

味物理前沿研讨会暨味物理讲座100期特别活动

兆电子伏中微子物理 研究技术进展汇报

王喆

清华大学



清华大学
Tsinghua University

2026年2月3日

wangzhe-hep@mail.tsinghua.edu.cn

汇报提纲

- 一 . Majorana中微子与液闪实验
- 二 . 研究尝试，水基掺碲液闪
- 三 . 研究理解一，分子结构，“电”属性，液闪淬灭
- 四 . 研究理解二，分子结构，“磁”属性，液闪淬灭
- 五 . 研究总结

科学意义：无中微子双贝塔衰变

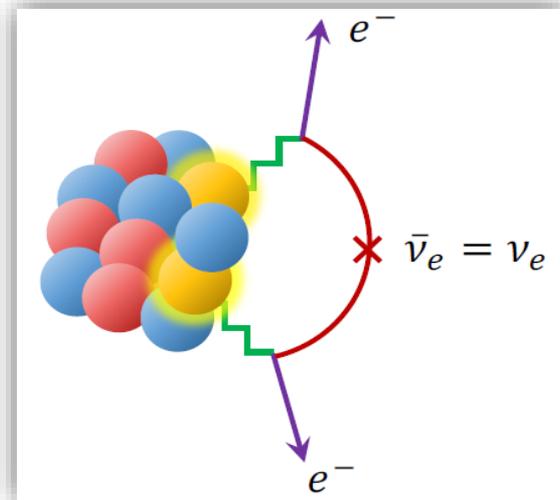
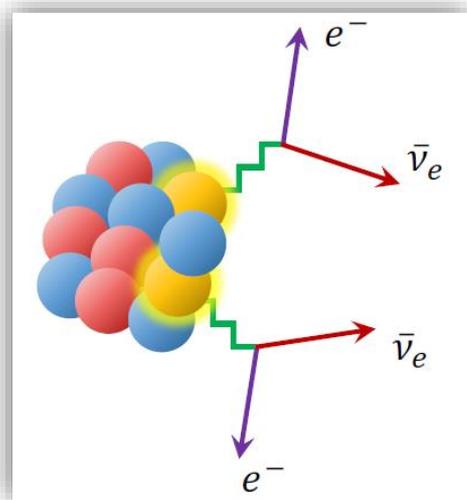
Dirac中微子：轻子数守恒

Majorana中微子： $\nu \equiv \bar{\nu}$ ，轻子数守恒不准确，超出标准模型的其他结构，宇宙学

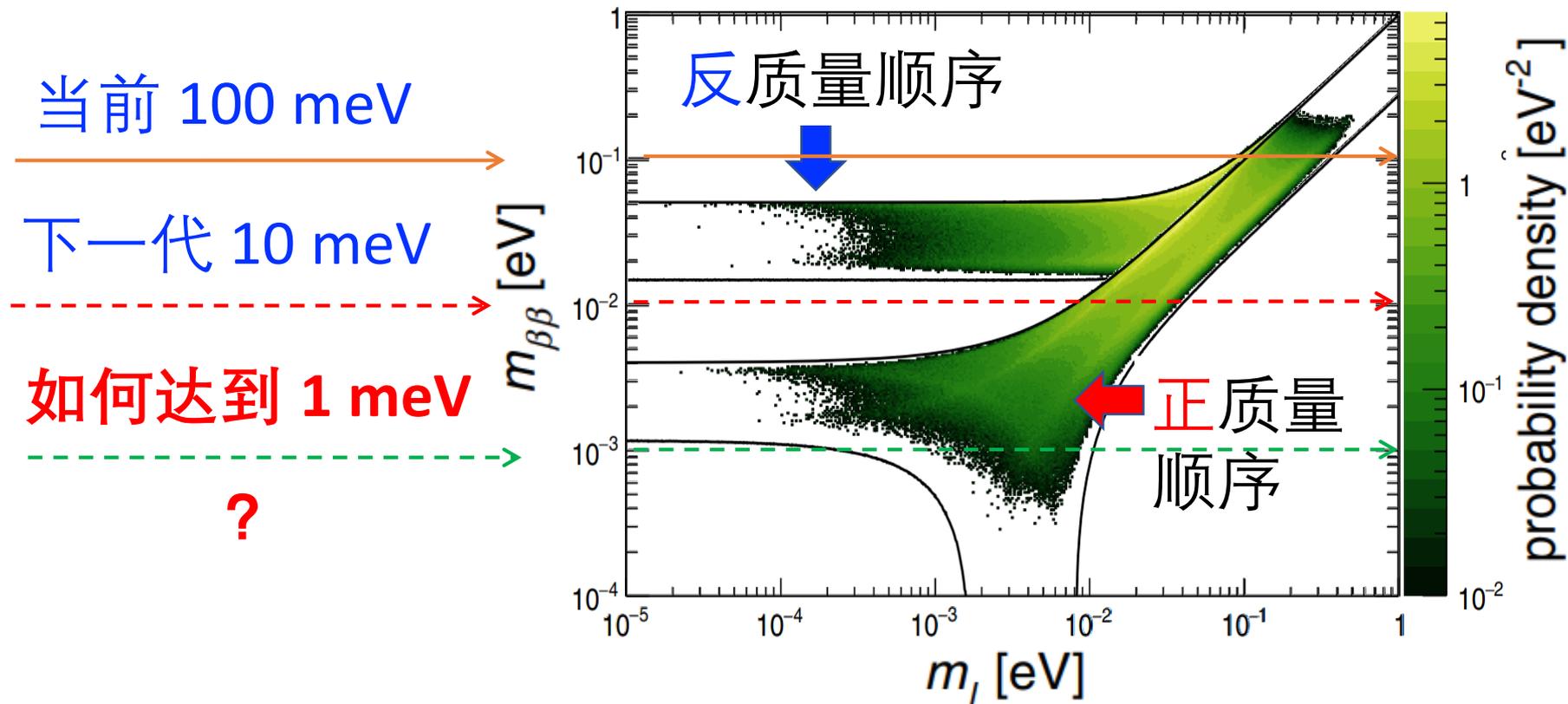
无中微子的双贝塔衰变 ($0\nu\beta\beta$) 是目前唯一的实验探测方案

$$2\nu\beta\beta : (Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$$

$$0\nu\beta\beta : (Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + 2e^-$$

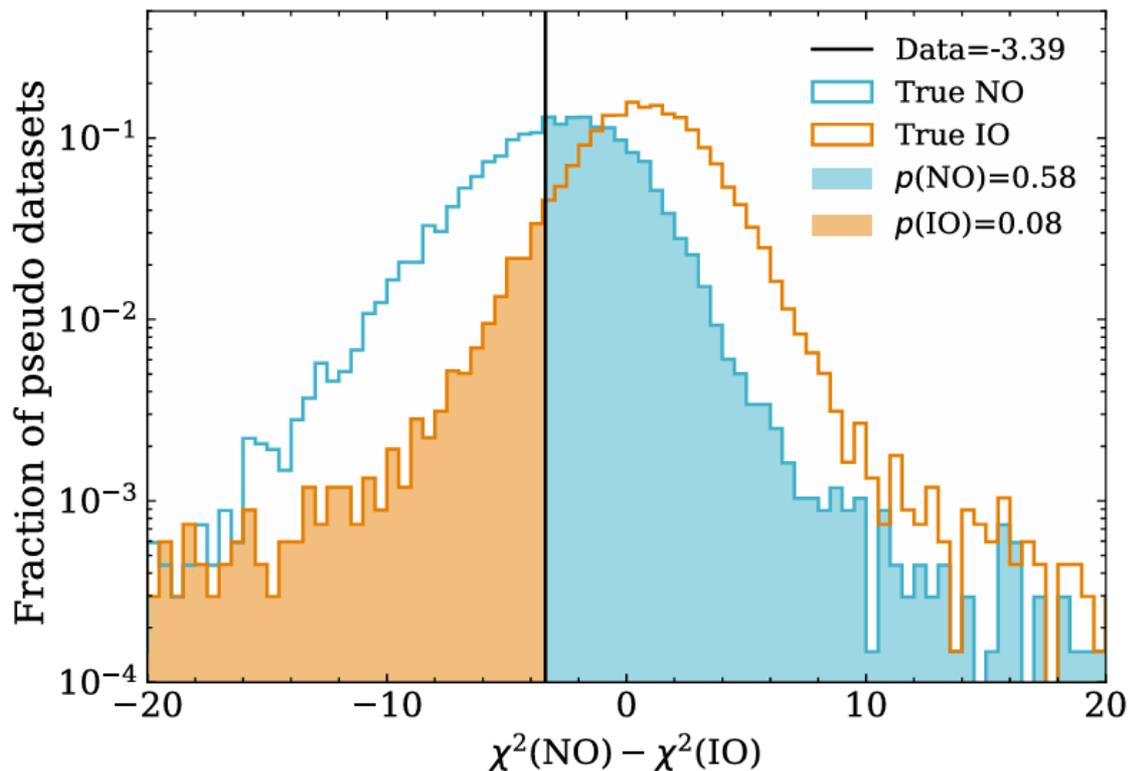


研究现状和期待



PhysRevD.96.053001(2017)

质量谱顺序的测量结果

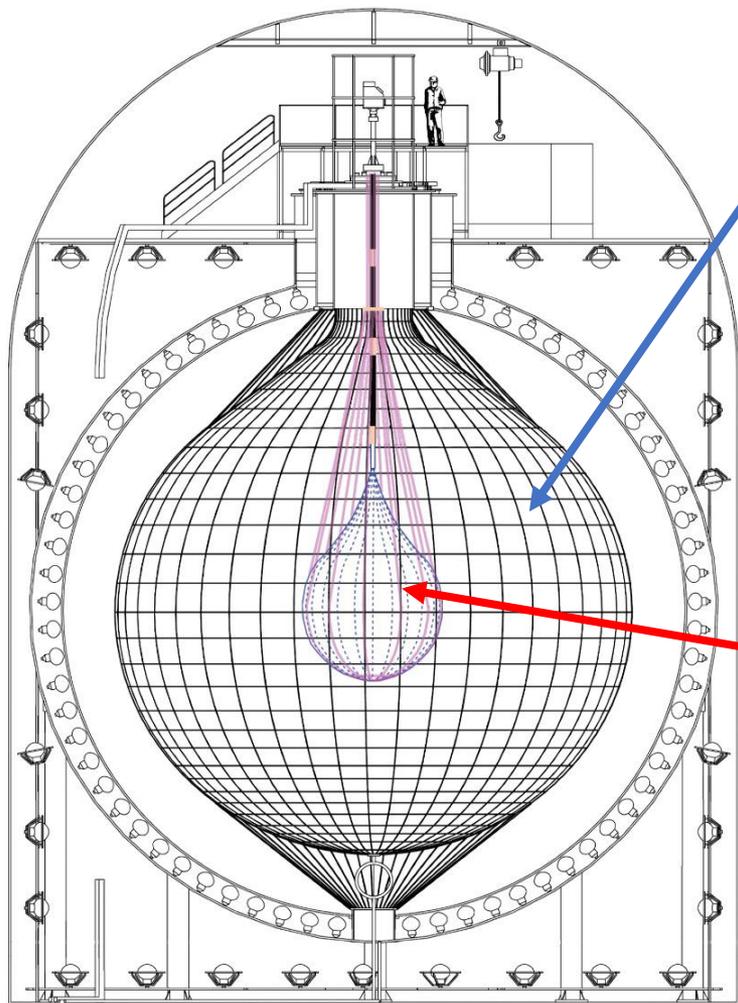


微微倾向于正质量谱顺序假设，逆质量谱顺序假设被以 1.2σ 排除

T2K、SK对质量谱顺序的联合测量结果

PRL 134, 011801 (2025)

