



赵忠尧博士后评审报告

李慧玲

博士生导师：王萌 教授（SDU）
博士后合作导师：温良剑 研究员（IHEP）

2018-03-28

个人简历

◆ 2009. 09–2010. 09

山东大学 物理学院 本科

2010. 09–2013. 09

山东大学 **泰山学堂** 本科 **理学学士**

◆ 2013. 09–2015. 09

AMS02实验室联合培养博士生 导师 Shih-Chang Lee教授
(Academia Sinica)和王萌教授(SDU)

▫ **通过丁肇中教授及其团队核心成员的面试，并获得国家基金委赴瑞士留学奖学金**

2015. 09–至今

山东大学 粒子物理与原子核物理专业**直博生** 导师 王萌 教授

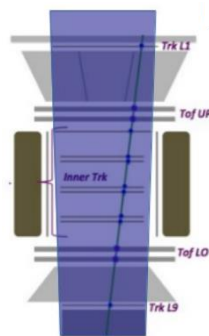
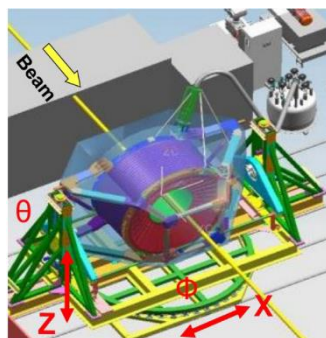
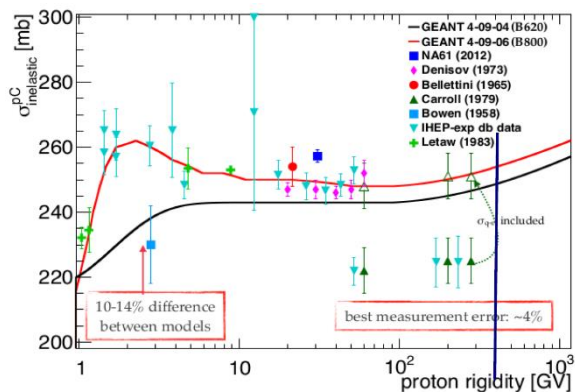
博士论文：基于江门中微子实验超新星中微子的相关问题研究

科研经历

- ◆ 2013. 09–2015. 09 **AMS02** **CERN**
 - 利用AMS02地面束流测试数据测量400GeV质子与碳核的非弹性散射反应截面
- ◆ 2015. 09–2016. 09 **CEPC** **山东大学**
 - 参与利用快速模拟软件和Kalman Filter算法对CEPC中硅像素探测器排布的优化研究
- ◆ 2016. 09–至今 **JUNO** **高能物理研究所**
 - 利用SVD反解算法实现液闪探测器中超新星中微子不同反应道能谱重建和不同味道中微子能谱分离。
 - 提出利用IBD反应道实现JUNO实验中在线超新星的触发方案。
 - 给出了一组超新星源处不同味道中微子通量时间分布的唯象模型。

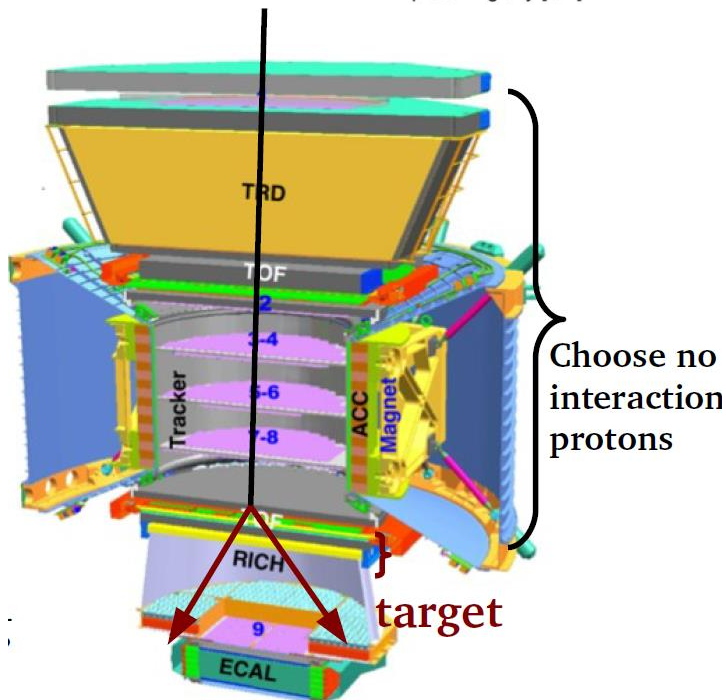


400GeV pC 非弹性散射反应截面测量 (主导)



研究目的:

