



高能水下中微子望远镜

陈明君

中国科学院高能物理研究所

2024年7月17日 青岛

NED & CAGD 2024



- 一、科学动机
- 二、HUNT装置
- 三、项目进展



粒子天体物理领域进入多信使观测时代

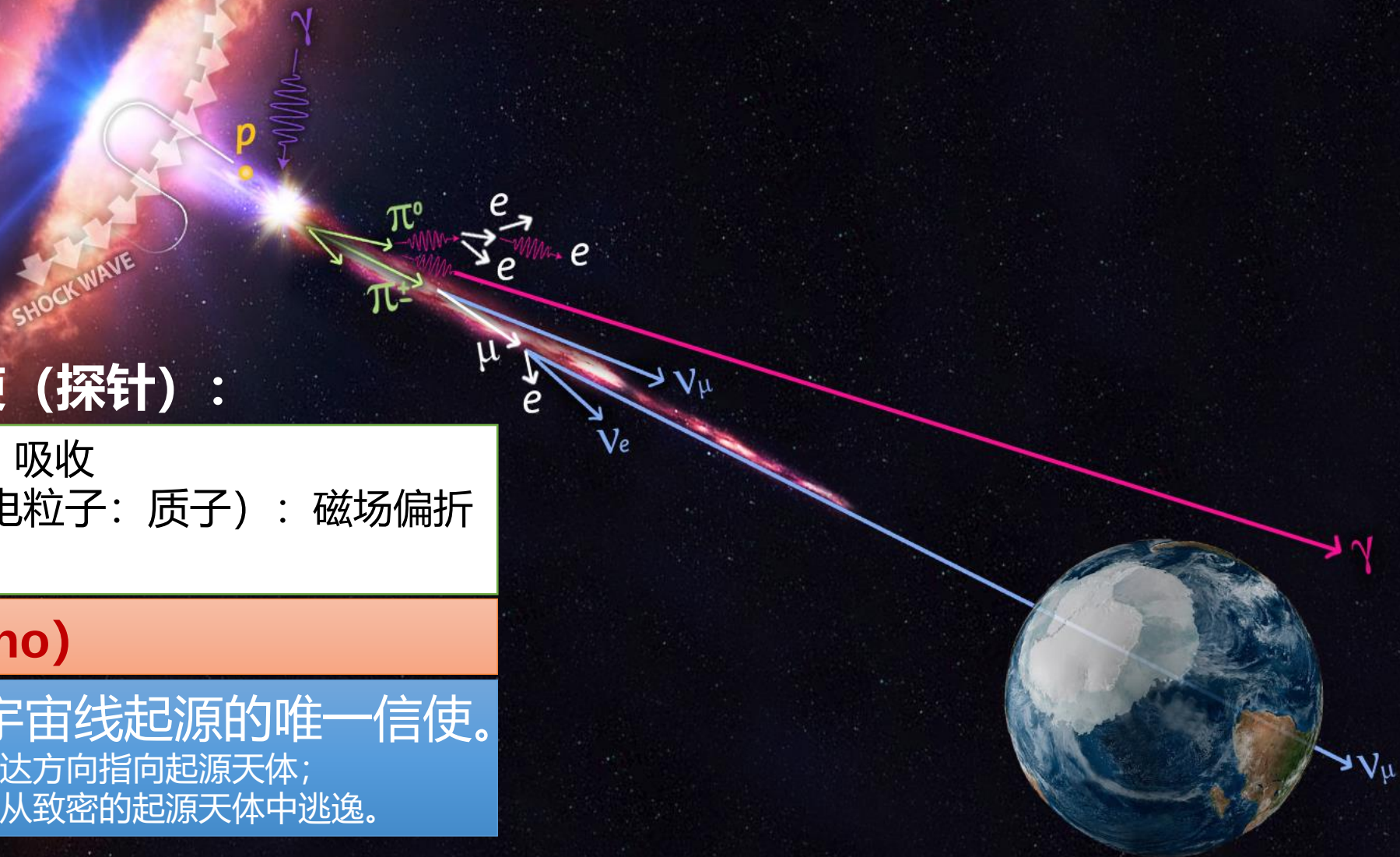
了解宇宙的四种信使（探针）：

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)

几乎成为寻找高能宇宙线起源的唯一信使。

- 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。

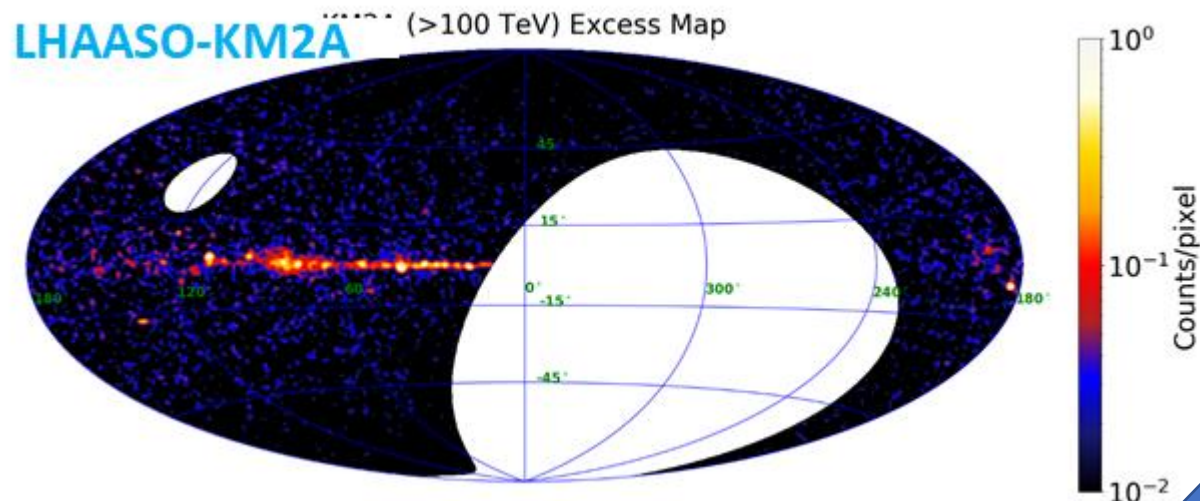




LHAASO发现银河系内有43个超高能射线源

4

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



Main process:

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

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

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

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

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

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

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

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

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！

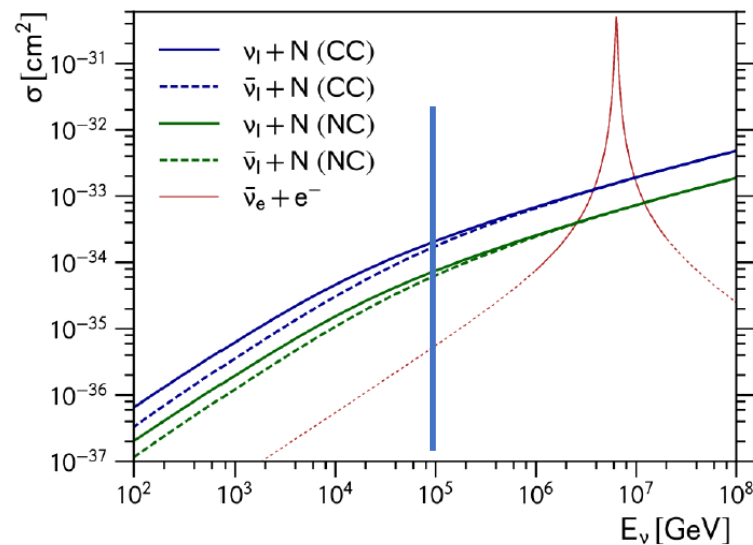
- LHAASO Collaboration, 2021, Nature, 594, 33.
- LHAASO Collaboration, 2024, ApJS, 271, 25.



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。

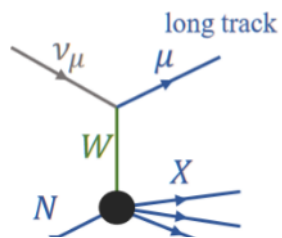


中微子极难与周围物质发生相互作用

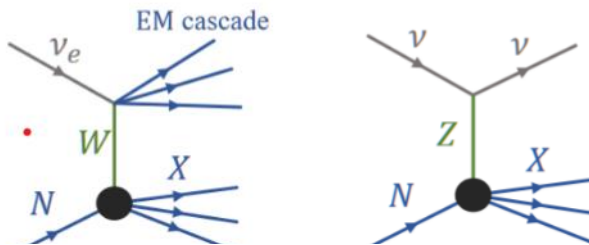
中微子事例在探测器中的三种形态

6

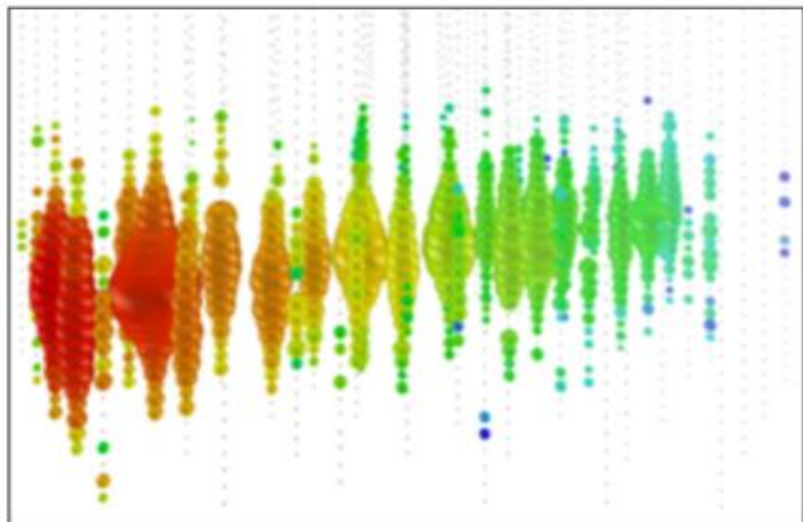
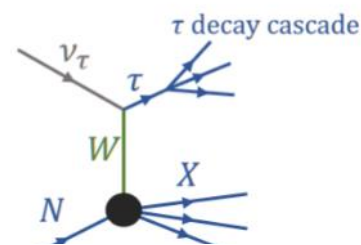
μ 中微子的带电流过程



