

锦屏中微子实验进展 与物理展望

陈少敏

清华大学高能物理研究中心

清华大学工程物理系近代物理研究所

chenshaomin@tsinghua.edu.cn

2020年6月19日

报告提纲

- 一、中微子物理
- 二、锦屏地下实验室
- 三、锦屏中微子物理
- 四、锦屏中微子实验预研
- 五、总结与展望

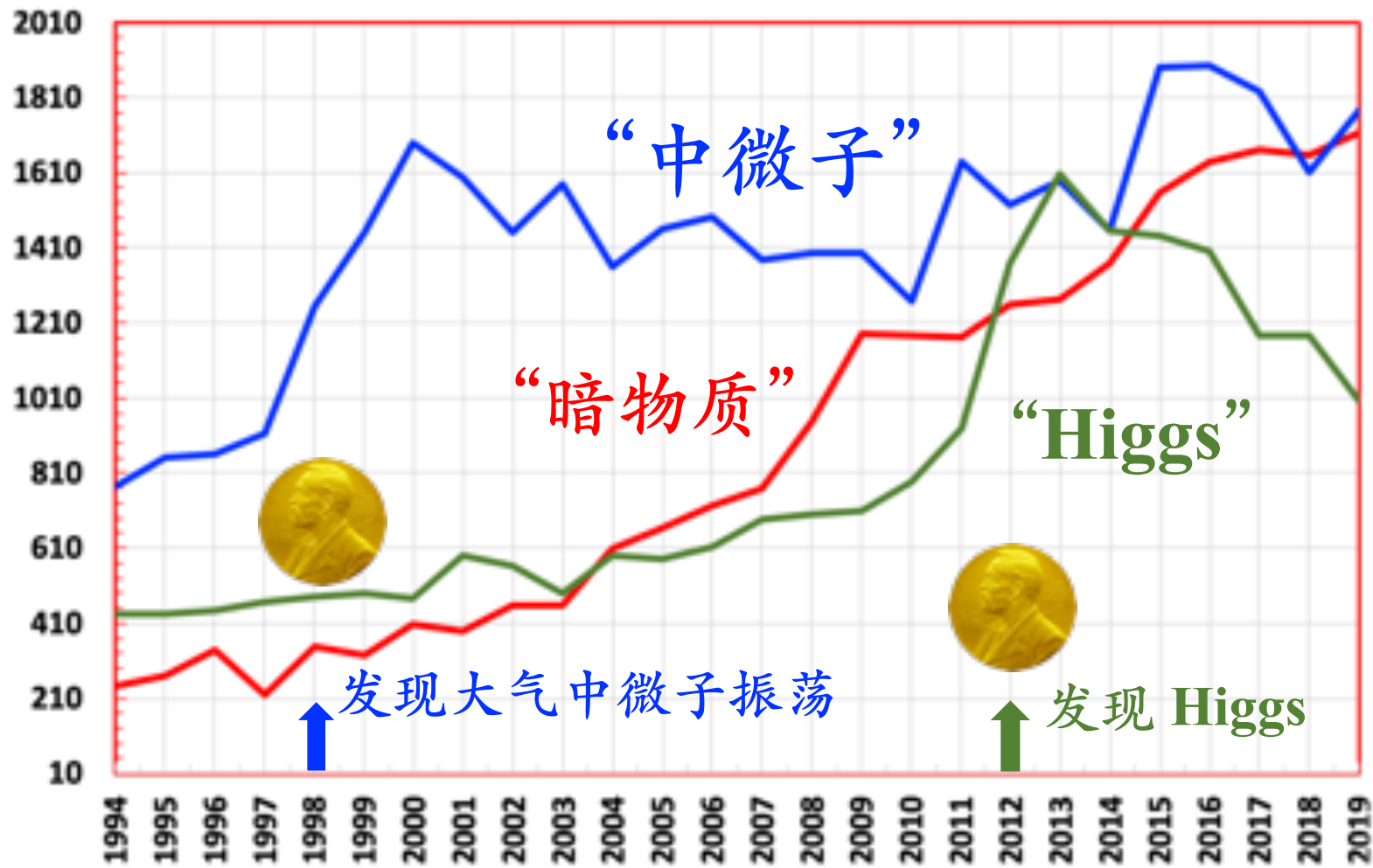
一、中微子物理

“中微子的发现来得如此之快，以至于我们几乎没有时间重建我们希望理解它们的概念矩阵。”

– APS 2004年报告

二十五年的高能物理发展历程

论文数目



发表年份

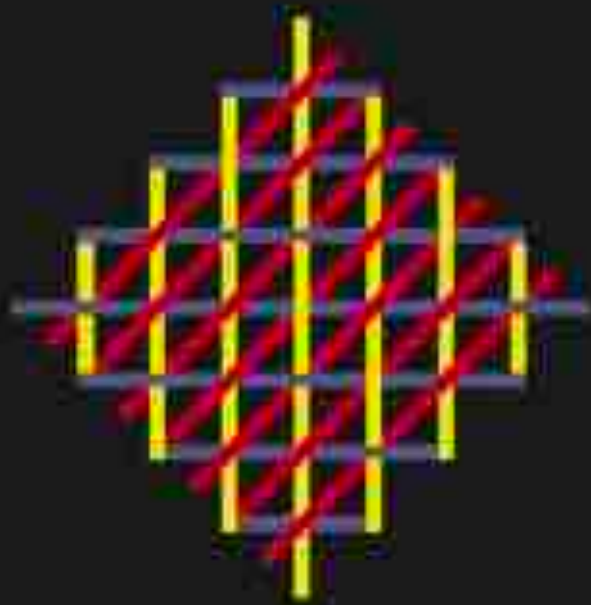
数据来自 inspirenet.hep

中微子研究的驱动力在哪？

- 中微子振荡因而有质量，是第一个得到各方面实验证实超出标准模型新物理的明显证据，但我们对中微子的了解还很欠缺。
- 太阳中微子反常、大气中微子反常、LSND 中微子反常、反应堆中微子通量反常…，中微子一直以“反常”为标志，窥视着新的物理并提供着新机遇。
- 源自大爆炸和恒星内核的中微子让我们找到它们和宇宙之间的联系，并借此探索赖以生存的太阳与地球能量起源与未来。

APS关于中微子未来的联合报告

November, 2004
arXiv:0411216



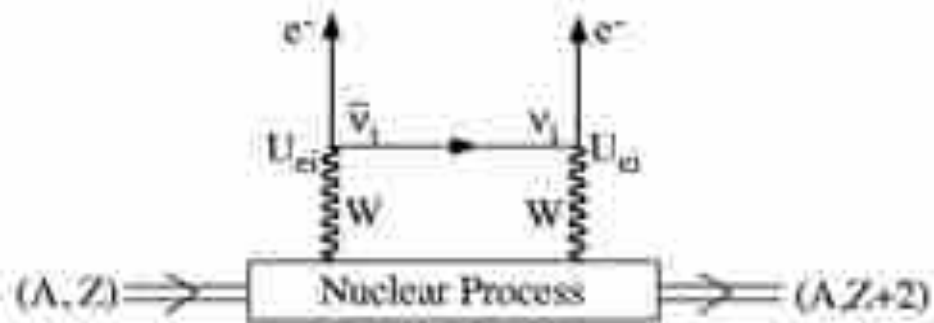
The Neutrino Matrix

美国物理学会 (APS) 核物理分部 (DNP) / 粒子物理与场分部 (DPF) / 天体物理分部 (DAP) / 束流物理分部 (DPB) 关于中微子物理未来的联合研究报告

- 未来中微子的三大主题
 1. 中微子和新范式
 2. 中微子与不可预见的物理与机遇
 3. 中微子与宇宙
- 对未来研究的三项建议：
 1. 分阶段对无中微子双 β 衰变进行高灵敏度寻找。
 2. 对中微子混合的理解，确定中微子质量谱的特征，并寻找在中微子之间的电荷-宇称 (CP) 破坏。
 3. 开发一个精确测量来自太阳的低能中微子实验。

过去十五年进展如何？

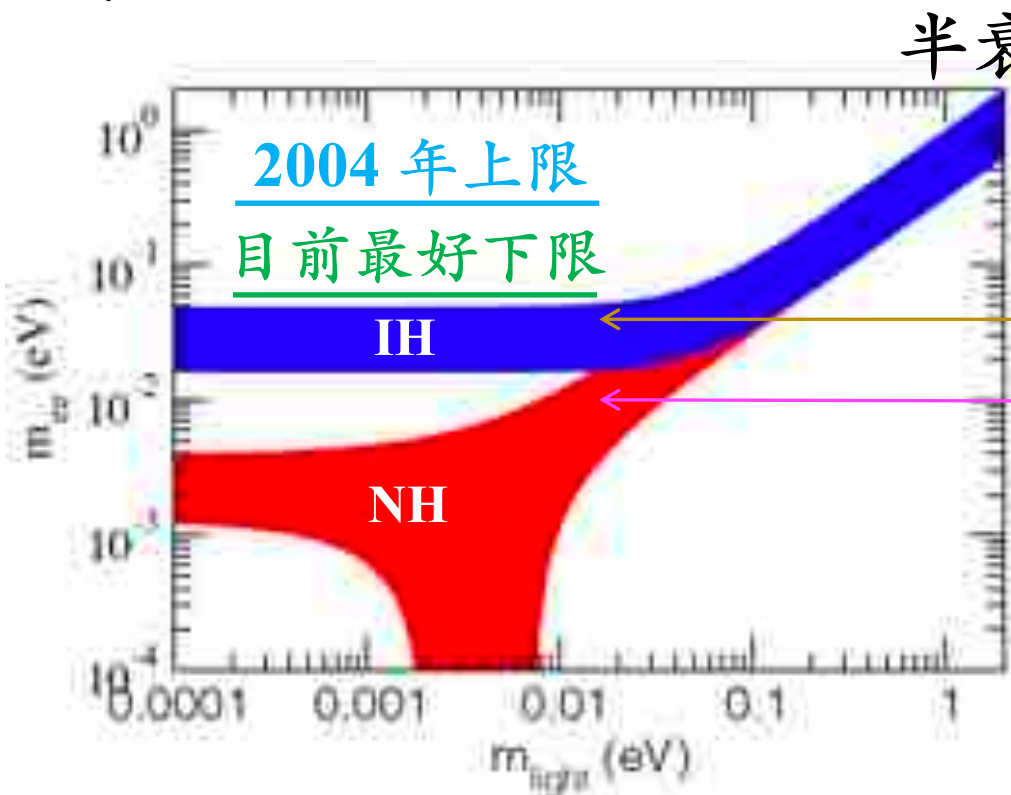
1. 无中微子双贝塔衰变实验方面有许多突出的工作，但是依然没有什么发现。
2. 中微子振荡研究成功证明了三代中微子框架，并精确测量混合参数（尤其是 θ_{13} ）和中微子质量平方差，并看到了三代中微子质量正排序及非零轻子 CP 相位迹象。
3. 碳-氮-氧（CNO）循环过程产生的太阳中微子尚未观测到；超新星遗迹中微子也尚未看到；太阳中微子从真空振荡区过渡到物质效应区的实验缺失。



$$|\langle m_{ee} \rangle| = \left| \sum_i m_i U_{ei}^2 \right|$$

$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G_{0\nu}(Q, Z) g_A^4 |M_{0\nu}|^2 m_{ee}^2$$

源=探测器		运行	在建	计划
可扩展性	液体 嵌入式 源	基于氙的 TPC	EXO-200 NEXT-10	nEXO NEXT-2.0 PandaX-III It
		液闪阵列	KamLAND-Zen SNO+ phase I	KamLAND2-Zen SNO+ phase II
高 ΔE 和 E	晶体 嵌入式 源	硅半导体	GERDA-II MJD	LEGEND-1000
		辐射热计	AMoRE pilot-I CUORE CUPID-0, CUPID-MO	AMoRE-II CUPID



半衰期(年)

质量(吨)

10²⁵
10²⁶
10²⁷
10²⁸
10²⁹
10³⁰

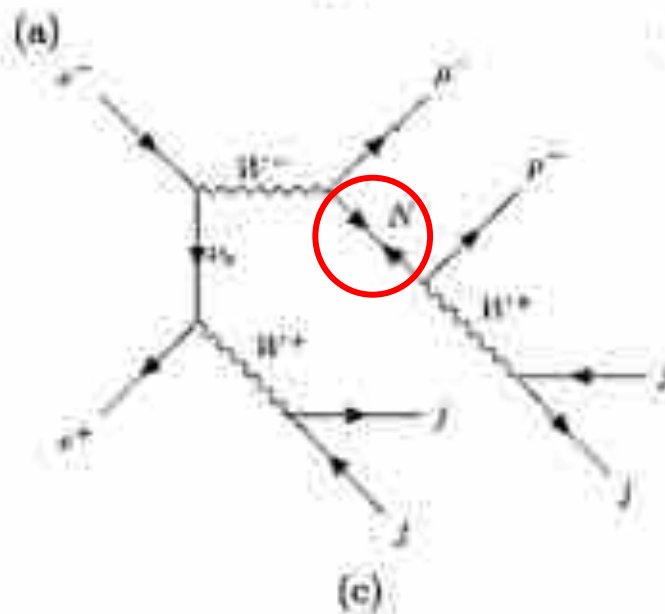
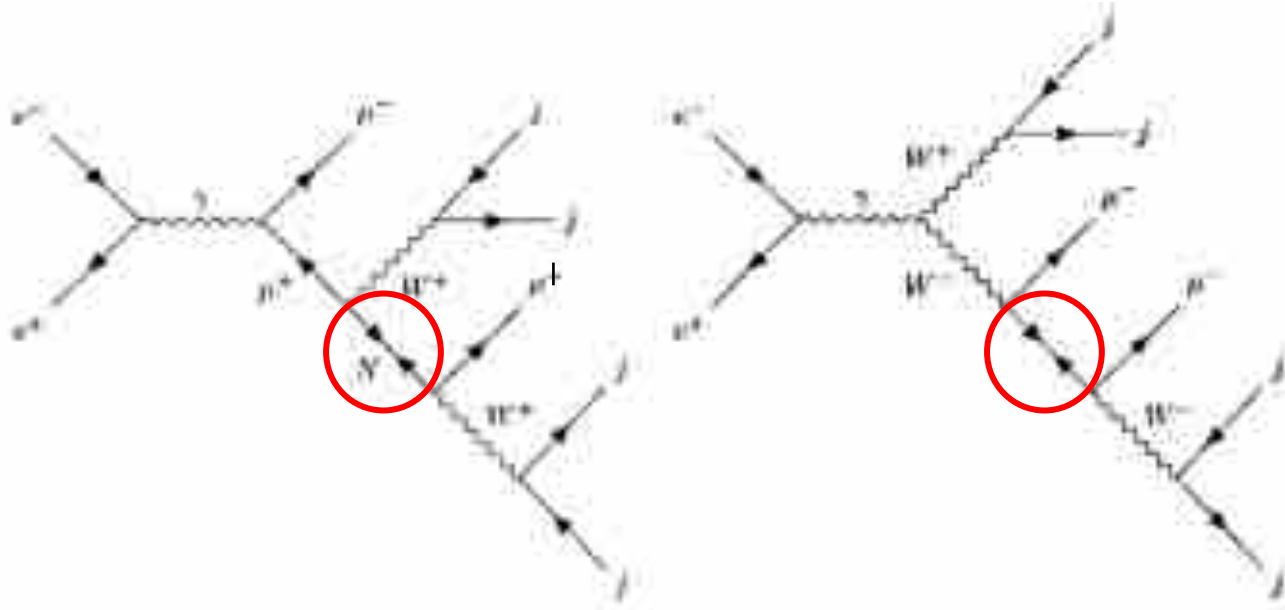
0.01
0.1
1
10
100

在建实验

下一代实验

质量正排序意味着百吨的同位素!

或者在对撞机上寻找 $e^+e^- \rightarrow N\mu^\pm W^\mp \rightarrow \mu^\pm\mu^\pm + 4j$

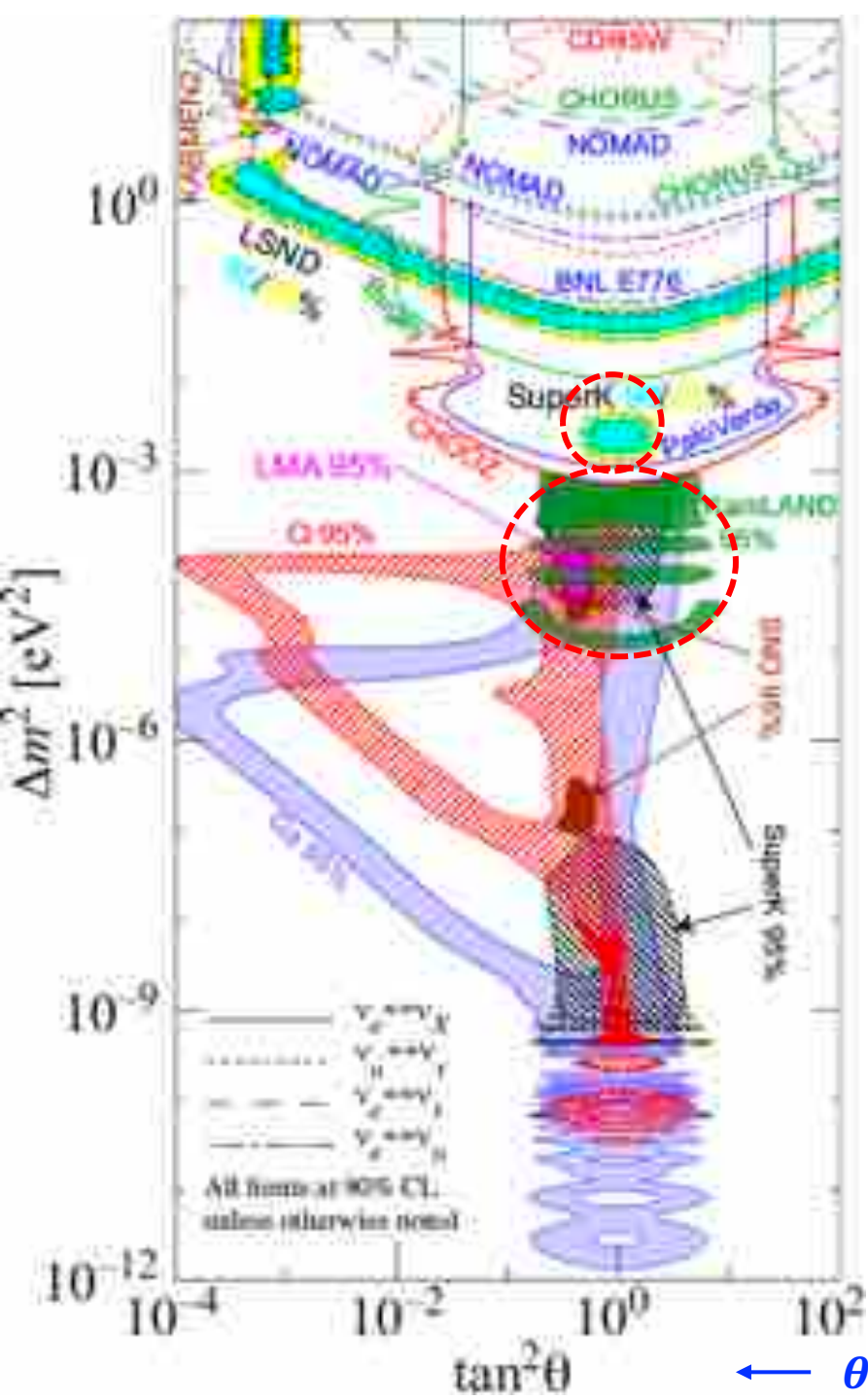


末态具有同号
Muon-子对的重
Majorana 中微子

Yang Zhang, Bin Zhang
arXiv:1805.09520

过去十五年进展如何？

1. 无中微子双贝塔衰变实验方面有许多突出的工作，但是依然没有什么发现。
2. 中微子振荡研究成功证明了三代中微子框架，并精确测量混合参数（尤其是 θ_{13} ）和中微子质量平方差，并看到了三代中微子质量正排序及非零轻子 CP 相位迹象。
3. 碳-氮-氧（CNO）循环过程产生的太阳中微子尚未观测到；超新星遗迹中微子也尚未看到；太阳中微子从真空振荡区过渡到物质效应区的实验缺失。



