

$0\nu\beta\beta$ 实验中两种半衰期灵敏度确定方法对比

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

目录

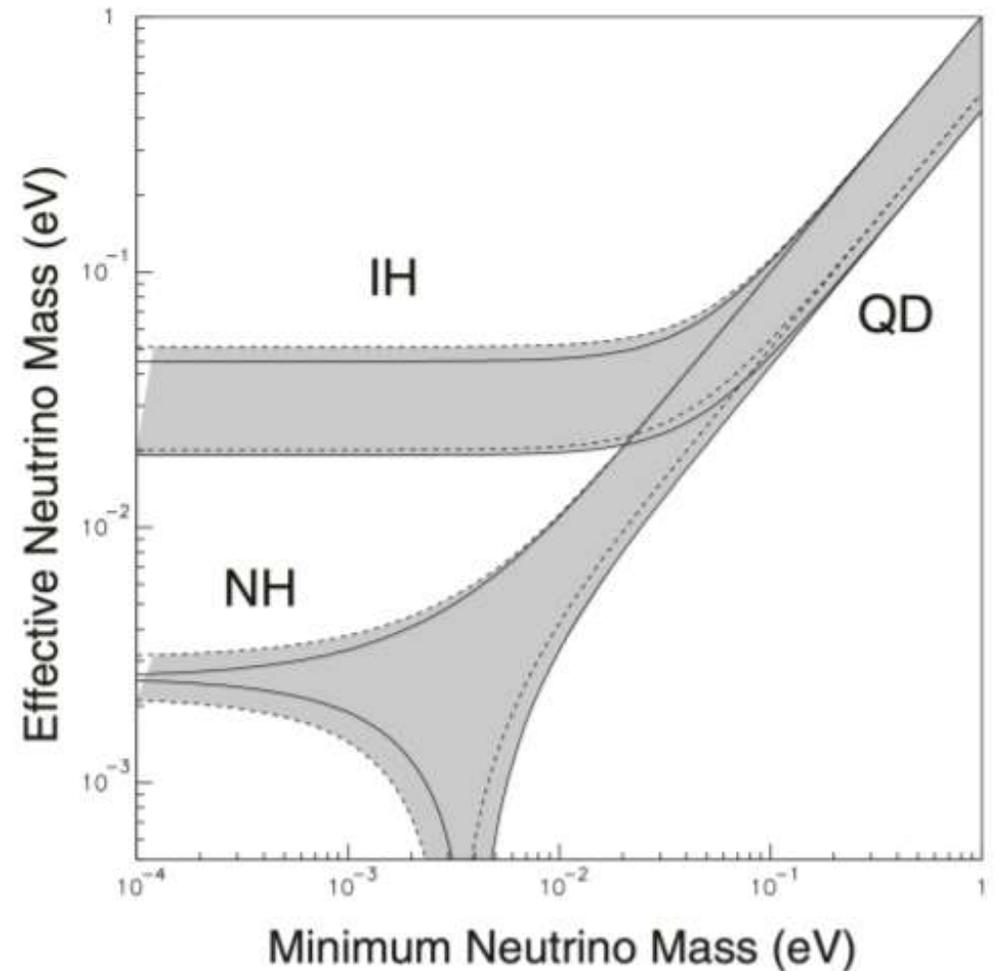
- 简介
- 锦屏500吨探测器 $0\nu\beta\beta$ 研究本底
- 分析方法及对比结果
- 结论

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



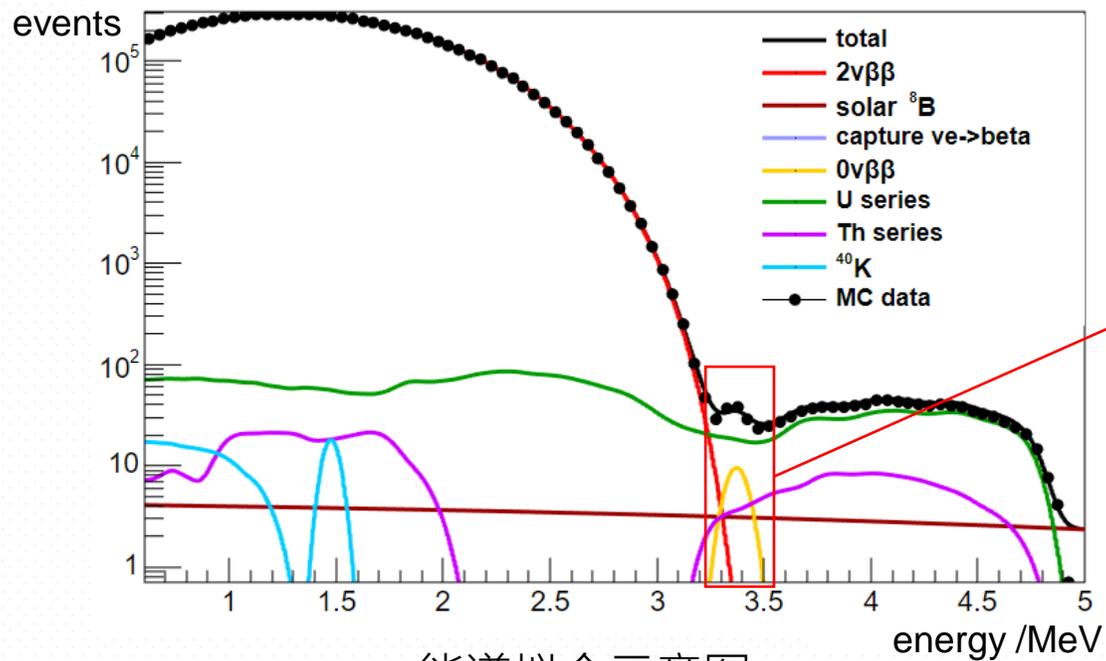
0νββ实验现状

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
.....							

