

台山反应堆中微子实验

(Taishan Antineutrino Observation, TAO)

曹国富

中科院高能物理研究所



❄ 反应堆中微子在中微子物理研究中发挥不可替代的作用

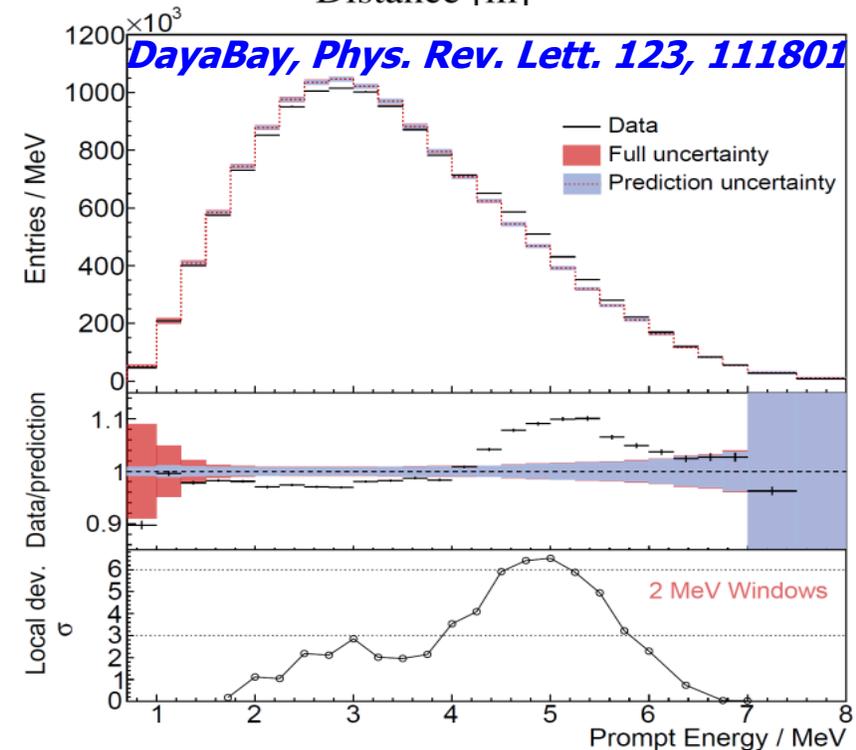
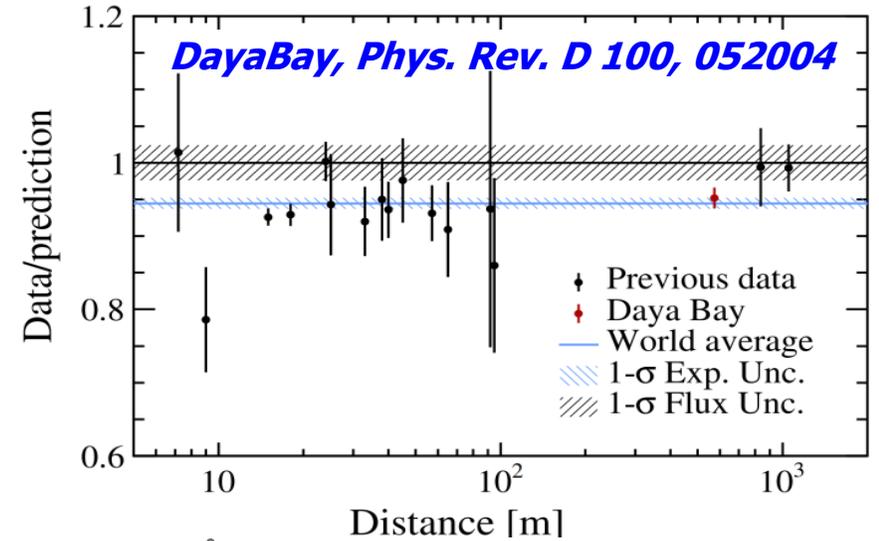
- 1956年Cowan-Reines实验证实中微子存在 [1995年诺贝尔奖]
- 中微子振荡参数精确测量 [JUNO, Daya Bay, KamLAND, Double Chooz, RENO, etc]
- 惰性中微子寻找 [NEOS, PROSPECT, DANSS, STEREO, etc]

❄ 反应堆中微子能谱预期

- 基于核数据库求和：误差确定困难
- Conversion模型：误差5%
- 大亚湾实验数据：误差2%，能量分辨率~8%@1MeV

❄ 实验观测与理论预期不符

- 理论模型不准确
- 核数据库不准确



❄️ TAO用来精确测量反应堆中微子能谱，是JUNO的卫星实验

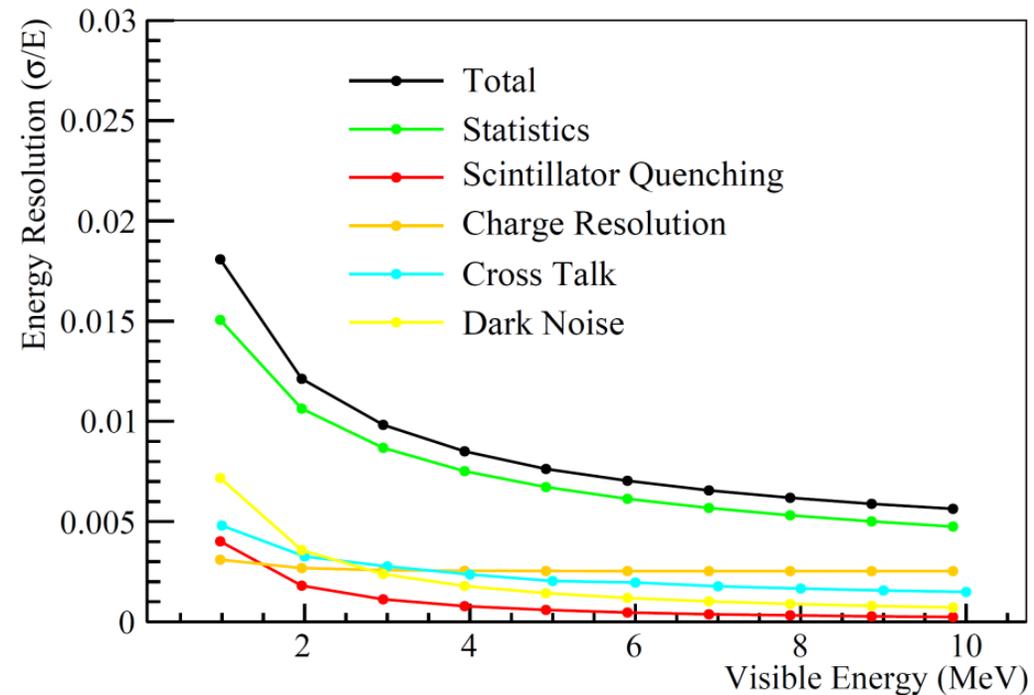
- 为JUNO提供参考能谱
- 为核数据库提供检验基准
- 有望率先测量能谱精细结构
- 研究能谱反常、惰性中微子、反应堆监测等

❄️ 距离一个台山反应堆堆芯约44米，地下三层 (-10米)

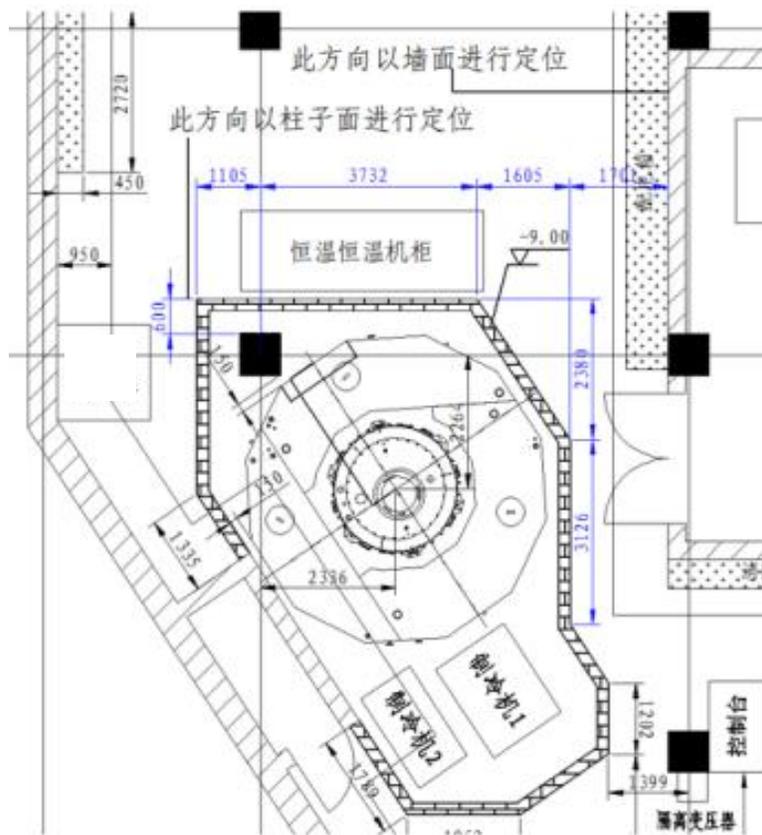
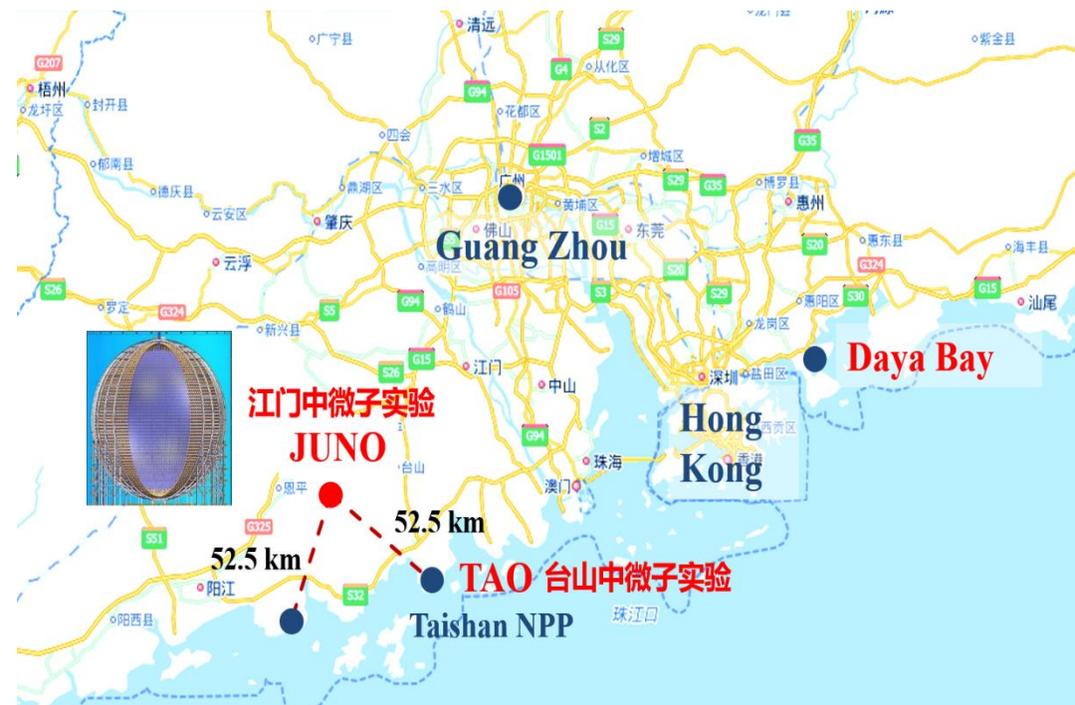
❄️ 吨级液闪探测器，预期能量分辨率好于 $2\%/\sqrt{E}$ (~ 4000 p.e./MeV)，远好于国际同类探测器的最好水平

- JUNO: $3\%/\sqrt{E}$; BOREXINO: $5\%/\sqrt{E}$; KamLAND: $6\%/\sqrt{E}$
- PROSPECT: $4.5\%/\sqrt{E}$; NEOS: $5\%/\sqrt{E}$

❄️ 预期2025年初开始数据获取



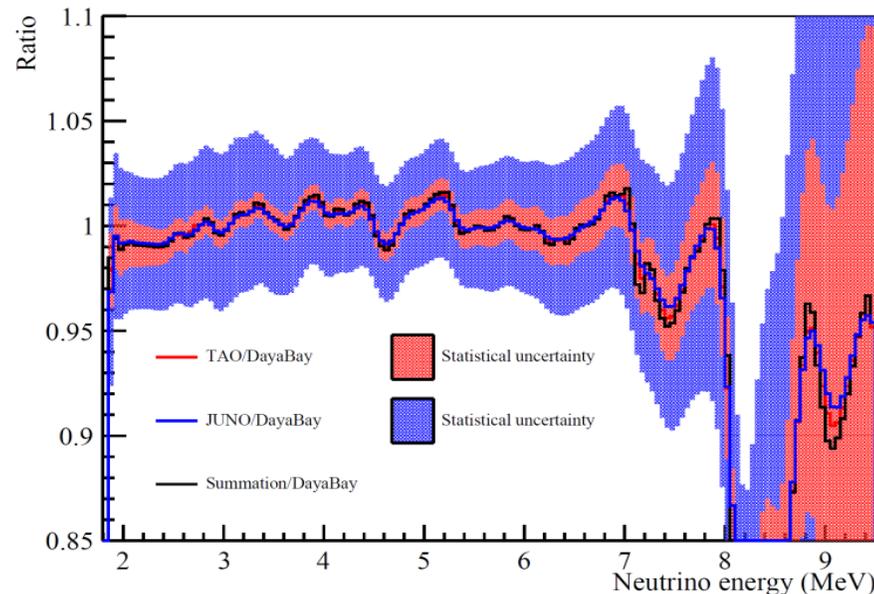
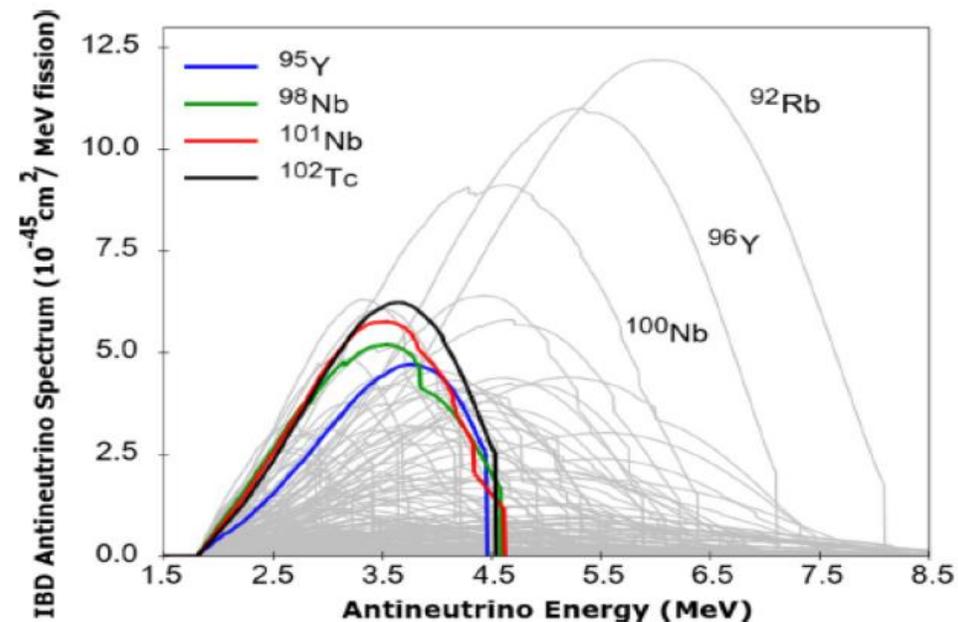
- ❄ 2018年1月，JUNO合作组决定做近点探测器，10月命名为台山反应堆中微子实验
- ❄ 2020年1月完成初步设计评审，3月完成概念设计报告([arXiv:2005.08745](https://arxiv.org/abs/2005.08745))
- ❄ 总造价约3000万
 - 意大利INFN贡献1M欧元，俄罗斯JINR贡献1M美元
 - 国内单位(高能所、中大等)



率先实现反应堆中微子能谱精细结构测量

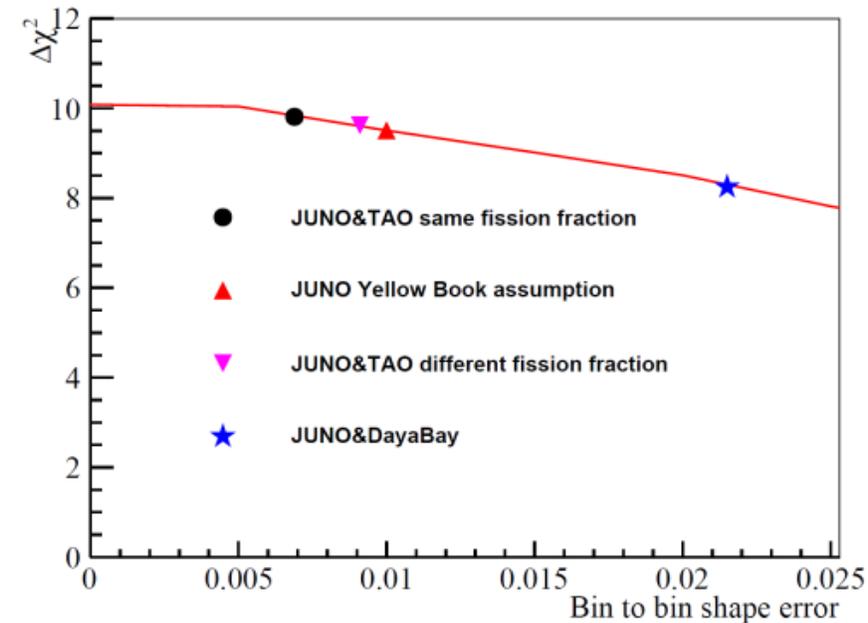
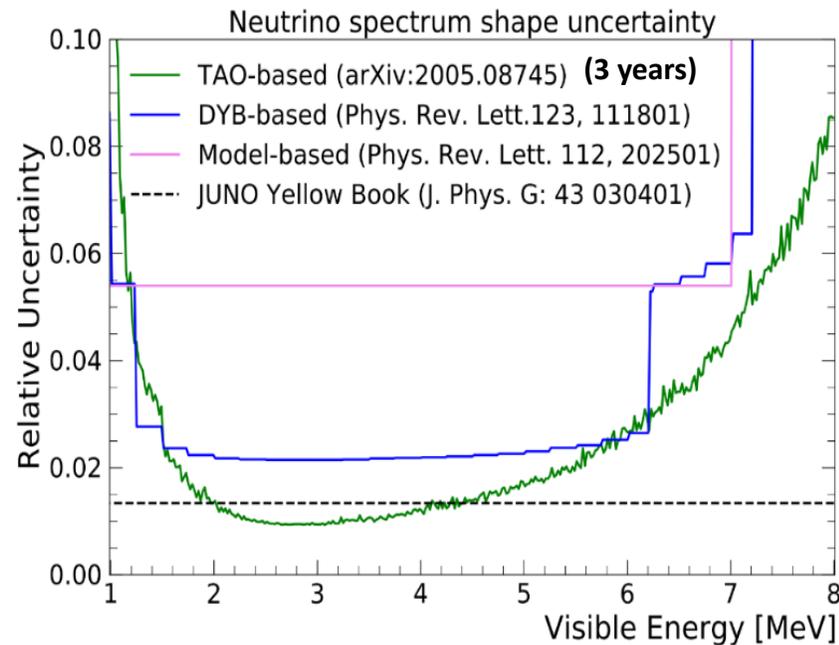
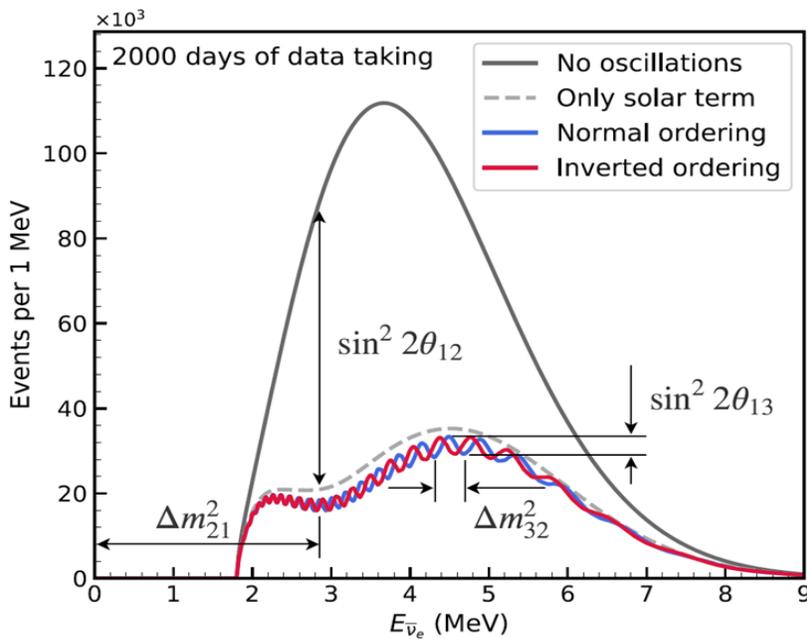
- ❄ 为JUNO提供参考能谱 (谱形误差 $<1\%$)
- ❄ 为检验核数据库提供基准
- ❄ 提供更加可靠的裂变核素中微子产额和能谱
- ❄ 推动丰中子同位素核物理理论发展
- ❄ 研究反应堆中微子反常问题
- ❄ 得到国际原子能机构的强烈推荐 (IAEA-INDC(NDS)-0786)

探测器能量分辨率越高越好!



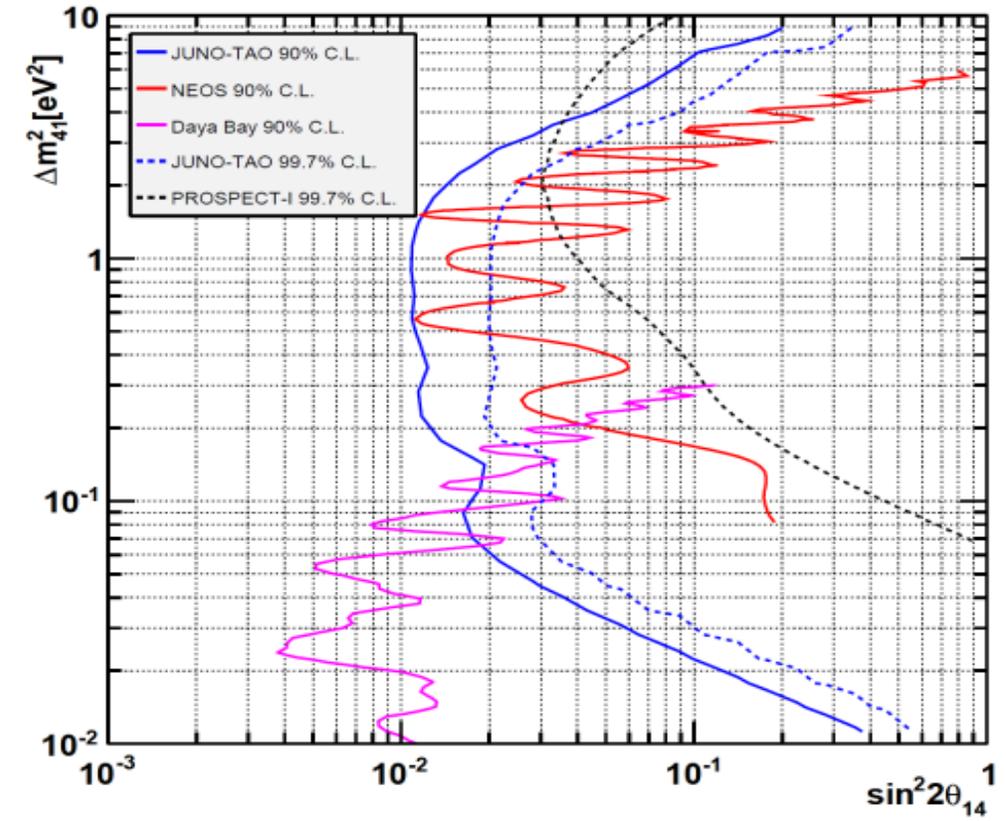
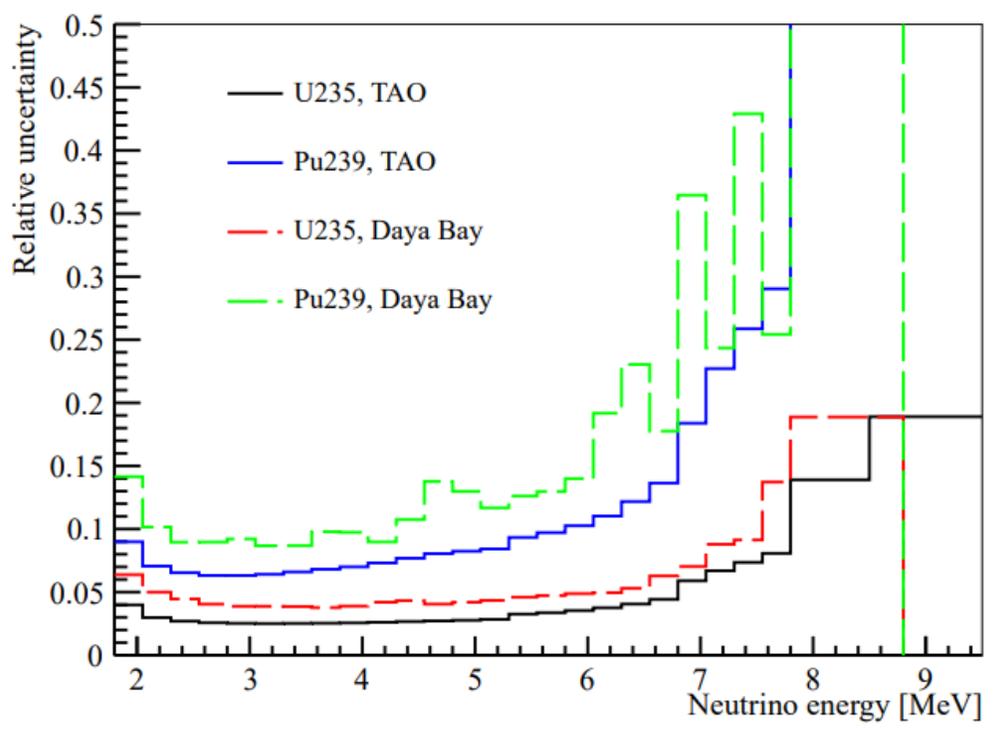
消除反应堆中微子能谱的模型依赖，提高中微子质量顺序测量灵敏度