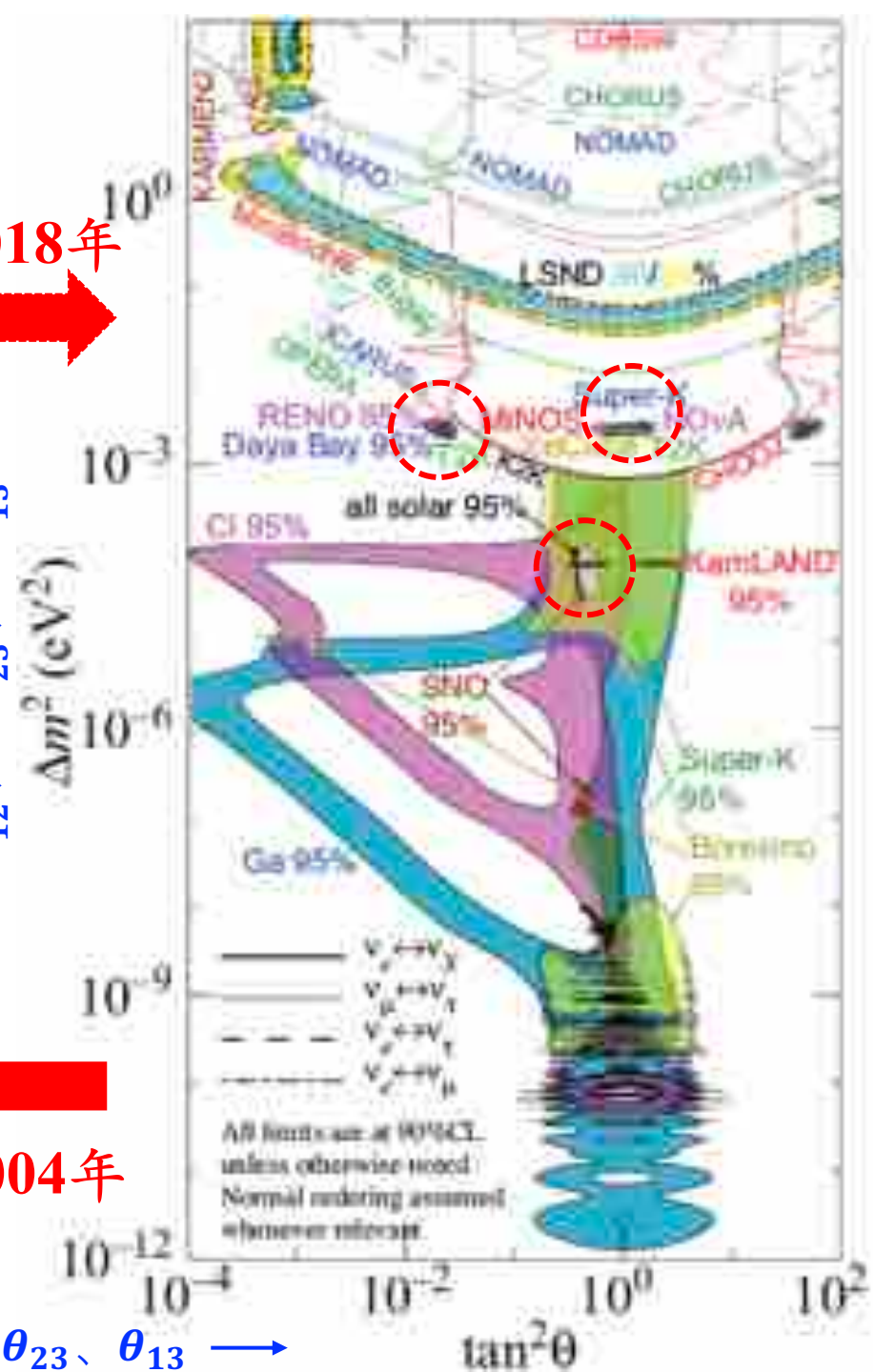
2018年



Δm_{12}^2 、 Δm_{23}^2 、 Δm_{13}^2

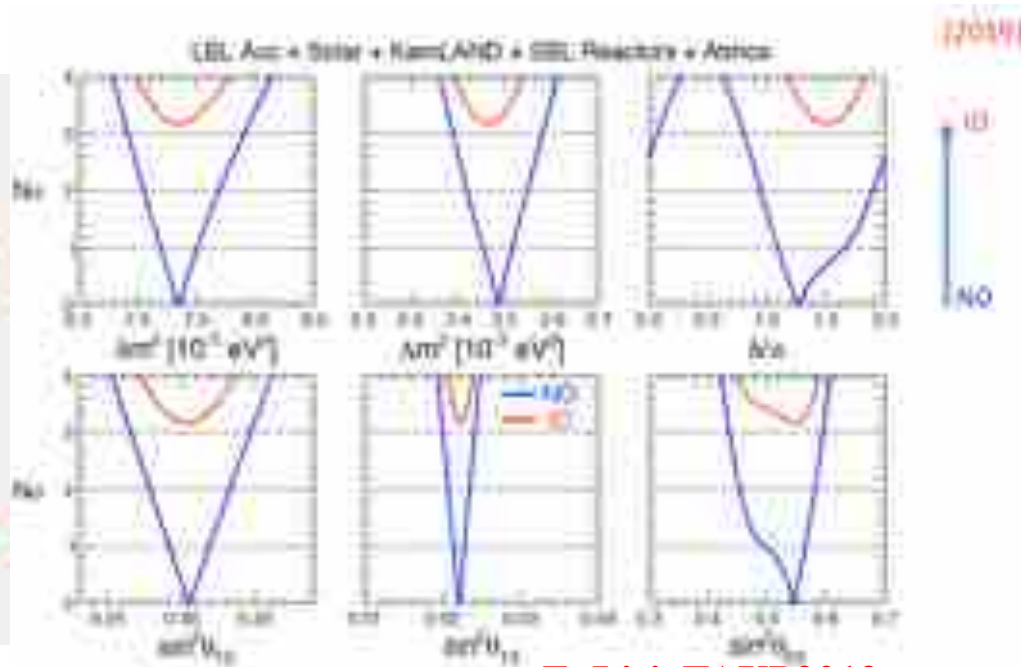
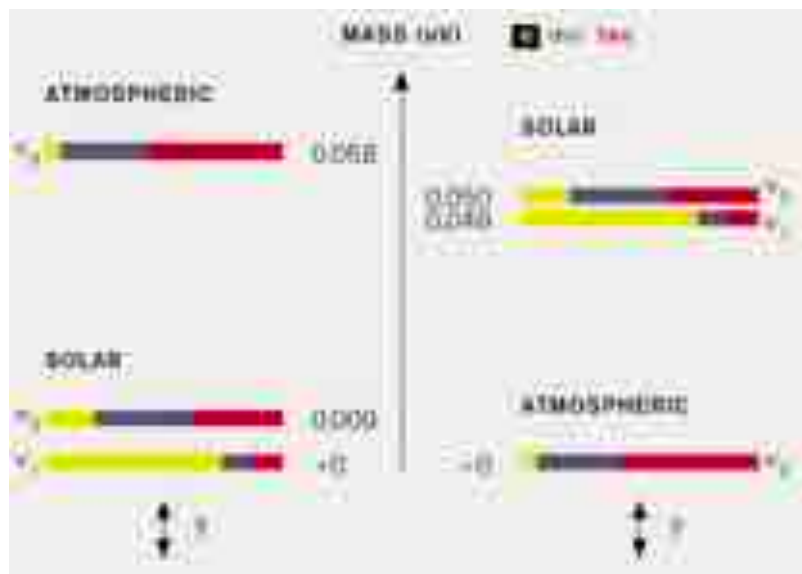


2004年



θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13}

在 3.2σ 上排除质量“倒置”排序



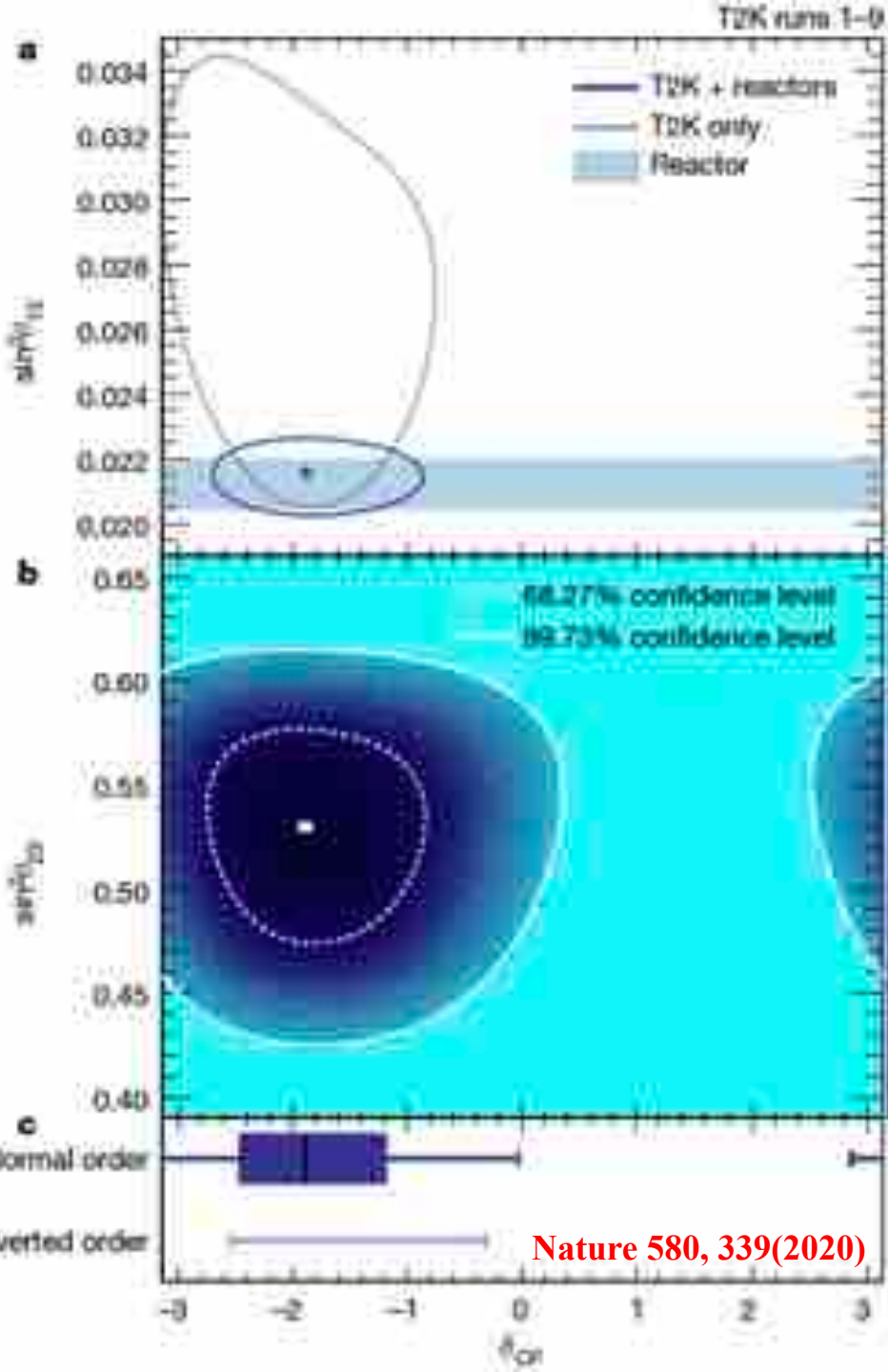
E. Lisi, TAUP2019

2010	15	20	25	30	35
美国NOvA	运行	14几率确定(加速器)			
印度INO					
日本Hyper-K (水)			运行	确定	
南极PINGU (冰) ?			运行	确定	
美国DUNE (液氩)			运行	确定	
法国ORCA (海水) ?		运行	确定		
江门实验 (液闪)		运行	确定		

- 美国NOvA: 将延长运行至2034年
- 印度INO: 已批准, 因环保问题未开工
- 日本Hyper-K: 接近批准, 2026年运行, 5年3-5e
- 美国DUNE: 已批准, 2024年探测器, 2026年束流运行, 1-3年5e
- 南极PINGU: 计划2025(?)运行, 5年3e
- 法国ORCA: 部分批准, 计划2022年运行, 3年3e

王贻芳, 2018

Global fit 的结果需要在建大型中微子实验的进一步验证!



Experiment	Value
Daya Bay νGd	0.0856 ± 0.0029
RENO νGd	0.0896 ± 0.0068
Daya Bay νH	0.071 ± 0.011
D-CHOOZ $\nu\text{Gd} + \nu\text{H}$	0.106 ± 0.014
RENO νH	$0.094^{+0.023}_{-0.021}$
bayesian	$0.099^{+0.027}_{-0.027}$
T2K NH	$0.106^{+0.027}_{-0.024}$
T2K IH	$0.116^{+0.031}_{-0.026}$

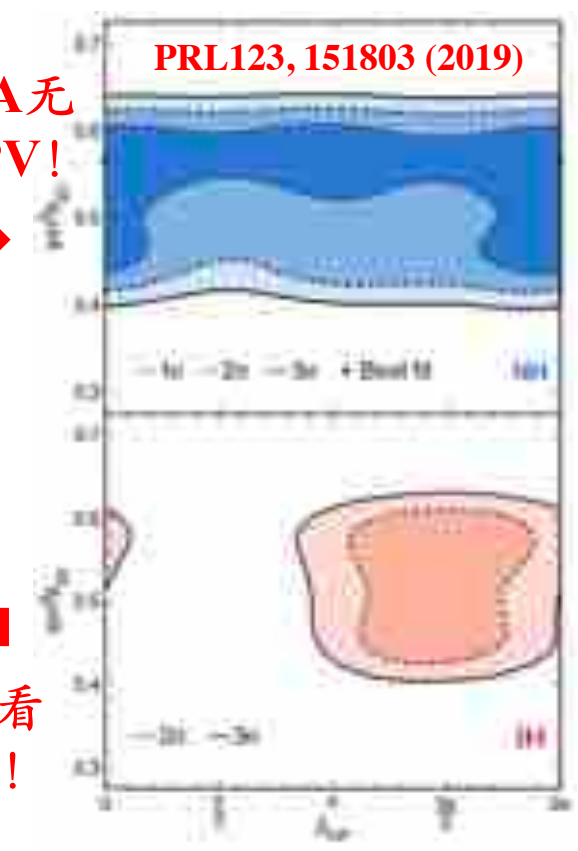
← 大亚湾的测量精度还能提高。

美国NOvA无明显的CPV!



日本T2K看到了CPV!

PRL123, 151803 (2019)



过去十五年进展如何？

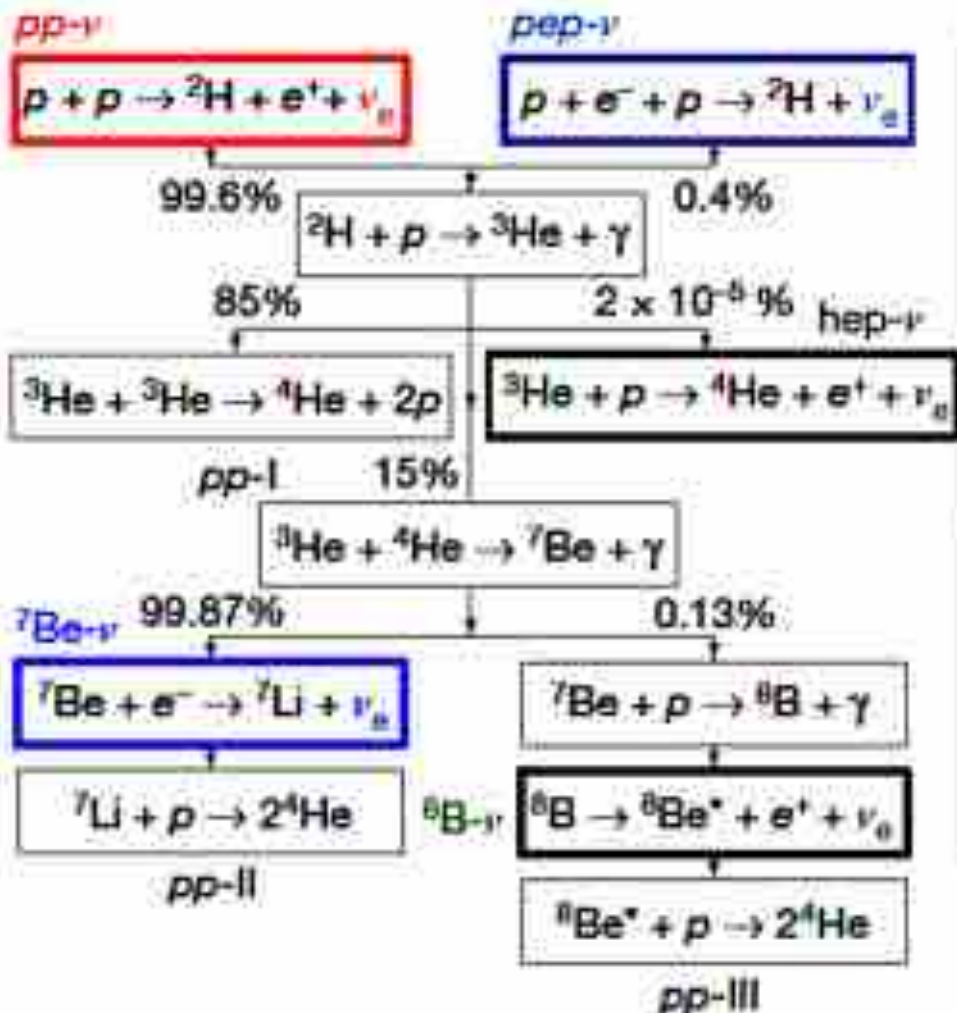
1. 无中微子双贝塔衰变实验方面有许多突出的工作，但是依然没有什么发现。
2. 中微子振荡研究成功证明了三代中微子框架，并精确测量混合参数（尤其是 θ_{13} ）和中微子质量平方差，并看到了三代中微子质量正排序及非零轻子 CP 相位迹象。
3. 碳-氮-氧（CNO）循环过程产生的太阳中微子尚未观测到；超新星遗迹中微子也尚未看到；太阳中微子从真空振荡区过渡到物质效应区的实验缺失。

占太阳总能量的99%

占太阳总能量的1%

pp chain

CNO cycle



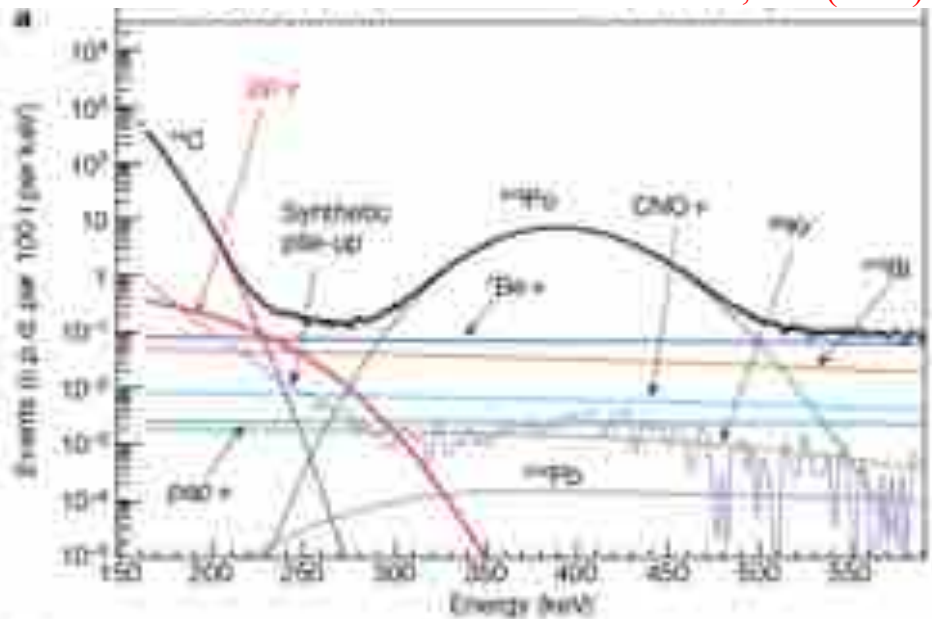
尚未观测到!

