



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



JUNO 弥散超新星中微子 背景搜寻现状

罗晓杰

高能物理研究所

中国物理学会高能物理分会

2026年7月15日



CONTENT

目录

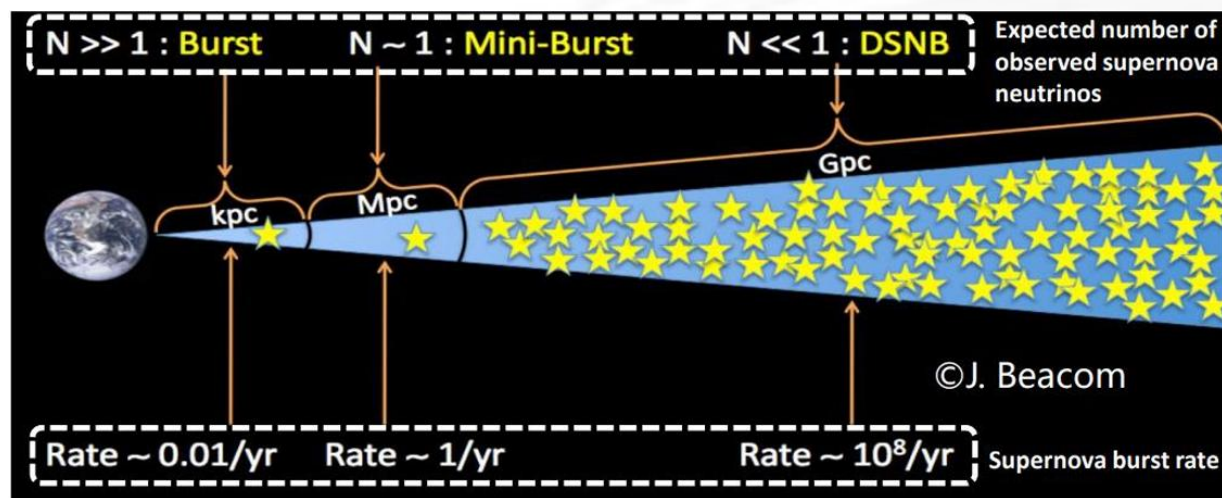
- 弥散超新星中微子背景
- 江门地下中微子观测站
- 信号与主要本底
- 早期数据结果
- 总结与展望



弥散超新星中微子背景



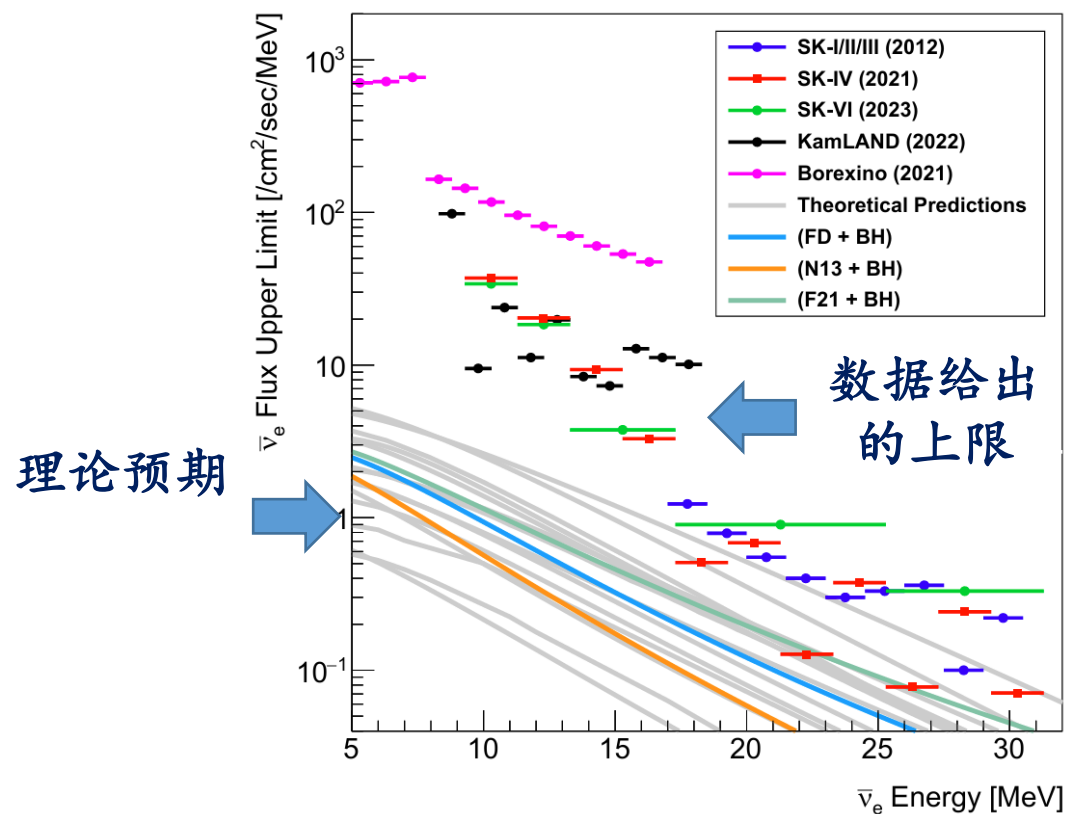
- 超新星爆发中的中微子携带核心坍缩的早期信息
- 银河系超新星稀有, 爆发时间短
- 最早的超新星中微子观测: KAMIOKANDE-II、IMB和Baksan实验 (1987A) ➡ ~25个事例
- 宇宙历史上所有核心坍缩超新星中微子通量的叠加 ➡ 弥散超新星中微子背景 (DSNB)



