



2023-2024年度职工考核报告

曹国富

**中科院高能物理研究所
实验物理中心中微子一组**

2024年11月21日

❄ 江门中微子实验 (JUNO)

- JUNO探测器模拟 (曹国富/邓子艳, co-L3至24年夏)

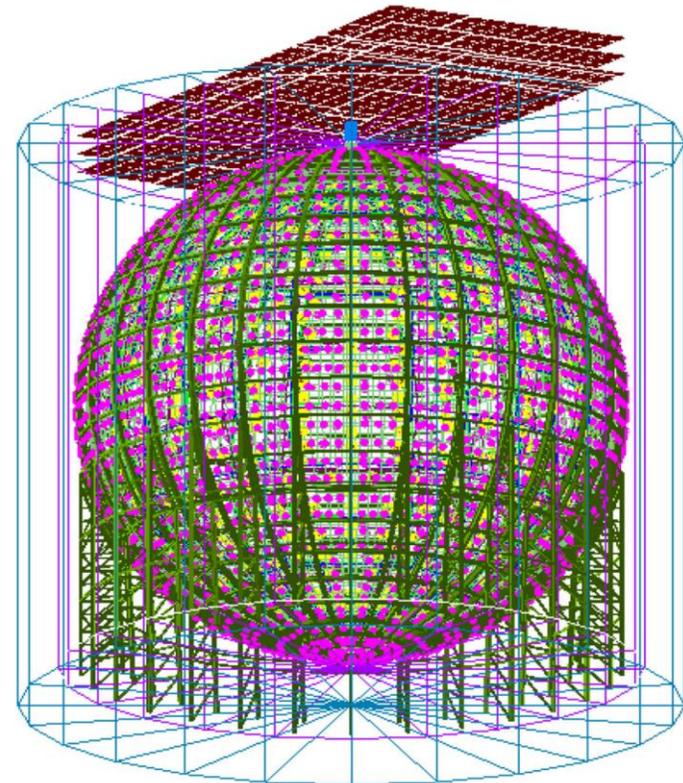
❄ 台山反应堆中微子实验 (TAO or JUNO-TAO)

- SiPM光探测器系统
 - 读出电子学系统
 - 离线软件系统
- } 主要负责3个系统

❄ nEXO无中微子双贝塔衰变实验 (国际合作项目)

- 光探测器系统 -- SiPM性能表征负责人 (R&D L2, project L3)
- 硅基转接板和真空紫外反射式电极研发 (千万级, 争取被nEXO采用, 核心硬件贡献)
- 高能所mini-nEXO液氙TPC

- ❄ **目标：打造国际上最精确的液闪探测器模拟软件**
- ❄ **团队成员：曹国富/邓子艳/林韬/Simon；研究生：张豪森、任雨涵、于佩东、杨旭辉**
- ❄ **JUNO丰富的物理目标 → 高精度模拟；百万、千万级海量光子模拟 → 极具挑战**
- ❄ **目前状态：完成模拟软件主要开发任务 ➡ 提高模拟软件物理和计算性能**



❄ 完成JUNO能量分辨率合作组文章发表

- 已经被CPC杂志接收，被推荐为2025年第1期封面文章
- 主要编辑作者之一

❄ 实现JUNO精细模拟的关键 → 深入理解液闪，PMT和电子学响应

❄ 液闪模型相关进展

- 取得液闪折射率测量阶段性成果，从400 nm以上延伸到250 nm（结果发表在NIMA杂志）
- 正在进行利用实验室液闪测量数据约束光学模型相关参数
- 加入DRD2合作组，承诺贡献“液闪光学模型相关研究成果”

❄ PMT光学模型（已完成）

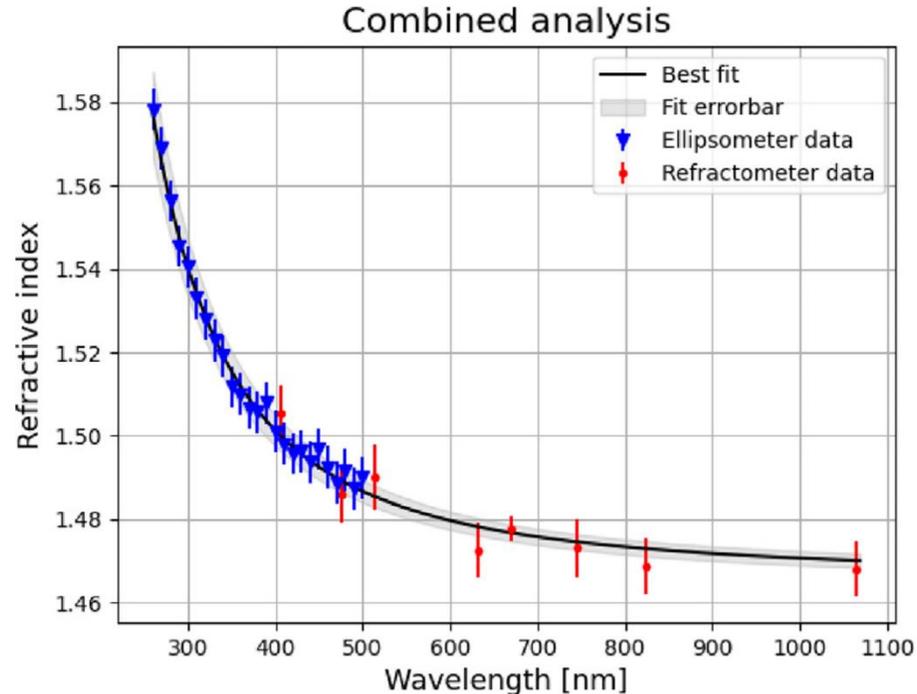
- 基于新测反射率数据、泛亚批量测量数据，已经获得17,612只20英寸PMT的光学常数
- 完成模拟中的PMT光学模型更新 → 实现“原理研究”到“工程应用”的转换

❄ PMT和电子学响应

- 基于已有实验数据，改进PMT后脉冲、暗噪声、单光子波形，以及电子学响应等模型，进行中

研究生：张豪森等

- ❄️ 切伦科夫光是影响JUNO能量分辨率的重要因素，产额取决于液闪折射率
- ❄️ 利用自制椭圆偏振仪，完成LAB等折射率测量（延伸至250 nm）和文章发表（NIM-A）
- ❄️ 未来计划
 - 利用该装置，测量LAB折射率至~120 nm → 实现对切伦科夫光产额的准确预期
 - 测量PPO和bis-MSB在VUV波段的荧光量子效率 → 完全理解切伦科夫光对分辨率的影响



Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1068 (2024) 169730

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima

Full Length Article

Refractive index in the JUNO liquid scintillator

H.S. Zhang^{a,b}, M. Beretta^{d,e}, S. Gialdi^d, C.X. Yang^{a,c}, J.H. Huang^{a,b}, F. Ferraro^d, G.F. Cao^{a,b}, G. Reina^d, Z.Y. Deng^a, E. Suerra^d, S. Altilia^d, V. Antonelli^d, D. Basilico^d, A. Brigatti^d, B. Caccianiga^d, M.G. Giammarchi^d, C. Landini^d, P. Lombardi^d, L. Miramonti^d, E. Percalli^d, G. Ranucci^d, A.C. Re^d, P. Saggese^d, M.D.C. Torri^d, S. Aiello^e, G. Andronico^e, A. Barresi^b, A. Bergnoli^f, M. Borghesi^h, R. Brugneraⁱ, R. Bruno^e, A. Budano^g, A. Cammi^m, V. Cerroneⁱ, R. Caruso^e, D. Chiesa^h, C. Clementiⁱ, S. Dusini^f, A. Fabbri^g, G. Felici^j, A. Garfagnini^f, N. Giudice^e, A. Gavrikov^l, M. Grassiⁱ, R.M. Guizzetti^f, N. Guardone^g, B. Jelmini^l, L. Lastrucci^f, I. Lippi^f, L. Loi^m, C. Lombardo^e, F. Mantovani^{k,l}, S.M. Mari^g, A. Martini^l, M. Montuschi^{k,l}, M. Nastasi^h, D. Orestano^g, F. Ortica^l, A. Paoloni^j, F. Petrucci^g, E. Previtali^h, M. Redchuck^f, B. Ricci^{k,l}, A. Romaniⁱ, G. Sava^e, A. Serafini^l, C. Sirignano^l, M. Sisti^h, L. Stanco^f, E. Stanescu Farilla^g, V. Strati^{k,l}, A. Triossi^l, C. Tuve^e, C. Venettacci^g, G. Verde^e, L. Votano^j

^a Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
^b University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
^c University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
^d INFN, Sezione di Milano e Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Fisica, Italy
^e INFN, Sezione di Catania e Università di Catania, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Italy
^f INFN, sezione di Padova e Università di Padova, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Italy
^g INFN, sezione di Roma Tre e Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Fisica e Matematica, Italy
^h INFN, Sezione di Milano Bicocca e Dipartimento di Fisica Università di Milano Bicocca, Italy
ⁱ INFN, Sezione di Perugia e Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Italy
^j Laboratori Nazionali dell'INFN di Frascati, Italy
^k INFN, Sezione di Ferrara, Italy
^l Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Italy
^m INFN, Sezione di Milano Bicocca e Dipartimento di Energetica, Politecnico di Milano, Italy

研究生：杨旭辉

❄️ 三个研究方向：

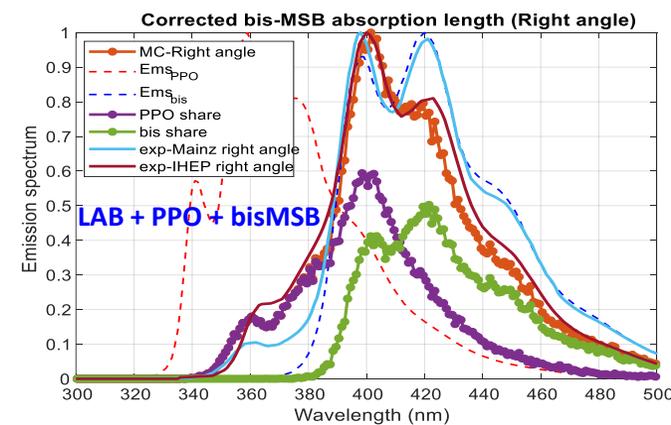
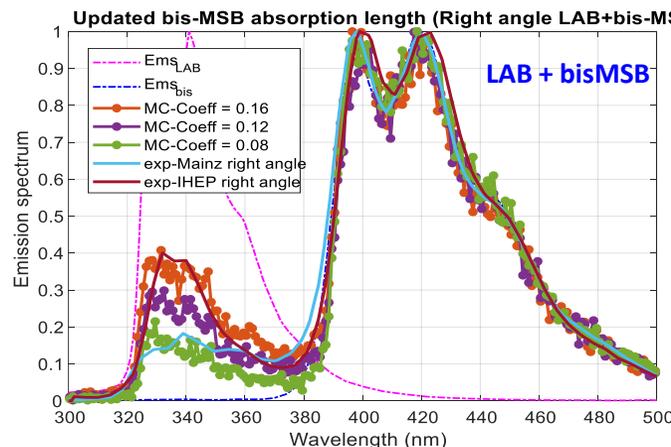
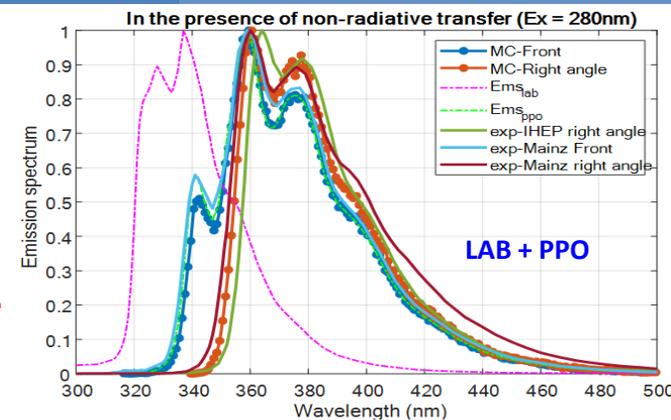
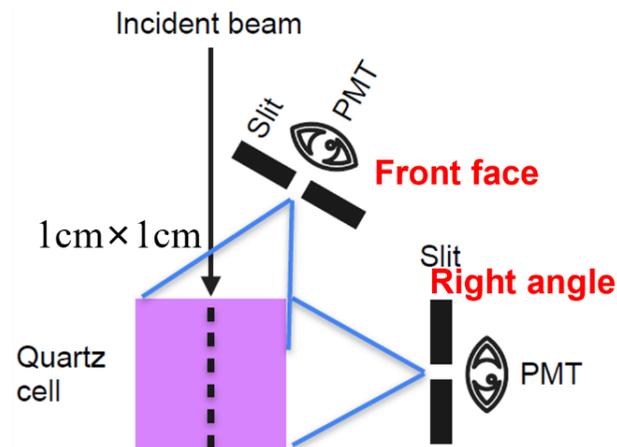
- 分子激发 (激发、电离截面, 分子能级等)
- 能量传递和淬灭机制
- 光子输运模型

