

# 锦屏地下实验室的液闪无中微子双贝塔衰变计划

续本达（代表 JNE 合作组）

清华大学  
工程物理系  
高能物理研究中心

$0\nu\beta\beta$  研讨会 2023-05-22 中山大学珠海校区

# 液闪特色

# 粒子鉴别、能量分辨率、大靶质量不可兼得

$$\frac{m_e^2}{G_{0\nu} \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 M_{0\nu}^2} = T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} = \frac{\epsilon}{\sqrt{b}} \sqrt{\frac{Mt}{\Delta E}}$$

**实验测量目标**

**靶质量**

**信噪比:**

- 😊 低放射性
- 😊 高Q值
- 😊 双电子识别

**能量分辨率**

- 😊 高Q值

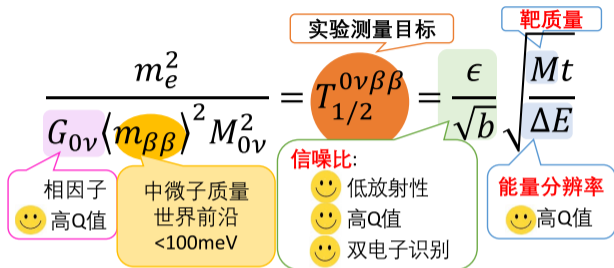
**相因子**

- 😊 高Q值

**中微子质量**

- 世界前沿
- <100meV

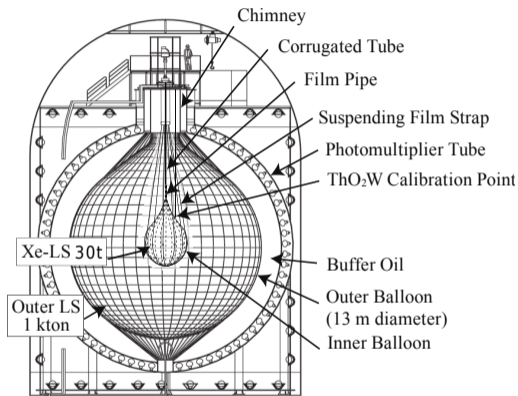
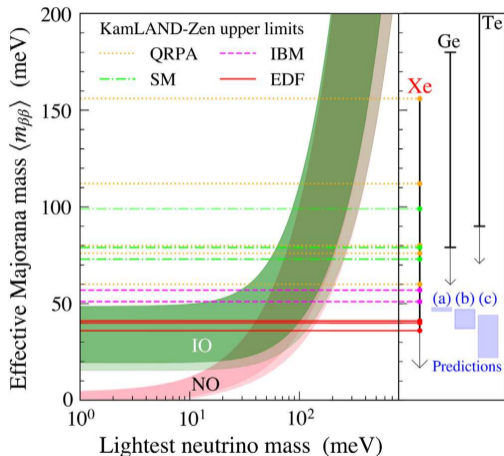
# 粒子鉴别、能量分辨率、大靶质量不可兼得



## 各类技术路线对比

类型	质量大	能量分辨率	粒子鉴别
液体闪烁体	oo		?
时间投影室	o (液态)		o (气态)
高纯锗半导体		oo	
辐射热计量		o	o (光读出)
漂移追踪器			oo

# KamLAND-Zen : 立足大靶质量, 尽一切可能压低本底



- KamLAND-Zen 在 2013 年、2016 年分别给出了  $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  的最强限制
- 2023 年,  $2.3 \times 10^{26}$  yr,  $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 36$  meV 至 156 meV,  
(10.1103/PhysRevLett.130.051801)

