

中国物理学会高能物理分会第十二届全国会员代表大会暨学术年会

液闪分子的电磁属性与荧光发射和淬灭的关系研究

王喆

清华大学



清华大学
Tsinghua University

2026年7月16日

wangzhe-hep@mail.tsinghua.edu.cn

汇报提纲

- 一 . Majorana中微子与液闪实验
- 二 . 研究理解， 分子结构， “电”属性， 液闪淬灭
- 三 . 研究理解， 分子结构， “磁”属性， 液闪淬灭
- 四 . 研究总结

科学意义：无中微子双贝塔衰变

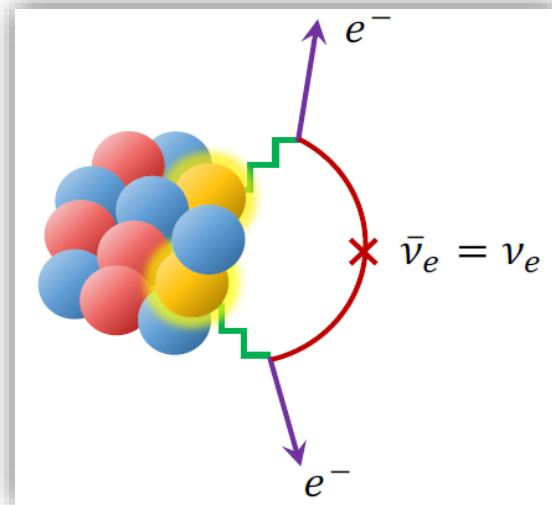
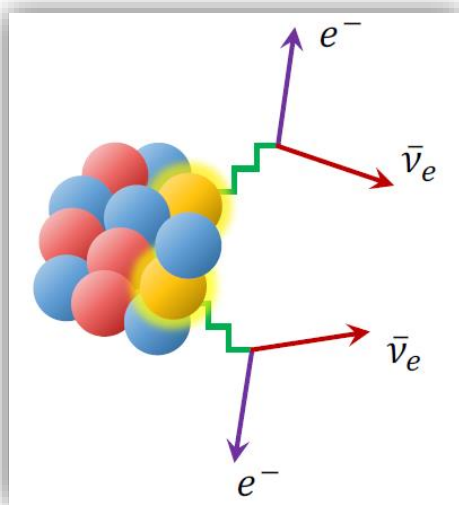
Dirac中微子：轻子数守恒

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

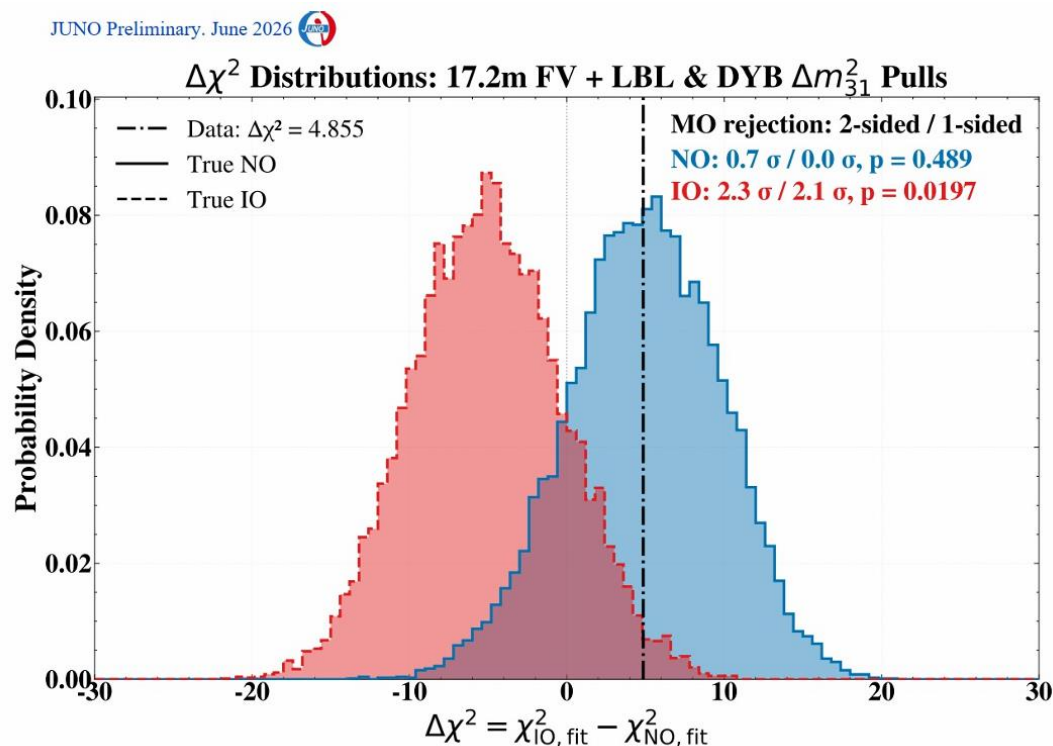
无中微子的双
贝塔衰变
($0\nu\beta\beta$) 是
目前唯一的实
验探测方案

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

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



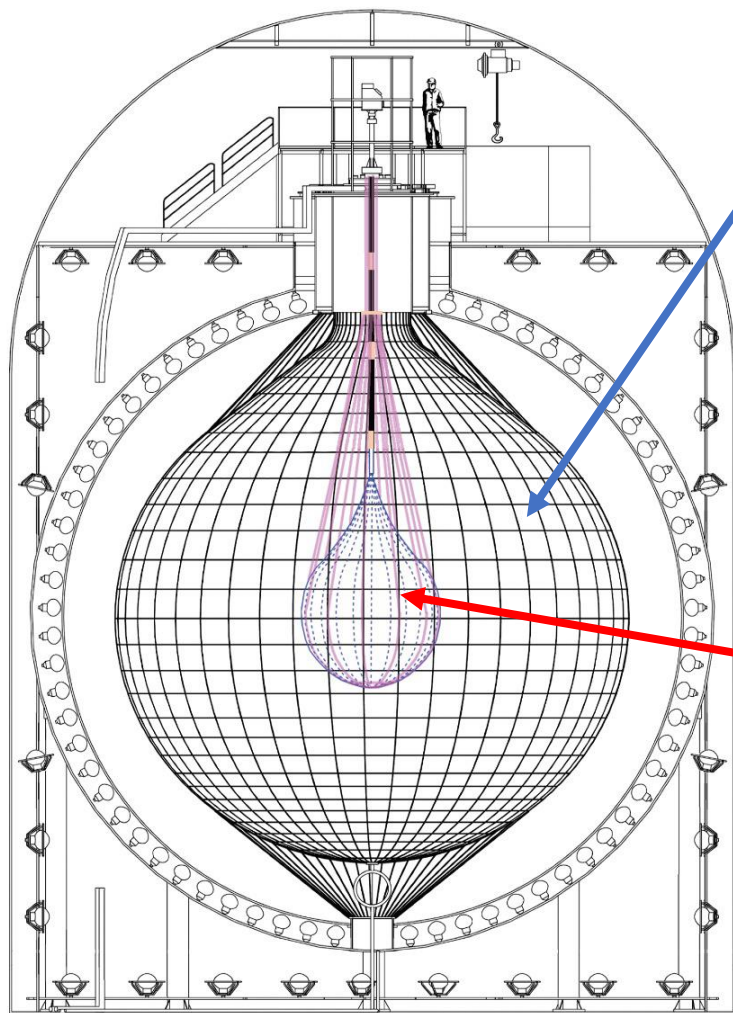
研究现状和期待



目前结合NuFIT-
LBL 和DayaBay
约束, 正序偏好
约为 2.3σ

见JUNO合作组在本次会议上的报告

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:

