



# <u>江门中微子实验观测</u>

# 太阳中微子的物理潜力

赵 洁 (代表江门中微子实验合作组) 中国科学院高能物理研究所



## 太阳中微子有待解决的问题

### ■太阳金属丰度问题: Z>2元素含量

	FLUX	Dependenc e on T	SSM-/HZ <sup>(1)</sup> SSM B16-GS98	SSM-/LZ <sup>(2)</sup> SSM B16-AGSS0 <sup>-</sup>	DIFF. (HZ-LZ)/HZ 9met
c	pp (10 <sup>10</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	<b>T</b> -0.9	5.98(1±0.006)	6.03(1±0.005)	-0.8%
chai	pep (10 <sup>8</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	T <sup>-1.4</sup>	1.44(1±0.01)	1.46(1±0.009)	-1.4%
dd	<sup>7</sup> Be (10 <sup>9</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	T <sup>11</sup>	4.94(1±0.06)	4.50(1±0.06)	8.9%
	<sup>8</sup> B (10 <sup>6</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	T <sup>24</sup>	5.46(1±0.12)	4.50(1±0.12)	17.6%
cycle	<sup>13</sup> N (10 <sup>8</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	T <sup>18</sup>	2.78(1±0.15)	2.04(1±0.14)	26.6%
CNO	<sup>15</sup> O (10 <sup>8</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	T <sup>20</sup>	2.05(1±0.17)	1.44(1±0.16)	29.7%





## <u>江门中微子实验(JUNO)的潜力</u>



### ■太阳金属丰度问题

(Z>2元素含量,两个模型:低丰度LZ,高丰度HZ)

#### JUNO探测器

20 kt 液体闪烁体 → Borexino的70倍 3%/√E 能量分辨 → 好于Borexino (5%) 能量阈值 → 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

### ■△m<sup>2</sup><sub>21</sub>测量

✓ 中微子存活几率高能物质振荡到低能真空振荡upturn
✓ 地球物质效应带来的太阳中微子流强日夜不对称性
✓ 太阳中微子和反应堆中微子测量结果偏差~1.5σ

#### 可用同一探测器,不同中微子源(太阳, 反应堆)独立测量Δm<sup>2</sup><sub>21</sub>以检验此偏差 ✓ 其中,反应堆中微子可测量<1%

#### JUNO collaboration, Chin. Phys. C 46, 123001 (2022)

	Central Value	PDG2020	100 days	6 years	20 years
$\Delta m_{31}^2 \ (\times 10^{-3} \ {\rm eV}^2)$	2.5283	±0.034 (1.3%)	±0.021 (0.8%)	±0.0047 (0.2%)	±0.0029 (0.1%)
$\Delta m_{21}^2 \; (\times 10^{-5} \; {\rm eV}^2)$	7.53	±0.18 (2.4%)	±0.074 (1.0%)	±0.024 (0.3%)	±0.017 (0.2%)
$\sin^2 \theta_{12}$	0.307	±0.013 (4.2%)	±0.0058 (1.9%)	±0.0016 (0.5%)	±0.0010 (0.3%)
$\sin^2 \theta_{13}$	0.0218	±0.0007 (3.2%)	±0.010 (47.9%)	±0.0026 (12.1%)	±0.0016 (7.3%)

## JUNO探测太阳中微



#### ■<sup>7</sup>Be, pep, CNO中微子 10<sup>13</sup> ✓ 主要观测道: v-e ES $\nu_x + e \rightarrow \nu_x + e$ 谱型: http://www.sns.ias.edu/~jnb/ 10<sup>12</sup> pp (±0.6%) 流强: HZ-SSM B16-GS98 10<sup>11</sup> Solar $\nu$ $^{7}$ Be CNO pep7Be (±6%) $10^{10}$ 10<sup>9</sup> ⊨ $\Phi \left[ 10^8 \, \mathrm{cm}^{-2} \, \mathrm{s}^{-1} \right]$ $4.88(1 \pm 0.11)$ $49.3(1\pm0.06)$ $1.44(1 \pm 0.009)$ Flux [cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>] pep (±1%) <sup>13</sup>N (±15%) HZ-10<sup>8</sup> $R \, [\mathrm{cpd/kton}]$ $489 \pm 29$ $28.0\pm0.4$ $50.3\pm8.0$ SSM 150 (±17%) 10<sup>7</sup> $R^{\rm ROI}$ [cpd/kton] $142.5\pm8.3$ $17.1\,\pm\,0.2$ $16.6\pm2.6$ 10<sup>6 F</sup> <sup>8</sup>B (±12%) 17**F (±20%)** 10<sup>5</sup> $\Phi [10^8 \,\mathrm{cm}^{-2} \,\mathrm{s}^{-1}]$ $45.0(1\pm0.06)$ $1.46(1 \pm 0.009)$ $3.51(1 \pm 0.10)$ LZ- $10^{4}$ $R \; [ m cpd/kton]$ $447 \pm 26$ $28.4 \pm 0.4$ $36.0\pm5.3$ $\mathbf{SSM}$ hep (±30%) 10<sup>3</sup> $R^{\rm ROI}$ [cpd/kton] $130.0 \pm 7.5$ $17.3 \pm 0.2$ $11.9 \pm 1.8$ 10<sup>2</sup> $\begin{array}{c} 1.27 \pm 0.19 \substack{+0.08 \\ -0.12} (\mathrm{LZ}) \\ 1.39 \pm 0.19 \substack{+0.08 \\ -0.13} (\mathrm{HZ}) \end{array}$ Borexino F $\Phi \,[10^8\,{\rm cm}^{-2}\,{\rm s}^{-1}]$ $49.9 \pm 1.1^{+0.6}_{-0.8}$ $6.6 \ ^{+2.0}_{-0.9}$ results 10<sup>-1</sup>