# KamLAND2-Zen 升级的关键：提升能量分辨率

锦屏地下实验  
室的液闪无中  
微子双贝塔衰  
变计划

续本达

液闪特色

掺钨液闪

液闪研发

同位素富集

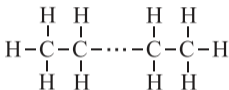
Dirac 属性验证

太阳中微子

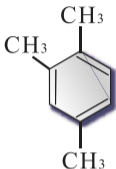
总结

备用

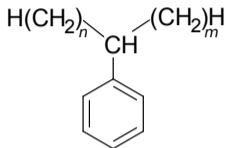
PMT



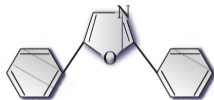
图：癸烷



图：偏三甲苯



图：线性烷基苯



图：二苯基恶唑

- ① 更亮的液闪，把 偏三甲苯 (18%) + 癸烷 (82%) + PPO 换为 LAB + PPO / bis-MSB

# KamLAND2-Zen 升级的关键：提升能量分辨率

锦屏地下实验  
室的液闪无中  
微子双贝塔衰  
变计划

续本达

液闪特色

掺钨液闪

液闪研发

同位素富集

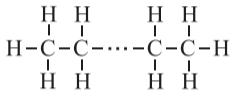
Dirac 属性验证

太阳中微子

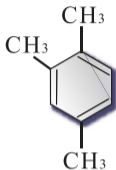
总结

备用

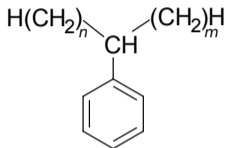
PMT



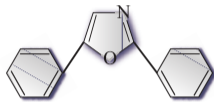
图：癸烷



图：偏三甲苯



图：线性烷基苯



图：二苯基恶唑

- ① 更亮的液闪，把 偏三甲苯 (18%) + 癸烷 (82%) + PPO 换为 LAB + PPO / bis-MSB
- ② 使用集光器 (Winston Cone) 达到更高光电倍增管 (PMT) 覆盖率  $\times 1.8$

# KamLAND2-Zen 升级的关键：提升能量分辨率

锦屏地下实验  
室的液闪无中  
微子双贝塔衰  
变计划

续本达

液闪特色

掺钨液闪

液闪研发

同位素富集

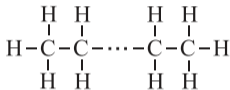
Dirac 属性验证

太阳中微子

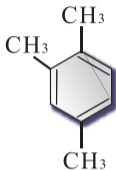
总结

备用

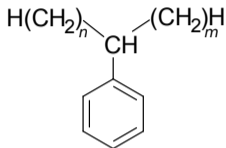
PMT



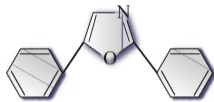
图：癸烷



图：偏三甲苯



图：线性烷基苯



图：二苯基恶唑

- ① 更亮的液闪，把 偏三甲苯 (18%) + 癸烷 (82%) + PPO 换为 LAB + PPO/bis-MSB
- ② 使用集光器 (Winston Cone) 达到更高光电倍增管 (PMT) 覆盖率  $\times 1.8$
- ③ 使用新型 PMT 将量子效率翻倍



# KamLAND2-Zen 升级的关键：提升能量分辨率

锦屏地下实验室的液闪无中微子双贝塔衰变计划

续本达

液闪特色

掺铀液闪

液闪研发

同位素富集

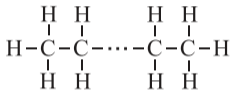
Dirac 属性验证

太阳中微子

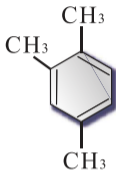
总结

备用

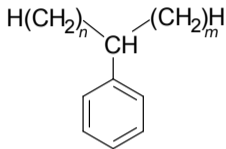
PMT



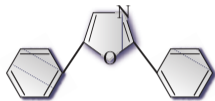
图：癸烷



图：偏三甲苯



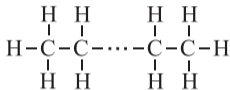
图：线性烷基苯



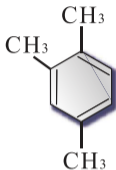
图：二苯基恶唑

- ① 更亮的液闪，把 偏三甲苯 (18%) + 癸烷 (82%) + PPO 换为 LAB + PPO/bis-MSB
- ② 使用集光器 (Winston Cone) 达到更高光电倍增管 (PMT) 覆盖率  $\times 1.8$
- ③ 使用新型 PMT 将量子效率翻倍
- ④ 宇宙线  $\mu$ - $^{136}\text{Xe}$  和  $\mu$ - $^{12}\text{C}$  散列本底 (神冈地下实验室 1 km 无法解决)