❄️ 光子输运模型

- 已经建立很好的基础, 进一步完善现有模型
- 在不同尺度下, 实现模型与实验数据符合
 - 实验室比色皿 (厘米级) → TAO/OSIRIS (米级) → JUNO (几十米级)
- 通过调整三成分的吸收长度, 已经能够实现模型与数据相符

❄️ 近期计划

- 基于OSIRIS、TAO和JUNO实验数据改进模型精度



□ 采用国际领先的探测技术，以 $<2\%$ @1 MeV的能量分辨率实现反应堆中微子能谱精确测量

- 为JUNO提供参考能谱，提升质量顺序测量灵敏度
- 为核数据库提供基准
- 反应堆监控、惰性中微子寻找等

□ 台山核电站内，距离堆芯44米

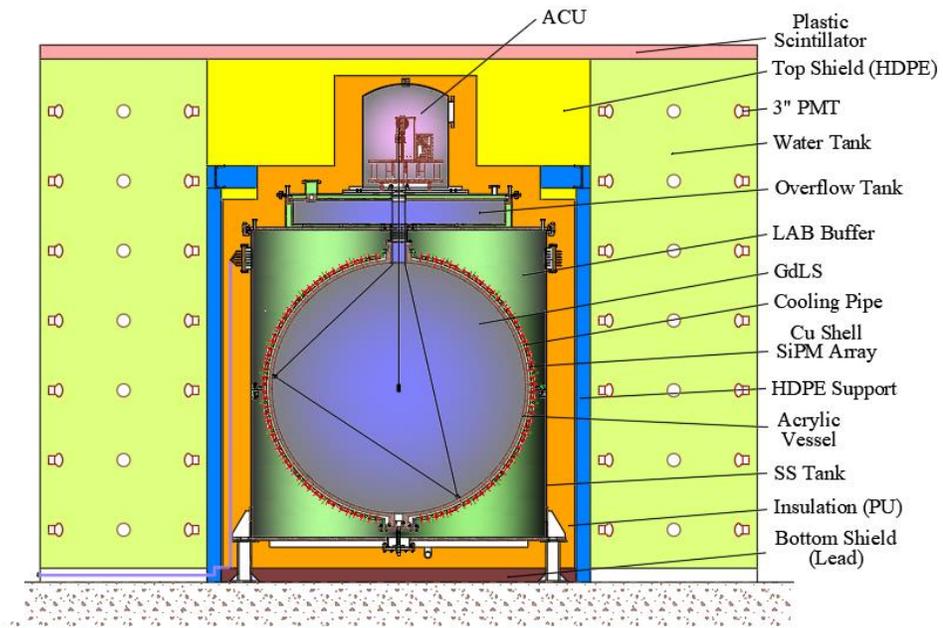
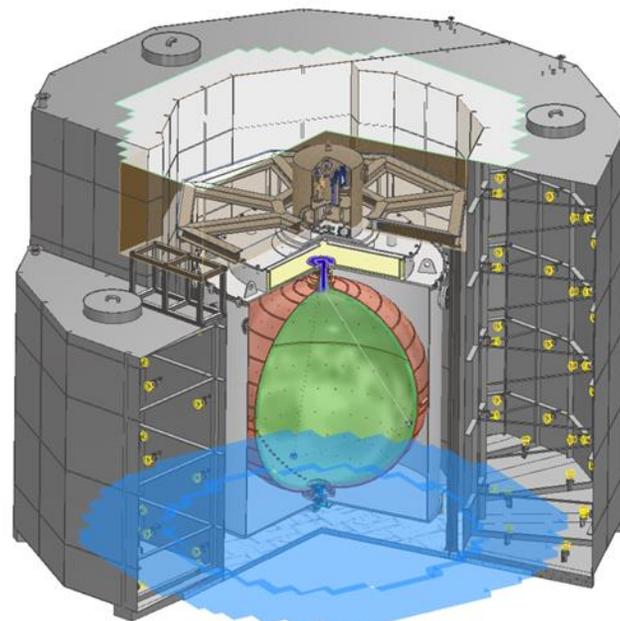


❄ 光探测器系统

❄ 读出电子学系统

❄ 探测器安装进度

❄ 离线软件系统



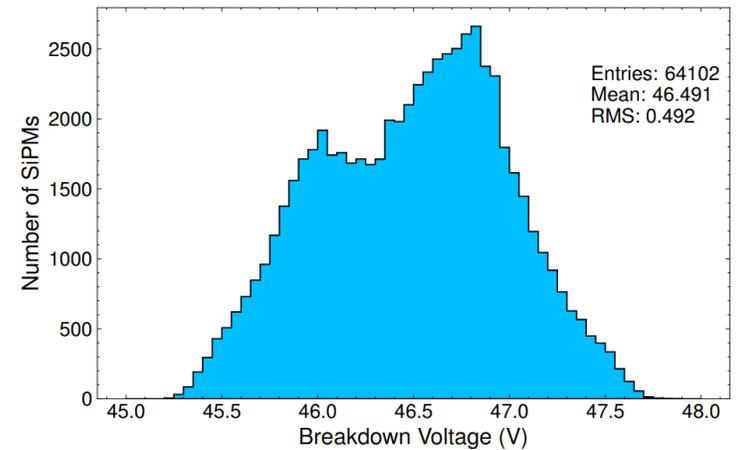
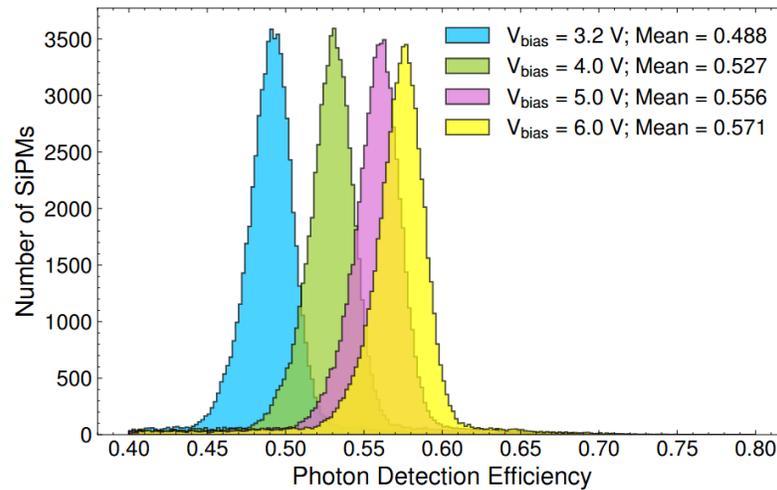
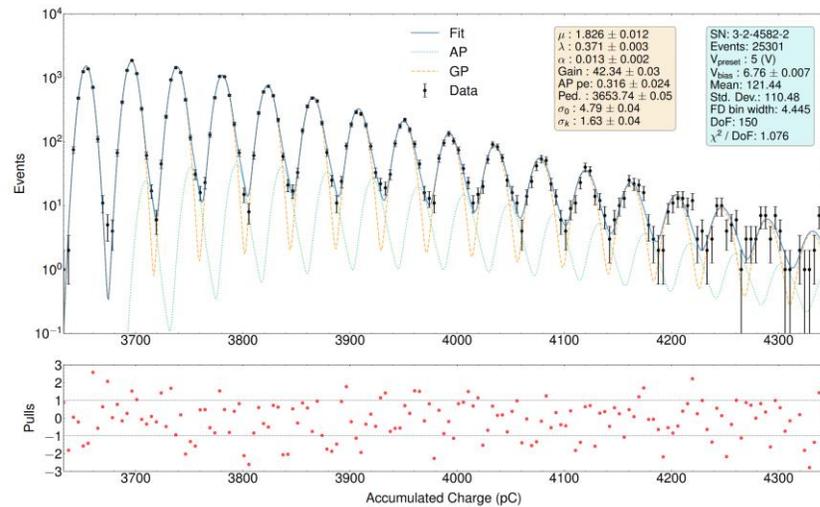
- ❄ **完成所有65,600个(10 m²)SiPM通道在低温环境下的QA/QC任务**
 - 不良品已经返回厂家，并完成新品生产、交付和验收
 - 批量测试装置文章已经发表在JINST杂志
 - 老化测试结果文章已经发表在JINST杂志
 - 批量测试结果文章正在撰写中
- ❄ **完成SiPM低本底连接器预研→试生产→量产→连接器更换→性能测试**
 - Samtec ERM8/ERF8 (Bq/kg): $^{238}\text{U} = 8.75$; $^{232}\text{Th} = 14.2$; $^{40}\text{K} = 16.4$
 - 改进后国产替代型号JME (Bq/kg): $^{238}\text{U} < 0.72$; $^{232}\text{Th} < 0.92$; $^{40}\text{K} < 2.58$
- ❄ **完成4100块SiPM阵列的清洁、以及连接器管脚三防处理**
- ❄ **全部10 m² SiPM安全运抵台山核电厂**



