



华北电力大学

NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY



# 江门中微子实验测量超新星遗迹中微子的机遇和挑战

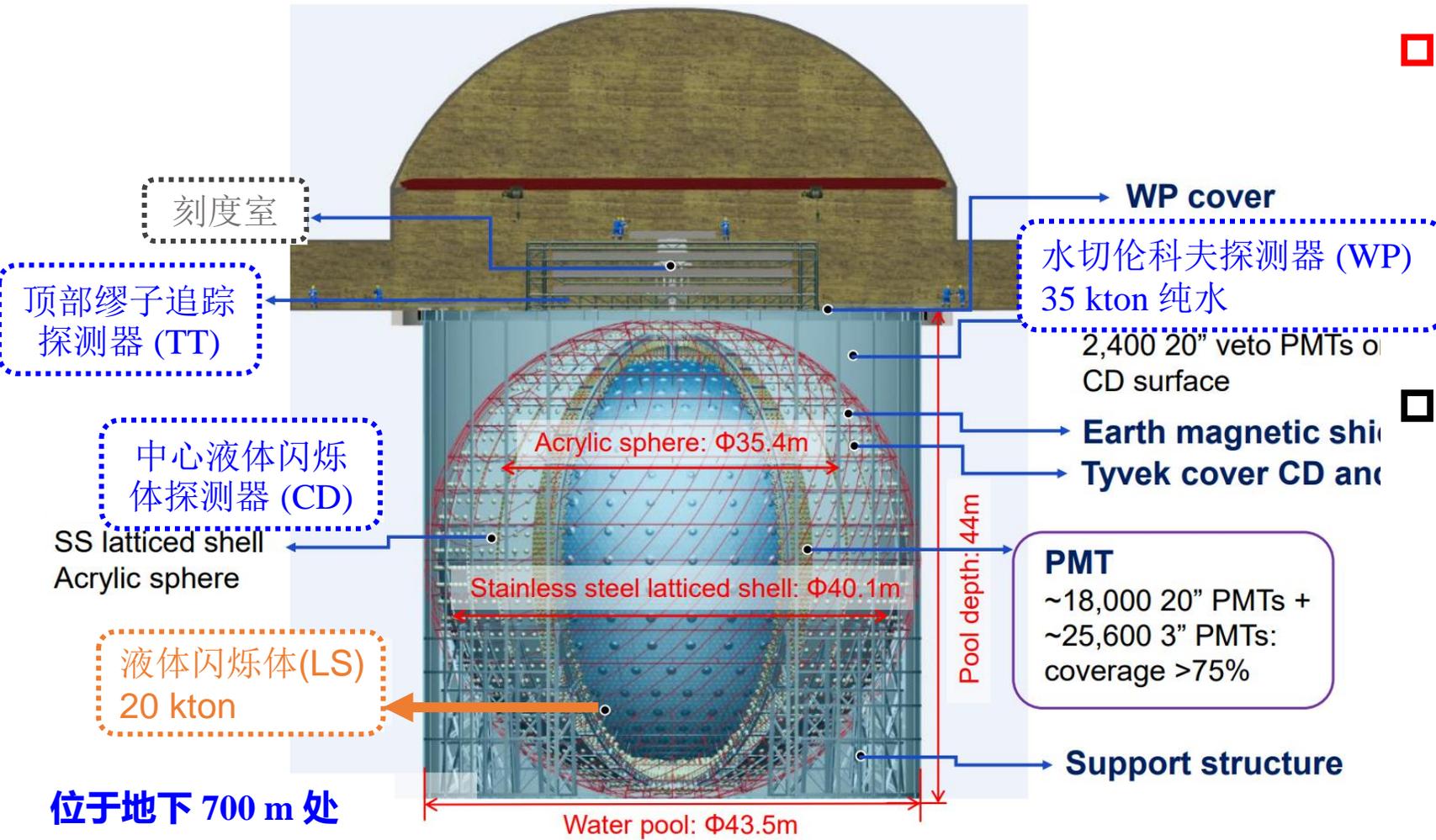
程捷 (代表江门合作组)