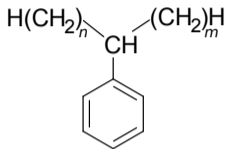
# KamLAND2-Zen 升级的关键：提升能量分辨率



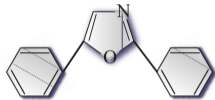
图：癸烷



图：偏三甲苯



图：线性烷基苯



图：二苯基恶唑

- ① 更亮的液闪，把 偏三甲苯 (18%) + 癸烷 (82%) + PPO 换为 LAB + PPO/bis-MSB
- ② 使用集光器 (Winston Cone) 达到更高光电倍增管 (PMT) 覆盖率  $\times 1.8$
- ③ 使用新型 PMT 将量子效率翻倍
- ④ 宇宙线  $\mu$ - $^{136}\text{Xe}$  和  $\mu$ - $^{12}\text{C}$  散列本底 (神冈地下实验室 1 km 无法解决)

努力并跑 (“毛坯房” 装修更高效)

在锦屏地下实验室 2.4 km, 能否直接实现 KamLAND2-Zen 的设计指标?

- 2023-04-09 下挖工程完成，最大化球形探测器体积。
  - 与地下实验室同步建设



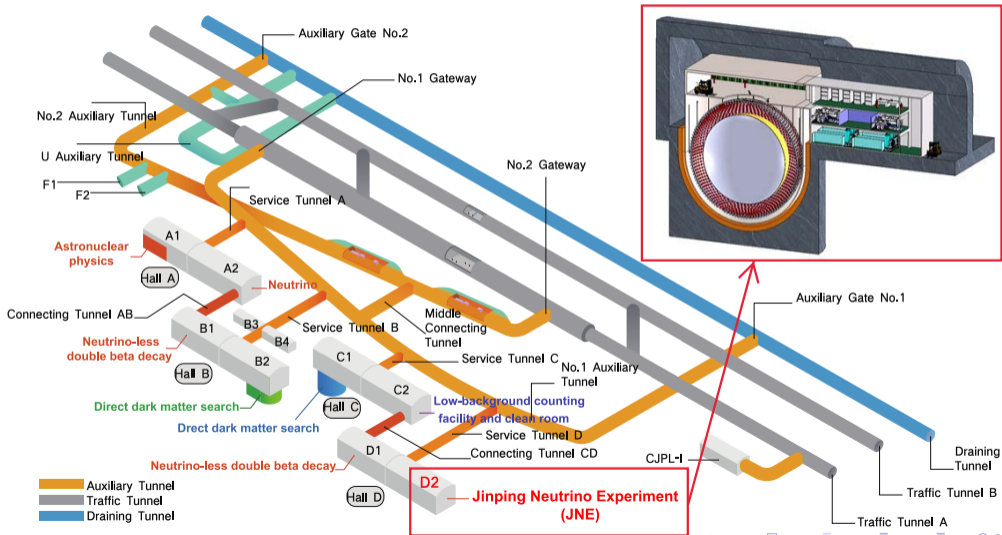
图：下挖施工



图：墙面支护完成

- 2026 年完工取数，建成 500 吨水切伦科夫太阳中微子观测站。

# 锦屏地下实验室的 500 吨液闪实验



- 一期目标 (2026–2027 年)：  
在极低本底下，水相测量太阳  $^8\text{B}$  中微子谱形与通量。

- 一期目标 (2026–2027 年)：  
在极低本底下，水相测量太阳  $^8\text{B}$  中微子谱形与通量。
- 完成第一期观测后，如果进行无中微子双贝塔衰变改造：

## 在锦屏实现 KamLAND2-Zen 的标准

KamLAND2-Zen	锦屏中微子实验 二期工程
更亮的液闪	LAB 掺杂液闪
使用 Winston Cone	3D 的 PMT 集光器设计，效率高于 1D
高量子效率 PMT	北方夜视新型 $\varnothing 20\text{ cm}$ MCP-PMT

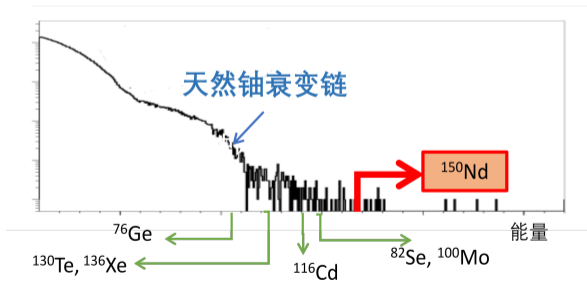
[arXiv:1703.07527](https://arxiv.org/abs/1703.07527) , [arXiv:2303.05373](https://arxiv.org/abs/2303.05373)