- ❄ 3年统计量，能谱误差 $< 1\%$
- ❄ 能量分辨率好于JUNO
- ❄ 相比大亚湾能谱输入，灵敏度 $\Delta\chi^2$: $\sim 1.9\uparrow$



❄ 惰性中微子寻找

- 与大亚湾中微子实验和超短基线反应堆实验互补。



❄ 反应堆监测

- ²³⁵U和²³⁹Pu核素中微子谱形测量误差达到4%和8%
- 为反应堆燃料演化反解提供更准确输入

❄️ 中心探测器

- 2.8吨低温掺钆液闪，有机玻璃球直径1.8米
- 超大面积 (10 m²) SiPM光探测器阵列
- 铜球壳和制冷系统
- 不锈钢罐，罐内为-50°C环境
 - 3.4吨LAB缓冲液，外包裹密封胶脂材料用于隔热

❄️ 刻度系统

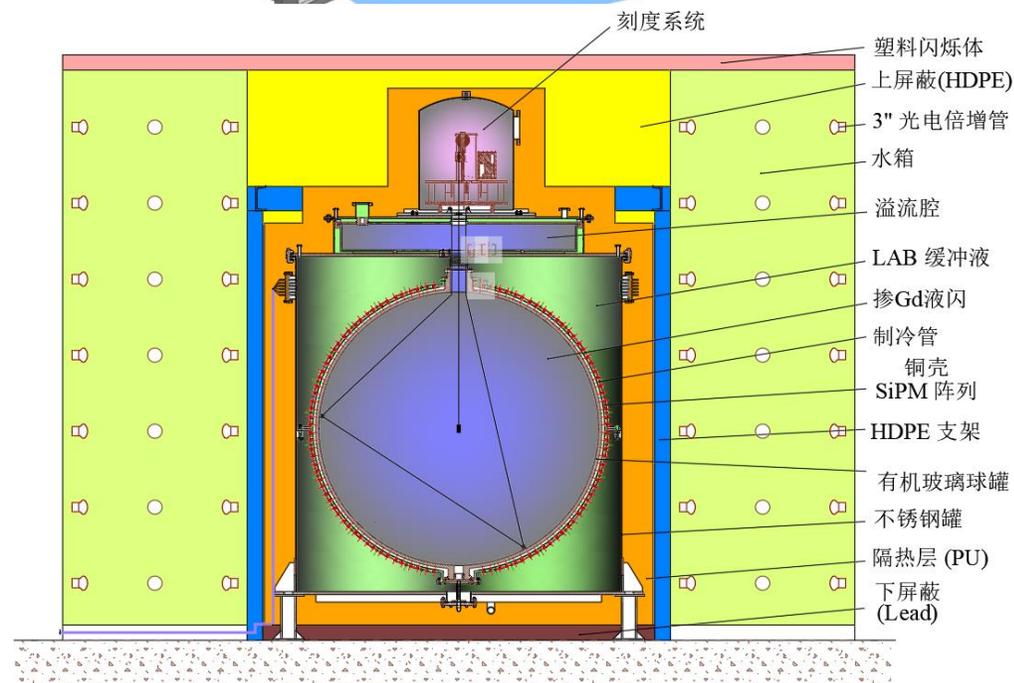
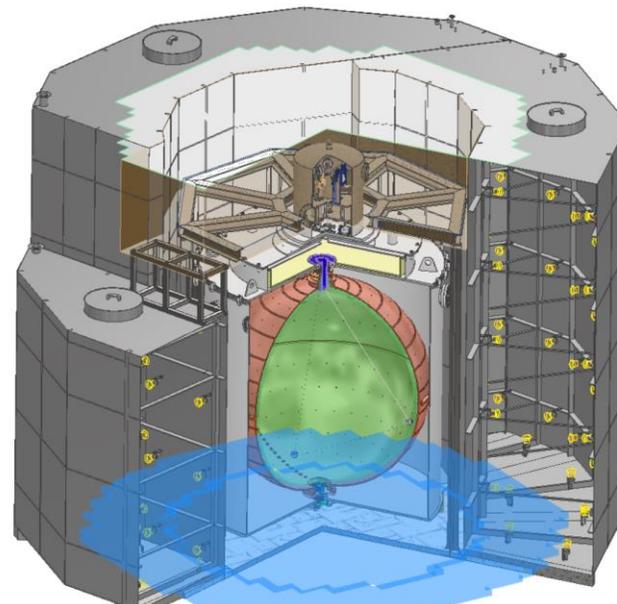
- ACU刻度装置
- 绕线装置

❄️ 水切伦科夫探测器

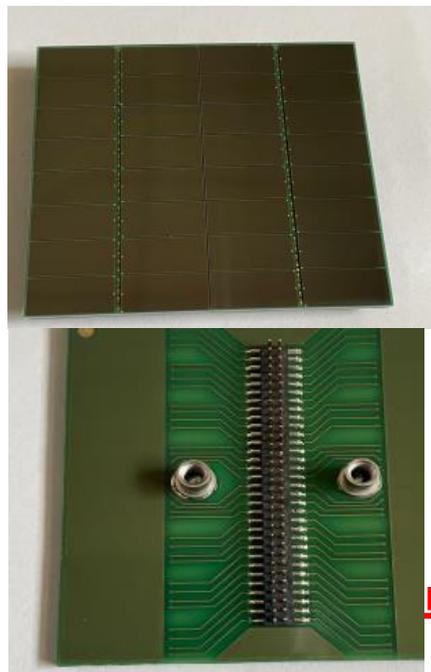
- 中心探测器四周
- 3个水箱，构成八角形，1.2米厚水屏蔽层

❄️ 塑料闪烁体探测器

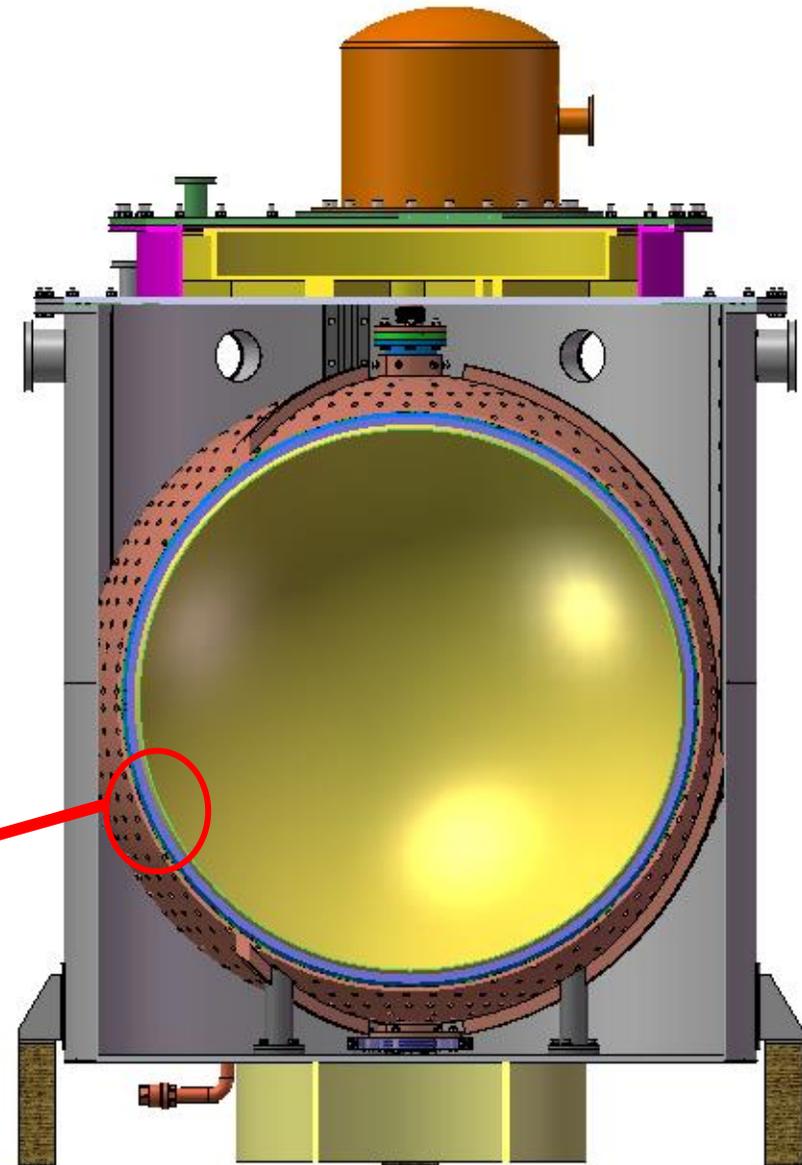
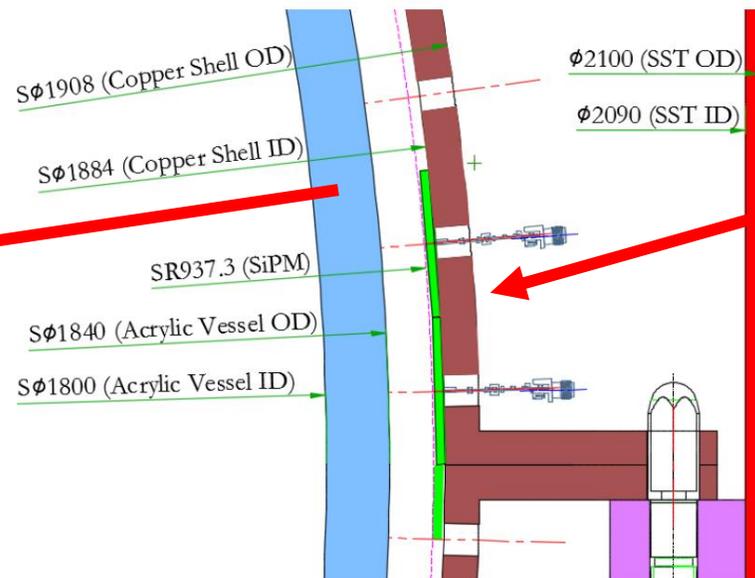
- 位于顶部
- 4层塑料闪烁体



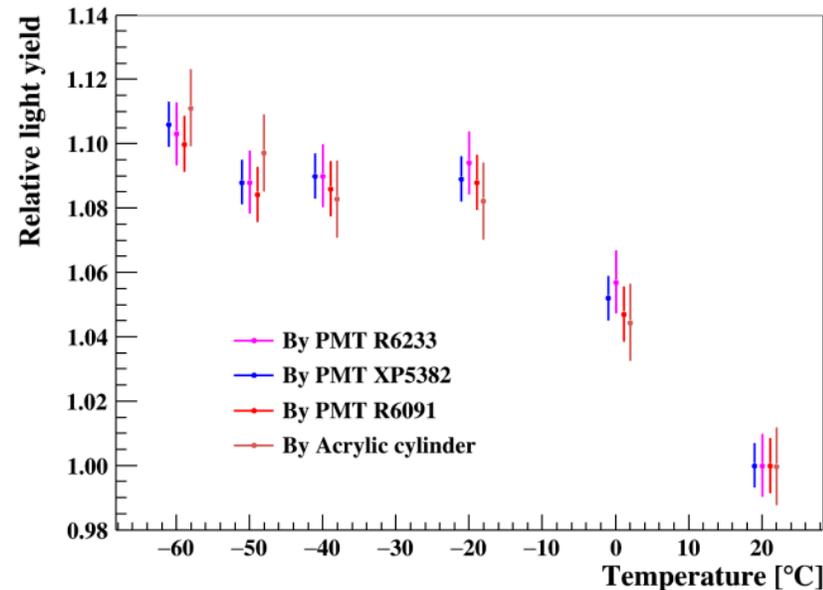
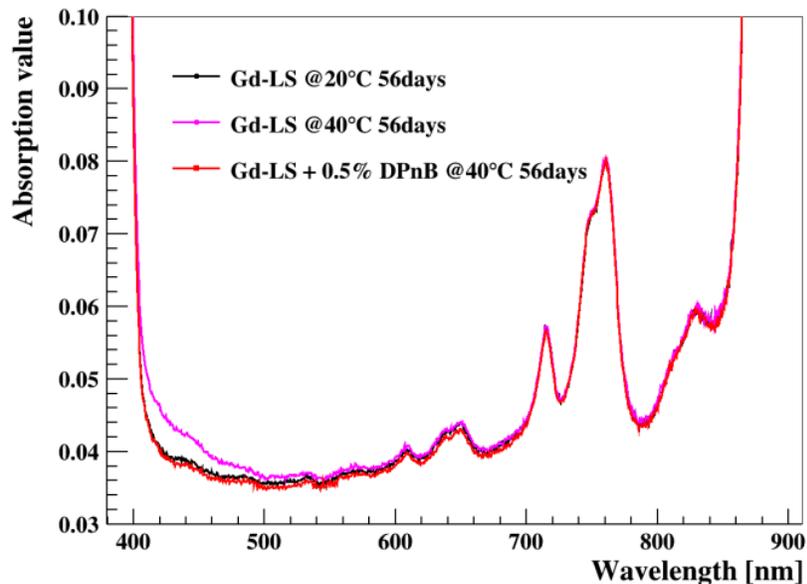
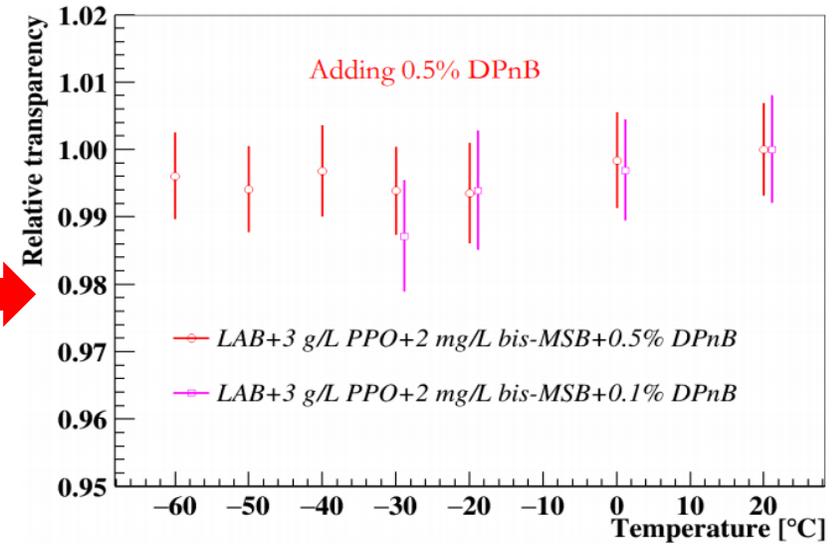
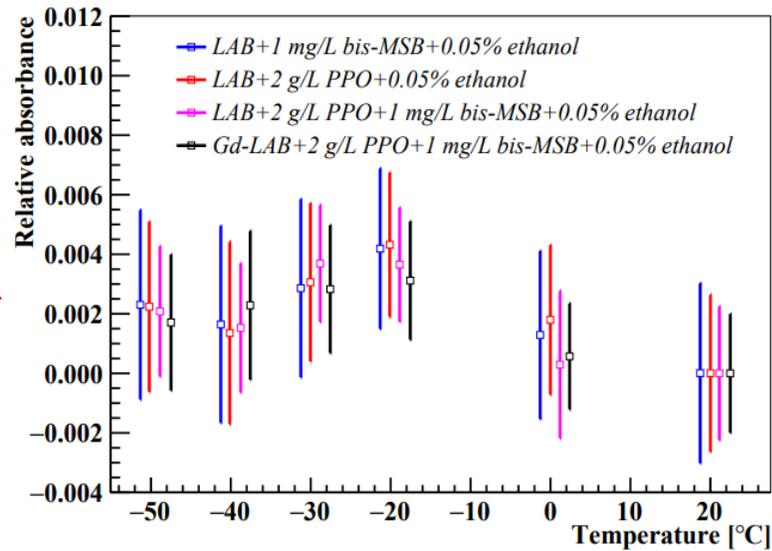
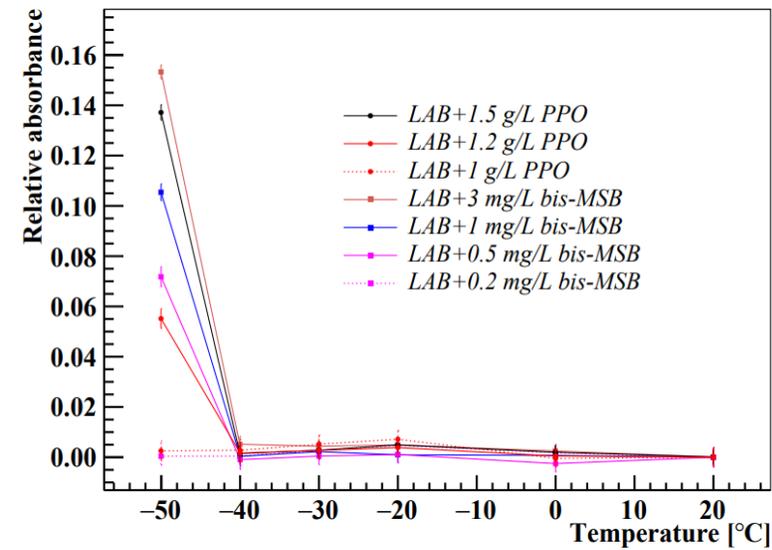
- ❄ 低温掺钷液闪 → **首个低温液闪配方 (下页)**
- ❄ 10平方米SiPM光探测器阵列
 - 4024个 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 阵列, 8048个读出通道
 - 覆盖率: 94%, 探测效率: $>50\%$
 - 工作温度: -50°C , 浸泡在LAB中
- ❄ 直径~2米铜球壳, 厚12mm



单个SiPM阵列



Nucl. Instrum. Meth. A 1009 (2021) 165459



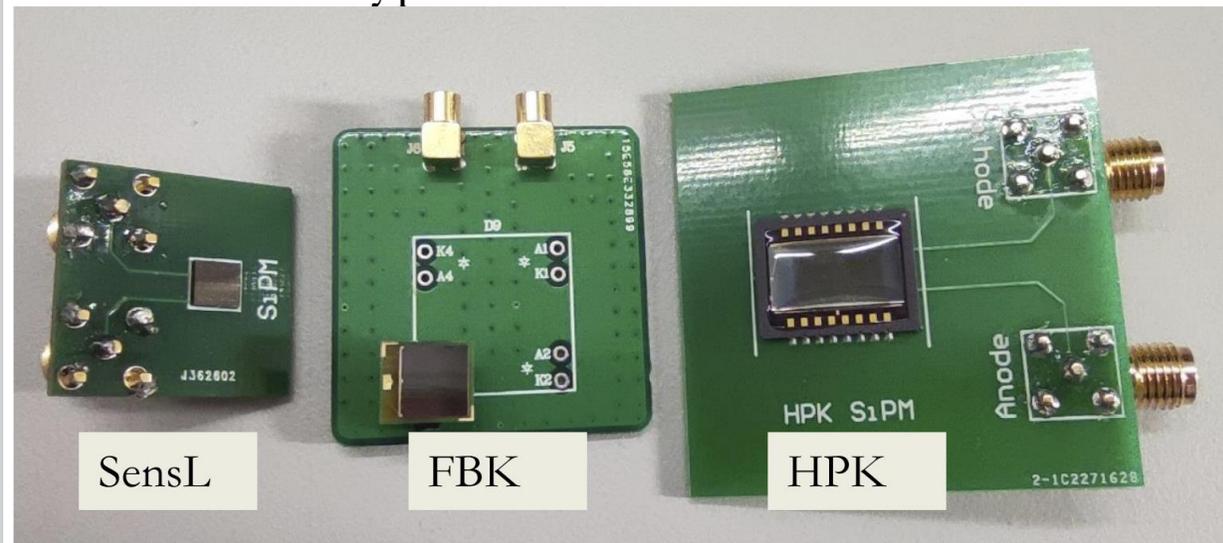
❄️ 低温液闪配方:

Gd-LAB + 3 g/L PPO + 2 mg/L bis-MSB + 0.5% DPnB

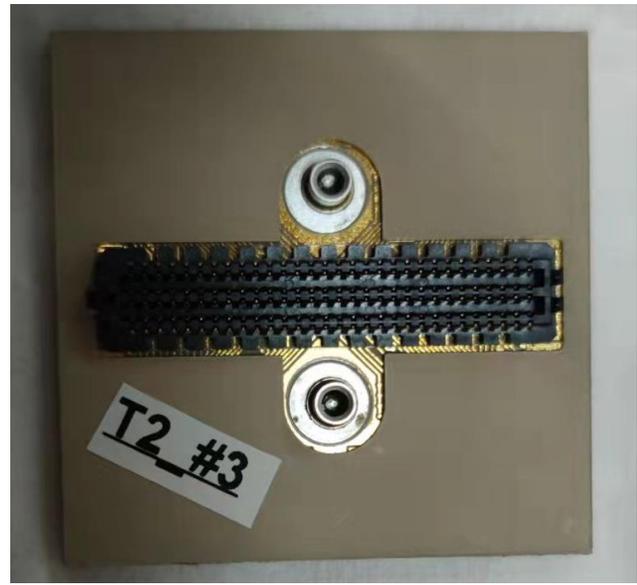
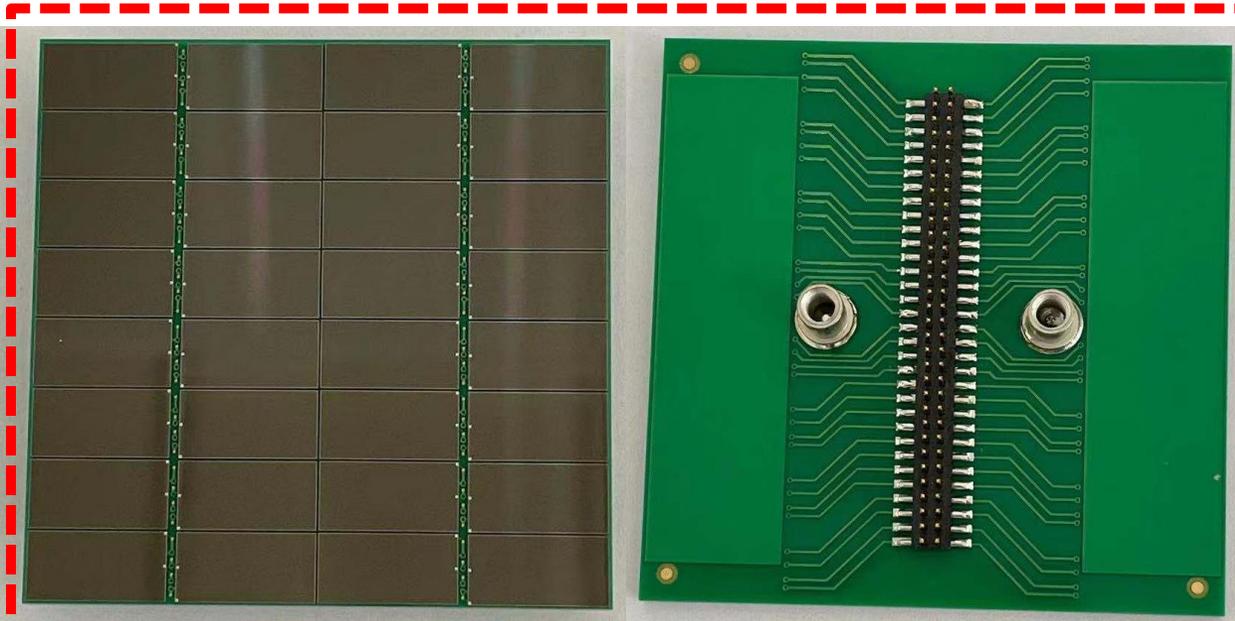
❄️ 高光产额、高闪点、高透过率、高稳定性、低挥发

❄️ 非常多的材料兼容性测量

SiPMs: three types from different vendors



Vendor	Type	Pixel size ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	Total size (mm*mm)
SensL	MicroK-40035-E715	35*35	4*4
FBK	NUV-HD LowCT_v2 (Double/Triple trenches)	50*50 (75*75)	6*6
HPK	S16080	75*75	6*12





完成10平方米 (4100个) SiPM阵列量产

第1步：光学检测

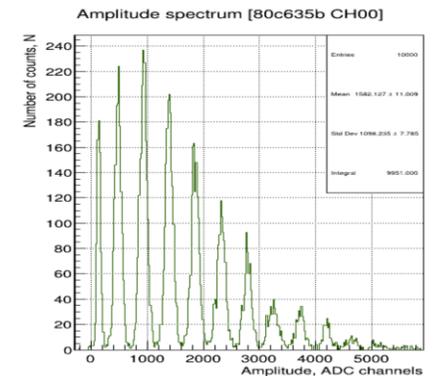
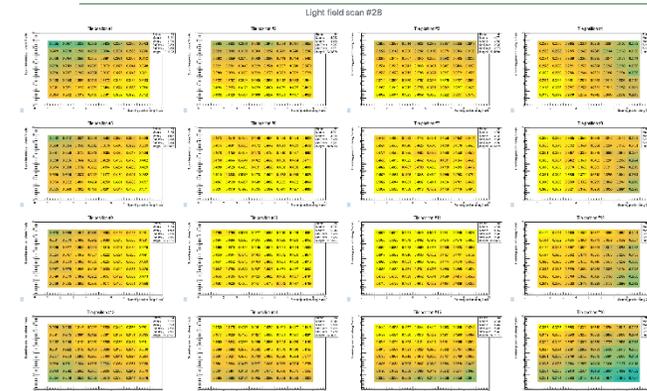
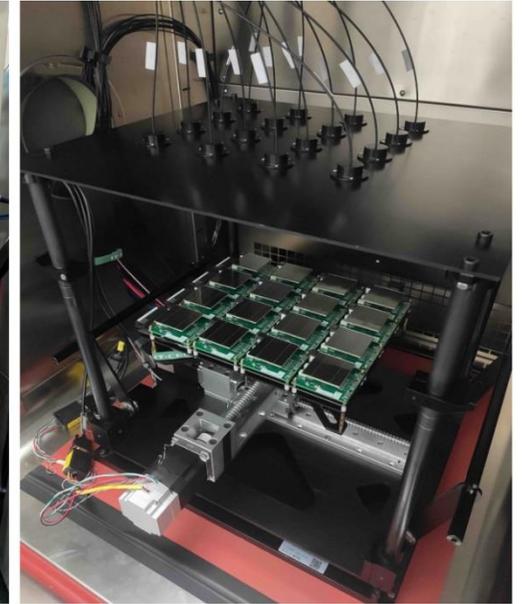
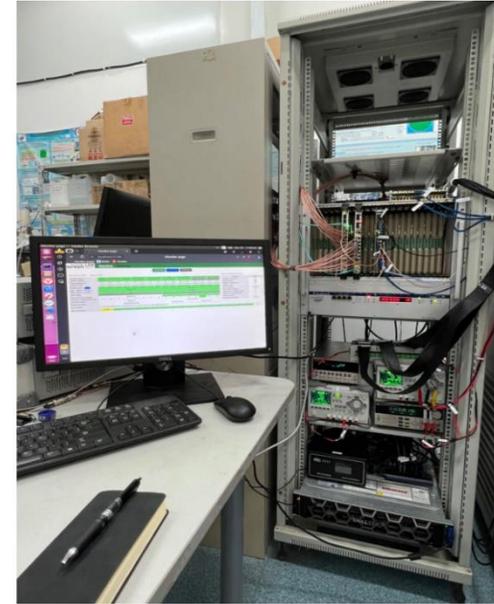
- 4100个SiPM阵列
- 后续算法判断缺陷