KamLAND-Zen实验简介



中心探测器：液体闪烁体+PMT圈层

可以理解为一个大的电磁量能器

核心物质：

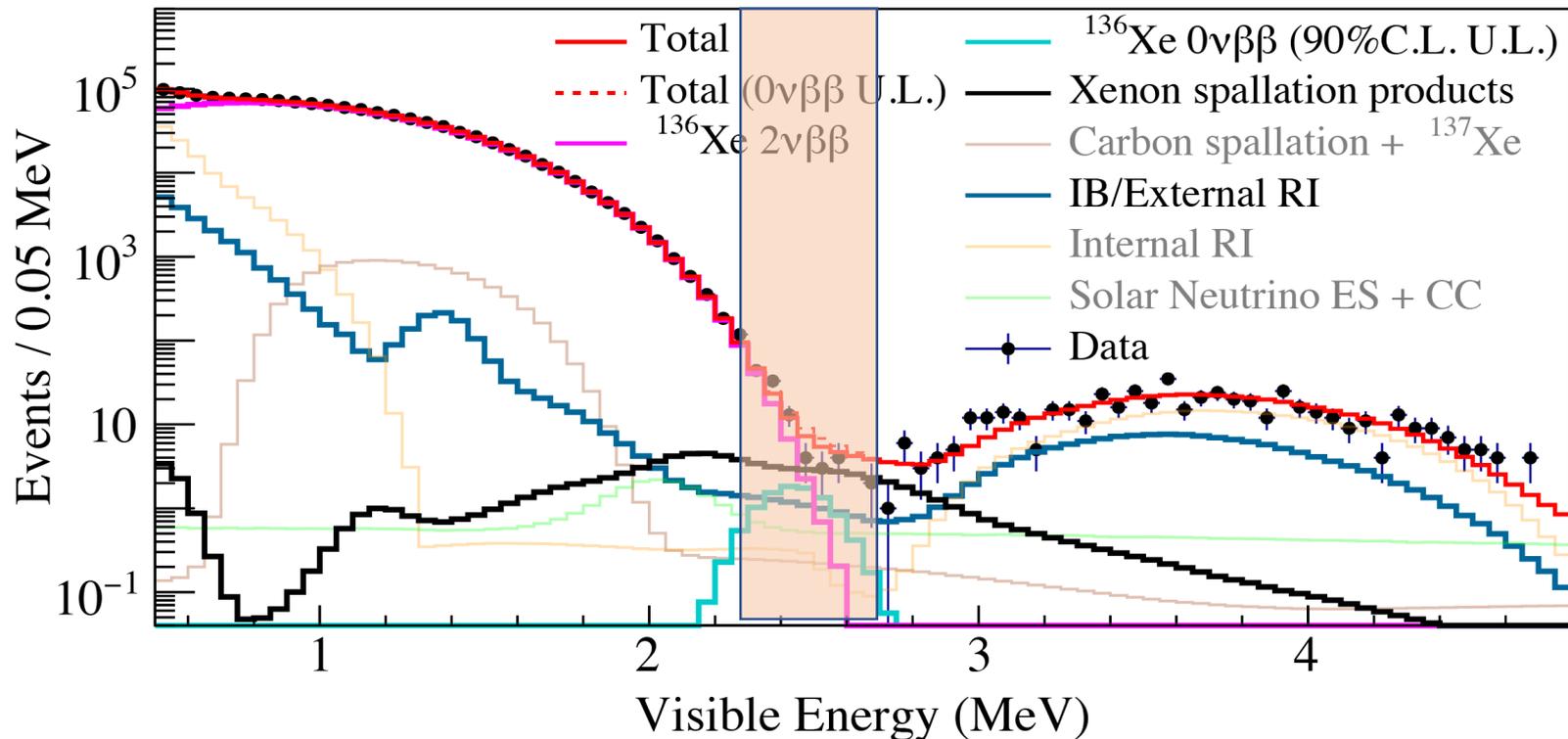
掺氙液闪球，直径3.8m，共24t

● 3% enriched xenon

→ 745 kg Xe (含91% ^{136}Xe)

$Q_{\beta\beta} = 2.458 \text{ MeV}$

KamLAND-Zen实验结果

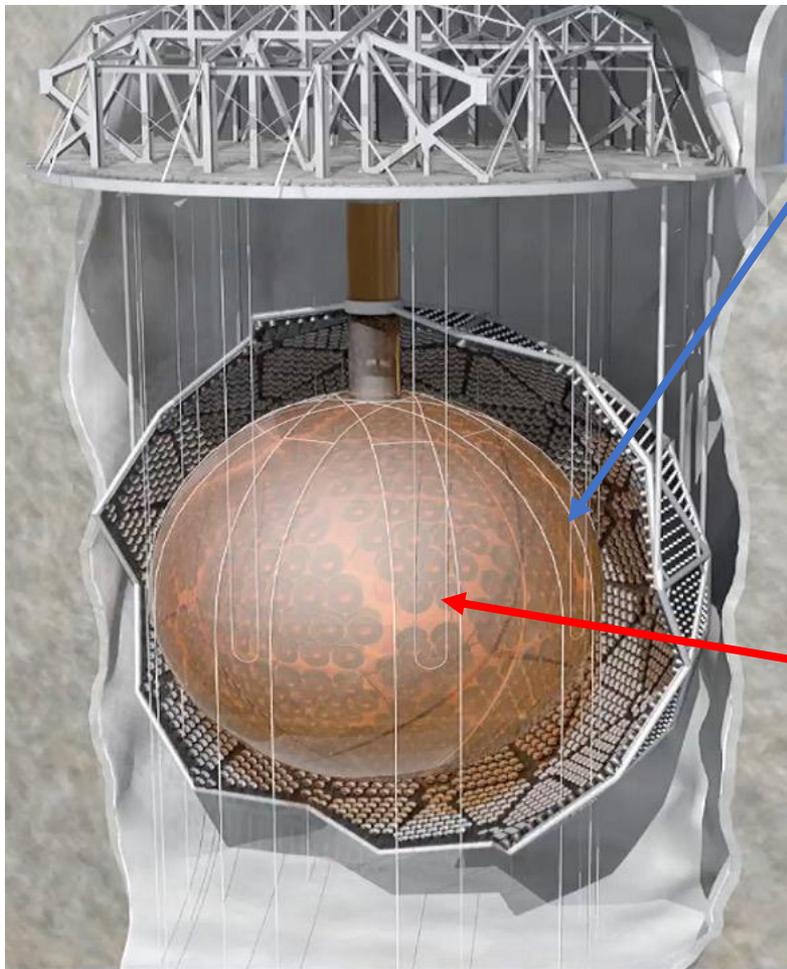


目前的实验结果: $T_{1/2}^{0\nu} > 3.8 \times 10^{26}$ 年

有效Majorana质量: 28-122 meV

• *Phys.Rev.Lett.* 135 (2025) 26, 262501

SNO+ 实验的计划



中心探测器：液体闪烁体+PMT圈层

可以理解为一个大的电磁量能器

核心物质：

液体闪烁体+含碲 (Te) 化合物 (TeBD)

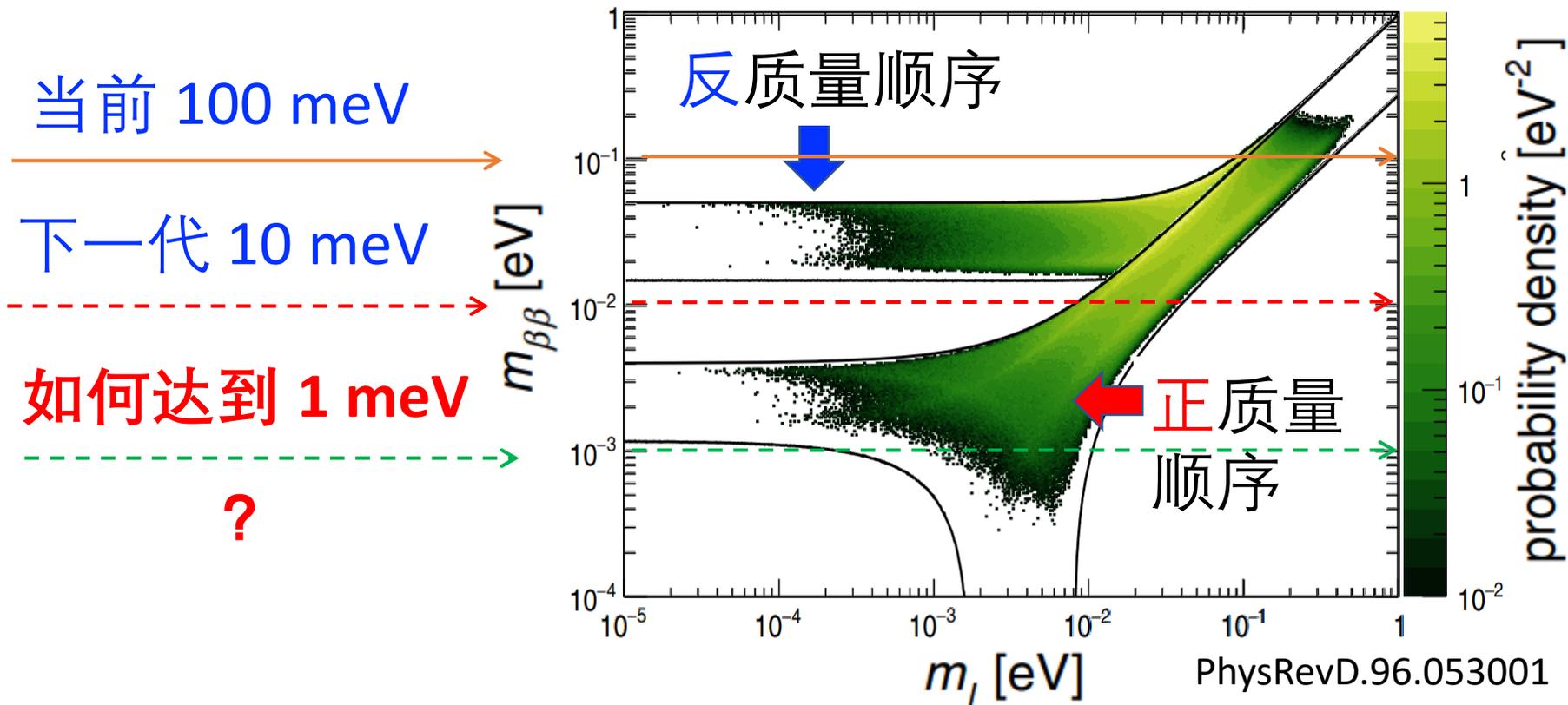
液闪 780 吨

混入天然碲 > 4 吨

碲含量 > 0.5% 水平

Benjamin Tam, IOP Joint Meeting 2024

Te液闪探测技术的需求



SNO+, KamLAND-Zen, 江门中微子实验都在探索这个问题

Te液闪探测技术的需求

- 理论上，更小的 $m_{\beta\beta}$ ，对应更长的衰变寿命，平方反比关系

$$T_{1/2}^{0\nu} = \frac{1}{G|M|^2\langle m_{\beta\beta}\rangle^2}$$

- 实验上，需要更多的靶质量，曝光时间，更低的本底，更高的能量分辨率

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \sqrt{\frac{M t}{\Delta E B I}}$$