# 掺钷液闪

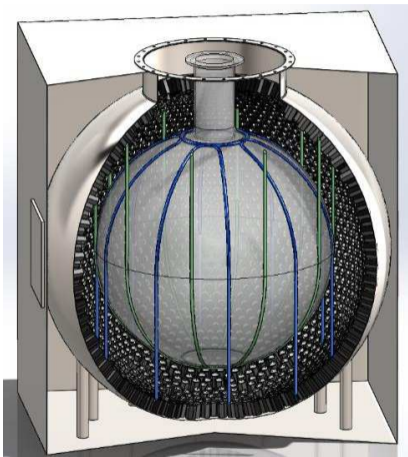
- 当  $0\nu\beta\beta$  被发现后，需要多种核素交叉检验
  - 排除原子核矩阵元的模型依赖，获得精准的  $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  测量
- 压低天然放射性干扰，提升能量分辨率
  - 最好  $Q_{\beta\beta}$  值大于 3 MeV



- 当  $0\nu\beta\beta$  被发现后，需要多种核素交叉检验
  - 排除原子核矩阵元的模型依赖，获得精准的  $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  测量
- 压低天然放射性干扰，提升能量分辨率
  - 最好  $Q_{\beta\beta}$  值大于 3 MeV



	$Q_{\beta\beta}/\text{MeV}$	丰度/%
$^{150}\text{Nd}$	3.37	5.4
$^{100}\text{Mo}$	3.04	9.7
$^{96}\text{Zr}$	3.35	2.8
$^{48}\text{Ca}$	4.27	0.19



500t 液闪，质量分数 2% 的天然钕（初试），10% 的富集钕（终级）



59 Pr 镨	60 Nd 钕	61 Pm 钷	62 Sm 钐	63 Eu 铕	64 Gd 钆
------------	------------	------------	------------	------------	------------

- 稀土元素钕，我国矿藏丰富，占世界绝大部分产量；
- 工业用途：激光器、永磁铁、电动机、发电机
- 磷酸盐矿石，工业原料为  $\text{NdCl}_3$

- SNO+ 早年样品
- 融合大亚湾液闪技术



掺钕液闪  
合成工艺

再创新

大亚湾中微子实验  
研发掺钕液闪工艺

59 Pr 镨	60 Nd 钕	61 Pm 钷	62 Sm 钐	63 Eu 铕	64 Gd 钆
------------	------------	------------	------------	------------	------------

- SNO+ 早年样品
- 融合大亚湾液闪技术

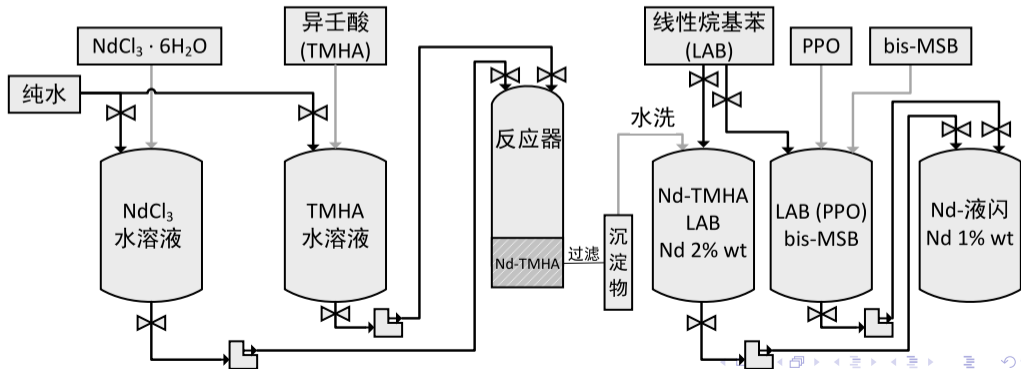


掺钆液闪合成工艺

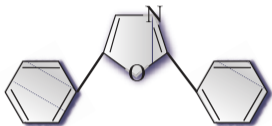
再创新

大亚湾中微子实验研发掺钆液闪工艺

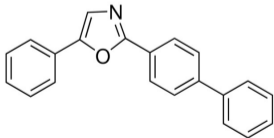
59 Pr 镨	60 Nd 钆	61 Pm 钷	62 Sm 钐	63 Eu 铕	64 Gd 钆
------------	------------	------------	------------	------------	------------