- ◆ 测量400GeV质子-碳非弹性散射反应截面, 之前没有实验测量该截面
- ◆ 检验Geant4模拟



反应截面探测原理:

$$\begin{aligned}
 N_{surv}/N_{tot} &= \exp(-L/\lambda) = \exp(-L \sum n_i \sigma_i) \\
 &= \exp(-\sum N_A \rho L w_i / A_i \sigma_i) \\
 &= \exp(-\sum N_A e_i \sigma_i) = \exp(-N_A \sigma_{pd} e_c / Fc)
 \end{aligned}$$

Measure from data

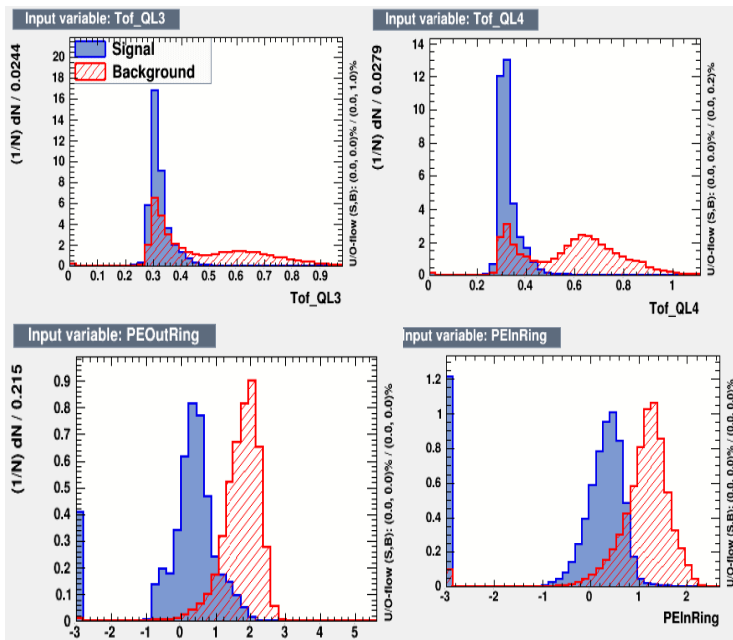
- ◆ **靶:** LTOF和RICH
- ◆ **入射质子:** 利用TRD和Tracker探测器选择400GeV左右的入射质子
- ◆ **质子存活率:** 利用机器学习算法BDT (Boosted Decision Tree) 得到入射质子穿越靶后不同状态的模板, 然后拟合得到束流测试数据中的质子存活率。

Purpose

Get from MC



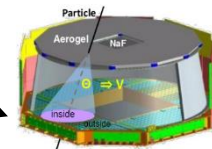
400GeV pC 非弹性散射反应截面测量



使用BDT进行事例鉴别

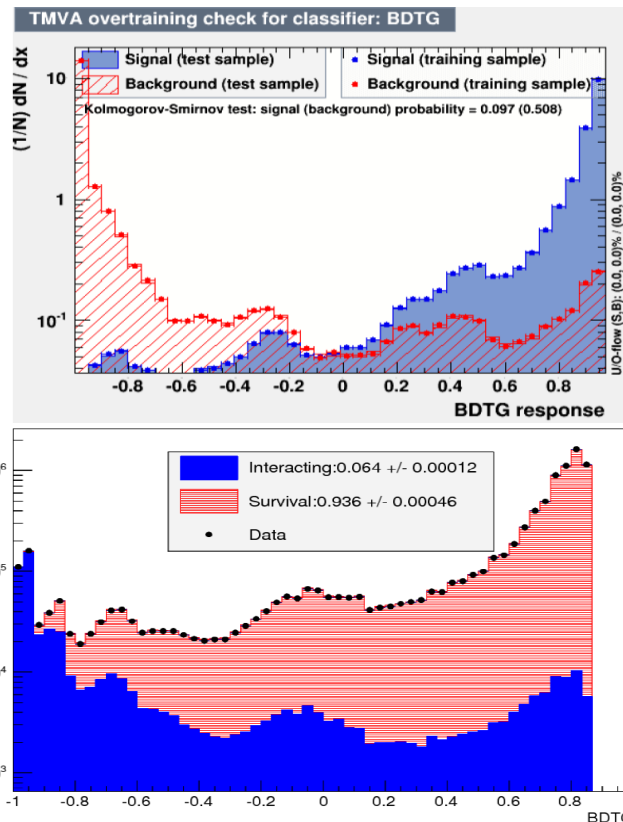
BDT训练和测试所输入事例的物理信息:

- ◆ LTOF两层闪烁体上重建的电荷量
- ◆ RICH底部光信号位置与入射粒子的夹角



- ◆ **系统误差**: 分别调节Geant4模拟中反应截面为理论值的90%和110%，重复以上计算步骤，得到**系统误差45.7mb**。
- ◆ **初步结果**: $241.5 \pm 45.73\text{mb}$ ，与理论值在误差范围内符合。

