



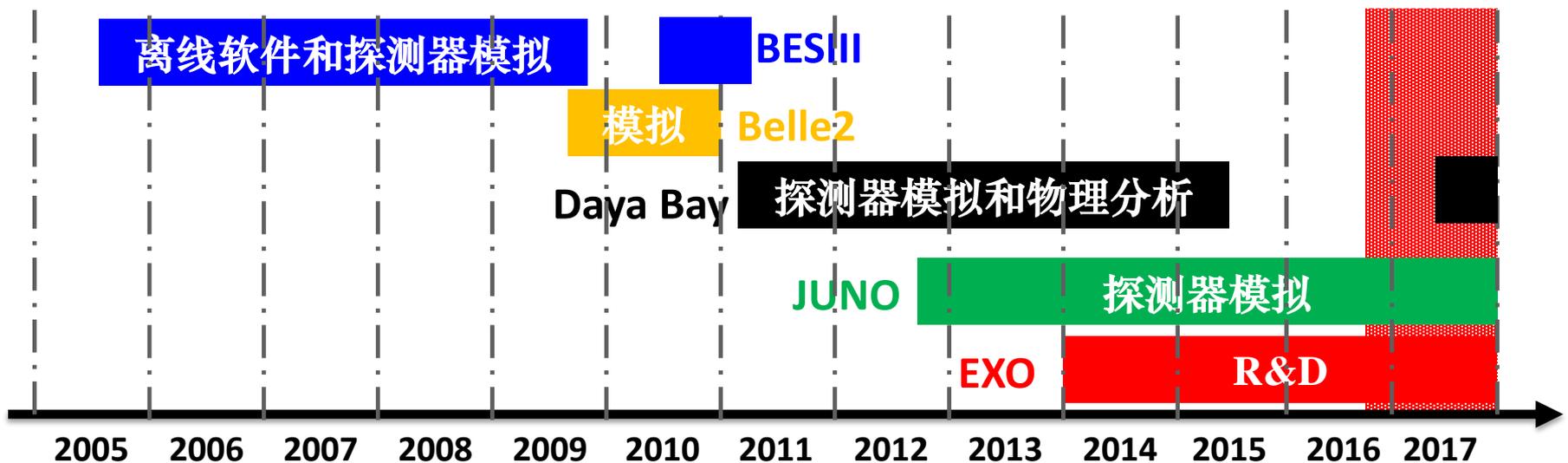
2017年卓越中心青年骨干评审

曹国富

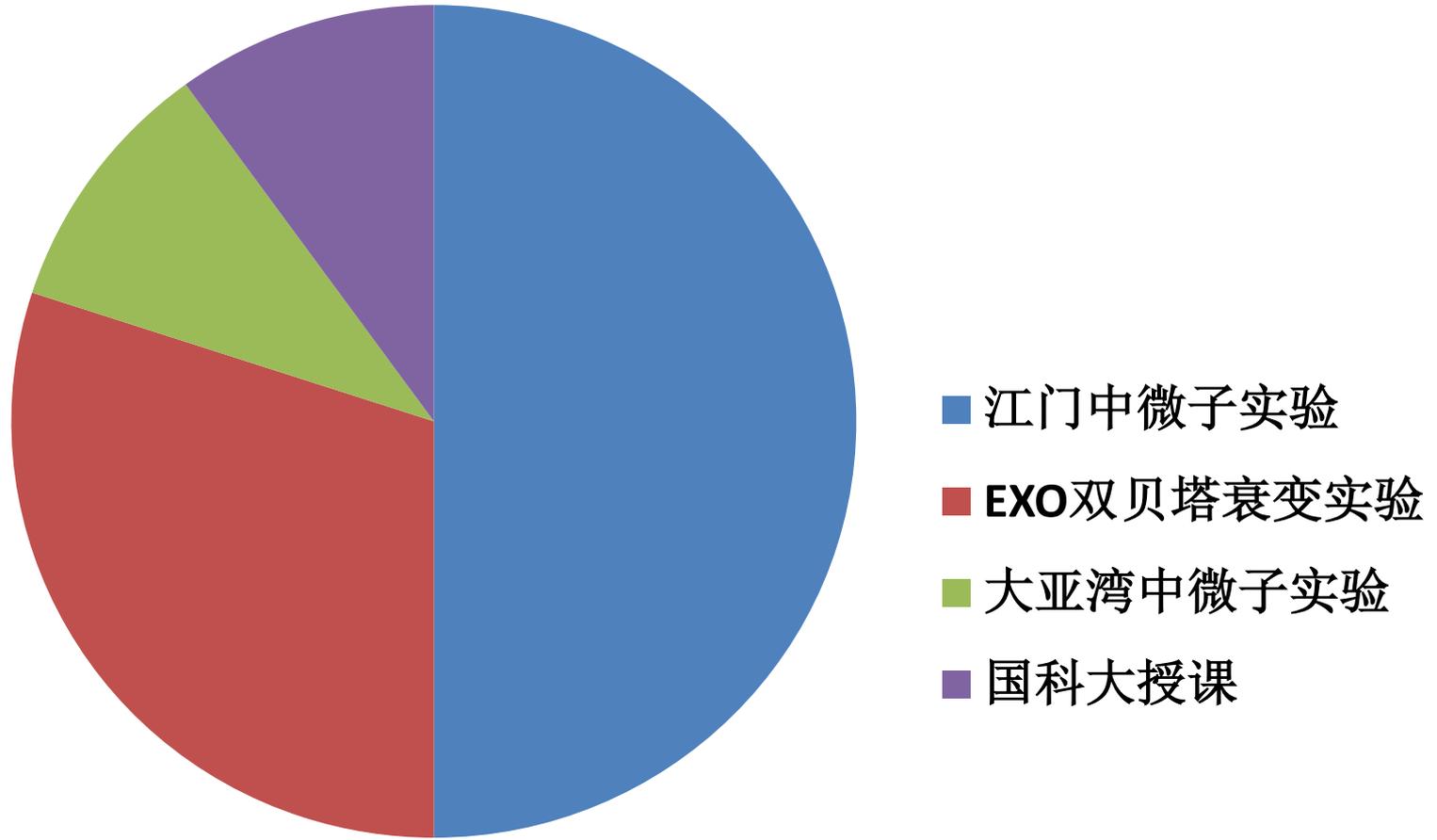
高能物理研究所，实验物理中心

2017.12.02

- ✧ 高能所，副研究员，2012.07 ~ 至今
- ✧ 斯坦福大学，访问学者，2014.03 ~ 2014.09 (高能所资助)
- ✧ 高能所，助理研究员，2011.03 ~ 2012.07
- ✧ 高能所，博士后，2009.07 ~ 2011.03
- ✧ 日本KEK，访问学者，2009.12 ~ 2010.06 (KEK资助)
- ✧ 高能所，硕博连读，2004.09 ~ 2009.07



2016.11 ~ 2017.11



❄ 物理目标: 寻找无中微子的双贝塔衰变 (^{136}Xe)

$$T_{1/2} (\beta\beta 0\nu ^{136}\text{Xe}) > 10^{28} \text{ y at 90\% C.L. (5 years)}$$

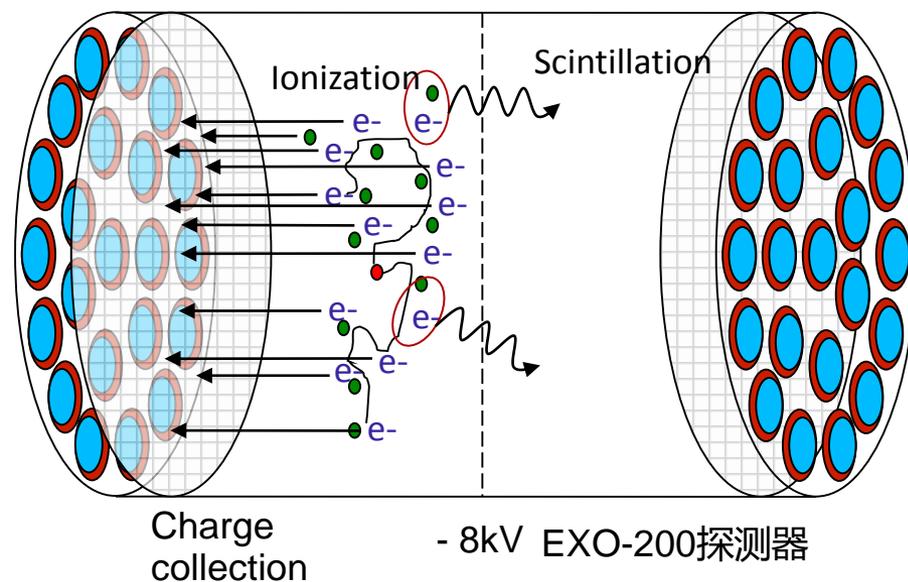
❄ 两个阶段:

➤ EXO-200实验已经取得了成功: 国际上最精确的 ^{136}Xe $2\nu\beta\beta$ 寿命测量; 最好的 ^{136}Xe $0\nu\beta\beta$ 寿命灵敏度; --- 正在运行中

➤ nEXO是EXO-200的下一代实验项目, 5吨液氙TPC探测器: a) <1%能量分辨率; b) 极低本底水平 (EXO-200/40); --- R&D阶段

高能所是EXO合作组的成员单位, 对nEXO的主要贡献包括:

- ① nEXO探测器模拟 (曹国富/温良剑)
- ② nEXO液氙TPC电荷读出 (温良剑)
- ③ nEXO液氙TPC电荷读出低温电子学 (江晓山)
- ④ nEXO液氙TPC光探测器 (曹国富)
- ⑤ 本底测量 (温良剑)
- ⑥ 高能所小液氙TPC (曹国富等5人)



❄ nEXO光探测器组联合负责人 (co-L2 manager).

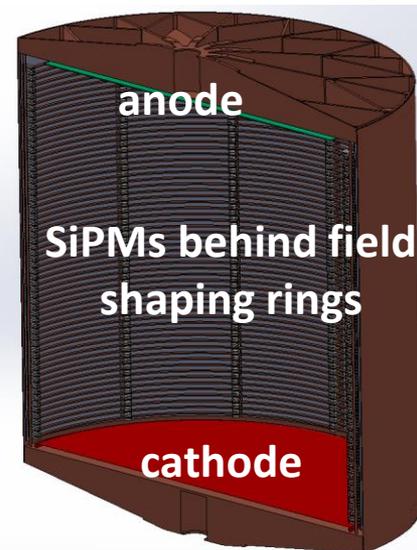
- Fabrice (TRIUMF), Guofu Cao (IHEP).
- 组织每两周一次的光探测器组会，协调各项R&D工作。
- 参加每两周一次的L2 manager会议。

❄ 光探测器主要的R&D任务：

1. 光探测器模拟 (IHEP)
2. 反射式电极R&D (IHEP)
3. SiPM研发与采购 (Stanford, TRIUMF, Erlangen)
4. SiPM测试 (IHEP, Stanford, TRIUMF, BNL, UMASS, Erlangen)
5. 反射率测量 (IHEP, UA, Erlangen)
6. Silicon interposer (IME, IHEP, ...)

❄ 过去一年光探测器相关的主要工作

- SiPM高压测试
- 反射率测量



- ❄ **目的:** 在nEXO的TPC探测器内, 部分SiPM将工作在强电场区域, 最高可达 30kV/cm 。因此, 有必要研究SiPM在强电场环境下的性能。
- ❄ **该项工作已经完成, 文章正在nEXO合作组内部评审。**
 - 已测SiPM包括: **FBK-RGB, FBK-VUV-STD, FBK-VUV-LF, Hamamatsu-VUV3**
 - 研究了外加电场对SiPM增益、光学串扰、后脉冲和效率等性能的影响。
- ❄ **初步结论:**
 - 在 $0\sim 30\text{kV/cm}$ 范围内, 未观测到SiPM各项性能随外加电场变化。
 - 在 200kV/cm 的强电场下, SiPM仍能工作。

