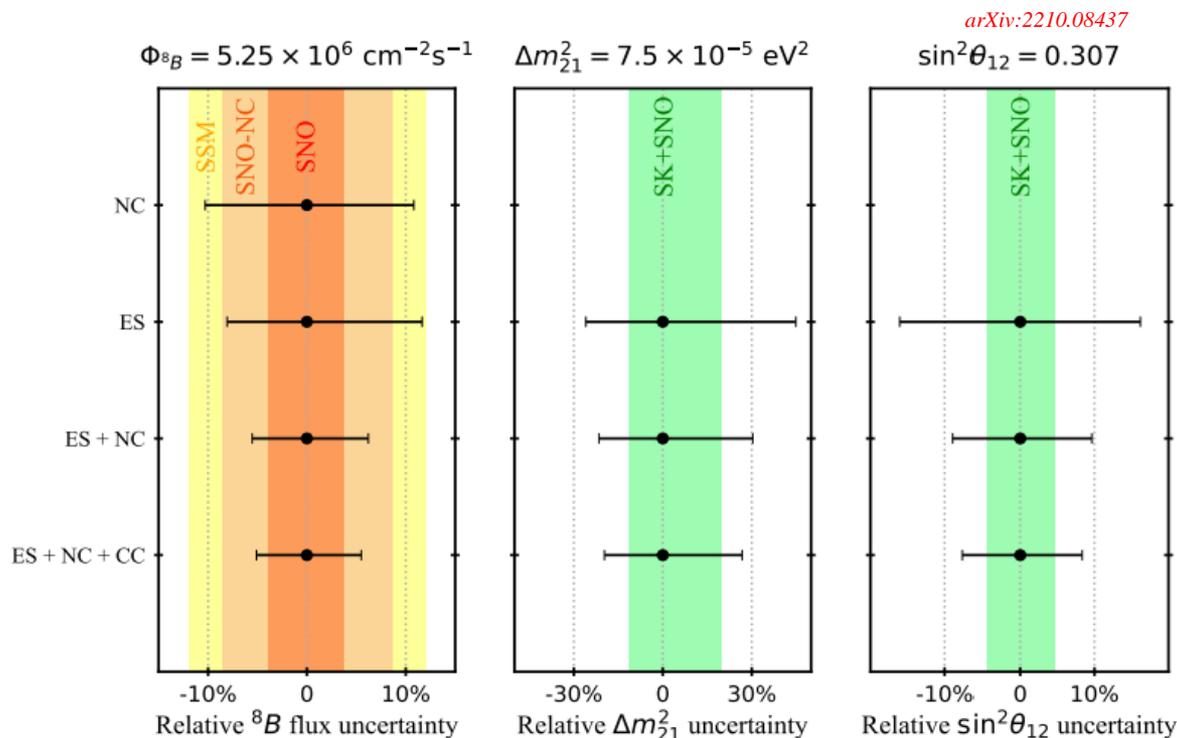
# $^8\text{B}$ 中微子物理



可用同一探测器，不同中微子源（太阳，反应堆）独立测量 $\Delta m_{21}^2$ 以检验此偏差

# B8-v: 模型无关的测量

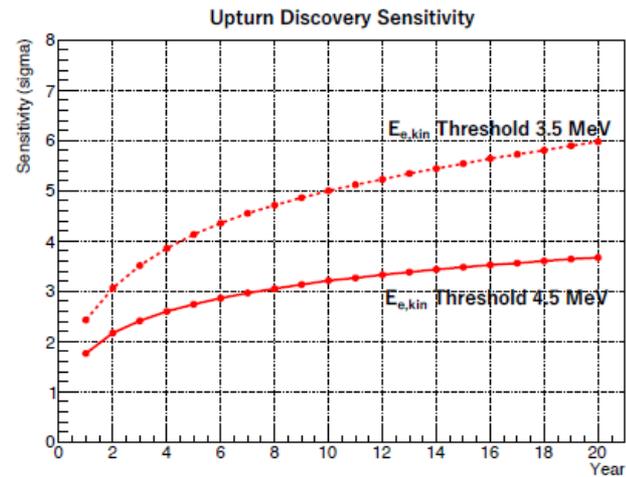
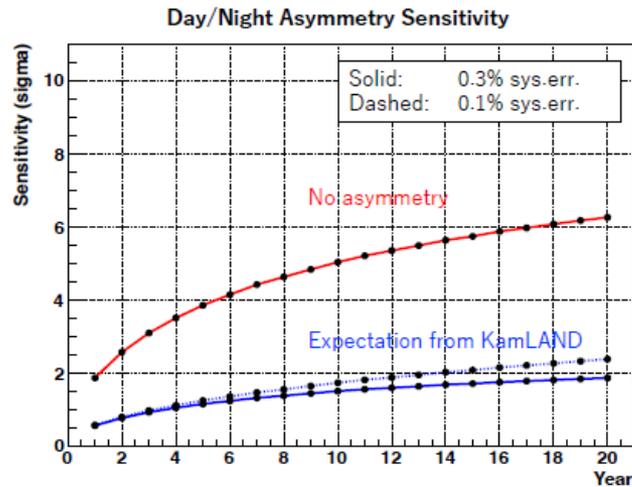
- 利用ES, NC, CC三个反应道
  - 可模型无关的测量 $^8\text{B}$ 太阳中微子流强 (5%) , 两个振荡参数 $\sin^2\theta_{12}$  (8%) 和  $\Delta m_{21}^2$  ( $\sim 20\%$ )
  - 如果联合SNO-NC结果, 可获得世界上最高的 $^8\text{B}$ 中微子流强精度3%
  - JUNO将探测到太阳中微子和 $^{13}\text{C}$ 的NC和CC反应道, 且不需要太阳模型和其他实验测量结果的输入独立测量 $^8\text{B}$ 太阳中微子流强和振荡参数



