

HUNT实验以及相关物理

高博

中国科学院高能物理研究所

2024年8月10日 昆明

LHAASO暑期学校 2024



- 一、科学动机
- 二、HUNT装置
- 三、项目进度





宇宙线起源是关于宇宙构成之重大科学问题

□ **宇宙线**：是来自外太空的高能带电粒子，如氢、氦、铁等原子核，还包含少量电子。

1912年，由奥地利物理学家**赫斯 (Hess)** 发现了宇宙线。来源至今未完整回答！

宇宙线领域的五枚诺贝尔奖



2002年**美国**国家研究委员会：《联结夸克和宇宙：新世纪11个科学问题》之第6

2007年**欧洲**天体粒子联合会：《未来规划围绕的6个基本问题》之第5

2021年**Science**杂志：《125个科学问题：探索与发现》天文之第10

- 宇宙线最高能量是人造加速器(LHC) 加速最高粒子能量的一千万倍！
- 拍电子伏 (PeV) 及其以上的宇宙线起源仍是未解之谜。

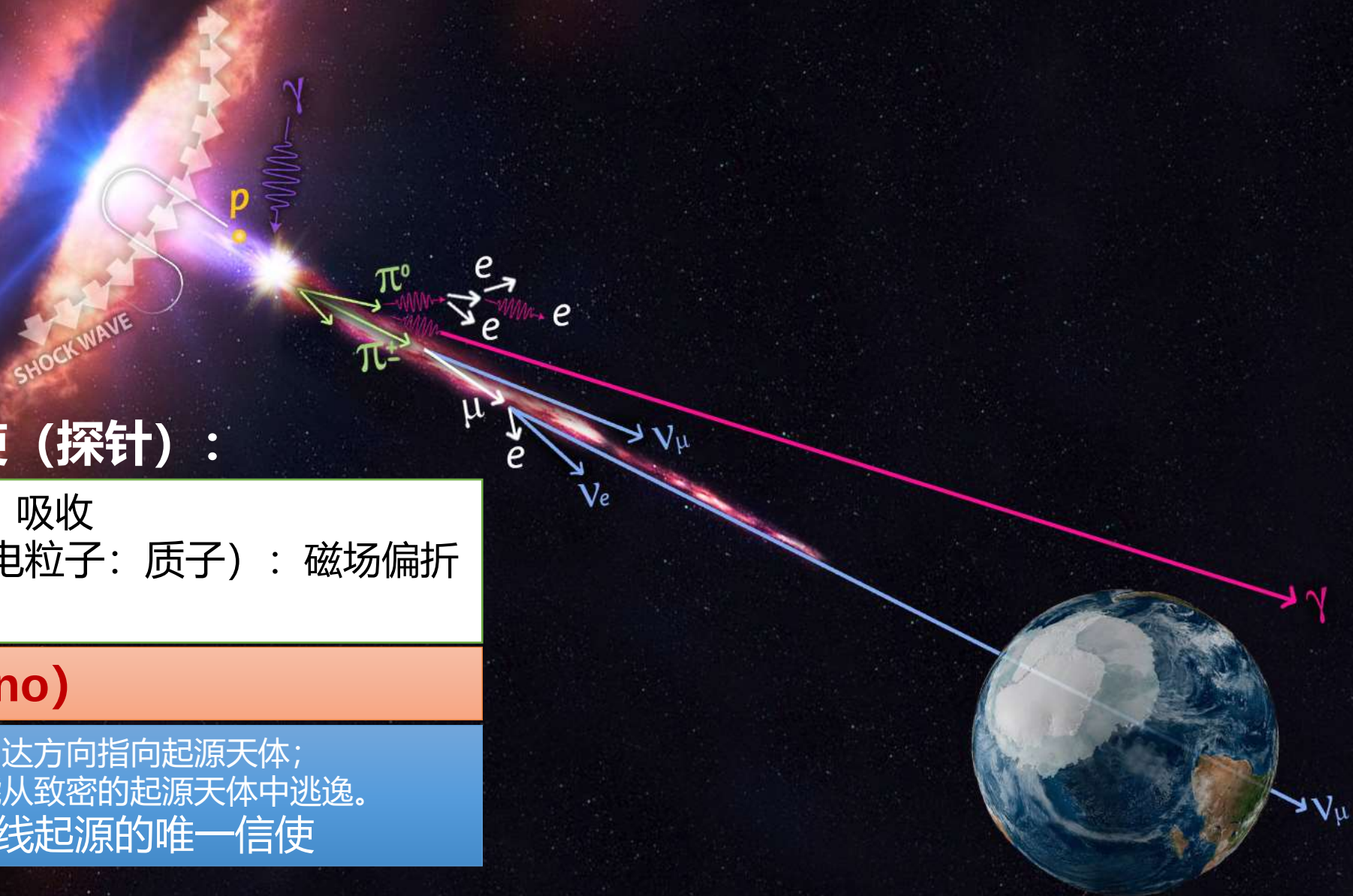
粒子天体物理领域进入多信使观测时代

了解宇宙的四种信使（探针）：

1. 电磁波、伽马射线：吸收
2. 宇宙线（外空的带电粒子：质子）：磁场偏折
3. 引力波：灵敏度

4. 中微子 (Neutrino)

- 电中性，不受磁场影响，到达方向指向起源天体；
 - 与物质作用弱，传播远，能从致密的起源天体中逃逸。
- 几乎成为寻找高能宇宙线起源的唯一信使

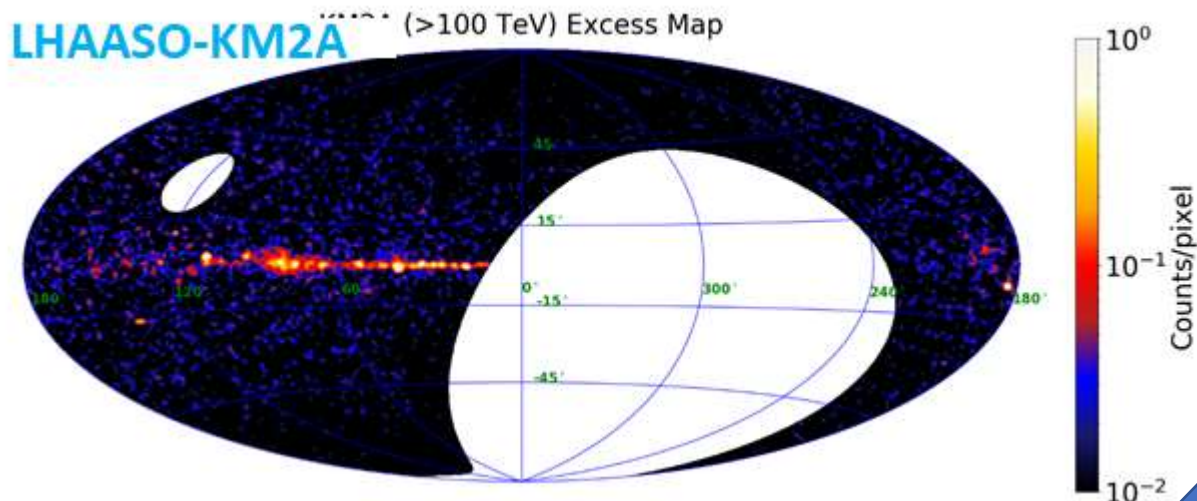




LHAASO发现银河系内有43个超高能射线源

5

1st LHAASO Catalog: 43 UHE gamma ray sources ($>4\sigma$)



PeV光子的两个来源:

一、轻子起源

相对论性电子产生的韧致辐射和
低能光子发生的逆康普顿散射
没有中微子

二、强子起源

PeV能量宇宙线和源区物质、
或光子场相互作用
大量中微子

Main process:

$$p + p \longrightarrow N(\pi^+ + \pi^- + \pi^0) + X$$

$$p + \gamma \longrightarrow n + \pi^+$$

$$\pi^+ \longrightarrow \nu_\mu + \mu^+ \longrightarrow \nu_\mu + (e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e)$$

$$\pi^- \longrightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^- \longrightarrow \bar{\nu}_\mu + (e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e)$$

$$\pi^0 \longrightarrow 2\gamma$$

$$E_\nu \approx 5\% \cdot E_p$$

$$E_\gamma \approx 10\% \cdot E_p$$

同时测到：中微子和光子信号，则可反推指回到天体源。

彻底解决高能宇宙线的起源问题！

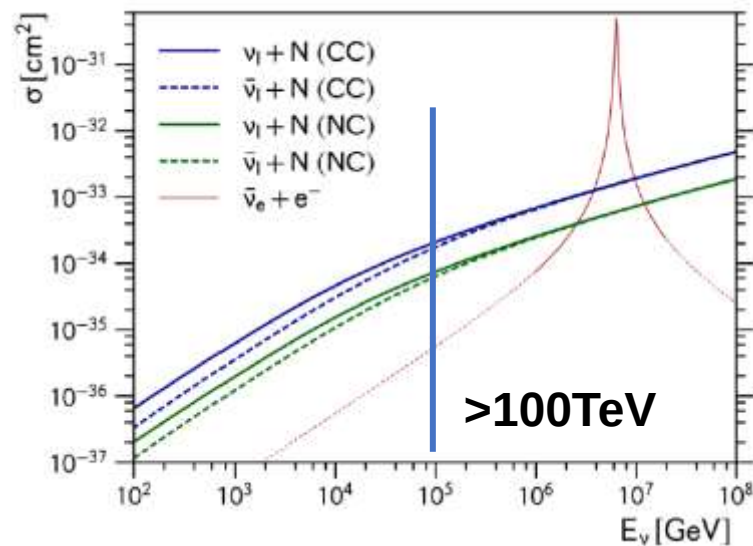
- LHAASO Collaboration, 2021, Nature, 594, 33.
- LHAASO Collaboration, 2024, ApJS, 271, 25.



We propose to install detectors deep in a lake or in the sea and determine the direction of charged particles with the help of Cherenkov radiation.

M.A. Markov, 1960年的国际高能物理大会

- 1) 十亿立方级别的巨量透明介质：水体或冰体！
- 2) 探测器需放置在千米水下。海洋中，水下一千米内容易受到太阳光和生物影响。
- 3) 需构建立体探测器测量中微子事例的方向和能量信息。

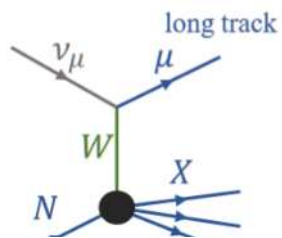


中微子极难与周围物质发生相互作用

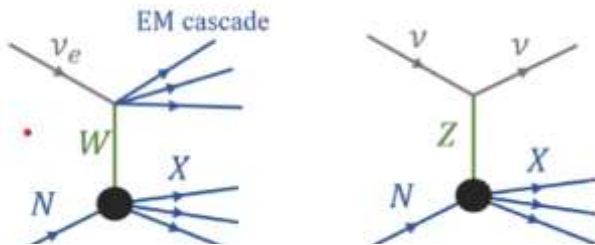
中微子事例在探测器中的三种形态

7

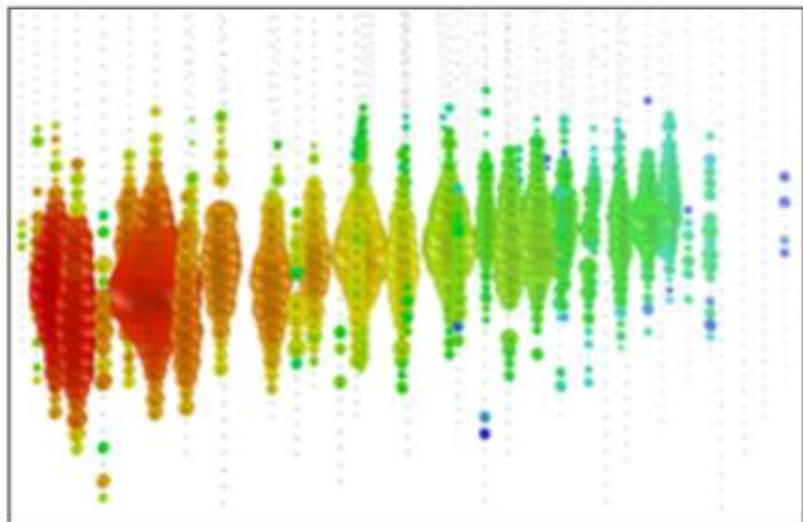
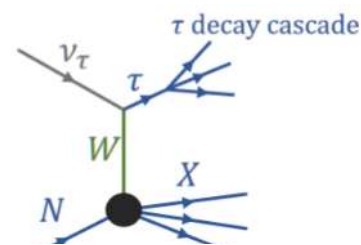
μ 中微子的带电流过程



