



清华大学

锦屏中微子实验

王喆
清华大学

讲座内容：

1. 背景介绍
2. 锦屏地下实验室
3. 中微子探测思路
4. 中微子振荡及物质效应
5. 太阳中微子
6. 地球中微子
7. 超新星中微子
8. 锦屏中微子实验的计划和进展

一、背景介绍

中微子概念 – 实验发现 – 探索工具

1931年 Pauli提出中微子的概念

1956年 Cowan和Reines探测到中微子

1995 Nobel

1962年 发现缪子中微子

1988 Nobel

1962年 R. Davis探测到太阳中微子及反常

1980年代 大气中微子反常，超新星中微子

} 2003 Nobel

2001年 确定太阳中微子振荡与物质效应

2015 Nobel

2012年 大亚湾非0混合角 θ_{13}

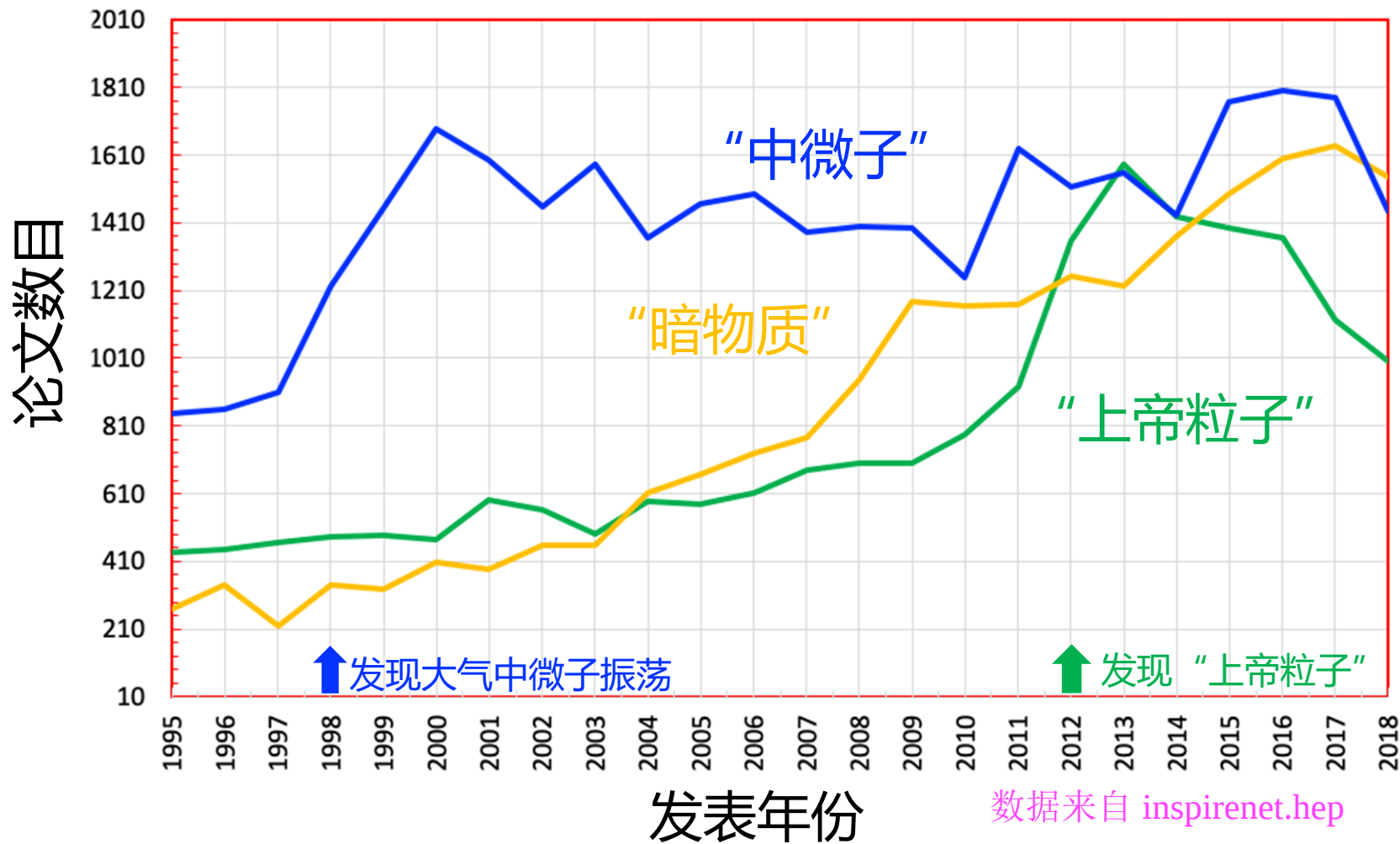
2012 Science 十大突破

2013年 IceCube甚高能宇宙中微子

2013 Phys. World十大突破

最近还有 δ_{CP} 和mass hierarchy等的初步结果

近二十年粒子物理的发展历程



过去十五年进展如何？

Neutrino 2018

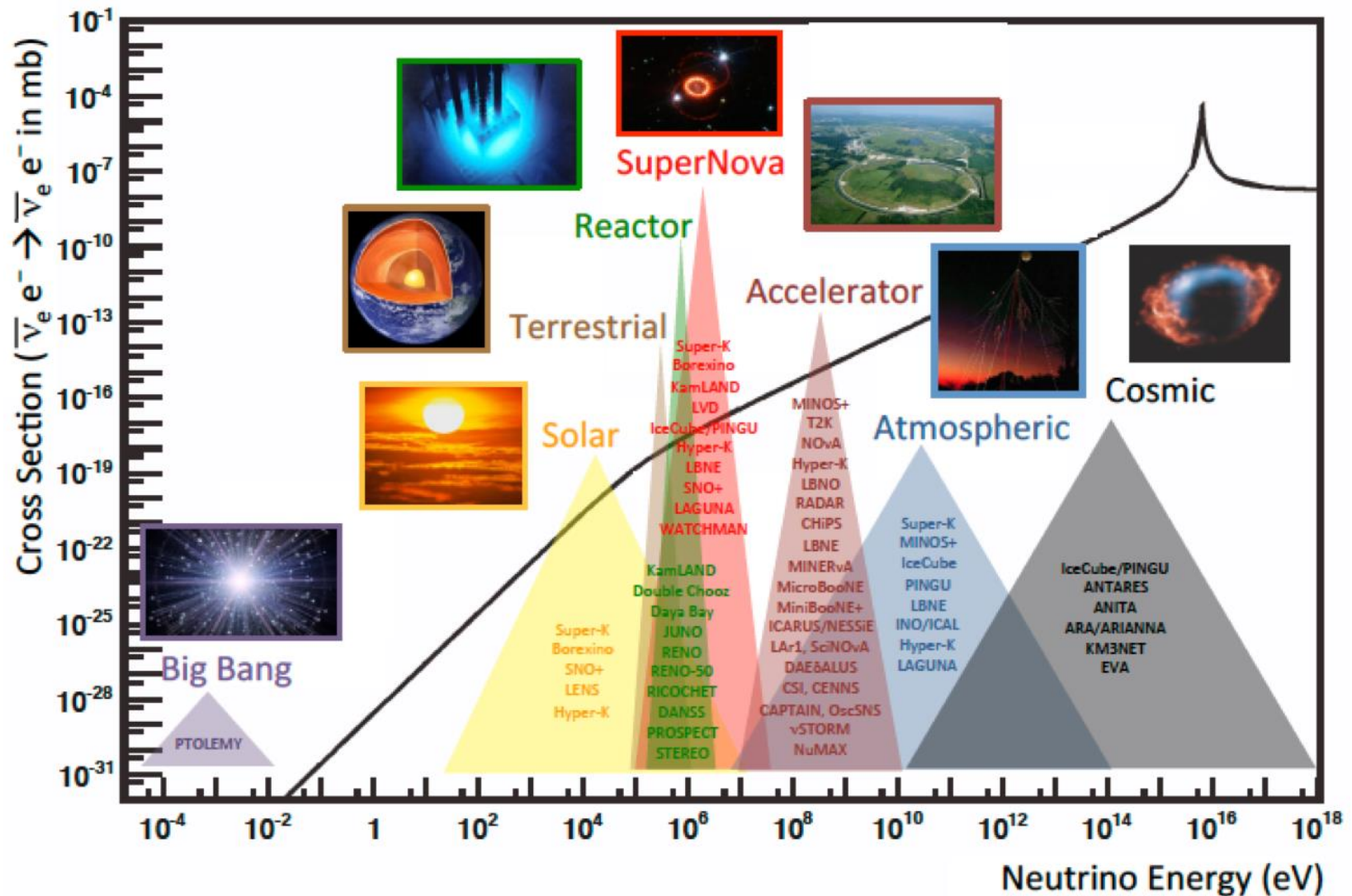
1. 无中微子双贝塔衰变实验方面有许多突出的工作，但是依然没有什么发现。
2. 中微子振荡研究成功证明了三代中微子框架，并精确测量混合参数（尤其是 θ_{13} ）和中微子质量平方差，并看到了中微子质量正排序及非零轻子CP相位迹象。
3. 碳-氮-氧（CNO）循环与氦-质子聚变（*hep*）过程产生的太阳中微子尚未观测到，标准太阳模型仍需要精确的检验；太阳中微子从真空振荡区过渡到物质效应区的实验缺失。

中微子还进入了地球科学领域

美国国家科学院国家研究理事会2014年指出未来10年出现的7个新的研究机遇：

- ① 早期的地球
 - ② 热化学内动力和挥发物分布
 - ③ 断裂作用与变形过程
 - ④ 气候、地表过程、地质构造和深部地球过程之间的相互作用
 - ⑤ 生命、环境和气候间的协同演化
 - ⑥ 水文地貌-生态系统对自然界与人类活动变化的耦合响应
 - ⑦ 陆地环境的生物地球化学和水循环，以及全球变化对它们的影响
- } 放射性同位素的形成
与产热对地球的影响

中微子源与中微子实验



兆电子伏能区中微子物理与实验

- ✓ 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} 与中微子质量排序 (JUNO)
- ✓ 太阳中微子 (标准太阳模型、振荡曲线、高温主序星)
 - 寻找碳-氮-氧循环中微子 (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, SNO, HK, JUNO?)
 - 太阳中微子在地球的物质效应 (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)
 - 钾中微子 (锦屏?)
- ✓ 超新星中微子
 - 寻找爆发与遗迹中微子 (锦屏、SK、JUNO, DUNE, HK)