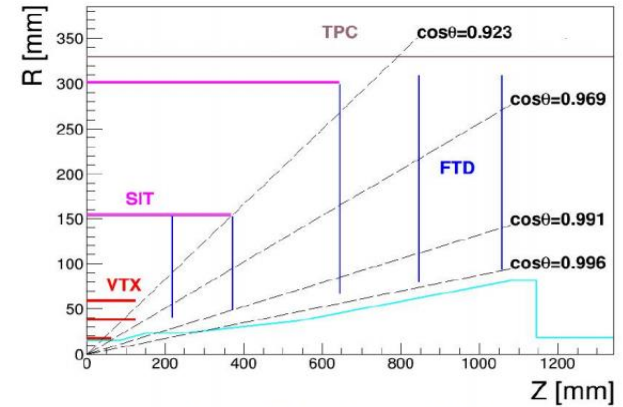
该结果在AMS实验组会做了报告



CEPC硅探测器的排布优化(参与)

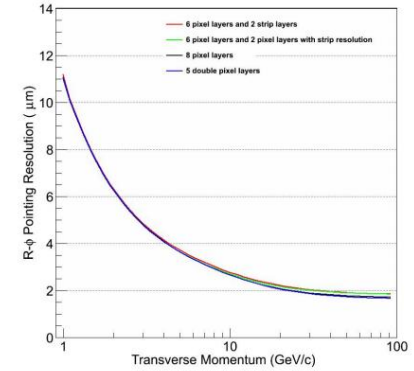
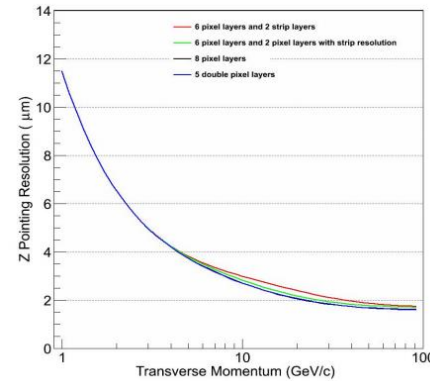
贡献:

- ◆ 分析了硅探测器模拟过程
- ◆ 比较了几种不同排布的位置分辨和动量分辨

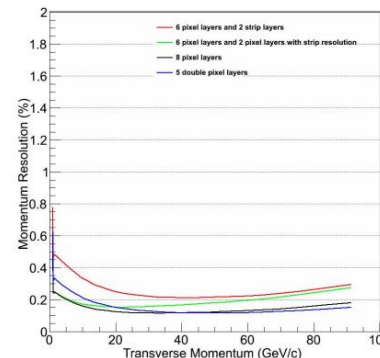


z位置分辨

from CEPC preCDR



R-φ分辨率



动量分辨

| | R[cm] | Z[cm] | $\sigma(r\Phi)[\mu\text{m}]$ | $\sigma(z)[\mu\text{m}]$ | X/X0[%] |
|---------------|-------|--------|------------------------------|--------------------------|---------|
| BeamPipe | 1.45 | 136.05 | — | — | 0.07 |
| Pixel Layer 1 | 1.6 | 6.25 | 2.8 | 2.8 | 0.15 |
| Pixel Layer 2 | 1.8 | 6.25 | 2.8 | 2.8 | 0.15 |
| Pixel Layer 3 | 3.7 | 12.5 | 4 | 4 | 0.15 |
| Pixel Layer 4 | 3.9 | 12.5 | 4 | 4 | 0.15 |
| Pixel Layer 5 | 5.8 | 12.5 | 4 | 4 | 0.15 |
| Pixel Layer 6 | 6.0 | 12.5 | 4 | 4 | 0.15 |
| Strip Layer 1 | 15.3 | 37.13 | 7 | 50 | 0.65 |
| Strip Layer 2 | 30.0 | 66.49 | 7 | 50 | 0.65 |
| Strip Layer 3 | 181.1 | 235.0 | 7 | 50 | 0.65 |

↑
VERTEX
↓
SIT
↓

模拟:

- ◆ 多次弹性散射
- ◆ 硅像素探测器物质
- ◆ 像素探测器位置分辨率
- ◆ **Kalman Filter**算法重建径迹

JUNO探测器上的超新星中微子研究

超新星中微子相关的物理:

- ◆ 超新星爆发机制、中子星和黑洞起源、引力波、超新星元素合成...
- ◆ 中微子绝对质量、中微子质量顺序和中微子集体振荡效应...

