



# 2020年卓越中心“拔尖人才”评审

**曹国富**

中科院高能物理研究所

2020年12月05日

- ❄ **完成BESIII探测器模拟的工程任务，为物理结果的产出提供了坚实的保障 (2005 - 2011)**
  - **第一篇使用BESIII实验数据的文章 [Nucl. Instrum. Meth. A 606(3) (2009) 700]**
  
- ❄ **设计并开发第一个版本的Belle II探测器模拟软件框架和CDC探测器模拟软件 (2009 - 2010)**
  
- ❄ **高精度探测器模拟是大亚湾实验精确测量中微子能谱和振荡参数的关键 (2011 - 2018)**
  - **作为大亚湾物理分析的核心成员和探测器模拟组的负责人，对GEANT4做了大量改进，实现了大亚湾探测器的高精度模拟**
  - **获得了国家自然科学基金青年基金的资助**
  
- ❄ **高精度探测器模拟同样是JUNO实验精确测量振荡参数的前提和保障 (2015 至今)**
  - **作为JUNO探测器模拟组联合负责人，已经完成模拟软件的设计和开发任务**
  - **带领团队致力于深入理解探测器，进一步提高能量分辨率和模拟精度**
  - **液闪光学模型**
  - **PMT光学模型 (2019年获得国家自然科学基金面上项目的资助)**
  
- ❄ **独自开发nEXO探测器模拟软件，独立完成TPC探测器设计相关所有模拟任务 (2014 - 2018)**
  - **“nEXO Pre-Conceptual Design Report”, arXiv:1805.11142**

## ✧ nEXO光探测器系统联合负责人 – L2 manager (2015 至今)

- 发表探测器技术文章6篇(高能所2篇/斯坦福2篇/UA 1篇/TRIUMF 1篇), 是发表文章最多的一个系统。
- 硅基转接板是实现极低本底光探测器的理想方案。与微电子所合作, 主导转接板研发工作, 2017年制作出国际上第一块大尺寸硅基转接板。2020年获得国家自然科学基金面上项目的资助
- nEXO能量分辨率受限于光收集效率, VUV反射电极可大幅提高光收集效率。主导VUV反射电极研发任务, 与成都光电院合作, 经过一年多的研发, 反射率已经满足nEXO要求。
- 高能所mini-nEXO液氙TPC, 研究能量分辨率, 负责并完成探测器设计、组装、以及光探测器调试

## ✧ nEXO光探测器系统project L3 manager (2019 至今)

## ✧ 台中微子实验(TAO) (2018 至今)

- 完成光探测器系统和电子学系统的概念设计报告
- 完成离线软件和计算系统的概念设计报告
- 读出电子学系统, Co-L3 manager
- 离线软件和计算系统, Co-L3 manager

TAO CDR, arXiv:2005.08745

❄ **能量分辨率是影响JUNO质量顺序测量灵敏度最为关键的参数，高精度模拟是实现精确测量的前提和保障！**

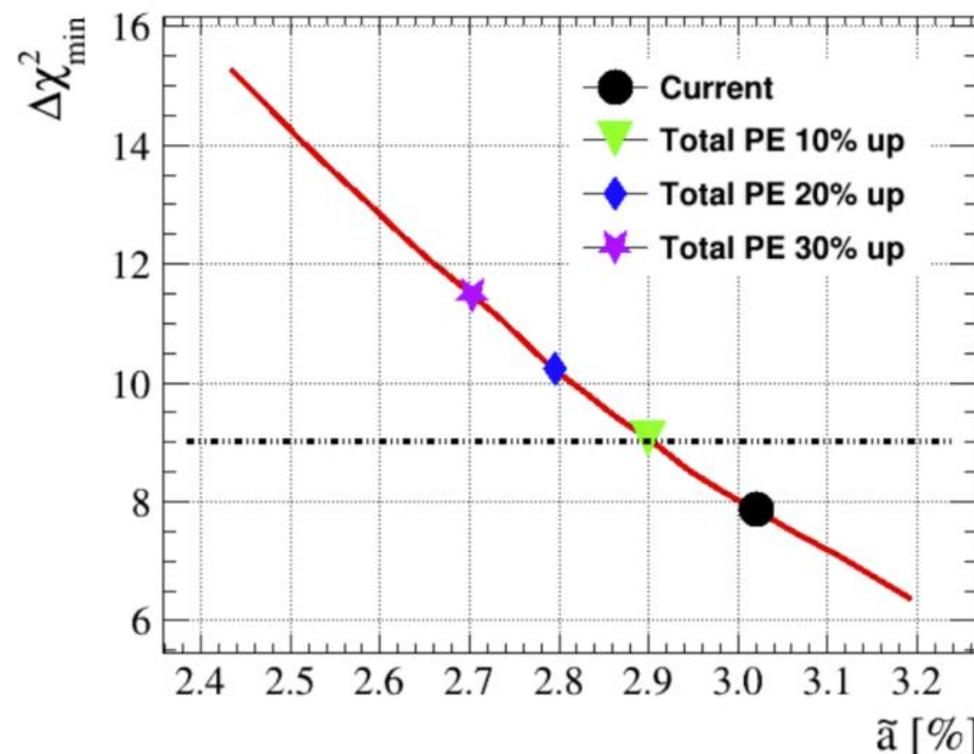
- 提高能量分辨率
- 提高探测器模拟精度

❄ **与各系统保持紧密联系，深入理解探测器，减少模拟中的自由参数**

- 几何参数，光学参数，PMT排布等
- 泛亚PMT测试系统的结果(效率、暗噪声、TT/TTS、角度依赖等)是PMT电学模拟的重要输入参数
- 基于电子学系统的测试数据，更新电子学响应模拟(波形、噪声、非线性等)

❄ **建立可靠的液闪光学模型**

❄ **建立可靠的PMT光学模型**





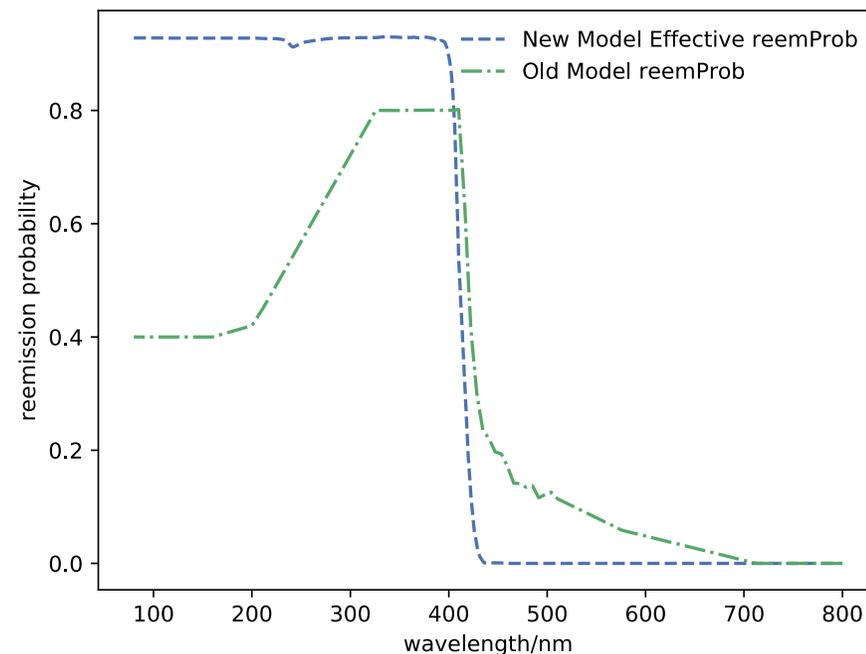
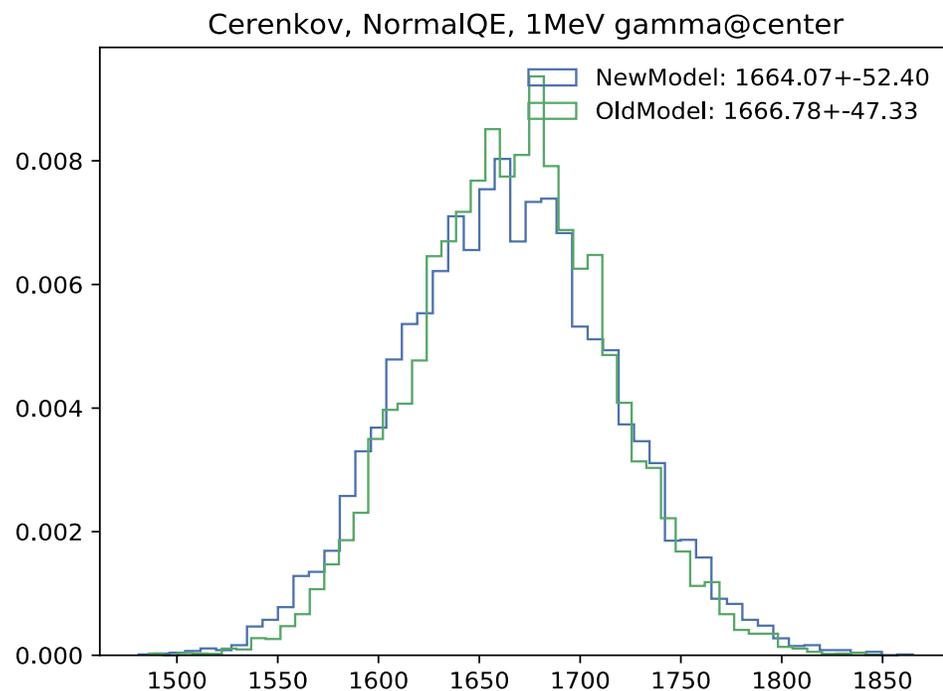
## ❄️ 准确理解切伦科夫光的贡献，需要：