为什么要到地下？

如果 SNO 实验室不是设在 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！

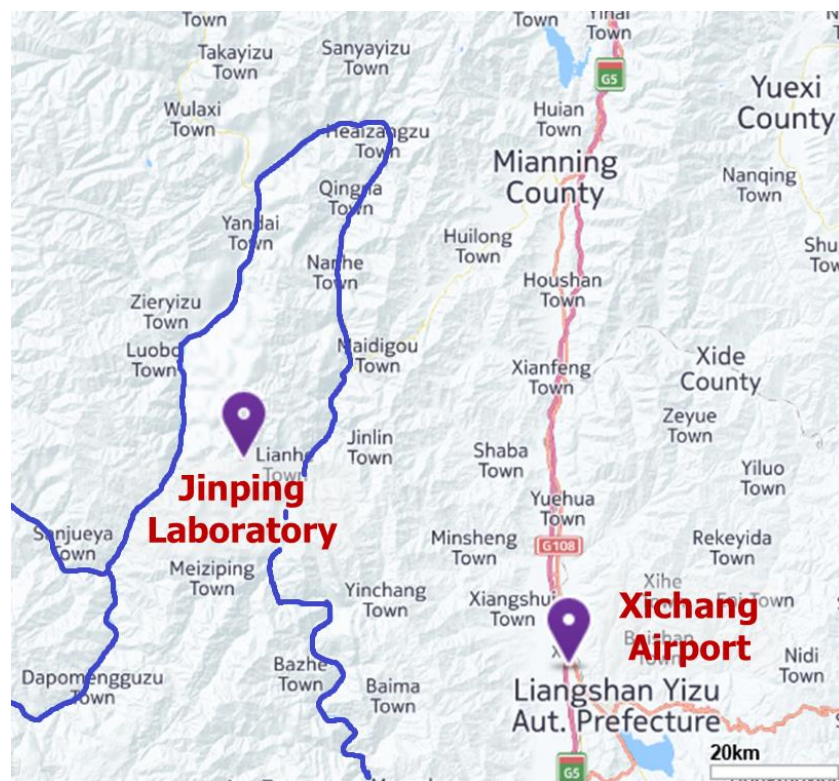
Sudbury
during a solar
storm

Art McDonald, Neutrino 2018



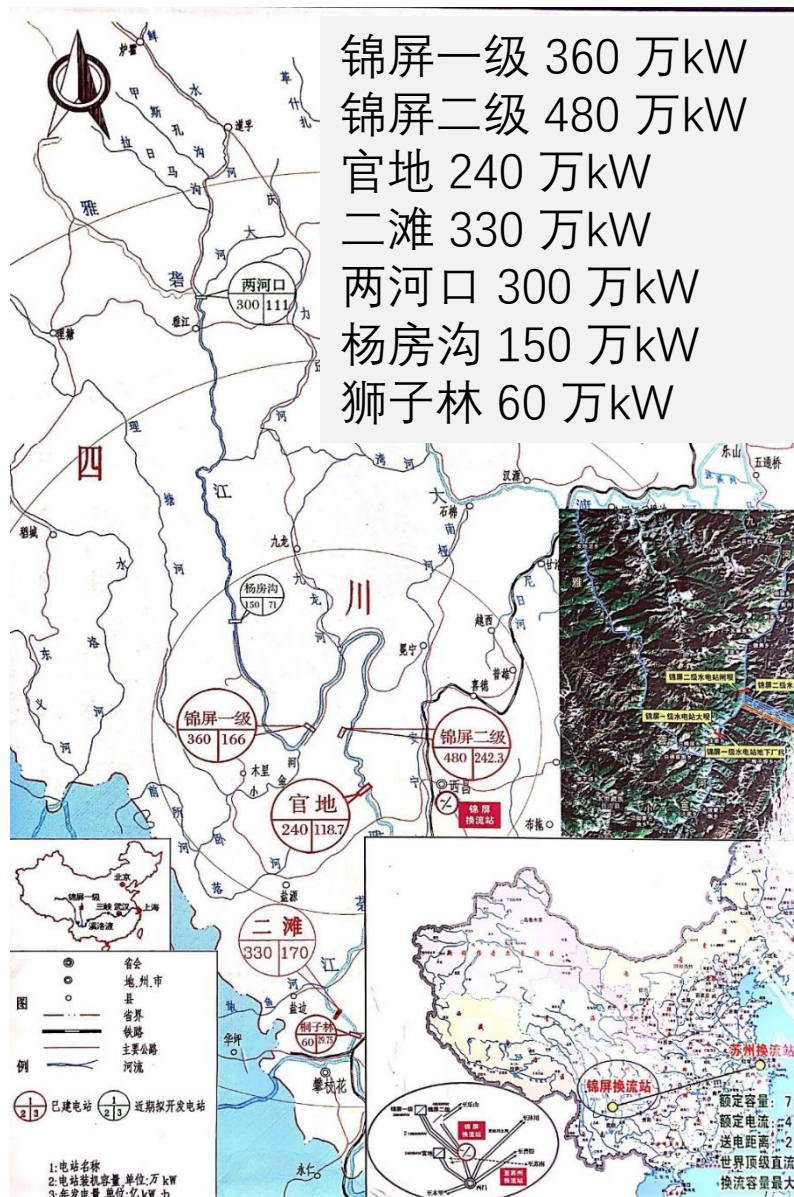
二、锦屏地下实验室

锦屏实验室的地理位置

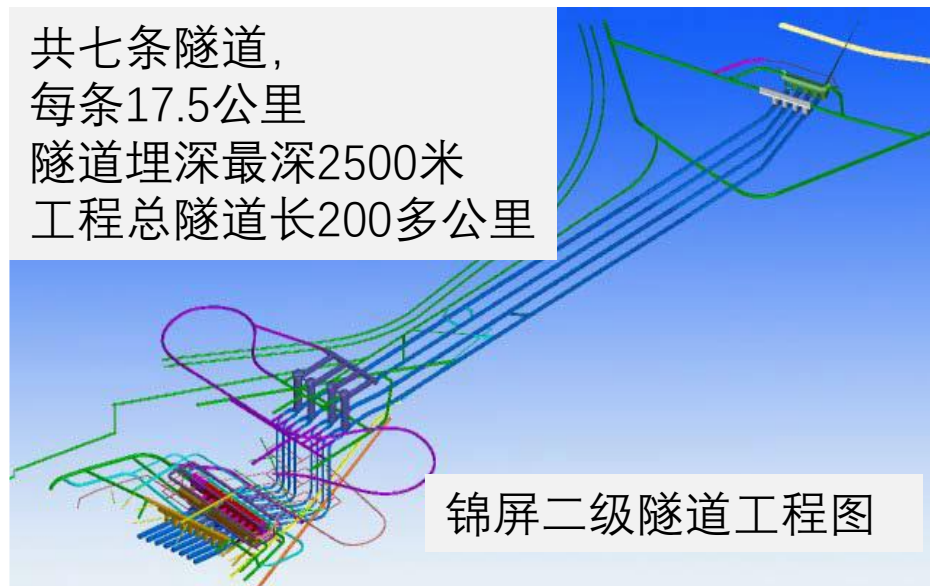


飞机：北京，上海，广州，深圳等 → 西昌（直飞）
汽车：西昌 -> 锦屏（2小时）路过西昌发射中心

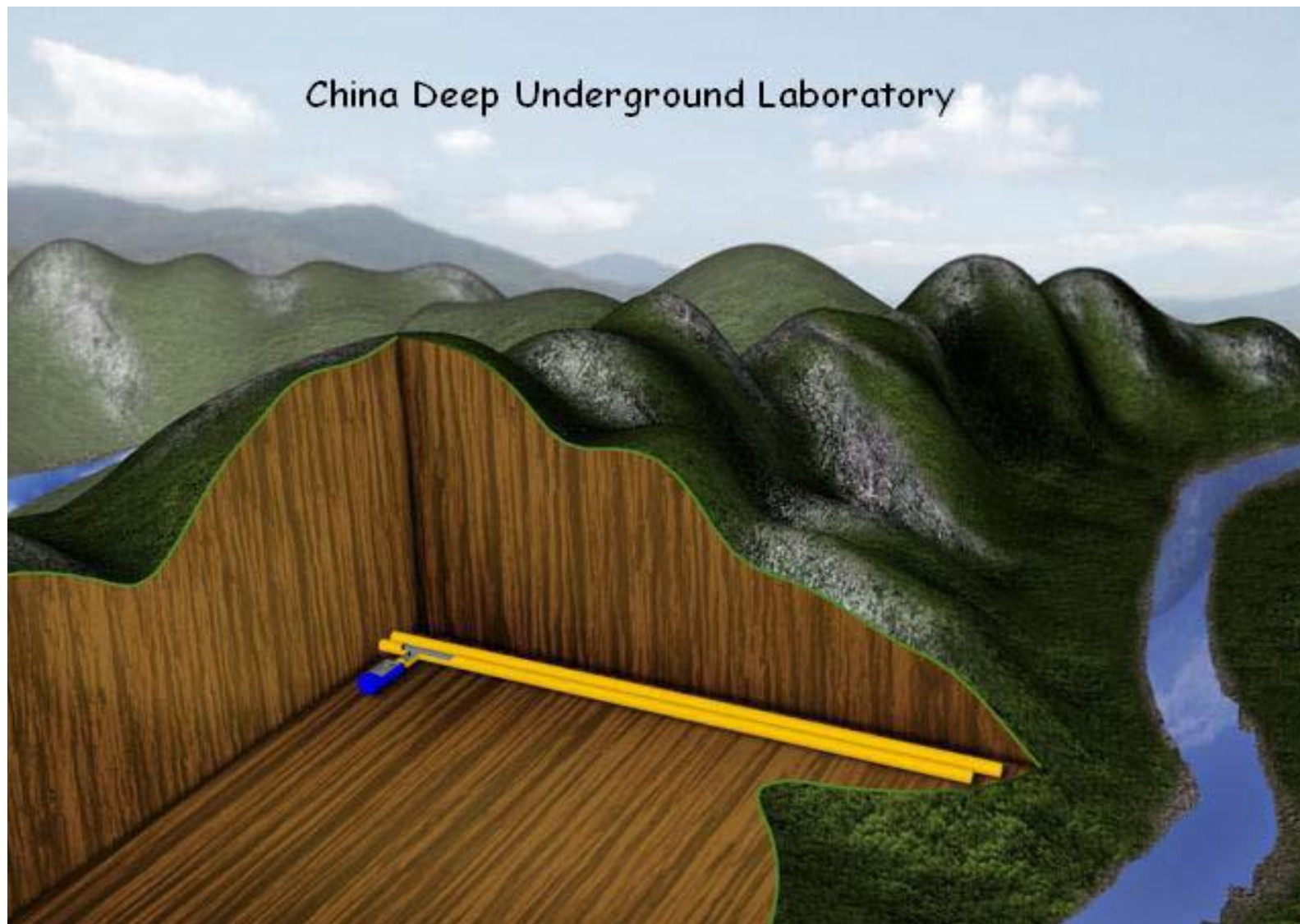
锦屏水电创造了20几个世界第一



共七条隧道,
 每条17.5公里
 隧道埋深最深2500米
 工程总隧道长200多公里

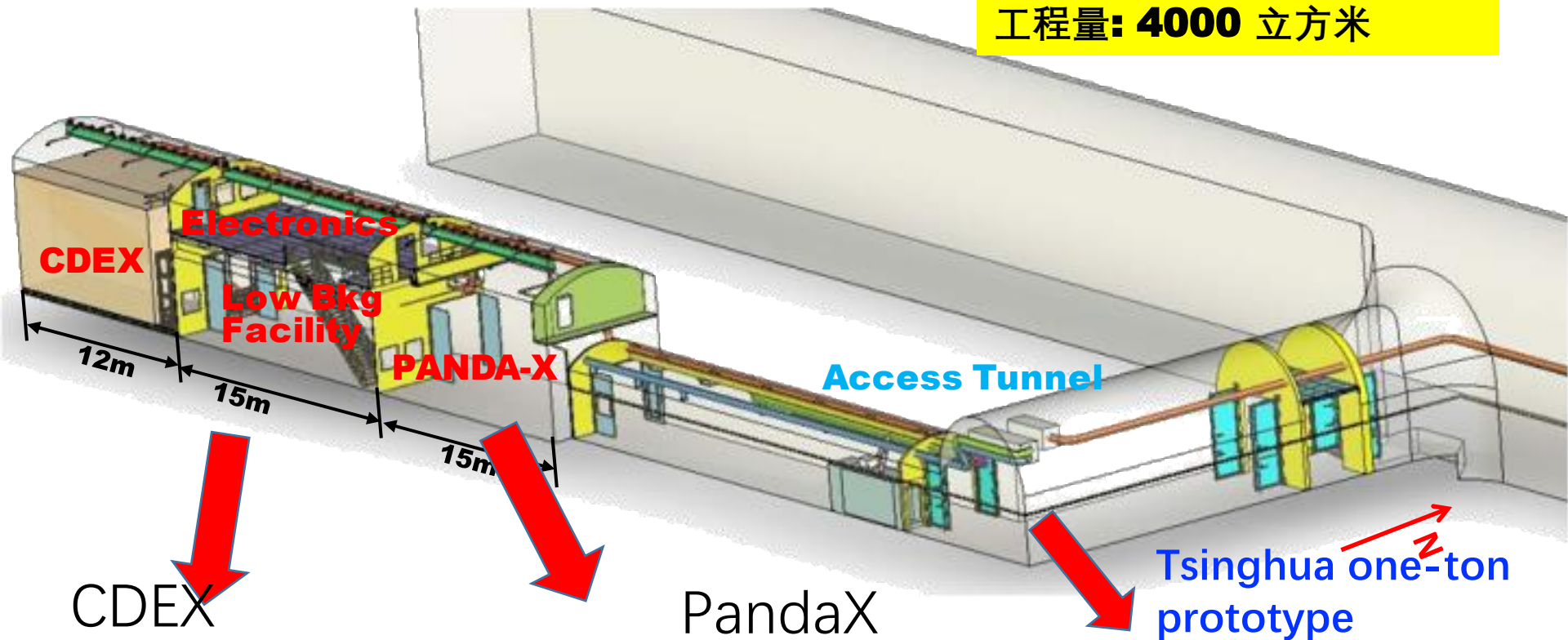


锦屏地下实验室的概念图，大山下的实验室



锦屏地下实验室一期

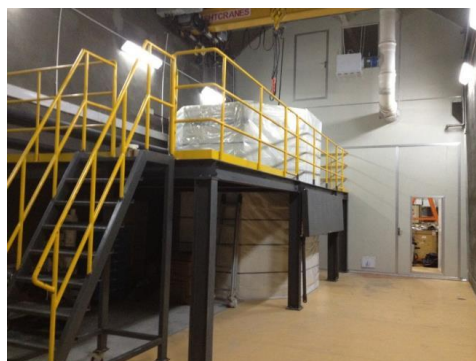
工程量: **4000** 立方米



CDEX

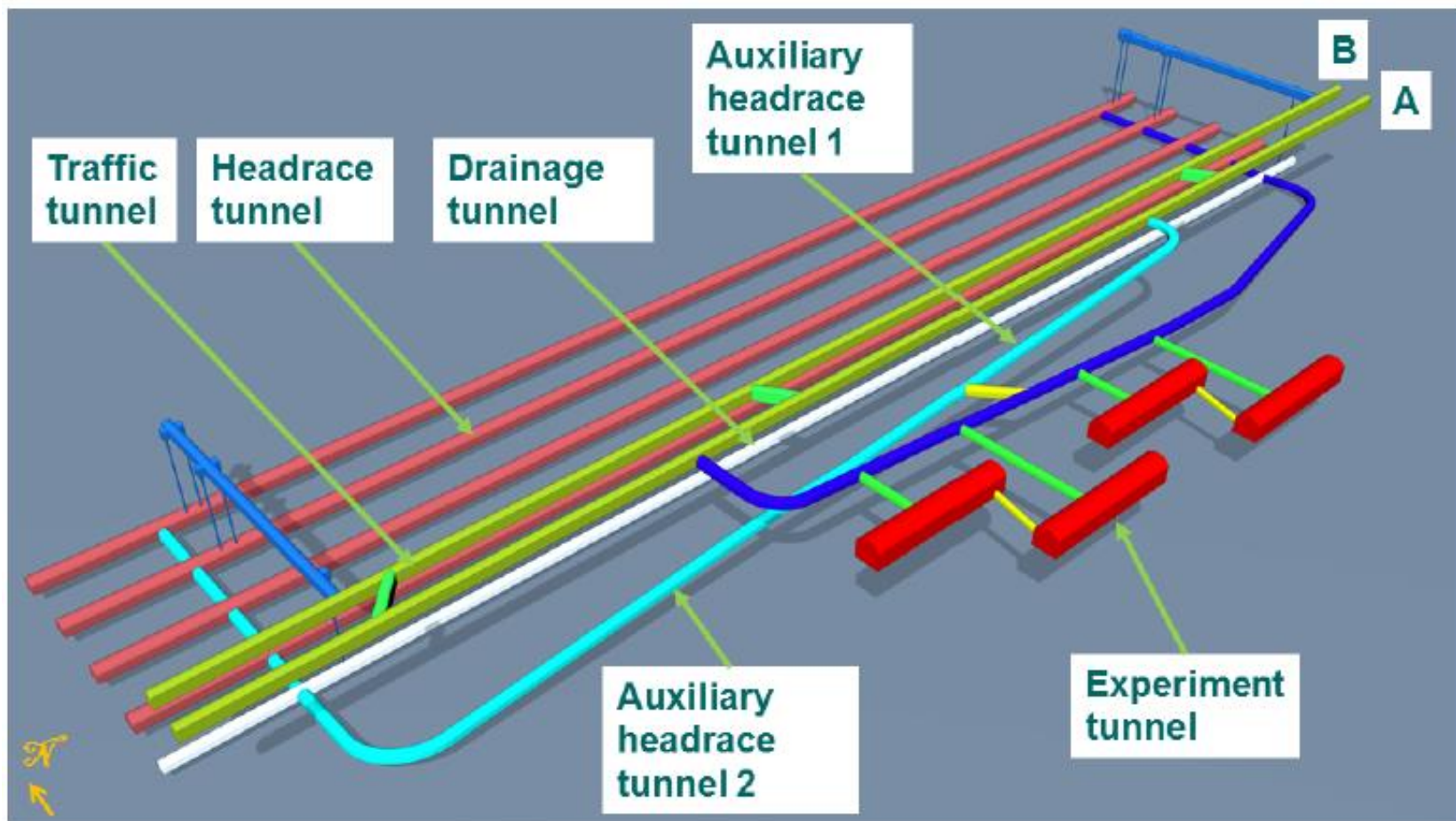
PandaX

Tsinghua one-ton
prototype



锦屏二期实验室示意图

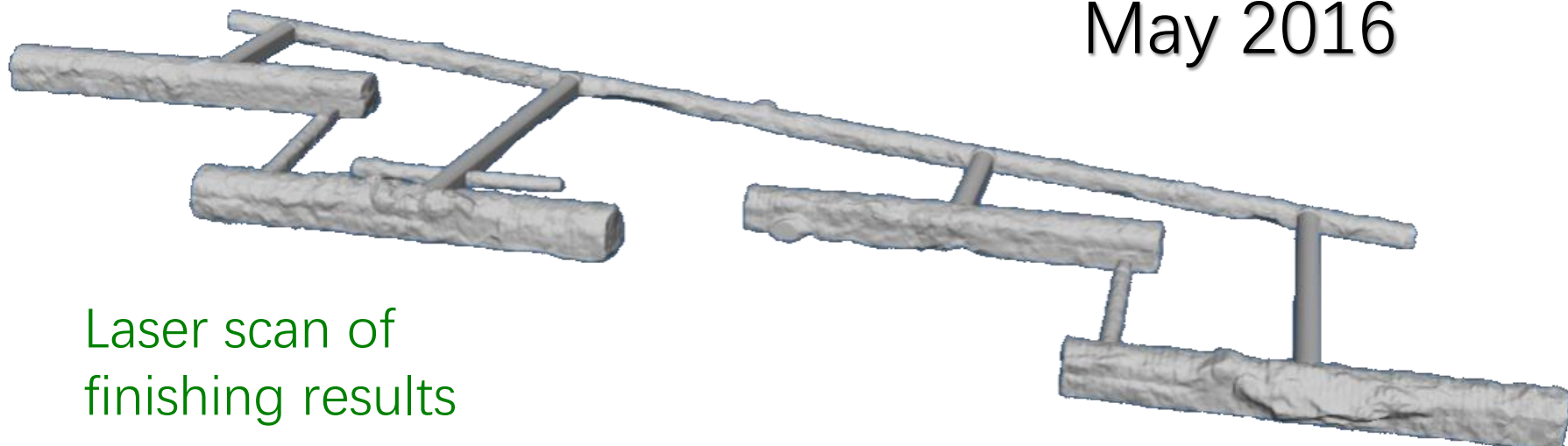
工程量: **131000** 立方米



单个实验大厅至少在 $12 \times 12 \times 130$ 米

二期实验室完成情况

May 2016



Laser scan of
finishing results



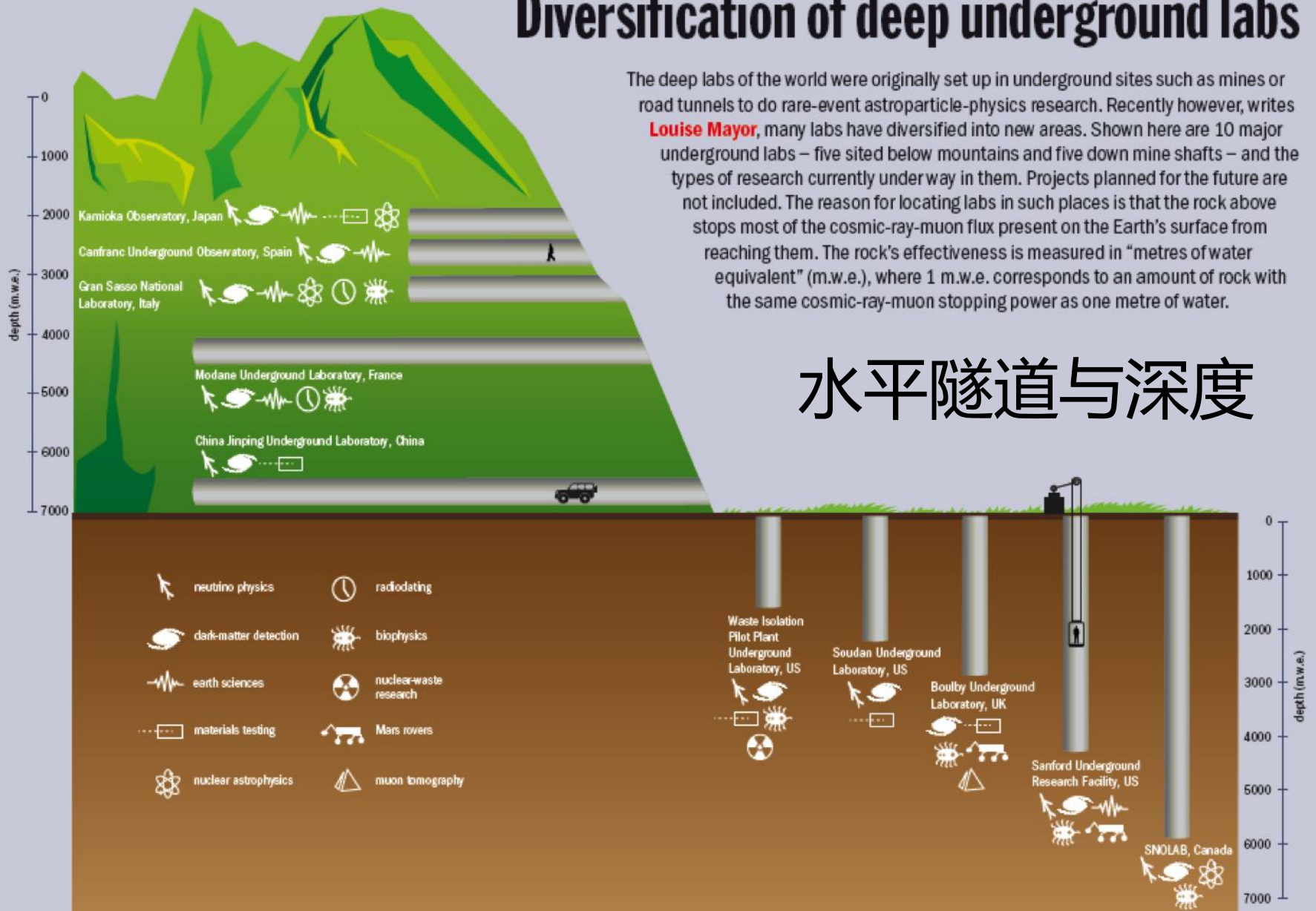
CDEX pit and
PandaX pit done



One hall

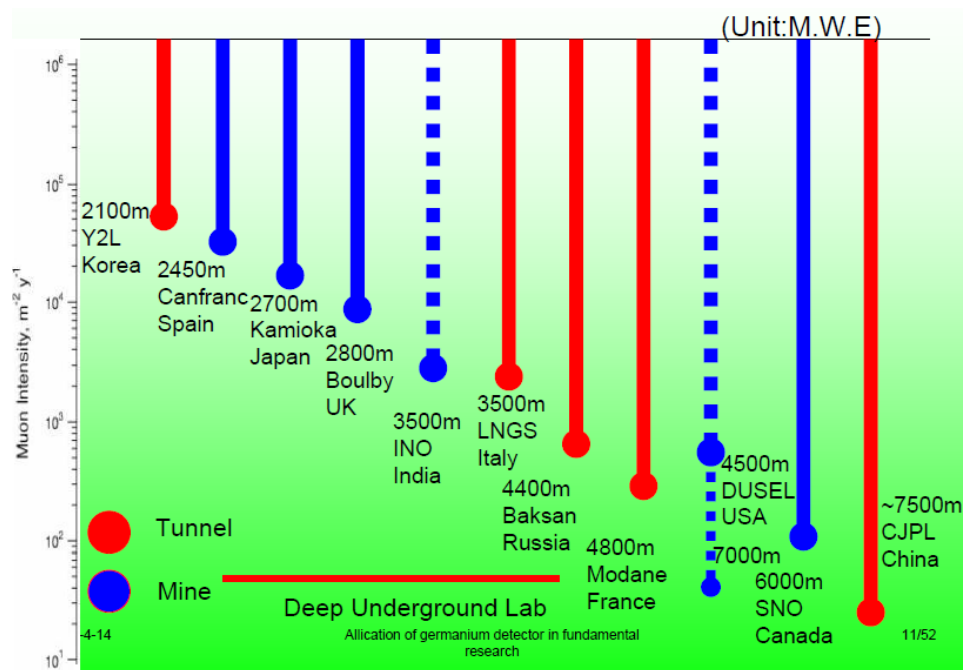
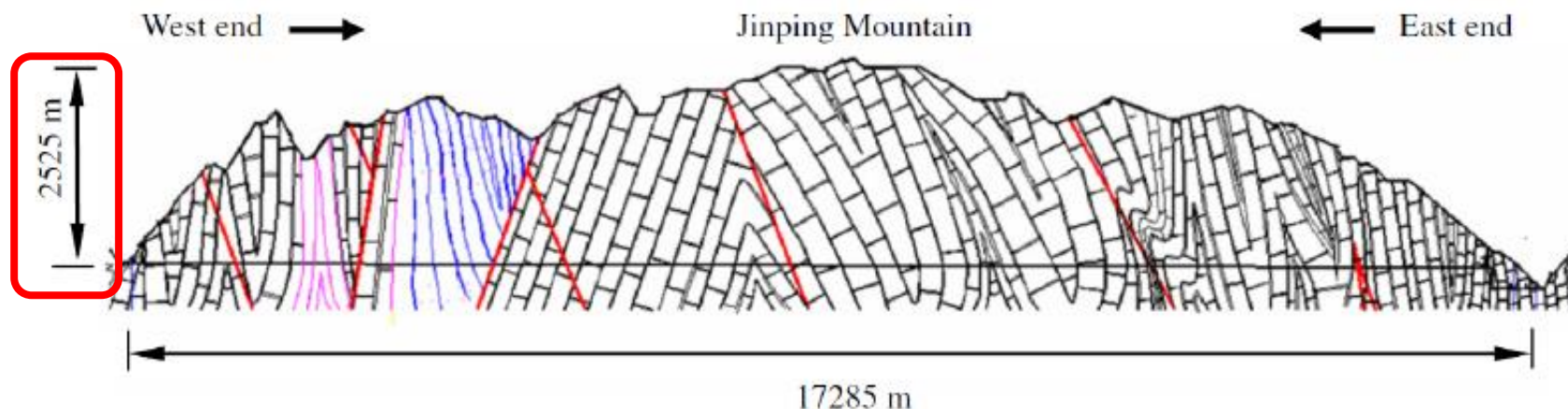
Diversification of deep underground labs

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 underway 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.