e 中微子的带电流过程 和 中微子的中性流过程

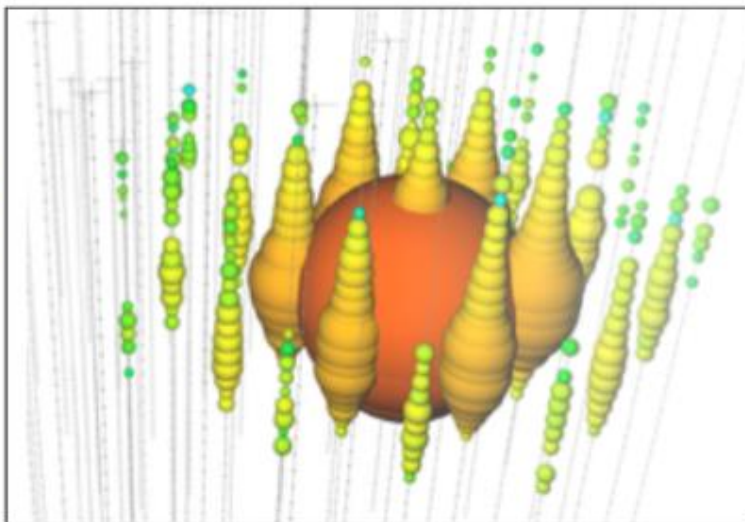


τ 中微子的带电流过程



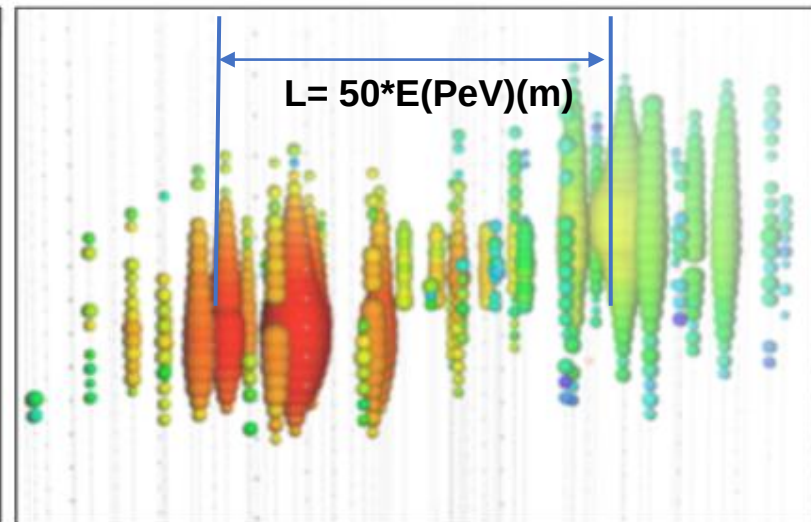
径迹型事件

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。

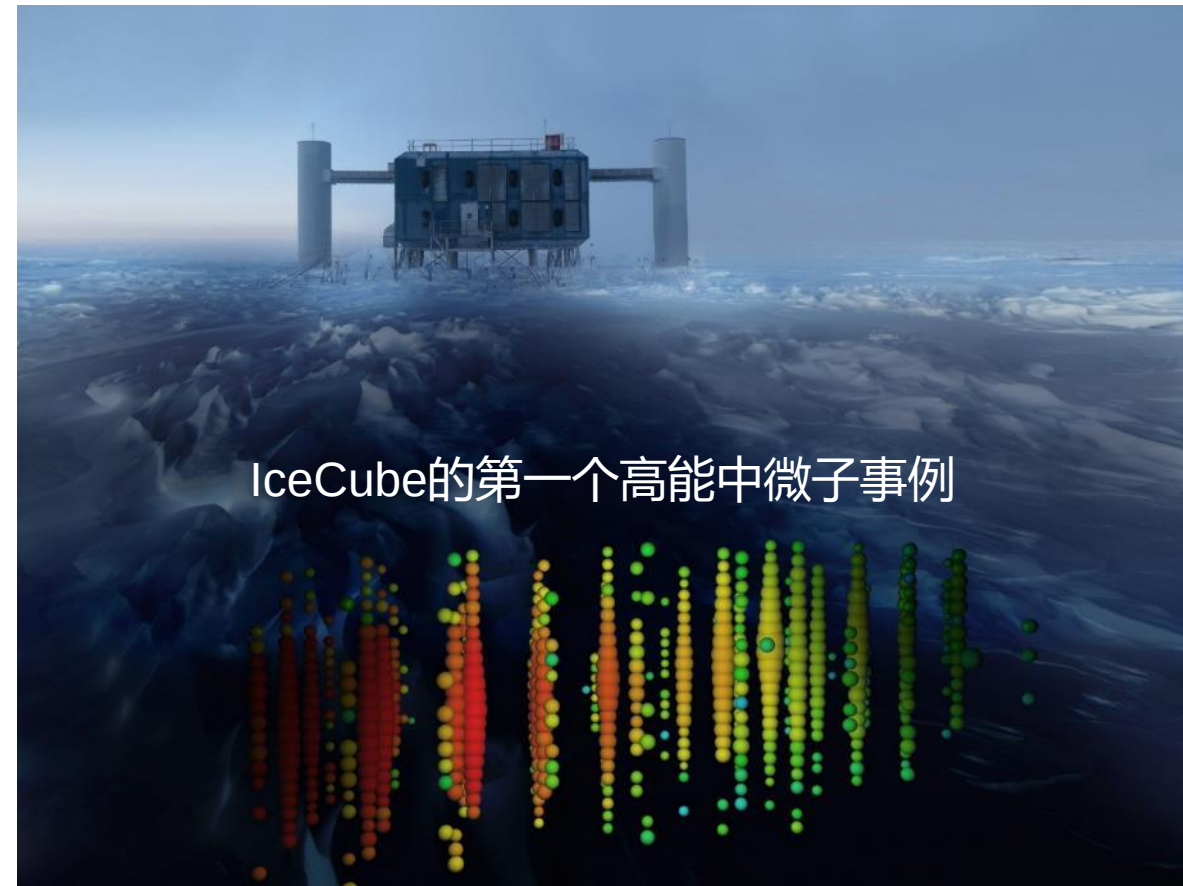


双簇射型事件

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。



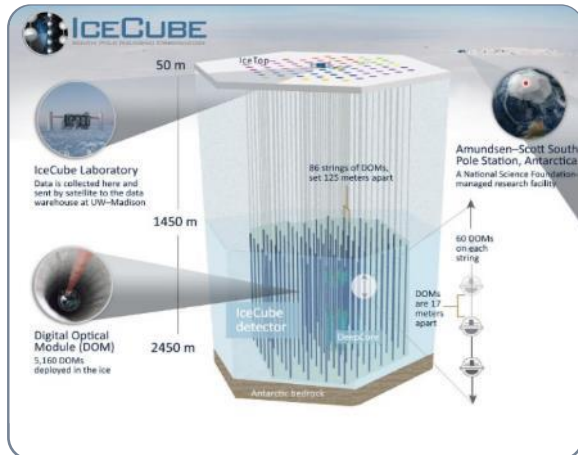
- **1976 -**
DUMAND, ANTARES, NT系列, AMANDA, IceCube, KM3NeT, Baikal-GVD,
- **2013**
IceCube首次观测到高能天体中微子。
- **2018**
IceCube观测到高能中微子 (耀变体, 3.5σ)。
- **2019**
IceCube观测到高能中微子(NCG1068, 2.9σ)。
- **2023: 银盘面有迹象发出弥散中微子, $\sim 4\sigma$**



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

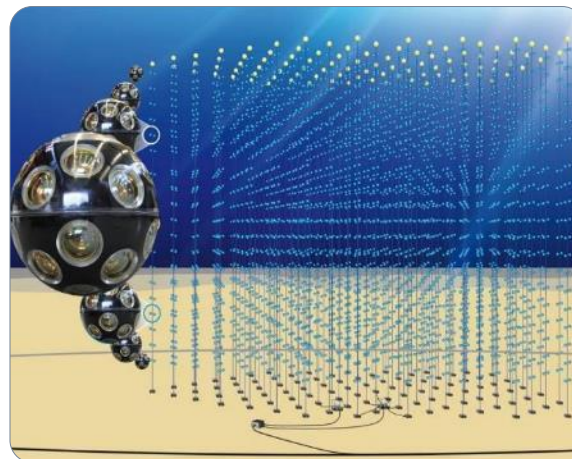
Construction from 2003 to 2010,
On-working now.

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



欧洲KM3NeT-ARCA

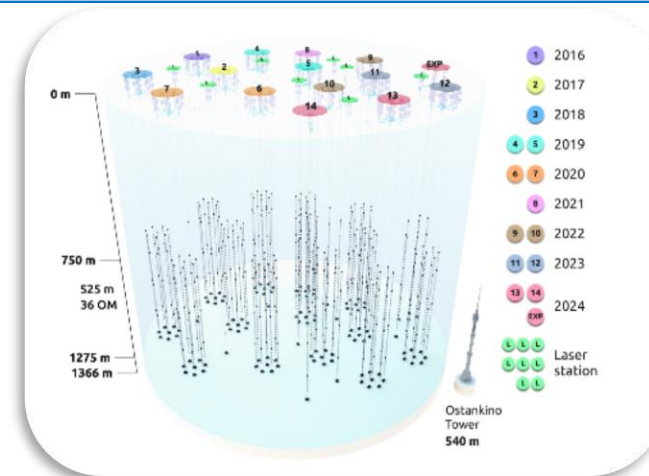
28/230 strings are deployed.