低质量恒星的聚变模式

大质量恒星的聚变模式

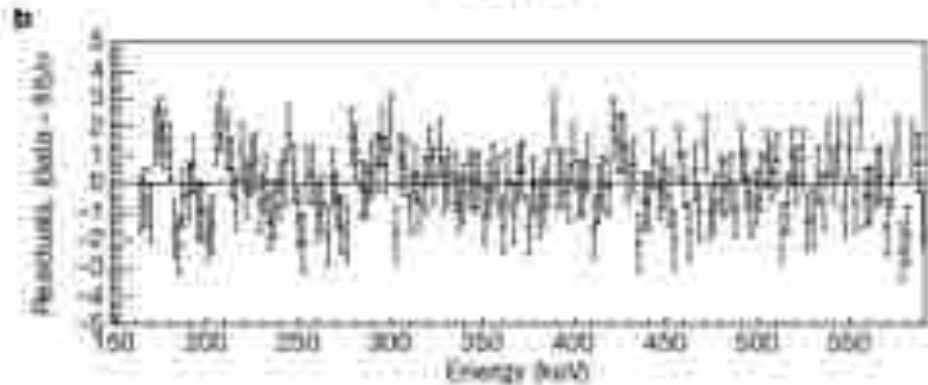
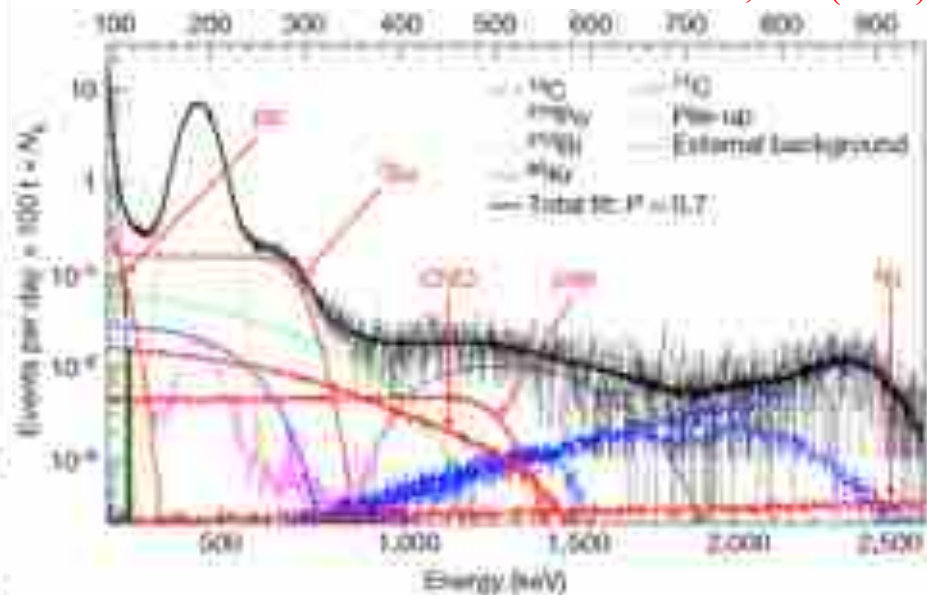
从对pp中微子的实时测量

Nature 512, 383 (2014)



到在一个探测器中观察到了所有 PP-链的中微子

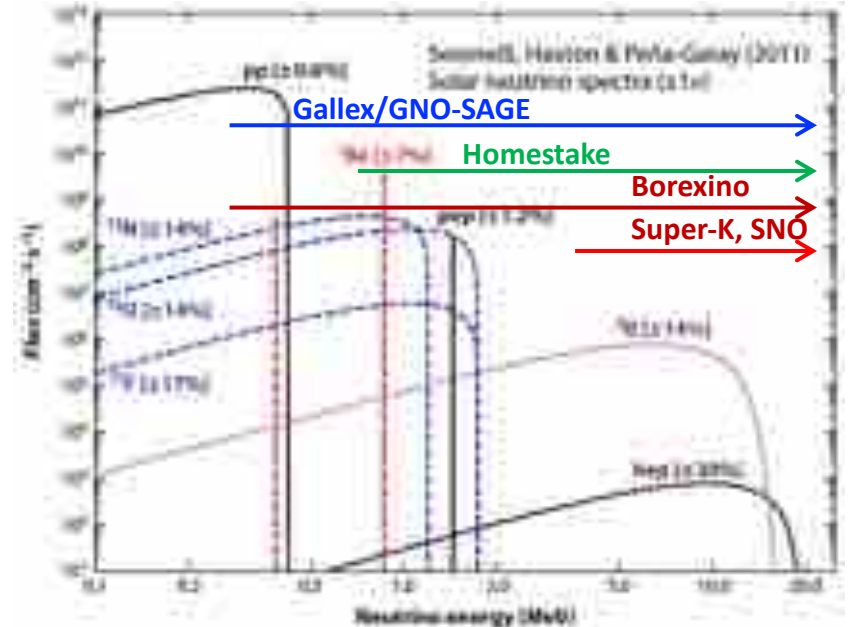
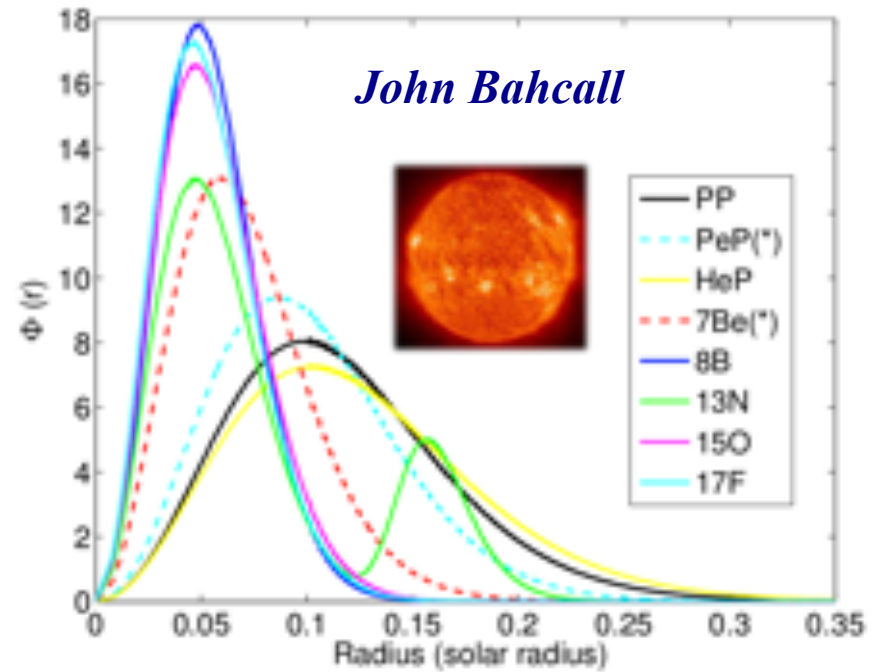
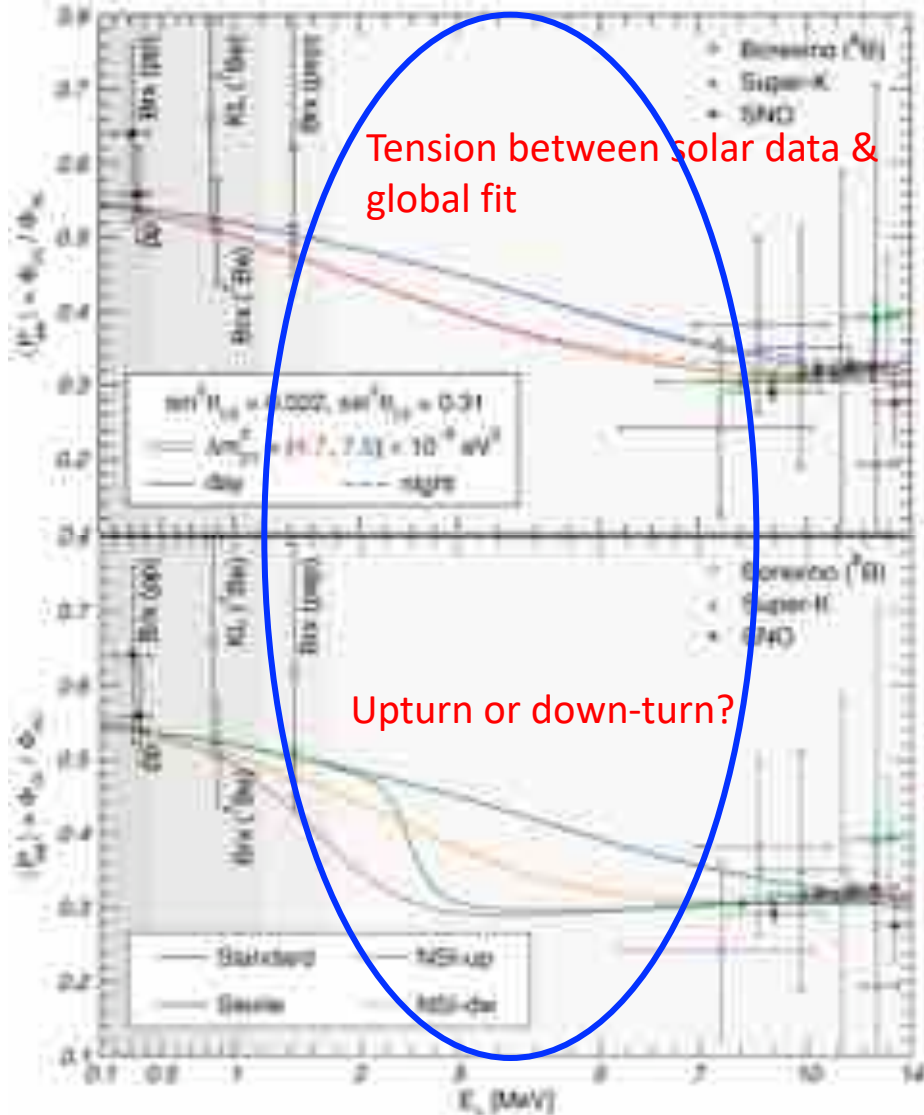
Nature 562, 505 (2018)



Borexino 有可能在停止运行前看到CNO的迹象。

真空到物质效应过渡区依然是一个突不破的障碍。

Maltoni & Smirnov (2016)



中微子还进入了地球科学领域

二十一世纪地球科学研究十大科学问题（美国国家科学院国家研究理事会NRC），有四个涉及放射热占比，产热核素分布与大小。

1. 地球和其它行星是如何形成的？
2. 地球诞生后的最初 5 亿年究竟发生了什么？
3. 生命是如何起源的？
4. 地球内部如何运动及其如何影响地表？
5. 地球为何拥有板块构造和大陆？
6. 物质特征如何控制地球演化过程？
7. 什么原因引起气候变化，气候变化幅度能有多大？
8. 生命如何改变地球，地球又如何塑造生命？
9. 能够预测地震、火山喷发及其后果吗？
10. 流体流动和搬运如何影响人类环境？

Antineutrino astronomy and geophysics

Lawrence M. Krauss*, Sheldon L. Glashow† & David N. Schramm‡

* Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138, USA

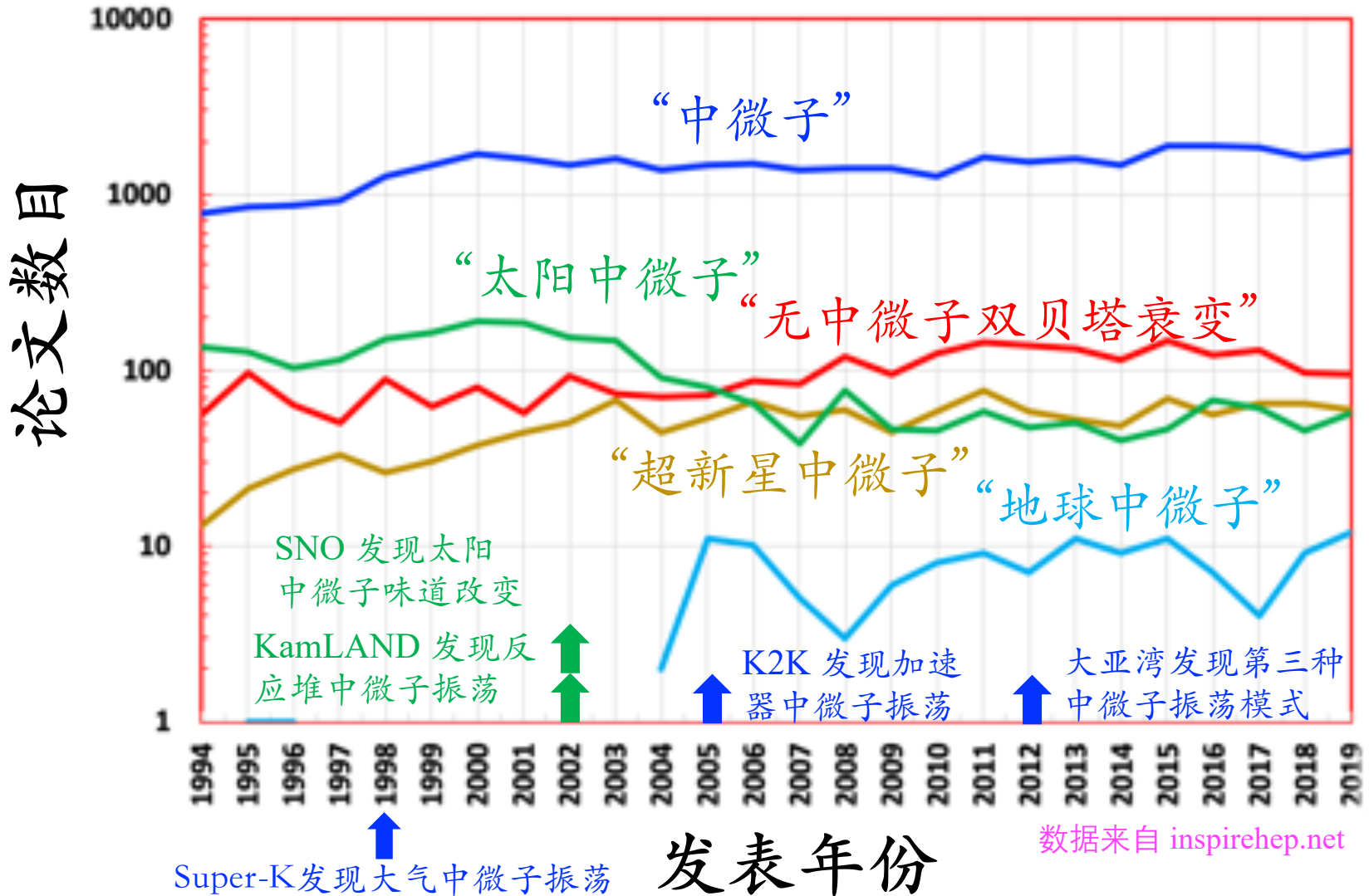
† Department of Physics, Boston University, Boston, Massachusetts 02215, USA

‡ Department of Physics and Astrophysics, Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, Illinois 60637, USA

Radioactive decays inside the Earth produce antineutrinos that may be detectable at the surface. Their flux and spectrum contain important geophysical information. New detectors need to be developed, discriminating between sources of antineutrinos, including the cosmic-background. The latter can be related to the frequency of supernovas.

That the Earth is a source of antineutrinos was first pointed out by Eders³ and Marx and co-workers⁴⁻⁶. Marx in particular was the first seriously to investigate the detection of terrestrial neutrinos and to recognize the importance of both resonant capture and inverse β decay of terrestrial antineutrinos in detection⁴. But a detailed analysis of the geophysical implications of the problems of measuring the actual flux of terrestrial antineutrinos has not been performed.

各中微子方向研究趋势



二、锦屏地下实验室

“在中微子实验方面，中国锦屏地下实验室的竞争者很少，优势明显...”

锦屏 IAC 主席 John Ellis, 2018

为什么要到地下?

如果 SNO 实验室不是建在 2 公里地下，宇宙线会让探测器像极光那样时刻都在闪闪发光!

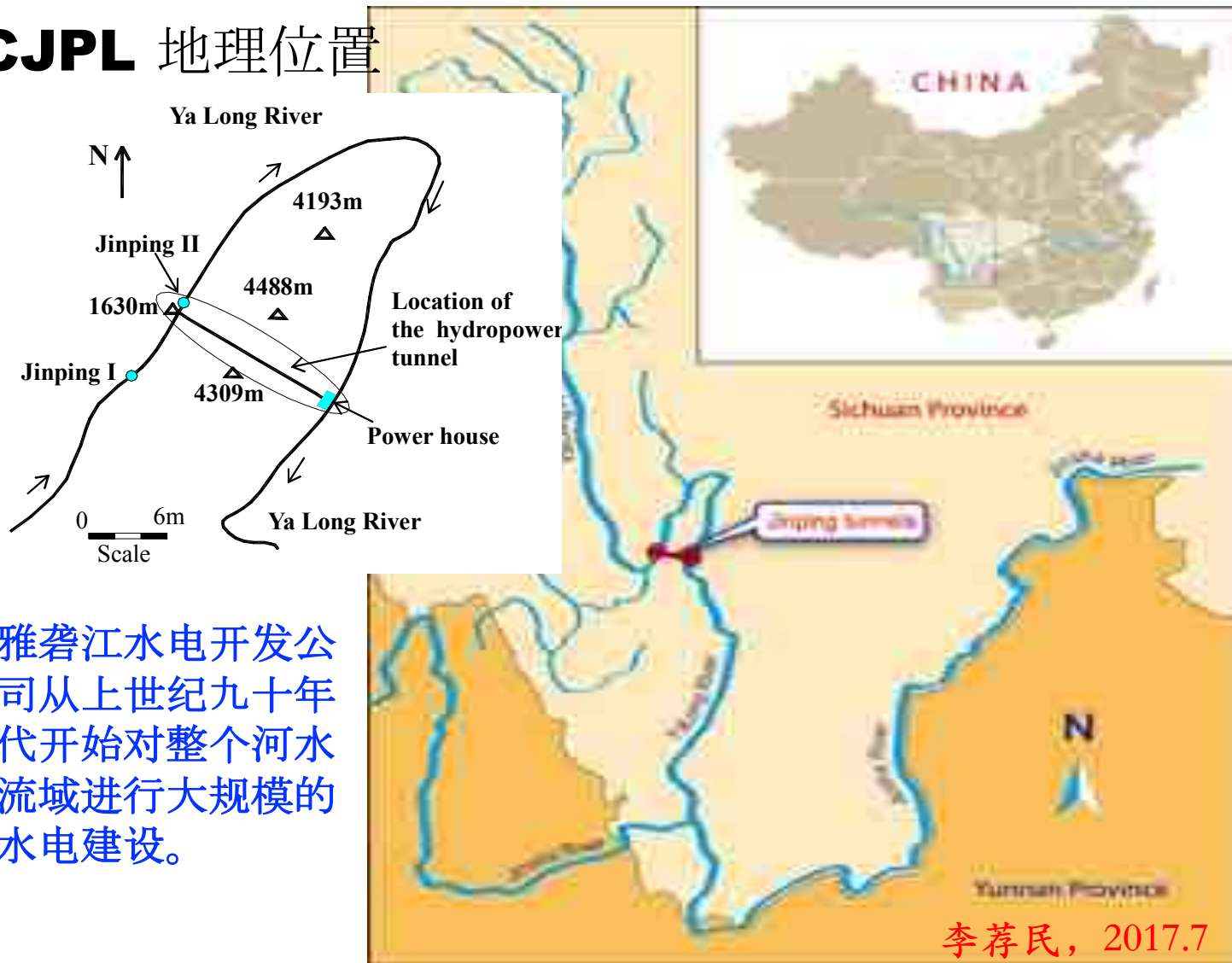
Sudbury
during a solar
storm.