e 中微子的带电流过程 和 中微子的中性流过程

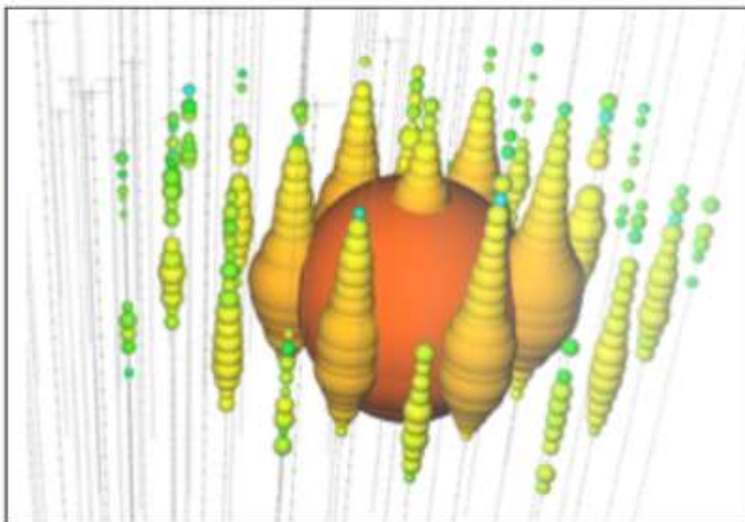


τ 中微子的带电流过程



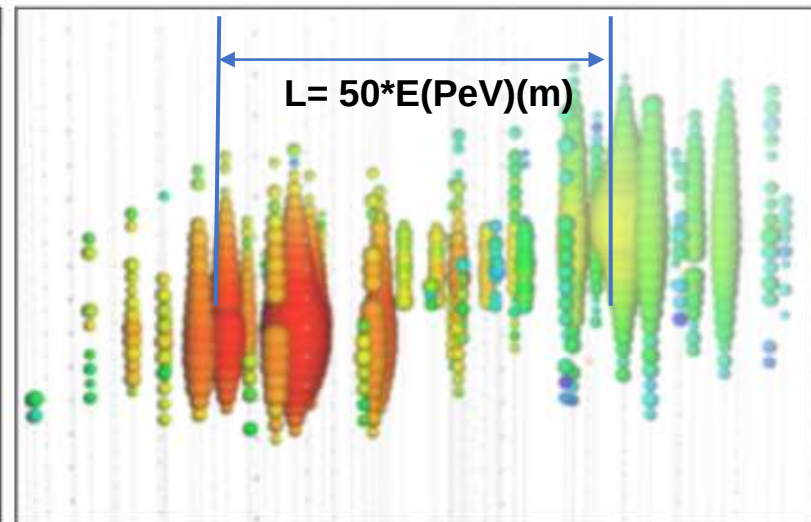
径迹型事件

有清晰的muon径迹
能量测量较差，角分辨率好。



簇射型事件

信号成团
能量测量较好，角分辨率较差。

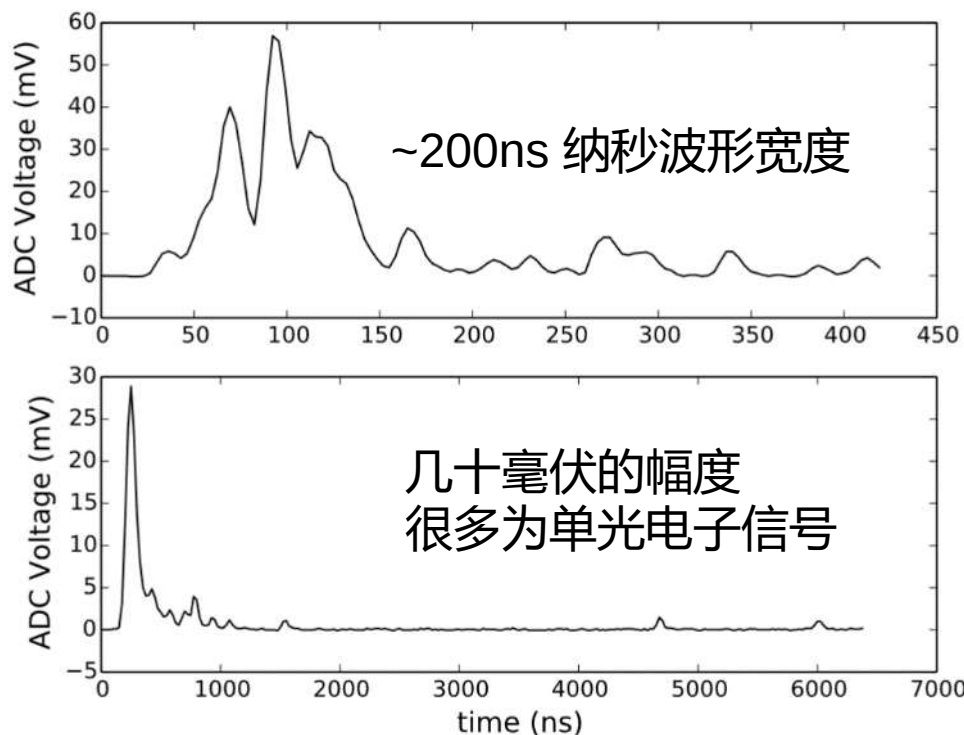


双簇射型事件

图中每一个有颜色的点表示 探测器单元观测到了来 自中微子事例的光子，
其颜色表示光子到达时间，大小表示 探测到的光子数量。

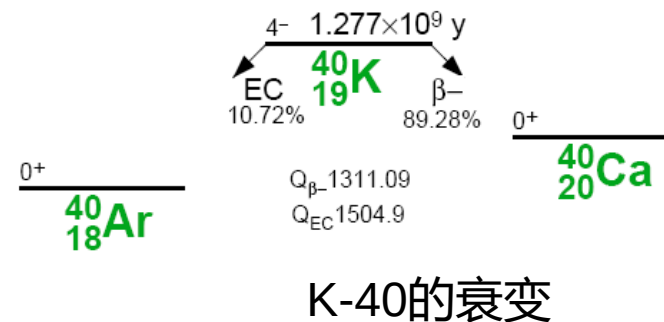
径迹型事例：作用长度为几公里到十公里级别
簇射型事例：作用长度约为20米

探测器单元采集到的典型信号波形



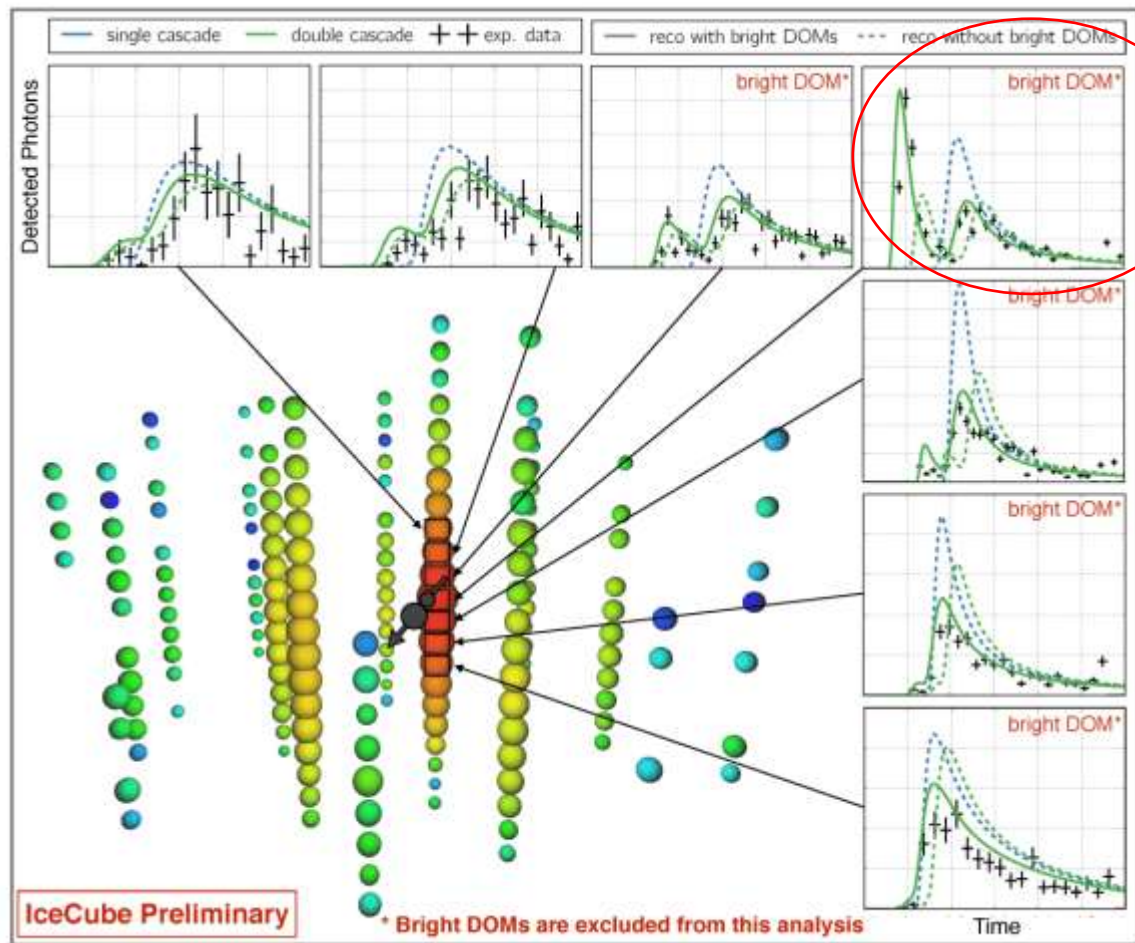
中微子信号的背景：

- 1, 大气中微子
- 2, 大气muon
- 3, 海水中的K40



20寸PMT模拟K40噪声率：
 $\sim 2.55 \times 10^5 \text{ Hz}$

First detection of candidate astrophysical tau neutrinos

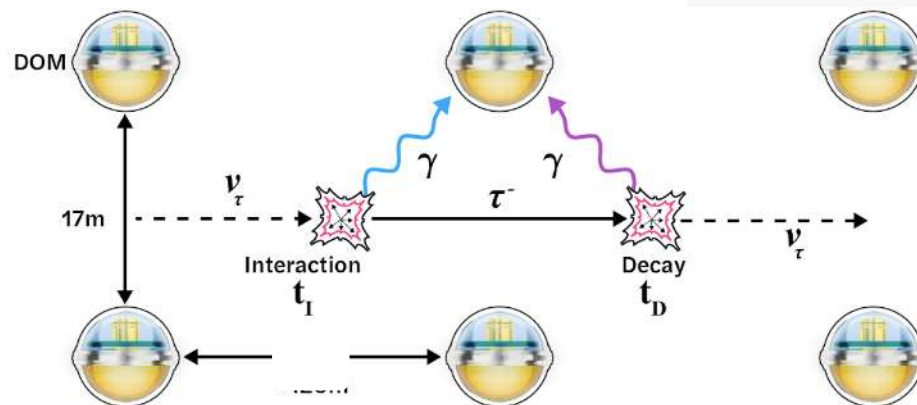
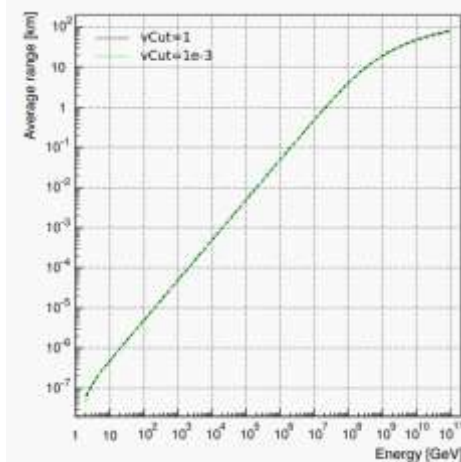
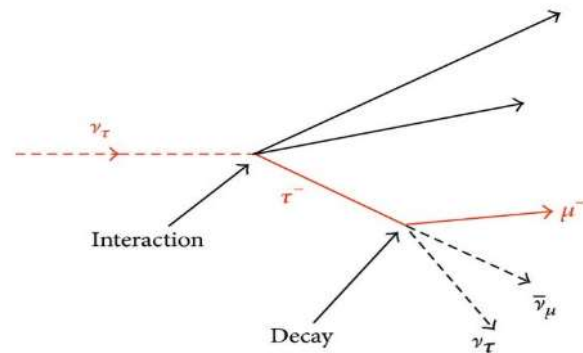


7.5年数据只发现两个疑似 τ 中微子事例 (2.8σ) !

双簇射型事例

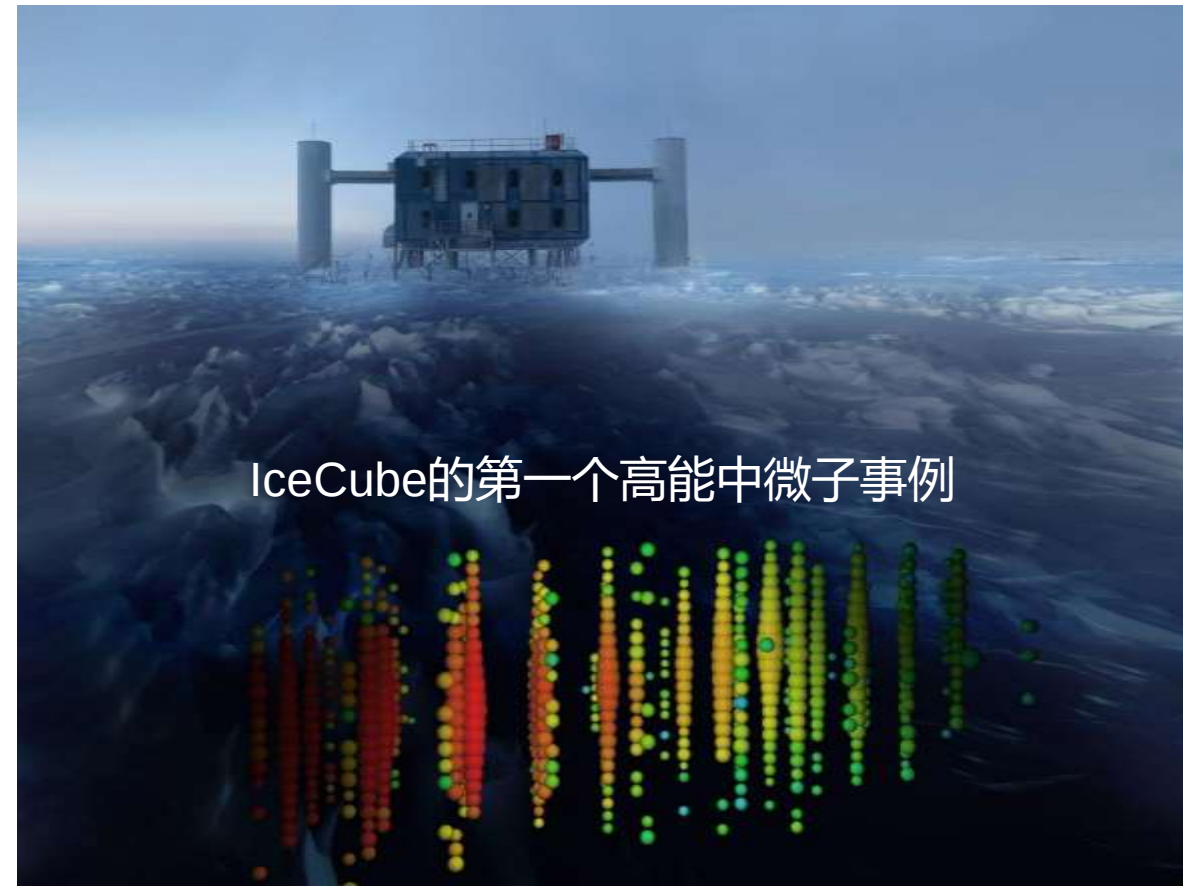
约300ns的波形宽度.
要分辨 τ 中微子, 必须波形采样!

至少200MHz的FADC.



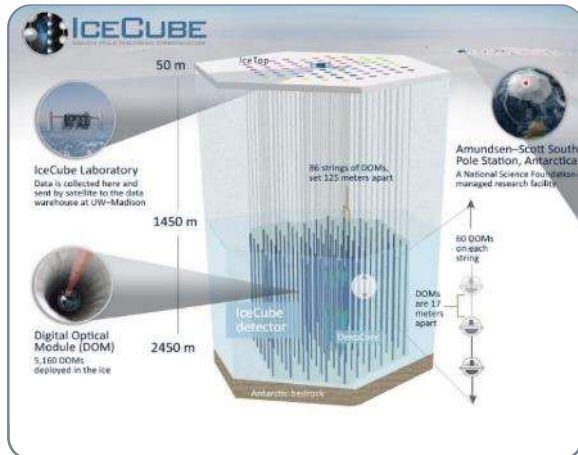


- **1976 -**
DUMAND, ANTARES, NT系列, AMANDA, IceCube, KM3NeT, Baikal-GVD,
- **2013**
IceCube首次观测到高能天体中微子。
- **2018**
IceCube观测到高能中微子 (耀变体, 3.5σ)。
- **2019**
IceCube观测到高能中微子(NCG1068, 2.9σ)。
- **2023: 银盘面有迹象发出弥散中微子, $\sim 4\sigma$**



50年的发展，未给出有效观测！

未达到 5σ 置信度，未确认中微子源！



美国IceCube

Construction from 2003 to 2010,
On-working now.

