

# 江门中微子实验天文学中 微子研究

张依兵 (代表江门中微子实验合作组)

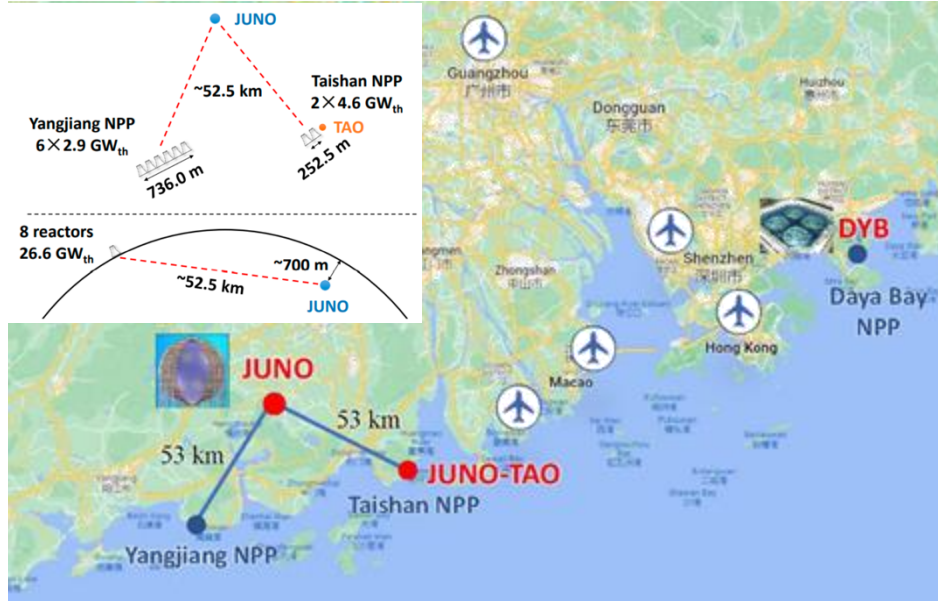
中国科学院高能物理研究所

2024.8.15

第十四届全国粒子物理学术会议，青岛

# 江门中微子实验

- Jiangmen Underground Neutrino Observatory (**JUNO**)
- 该实验在2013年获得批准，世界范围内有74所合作单位，700多位合作组成员
- 地下700米，多功能探测器：3%能量分辨率，2万吨液闪
- 计划2024年底完成探测器建设，2025年取数



~60 IBDs per day      Several per day      Hundreds per day      ~5000 IBDs for CCSN @10 kpc      Several IBDs per day

+  
New physics

- 首要物理目标：测量中微子质量顺序(>3 $\sigma$ )
- 其他物理研究：太阳中微子，超新星中微子，大气中微子，地球中微子，核子衰变等

张永鹏 《JUNO的探测技术研发与探测器建设进展》  
 韩阳 徐嘉洋 《反应堆中微子能谱问题及JUNO-TAO实验》  
 赵润泽 《JUNO的中微子振荡物理》