- DSNB携带宇宙演化和超新星机制的重要信息
 - ▣ 宇宙中恒星形成率
 - ▣ 失败超新星或黑洞形成事件比例
 - ▣ 超新星中微子平均能量分布

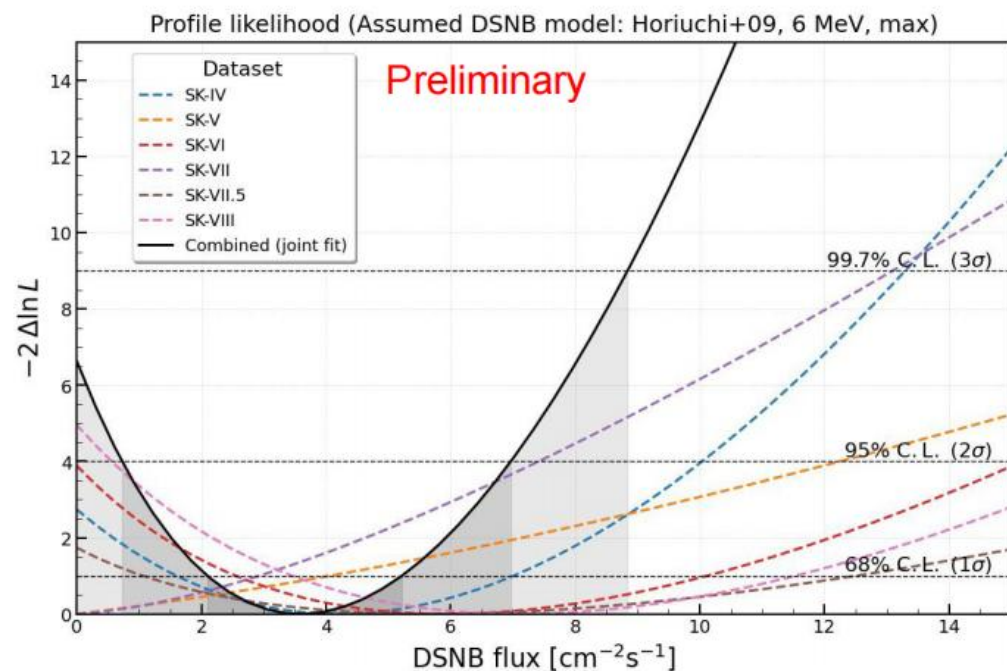
$$\frac{d\phi}{dE_\nu} = \int_0^{z_{\max}} R_{\text{SN}}(z) \left[\frac{dN(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \left| \frac{cdt}{dz} \right| \right] dz$$

- 国际上诸多实验进行过寻找，但至今未被实验发现。
- 目前对DSNB的探测水平已经接近理论预期。



Ando et al. 2023 PJAB 99 026

Super-K 联合5000天数据集观测
到相对于无信号假设的 2.6σ 偏离



Neutrino 2026 Hiroyuki



江门地下中微子观测站 (JUNO)



➤ 2万吨液体闪烁体靶体，光阴极覆盖率约78%

▣ 靶质量大

▣ 优异的能量分辨率（约3 %@1 MeV）

- 高光产额

- 高光子探测效率

▣ 低放射性本底 ($U/Th < 10^{-16}$ g/g)

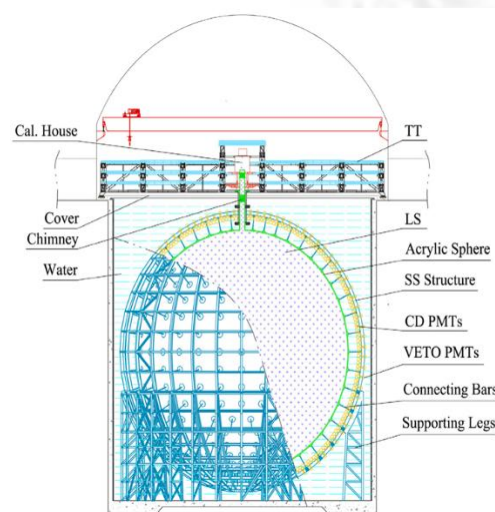
▣ 优异的波形鉴别潜力

➤ 已在2025年8月开始正式运行取数，并发布了首批物理成果

JUNO 地理位置



JUNO 探测器结构





➤ 液闪探测DSNB的优势：中子探测效率高、波形鉴别潜力。

➤ JUNO主要通过逆 β 衰变反应探测DSNB电子反中微子

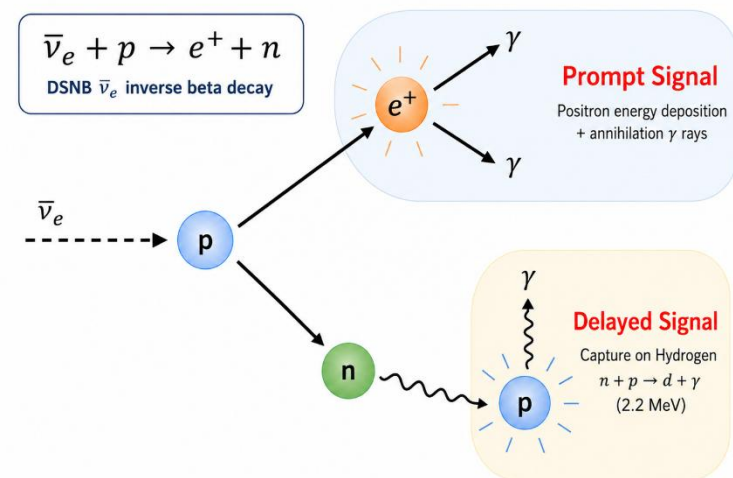
- 能量范围：12-30 MeV
- 逆 β 衰变：快慢信号符合
- 预期信号事例率：2-4个/年

➤ 主要本底：

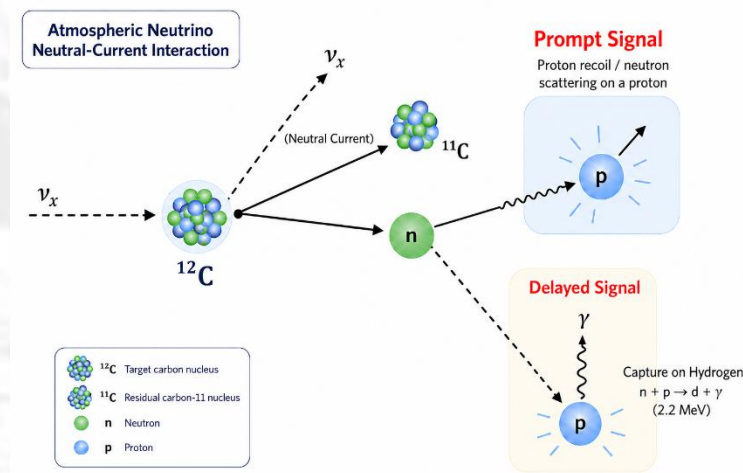
- 大气中微子中性流 (Atm-NC)
- 大气中微子带电流 (Atm-CC)
- 快中子
- 宇生同位素 ($^9\text{Li}/^8\text{He}$)
- 反应堆中微子