Art McDonald, Neutrino 2018



中国锦屏地下实验室(CJPL)

CJPL 地理位置

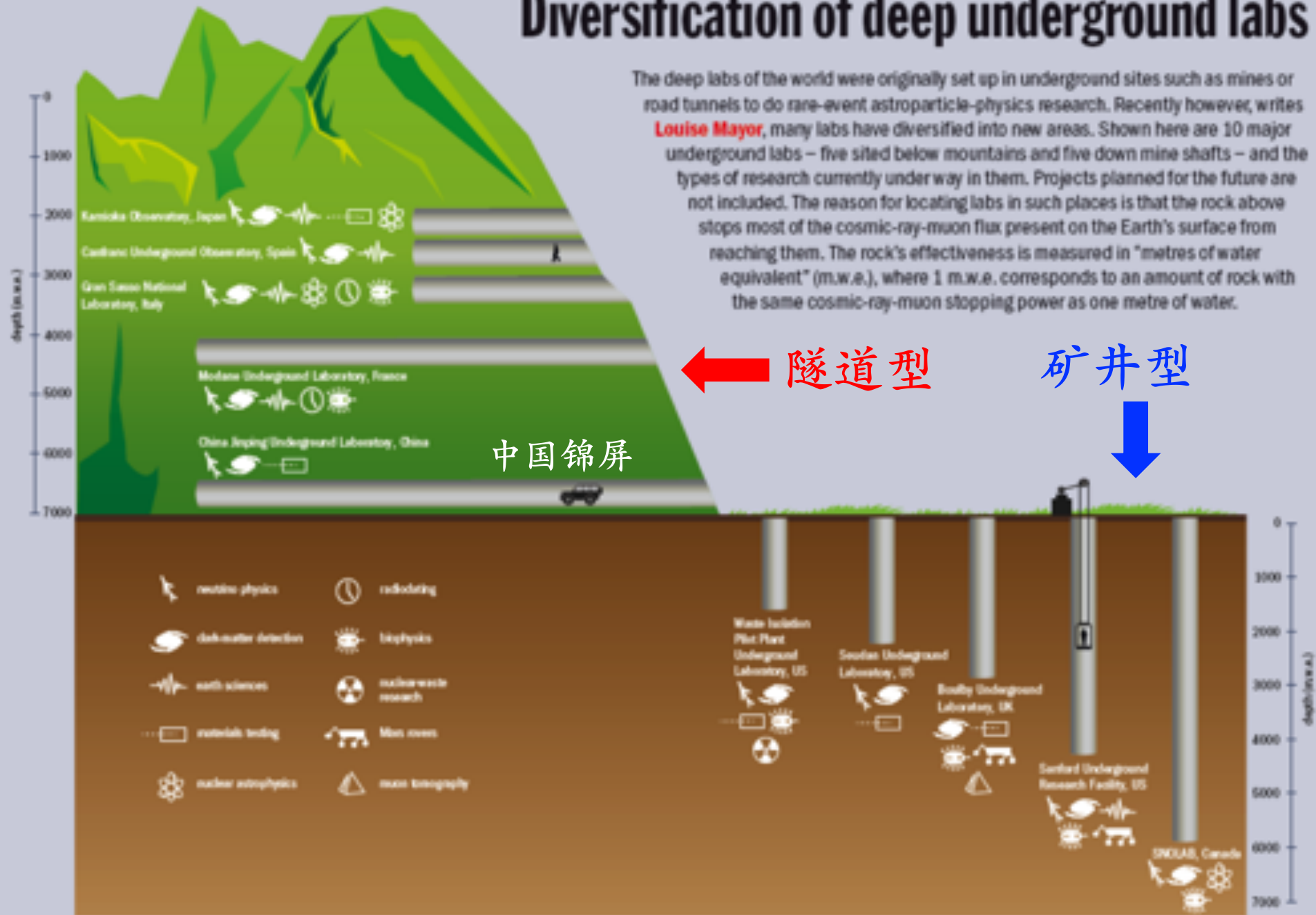


雅砻江水电开发公司从上世纪九十年代开始对整个河流域进行大规模的水电建设。

李荐民, 2017.7

Diversification of deep underground labs

The deep labs of the world were originally set up in underground sites such as mines or road tunnels to do rare-event astroparticle-physics research. Recently however, writes **Louise Mayor**, many labs have diversified into new areas. Shown here are 10 major underground labs – five sited below mountains and five down mine shafts – and the types of research currently under way in them. Projects planned for the future are not included. The reason for locating labs in such places is that the rock above stops most of the cosmic-ray-muon flux present on the Earth's surface from reaching them. The rock's effectiveness is measured in "metres of water equivalent" (m.w.e.), where 1 m.w.e. corresponds to an amount of rock with the same cosmic-ray-muon stopping power as one metre of water.

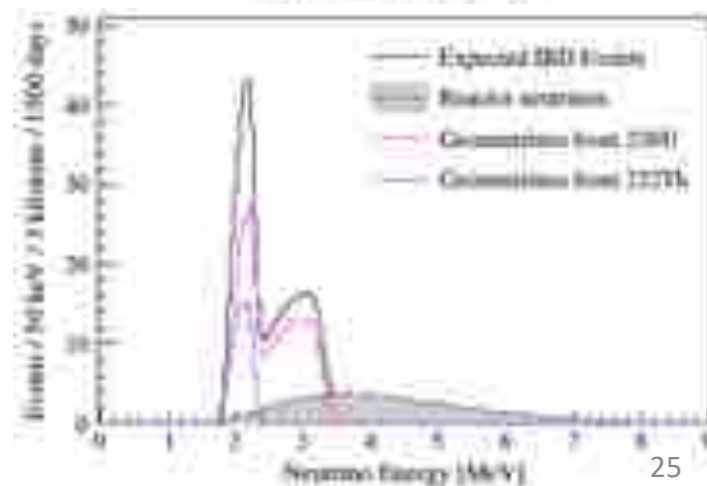
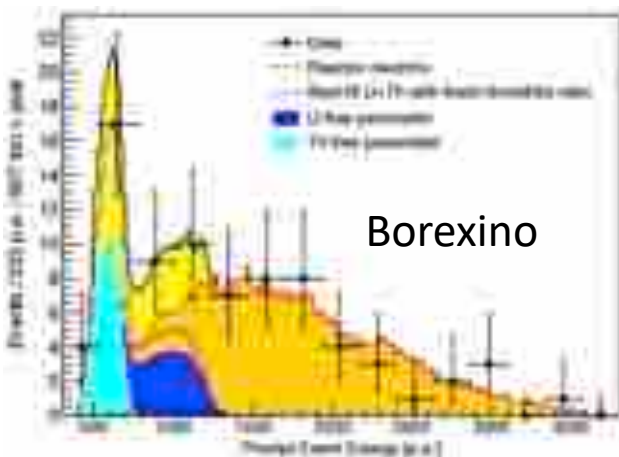
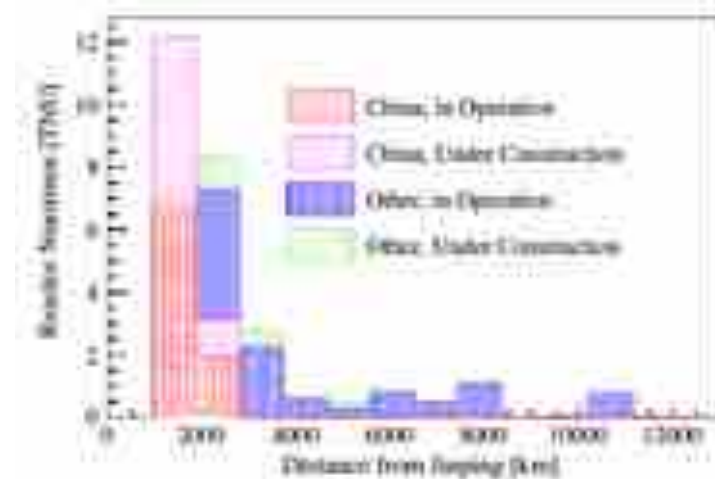


锦屏地下实验室离核电站远

为测量地球中的铀/钍比提供了可能



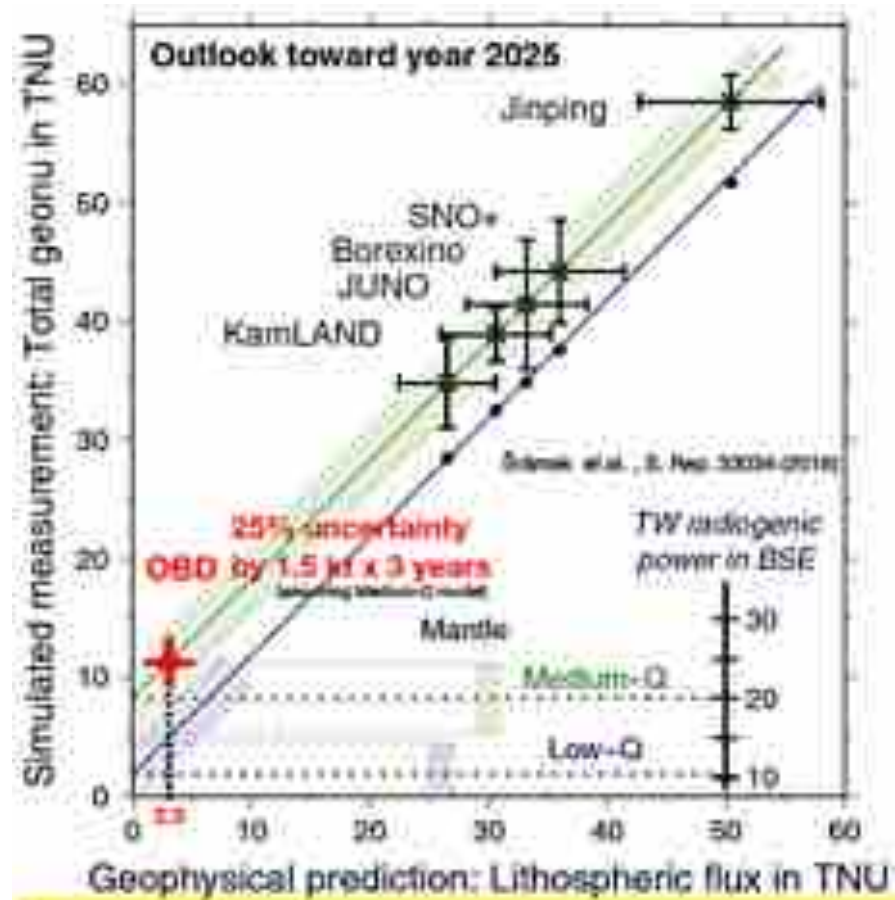
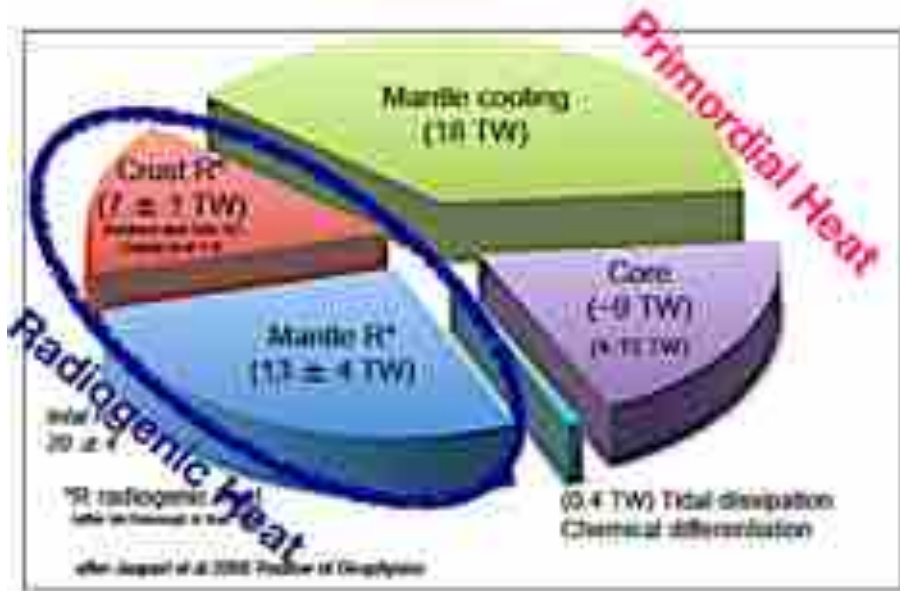
国际原子能机构 2015数据



锦屏周边地壳比较厚

对测量地幔放射性元素产热贡献大

Surface heat flow
 46 ± 3 TW
 example of Earth model

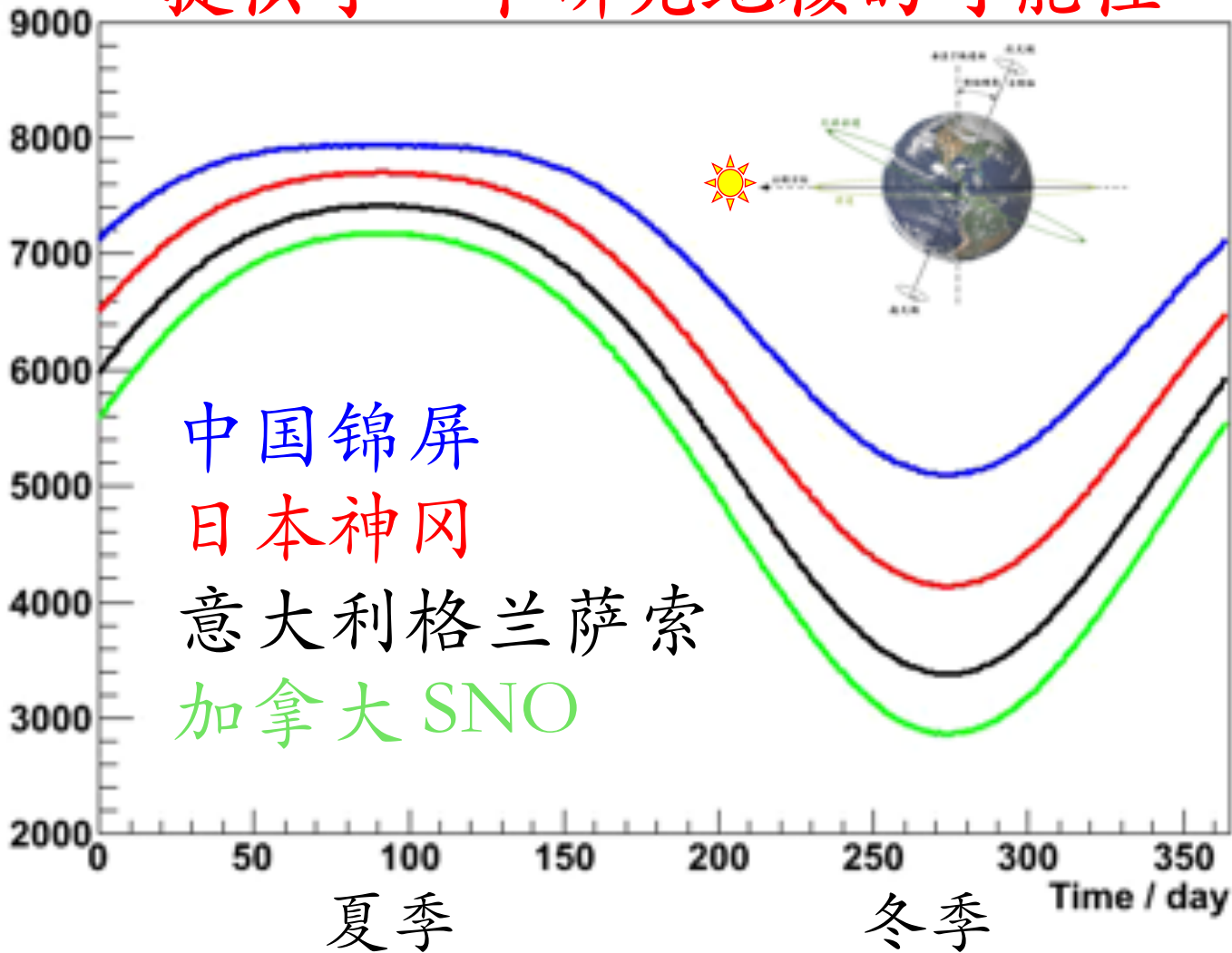


H. Watanabe, TAUP2019

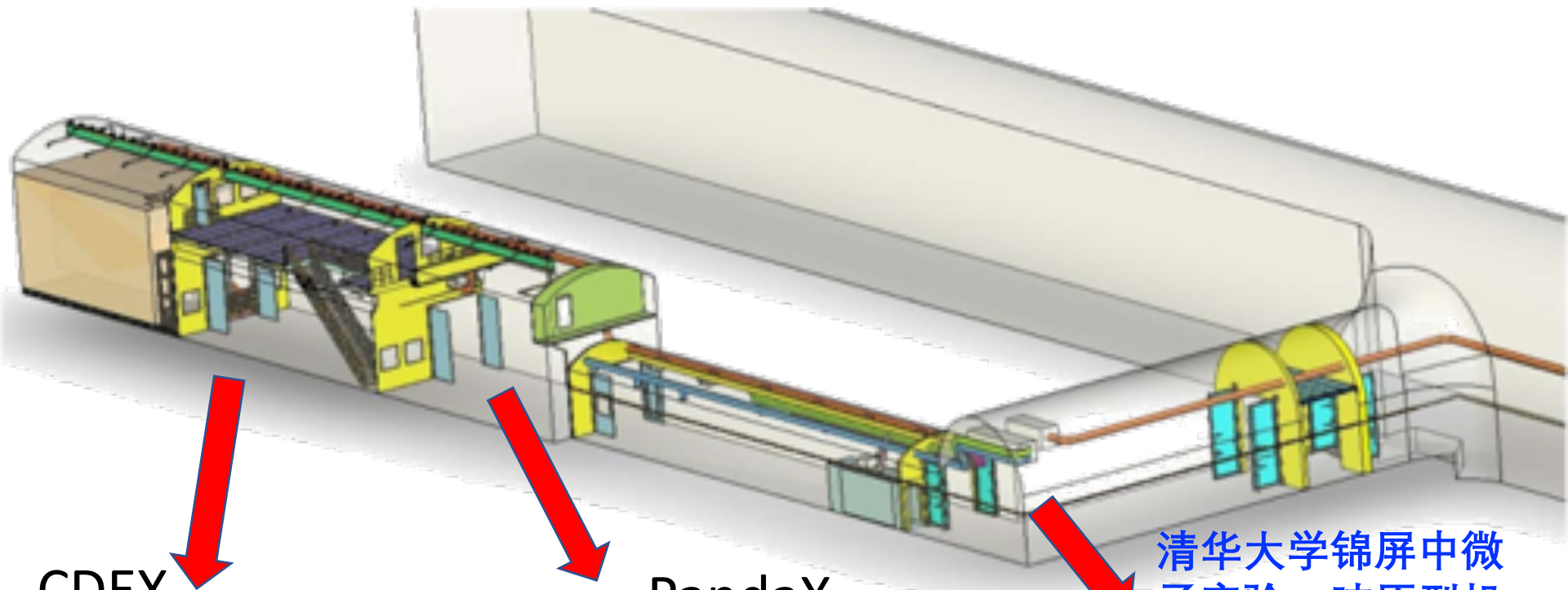
锦屏地下实验室纬度低

提供了一个研究地核的可能性

太阳中微子过地最大长度 (公里)