第2步：老化测试

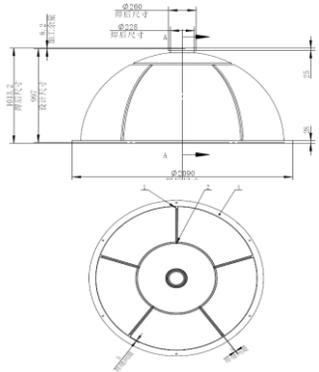
- 常温运行2周
- 抽测每个阵列暗电流

第3步：批量测试

- -50 °C 测量环境
- 4100 tile × 16 ch/tile = 65,600, 48 tile/day
- PDE, DCR, CT, AP, gain, etc



直径约2米，厚度28mm铜球壳加工制作极具挑战！2021年夏 - 2023年5月



分成8瓣



完成铸造



焊接成形



完成焊接



PTFE镀膜



喷砂



除油



完成机械加工

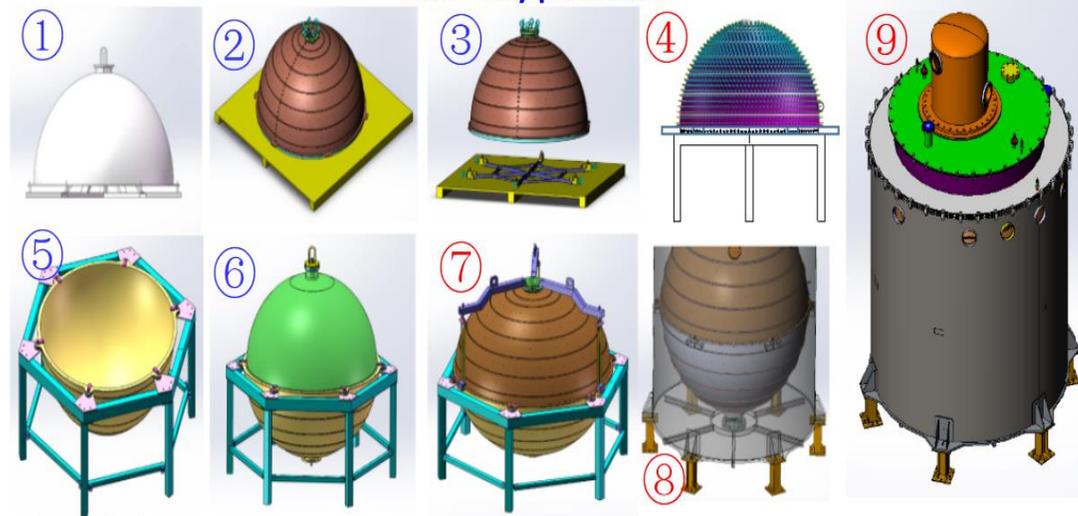


车削和铣削

❄ 探测器已经在高能所完成组装

❄ 正在进行性能测试

Assembly procedure



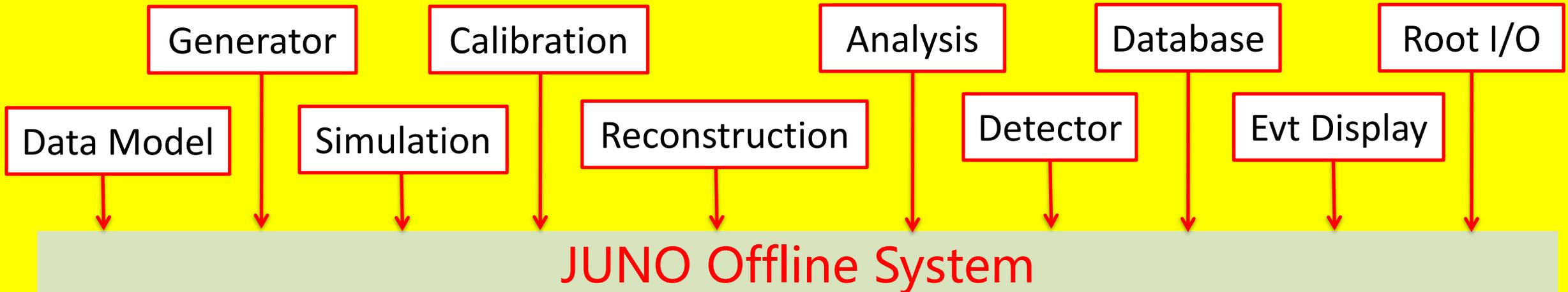
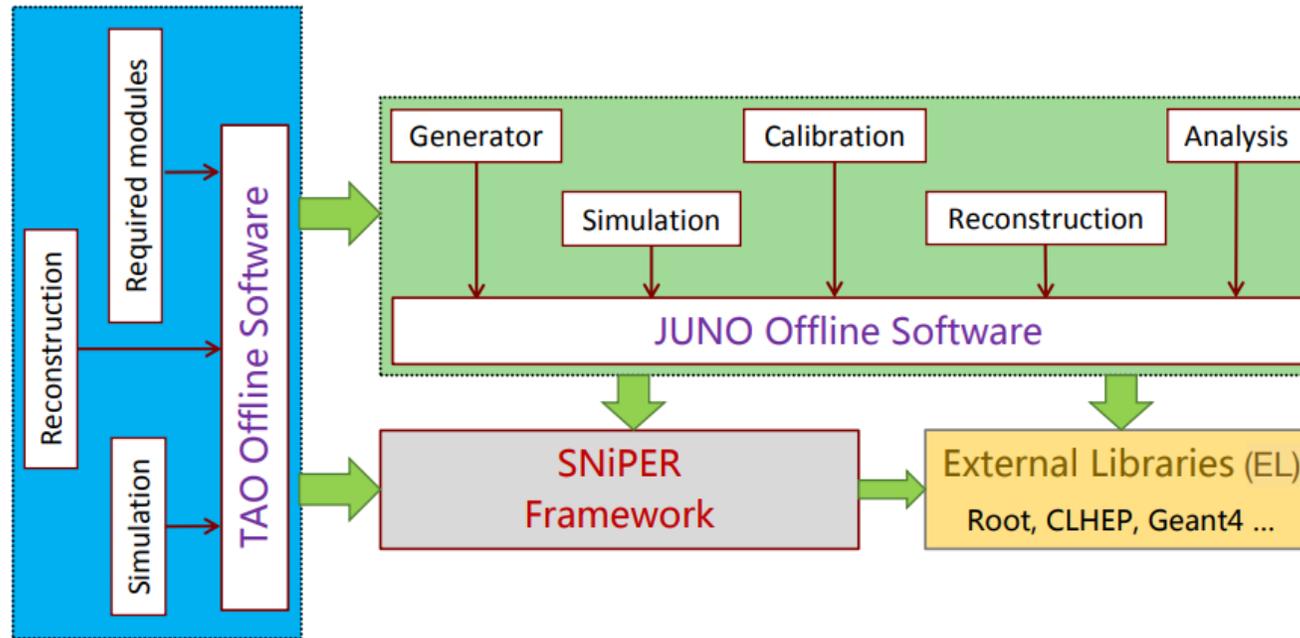
- ❄️ **台山中微子实验将首次测量反应堆中微子能谱的精细结构**
 - **为JUNO提供精确的参考能谱，显著提高质量顺序测量灵敏度**
 - **反应堆中微子能谱精细结构，为核数据库提供基准**
 - **惰性中微子、反应堆监测与防护等**
- ❄️ **采用国际领先的探测技术，先进性与挑战性并存**
 - **能量分辨率好于2% @ 1 MeV，远好于国际同类探测器**
 - **完成首个低温液闪配方，超大面积SiPM阵列，大尺寸铜球壳制作**
- ❄️ **探测器将于2024年下半年在核电站安装，2025年初开始数据获取**

中微子实验软件

曹国富

中国科学院高能物理研究所

- ❄ **为什么需要中微子实验软件?**
- ❄ **都有哪些软件模块?**
- ❄ **每种软件模块的功能是什么?**
- ❄ **是不是计算机专业的更合适?**
 - **不行，需要懂物理**



软件的作用贯穿项目的各个阶段，具有不可替代的作用！

提出JUNO
项目

JUNO工程
建设

数据获取
和分析

❄ **为什么建造JUNO?**

→ **想解决什么重大科学问题**

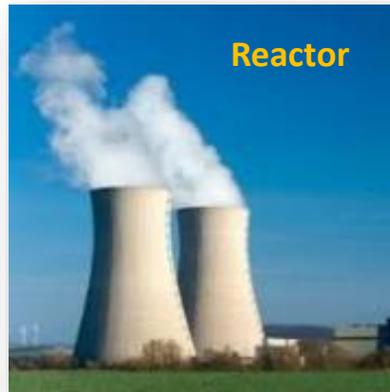
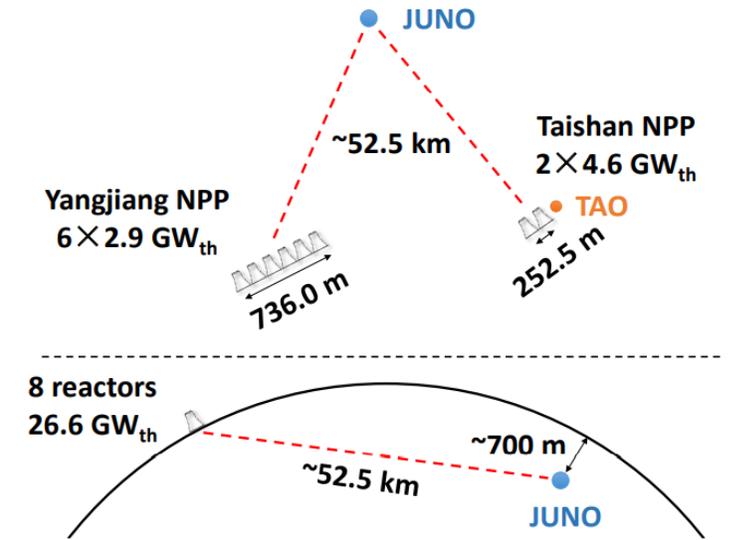
❄ **怎么建造JUNO?**

→ **探测器设计、成本、风险等**

为什么建造JUNO?

科学目标：质量顺序，精确测量等

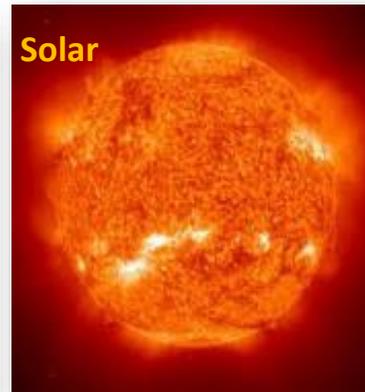
- Physics goals: neutrino mass ordering ($\sim 4\sigma$), precision measurement of neutrino mixing parameters ($\ll 1\%$), supernova ν , geo- ν , solar ν , nucleon decay, etc
- Future upgrade (2030s) : searching for $0\nu\beta\beta$
- Detector construction completed in 2024



~60 IBDs per day



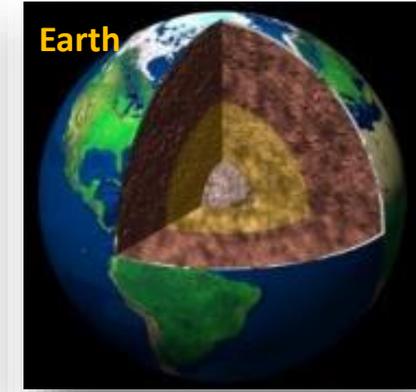
Several per day



Hundreds per day



~5000 IBDs for
CCSN @10 kpc



Several IBDs per day

+

New physics

IBD: inverse beta decay
CCSN: core-collapse supernova

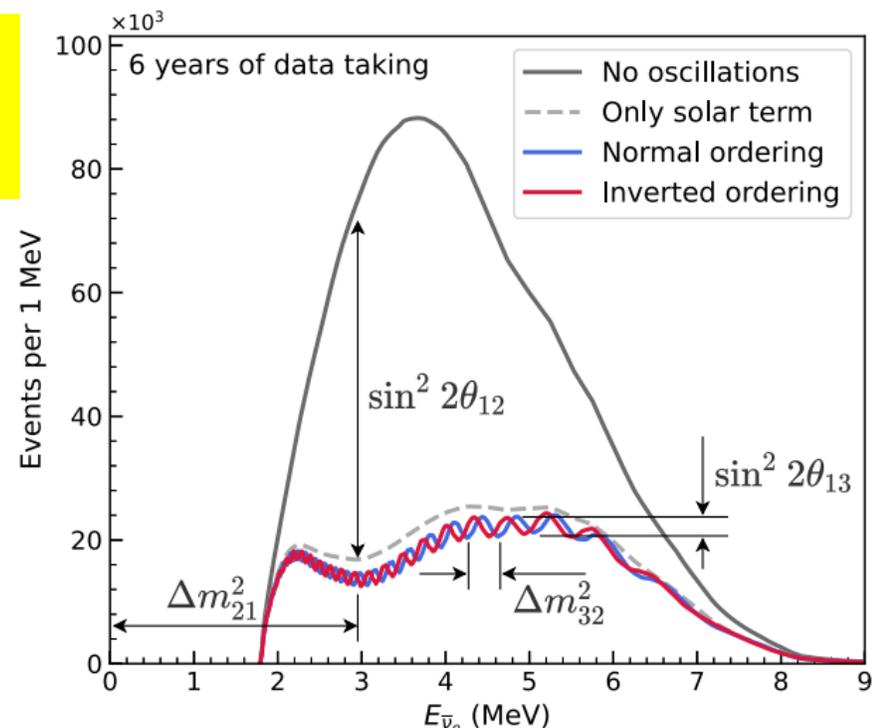
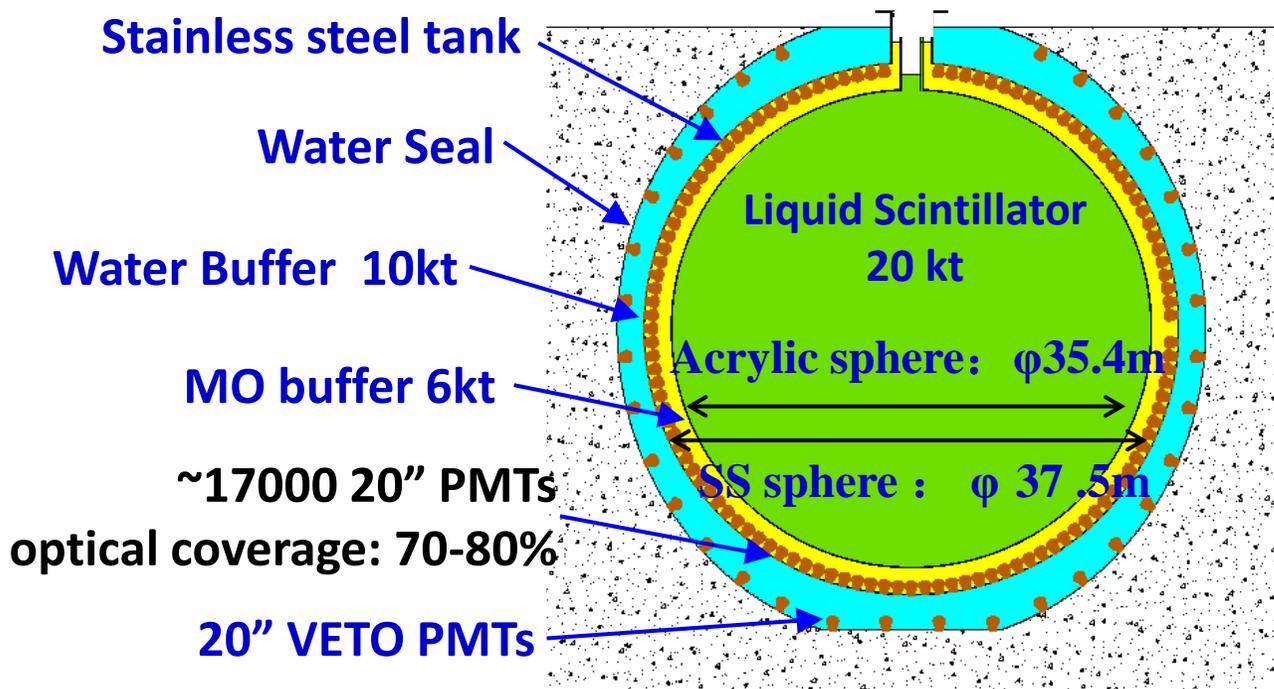
Neutrino oscillation & properties

Neutrinos as a probe

- ❄ 如何设计探测器?
- ❄ 如何确定探测器各项参数?
- ❄ 如何判断探测器性能是否满足要求?

探测器模拟是解决这些问题的唯一有效途径!

江门中微子实验(JUNO)探测器概念图

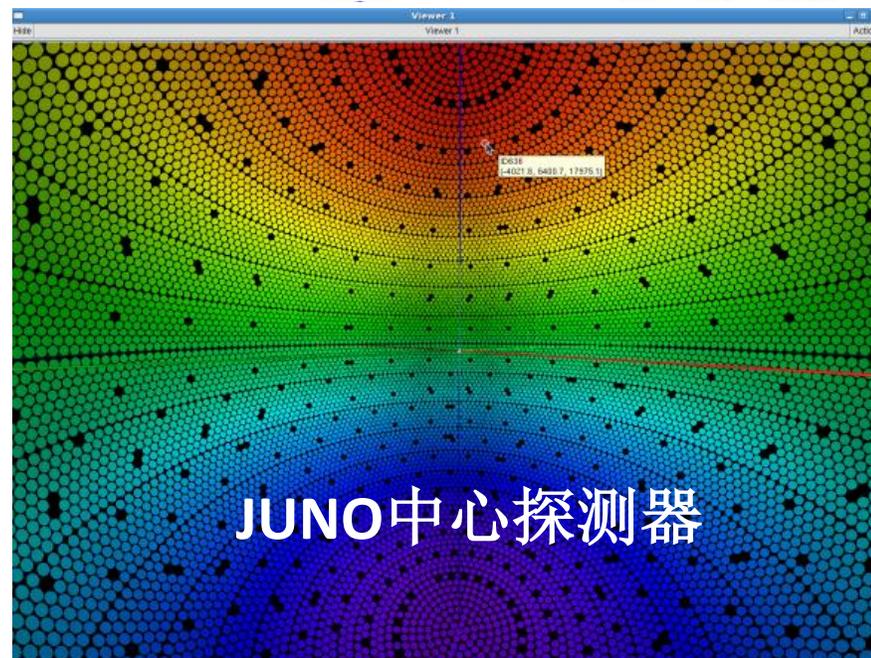
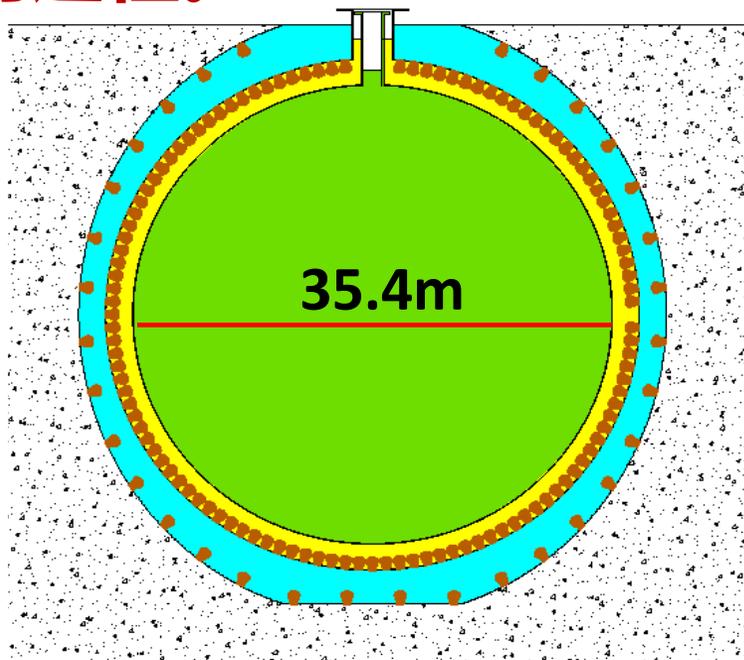


主要物理目标:
确定中微子质量等级

探测器主要性能指标:
能量分辨率 $< 3\%/\sqrt{E}$,
这对应于1MeV能量沉积
产生1200个光电子。

什么是探测器模拟?

- ❄ 探测器模拟是把一个**真实探测器**或一个**假想探测器**在**计算机中实现**的过程。



JUNO中心探测器

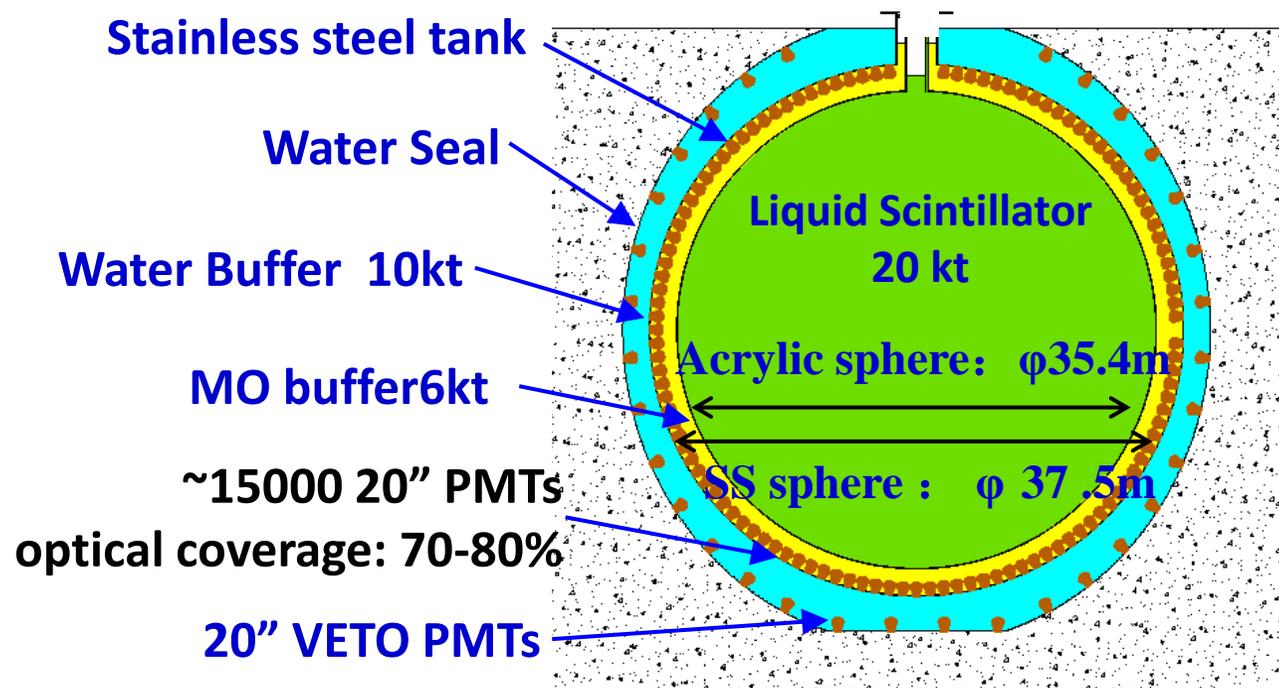
- ❄ 探测器模拟是**虚拟实验**，已有**理论、模型、经验和实验数据**是探测器模拟的基础。
 - ❄ **粒子与物质相互作用**
 - ❄ **深刻理解探测器**
- } **获得靠谱探测器模拟结果的关键!**

- ❄ **模拟是工具、手段、方法。**
- ❄ **模拟无法替代实验，更无法替代理论。**
- ❄ **模拟结果具有指导性，是高能物理等实验中不可或缺的一个环节。**
- ❄ **高精度的模拟结果在某些领域是必需的。**
- ❄ **实验是检验模拟正确性的唯一标准。**

❄ 探测器R&D阶段

- 从物理上比较探测器不同设计方案优劣的重要手段
- 确定探测器的各项设计参数的重要途径
- 研究探测器的预期性能指标

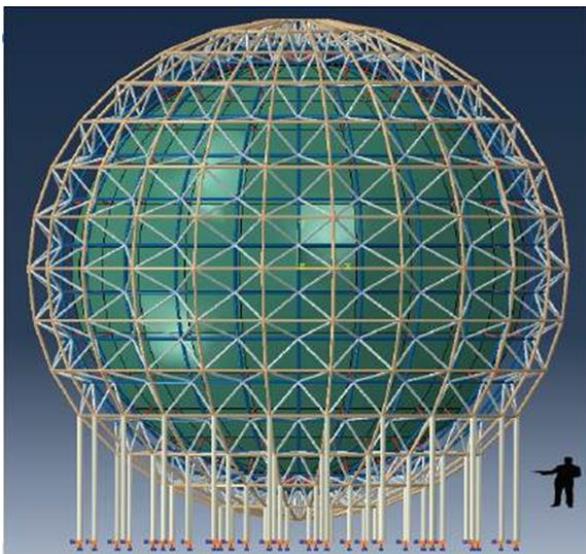
江门中微子实验(JUNO)探测器概念图



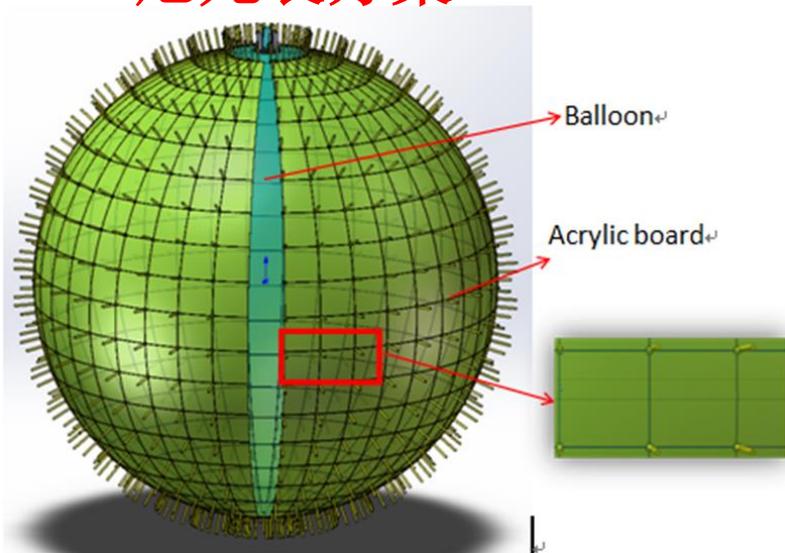
主要物理目标：
确定中微子质量等级

探测器主要性能指标：
能量分辨率 $< 3\%/\sqrt{E}$ ，
这对应于1MeV能量沉积
产生1200个光电子。

有机玻璃球方案



尼龙袋方案



选哪个好那?