液闪技术在 $0\nu\beta\beta$ 的强竞争力

1. 超大质量
2. 极低本底
3. 够用的能量分辨率
4. 已有一些大的装置
 - KamLAND-Zen, 780吨
 - SNO+, 780吨
 - 江门, 20000吨, 17612 20" large-PMTs and 25600 3" small-PMTs; 78% photocoverage, ~1600 PE/MeV
预期的能量分辨率 2.95% resolution @ 1 MeV

Te液闪探测技术的需求

^{130}Te 优势: $Q=2.5\text{ MeV}$
天然丰度34% (无需富集)
价格低 ($\sim 1/10\ ^{136}\text{Xe}$)

如何达到1 meV水平? ^{130}Te 质量x100

-参考SNO+: 10 meV计划

2吨 ^{130}Te

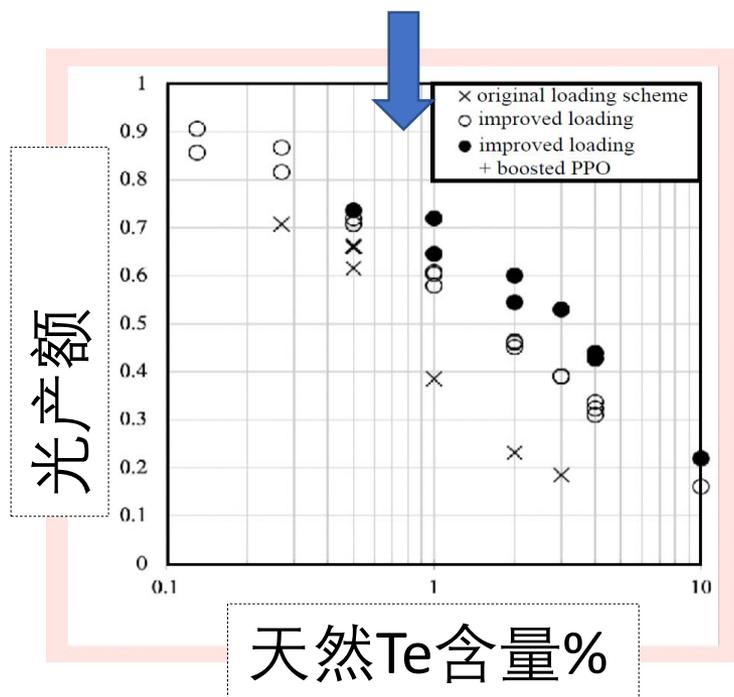
(液闪 $^{\text{nat}}\text{Te}$ 含量2.5%, w/w)

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \sqrt{\frac{M t}{\Delta E B I}}$$

- 江门实验, SNO+靶体积x20, Te含量x10
==> ^{130}Te 在400吨规模

目前掺Te液体闪烁体的核心问题

淬灭严重，当Te含量达到~1% (w/w)，光产额急剧下降至50%，达到5%，光产额为~0



SNO+论文 (Biller) : NIM A 1051 (2023) 168204

JUNO论文 (Ding) : NIM A 1049 (2023) 168111

Russia论文 (Suslov) : NIM A 1040 (2022) 167131

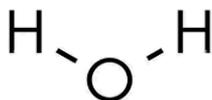
透明度，溶解性等
是次要问题

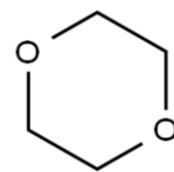
研究尝试

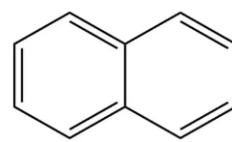
水基掺碲液闪

水基掺碲液闪组分

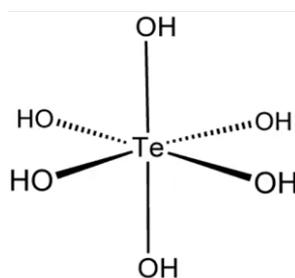
• 水， 二氧环己烷， 萘， 碲酸， 2,5-二苯基恶唑

• 水： H_2O ， 极性分子 

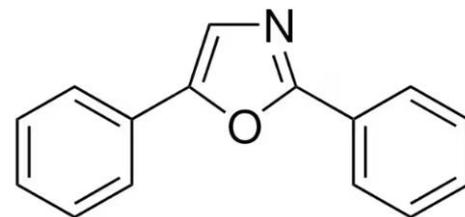
• 二氧环己烷： $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ 

• 萘： C_{10}H_8 

• 碲酸： $\text{Te}(\text{OH})_6$ ， 极性



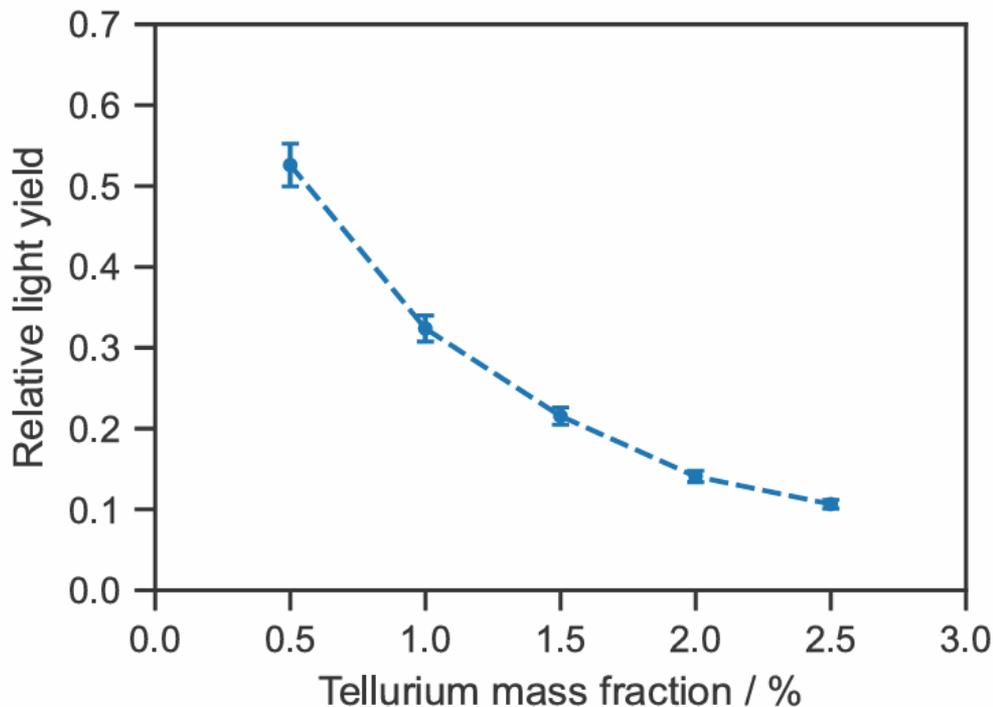
• 2,5-二苯基恶唑 (PPO)： $\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{NO}$



二氧环己烷——水基掺碲液闪原理

- 水：碲酸的溶剂
- 二氧环己烷：
 1. 萘和2,5-二苯基恶唑的溶剂
 2. 无机物水、碲酸和有机物混溶的载体
 3. 第一荧光物质
- 萘：荧光物质；
- 2,5-二苯基恶唑（PPO）：荧光物质，波长位移计

二氧环己烷，水基掺碲液闪性质



实现了一种水基掺碲液闪，光产额与有机液闪相当。可直接应用于其他无机盐。

看到了淬灭是有机和水基液闪的关键问题，我们集中精力研究了淬灭问题

研究理解一

分子结构，“电”属性，
液闪淬灭

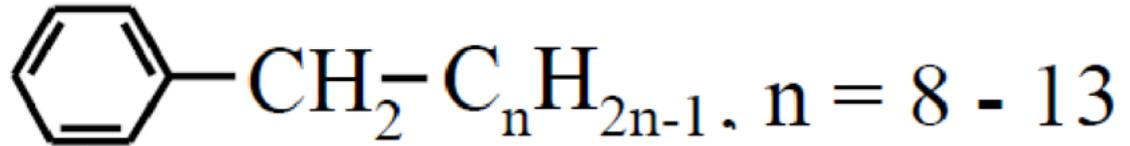
两成分液体闪烁体

- **第一成分**：溶剂，吸收粒子辐射能量，发射短波闪烁光，质量体积都占主体，**给体**
- **第二成分**：溶质，波长位移剂（吸收短波辐射，发射长波光，给出更长的衰减长度，适合大体积探测器），质量和体积都小，**受体**

LAB（第一成分）	PPO（第二成分）
直链式烷基苯	2,5-二苯基恶唑 (2,5-diphenyloxazole)
溶剂，质量主体	3 g/L
发射谱峰在380 nm	吸收峰在380 nm; 发射谱峰在430 nm