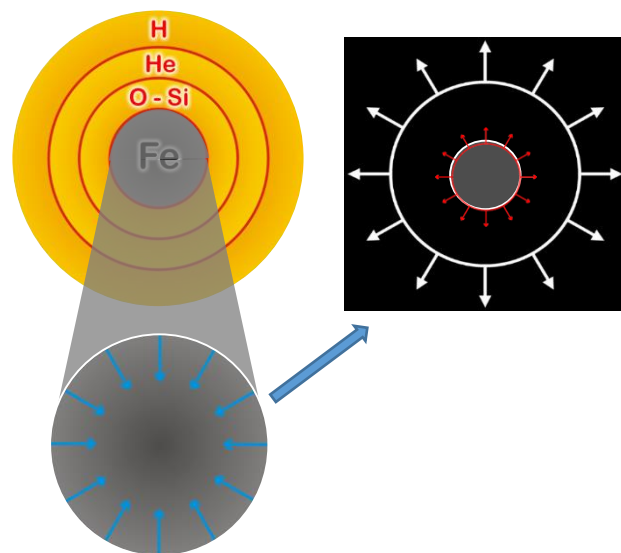
超新星爆发释放引力势能 $\sim 10^{53}$ erg。其中**99%**能量被坍缩内核产生的中微子带走，中微子爆发持续 **~ 10 s**。

迄今人类**第一次**也是**唯一**一次探测到的超新星中微子事例来自大麦哲伦云的**SN1987A**，且只有 **~ 20** 个数据。

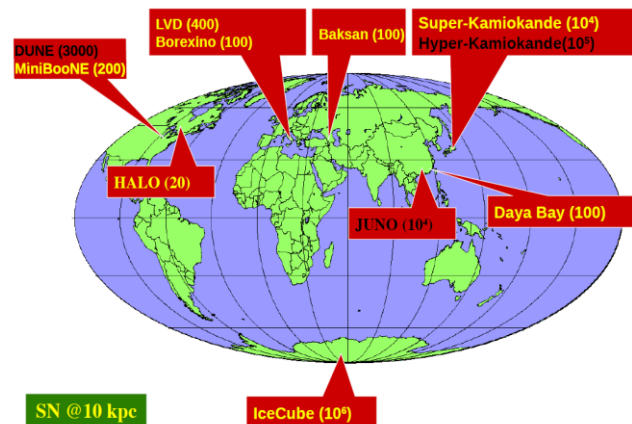
JUNO实验中液闪质量20kt，3%能量分辨率。JUNO探测器对超新星的 μ 和 τ 味道中微子能谱具有**最好的探测能力**。

有必要、有机会对中微子能谱和时间谱分布特征进行准确的测量和理解。

中微子驱动延迟激波理论



不同中微子实验对SN中微子的探测



超新星中微子在液闪中的能谱重建研究（主导）

该工作的文章已被PRD接收。 Huil-Ling Li *et al.* [arXiv:1712.06985](https://arxiv.org/abs/1712.06985)

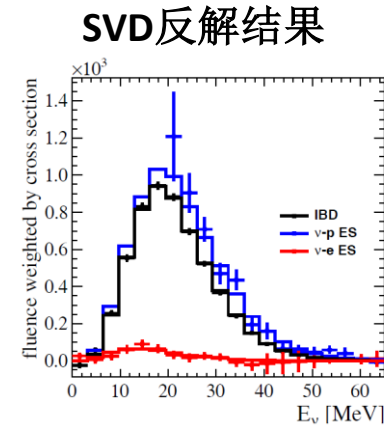
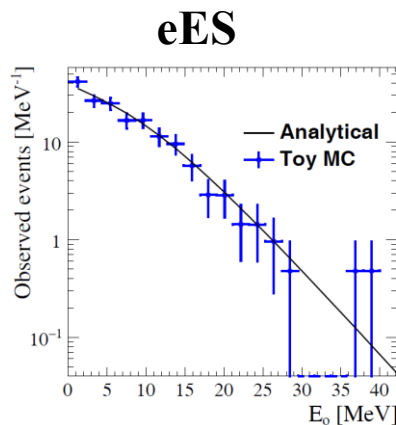
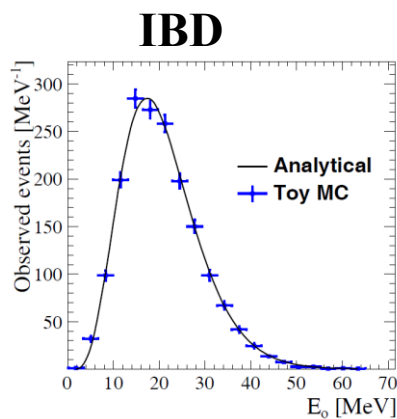
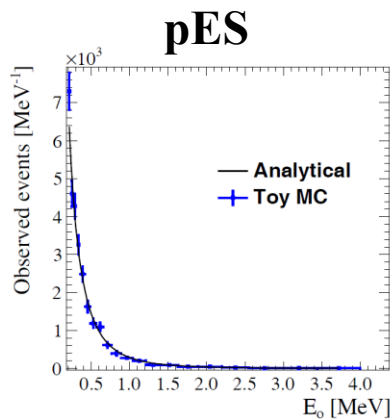
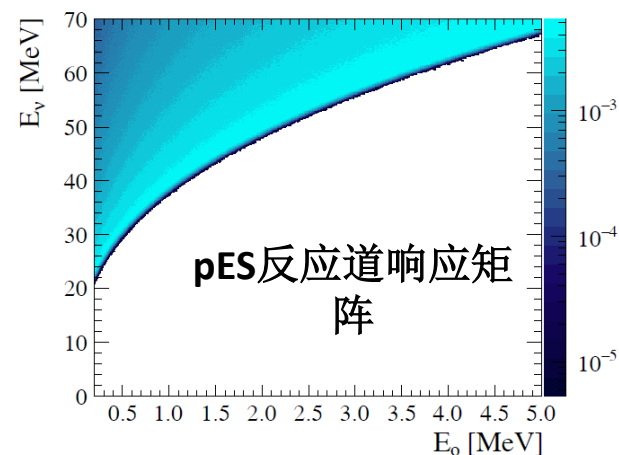
Towards a complete reconstruction of supernova neutrino spectra in future large liquid-scintillator detectors