D山洲子					Neutrino Energy [MeV]		
D T IX J	No.		Channels	Threshold [MeV]	Signal	Event numbers (10	) years)
✓ ES: 4 cpd/kt	1		$\nu_e + {}^{12}\text{C} \to e^- + {}^{12}\text{N}(1^+;\text{gnd})$ [35]	16.827	$e^{-}+^{12}N \text{ decay } (\beta^{+}, Q=17.338 \text{ MeV})$	0.43	
$\sqrt{NC/CC} \cdot 0.05 \text{ cpd/kt}$	1	CC	$\nu_e + {}^{13}\text{C} \to e^- + {}^{13}\text{N}(\frac{1}{2}; \text{gnd})$ [36]	2.2	$e^{-}+^{13}$ N decay ( $\beta^{+}$ , Q=2.22 MeV)	3929	快慢符合信号
· 110/00:000 cpu/kt	2		$\nu_e + {}^{13}\text{C} \to e^- + {}^{13}\text{N}(\frac{3}{2}^-; 3.5 \text{MeV}) [36]$	5.7	$e^-+p$	2464	
	4		$\nu_x + {}^{12}\text{C} \to \nu_x + {}^{12}\text{C}(1^+; 15.11 \text{ MeV}) $ [35]	15.1	$\gamma$	4.8	
	3		$\nu_x + {}^{13}\text{C} \to \nu_x + n + {}^{12}\text{C}(2^+; 4.44 \text{MeV}) [37]$	6.864	$\gamma + n$ capture	65	
	4		$\nu_x + {}^{13}\text{C} \to \nu_x + {}^{13}\text{C}(\frac{1}{2}^+; 3.089 \text{MeV})$ [36]	3.089	$\gamma$	14	
	5	NC	$\nu_x + {}^{13}\text{C} \to \nu_x + {}^{13}\text{C}(\frac{3}{2}; 3.685 \text{MeV})$ [36]	3.685	$\gamma$	3032	单信号
	6		$\nu_x + {}^{13}\text{C} \to \nu_x + {}^{13}\text{C}(\frac{5}{2}^+; 3.854 \text{MeV})$ [36]	3.854	$\gamma$	2.8	
	7	ES	$\nu_x + e \to \nu_x + e$	0	e <sup>-</sup>	$3.0  imes 10^5$	单信号

2023/5/8

**8B** 

10

## ■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</li>

## **Fiducial volume cut**的优化

✓ With about 5 m self-shielding, <sup>208</sup>Tl decays from external materials are negligible.

	R<16.5m	<b>R</b> <15m	R<13m	R<14m
Energy (MeV)	> 5	(3, 5)	(2, 3)	<2
靶质量 (kt)	16.2	12.2	7.9	9.9