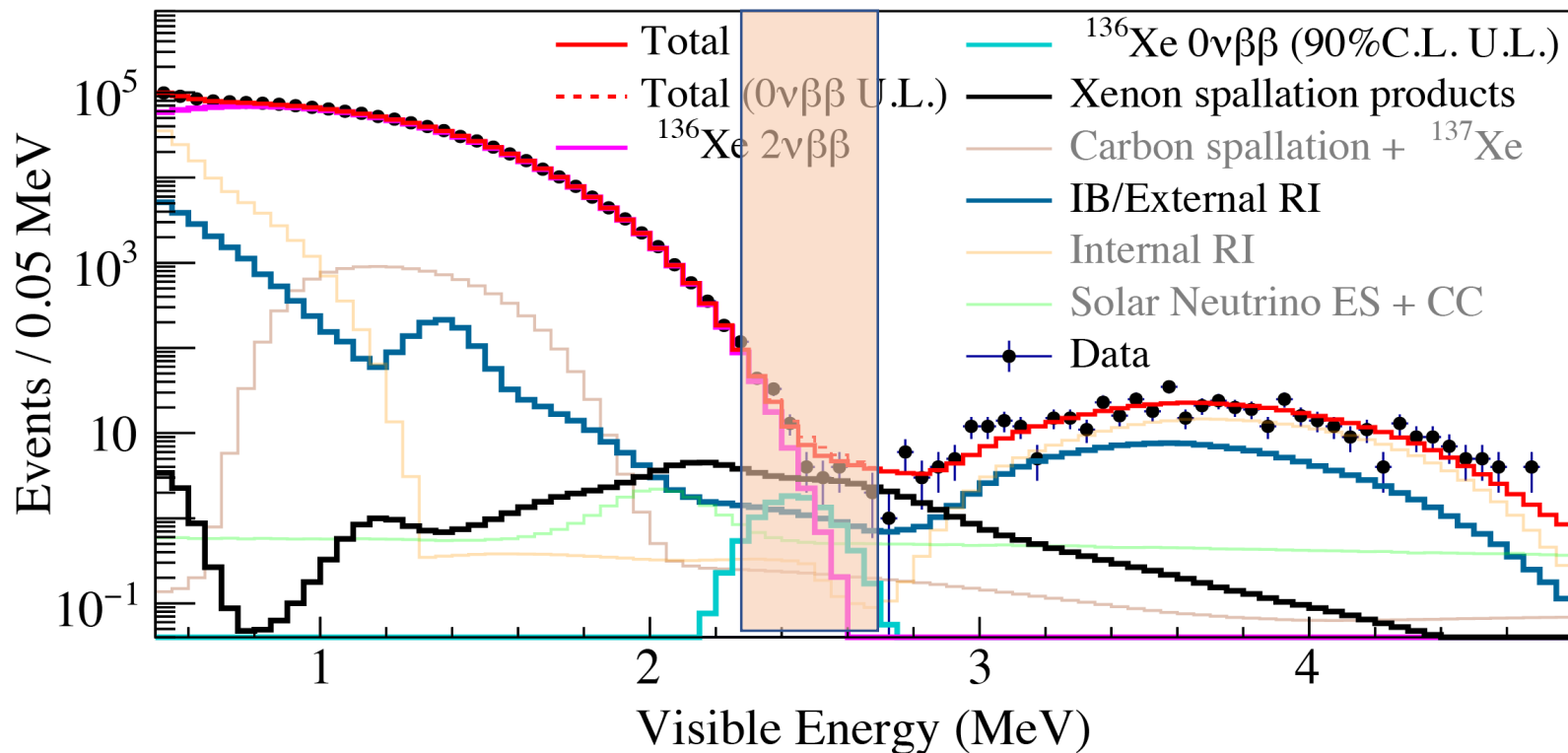
掺氙液闪球, 直径3.8m, 共24t

● 3% enriched xenon

→ 745 kg Xe (含91% ^{136}Xe)

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

KamLAND-Zen实验结果

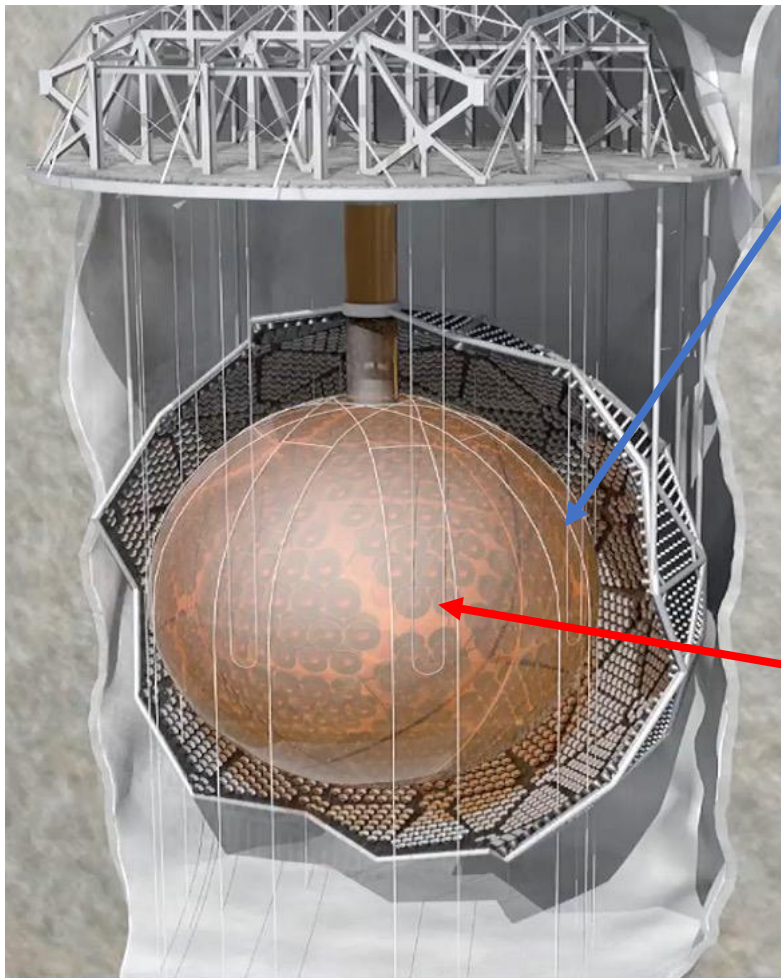


目前的实验结果: $T_{1/2}^{0\nu} > 3.8 \times 10^{26}$ 年

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)