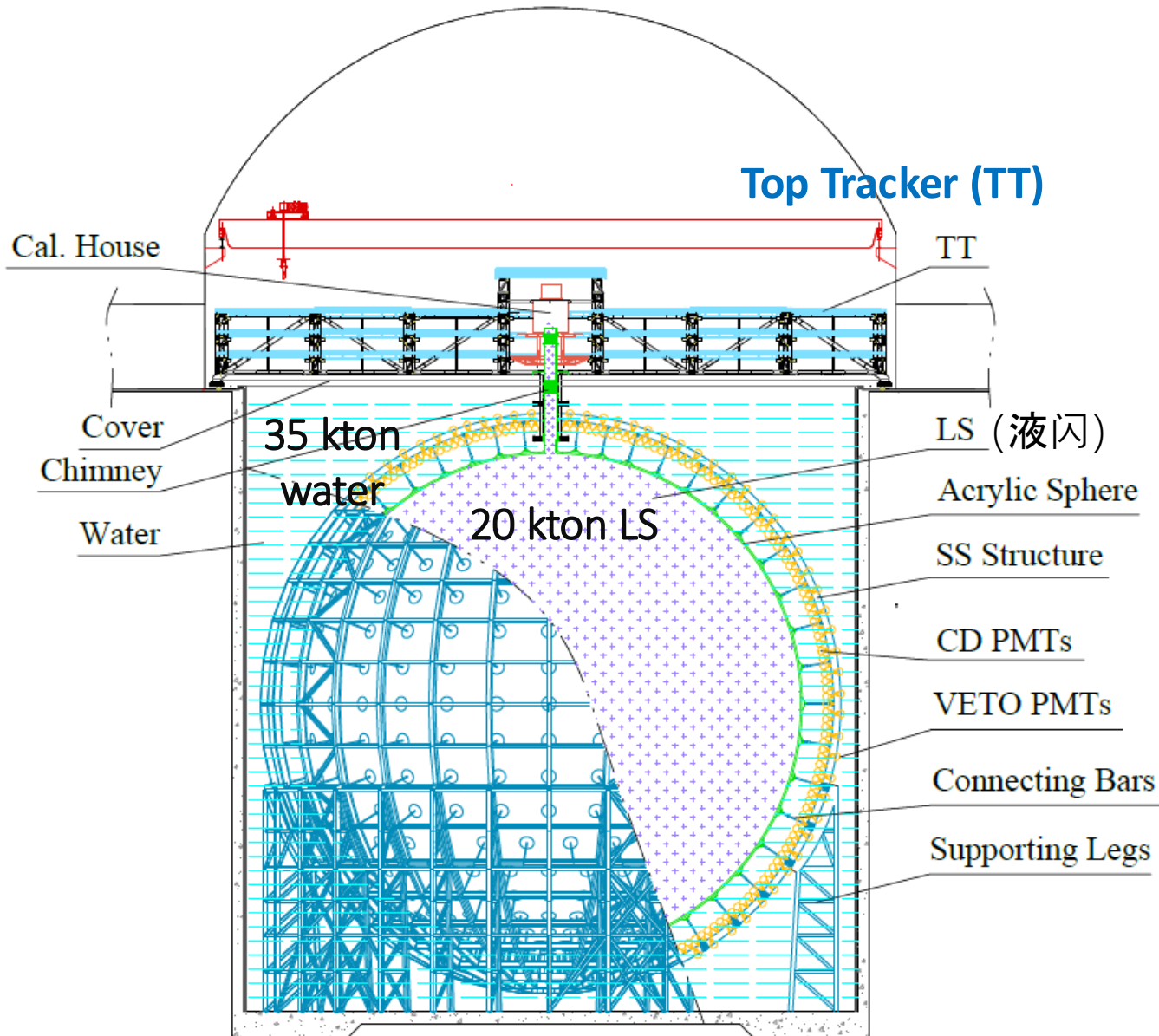
Neutrino oscillation & properties

Neutrinos as a probe

IBD: inverse beta decay  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

CCSN: core-collapse supernova

# 江门中微子实验探测器



## Acrylic Sphere(亚克力球):

内径: 35.4 m

厚度: 12 cm

## Stainless Steel (SS) Structure (不锈钢结构):

内径: 40.1 m, 外径: 41.1 m

17612只20英寸光电倍增管 (PMT) , 25600只3英寸 PMT

## Water pool(水池):

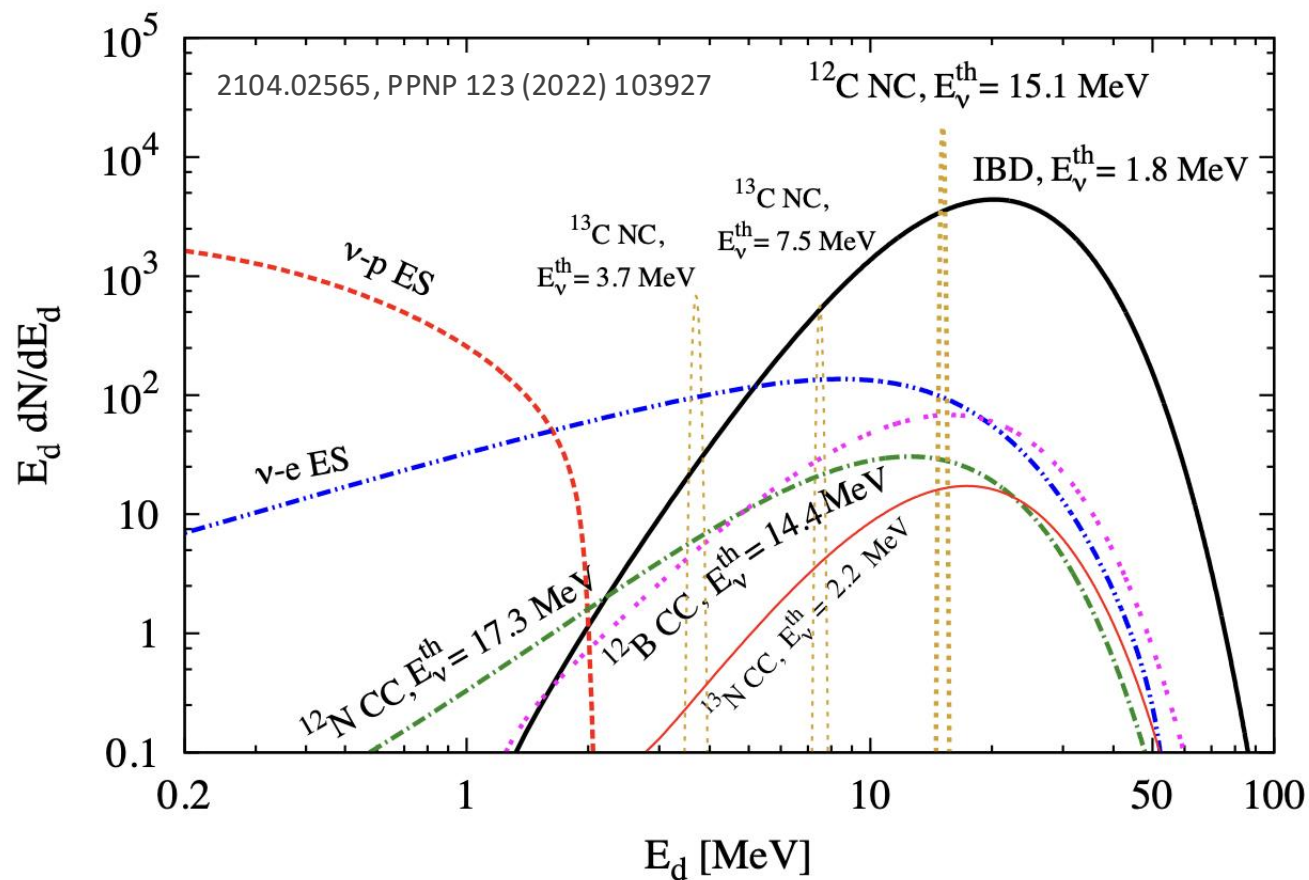
内径: 43.5 m, 高度: 44 m

2400只20英寸 PMT





# 超新星中微子



## 超新星中微子

- 每个世纪, 银河系约有1-3次超新星爆发, 产生的中微子带走99%的能量
- 可以对超新星爆发机制以及中微子本身的性质提供珍贵的信息
- 持续时间  $\sim 10$  s

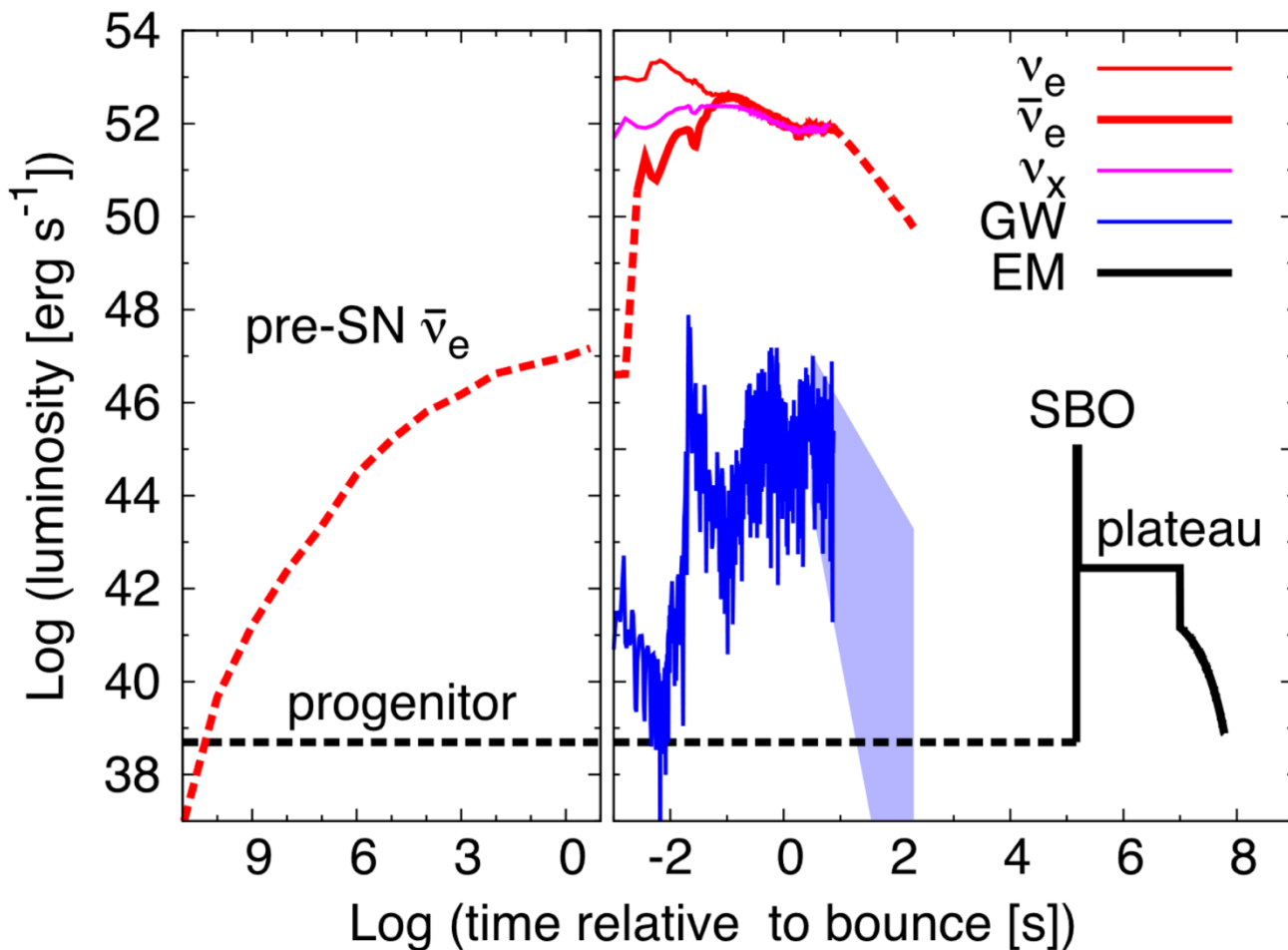
## JUNO实验探测超新星的物理潜能

- 实时监测超新星的爆发
- 中微子绝对质量的测量
- 为天文学研究提供中微子全味道束流  $\nu_e, \bar{\nu}_e$  and  $\nu_x$

- 10 kpc处的超新星爆发, JUNO中约 $\sim 5000$  IBD,  $\sim 2000$  pES,  $\sim 300$  eES 可以被观测.

# 超新星预警系统

## 多信使信号



超新星爆发不同时间段可以观测到的信号及其强度

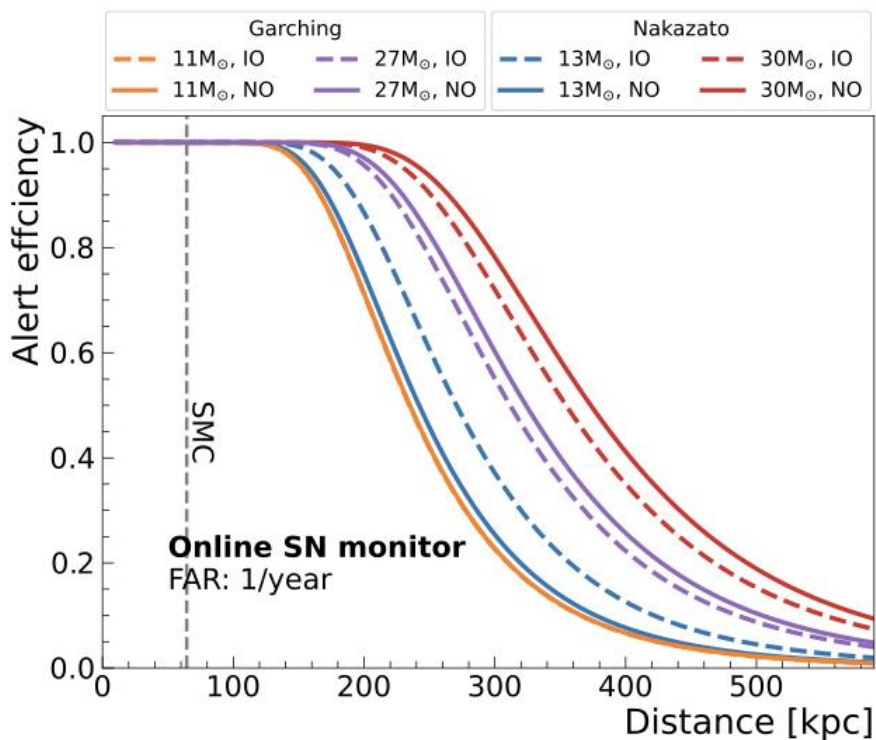
- 地球上可观测包括 pre-SN 中微子(爆发前期超新星释放的中微子), SN 中微子(爆发过程中释放的中微子), 引力波以及电磁波等
- JUNO实验可以探测pre-SN和SN中微子
  - Pre-SN
    - $\sim \text{MeV}$ 的中微子
    - 几小时或几天可以给出预警
  - SN中微子探测
    - 几十MeV的中微子, 持续10秒左右