华北电力大学

chengjie@ncepu.edu.cn

2023年5月11日

这个报告内容主要来自于江门合作组文章 JCAP 10 (2022) 033



□ **首要物理目标：** 通过测量反应堆中微子

▶ **中微子质量顺序**

▶ **精确测量中微子振荡参数**

□ **具有非常多的中微子物理和超出标准模型的新物理研究课题**

▶ **大气中微子**

▶ **超新星中微子**

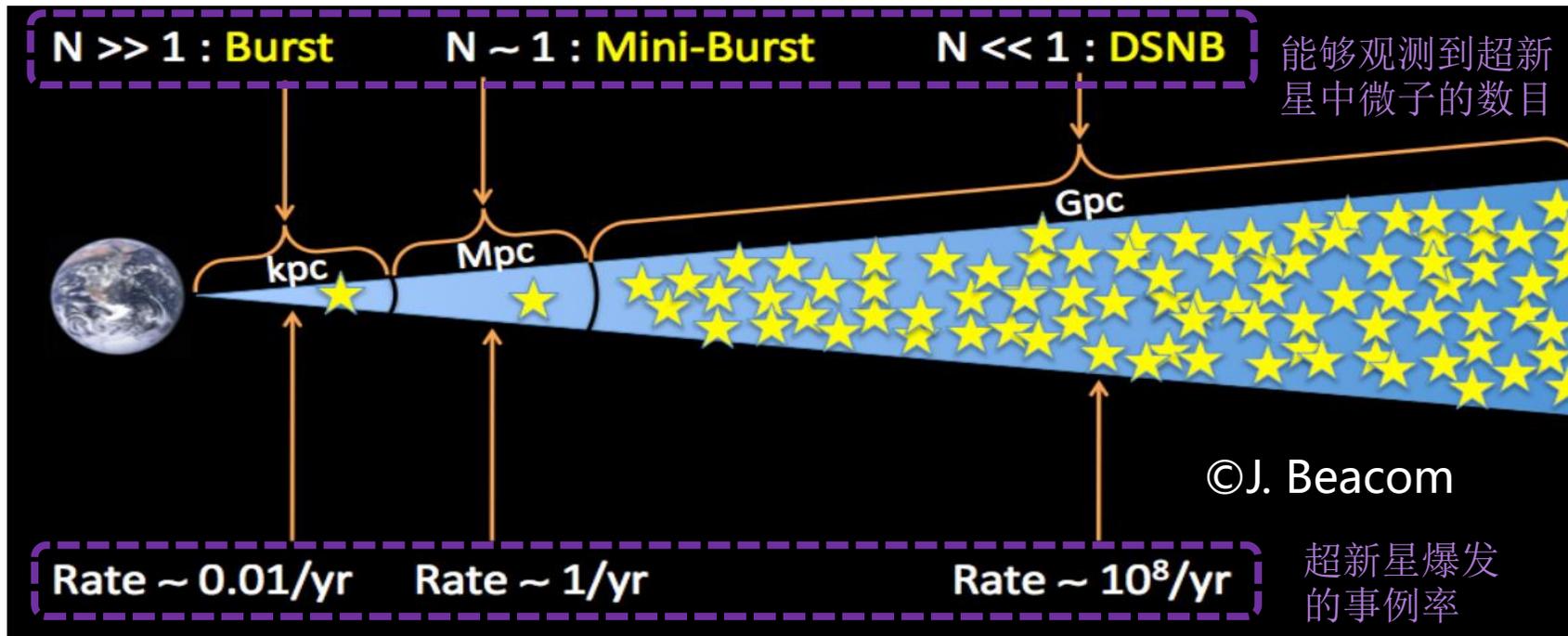
▶ **太阳中微子**

▶ **地球中微子**

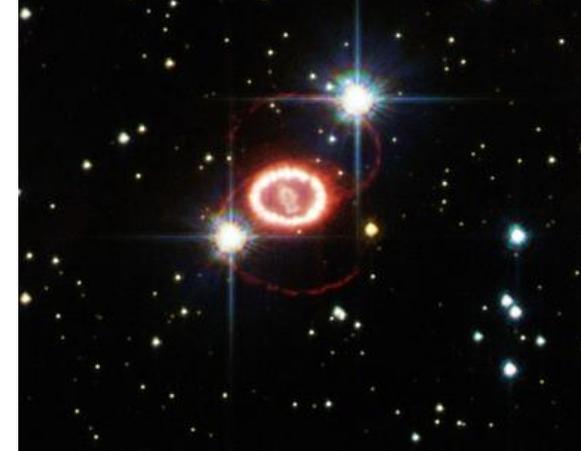
▶ **核子衰变**

▶ **暗物质间接测量**

# 超新星中微子



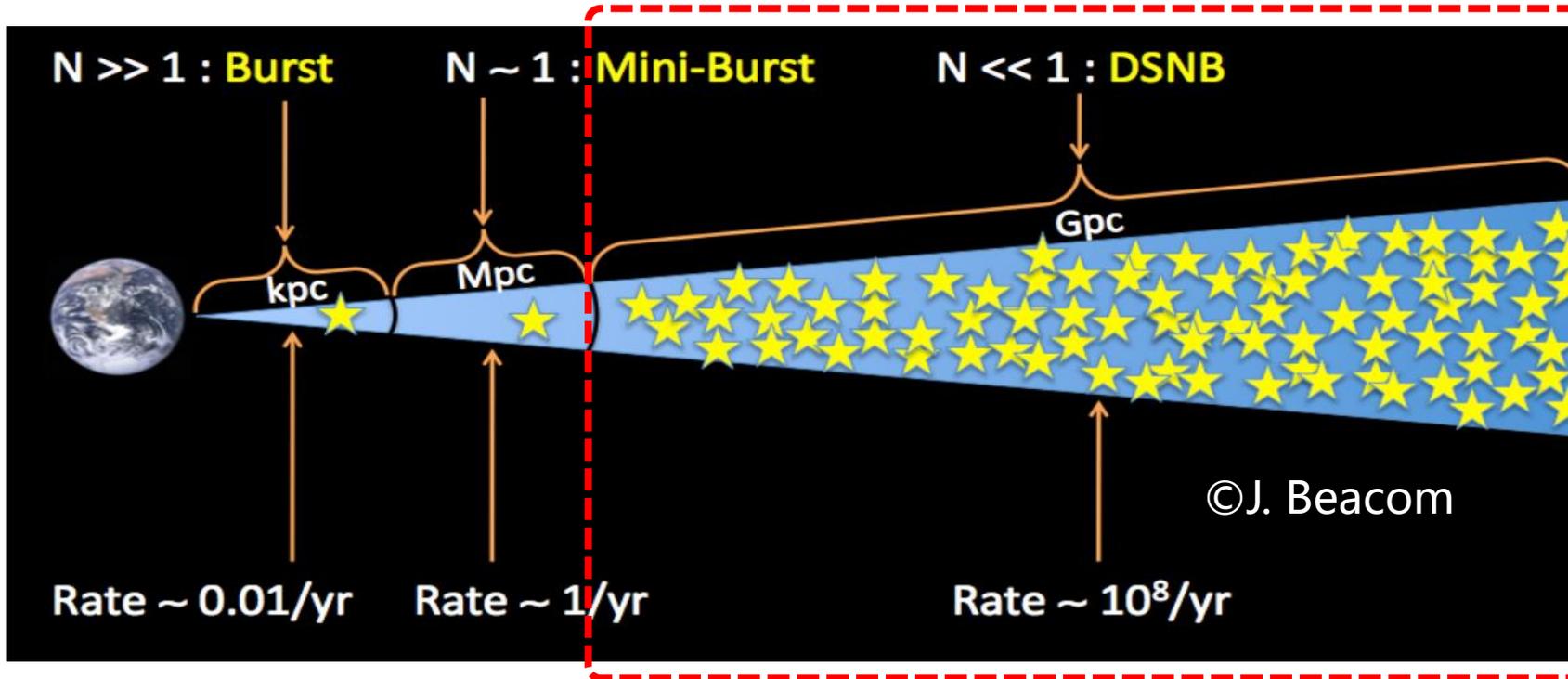
这张SN1987A的照片是在2006年12月用哈勃望远镜拍摄的。



至今只观测到超新星 (SN1987A) 爆发产生的中微子

- ▶ 超新星中微子是研究恒星演化命运、宇宙演化、元素核合成、中微子性质的重要工具
- ▶ 研究超新星中微子有**两种互补**的方法：
  - 银河系及其附近超新星爆发中微子：高统计量 😊，精确测量 😊，但依赖爆发机会 (2-3次/百年) 😞
  - 超新星遗迹中微子：低统计量 (预计2-4个/年 @ JUNO) 😞，但这些中微子来自于宇宙中已经爆发成功或失败的超新星 😊

# 超新星遗迹中微子



- 未被探测到
- 将来有望使用大型的液体闪烁体和水切伦科夫探测器实现**第一次观测**
- **江门中微子实验 (JUNO)** 拥有20kt靶物质和非常好的排除本底的技术，非常有希望成为**首次观测超新星遗迹信号的最佳实验之一**

■ **携带非常重要的信息:** 宇宙恒星演化，来自于核坍塌超新星爆发的平均中微子能谱，超新星爆发形成黑洞的比例

■ **探测关键:**

■ **靶体积** (将来可能观测到DSNB的实验: JUNO, SuperK-Gd, Hyper-K, DUNE, THEIA)