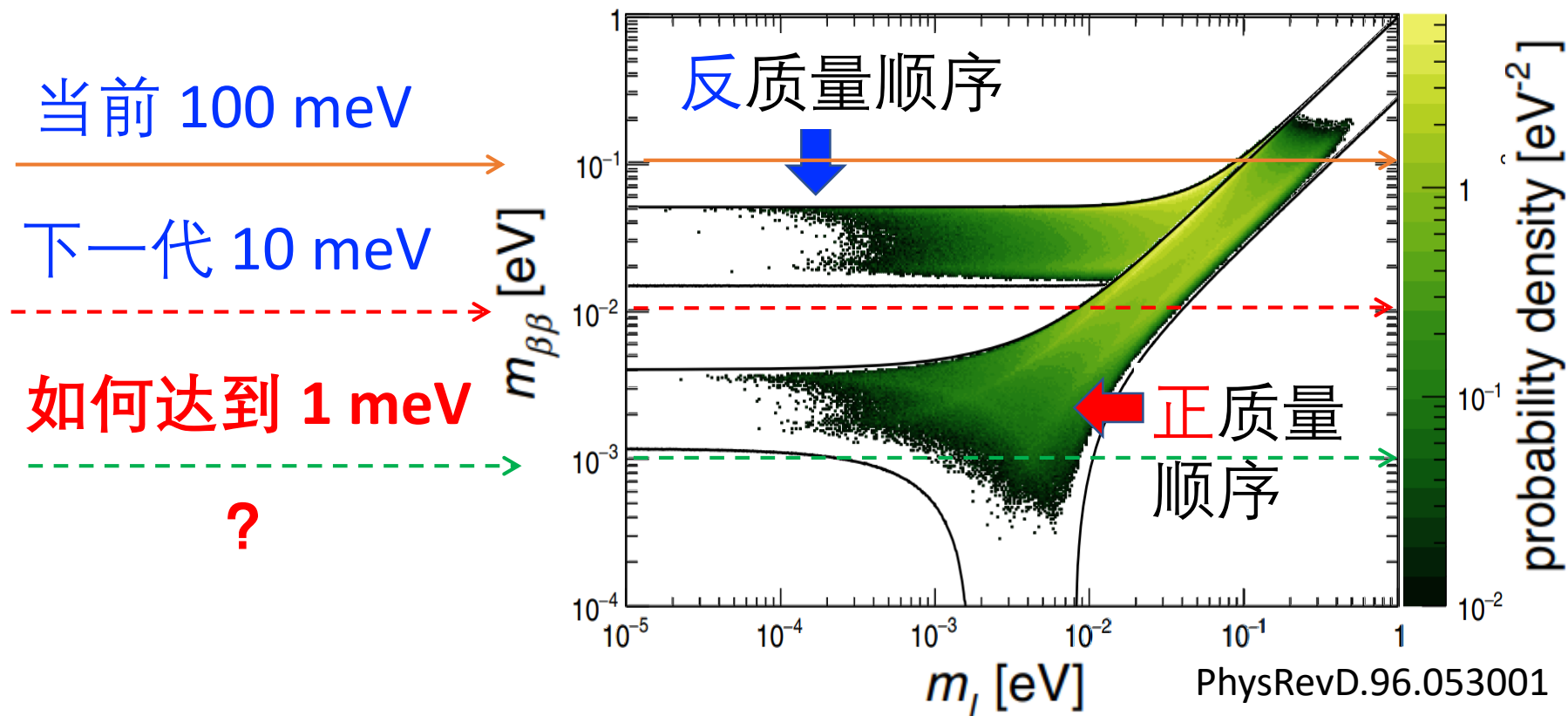
液闪 780 吨

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)

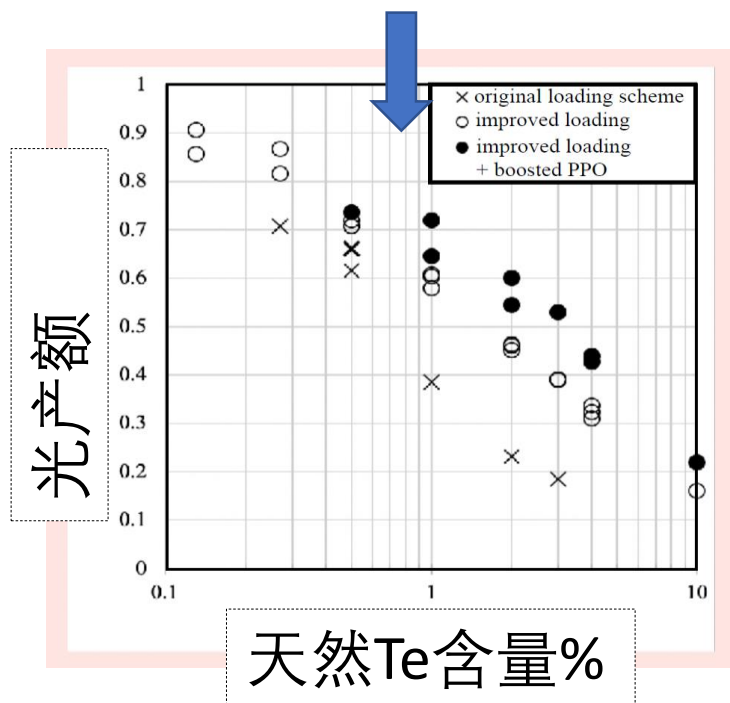
$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \sqrt{\frac{M t}{\Delta E B I}}$$

- 江门实验, SNO+靶体积x20, Te含量x10

$\Rightarrow$ ^{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60%，达到5%，光产额为30%