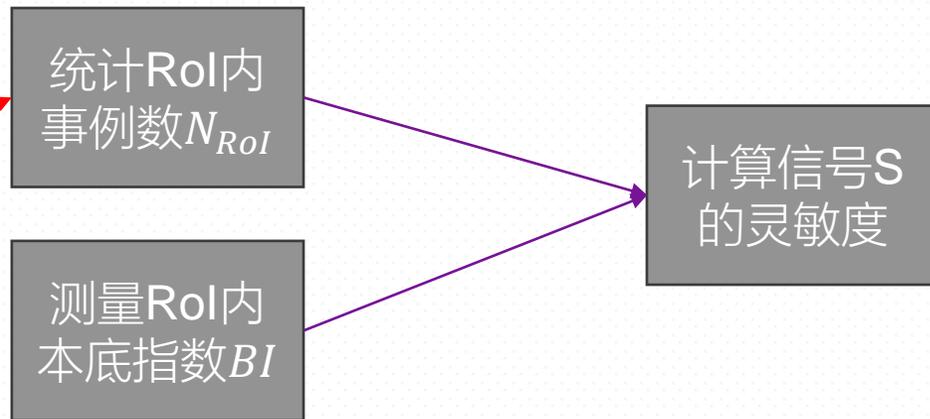
- 目前0νββ实验中使用的的方法有径迹重建，计数法和拟合法
- 液体闪烁体探测器中普遍使用的方法有计数法和拟合法