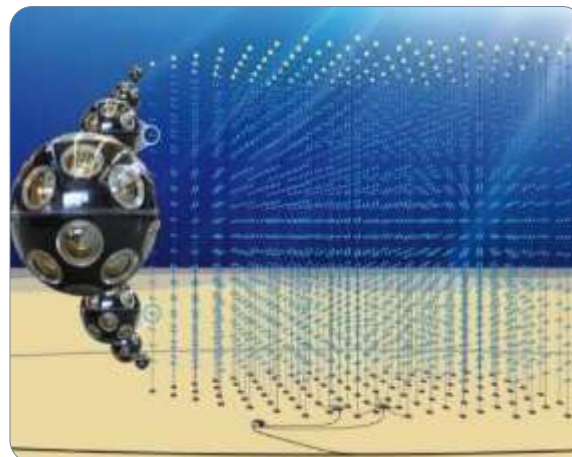
探测介质 冰

实验规模 1 km^3

探测器深度 2500 m

建设费用 2.8亿美元

IceCube-Gen2已批复(经费未下拨)
体积扩大8倍。
计划在2034年完成探测器建设。



欧洲KM3NeT-ARCA

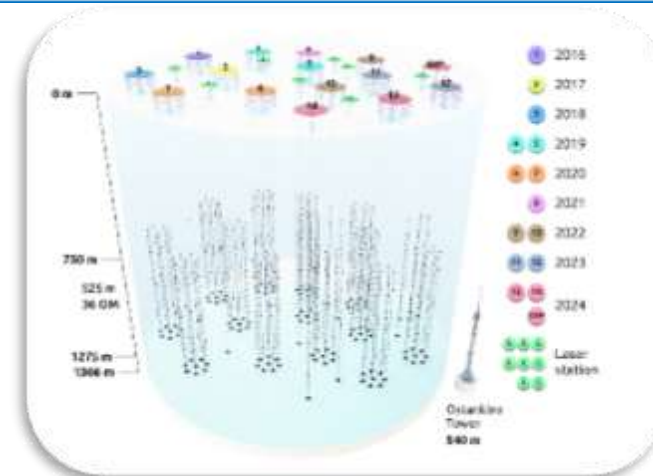
28/230 strings are deployed.

海水

1 km^3

3500 m

2.4亿欧元



俄罗斯Baikal-GVD

14 clusters deployed.

湖水

0.6 km^3 (phase-1)

1366 m

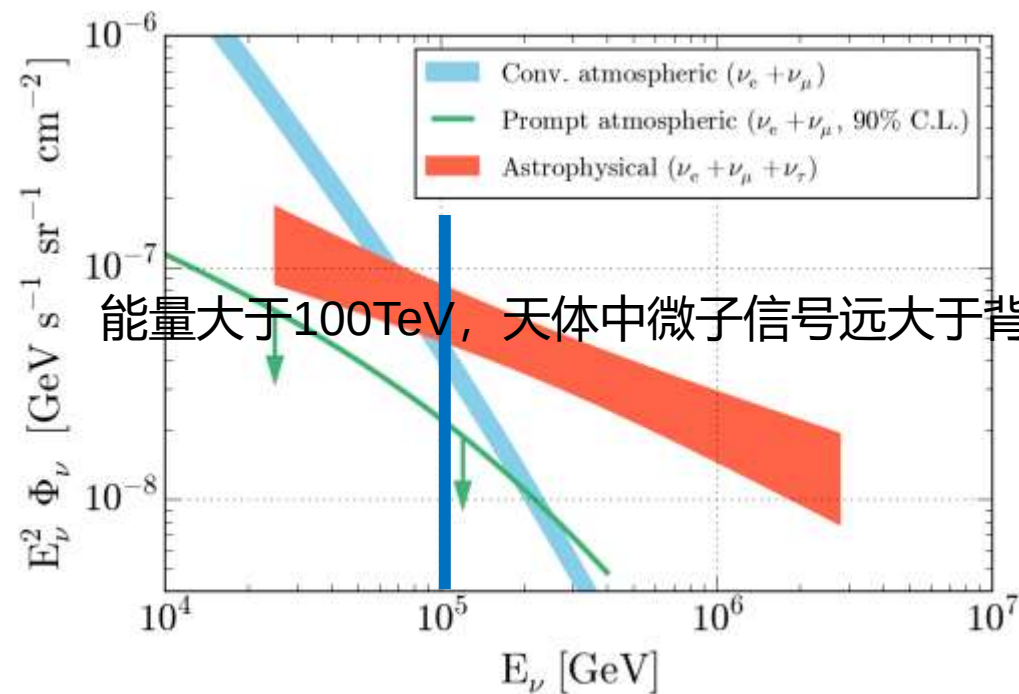
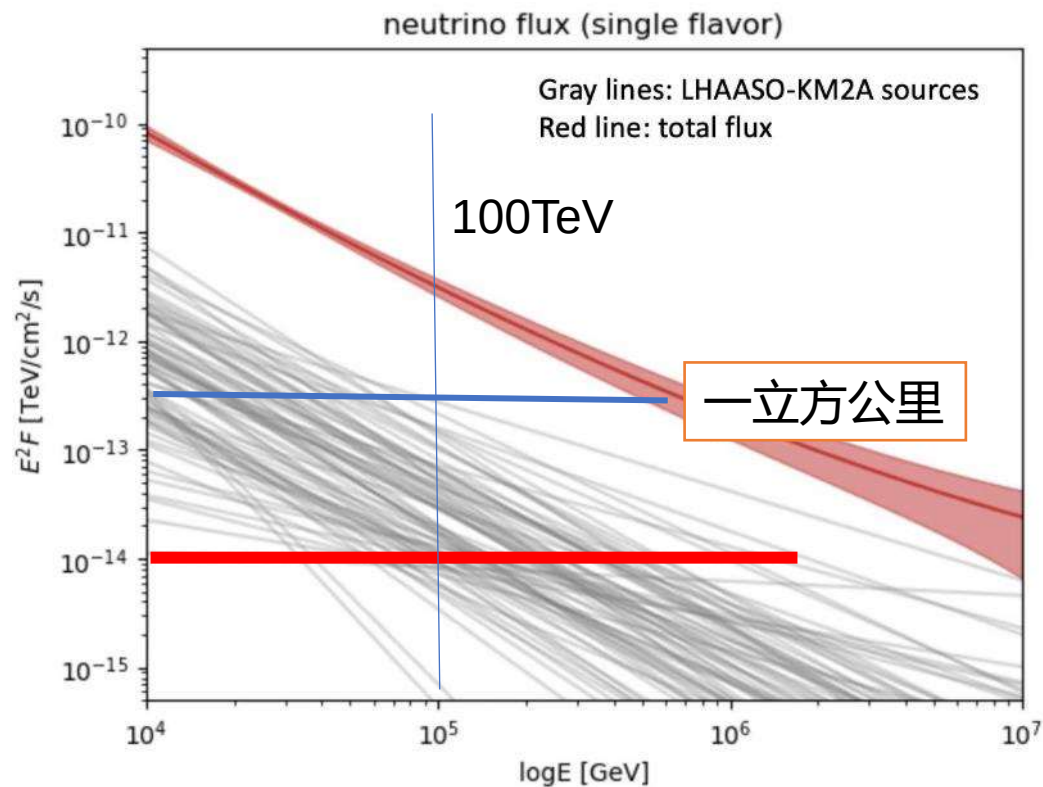
—

事例率~100/year
探测器体积不够大，不够灵敏！
不足以对LHAASO源的灵敏观测



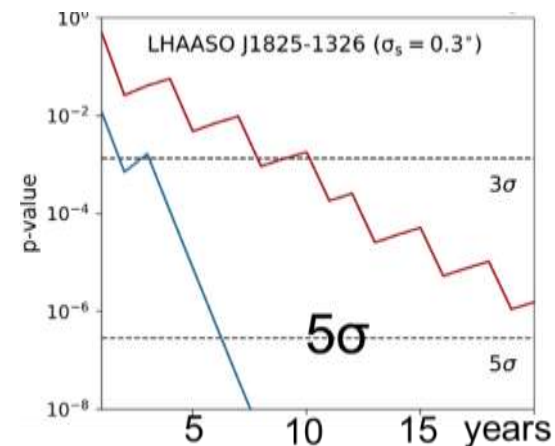
下一代高能中微子望远镜的需求

12



Energy spectrum of the astrophysical neutrino flux

面向观测目标以及灵敏度需求
要设计一个至少**30立方公里**的探测器



HUNT大科学装置示意图

- **探测对象：**测量LHAASO超高能伽马辐射源对应的高能天体中微子
 - **目标：**几年内，实现观测到高能中微子点源。
-
- ~2000串
 - 每串长度>1000米
 - 间距150米
 - 覆盖水体约30立方公里



HUNT项目团队

14

High-energy Underwater Neutrino Telescope(HUNT)

国际上以俄罗斯Baikal-GVD合作组为主。

现国内主要参与单位:

- 中科院高能所
- 中国海洋大学
- 中科院声学所
- 北京大学
- 清华大学
- 中国科技大学
- 中山大学
- 南京大学
- 中科院计算机网络信息中心
- 西南交通大学
- 厦门大学
- 集美大学 等



高能中微子望远镜项目研讨会
成都 2023.4.11

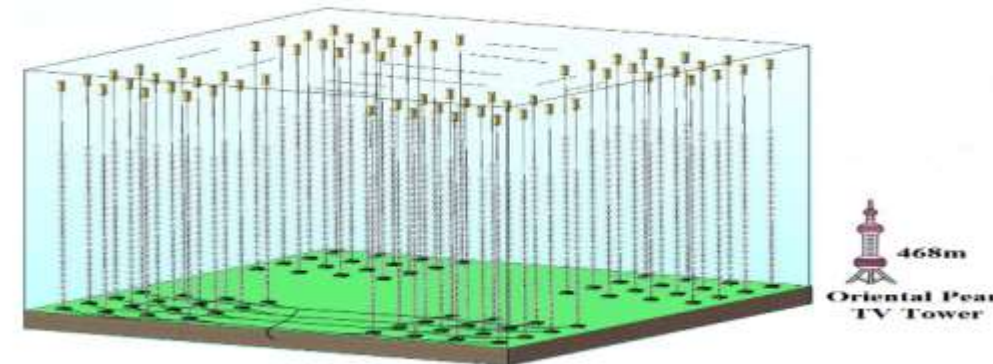




HUNT探测器技术指标

15

条目	指标
有效体积	30立方公里
光电倍增管	单光子测量能力; 1 – 2,000光电子的动态范围
电子学	2ns/point 的波形采样, 500ns波形窗口; 满足大动态电荷输出
时间测量精度	~1ns
事例触发率	~5KHz
数据存储量	200MB/s
用电功率	≈500KW



- **探测对象:** 测量全类型中微子的簇射事例和径迹事例
- **角分辨:** $\sim 0.1^\circ$ (tracks), $< 3^\circ$ (cascades).
- **能量分辨:** $\Delta \log E \sim 0.3$ (tracks), $\Delta E \sim 10-30\%$ (cascades).
- Discovering Neu sources (> 100 TeV) at the level of 5σ within several years.

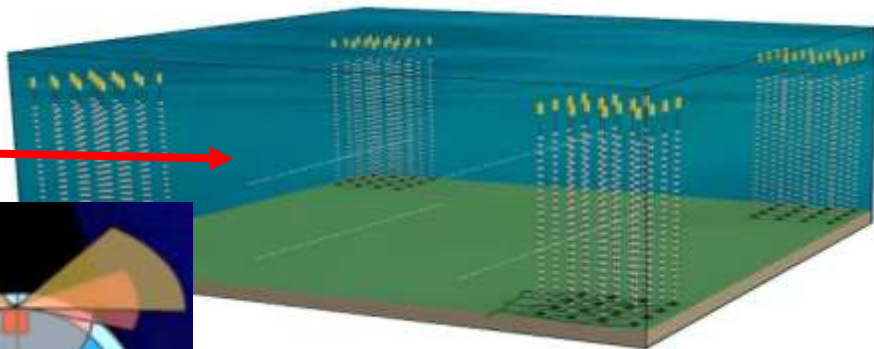
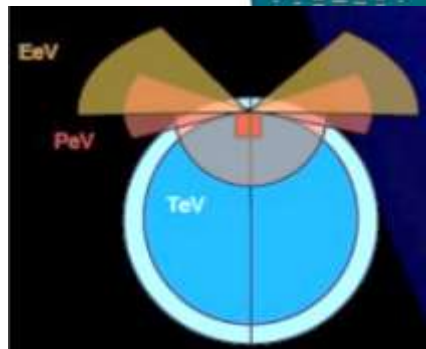


探测器的布局优化

17

30立方公里 / 串间距150米 / 串长度1公里以上

中微子



6公里见方

一个单独的阵列
(有利于簇射型事例)

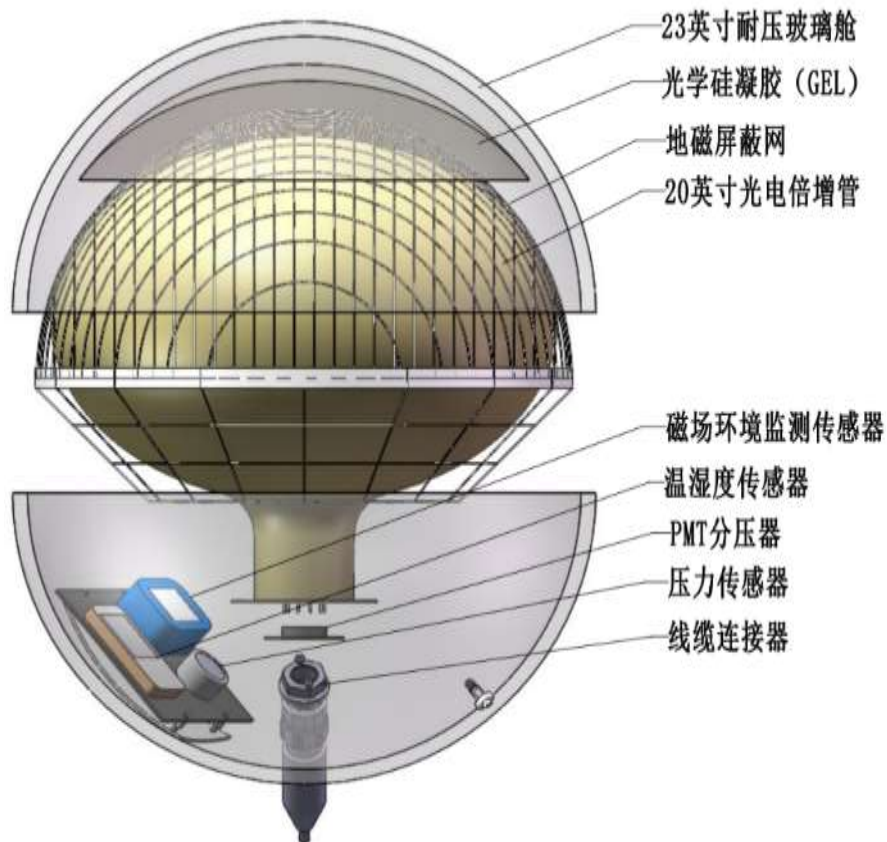


多个独立的子阵列
(有利于径迹型事例)

物理上PeV天体中微子水平方向来的居多，
希望串的高度达到2KM：

- ◆ 越高探测的中微子事例效率更高
- ◆ 串的数量将急剧减少 (2300 -- > 800)

But, 由水动力环境和深海工程决定。



20英寸超大尺寸的光敏探头

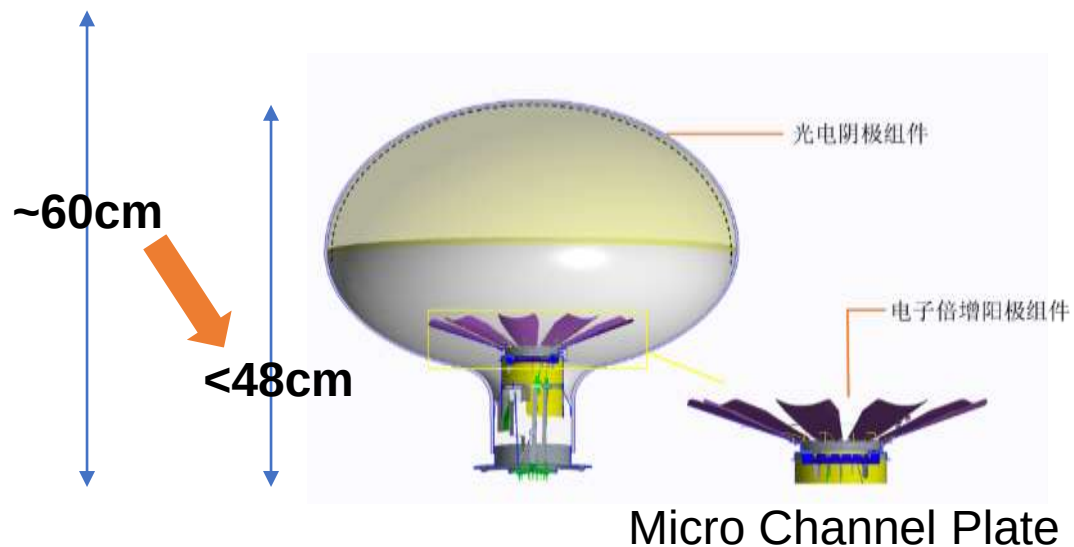


20英寸MCP-PMT
光灵敏面积是8英寸的7.3倍
是10英寸的4.5倍左右

**追求探测器单元的简单、可靠，成本可控，
利于构建大型立方阵列！**

- 新国产短轴向20英寸PMT

相较现有小尺寸打拿极产品，拥有更大的视场角。



Ten centimeters shortened.