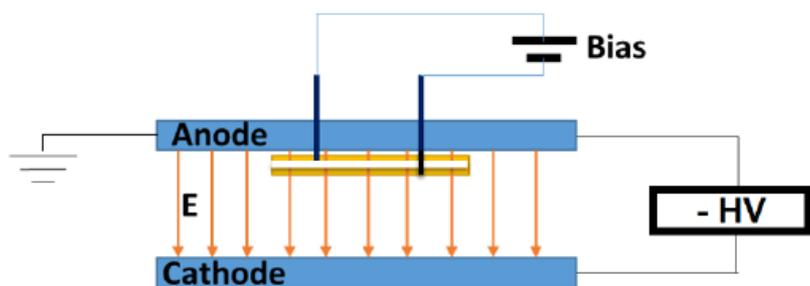
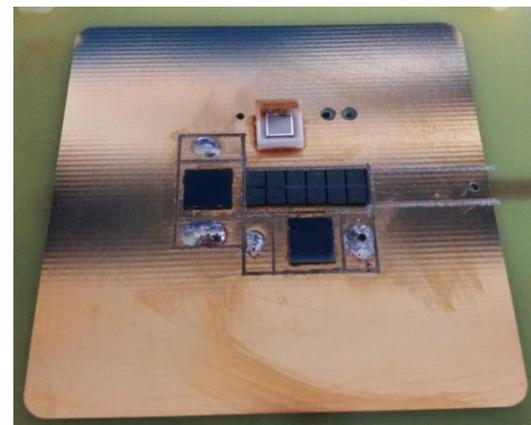
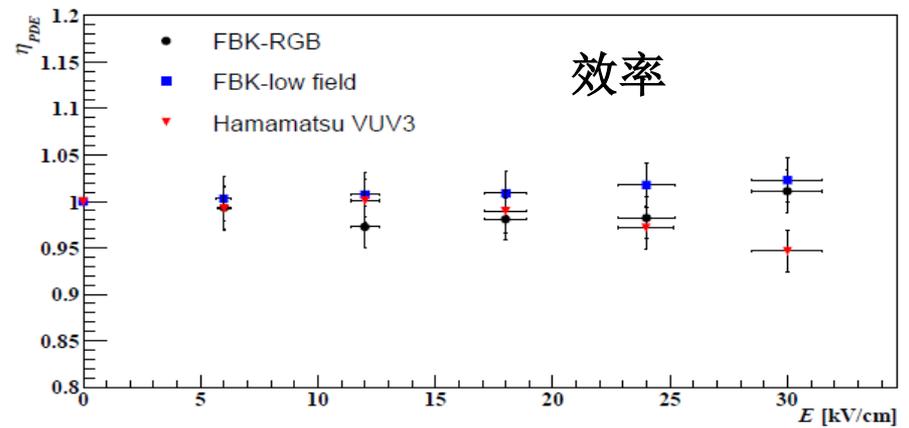
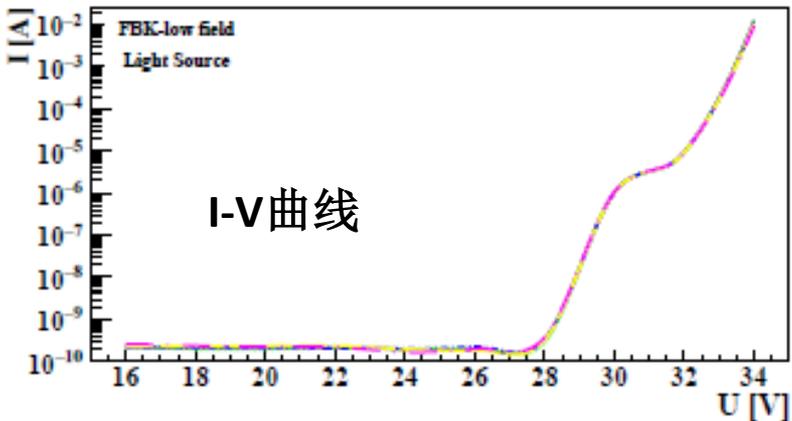
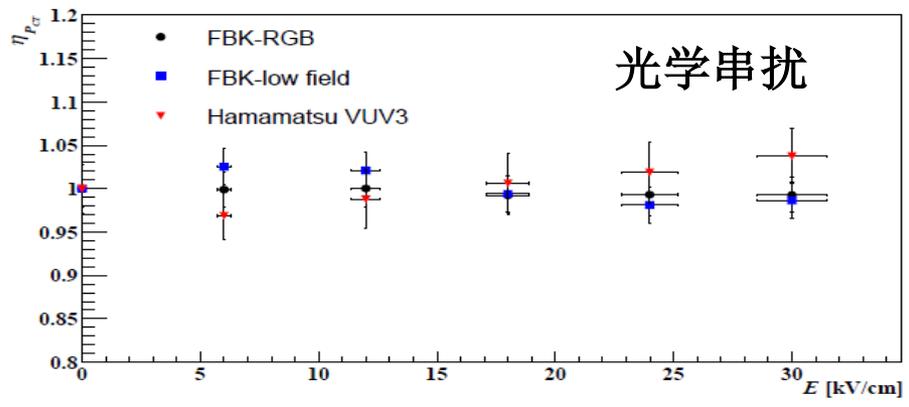
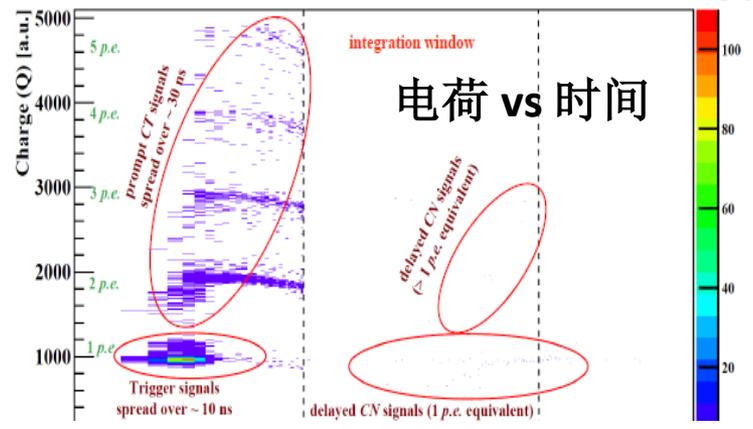
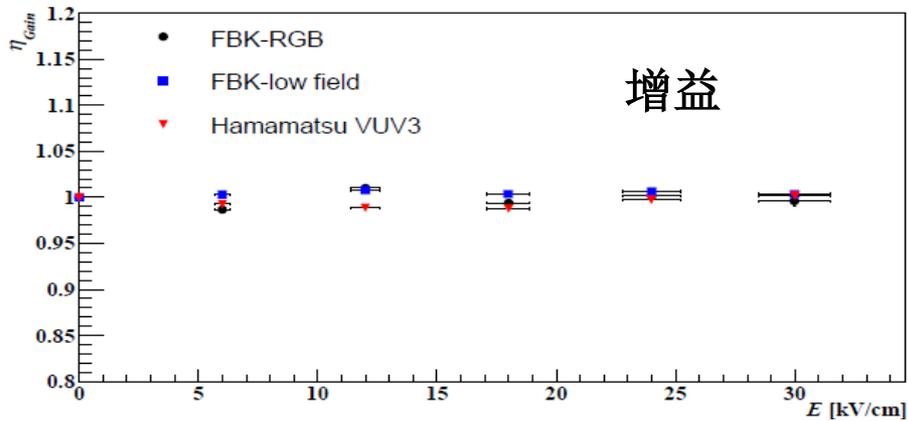
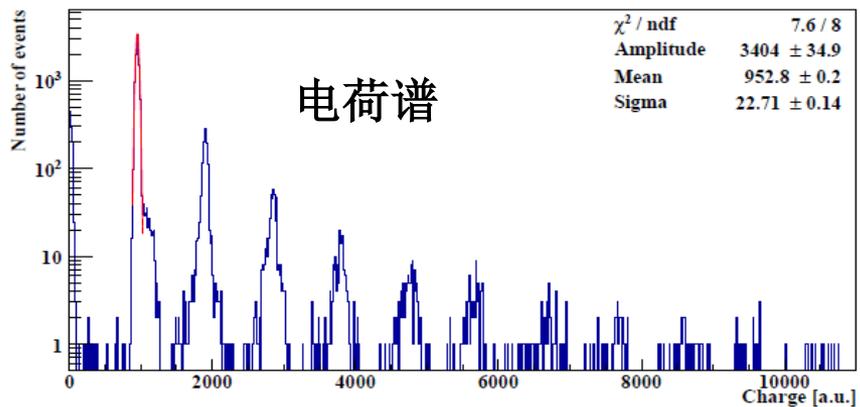


Figure 2: Conceptual design of the SiPM high electric field performance test.





难点： a) 175nm; b) 漫反射

✧ 目标：

- 测量并理解SiPM反射率，决定SiPM探测效率性能指标的确定。
- 测量TPC内各个部件的反射率。

✧ 实验装置

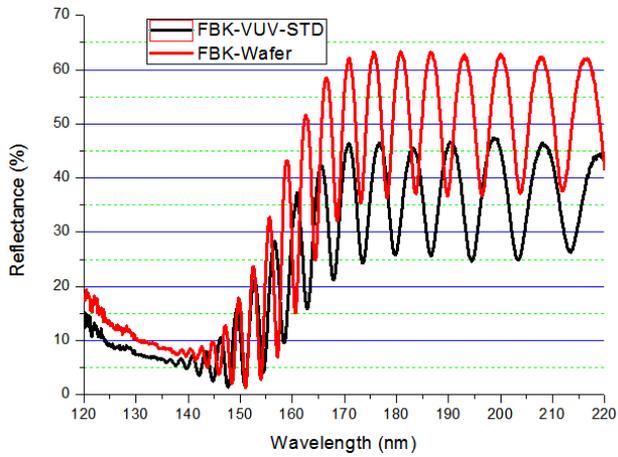
- 基于SLAC的一台测量装置，对多个样品的反射率进行了测量。
- 成光所镜反射装置 + 193nm漫反射装置。
- 高能所3D反射率测量系统 (正在组装和调试)