# 7Be, pep, CNO分析能区[0.45, 1.6] MeV本底



## ■7Be, pep, CNO分析能区[0.45, 1.6] MeV √假设不同的液闪内部放射性本底含量

Radio- purity Scenario		<sup>40</sup> K	<sup>85</sup> Kr	<sup>232</sup> Th-chain	<sup>238</sup> U-chain	<sup>210</sup> Pb/ <sup>210</sup> Bi	<sup>210</sup> Po
IBD	$c \left[ \frac{g}{g} \right]$	$1 \times 10^{-16}$	-	$1 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-15}$	$5 \times 10^{-23}$	-
	$R\left[\frac{\mathrm{cpd}}{\mathrm{kt}} ight]$	2289	5000	3508	15047	12031	12211
Basalina	$c \left[ \frac{g}{g} \right]$	$1 \times 10^{-17}$	-	$1 \times 10^{-16}$	$1 \times 10^{-16}$	$5  imes 10^{-24}$	-
Dasenne	$R\left[\frac{\mathrm{cpd}}{\mathrm{kt}} ight]$	229	500	351	1505	1203	1221
Ideal	$c \left[\frac{g}{g}\right]$	$1 \times 10^{-18}$	-	$1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-17}$	$1 \times 10^{-24}$	-
Iucai	$R\left[\frac{\mathrm{cpd}}{\mathrm{kt}} ight]$	23	100	35	150	241	244
Borexino	$c \left[\frac{g}{g}\right]$	-	-	${<}5.7\times10^{-19}$	$<\!9.4\times10^{-20}$	-	-
	$R\left[rac{\mathrm{cpd}}{\mathrm{kt}} ight]$	4.2	100	1.4	2	115	446.9

NOTE: Contribution from pileup and reactor neutrinos found negligible in the ROI







## ■<sup>7</sup>Be, pep, CNO中微子分析能区 $\checkmark^{11}C (\tau=29 \text{min}), {}^{10}C (\tau=27.8 \text{s}), {}^{6}\text{He} (\tau=1.16 \text{s})$ 是此能区主 要本底 $R^{JUNO} = R^{\text{ref}} \cdot \left(\frac{\bar{E}_{\mu}^{JUNO}}{\bar{E}_{\mu}^{\text{ref}}}\right)^{\alpha} \cdot \frac{\Phi(\mu)^{JUNO}}{\Phi(\mu)^{\text{ref}}} \cdot \frac{\epsilon_{C}^{JUNO}}{\epsilon_{C}^{\text{ref}}},$

Isotope	$R_{ m Scaling\ exp.}$	R	$\langle R \rangle$	$\langle R \rangle_{\rm ROI}$
	[cpd/kton]	[cpd/kton]	[cpd/kton]	[cpd/kton]
<sup>11</sup> C	$R_{\rm Bx} = 274 \pm 3$	$1890 \pm 199$	$1016 \pm 157$	$1761 \pm 144$
	$R_{\rm KL} = 1106 \pm 8$	$1959 \pm 254$	$1910 \pm 107$	$1701 \pm 144$
10C	$R_{\rm Bx} = 6.2 \pm 2.2$	$41.4 \pm 15.3$	$37.1 \pm 5.3$	$0.25 \pm 0.04$
	$R_{\rm KL} = 21.1 \pm 1.8$	$36.5\pm5.7$	$57.1 \pm 0.5$	$0.25 \pm 0.04$
6 <sub>Ho</sub>	$R_{\rm Bx} = 11.1 \pm 4.5$	$74 \pm 31$	$27.8 \pm 4.8$	$12.7 \pm 2.10$
116	$R_{\rm KL} = 15.4 \pm 2$	$26.6\pm4.9$	$21.0 \pm 4.0$	$12.7 \pm 2.19$

✓<sup>11</sup>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





## 8B分析能区[2,16] MeV本底



第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

Energy [MeV]

液闪中天然放射性本底



## ■Muon事例率





 $[10^{4} \text{ Mole} [\text{day}^{-1}\text{kt}^{-1}\text{MeV}^{-1}] = 10^{4}$ 

10-1

 $10^{-1}$ 

Rate[day<sup>-1</sup>] 01

10

 $10^{2}$ 

10

 $10^{-}$ 



■能谱



#### Yield in LS is scaled from measurement by Borexino and KamLAND



-	Systematic uncertainty	<sup>12</sup> B	<sup>8</sup> Li	<sup>6</sup> He	<sup>10</sup> C	<sup>11</sup> Be
	livetime $(\tau)$	$29.1 \mathrm{ms}$	$1.21 \mathrm{~s}$	1.16s	$27.8~{\rm s}$	19.9s
	KamLAND [47]		3.3%			10.8%
-	JUNO	1%	$1 \sim 3\%$	$1{\sim}3\%$	$5 \sim 10\%$	$5 \sim 10\%$

✓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

■系统误差

## ■信号特征:单信号

## ■<sup>8</sup>B事例挑选效率

✓ Muon反符合效率: 52%

✓ (3, 5) MeV: 52% (muon veto) \* 80% (<sup>212</sup>Bi-<sup>208</sup>Tl cut)

## ■其他系统误差

- ✓ FV cut: 1%, refer to Borexino
- (Phys. Rev. D, 101(6):062001, 2020).