两类分析处理方法

- 在常见的非径迹重建 $0\nu\beta\beta$ 实验中，分析实验数据获取 $0\nu\beta\beta$ 半衰期的方式分为两类：能谱拟合法或计数法



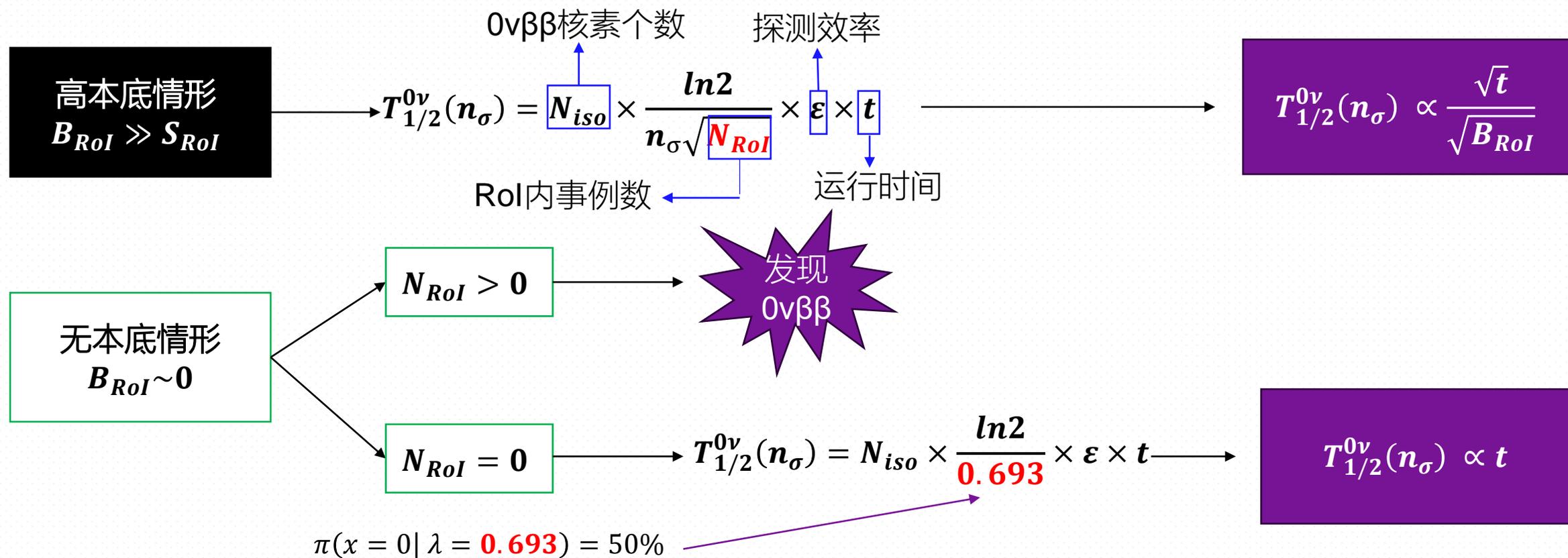
能谱拟合示意图



计数法流程

本底对半衰期灵敏度影响

- 以计数法的简单情形为例：



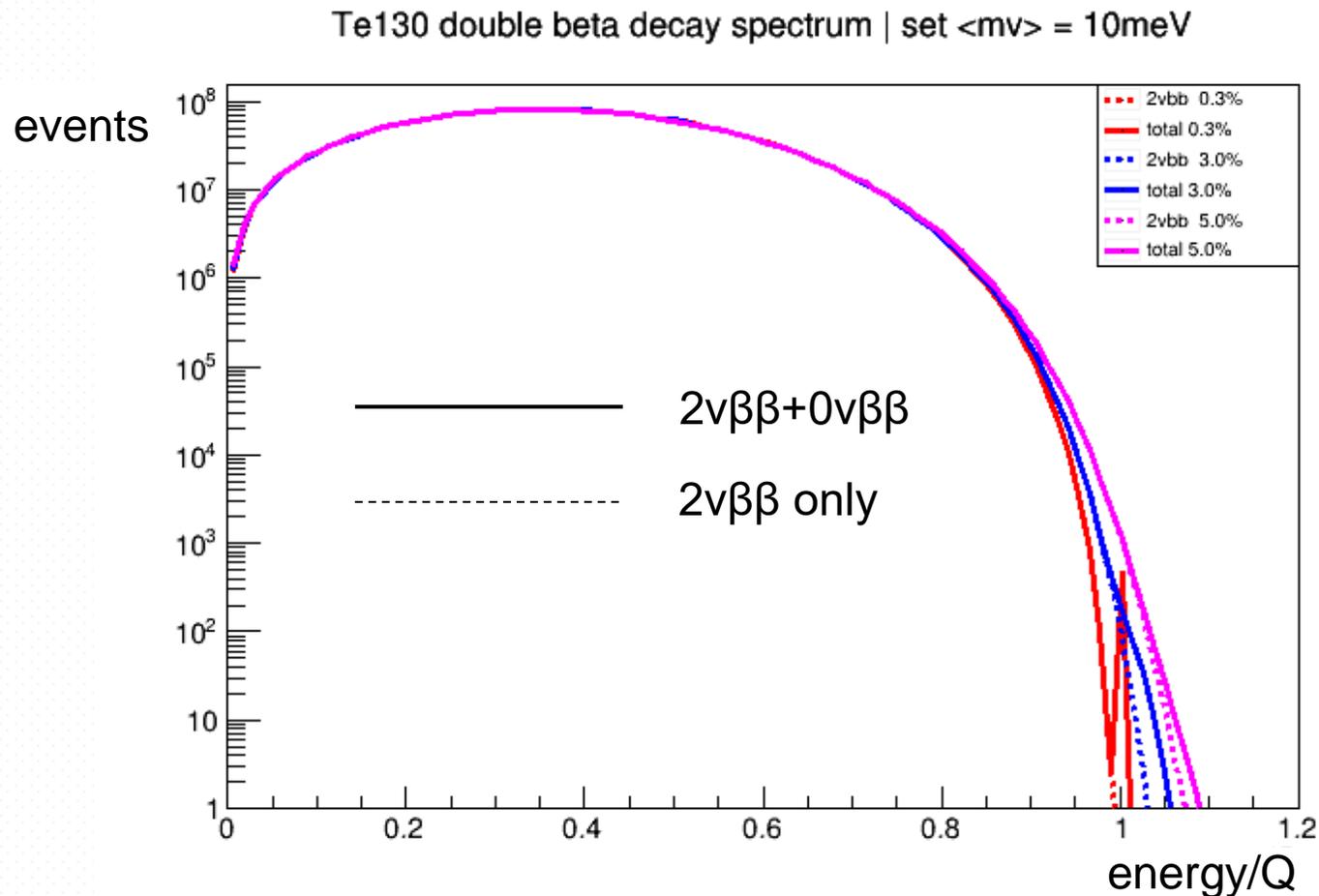
目录

- 简介
- 锦屏500吨探测器 $0\nu\beta\beta$ 研究本底
 - $2\nu\beta\beta$ 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

双贝塔衰变本底与能量分辨率关系

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

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$$
- ^{130}Te 在 $\langle m\beta\beta \rangle = 10\text{meV}$, 能量分辨率分别为0.3%, 3%和5%的条件下, $2\nu\beta\beta$ 与 $2\nu\beta\beta+0\nu\beta\beta$ 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

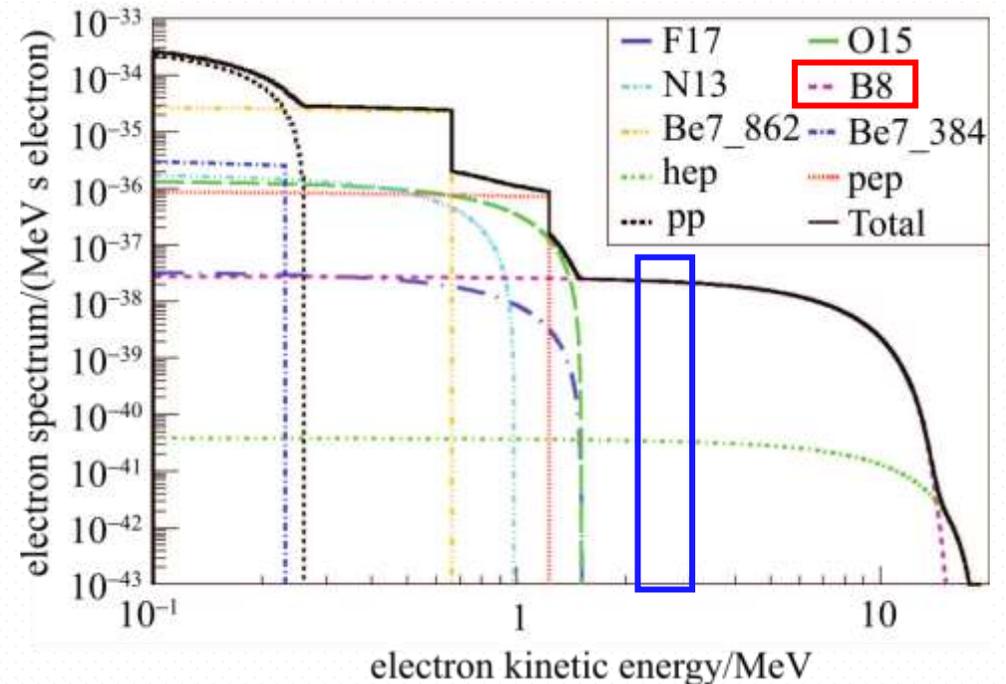
$$NC: \nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$$

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

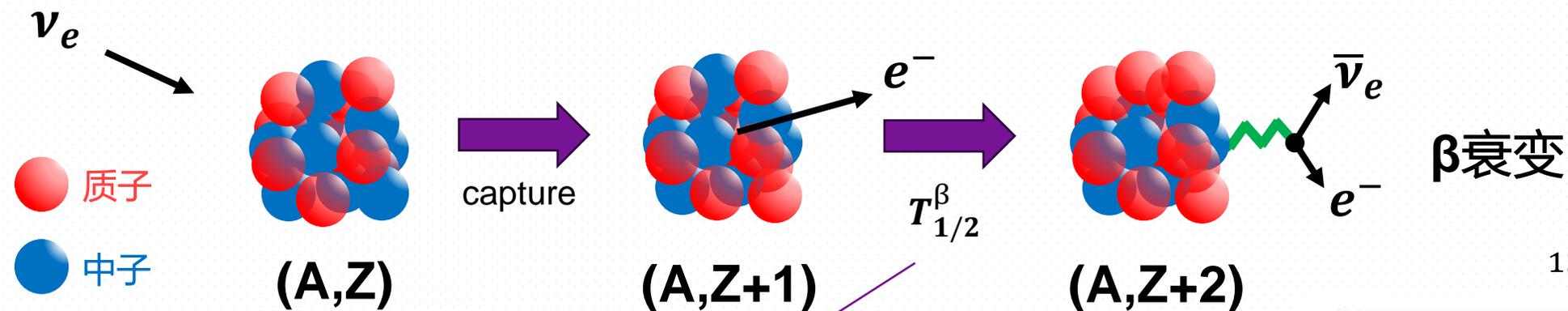
对锦屏500吨探测器:

太阳 ^8B ν_e 的ES总事例率为 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



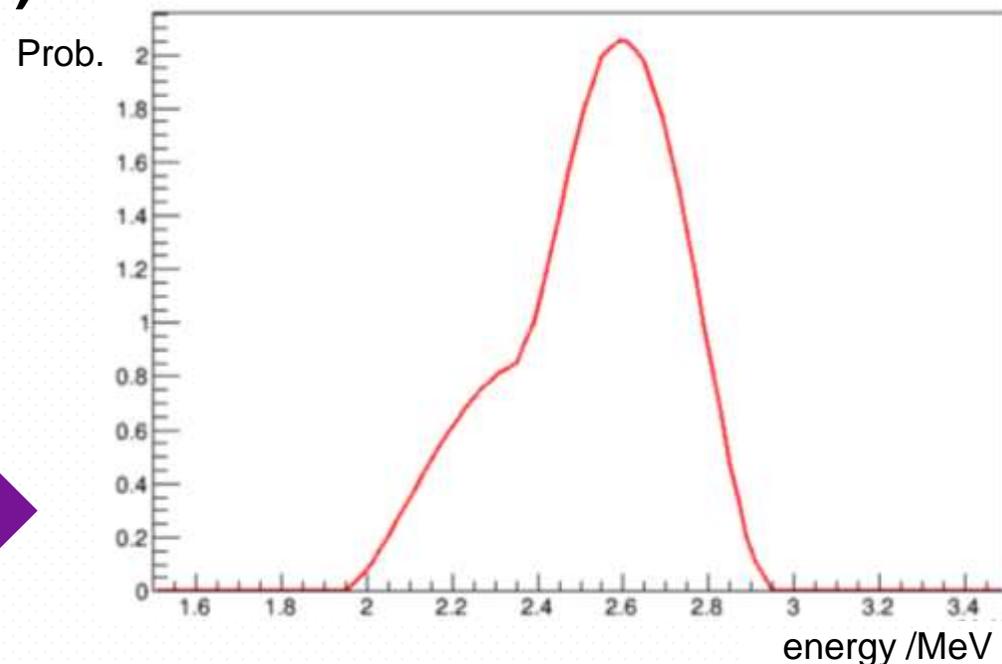
$0\nu\beta\beta$ 核素俘获太阳中微子产生的本底 DOI: 10.1103/PhysRevC.95.055501



^{130}I $\beta+\gamma$ 总能谱

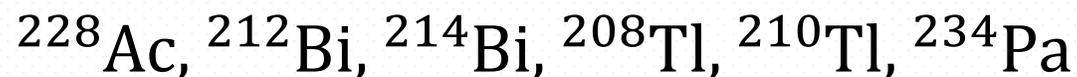
核素	俘获前核素	$T_{1/2}^\beta$ [h]	Q_β [MeV]	事例率 [evts / t y]
^{130}I	^{130}Te	12.36	2.949	4.9
^{150}Pm	^{150}Nd	2.70	3.454	60.0

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



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：
- 对铀钍系只模拟了沉积能量在2 MeV以上的成分，包括：



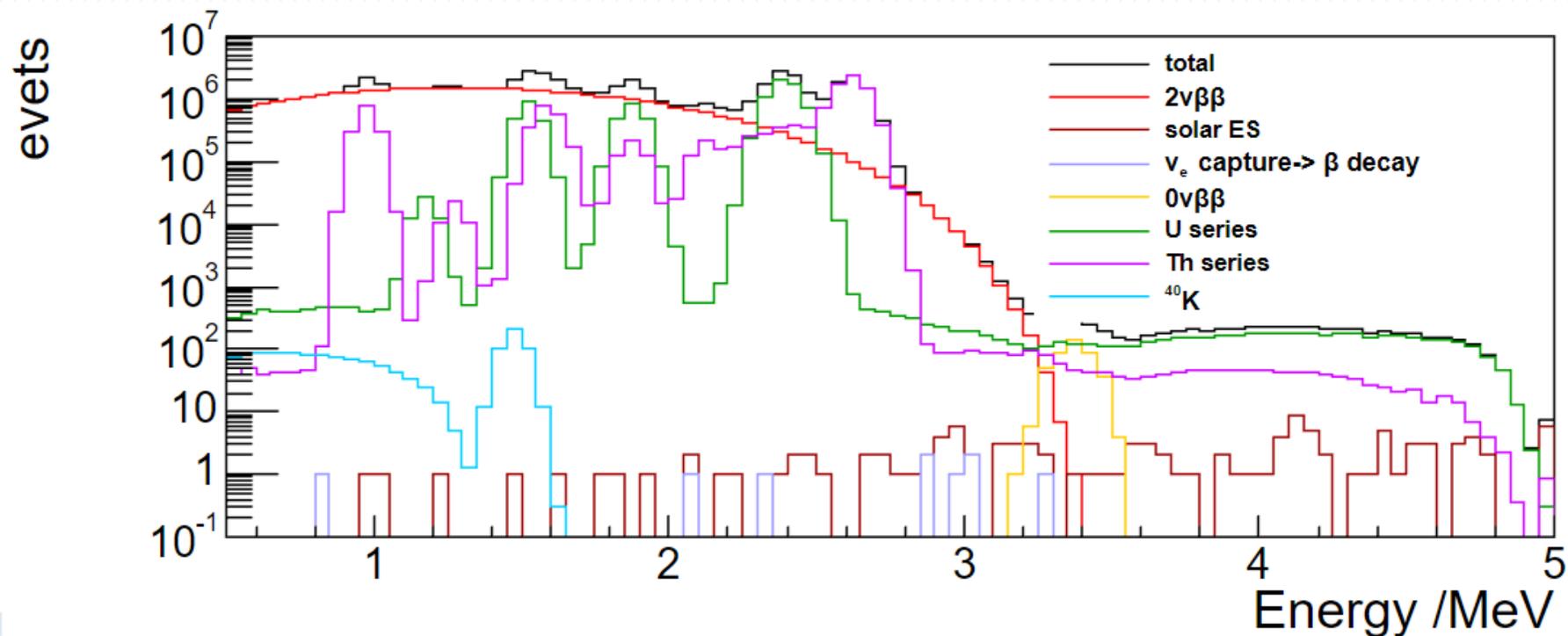
材料	$^{238}\text{U}[\text{g/g}]$	$^{232}\text{Th}[\text{g/g}]$	$^{40}\text{K}[\text{g/g}]$
液体闪烁体	1×10^{-16}	1×10^{-16}	1×10^{-18}
亚克力	6×10^{-13}	1.6×10^{-12}	1×10^{-18}
不锈钢(304L)	3.7×10^{-10}	2.8×10^{-9}	4.5×10^{-7}
水	5×10^{-14}	5×10^{-14}	1×10^{-14}
光电倍增管玻璃	7.78×10^{-8}	1.72×10^{-7}	9.62×10^{-9}
岩石(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