### ➤ 切伦科夫光子的产生数目

- 液闪VUV波段的折射率 (与成都光电院合作)

### ➤ 液闪在VUV波段的重发射几率

- 基于高能所已有的VUV测量装置



model	Cerenkov	resolution
Old	OFF	2.625
Old	ON	2.838
New	OFF	2.716
New	ON	3.340

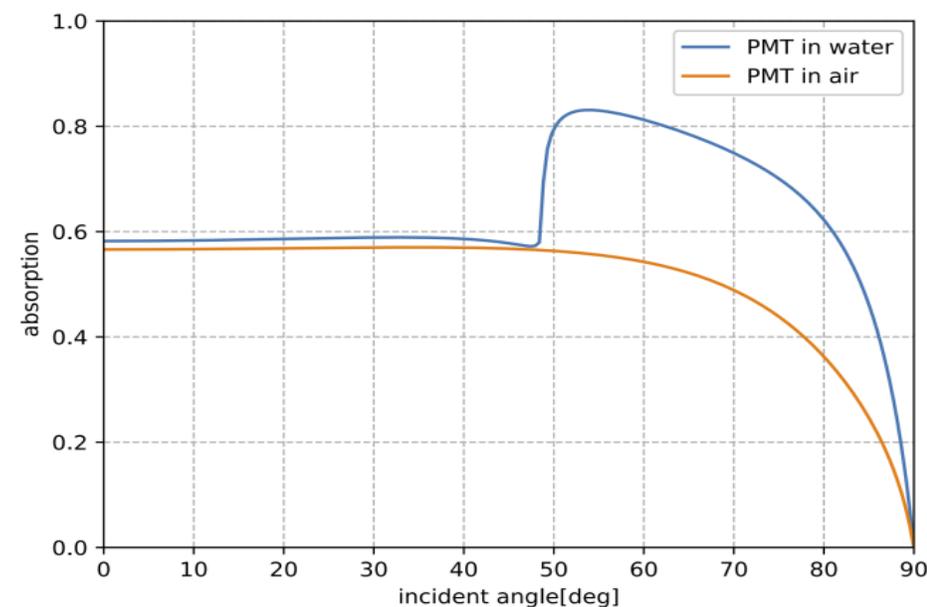
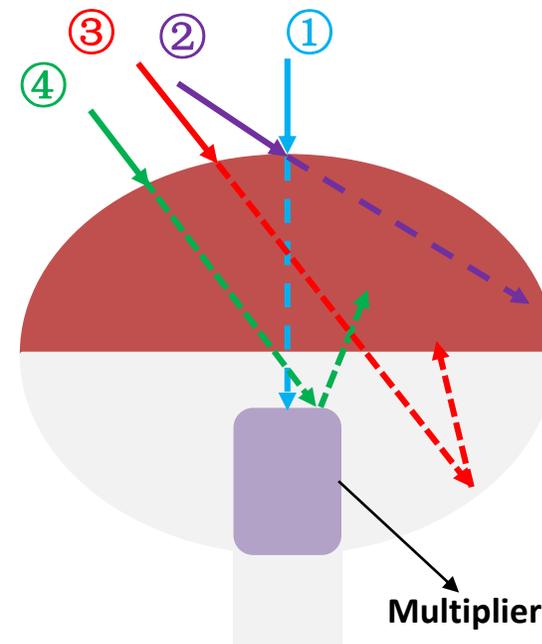
❄ 通过理论计算，我们发现：

- 当PMT工作在水中时，会发生全反射效应，从而提高PMT探测效率，同时提高PMT表面反射率
- 由于JUNO具有75%的光阴极覆盖率，PMT表面和内部反射的光很容易被其它PMT探测到 (这部分光子在PMT性能测量时通常归到效率损失中)

❄ 诸多液闪探测器取数后都发现光产额高于预期，这很可能是产生这一现象的根本原因

❄ 意味着JUNO探测器的光产额很可能也被低估

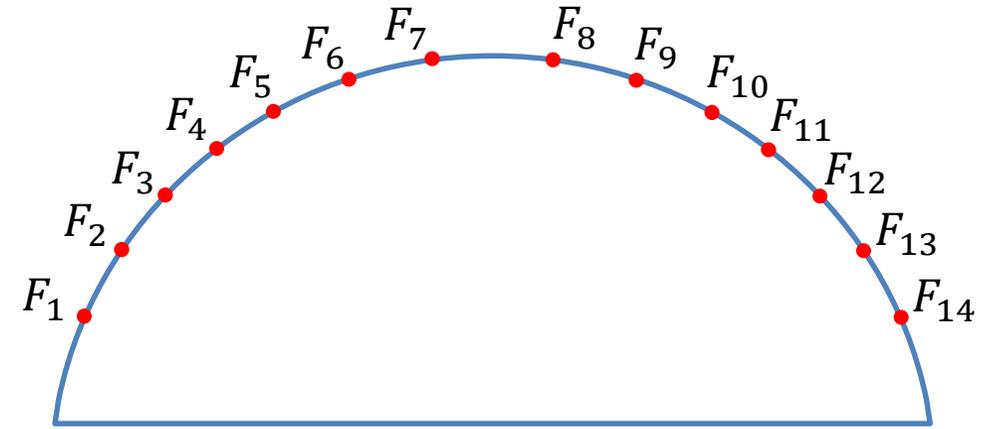
❄ 建立PMT光学模型，正确描述这些效应，对改善能量分辨率和模拟精度至关重要



## ✧ 建立了PMT光学模型 (数据+模型)

$$\begin{pmatrix} DE_1 \\ DE_2 \\ \vdots \\ DE_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & \dots & A_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{j1} & \dots & A_{jj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_j \end{pmatrix}$$