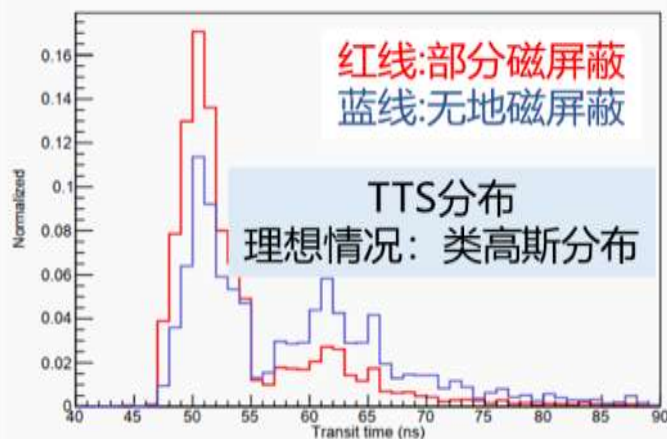
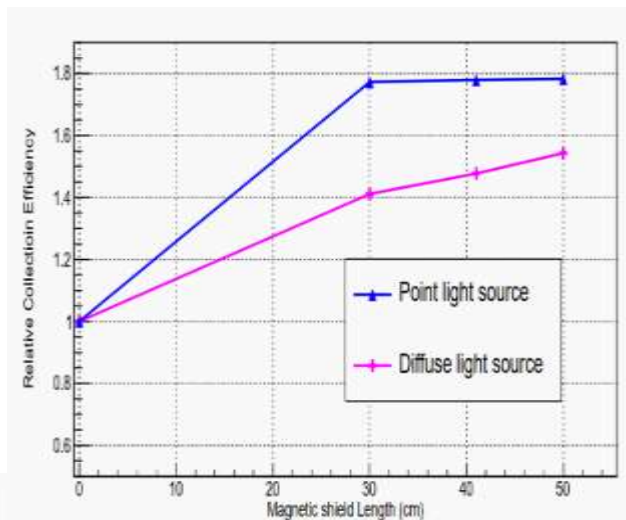
- 超大型23英寸耐压玻璃舱

国际上最大的深海耐压玻璃舱。

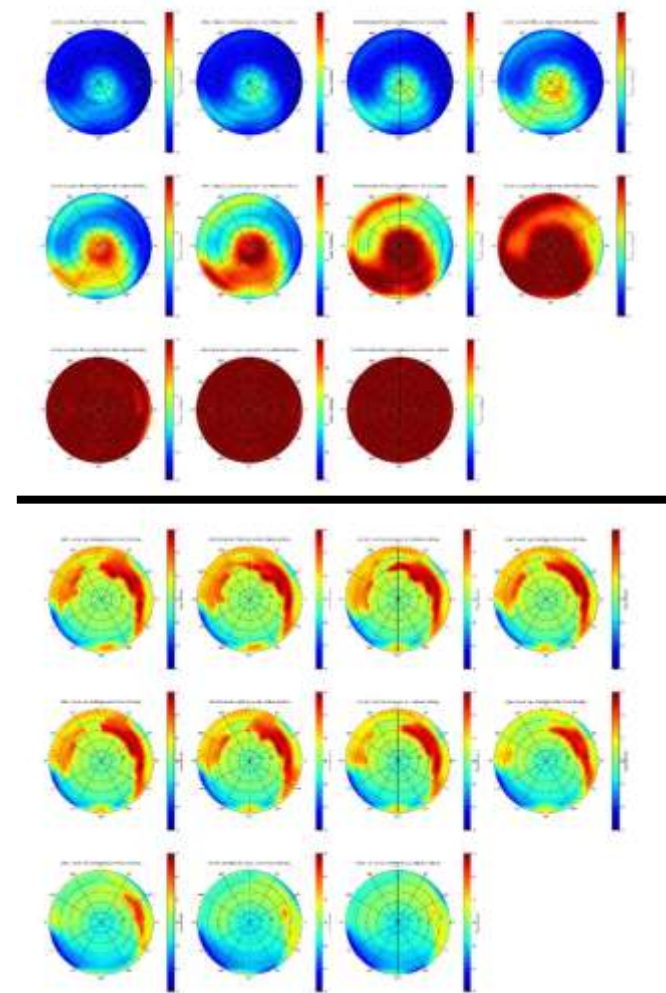


Passed 50Mpa pressure test.

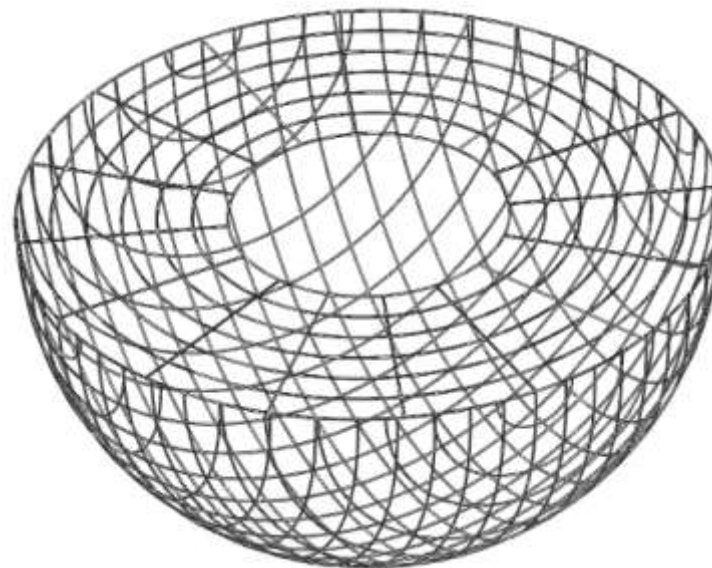
不同磁屏蔽长度条件下，
相对探测效率变化。



无磁屏蔽情况下，电荷输出均匀度和相对渡越时间均匀度分布。

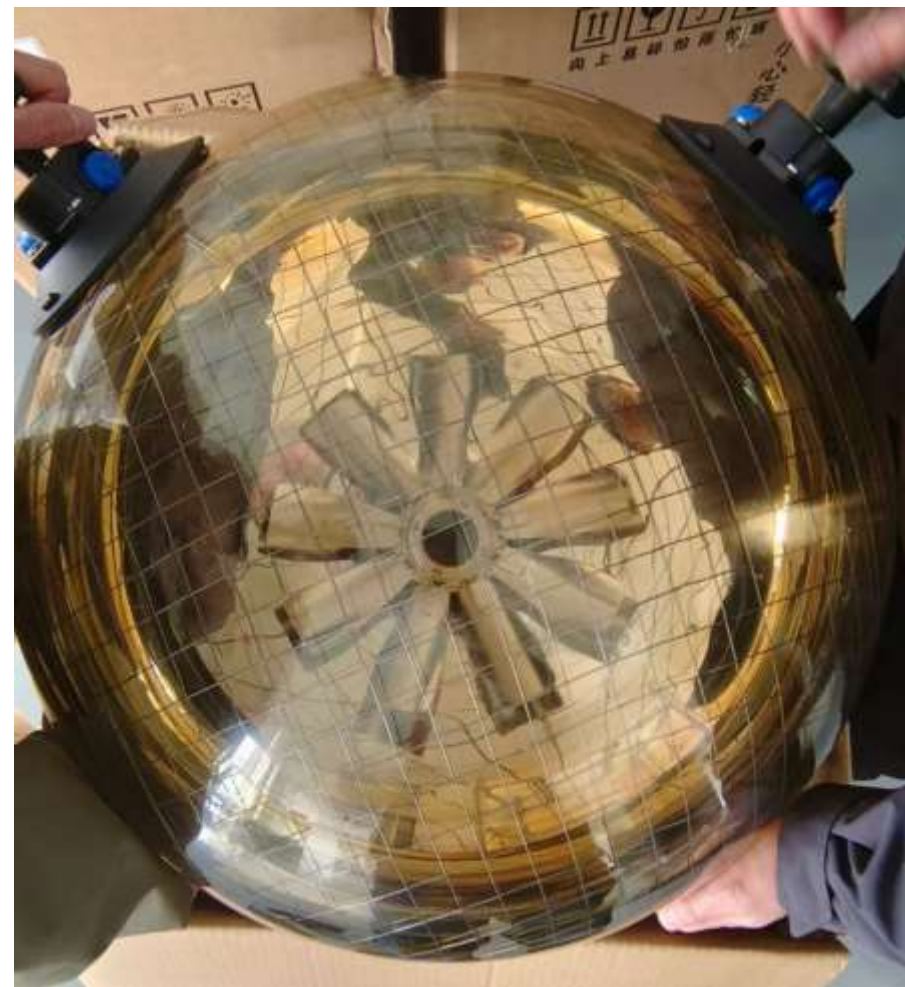
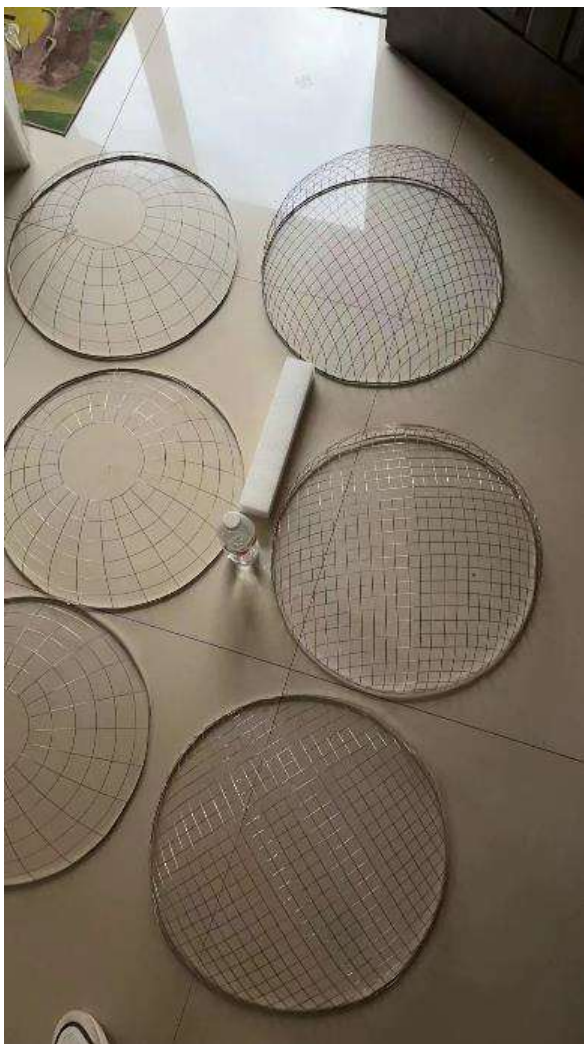


地磁严重影响PMT收集效率和时间性能



- 寻找高磁导率材料：坡莫合金
- 通过COSMOL软件，建模设计
- 需要大型充氢气退火消磁的设备

大尺寸磁屏蔽网研制



20英寸直径,
中心磁场余量10%



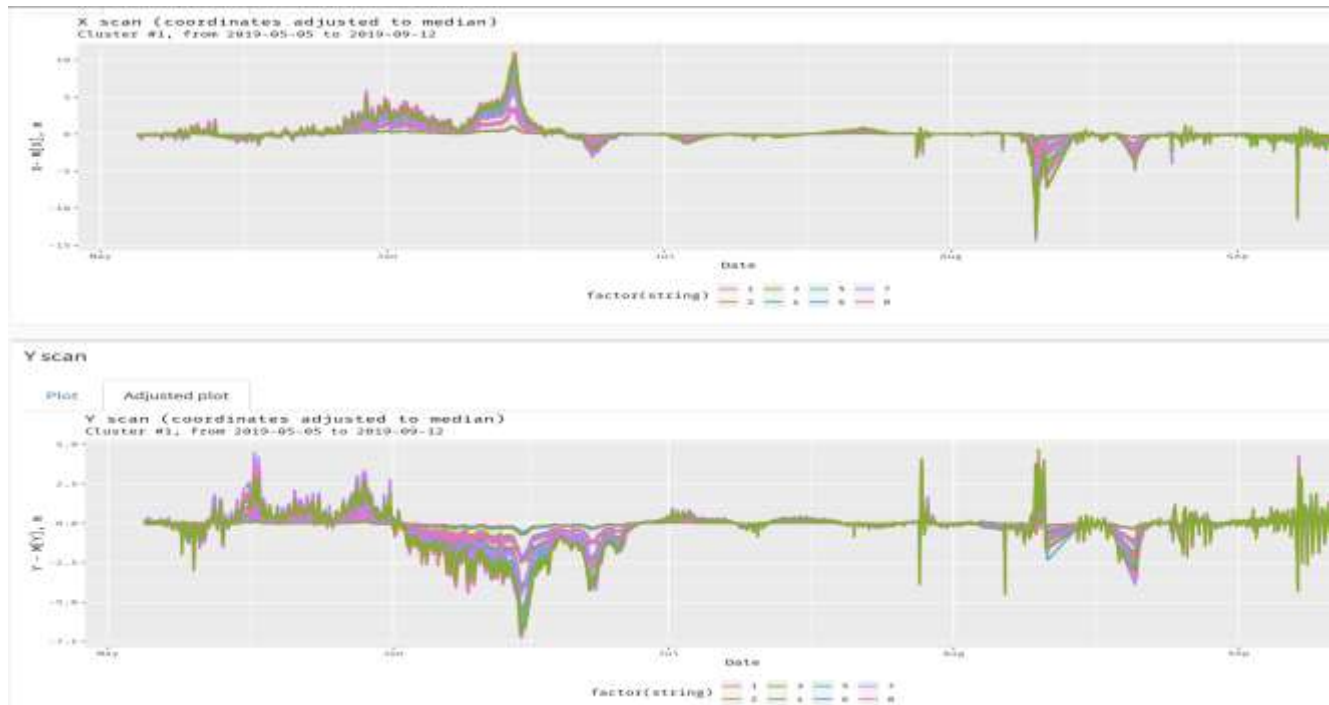
声纳定位系统

2222

- 1米位置误差对应4.5ns时间差别
 - Baikal-GVD统计了8串、五个月数据
 - X,Y~15m; Z~0.5m
(湖或海里: 水流速度~2-10cm/s)
- 布置声纳定位系统, 实时监测
- **实时位置测量精度 < 20cm**
 - 声速时间测量精度 < 1us