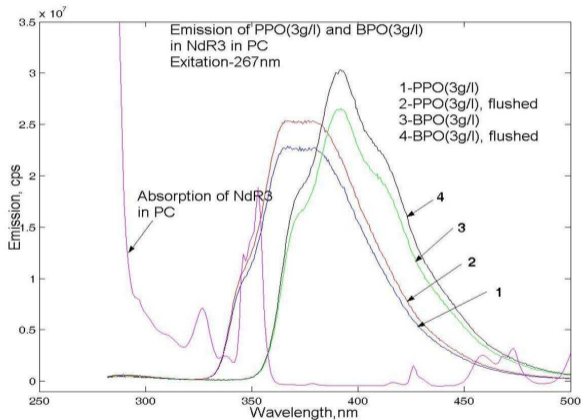
- 把 PPO 换为 BPO，发光谱避开  $^{150}\text{Nd}$  的发光谱



图：二苯基恶唑：PPO



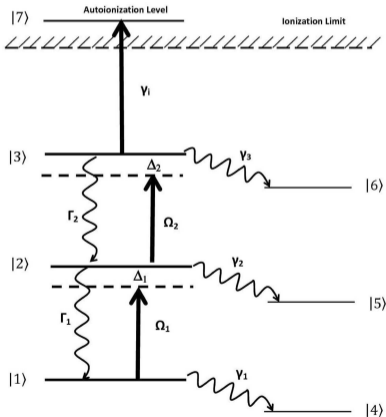
图：2-(4-联苯基)-5-苯基唑：BPO



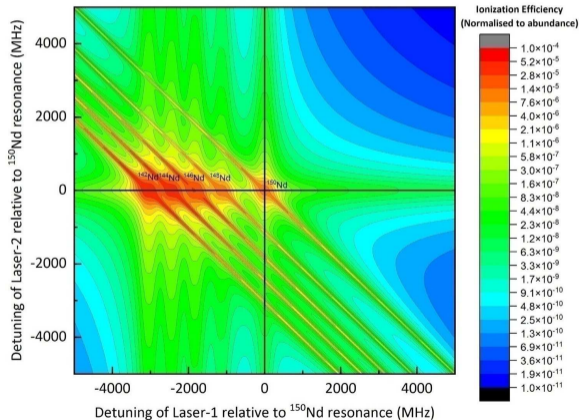
- 作为稀土元素，Nd 没有气态物料，无法使用离心机组

- 作为稀土元素，Nd 没有气态物料，无法使用离心机组

## 原子蒸气激光同位素分离 (atomic vapor laser isotope separation, AVLIS)



Suryanarayana 2022



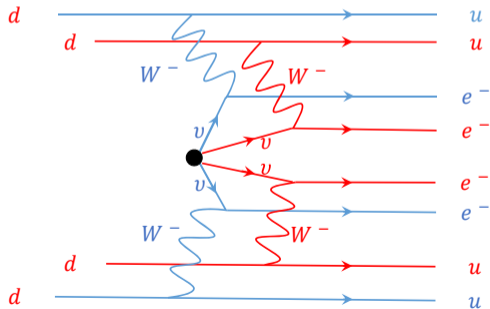
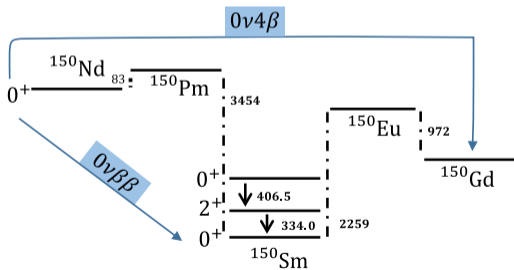
- 倘或 10 年后, JUNO 测出中微子质量为逆序, 我们把实验灵敏度推进到了  $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 1 \text{ meV}$  仍然没有观察到  $0\nu\beta\beta$ , 如之奈何?



- 倘或 10 年后, JUNO 测出中微子质量为逆序, 我们把实验灵敏度推进到了  $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 1 \text{ meV}$  仍然没有观察到  $0\nu\beta\beta$ , 如之奈何?
- 反之, 倘或 20 年后, 我们把实验灵敏度推进到了  $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 1 \text{ meV}$ , 仍然没有观察到  $0\nu\beta\beta$ , 如之奈何?