# 超新星预警系统

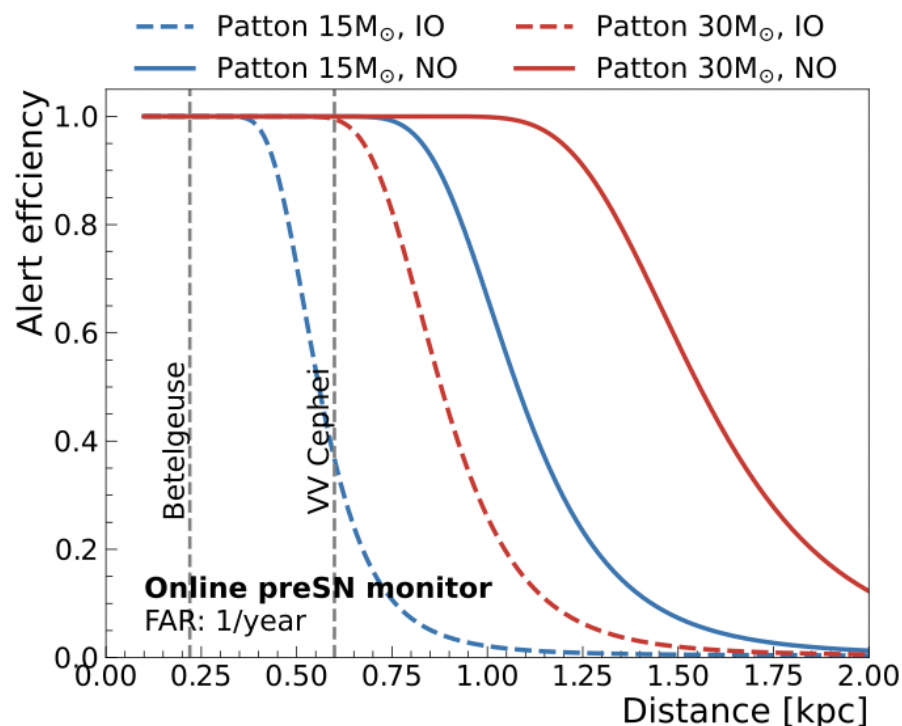
## 超新星探测系统

- 快速预警系统: 提供快速预警, 运行在FPGA上
- 在线预警系统: 运行在DAQ, 利用事例重建信息提供预警
- 多信使触发系统: (降低能量阈值至20 keV)

## 以在线预警系统为例 (JCAP 01 (2024) 057)

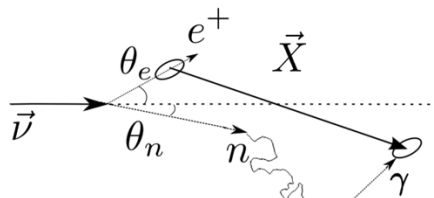


- 预警距离 (预警效率达到 50%处): 230~350 kpc
- 预警时间: 15~30 ms



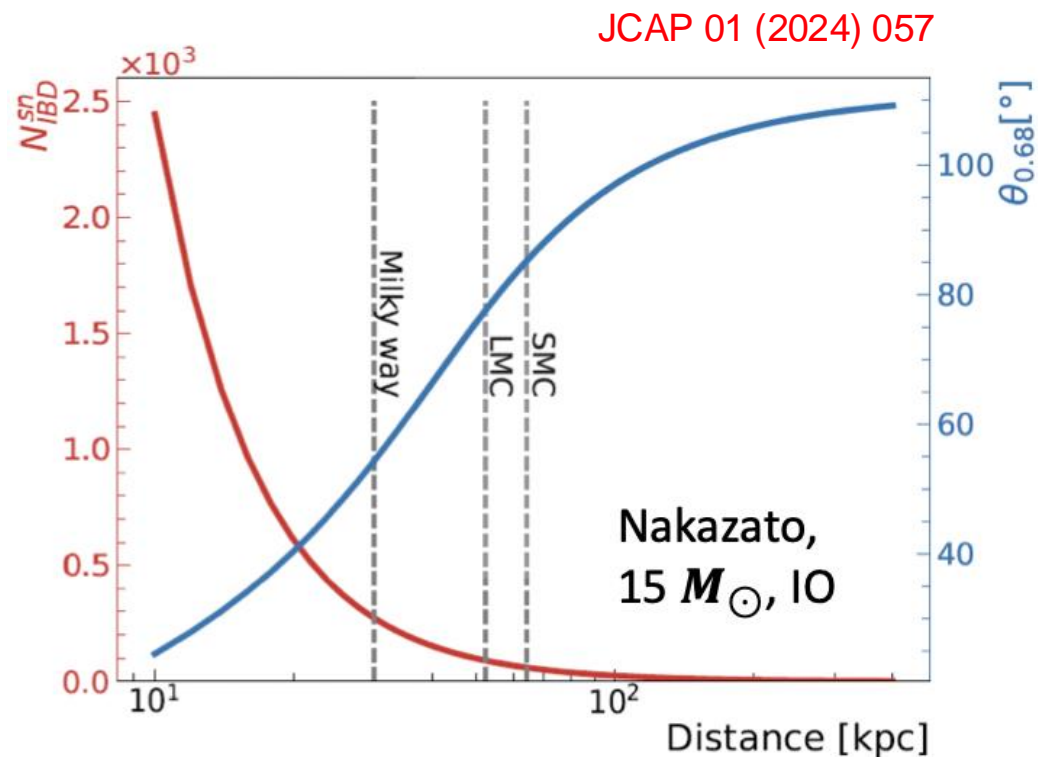
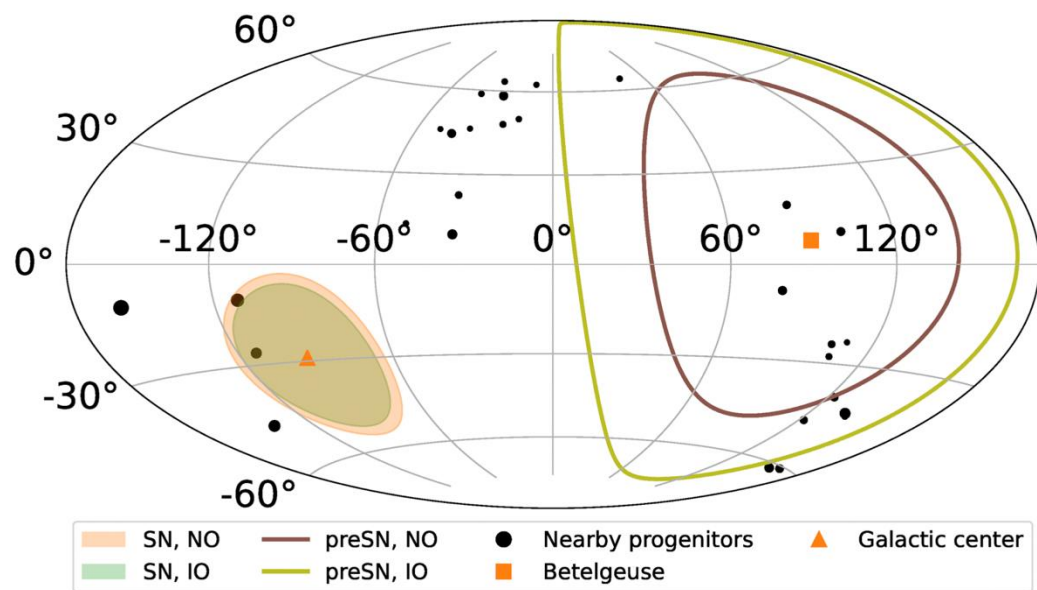
- 对于Betelgeuse, 100% 预警效率
- 预警距离可以达到: 0.6~1.6 kpc
- 预警时间: 3~120 hours before SN explosion

# 超新星预警—方向重建



利用IBD保留的方向信息重建超新星方向:

$$\vec{d}_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{X}_{pn}^i$$



- 指导天文学望远镜较早地准备观测CCSN爆发
- 15  $M_{\odot}$  Patton 模型：利用爆发前身中微子对于Betelgeuse-like (0.2 kpc) 模型，在正质量排序(反质量排序)情形，方向重建能力大约在  $56^{\circ}$  ( $81^{\circ}$ )
- 13  $M_{\odot}$  Nakazato模型：对于一个典型的10 kpc的CCSN，在正质量排序 (反质量排序)情形，方向重建能力达到  $26^{\circ}$  ( $23^{\circ}$ )