部分批量测试结果展示

❄️ 具有足够多的SiPM统计样本，为国际其它实验提供重要参考

❄️ 核心参数均已获取：探测效率、暗计数、串扰、击穿电压等



Eur. Phys. J. C manuscript No.
(will be inserted by the editor)

Comprehensive Mass Testing of Silicon Photo-Multipliers for the JUNO-TAO Experiment

Hanwen Wang^{a,1}, Guofu Cao^{b,1,2}, N. Anfimov³, A. Rybnikov³, All Qualified TAO Collaborators

¹Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences
²University of Chinese Academy of Sciences
³Joint Institute for Nuclear Research
⁴Present Address: 19B Yuquan Road, Shijingshan District, Beijing

Received: date / Accepted: date

Abstract The Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO) aims to revolutionize our understanding about neutrinos, with the Taishan Anti-neutrino Observatory (TAO) serving as a crucial sub-experiment in this ambitious project. To accurately measure the neutrino energy spectrum at a near detector situated 44 meters away from the center of a Taishan nuclear reactor, the TAO experiment aims for an energy resolution of 2% at 1 MeV and sub-percent levels above 5 MeV. Achieving this ambitious goal hinges critically on the performance of the Silicon Photomultipliers (SiPMs) within TAO's central detector. Therefore, rigorous testing and precise knowledge of the performance characteristics of each SiPM are fundamental, serving as the cornerstone for the overall functionality of the TAO detector. This paper presents a comprehensive framework for mass testing SiPMs tailored to meet the stringent requirements of TAO experiment. Addressing logistical and technical challenges, the study employs an automated, high-throughput testing methodology to evaluate key performance metrics such as photon detection efficiency, dark count rate, cross-talk probability, etc. By leveraging both traditional testing techniques and advanced statistical analyses, this approach ensures a robust and efficient SiPM quality acceptance process. Results demonstrate a consistent performance level among tested SiPMs, with only a small percentage failing to meet the project's criteria. The findings of this mass testing initiative contribute significantly to optimizing the detector systems for TAO, offering valuable insights for future neutrino and dark matter experiments with large-scale use of SiPMs.

1 Introduction

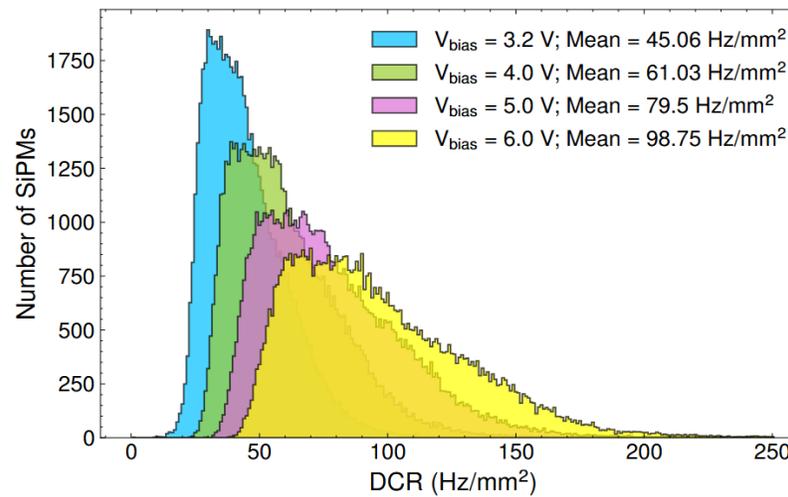
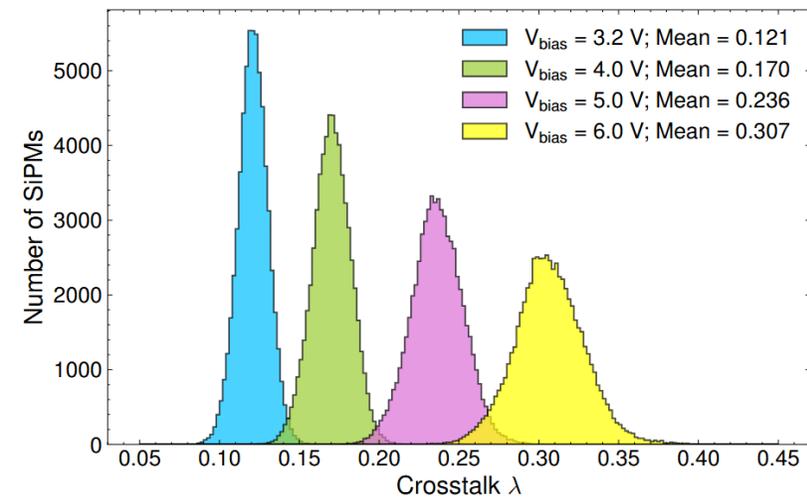
The Taishan Anti-neutrino Observatory (TAO), or JUNO-TAO) is a satellite experiment associated with the Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO). Located 44 meters from one of the reactor cores at the Taishan nuclear power plant, TAO is designed to precisely measure the reactor neutrino energy spectrum and its fine structures using a 2.8-ton liquid scintillator detector. A standout feature of the TAO detector is its energy resolution, which is better than 2% at 1 MeV. This capability allows TAO to provide a model-independent reference reactor neutrino spectrum for JUNO, enhancing its sensitivity in determining the neutrino mass ordering. Additionally, TAO serves as a benchmark for examining nuclear databases, investigating the reactor antineutrino anomaly, and searching for sterile neutrinos. A detailed discussion of the TAO physics program can be found in [1].