探测器模拟结果显示:

1. 有机玻璃球方案的能量分辨率稍差。
2. 尼龙袋方案的本底略高。

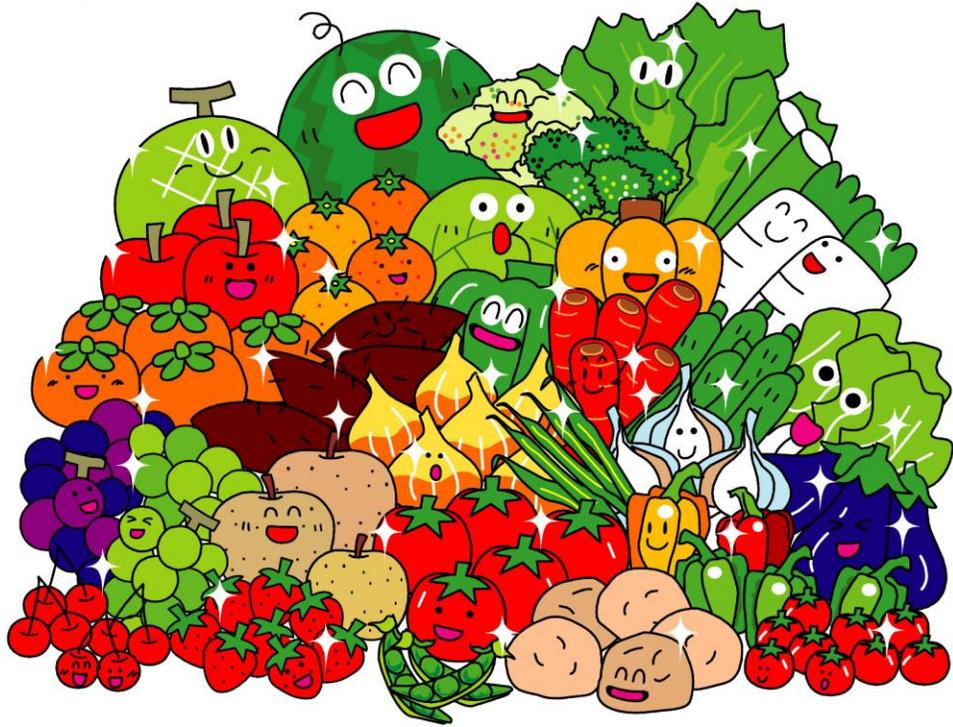
最后, 综合考虑模拟结果, 机械设计和实验风险等因素, 选择了有机玻璃球方案。

- ❄ **满足物理目标是探测器性能指标确定的基本要求。**
- ❄ **达到探测器性能指标是设计探测器各项参数的前提。**
- ❄ **以JUNO为例，通过探测器模拟确定了很多探测器设计参数：**
 - 液闪衰减长度
 - 液闪光产额
 - PMT覆盖率
 - PMT探测效率
 - 水屏蔽层的厚度
 -
- ❄ **所有设计参数的确定必须综合考虑模拟结果，机械设计，成本，风险等因素。**

- ❄ **探测器模拟是离线软件数据处理系统的重要组成部分。**
 - 是重建、刻度等离线软件开发的前提和基础。
 - 检验、调试重建和刻度算法的重要手段。

- ❄ **在探测器建造的数年时间，是完善和优化探测器模拟的重要契机，为实现精细探测器模拟做好准备。**
 - 完善和细化探测器几何和物质描述。
 - 利用一切可能的测量数据，确定模拟中的各种参数。
 - 考虑探测器性能随时间的变化，实现从静态、理想探测器模拟到探测器模拟真实化的转变。
 - 精细模拟电子学系统，触发判选系统和数据读出系统。
 - 检查模拟软件中的错误，优化模拟软件设计和运行速度。

- ❄ **模拟调节 (MC tuning), 目的是减少模拟与数据间的差别。**
 - **模拟调节 \leftrightarrow 模拟与数据对比**
- ❄ **借助探测器模拟理解探测器响应。**
- ❄ **在实验数据分析中, 模拟在事例选择条件优化, 本底分析, 绝对探测效率确定和变量形状描述等方面起着关键性作用。**
- ❄ **探测器模拟在物理成果的发现中扮演者非常重要的角色。**



信号：黄瓜
本底：其它蔬菜、水果

通过模拟研究信号事例和本底事例的特征。

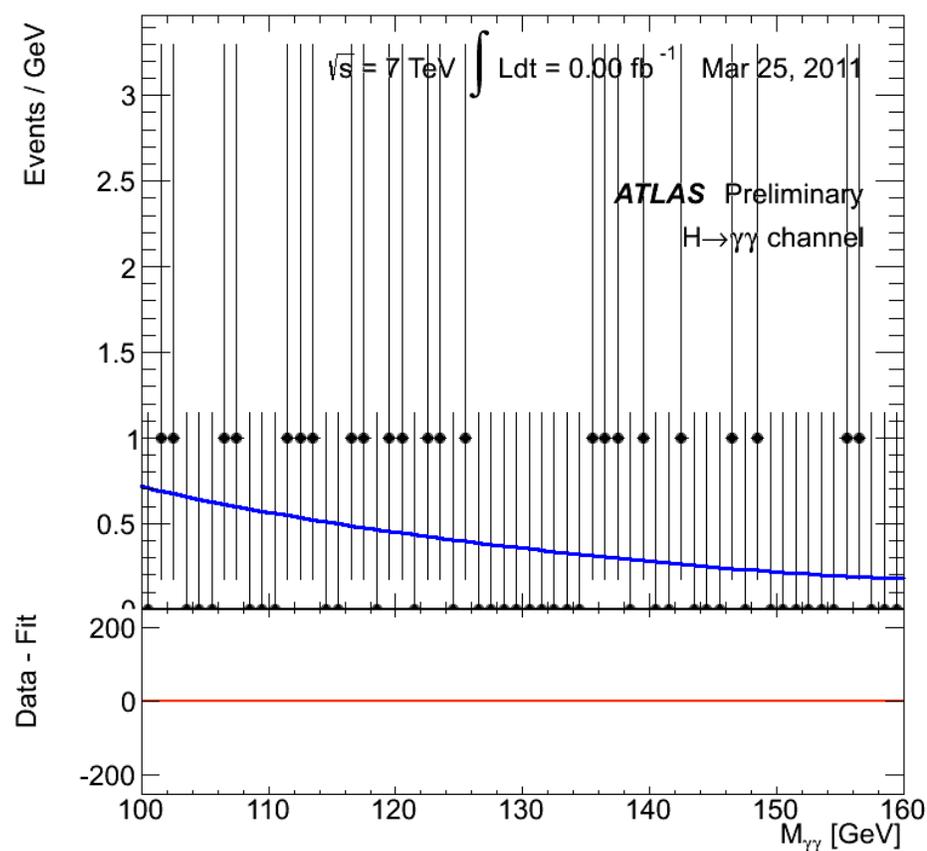
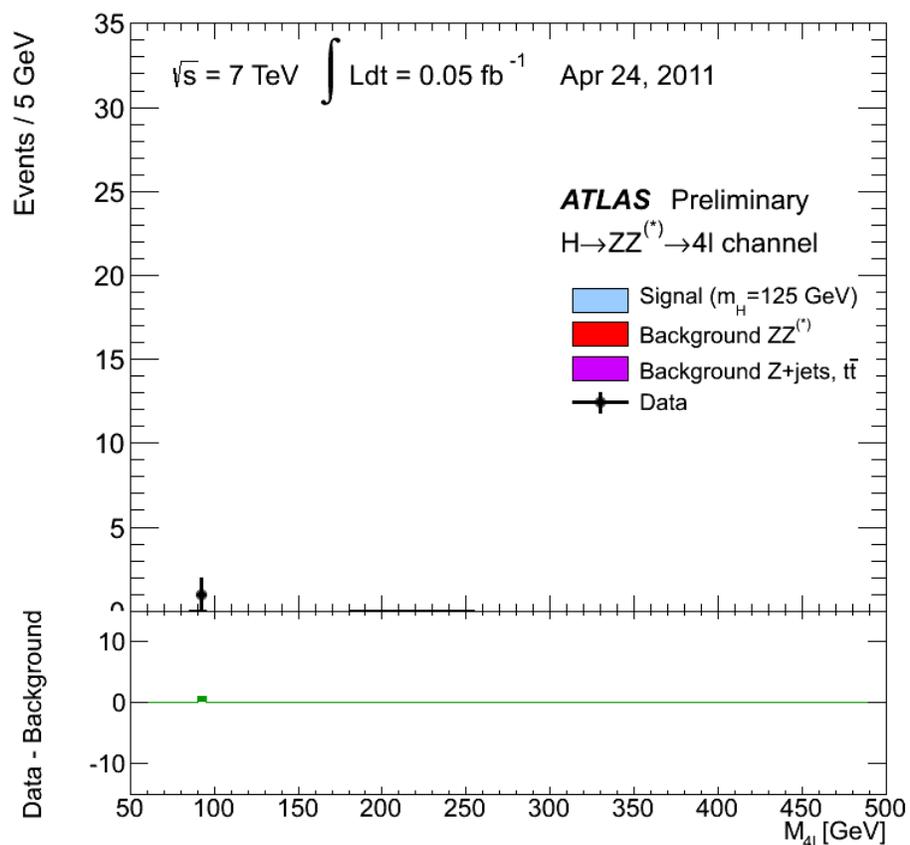
- a) 绿色
- b) 细长
- c) 瓜皮较厚
- d) 表皮有刺

通过以上选择条件优化以后，黄瓜(信号)+少量丝瓜(本底)



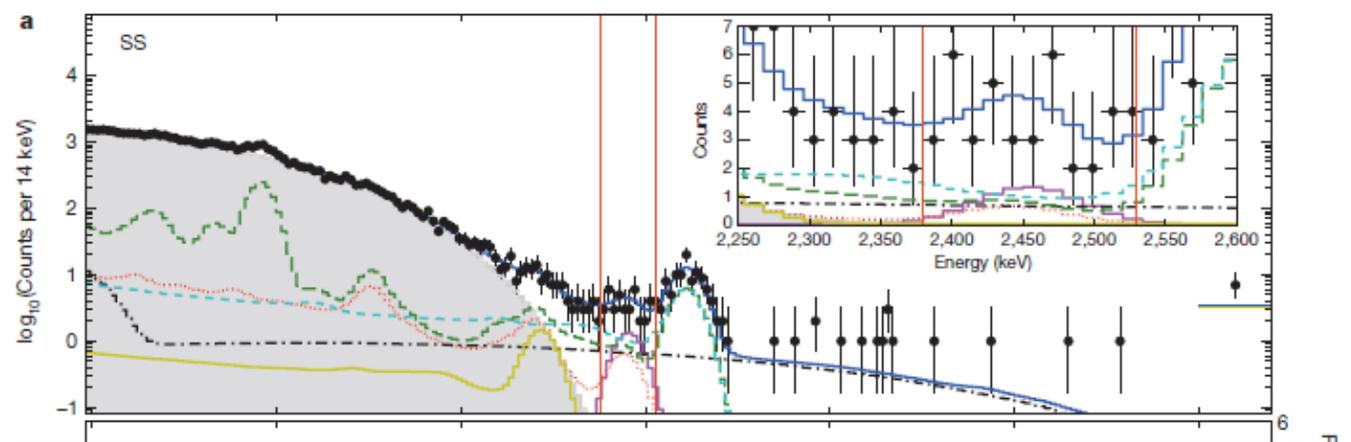
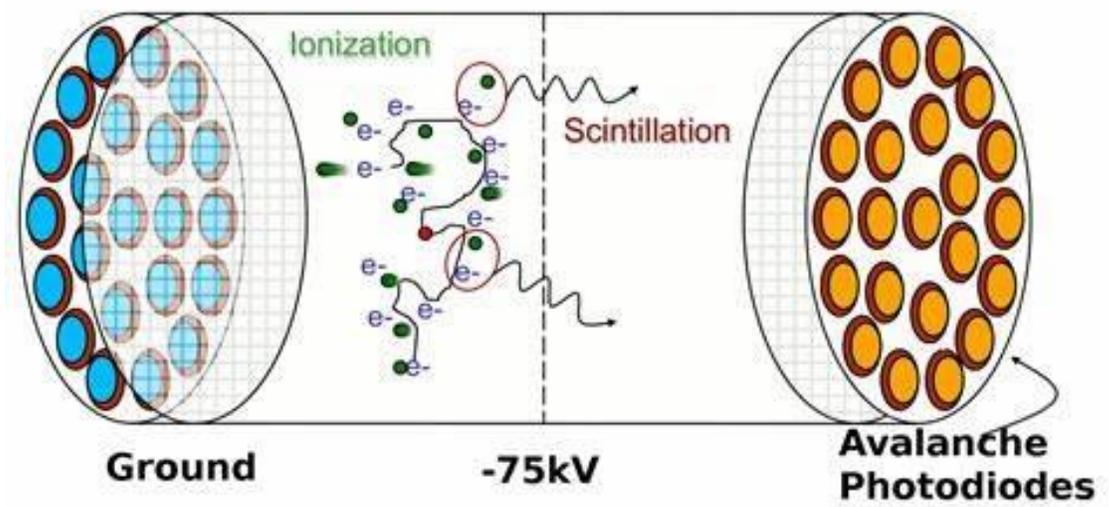
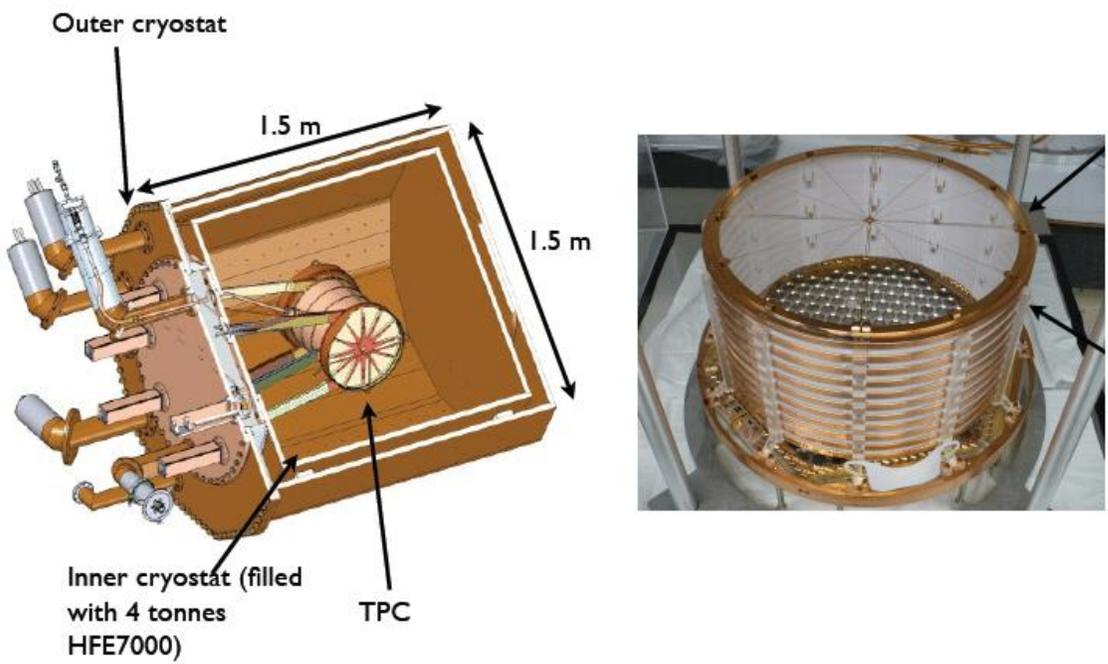
通过模拟纯信号事例，得到**选择效率**。

通过模拟本底事例，分析通过选择条件的**本底成分**。

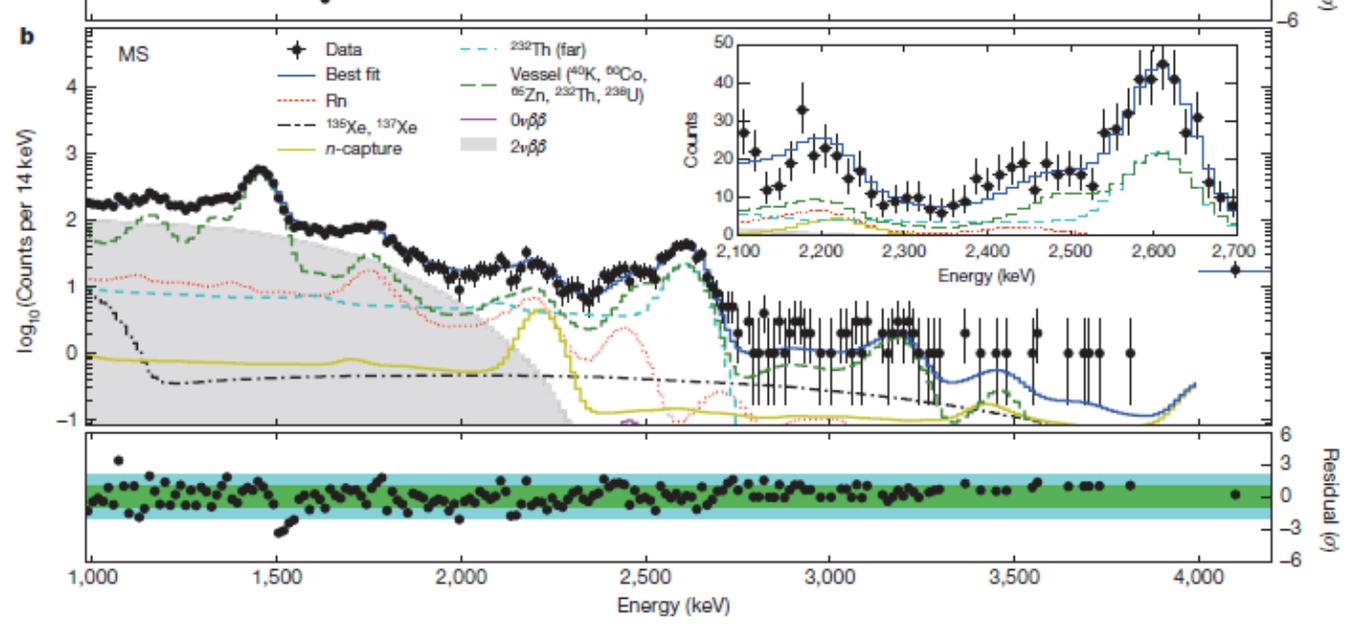


探测器模拟用于确定Higgs衰变到 $\gamma\gamma$ 末态的不变质量谱形状。

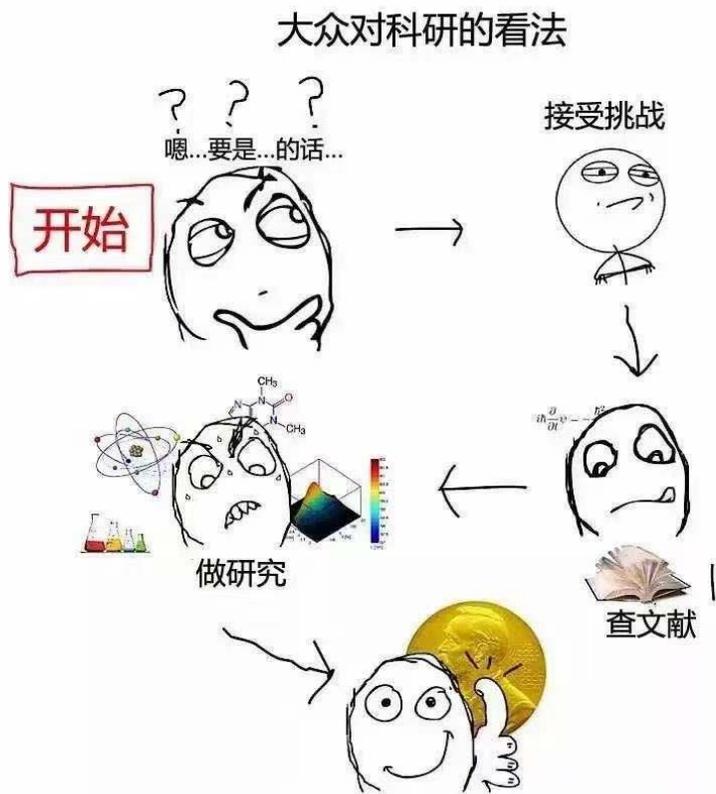
探测器模拟用于分析Higg寻找中的本底。



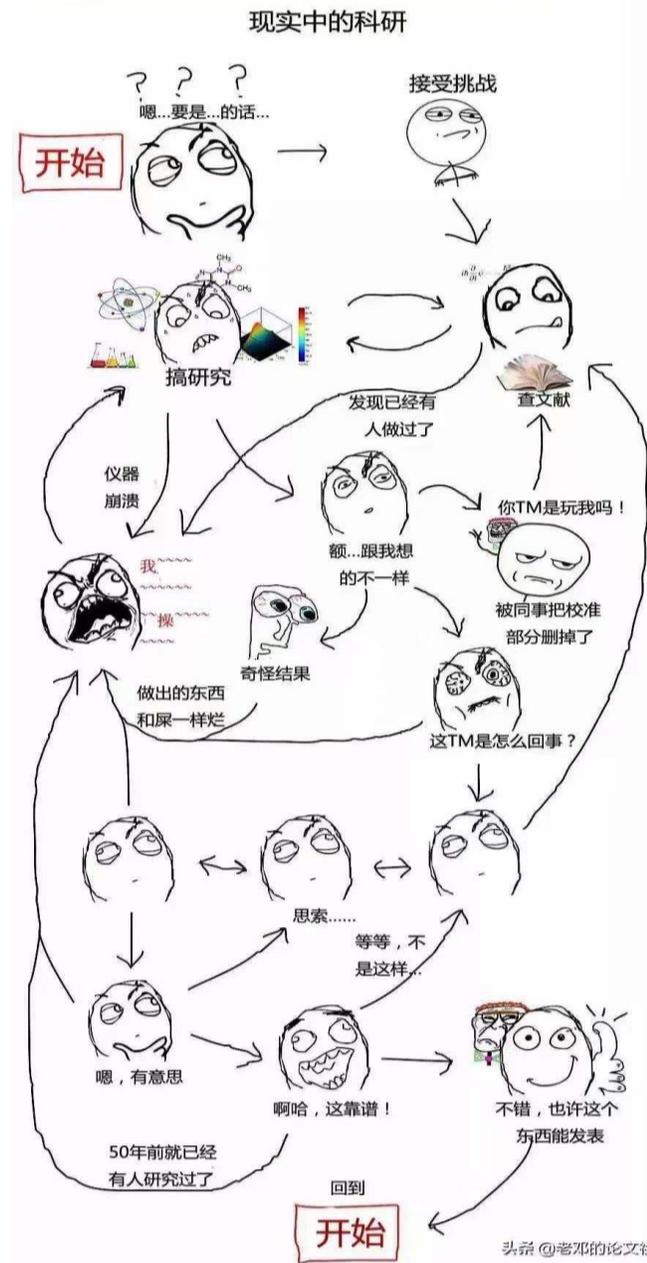
所有的本底形状和信号显著性分析都源于探测器模拟!