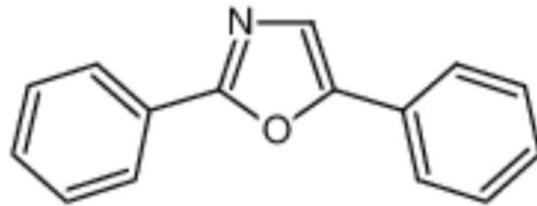
两成分液体闪烁体

- LAB



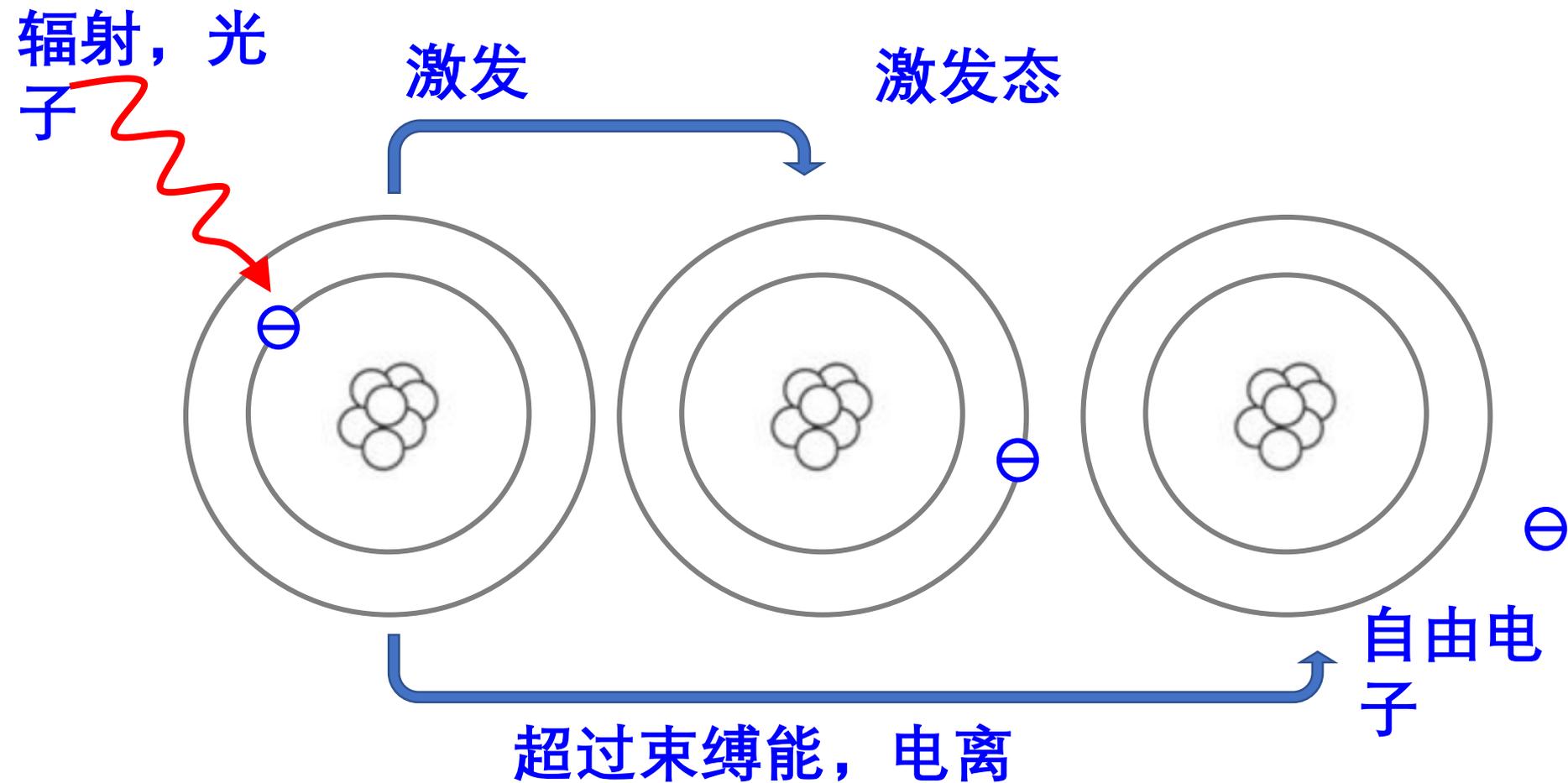
闪烁光发光基团，第一组分，给体

- PPO



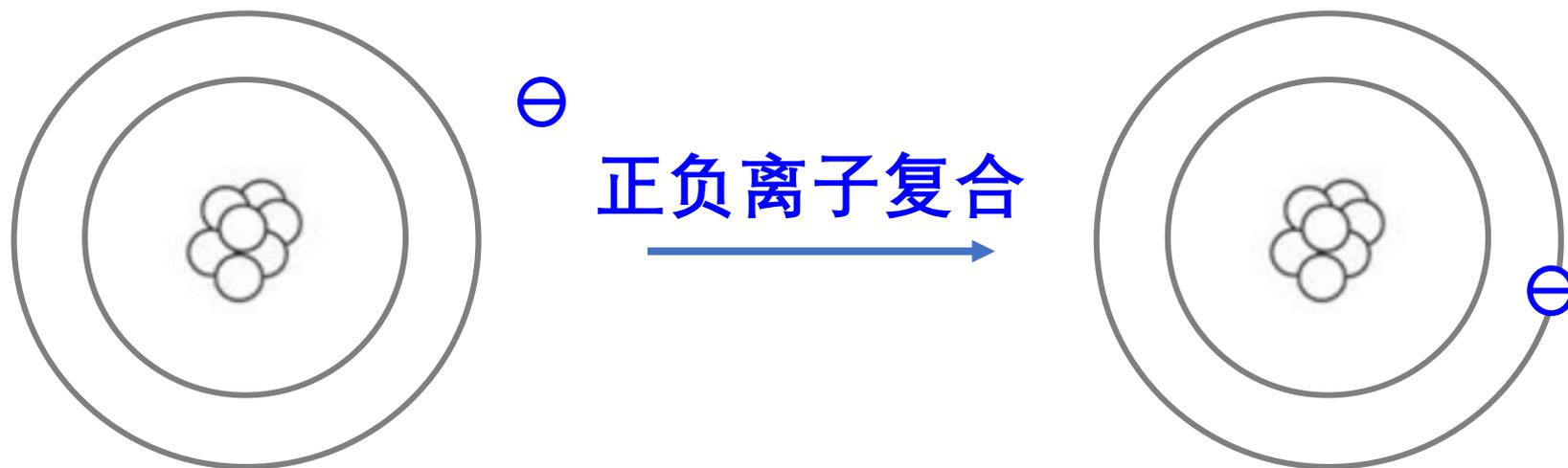
波长位移剂，第二组分，受体

辐射能量沉积过程



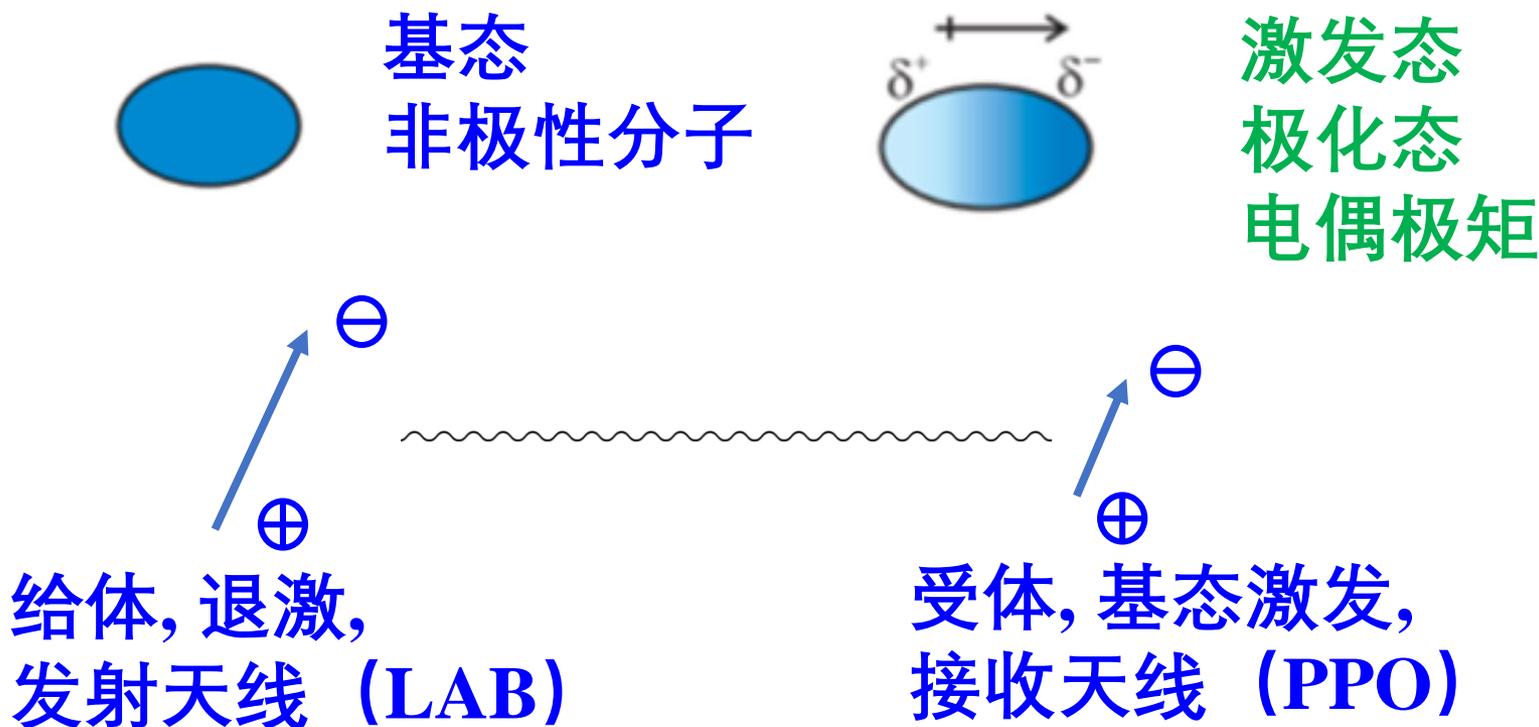
正负离子复合，发光过程

- 第一组分，给体
 - 吸收绝大部分的能量沉积
 - 溶剂中：激发态，电子，阳离子
 - 激发态：退激发，发闪烁光(衰减长度短)
 - 电子（负离子）和阳离子复合，回到激发态，也贡献到闪烁光