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

—

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。

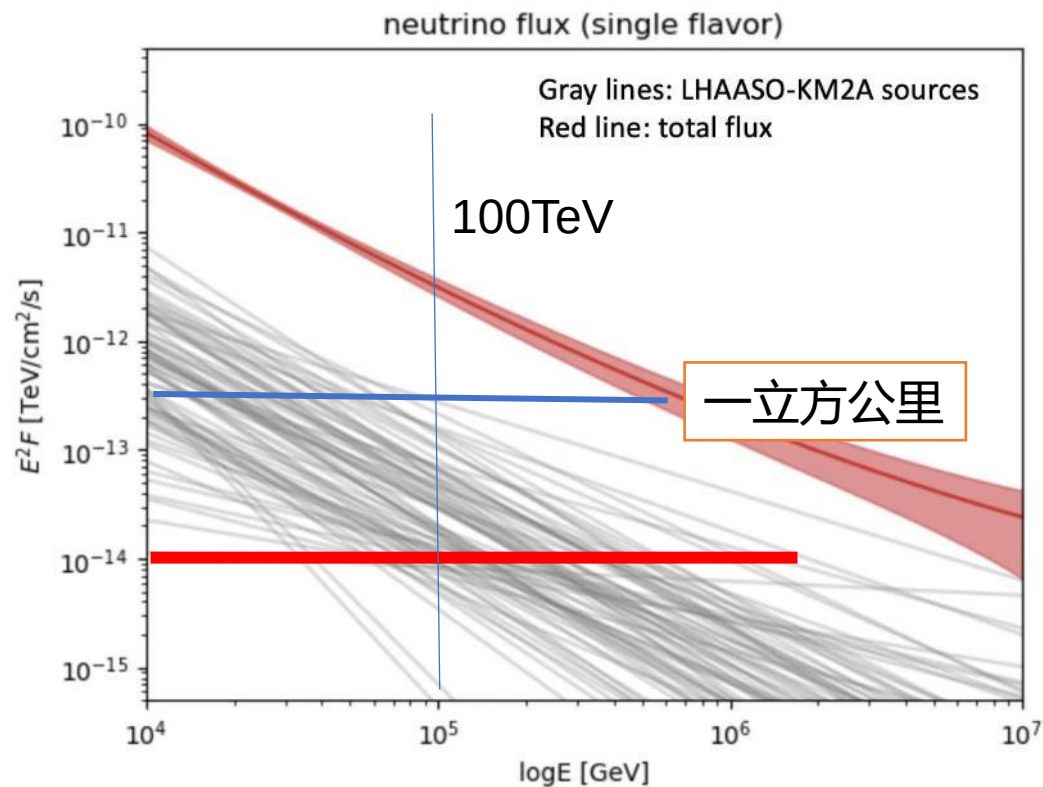


探测器体积不够大，不够灵敏！
不足以对LHAASO源的灵敏观测

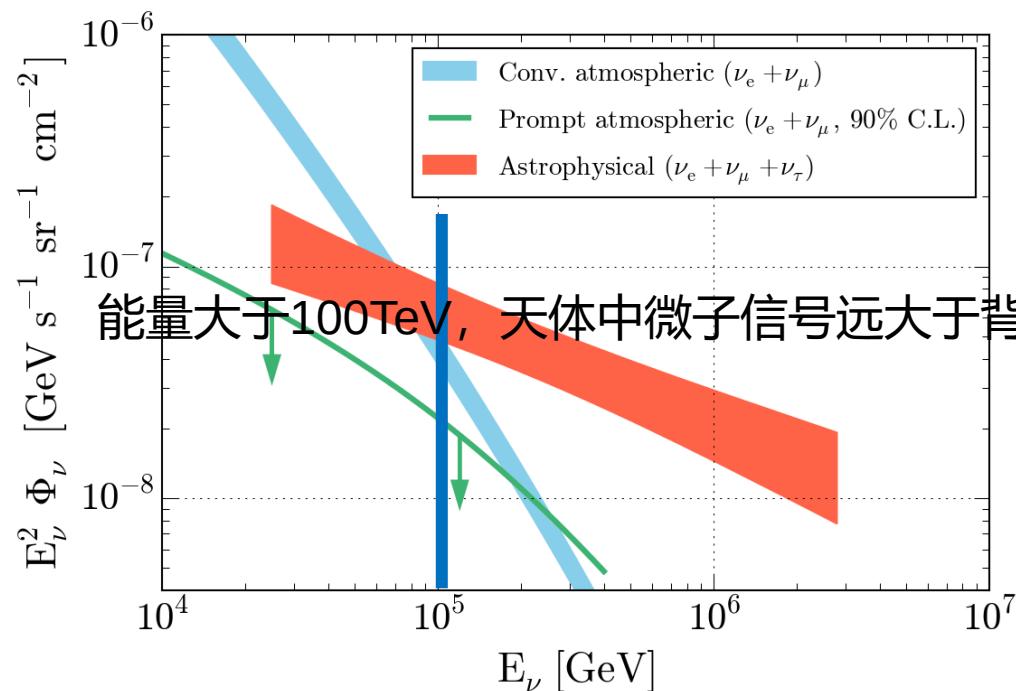


下一代高能中微子望远镜的需求

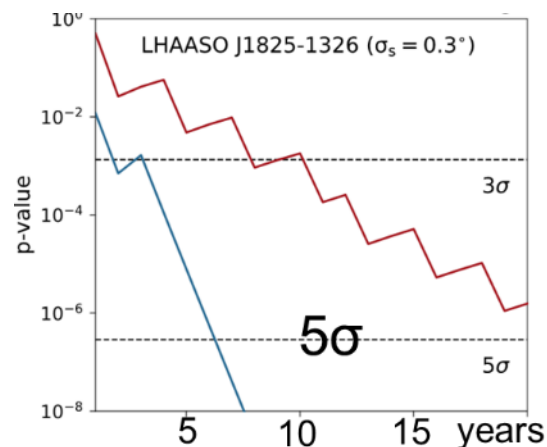
9



要设计一个至少30立方公里的探测器



Energy spectrum of the astrophysical neutrino flux



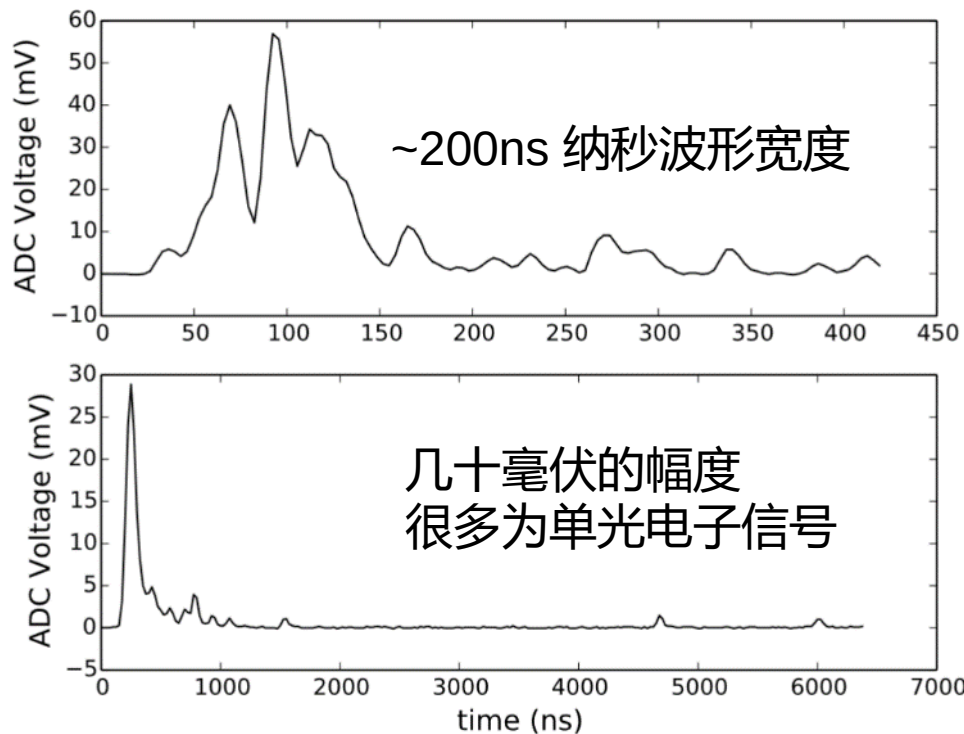
HUNT大科学装置示意图

- **探测对象：**测量LHAASO源对应的中微子
- **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
- 覆盖海域约30立方公里

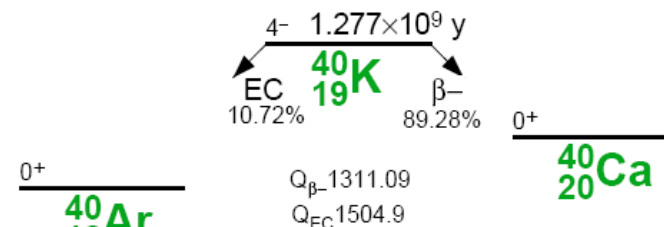
径迹型事例：作用长度为几公里到十公里级别
簇射型事例：作用长度约为20米

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

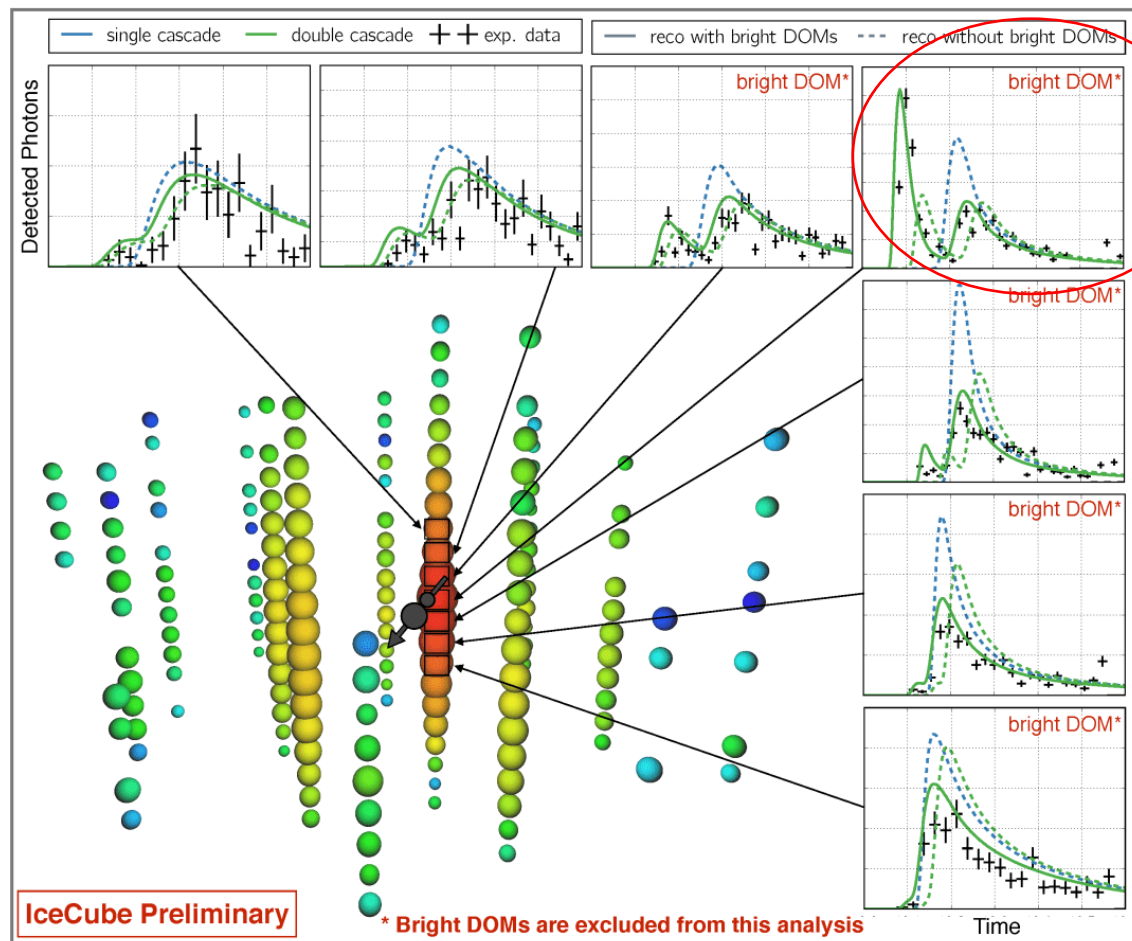


K-40的衰变

20寸PMT模拟K40噪声率：

$\sim 2.55 \times 10^5 \text{ Hz}$

First detection of candidate astrophysical tau neutrinos

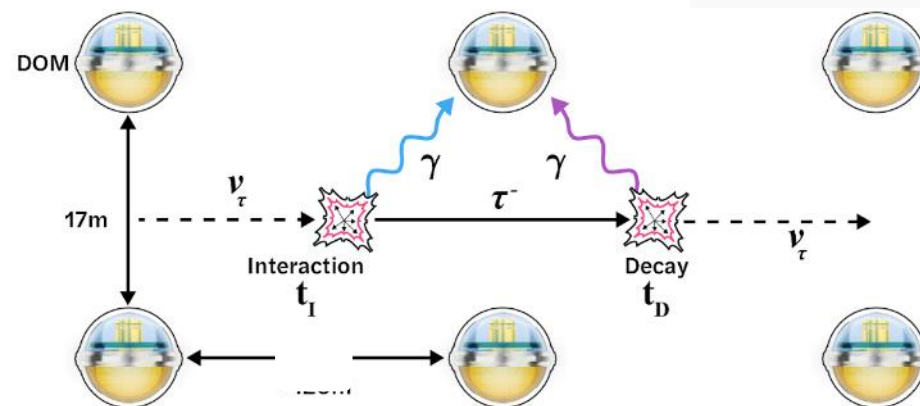
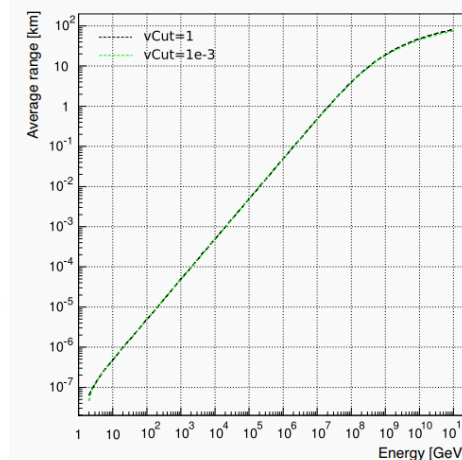
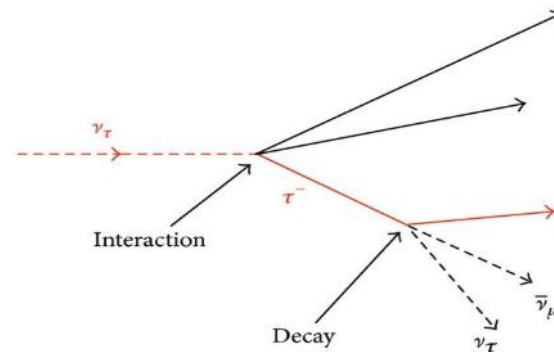


7.5年数据只发现两个疑似 τ 中微子事例 (2.8σ) !

