

无中微子双贝塔衰变实验中 计数法与拟合法的对比

付昊阳

清华大学 工程物理系 近代物理研究所

fu-hy21@mails.tsinghua.edu.cn



清华大学
Tsinghua University



JINPING
NEUTRINO
EXPERIMENT

目录

- 简介
- 锦屏500吨探测器 $0\nu\beta\beta$ 研究本底
- 分析方法及对比结果
- 结论

常见 $0\nu\beta\beta$ 实验类别

时间投影室

优势：
拥有径迹重建能力，在 $0\nu\beta\beta$ 实验中将双贝塔事例筛选出来



PandaX

NuDEX

辐射量热器

优势：
极高的能量分辨率，在 $0\nu\beta\beta$ 实验中大幅减少内禀的 $2\nu\beta\beta$ 本底的影响

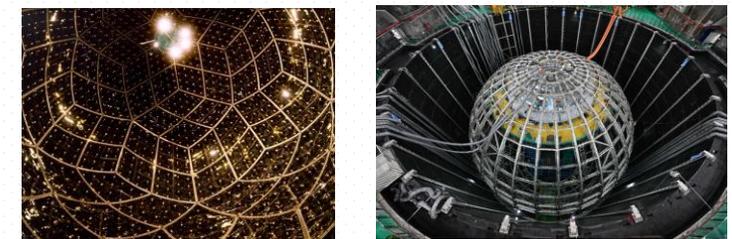


CUORE

CUPID

液体闪烁体探测器

优势：
体量可以达到万吨量级，在 $0\nu\beta\beta$ 实验中具备曝光度上的优势



KamLAND

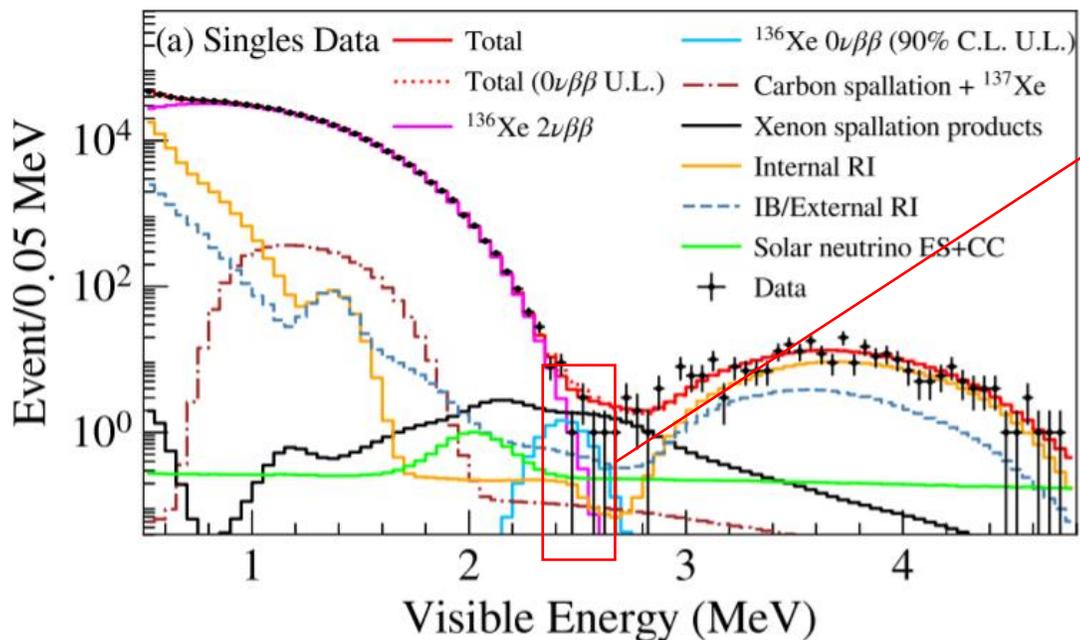
JUNO

两类分析处理方法

能谱拟合法

计数法

KamLAND-Zen发表的能谱拟合示意图
doi: 10.1103/PhysRevLett.130.051801



统计RoI内
事例数 N_{RoI}

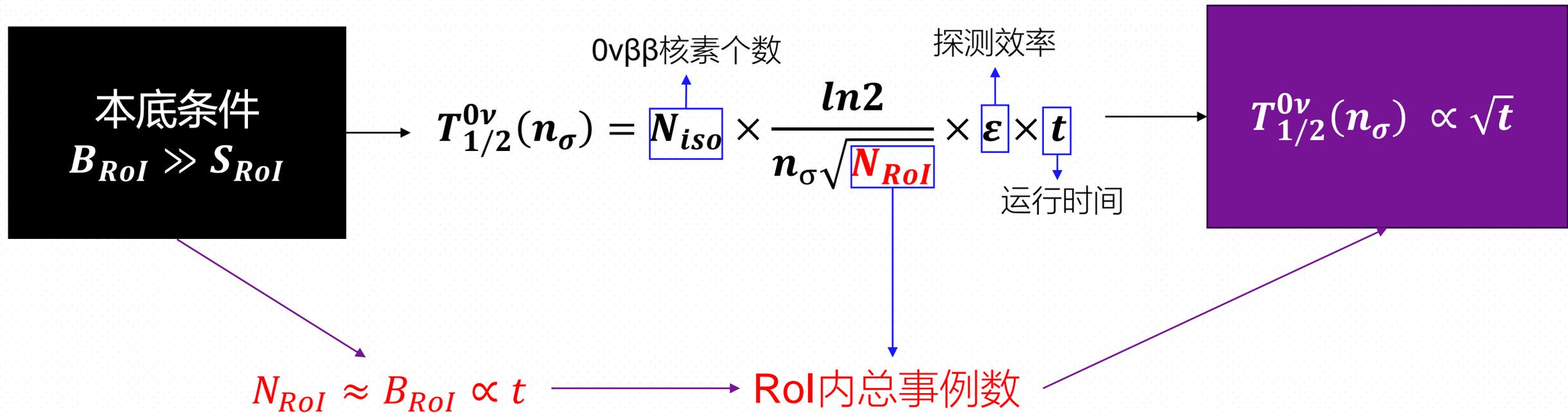
测量RoI内
本底指数 BI

计算信号S
的灵敏度

计数法流程

半衰期灵敏度与本底数

- 以液闪探测器中计数法估算灵敏度为例：



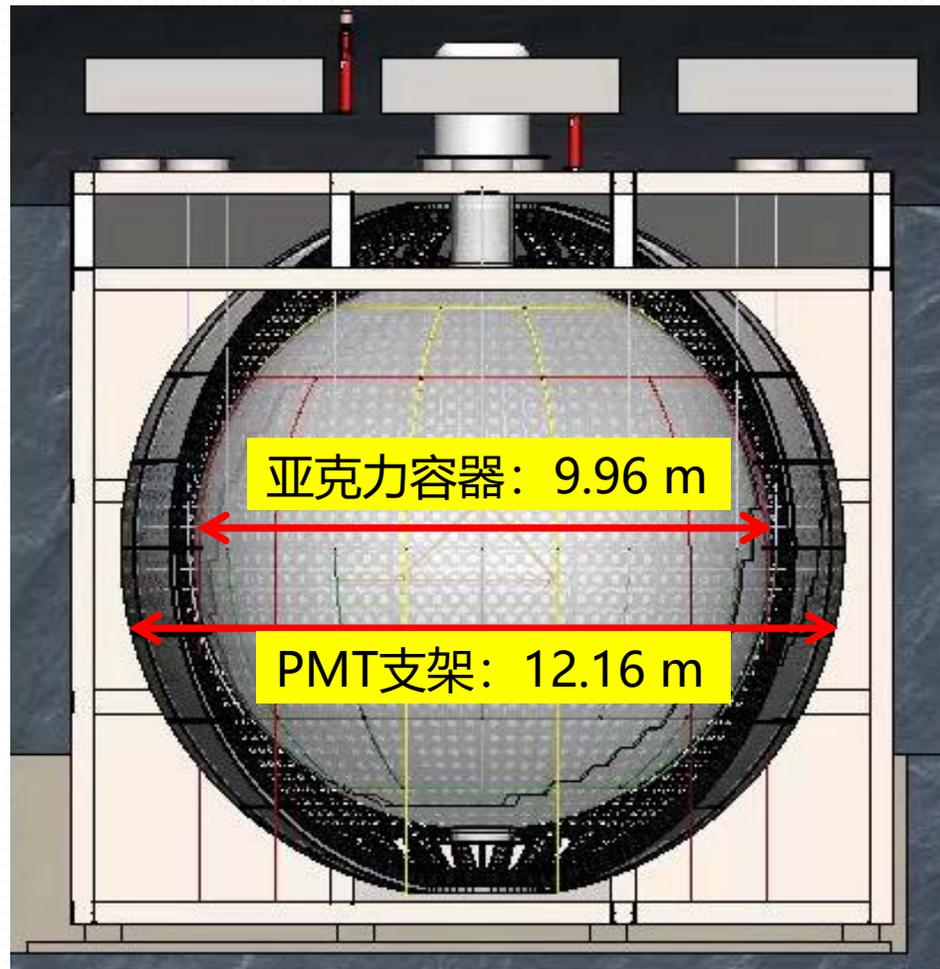
目录

- 简介
- 锦屏500吨探测器 $0\nu\beta\beta$ 研究本底
 - 锦屏500吨探测器简介
 - $2\nu\beta\beta$ 本底
 - 太阳中微子本底
 - 天然放射性本底
- 分析方法及对比结果
- 结论