■ **排除本底的技术**

# DSNB 信号预期

## • DSNB 流强

$$\frac{d\phi}{dE_\nu} = \int_0^5 R_{SN}(z) \frac{dN(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \left| \frac{cdt}{dz} \right| dz$$

平均超新星中微子能谱, 包括来自

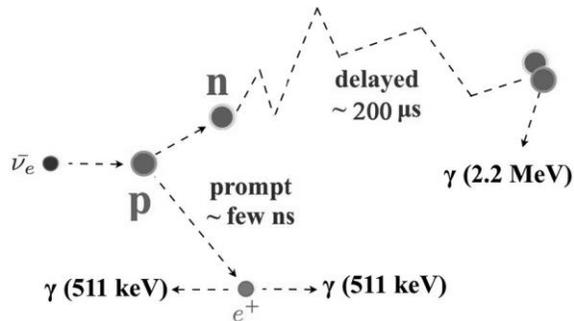
- 爆发失败的超新星
- 爆发成功的超新星

核坍塌超新星事例率      依赖于宇宙演化的历史

三个关键 (不确定) 参数:

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

## • DSNB 首要探测道: 反贝塔衰变 (IBD)



JUNO: 中子被氢俘获  
2-4 DSNB IBD 事例/年

## • DSNB 快信号能谱:

测量得到快信号能量  $\rightarrow \frac{dS(E_{prompt})}{dE_{prompt}} = N_p \times \sigma(E_\nu) \times J(E_\nu) \times \frac{d\phi}{dE}(E_\nu) \rightarrow$  DSNB 流强

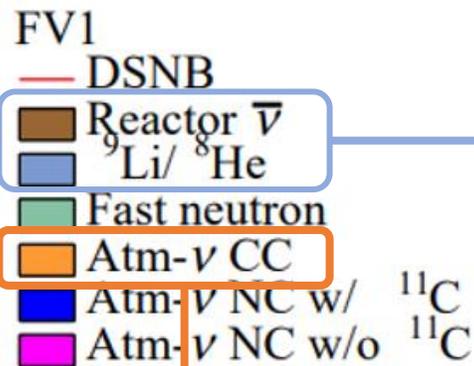
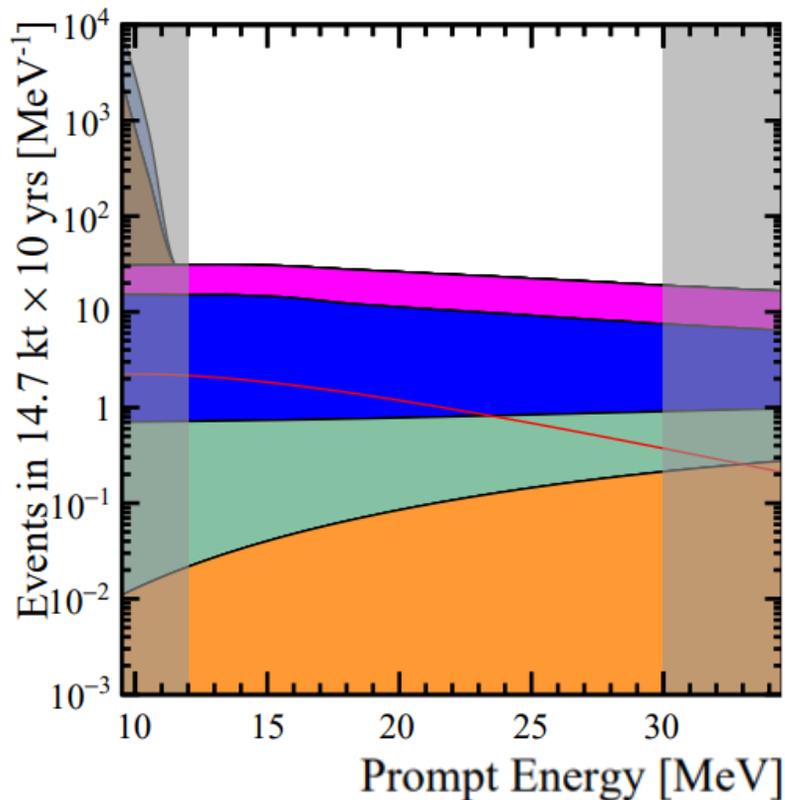
探测器的探测能力      雅克比因子

可参考的模型:

- $\langle E_\nu \rangle = 15 \text{ MeV}$
- $f_{BH} = 0.27$
- $R_{SN}(0) = 1.0 \times 10^{-4} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$

扫描一个合理的参数空间  
用于灵敏度的研究

# DSNB 观测能区



低能区 ( $< 12 \text{ MeV}$ ):

- ▶ 反应堆  $\bar{\nu}_e$  和宇生的  ${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$  同位素是主要本底来源
- ▶ DSNB观测能区的下限设置为  $12 \text{ MeV}$ , 这两种本底可以被忽略

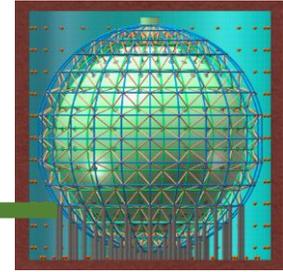
高能区 ( $> 30 \text{ MeV}$ ):

- ▶ 大气中微子带电流 ( $\bar{\nu}_e$  IBD) 事例率随能量增加而增加, 限制 DSNB 的观测
- ▶ 通过研究不同能区上限对 DSNB 灵敏度的影响, 优化 DSNB 观测能区上限为  $30 \text{ MeV}$

- DSNB观测能量区间为  $[12, 30] \text{ MeV}$ , 主要本底:
  - 快中子本底
  - 大气中微子中性流本底

# 快中子本底

- ▶ 江门水池和中心探测器的缪子探测效率分别为99.8%和~100%
- ▶ 快中子本底：来自于只穿过探测器周围岩石的缪子
  - ▶ 由于水层的屏蔽，大多数的快中子事例分布在中心探测器的赤道和顶部