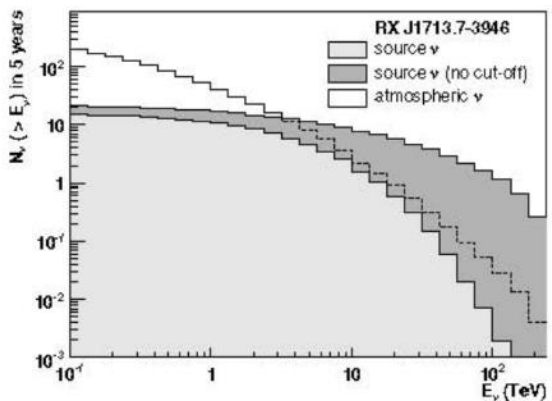
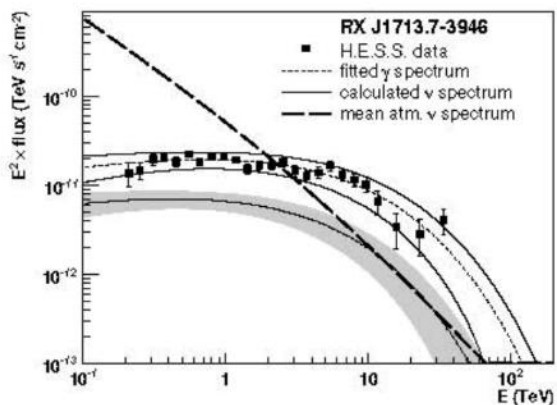
双簇射型事例

约300ns的波形宽度。
要分辨 τ 中微子，必须波形采样！

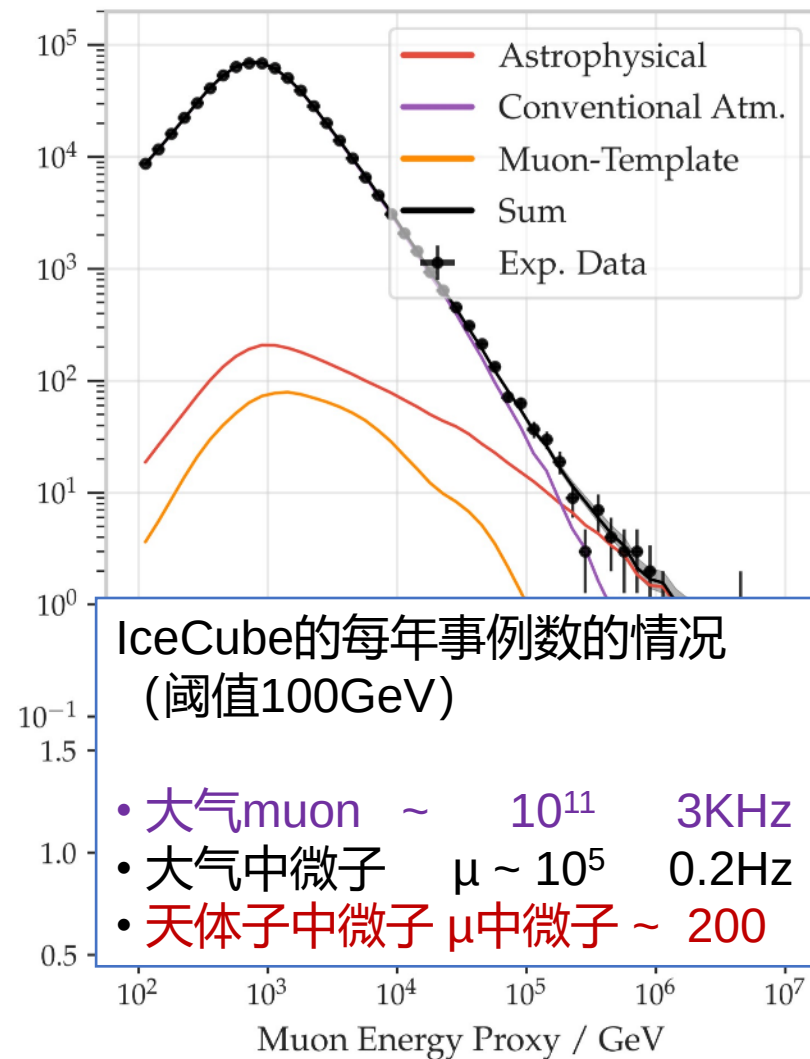
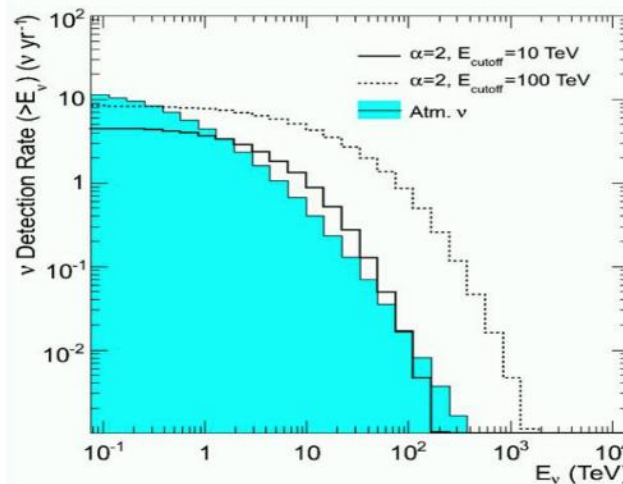
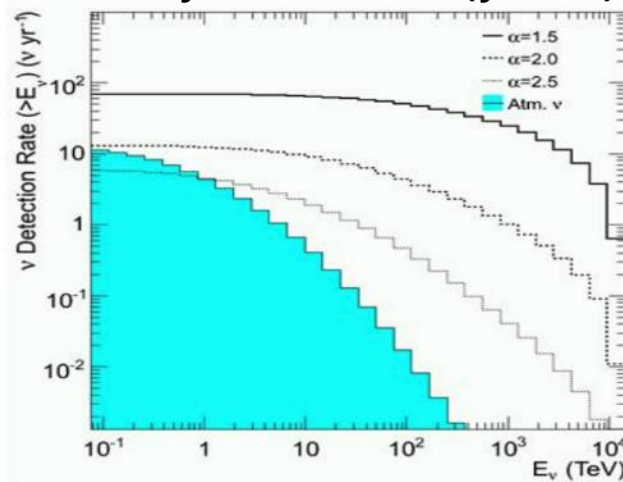
至少200MHz的FADC。



KM3NeT对某个源的事例数预估
五年测量到百来个天体中微子



All-sky event rate (year⁻¹)

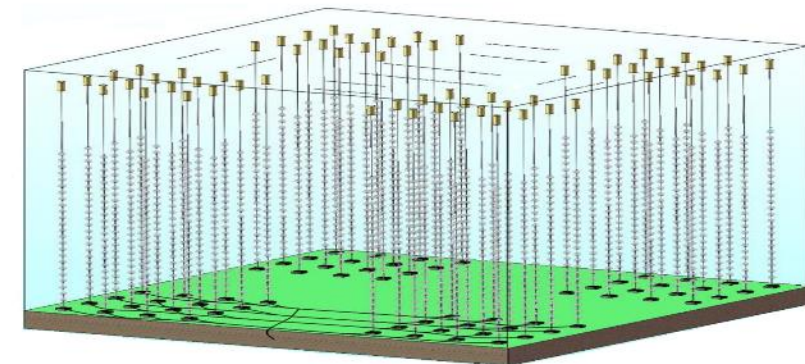




HUNT探测器技术指标

14

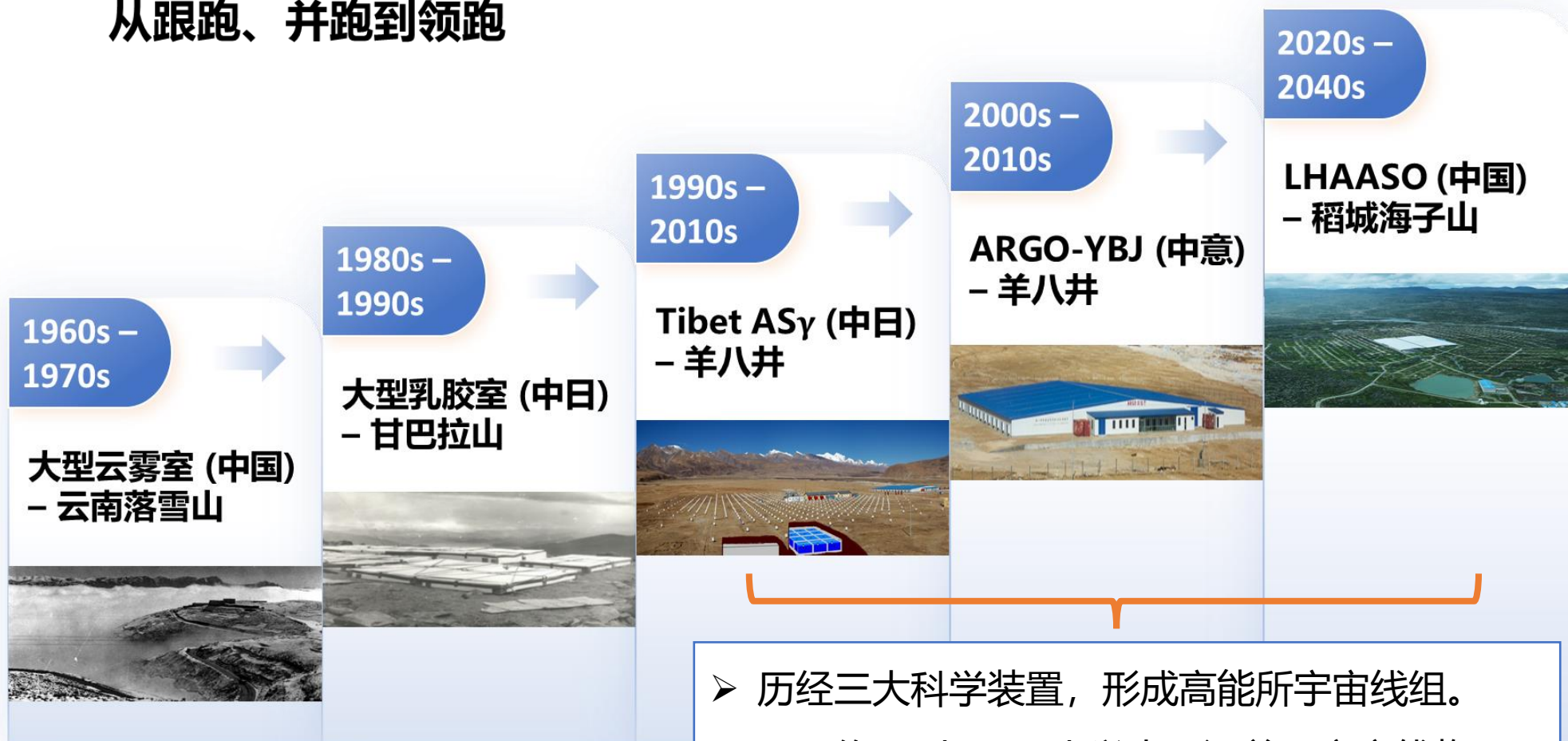
条目	指标
有效体积	30立方公里
光电倍增管	可分辨单光电子; 1 – 2,000光电子的动态范围
电子学	2ns/point 的波形采样, 500ns波形窗口; 满足大动态电荷输出
时间测量精度	~1ns
事例触发率	~5KHz
数据存储量	200MB/s
用电功率	~500KW



- **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.