锦屏中微子实验百吨探测器示意图

中心探测器：

- 500 m³ 容积
- 有机 - 无机两用
 - 力学结构可承受纯水密度 $\pm 20\%$ 的液体



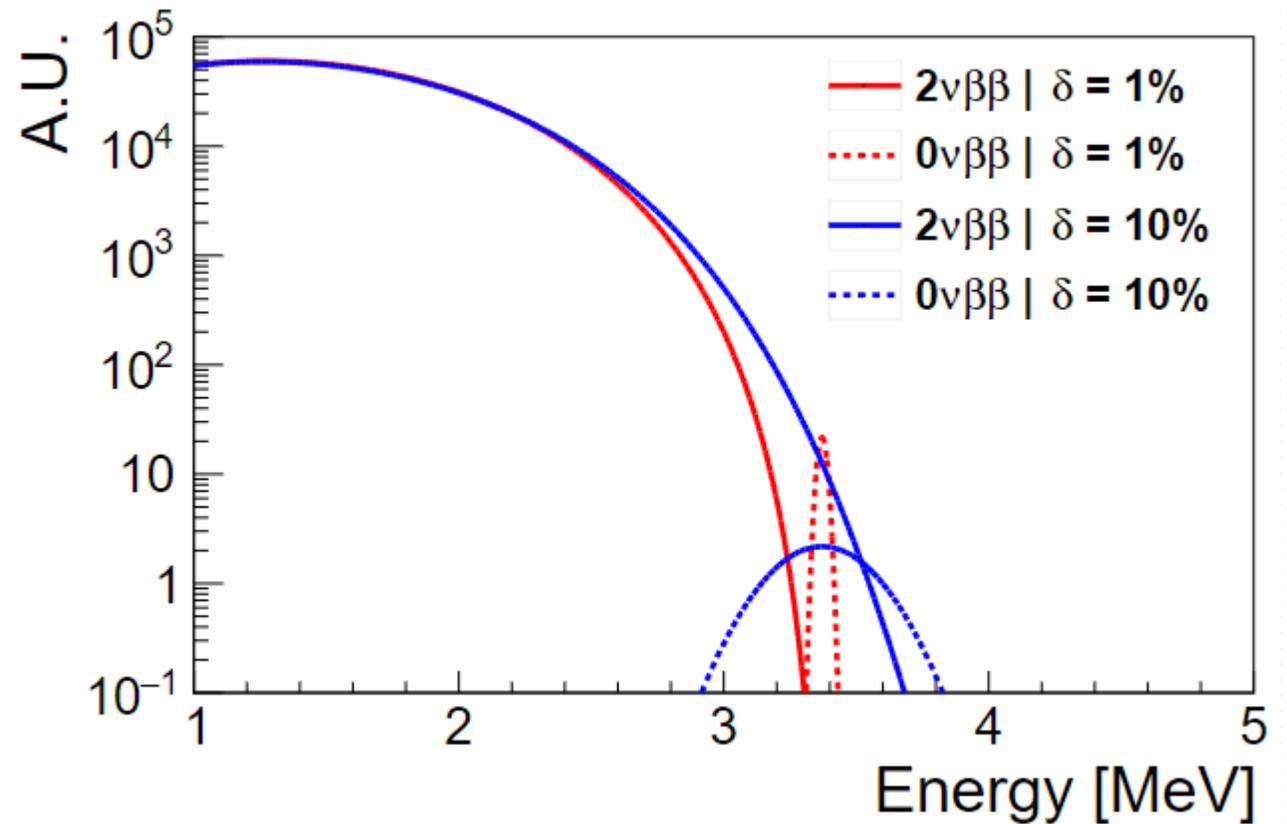
MCP-PMT + 集光器：

- 8英寸，约3800支
- 约50% 覆盖率
- 30% 量子效率
- TTS < 1.8 ns

双贝塔衰变本底与能量分辨率

- $0\nu\beta\beta$ 反应一定伴随着 $2\nu\beta\beta$ 本底
- $2\nu\beta\beta$ 反应过程：

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$$
- 对 $2\nu\beta\beta$ 本底，探测器的能量分辨率是最重要的影响因素
- 右图为 ^{150}Nd 在能量分辨率分别为1%和10%条件下， $2\nu\beta\beta$ 与 $0\nu\beta\beta$ 的两电子总动能能谱示意图



非径迹重建实验中的太阳中微子本底

- 太阳中微子在非径迹重建实验中产生的本底主要来自其与探测器中电子发生的NC和CC (仅 ν_e) 散射过程

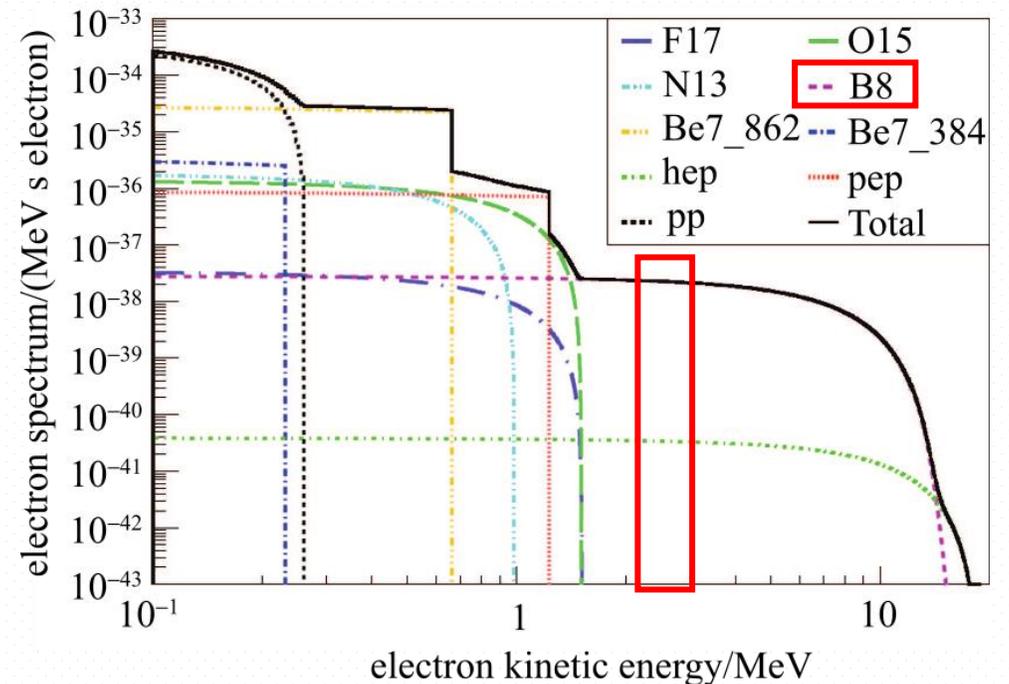
$$NC: \nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$$

$$CC: \nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$

对锦屏500吨探测器:

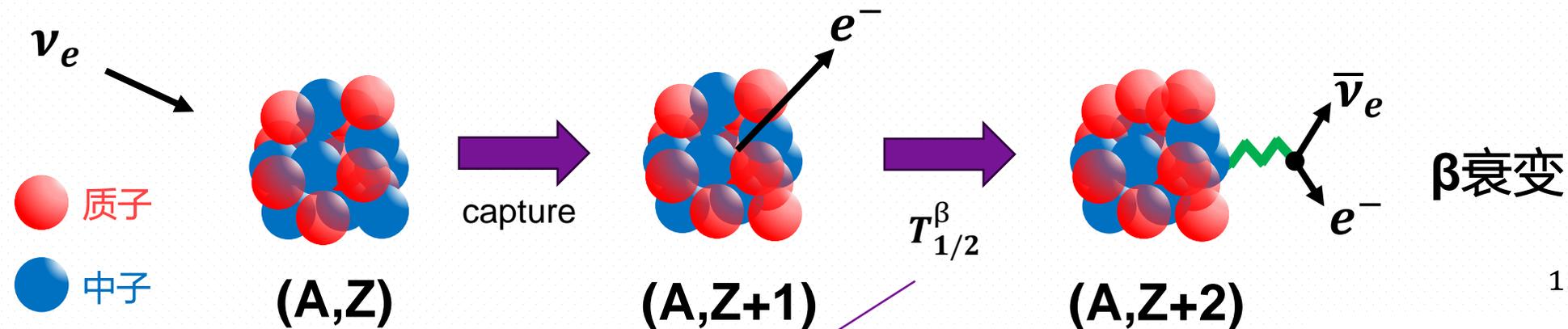
太阳 ^8B ν_e 的ES本底事例率为 805.93 yr^{-1}
在2~3 MeV附近约为 $0.02 \text{ yr}^{-1} \text{ keV}^{-1}$

太阳中微子反冲电子能谱



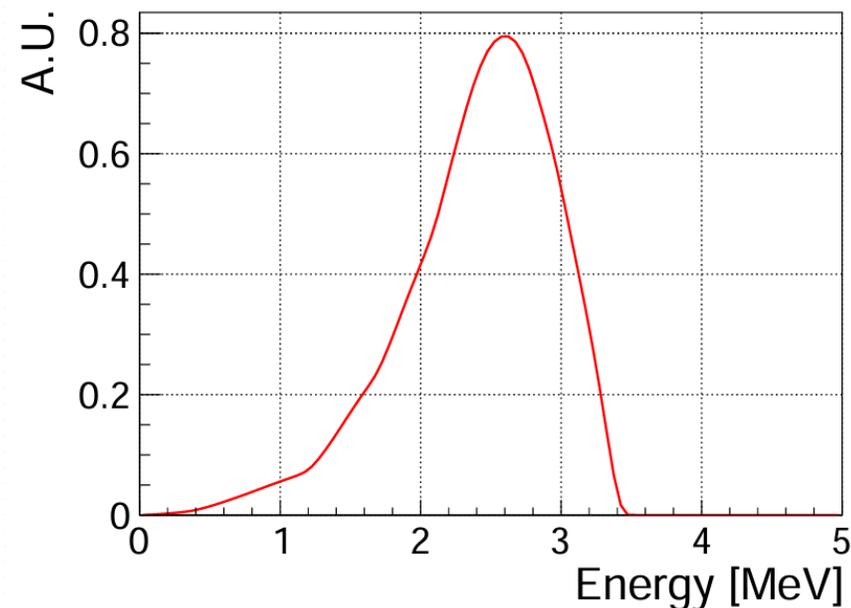
$0\nu\beta\beta$ 核素俘获太阳中微子产生的本底

DOI: 10.1103/PhysRevC.95.055501


 ^{130}I β+γ总能谱

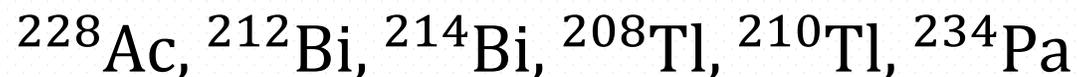
核素	俘获前核素	$T_{1/2}^\beta$ [h]	Q_β [MeV]	事例率 [evts /yr.]
^{130}I	^{130}Te	12.36	2.949	84.79
^{150}Pm	^{150}Nd	2.70	3.454	188.79

- 例如: $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{I} \rightarrow \begin{cases} 48\% \ ^{130}\text{Xe}^* : \beta + \gamma (1.9\text{MeV}) \\ 46.7\% \ ^{130}\text{Xe}^* : \beta + \gamma (2.3\text{MeV}) \end{cases}$



天然放射性本底

- 考虑铀系、钍系和 ^{40}K 的本底，其在锦屏500吨探测器不同成分中的含量：
- 为减少计算时间，对铀钍系只模拟了沉积能量在2 MeV以上的成分，包括：

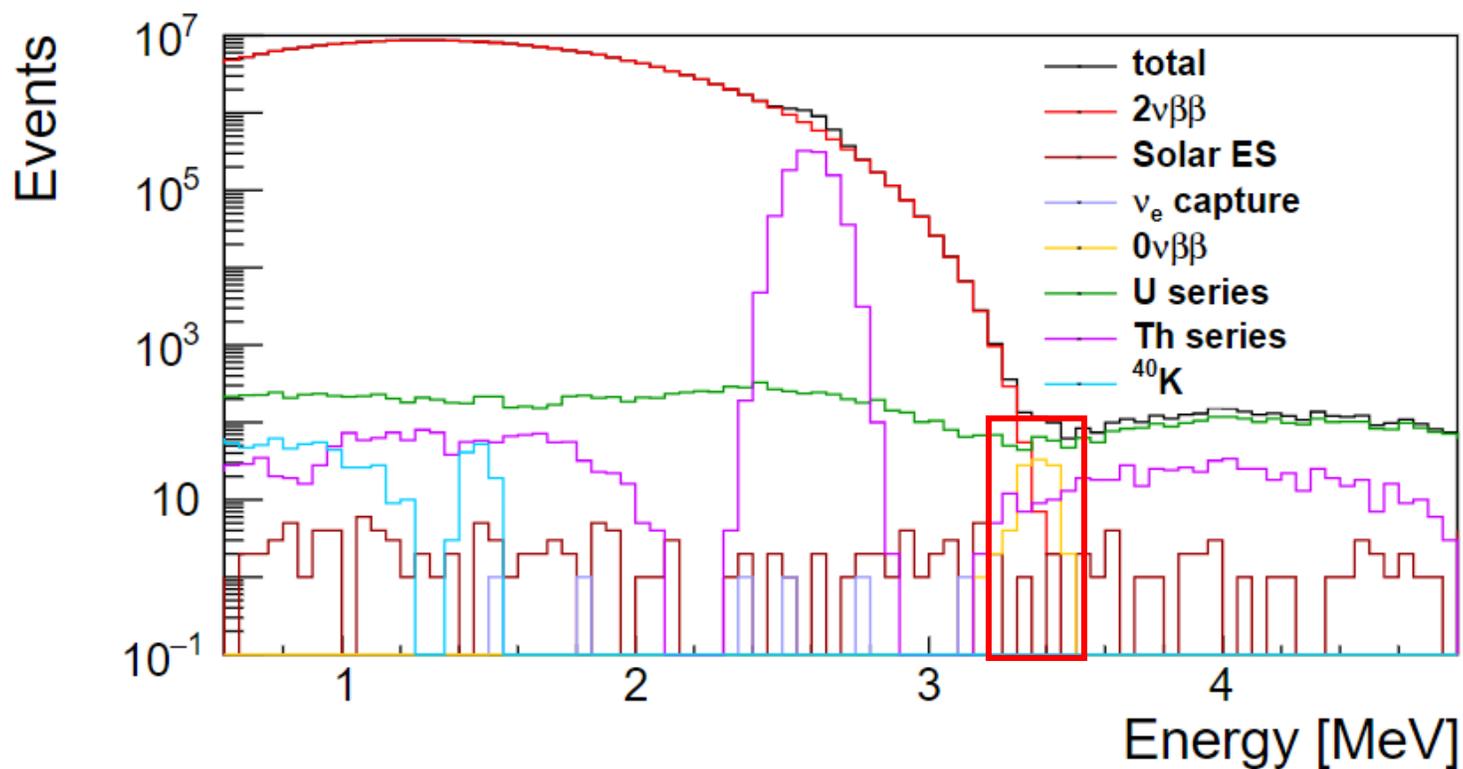


材料	$^{238}\text{U}[\text{g/g}]$	$^{232}\text{Th}[\text{g/g}]$	$^{40}\text{K}[\text{g/g}]$
液体闪烁体	1×10^{-16}	1×10^{-16}	1×10^{-18}
亚克力	6×10^{-13}	1.6×10^{-12}	1×10^{-18}
不锈钢(304L)	3.7×10^{-10}	2.8×10^{-9}	4.5×10^{-7}
水	5×10^{-14}	5×10^{-14}	1×10^{-14}
光电倍增管玻璃	7.78×10^{-8}	1.72×10^{-7}	9.62×10^{-9}
岩石(保守估计)	8.1×10^{-7}	2.46×10^{-7}	3.23×10^{-7}