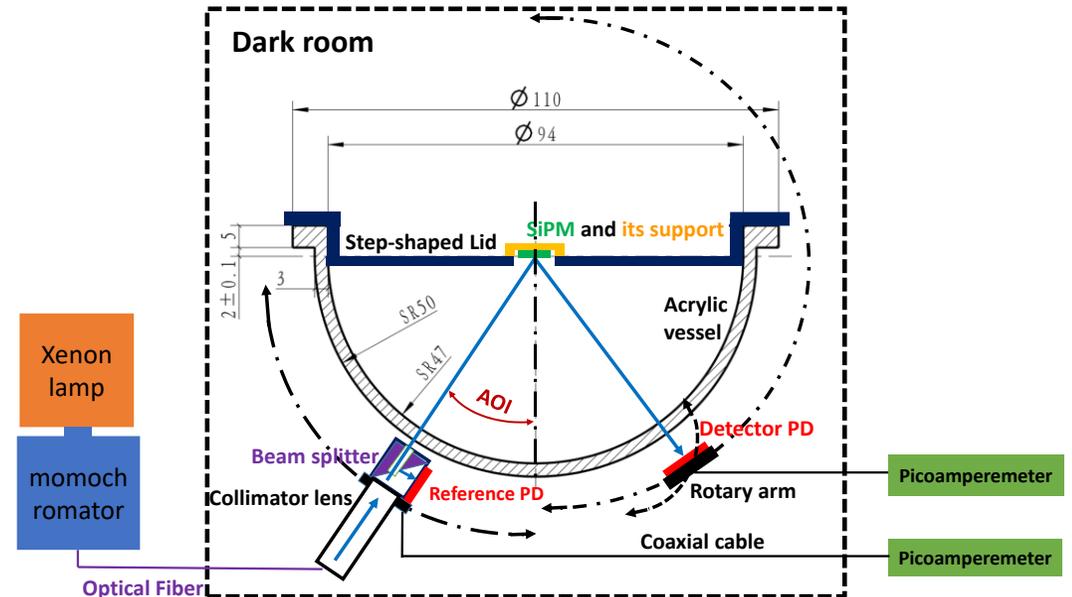
from experiment      from simulation

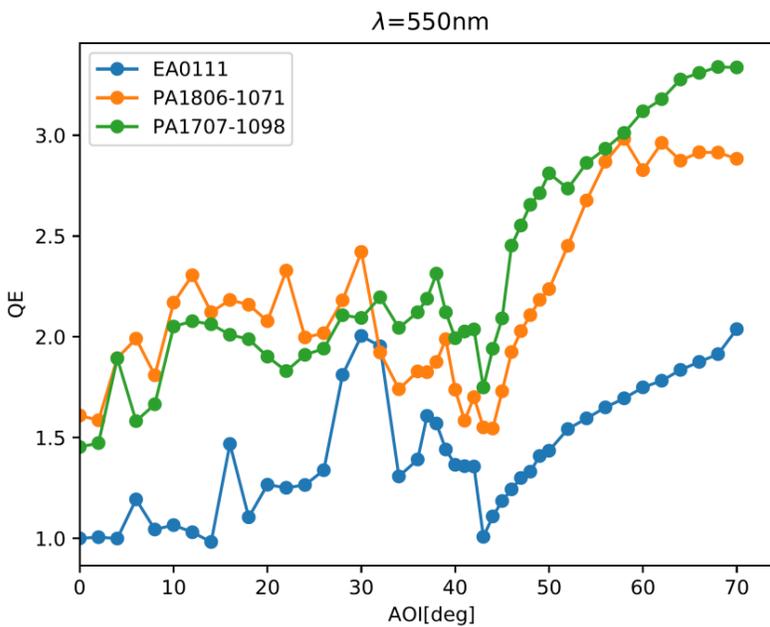
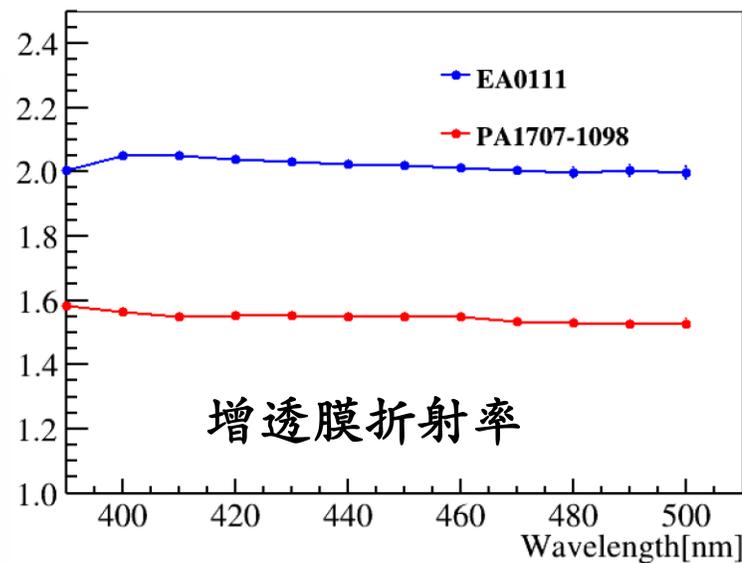
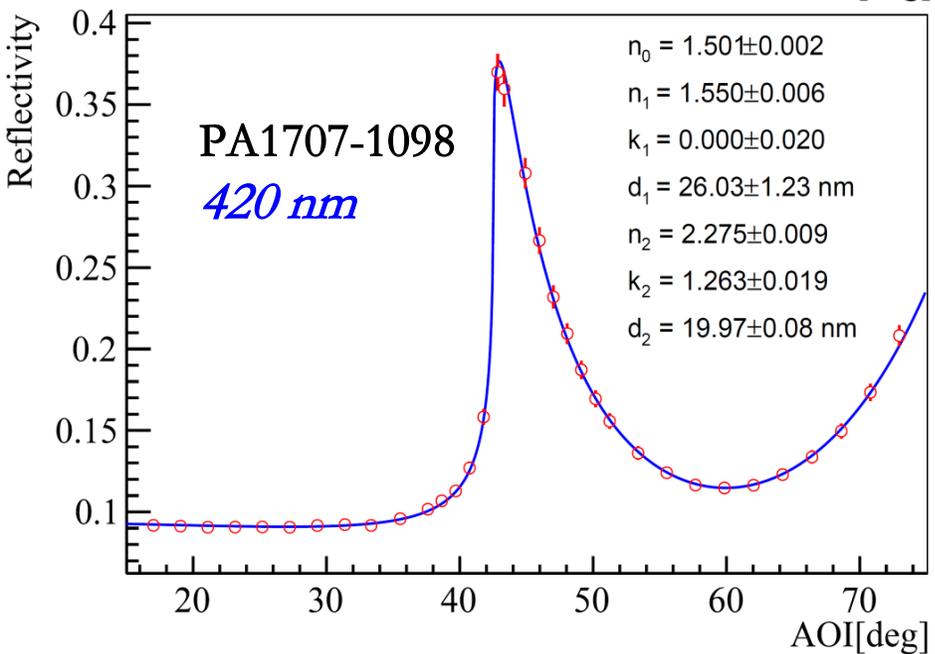
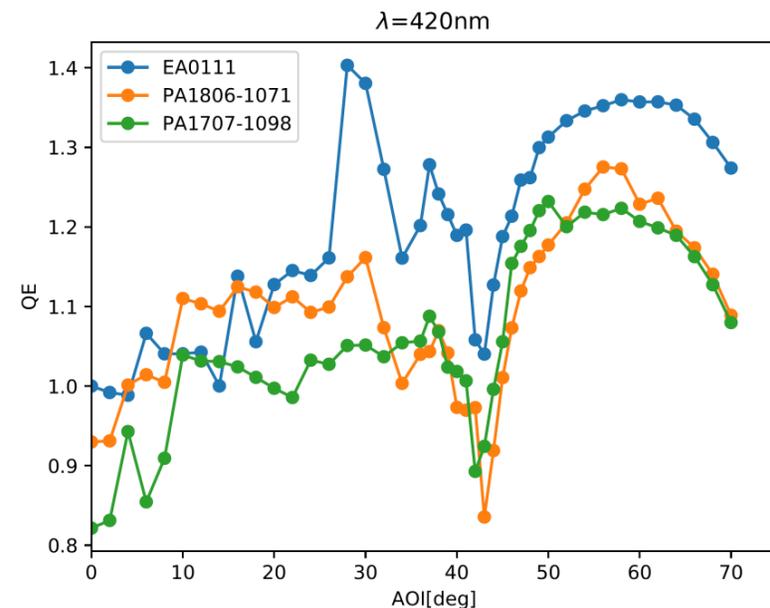
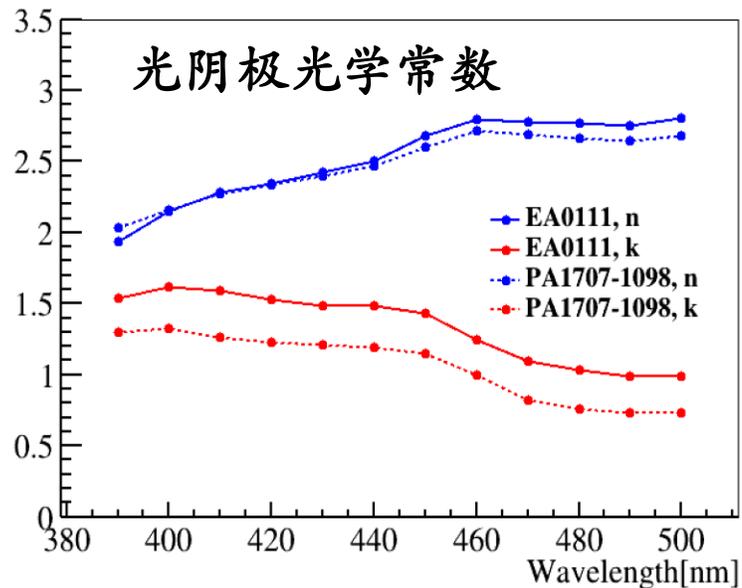
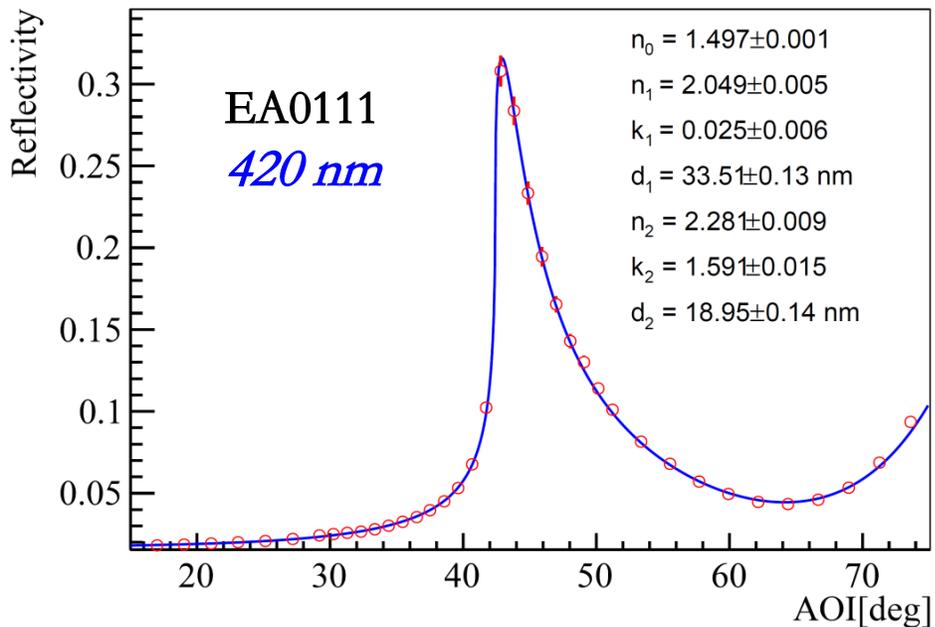