水平隧道与深度

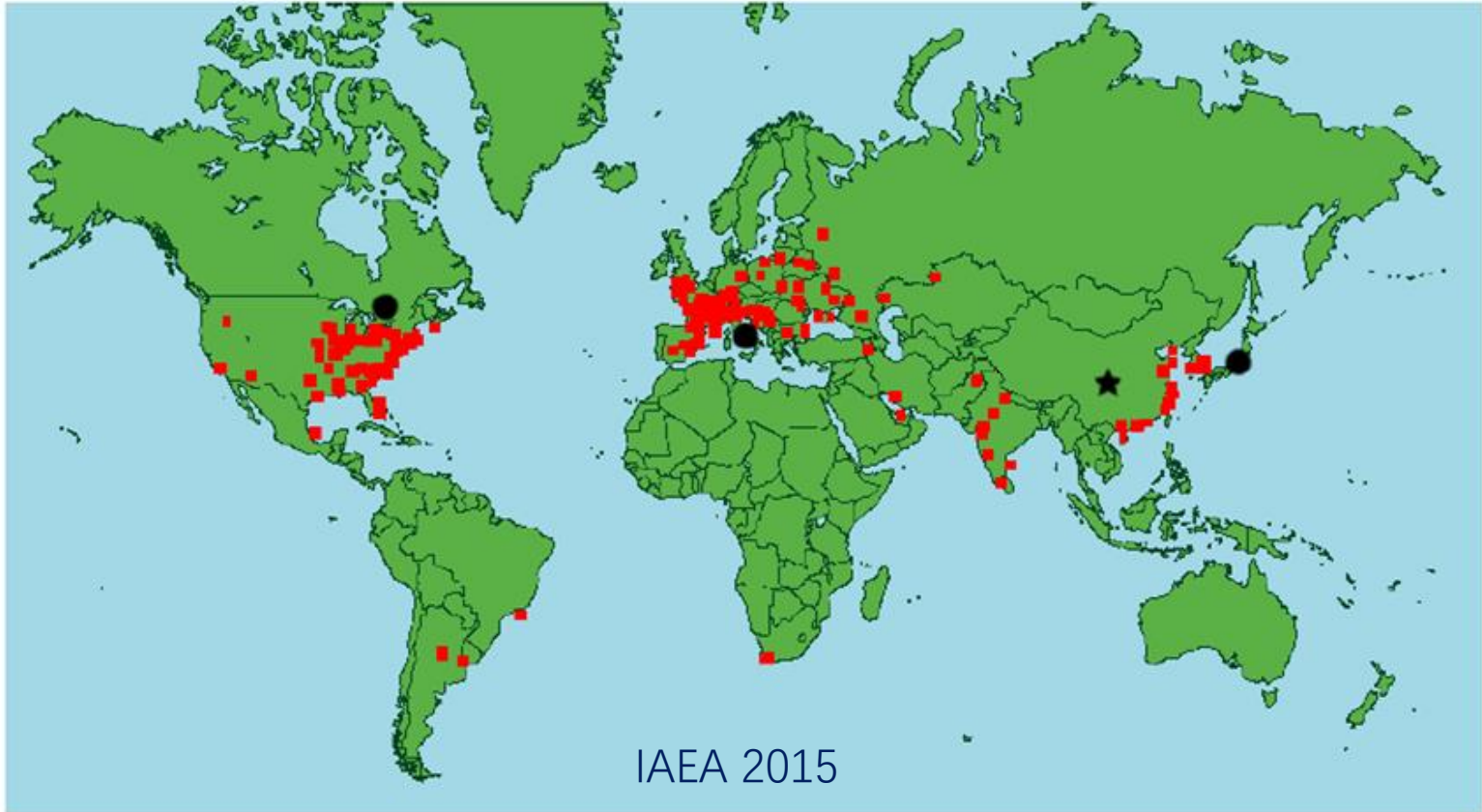
深度与缪子流强



宇宙线本底:

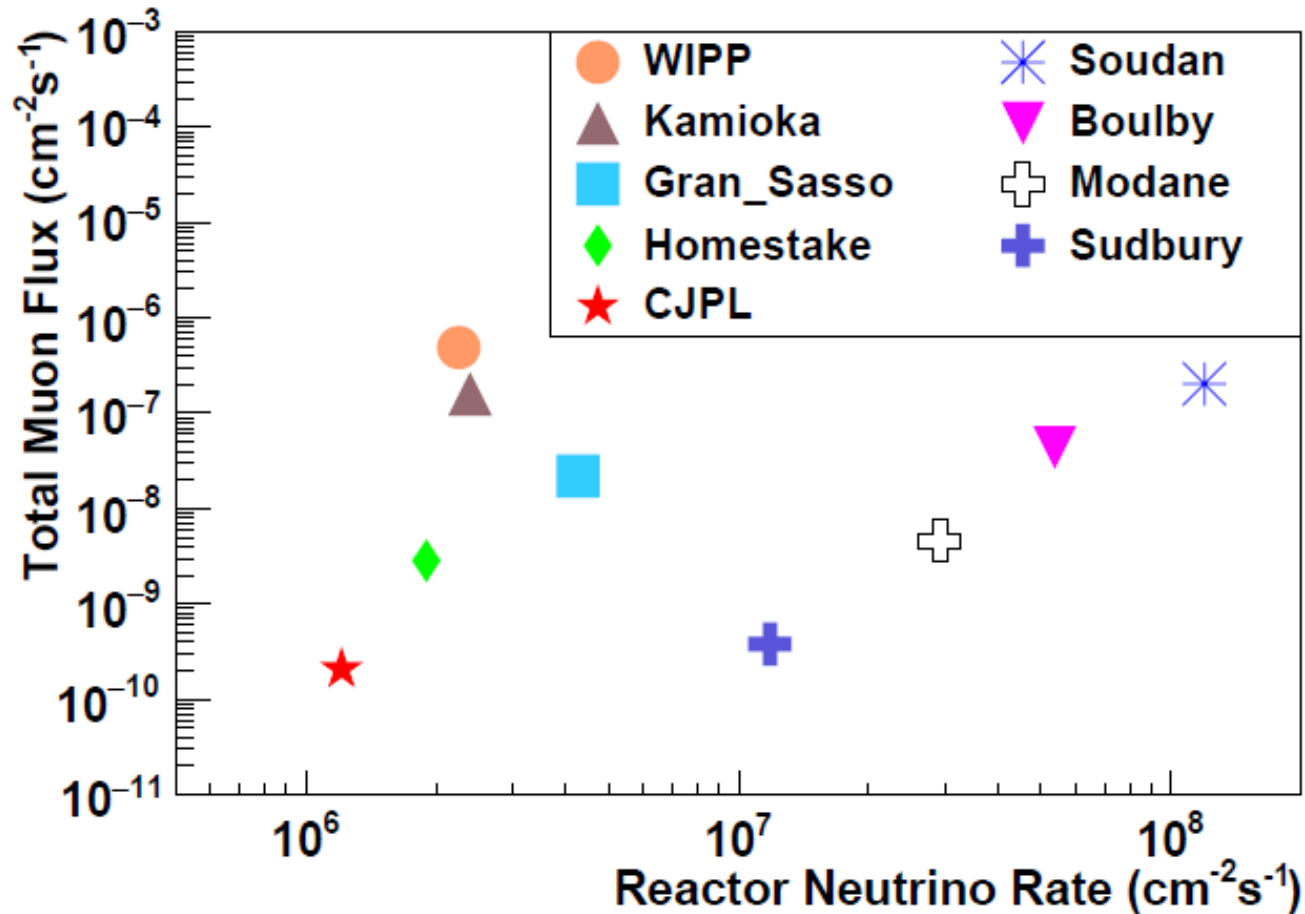
- 比Borexino低200倍
- 比SNO实验低2倍

原理反应堆，反应堆本底低



距最近的反应堆1200 km (直线距离950 km),
低反应堆本底

锦屏地下实验室天然条件世界第一



三、中微子探测思路

中微子的基本性质

质量 < 1 eV (electron 0.5 MeV)

电荷 = 0 (electron $+/- 1$)

自旋 $1/2$

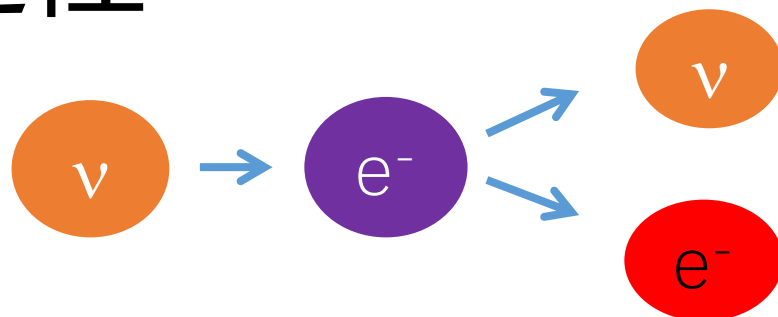
Dirac还是Majorana?

只参与弱相互作用

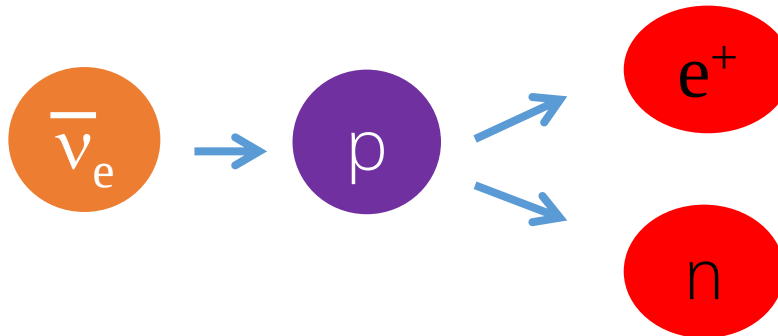
(截面在 $10^{-38} - 10^{-42}\text{cm}^2$ 左右)

低能中微子探测过程

例1、中微子电子散射



例2、反 β 衰变



例3、中微子氘核中性流散射: $\nu + d \rightarrow p + n + \nu$

例4、中微子氘核带电流散射: $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$

总结：探测正电子、电子、中子

$$E_{e^\pm} \Rightarrow E_\nu$$

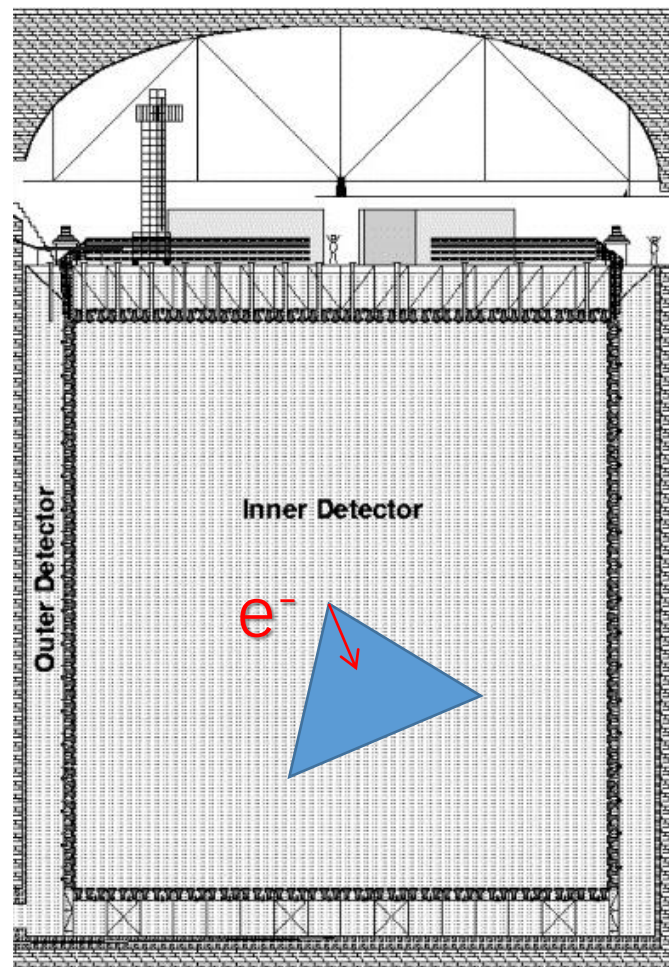
中微子探测方案总的思想

1. 一个中微子可以延直径穿过 1×10^8 个地球而不发生任何相互作用
2. 提高中微子通量，例如太阳中微子
 $6 \times 10^{10}/\text{s}/\text{cm}^2$
3. 中微子探测器靶质量都在千吨以上

$$N_\nu(E) \sim \Phi_\nu(E) \times \sigma_\nu(E) \times \text{target}$$

判选探测到中微子的标准

1. 事件 (e^+ , e^- , n) 的顶点必须在探测器内部
2. 外部必须没有任何反应, 例如环境中子, 宇宙线缪子
3. 探测器一般:
 1. 要在地下
 2. 要低放射性本底



四、中微子振荡及中微子振荡的物质效应

中微子混合

1998之前，没有混合，中微子质量为零

$$m_\nu = 0 \quad \rightarrow \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Weak eigenstate = **Mass eigenstate**

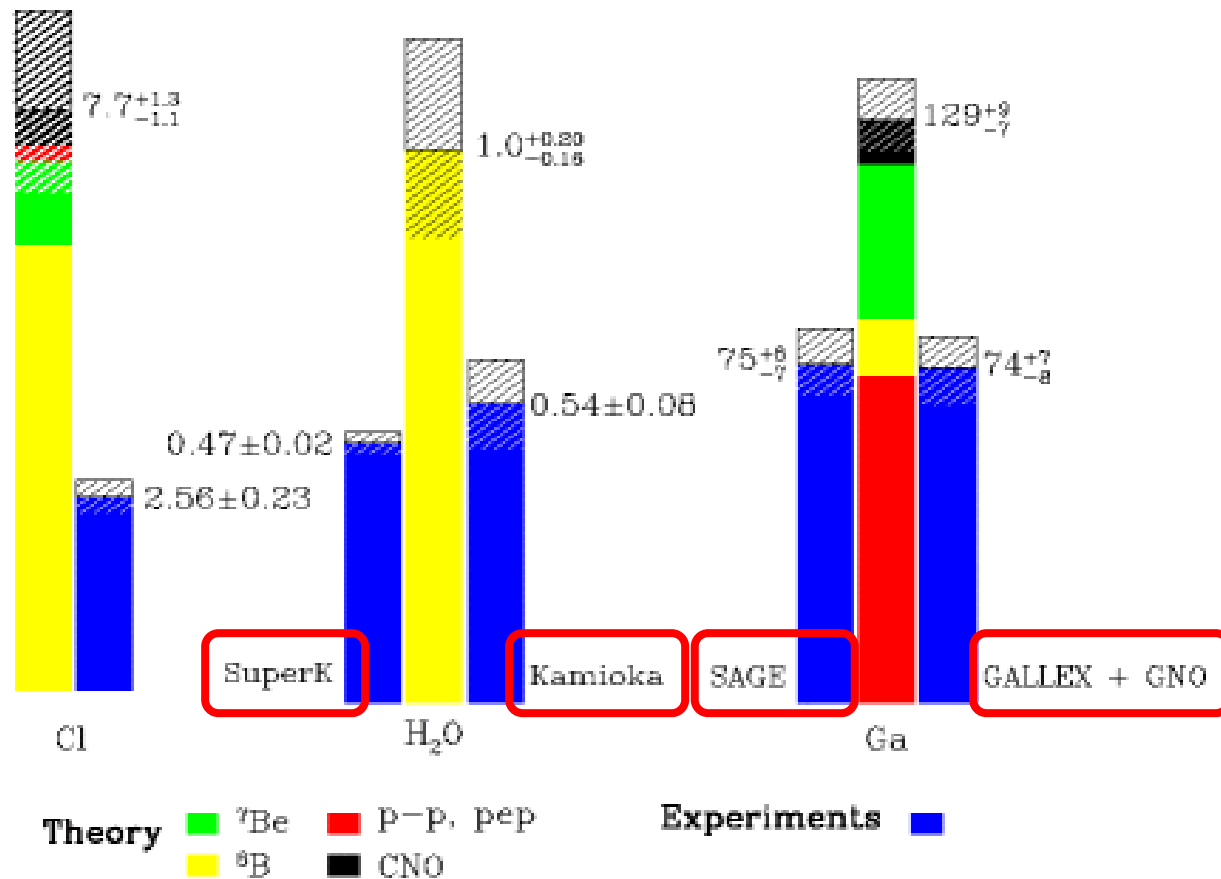
发现太阳中微子缺失，放射性化学方法

- 太阳中微子，能量小于20 MeV
- $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$
 $E_{\text{th}} = 0.814 \text{ MeV}$
- Raymond Davis在Homestake的地下准备了615吨 C_2Cl_4 ，每隔一段时间，如果有太阳中微子，会有一定的 ${}^{37}\text{Ar}$ 产生。
 ${}^{37}\text{Ar}$ 常态为气体，在 C_2Cl_4 液体中通入大量的氦气，带出其中的 ${}^{37}\text{Ar}$ 。
- ${}^{37}\text{Ar}$ 气体导出后，纯化，利用正比室测量 ${}^{37}\text{Ar}$ 的个数。