宇宙线缪子

DSNB的IBD过程



大气中微子的NC过程





➤ 液闪探测DSNB的优势：中子探测效率高、波形鉴别潜力。

➤ JUNO主要通过逆 β 衰变反应探测DSNB电子反中微子

- 能量范围：12-30 MeV
- 逆 β 衰变：快慢信号符合
- 预期信号事例率：2-4个/年

➤ 主要本底：

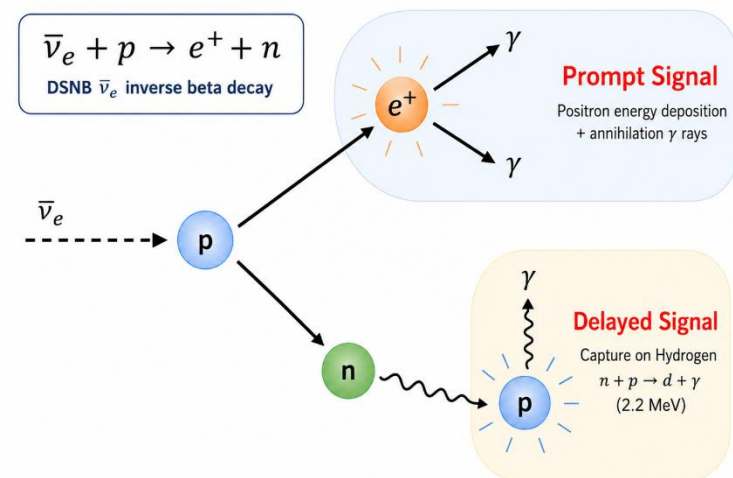
- 大气中微子中性流 (Atm-NC)
- 大气中微子带电流 (Atm-CC)
- 快中子
- 宇生同位素 ($^9\text{Li}/^8\text{He}$)
- 反应堆中微子

宇宙线缪子

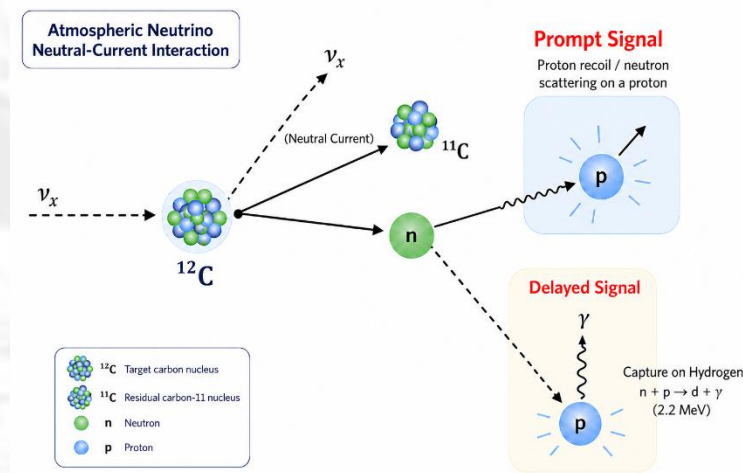


宇宙线反符合

DSNB的IBD过程



大气中微子的NC过程





➤ 液闪探测DSNB的优势：中子探测效率高、波形鉴别潜力。

➤ JUNO主要通过逆 β 衰变反应探测DSNB电子反中微子

- 能量范围：12-30 MeV
- 逆 β 衰变：快慢信号符合
- 预期信号事例率：2-4个/年

➤ 主要本底：

- 大气中微子中性流 (Atm-NC)
- 大气中微子带电流 (Atm-CC)
- 快中子
- 宇宙线反符合
- 宇宙线缪子
- 宇生同位素 ($^9\text{Li}/^8\text{He}$)
- 反应堆中微子