研究创新点:

- ◆ 提出利用更接近**真实探测情况**的**SVD反解算法**重建不同反应道能谱。
- ◆ 同时实现了**全味道**超新星中微子的能谱重建。

SVD反解得到的能谱误差更小且谱形更稳定:

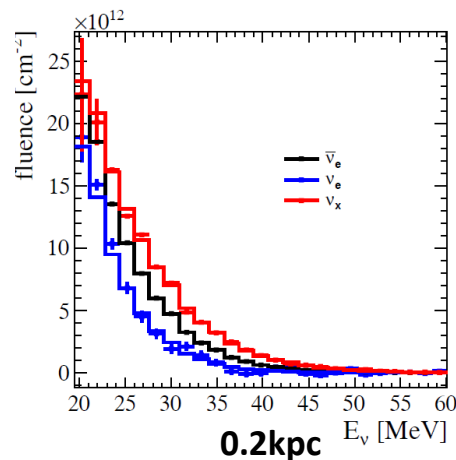
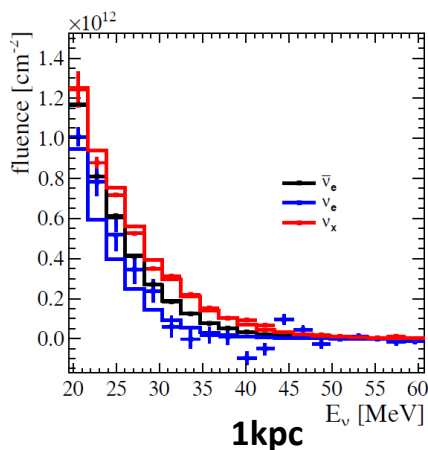
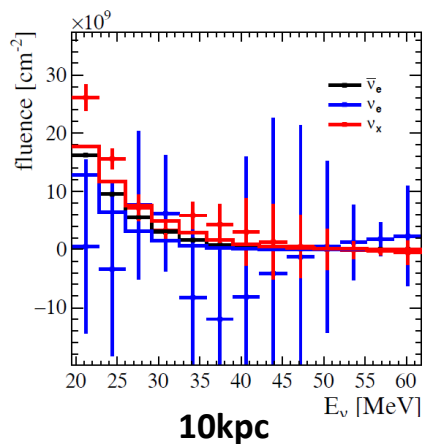
$$\chi^2 = (Ax - m)^T V^{-1} (Ax - m) + \tau (Cx)^T (Cx)$$



利用KRJ参数化模型描述超新星中微子时间积分能谱分布, SN@10kpc, 无振荡



超新星中微子在液闪中的能谱重建研究

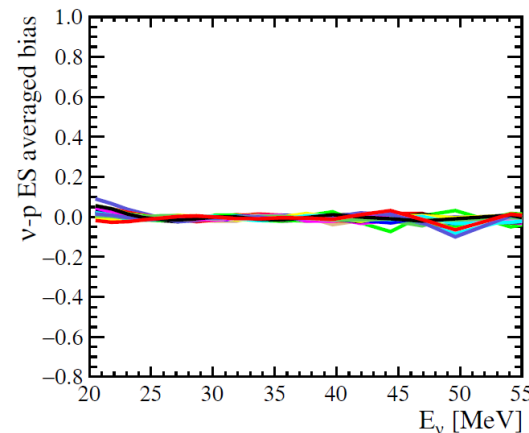
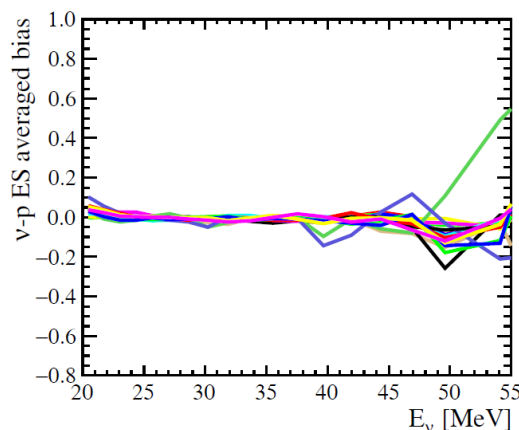