设置 **fiducial volume** 排除大部分的快中子事例

▶ 两个fiducial volumes: **FV1** 和 **FV2**

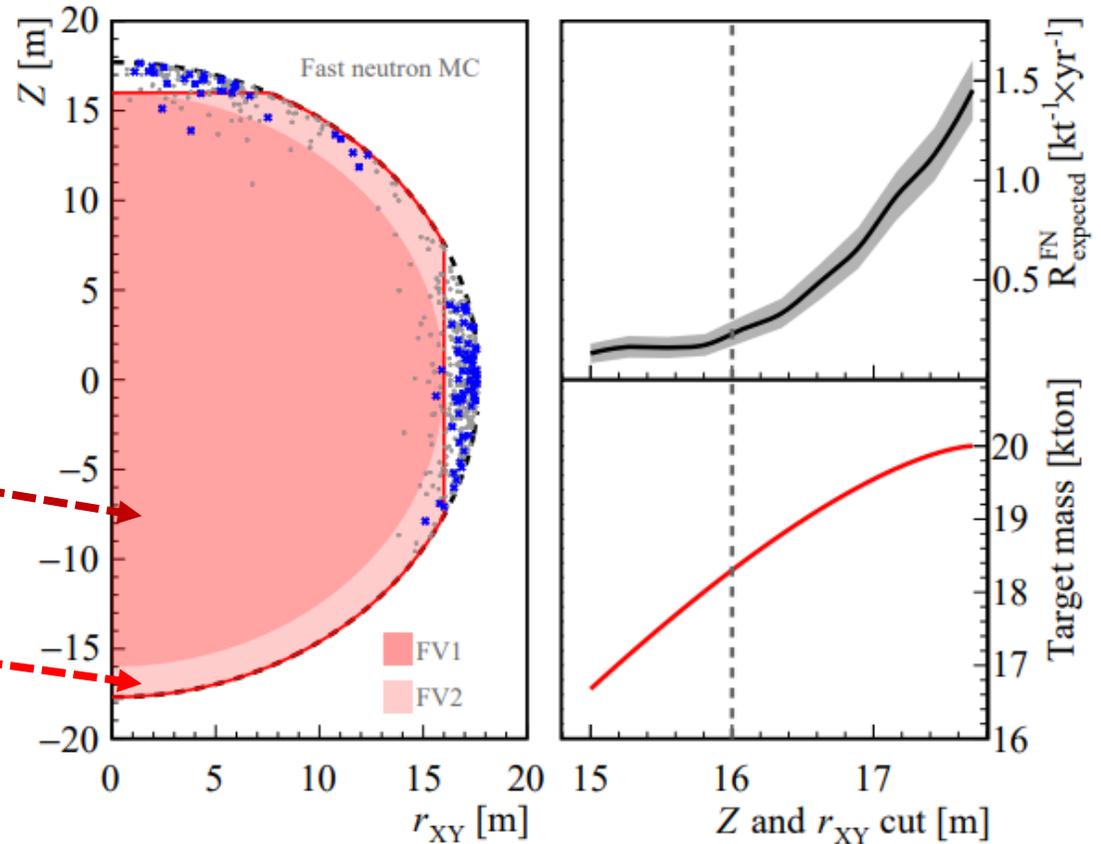
■ **FV1 (内层):**

$$R \equiv \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} < 16\text{m} \text{ (14.7 kt)}$$