各本底和 $0\nu\beta\beta$ 能谱

$0\nu\beta\beta$ 核素曝光度

能量分辨率($\frac{\sigma_E}{E}$ at 1MeV)

^{150}Nd , $\Sigma = 0.285 \text{ ton} \cdot \text{yr}$, $\delta = 3\%$, $T_{1/2}^{0\nu} = 10^{24} \text{ yr}$



目录

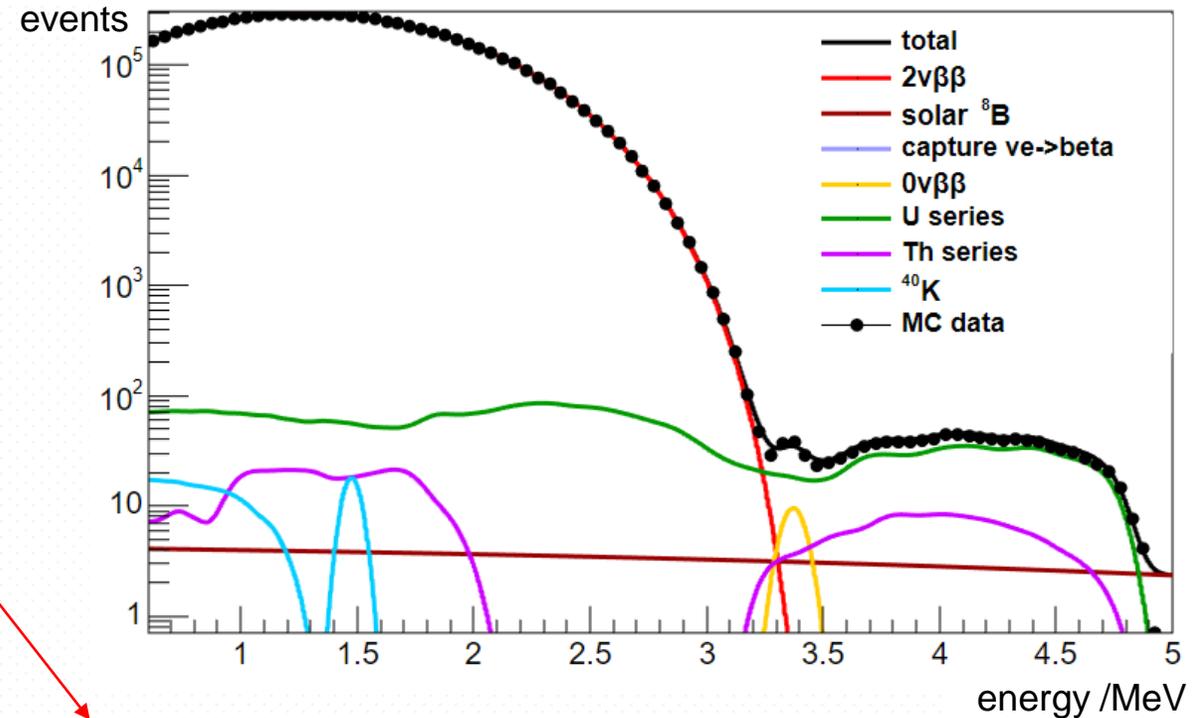
- 简介
- 锦屏500吨探测器 $0\nu\beta\beta$ 研究本底
- 分析方法及对比结果
 - 能谱拟合法
 - 计数法
 - 对比结果
- 结论

能谱拟合法

能谱拟合法使用的似然函数为：

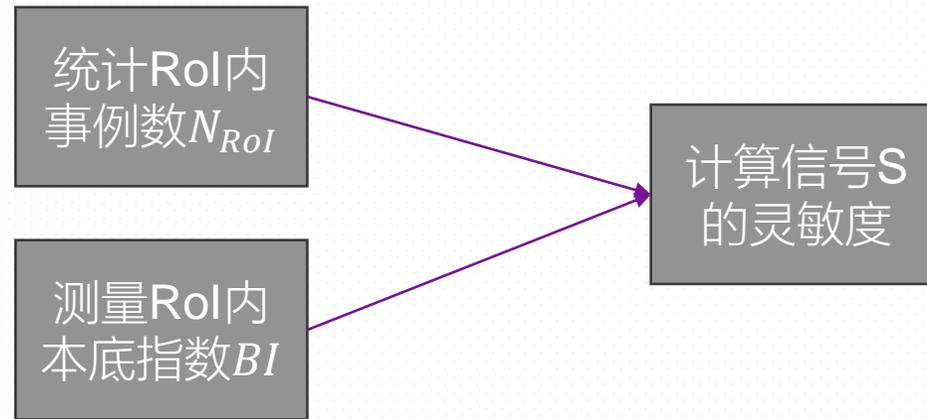
$$-2 \log(L) = \chi^2 = \chi_{signal} + \chi_{penalty}$$