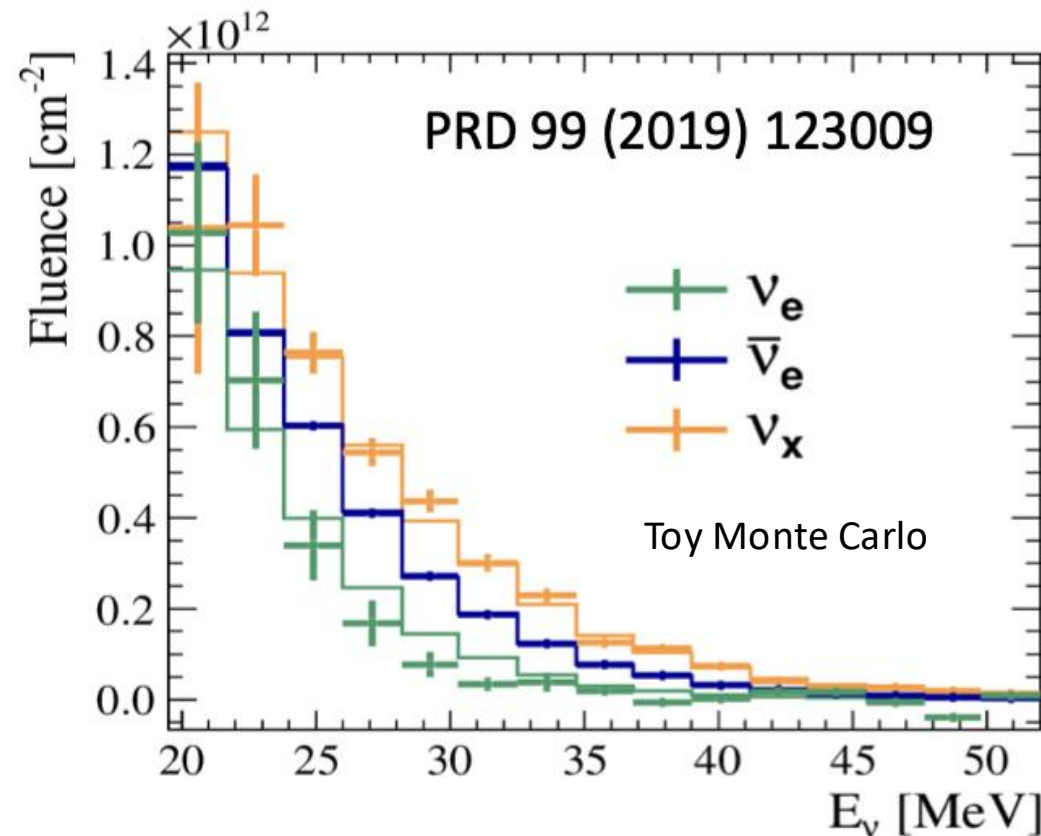
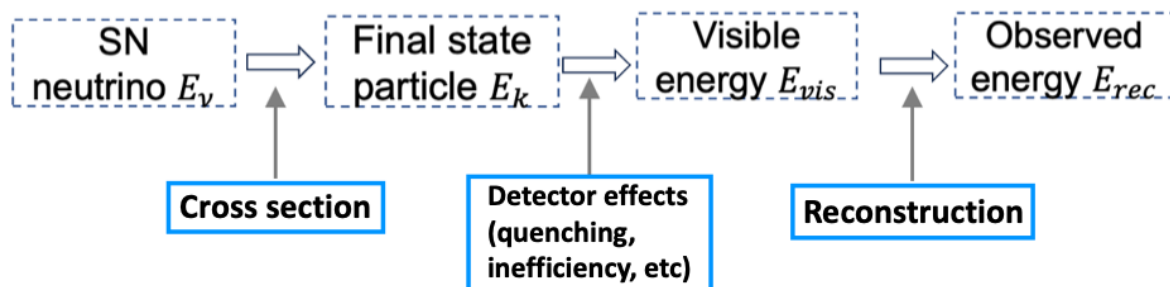
# 超新星能谱观测

探测器响应 (R)、中微子通量 (F) 和观测谱 (S) 之间的关系可以用一个线性方程  $RF = S$  来描述:

$$\begin{array}{l}
 \text{IBD} \\
 \text{pES} \\
 \text{eES}
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 \nu_e & \bar{\nu}_e & \nu_x \\
 N_p D_{\text{IBD}} \sigma_{\nu_e}^{\text{IBD}} & N_p D_{\text{IBD}} \sigma_{\bar{\nu}_e}^{\text{IBD}} & N_p D_{\text{IBD}} \sum \sigma_{\nu_x}^{\text{IBD}} \\
 N_p D_{\text{pES}} \sigma_{\nu_e}^{\text{pES}} & N_p D_{\text{pES}} \sigma_{\bar{\nu}_e}^{\text{pES}} & N_p D_{\text{pES}} \sum \sigma_{\nu_x}^{\text{pES}} \\
 N_e D_{\text{eES}} \sigma_{\nu_e}^{\text{eES}} & N_e D_{\text{eES}} \sigma_{\bar{\nu}_e}^{\text{eES}} & N_e D_{\text{eES}} \sum \sigma_{\nu_x}^{\text{eES}}
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 F_{\nu_e} \\
 F_{\bar{\nu}_e} \\
 F_{\nu_x}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 S_{\text{IBD}} \\
 S_{\text{pES}} \\
 S_{\text{eES}}
 \end{bmatrix}$$

响应矩阵
中微子束流
观测谱

探测器响应包含如下效应:



- 通过能谱反解方法, 可以对  $\nu_e, \bar{\nu}_e$  and  $\nu_x$  的能谱进行无模型依赖的重建。
- 用于进一步的物理学和天体物理学研究。



# 超新星遗迹中微子

## 信号以及本底的事例率和能谱

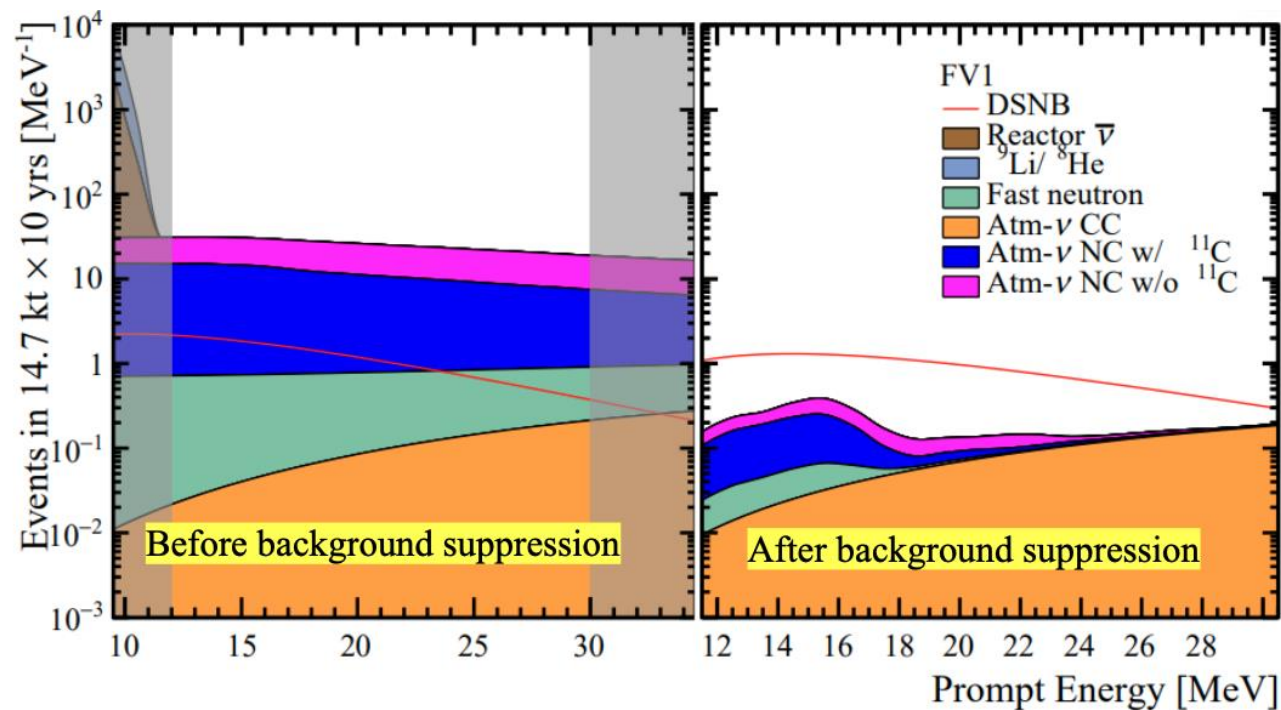
首要探测道：反贝塔衰变 (IBD)

观测能量区间为 [12, 30] MeV，主要本底：

- 快中子本底
- 大气中微子中性流本底

10年总事例数		w/o 排除本底	w/ 排除本底
FV1	dsnb	20.8	15.6
	bkg	459.4	3.5
	<b>S/B</b>	<b>0.045</b>	<b>4.46</b>
FV2	dsnb	5.0	3.6
	bkg	136.5	1.9
	<b>S/B</b>	<b>0.037</b>	<b>2.0</b>