- ❄ **探测器模拟广泛应用于，**
 - **高能物理 (探测器设计, 刻度/重建, 数据分析)**
 - **核物理**
 - **宇宙线物理**
- ❄ **此外，还应用于很多其它领域，**
 - **空间科学**
 - **放射科学**
 - **医学 (束流治疗, 放疗, 成像, 辐射研究)**
 - **背景辐射计算**
 -



MC Simulation



❄️ **是的，非常具有挑战性！是块硬骨头**

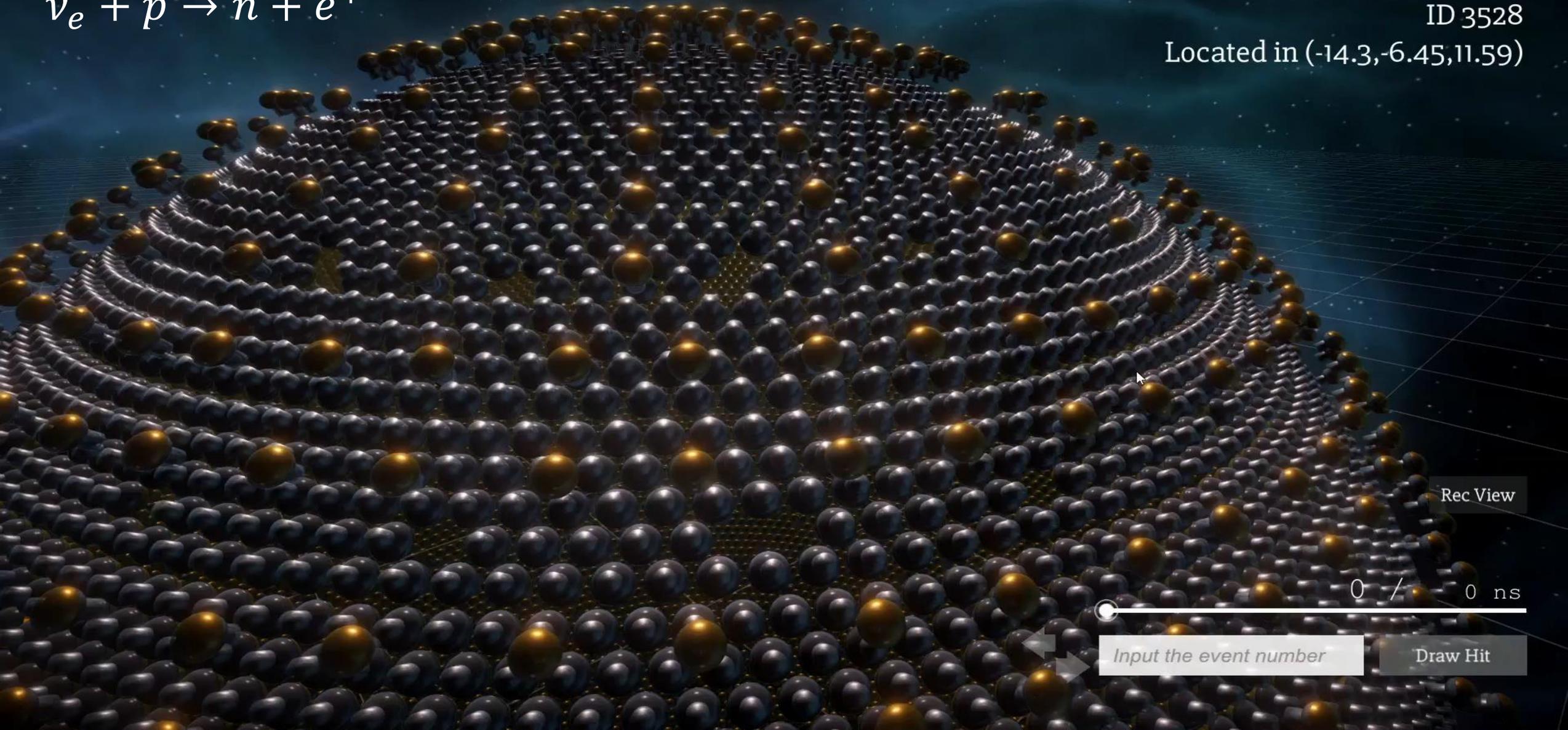
❄️ **你敢来挑战吗？**



PMT

ID 3528

Located in (-14.3,-6.45,11.59)



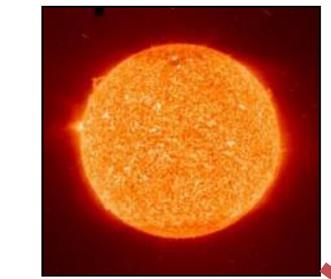
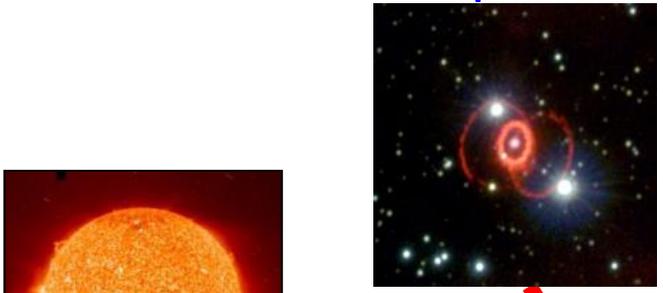
Rec View

0 / 0 ns

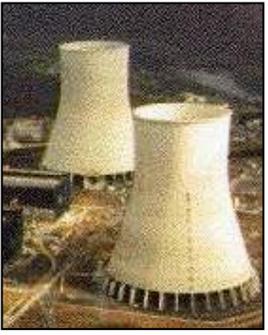
Draw Hit

产生打入探测器的原初粒子

Supernova ν
5-7k in 10s for 10kpc



Solar ν
(10s-1000s)/day



26.6 GW, 53 km
reactor ν , 45/day
Bkg: 3.8/day

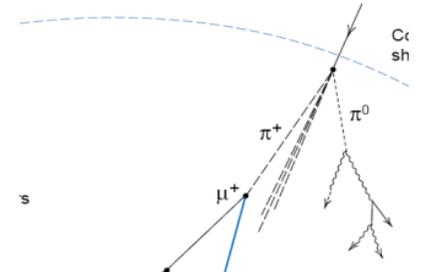


Atmospheric ν
several/day

Cosmic muons
~ 250k/day

0.003 Hz/m²
215 GeV
10% multiple-muon

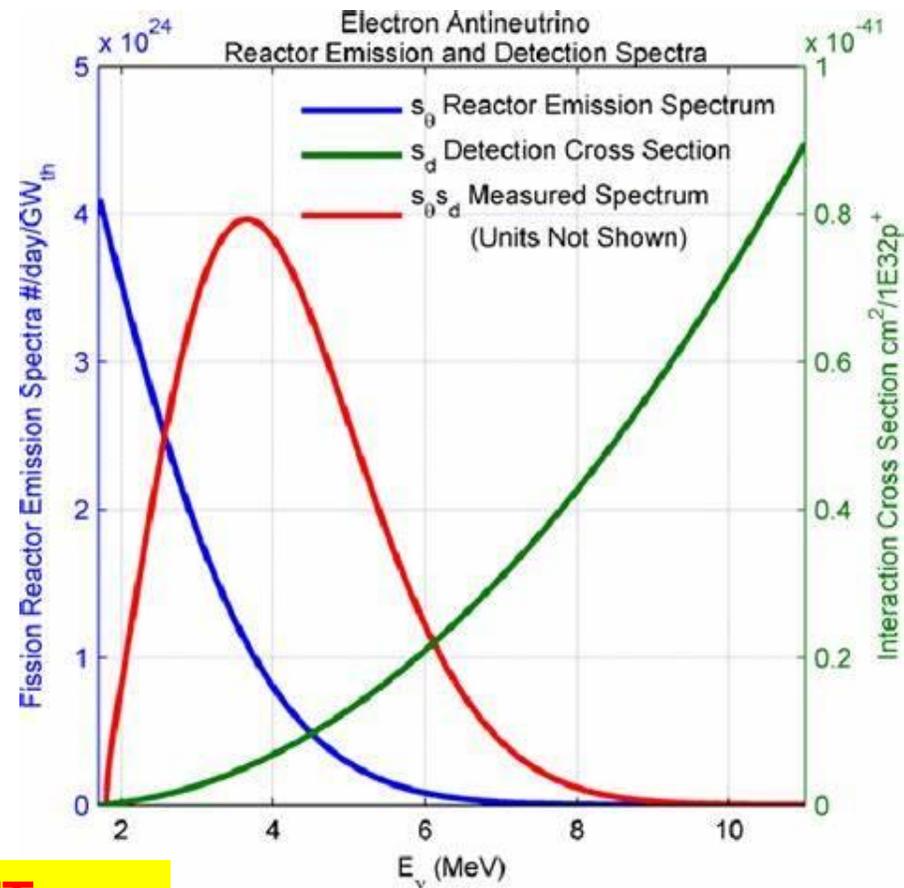
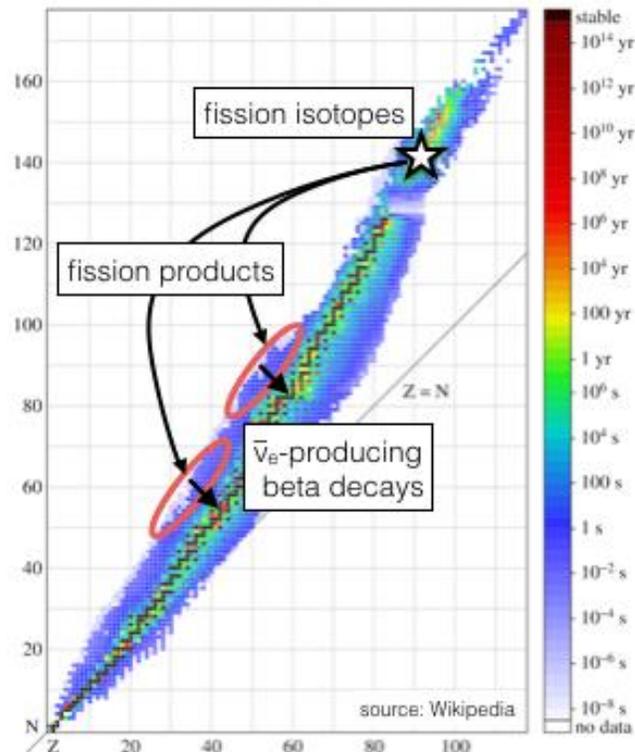
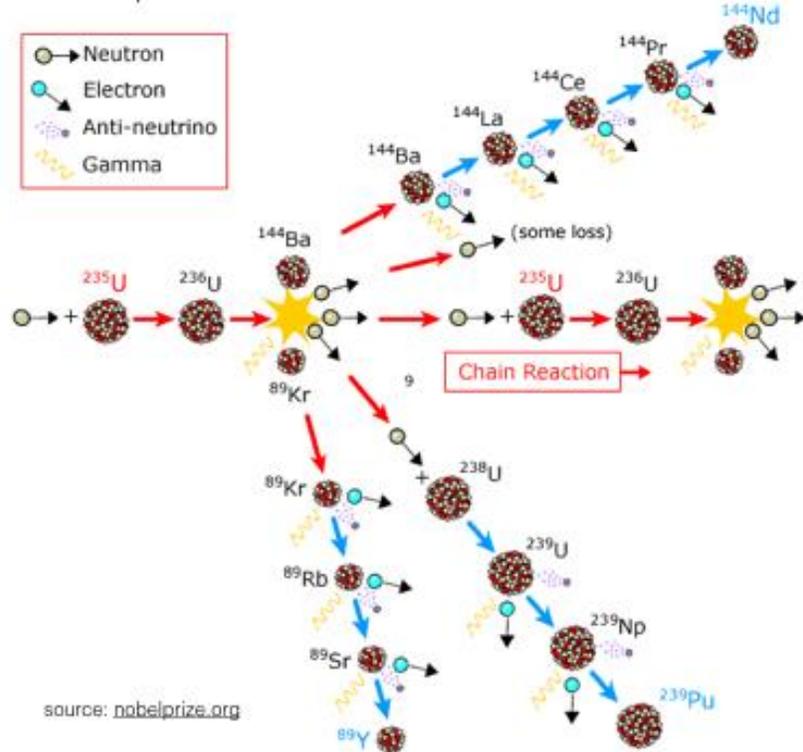
Geo-neutrinos
1.1/day



一个例子：反应堆中微子的产生

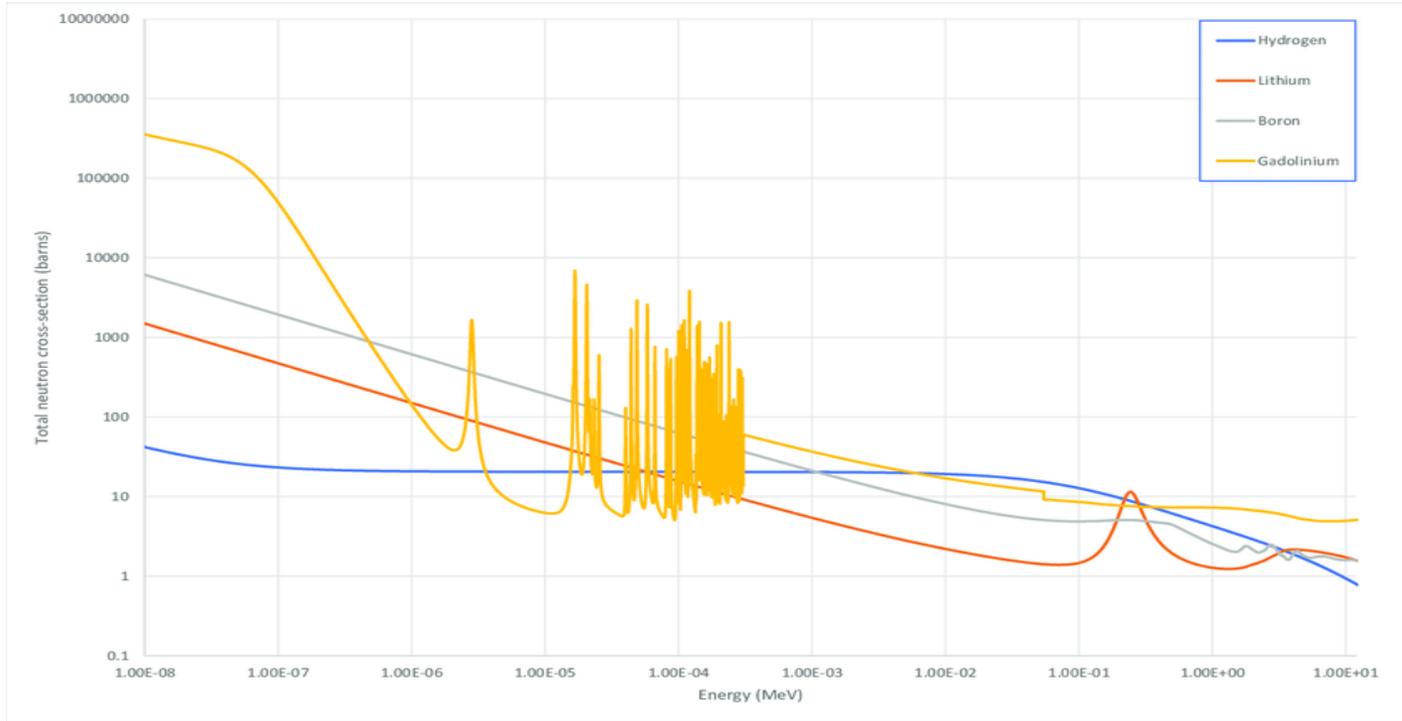
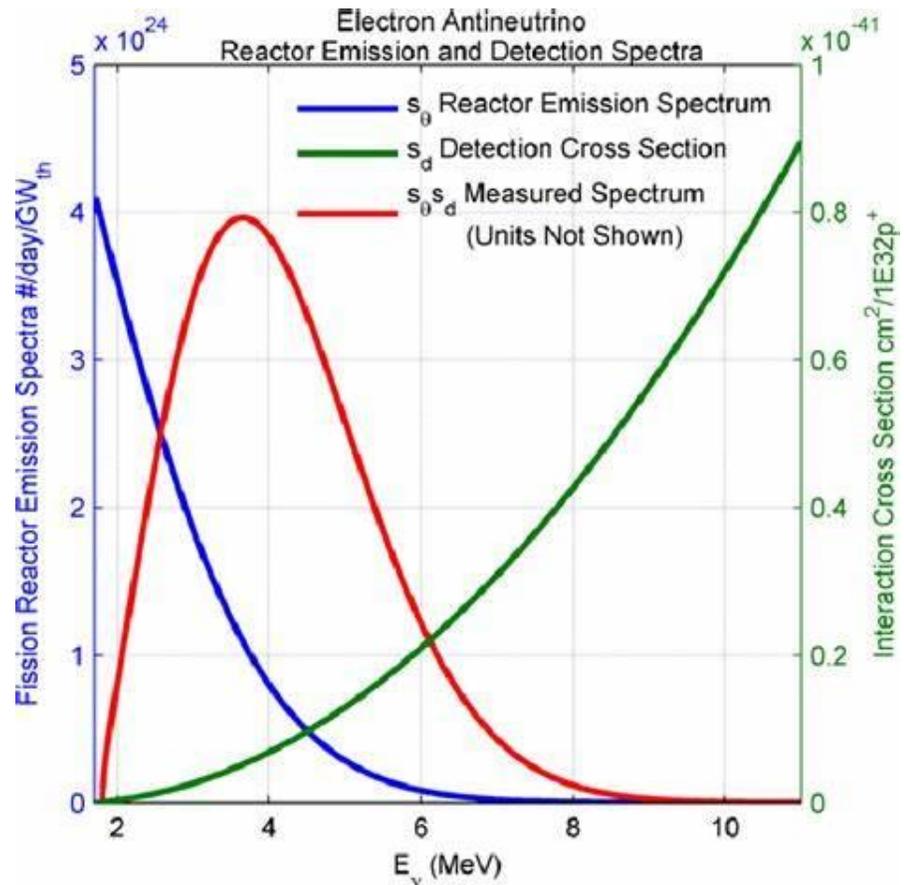
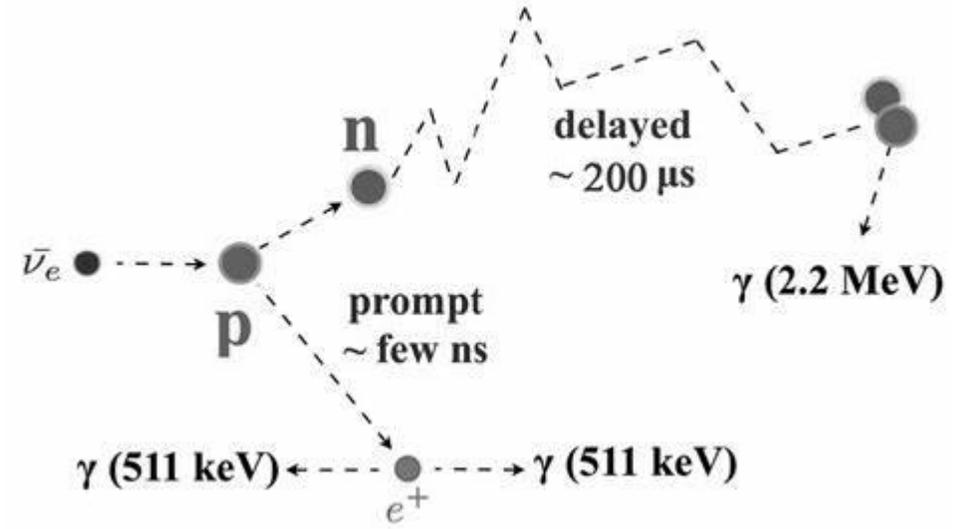
❄ 研究课题：反应堆中微子能谱预期

fission process in a nuclear reactor



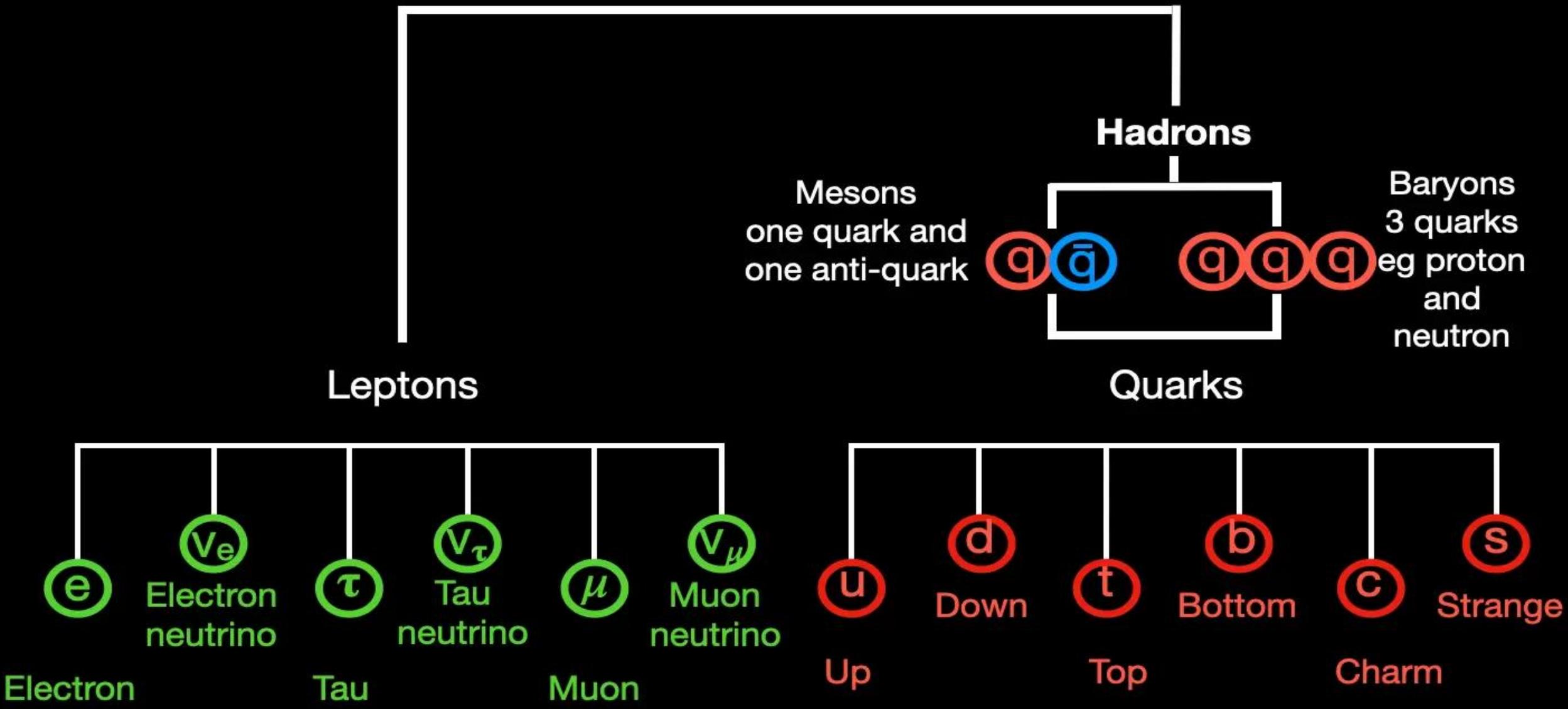
- 反应堆中微子流强和能谱反常问题
- 模型误差在5%水平，要求：~1%

❄️ 反贝塔衰变: $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$



- ❄ **物理事例**（各中微子源，在探测器内产生的次级产物）
- ❄ **宇宙线事例及其次级产物**（能量高，产物复杂）
- ❄ **天然放射性事例**（ α , β , γ ）

Fermions



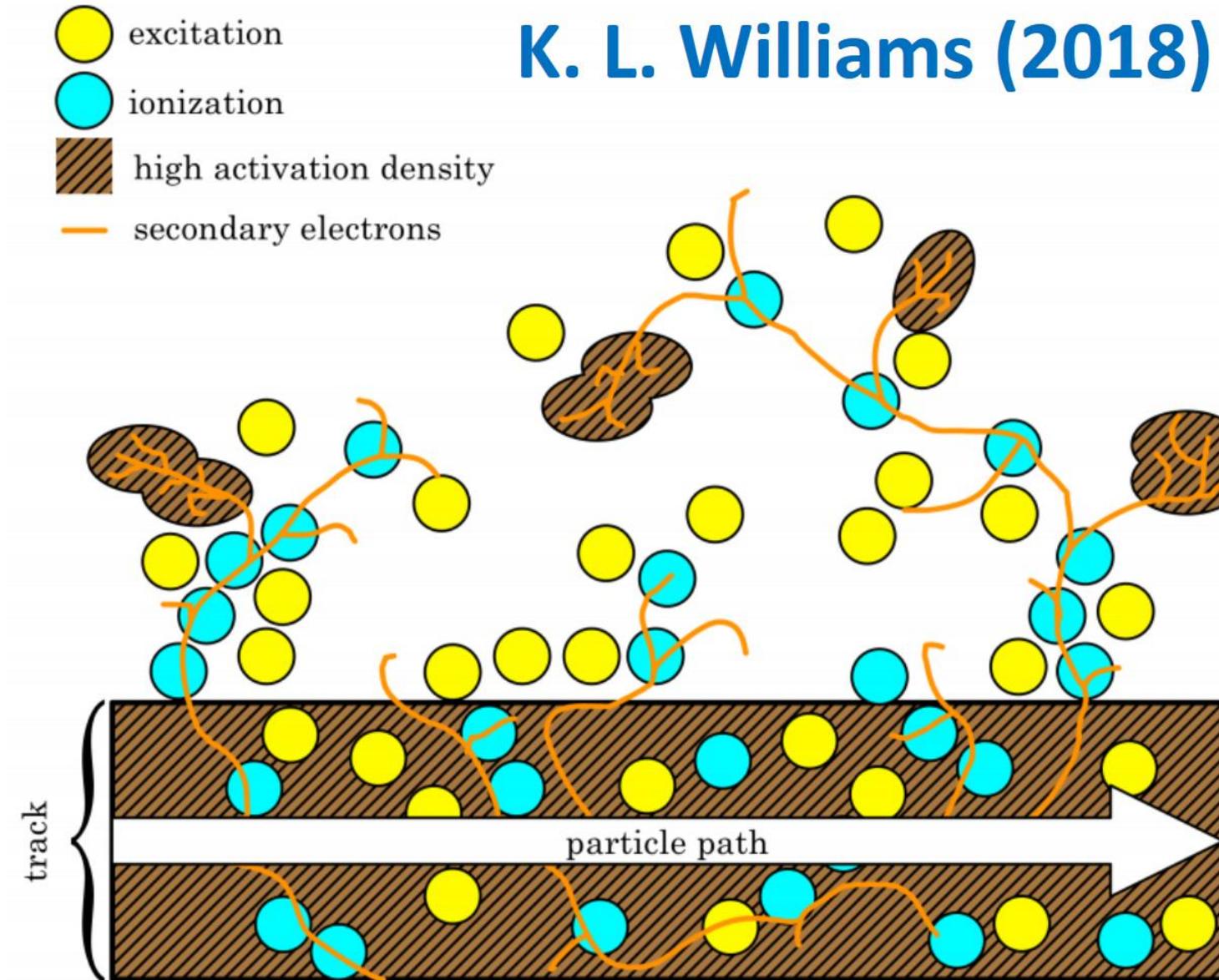
❄ 粒子与探测器物质之间的相互作用

- 依赖于GEANT4、FLUKA等模拟软件包
- 对于一些物理过程的处理还有待提高

❄ JUNO液体闪烁体：LAB + PPO (2.5 g/L) + bisMSB (3 mg/L)

❄ 粒子在探测器内沉积能量 → 液体闪烁体发光

❄ 以IBD反应为例：中微子能量 \propto 正电子能量 \propto 产生的光子数目



只有部分能量转换为光子 ---- 淬灭效应

我也没完全理解清楚，是一个前沿课题!