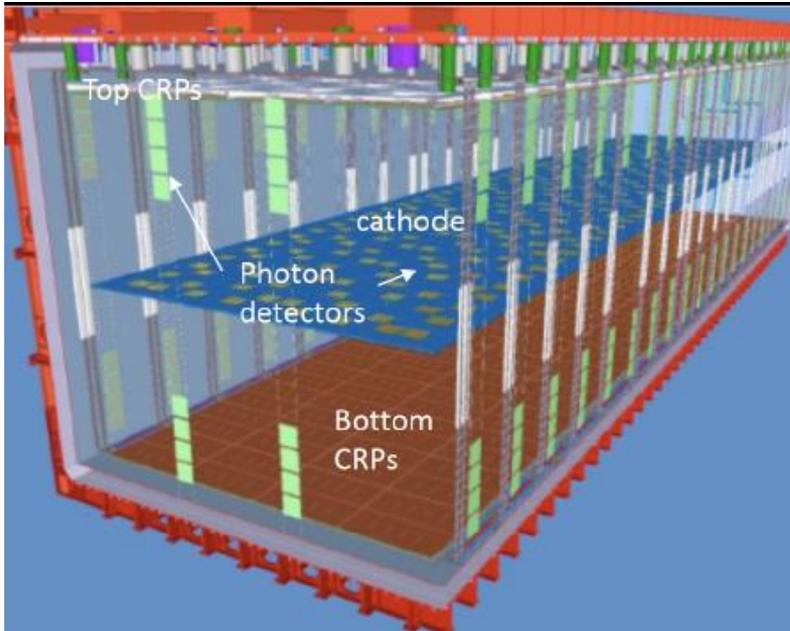
# 3.2 Hyper-Kamiokande



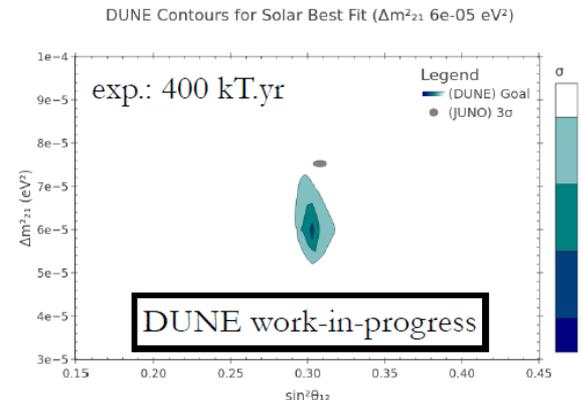
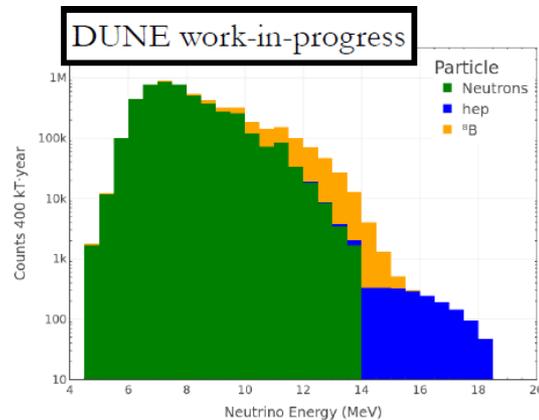
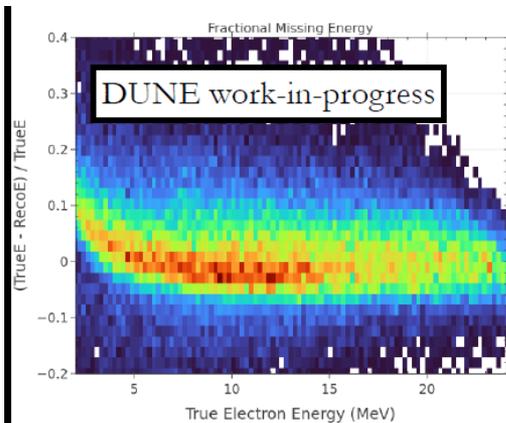
- 探测器体积大水契仑科夫探测器；
  - 预期2027年可以开始运行；
- 预期可以观测  $\sim 5$   $^8\text{B}$  中微子/小时；
- 对日夜效应和振荡的upturn效应的观测
- 超高能中微子(hep)的观测