两个fiducial volumes: **FV1**(内层)和 **FV2**(外层, 全反射区)来排除大部分的快中子事例, 使用不同的本底排除策略



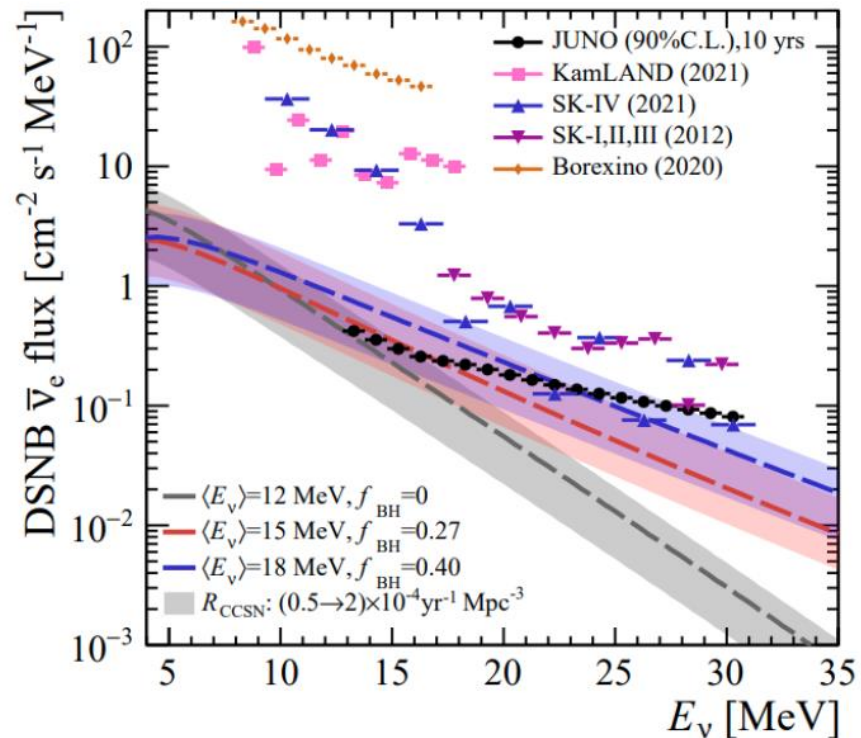
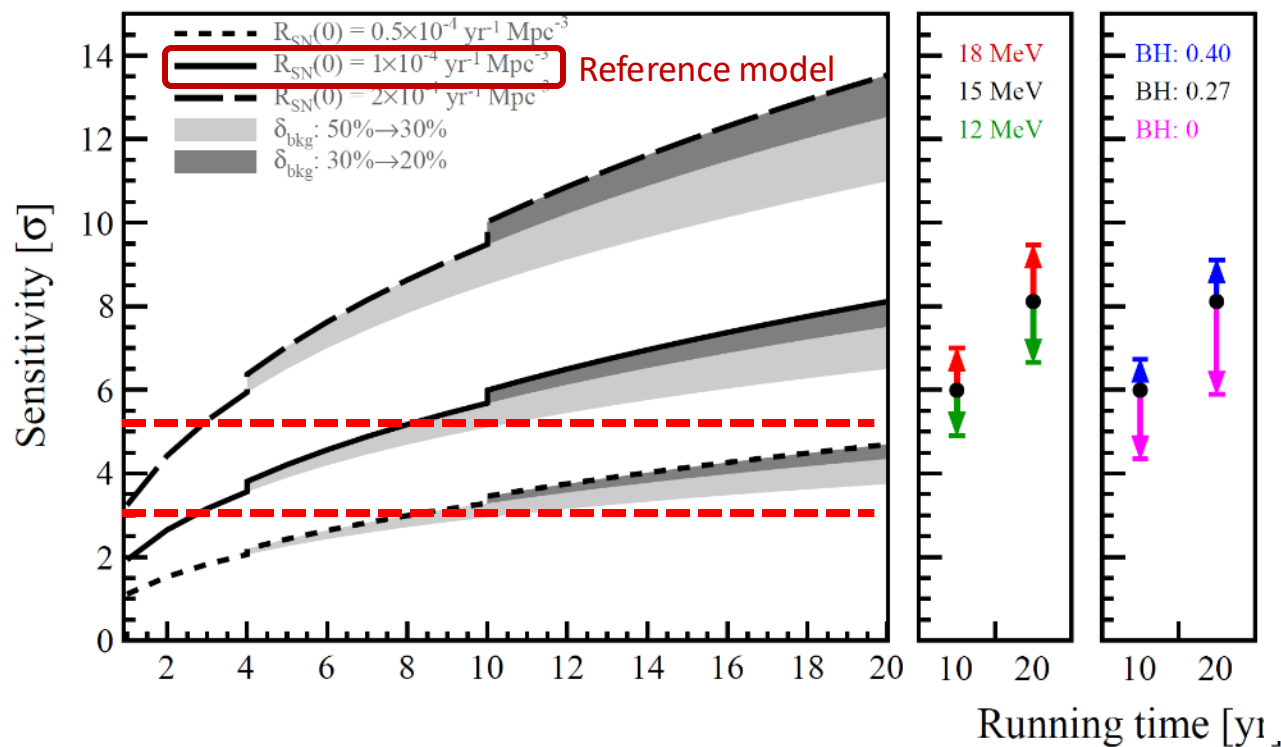
排除本底方面的亮点：

- Muon veto
- 粒子脉冲鉴别(PSD)

# 超新星遗迹中微子

灵敏度

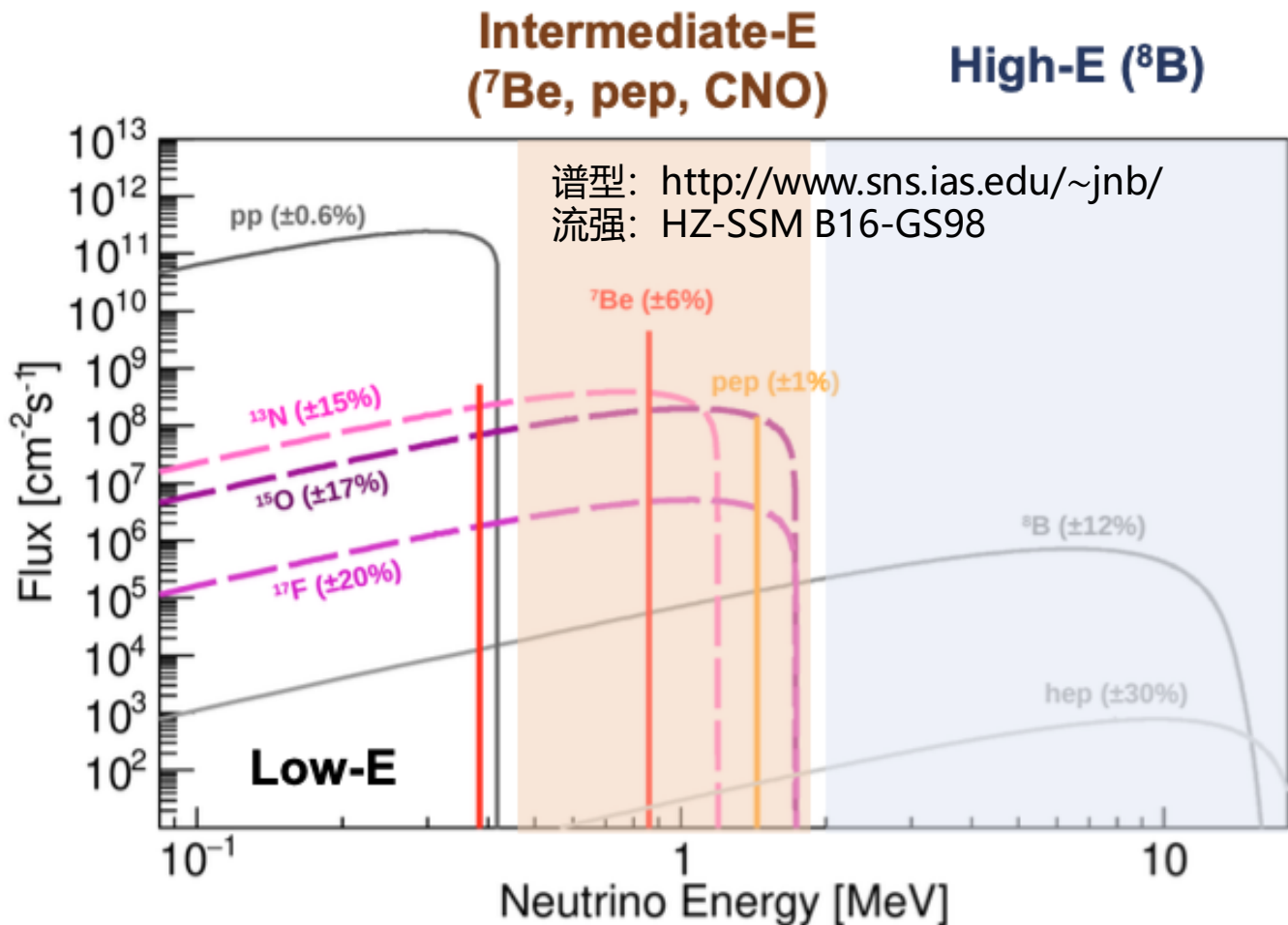
JCAP 10 (2022) 033



- 如果没有积极观测结果, JUNO 可以给出世界上最好的实验测量上限
- 基于DSNB代表模型 (黑实线(左图)):  $3\sigma$  (3 年数据) 和  $6\sigma$  (10 年数据)