A conceptual drawing of the TAO detector is presented in Figure 1. The detector consists of a central detector (CD) for capturing reactor neutrinos, surrounded by a water Cherenkov detector that tags cosmic muons and provides shielding against external radioactive backgrounds. Additionally, a top veto tracker made of a plastic scintillator is used to detect muons. The CD includes a calibration system to monitor its energy response, with more details available in [2]. To achieve the desired energy resolution, the CD will employ approximately 10 m² of high-performance Silicon Photomultipliers (SiPMs), achieving 94% coverage. These SiPMs efficiently collect both scintillation and Cherenkov light produced in the liquid scintillator. They are mounted on the inner surface of a spherical copper shell, immersed in a LAB buffer, which encases the spherical acrylic vessel containing the liquid scintillator. The outermost

Keywords First keyword · Second keyword · More

^ae-mail: wanghanwen@ihep.ac.cn

^be-mail: caogf@ihep.ac.cn



❄️ 完成全部约4100块前端电子学板 (FEB) 的量产任务 (意大利)

➤ 搭建电子学测试系统, 完成FEB性能研究, 确认满足TAO的要求

- FEB噪声水平、单光子分辨、增益、线性、动态范围等

➤ 完成FEB量产所需低放射性本底R/C器件的筛选

- FEB本底水平降低约1倍

❄️ 完成电子学系统的环境干扰噪声研究 (得到很多帮助)

➤ 明确铜壳、钢罐、电子学系统的接地方案

➤ 改进接地方案: 几十kHz \rightarrow \sim 100 Hz; 低温: \sim 100 Hz \rightarrow 几Hz

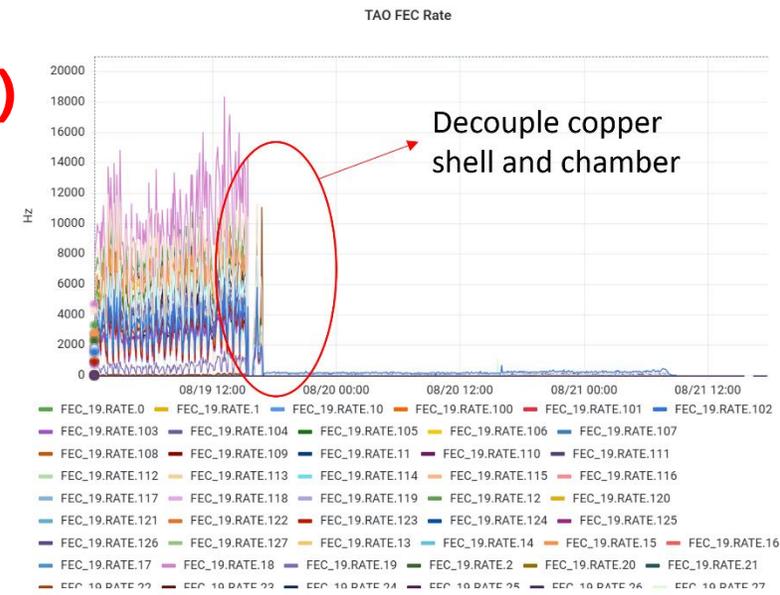
❄️ 完成电子学系统所需各种线缆的批量生产和验收

❄️ 完成SiPM高压系统的量产、QA/QC、刻度和老化 (俄罗斯)

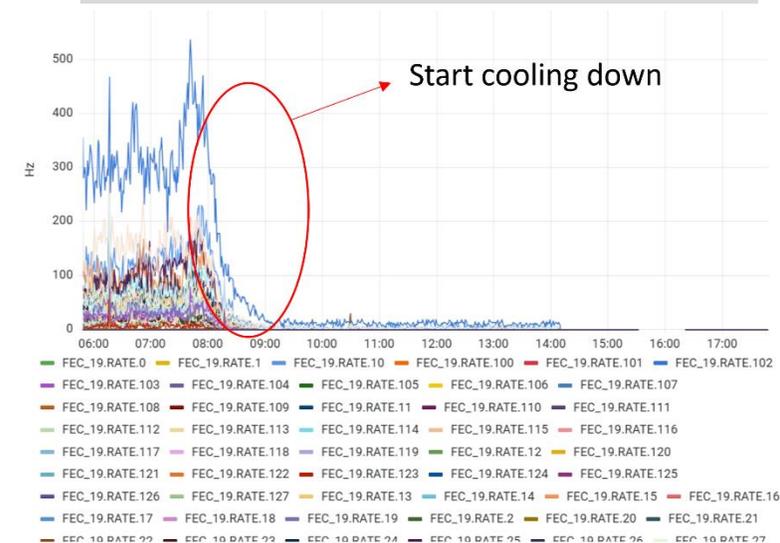
❄️ 完成半数以上FEB的三防处理, 月底前完成全部

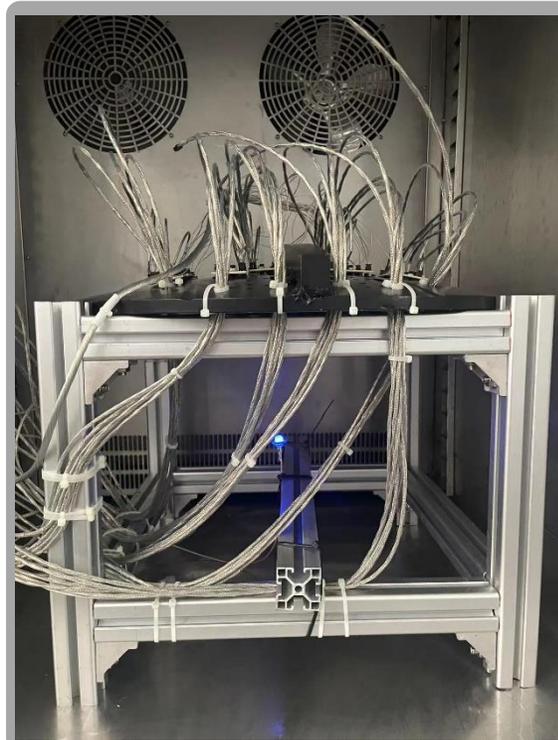
❄️ 完成后端电子学 (FEC) 的PRR评审, 量产已经开始

❄️ 进行多轮电子学系统与TDAQ系统的联合调试



团队: 曹国富、张杰、杨冯帆、徐嘉洋、殷麒麟等





❄ 光探测器和电子学系统安装分5个阶段:

- 第1阶段: SiPM和FEB在2个铜球壳上组装 (✓)
- 第2阶段: 内部线缆在铜球壳上连接 (×)
- 第3阶段: 内部线缆在钢罐法兰上连接 (×)
- 第4阶段: 钢罐外部线缆连接, 包括法兰端和机箱端 (×)
- 第5阶段: 探测器调试 (×)

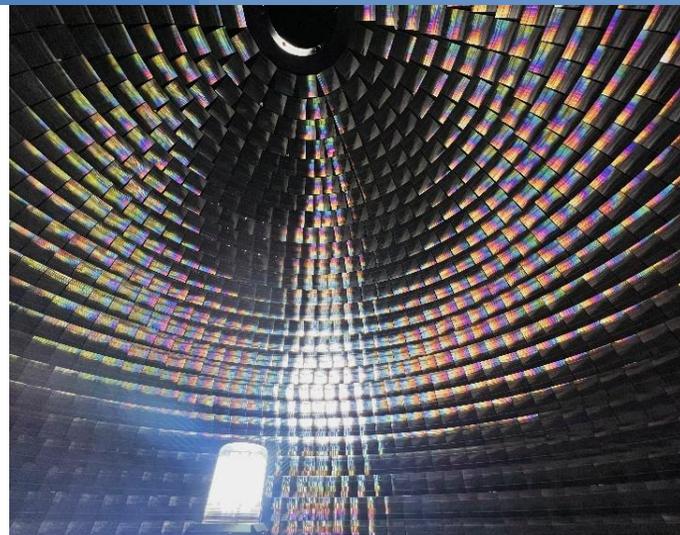
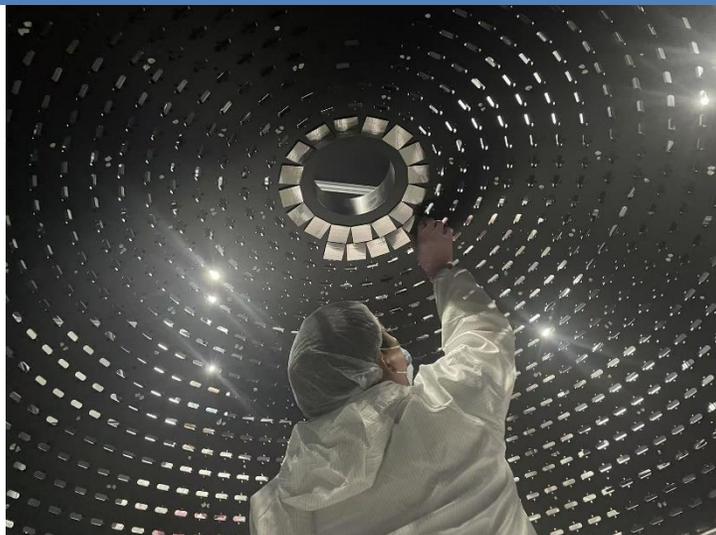
❄ 在台山核电厂内进行探测器安装工作, 严格遵守核电工作流程和各项规章制度

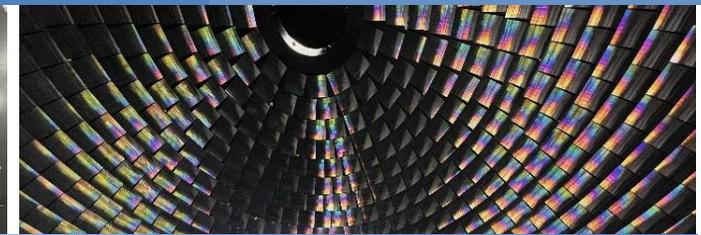
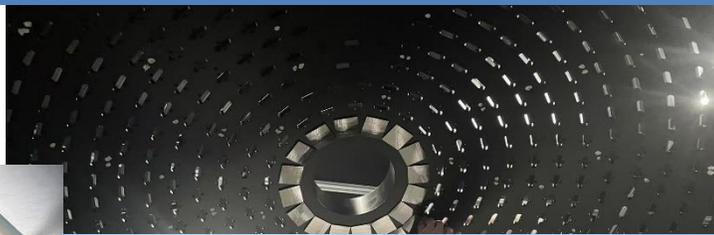
❄ 安装进展, 11月6日获得工作许可, 正式开始安装

- 已经完成上、下铜球壳的SiPM组装工作
- 已经完成约1500片FEB的安装工作, 等待后续FEB陆续分批发货到现场
- 正在进行已安装SiPM和FEB的性能测试工作, 预期月底前完成第1阶段安装任务

❄ 安装团队

- 高能所职工、博后、研究生; 中山大学研究生; 俄罗斯JINR, 共约10人





❄️ 完成TAO离线软件最终设计评审 (FDR)

❄️ 事例重建算法开发进展顺利 (人力得到补充)

➤ 电荷重心法 (博士生: 石航宇)