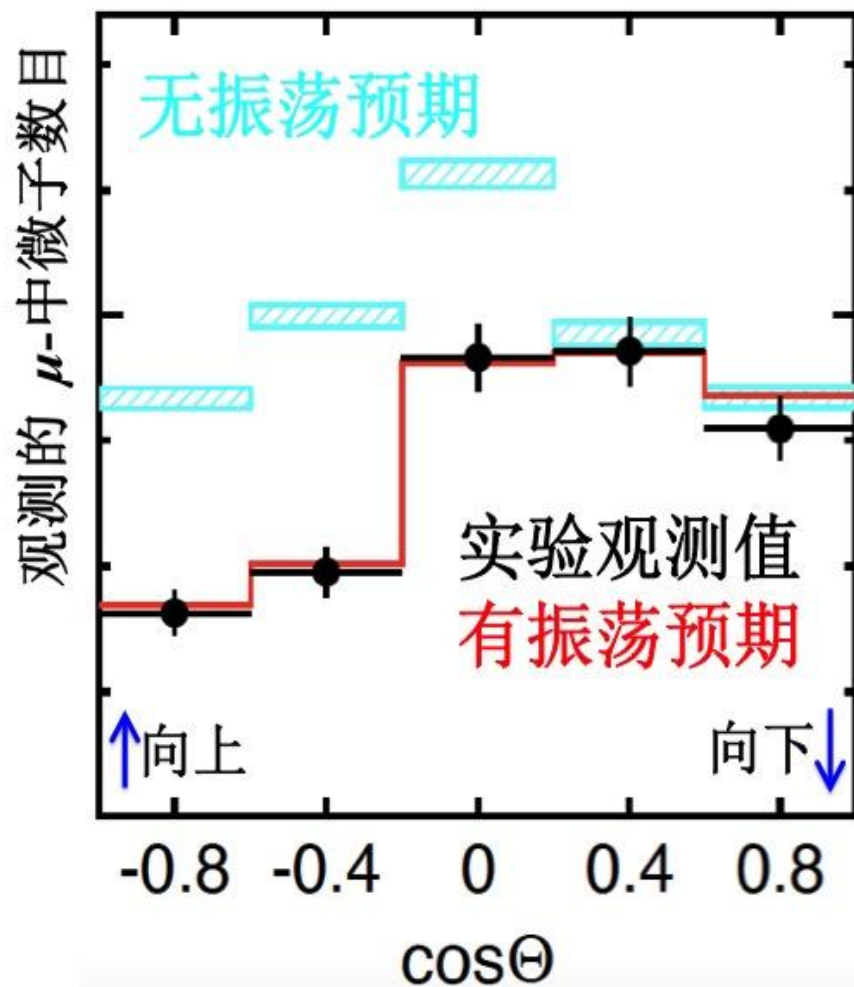
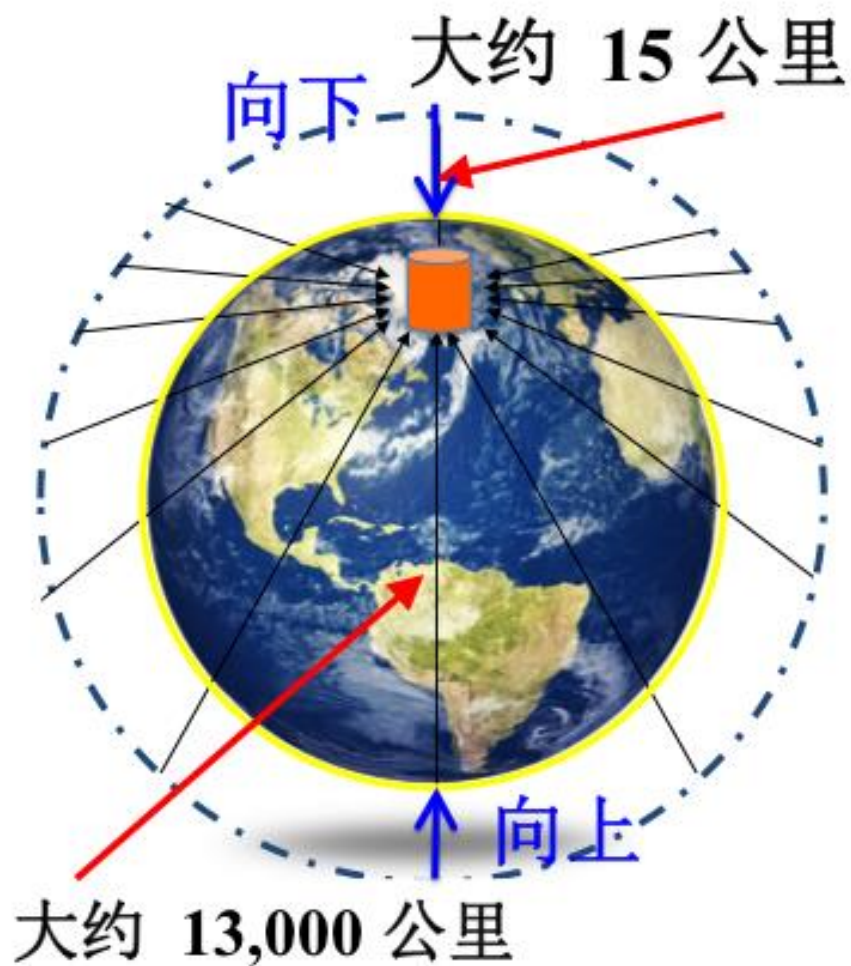


太阳中微子缺失 (相对于太阳模型)

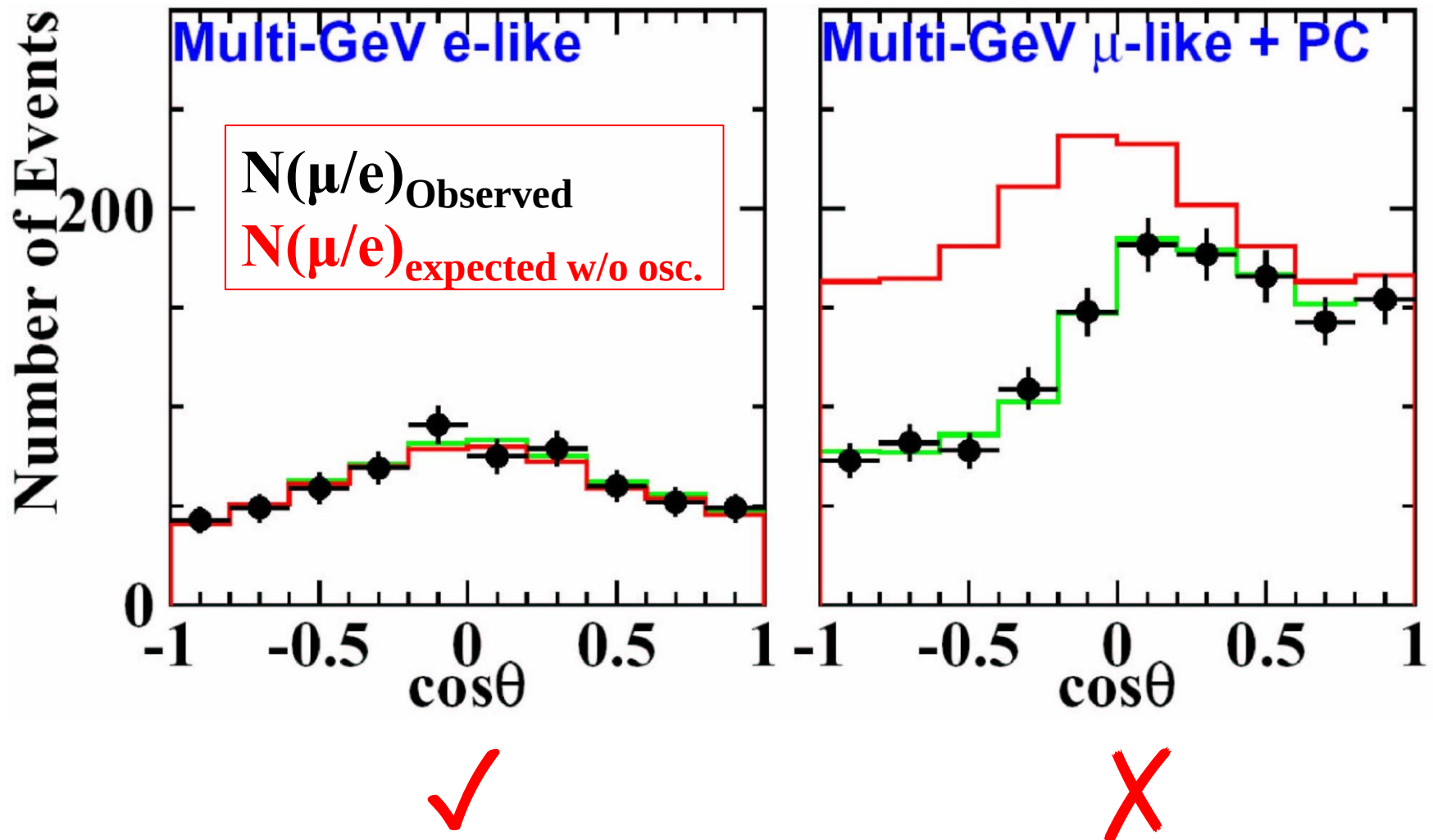
Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



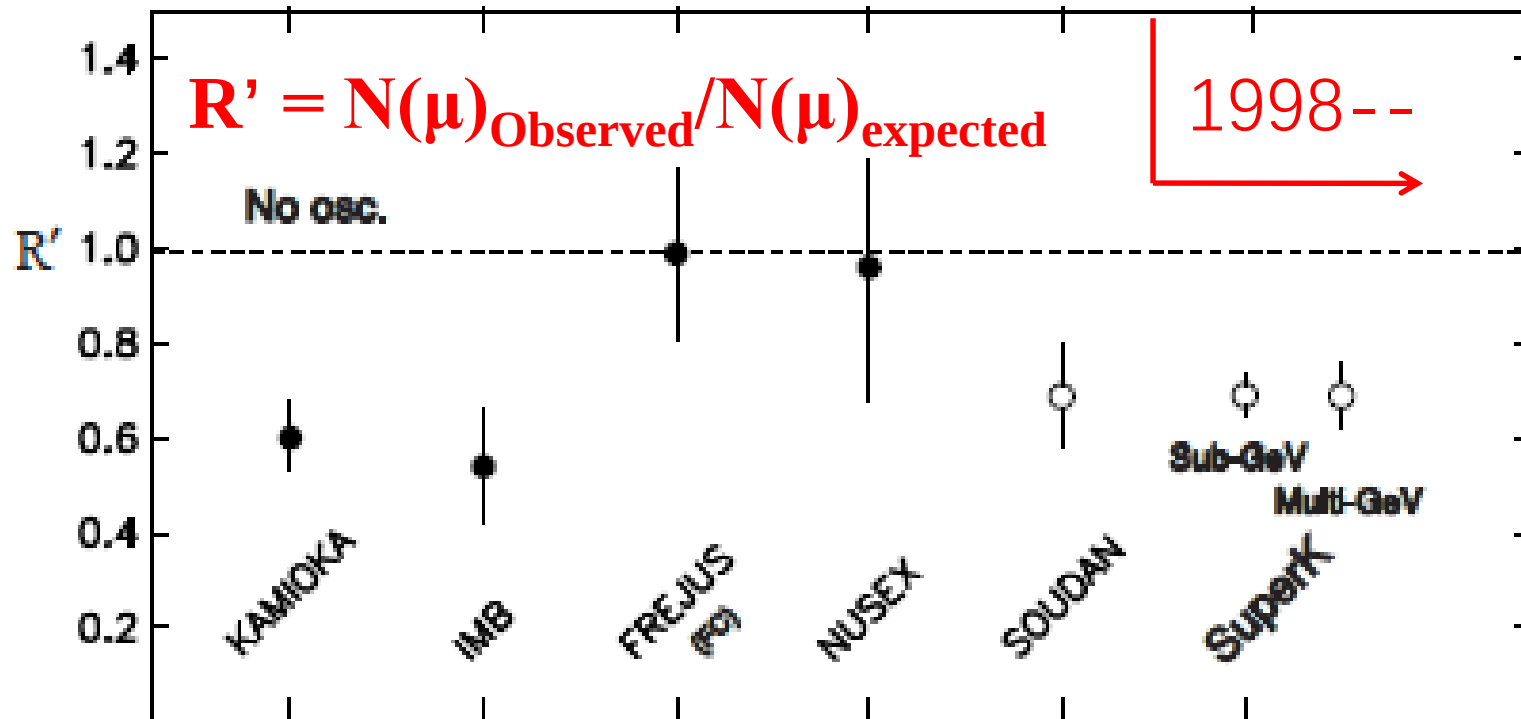
大气中微子的上下不对称性



Super-Kamiokande的实验结果



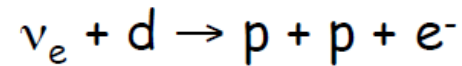
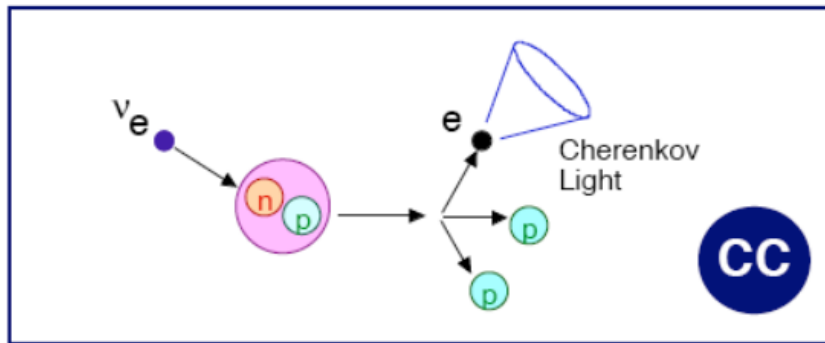
大气中微子的总结



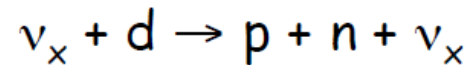
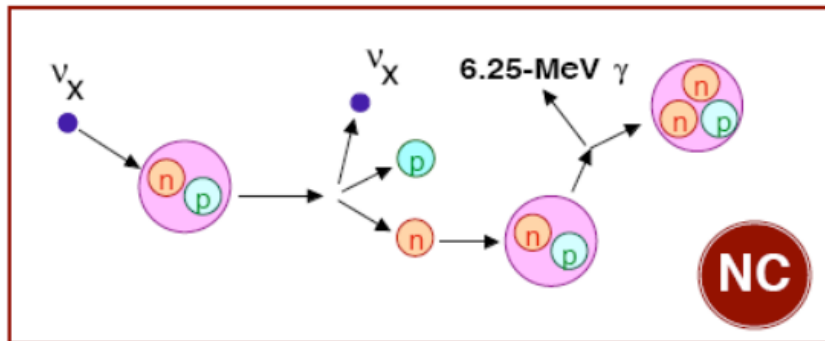
In early 1998, there are three observed hints of neutrino oscillation, and thus of neutrino mass. These hints are the behavior of solar neutrinos, the behavior of atmospheric neutrinos, and the results of the LSND experiment.

PDG1998

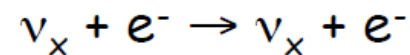
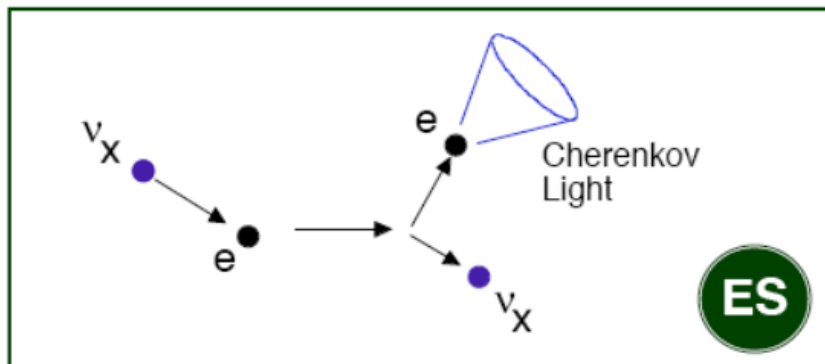
中微子振荡的确认, SNO实验, 重水探测器



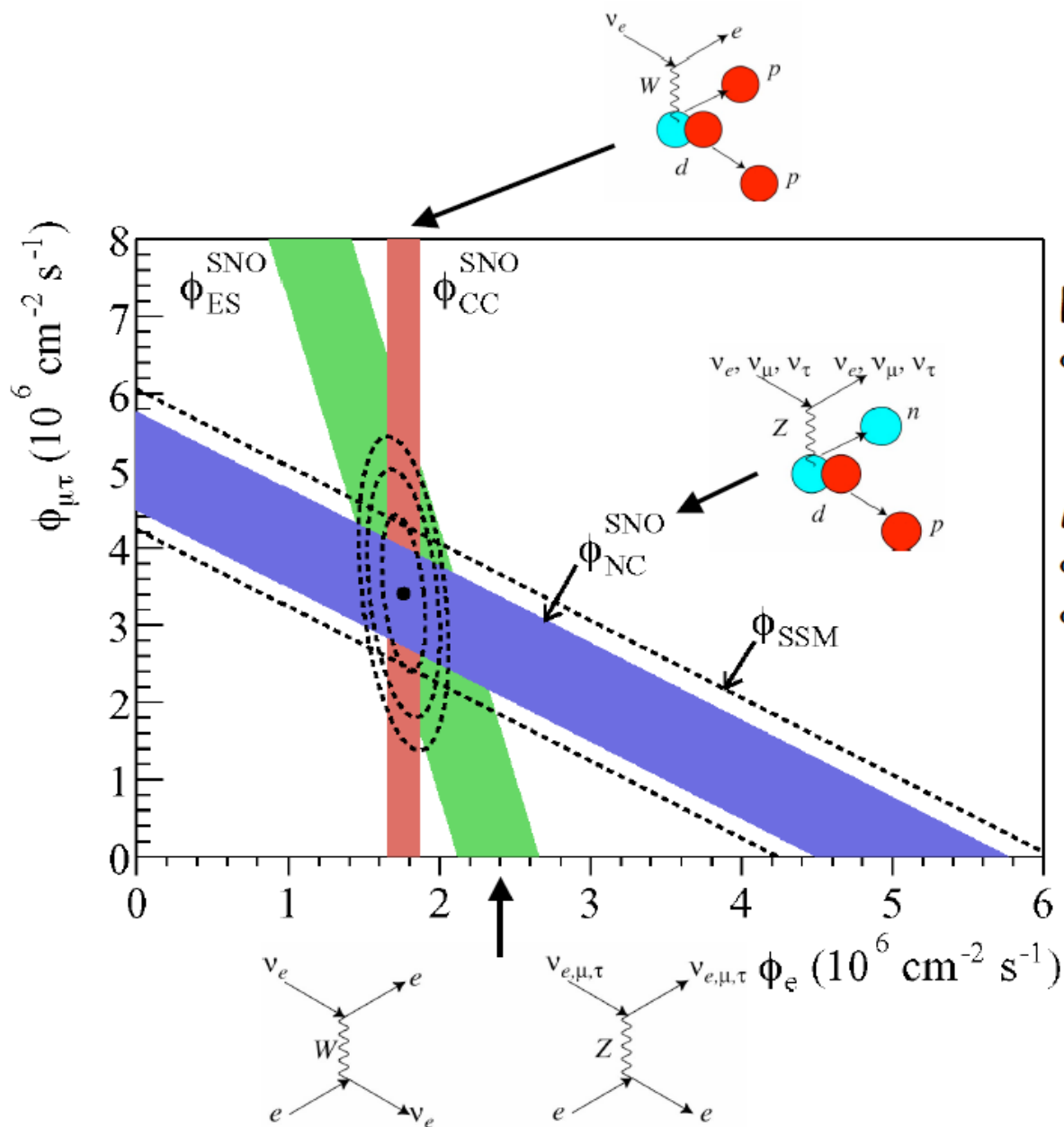
- Measure the energy spectrum of ν_e
- Direction of e^- not strongly correlated with that of ν_e