■ **FV2 (外层, 全反射区):**

$$R > 16\text{m}, Z \text{ 和 } r_{XY} < 16\text{m} \text{ (3.6 kt)}$$

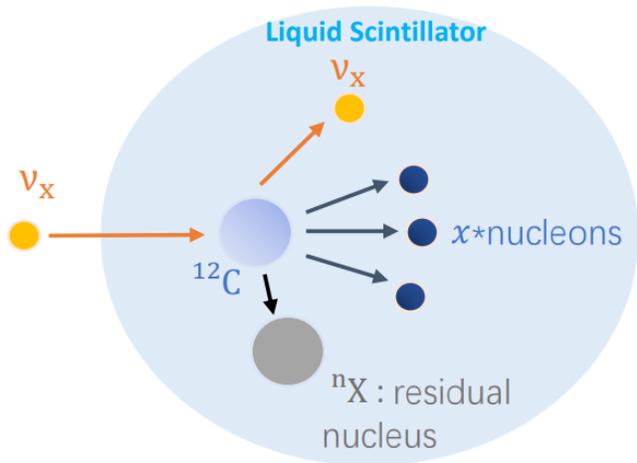
■ 在FV1和FV2中, 使用不同的本底排除策略



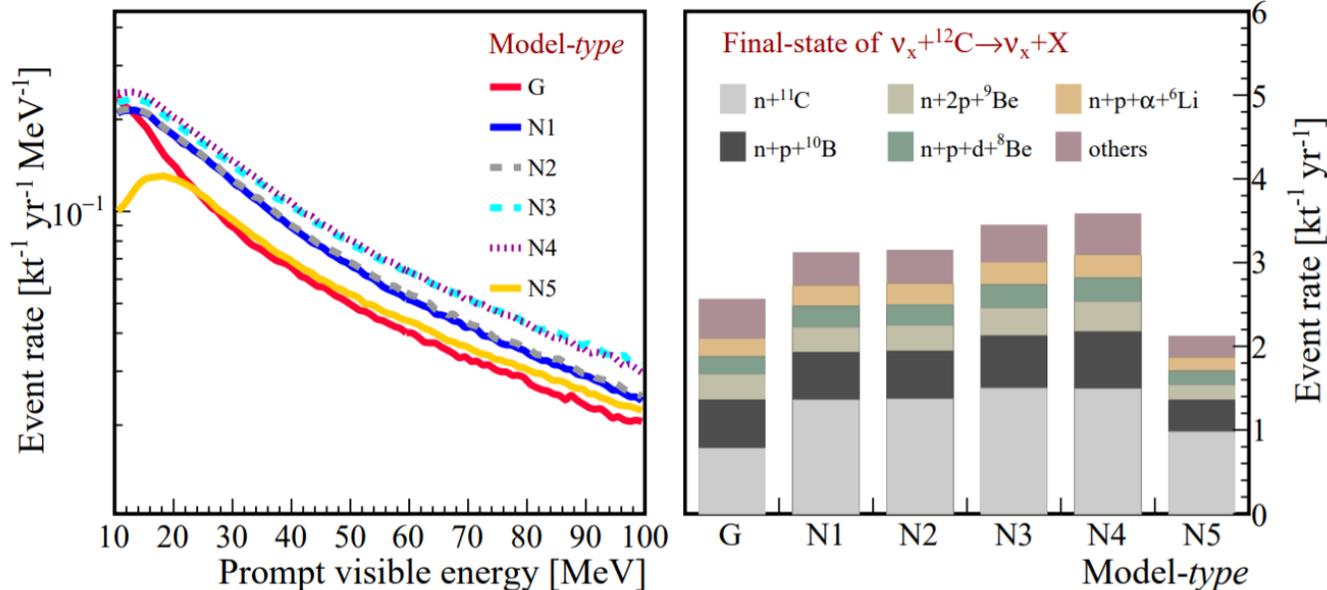
# 大气中微子中性流本底



- 大气中微子在液闪中与 $^{12}\text{C}$ 发生的中性流过程是**最大的本底来源**，大约是信号的**20倍**



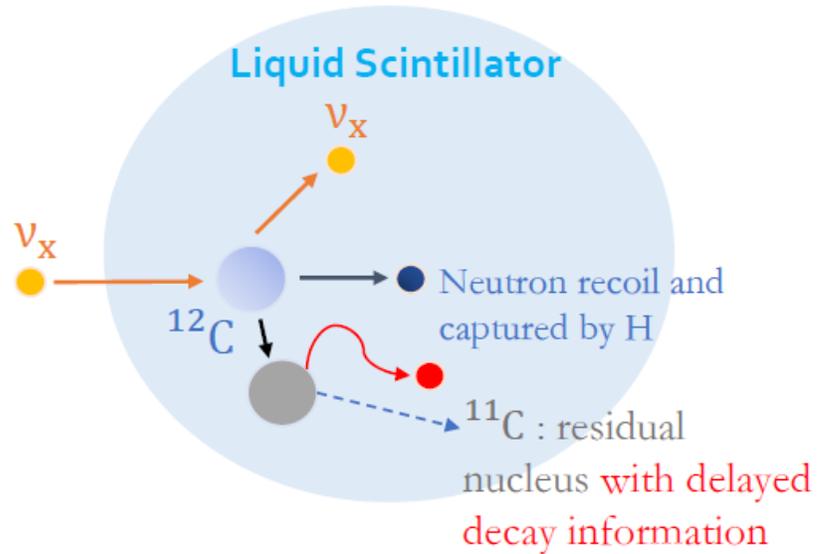
Dominant channels in [12, 30]MeV



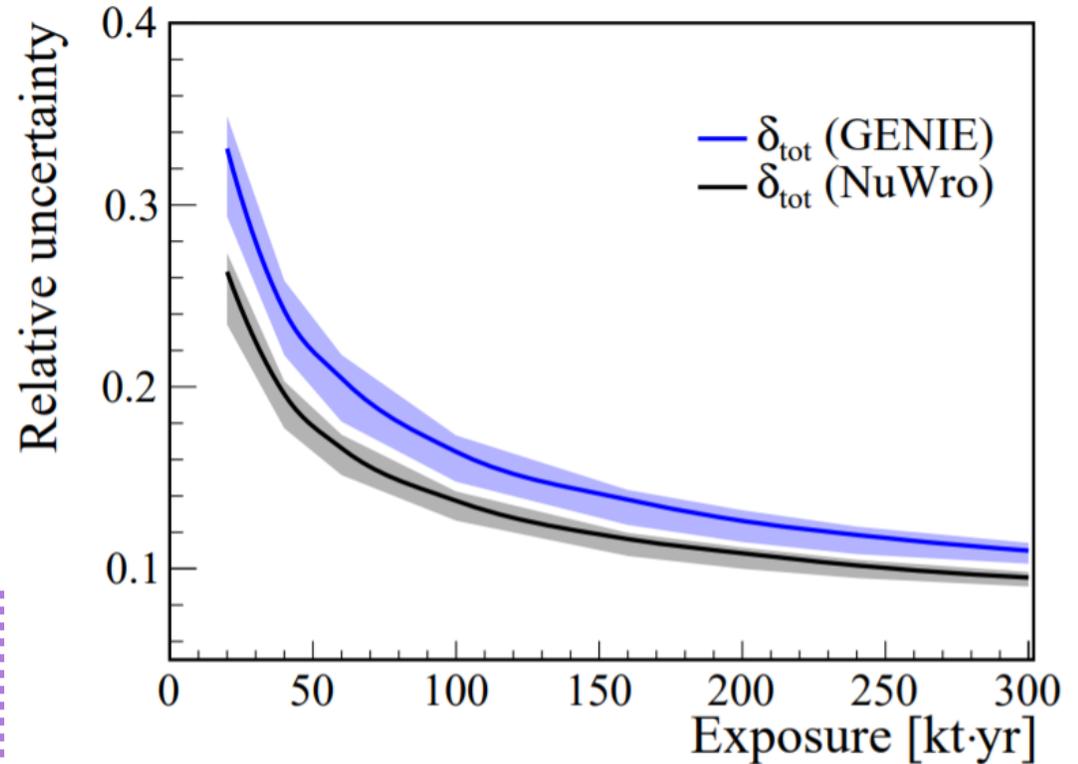
■ **Atm- $\nu$  流强:** 来自于 M. Honda 教授 (arXiv:1502.03916v2)

分析工作	研究亮点	参考文献
模型预期	$\nu$ -N 相互作用 (GENIE, NuWro) + 残余原子核退激发 (TALYS)	Phys.Rev.D 103 (2021) 5, 053001
当前JUNO合作组成立了中微子相互作用研究组 (GANYMEDE group), 基于GENIE、NuWro、GiBUU的最新版本开展相互作用的研究, ( <a href="https://zenodo.org/record/6774990">https://zenodo.org/record/6774990</a> )		

# 误差估计：大气中微子中性流本底



- 不同模型之间的差别：  
→ ~20%
- 最大的反应道：  
 $\nu_x + ^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + n + ^{11}\text{C}$  (三重符合信号)
- 最大似然法联合拟合第三个信号的时间、位置和能量信息  
→ *in situ* 测量