$R_{SN}(0)$ : 宇宙中超新星事例率  
 $\langle E_\nu \rangle$ : 超新星中微子平均能量  
 $f_{BH}$ : 黑洞比例

# 太阳中微子



## • 探测器优势

- 最大的液闪靶体积 (20 kt)
- 低能量阈值 (0.2 MeV)、低天然放射性本底(U/Th $\sim 10^{-17}$  g/g)、高能量分辨率 (3%)

## • 物理目标: 开展对太阳中微子流强和振荡参数的测量

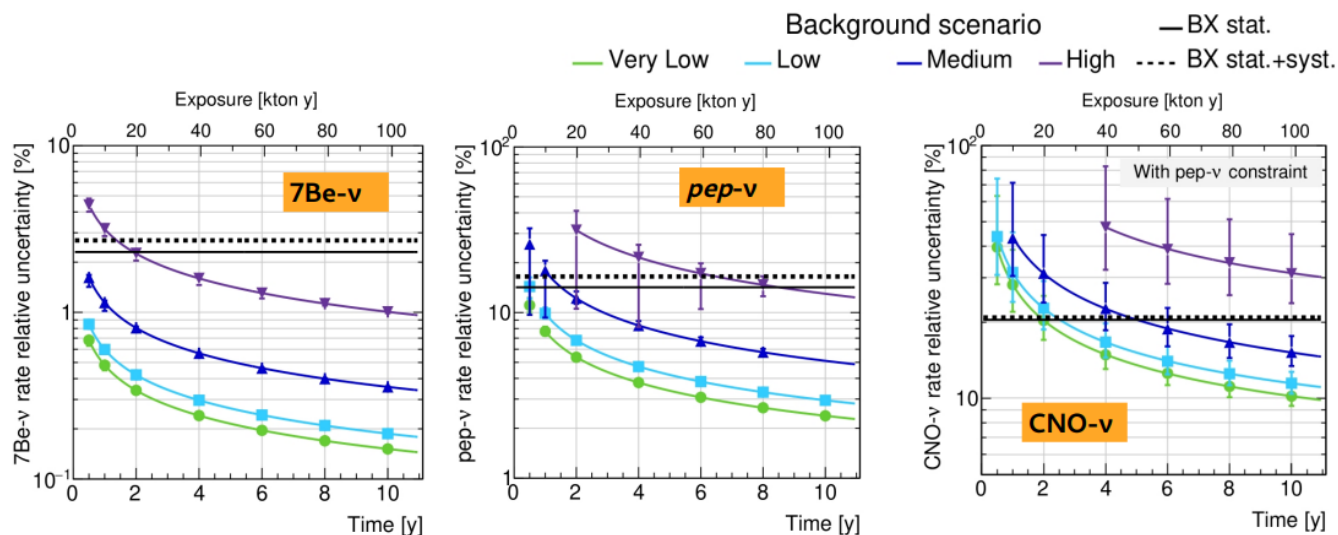
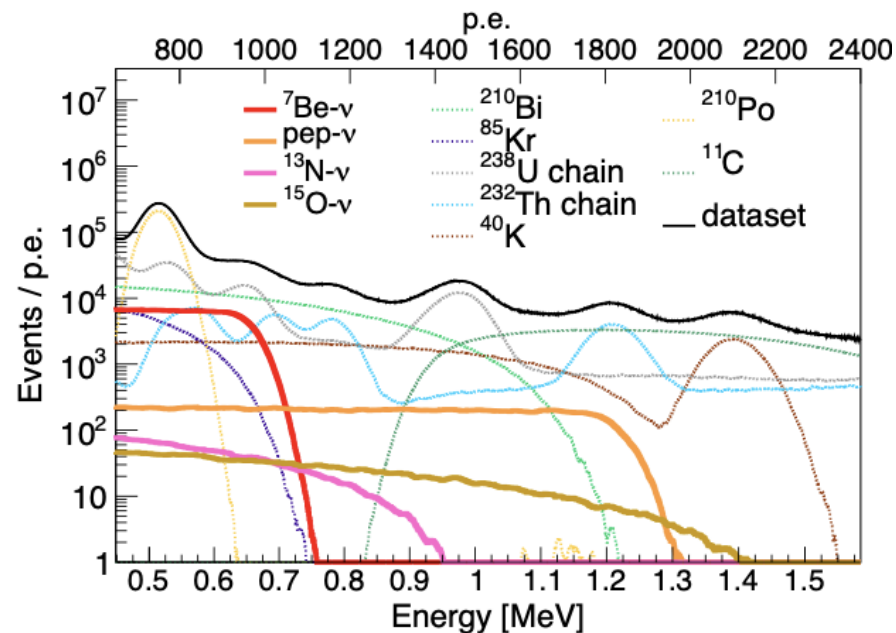
- ${}^8\text{B}$ 中微子: 在国际上首次探测到太阳中微子和 ${}^{13}\text{C}$ 的NC和CC反应道。独立测量 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子流强,  $\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$ 等振荡参数
- ${}^7\text{Be}$ , pep, CNO中微子: 检验太阳金属丰度模型

# 太阳中微子 ( $^7\text{Be}$ , pep, CNO中微子)

观测道: ES  $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$

分析能区: [0.45, 1.6] MeV

	Solar $\nu$	$^7\text{Be}$	pep	CNO
HZ-SSM	$\Phi$ [ $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]	49.3(1 $\pm$ 0.06)	1.44(1 $\pm$ 0.009)	4.88(1 $\pm$ 0.11)
	$R$ [cpd/kton]	489 $\pm$ 29	28.0 $\pm$ 0.4	50.3 $\pm$ 8.0
	$R^{\text{ROI}}$ [cpd/kton]	142.5 $\pm$ 8.3	17.1 $\pm$ 0.2	16.6 $\pm$ 2.6
LZ-SSM	$\Phi$ [ $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]	45.0(1 $\pm$ 0.06)	1.46(1 $\pm$ 0.009)	3.51(1 $\pm$ 0.10)
	$R$ [cpd/kton]	447 $\pm$ 26	28.4 $\pm$ 0.4	36.0 $\pm$ 5.3
	$R^{\text{ROI}}$ [cpd/kton]	130.0 $\pm$ 7.5	17.3 $\pm$ 0.2	11.9 $\pm$ 1.8
Borexino results	$\Phi$ [ $10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]	49.9 $\pm$ 1.1 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.8</sub>	1.27 $\pm$ 0.19 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.12</sub> (LZ) 1.39 $\pm$ 0.19 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.13</sub> (HZ)	6.6 <sup>+2.0</sup> <sub>-0.9</sub>



JUNO实验可降低Borexino实验对 $^7\text{Be}$ , pep, CNO测量的误差

JCAP 10, 022 (2023)