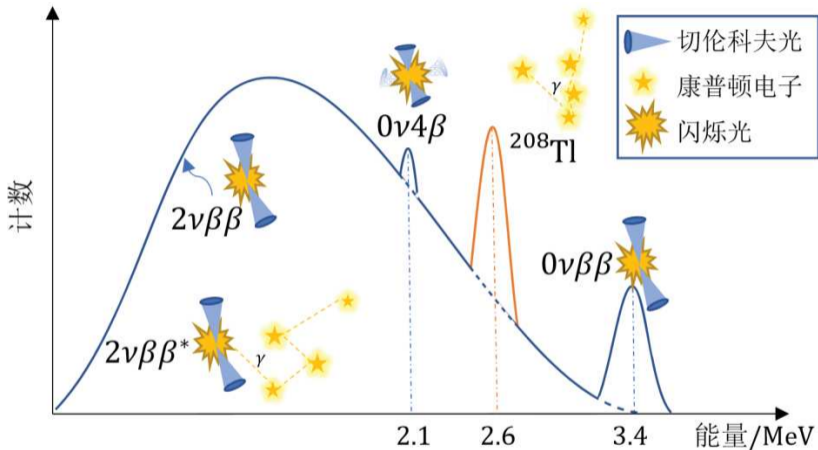
- 倘或 10 年后, JUNO 测出中微子质量为逆序, 我们把实验灵敏度推进到了  $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 1 \text{ meV}$  仍然没有观察到  $0\nu\beta\beta$ , 如之奈何?
- 反之, 倘或 20 年后, 我们把实验灵敏度推进到了  $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 1 \text{ meV}$ , 仍然没有观察到  $0\nu\beta\beta$ , 如之奈何?

## 无中微子四贝塔衰变 $0\nu 4\beta$ Heck and Rodejohann 2013



- 同一实验交叉验证中微子的费米子属性  $T_{1/2}^{0\nu 4\beta} \sim 1 \times 10^{46} \text{ y}$

# 本底与待寻找的目标信号



- $0\nu 4\beta$  主要的本底是  $2\nu 2\beta$ ，应竭力提升能量分辨率
- 若识别切伦科夫光，有可能测量产生的电子数目，区分本底和电子动量等
  - 有待详细预研

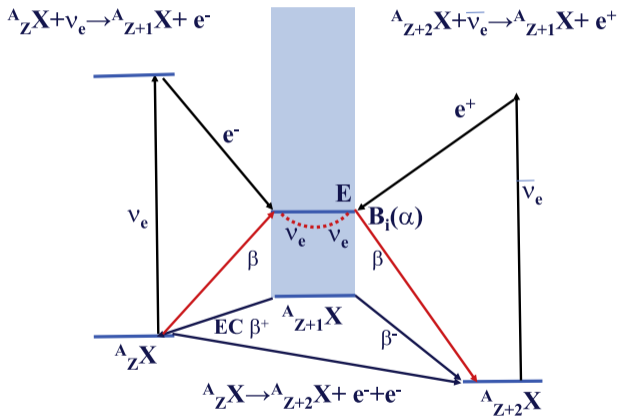
## 500 t 液闪，取数两年，能量分辨率 5% @ 1 MeV

PRELIMINARY!!!

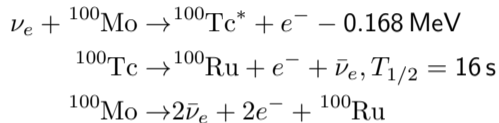
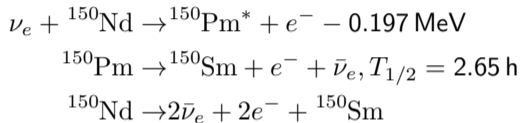
	丰度	靶质量 分数	$^{150}\text{Nd}$ 曝光量	$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}$ 灵敏度	$T_{1/2}^{0\nu4\beta}$ 灵敏度	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ 灵敏度
初试 (2028–2030)	5.6%	2%	1 吨年	$4 \times 10^{25}$ y	$3 \times 10^{22}$ y	$\sim 55$ meV
终级 (2033?–)	90%	10%	80 吨年	$3 \times 10^{26}$ y	$2 \times 10^{23}$ y	$\sim 20$ meV

- 基于 Vergados, Ejiri, Simkovic 2012 的粗略数量级估计，仅供定性参考

## 延迟符合 – 液闪



Ejiri, H. et. al., Physics Reports, 797 (March 23, 2019): 1–102.