✧ 过去一年进展

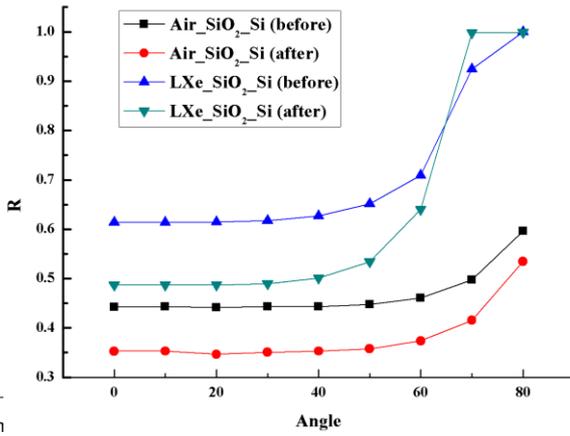
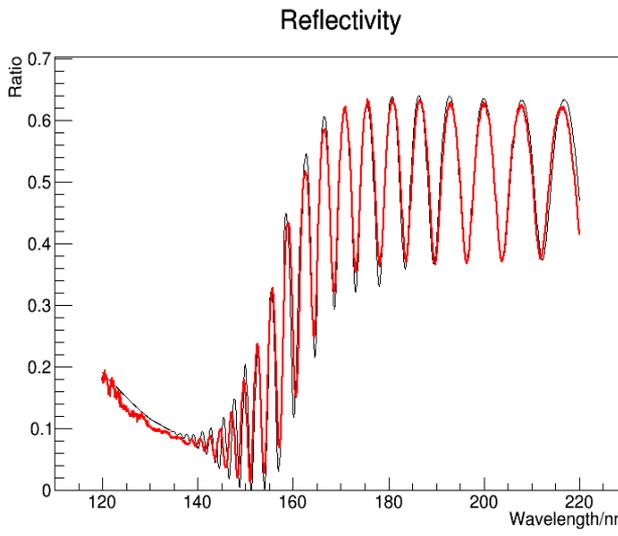
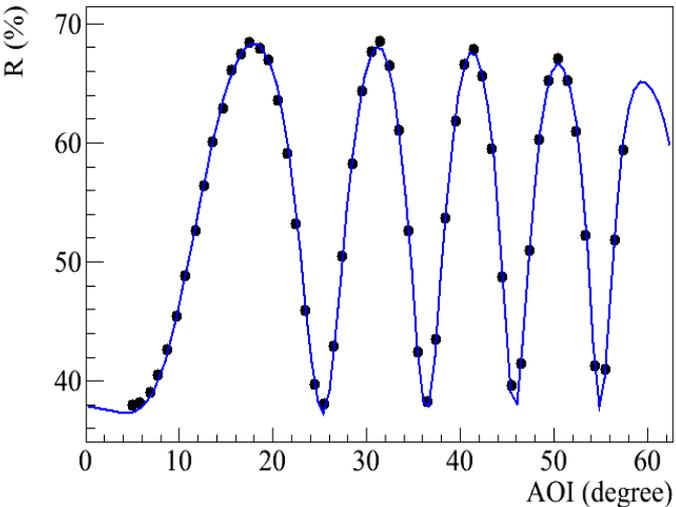
- 测量了FBK-VUV-STD, FBK-VUV-LF和Si-wafer在120nm - 200nm波段的镜面反射(10度入射)，以及在193nm的漫反射
- 测量了FBK-VUV-LF和Si-wafer反射率随入射角的变化 (波长为128nm, 170nm, 175nm, 180nm和200nm)
- 分析上述测量结果，以期提取各个波长硅和二氧化硅的折射率 (进行中)。
- 高能所3D反射率测量系统各部件已基本就位(单色仪除外)，正在进行组装和调试。

- ✧ 迄今为止，nEXO内所有反射率测量结果(真空或氮气)均由我们提供，计划明年发表一篇反射率测量文章。

反射率测量相关结果展示 (曹国富/吕品)



| Device | Specular (177nm, 10 degree) | Diffuse(193 nm) |
|-------------|-----------------------------|-----------------|
| FBK-VUV-STD | 35% | 11.5% |
| FBK-VUV-LF | 40% | 12.3% |
| FBK-RGB | 38% | 17% |
| FBK wafer* | 50% | 0.16% |



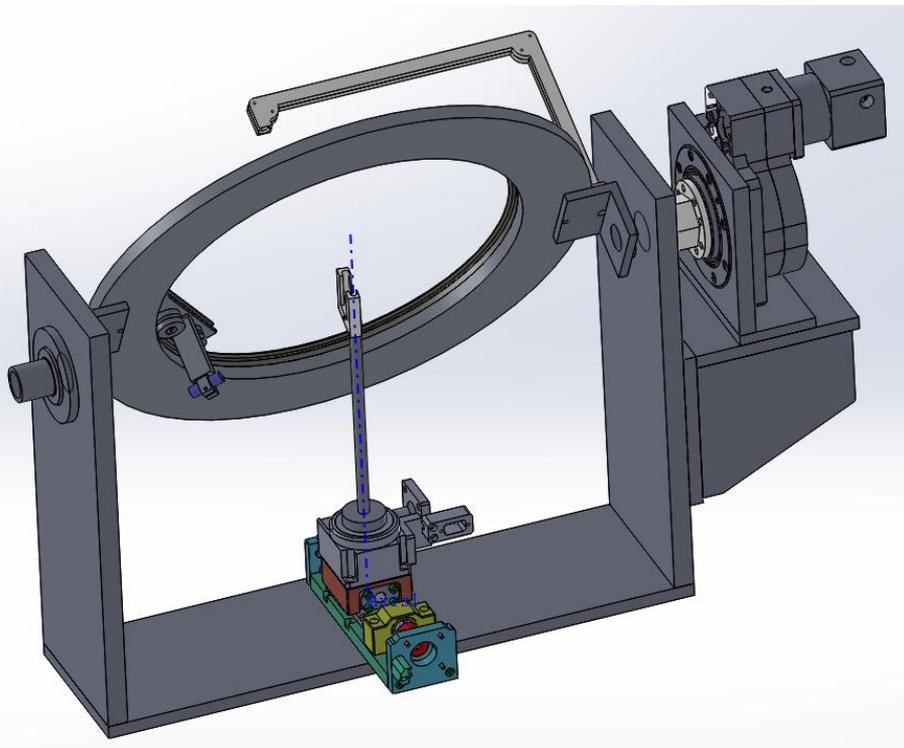
175nm 反射率 vs 入射角
 黑点: 测量值
 蓝线: 拟合曲线

10度入射, 反射率 vs 波长
 红线: 测量值
 黑线: 拟合曲线

预期液氙中的反射率

该装置各个部件已经基本就位(单色仪除外, 先使用滤光片), 正在进行组装和调试。

- ① 可以使用不同光源, 实现不同波长下镜面反射+漫反射测量。对于VUV, 将使用氮气或氩气。
- ② 可以测量不同入射角的镜面反射+漫反射。
- ③ 计划将来能够实现自动控制。