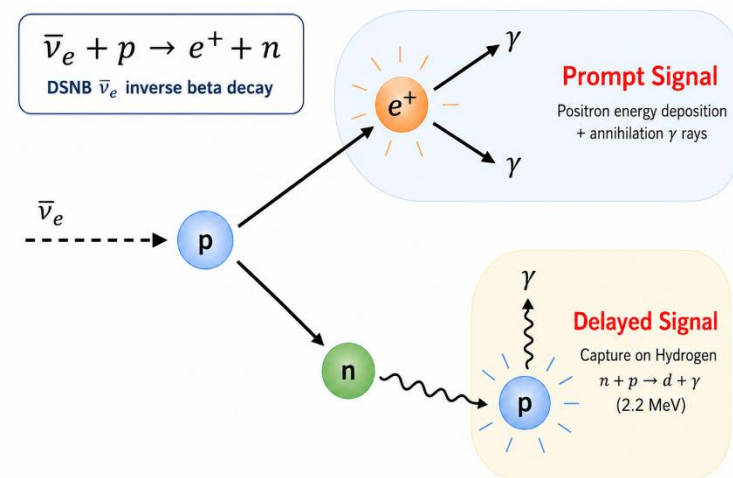


宇宙线反符合

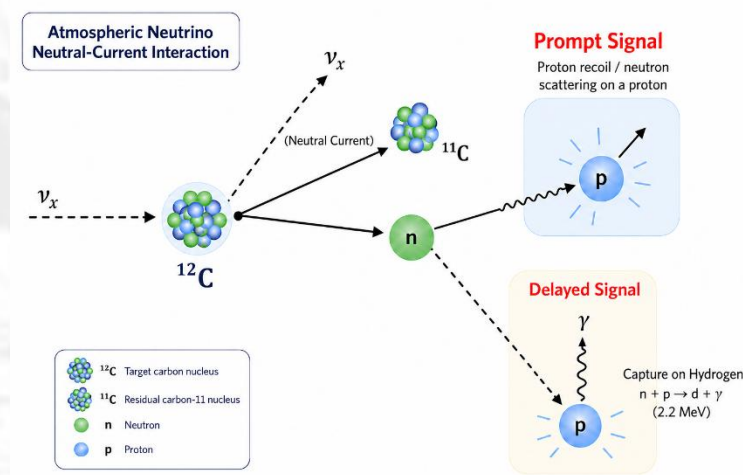


能量区间: 12 MeV以上

DSNB的IBD过程



大气中微子的NC过程





➤ 液闪探测DSNB的优势：中子探测效率高、波形鉴别潜力。

➤ JUNO主要通过逆 β 衰变反应探测DSNB电子反中微子

- 能量范围：12-30 MeV
- 逆 β 衰变：快慢信号符合
- 预期信号事例率：2-4个/年

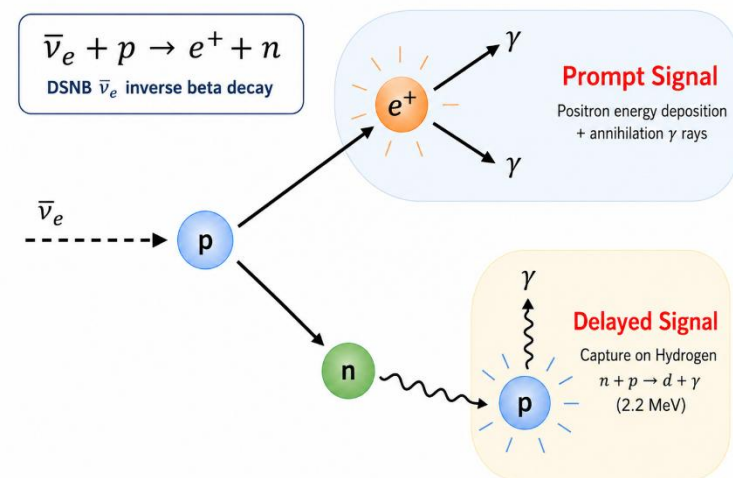
事例率是信号的20倍
主要本底

➤ 主要本底：

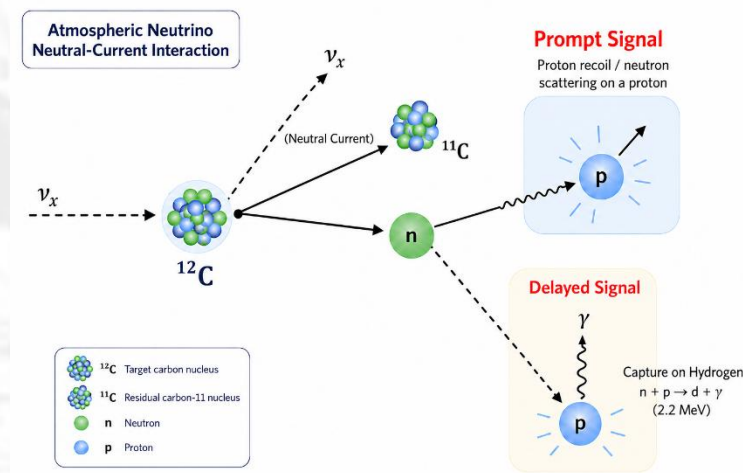
- 大气中微子中性流 (Atm-NC)
- 大气中微子带电流 (Atm-CC)
- 快中子
- 宇宙线反符合
- 宇宙线缪子
- 宇生同位素 ($^9\text{Li}/^8\text{He}$)
- 反应堆中微子

宇宙线反符合
能量区间：12 MeV以上

DSNB的IBD过程



大气中微子的NC过程





➤ 液闪探测DSNB的优势：中子探测效率高、波形鉴别潜力。

➤ JUNO主要通过逆 β 衰变反应探测DSNB电子反中微子

- 能量范围：12-30 MeV
- 逆 β 衰变：快慢信号符合
- 预期信号事例率：2-4个/年

事例率是信号的20倍
主要本底

➤ 主要本底：

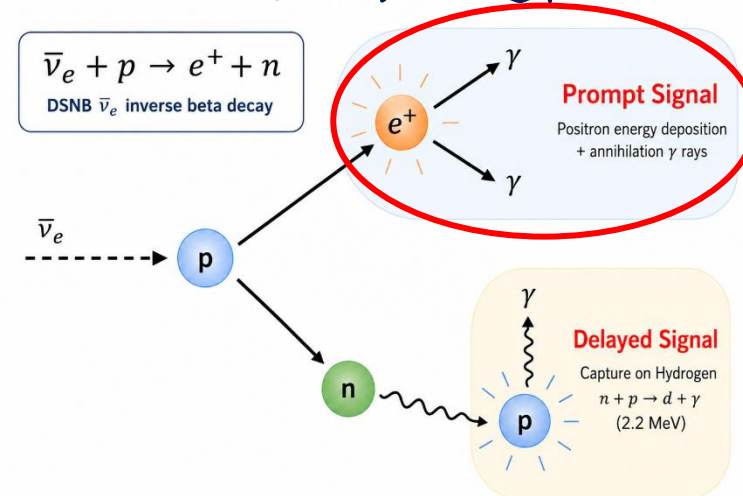
- 大气中微子中性流 (Atm-NC)
- 大气中微子带电流 (Atm-CC)
- 快中子
- 宇生同位素 ($^9\text{Li}/^8\text{He}$)
- 反应堆中微子

波形鉴别 (PSD)