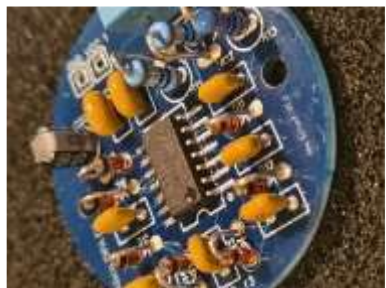
未来采用WR时钟, 理论定位精度提升一个量级。

- 在每串上至少布置4套,
- **国际市场价格昂贵, 需要国产化方案**





高能水下中微子望远镜 (HUNT)



声信号发射电路



声信号接收电路



声信号处理与定位解算电路

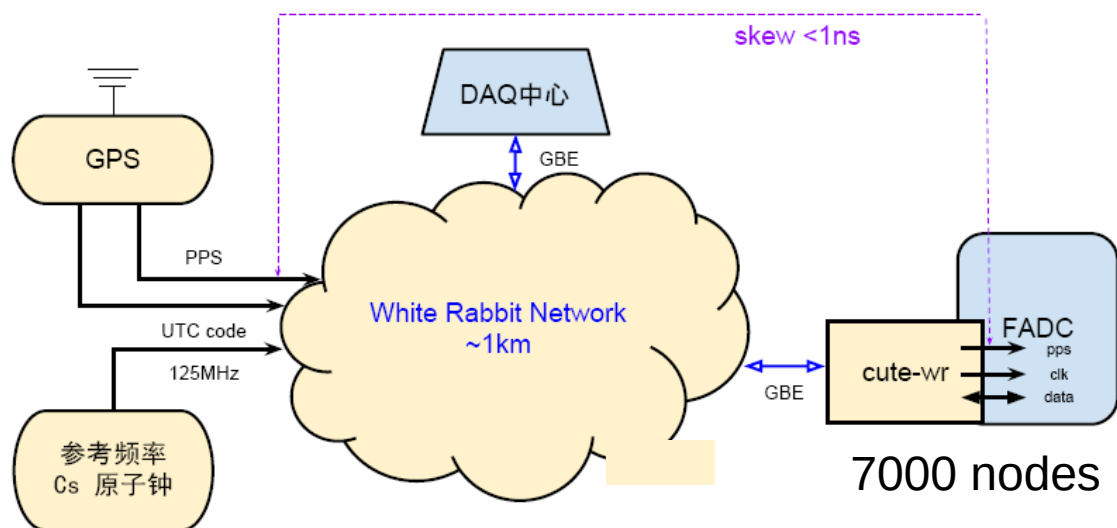


国产声纳定位装置
千岛湖湖试@20240810



时钟分配系统：White Rabbit（小白兔技术）

24

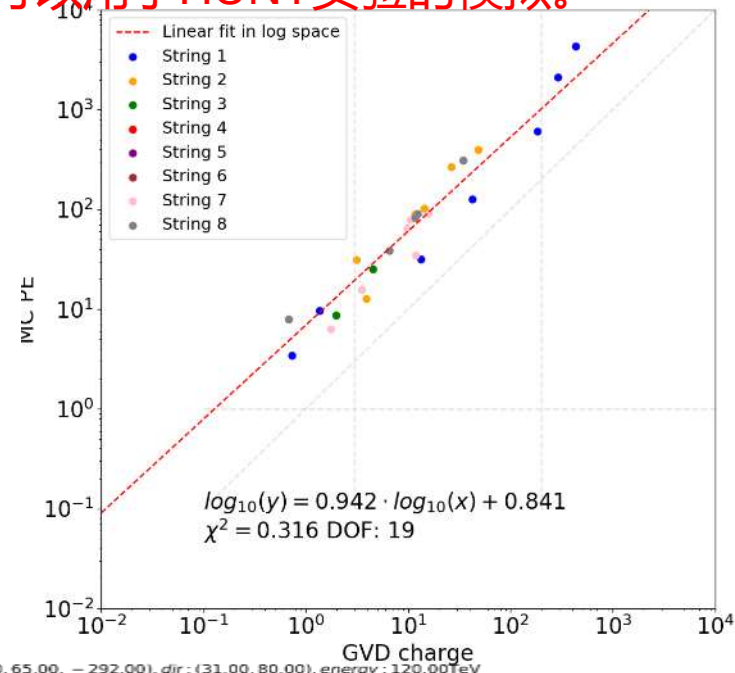
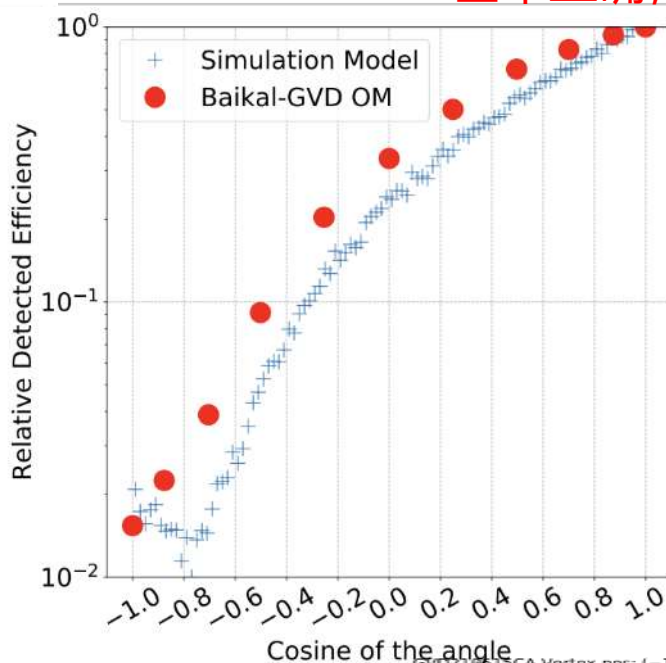
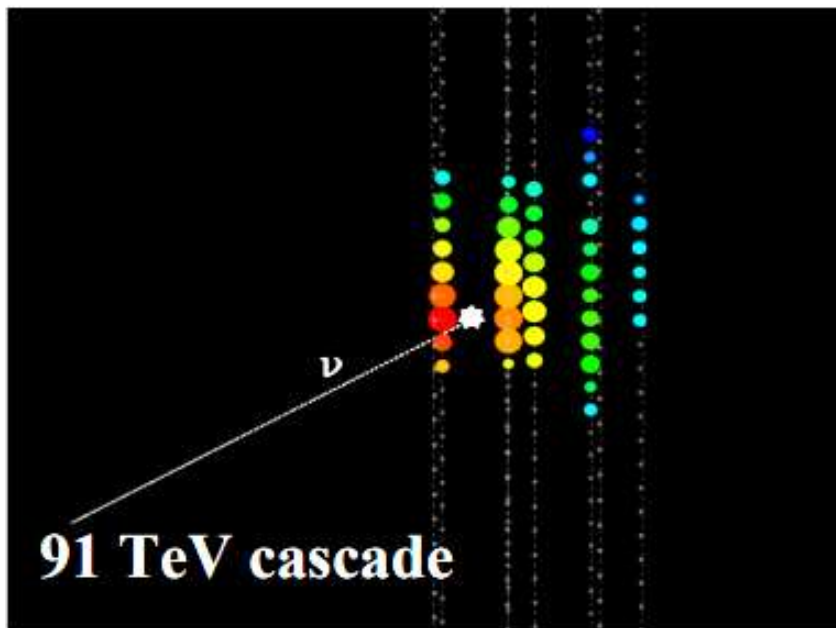


- ◆ 在LHAASO, 实现了 > 1km范围内, 7000多个节点, 精确时钟同步 (<0.3 ns) ;
- ◆ 结合FEE可在每个时钟节点对hit加入绝对时间信息。

- 时钟分配系统为每个前端电子设备提供用于ADC采样的高精度时钟同步。
- 由欧洲核子研究中心CERN开发, 并由清华大学成功应用于LHAASO实验。
- 可用在HUNT上, 已在Baikal-GVD上验证。

Baikal-GVD的13个真实事例形态和模拟程序对比。

线性拟合参数都很接近1，这说明探测器配置基本正确，可以用于HUNT实验的模拟。



相关工作的文章已被CPC接受。

Generating Baikal-GVD high energy cascade-like neutrino events with a GEANT4-based simulation toolkit*

Zike Wang(王子珂)^{1,2}, A.D.Avrozin³, Zhen Cao(曹臻)^{1,2,4}, Mingjun Chen(陈明君)^{1,4}, Peiyuan Chu(褚培元)^{1,2}, Zh.A.M.Dzhilkiboev³, Bo Gao(高博)^{1,4}, Tianqi Huang(黄天奇)¹, Jiali Liu(刘佳丽)^{1,4}, Ying Qi(齐莹)^{1,5}, Xiaohao Yu(游晓浩)^{1,4}, and D.N.Zaborov³

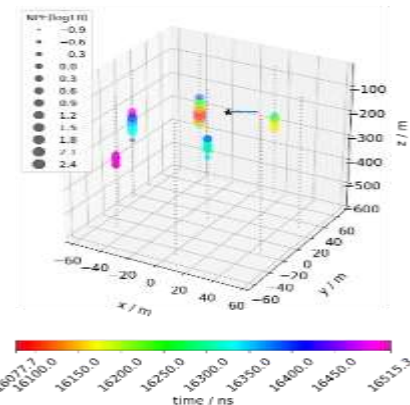
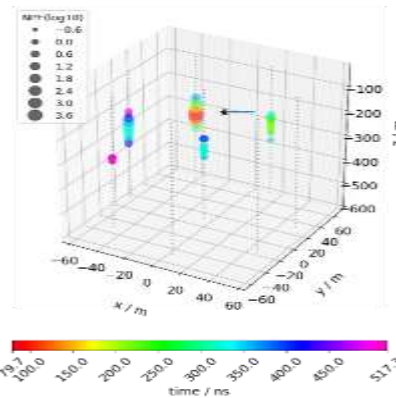
¹Key Laboratory of Particle Astrophysics Experimental Physics Division & Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

³Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow 117312, Russia

⁴TIANFU Cosmic Ray Research Center, Chengdu, Sichuan, China

⁵School of Science, Tibet University, Lhasa, 850000, Xizang



全过程模拟处理由中微子信号产生的几十亿光子的输运过程

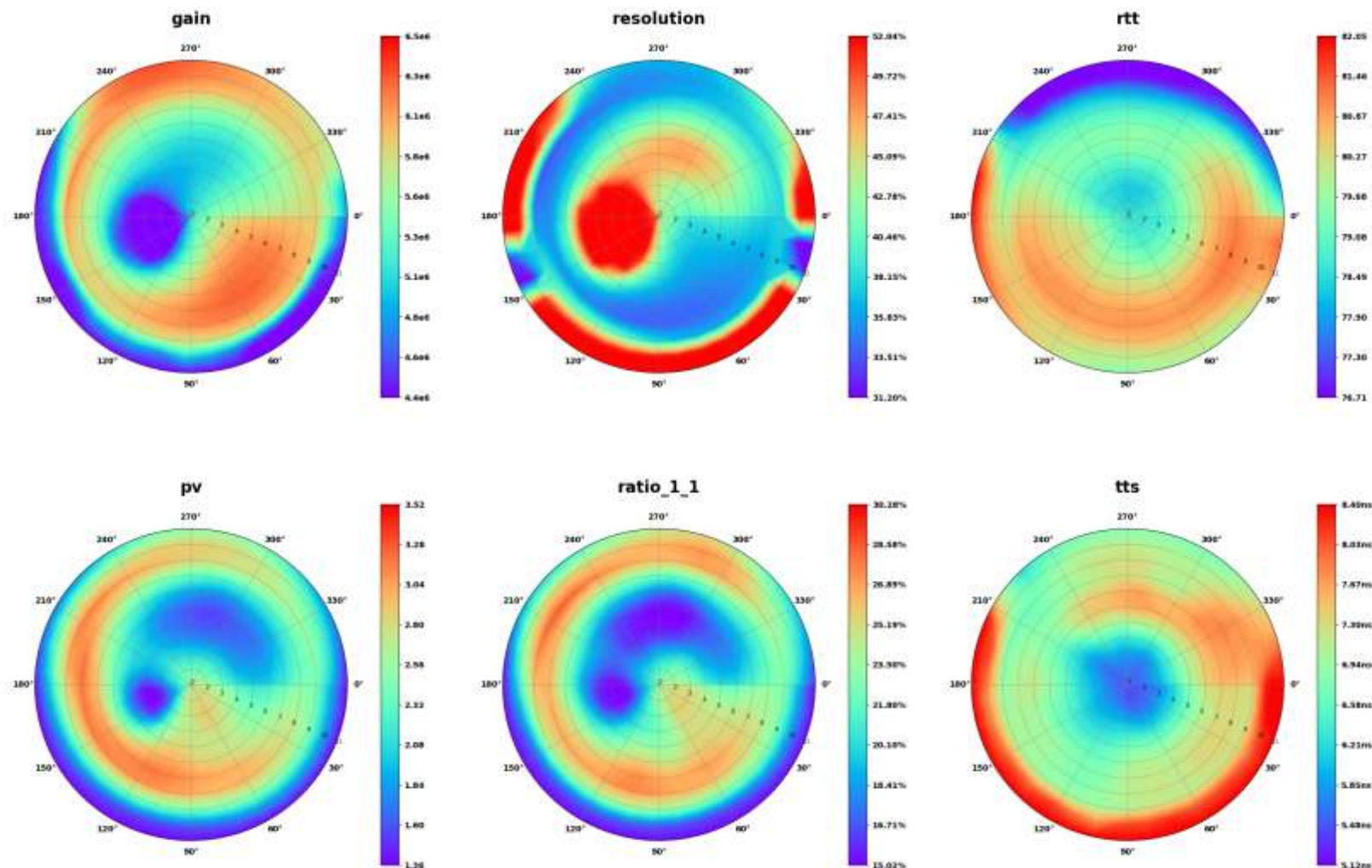
- **G4DMT**: GEANT4 Distributed Multiple Threads
 - 能够调用所有CPU的性能来协助模拟一个初级粒子。
- **G4ART**: GEANT4 Accelerated Ray Tracing
 - 利用GPU强大的并行算力来模拟光子的追踪过程。

能量 (TeV)	G4 调度器	光学物理过程	光学模拟	线程 (每节点)	GPU 卡 (每节点)	节点 (个)	总耗时 (s)
1	G4MT	G4OpticalPhysics	G4	2	0	1	463.988411
1	G4MT	ARTOpticalPhysics	关闭	2	0	1	3.541932
1	G4MT	ARTOpticalPhysics	G4ART	2	1	1	5.713808
1	G4MT	ARTOpticalPhysics	G4	2	0	1	139.707034

加速效果：81倍提升！

单线程：单卡 $\approx 464.0s : 5.7s \approx 81.4:0$

- 加速效果比Opticks更好，源码级的开发，程序开发可控。
- 可以在HIP和CUDA环境（NV）下工作。
- 可以最大化的利用计算资源。



- 建立数字响应模型，实现模拟真实化；
- 深入理解基于不同PMT的探测器的性能区别。



实验进展 (2023.01-至今)