## ✧ PMT光学模型所需关键输入

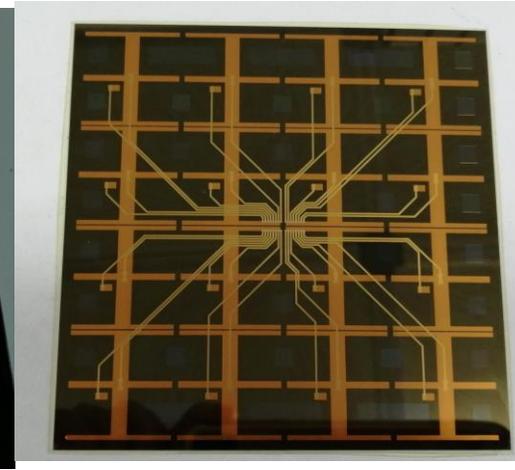
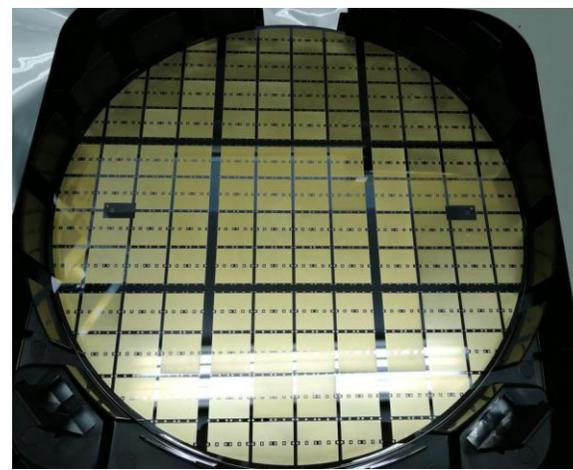
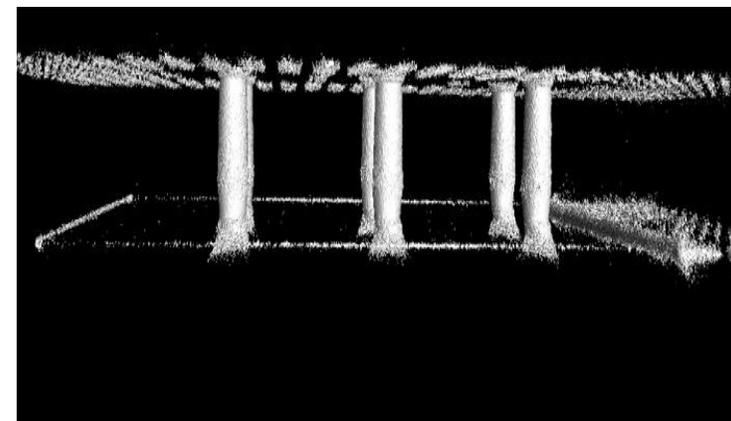
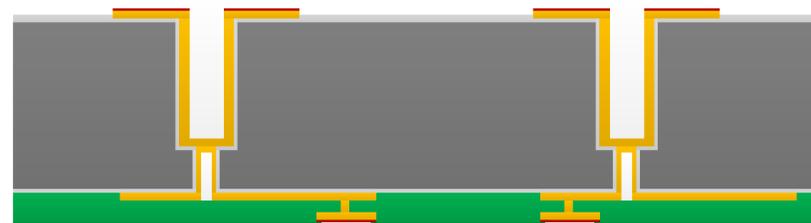
- 光阴极光学常数是PMT模型的重要输入参数 (测量水中PMT的反射率)
- QE随入射角(AOI)变化是构建和检验该模型的基础 (测量QE vs AOI)