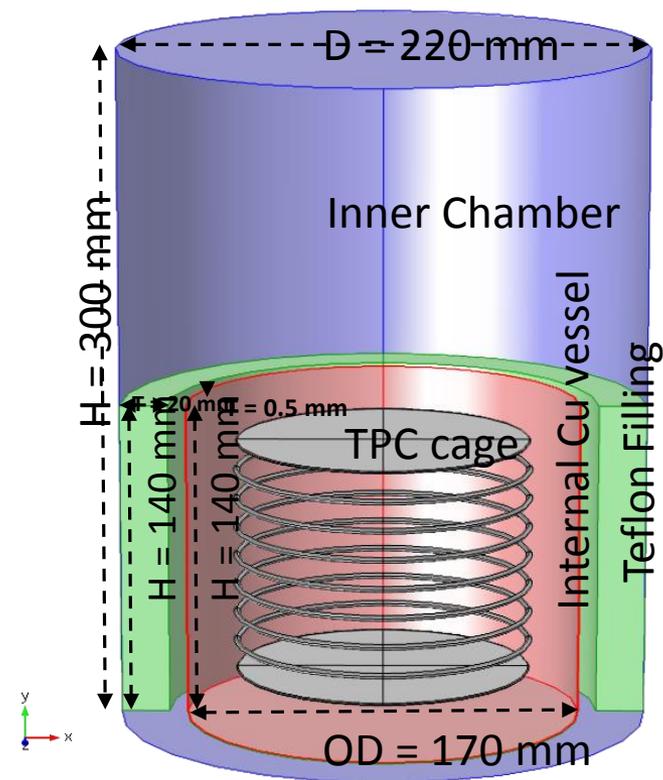
❄ 基于高能所液氙测试系统，设计并搭建一个液氙TPC探测器。

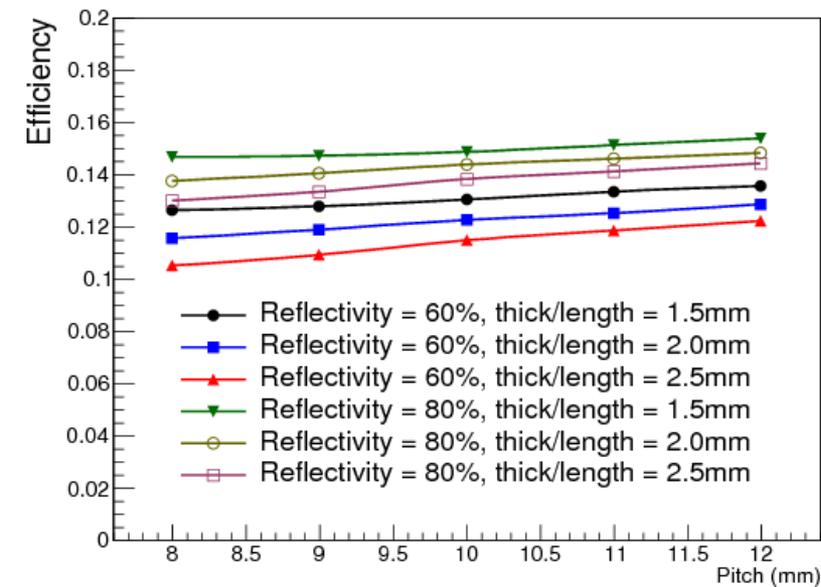
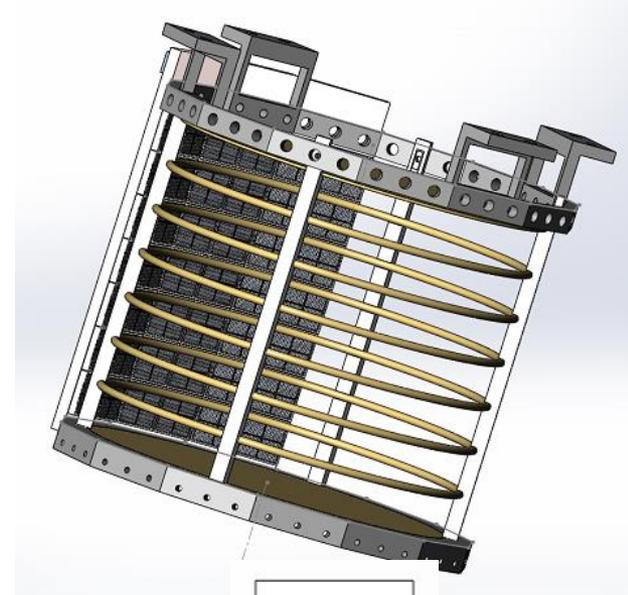
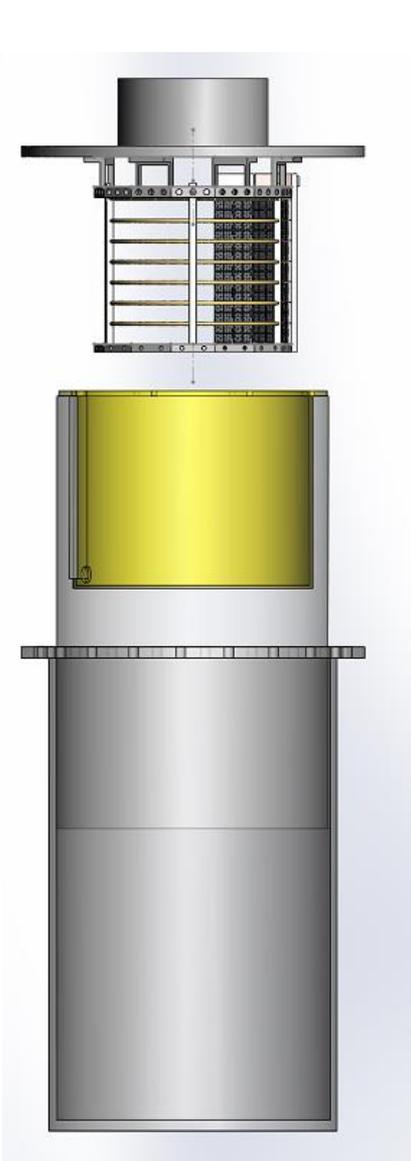
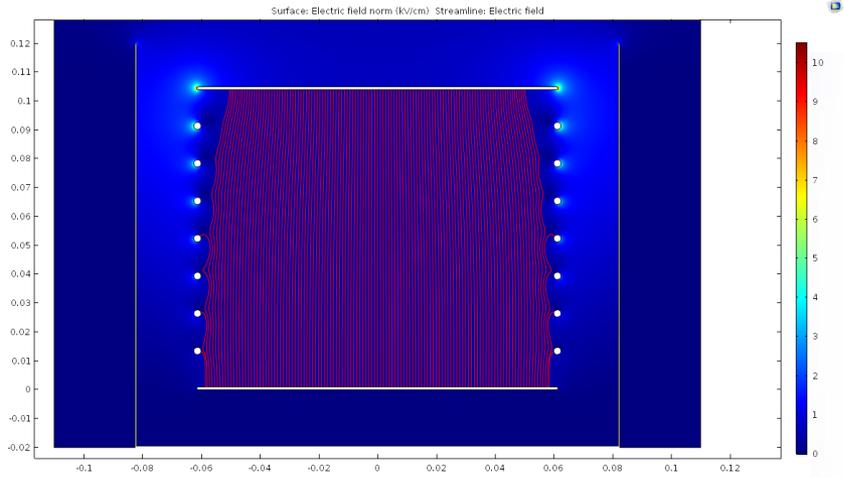
❄ 目标:

- 1% (2.458MeV)能量分辨率
- 测试电荷读出模块
- 测试电荷读出电子学
- 测试光探测器(200片 1cm^2 SiPM)性能
- 研究液氙性质

❄ 目前进展

- 完成静电场模拟和光收集效率模拟
- 完成TPC参数确定和结构设计
- 200片滨松VUV4 MPPC正在采购
- SiPM读出方案正在讨论和测试中
- 电荷读出模块和读出电子学正在调试 (IME/高能所电子学组)





✧ **JUNO探测器模拟组联合召集人 (Level 3)**，负责探测器模拟。

✧ 过去一年主要工作

1. **PMT光学模型研究 (博士研究课题, 王耀光/曹国富)**

➢ 模型框架已经完成, 模型优化及与数据对比正在进行中

2. **PMT性能测试**

➢ 测试系统已经完成搭建, 包括带地磁屏蔽暗室, PMT测试平台, 读出系统等 (曹国富/温良剑/侯少静/王耀光/赵荣/Tamer)

➢ PMT性能测试, 服务于光学模型, 已测量10只不同型号的PMT (王耀光/赵荣/曹国富/温良剑)

3. **液闪发光时间测量 (王洪鑫/曹国富)**

➢ 测量了不同PPO、bis-MSB浓度配比的液闪发光时间, 包括电子, 阿尔法和中子三种不同粒子

➢ 数据获取已经完成, 正在进行数据分析。

4. **能量分辨率研究 (张岩/曹国富)**

➢ 结果最新的泛亚批量PMT测试结果, 研究不同效应对能量分辨率的影响, 基本完成。

5. **电子学模拟更新 (张岩/曹国富)**

➢ 基于PMT测试结果, 对电子学模拟中的相关参数和模型进行了更新, 对数据结构进行了优化, 已经完成。

1. PMT光学模型研究

□ **目标：**实现不同光场和介质间PMT响应的转换，考虑不同入射角的光PMT响应。

□ **目前进展：**

- 已经建立PMT光学模型的基本思路、方法和框架。
- 已经得到一些与实测数据初步的对比结果。
- 模型中所用的参数，还需要从更多的测试数据中提取（计划中）
- 模型的改进和优化，还需要与更多的实验数据比较（进行中）

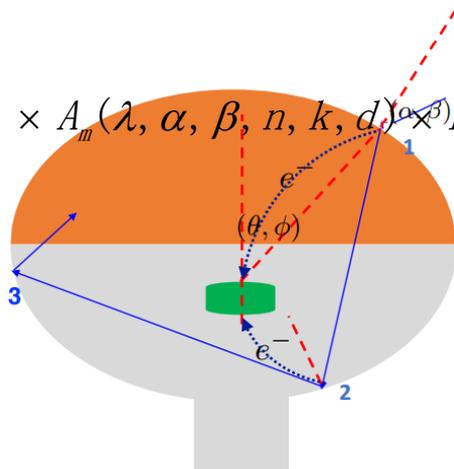
$$DE = A_1(\lambda, \alpha, \beta, n, k, d) \times P_1(\lambda, \alpha, \beta) \times CE_1(\theta, \varphi) +$$

$$T_1 \times A_2(\lambda, \alpha, \beta, n, k, d) \times P_2(\lambda, \alpha, \beta) \times CE_2(\theta, \varphi) +$$

$$R_2 \times T_1 \times A_3(\lambda, \alpha, \beta, n, k, d) \times P_3(\lambda, \alpha, \beta) \times CE_3(\theta, \varphi) +$$