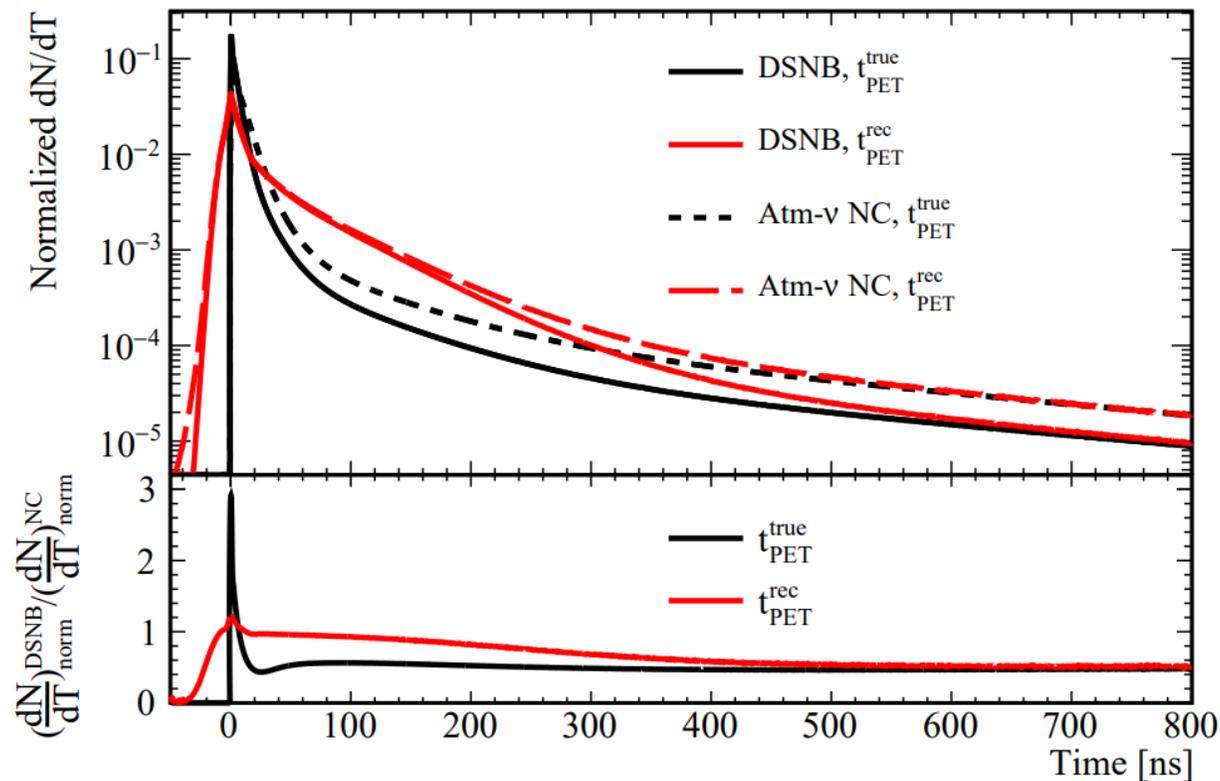


取数时间	1-3 年	4-9 年	10-20 年
误差	35%	25%	15%

# 脉冲形状鉴别 (PSD)



- 在液闪中，沉积能量以荧光的形式放出
- 荧光的放出时间分布是几个指数的叠加
- 不同粒子的荧光放出的时间分布（脉冲形状）不同 → 粒子鉴别的基础（粒子种类相关）
- 形成快信号的粒子种类不同
  - DSNB快信号：正电子
  - 大气中微子中性流（快中子）快信号：核子（中子或者中子和质子）反冲信号



平均光子放出时间分布

► PSD技术能够非常强的排除大气中微子中性流本底和快中子本底

# PSD鉴别效率和误差估计



■ 多变量分析 **BDT** (baseline) 和神经网络 **neural network** (alternative) 为基础的机器学习方法

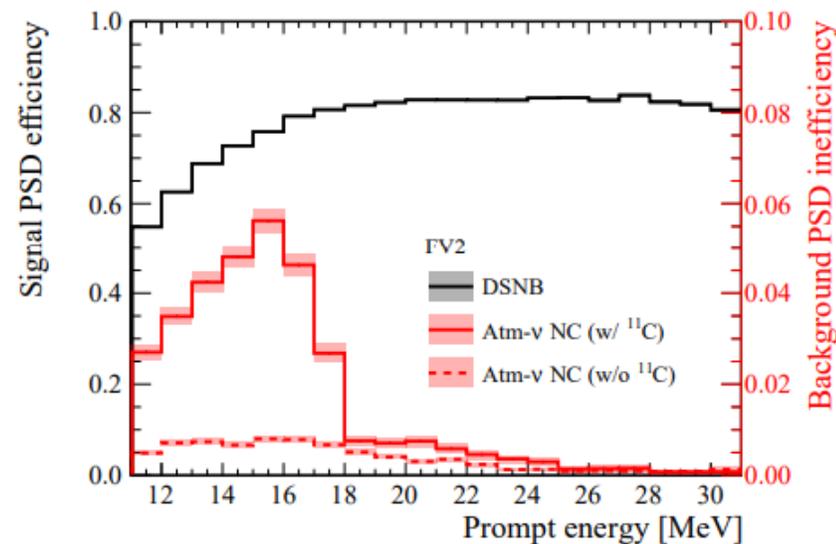
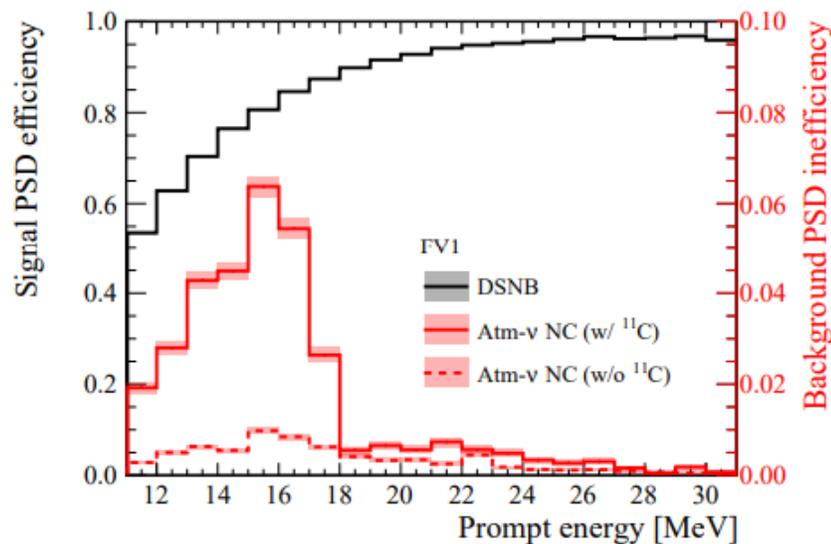
■ 当大气中性流本底的残余效率为1%，平均DSNB信号PSD效率为：

✓ 84% (FV1)

✓ 77% (FV2)