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

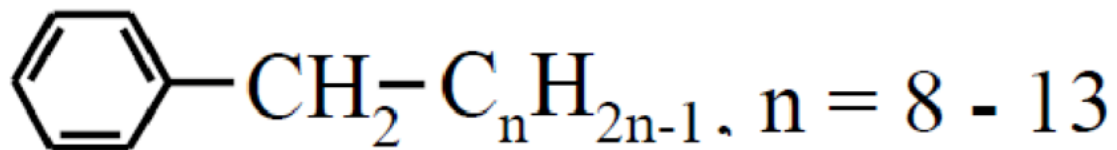
透明度，溶解性等
是次要问题

研究理解一

分子结构，“电”属性，
液闪淬灭

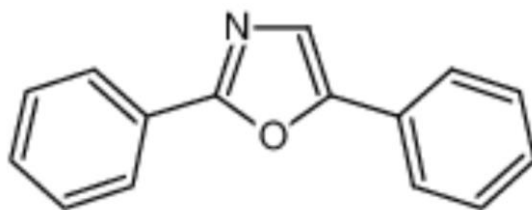
两成分液体闪烁体

- LAB



闪烁光发光基团，第一组分，给体

- PPO



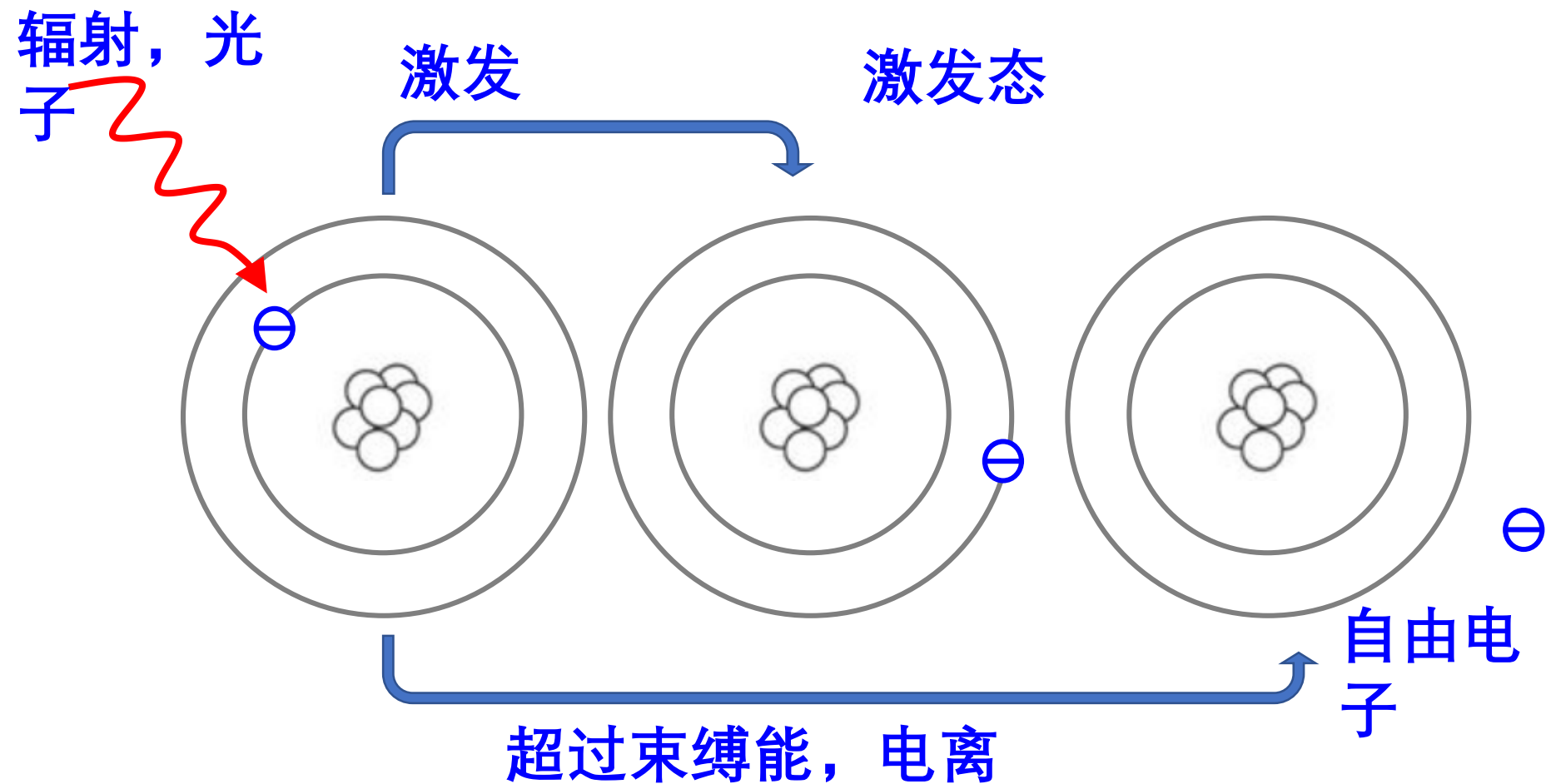
波长位移剂，第二组分，受体

两成分液体闪烁体

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

- **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**

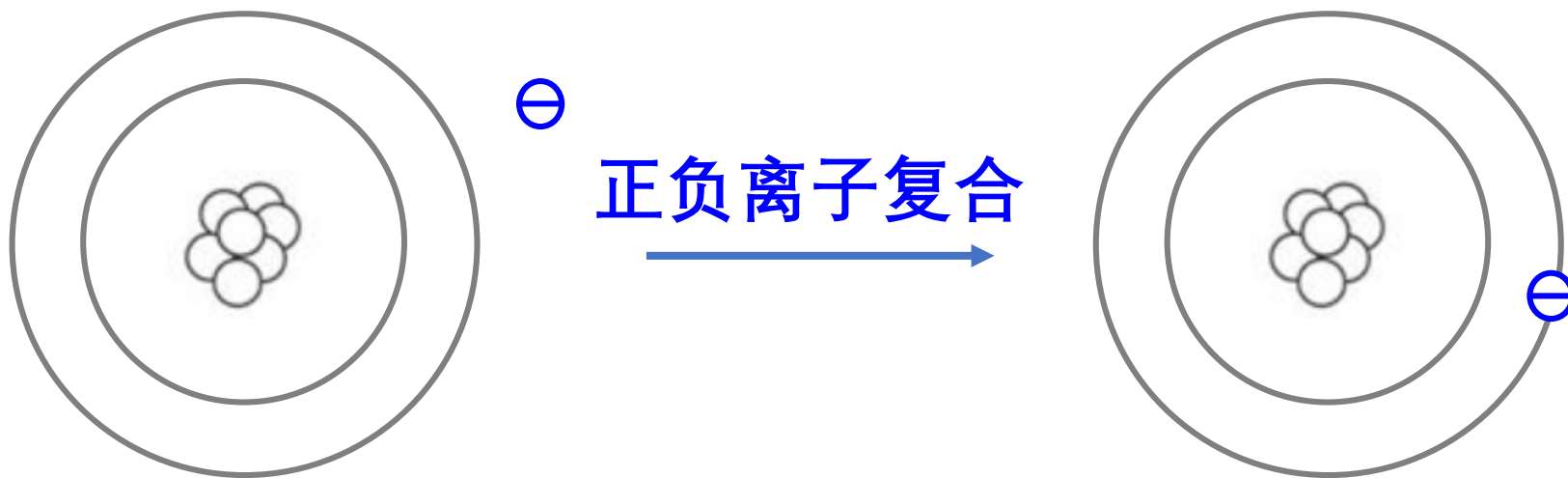
辐射能量沉积过程



正负离子复合，发光过程

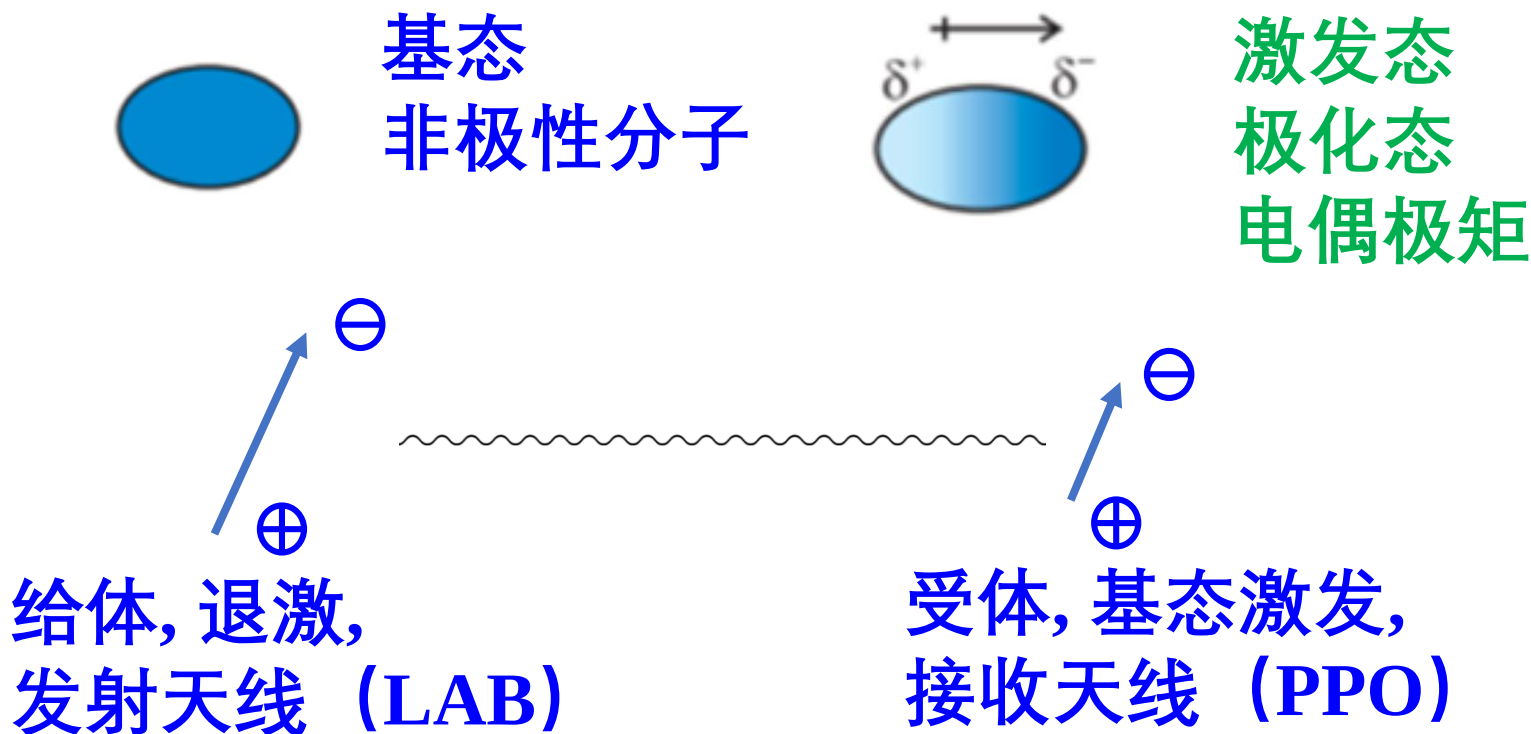
- 第一组分，给体

- 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