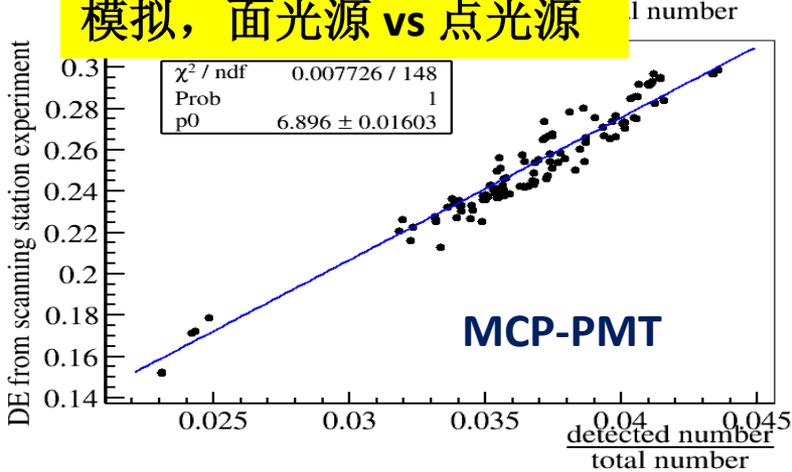
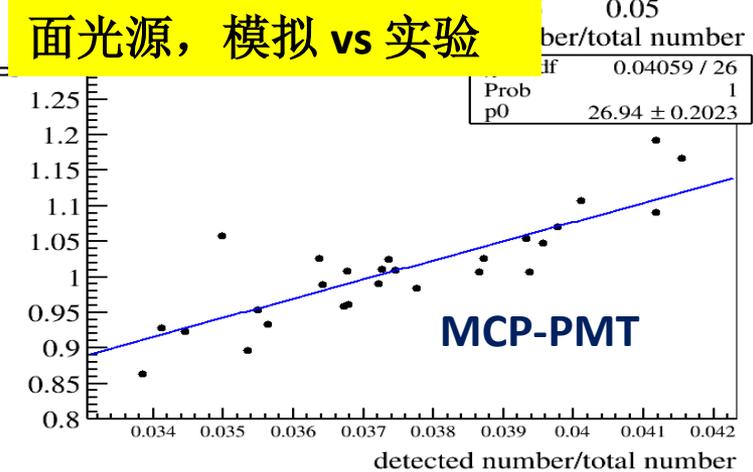
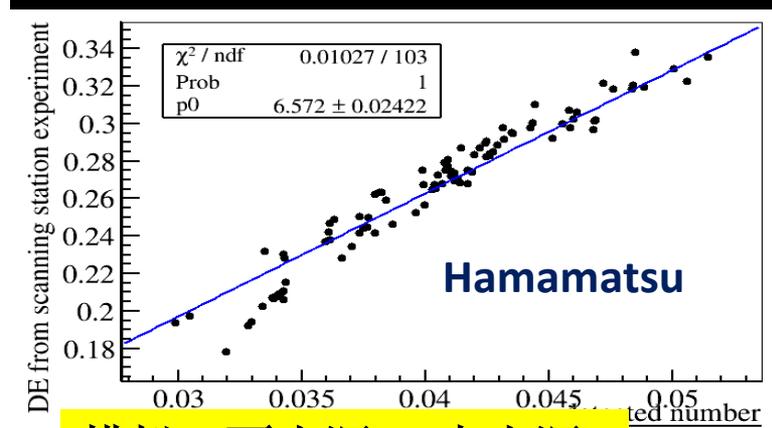
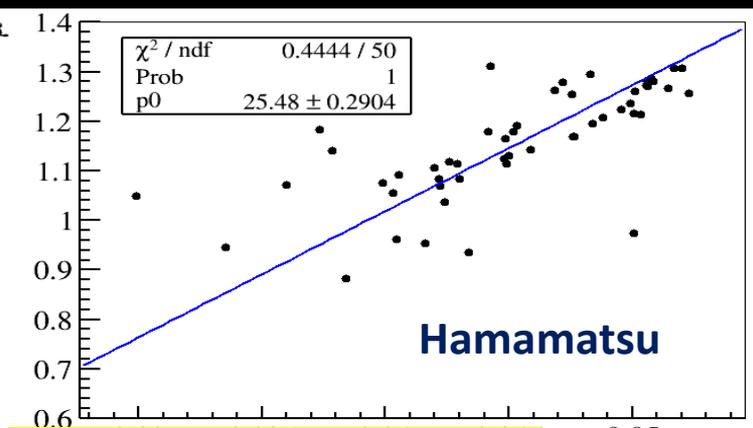
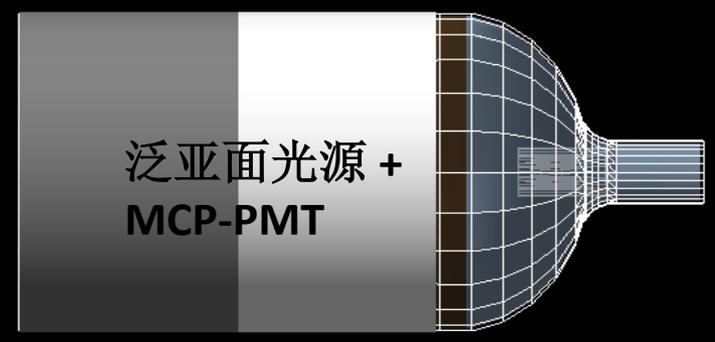
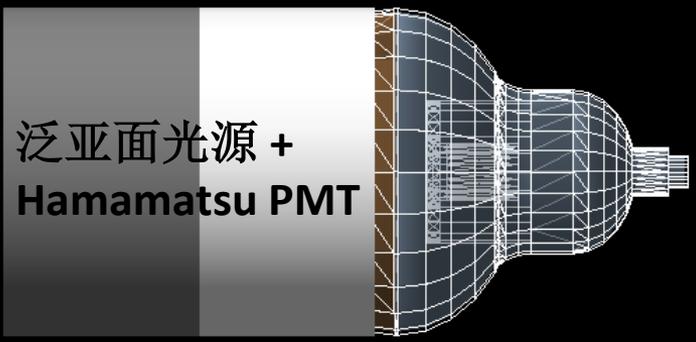
... ..

$$\prod_{i=2}^{m-1} R_i \times T_1 \times A_m(\lambda, \alpha, \beta, n, k, d) \times P_m(\lambda, \alpha, \beta) \times CE_m(\theta, \varphi)$$



| Parameter | Variables |
|-----------------------|---------------------|
| Mn_iO_j | n_1, k_1, d_1 |
| Al film | n_2, k_2, d_2 |
| Photocathode | n_3, k_3, d_3 |
| Collection efficiency | $CE(\theta, \phi)$ |
| Conversion factor | $P_{conv}(\lambda)$ |