■ 首次使用了能量依赖的PSD效率

能量依赖的 PSD 效率： 已经被优化



PSD 误差估计： 利用将来相似的数据样本

- 宇宙线缪子产生的散裂中子
- 低能的中子刻度源
- 缪子俘获样本以及产生的密歇尔电子

曝光时间	1-3 年	4-9 年	10-20 年
PSD 效率误差	30%	20%	10%

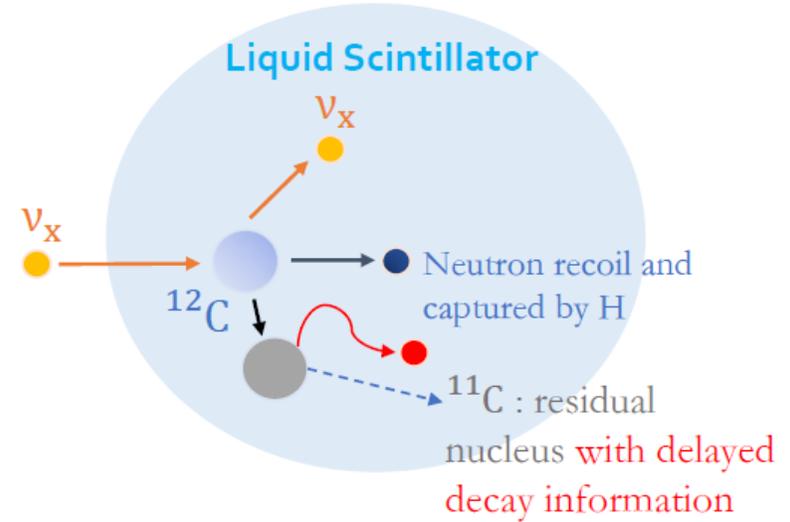
# 三重符合 (TC) 信号的排除

## ● TC cut

⇒ 依据  $^{11}\text{C}$  NC 反应道的三重符合信号

- 快信号: 快中子反冲信号
- 慢信号: 中子被氢俘获
- 第三个信号:  $^{11}\text{C}$  原子核不稳定衰变

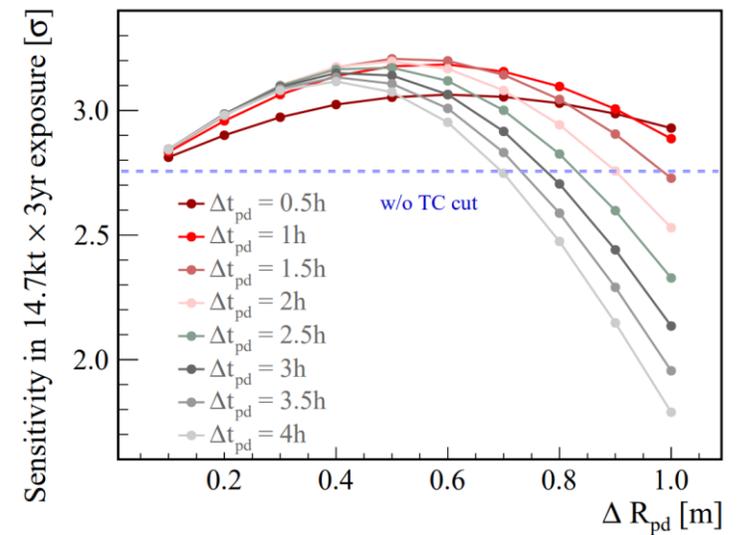
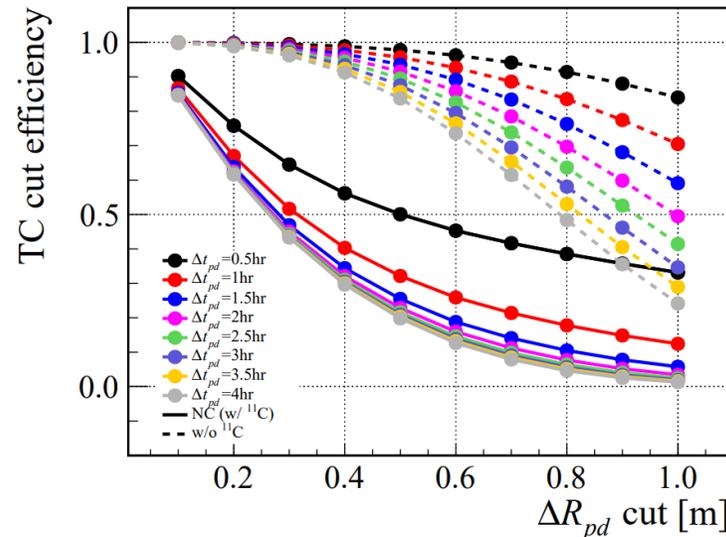
⇒ 对第三个信号到第一个信号之间的时间和距离设置排除区间



## ▶ 偶然符合本底 (冒充第三个信号)

- ✓ 宇生的  $^{11}\text{C}$
  - ✓ 天然放射性本底
- 由于FV2的天然放射性本底水平太高, 无法应用TC cut

## ▶ 研究不同TC cut对DSNB灵敏度的影响, 挑选出最优cut设置

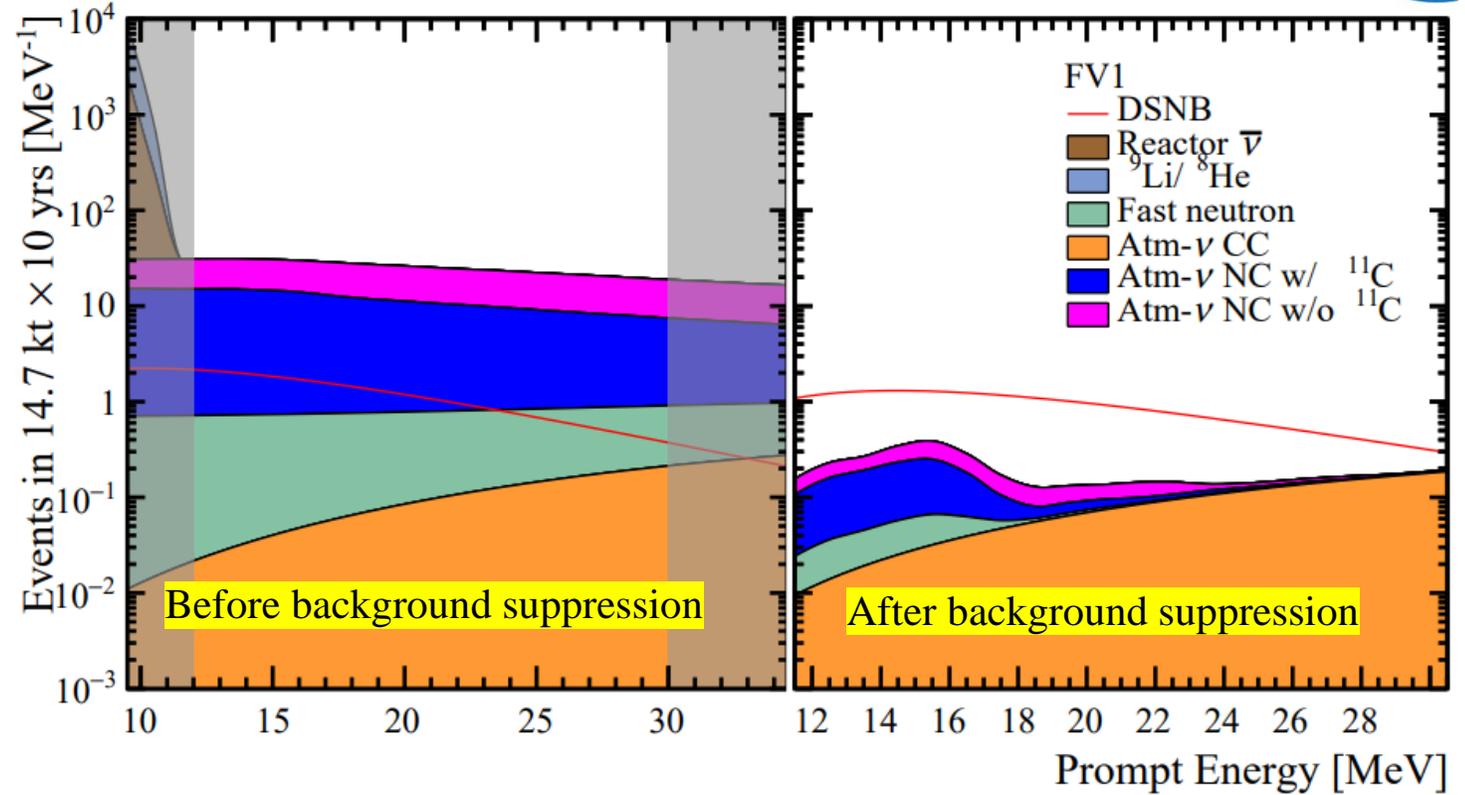


# 信号以及本底的事例率和能谱



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

- 排除本底方面的**亮点**:
- ✓ Muon veto
- ✓ 粒子脉冲鉴别 (PSD)
- ✓ 三重符合cut ( $^{11}\text{C}$  delayed decay)