W. Wang et al., Nucl. Instrum. Meth. A 973 (2020) 164171

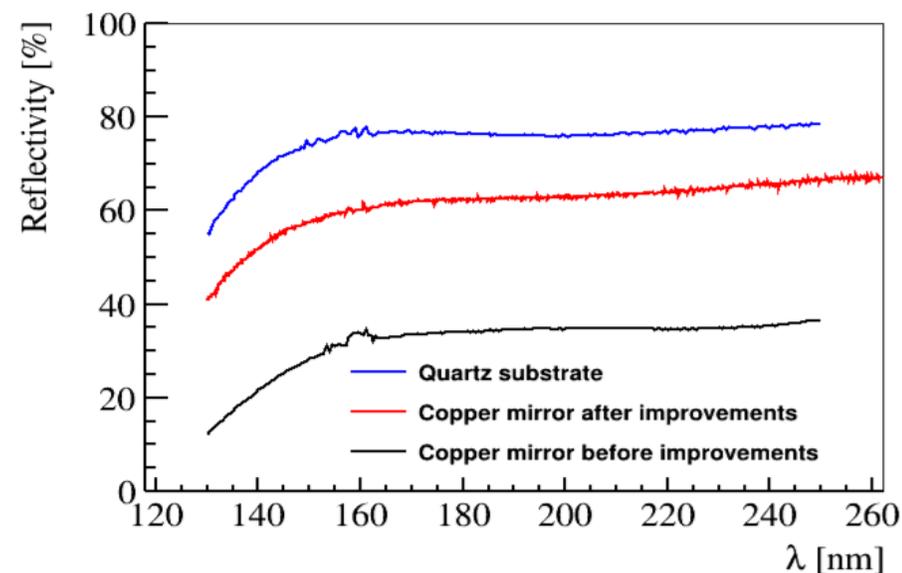
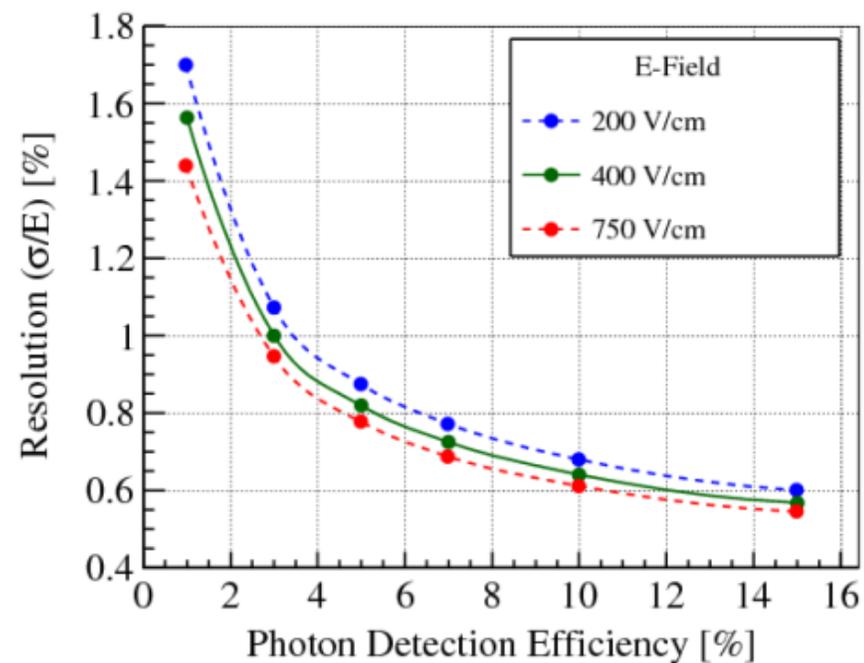
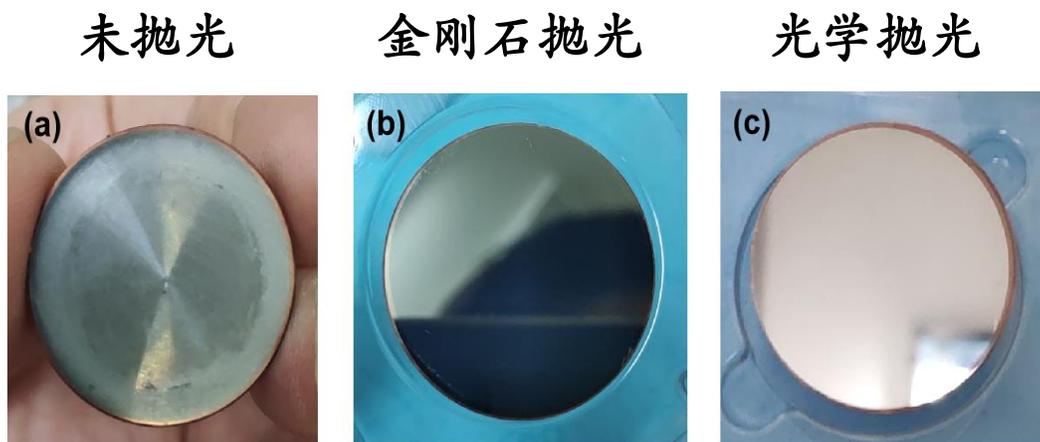




- ❄ **硅基转接板是nEXO获得极低本底光探测器系统的理想方案**
- ❄ **也可为其它极低本底实验(暗物质/双贝塔衰变)提供新的探测器解决方案。**
- ❄ **与微电子所合作，2017年制作国际上第一块大尺寸硅基转接板**
- ❄ **今年夏天成功完成第二轮转接板试制**
- ❄ **通过优化设计，改进工艺:**
  - **线电阻显著降低(18欧姆 → 5欧姆)**
  - **绝缘性能显著提高(兆欧姆 → 百兆欧姆)**
- ❄ **接近nEXO实验要求(2欧姆, 千兆欧姆)。**
- ❄ **正在推进第三轮转接板试制**



- ❄️ **VUV反射式电极(阴极板、成形环等)是获得nEXO预期能量分辨率的关键因素之一**
- ❄️ **高能所与成都光电院合作, 去年底启动铜基底VUV反射镜研发工作**
- ❄️ **通过改进设计和工艺, 镜面反射率从~30%提高到60%以上, 漫反射~20%, 满足nEXO要求**
- ❄️ **仍有很多关键技术问题亟需解决**
  - **大尺寸、不规则形状、低温稳定性等**

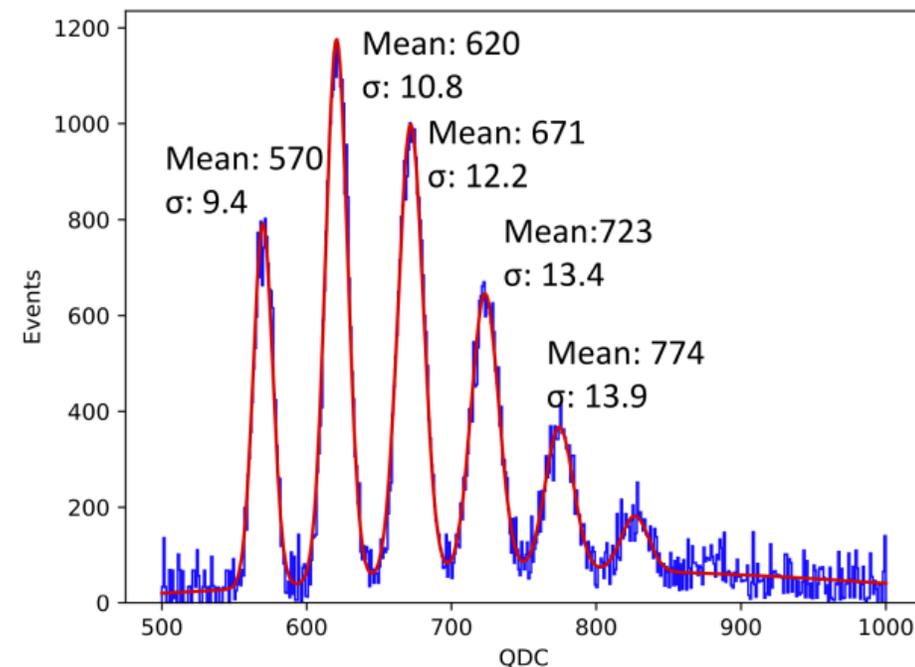
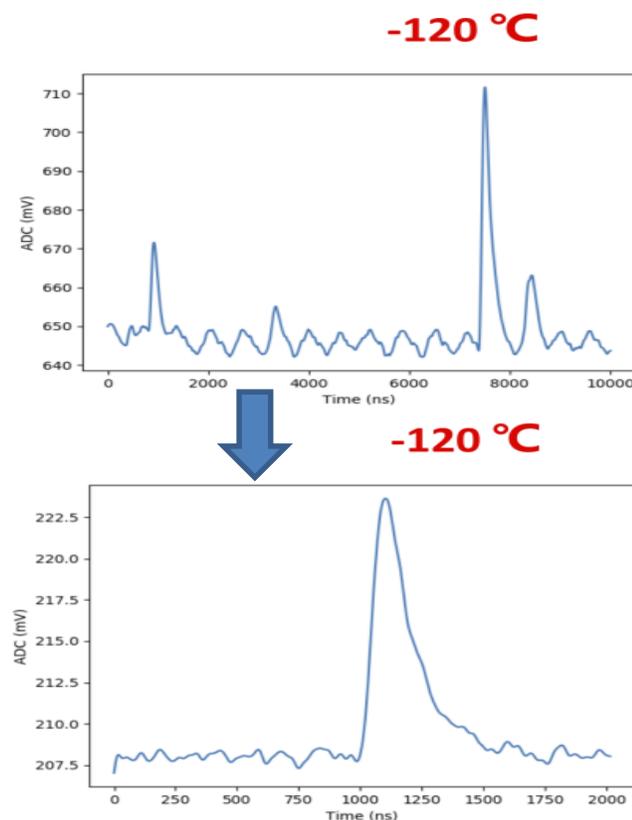
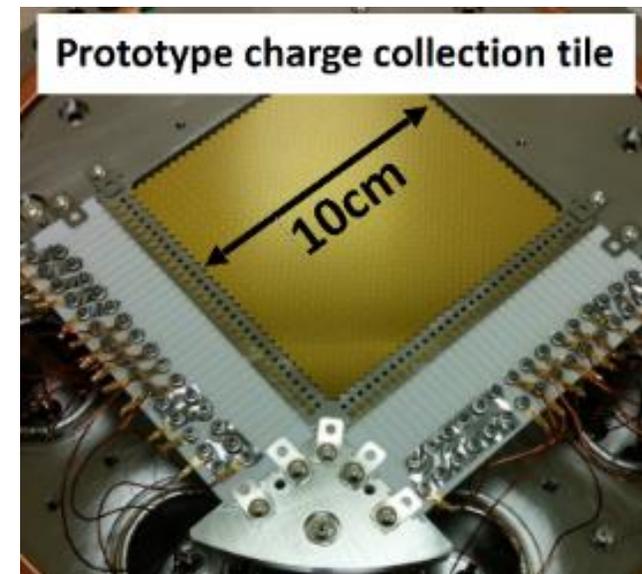