- 完成SiPM反射、DCR、串扰、饱和效应等因素对重建精度和偏差的影响研究
- 基于刻度模拟数据, 初步完成位置修正算法研究

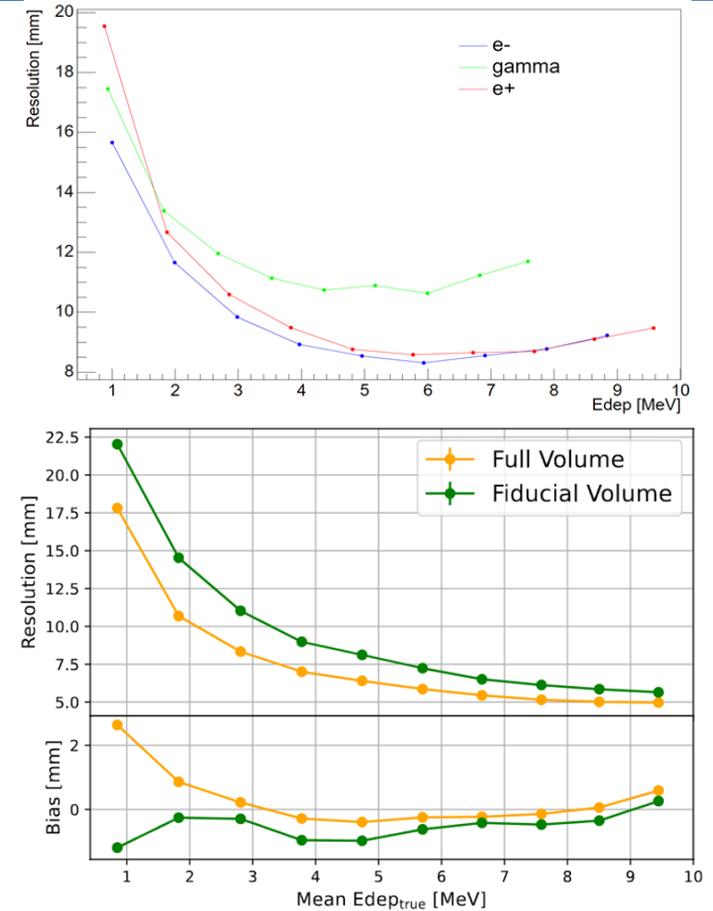
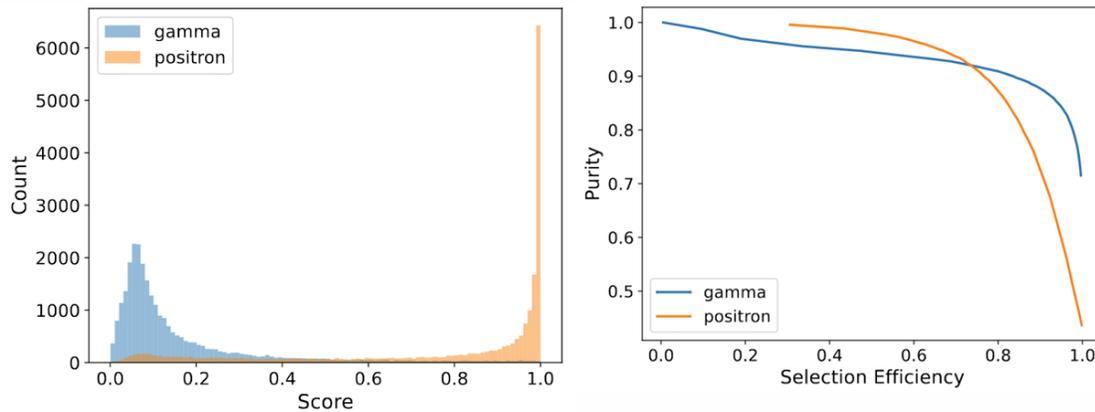
➤ 传统Likelihood方法 (博后: Randhir、清华)

➤ 机器学习 (博士生: 石航宇)

- 尝试了VGG、ResNet和RepVGG多个网络, 重建性能相近

❄️ 粒子鉴别算法 (博士生: 陈建)

➤ 基于机器学习算法 (CoAtNet), 开发e-/e+/gamma粒子鉴别算法



particle	Attribute	VGG-T	ResNet-T	RepVGG-T
e ⁺	R Bias	< 1.2 mm	< 3.52 mm	< 7.73 mm
	R Resolution	< 17.8 mm	< 28.5 mm	< 19 mm
e ⁻	R Bias	< 1.7 mm	< 5.4 mm	< 6.34 mm
	R Resolution	< 10 mm	< 22.5 mm	< 11 mm
γ	R Bias	< 0.84 mm	< 2.28 mm	< 6.6 mm
	R Resolution	< 13 mm	< 25 mm	< 14.1 mm

❄️ **SiPM性能研究** (博士: 管宇铎)

➤ 完成SiPM外部光学串扰文章在JINST杂志发表

❄️ **硅基转接板** → **极低本底光探测器解决方案** (博后: 王翰文; 学生: 孙一方、林阙)

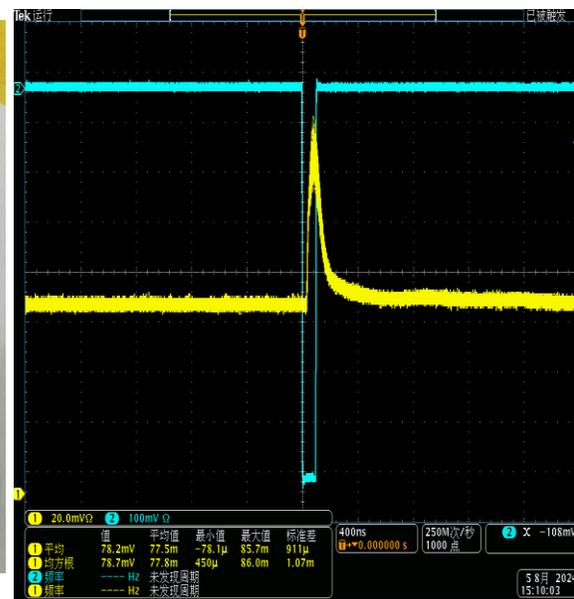
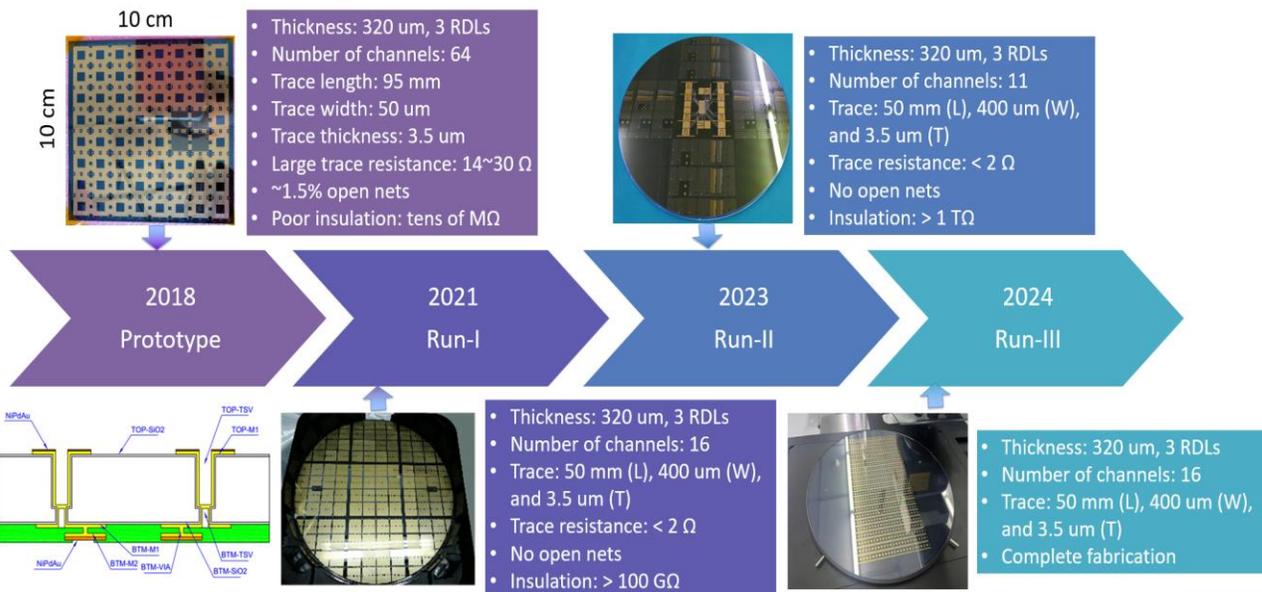
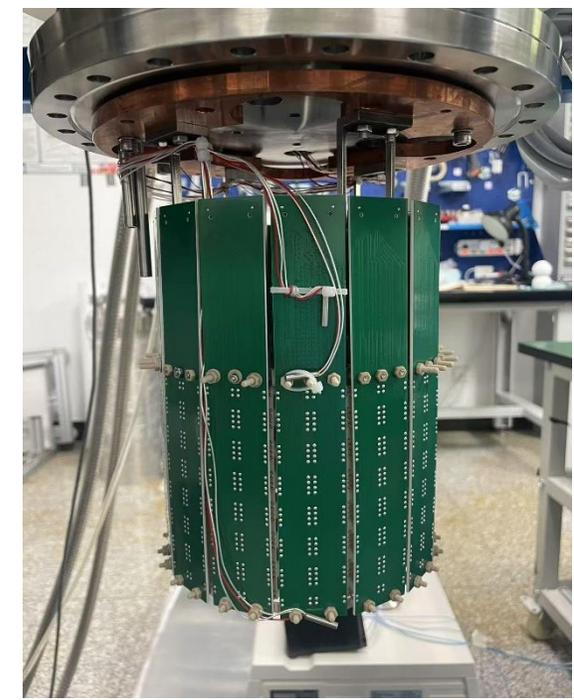
➤ 研发工作基本完成