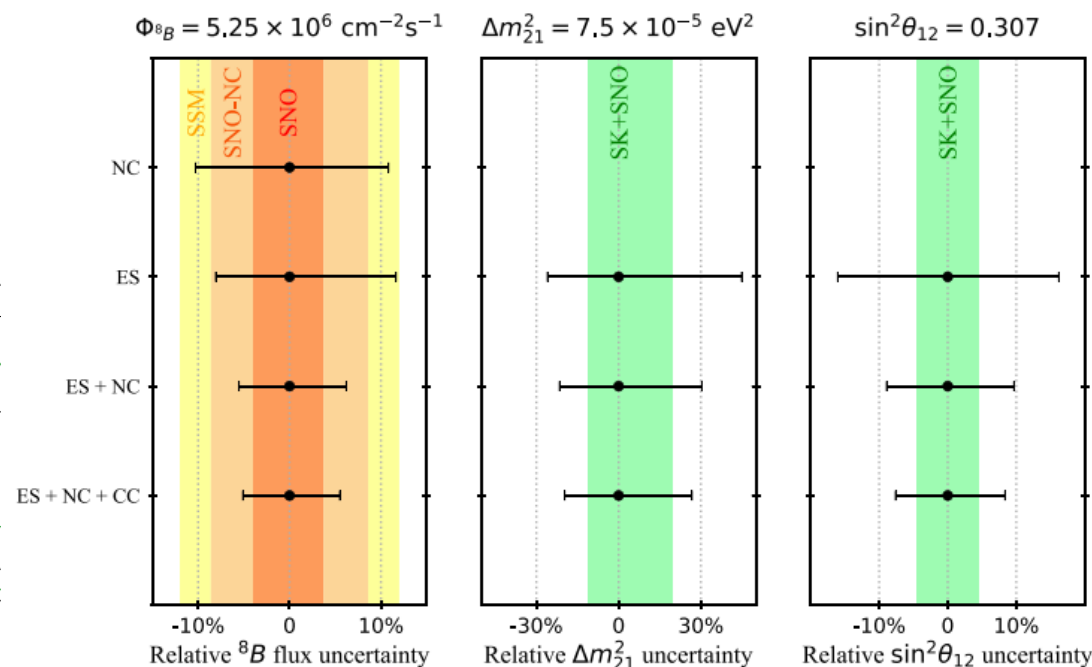
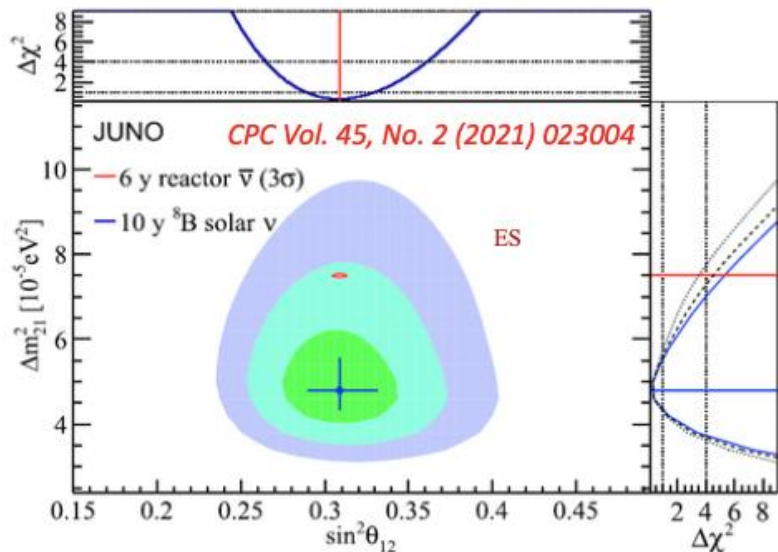


# 太阳中微子 ( $^8\text{B}$ 中微子)

## 利用ES, NC, CC三个反应道

- 提供最大的 $^{13}\text{C}$  ES+NC+CC 样本, 60,000 ES(弹性散射), 600 NC(中性流)/CC(带电流)
- $^8\text{B}$  束流无模型依赖误差可以在10年内达到 5%

No.	Channels	Threshold [MeV]	Signal	Event numbers (10)
1	$\nu_e + ^{12}\text{C} \rightarrow e^- + ^{12}\text{N} (1^+; \text{gnd})$ [35]	16.827	$e^- + ^{12}\text{N}$ decay ( $\beta^+$ , $Q=17.338$ MeV)	0.43
1	$\nu_e + ^{13}\text{C} \rightarrow e^- + ^{13}\text{N} (\frac{1}{2}^-; \text{gnd})$ [36]	2.2	$e^- + ^{13}\text{N}$ decay ( $\beta^+$ , $Q=2.22$ MeV)	3929
2	$\nu_e + ^{13}\text{C} \rightarrow e^- + ^{13}\text{N} (\frac{3}{2}^-; 3.5 \text{ MeV})$ [36]	5.7	$e^- + p$	2464
4	$\nu_x + ^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + ^{12}\text{C} (1^+; 15.11 \text{ MeV})$ [35]	15.1	$\gamma$	4.8
3	$\nu_x + ^{13}\text{C} \rightarrow \nu_x + n + ^{12}\text{C} (2^+; 4.44 \text{ MeV})$ [37]	6.864	$\gamma + n$ capture	65
4	$\nu_x + ^{13}\text{C} \rightarrow \nu_x + ^{13}\text{C} (\frac{1}{5}^+; 3.089 \text{ MeV})$ [36]	3.089	$\gamma$	14
5	$\nu_x + ^{13}\text{C} \rightarrow \nu_x + ^{13}\text{C} (\frac{3}{5}^-; 3.685 \text{ MeV})$ [36]	3.685	$\gamma$	3032
6	$\nu_x + ^{13}\text{C} \rightarrow \nu_x + ^{13}\text{C} (\frac{5}{5}^+; 3.854 \text{ MeV})$ [36]	3.854	$\gamma$	2.8
7	$\nu_x + e \rightarrow \nu_x + e$	0	$e^-$	$3.0 \times 10^5$

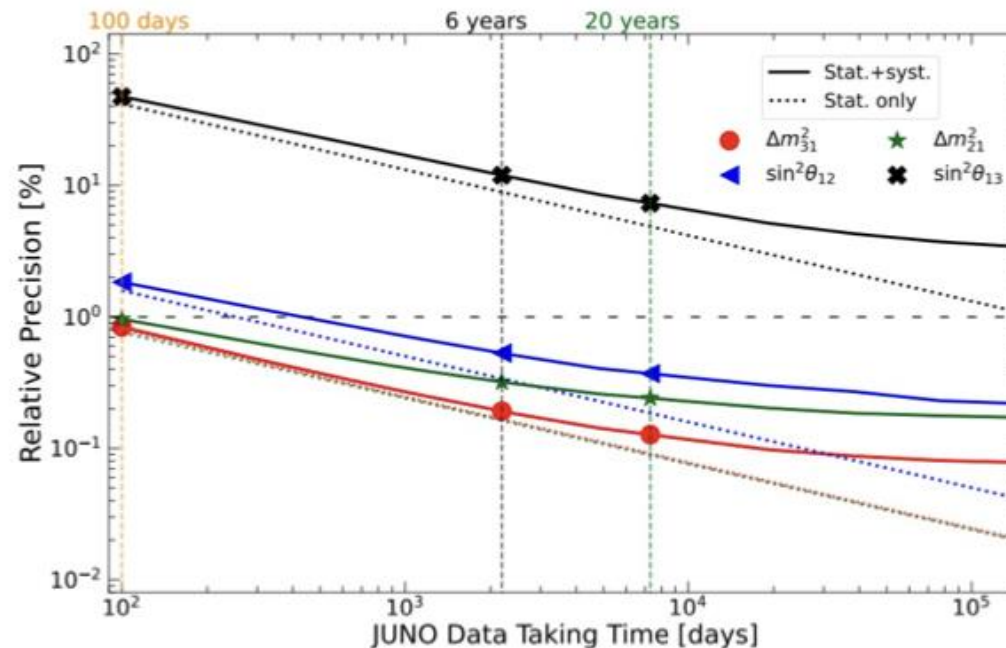
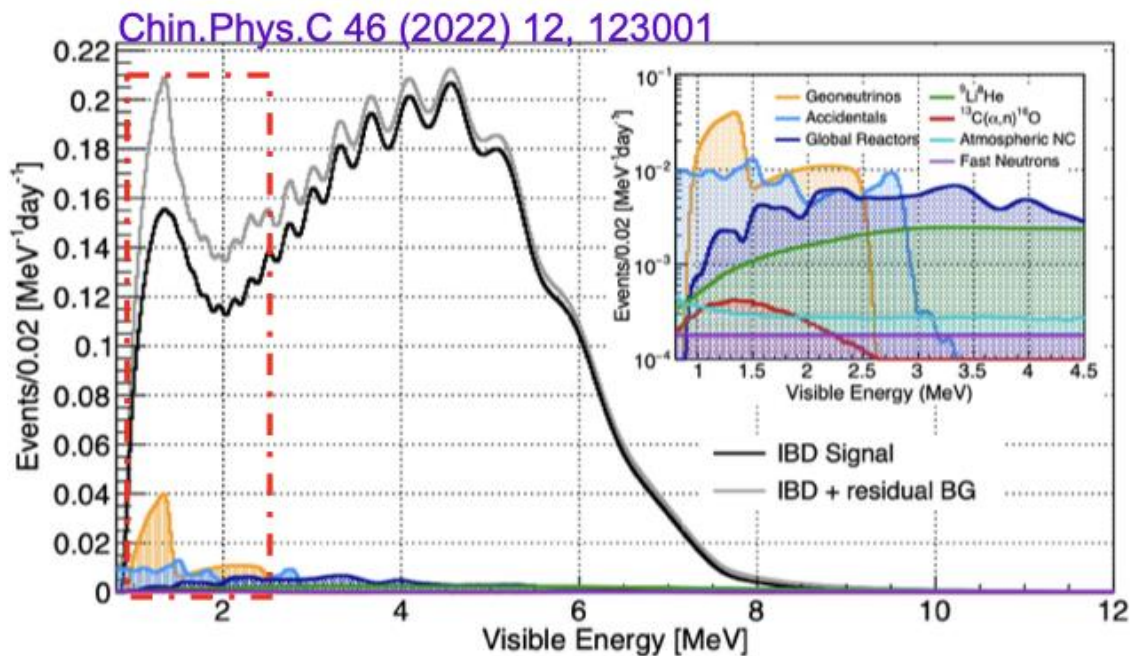