锦屏地下实验室一期现状



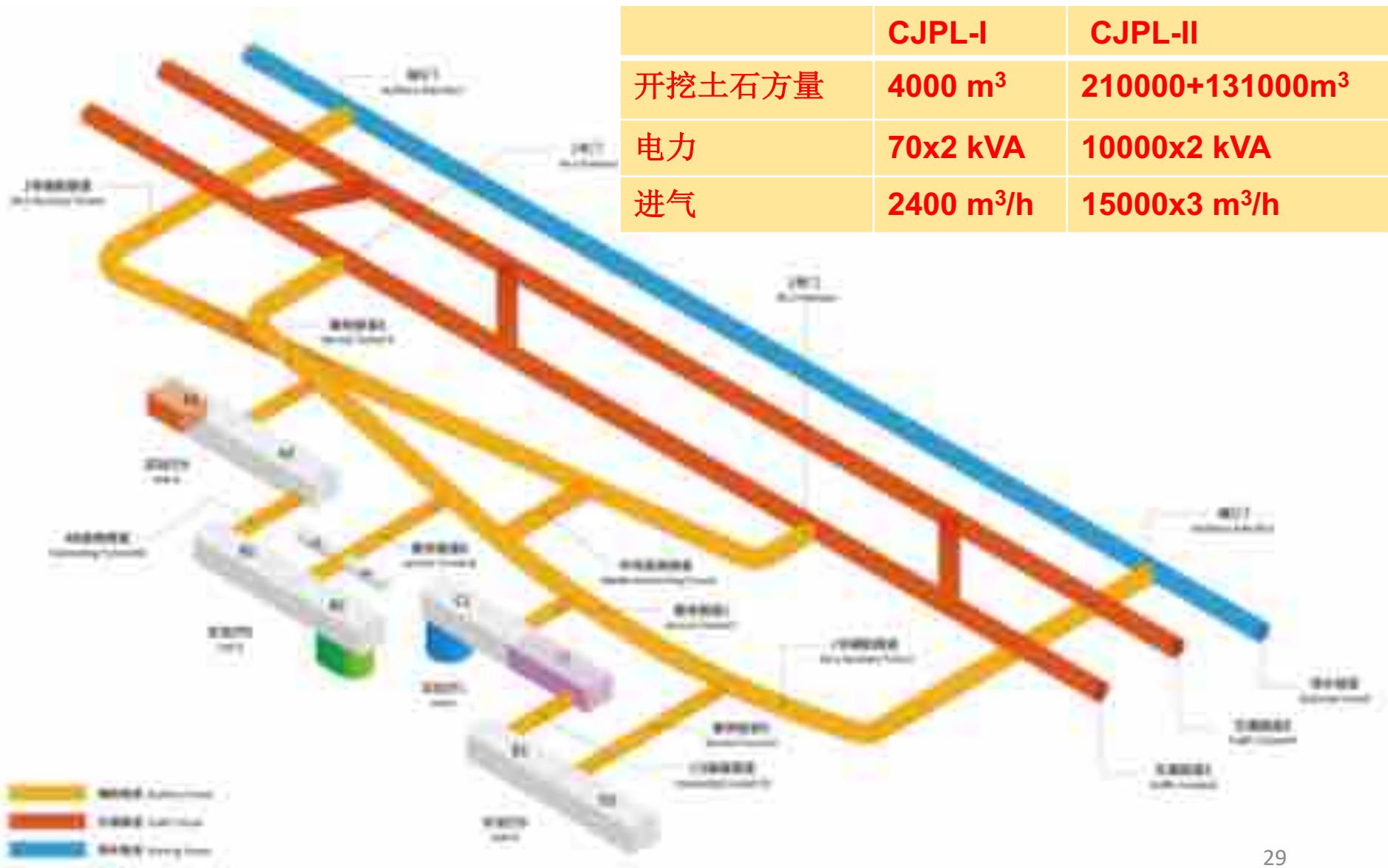
CDEX

PandaX

清华大学锦屏中微子实验一吨原型机

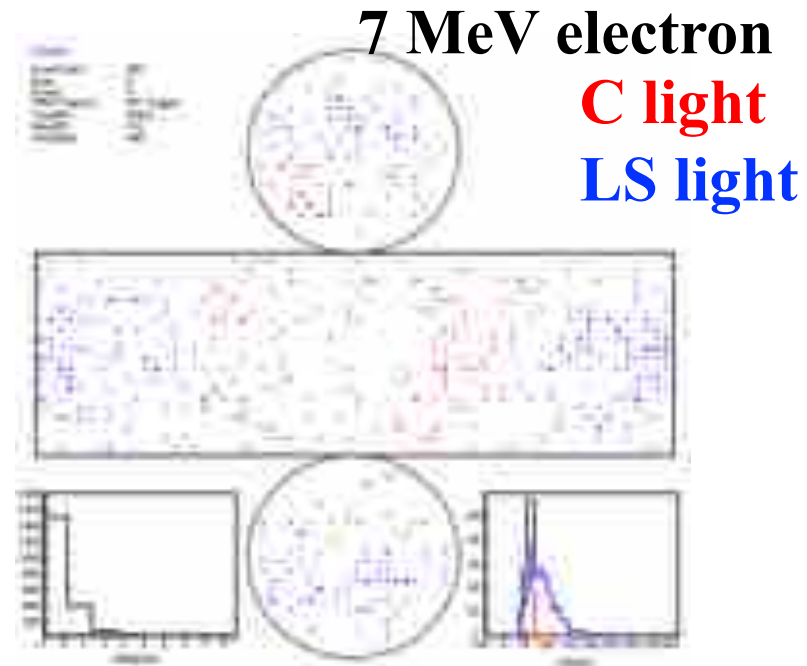
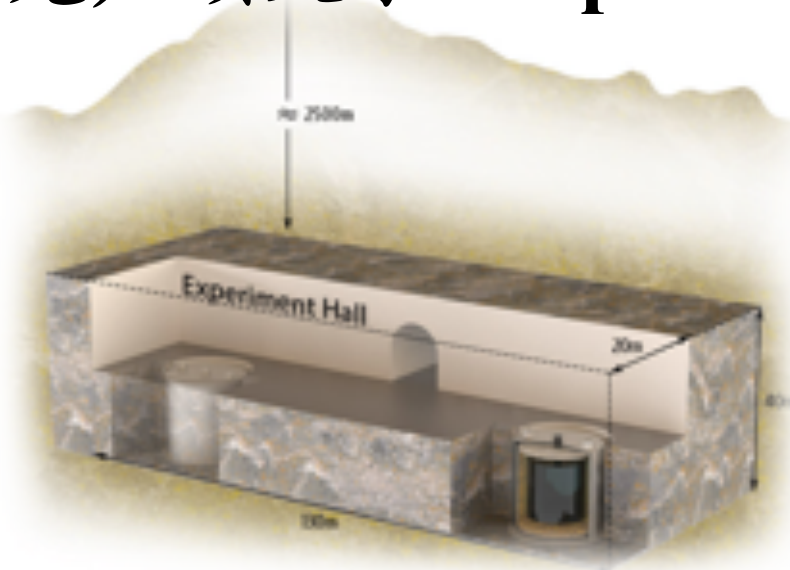


锦屏地下实验室二期现状



拟议的锦屏中微子实验

- 双探测器，总有效靶体积为：**2000吨**（太阳），**3000吨**（地球、超新星）；
- 慢液闪（可同时测量能量与方向）；
- 本底水平至少达到 **Borexino** 实验的水平；
- 光产额大于 **500pe/MeV**。



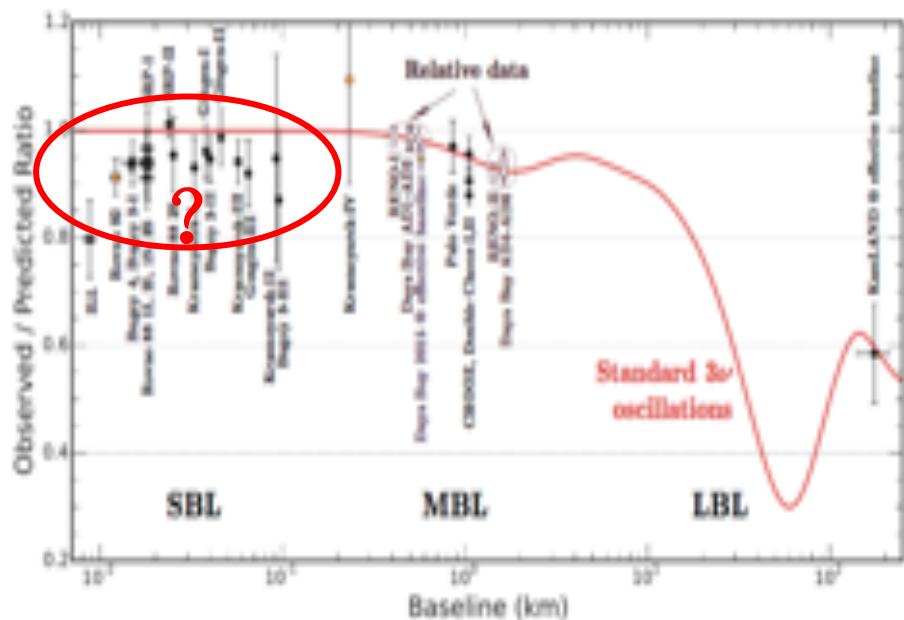
三、锦屏中微子物理

“尽管我投了中微子振荡一票，但我对有两个方面的研究缺失感到遗憾。。。”

某KTH教授, 2015

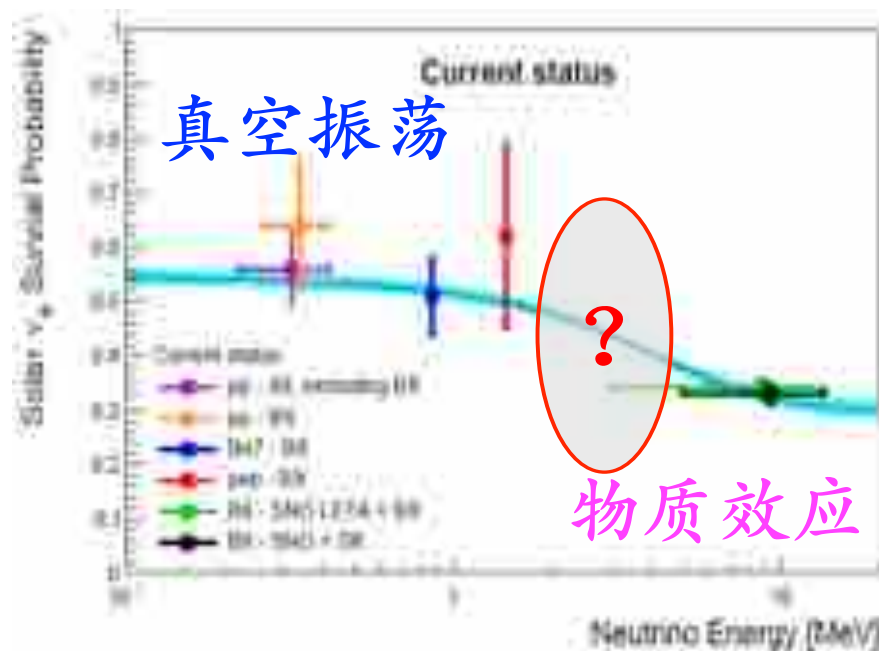
中微子振荡研究的两个小遗憾

反应堆中微子反常



是核模型不完善? 还是存在惰性中微子?

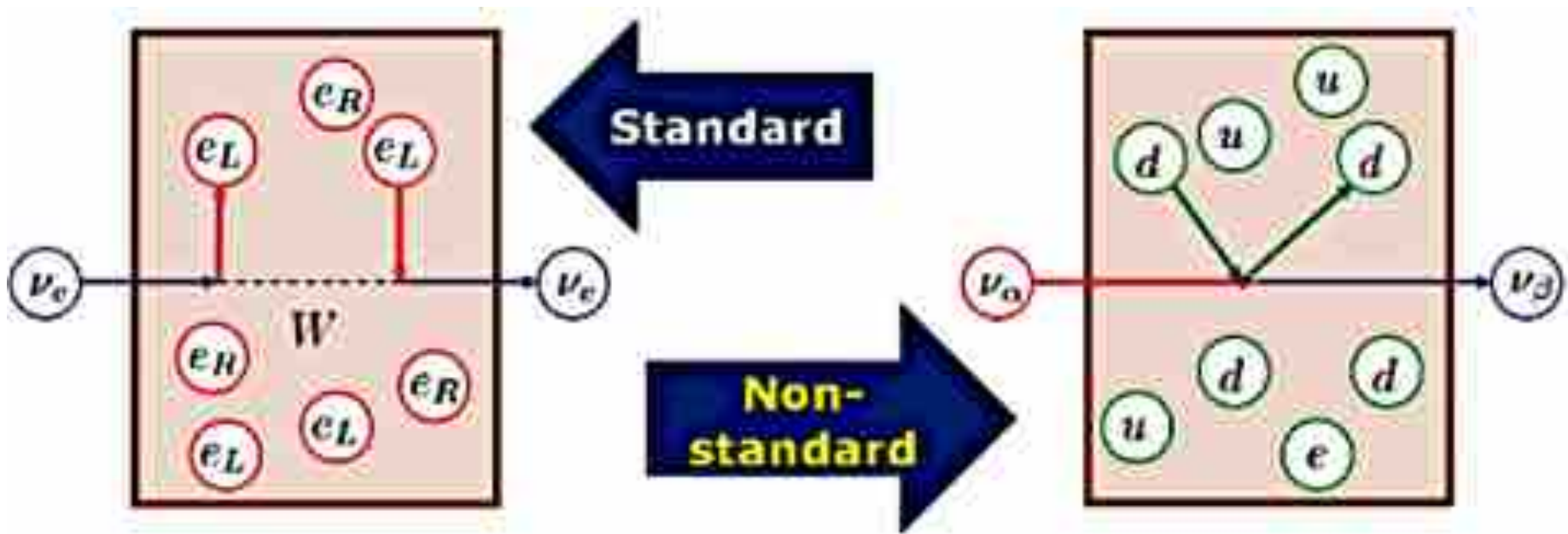
太阳中微子过渡区



是LMA-MSW理论? 惰性中微子? 非标准相互作用?

非标准相互作用

中微子振荡的次级效应 (sub-leading effect)



标准相互作用

非标准相互作用

兆电子伏能区中微子物理

- ✓ 反应堆中微子（中微子振荡参数、质量排序）
 - θ_{13} 与 Δm^2_{ee} (大亚湾...); θ_{12} 、 Δm^2_{12} 与质量排序 (JUNO)
- ✓ 太阳中微子（标准太阳模型、振荡曲线）
 - 寻找CNO中微子（锦屏、Borexino、Thiea）
 - 寻找 hep 中微子（HK、DUNE）
 - 研究太阳中微子如何从真空振荡过渡到物质效应区（锦屏、SK、HK）
 - 太阳中微子在地球的物质效应（锦屏、SK、HK）
- ✓ 地球中微子（地球的起源、热流的来源、内部组成）
 - 地壳/地幔通量（锦屏、Borexino、KamLAND、JUNO）
 - 铀/钍比（锦屏）
- ✓ 超新星中微子
 - 寻找爆发与遗迹中微子（锦屏、SK、JUNO, DUNE, HK）

2019.3 锦屏中微子科学论证会



2019.11 锦屏地球中微子研讨会



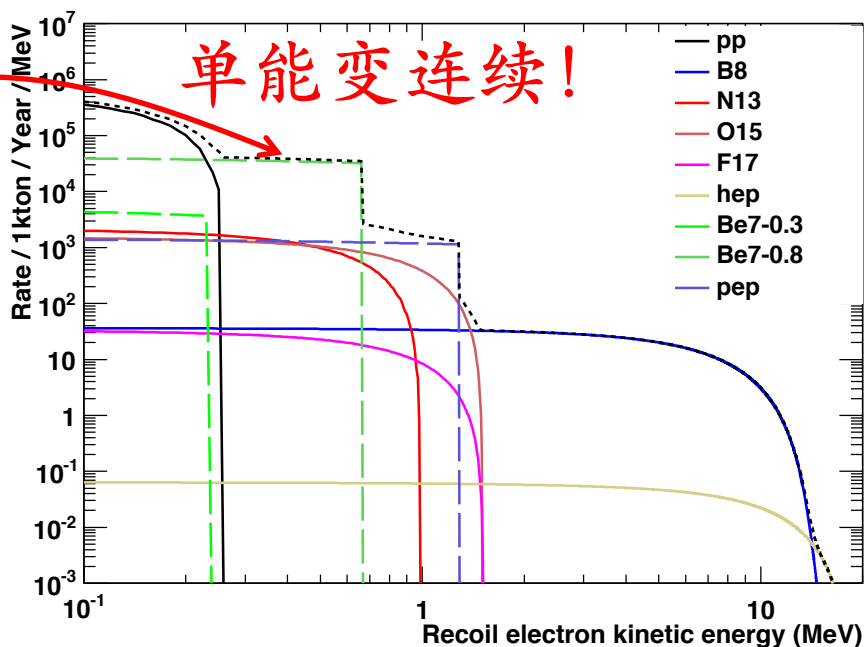
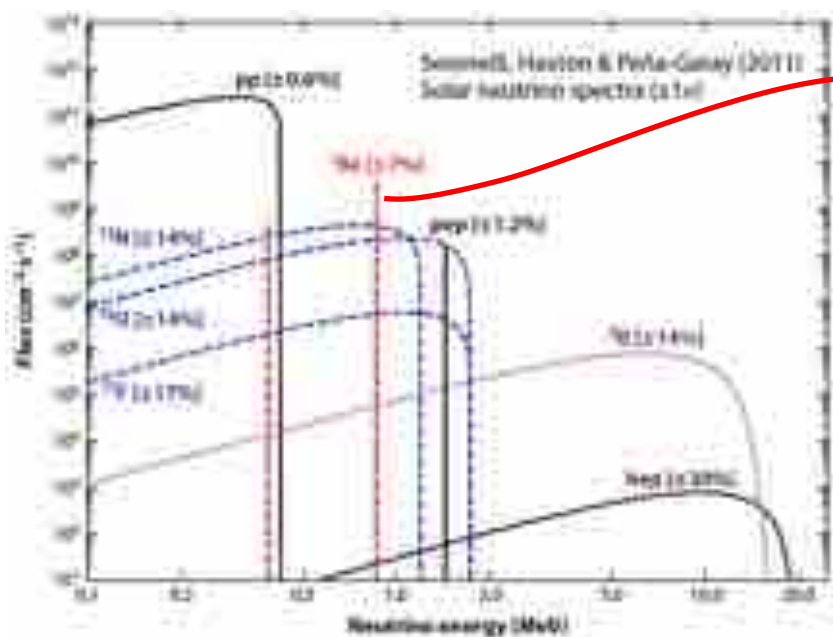
四、锦屏中微子实验 预研

“Go for the messes—that’s where the action is
(广阔天地，大有作为).”

史蒂芬·温伯格, 2003

太阳中微子实验难度在哪里？

中微子-电子弹性散射测量法，解谱很困难！



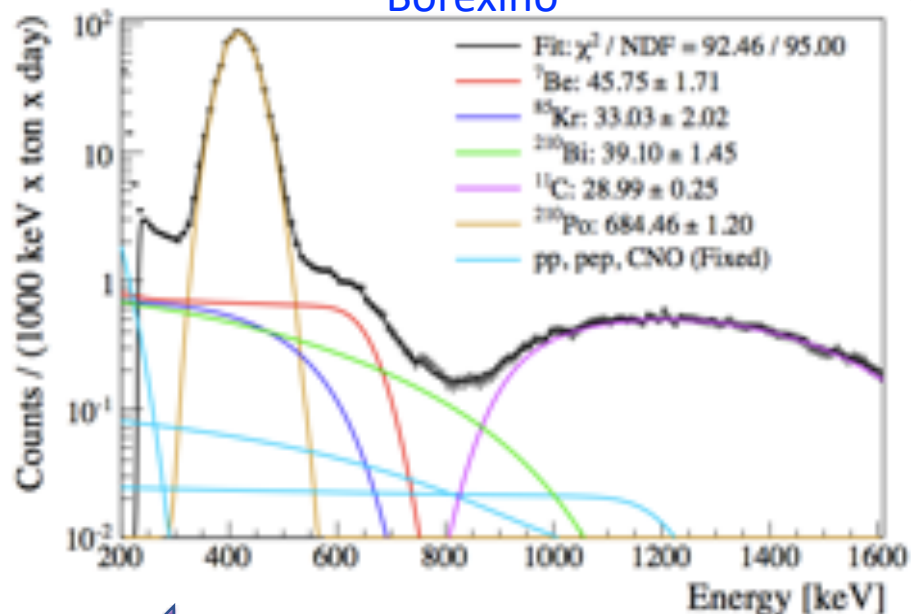
$$T_{\max} = \frac{E_{\nu}}{1 + m_e / 2E_{\nu}}$$

$$F(T_e) = \int_0^{E_{\nu, \max}} \phi(E_{\nu}) \frac{d\sigma}{dT_e} dE_{\nu}$$

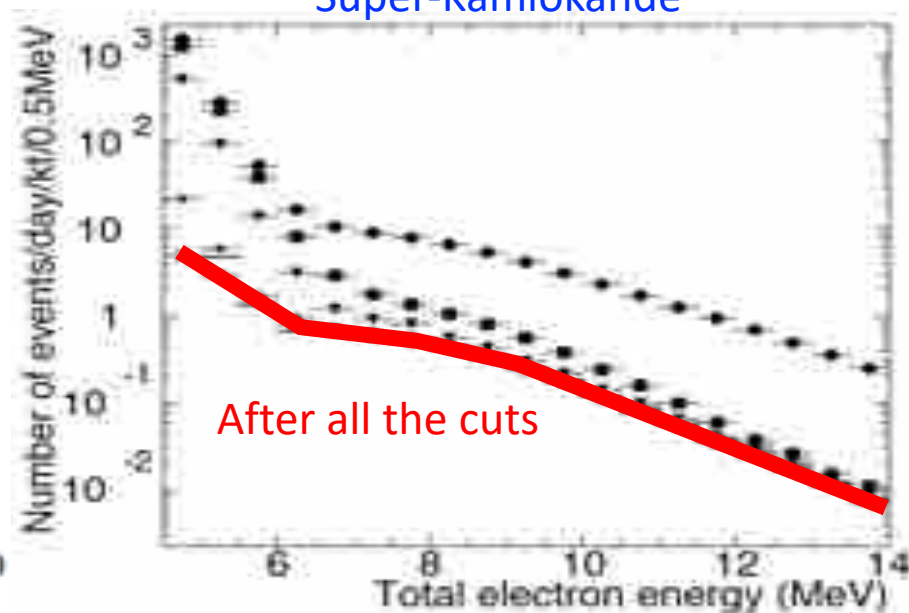
实验的本底很麻烦!