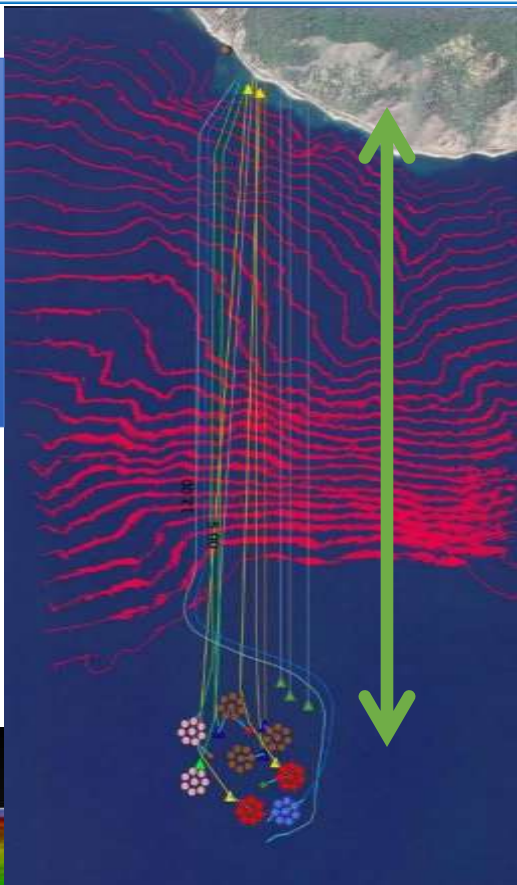
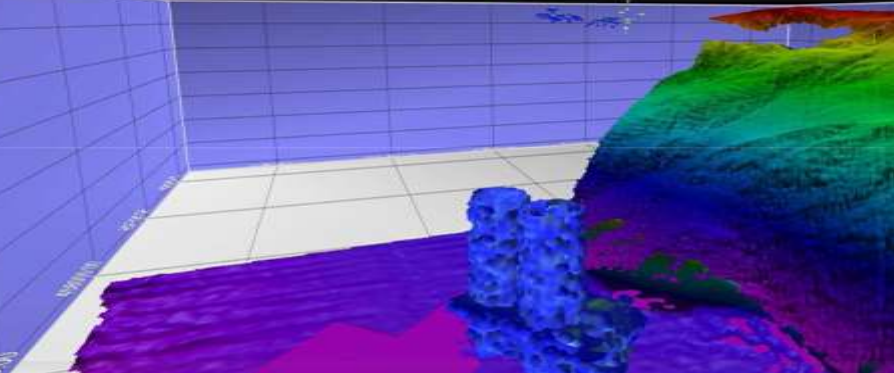
候选站址1：贝加尔湖

29

- 世界第一深湖，最大深度1600米以上
- 水质透明清澈(20-40米)
- 百平方公里湖床的高程差，小于1米
- 水体中无放射性本底
- 每年7个星期以上，结冰1米
- 每天有18小时对银河中心可观测

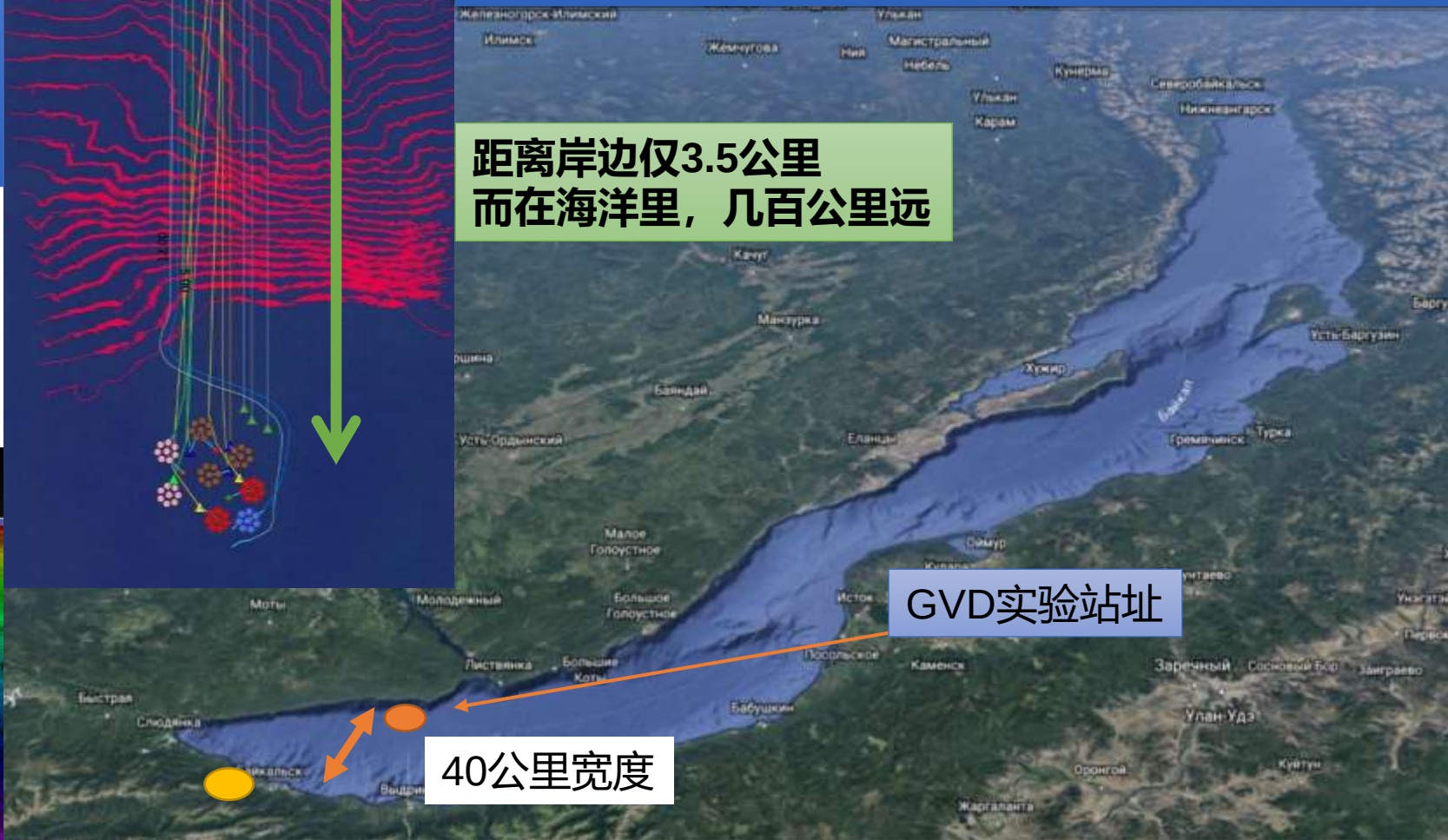


可在冰面上投放作业
探测器设备可维护
极大降低成本和工程难度



Lake Baikal

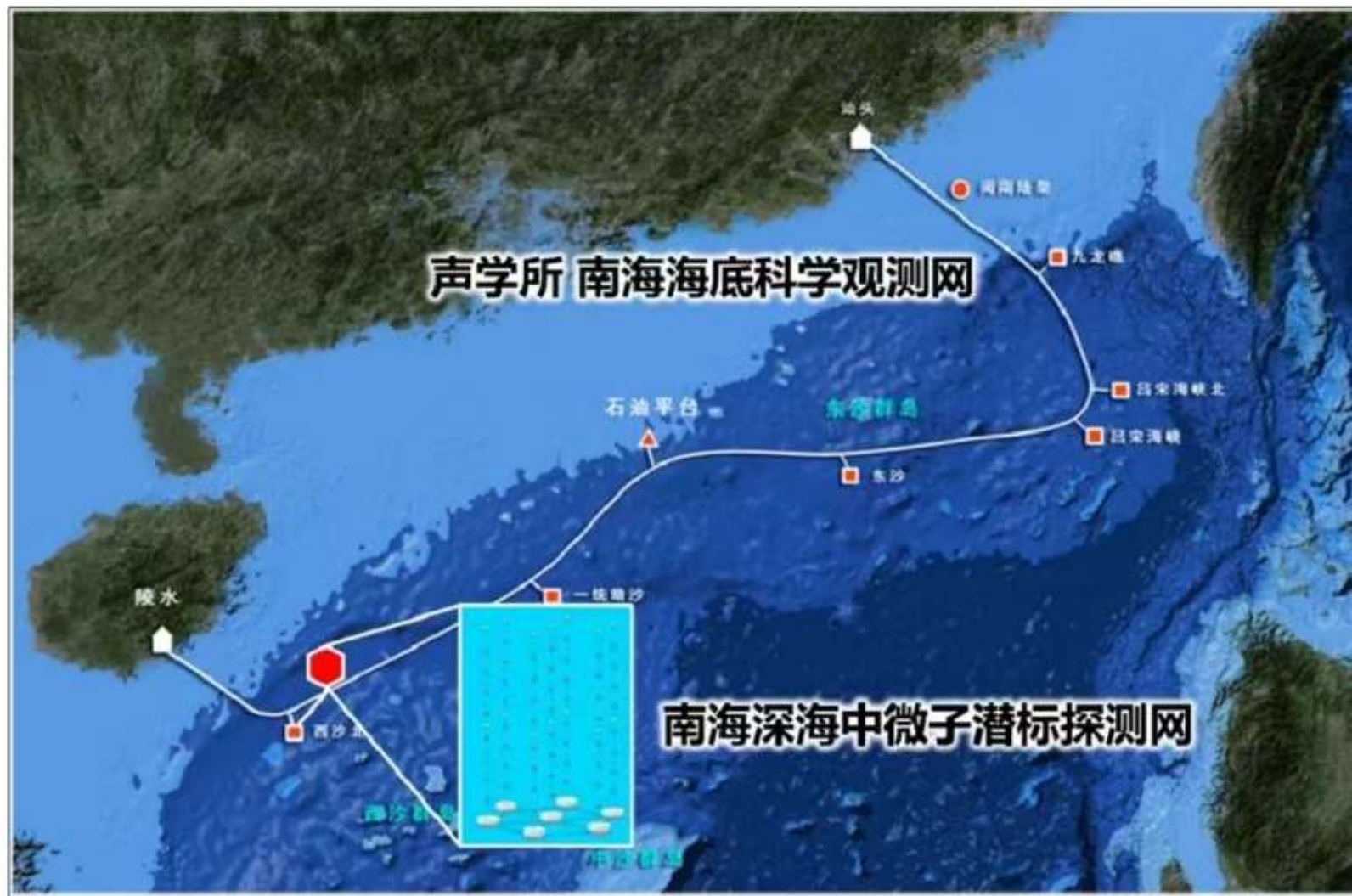
距离岸边仅3.5公里
而在海洋里，几百公里远



40公里宽度

GVD实验站址

贝加尔斯克火车站



- 拥有南海观测网，可以提供部分电力以及通信基座；
- 投放以及维护成本高；
- 洋流以及较高的本底辐射...

中国南海

17° N, 113° 20E
2000米水深

Water depth: 1800m

1. 将两个8英寸PMT放置在水下1800米，并长期工作。
2. 原位本底伽马射线测量工作*。
3. 长距离LED时间标定系统验证。

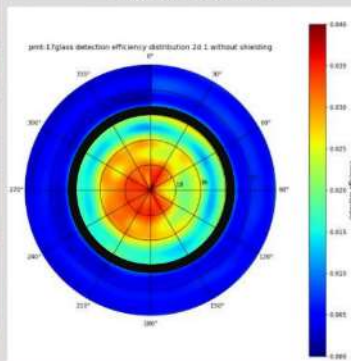
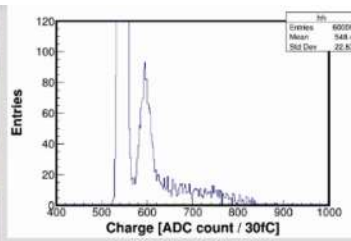
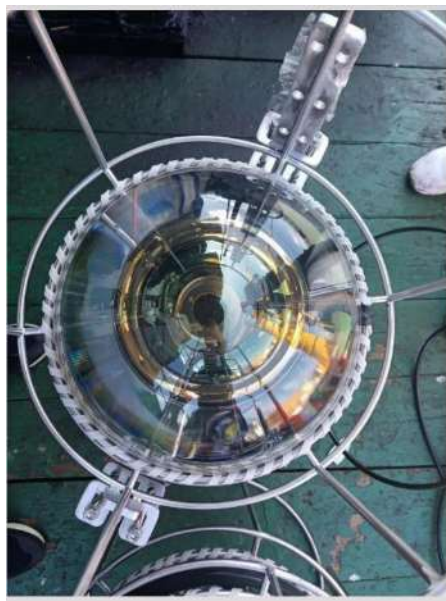


LED Calibration system

Two DOMs with 8inch PMT

Gamma spectrometer

23inch glass sphere

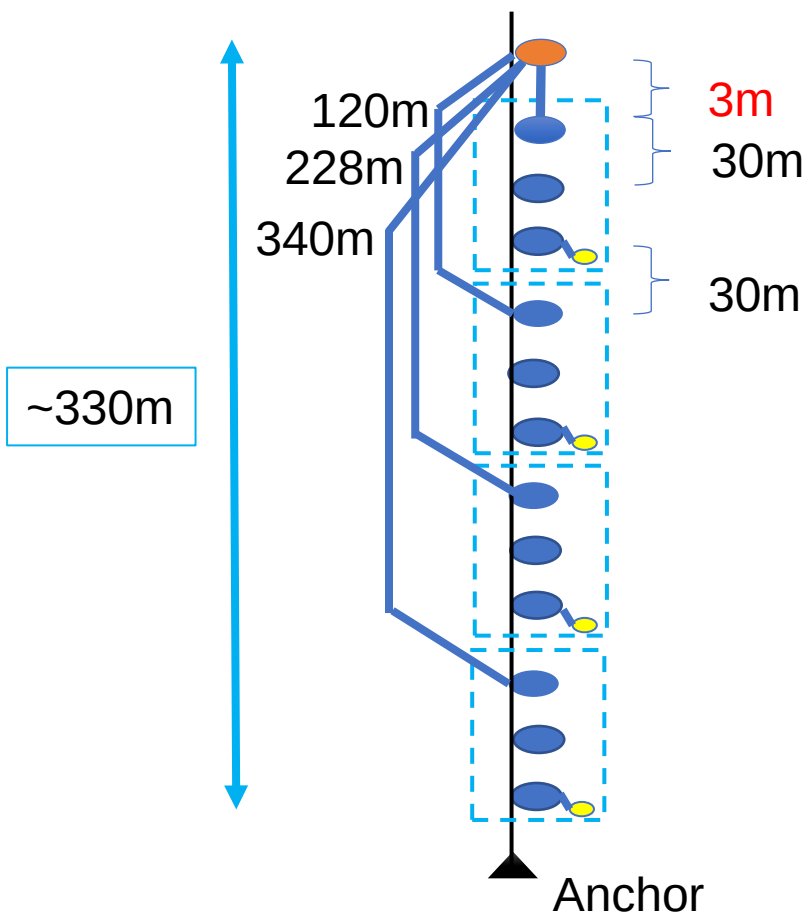


海试成果（技术性验证）：

1. 1800米处，三套探测器系统长时间测量
2. 1800米和1100米，低本底伽马辐射原位测量
3. 验证了四套玻璃舱装置的防水封装工艺
4. 检验了长距离LED时间刻度系统
5. 国产化23英寸玻璃舱的耐压测试

*得到中科大曹平团队的支持

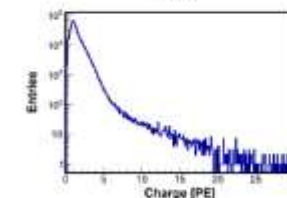
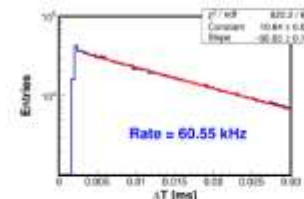
- 水深1300米，投放了12个20英寸PMT，4个LED标
- 还将投放48个探测器单元。



Mingjun Chen from IHEP Beijing reports on the Chinese string: The string consists of 12 optical modules with a diameter of 23 inches glass bulb, based on the 20-inch MCP-PMT design. The spacing between the optical modules is 30 meters. We utilize waveform digital data acquisition with a sampling rate of 500 MHz and "White Rabbit" clock synchronization system. The top of the detector string is aligned with the top of the GVD detector. Additionally, it includes 4 LED-based optical calibration modules and a centralized control module for remote control and data retrieval through an on-site server. The main purpose of this string is to study the operational status of the ultra-large aperture optical modules in the environment of Lake Baikal, including technical performance and signal observations consistent with GVD.