总能谱示意图

$0\nu\beta\beta$ 核素曝光度
 ^{150}Nd , $\Sigma = 2.85 \text{ ton} \cdot \text{yr}$

能量分辨率($\frac{\sigma_E}{E}$ at 1MeV)
 $\delta = 3\%$, $T_{1/2}^{0\nu} = 10^{24} \text{ yr}$



目录

- 简介
- 锦屏500吨探测器 $0\nu\beta\beta$ 研究本底
- 分析方法及对比结果
 - 能谱拟合法
 - 计数法
 - 对比结果
- 结论

能谱拟合法

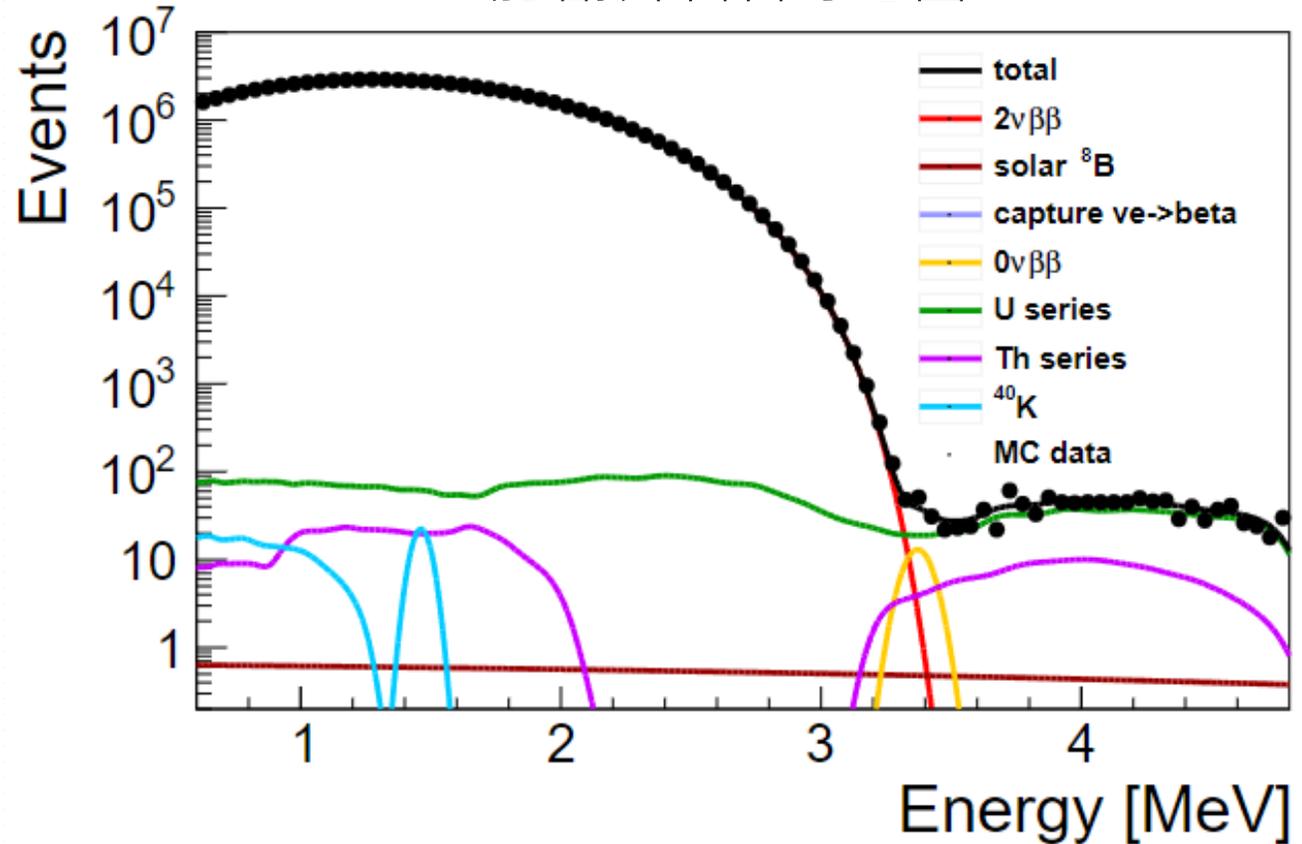
能谱拟合法使用 χ^2 拟合:

$$\chi^2 = \chi^2_{signal} + \chi^2_{penalty}$$

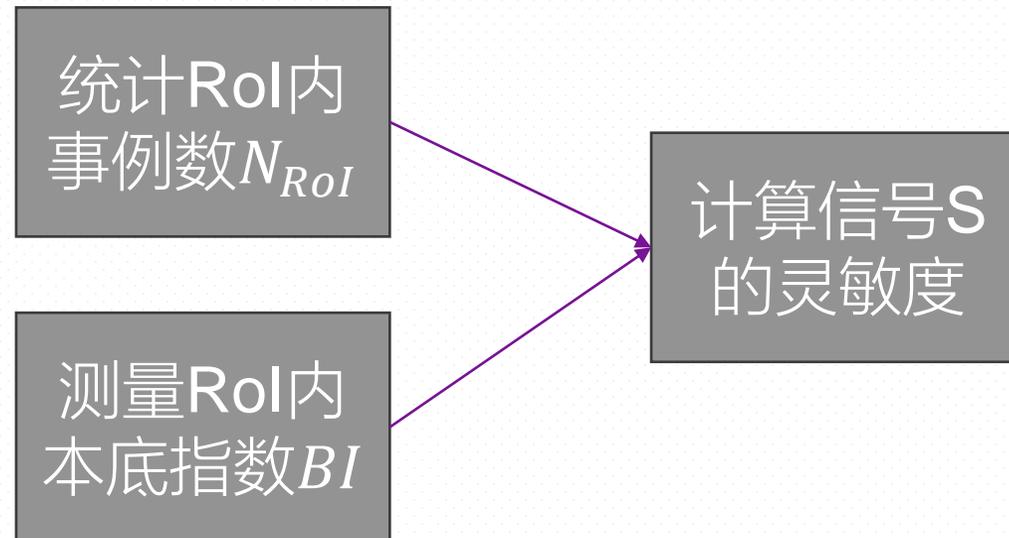
χ^2_{signal} 对应拟合范围内能谱
所有bin的对数泊松概率求和

$\chi^2_{penalty}$ 是针对实验中有测量
结果的本底成分的惩罚项

能谱拟合结果示意图



计数法



- 根据 BI 得到 RoI 内本底数 B_0 , 当 $B_0 \gg S$, 信号数 S 的灵敏度:
 $> n_\sigma, 50\% \longrightarrow S_0(n_\sigma) = n_\sigma \sqrt{N_{RoI}} + N_{RoI} - B_0$