探测方法: $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$

Borexino



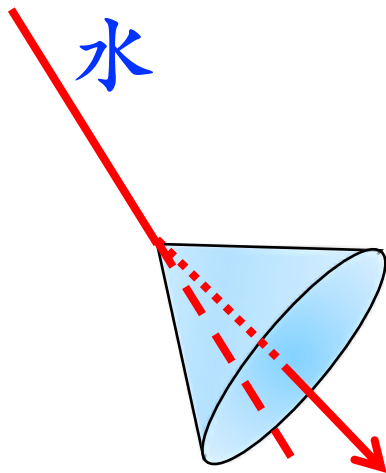
Super-Kamiokande



- ① 外部本底 (PMT, 周围岩石...)
- ② 内部本底 (${}^{222}\text{Rn}$...)
- ③ 宇生本底

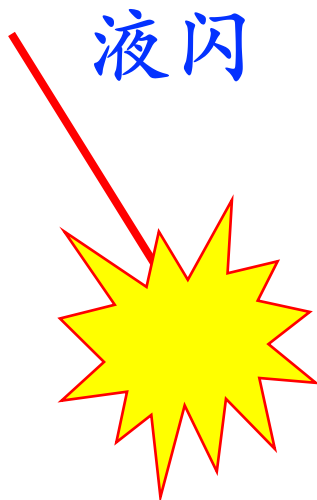
解决方案：慢（发光）液闪

SNO
SK
HK



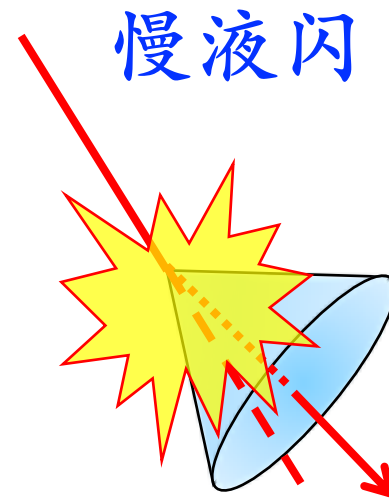
好的方向测量

Borexino
SNO+, JUNO
DUNE



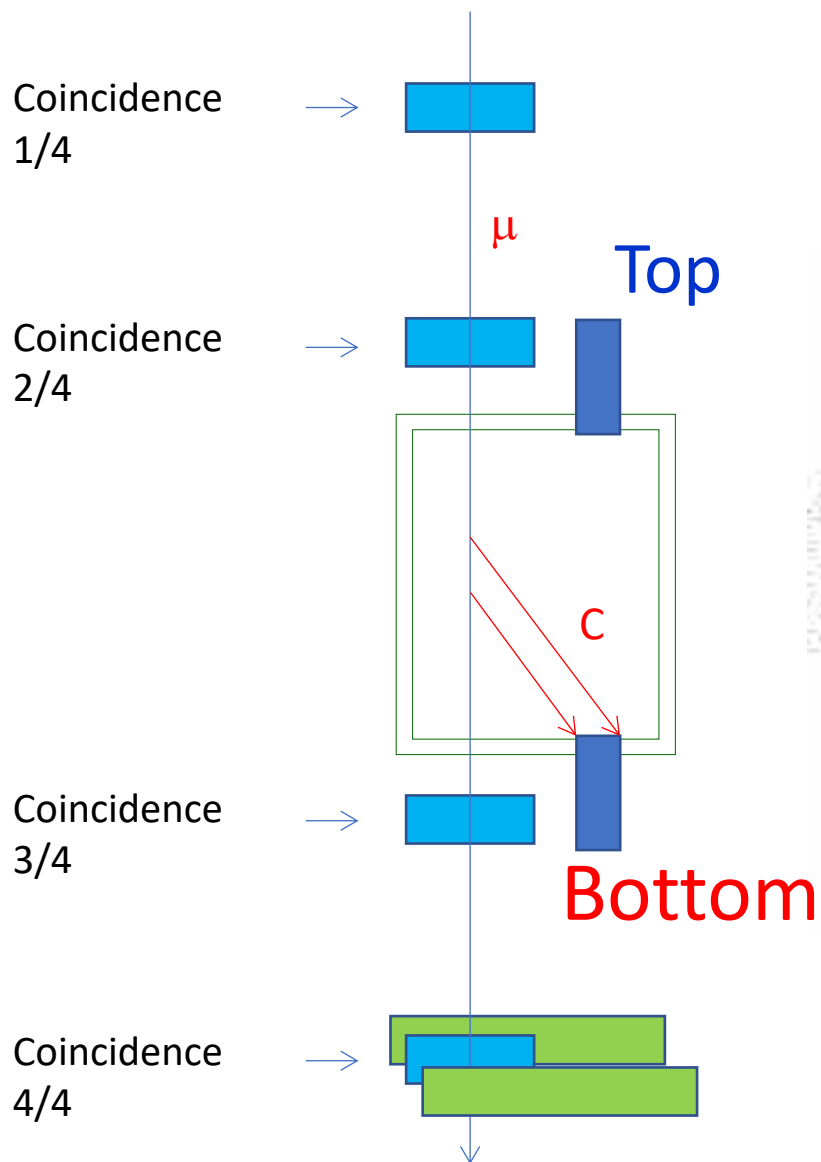
好的能量测量

Theia
Jinping

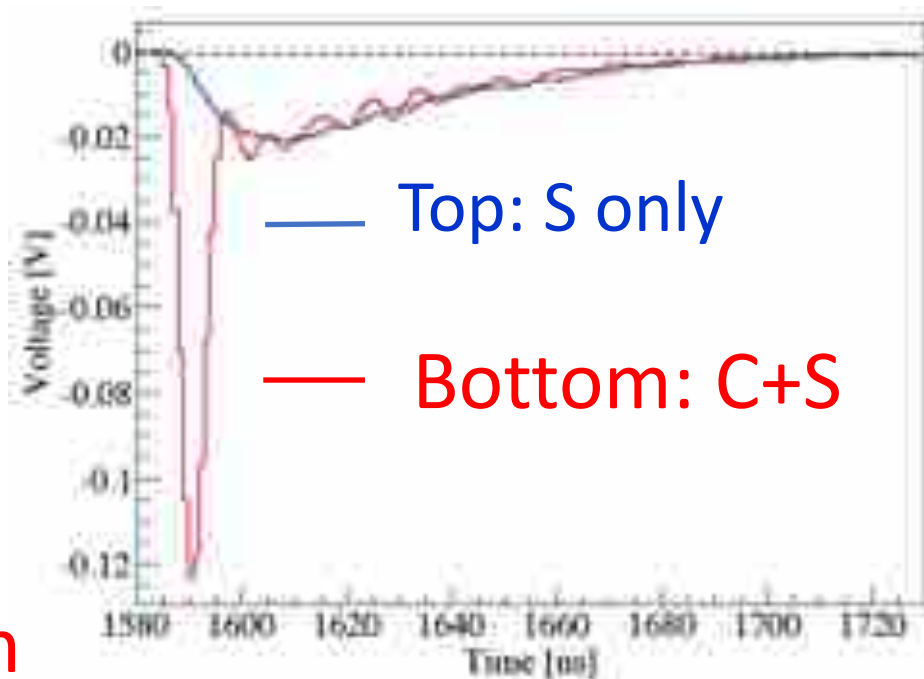


好的方向与能量测量

慢液闪预先研究

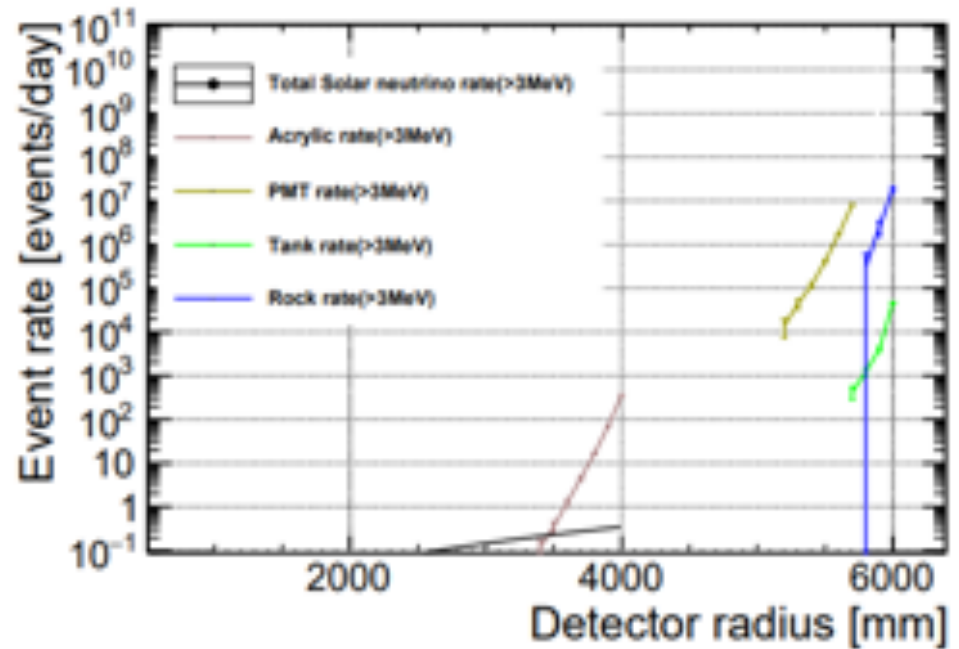
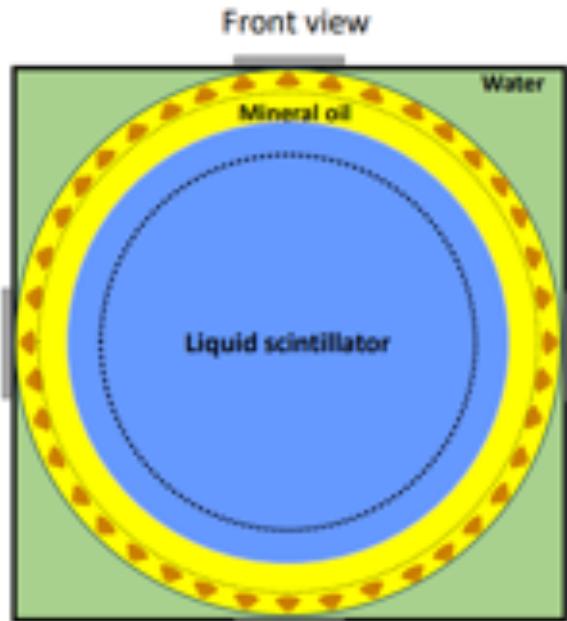


顶部与底部的PMT脉冲
波形可区分两种光。



NIMA 830 (2016) 303

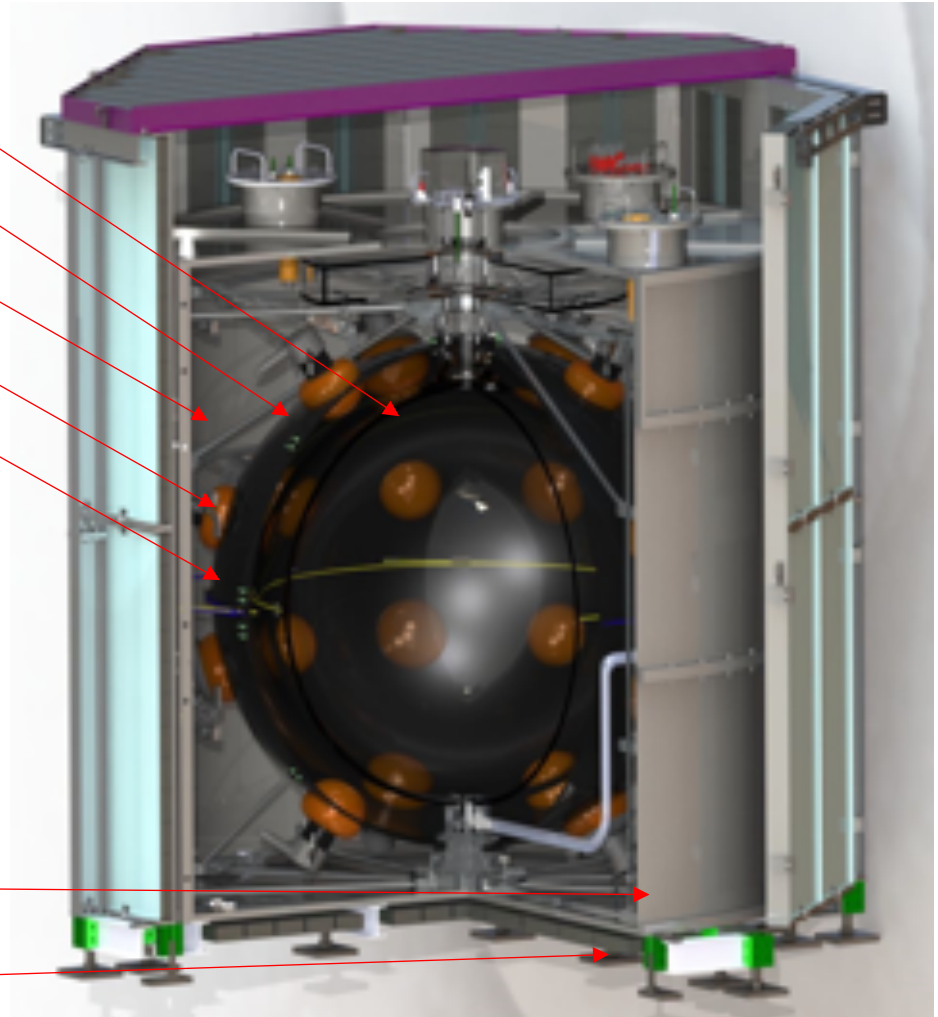
探测器模拟与几何结构优化



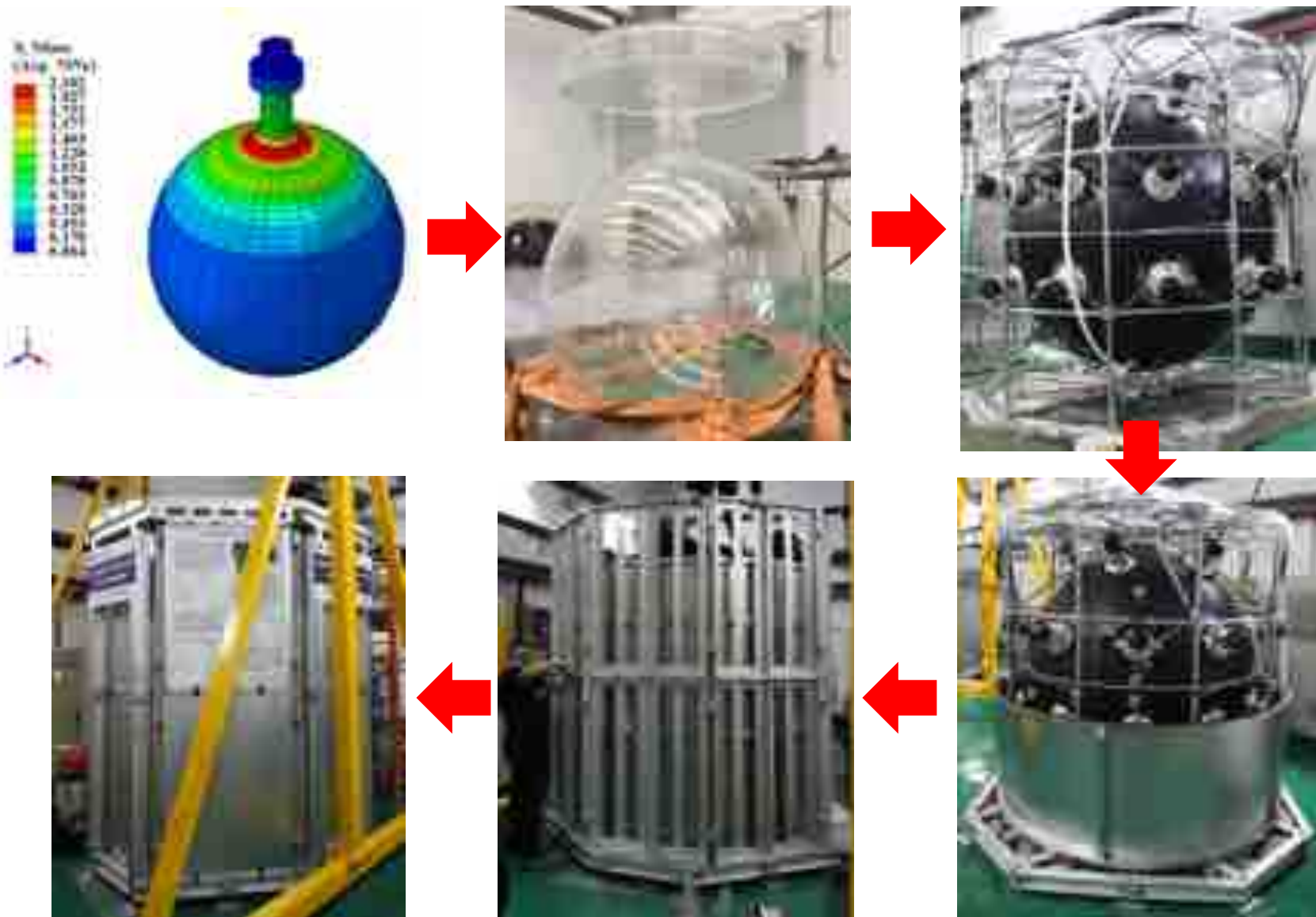
- 测量岩石，不锈钢，PMT，纯水，液闪，矿物油，亚克力等全部物质的放射性特性。
- 给定实验室空间，优化设计使靶体积最大。