❄ **目标: 研究能量分辨率**

曹国富, 温良剑

❄ **过去一年进展**

- 解决了光探测器前放在 $-100^{\circ}\text{C}$ 下的振荡问题, 完成相关调试
- 电荷探测器加工完成, 正在与电子学联调
- 即将开始光电联合测试



## ❄️ SiPM光探测器系统

- 数目庞大、要求极高 (10 m<sup>2</sup> , 近27万个器件)
- -50°C, 单光电子探测
- 完成SiPM指标要求研究

## ❄️ 与FBK和HPK SiPM生产厂家的R&D工作进展顺利 (和意大利合作者一起)

## ❄️ 将SensL拉入并开展R&D合作!

## ❄️ 在高能所建立SiPM详细表征系统 (PDE, DCR, CT, spectral and angular response, etc)

- W. Wang et al., Nucl. Instrum. Meth. A 973 (2020) 164171

## ❄️ 协助JINR完成批量测试系统初步设计

## ❄️ 负责TAO CDR中光探测器与读出电子学部分撰写(贡献本章1/3以上篇幅)

- arXiv:2005.08745

Parameters	Specification	Comments
Photon detection efficiency	> 50%	at 400 nm, not include correlated avalanches
Dark count rate	< 100 Hz/mm <sup>2</sup>	at -50 degree
Probability of correlated noise	< 10%	including optical cross talk, delayed optical cross talk and after pulsing
Uniformity of V <sub>bd</sub>	< 10%	to avoid bias voltage tuning
Size of the SiPM device	>= 6 x 6 mm <sup>2</sup>	for easy handling
SiPM coverage within tile	> 94%	not included in SiPMs' PDE
Radio-purity (Bq/kg)	U: <<4.4; Th: <<6.3; K: <<1	SiPM + resin + PCB + elec.

❄ 2018年提出基于KLauS ASIC的电子学读出方案，与分立器件方案相比：

- 90% vs 32%快中子本底排除能力 (通道数目14万 vs 4000)
- 更好的时间分辨200 ps vs 1~10 ns
- 对SiPM的failure rate具有更高的容忍度，如：0.1%SiPM failure rate → 0.2% ASIC vs 6.4%分立器件

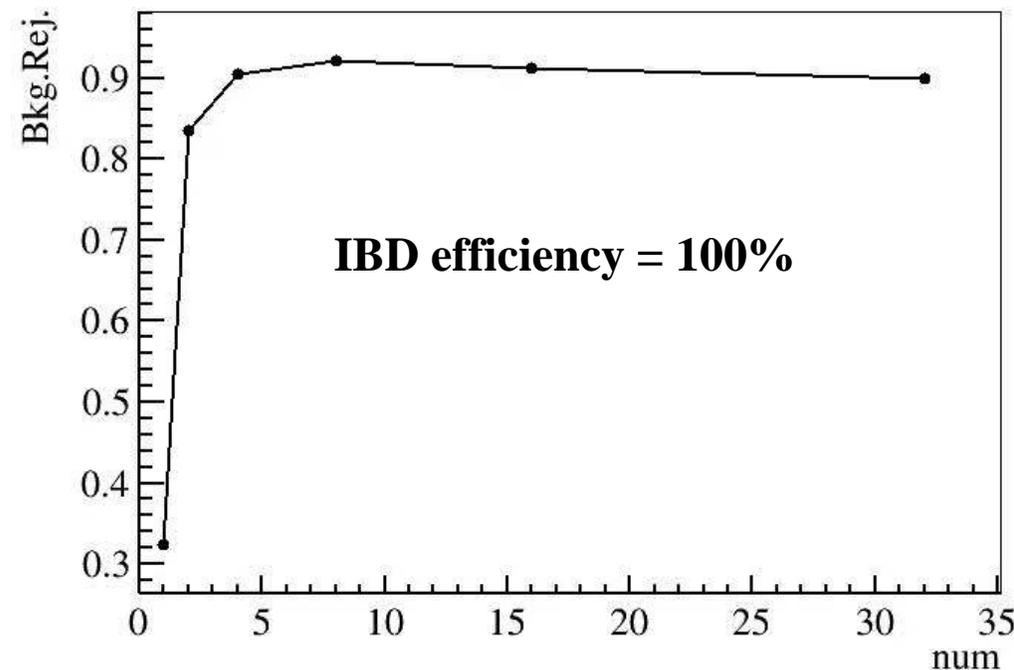
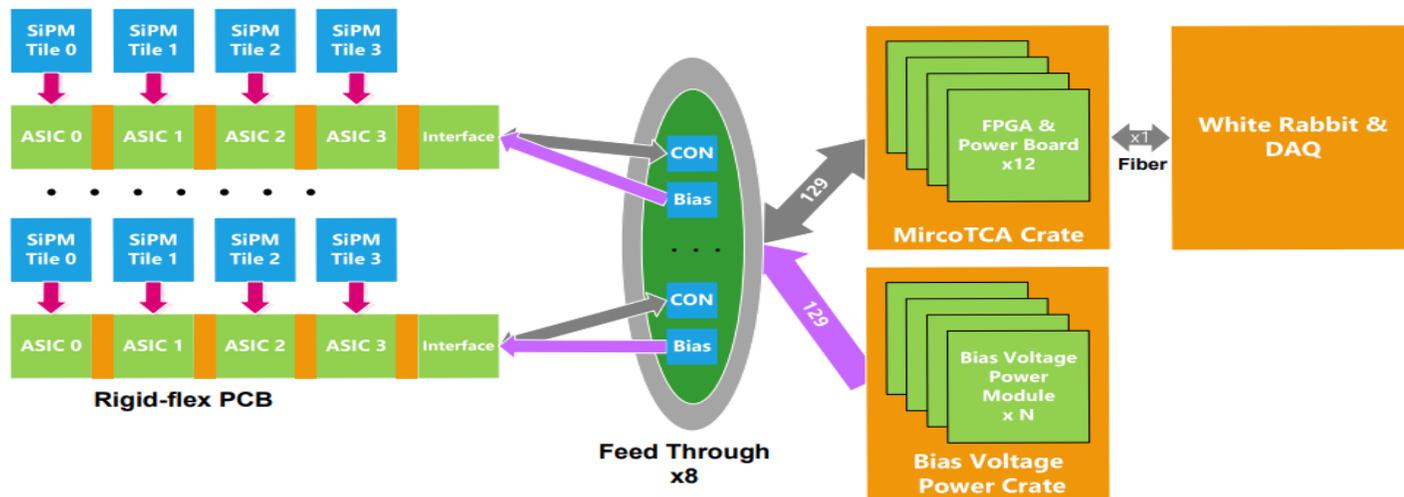
曹国富，张杰