The first installed 23-inch OM.



First impressions: Single-channel distribution of hit time differences, and the resulting counting rate (top) and amplitude spectrum (bottom) measured for a typical OM, (threshold ~ 0.5 PE). More detailed data will become available after completing the electronic firmware.

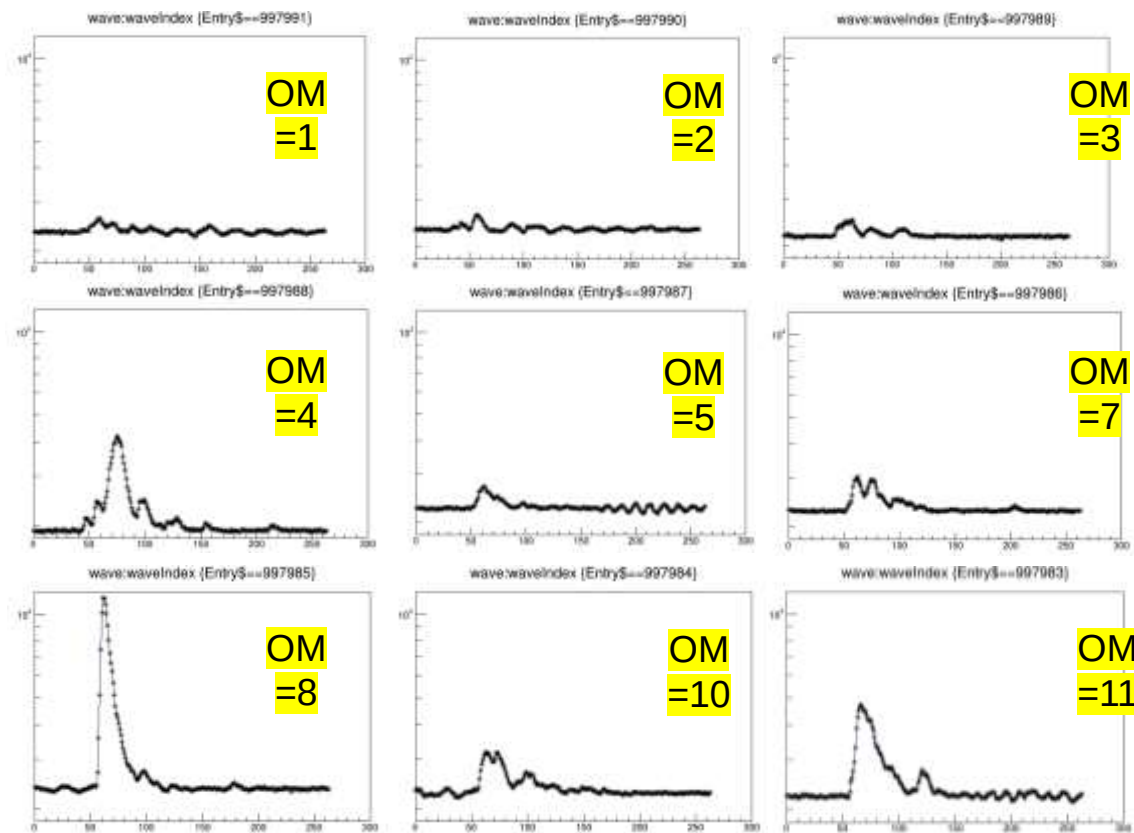
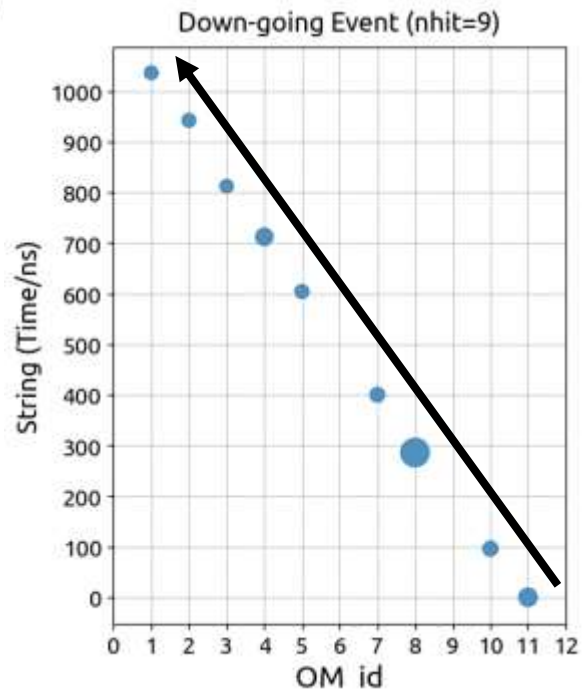
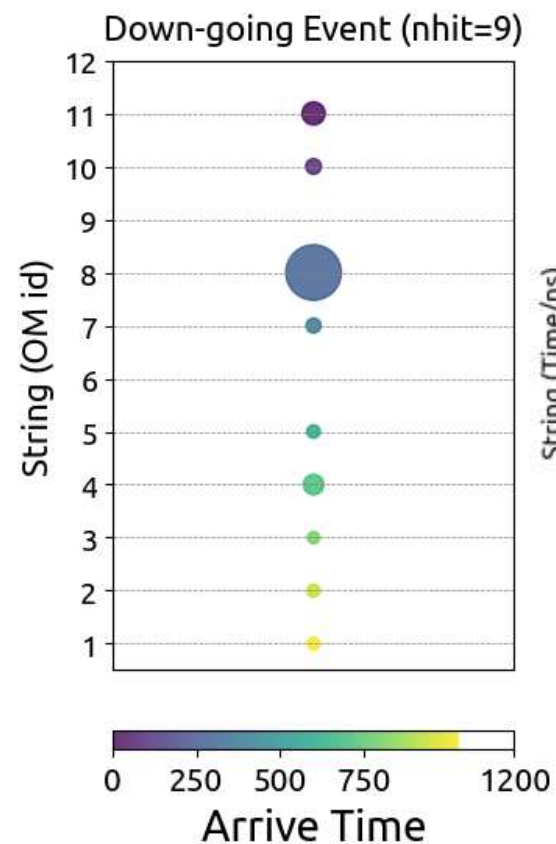
RNO-G

The RNO-G collaboration has comprehensive plans for the coming season. Anna Nelles (DESY Zeuthen/ECAP Erlangen) reports:

RNO-G is gearing up for another installation season, which will be the longest that RNO-G has seen, using almost all of the time available for science at Summit Station.

On May 9th the first drilling team will arrive on site starting with the assembly of the BigRAID drill, which delivers dry holes of 28 cm diameter down to 100 m. The drill has been upgraded with respect to the last drilling season in 2022, hoping to improve speed and reliability, which is needed to drill up to 12 stations in one season. Mid of June the first science installation team will then arrive at Summit to instrument the drilled holes. Equipment for 10 new stations will be shipped, the installation will depend on the drilling performance. Furthermore, an upgrade of the existing

GNN Monthly, 2024/04/26



A “muon-like” top-down event



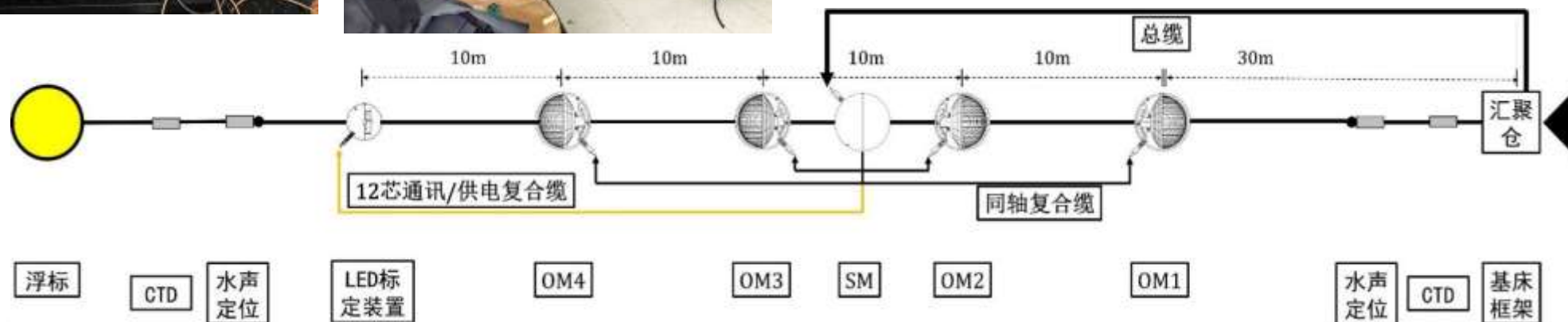


Preliminary Results





依托中海大和中科院声学所



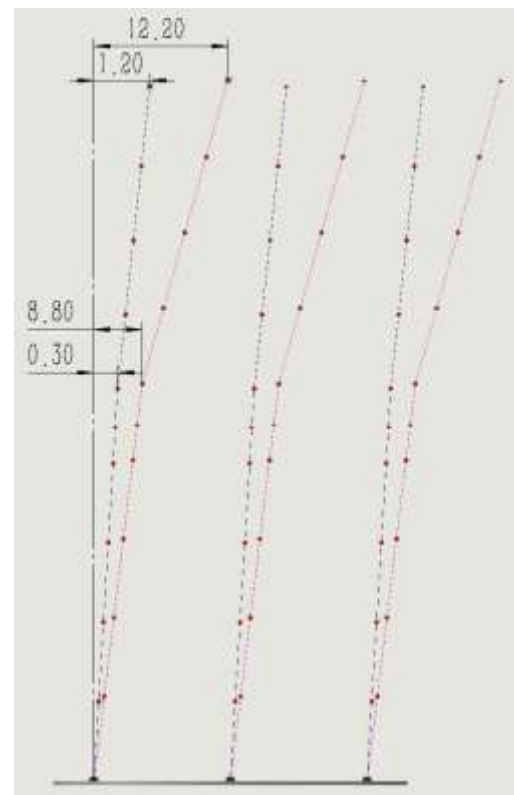
目的：

- 研究高度1000-1500米的潜标的水动力环境
- 研究潜标密排的布放和长期稳定运行的问题

方案：

- 在海底观测网的2600米处
- 投入**四串的水动力潜标**

长期监测2千米水下的温盐层，流速等信息。



总体方案示意图

- 论证在中国南海建立HUNT阵列的可行性；
- 测量到真实的大气中微子信号或muon通量。

研究：

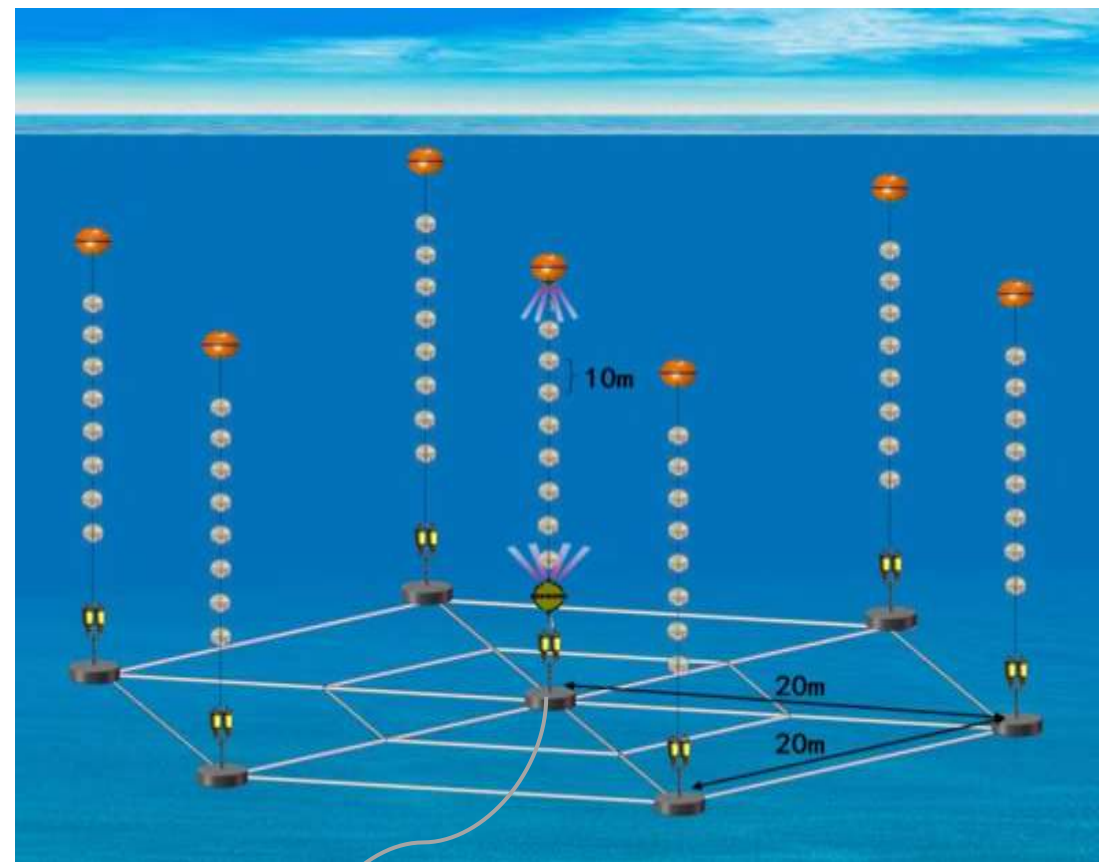
- ① 原位水体环境（吸收、散射、折射）；
- ② 探测器单元的信号特征：频率和幅度；

检验：

- ① 探测器单元的工程技术方案（防水、线缆等）；
- ② 时间刻度系统和声纳定位系统；
- ③ 大气中微子或缪子muon信号的触发判选机制；

评估：

- ① 电力功耗、数据量；
- ② 系统长期运行可靠性；
- ③ 现场投放方案。



节点



分阶段进行原型机的工作：

1. 23年2月，在中国南海两个探测器单元的短期海试
2. 24年10月，投入4个探测器单元长期运行
3. 24年底，投入四串超长水动力潜标
4. 25年年中，投放7串，实现小阵列(56探测单元)运行
5. 25初和26年初，在贝加尔湖继续投入48个探测器单元

两年内，完成HUNT项目在南海实施的可行性方案报告（初设报告）。

1. 建设 30 km^3 深海中微子望远镜，超越IceCube-Gen2，冲击天体中微子点源的首次确认。
2. 2020年，曹臻院士提出项目设想。目前，逐步建立了项目团队，并正开展多步骤的预研工作。
3. 欢迎同行加入，共谋发展。