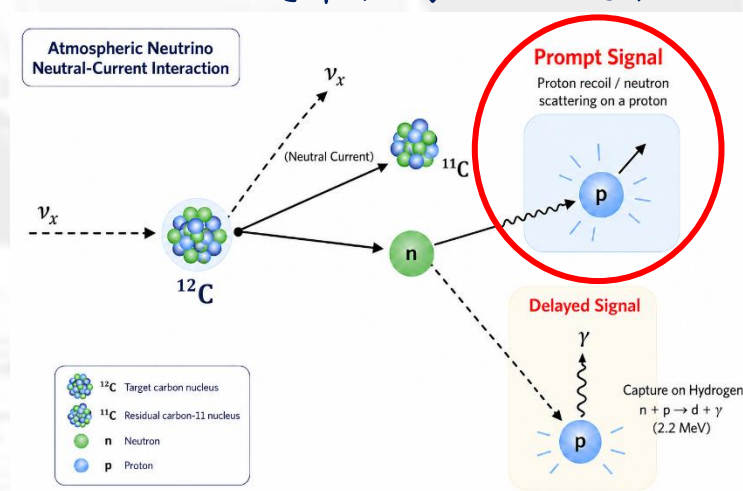
宇宙线反符合

能量区间：12 MeV以上

DSNB的IBD过程



大气中微子的NC过程



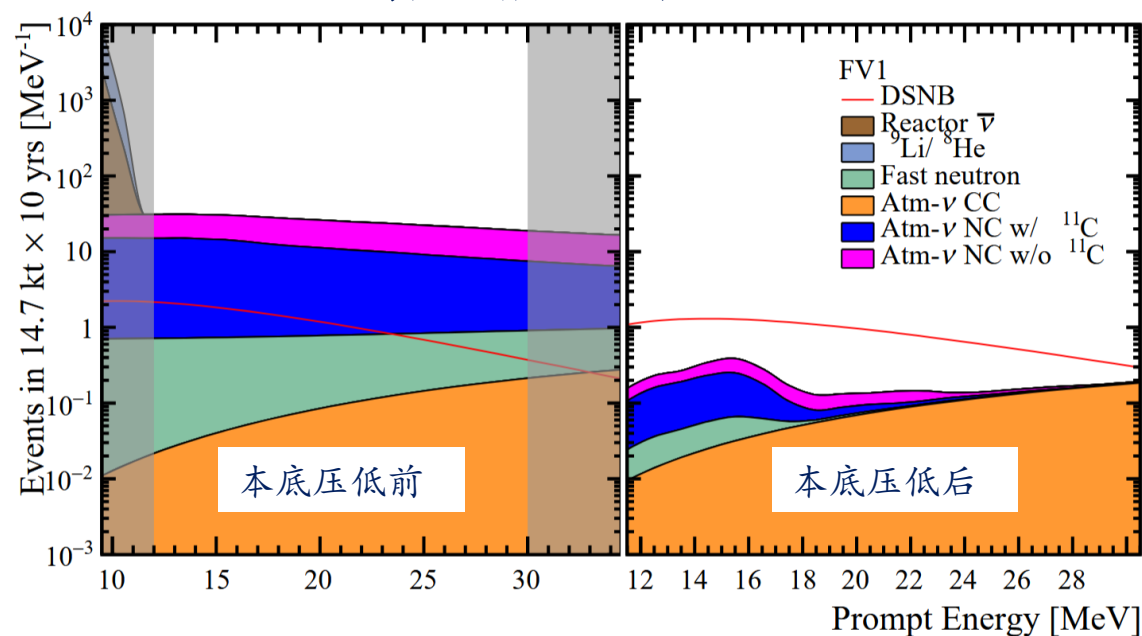


JUNO对DSNB具有优异的探测灵敏度（3年 3σ ）。其关键主要取决于两点：

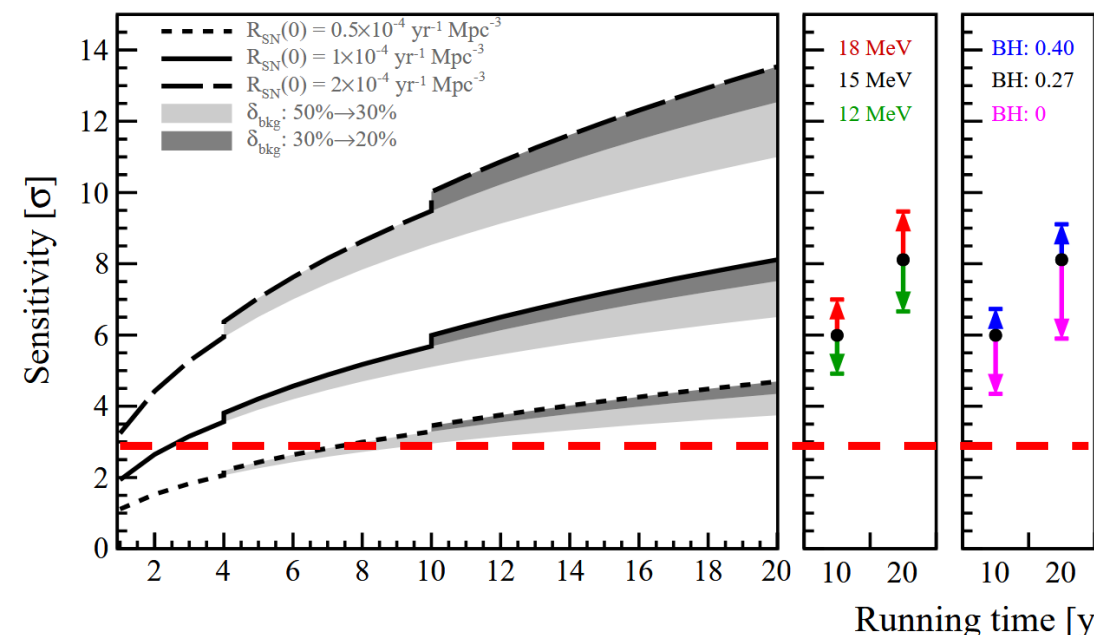
- 是否能有效压低大气 NC 等主要本底；
- 是否能准确约束剩余本底及其系统误差。

→ 分析重点是利用早期数据检验本底模型，并发展 PSD 以提升信噪比。

预期能谱以及本底压低



JUNO对DSNB的探测的灵敏度



JUNO Collaboration, JCAP 2022(10), 033 (2022).



➤ 大气中微子NC相互作用是DSNB能区的主要本底。

➤ NC末态组成及事例率存在较大模型不确定性。

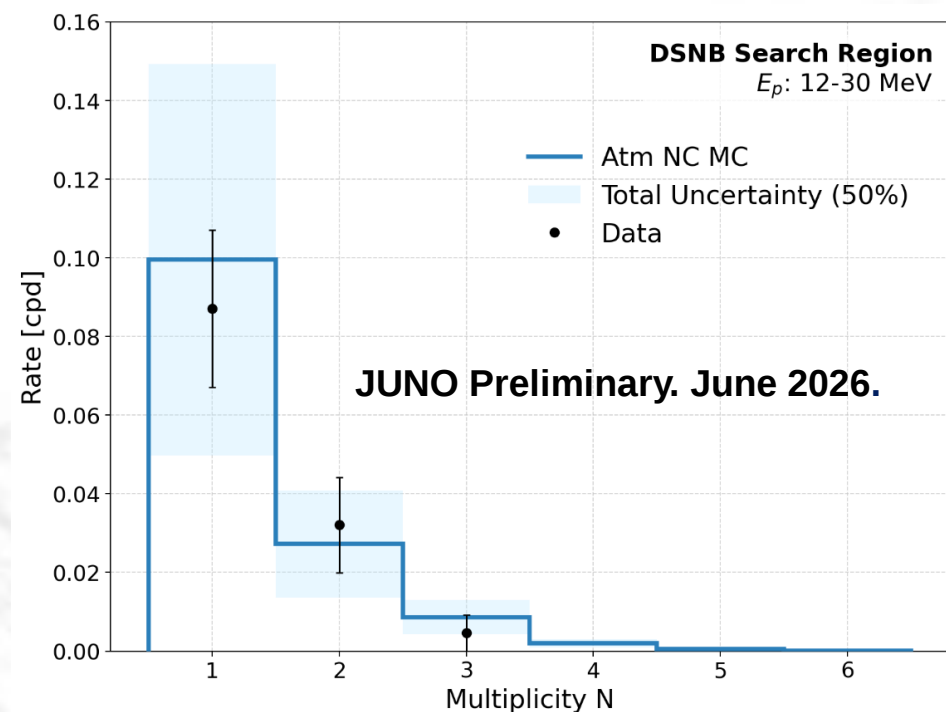
▣ 采用5组专用MC模型的平均结果作为NC预期 [1]

▣ 来自于GENIE 3.4.2 [2] 和 NuWro 21.09 [3]

➤ 利用中子多重度分布与数据进行校验。

➤ 在当前误差范围内，NC本底与模型预期一致。

▣ 模型预期作为流强上限计算的输入



[1] J. Cheng et al., Eur. Phys. J. C 85, 295 (2025).

[2] C. Andreopoulos et al., Nucl. Instrum. Meth. A 614, 87 (2010).