χ_{signal} 对应拟合范围内能谱
所有bin的对数泊松概率求和



$\chi_{penalty}$ 是针对实验中有测量结果的本底成分的惩罚项

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：

$$> n_\sigma, 50\% \longrightarrow S_0(n_\sigma) = n_\sigma \sqrt{N_{RoI}} + N_{RoI} - B_0$$

- 在此基础上稍加改进，可以使用泊松形式的似然函数：

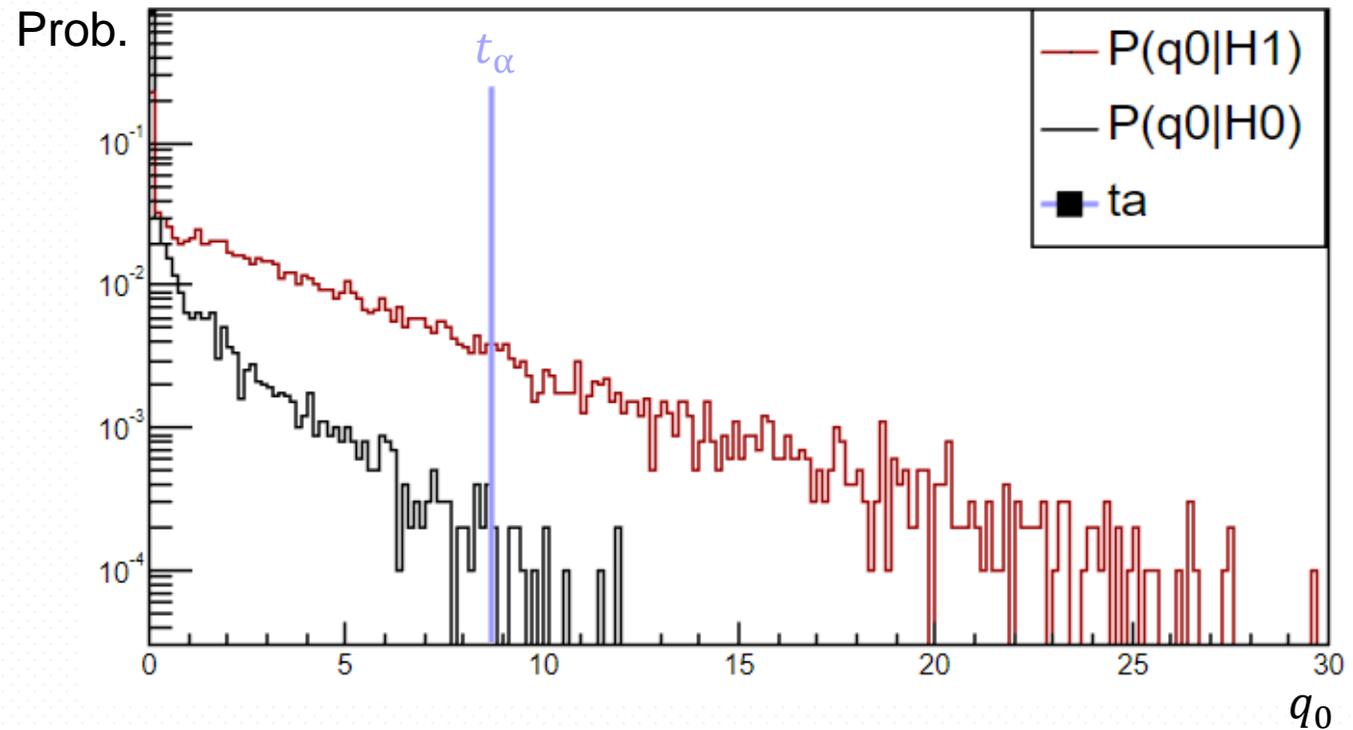
$$L(N_{RoI}|S) = \frac{e^{S+B_0} \times (S+B_0)^{N_{RoI}}}{N_{RoI}!}$$