- 掺钷液闪工艺基础迁移，稀土元素化学性质相近

- 纳米晶体掺杂液闪

SAE Arai et. al., Journal of the Ceramic Society of Japan 127, no. 1 (2019): 28–34.

- 恰当寿命激发态有可能实现太阳中微子的延迟符合测量
  - 显著压低放射性本底，大大降低测量的能量阈值
  - 研究太阳  $pp$  和 CNO 中微子

	Nd	Mo
天然丰度	5.6%	9.74%
$Q_{\beta\beta}/\text{MeV}$	3.37	3.035
液闪制备	Nd-TMHA	SrMoO <sub>4</sub> 纳米晶体
同位素富集	原子蒸气激光	MoF <sub>6</sub> 离心
靶核质量分数	2%	0.054%
太阳中微子	有待测量 $^{150}\text{Pm}$ 的激发态	16s 弱符合

# 总结

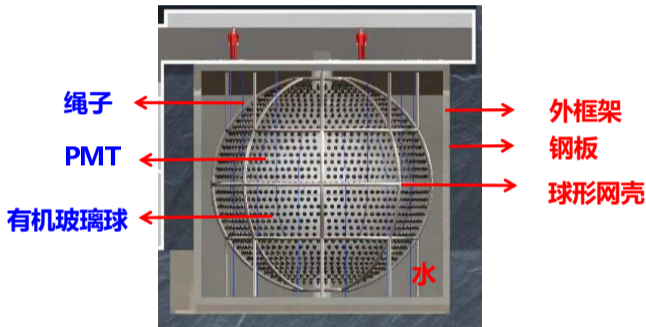
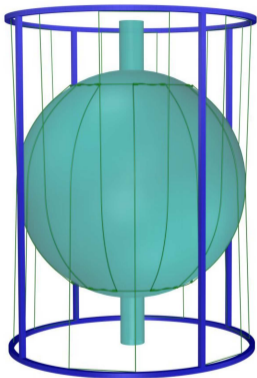




锦屏中微子实验 (JNE) 可以在一期  $^8\text{B}$  测量之后开展  $0\nu\beta\beta$  寻找

- 液闪  $^{150}\text{Nd}$  特点：与现有实验计划互补，同时寻找  $0\nu4\beta$ ，观测太阳  $pp$  中微子
  - 初试（天然钷，成熟液闪配方）能达到有竞争力的结果。
- 终级版挑战：原子蒸气激光同位素分离，高浓度液闪的研发