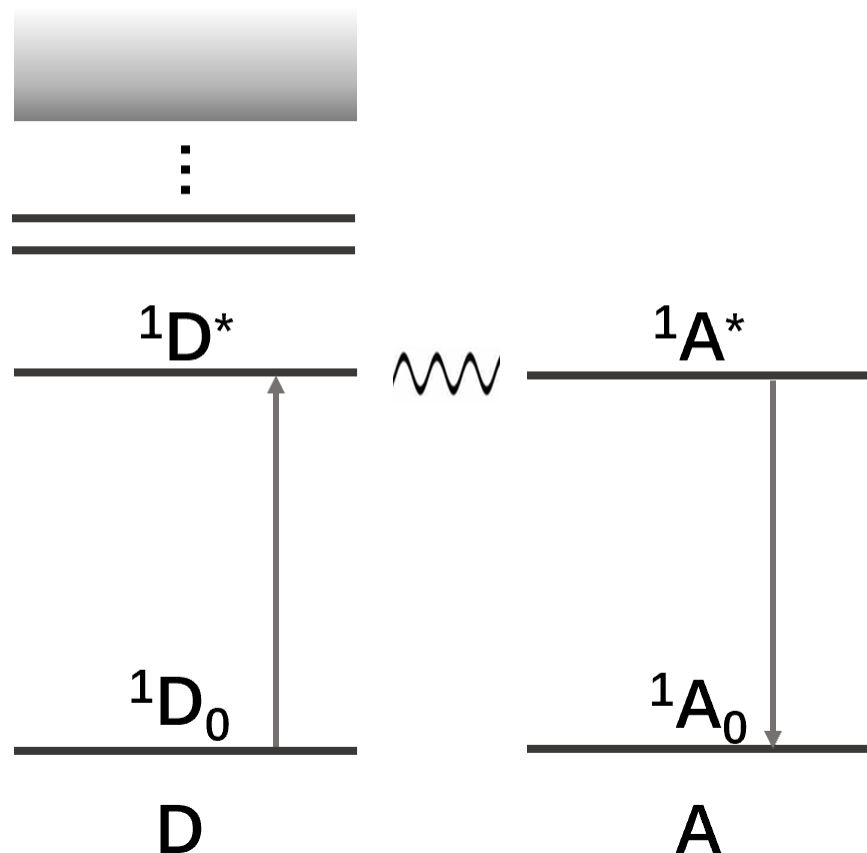


从给体到受体的能量转移

- 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

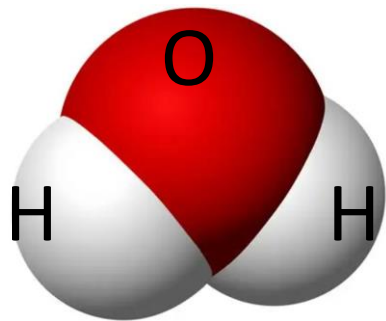


- 低受体浓度条件下，能量转移以电偶极-偶极跃迁为主
- 受体发射波长较长，更少的自吸收，更好的透明度，匹配更高的PMT量子效率。

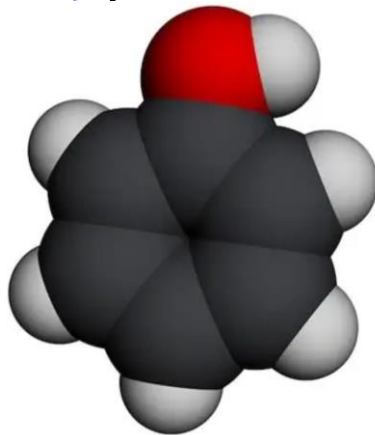
(江门实验，
20000吨，探测器
直径41米)

极性基团，介电常数

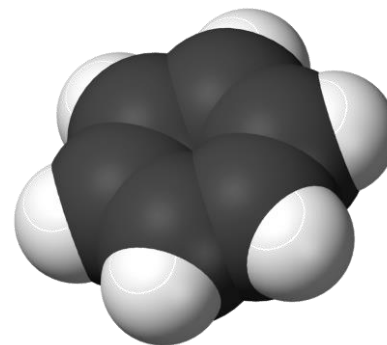
- 水分子是极性分子
- 醇类分子含有极性基团，羟基 ($-\text{OH}$)
- 苯分子是无极性分子
- 极性基团是亲电性的(吸引电子, 溶解电子)



H_2O

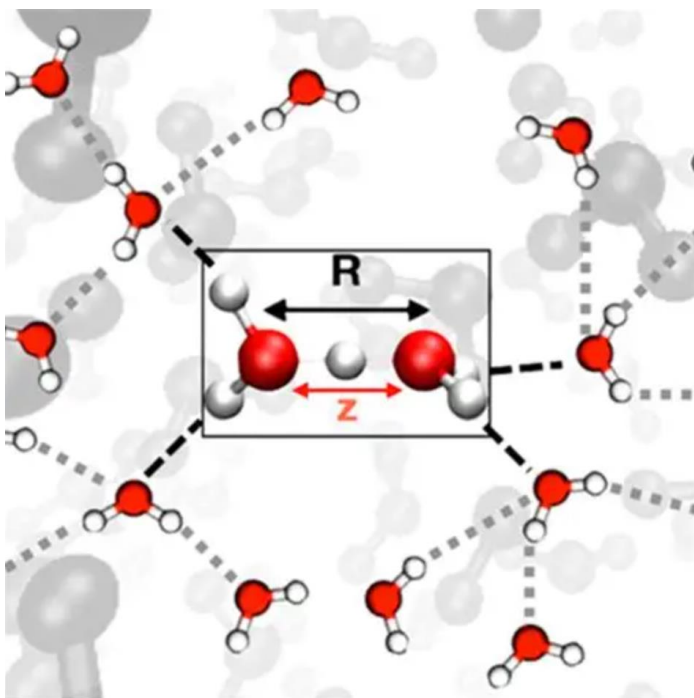
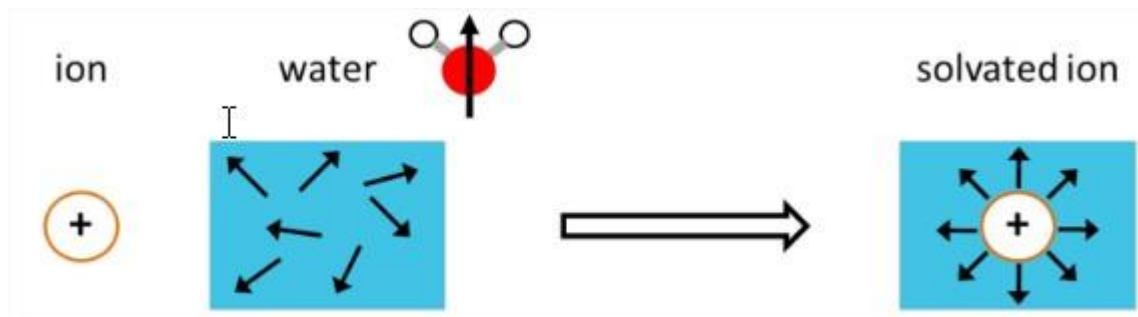
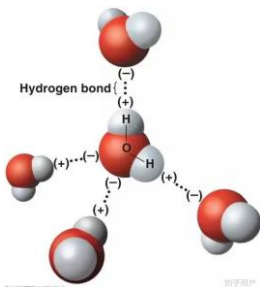