- Measure the total flux of ν from ${}^8\text{B}$
- $\sigma(\nu_e) = \sigma(\nu_\mu) = \sigma(\nu_\tau)$



- Measure the total flux of ${}^8\text{B}$ ν :
 $\Phi = \Phi(\nu_e) + 0.16\Phi(\nu_\mu) + 0.16\Phi(\nu_\tau)$
- Strongly directional, e^- tends to follow ν



Prediction:

$$\Phi(\nu_e) \approx 5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Measured:

$$\Phi(\nu_e) \approx 1.8 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\Phi(\nu_{\mu\tau}) \approx 3.4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

中微子混合矩阵

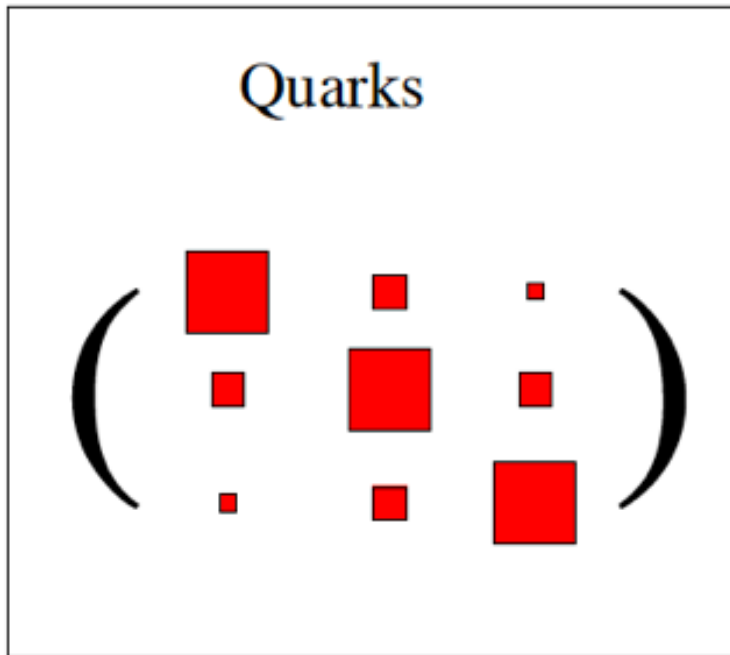
Neutrino mixing at the 3-neutrino framework

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

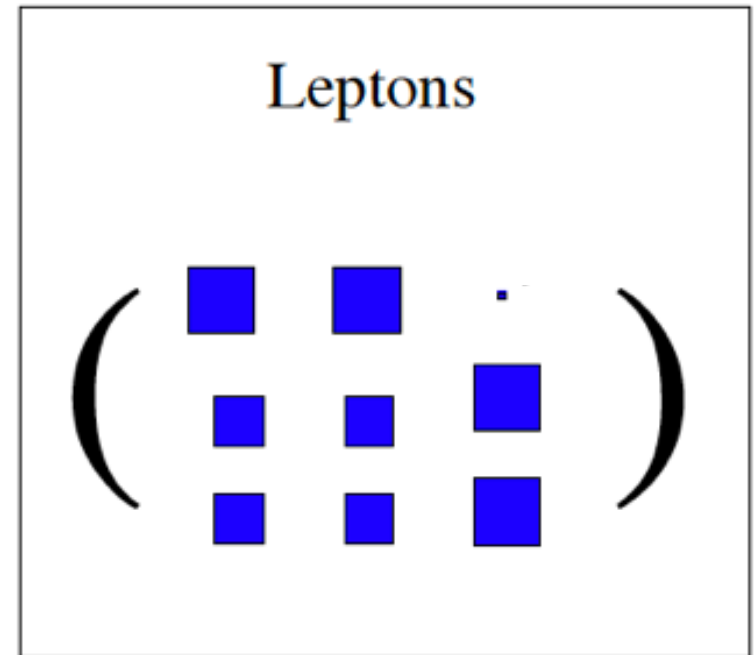
Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata matrix

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\phi} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

CKM Vs. PMNS



vs.



- ✓ Elements well known
- ✓ Diagonal
- ✓ CP phase known

- ✓ Elements known
- ✓ Non-Diagonal, why
- ✓ CP phase unknown

两味道中微子振荡

在 $t = 0$, 中微子味道态矢量 (波函数) 为

$$|\nu(0)\rangle = |\nu_\mu\rangle$$

在其他时刻, 中微子味道态矢量 (组合波函数) 为

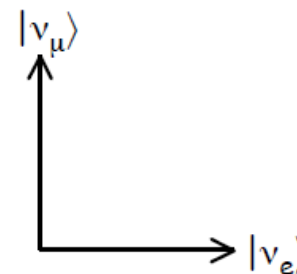
$$|\nu(t)\rangle = C_e(t)|\nu_e\rangle + C_\mu(t)|\nu_\mu\rangle \quad \text{s.t. } C_e(0)=0, C_\mu(0)=1$$

为缪子和电子型中微子的系数为

$$\langle\nu_\mu|\nu(t)\rangle = C_\mu(t) \quad \langle\nu_e|\nu(t)\rangle = C_e(t)$$

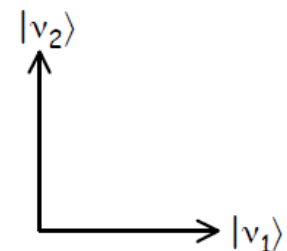
并且满足

$$C_\mu^2(t) + C_e^2(t) = 1$$



如果写成质量本征态的组合

$$|\nu(t)\rangle = C_1(t)|\nu_1\rangle + C_2(t)|\nu_2\rangle$$



假定两者的动量相同

$$E_1 = \sqrt{m_1^2 + p^2} \quad E_2 = \sqrt{m_2^2 + p^2}$$

质量本征态随时间的演化

$$C_1(t) = C_1(0)e^{-iE_1 t} \quad C_2(t) = C_2(0)e^{-iE_2 t}$$

在两种基氏空间的展开等价

$$|\nu(t)\rangle = C_1(t)|\nu_1\rangle + C_2(t)|\nu_2\rangle = C_e(t)|\nu_e\rangle + C_\mu(t)|\nu_\mu\rangle$$

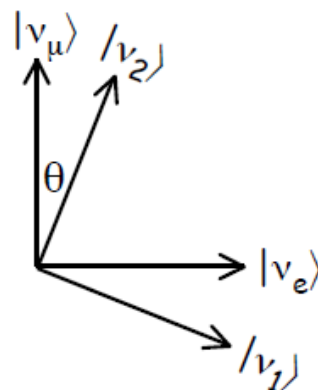
于是有

$$C_e(t) = C_1(t) \langle \nu_e | \nu_1 \rangle + C_2(t) \langle \nu_e | \nu_2 \rangle$$

$$C_\mu(t) = C_1(t) \langle \nu_\mu | \nu_1 \rangle + C_2(t) \langle \nu_\mu | \nu_2 \rangle$$

表达成矩阵形式，并引入中微子混合矩阵 U_θ

$$U_\theta = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} C_e(t) \\ C_\mu(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \nu_e | \nu_1 \rangle & \langle \nu_e | \nu_2 \rangle \\ \langle \nu_\mu | \nu_1 \rangle & \langle \nu_\mu | \nu_2 \rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{pmatrix}$$

在 $t=0$ 时刻

$$|\nu(0)\rangle = |\nu_\mu\rangle \rightarrow C_1(0) = -\sin\theta \quad C_2(0) = \cos\theta$$

在其他时刻

$$C_e(t) = \sin\theta\cos\theta(e^{-iE_2t} - e^{-iE_1t})$$

$$C_\mu(t) = \sin^2\theta e^{-iE_1t} + \cos^2\theta e^{-iE_2t}$$

概率表达式

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = C_e^*(t)C_e(t) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{(E_2 - E_1)t}{2} \right]$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = C_\mu^*(t)C_\mu(t) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{(E_2 - E_1)t}{2} \right]$$

如果 m_1, m_2 远远小于 p , 中微子以光速飞行

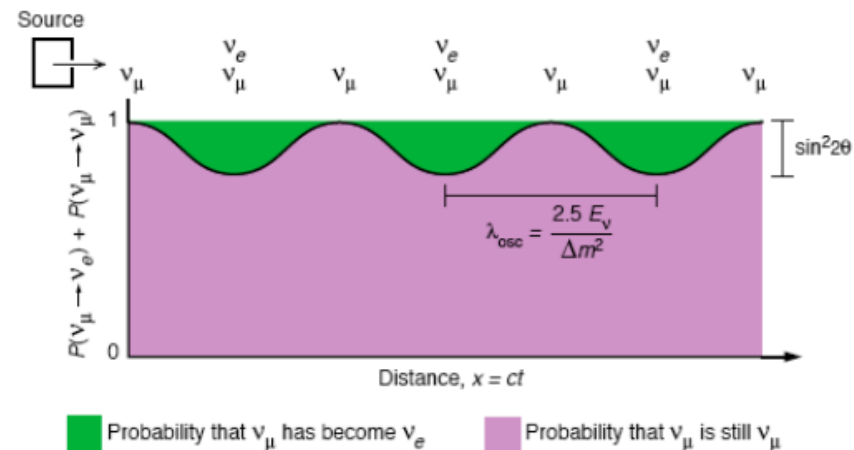
$$ct = L, \quad E_1 \approx p + m_1^2/2p, \quad E_2 \approx p + m_2^2/2p, \quad E_1 \approx E_2 \approx p = E$$

出现概率

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{(m_2^2 - m_1^2)L}{4E} \right]$$

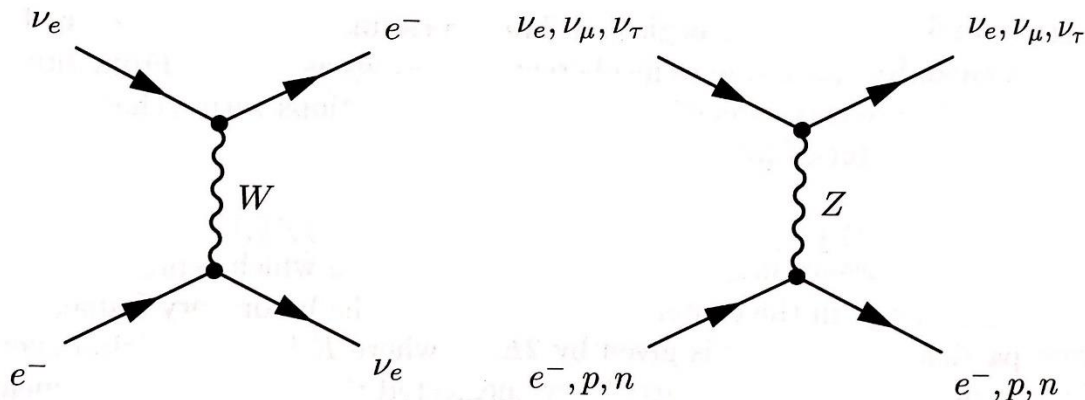
存活概率

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{(m_2^2 - m_1^2)L}{4E} \right]$$



物质效应:

由于物质中充满电子, 所以各种中微子在物质中的传播受到影响并不对称



写下两代质量本征态的演化方程

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2p} \underbrace{\begin{pmatrix} m_1^2 & 0 \\ 0 & m_2^2 \end{pmatrix}}_M \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$E_1 \approx p + m_1^2/2p$$

仍然利用了如下方程,
p构成的单位矩阵对振荡无贡献

$$U_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

利用两代中微子的转换矩阵,

U_θ

质量本征态和味道本征态之间
可以互相转化

写下两代味道本征态的演化方程

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \frac{1}{2p} U M U^T \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

$$= \frac{M^2}{2p} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

$$U M U^T = \frac{\Delta m^2}{2} \begin{pmatrix} -\cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{pmatrix}$$

对电子中微子引入额外的作用势

$$V_e = G_F \sqrt{2} N_e \quad N_e = \text{electron density}$$

哈密顿量 M^2 有了新的变化

$$M^2 \rightarrow M_M^2 = \frac{\Delta m^2}{2} \begin{pmatrix} -\cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta m_M^2 & 0 \\ 0 & -\Delta m_M^2 \end{pmatrix}$$

我们必须重新把 M^2 对角化，才能解除该微分方程组

$$\begin{pmatrix} \nu_{1m} \\ \nu_{2m} \end{pmatrix} = U_{\theta_m}^T \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_x \end{pmatrix}$$

$$U_{\theta_m}^T M^2 U_{\theta_m} = \frac{1}{2} (m_1^2 + m_2^2) \begin{pmatrix} -\Delta_m & 0 \\ 0 & \Delta_m \end{pmatrix}$$

$$\Delta_m = \Delta m^2 \sqrt{(a - \cos 2\theta)^2 + \sin^2 2\theta}$$

$$a = 2\sqrt{2} EG_F N_e / \Delta m^2$$

这时有物质中的新的质量本征态 ν_{1m} , ν_{2m}

而且这组新的质量本征态的组合与物质中的电子数密度相关

检查混合角 θ_m 的情况，也是物质电子数密度依赖

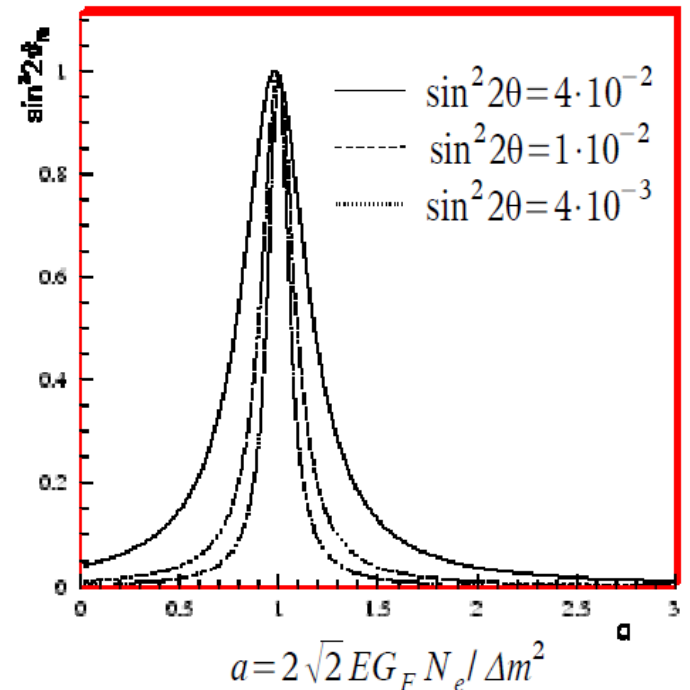
$$U_{\theta_m} = \begin{pmatrix} \cos \theta_m & \sin \theta_m \\ -\sin \theta_m & \cos \theta_m \end{pmatrix} \quad \text{with}$$

$$\sin^2 2\theta_m = \frac{\sin^2 2\theta}{(\cos 2\theta - a)^2 + \sin^2 2\theta}$$

混合角 θ_m 的达到共振极大

$$\cos 2\theta - a = 0 \quad i.e. \quad N_e = \Delta m^2 \frac{\cos 2\theta}{2\sqrt{2}EG_F}$$

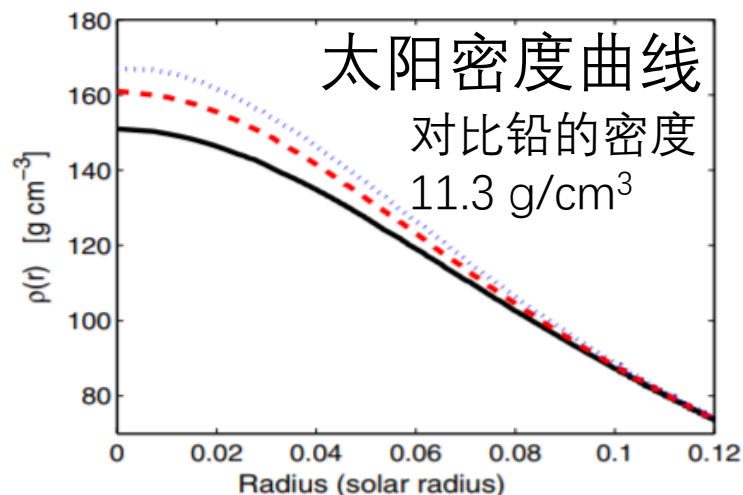
只要物质密度足够大，例如太阳，即使中微子在真空中没有混合，也会由于物质效应导致中微子味道发生转换
目前太阳中微子振荡的解释，需要非零的真空混合角以及物质效应