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。



HUNT项目团队

16

High-energy Underwater Neutrino Telescope(HUNT)

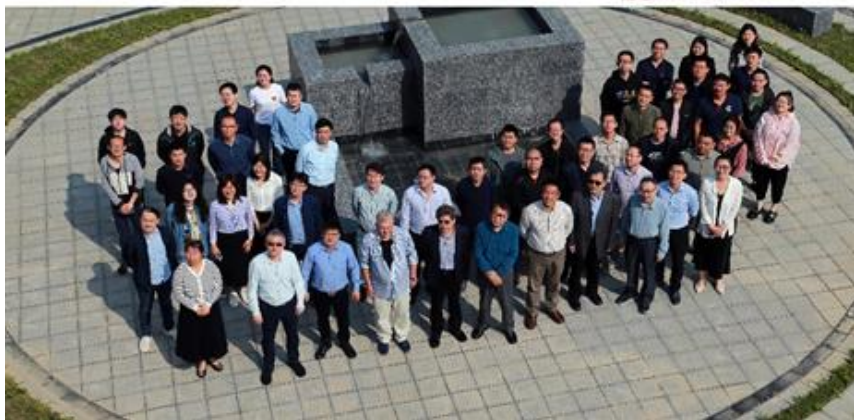
国际上以俄罗斯Baikal-GVD合作组为主。

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



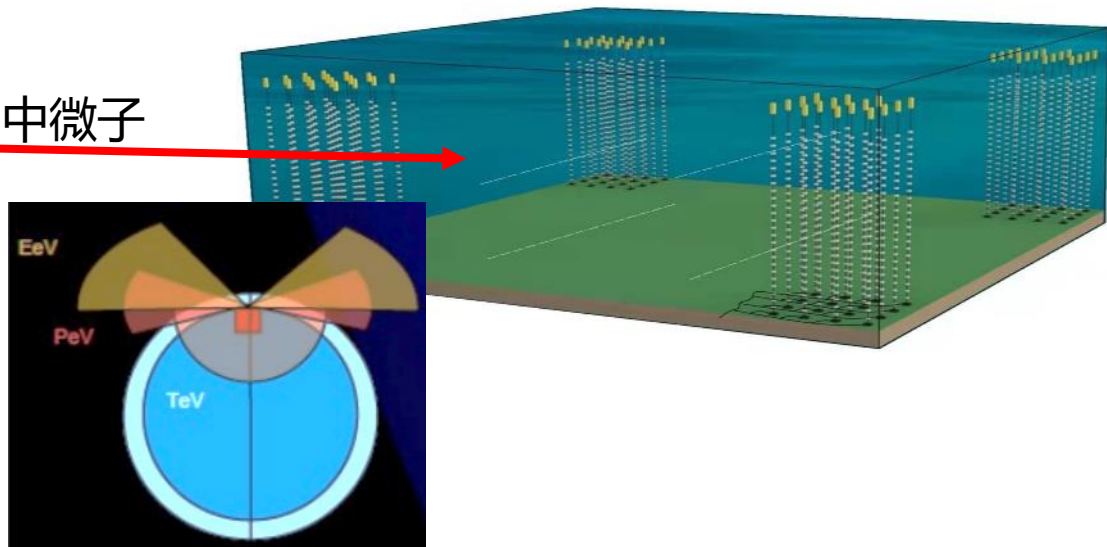


探测器的布局待优化

18

30立方公里 / 串间距150米 / 串长度1公里以上

中微子



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。

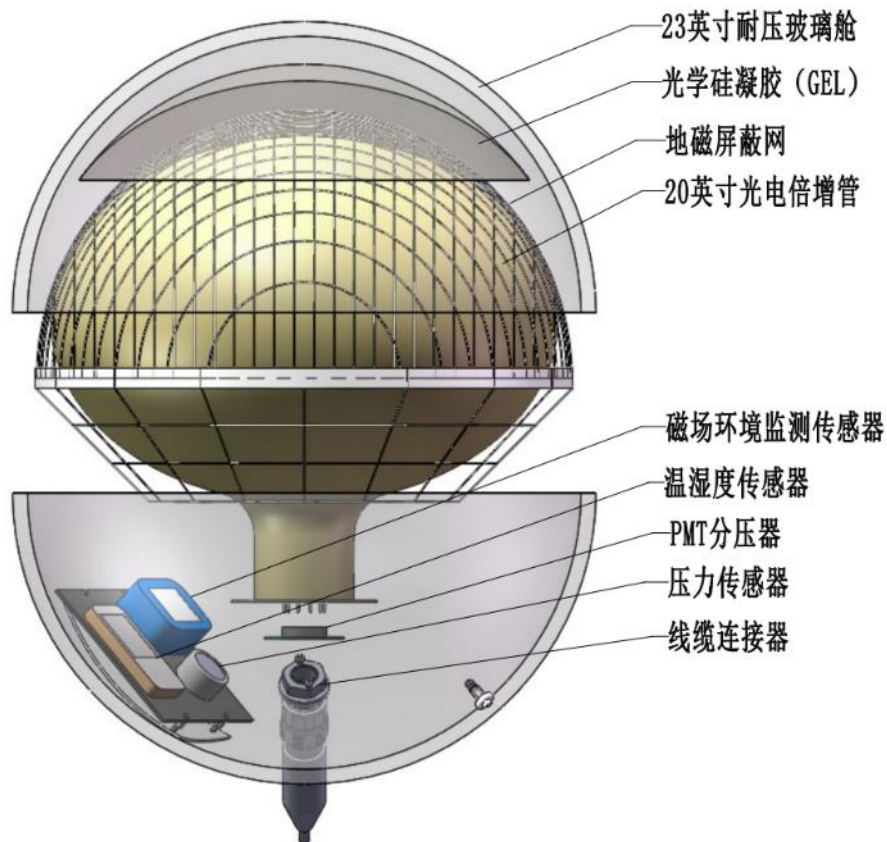
6公里见方

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)





20英寸超大尺寸的光敏探头

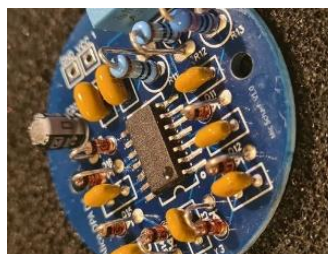


3、8 or 10-inch

追求探测器单元的简单、可靠，成本可控！

- 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 < 10us
- 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**

即将在内陆湖开展湖试实验。



声信号发射电路

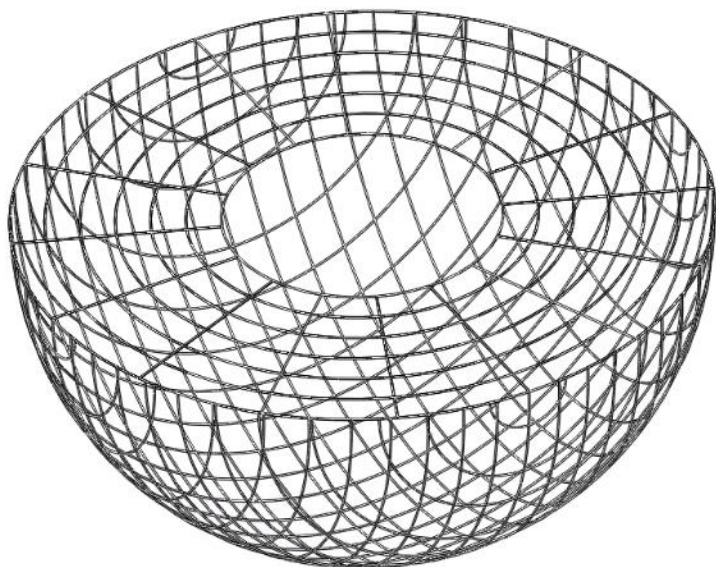


声信号接收电路



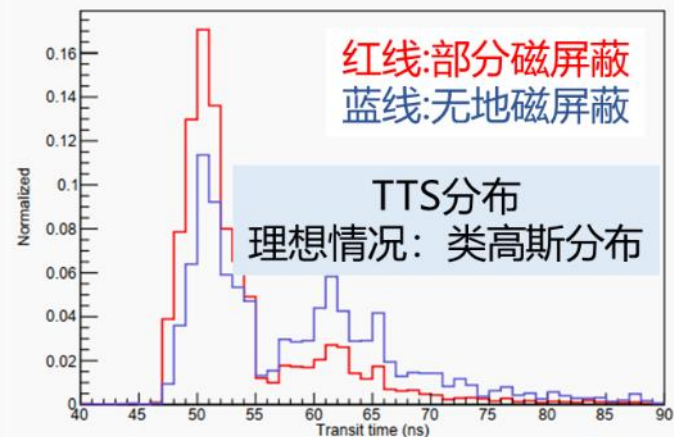
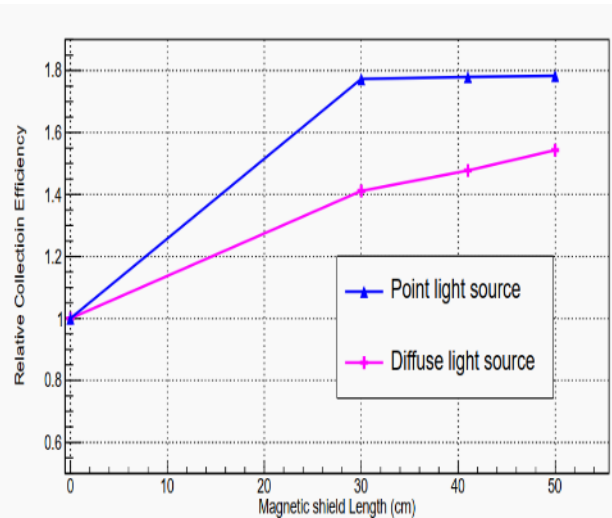
声信号处理与定位解算电路

地磁严重影响PMT收集效率和时间性能



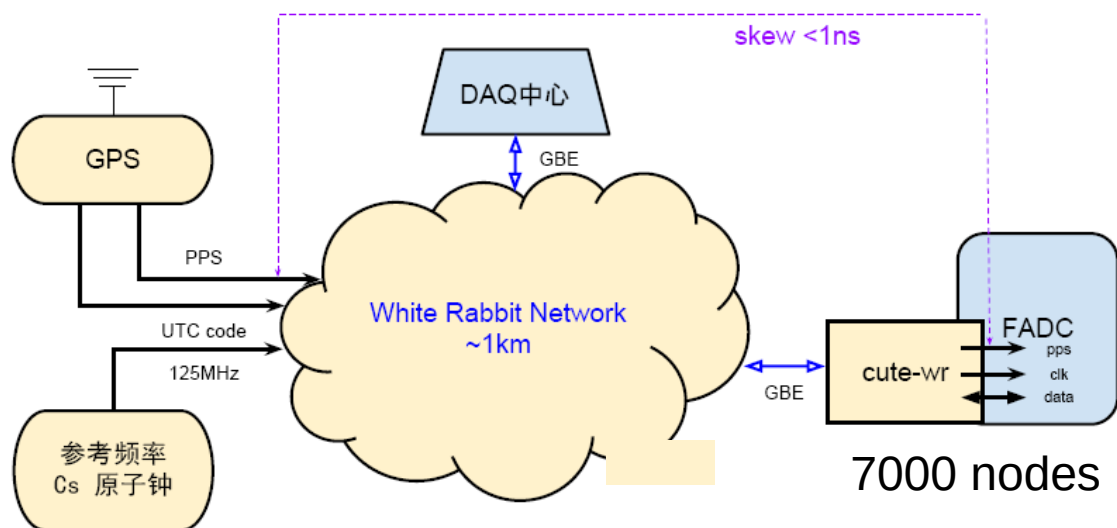
- 寻找高磁导率材料：坡莫合金
- 通过COSMOL软件，建模设计
- 需要大型充氢气退火消磁的设备

不同磁屏蔽长度条件下，
相对探测效率变化。



10%!