# 3.3 DUNE

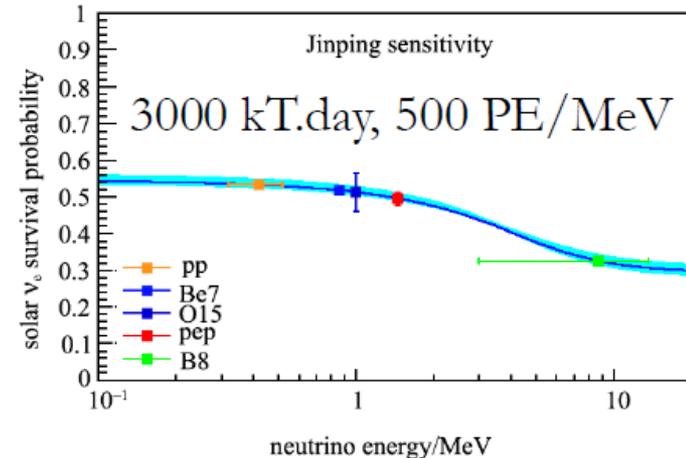
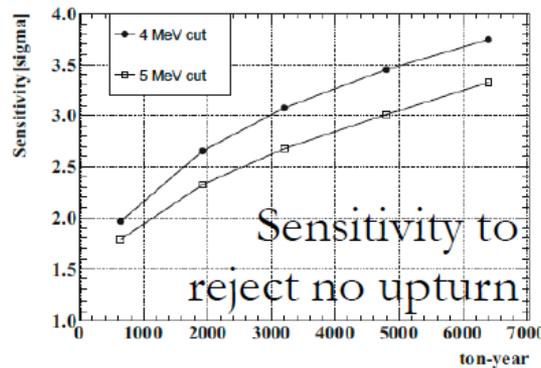
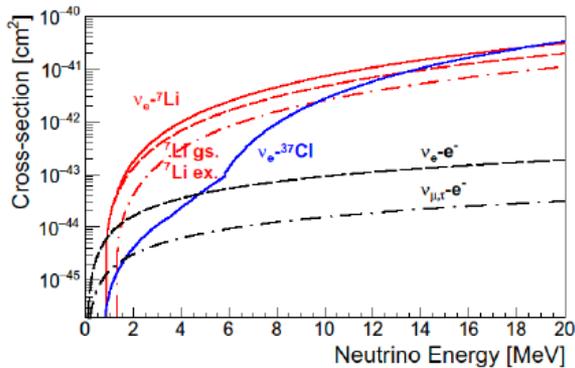


- 27kton的target Ar
  - 16% 能量分辨;
  - 第一期预计2029年开始;
- 物理研究
  - ${}^8\text{B}$ 可以有高统计量;
  - 对于 $\Delta m_{21}^2$  测量和检验;
  - 对hep中微子有比较好的探测能力.



# 3.4 锦屏中微子实验

- 锦屏地下实验室
  - 有机玻璃球~10m, 500m<sup>3</sup>;
  - 水可以掺杂slow\_LS, LiCL-LS or TeLS or NdLS;
- 现在测试PMT和电子学1吨的模型;
- 预期2026年底运行;



## 4. 总结

- 太阳中微子在过去的几十年有很大的进展；
- 即将建成的江门实验是世界上最大的液闪探测器；
  - 可以开展丰富的物理研究；
  - 开展一些太阳中微子相关的物理研究，也有一些特色的研究；
- 希望同学们也能对此感兴趣，加入我们的研究队伍！
- 一起做一些有意思的事情！

## • 参考的报告和文献

- 太阳中微子, 陈少敏, 2021 CEPPC暑期学校;
- Neutrino2024, J. M A N E I R A L I P L I S B O N , P O R T U G A L, Solar neutrinos: Recent results and prospects
- 江门中微子实验, 赵洁, 太阳中微子小型研讨会2024, 中山大学;
- 太阳模型的现状和挑战, 张钱生, 太阳中微子小型研讨会2024, 中山大学;
- 太阳中微子物理和标准模型, 许勋杰, 太阳中微子小型研讨会2024, 中山大学;
- SK实验, 徐本达, 太阳中微子小型研讨会2024, 中山大学;
- 转动太阳模型与核反应截面和太阳中微子, 杨伍明, 太阳中微子小型研讨会2024, 中山大学;
- Neutrinos & Astrophysics of Neutrinos, 钱永忠, CCEPP Summer School 2017 on Neutrino Physics

---

谢谢！