- ◆ 联合IBD、eES和pES反应道可以实现不同味道的超新星能谱的分离
- ◆ 超新星距离越近，不同中微子谱形重建的精确越高
- ◆ **0.2kpc**对应的可能的超新星候选 **Betelgeuse**

16个Garching组模型

21个Japan组模型

利用16个**Garching**组和21个**Japan**组超新星中微子数值模型检验了该重建算法的与**超新星中微子模型无关**。

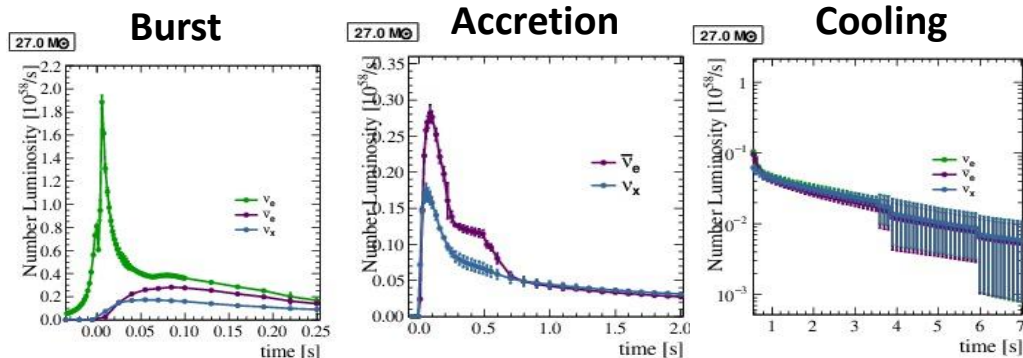




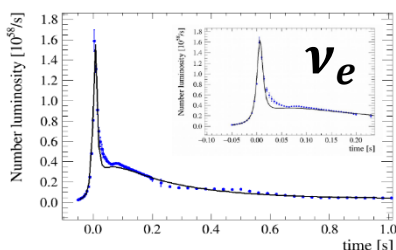
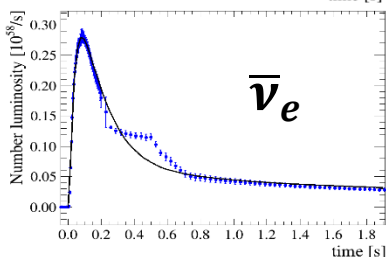
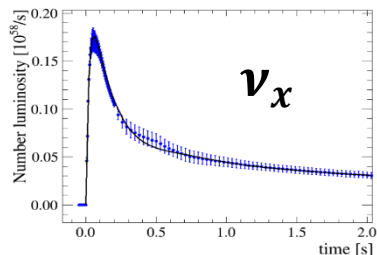
超新星源处中微子通量时间分布的唯象模型（主导）

研究意义:

- ◆ 单个超新星模拟在超级计算平台上需花费数月时间
- ◆ 可用于时间分布特征与超新星中微子机制的关联研究
- ◆ 唯象研究工具



27M_☉



唯象模型假设:

1. 不同味道中微子在cooling阶段表现一致。
2. Accretion阶段 ν_e 和 $\bar{\nu}_e$ 的表现相同。
3. 忽略 ν_e 分布的preshock结构

对于Garching模型忽略[0.3s,0.55s]人为触发部分的数据, 该模型对不同前身星质量的Garching超新星中微子模型拟合表现良好。

$$f_{\nu_x}(t) = A_{01} \frac{e^{-\frac{t-t_{01}}{\tau_{01}}} - e^{-\frac{t-t_{02}}{\tau_{02}}}}{\tau_{01} - \tau_{02}} + \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{0a}}\right)^{2k_0}}\right) \cdot A_{02} e^{-\frac{t-t_{03}}{\tau_{03}}}$$

$$f_{\bar{\nu}_e}(t) = A_{11} \frac{e^{-\frac{t-t_{11}}{\tau_{11}}} - e^{-\frac{t-t_{12}}{\tau_{12}}}}{\tau_{11} - \tau_{12}} + \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{1a}}\right)^{2k_1}}\right) \cdot A_{02} e^{-\frac{t-t_{03}}{\tau_{03}}}$$

$$f_{\nu_e}(t) = \frac{A_0}{s} \left(1 + \left(\frac{t-t_0}{s}\right)^2\right)^{-1} + A_{11} \frac{e^{-\frac{t-t_{11}}{\tau_{11}}} - e^{-\frac{t-t_{12}}{\tau_{12}}}}{\tau_{11} - \tau_{12}} + \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{2a}}\right)^{2k_2}}\right) \cdot A_{02} e^{-\frac{t-t_{03}}{\tau_{03}}}$$