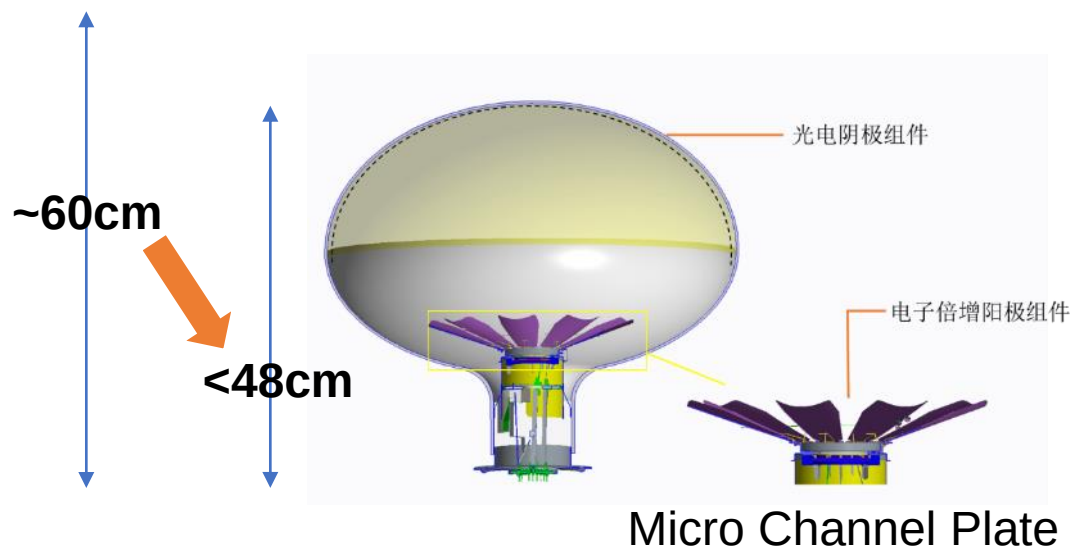


- ◆ 在LHAASO，实现了 > 1km范围内，7000多个节点，精确时钟同步 (<0.3 ns) ；
- ◆ 结合FEE可在每个时钟节点对hit加入绝对时间信息。

- 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。

- 新短轴向20英寸PMT

国产、单光子探测灵敏



Ten centimeters shortened.

- 超大型23英寸耐压玻璃舱

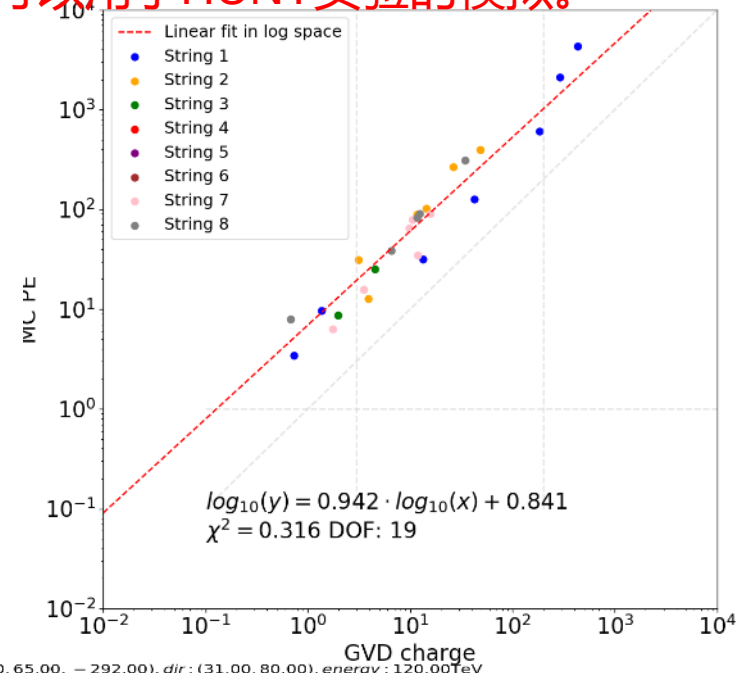
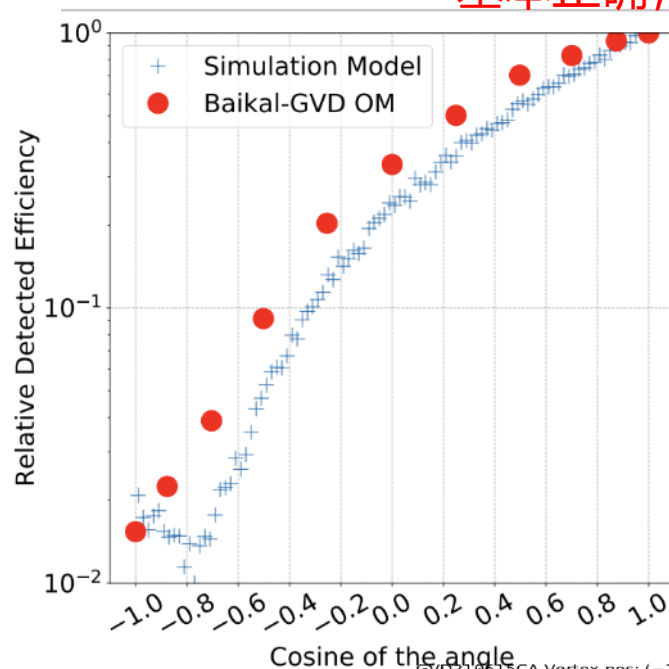
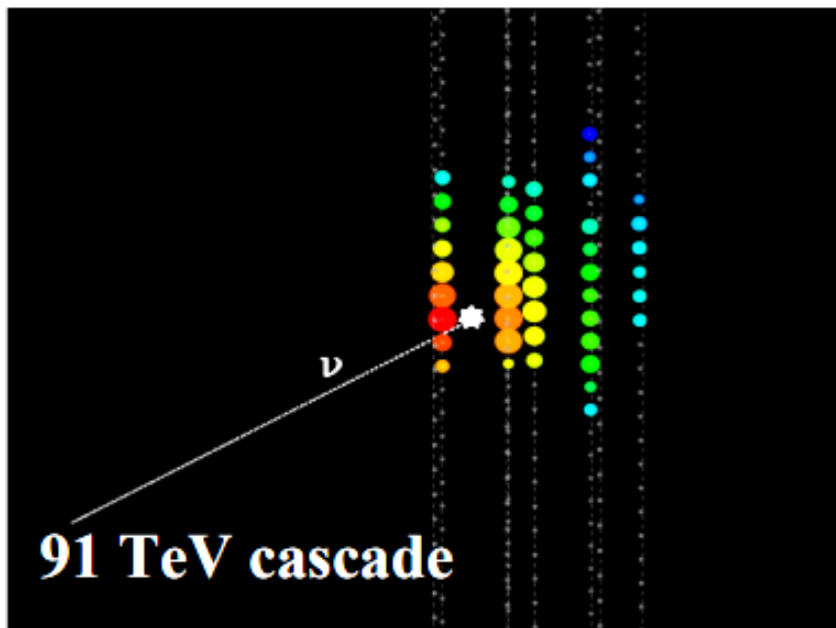
国际上最大的深海耐压玻璃舱



Passed 50Mpa pressure test.

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.Avrorn³, Zhen Cao(曹臻)^{1,2,4}, Mingjun Chen(陈明君)^{1,4}, Peiyuan Chu(褚培元)^{1,2},
Zh.-A.M.Dzhilkibaev³, Bo Gao(高博)^{1,4}, Tianqi Huang(黄天奇)¹, Jiali Liu(刘加丽)^{1,4}, Ying Qi(齐莹)^{1,5}, Xiaohao
You(游晓浩)^{1,4}, and D.N.Zaborov³

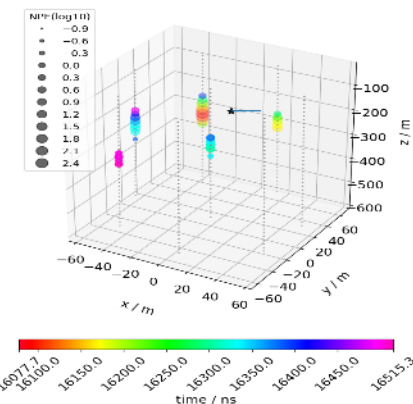
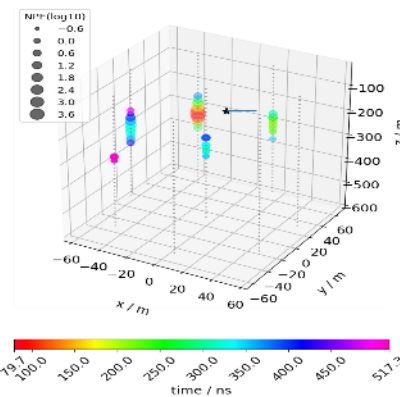
¹Key Laboratory of Particle Astrophysics Experimental Physics Division & Institute of High Energy Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