不同条件下¹⁵⁰Nd半衰期灵敏度

500吨探测器
10%掺杂天然Nd

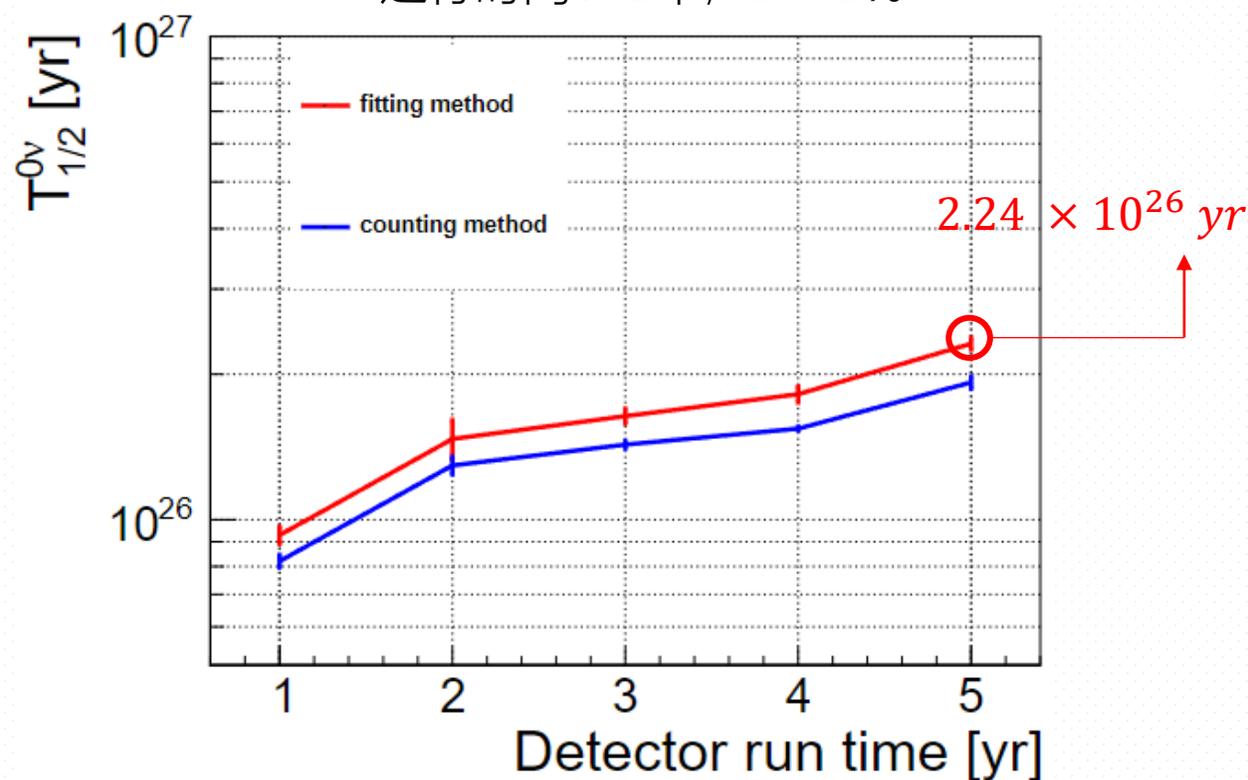
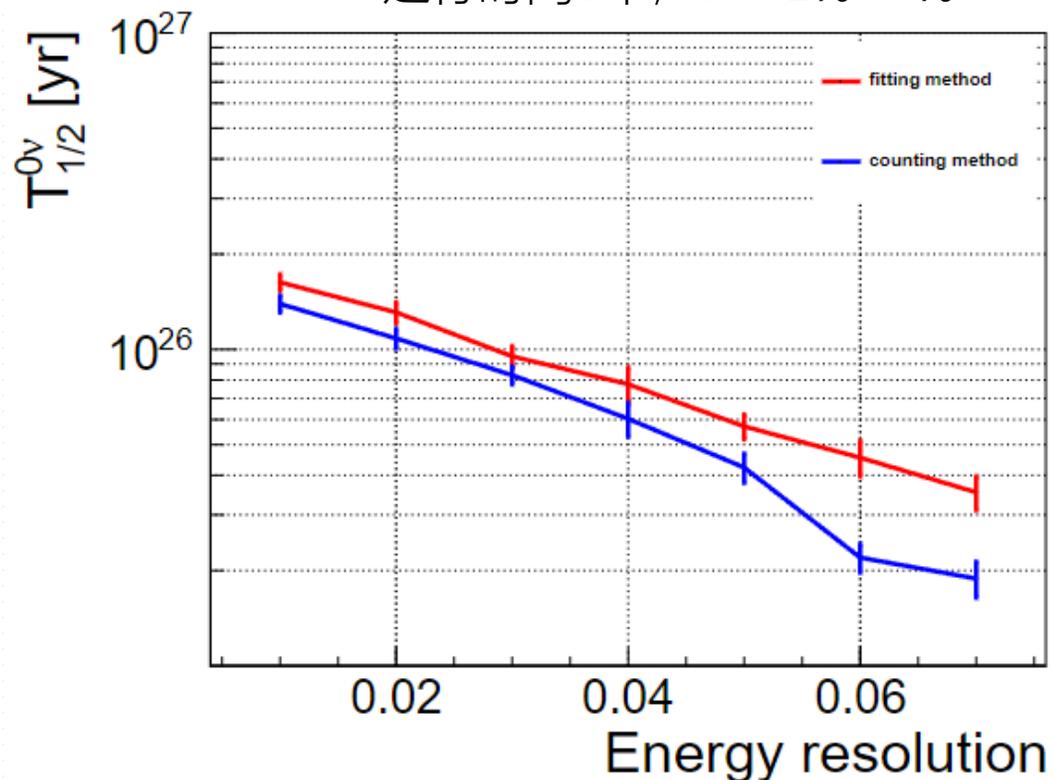
Preliminary result

> 1.29σ(90% C.L.), 50%

Nature Nd, $M_{Nd150} = 2.85 \text{ ton}$

运行时间1年, $\delta = 1\% \sim 7\%$

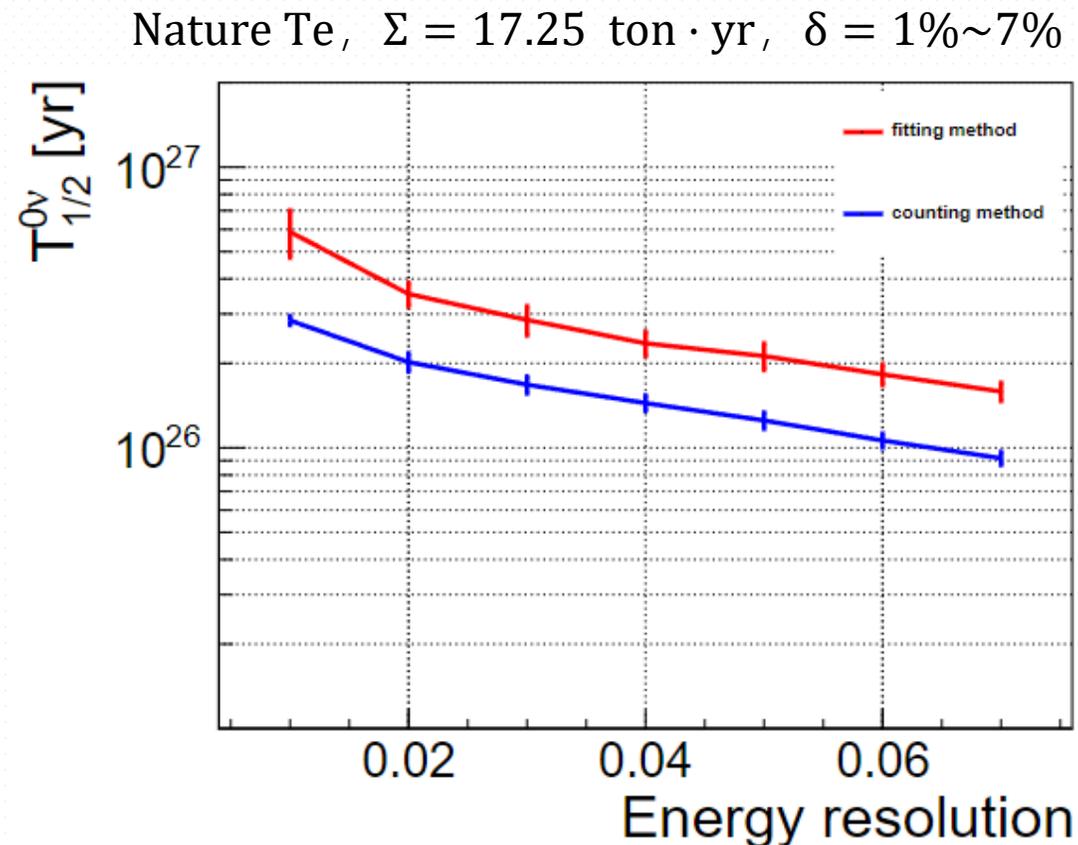
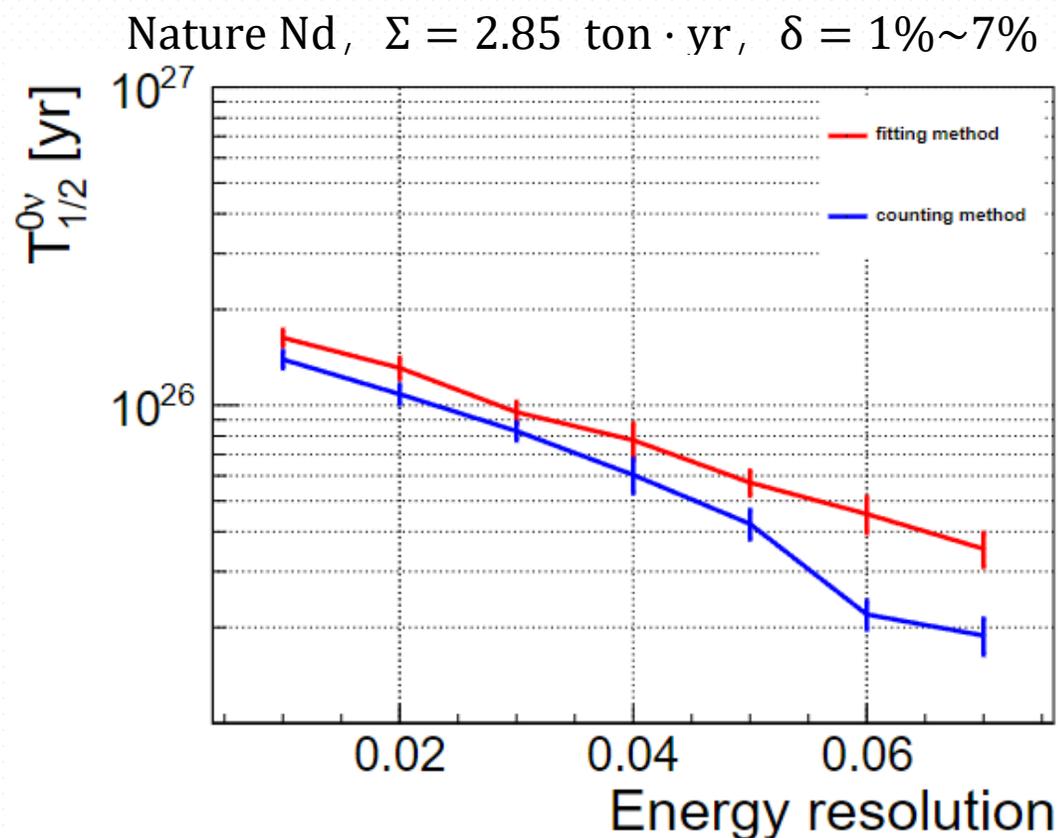
运行时间1~5年, $\delta = 3\%$