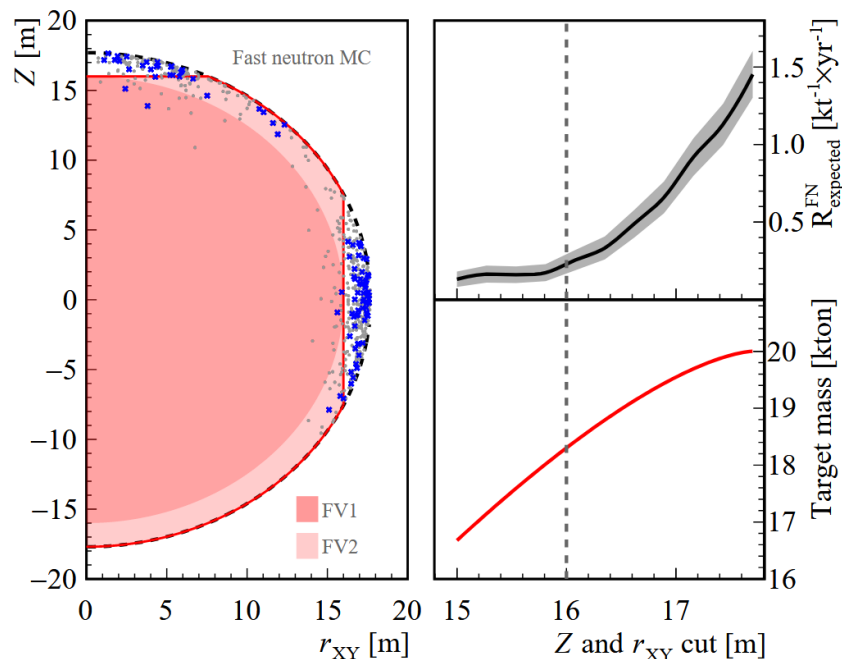
[3] T. Golan et al., Nucl. Phys. B Proc. Suppl. 229-232, 499 (2012).



快中子本底：利用顶点分布约束边缘本底

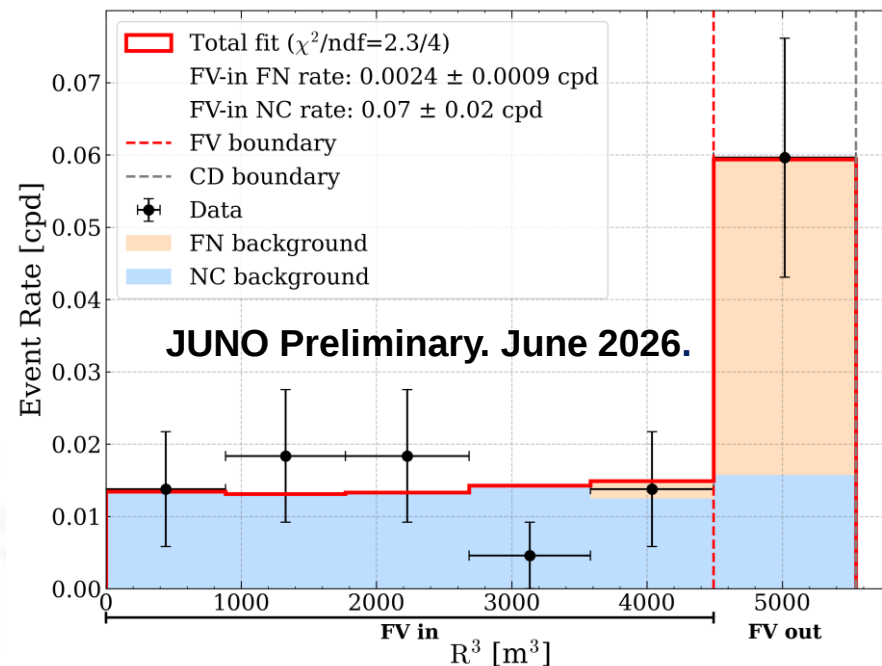


快中子的模拟预期空间分布



JUNO Collaboration, JCAP 2022(10), 033 (2022).

数据中的快中子事例率估计



- 缪子穿过岩石产生的快中子 (FN) 主要分布在探测器边缘。
- 通过拟合事例顶点分布来估计快中子事例率
 - ▣ 快中子顶点分布：由水池关联缪子样本构建
- 12-30 MeV 窗口快中子率为 0.0024 ± 0.0009 cpd。
- 快中子贡献较小，并可通过数据驱动方法进行约束。