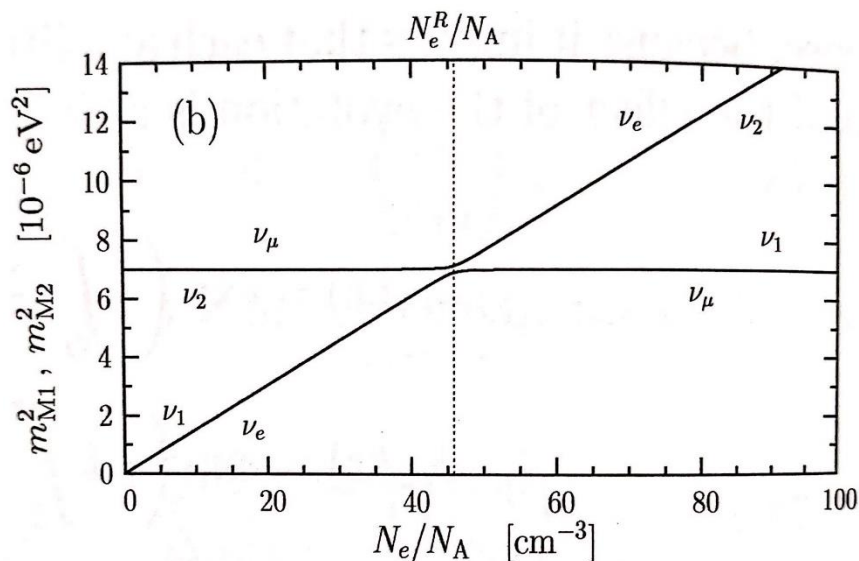
非常数物质电子数密度

M^2 的对角化随着位置不断变化

在物质中的质量本征态也在随着位置在不断变化

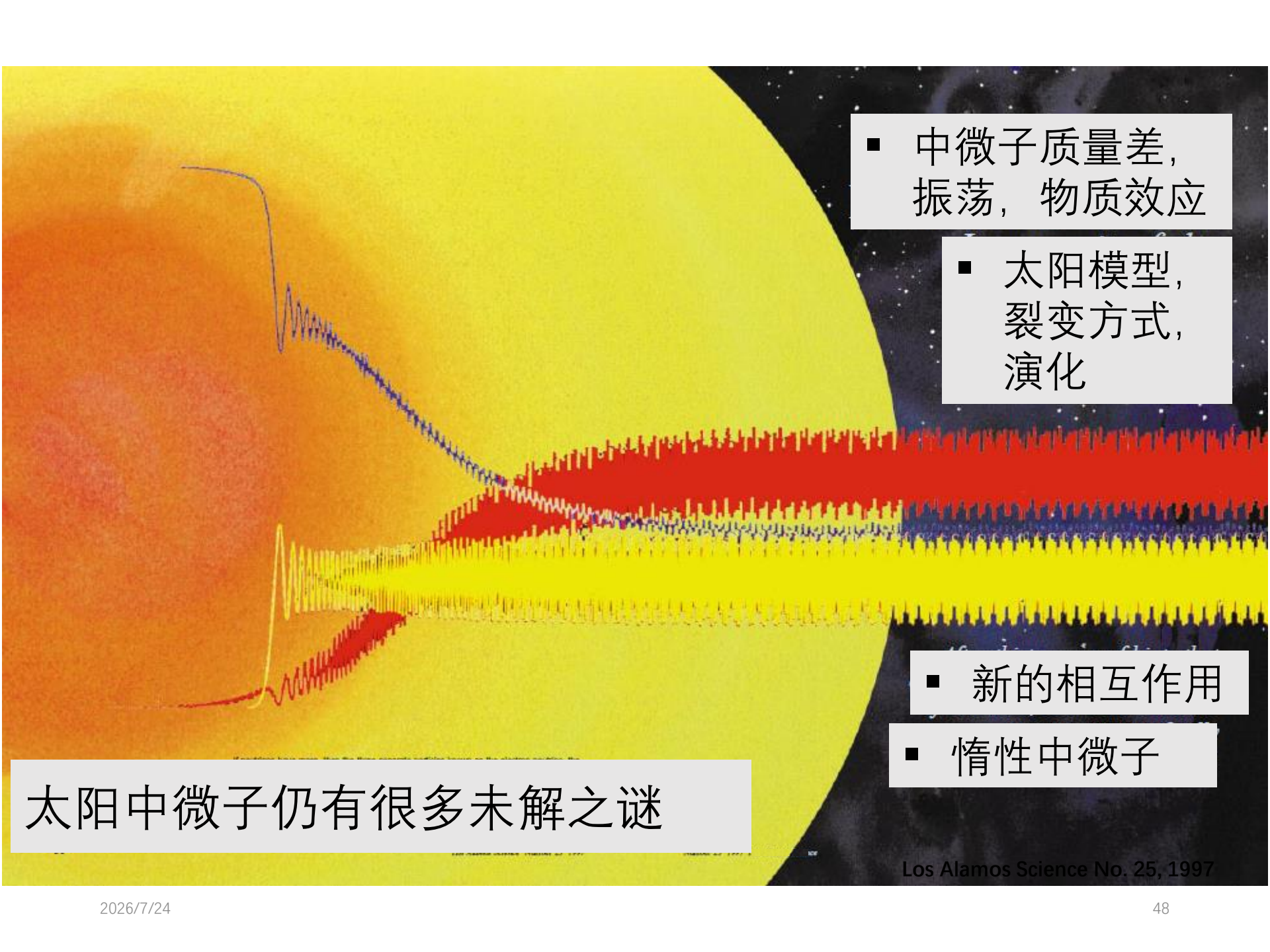


引入绝热近似：密度变化足够缓慢，以至于密度的改变量不足以引起质量本征态的显著变化（略去数学推导）



质量本征态的组分平滑的从高密度物质过度到真空状态

五、太阳中微子



- 中微子质量差，振荡，物质效应

- 太阳模型，裂变方式，演化

- 新的相互作用

- 惰性中微子

太阳中微子仍有很多未解之谜

Los Alamos Science No. 25, 1997

- 大约在1850, 生物学家地质学家, 例如Charles Darwin估计地球寿命有3亿年, 而物理学家, 例如Kelvin, 猜测太阳的引力势能消耗只能使太阳有0.3亿年寿命
- 约1890, 发现放射性 (Becquerel, Curie, Laborde 等)
- 1905, 质能方程, Einstein
- 1920, $4M_H < M_{He}$, Aston
- 约1930, 利用量子隧道效应, Gamow, Teller等
- 约1940, pp聚变, CNO循环, $4H \rightarrow He + 2e + 2\nu_e$, Bethe, von Weizsacker等
- 约1960, 提议并探测太阳中微子, Bahcall, Davis等
- 约1990, 太阳中微子缺失, 发现中微子振荡, 开始大量的中微子实验

太阳标准模型(恒星演化模型)的四个要素: John Bahcall

1. 太阳供能方式:

质子-质子聚变链 pp

碳氮循环 CNO

2. 太阳内能量的传输机制:

辐射 (内部), 依赖于辐射透明度

对流 (外部)

3. 太阳各处处于一个液态局域平衡状态:

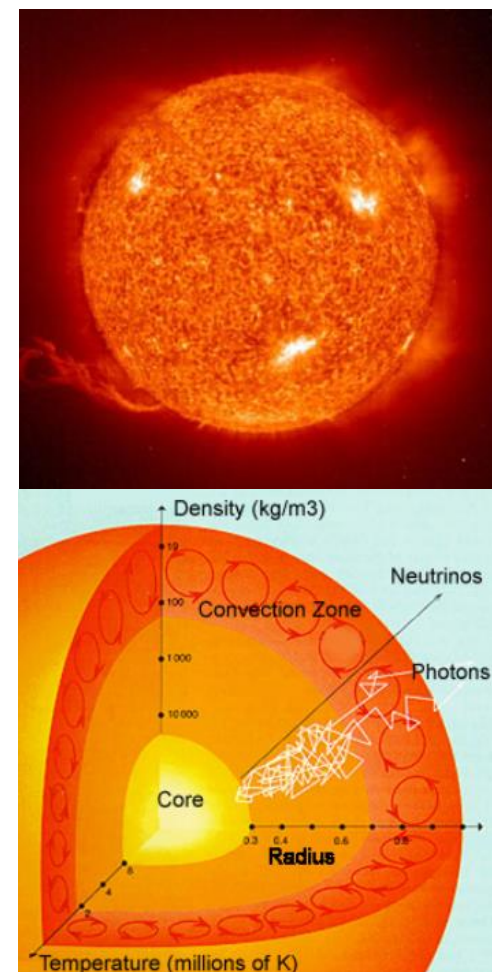
引力与辐射压力

4. 边界条件:

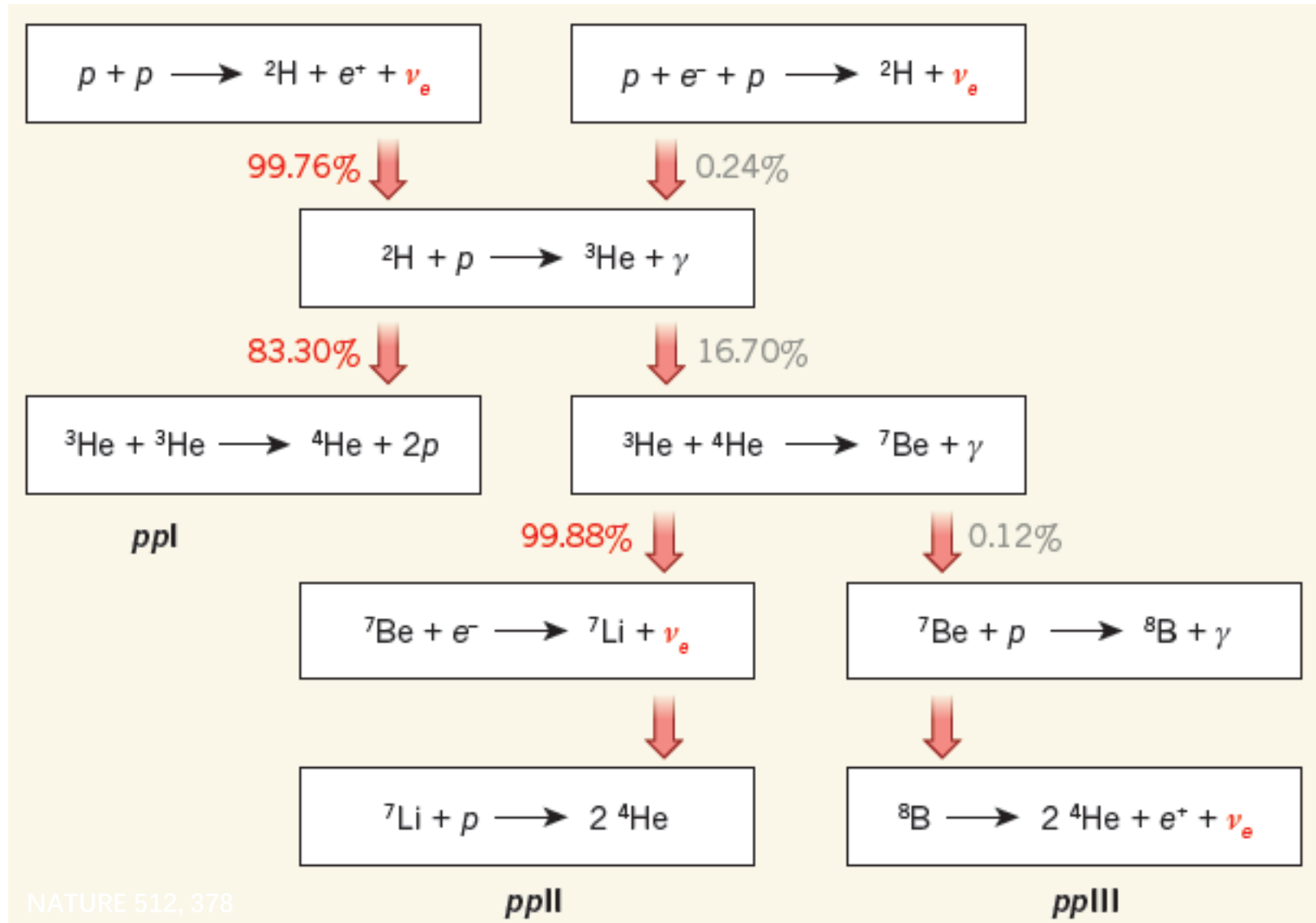
原初星的氢、氦、金属含量,

目前太阳半径, 质量, 亮度约束、年龄。

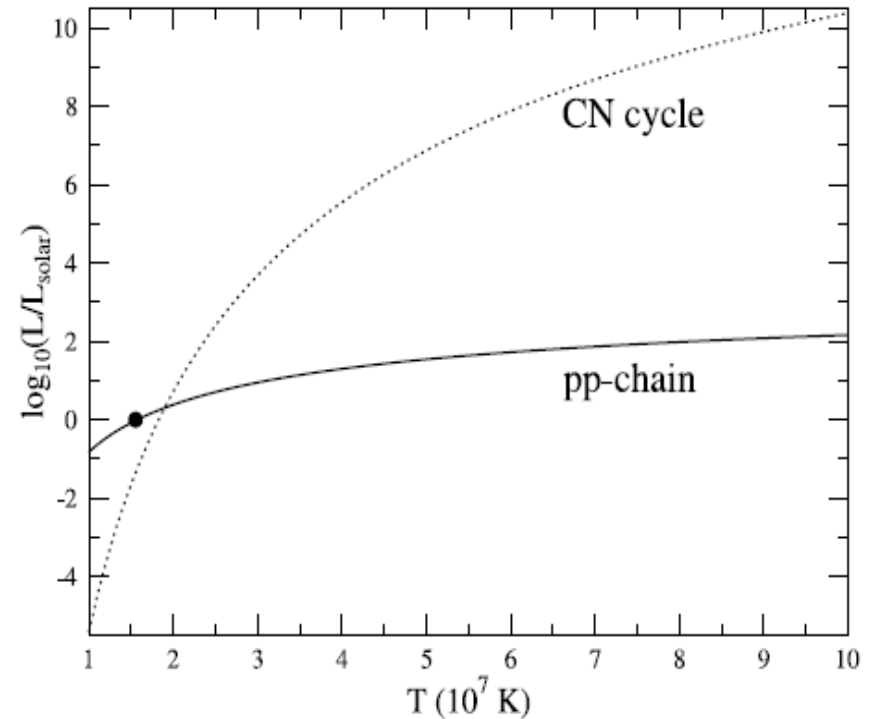
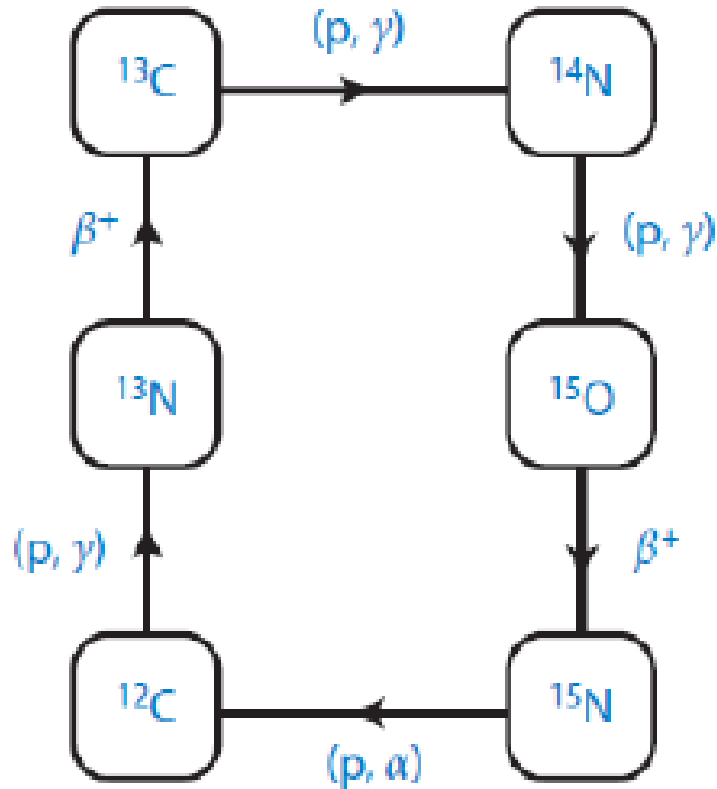
Assume: Initial metal fraction = surface fraction = core fraction



中微子产生-1： 质子-质子聚变链 pp



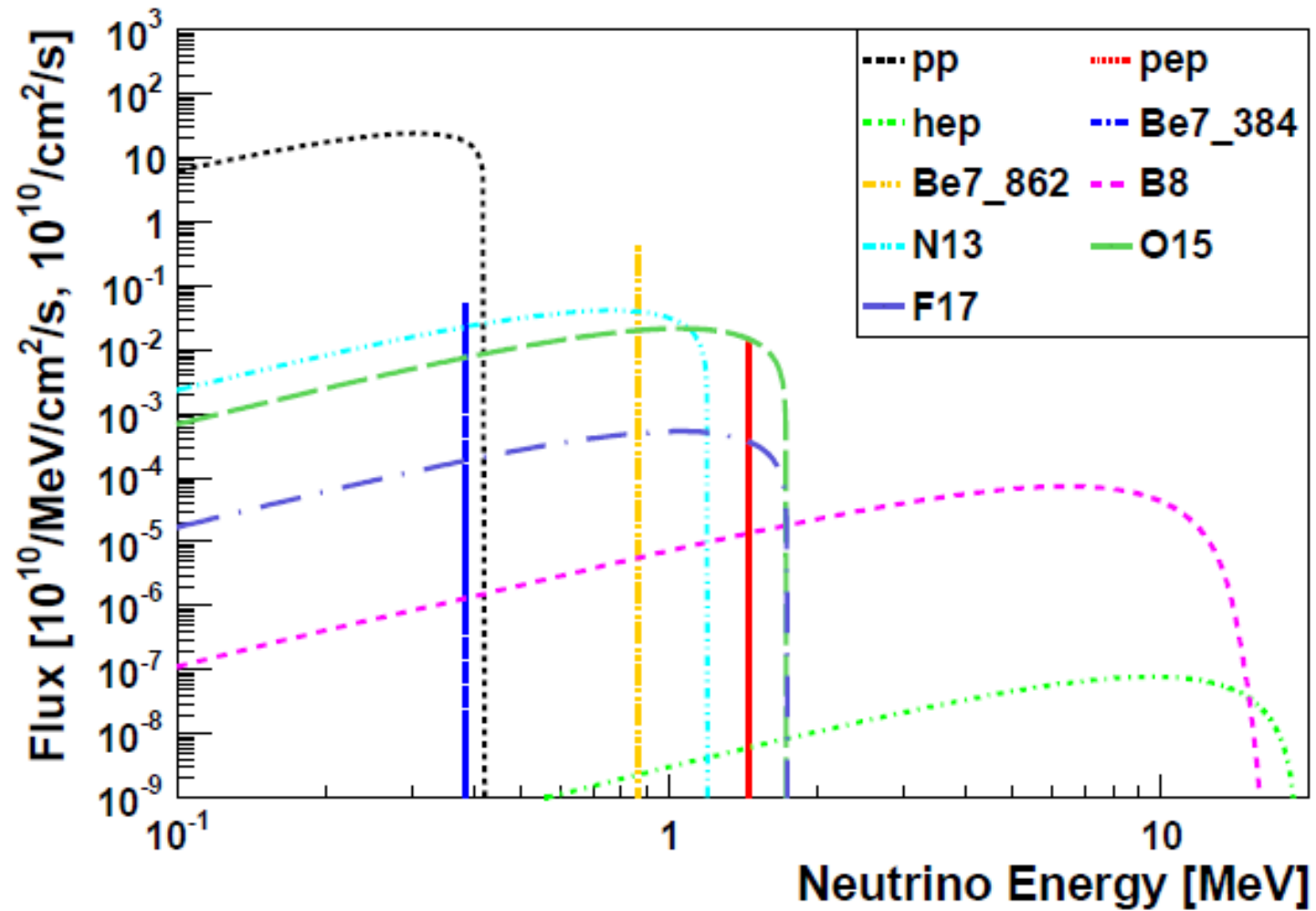
中微子产生-2：碳氮循环 CNO



质子-质子聚变链：
(太阳温度下的主要过程)

碳氮循环：
(高温主序星的主要模式)