^{150}Nd 与 ^{130}Te 半衰期灵敏度对比

Preliminary result

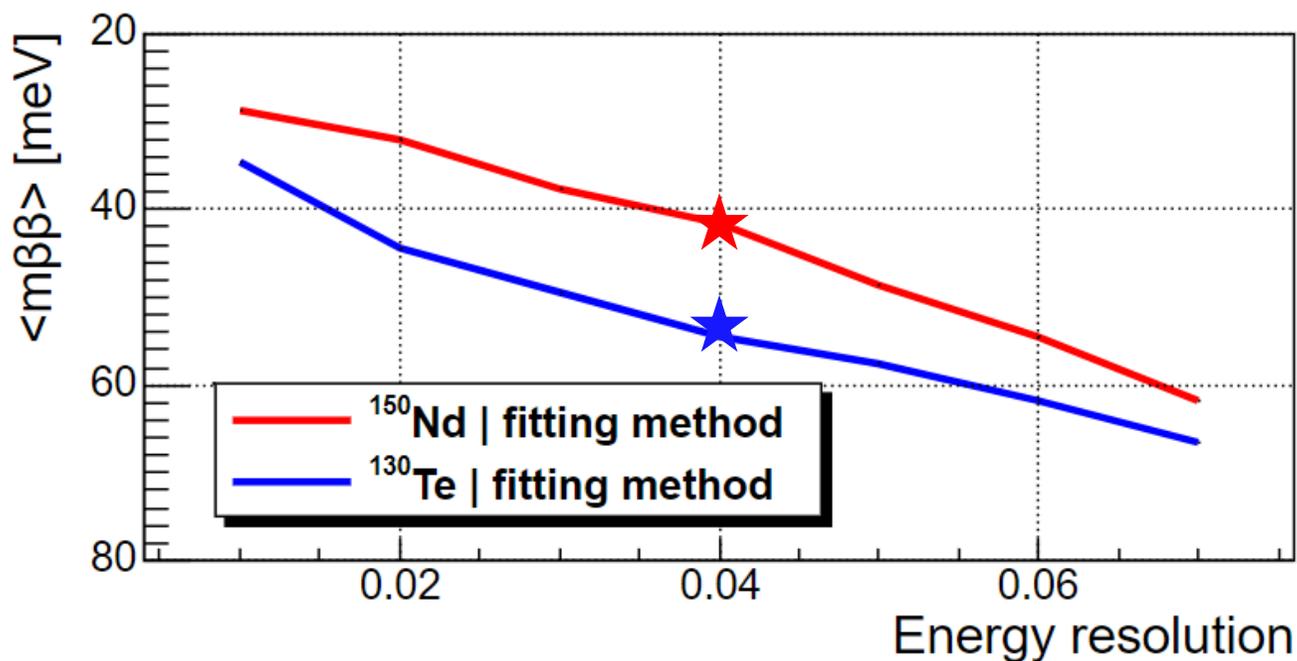
500吨探测器运行1年, 掺杂10%天然Nd/Te



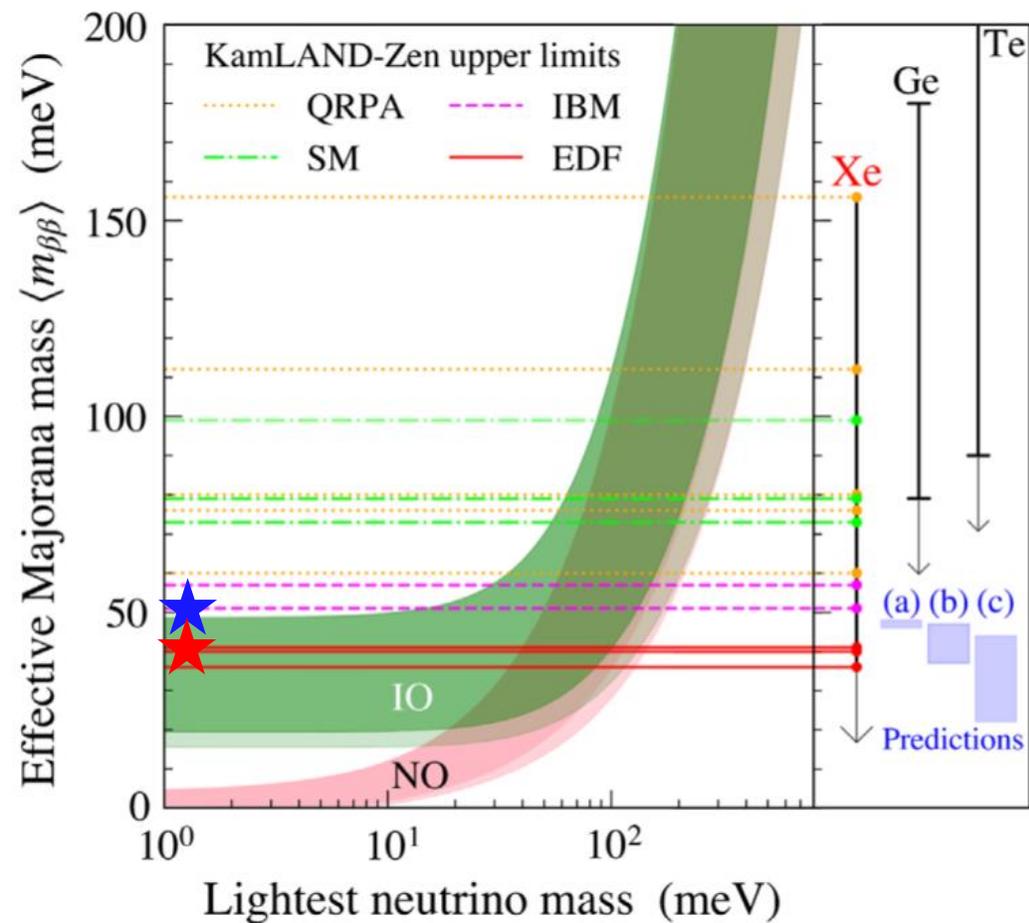
^{150}Nd 与 ^{130}Te 的中微子有效质量

Preliminary result

500吨探测器运行1年，掺杂10%天然Nd/Te



KamLAND-Zen发表的有效质量结果
doi: 10.1103/PhysRevLett.130.051801

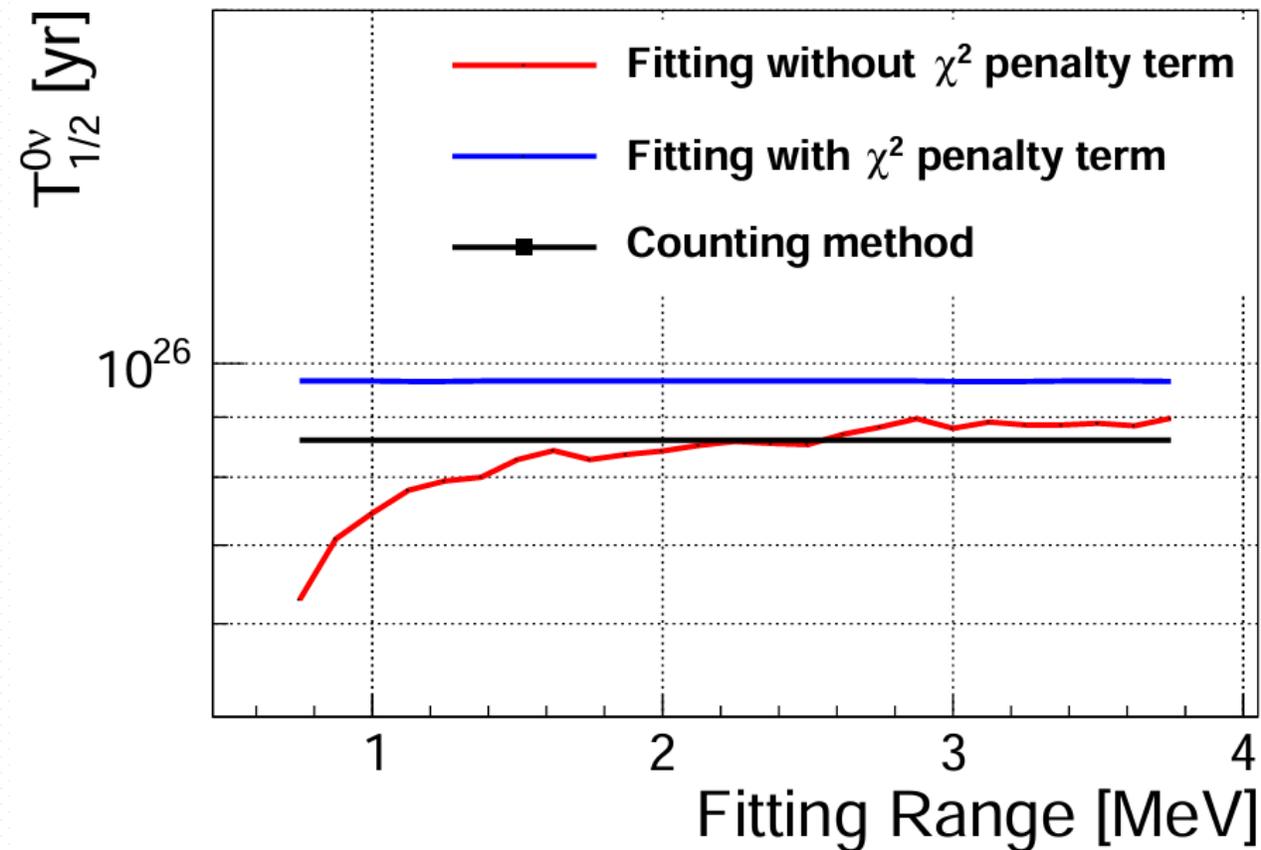


*计算 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ 所用 $G_{0\nu}$ 与 $M_{0\nu}$ (QRPA)取自doi: 10.1142/S0217732313500211

拟合范围与 χ^2 惩罚项的影响

Preliminary result

Nature Nd, $\Sigma = 2.85 \text{ ton} \cdot \text{yr}$, $\delta = 3\%$



- 无惩罚项时，拟合范围缩小会导致灵敏度降低
↓
- 拟合法更高的灵敏度可能来自**RoI范围外的额外信息**
- 有惩罚项时，拟合范围对灵敏度无影响
↓
- **惩罚项**本身提供了**RoI范围外的额外信息**

目录

- 简介
- 锦屏500吨探测器 $0\nu\beta\beta$ 研究本底
- 分析方法及对比结果
- 结论

结论

- 初步结果显示，相同实验条件下，**拟合法**给出的 $0\nu\beta\beta$ 灵敏度**更优**
- 这一结果可能由拟合法使用了RoI范围外的**额外信息**导致