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}}$$

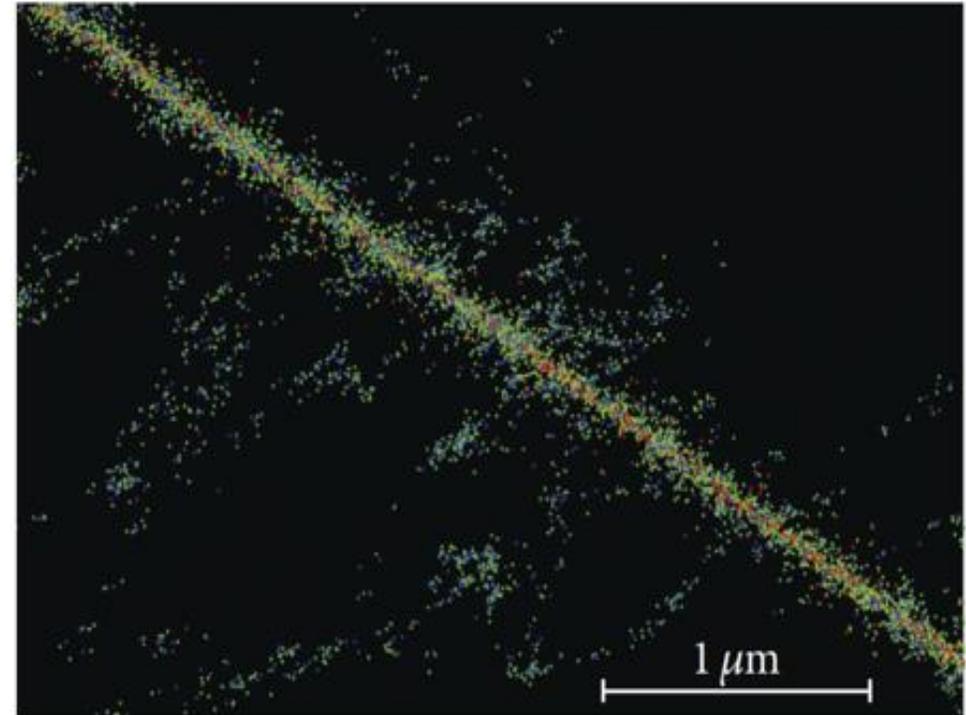
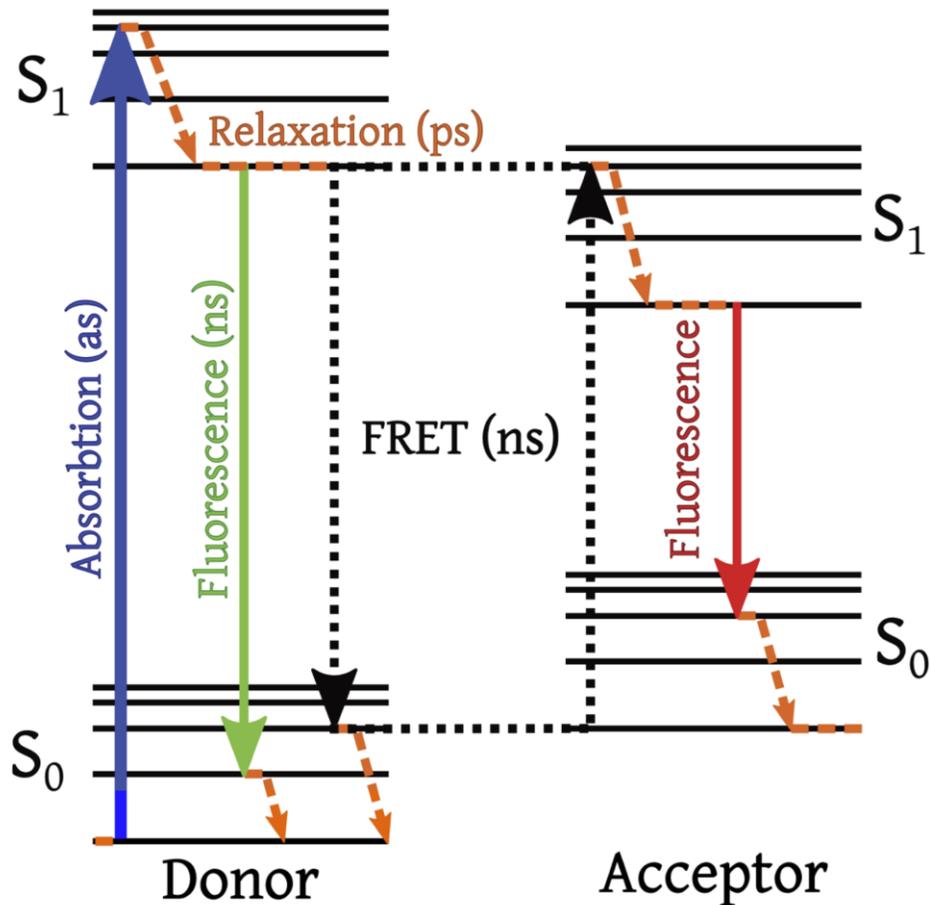
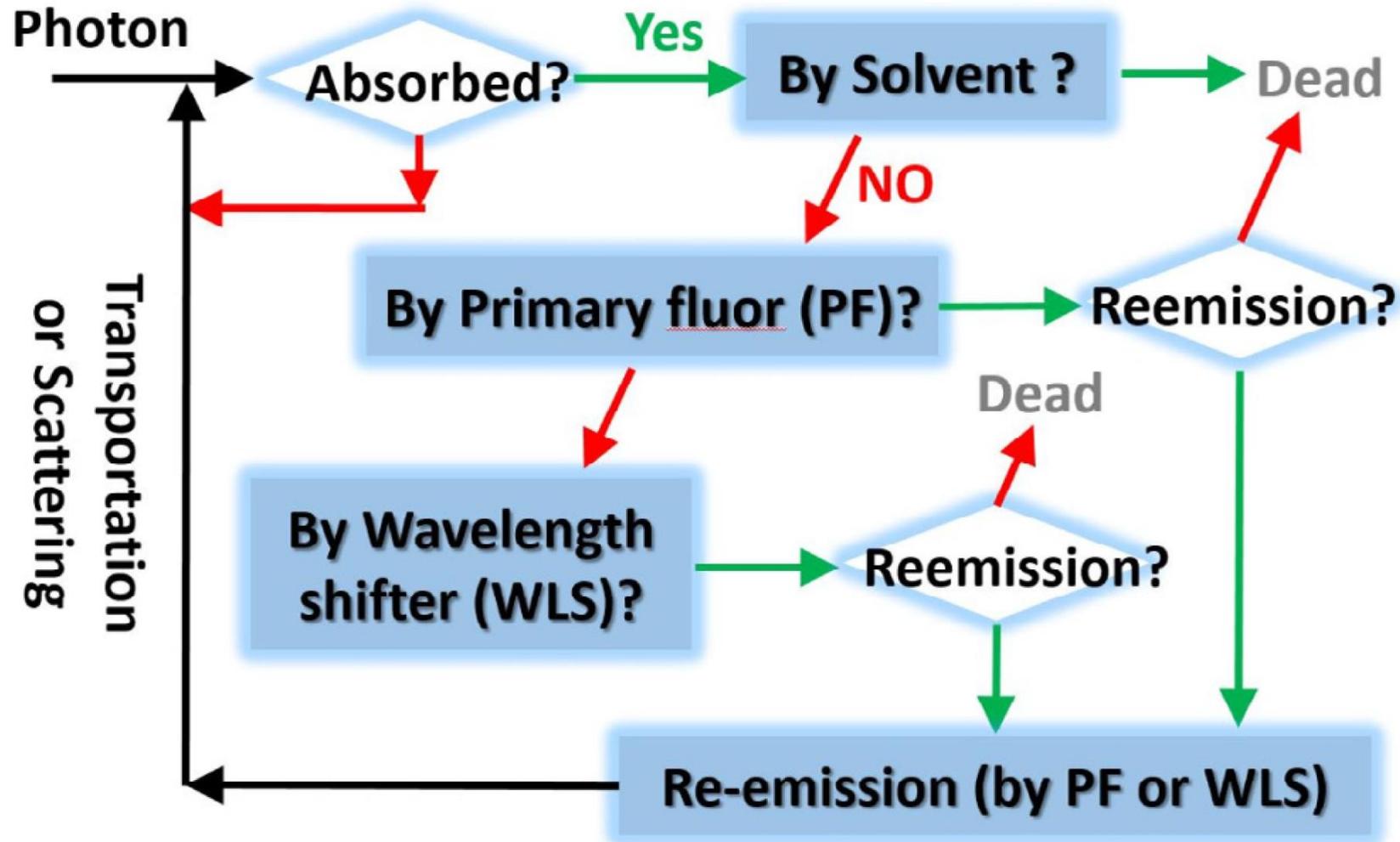


FIGURE 1: The track structure of a single proton in water. Simulated using RITRACKS. Red: proton ionisation, green: electron ionisation, and blue: hydroxyl radicals.

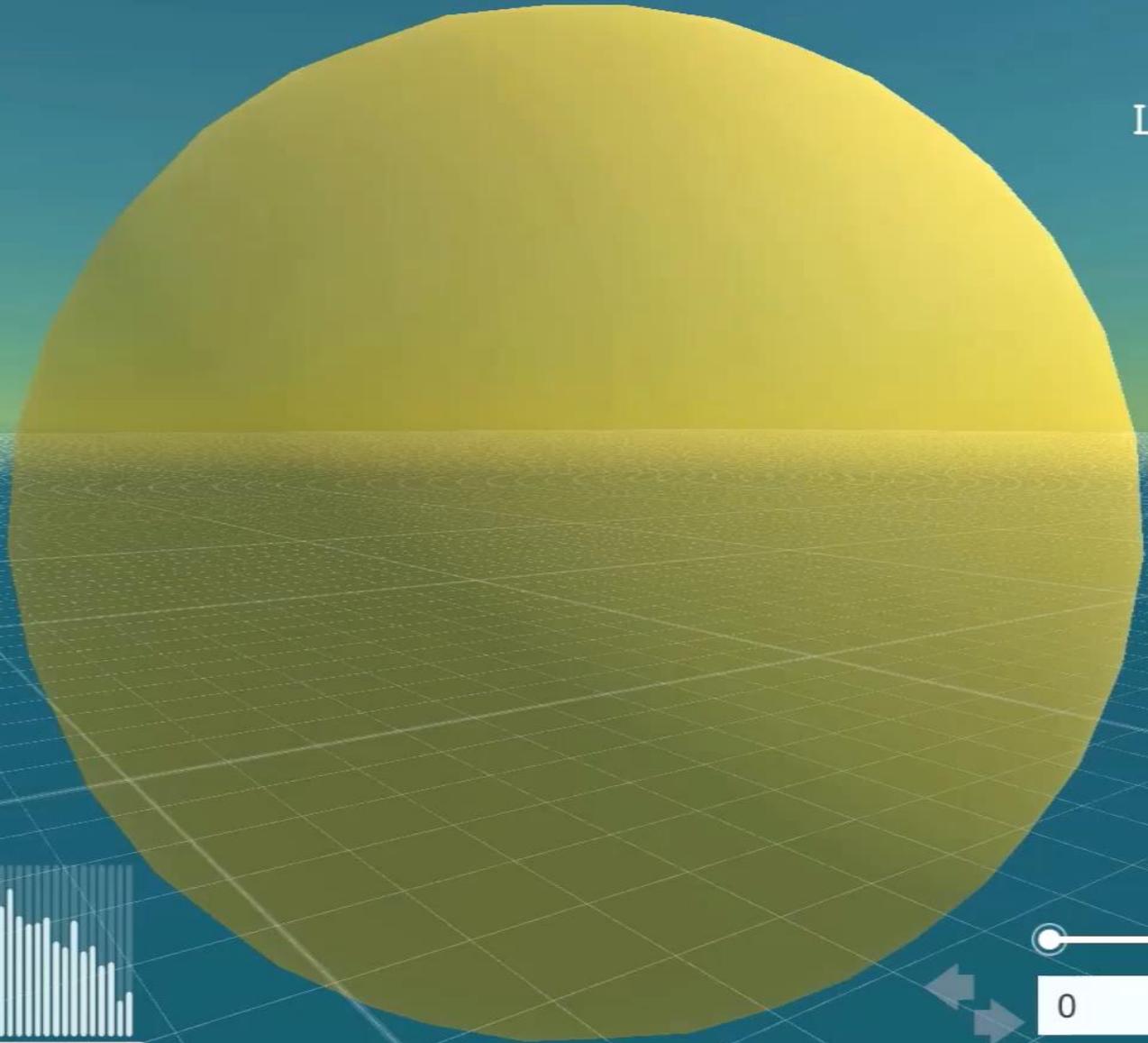
NIM, A 967 (2020) 163860

研究课题：液闪发光机制和淬灭机制，
以及液闪光学模型



Current displayed event: NO.0
Sum of all the PMT hits: 10212
maximum of hit time: 117953 ns

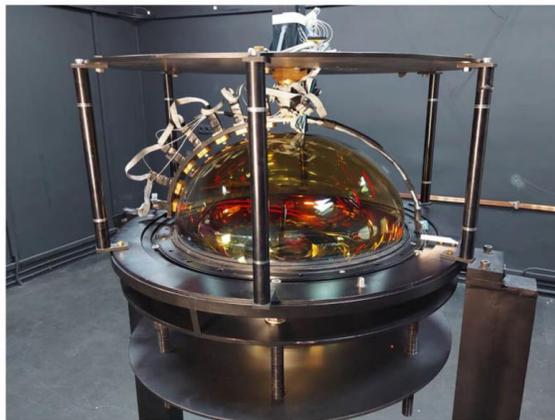
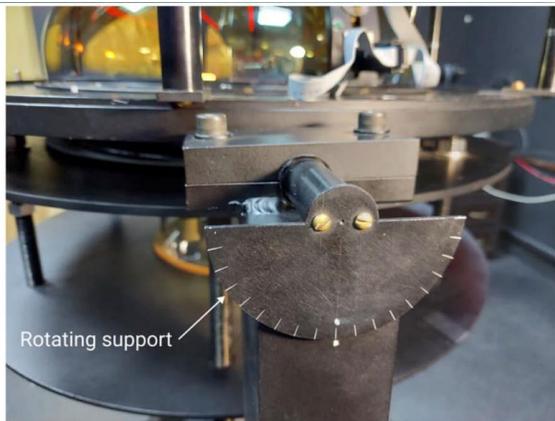
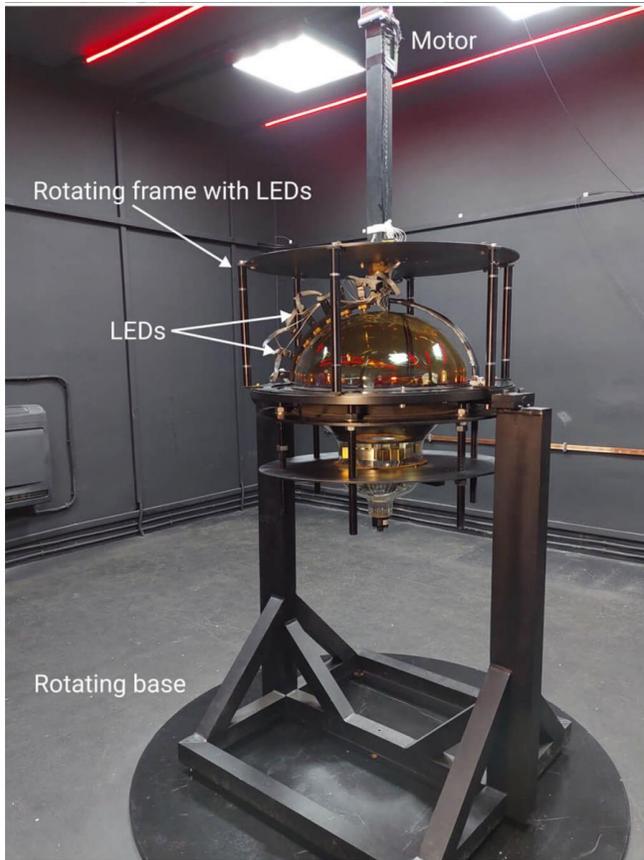
PMT
ID 9822
Located in (-8.68,1.77,-17.37)
Obtained 2 photons



0.3 / 200 ns

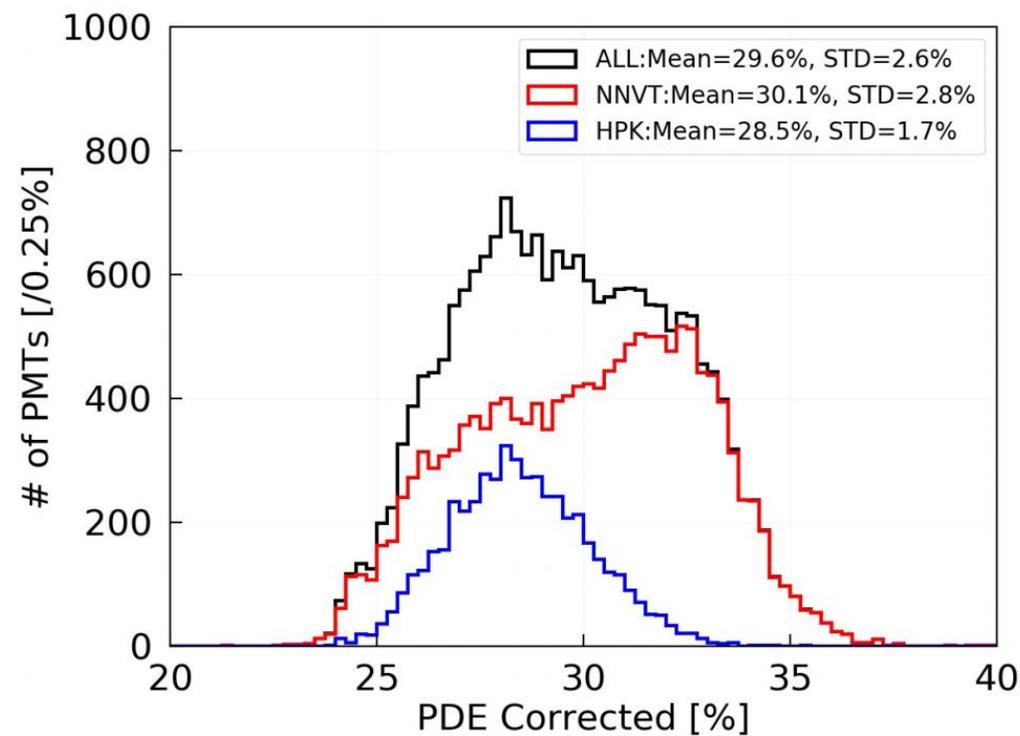
0

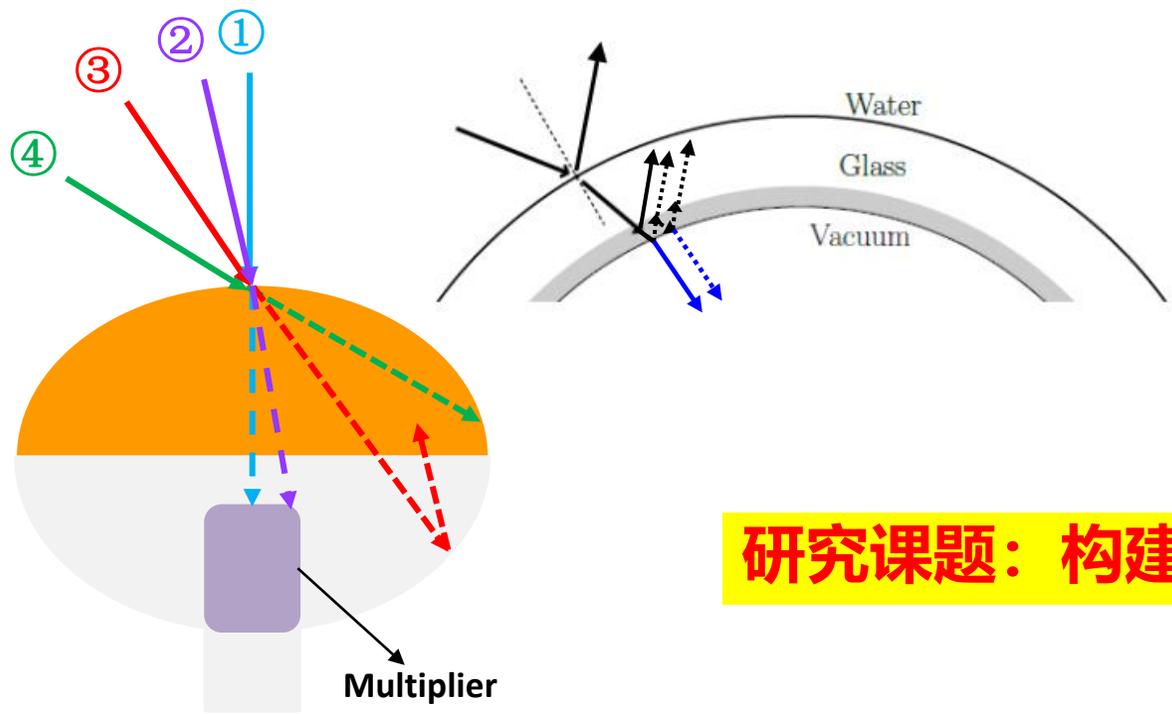
Draw Hit



❄ 光子是否能够被探测取决于PMT的**探测效率 (PDE, 包括QE和CE)**

❄ PDE依赖于**波长**、**入射角**、**入射位置**和**工作介质**

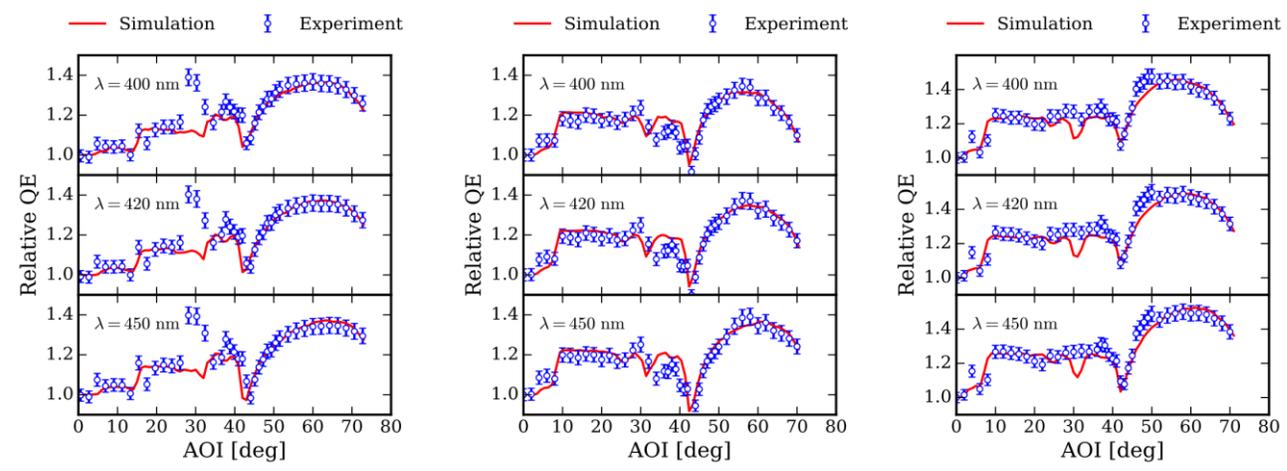




❄️ 光子是否能够被探测取决于PMT的**探测效率 (PDE, 包括QE和CE)**

❄️ PDE依赖于**波长、入射角、入射位置和工作介质**

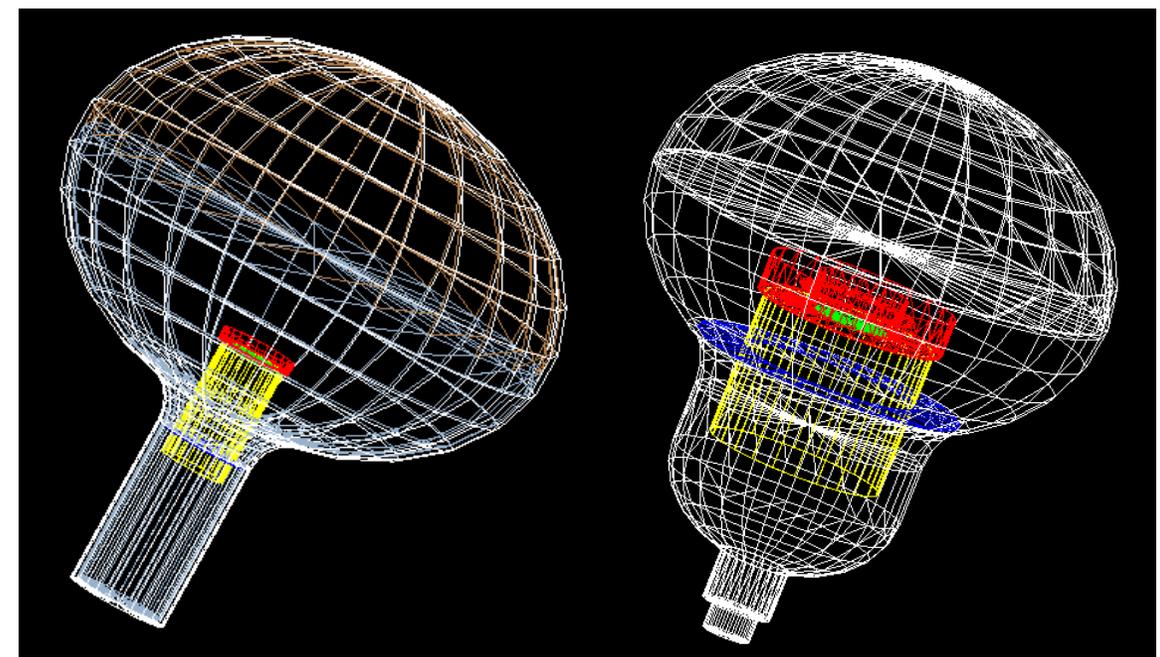
研究课题：构建PMT光学响应模型



(a) Hamamatsu PMT

(b) NNVT high-QE PMT

(c) NNVT normal-QE PMT



光子 → 光电子 → 电信号

❄ 光子 → 光电子：光电效应

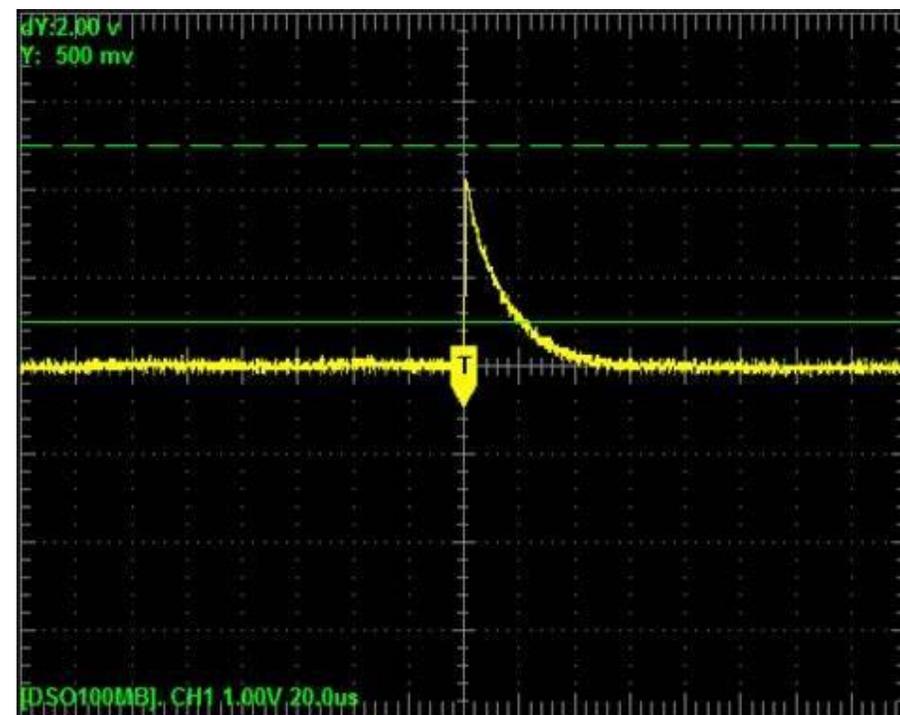
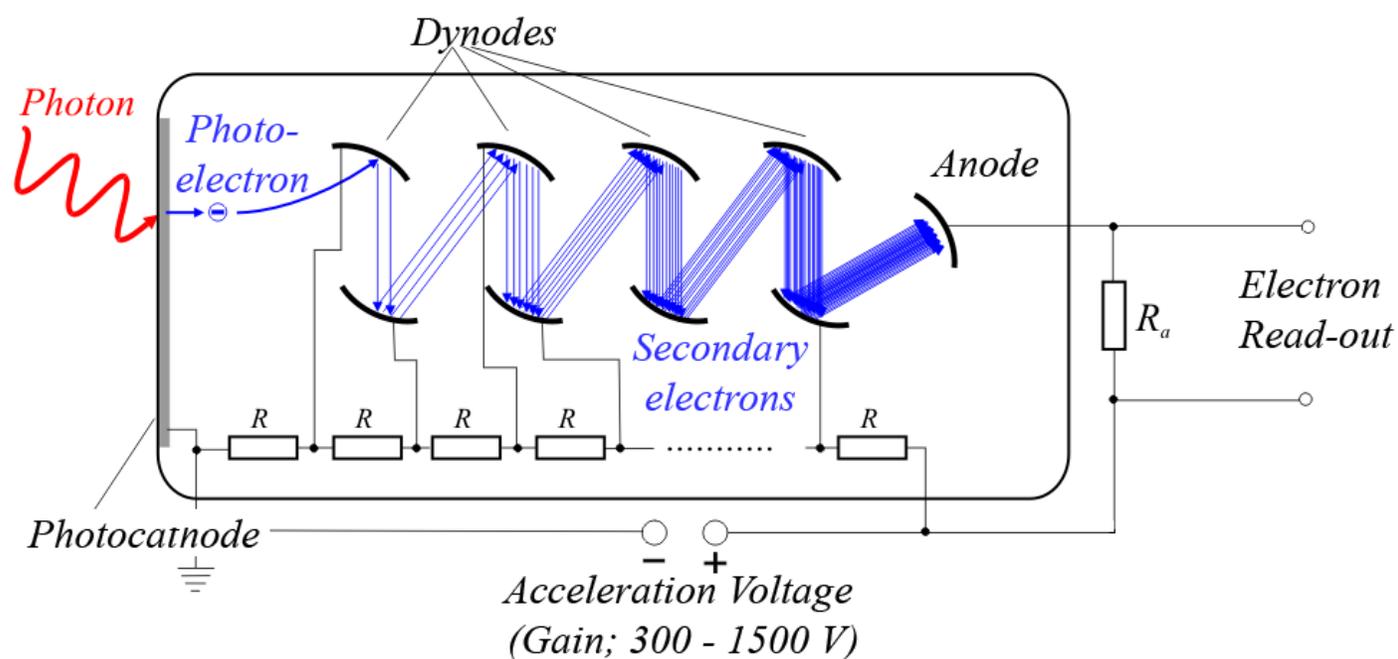
❄ 光电子 → 电信号