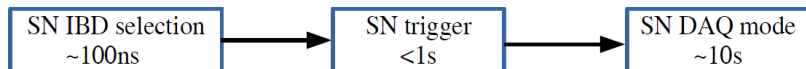
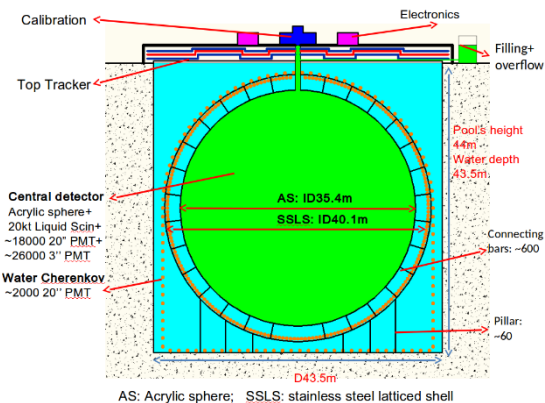


JUNO实验的在线超新星触发方案研究（主导）

大亚湾实验超新星触发是在**DAQ阶段**实现。
JUNO的超新星触发要求**在线**实现。

触发方案初步要求:

- ◆ 超新星预警系统**SNEWS**对加入实验的误触发率的要求 ($\leq 1/\text{week}$)
- ◆ 可以在电子学硬件上进行实现
- ◆ 尽可能覆盖更远更多的超新星

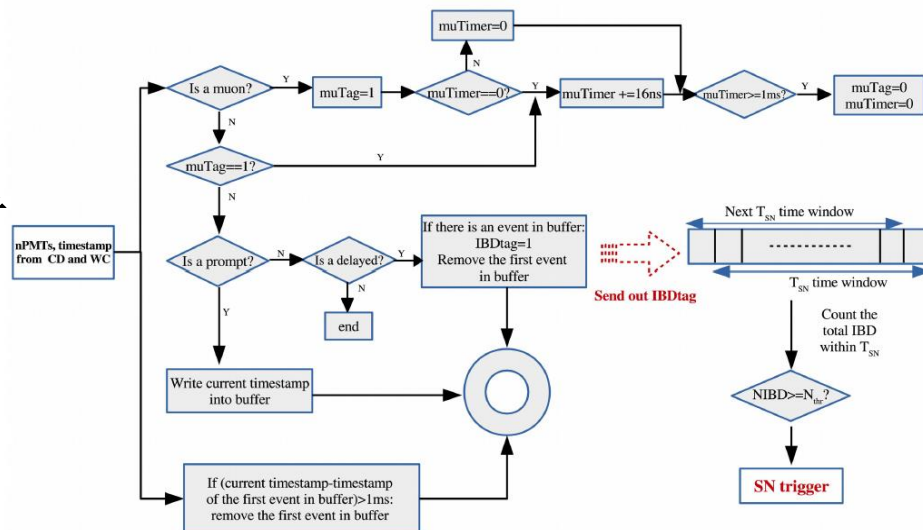


完成初步的触发方案设计:

- ◆ 使用**WC**和**CD**中**PMT**着火个数和时间信息
- ◆ 在线筛选**SN IBD**事例，且个数超过 N_{thr} 时产生**SN trigger**
- ◆ 探测器中**Fake SN IBD** < 100/day

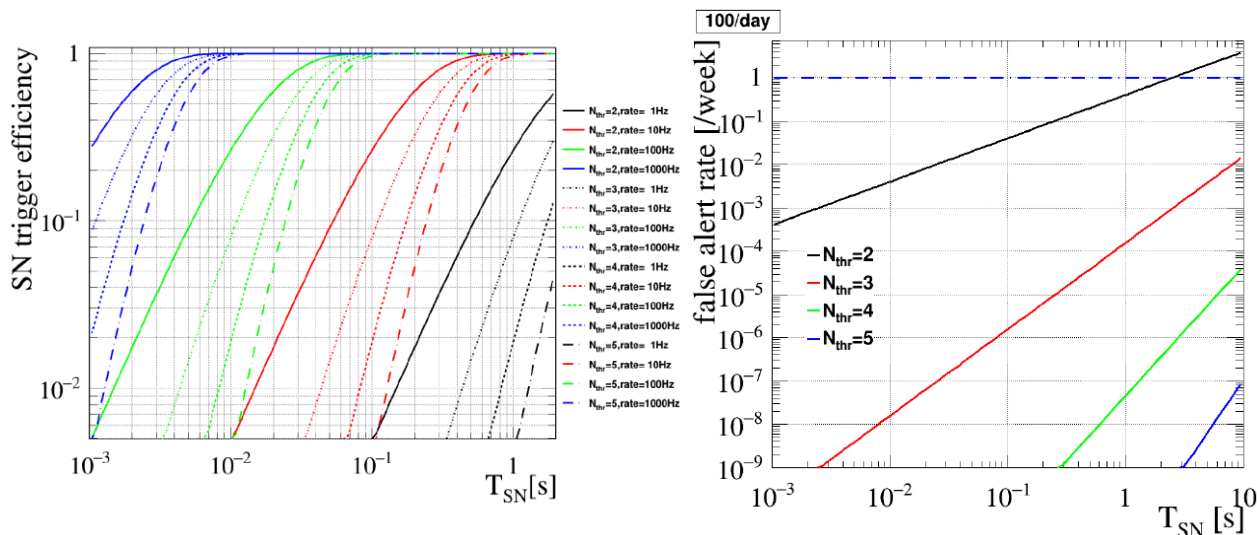
相关电子学参数:

- ◆ 判选时间窗口 T_{SN}
- ◆ 超新星触发阈值 N_{thr}





JUNO实验的在线超新星触发方案研究



触发几率:

$$p(N_{thr}; T_{SN}, r) = 1 - \sum_{n=0}^{N_{thr}-1} \frac{1}{n!} e^{rT_{SN}} (rT_{SN})^n$$

可以估计不同电子学参数下:

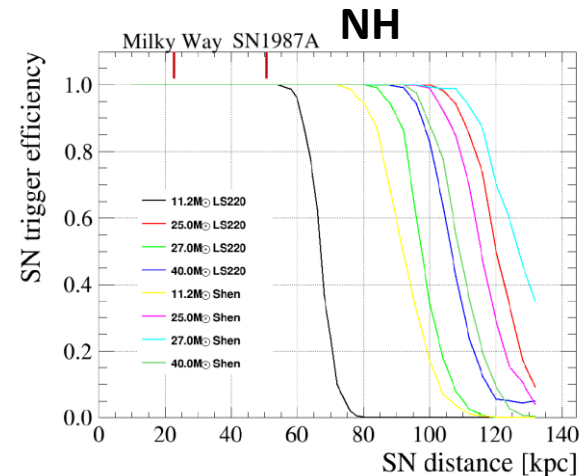
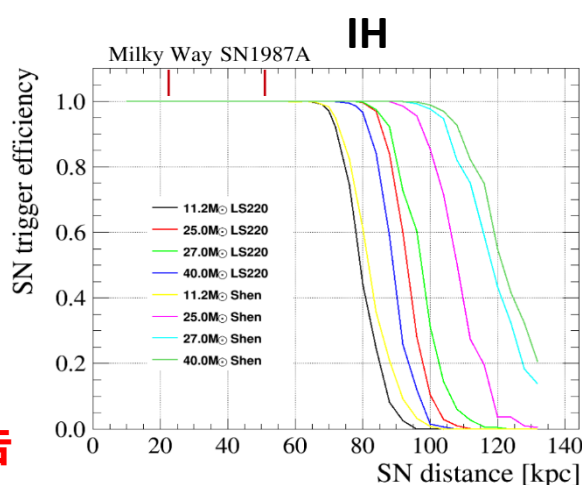
- ◆ 不同SN IBD事例率的触发效率
- ◆ 该触发方案的超新星误触发率

$[T_{SN} = 100ms, N_{thr} = 4]$

该方案的超新星**触发能力**:

- ◆ 对类似SN1987A距离的超新星具有**完全**触发能力。
- ◆ 对**~100kpc**的超新星具有触发能力。

该工作在JUNO合作组会做了报告



学术论文、会议报告

◆ 学术论文

- Towards a complete reconstruction of supernova neutrino spectra in future large liquid-scintillator detectors, Hui-Ling Li *et al.* , PRD

◆ 会议报告

- **Talk** “Supernova Neutrinos with the JUNO experiment”, **WIN2017**, Irvine CA USA
- **Poster** “Reconstruction of Supernova Neutrino Spectra in Future Large Liquid Scintillator Detectors”, LP2017, Guangzhou China
- AMS实验组报告1次, JUNO合作组报告3次

博士后研究计划

◆ 超新星中微子（45%）

- ◆ 提出并确定JUNO的在线超新星触发方案
- ◆ 超新星中微子时间谱形重建研究以及不同味道转换下时间谱特征分析
- ◆ 超新星中微子时间、能量和味道的观测分布特征与其产生和传播机制的关联研究

◆ 中微子振荡参数全局拟合（45%）：

- ◆ 掌握太阳中微子和反应堆中微子实验的分析方法，研究不同实验之间误差关联和误差抵消问题。
- ◆ 确立利用太阳中微子和反应堆中微子实验实现全局拟合的方法

◆ 参与JUNO实验的PMT测试工作（10%）

谢谢！