- 作为粗糙的估计，锦屏500吨探测器在 $\delta = 3\%$ 的条件下掺杂10%天然Nd，运行5年：对 ^{150}Nd 的 $0\nu\beta\beta$ 半衰期灵敏度可达到 **$2.24 \times 10^{26} \text{ yr}$** ，对应 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ 为16~35 meV^*
- 初步结果显示，同样掺杂10%质量的天然Nd与天然Te， ^{130}Te 的 $0\nu\beta\beta$ 半衰期灵敏度较 ^{150}Nd 更高，但换算至**有效中微子质量**后二者给出**同量级**的 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$

* $G^{0\nu}$ 与 $M^{0\nu}$ 取自 DOI: 10.1142/S0217732313500211

感谢聆听!

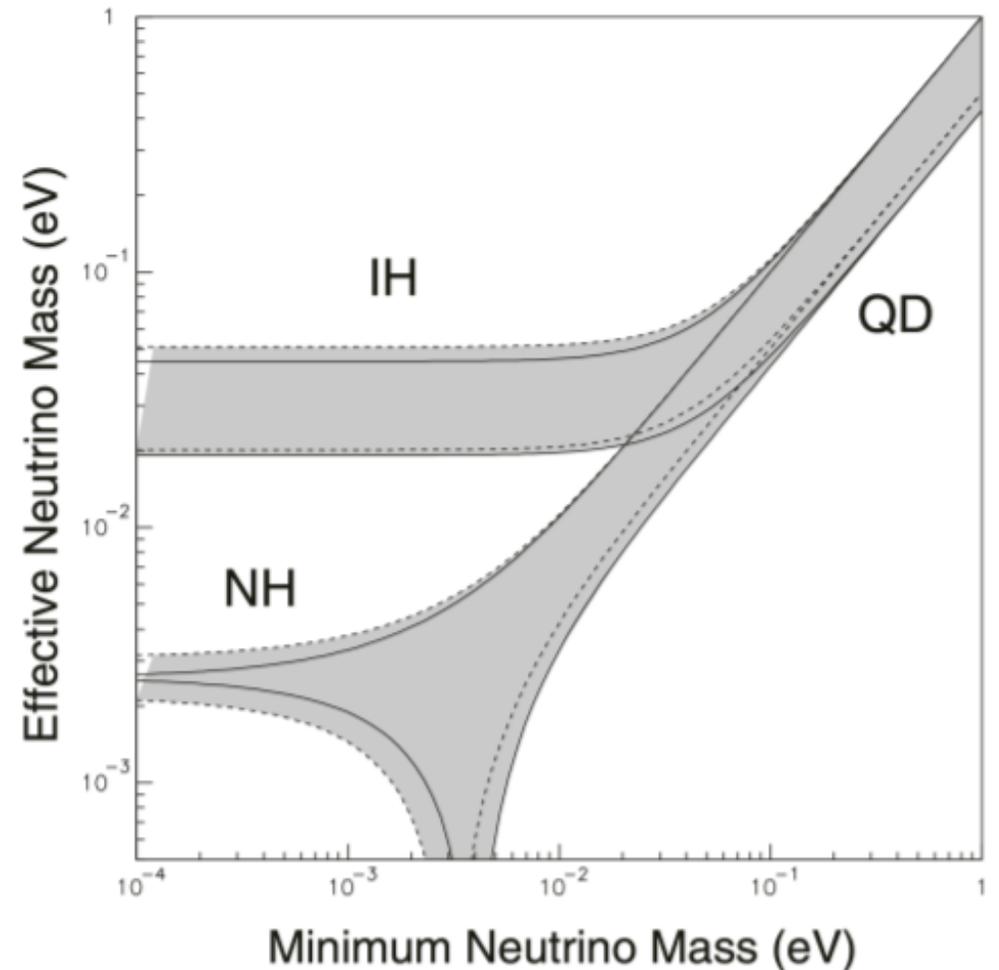
BackUp

无中微子双贝塔衰变半衰期下限确定

- $0\nu\beta\beta$ 反应：
 $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$
- 观测到 $0\nu\beta\beta$ 反应可以验证中微子的 **Majorana**性质，**轻子数不守恒**，并为确定**中微子质量排序**提供重要依据
- $0\nu\beta\beta$ 反应的半衰期 $T_{1/2}^{0\nu}$ 满足：

$$\left(\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}}\right) = G^{0\nu} g_A^4 |M_{0\nu}|^2 \left|\frac{\langle m_{\beta\beta} \rangle}{m_e}\right|^2$$
- 其中 $G^{0\nu}$ 为相空间因子， $|M_{0\nu}|$ 为核矩阵元