苯酚 Phenol
 $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$



苯 Benzene

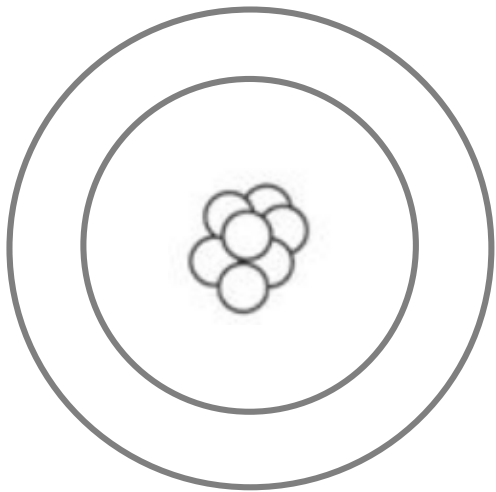
例：水溶液的氢键，电子溶解



- 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



⊖

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

吸引力 $\propto$ 介电常数的逆

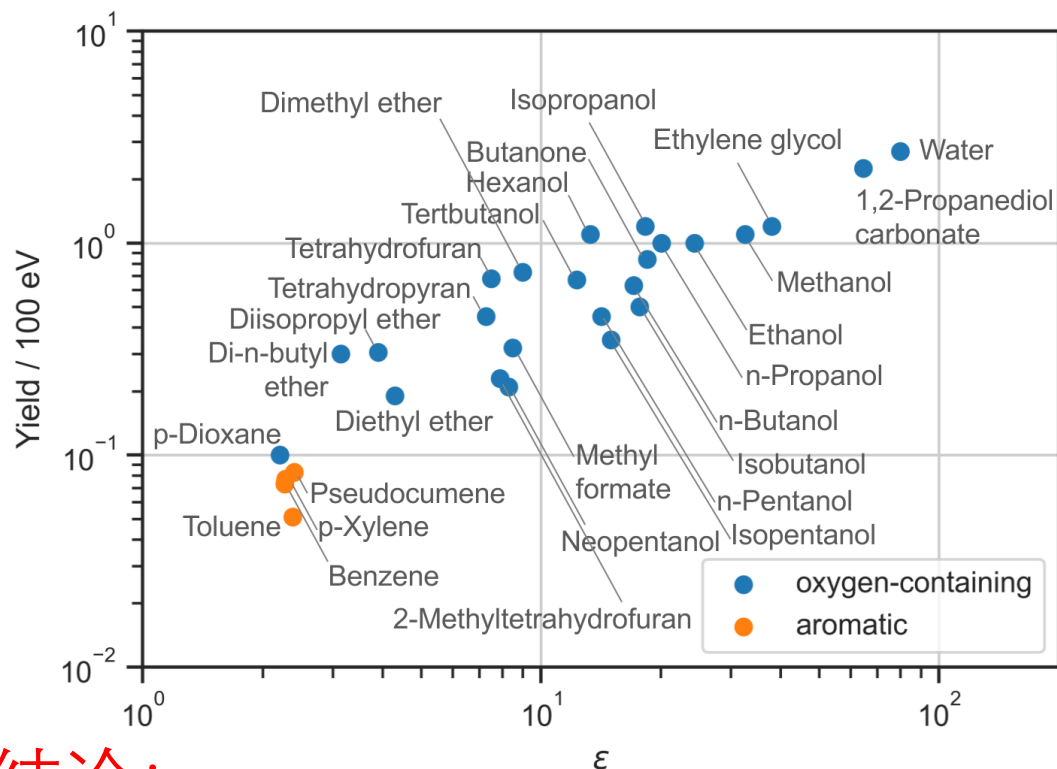
自由(未复合)离子产额的实验测量

- 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：

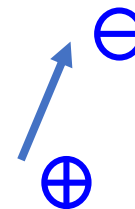
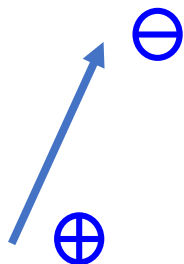
1. 随着介电常数增加，自由离子数目增加
2. 溶剂中的极性基团：减缓甚至阻止正负离子复合