1. PMT光学模型部分结果



面光源，模拟 vs 实验

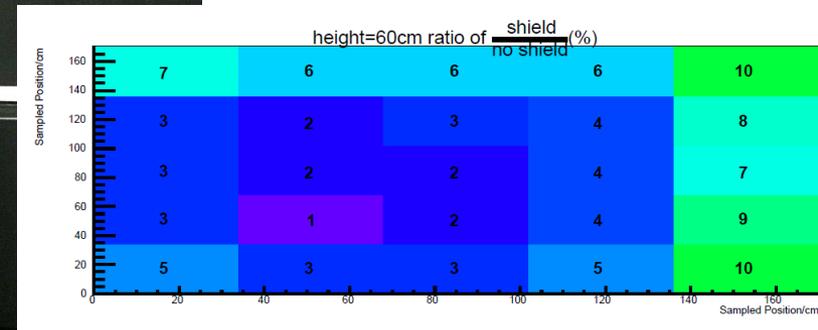
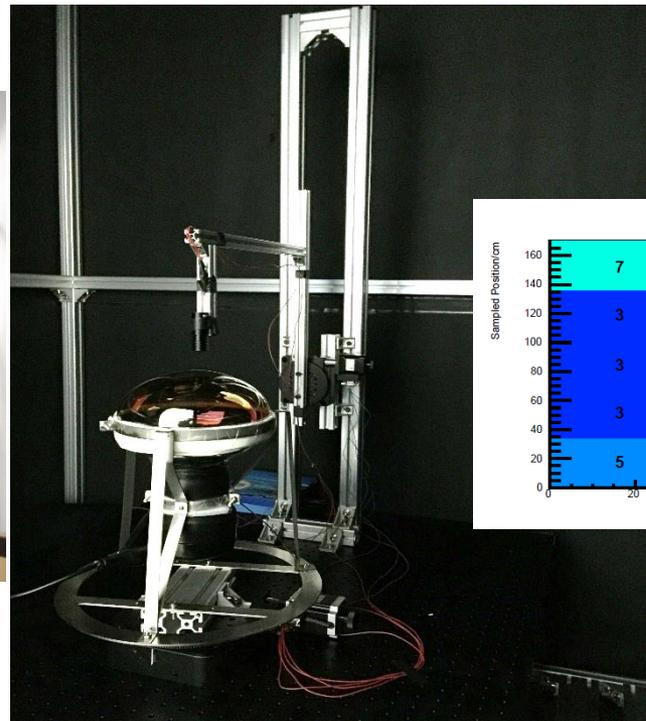
模拟，面光源 vs 点光源

2. PMT性能测试

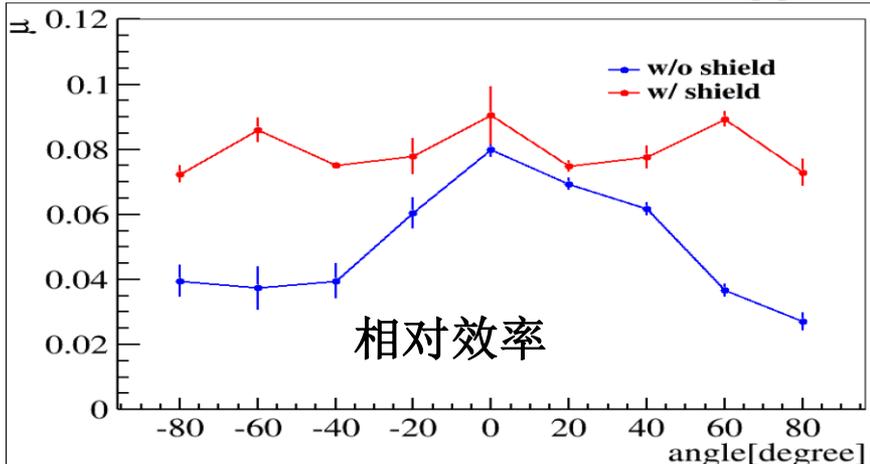
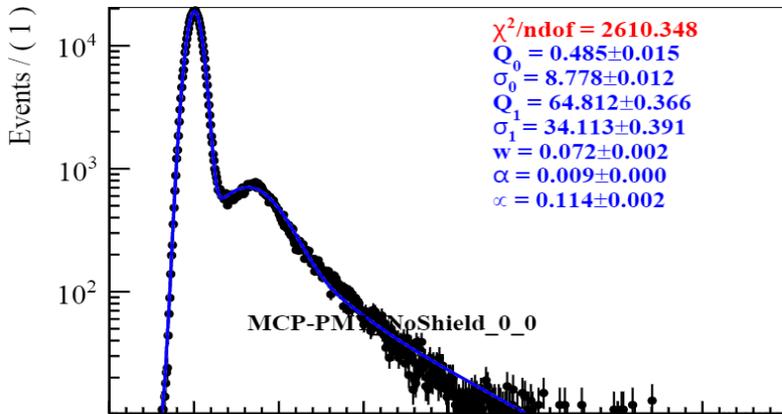
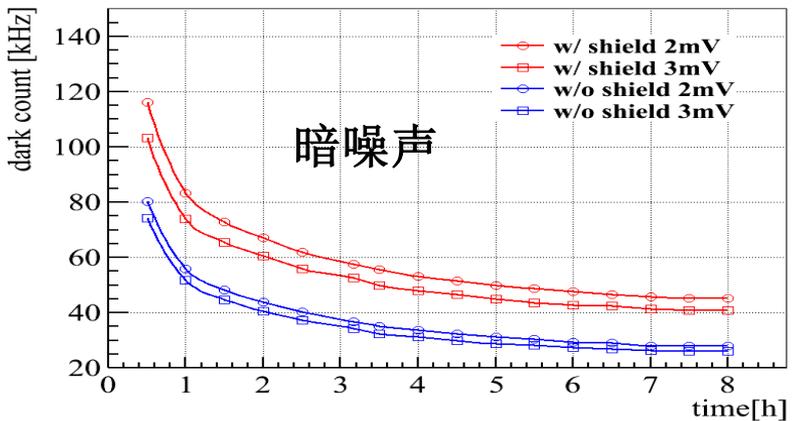
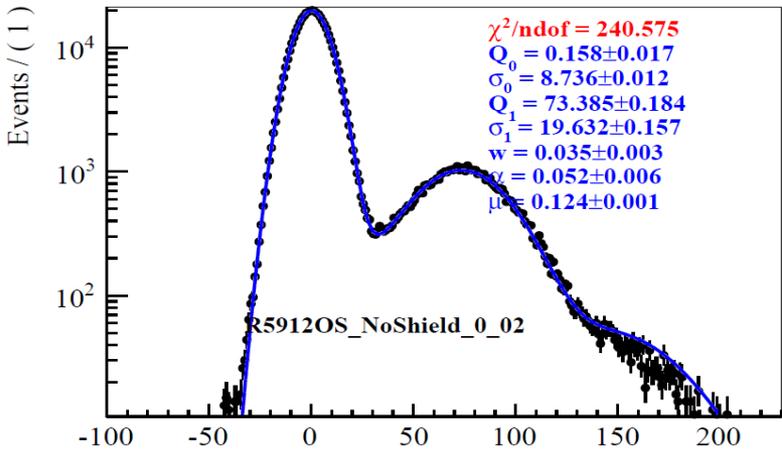
□ **目标：**服务于PMT光学模型，测量PMT性能。

□ **目前进展：**

- PMT测试系统已经建立，测试区残余地磁 $<5\%$ ，屏蔽 $0\% - 100\%$ 可调。
- 已经测量了10只不同类型PMT的相对探测效率，包括3只8” R5912，2只20” R12860和5只MCP-PMT，**垂直入射、全光阴极扫描。**
- 已经得到一些初步结果。
- **测量不同入射角的PMT响应（计划中）**