✓ Detector energy scale: 0.3%, refer to Daya Bay

(Nucl. Instrum. Meth. A, 940:230-242, 2019.)



3 MeV和5 MeV的跳变来自不同FV cut

cpd/kt	$\mathbf{FV}$	<sup>8</sup> B signal eff.	$^{12}B$	<sup>8</sup> Li	$^{10}C$	$^{6}\mathrm{He}$	$^{11}\mathrm{Be}$	$^{238}\mathrm{U}$	$^{232}$ Th	$\overline{\nu}$ -e ES	Total bkg.	Signal	rate at
1 /		Ŭ									Ŭ	$\Delta m_{21}^{2\star}$	$\Delta m_{21}^{21}$
(2, 3)  MeV	7.9 kt	$\sim 51\%$	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	$\sim 41\%$	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	$\sim 52\%$	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%				





## 8B太阳中微子CC道探测

$$ν_e + {}^{13}C → e^- + {}^{13}N(\frac{1}{2}^-)$$
  
**信号特征:快慢符合信号**  
✓快信号:电子动能  
✓慢信号: {}^{13}N衰变(β^+, τ = 863 s)



## ■优化事例挑选条件

				Background for CC channel			
	Cuts	CC signal efficiency	CC signal	Solar ES	Muon-induo	ced isotopes	
				Accidental	Accidental	Correlated	
_	_	-	3929	—	_	_	
Time cut	$\Delta T < 900 \text{ s}$	65%	2554	$10^{10}$	$10^{13}$	$10^{12}$	
Enorgy gut	$5 \text{ MeV} < E_p < 14 \text{ MeV}$	79%	1996	109	1010	109	
Energy cut	$1~{\rm MeV} < E_d < 2~{\rm MeV}$	91%	1000	10	10	10	
Fiducial volume Cut	R < 16.5  m [30]	81%	1487	$10^{7}$	$10^{7}$	$10^{8}$	
Vertex cut	$\Delta d < 0.47~{\rm m}$	87%	1293	328	$10^{5}$	$10^{6}$	
Muon veto	Muon and TFC veto [30]	50%	647	164	53	58	
Combined	_	17%	647		275		



# 物理灵敏度分析



第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

## JUNO观测中微子存活几率upturn



Neutrino oscillation (MSW-LMA)





**非除平的P**<sub>ee</sub>: 2.7  $\sigma$  with  $\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ , and the statistic-only sensitivity can reach 5  $\sigma$ .













## ■利用ES, NC, CC三个反应道

✓可模型无关的测量<sup>8</sup>B太阳中微子流强(5%),两个振荡参数sin<sup>2</sup>θ<sub>12</sub>(8%)和Δm<sup>2</sup><sub>21</sub>(20%)
 ✓如果联合SNO-NC结果,可获得世界上最高的<sup>8</sup>B中微子流强精度3%



<sup>210</sup>Po reach Phase I of Borexino (10<sup>4</sup> cpd/kt), dashed line in the right panel <sup>238</sup>U/<sup>232</sup>Th ~ 10<sup>-15</sup> g/g,  $E_{vis} > 5$  MeV, dotted line in the right panel





## ■JUNO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~10<sup>-17</sup> g/g)、高能量分辨率(3%/√E)

### ■太阳中微子流强和振荡测量

✓<sup>7</sup>Be, pep, CNO中微子: 检验太阳金属丰度模型

			CNO			
	<sup>7</sup> Be	рер	无pep约束	有pep约束		
Borexino	2.7%	17%	-12%, +30%			
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%		

#### 相关合作组文章:

1. CPC Vol. 45, No. 2 (2021) 023004

2. arXiv:2210.08437

3. arXiv:2303.03910

### ✓<sup>8</sup>**B**中微子: 10年数据,流强5%, sin<sup>2</sup>θ<sub>12</sub> 8%和Δm<sup>2</sup><sub>21</sub> 20%

- SuperK和Borexino实验只能观测 B8太阳中微子ES道,因此受振荡参数影响无法独立确定<sup>8</sup>B太阳中微子总流强
- JUNO将在国际上首次探测到太阳中微子和<sup>13</sup>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<sup>8</sup>B太阳中微子流强和振荡参数

✓<sup>8</sup>B中微子: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±0.9)% for Δm<sup>2</sup><sub>21</sub>=7.5×10<sup>-5</sup> eV<sup>2</sup>, 和SuperK 20年数据结果相当
- 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