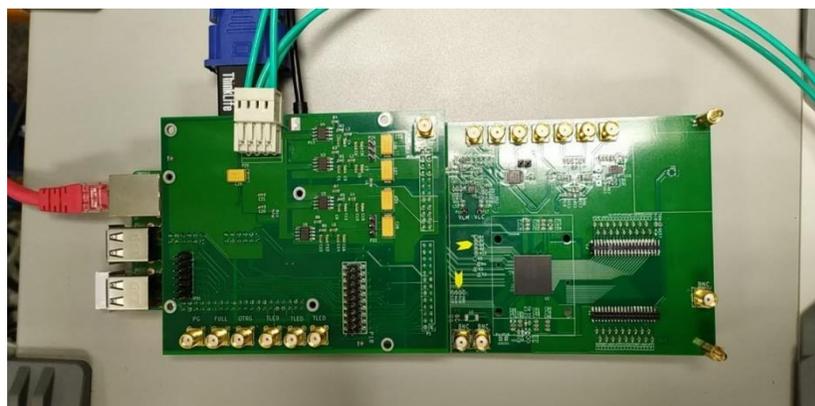
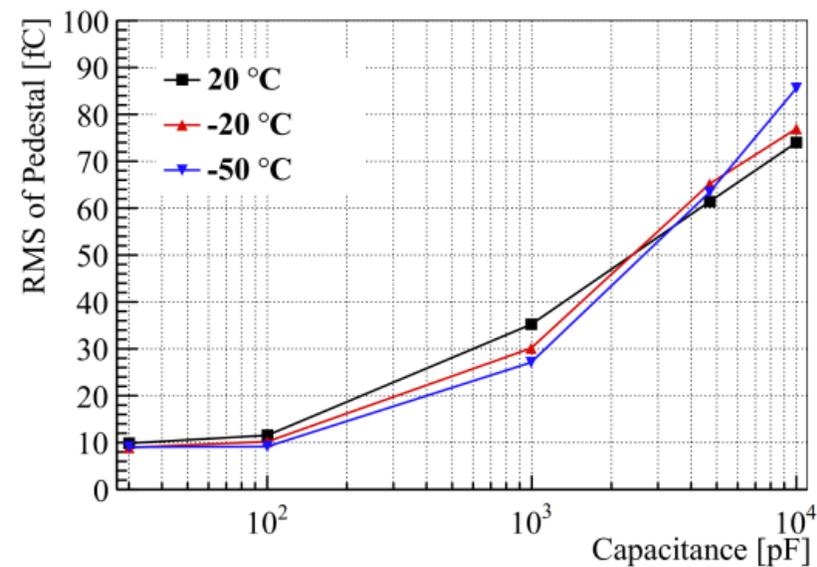
❄ ASIC是未来SiPM读出方案的发展趋势，趁机推动低温ASIC研发，服务未来低本底实验

❄ 完成系统级概念设计，说服意大利合作者采用ASIC方案

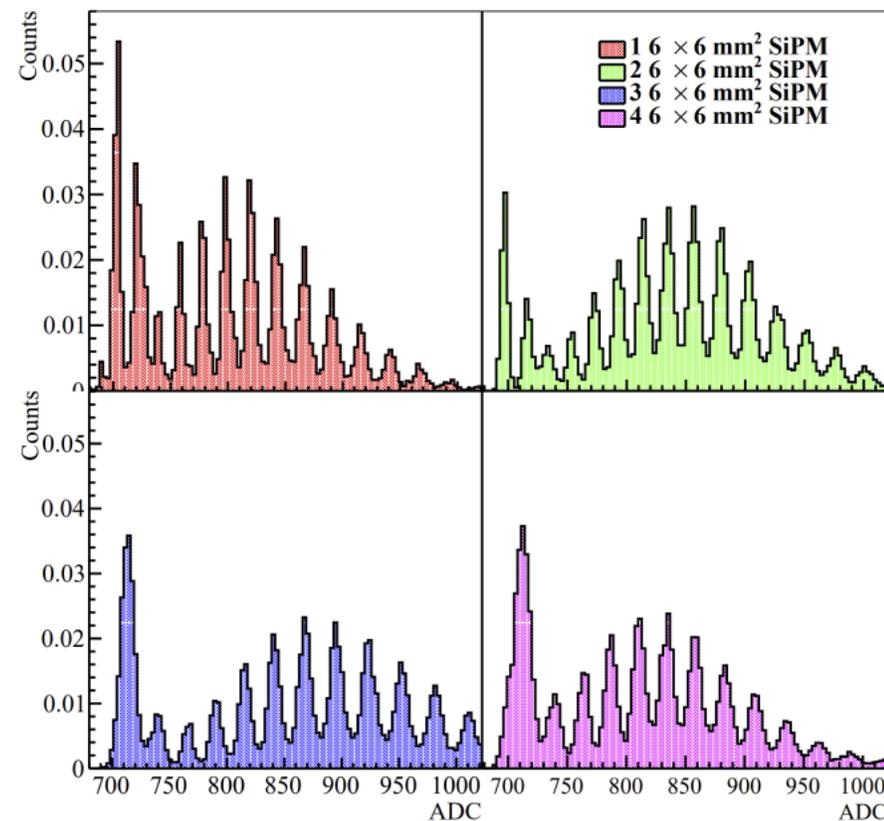
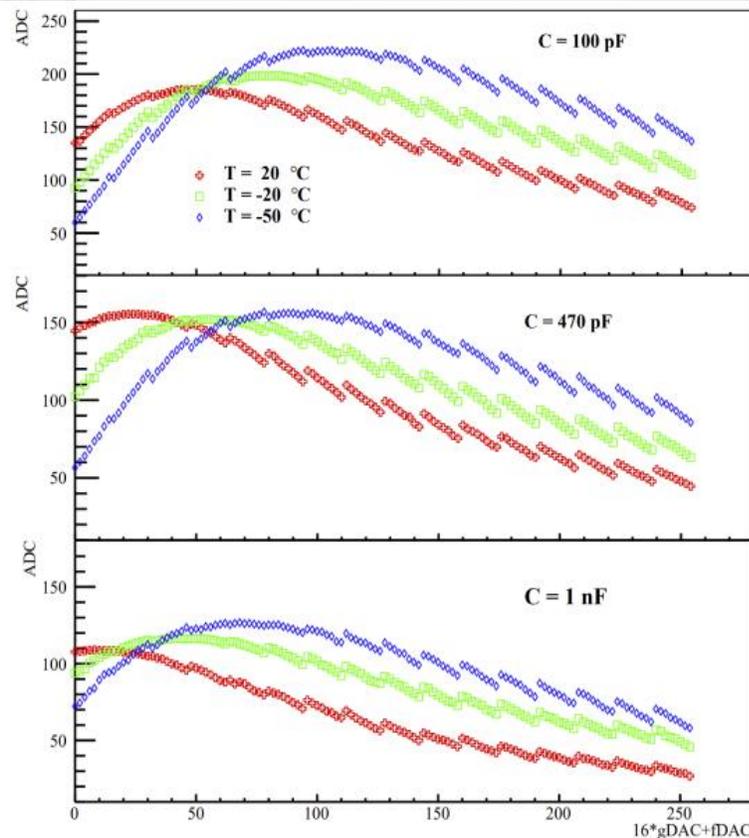
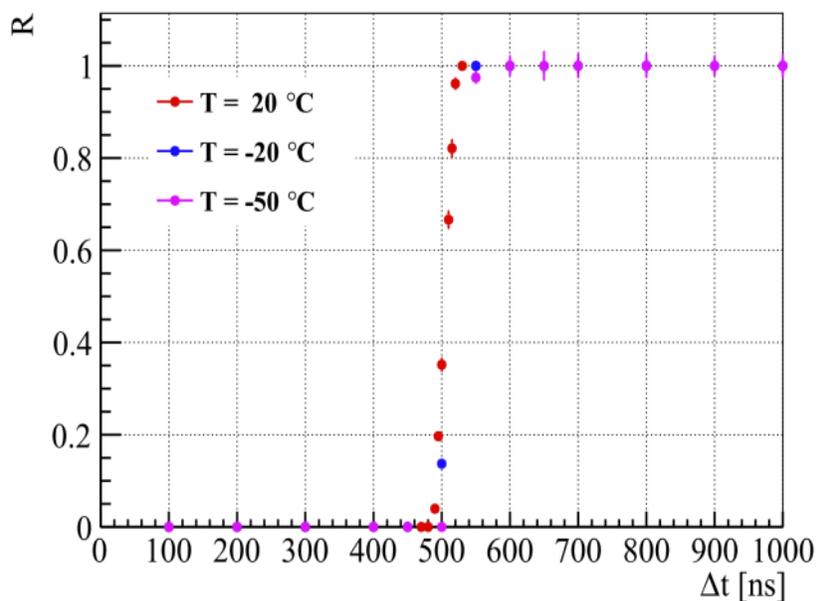
❄ 已经开展KLauS芯片相关低温性能测试