太阳中微子能谱



太阳中微子振荡与传播

太阳中心-高
密度：受电子
数密度和中微
子能量影响的
混合角 θ_{12}^M

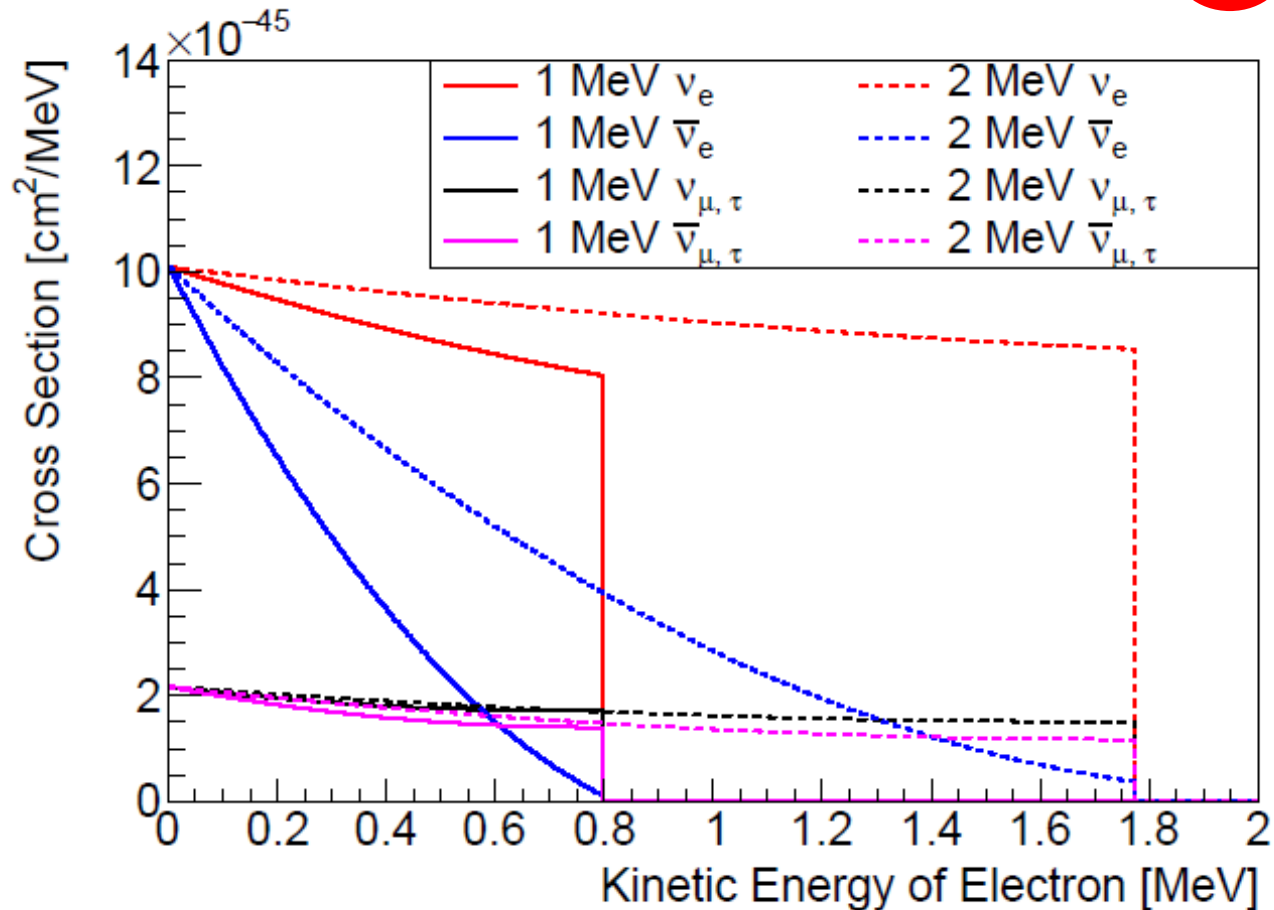
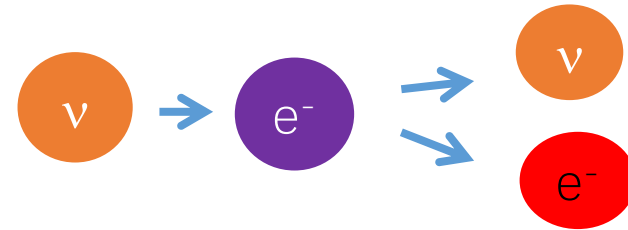
外围：真空
混合角 θ_{12}

$$P_{ee}^{\odot} = \cos^4 \theta_{13} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\theta_{12}^M \cos 2\theta_{12} \right)$$