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 $\beta = 0.5$

能量分辨率对半衰期灵敏度的影响

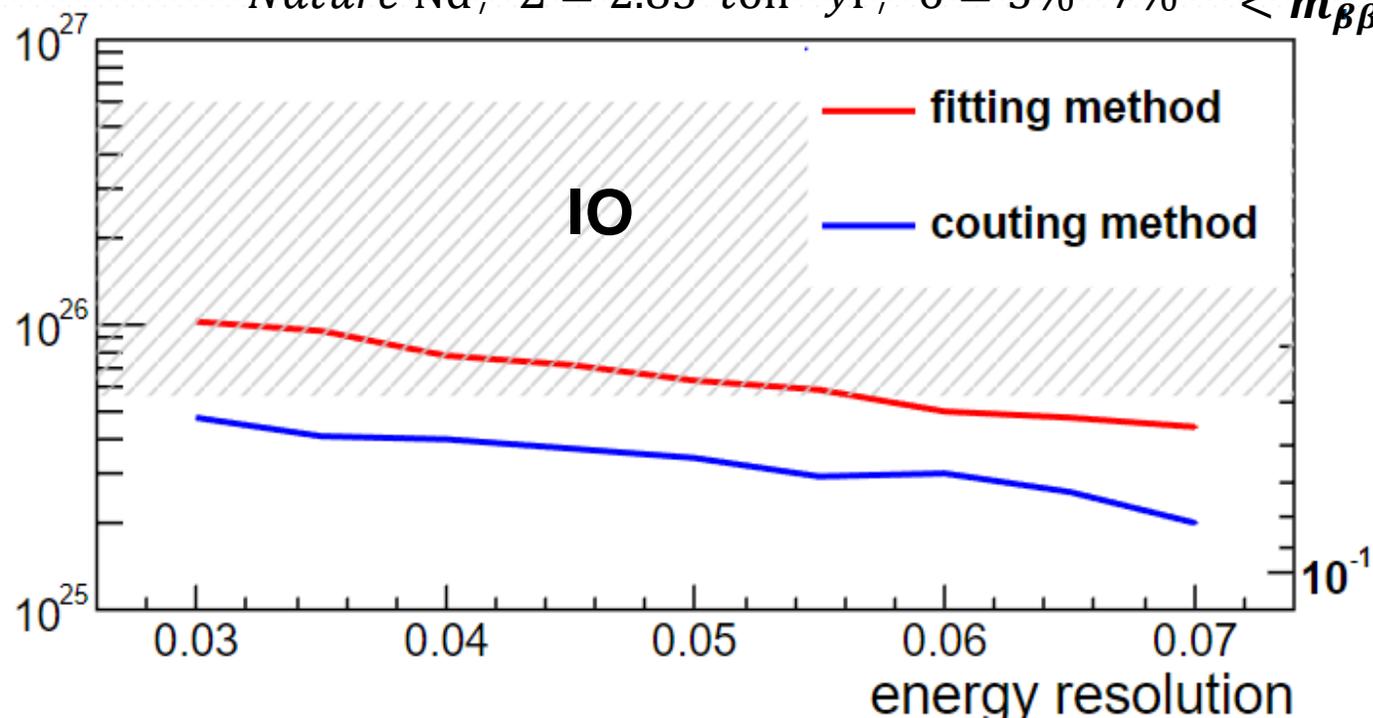
500吨探测器运行一年
10%掺杂天然Nd

Preliminary result

Nature Nd, $\Sigma = 2.85 \text{ ton} \cdot \text{yr}$, $\delta = 3\% \sim 7\%$ $\langle m_{\beta\beta} \rangle / eV$

$> 1.29\sigma(90\% \text{ C.L.}), 50\%$

$T_{1/2}^{0\nu} / \text{yr.}$

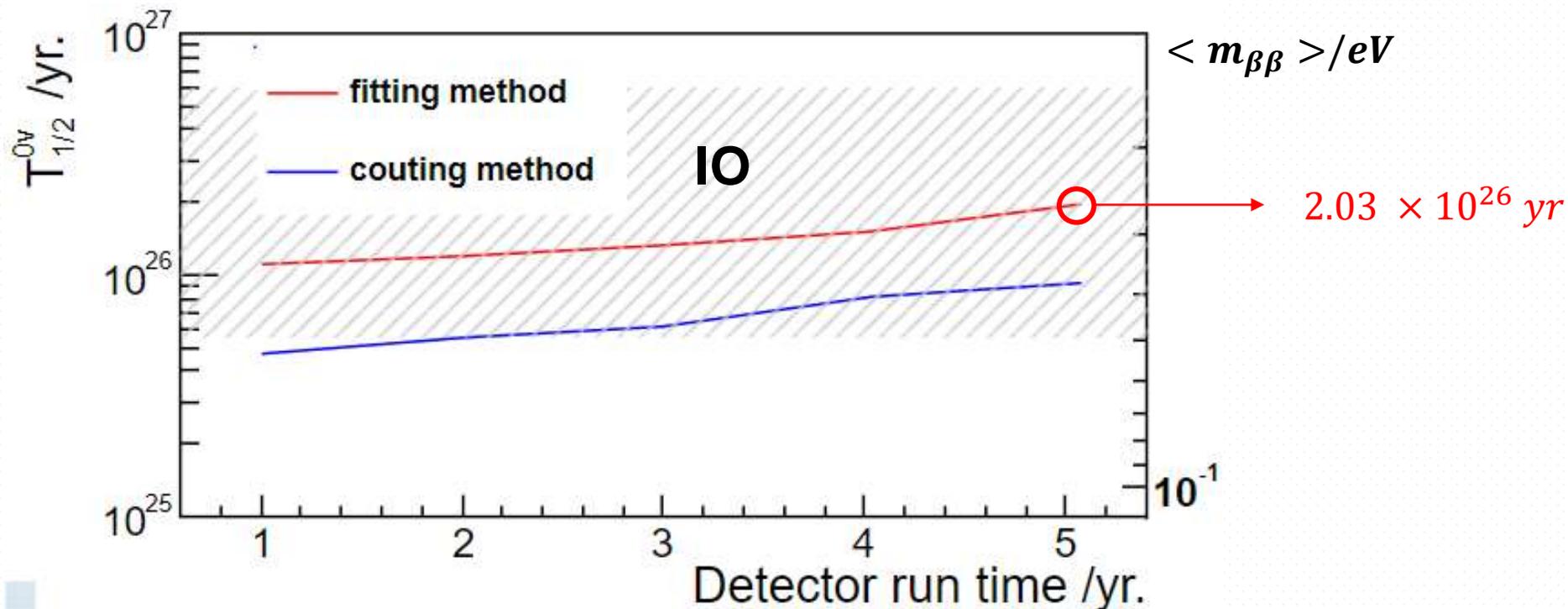


运行时间对半衰期灵敏度的影响

500ton探测器掺杂10%天然Nd = 2.85 ton ← 运行时间(yr)