➤ PMT内通过打拿极或MCP实现电子放大

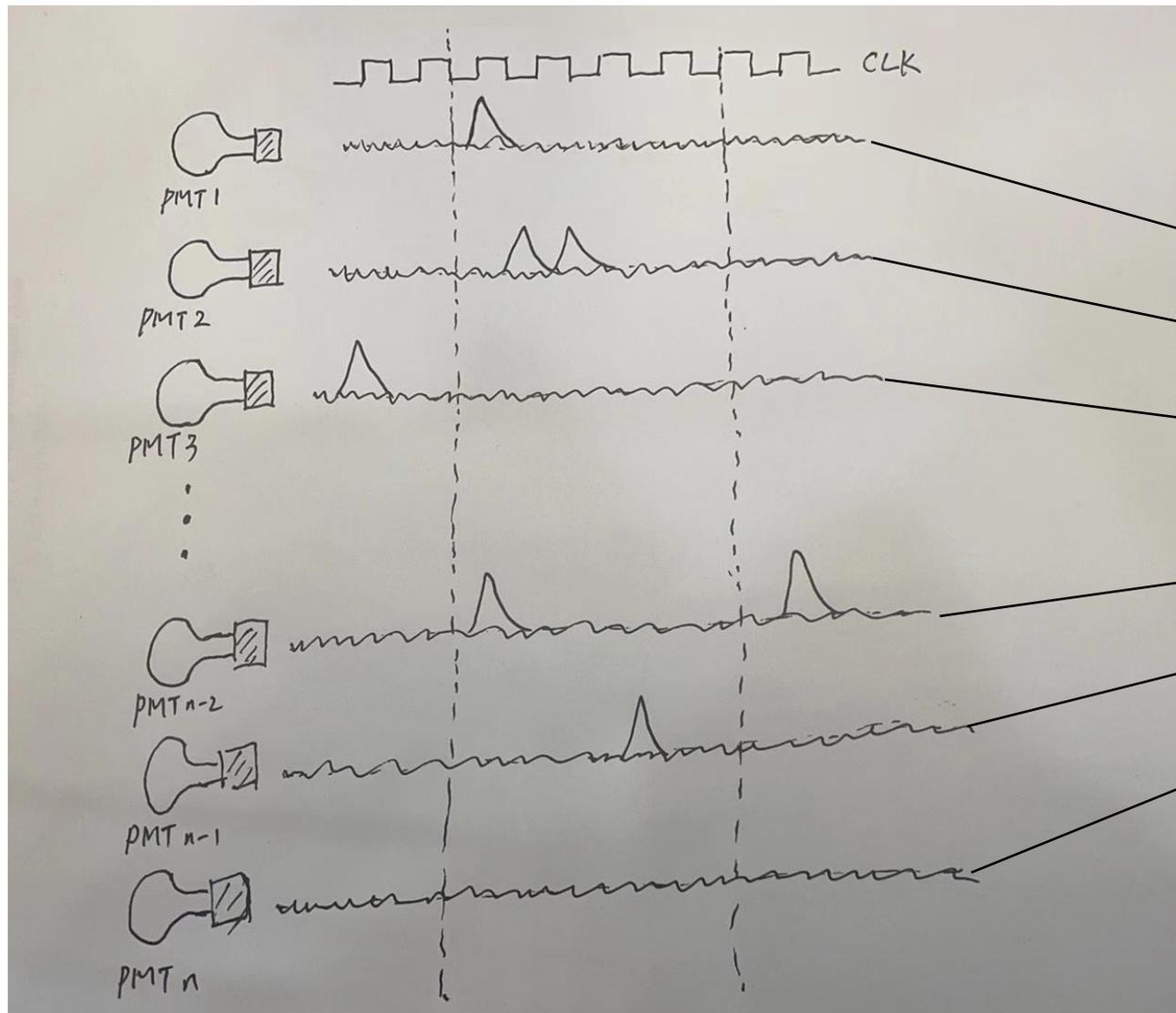
❄ PMT和电子学响应

➤ PMT：暗噪声、前脉冲/后脉冲、增益、单光电子响应波形等

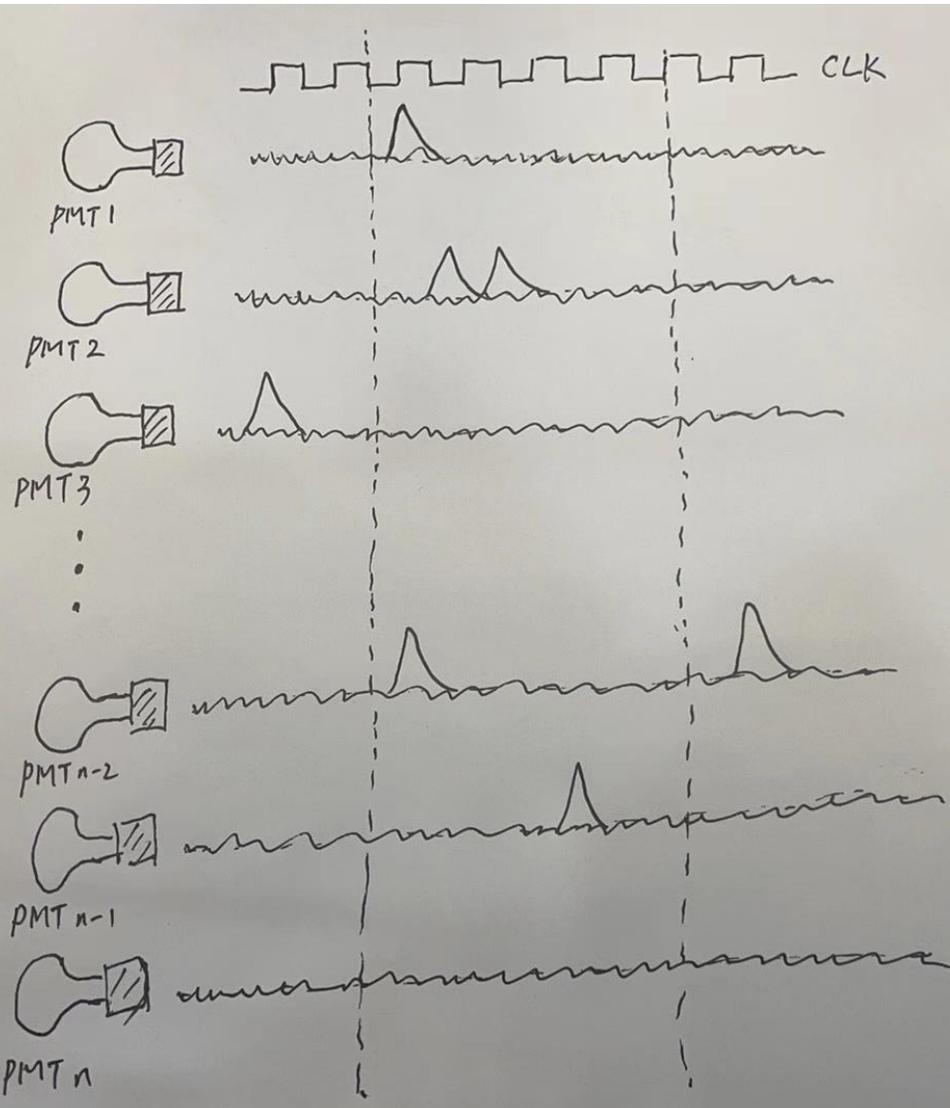
➤ 电子学：噪声、非线性、饱和效应、数字化和触发逻辑等



研究课题：电子学系统模拟仿真



Raw Data



❄️ 击中 (Hit) 级别刻度

- 原始电子学信息 (ADC、TDC) → 光电子个数、每个光电子时间
- 每个PMT的关键参数 (DCR, 增益, 时间等)
- 液闪关键参数 (发光时间、衰减长度等)

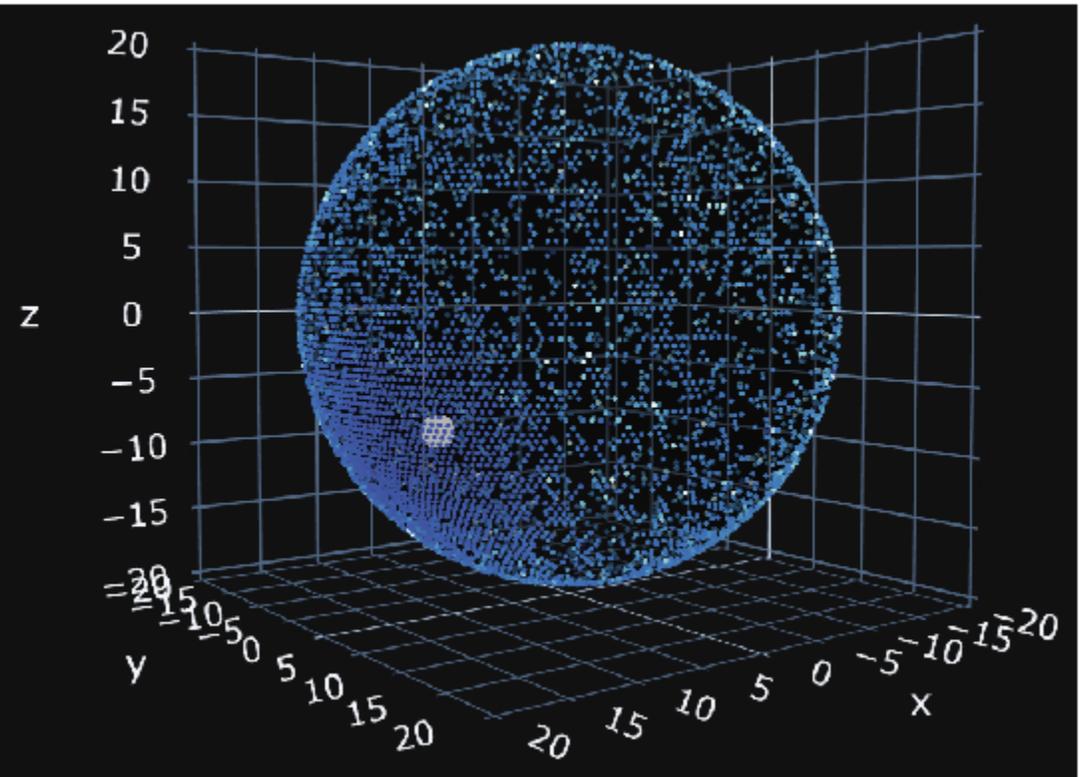
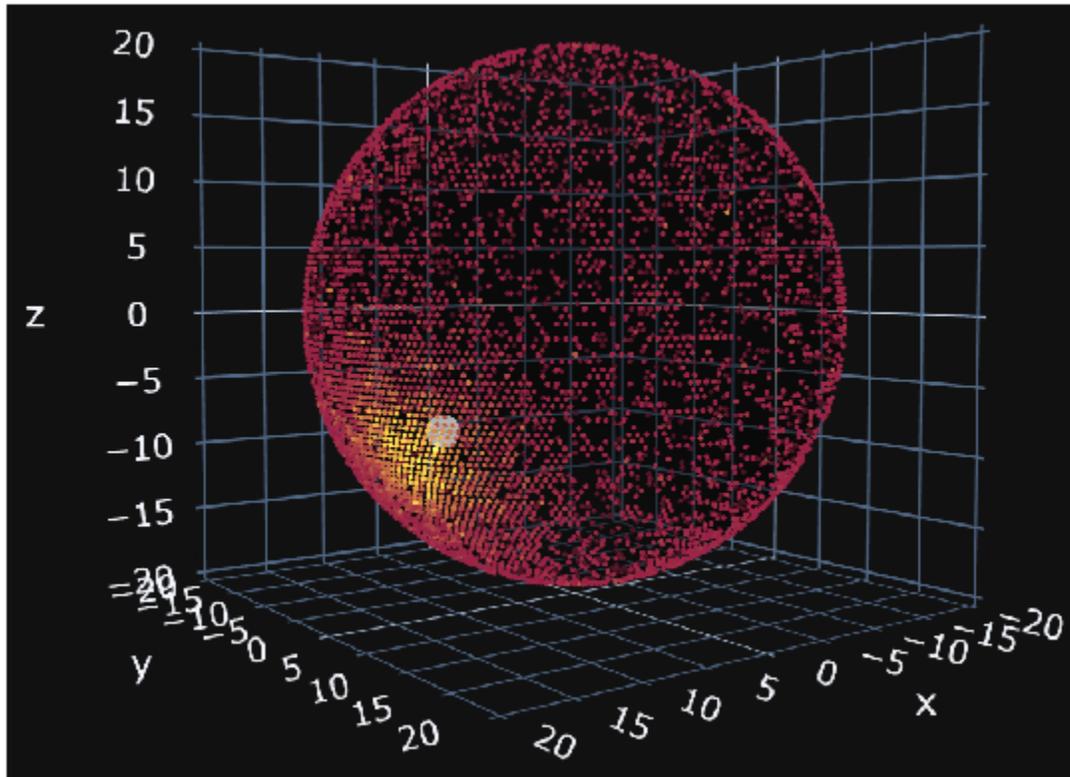
❄️ 事例级别刻度

- 能量标度和能量非线性等

❄️ 实验数据和模拟数据都要进行刻度

❄️ 刻度参数数据库管理

❄ 基于刻度算法的输出信息（光电子数、时间等）重建相互作用末态粒子的**能量、位置、方向和种类**等



❄ **事例挑选** → **基于重建输出，从海量本底 (~kHz) 中挑选物理信号**

➤ **事例选择条件优化** → **探测器模拟**

➤ **挑选后的样本：信号 + 本底**

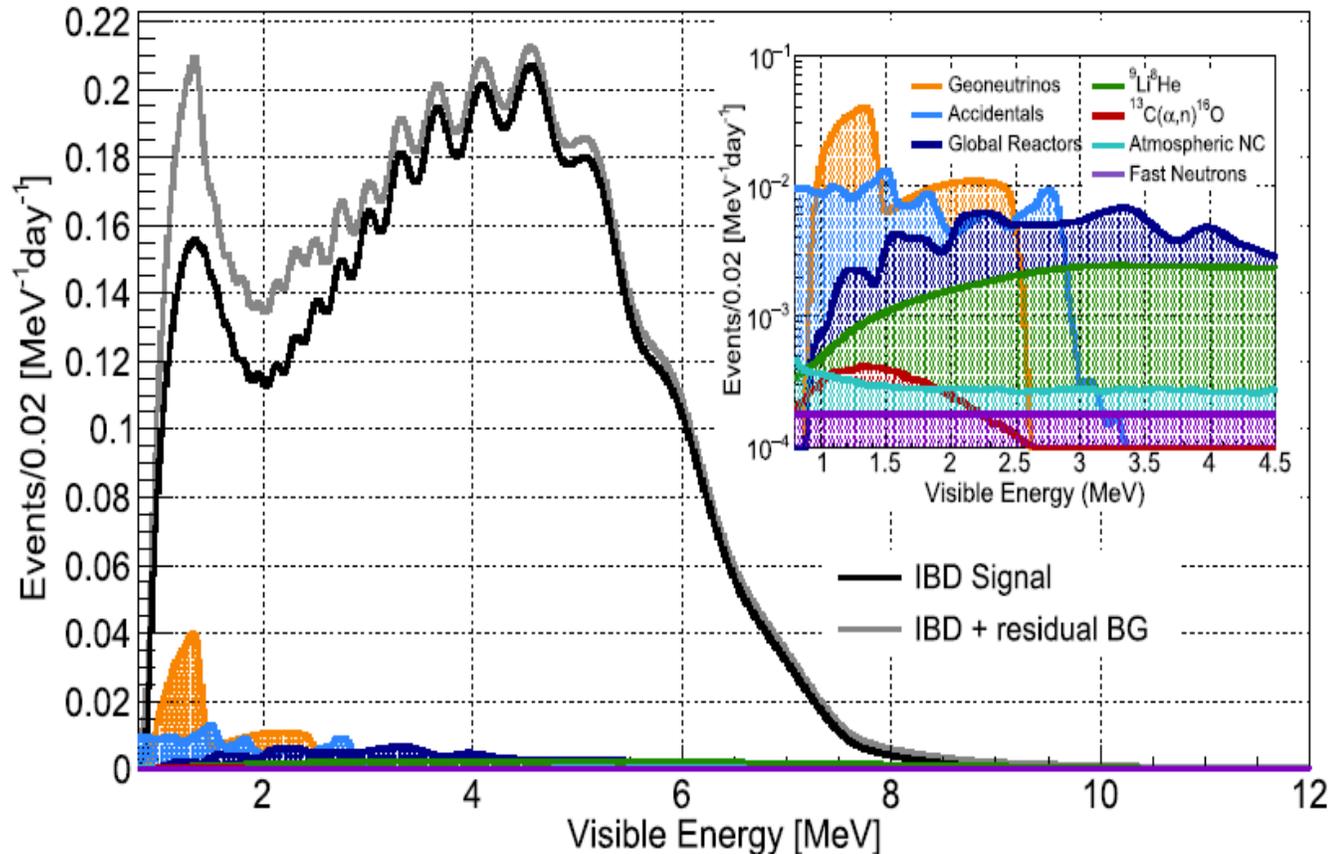
❄ **本底分析 (能谱, 事例率)**

➤ **探测器模拟**

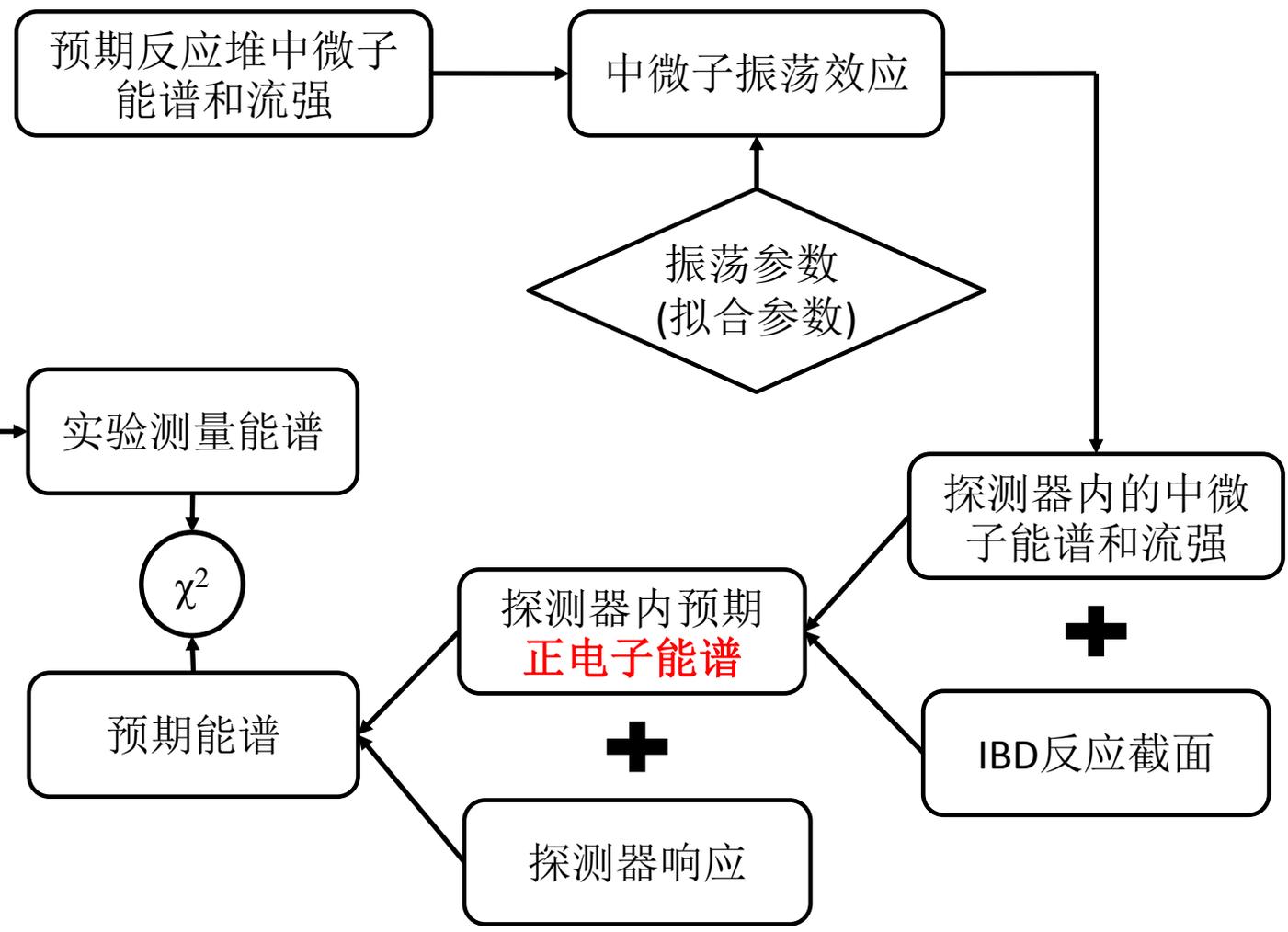
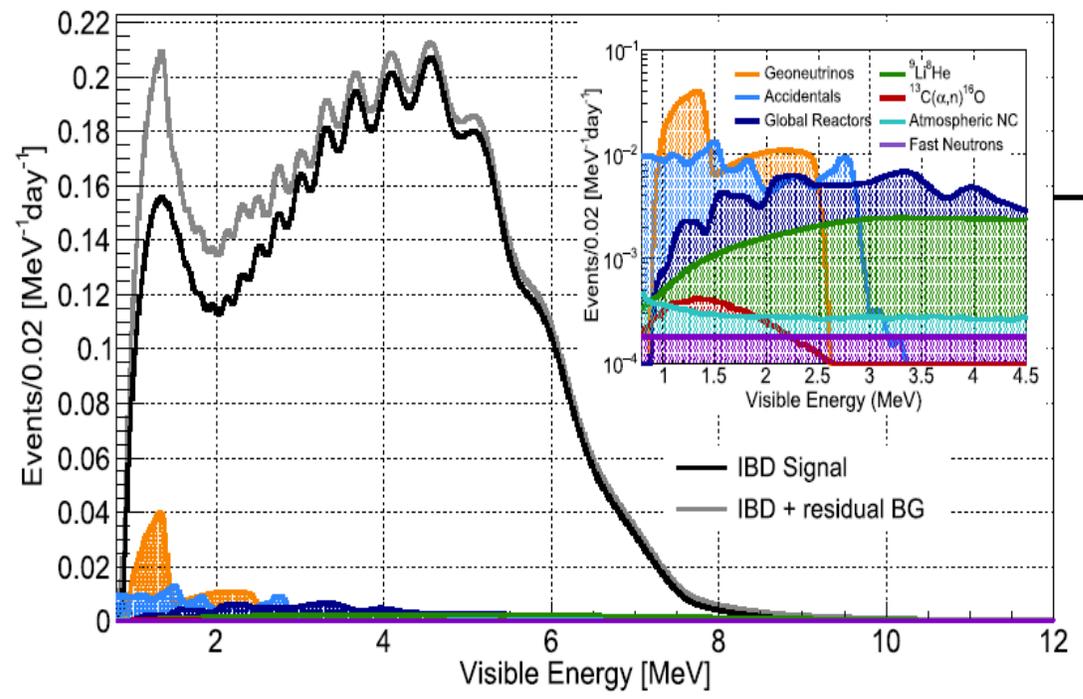
➤ **Data-driven方法**

❄ **物理事例选择效率**

➤ **探测器模拟**

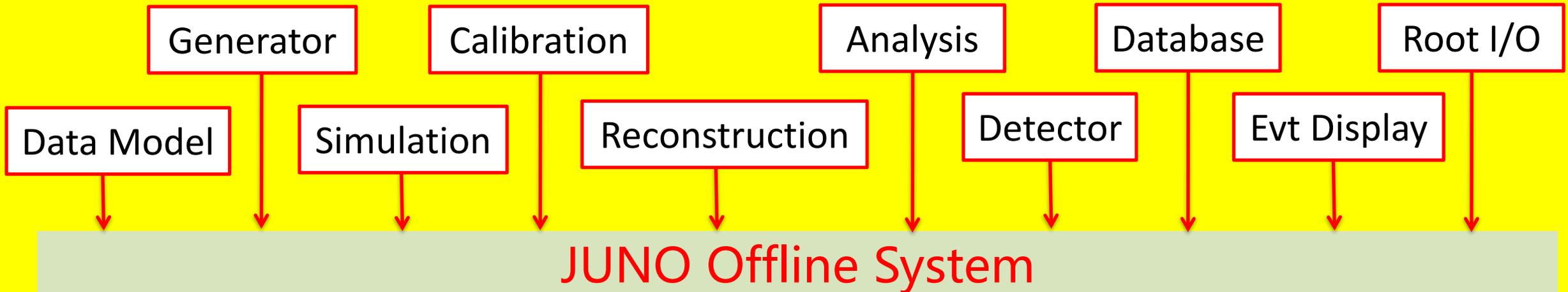
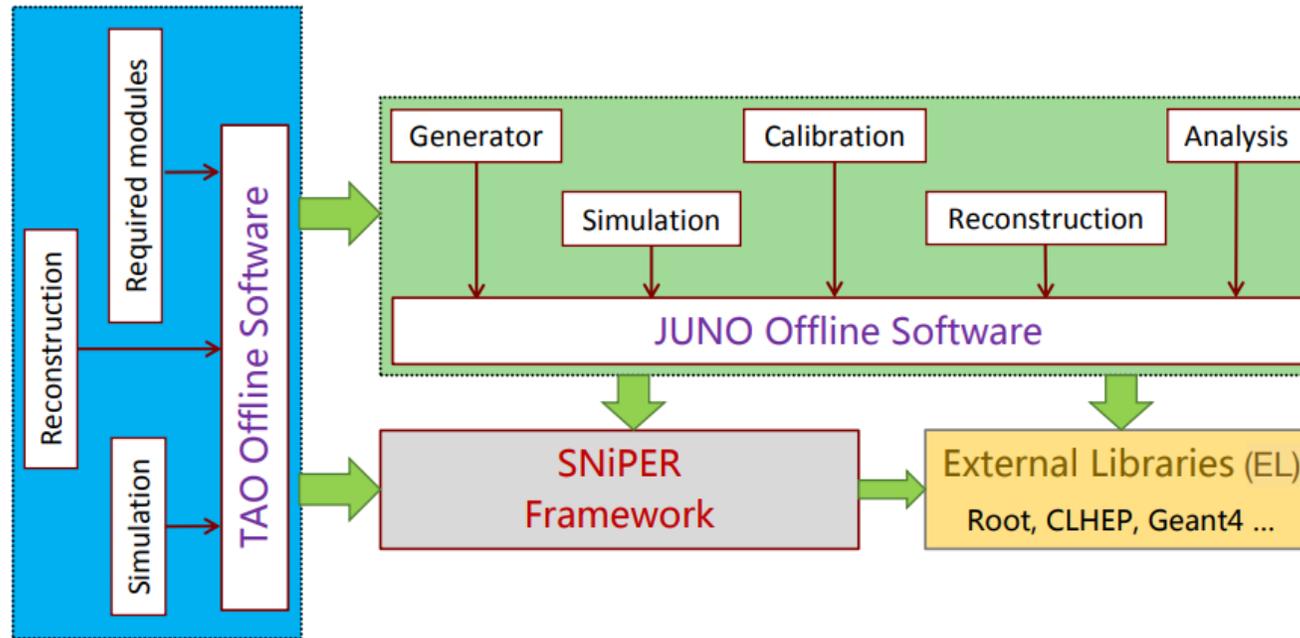


以反应堆中微子为例:



- ❄ **每种软件模块都是必不可少的!**
- ❄ **所有软件联合在一起才能搭建一个完整的、通往成功的梯子!**





Introduction of **SNiPER**

(**Software for Non-collider Physics ExpeRiment**)

❄ Usually, an offline software system includes:

- Generator
- Simulation
- Calibration
- Reconstruction
- Physics analysis
- Detector geometry
- Validation
- Event display

1) How to implement these modules “independently”?
2) How to transit event data from one module to another?
3) How to handle data I/O for each module?
4) How to access detector geometry, database, etc in a consistent way?
... ..