- arXiv:2011.05643, submitted to NIM-A

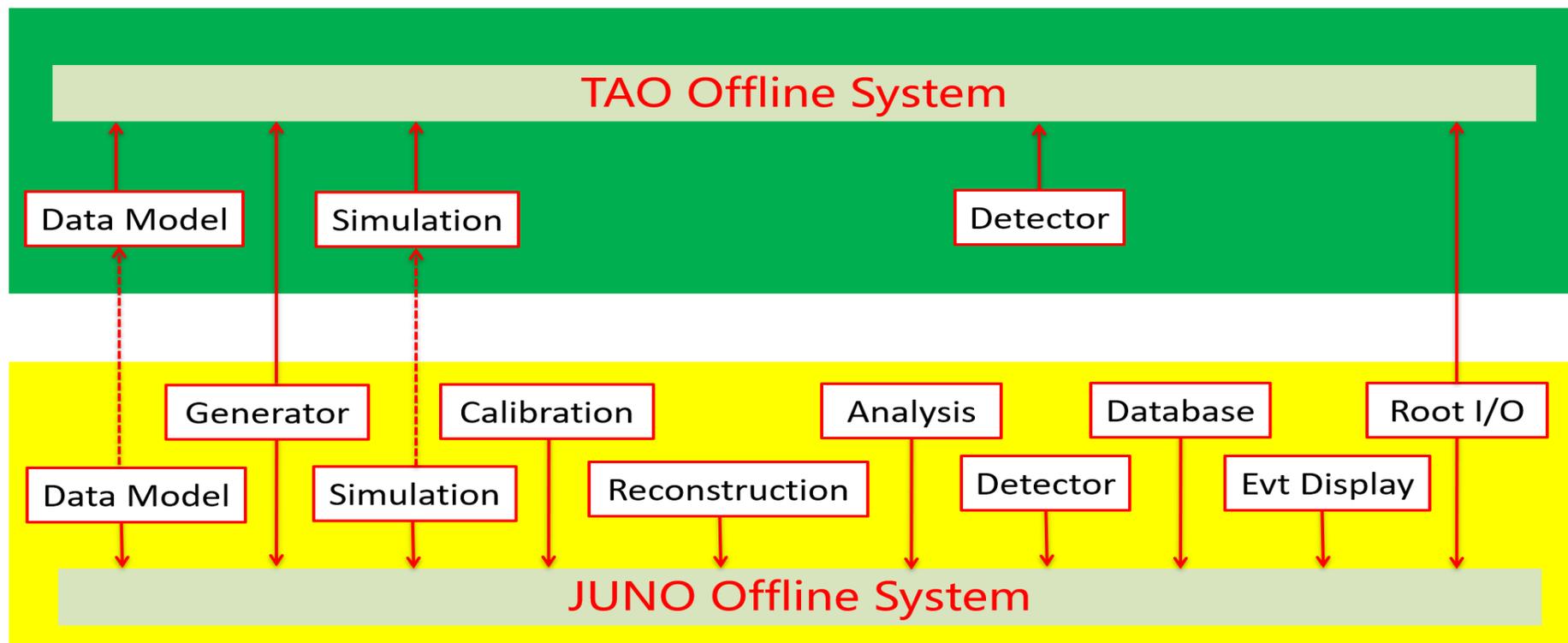




满足TAO实验能量精确测量的要求。



- ❄ 开发探测器模拟软件用于探测器设计
- ❄ 完成探测器模拟与SNIPEr框架整合, 已经发布2个版本
- ❄ 完成TAO CDR中离线软件和计算部分(贡献本章1/2以上篇幅)



## ✧ 本年度学术文章

- ① “Reflectance of Silicon Photomultipliers at Vacuum Ultraviolet Wavelengths”, 已被IEEE TNS接收, nEXO合作组文章, 通讯作者
- ② “Capability of detecting low energy events in JUNO Central Detector”, JINST 15 P03020 (2020) (通讯作者)
- ③ “Reflectance of Silicon Photomultipliers in Linear Alkylbenzene”, Nucl. Instrum. Meth. A 973 (2020) 164171 (通讯作者)
- ④ “Evaluation of the KlauS ASIC at low temperature”, arXiv:2011.05643, submitted to NIM-A (共同通讯作者)
- ⑤ “TAO CDR”, arXiv:2005.08745 (SiPM and readout, offline and computing)

## ✧ 过去发表的主要文章 (不含本年度)

- ① “Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay”, Phys. Rev. Lett. 108, 171803 (2012)
- ② “Improved measurement of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay”, CPC 2013 37(1)
- ③ “Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay”, Phys. Rev. Lett. 116, (2016) 061801
- ④ “Spectral Measurement of Electron Antineutrino Oscillation Amplitude and Frequency at Daya Bay”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 061801
- ⑤ “Study of Silicon Photomultiplier Performance in External Electric Fields”, JINST 13, T09006, 2018 (共同通讯作者)
- ⑥ “nEXO Pre-CDR”, arXiv:1805.11142
- ⑦ “Test of hadronic interaction models in GEANT4 at low energy using the BESIII data”, G.F. Cao, et al., NIM A: Volume 606, Issue 3, 21 July 2009, Pages 700-707
- ⑧ “Object-Oriented BESIII Detector Simulation System”, Deng Zi-Yan, Cao Guo-Fu, et al., Chin.Phys.C30: 371-377, 2006 (in Chinese)

## ❄ 基金

- “**极低本底光探测器模块关键问题研究**”，面上项目，63万，负责人，2021-2024
- “**20英寸PMT光学响应模型研究**”，面上项目，66万，负责人，2019-2022
- “**EXO无中微子双beta衰变实验**”，中美合作基金，主要参与者，2019-2023
- “**EXO无中微子双beta衰变实验**”，中美合作基金，子课题负责人，2014-2018，已结题
- “**大亚湾探测器精细模拟**”，青年基金项目，21万，负责人，2016-2018，已结题
- “**基于台山中微子实验的高精度反应堆中微子能谱测量**”，中俄国际合作，中方负责人，评审中
- “**基于台山中微子实验的中德合作研究**”，中德国际合作，主要参与者，评审中