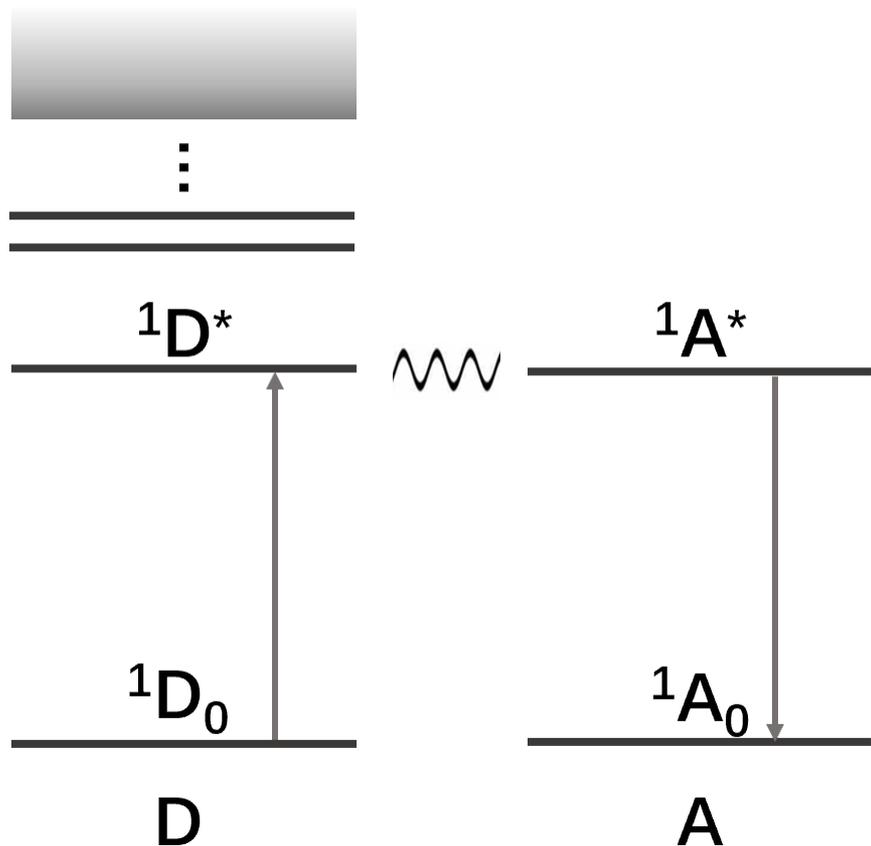


从给体到受体的能量转移

- 电偶极偶极相互作用: 长程相互作用
- 电荷交换作用: 短程相互作用 (碰撞, 电子云交叠)



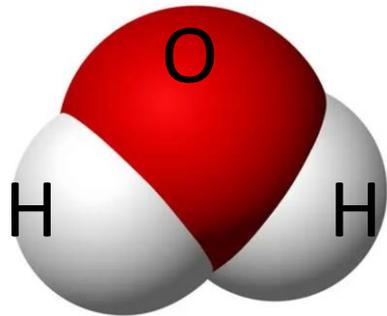
能量沉积与能量转移的另一图示



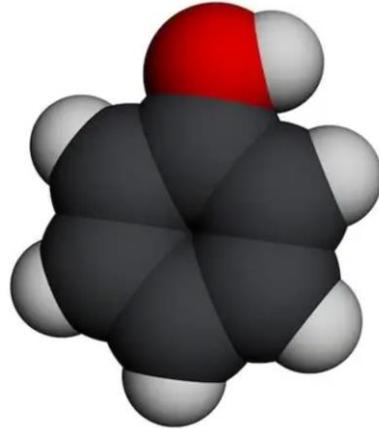
- 低受体浓度条件下，能量转移以电偶极-偶极跃迁为主
- 受体发射波长较长，更少的自吸收，更好的透明度，匹配更高的PMT量子效率。
(江门实验，20000吨，探测器直径41米)

极性基团，介电常数

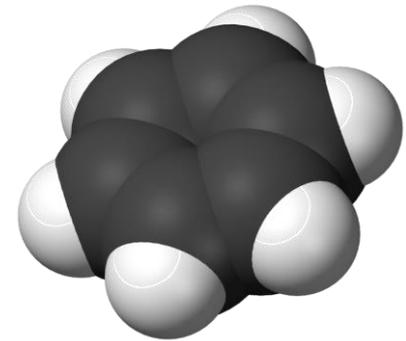
- 水分子是极性分子
- 醇类分子含有极性基团，羟基 (-OH)
- 苯分子是无极性分子
- 极性基团是亲电性的(吸引电子，溶解电子)



H₂O

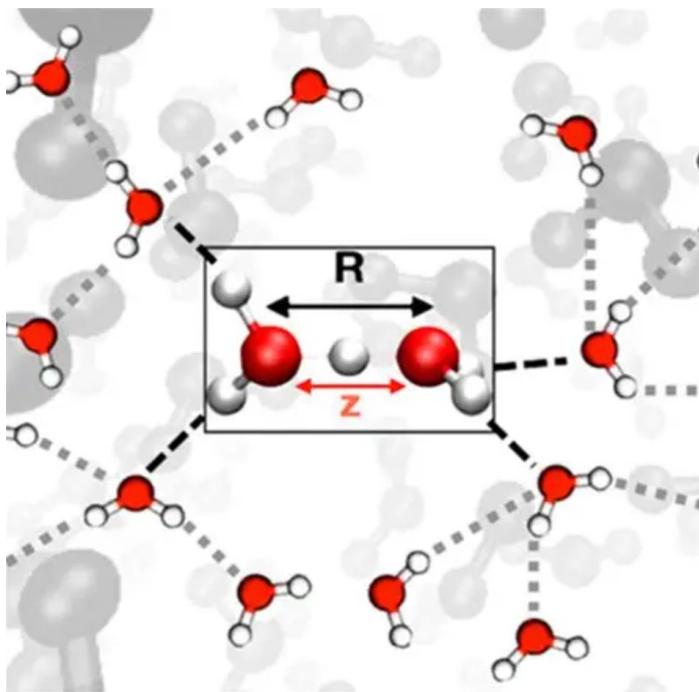
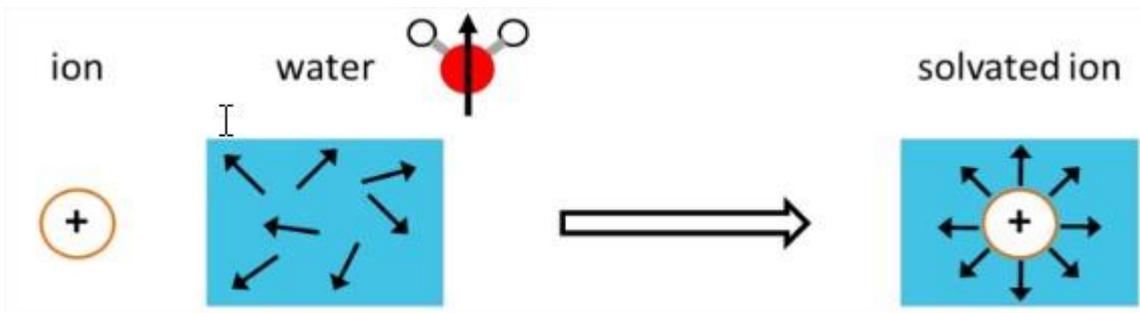
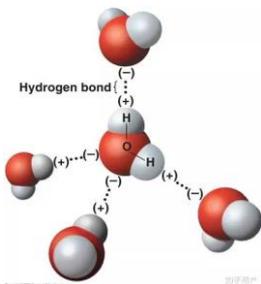


苯酚 Phenol
C₆H₅OH



苯 Benzene

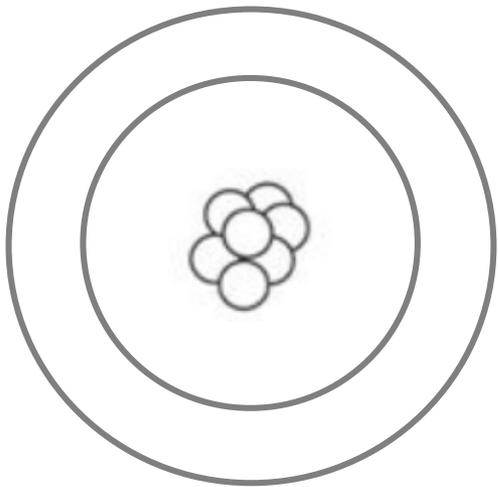
例：水溶液的氢键，电子溶解



- 溶剂中的极性基团：减缓甚至阻止正负离子复合
- 消耗掉液闪发光的基团

极性基团，介电常数

- 更多的极性基团，更高的介电常数
- 正负离子的吸引 (库伦定律)
- 溶剂中的极性基团：减缓甚至阻止正负离子复合



⊖

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1q_2}{r^2}$$

吸引力 \propto 介电常数的逆

自由(未复合)离子产额的实验测量

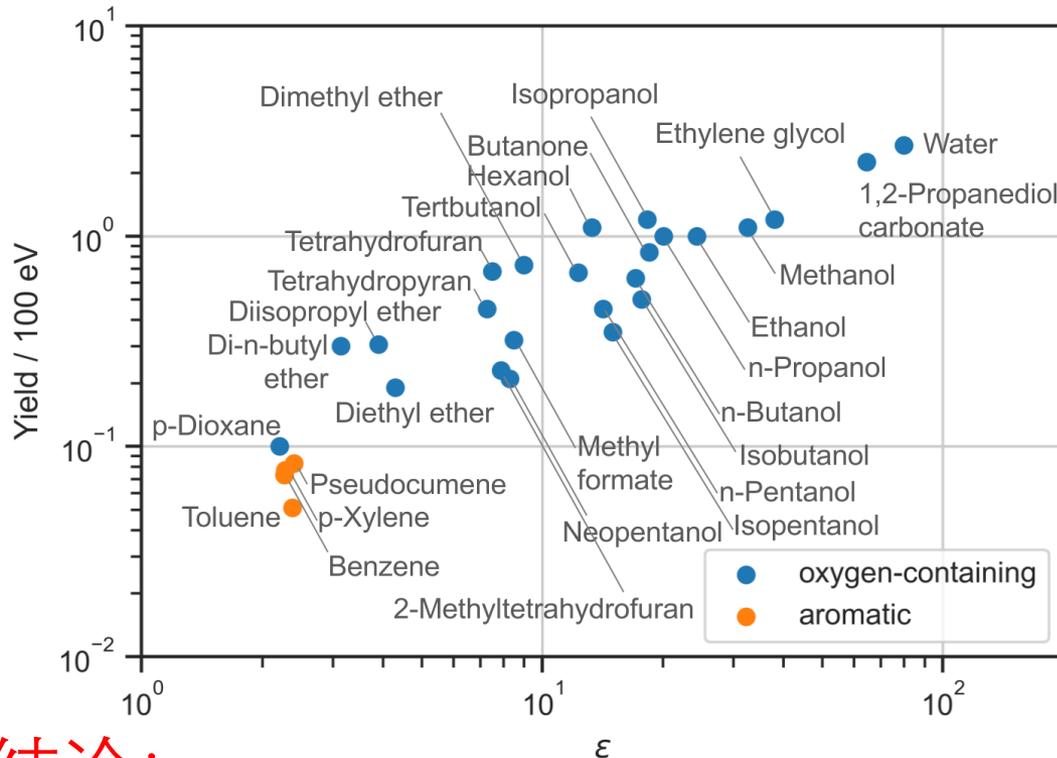
- 液体中的自由（未复合）离子产额早有系统性测量（1976） Allen, Augustine O. Yields of free ions formed in liquids by radiation.