一吨中微子探测器原型机

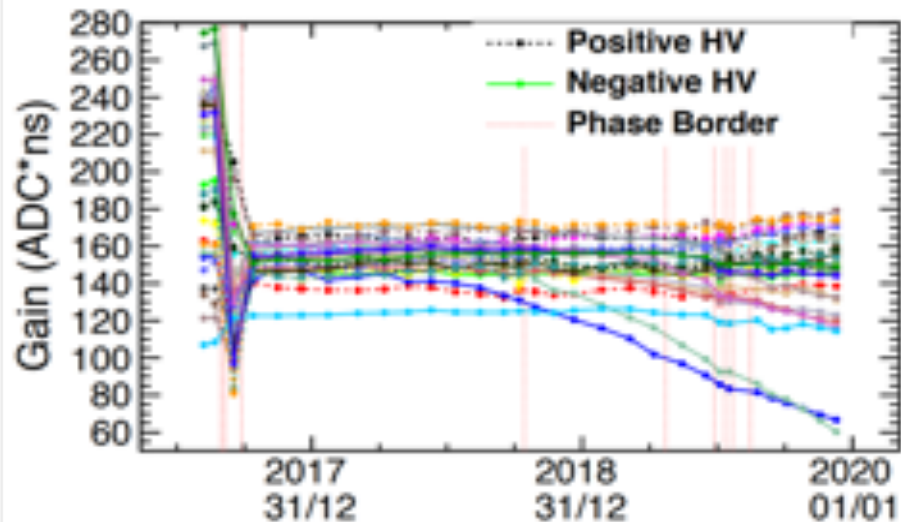
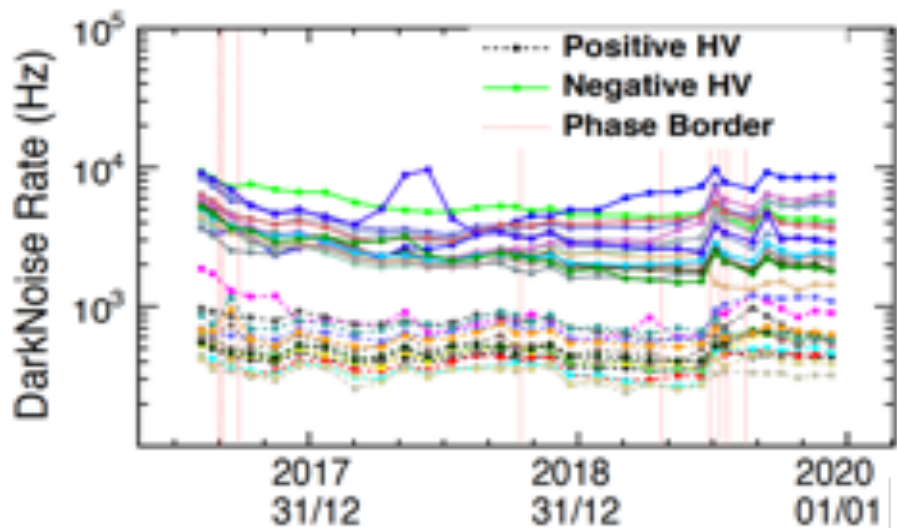
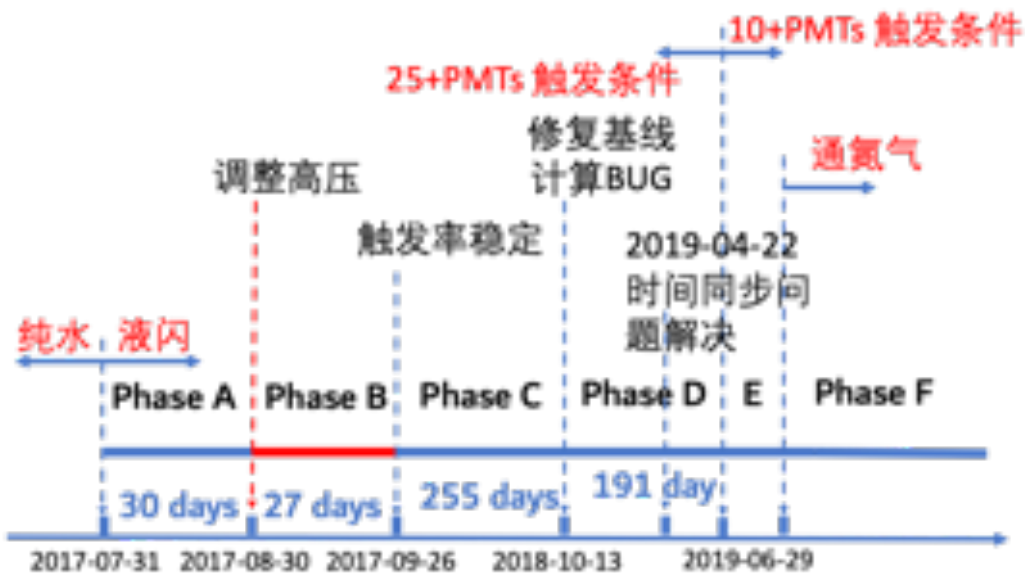
1吨液闪
透明亚克力容器
纯水
30只8英寸PMT
黑色粗糙球壳
FADC*8 10 bit 1GS/s
逻辑触发板
高压系统
液面监测
数据获取和远程监控
液体除氦
不锈钢桶
铅屏蔽



一吨原型机的安装

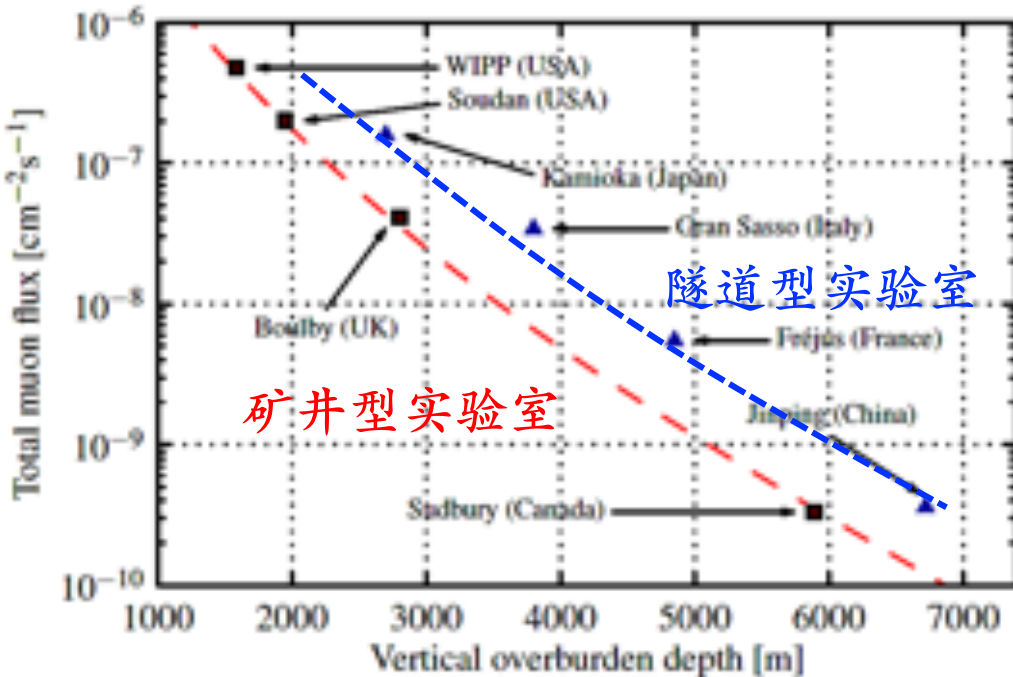
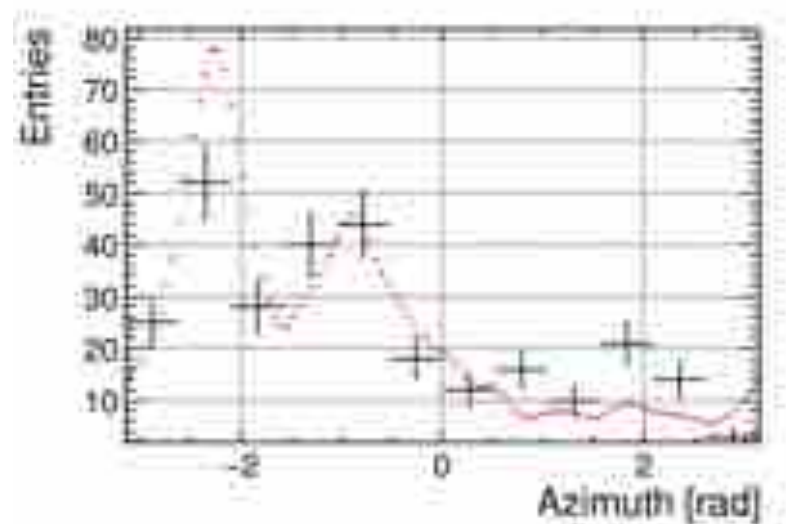
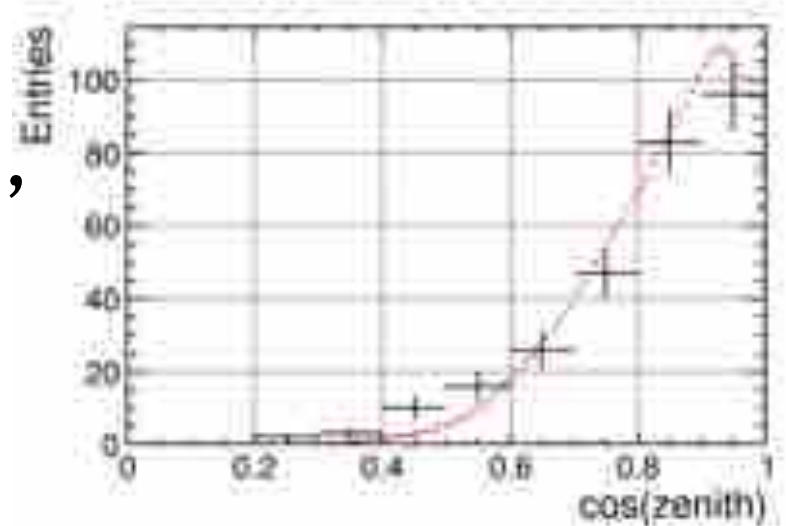


一吨原型机的运行

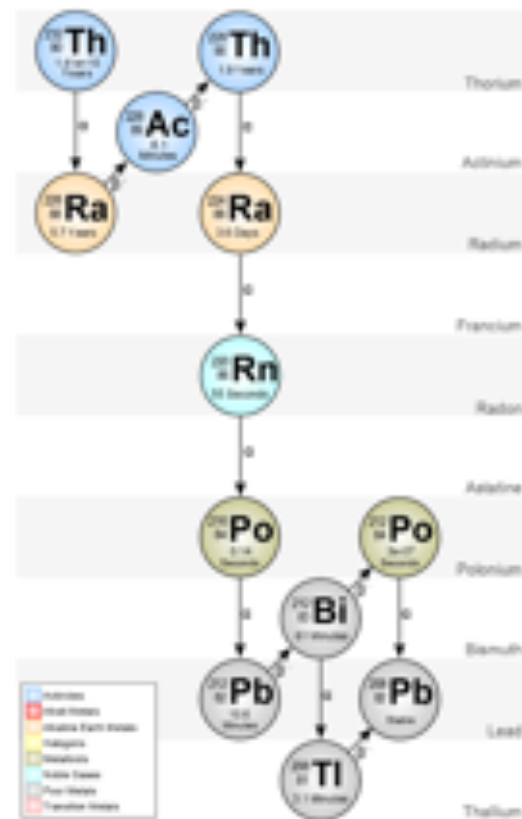
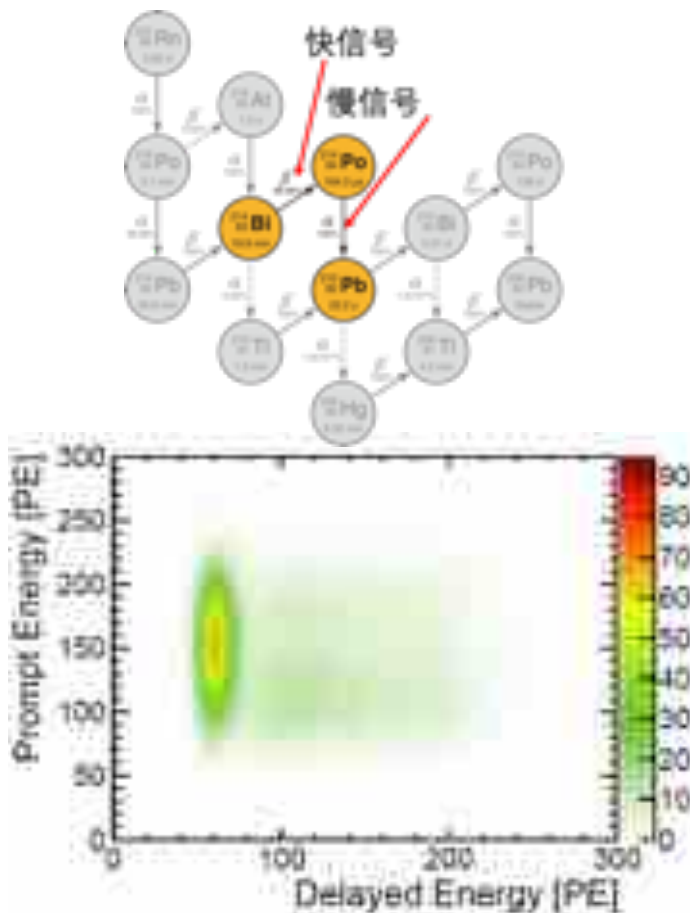
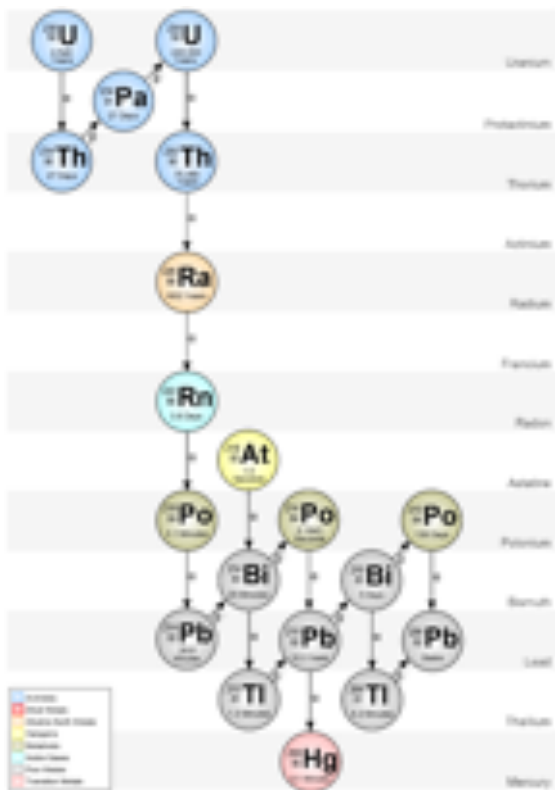


宇宙线通量测量

通过对入射宇宙线方向的测量，研究了山体泄漏，测量了锦屏地下实验室一期中宇宙线的通量。



液闪中的铀、钍本底测量



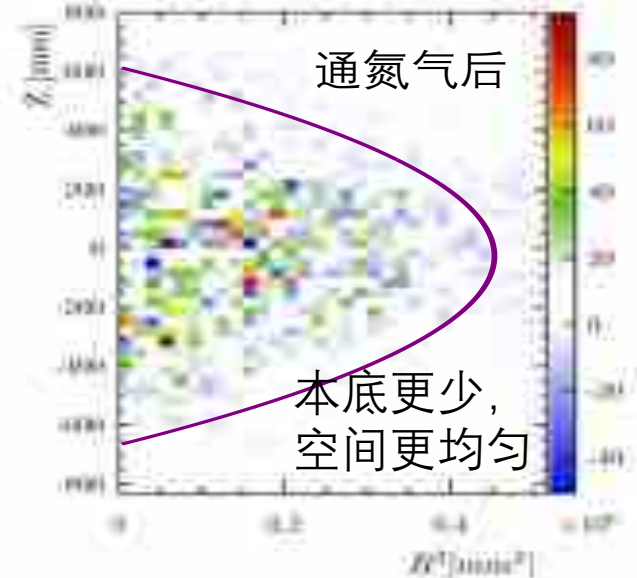
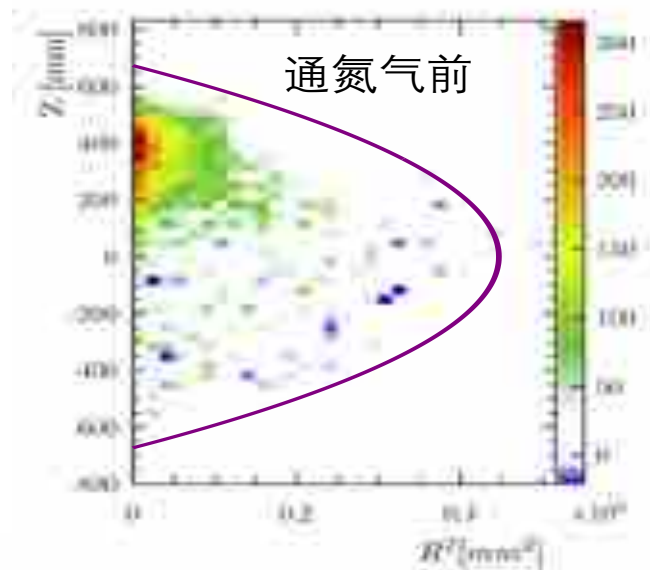
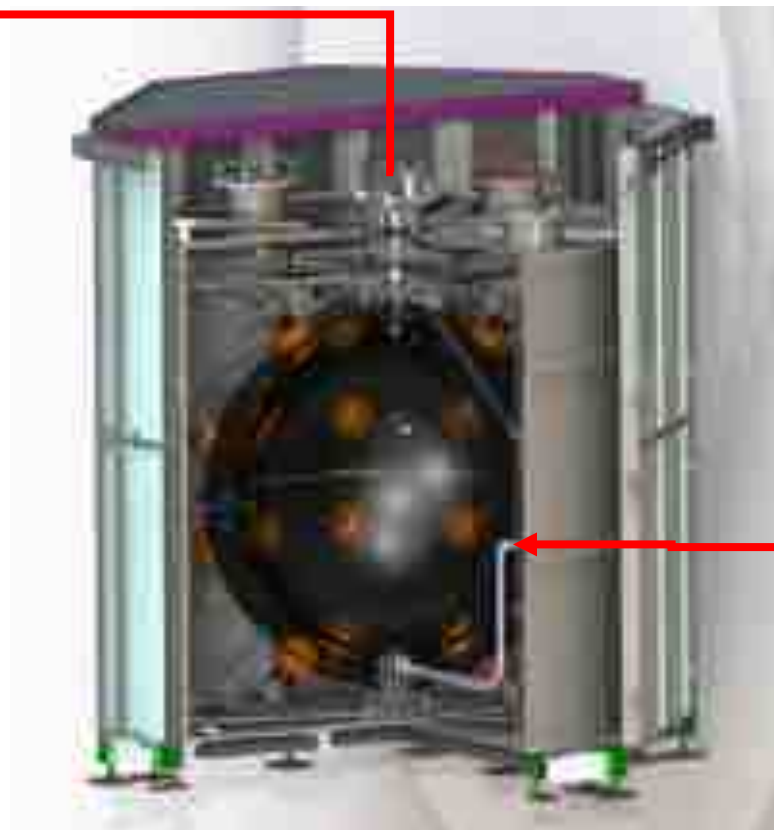
$$R_{U-238} = (2.2 \pm 0.3) \times 10^{-13} \text{ g/g}$$

$$R_{Th-232} \sim 1.7 \times 10^{-14} \text{ g/g}$$

主要归结于氦气渗漏。

目标: 10^{-15} g/g

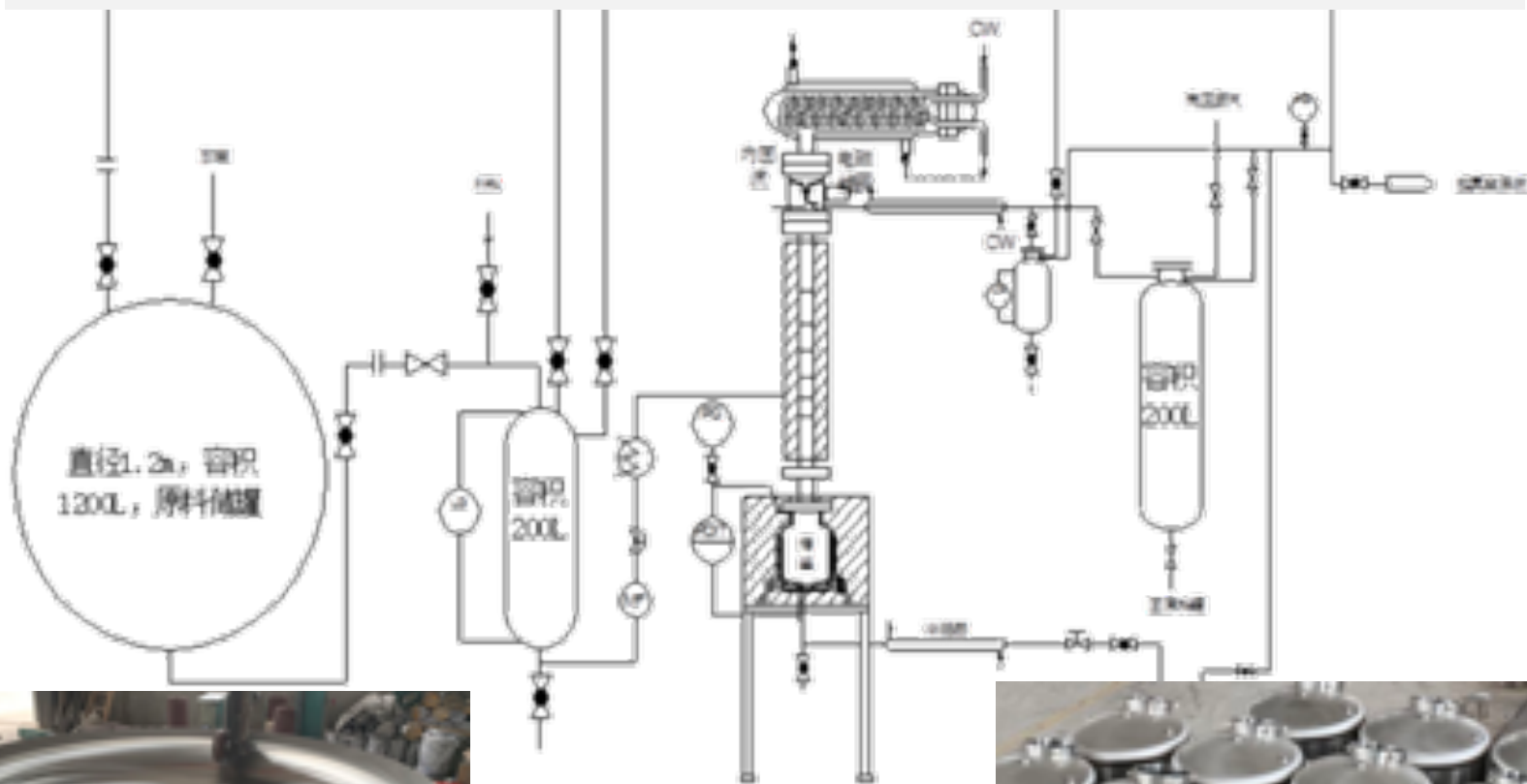
氦气渗漏解决方案



- 从探测器底部缓慢通入氦气
- 瓶内处于正压，阻止氦气渗入
- 带走液闪内一定量的氦气

下一步解决提纯问题

超洁净设备，电抛光，低漏率 $1.3E-6$ Pa.L/S，精馏功能



锦屏中微子国际研讨会

清华, 中山, Queen's Univ., 国科大, 广西大学, 山东大学, BNL, Maryland Univ., Dresden Univ., Mainz Univ., Charles Univ., 南京大学, 武汉大学