谢 谢 大 家 ！



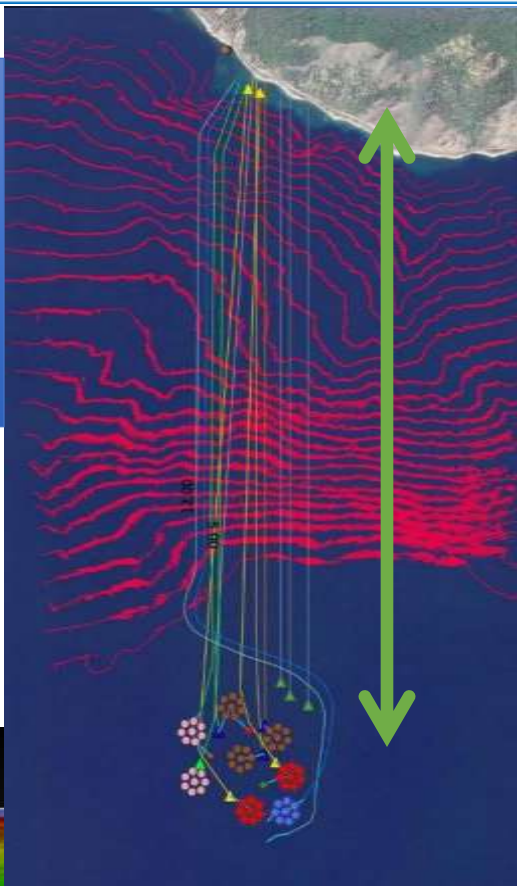
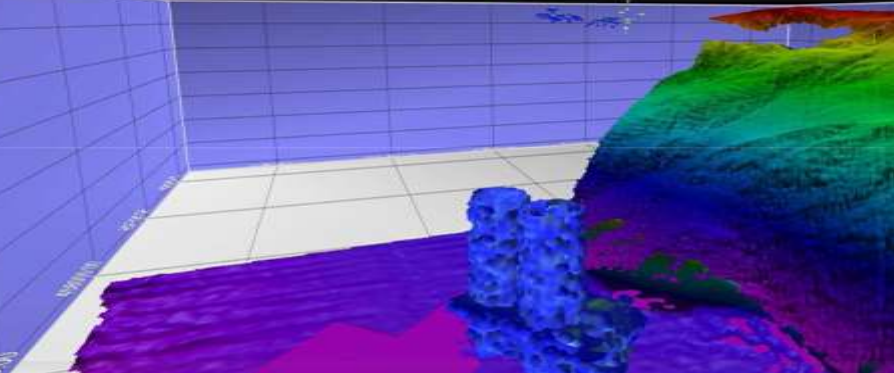
独一无二的实验站址：贝加尔湖

41

- 世界第一深湖，最大深度1600米以上
- 水质透明清澈(20-40米)
- 百平方公里湖床的高程差，小于1米
- 水体中无放射性本底
- 每年7个星期以上，结冰1米
- 每天有18小时对银河中心可观测



可在冰面上投放作业
探测器设备可维护
极大降低成本和工程难度



Lake Baikal

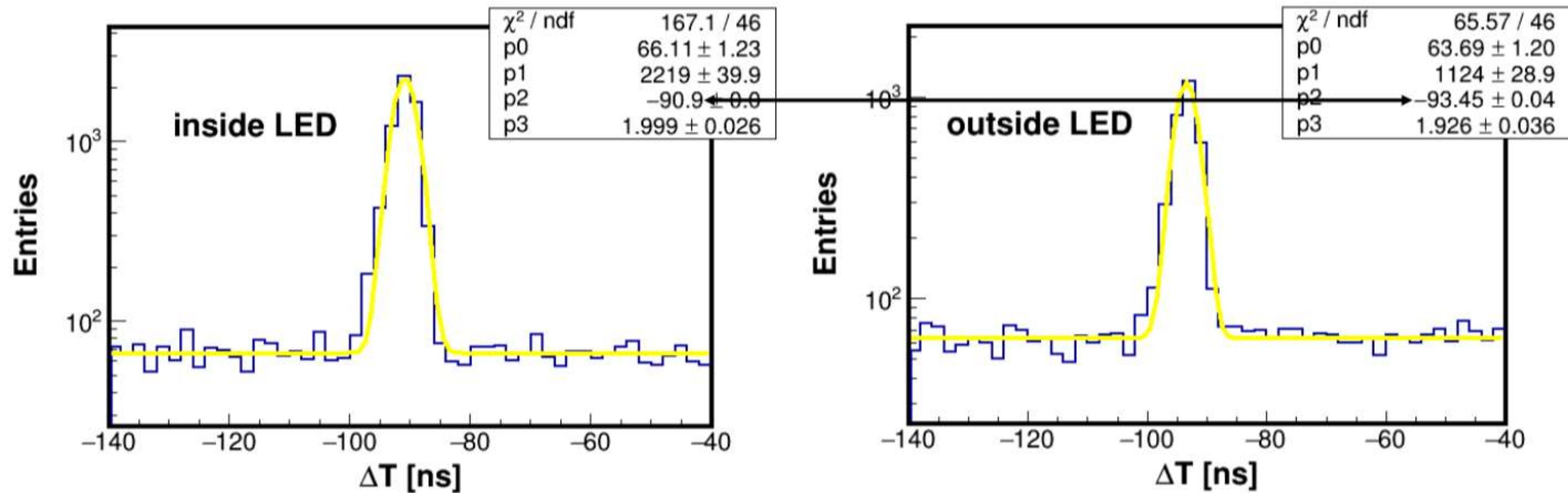
距离岸边仅3.5公里
而在海洋里，几百公里远



贝加尔斯克火车站

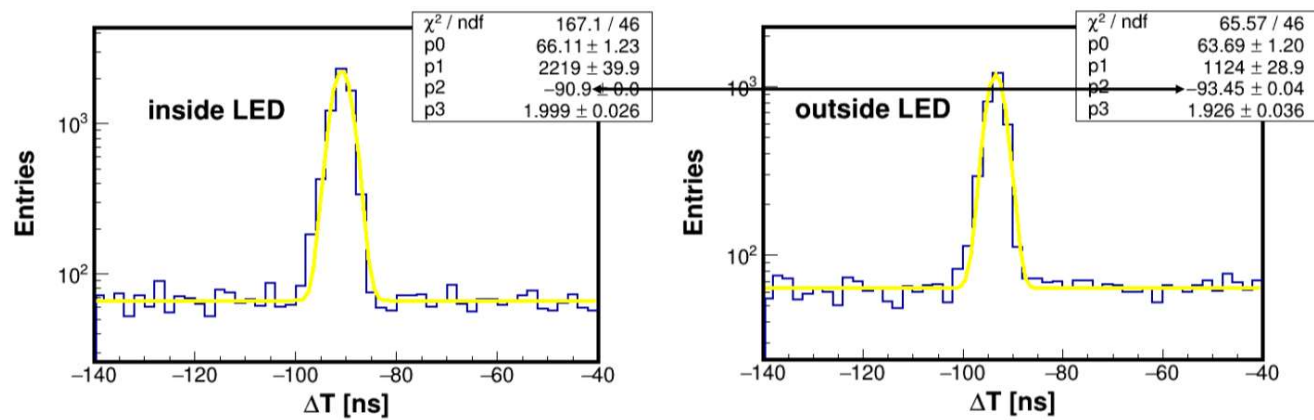
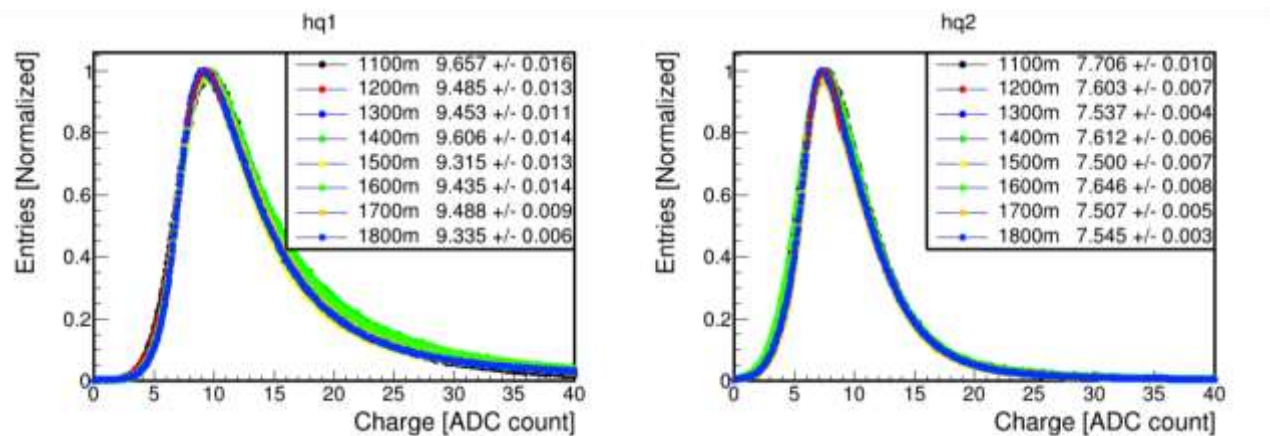


高能水下中微子望远镜 (HUNT)

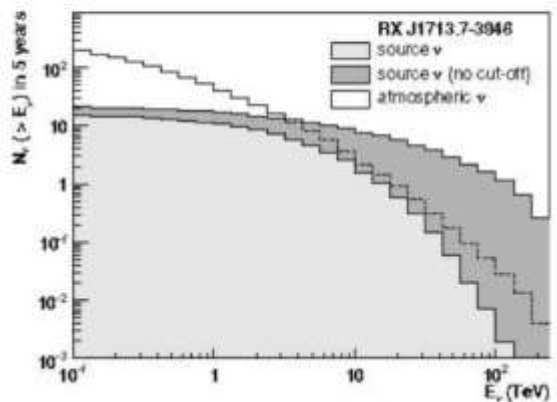
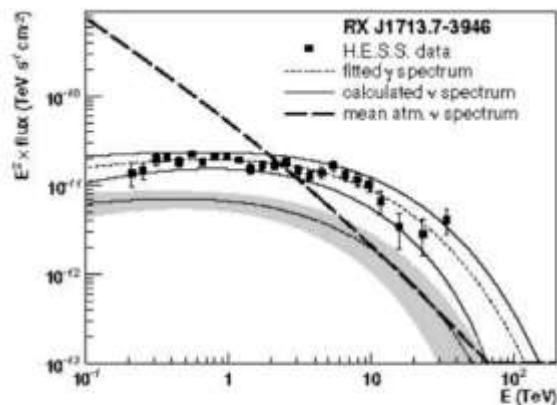




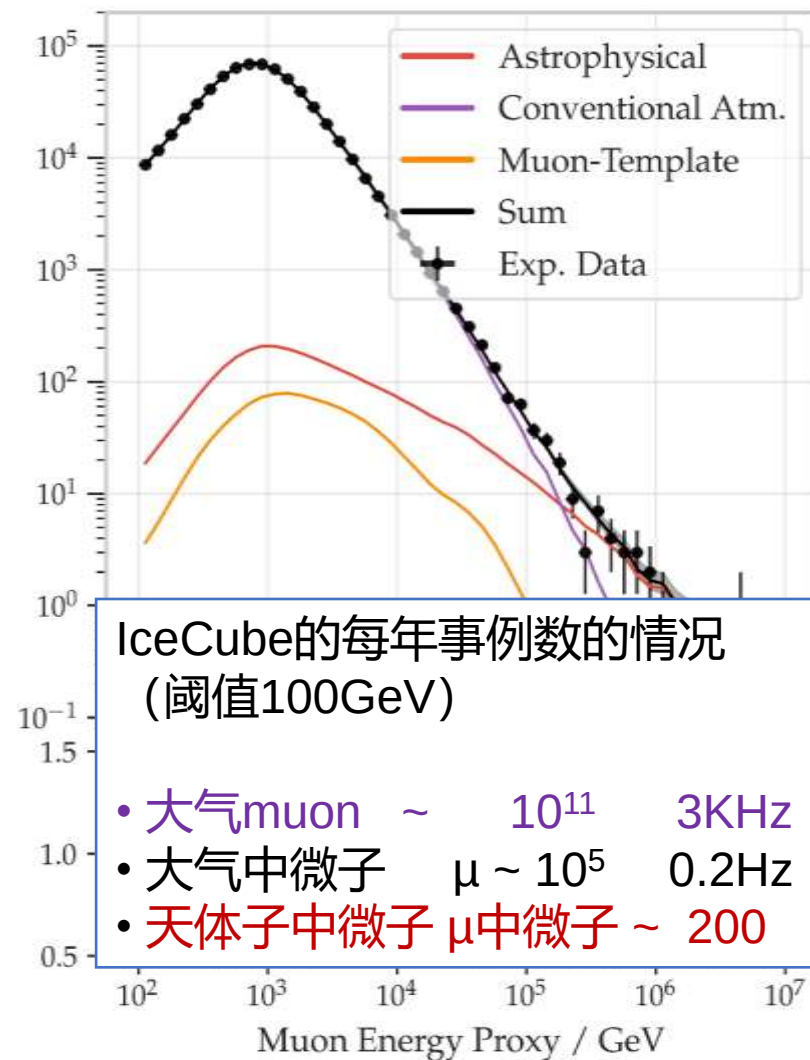
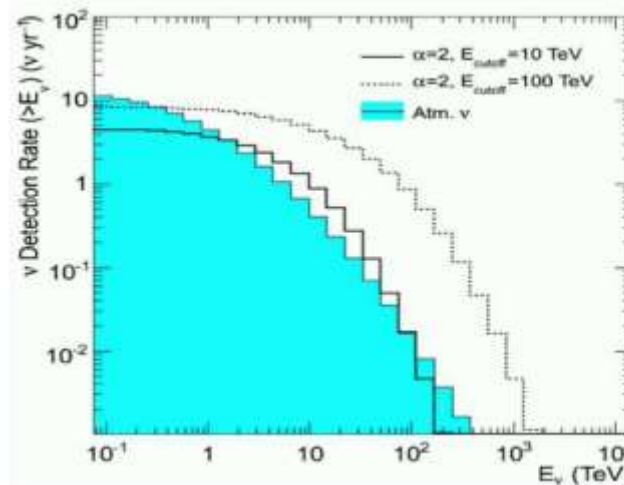
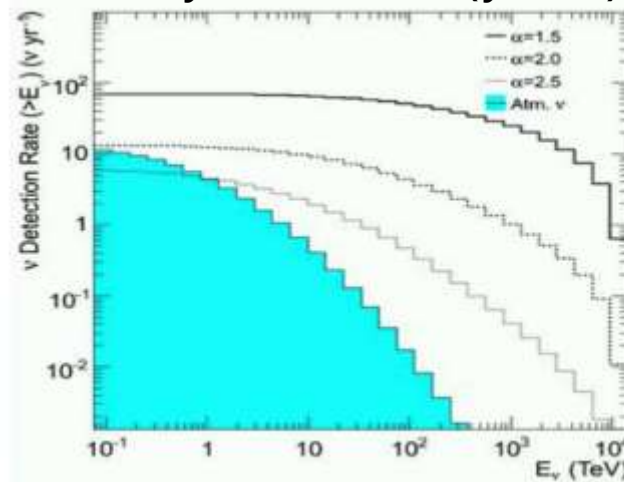
single data[th=20]



KM3NeT对某个源的事例数预估
五年测量到百余个天体中微子



All-sky event rate (year⁻¹)



从跟跑、并跑到领跑



- 历经三大科学装置，形成高能所宇宙线组。
- 职工约 50人 + 50人学生，涵盖：宇宙线物理数据分析，探测技术研发，电子学、机械工程和装置管理等。