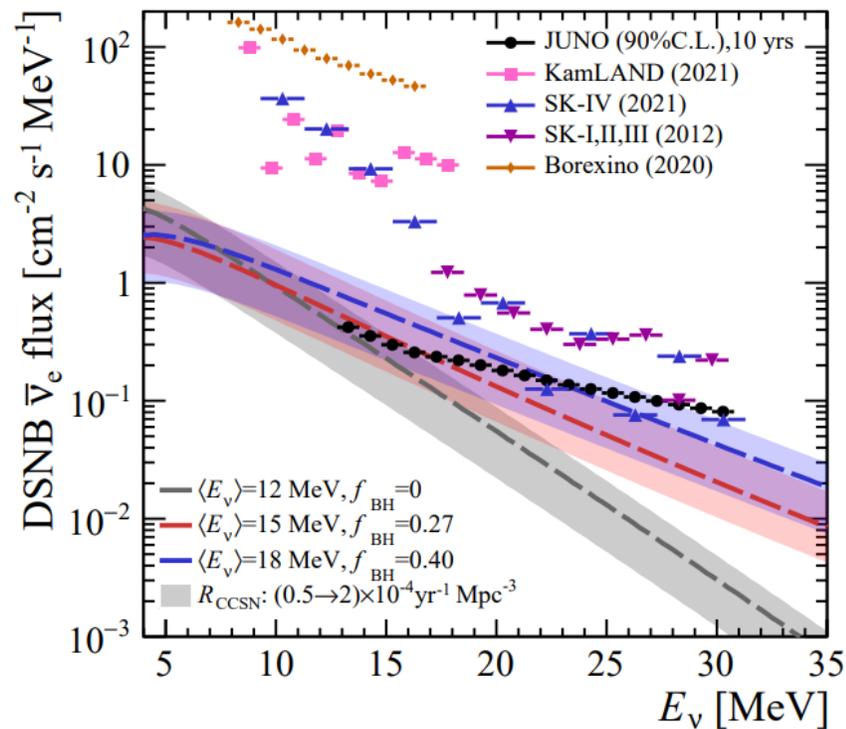
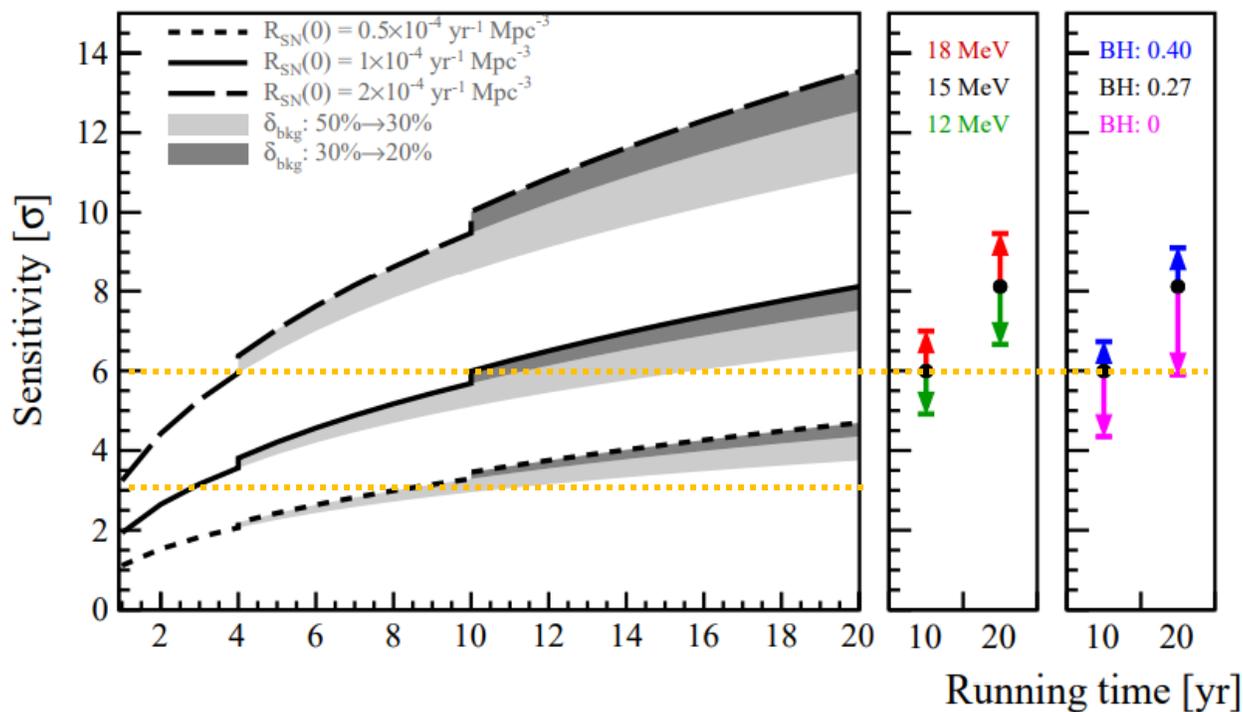


相比于JUNO黄皮书 *J. Phys. G43:030401(2016)* , 重要改进:

- ✓ 本底预期: 0.7 / 年  $\rightarrow$  0.54 / 年
- ✓ PSD: 信号效率 50%  $\rightarrow$  80% (1% 残余本底水平)
- ✓ 更加实际的DSNB模型: 考虑了超新星爆发失败形成黑洞产生的中微子

$\Rightarrow$  S/B 从 2 提高到 3.5 (FV1+FV2)

# DSNB 灵敏度



- ▶ 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)
- ▶ 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

## ◆前景好！

- 大气中微子NC本底：通过对通量计算、中微子相互作用（包括 deexcitation）、原位测量以及PSD技术进行优化，我们成功地建立了一个完整的链条
- JUNO对DSNB的探测有很好的前景
- 模型相关的DSNB灵敏度： $3\sigma$ （3年数据），好于  $5\sigma$ （10年数据）

## ◆最好的DSNB flux上限！

- 即使JUNO未能测出DSNB，低本底优势，能够让JUNO给出当前世界上最好的上限和强有力排除参数空间

## ◆JUNO 将在2023年完成探测器的建设, 期待江门中微子实验的数据！

# 谢谢！