Nature Nd, $\Sigma = 2.85 \cdot t$ ton · yr, $\delta = 3\% \sim 7\%$

Preliminary result



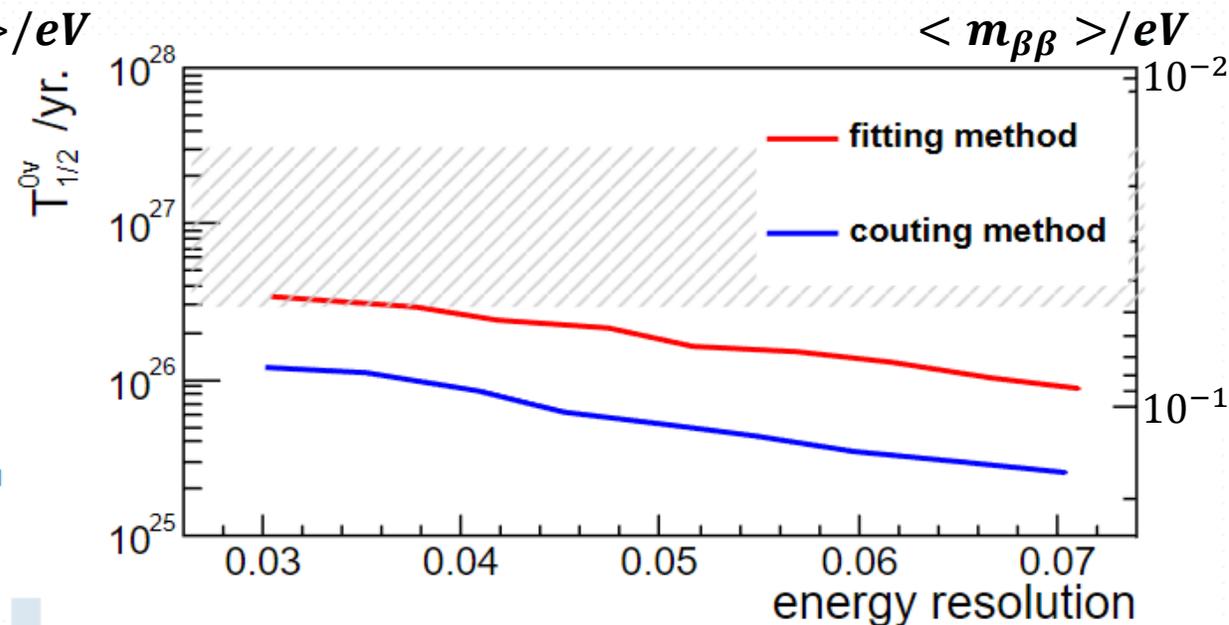
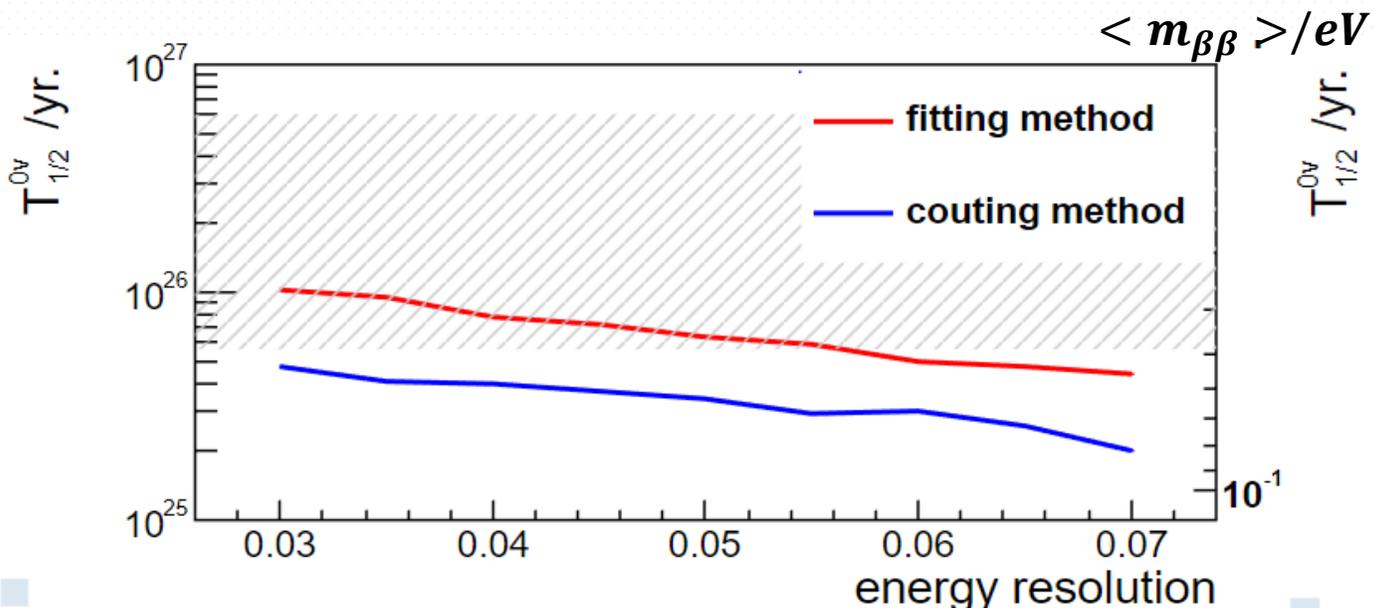
^{150}Nd 与 ^{130}Te 半衰期灵敏度对比

500吨探测器运行1年
掺杂10%天然Nd/Te

Preliminary result

Nature Nd, $\Sigma = 2.85 \text{ ton} \cdot \text{yr}$, $\delta = 3\% \sim 7\%$

Nature Te, $\Sigma = 17.25 \text{ ton} \cdot \text{yr}$, $\delta = 3\% \sim 7\%$



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，**能谱拟合法**给出的 $0\nu\beta\beta$ 灵敏度**更优**
- 作为粗略的估计，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 **$2.03 \times 10^{26} \text{ yr}$** ，对应 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ 为24 – 52 meV^*
- 初步结果显示，同样掺杂10%的天然Nd与天然Te对比， ^{130}Te 给出的 $0\nu\beta\beta$ 半衰期灵敏度较 ^{150}Nd 更高，但换算至有效中微子质量后 ^{150}Nd 给出更低的 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$

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

感谢聆听!

BackUp

灵敏度的定义

$0\nu\beta\beta$ 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：

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

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

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

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