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。

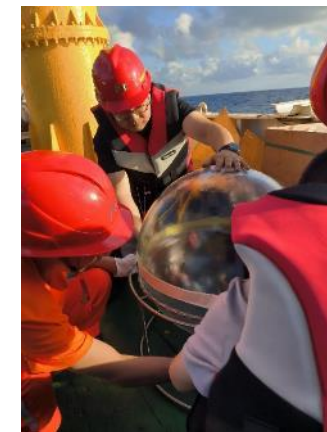


中国南海

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。

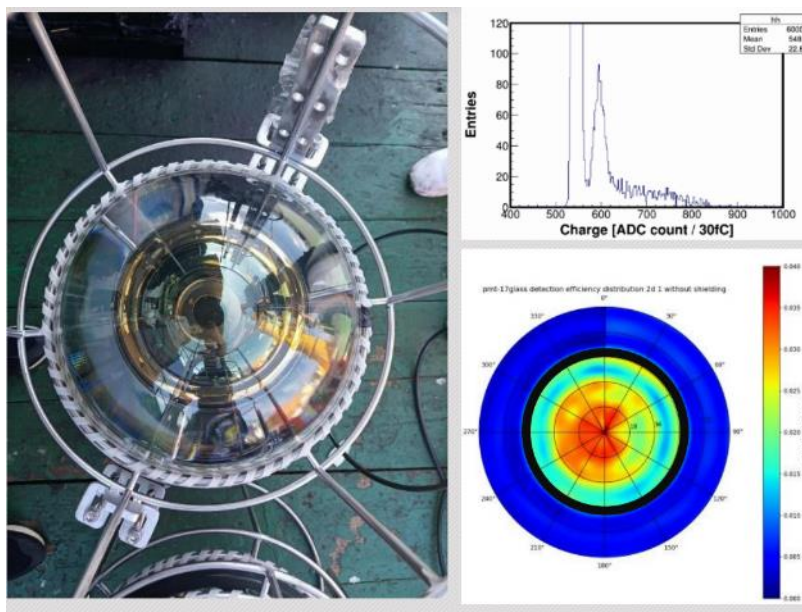


LED Calibration system

Two DOMs with 8inch PMT

Gamma spectrometer

23inch glass sphere

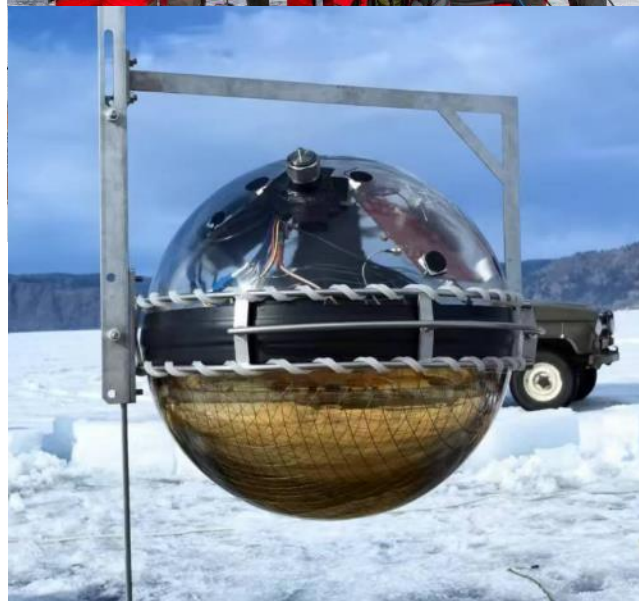
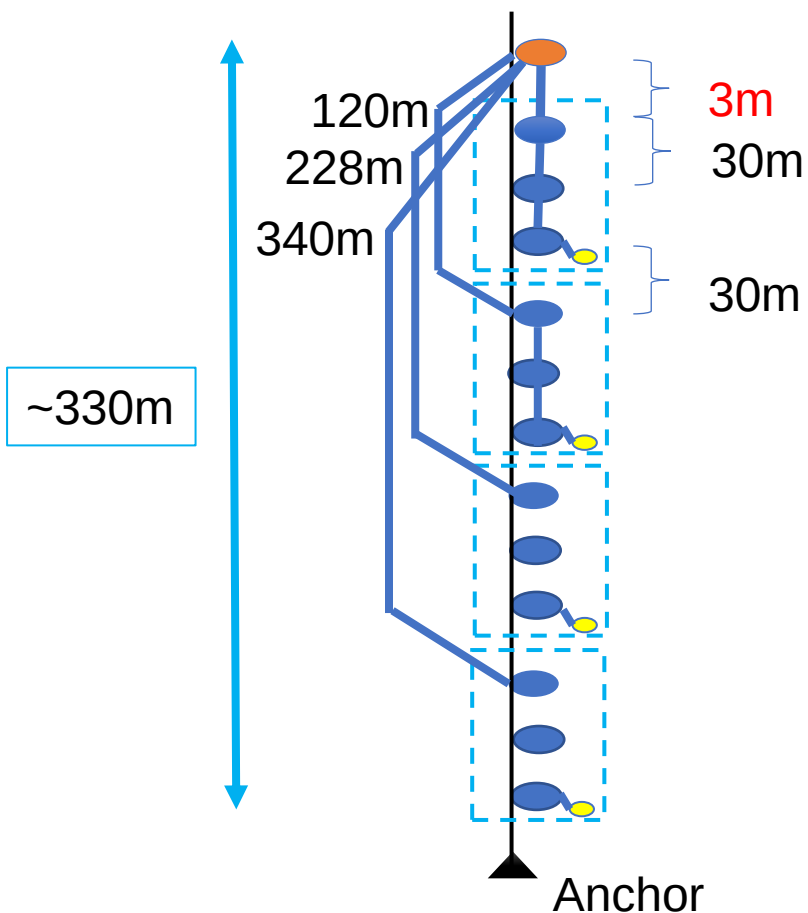


海试成果：

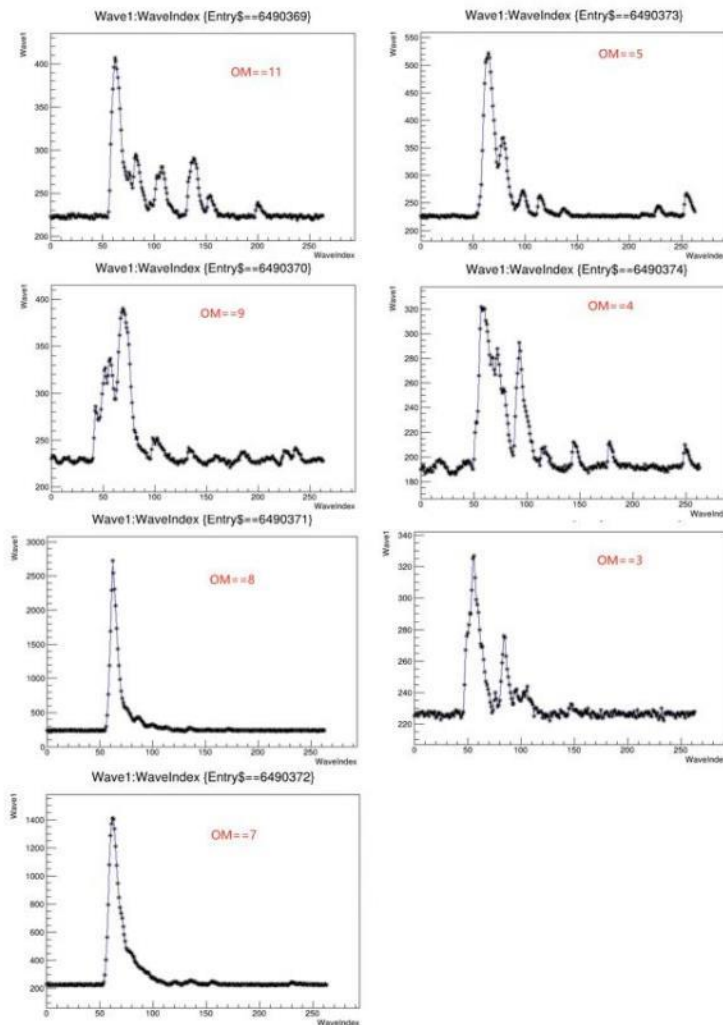
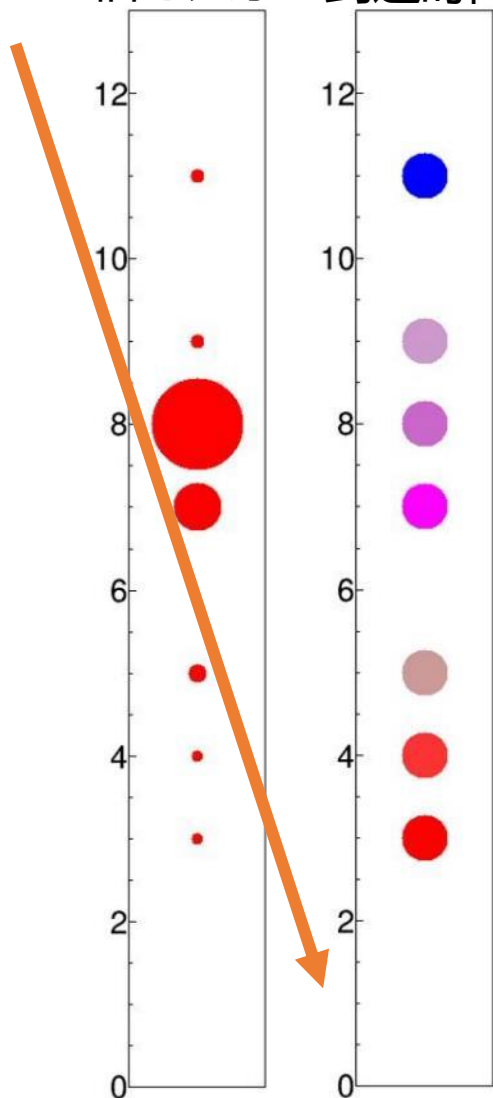
1. 1800米处，三套探测器系统长时间测量
2. 1800米和1100米，低本底伽马辐射原位测量
3. 验证了四套玻璃舱装置的防水封装工艺
4. 检验了长距离LED时间刻度系统
5. 国产化23英寸玻璃舱的耐压测试