2. PMT性能测试初步结果



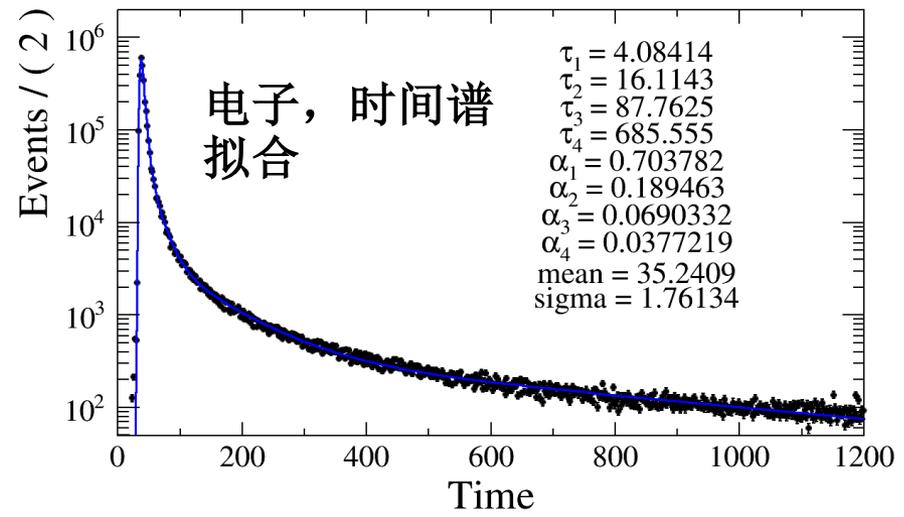
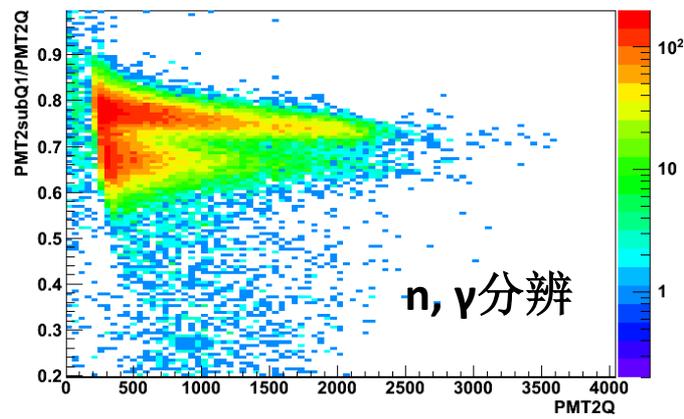
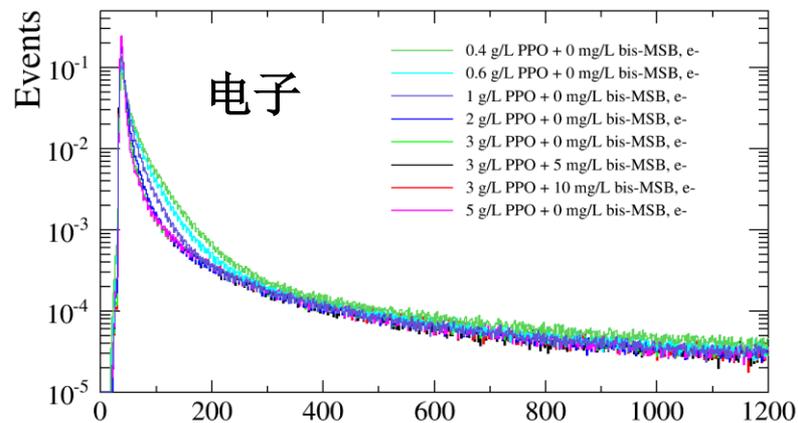
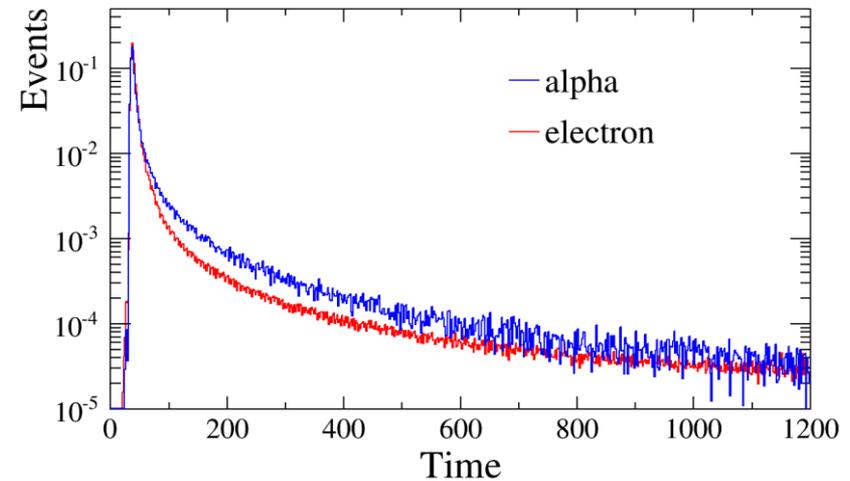
| PMT类型 | 日期 | 全谱拟合 μ_1 | | 台阶拟合 μ_1 | | μ_2 |
|---------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|
| | | 拟合 | 计数 | 拟合 | 计数 | |
| 油封R5912 | 4月27日 | 0.131 (1.00) | 0.134 (1.00) | 0.145 (1.00) | 0.144 (1.00) | 13.952 |
| | 5月11日 | 0.156 (1.00) | 0.156 (0.97) | 0.174 (1.00) | 0.172 (1.00) | 16.675 |
| EA0087 | 5月4日 | 0.118 (0.95) | 0.148 (1.17) | 0.159 (1.16) | 0.157 (1.15) | 13.202 |
| | 5月9日 | 0.131 (0.97) | 0.161 (1.17) | 0.176 (1.18) | 0.174 (1.17) | 14.360 |
| MCP-PMT | 5月7日 | - | - | 0.187 (1.17) | 0.181 (1.14) | 15.319 |

3. 液闪发光时间测量

□ 目标：测量液闪发光时间，研究PSD粒子鉴别。

□ 目前进展：

- 对于e-和 α ，已经测完8种不同浓度配比的液闪发光时间。对于中子，测量了一种。
- 数据获取已经完成。
- 正在进行数据分析。



- **目标：**基于现有批量PMT测试结果，研究不同效应对能量分辨率的影响。
- **目前进展：**
 - 基本完成，正在对结果进行最后的检验。

4. 能量分辨率研究

| Conditions | | A | B | C | Effective(E=1MeV) |
|--------------------------|--|-------|--------|-------|-------------------|
| Detector Simulation | Fix QE | 2.68 | 0.77 | 0 | 2.82% |
| | QE with distribution of each PMT, sigmaQE= 20% | 2.78 | 0.71 | 0 | 2.86% |
| | 8% nonuniformity of QE in each PMT | 2.71 | 0.75 | 0 | 2.81% |
| | After detsim | 2.83 | 0.704 | 0 | 2.90% |
| | Close Cherenkov Quenching | 2.788 | 0.0022 | 0 | 2.78% |
| | closeCherenkov | 2.85 | 0.16 | 0 | 2.85% |
| | closeQuenching | 2.73 | 0.55 | 0 | 2.785% |
| Electronic Simulation | sigmaGain=0 | 2.87 | 0.65 | 0 | 2.94% |
| | sigmaGain=0.3 | 3.00 | 0.66 | 0 | 3.07% |
| | sigmaGain=0.3 with HMM testing distribution | 2.97 | 0.69 | 0 | 3.06% |
| | sigmaGain=0.3 With MCP testing distribution | 2.97 | 0.72 | 0. | 3.06% |
| | No white noise sigmaGain=0.3 | 3.05 | 0.64 | 0.003 | 3.11% |
| | 3.6% difference of QE sigmaGain=0.3 | 3.01 | 0.64 | 0 | 3.07% |
| | sigmaGain=0.4 | 3.15 | 0.69 | 0 | 3.22% |
| | sigmaGain=0.5 | 3.28 | 0.69 | 0 | 3.35% |
| | MCP large signal sigmaGain =0.3 | 3.42 | 0.73 | 0. | 3.49% |
| Open AfterPulse | 3.03 | 0.69 | 0 | 3.10% | |

- ✱ 基于最新的PMT测试数据，在电子学模拟中对相关的参数进行了更新：
 - TTS
 - 暗噪声
 - 单光子分辨
 - QE不均匀性
 - 电子学噪声
 - 单光电子波形

- ✱ 更新了对FADC的模拟，包括Tsinghua-ADC和 VULCAN ADC

- ✱ 对电子学模拟的数据结构进行了优化，使文件大小缩小为原来的1/3.

❄ 发表文章

- ① **New Study for SiPM Performance in High External Electric Field**
(合作组文章, 通讯作者, nEXO internal review)

❄ 国际会议报告

➤ **TIPP 2017, Beijing**

Talk: “Light Detection with Large Area SiPMs in nEXO”

➤ **X-PMT workshop, Nanjing**

Talk: “Photo-detector System with Large Area SiPM in nEXO”

谢谢!