❄ Data processing

- Data model
- Data I/O

A framework can answer all above questions!
Nearly all HEP experiments are using a offline framework to avoid duplication work.

❄ Database (calibration constants, parameters, ...)

❄

❄ Start from Daya Bay offline software

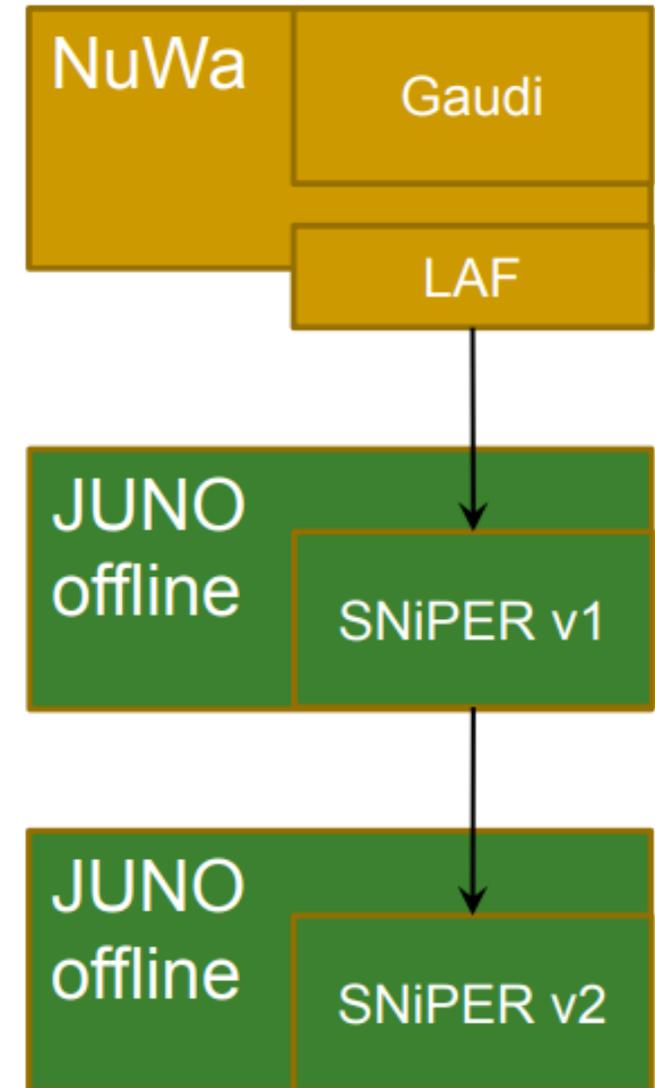
- **NuWa**: based on Gaudi (originally from LHCb)
- **LAF**: a **L**ightweight **A**nalysis **F**ramework (~ 2012)
 - A standalone package in NuWa, used for data analysis
 - Borrowed some basic concepts from Gaudi, but much more simplified

❄ SNIKER designed for JUNO

- Well handling to time correlation between events, such as IBDs
- v1 is mainly inherited from LAF
- v2 is extended for specific requirements of JUNO

❄ Developed by IHEP and Shandong University

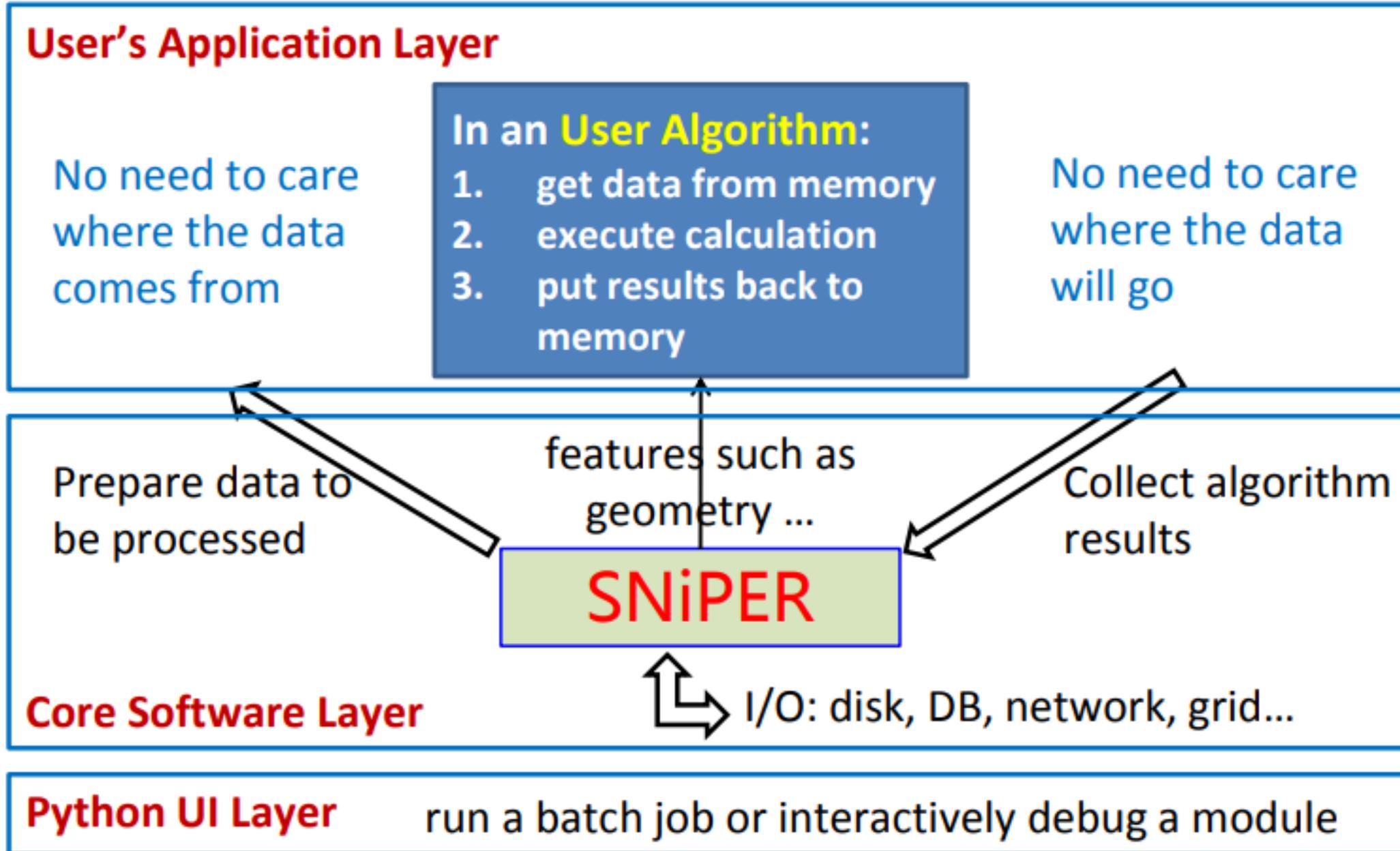
❄ Currently used in JUNO, LHAASO and nEXO



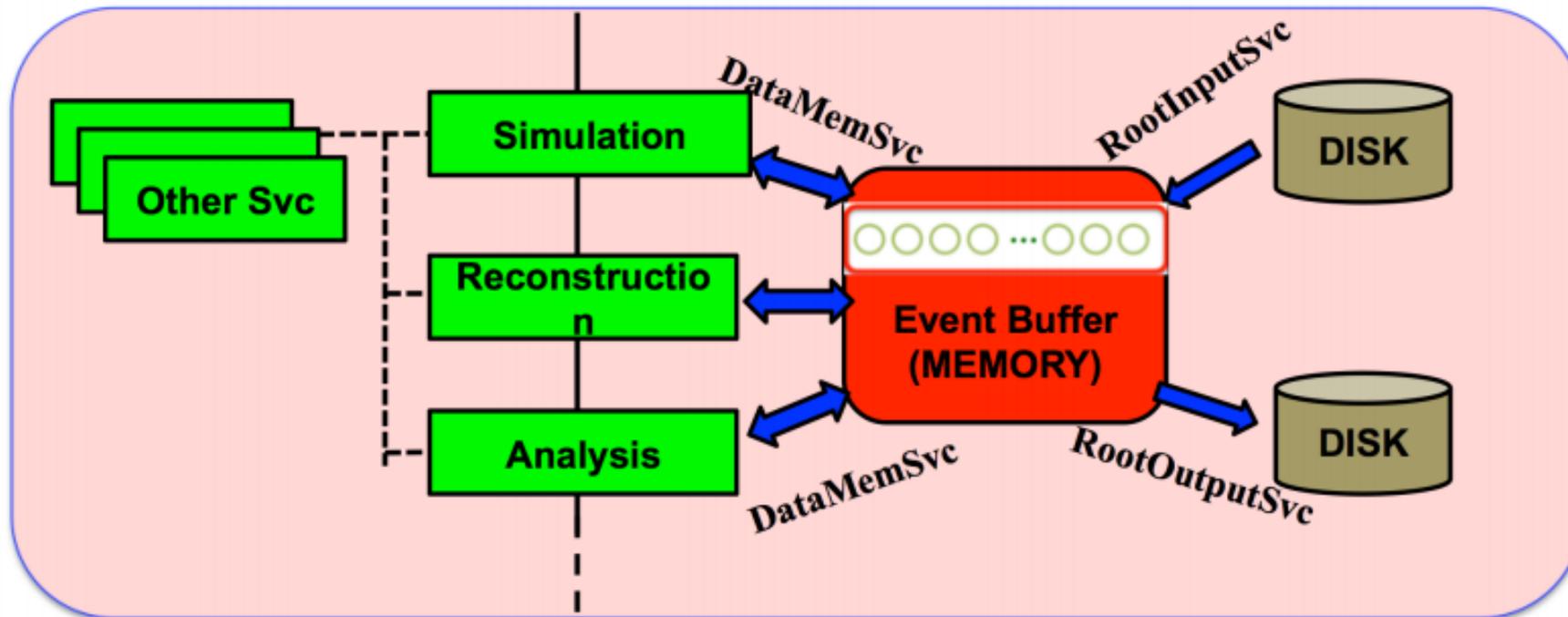
- ❄ **Programming language: C++ and Python**
 - A common feature in HEP field, ROOT/Geant4/...
- ❄ **Job configuration: Python**
- ❄ **Source code build: CMake ^[1]**
 - Help to compile packages easily
 - Help to setup the running environment
- ❄ **Supporting system**
 - Official recommendation: **Centos7 and Almalinux9**
 - Some people also compile successfully on Ubuntu, Debian and Mac OS
- ❄ **Code management (Open source)**
 - Github ^[2]

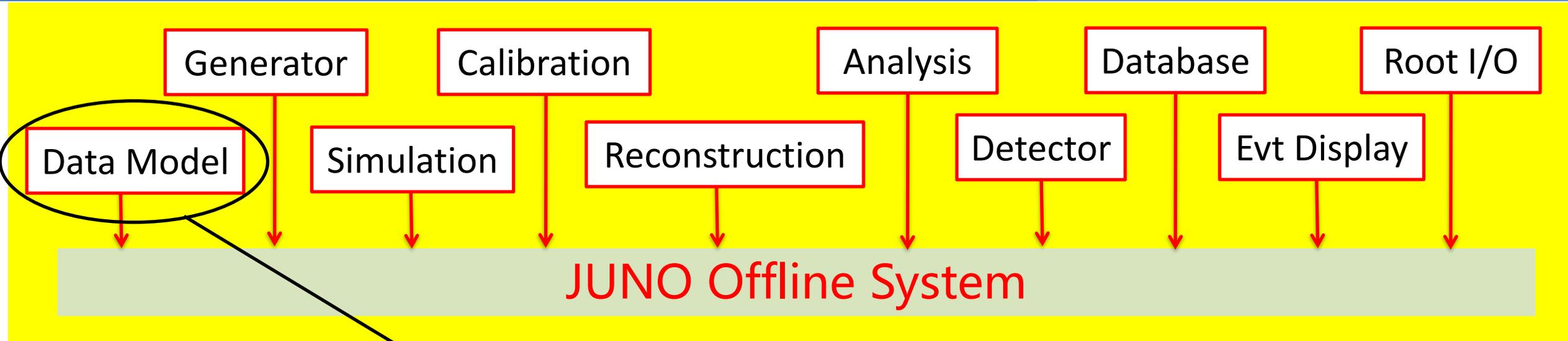
[1] <https://cmake.org/>

[2] <https://github.com/SNIper-Framework>

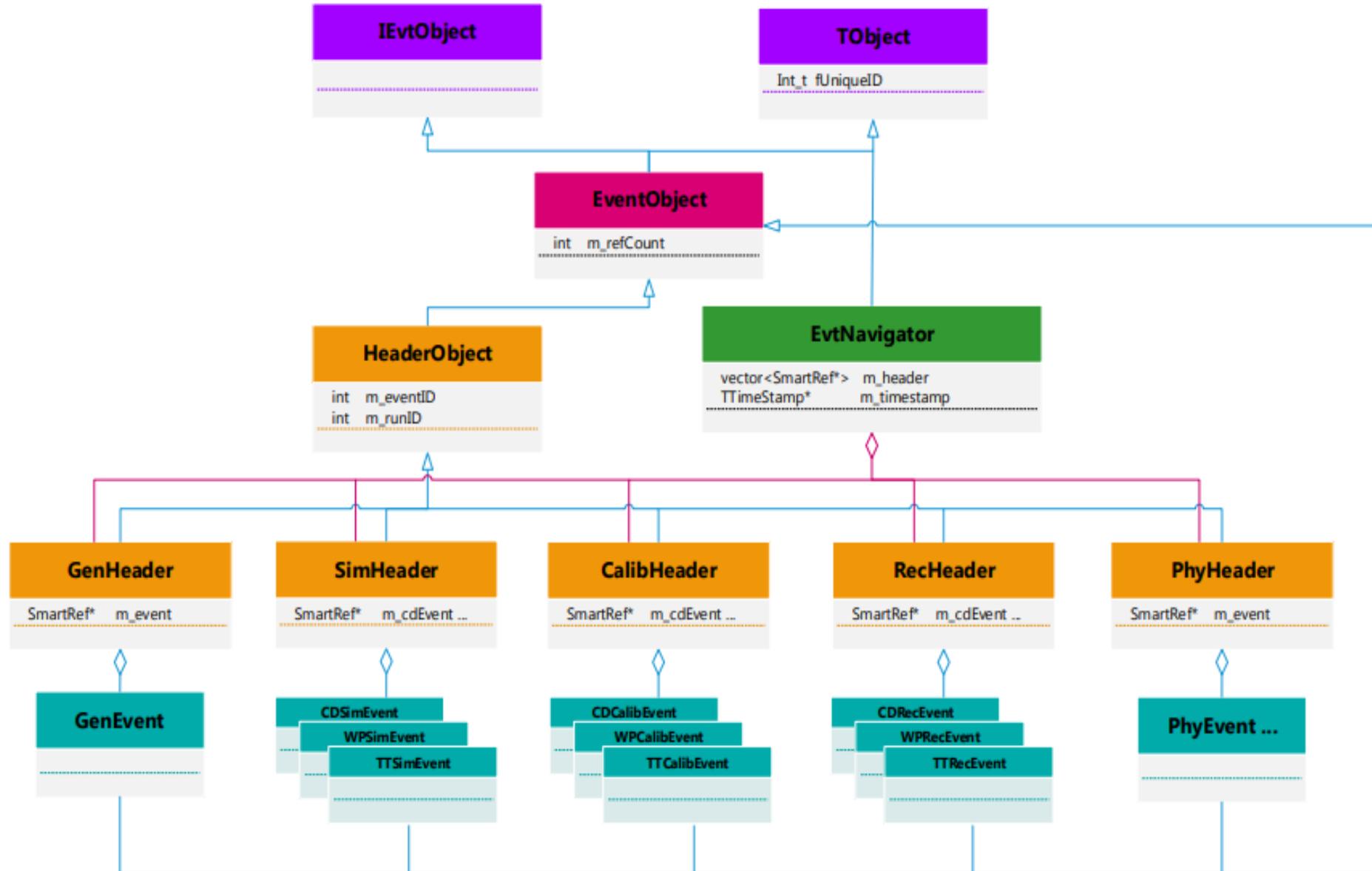


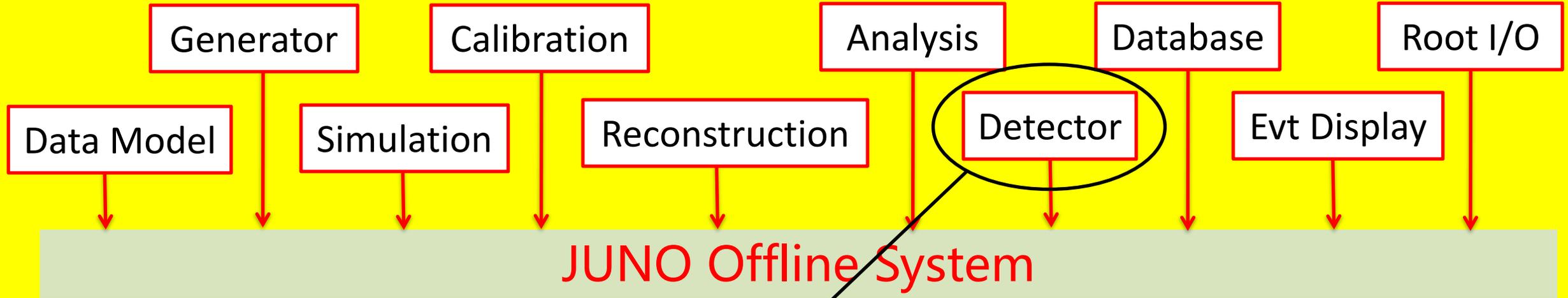
- ❄ It's a memory place allocated dynamically to hold multiple events within certain Time Window.
- ❄ Algorithms get event data from buffer and update them after processing.



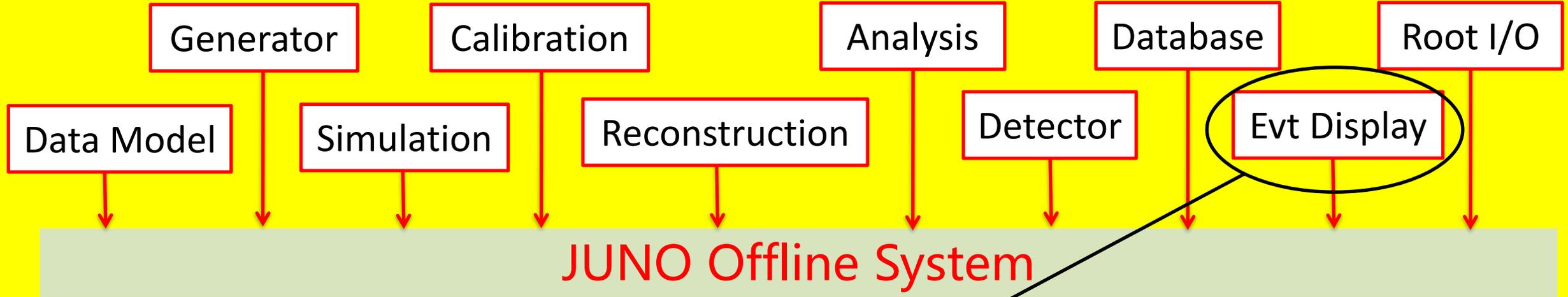


?



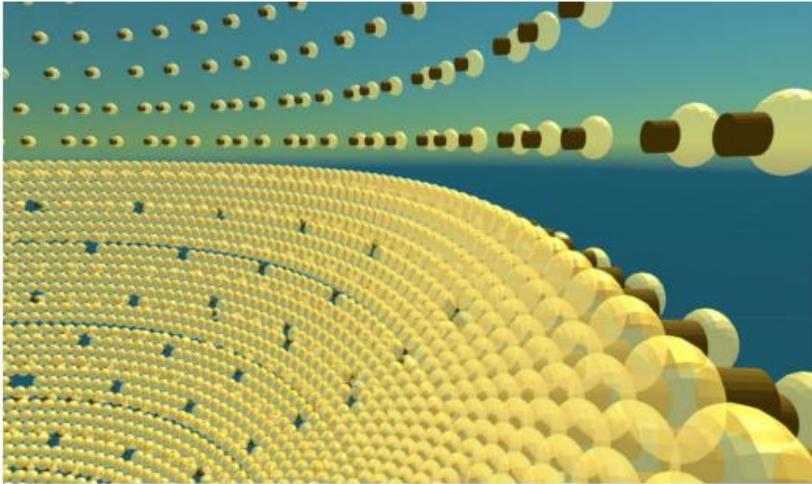


- 实现几何的统一管理，以确保不同软件模块之间的一致性
- 建立硬件系统和软件系统几何编号的对于关系

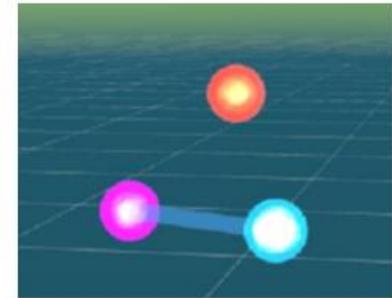
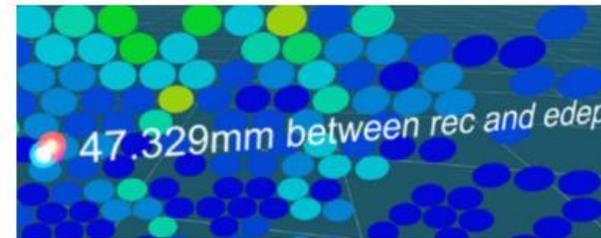


?

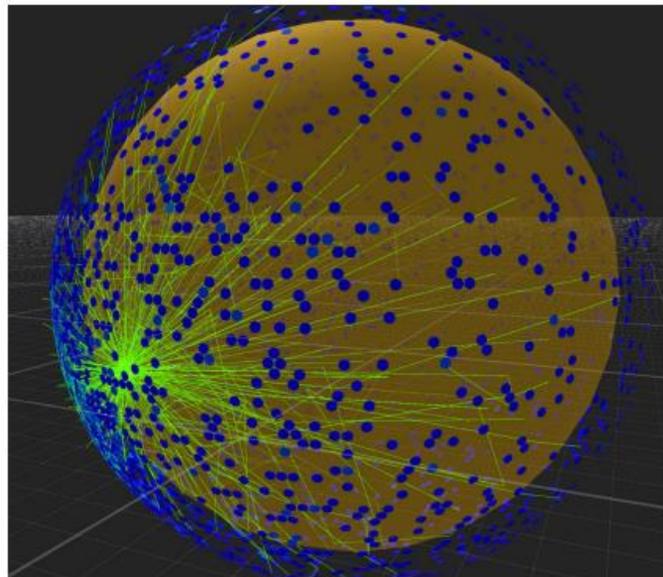
Visualization of the true PMTs



- ✓ **Red point:** particle's initial production vertex.
- ✓ **Blue point:** true energy deposit vertex.
- ✓ **Purple point:** reconstructed vertex



Event hits distribution



2D distribution