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

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

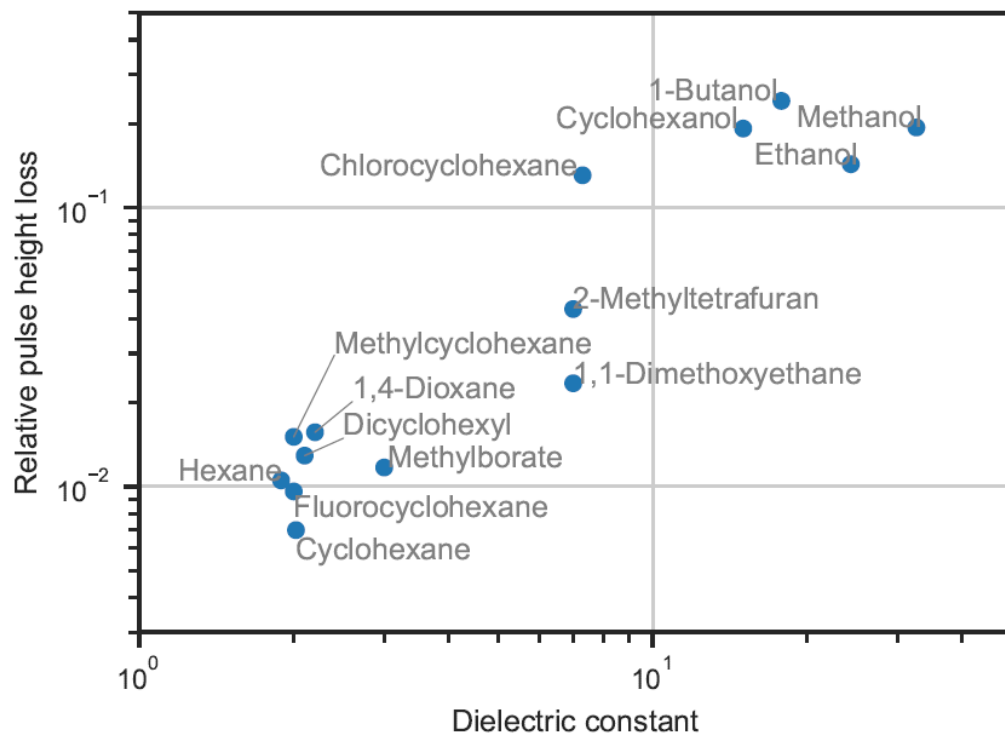
到受体的跃迁
概率

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

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

注意 ϵ 和频率的关系

光产额与介电常数的关系

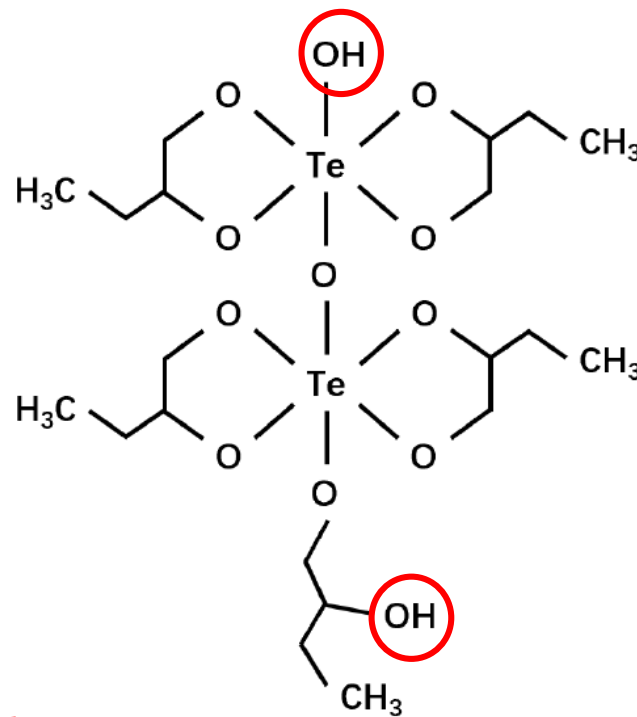
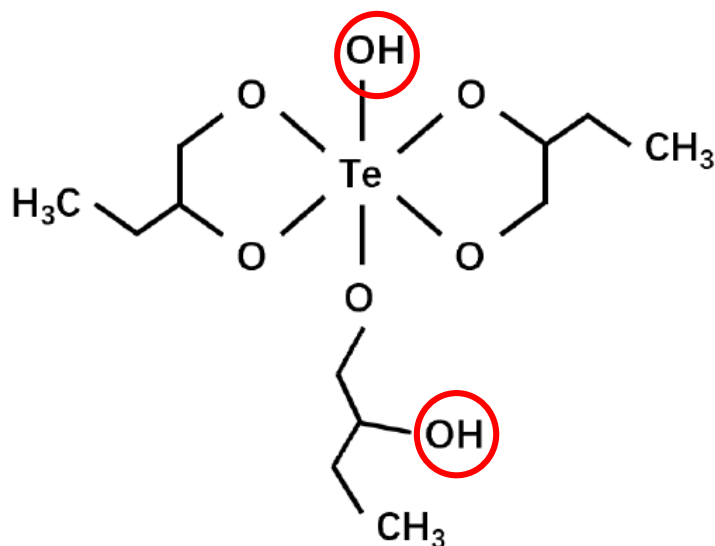


数据来自J. B. Birks,
The Theory and
Practice of
Scintillation
Counting

总结了前人的实验观测结果，确实发现淬灭百分比随介电常数增加而增加的趋势

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：

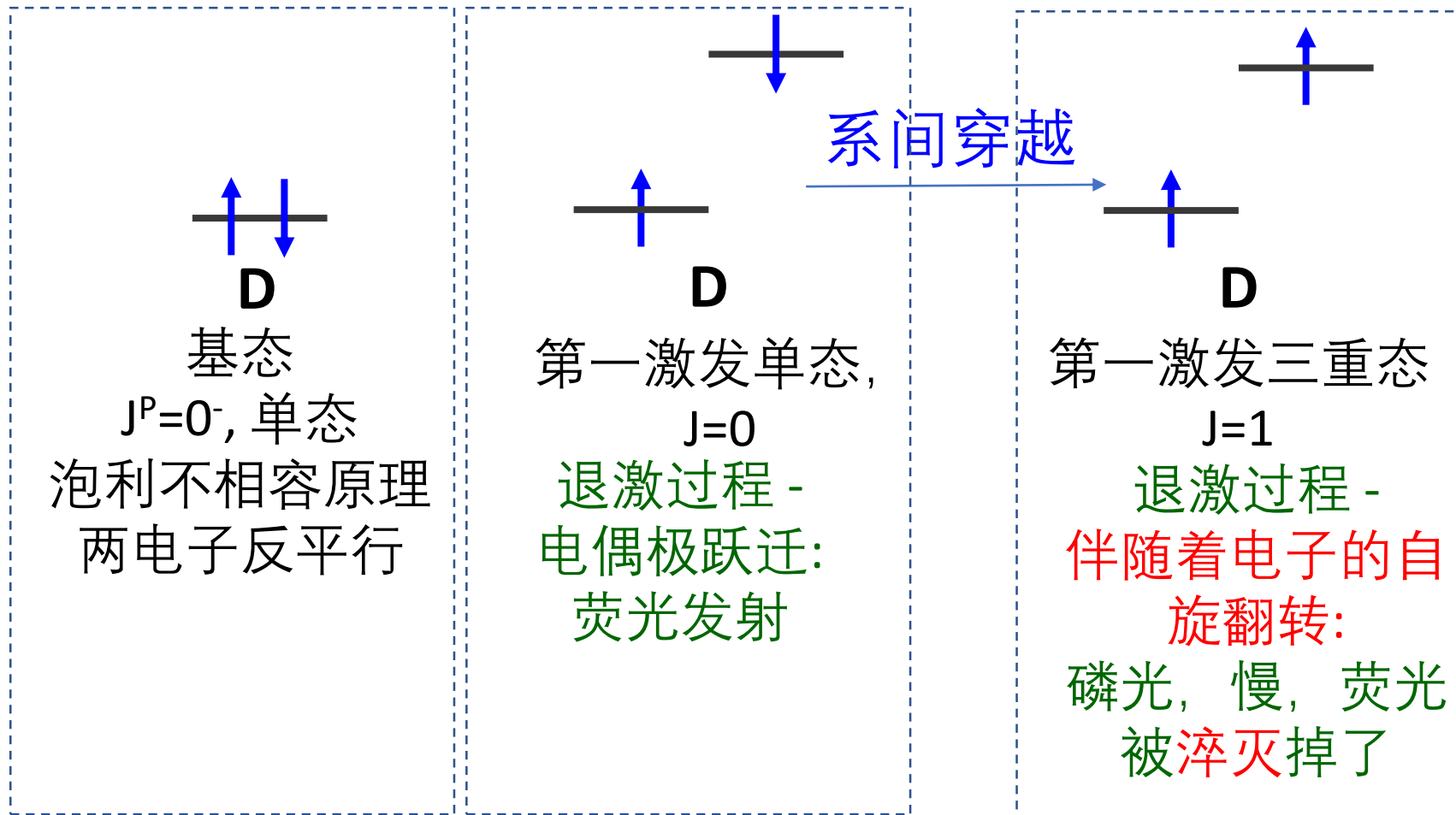
- TeBD的介电常数是 16 ± 1 ，烷基苯是2.3-2.4
(世界首次测量)