- 可模型无关的测量 $^8\text{B}$ 太阳中微子流强, 两个振荡参数 $\sin^2\theta_{12}$  (8%) 和 $\Delta m_{21}^2$  (20%)
- 如果联合SNO-NC结果, 可获得世界上最高的 $^8\text{B}$ 中微子流强精度3%

# 地球中微子

- **反电子中微子:** 来自 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{238}\text{U}$ 的衰变链, 提供探测地球结构和地球物质组成的方法
- **高统计量:** 将在1年内测量的地球中微子事件数量比Borexino和KamLAND在超过10年内测量的数量多约400个
- **有测量U/Th比值的潜力**

	Rate [cpd]	Rate uncert.	Shape uncert.
Geo-neutrinos	1.2	-	5%
Reactor neutrinos	47.1	-	Daya Bay/ TAO
Accidental	0.8	1%	-
$^9\text{Li}/^8\text{He}$	0.8	20%	10%
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	0.05	50%	50%
Fast neutron	0.1	100%	20%
World reactor neutrinos	1	2%	5%
Atmospheric neutrinos	0.16	50%	50%



# 地球中微子

## 对总地球中微子通量的灵敏度

### U/Th固定 (3.9)

Expected geoneutrino precision\*  
(assuming Th/U mass ratio fixed to 3.9)

1 year	~22%
6 years	~10%
10 years	~8%

### 对比其他实验:

Phys. Rev. D 101, 012009

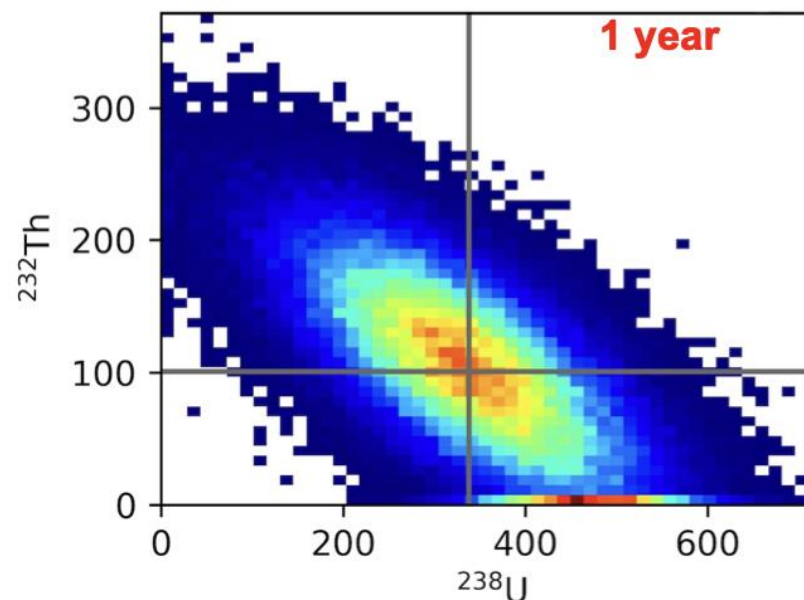
Borexino 17% with 8.9 years

KamLAND 15% with 14.3 years

Phys. Rev. C, 80, 015807

JUNO实验将会提供最精确的测量结果

### U/Th自由



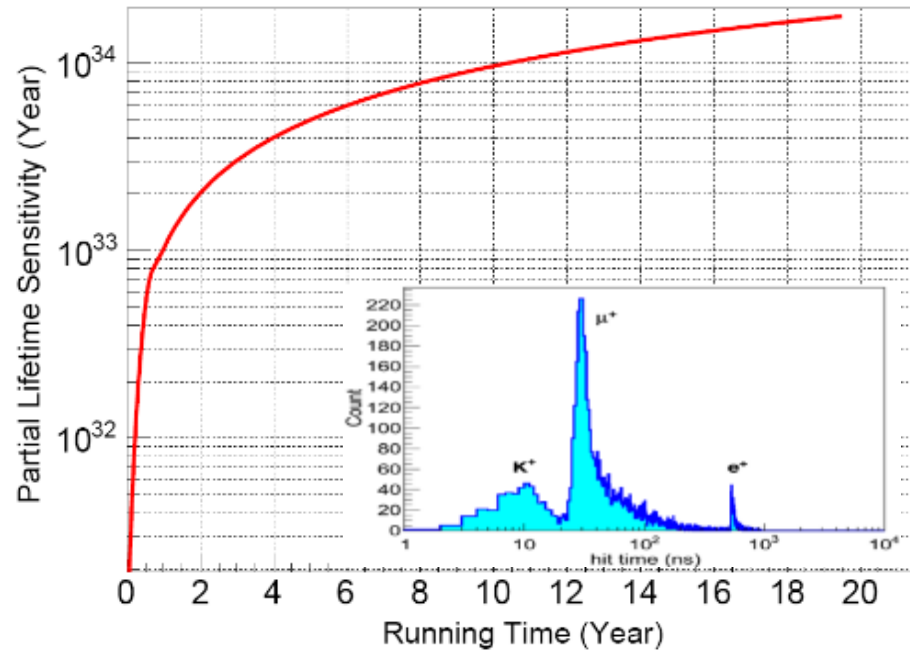
	6 years	10 years
$^{232}\text{Th}$ :	~40%	~35%
$^{238}\text{U}$ :	~35%	~30%
$^{232}\text{Th}+^{238}\text{U}$ :	~18%	~15%
$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ratio:	~70%	~55%

# 核子衰变

探测质量: 20 kton LS  $\rightarrow 1.45 \times 10^{33}$  自由质子  
 $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$

$5.30 \times 10^{33}$  bound 质子/中

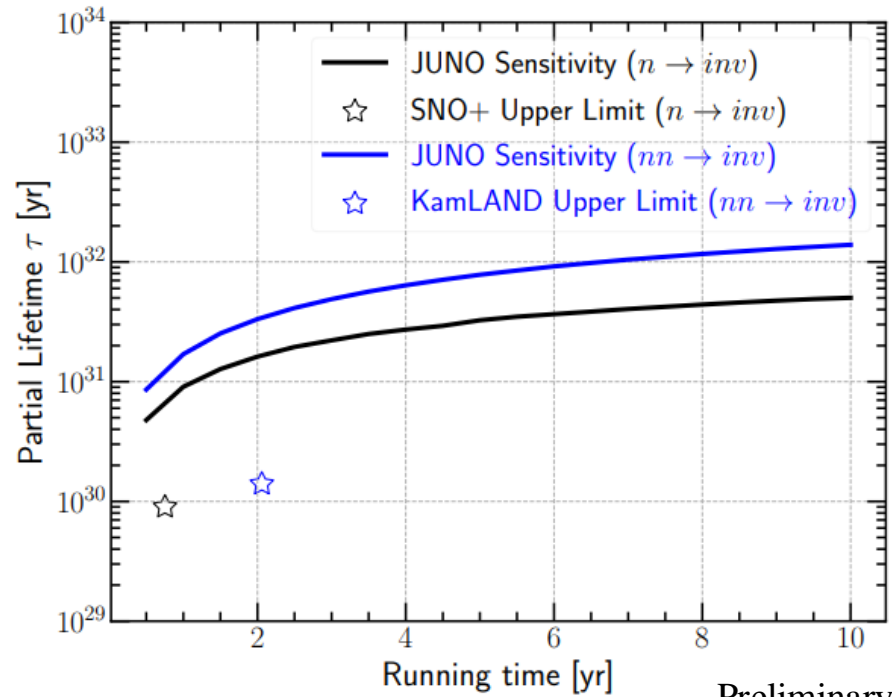
束缚态中子不可见衰变  $n \rightarrow inv$  ( $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}^*$ )  
 $nn \rightarrow inv$  ( $^{12}\text{C} \rightarrow ^{10}\text{C}^*$ )



Chinese Physics C 47, 113002 (2023)

$$\tau/B(p \rightarrow \bar{\nu} K^+) > 9.6 \times 10^{33} \text{ yrs} / 10 \text{ yrs}$$

当前最佳限制, Super-K实验:  $5.9 \times 10^{33}$  yrs  
 (Phys. Rev. D 90 (2014) 072005)



Preliminary

arXiv: 2405.17792

- 两年的数据可将当前最佳限制提高一个数量级
- 利用10年的数据,

$$\tau/B(n \rightarrow inv) > 5.0 \times 10^{31} \text{ years,}$$

$$\tau/B(nn \rightarrow inv) > 1.4 \times 10^{32} \text{ years. } 90\% \text{ C.L.}$$



# 结论

- **JUNO探测器预计于2024年完成建设并开始填充探测器，2025年采集数据**
- **高性能的探测器: 大液闪靶体积(2万吨), 低能量阈值(0.2 MeV)、低天然放射性本底、高能量分辨率(3%), 将为数据采集和物理研究做好充分准备。**
- **JUNO实验在探测太阳中微子, 超新星中微子, 地球中微子, 核子衰变等方面展现出优秀的物理潜能, 具有很强的国际竞争力。**