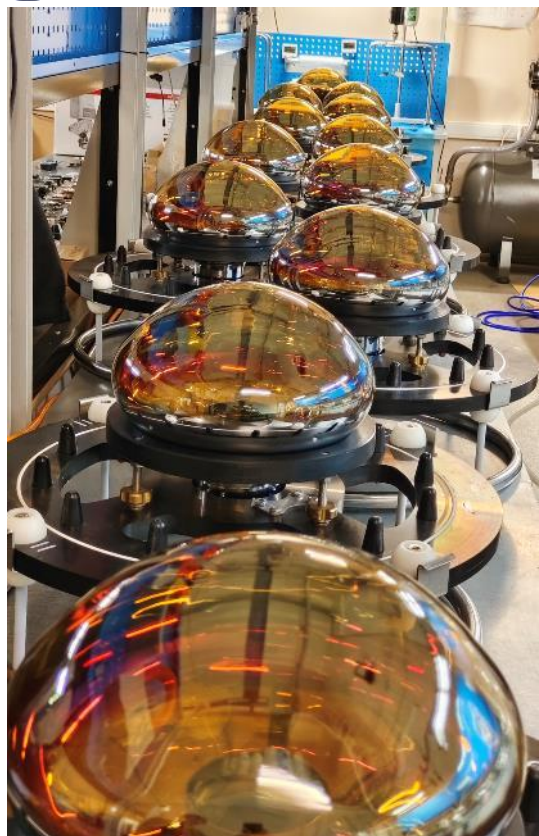
*得到中科大曹平团队的支持

- 1300米，投放了12个20英寸PMT，4个LED标定球，1个机箱。
- 还将投放48个探测器单元。

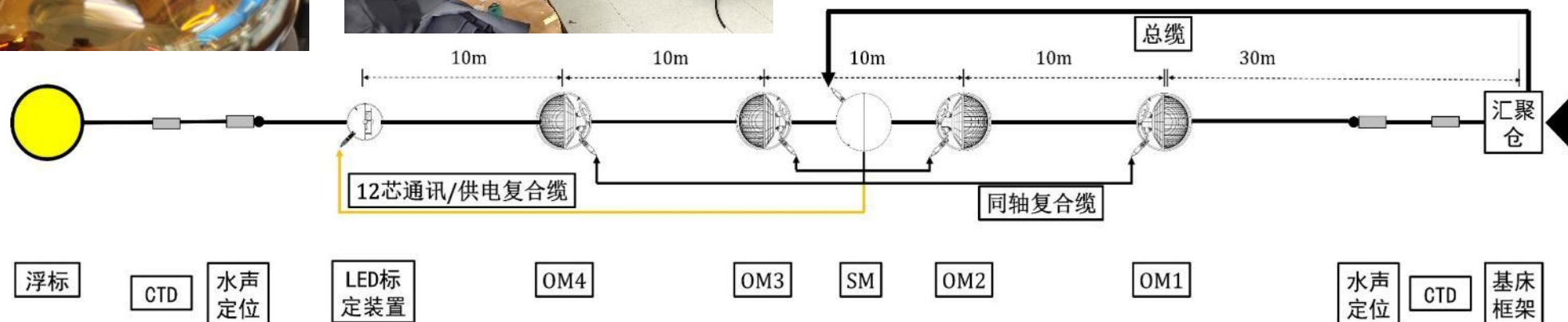
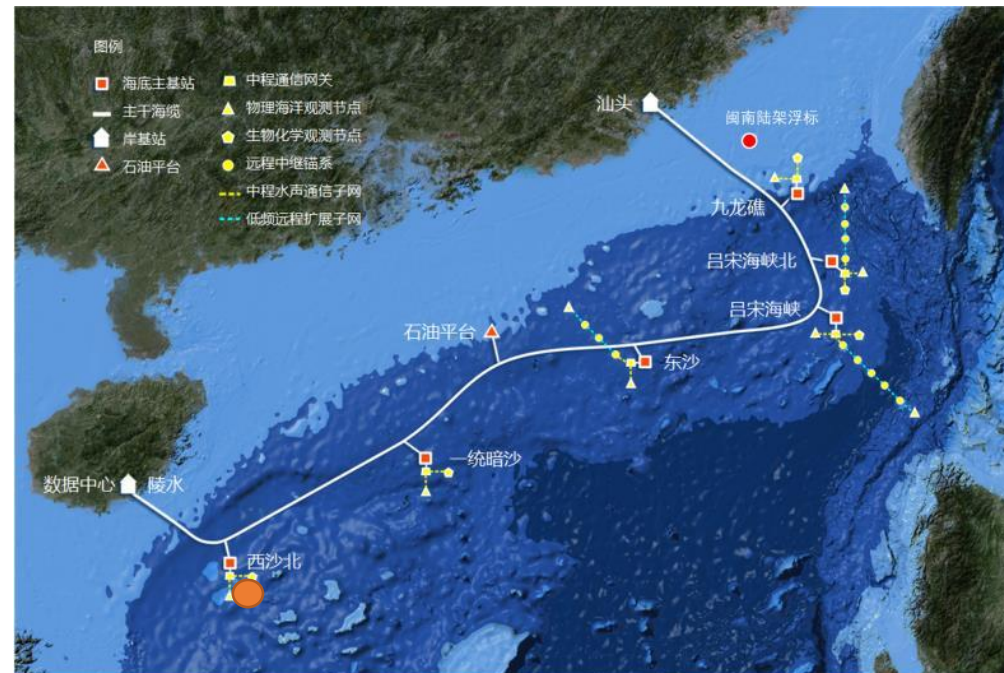


信号大小 到达时间





依托中海大和中科院声学所



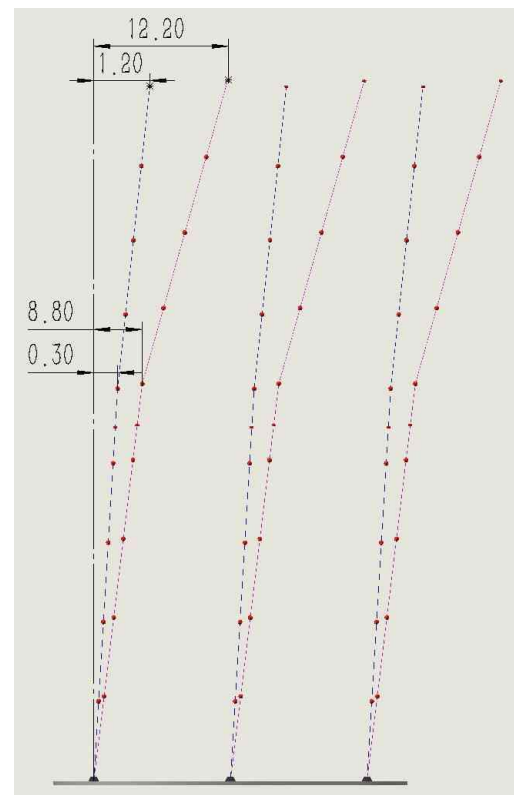
目的：

- 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。



- 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 水体环境
- ② 探测器单元的信号特征：频率和幅度

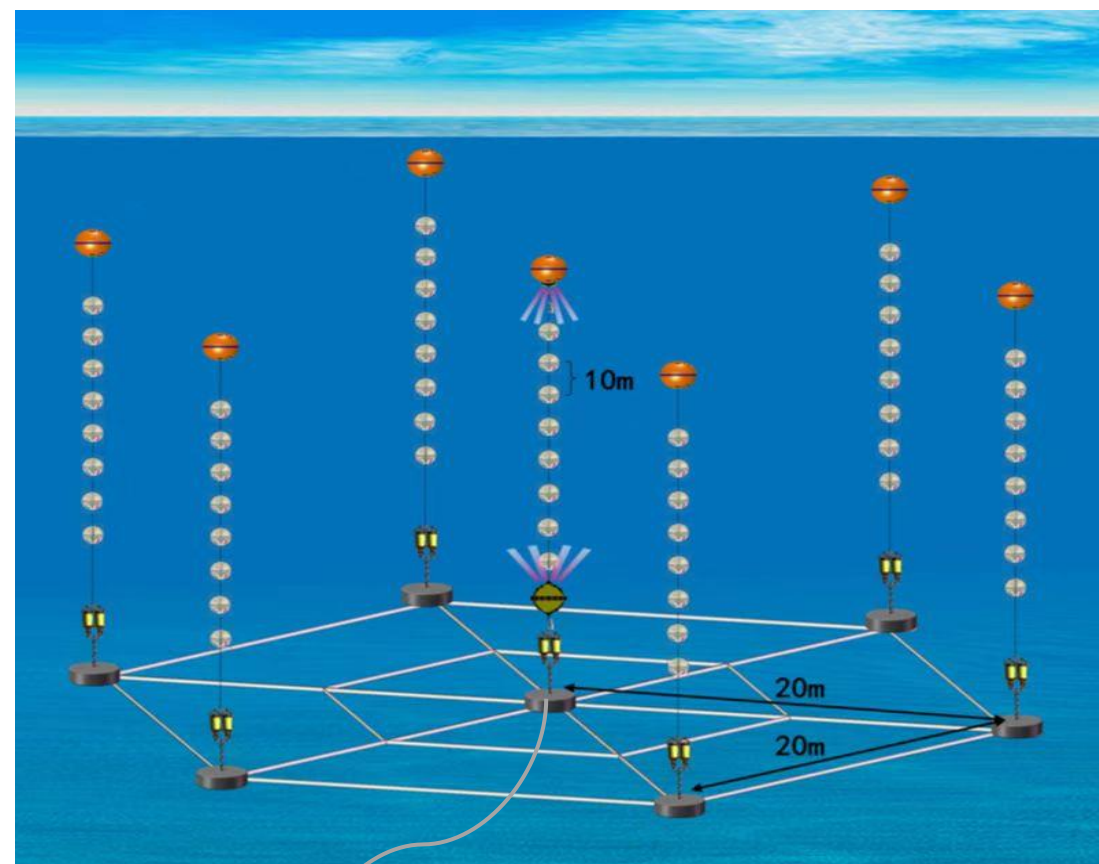
检验：

- 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 电力损耗、数据量；
- ② 长期检验系统的可靠性；
- ③ 现场投放方案。

总体方案示意图



节点



分步骤进行原型机的工作：

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，实现小阵列运行
5. 25和26年，在贝加尔湖投入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 ！



宇宙线起源是关于宇宙构成之重大科学问题

37

□ **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。



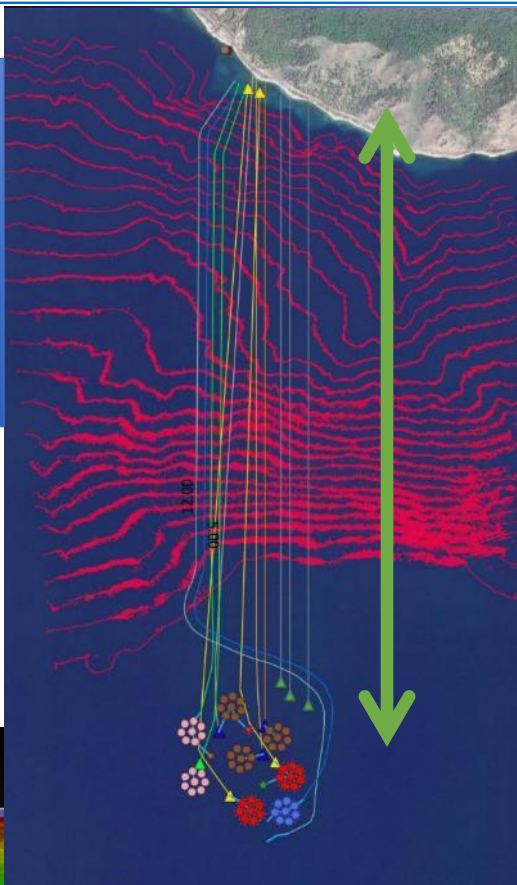
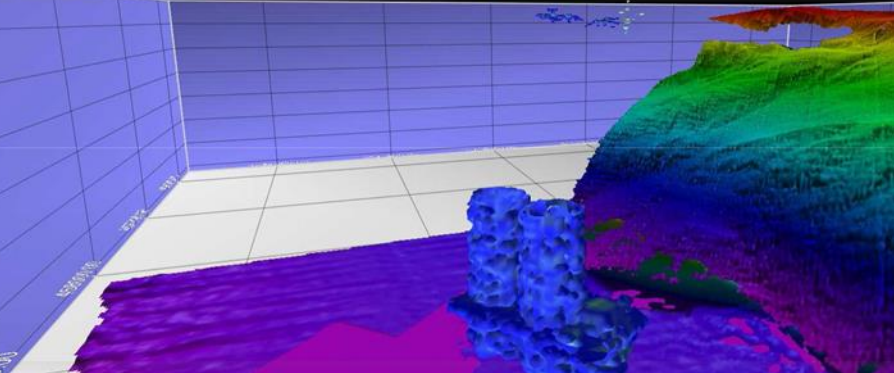
独一无二的实验站址：贝加尔湖

38

- 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

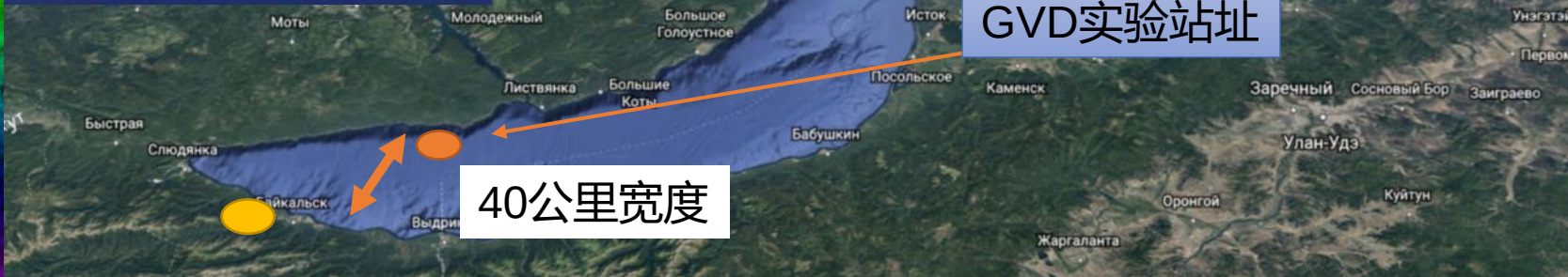


可在冰面上投放作业
探测器设备可维护
极大降低成本和工程难度



Lake Baikal

距离岸边仅3.5公里
而在海洋里，几百公里远



GVD实验站址

40公里宽度

贝加尔斯克火车站