我们自制了SNO+的TeBD样本，首个测量了TeBD的介电常数。

研究理解二

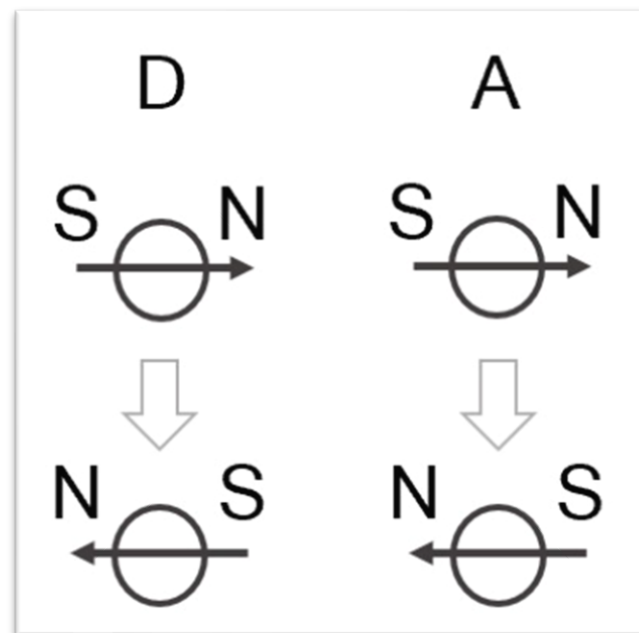
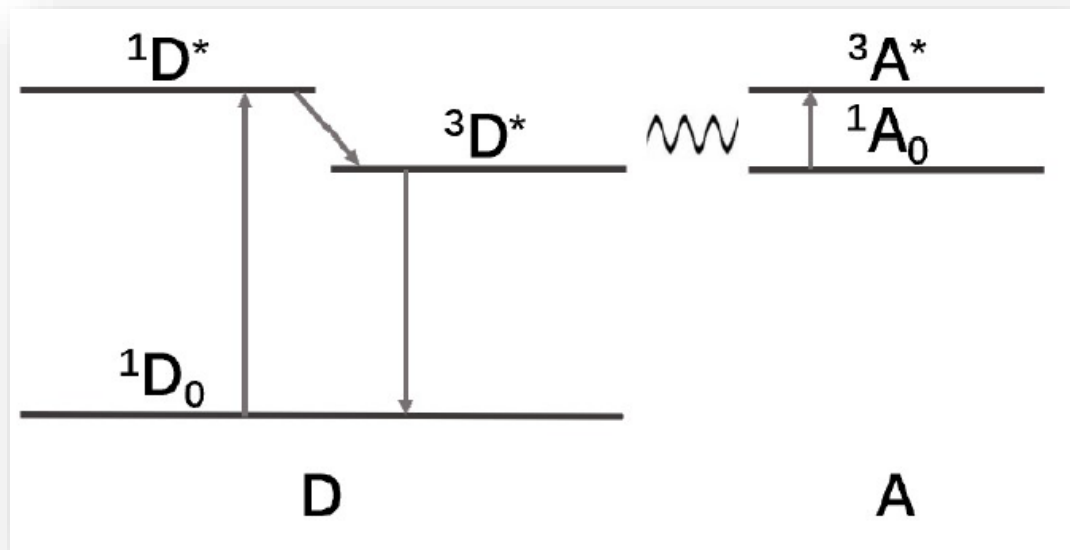
分子结构，“磁”属性，
液闪淬灭

另一淬灭机制：系间穿越（单重态->三重态）



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

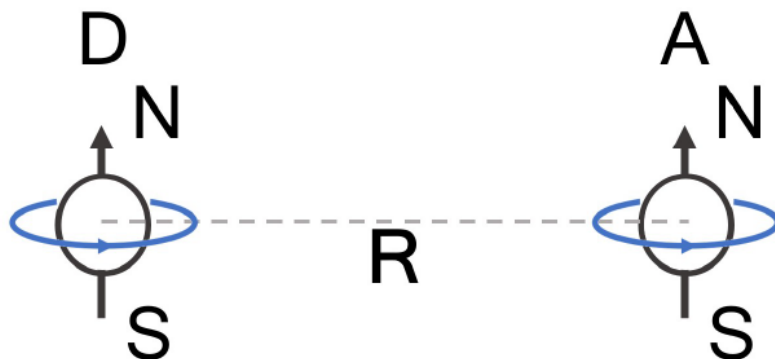
磁偶极偶极相互作用——诱导淬灭



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

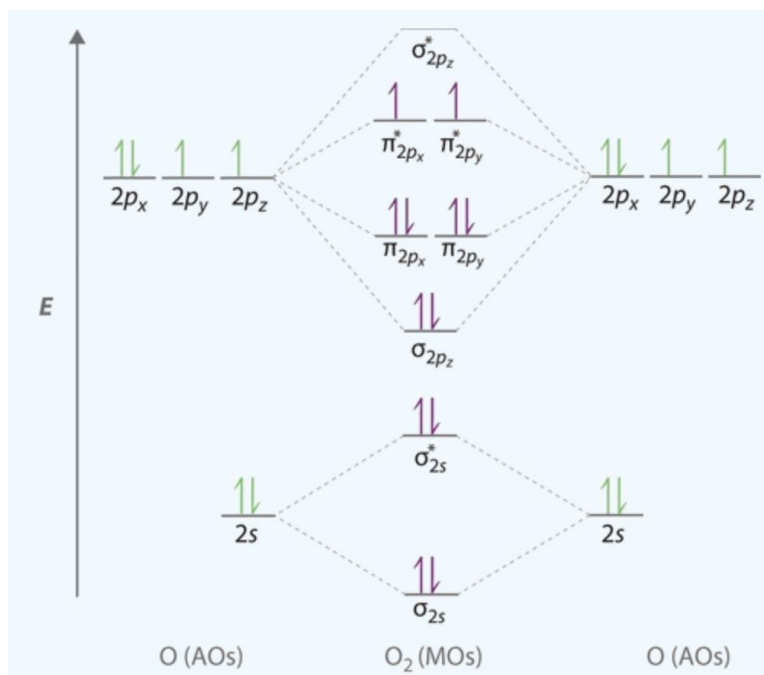
$$H = \langle \Psi_{3D^*} \Psi_{3A^*} | W | \Psi_{1D^*} \Psi_{1A_0} \rangle$$

跃迁概率

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

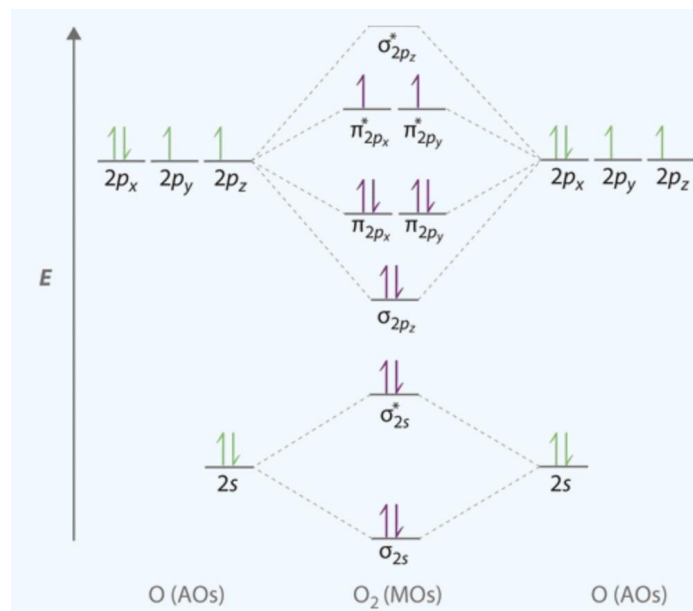
氧气分子的顺磁性

- 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 $8 \times 10^{-4} \text{ mole/mole}$



磁偶极偶极相互作用与氧气的淬灭

- 长程相互作用，虚光子(一个长程的淬灭机制)
- O_2 , 顺磁物质，基态三重态，第一激发态单态，能级差0.977 eV
- 苯（烷基苯类似）的第一激发单能态与第一激发三重态的能级差为0.96 eV，与 O_2 的情况匹配
- 可以很好的解释小浓度溶解氧造成的淬灭（增加了以往的解释）



总结

- 极性分子，通过阻止正负离子复合，可能引起淬灭
- 长程磁偶极偶极跃迁，可能增进系间穿越概率，引起淬灭
- 但是，这些可能不是TeBD的淬灭主因，仍在研究过程中

欢迎您的问题和意见