早期数据挑选结果：观测与本底预期一致

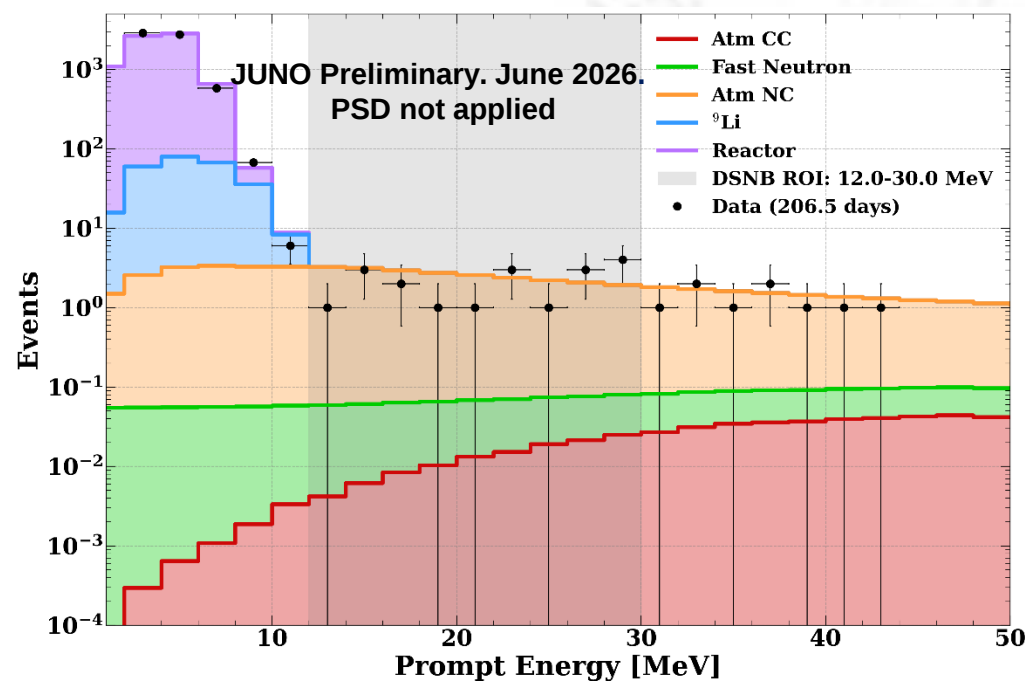


➤ 利用**206.5天**数据，在DSNB搜索能区 **12 - 30 MeV** 中进行候选事例挑选

- ▣ 观测到19个候选事例
- ▣ 总本底预期：21.3 $\pm$ 10.5个事例
- ▣ 当前结果未使用PSD

➤ 观测事例与本底预期一致，尚未观察到显著的DSNB信号超出。

事例能谱分布





JUNO模型无关DSNB流强上限

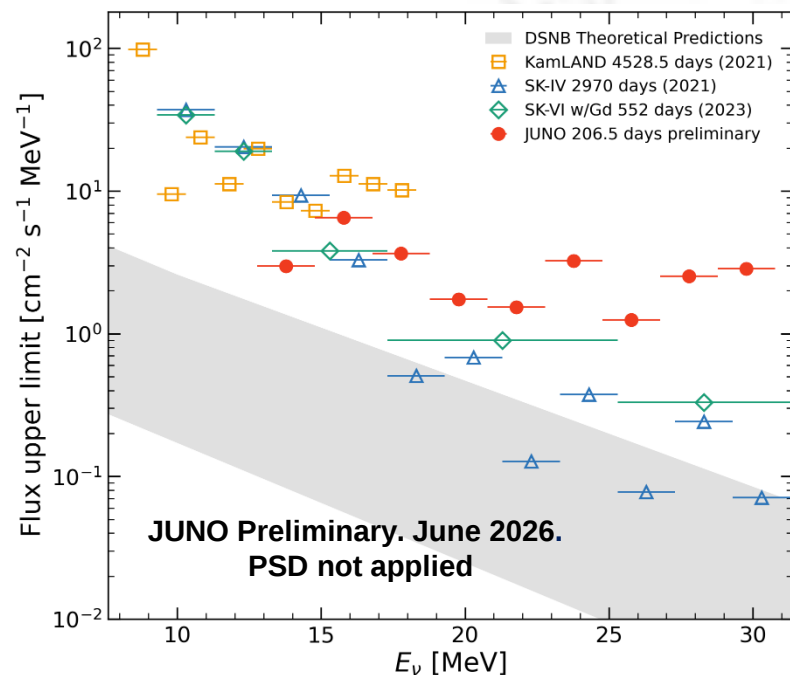


- 使用 Feldman-Cousins 方法逐能量分箱计算90% C. L. 上限

$$\phi_{90} = \frac{N_{90}}{N_p \cdot \sigma_{IBD} \cdot \epsilon_{IBD} \cdot T}$$

- 不假设具体DSNB信号谱形，给出模型无关流强限制
- 当前结果未作用PSD

- 基于早期数据，JUNO初步建立了从候选事例选择、本底评估到模型无关流强上限计算的分析链条。

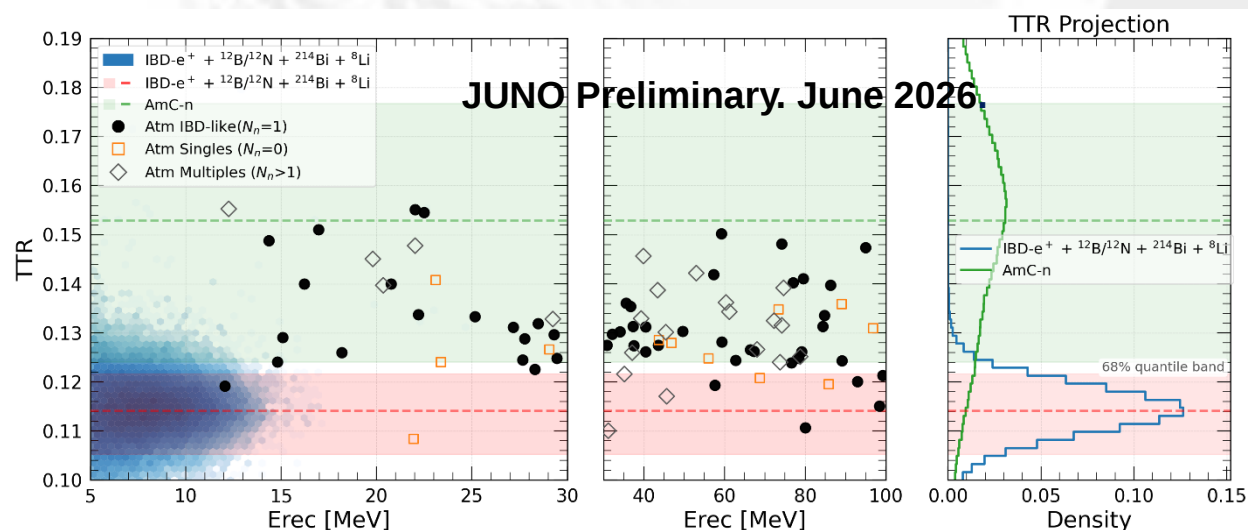
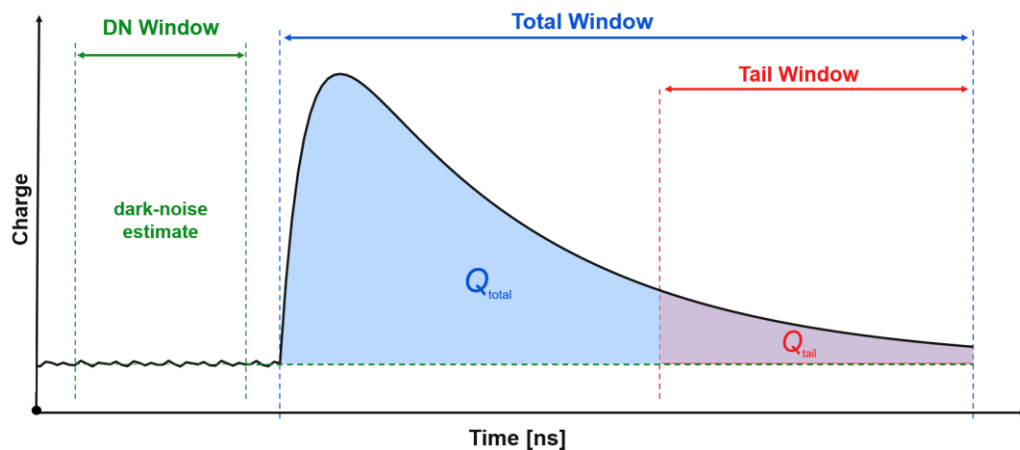


SK: K. Abe et al., Phys. Rev. D 104, 122002 (2021).
KamLAND: S. Abe et al., Astrophys. J. 925, 14 (2022)
SK-IV-Gd: M. Harada et al., Astrophys. J. Lett. 951, L27 (2023).