测量方法：

- 有些物质在吸附电荷后变色（色谱分析）
- 有自由电荷后导电率会变化
- 加一瞬间电场，能收集到自由电荷

- **产额：自由离子数目(含电子)/100 eV能量沉积**

自由(未复合)离子数目 vs. 介电常数



考察了醇、酮、酯类带氧的分子，水，苯等

Data collected from Augustine O. Allen. Yields of free ions formed in liquids by radiation. 1976.

结论：

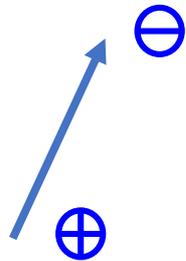
1. 随着介电常数增加，自由离子数目增加
2. 溶剂中的极性基团：减缓甚至阻止正负离子复合

总的，自由离子和激发态数目的对比

	水	苯
相对介电常数	~80 at 0 Hz	~2 at 0 Hz
总离子产额 (/100 eV) Geant4-DNA 模拟结果(无复合过程)	4.4	5.6
激发态产额 (/100 eV) Geant4-DNA 模拟结果(无复合过程)	2.3	6.0
自由(未复合)离子产额 (/100 eV) 实验测量	2.7	0.05-0.09

水，由于极性结构，有高介电常数，电离产生的正负离子很难复合，很难再贡献到闪烁光的发光上。

能量传至受体——电偶极偶极相互作用



电能

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^3} \left[\vec{m}_1 \cdot \vec{m}_2 - 3 \frac{(\vec{m}_1 \cdot \vec{R})(\vec{m}_2 \cdot \vec{R})}{R^2} \right]$$

偶极偶极跃迁
矩阵元

$$H = \langle \Psi_{3D^*} \Psi_{3A^*} | W | \Psi_{1D^*} \Psi_{1A_0} \rangle$$

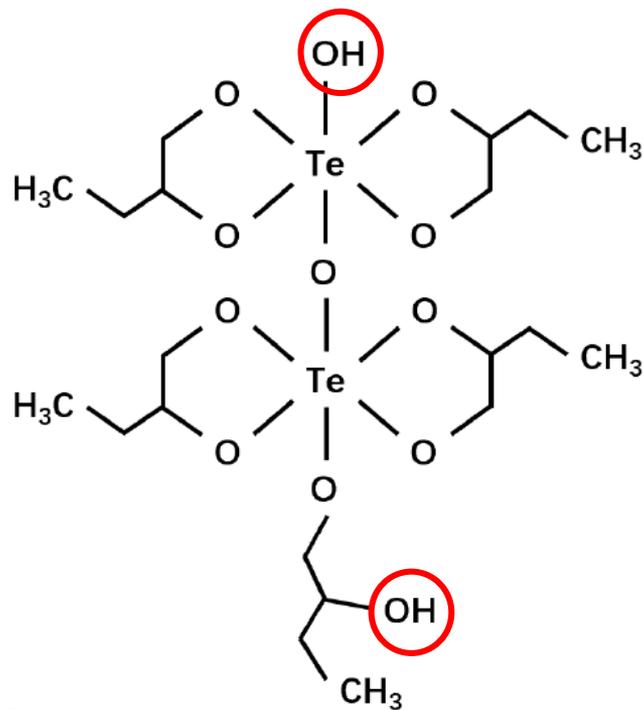
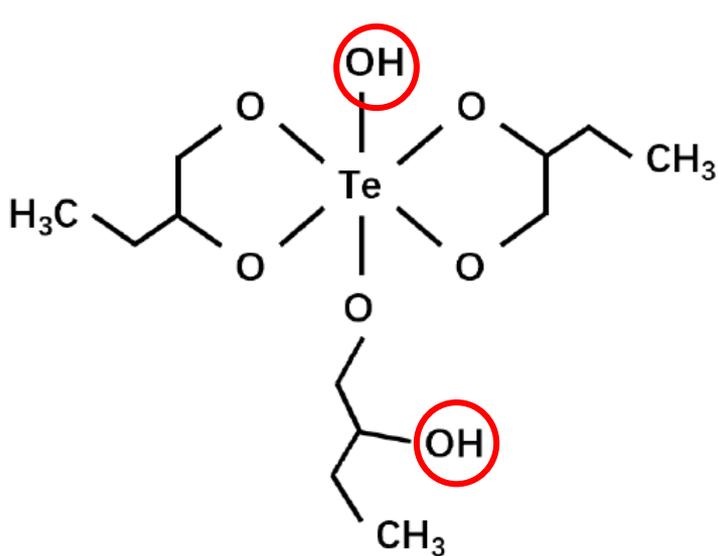
到受体的跃迁
概率

$$k = \frac{2\pi}{\hbar} |H|^2 \rho$$

$$k \propto 1/\epsilon^2$$

有机掺Te方案——TeBD分子 (SNO+, JUNO)

添加两个二丁醇配体 Tellurium 1,2-butanediol (TeBD)



电性质

1. 羟基基团 -OH: 溶解电子
2. 多个暴露的O基团

TeBD淬灭的因素之一

电性质：

- TeBD的介电常数是 17 ± 2 ， 烷基苯是2.5
(世界首次测量)

假如是纯的TeBD

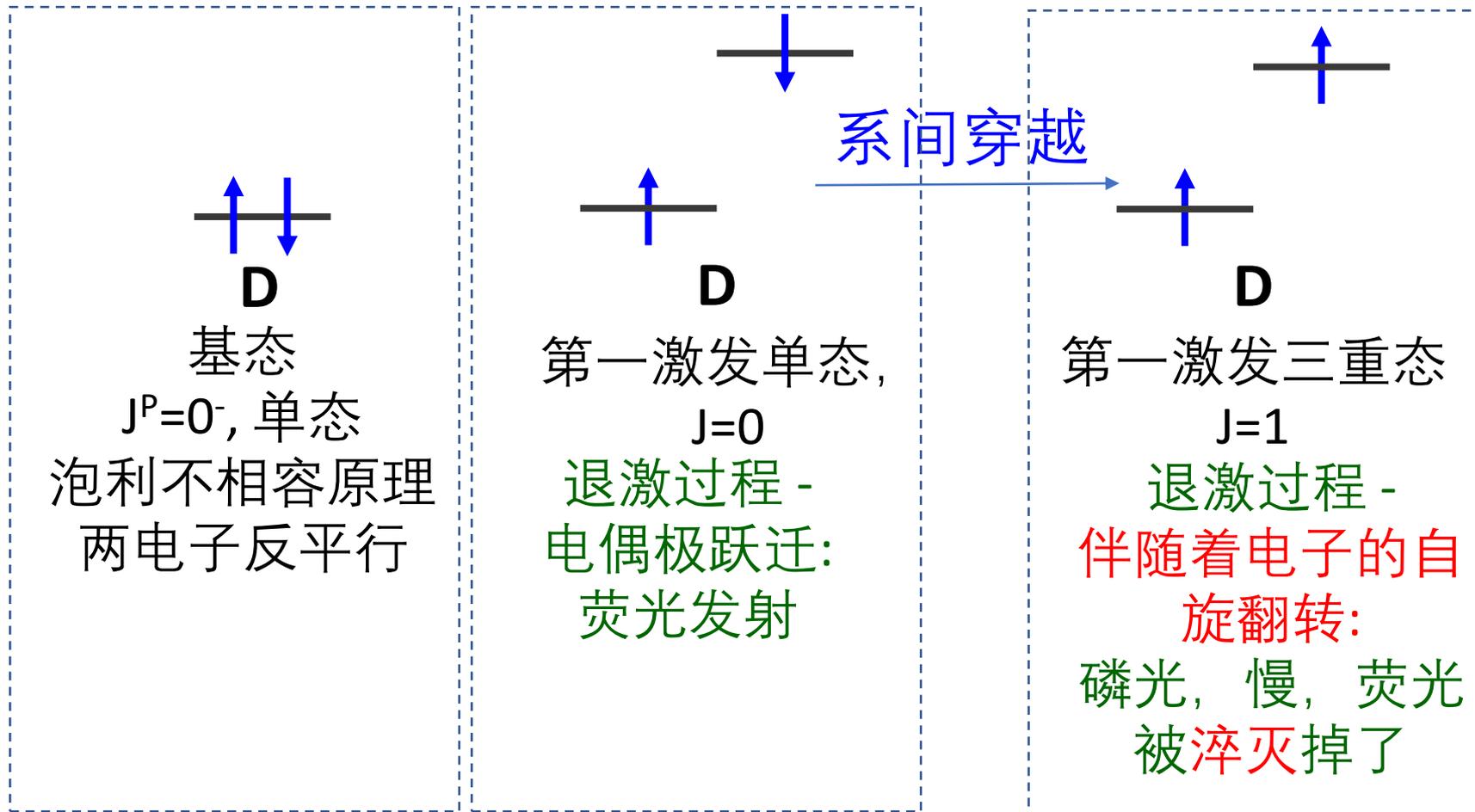
- 正负离子复合的库仑力比烷基苯中“弱7倍”
- 电偶极偶极跃迁的概率比烷基苯“小47倍”