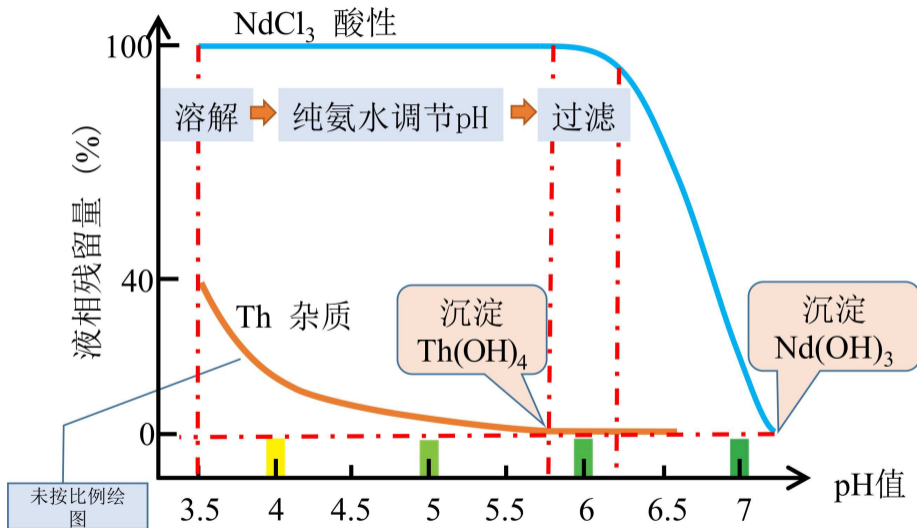
备用

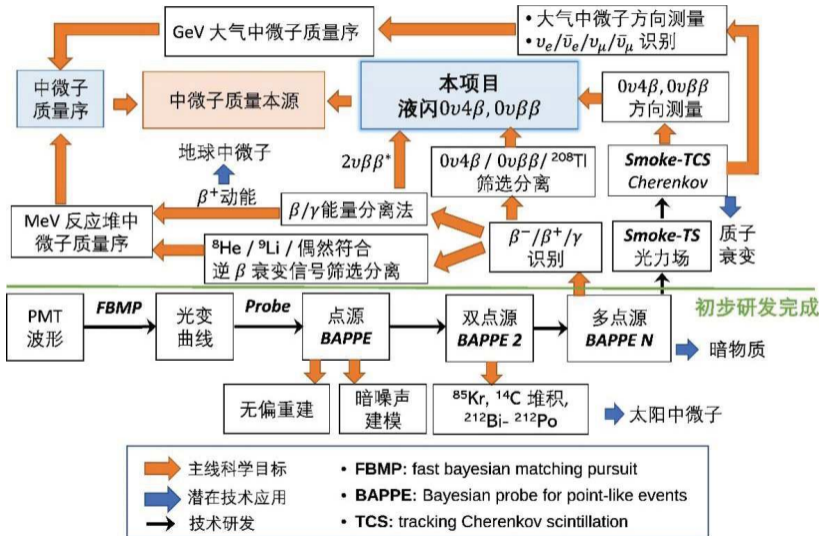


- 不锈钢方形水箱 12.9 m × 14 m × 13.2 m
- 球形钢网壳支持 PMT 阵列 (2000–8000)
- 绳索穿过网壳，上下支撑有机玻璃球形容器

- $\varnothing 20$  cm 微通道板 (MCP) 光电倍增管 (PMT) [arXiv:2303.05373](https://arxiv.org/abs/2303.05373)
  - 快时间响应 ( $\sigma_{TT} < 1.5$  ns), 高光子检出效率 ( $\sim 30\%$ )。
  - 低  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  本底玻璃筛选。







续本达

液闪特色

掺钷液闪

液闪研发

同位素富集

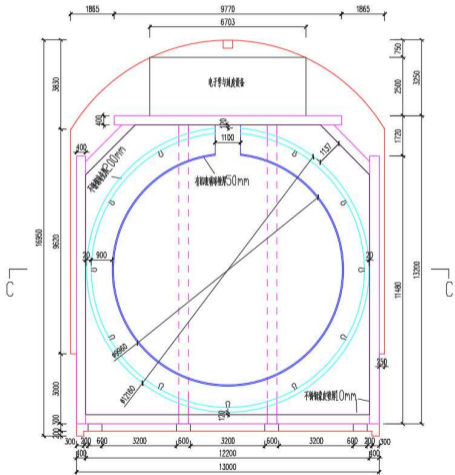
Dirac 属性验证

太阳中微子

总结

备用

PMT

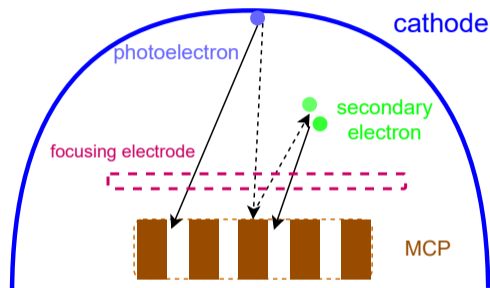
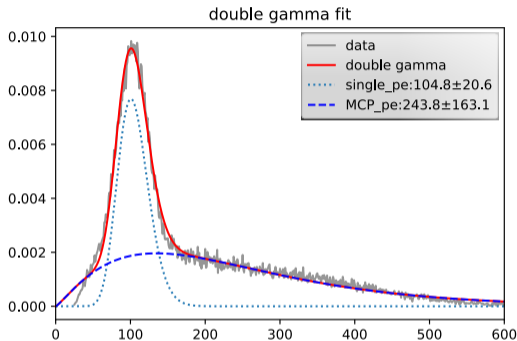


宽 12.9m  
长 14m  
高 13.2m



- 绳拉力  $< 100$  kN





- 直接进孔电子体现为“窄小”分量，经表面放大的电子体现为“宽大”分量；
- 处于猜想阶段，正在设计实验进行验证；
- “宽大”分量一个光子对应的电荷值变化大，对光子计数和中微子能量测量产生更大负面影响。