五、总结与展望

昨天的发现是今天的刻度，…以及明天的本底。

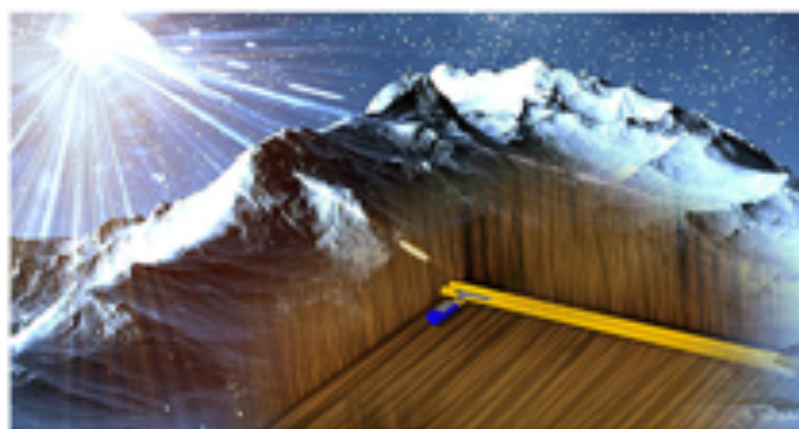
Andrea Giuliani, Neutrino 2018

News archive

- 2016
 - > February 2016
 - > January 2016
- > 2015
- > 2014
- > 2013
- > 2012
- > 2011
- > 2010
- > 2009
- > 2008
- > 2007
- > 2006
- > 2005
- > 2004
- > 2003
- > 2002
- > 2001
- > 2000
- > 1999
- > 1998
- > 1997

World's deepest lab targets neutrinos

Feb 23, 2016



Going underground: the China Jinping Underground Laboratory

An international group of researchers has issued a "letter of intent" for a new neutrino experiment to be built at the **China Jinping Underground Laboratory (CJPL)**. The scientists believe that the proposed Jinping Neutrino Experiment would measure solar and geoneutrinos better than any other facility in the world, thanks to its extremely low level of background radiation.

CJPL is located under a mountain – with about 2400 m of rock cover – in China's south-western Sichuan province. Completed in 2010, it is currently the deepest underground lab in the world, and hosts two dark-matter experiments: CDEX and PandaX. Work began in 2014 to expand CJPL so that it has room for four more experimental chambers – each 12 m wide and 130 m long. The expansion is expected to be complete by the end of this year.

physicsworld



Now available on iPhone & iPad



Share this

- E-mail to a friend
- StumbleUpon
- Twitter

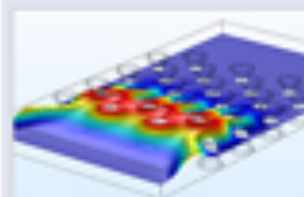
Lake Shore CRYOTRONICS

Model 372
AC Resistance Bridge &
Temperature Controller



Watch the Video

Latest webinar

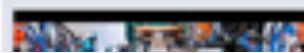


Modelling biosensors,
bioreactors and
biological flow

Sponsored by COMSOL

Register for this free
webinar

Featured video



锦屏国际顾问委员会意见

2014年 IAC 报告

“...IAC认为，最初旨在探测地球中微子的**千吨级闪烁探测器**可能是CJPL中微子科学的第一步，原则上类似于Borexino 和 KamLAND，前提是上述研究得出了积极的结论，并利用合作学会的每一个减少环境本底的技巧，以及随后转成的新实验，包括无中微子双贝塔衰变探测器的掺杂技术。”

2016年 IAC 报告

“...IAC强烈支持该项目，因为CJPL在减少本底方面具有相当大的优势。我们不知道在埋深如此大的地方还有其他实验，因此这显示了CJPL的优势。此外，**这个项目的科学目标是令人信服的。**...”

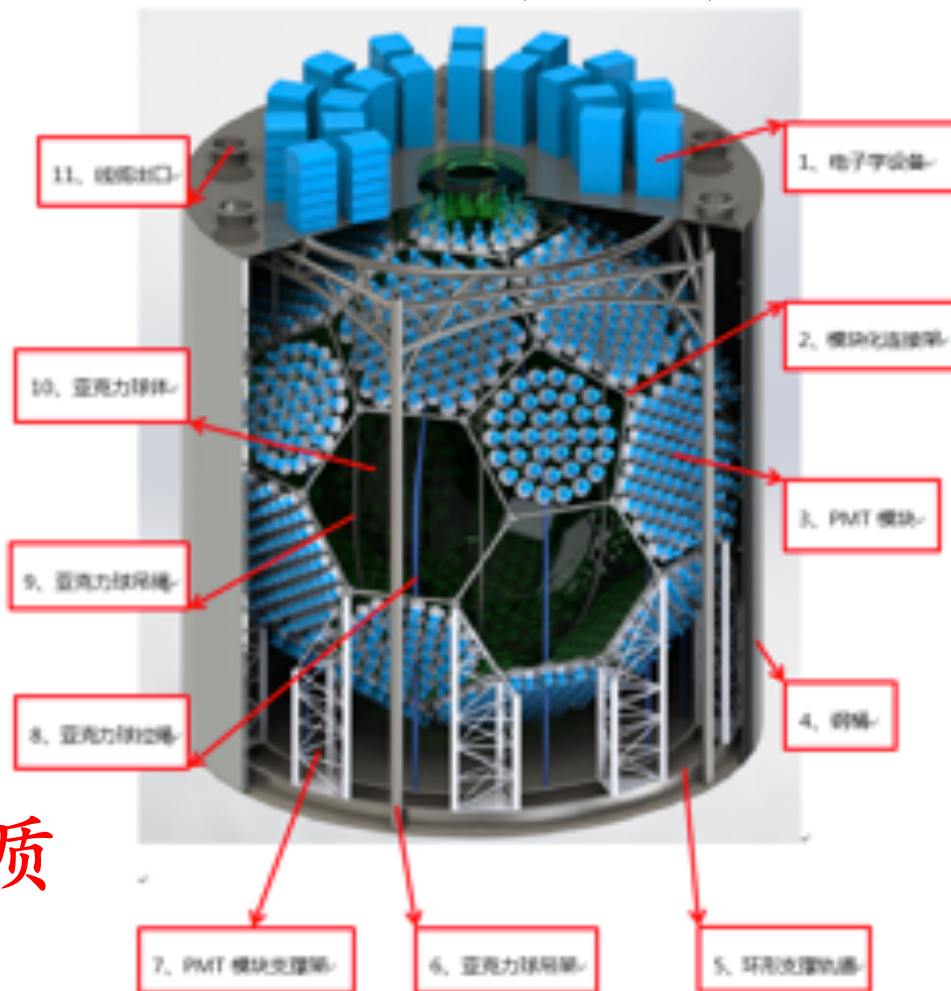
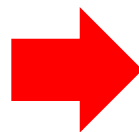
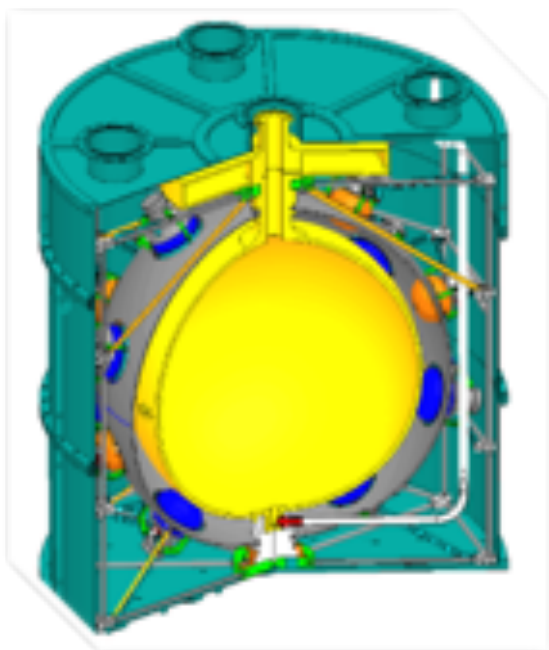
2018年 IAC 报告

“在中微子实验方面，CJPL 的竞争者很少，优势明显...”

复用大亚湾设备，建百吨探测器

一吨 (1米)

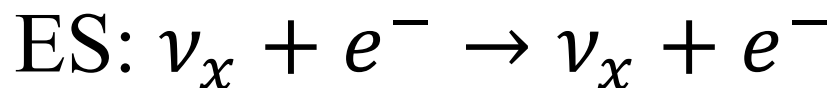
百吨 (10米)



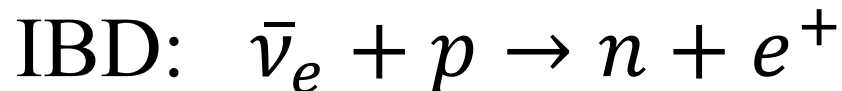
建成可更换靶物质的
百吨级探测器。

锦屏太阳中微子观测站实验方案

纯水方案：最容易实施，主要探测硼-8中微子与电子的弹性散射（ES）过程，也是探测器初步调试的阶段，ES过程可以和各种味道中微子反应，缺点是散射电子能量与中微子能量关系复杂，需要解谱推知中微子能量，精度差。

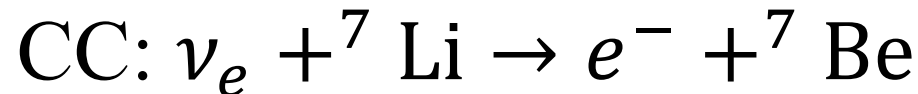


纯液闪方案：目前有着最好的低本底纪录，高能分辨，兼容ES过程探测，并且特别适合地球反电子中微子的探测（IBD），是一个重要选项。



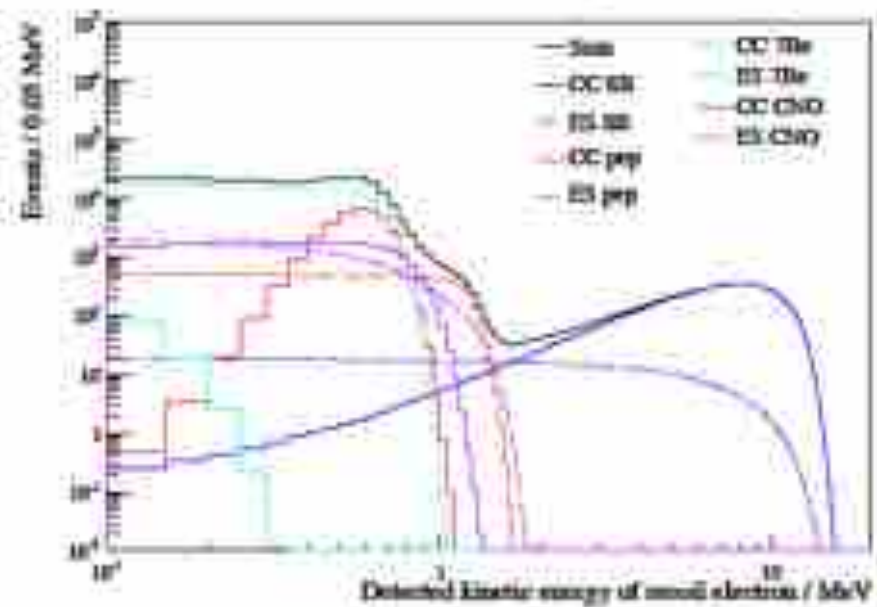
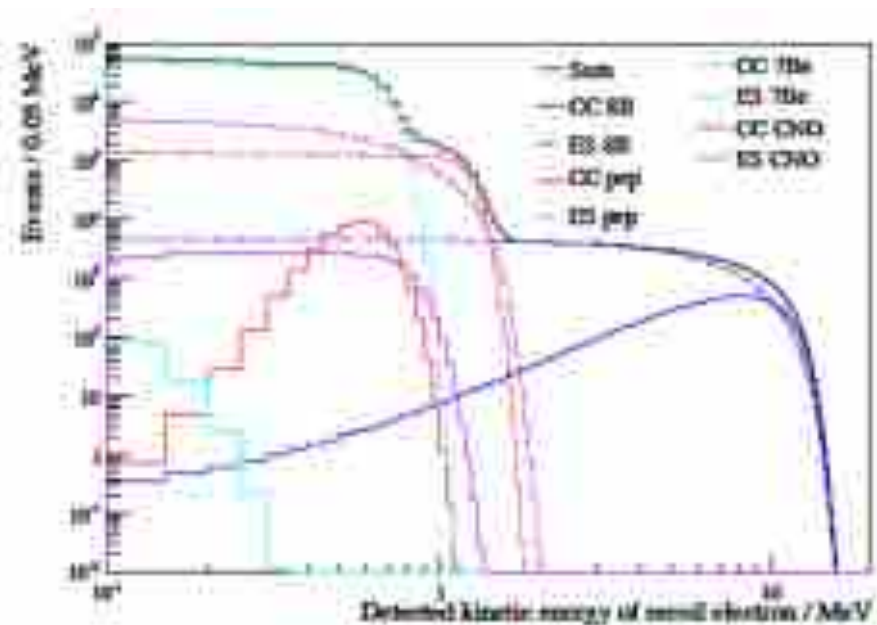
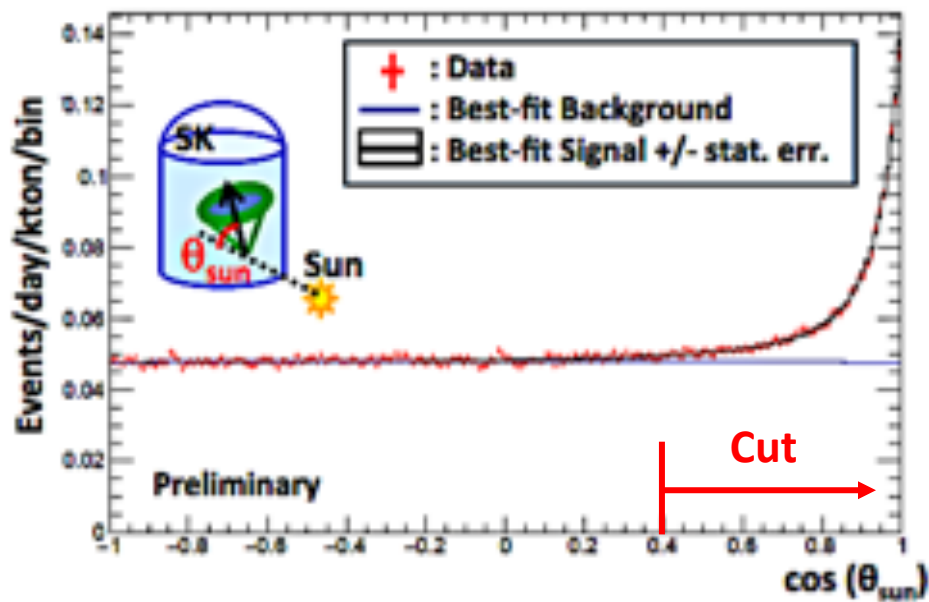
慢液闪方案：可以同时测量切仑科夫光和闪烁光，也适合ES和IBD的探测，它强化了粒子鉴别，带电粒子方向重建，是探测并区分太阳中微子弹性散射方向重要方案。

掺杂方案：掺入含 ${}^7\text{Li}$ ， ${}^{71}\text{Ga}$ ， ${}^{19}\text{F}$ 等的化合物，可以探测太阳中微子被原子核俘获的带电流过程（CC），例如：



末态电子能量 E_e 与中微子能量 E_ν 有简单关系：对基态跃迁， $E_e = E_\nu - 0.862 \text{ MeV}$ ，因此，这种单一的能量对应关系可以给出太阳中微子微分能谱。这将有助于真空到物质效应振荡过渡区的物理研究。

可同时测量能量和方向的兆电子伏中微子探测器，如果还采用掺杂技术，就可以大幅压低弹性本底，给出太阳中微子的微分能谱测量。



预期百吨探测器的物理目标

- 成为 Borexino 实验之后的唯一太阳中微子观测站。
- 运行五年可实现的物理目标
 - a) 完整测量硼-8太阳中微子微分能谱；
 - b) 以大于 3σ 的能力排除downturn现象，检验中微子振荡从物质到真空的转换理论；
 - c) 寻找或排除混合质量参数在 $(0.7-2)\times 10^5 \text{ eV}^2$ 区间的惰性中微子；
 - d) 寻找太阳中微子的非标准模型相互作用研究；
 - e) 以超过 3σ 的精度发现和测量来自喜马拉雅山脉地壳中微子。

DBD 中的太阳中微子本底

$$0\nu\beta\beta: Z^{-1}A \rightarrow Z^{+1}A + \beta^{-} + \beta^{-} + Q_{\beta\beta}$$

太阳中微子本底

$$\left[\begin{array}{l} \text{带电流: } Z^{-1}A + \nu_e \rightarrow Z A + e^{-} + \gamma + Q_{\nu} \\ \text{贝塔衰变: } Z A \rightarrow Z^{+1}A + \beta^{-} + \gamma + Q_{\beta} \end{array} \right.$$

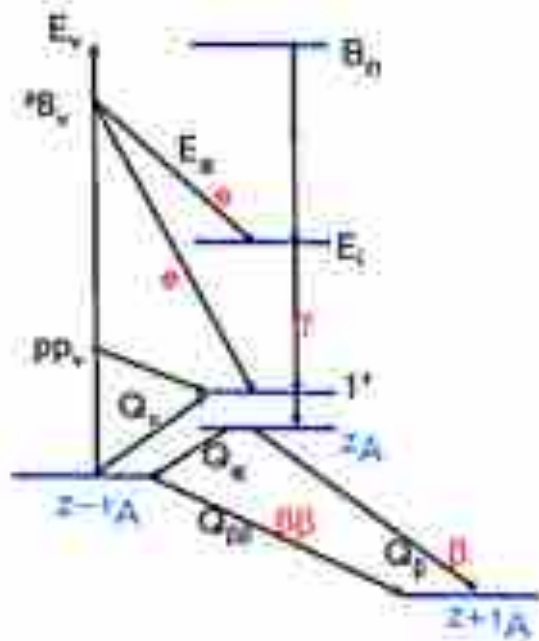


TABLE 2. $\beta\beta$, CC, and SB Q values in units of MeV and solar- ν capture rates in units of SNU for selected $\beta\beta$ nuclei including the effect of oscillations. Column 3 gives S_{ν} for no oscillations, S_B is the ${}^8\text{B}$ - ν capture rate, and S_{ν} is the total solar- ν capture rate. The background rates for β decay (B_{β}) and $\beta\beta(2\nu)$ ($B_{\beta\beta}$) are calculated for $\delta = 0.02$.

Isotope	S_{pp} (SNU)	S_B (SNU)	S_{ν} no osc. (SNU)	S_{ν} (SNU)	$B_{\beta\beta}$ events/1 y	B_{β} events/1 y
${}^{76}\text{Ge}$	0	5.0	15.7	6.3	0.03	0.005
${}^{82}\text{Se}$	257	10.0	672	368	4.42	0.15
${}^{100}\text{Mo}$	391	6.0	975	539	0.11	1.56
${}^{130}\text{Te}$	0	6.1	67.7	33.7	0.48	0.01
${}^{136}\text{Xe}$	0	9.8	136	68.8	0.55	0.003
${}^{150}\text{Nd}$	352	15.5	961	524	0.12	1.00



感谢您的聆听！
请多提宝贵意见！