我们自制了SNO+的TeBD样本，首个测量了TeBD的介电常数。（分子组分与SNO+略有不同）

研究理解二

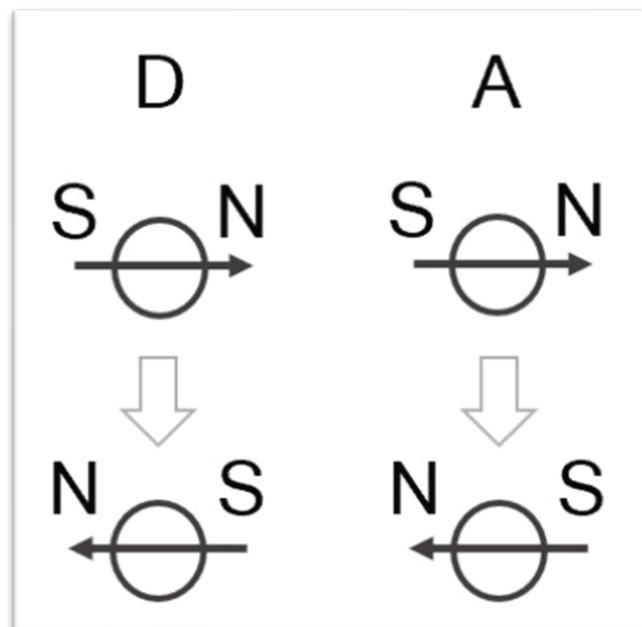
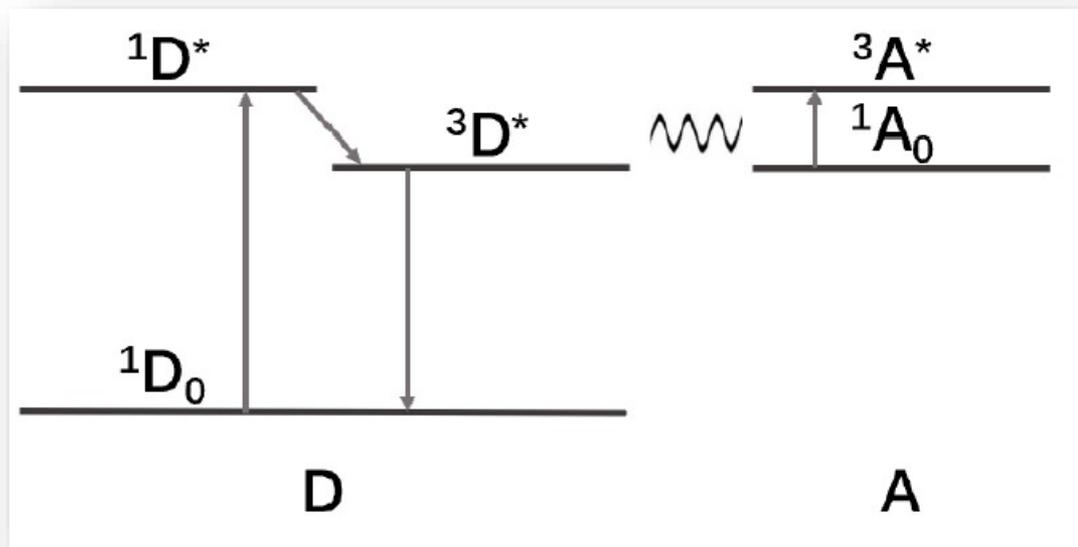
分子结构，“磁”属性，
液闪淬灭

另一淬灭机制：系间穿越（单重态->三重态）



可以联想粲偶素系统, $c\bar{c}$, 有E1跃迁和M1跃迁, M1跃迁慢、小

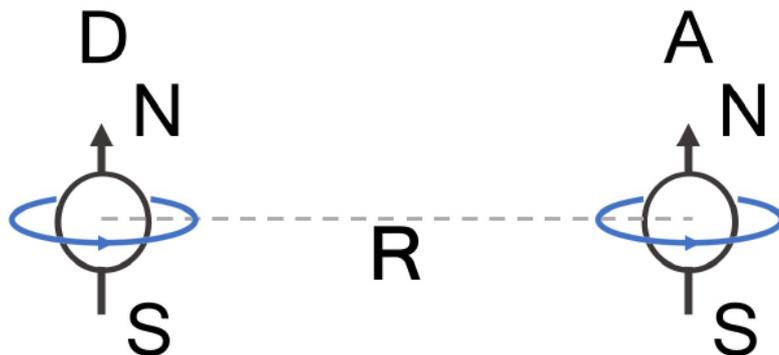
磁偶极偶极相互作用——诱导淬灭



受体的两个能级，电子自旋方向相反，能级与给体相同，诱发给体发生系间穿越，形成淬灭。

两个磁棒，我们翻转一个磁棒，另一个磁棒会伴随着翻转

磁偶极偶极相互作用



磁能

$$W = -\frac{\mu_0 \mathbf{m}_A \cdot \mathbf{m}_D}{4\pi R^3} + \frac{3\mu_0 (\mathbf{m}_A \cdot \mathbf{R})(\mathbf{m}_D \cdot \mathbf{R})}{4\pi R^5}$$

磁偶极偶极
跃迁矩阵元

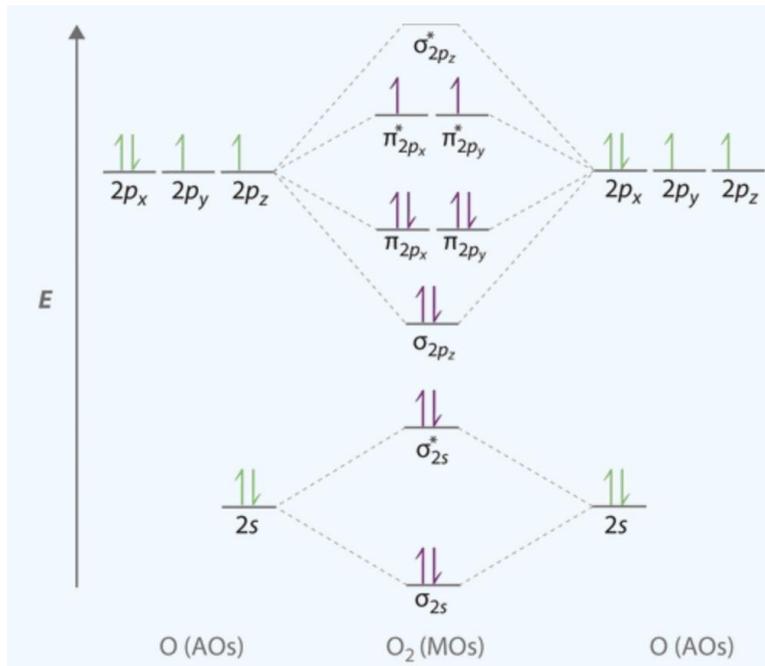
$$H = \langle \Psi_{3D}^* \Psi_{3A}^* | W | \Psi_{1D} \Psi_{1A} \rangle$$

跃迁概率

$$k = \frac{2\pi}{\hbar} |H|^2 \rho$$

氧气分子的顺磁性

- O_2 , 顺磁物质, 基态三重态, 第一激发态单态, 能级差0.977 eV
- 氧气在苯中的溶解度为 8×10^{-4} mole/mole



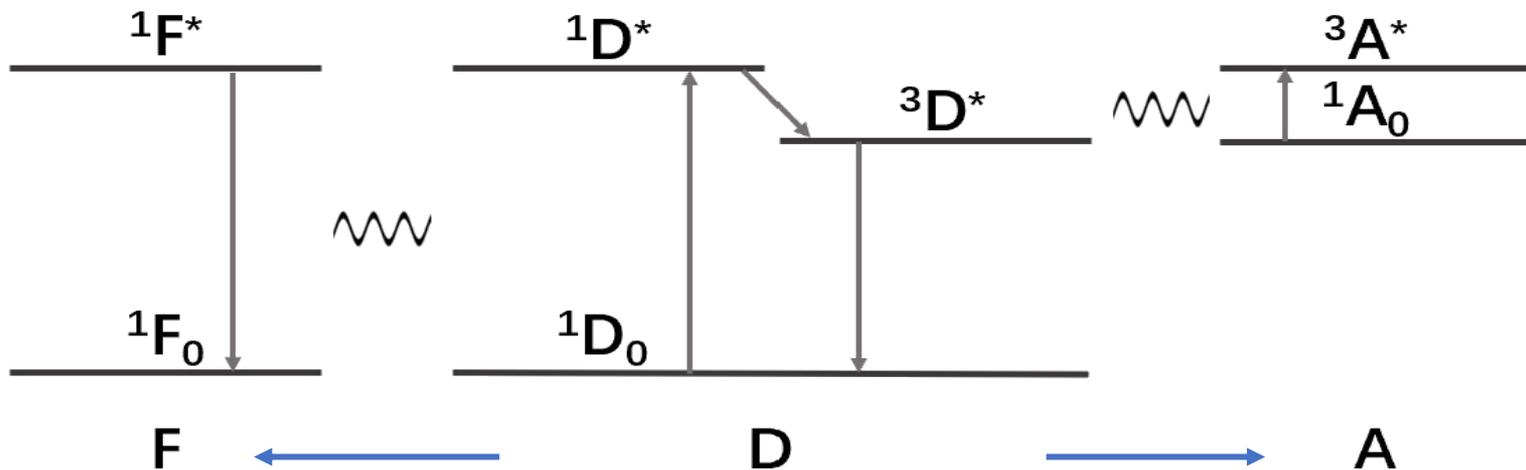
重元素（Te, Gd等）淬灭机制的猜测

- 重元素的引入，增加了旋轨耦合（自旋和轨道的耦合）导致的能量差， $\Delta E \propto Z^2$
- 旋轨耦合的能级差达到eV，几个eV的水平，三重态形成劈裂
- 基态和最低的三重态的能极差减小，至1 eV水平
- 形成淬灭受体，诱发系间穿越

本模型的实验验证未完成。

总结

- 一种水基的掺铽液闪，光产额与无基液闪相似
- 分子结构，电性质，正负离子复合，电偶极偶极跃迁，能量从给体传播到受体，极性分子的淬灭
- 分子结构，磁性质，长程磁偶极偶极跃迁，能量从给体到受体，增进系间穿越概率淬灭，解释氧气，重元素的淬灭机制



欢迎问题与建议

- 报告中跳过了光谱重叠、碰撞等机制
- 重新去理解了理论化学，原子分子物理等基础内容，从第一原理重新考虑了液闪的基础问题
- 更多针对TeBD的淬灭原因，还在研究中

arxiv:2505.11361 Magnetic dipole-dipole transition for scintillation quenching

arxiv:2508.19568 Molecule structure, electric property, and scintillation and quenching of liquid scintillators

arXiv:2505.13926 An exploratory study of a tellurium-loaded liquid scintillator based on water and p-dioxane

欢迎问题与建议

- 本次报告跳过了切伦科夫液体闪烁体和掺锂液体闪烁体的介绍，对太阳中微子，地球中微子，超新星中微子研究
- 期待我们更多的研究进展
- 感谢大家

BACKUP

Which Isotope?

- can you make into a detector?
- can you put into a detector?
- can you isotopically enrich?