$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ 为有效中微子质量



0νββ实验现状

实验名称	使用核素	$G^{0\nu}$ [10^{-15} yr]	Q值 [keV]	天然丰度 [%]	$T_{1/2}^{0\nu}$ 90%C.L. [yr]	$ m_{ee} $ [meV]	使用方法
NEMO-3	^{100}Mo	15.92	3034	9.6	$> 1.1 \times 10^{24}$	310-776	径迹重建法
	^{82}Se	10.16	2995	9.2	$> 3.6 \times 10^{23}$	815-1994	
	^{150}Nd	63.03	3371	5.7	$> 2.0 \times 10^{22}$	2423-5243	
	^{48}Ca	24.81	4272	0.187	$> 1.3 \times 10^{22}$	7478-20852	
	^{96}Zr	20.58	3350	2.8	$> 9.2 \times 10^{21}$	4094-14829	
CUORE	^{130}Te	14.22	2527	34.5	$> 3.2 \times 10^{25}$	75-350	计数法
GERDA	^{76}Ge	2.36	2039	7.8	$> 1.8 \times 10^{26}$	79-180	计数法
KamLAND-Zen	^{136}Xe	14.58	2458	8.9	$> 2.3 \times 10^{26}$	36-156	拟合法
CUPID-0	^{82}Se	10.16	2995	9.2	$> 4.6 \times 10^{24}$	263-545	计数法
CUPID-Mo	^{100}Mo	15.92	3034	9.6	$> 1.5 \times 10^{24}$	310-540	计数法
.....							

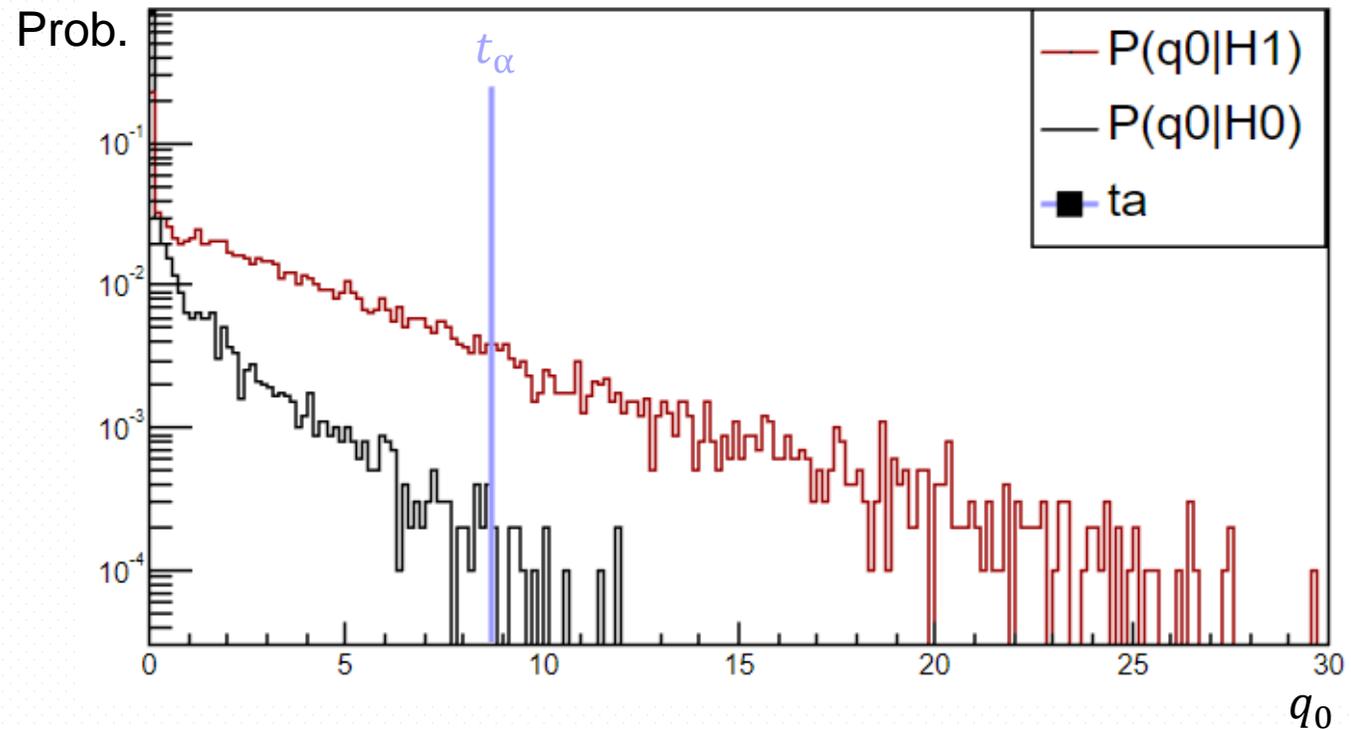
- 目前0νββ实验中使用的方法有径迹重建，计数法和拟合法
- 液体闪烁体探测器中普遍使用的方法有计数法和拟合法

两种方法采用的确定灵敏度的统计方法

- 统计检验量 q_0 :

$$q_0 = -2 \log \left(\frac{L(\mathbf{x}|S = 0, \hat{\mathbf{B}})}{L(\mathbf{x}|\hat{S}, \hat{\mathbf{B}})} \right)$$

- 第一类错误 $\alpha = \int_{t_\alpha}^{+\infty} P(q_0|H_0)dq_0$
- 第二类错误 $\beta = \int_0^{t_\alpha} P(q_0|H_1)dq_0$



- 根据选取的 α 确定 t_α (如 $\alpha = 0.0135$) $\longleftarrow P_{50}^{3\sigma}$ criteria
- 找到合适备择假设 H_1 使得 $\beta = 0.5$

灵敏度的另一种定义

$0\nu\beta\beta$ 半衰期灵敏度也可以指多次MC实验中，其半衰期90% C.L.下限的中位数

获取 $0\nu\beta\beta$ 半衰期的置信区间可使用Neyman-Constructed Confidence Interval，由于 $0\nu\beta\beta$ 事例数存在物理边界 ($S \geq 0$)，故置信区间的获取需要使用Feldman-Cousins方法*

多次生成MC实验时，必须给定 $0\nu\beta\beta$ 半衰期（即信号数期望 S ）的真值，例如设定 $S=0$ (nEXO) 或设定RoI内的 $S=B$ (SNO+)

*Phys. Rev. D 57 3873(1998)

$0\nu\beta\beta$ 核素俘获太阳中微子产生的本底能谱

- 对每个核素(A,Z), 其俘获能谱为对应(A,Z+1)核素的所有 β 衰变分支的 $\beta+\gamma$ 谱, 每个分支的能谱都使用 β 衰变的公式计算:

$$\frac{dN}{dE} \sim (E_0 - E_e)^2 E_e p_e F(Z, E_e)$$

- E_0 为 β 衰变Q值, E_e 为电子动能, p_e 为电子动量, $F(Z, E_e)$ 是费米函数

能谱拟合法似然函数

能谱拟合法使用的似然函数为：

$$-2 \log(L) = \chi^2 = \chi_{signal} + \chi_{penalty}$$

$$\chi_{signal} = 2 \sum_i^{N_{bin}} \begin{cases} v_i - n_i & \text{for } n_i = 0 \\ \left(n_i \log \left(\frac{n_i}{v_i} \right) v_i - n_i \right) & \text{for } n_i > 0 \end{cases}$$

$$\chi_{penalty} = \sum_k^{N_{bkg}} \left(\frac{v_k^{bkg} - N_k^{bkg}}{\sigma_k} \right)^2$$

能谱拟合法细节

参考KamLAND-Zen的做法，将总的能谱按照空间坐标分为等体积的10个同心球（球壳）

拟合时选取FV为 $r < 4.0$ m，即只选取半径较小的5个同心球（球壳）的能谱进行拟合

MC事例的空间坐标来自其沉积能量的加权平均中心