• 2024年完成第3轮硅基转接板生产 (针对滨松SiPM设计), 性能良好

➤ 侧重全尺寸光探测器模块性能研究 (完成nEXO首个全尺寸模块组装)

❄️ **Mini-nEXO液氙TPC** (访问学者: Igor; 博后: 王翰文等)

➤ 完成TPC探测器组装和试运行



❄ 本年度已发表文章 [1篇CPC, 1篇NIM-A, 3篇JINST]

- “Prediction of Energy Resolution in the JUNO Experiment”, CPC已接收, 合作组文章, 封面文章
- “Study of Silicon Photomultiplier external cross-talk”, JINST 19 P06024 (2024)
- “Performance of the mass testing setup for arrays of silicon photomultipliers in the TAO experiment”, JINST 19 P05035 (2024)
- “Burn-in test and thermal performance evaluation of Silicon Photomultipliers for the JUNO-TAO experiment”, JINST 19 P07028 (2024)
- “Refractive index in the JUNO liquid scintillator”, NIMA 1068 P169730 (2024)

❄ 计划发表文章

- “Mass testing results of SiPMs”, 文章撰写
- 2~3篇技术文章

- ❖ “**江门中微子实验的中微子振荡物理研究**”，**国家重点研发计划，2150万，项目负责人，2024-2028**
- ❖ “**基于JUNO和TAO实验的中微子质量顺序研究**”，**中俄组织间合作研究，150万，负责人，未获批**
- ❖ “**江门中微子实验低能区精细探测器模拟**”，**面上项目，52万，负责人，2024-2027**
- ❖ “**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**

- ❖ “**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，150万，负责人，2021-2023，已结题**
- ❖ “**20英寸PMT光学响应模型研究**”，**面上项目，66万，负责人，2019-2022，已结题**
- ❖ “**大亚湾探测器精细模拟**”，**青年基金项目，21万，负责人，已结题**
- ❖ “**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**

❄ 学术会议

- “Silicon Interposer for the nEXO Experiment: An Ultra-Low-Radioactivity Solution for the SiPM Photo-detector”, Neutrino 2024, Poster

❄ 学术交流活动

- 阿拉巴马大学副教授 Igor Ostrovskiy (科学院PIFI) 访问高能所半年, 已申请高能所职位
- 西安交通大学协同培养育人项目外聘专家, 讲授“辐射模拟软件设计”部分课程

❄ 学术发展规划

- 紧跟探测器模拟方面先进技术 → 具有一定影响力的探测器模拟专家
- 紧跟光探测器先进技术 → 具有一定影响力的光探测器专家
- 深入理解中微子物理

- ❖ 与董燎原(首席)、平荣刚老师共讲国科大研究生课程 -- “**探测器模拟与数据分析**”，主讲探测器模拟部分，15学时。
- ❖ 杂志文章评审，研究生毕业论文评审、答辩
- ❖ 中微子暑期学校、研究生考核等



中国科学院高能物理研究所
2024中微子夏令营
2024年7月5-9日 开平市 江门中微子实验站

活动安排

【日程安排】

7月4日	报到
7月5-7日	专题报告 参观江门中微子实验站
7月8日	优秀营员选拔
7月9日	专题报告

【专题报告】

中微子振荡	中微子质量	中微子实验相关探测器
反应堆中微子	核子衰变	中微子实验相关软件
天体中微子	中微子与暗物质	

主讲人

王贻芳、曹俊、何苗、于泽源、李玉峰、曹国富、李高嵩、丁雪峰、王毅、罗武鸣、郭万磊、路浩奇、赵洁

申请方式

扫描右侧二维码，按照系统要求填报信息，备注栏填写“中微子夏令营”后提交。
计划择优20名学生提供免费食宿和交通费



<div style="text-align: center; background-color: #007bff; color: white; padding: 5px; border-radius: 5px;">组织委员会</div> <p>赵洁 高能物理研究所 丁雪峰 高能物理研究所 王毅 高能物理研究所</p>	<div style="text-align: center; background-color: #007bff; color: white; padding: 5px; border-radius: 5px;">会务</div> <p>王焕玲 (高能物理研究所) 电话: 18600578243 邮箱: wanghuanling@ihep.ac.cn</p>
--	---

- ❄ 继续推进承担的各项研究任务
- ❄ 探索新的、有意思的研究课题
- ❄ 整理研究结果，发表文章3-4篇，申请经费
- ❄ 继续向国内外相关领域、顶级水平专家学习

Thinking...

Planning...

Doing...

Done.

谢谢