↑ higher phase space
↑ better for backgrounds

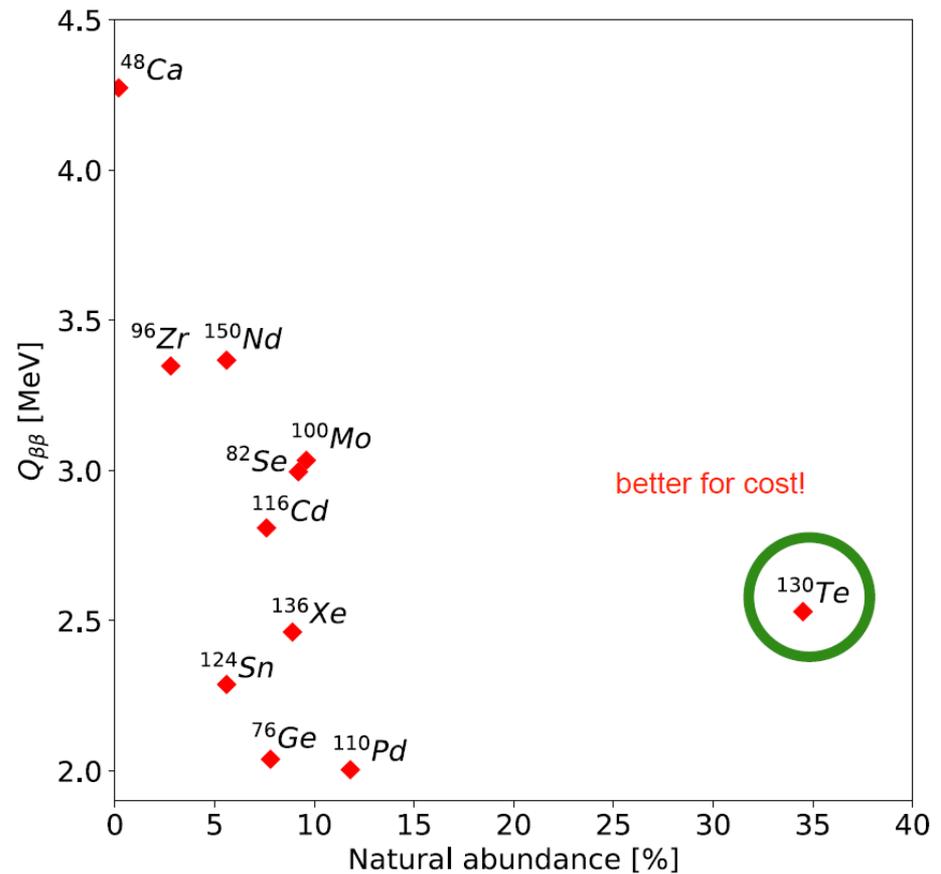
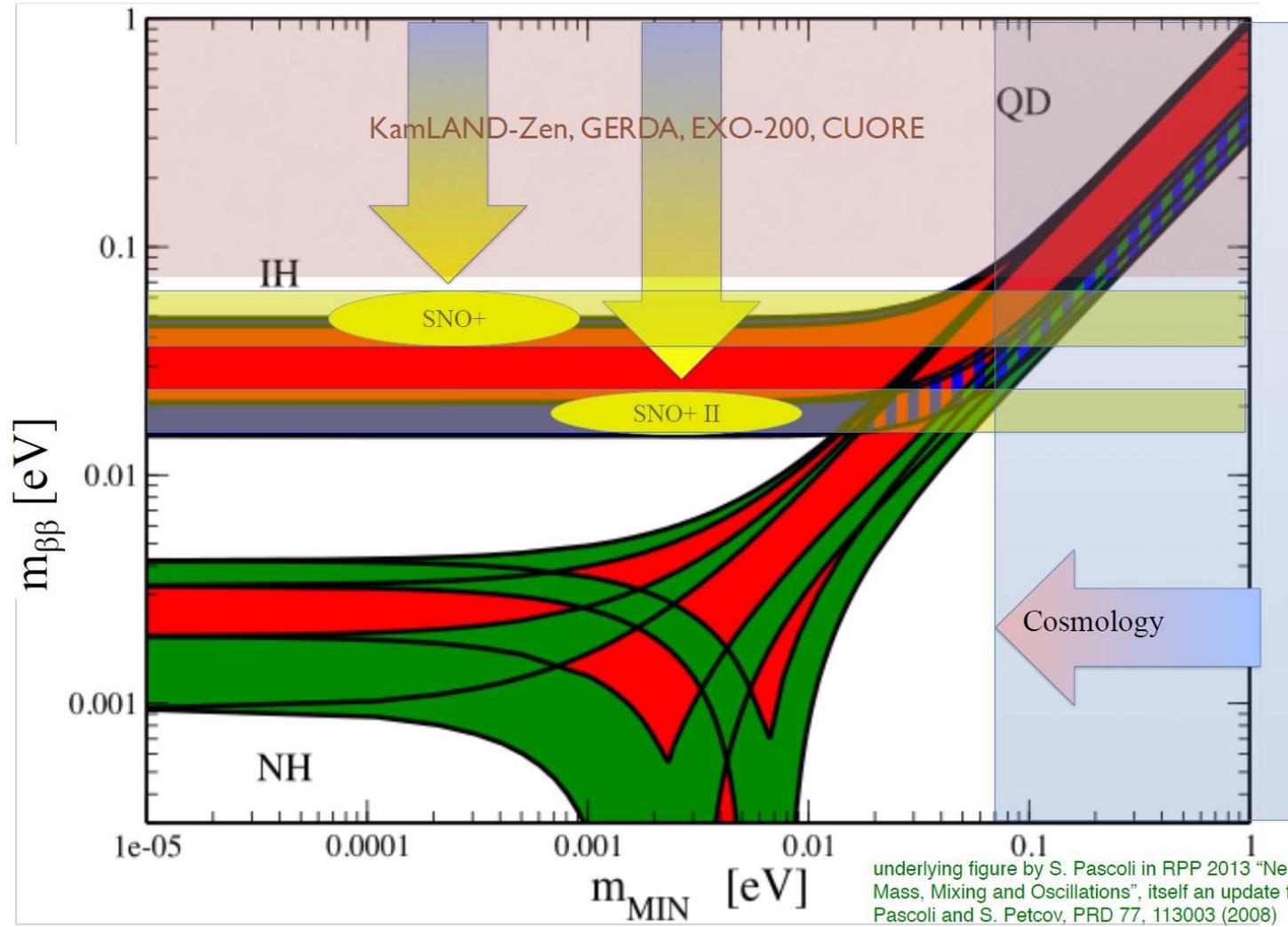


TABLE I. Properties of candidate $0\nu\beta\beta$ isotopes.

Isotope	Q (MeV)	Percent natural abund.	Element cost [5] (\$/kg)	$G^{0\nu}$ (10^{-14} /yr) [6]	$M^{0\nu}$ (avg) [7]	$T_{1/2}^{0\nu}$ for 2.5 meV (10^{29} yrs)	Tons of isotope for 1 ev/yr	Equivalent natural tons	Annual world production [5] (tons)	Natural element cost (\$M)	Enriched at \$20/g (\$M)	$0\nu/2\nu$ rate [2,8] (10^{-8})
^{48}Ca	4.27	0.19	0.16	6.06	1.6	2.70	31.1	16380	2.4×10^8	2.6	622	0.016
^{76}Ge	2.04	7.8	1650	0.57	4.8	3.18	58.2	746	118	1221	1164	0.55
^{82}Se	3.00	9.2	174	2.48	4.0	1.05	20.8	225	2000	39	416	0.092
^{96}Zr	3.35	2.8	36	5.02	3.0	0.93	21.4	763	1.4×10^6	27	427	0.025
^{100}Mo	3.04	9.6	35	3.89	4.6	0.51	12.2	127	2.5×10^5	4.4	244	0.014
^{110}Pd	2.00	11.8	23000	1.18	6.0	0.98	26.0	221	207	5078	521	0.16
^{116}Cd	2.81	7.6	2.8	4.08	3.6	0.79	22.1	290	2.2×10^4	0.81	441	0.035
^{124}Sn	2.29	5.6	30	2.21	3.7	1.38	41.2	736	2.5×10^5	22	825	0.072
^{130}Te	2.53	34.5	360	3.47	4.0	0.75	23.6	68	~ 150	24	471	0.92
^{136}Xe	2.46	8.9	1000	3.56	2.9	1.40	45.7	513	50	513	914	1.51
^{150}Nd	3.37	5.6	42	15.4	2.7	0.37	13.4	240	$\sim 10^4$	11	269	0.024

Double Beta Decay Allowed Parameter Space



Current Limits and Future Goals

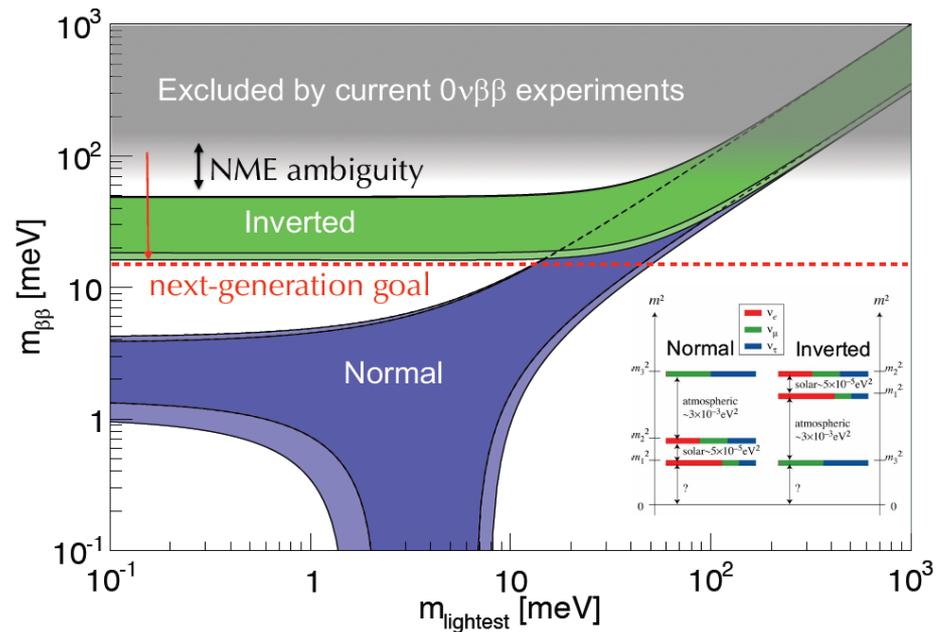
- Present best limits:

- ^{136}Xe (KamLAND-Zen): $T_{1/2} > 10^{26}$ yrs
- ^{76}Ge (GERDA): $T_{1/2} > 10^{26}$ yrs
- ^{130}Te (CUORE): $T_{1/2} > 3 \times 10^{25}$ yrs

- Future goal:

- ~2 OoM improvement in $T_{1/2}$
- Covers IO
- Up to 50% of NO
- Factor of ~few in Λ
- An aggressive experimental goal

$$\frac{1}{T_{1/2}} = G_{01} g_A^4 \left(M^{0\nu} + \frac{g_\nu^{\text{NN}} m_\pi^2}{g_A^2} M_{\text{cont}}^{0\nu} \right)^2 \frac{m_{\beta\beta}^2}{m_e^2}$$



Detwiler Neutrino 2020

dows. In order to compare different experiments, we rewrite the sensitivity formula Eq. 2 as

$$\left(\frac{T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} \cdot \alpha}{\ln 2 \cdot N_A} \right)^2 = \frac{M_{\text{norm}}}{B_{\text{I}}} \quad (3)$$

where $B_{\text{I}} = \frac{b}{(M\epsilon\eta \cdot t / M_{\text{isotope}}) \cdot \text{ROI}}$ is the redefined back-

ground index, and $M_{\text{norm}} = \frac{M\epsilon\eta \cdot t}{\text{ROI} \cdot M_{\text{isotope}}}$ is the normal-

Chinese Physics C Vol. 41, No. 5 (2017) 053001