- 采用TTR (Tail-to-Total Ratio) 作为PSD的初步方案。
- 通过数据样本来评估信号和本底的TTR分布, 理解候选事例与本底组成
 - ▣ e^-/e^+ 样本: IBD- e^+ 、 $^{12}\text{B}/^{12}\text{N}$ 、 ^{214}Bi 、 ^8Li
 - ▣ 质子反冲: AmC中子源的快信号、高能单事例
- 绝大部分候选事例呈现与质子反冲相近的TTR分布, 显示出区分IBD信号与大气NC本底的潜力。
- 下一步将标定PSD信号效率、本底抑制率及相关系统误差, 并纳入最终事例挑选。

TTR 计算示意图



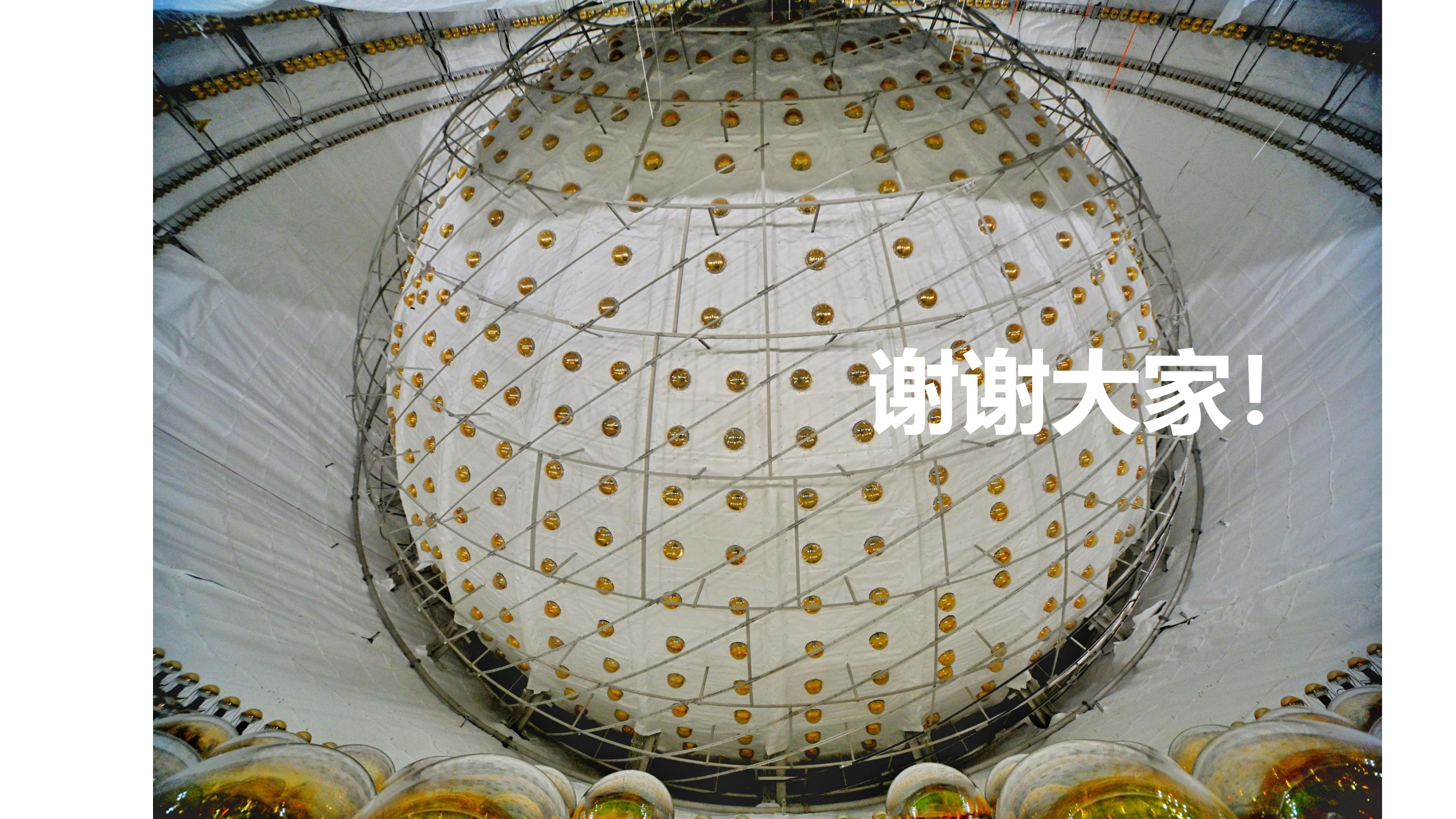


➤ 总结

- JUNO作为新一代大型液闪探测器，对DSNB有优异的探测灵敏度（预期3年 3σ ）。
- 基于206.5天早期数据，在12 - 30 MeV搜索区间内观测到 19个候选事例，与 21.3 ± 10.5 个本底预期一致，尚未观察到显著的DSNB信号超出。
- 通过数据对大气NC和快中子等主要本底进行了检验与约束；
- 在尚未施加PSD挑选的情况下，给出了JUNO的信号模型无关的DSNB流强上限。
- 初步TTR结果表明，波形鉴别具备进一步区分信号和大气NC本底的潜力。

➤ 展望

- 结合模拟与数据控制样本，标定PSD的信号效率、本底抑制率及相关系统误差，并将其纳入最终事例挑选。
- 随着曝光量增加，开展能谱拟合和不同DSNB模型检验，持续提升JUNO的DSNB探测灵敏度。



谢谢大家!

Backup



实验	探测器类型	能量区间 (MeV)	流强上限 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	参考文献
Super-Kamiokande (SK-I/II/III)	水切伦科夫	$17.3 < E_{\bar{\nu}_e} < 31.3$	2.9	Bays et al. 2012 PRD 85 052007
Super-Kamiokande (SK-IV)	水切伦科夫	$17.3 < E_{\bar{\nu}_e} < 31.3$	2.7	Abe et al. (2021) PRD 104, 122002
Super-Kamiokande (SK-VI)	水切伦科夫 (掺钐)	$9.3 < E_{\bar{\nu}_e} < 31.3$	129	Harada et al. 2023 ApJL 951 L27
KamLAND	液体闪烁体	$8.3 < E_{\bar{\nu}_e} < 31.8$	139	Gando et al. 2012 ApJ 745 193
Borexino	液体闪烁体	$2.8(7.8) < E_{\bar{\nu}_e} < 16.8$	2600 (112.3)	Agostini et al. 2021 ASP 125 102509
SNO	重水切伦科夫	$22.9 < E_{\nu_e} < 36.9$	19	Aharmim et al. 2020 PRD 102 062006