*如果中微子穿过地球，其通量
将继续受到调制，幅度变化~3%

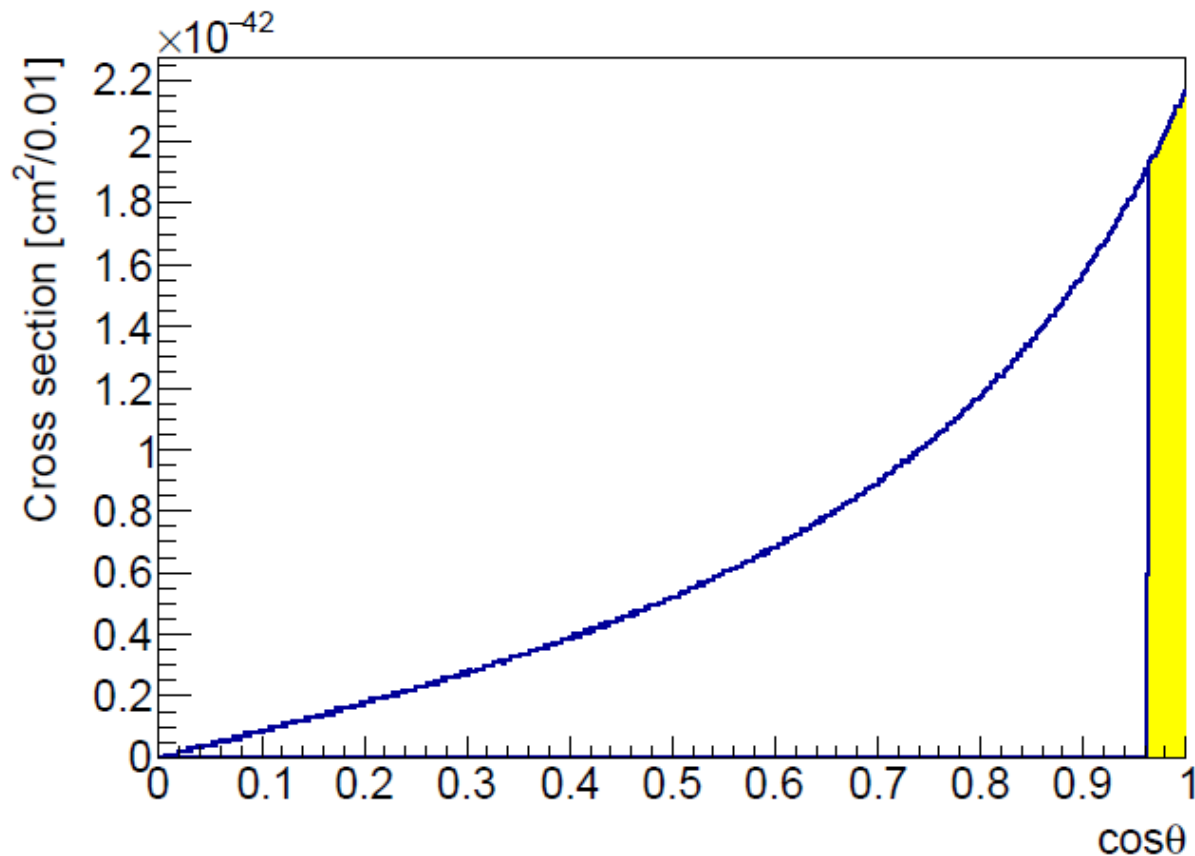
利用与电子的散射探测太阳中微子

中微子电子散射

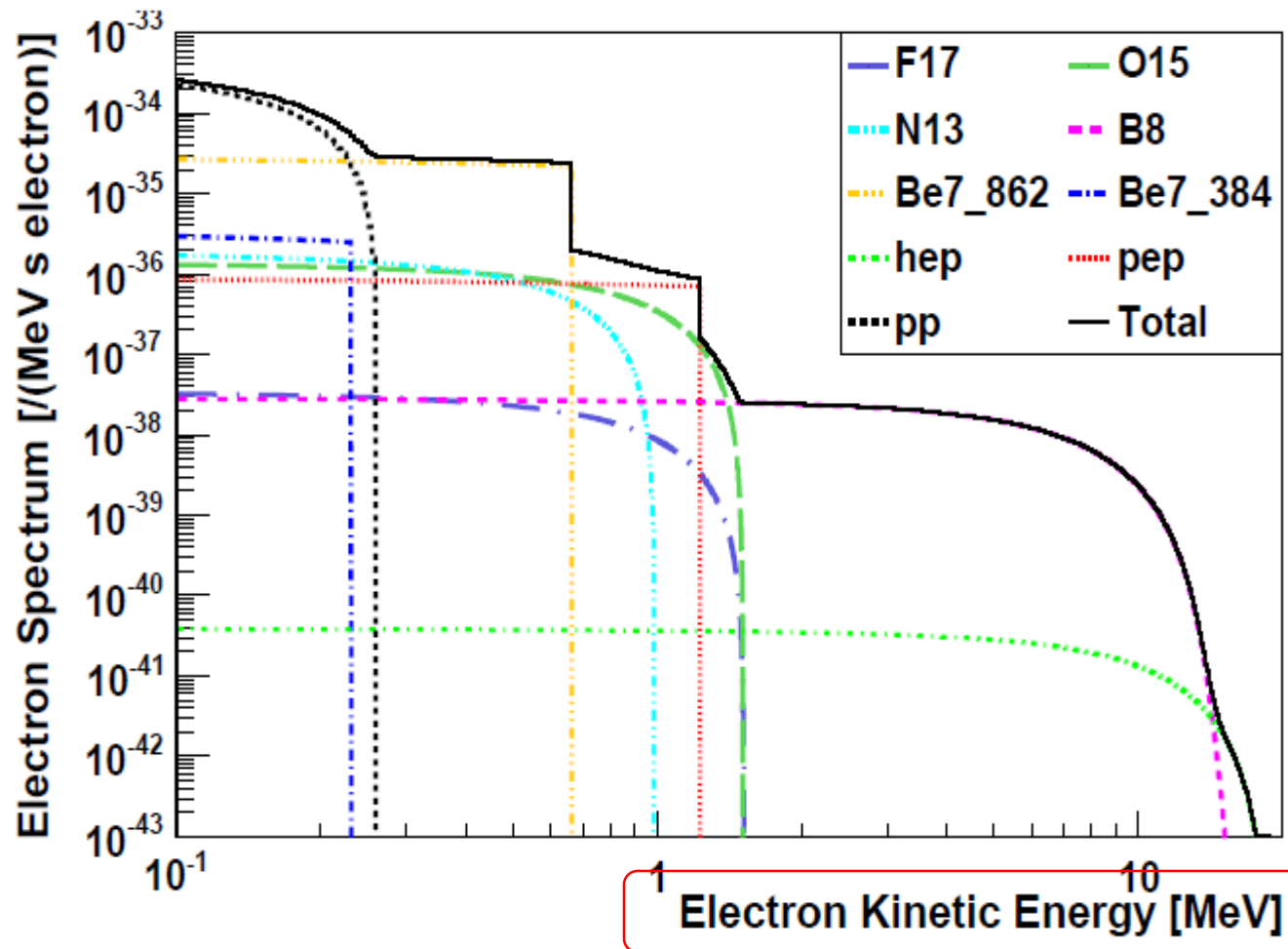


散射电子与太阳方向有强的角关联

出射电子会倾向于沿着原初中微子方向

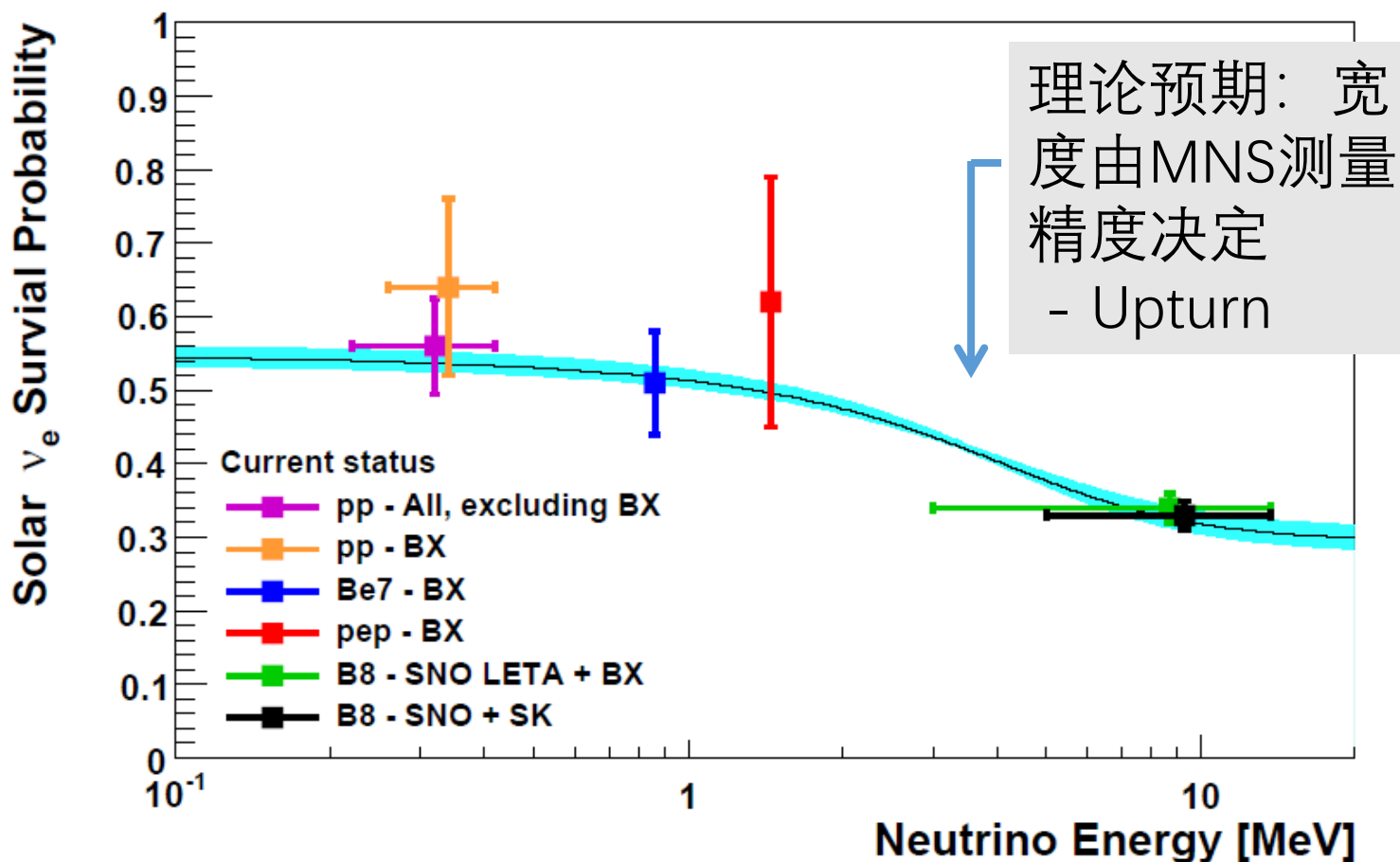


可探测的太阳中微子能谱



太阳中微子的研究现状

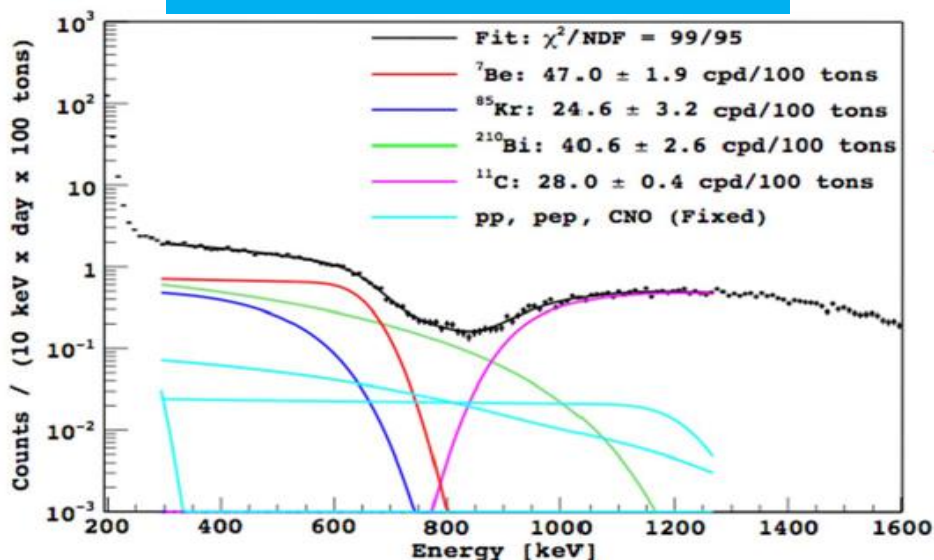
问题1. CNO、hep中微子仍未找到
pep中微子精度差



实验上的主要困难

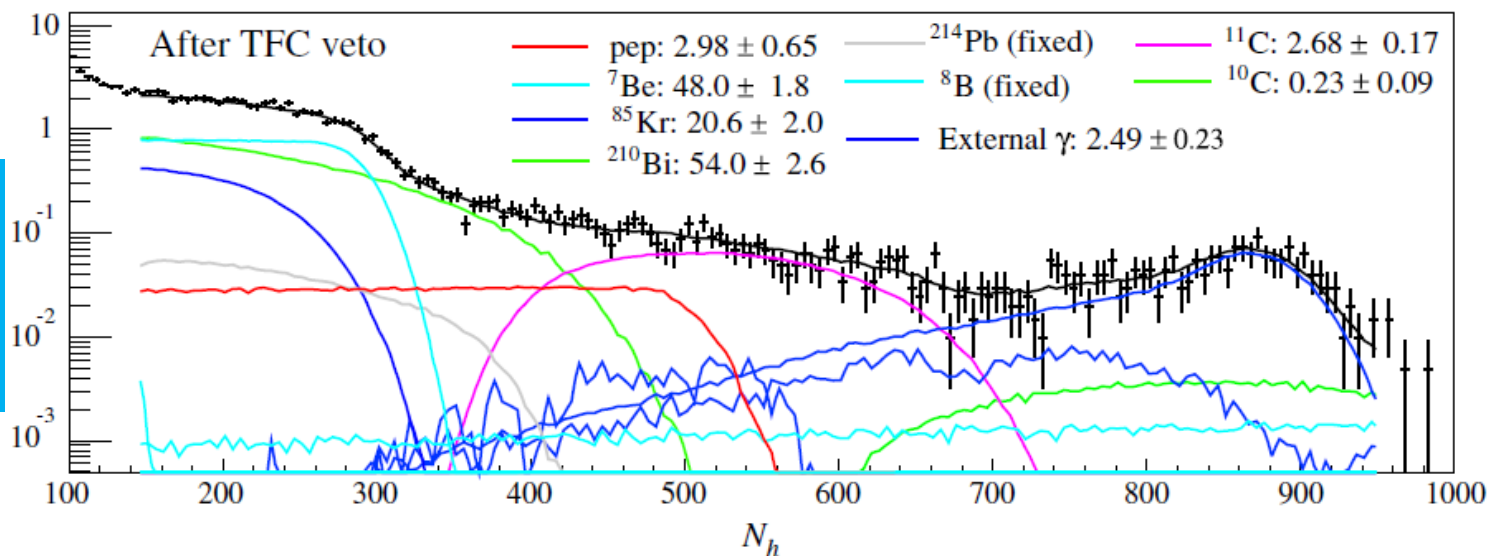
Borexino实验

Be7中微子通量测量

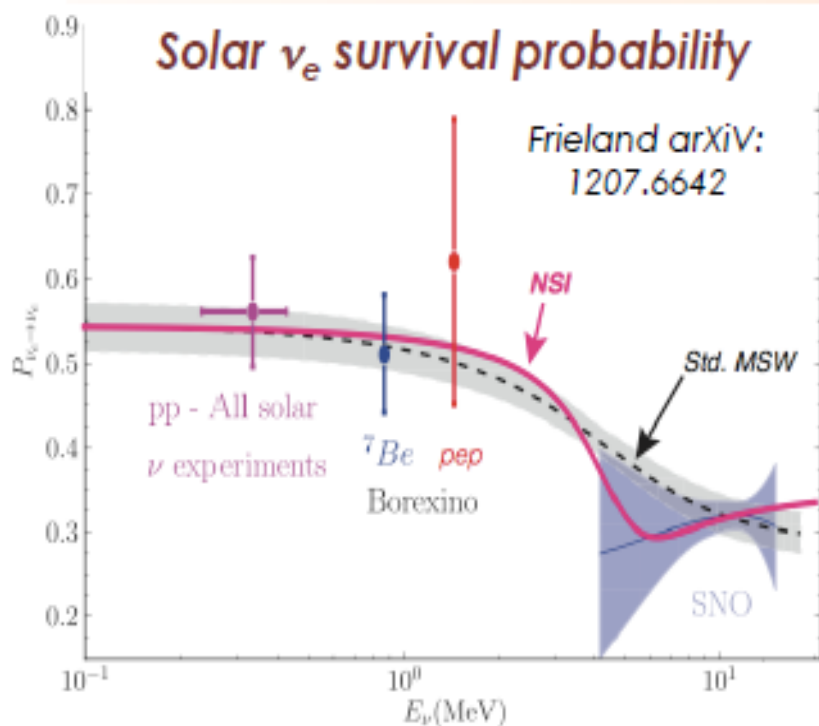


宇宙线导致的 ${}^{11}\text{C}$,
 ${}^{10}\text{C}$ 正好是重要的
本底, 其次是外部
光子本底

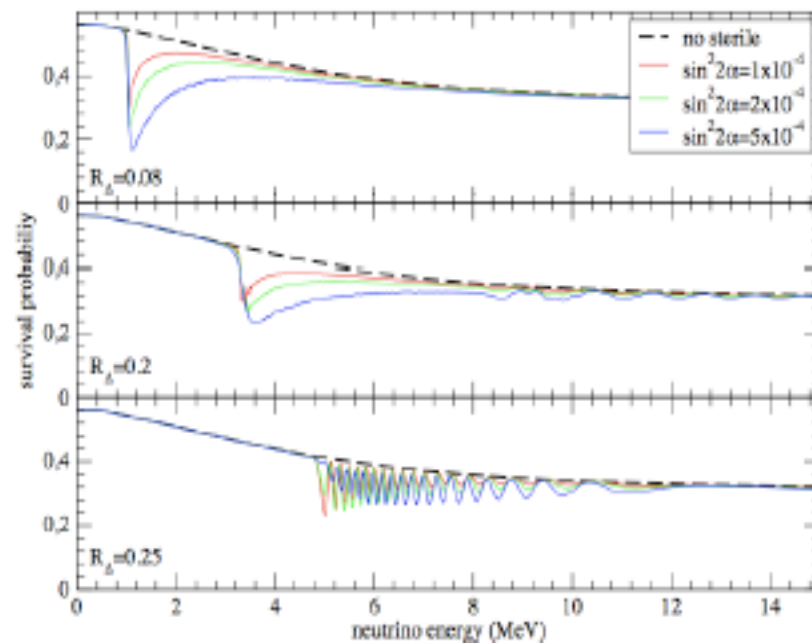
pep中微子通量测量



问题2. 对MNS+物质效应缺乏有效的验证



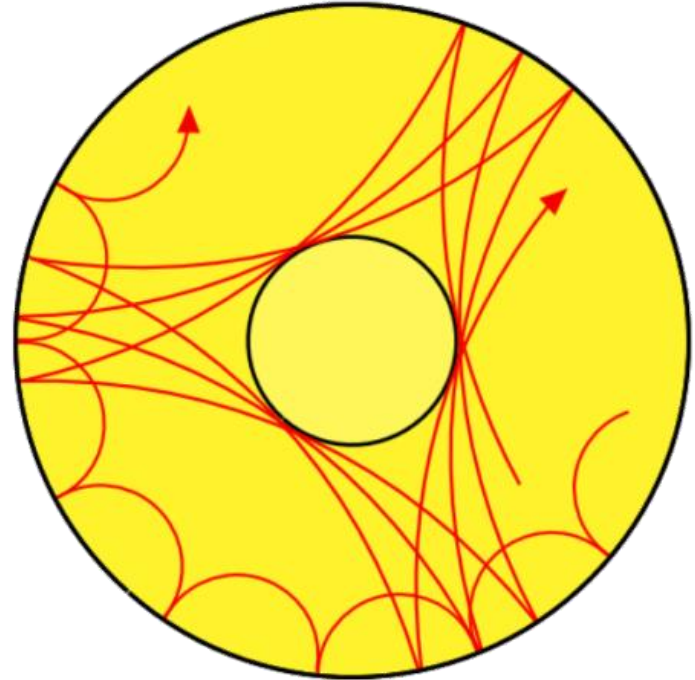
^8B $-\nu$ upturn, P. De Jolanda PRD 83 (2011)



期待高精度太阳混合角测量
非标准相互作用，惰性中微子，等等

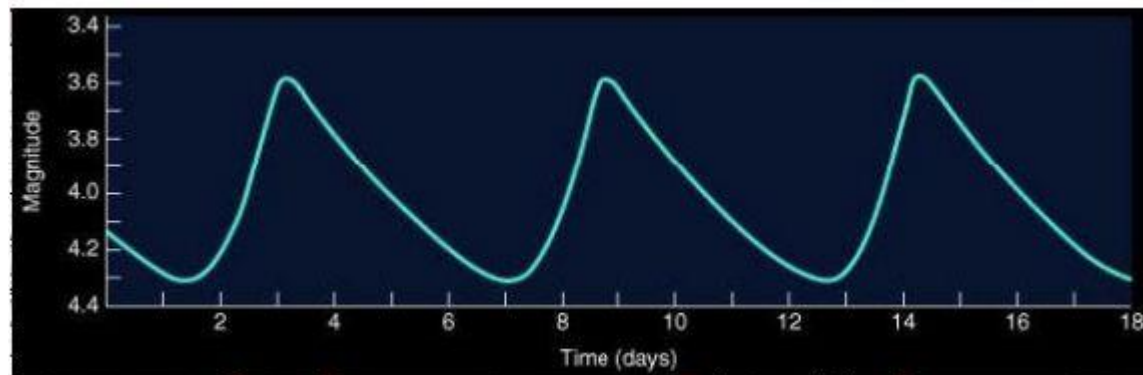
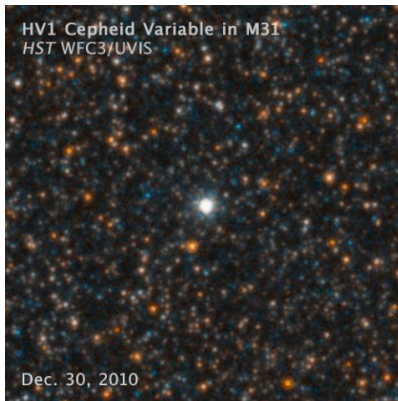
日震学的新挑战

日震学，星震学：太阳光球表面的吸收谱线的多普勒测量发现太阳表面在振动：周期5 min，速度达到0.5 km/s，振幅达到数百公里（太阳共振腔）

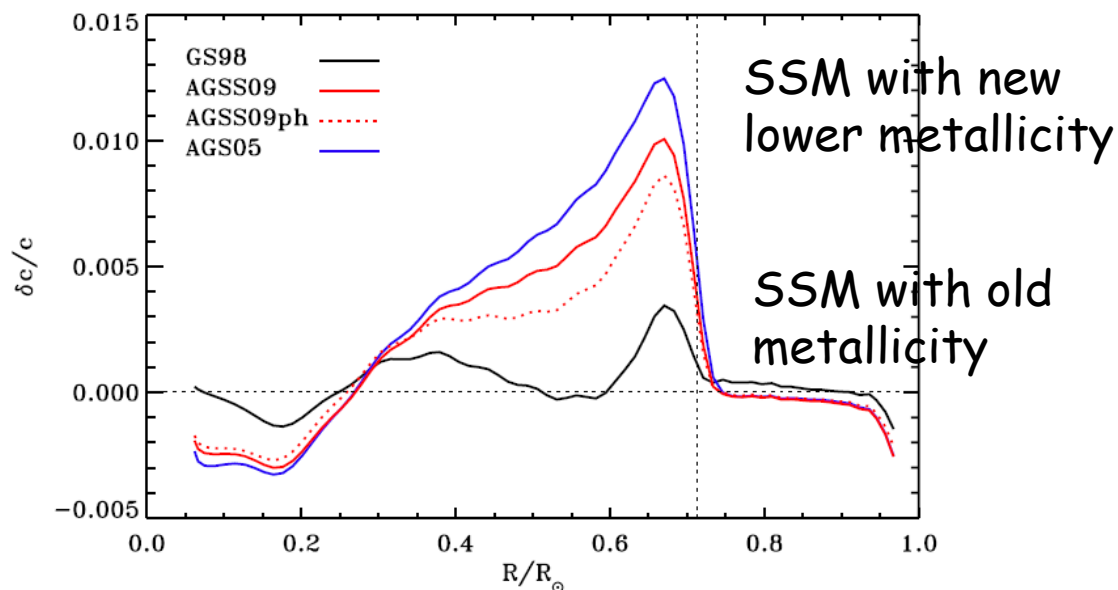


可推测太阳内部结构，密度，声速

造父变星



问题3. 新的金属性丰度预期，新的中微子 通量预期，与日震学计算不符



为了解释利用日震学测量得到的内部声速，需要降低太阳内部的金属丰度30%，这大大超出了太阳标准模型的控制范围

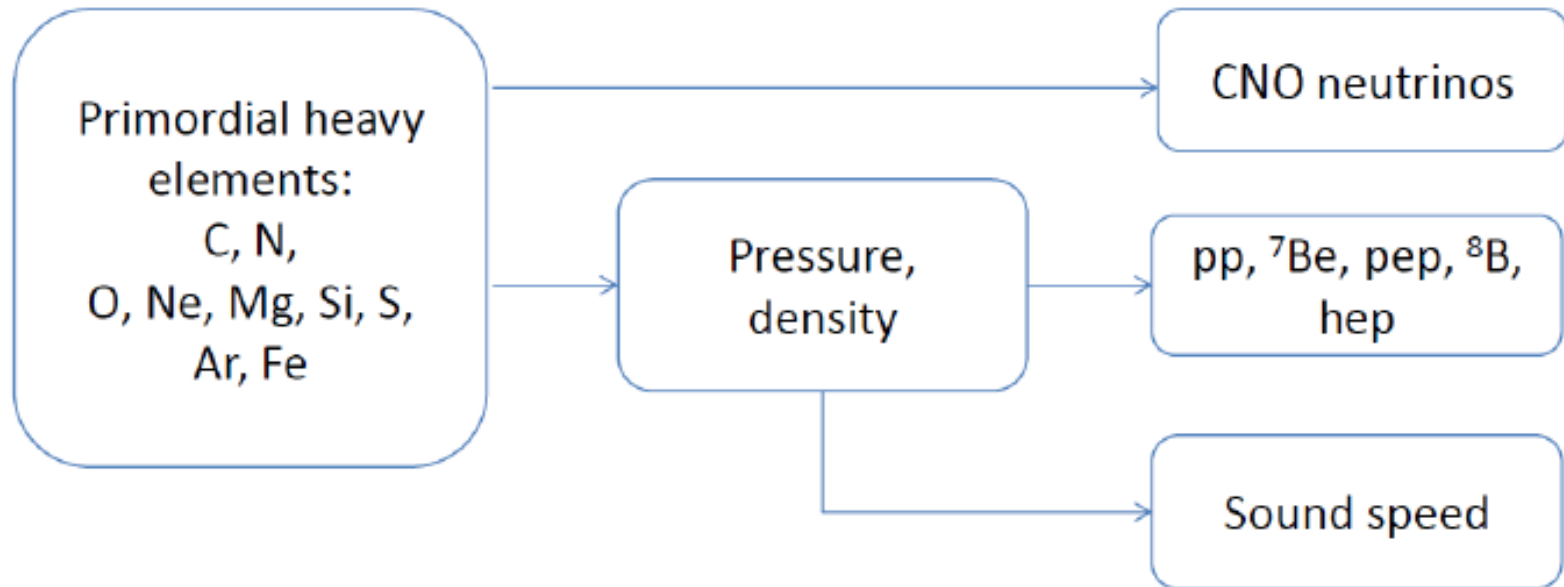
AGS09 and Helioseismology Metal element concentration off by 30%

- AGS09, 3D calculation, new surface abundance, etc.
- Different with helioseismology prediction in sound speed

Something is wrong or unaccounted:

- Solar matter opacity
- Solar abundances
- Chemical evolution

精确测量CNO中微子有重要意义



CNO neutrinos:

- besides testing CNO cycle
- provide clues for the solution of the metallicity puzzle.

太阳中微子的重要问题总结

1. 太阳模型

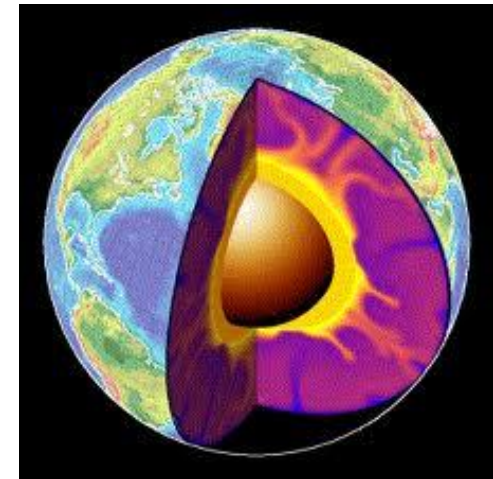
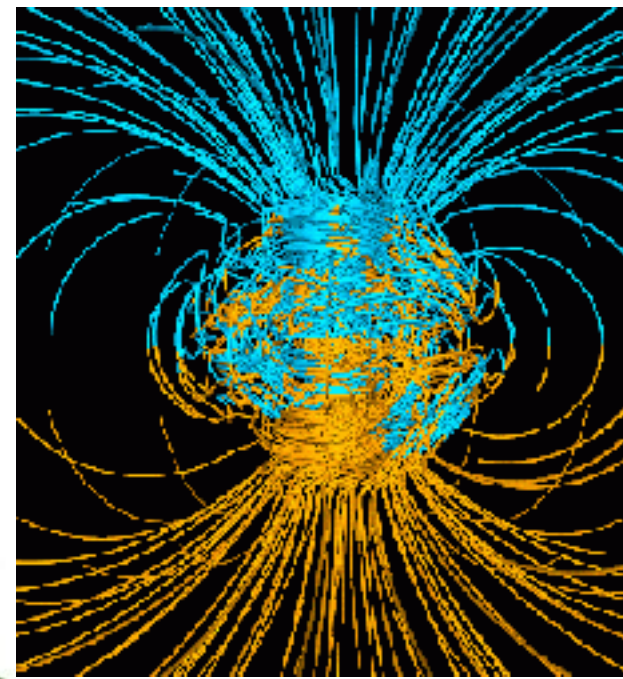
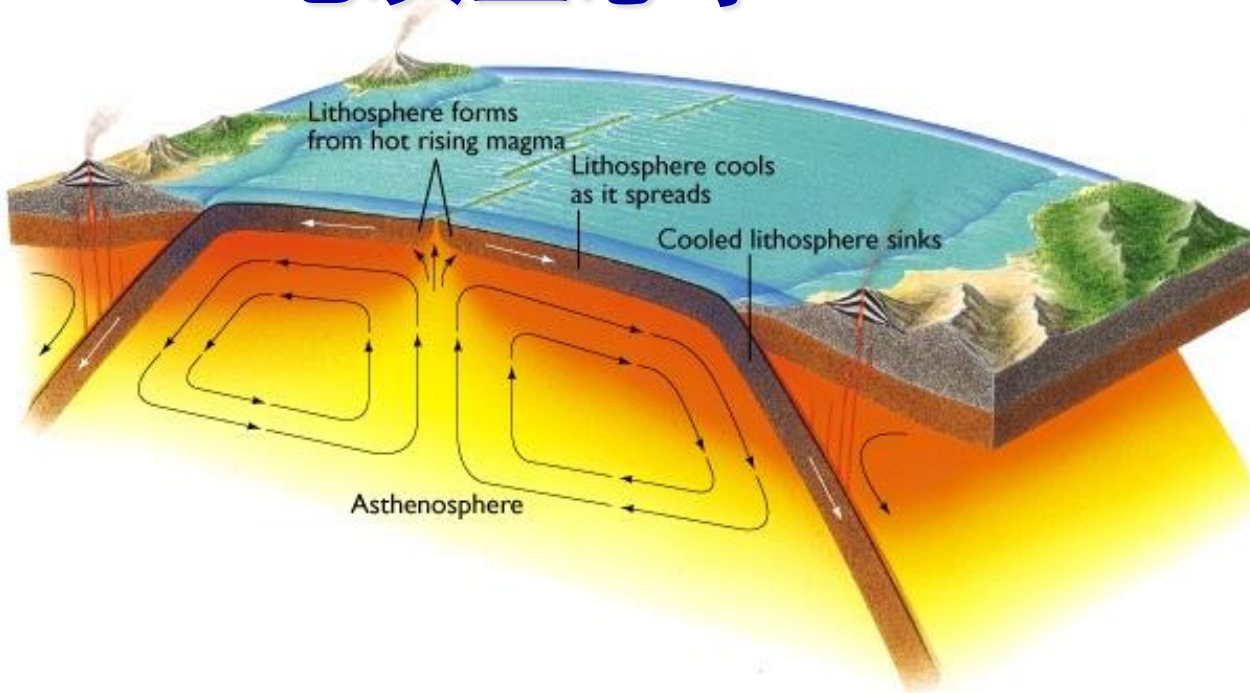
- CNO、hep中微子尚未发现，pep中微子精度差
- 太阳金属性问题
- 太阳中微子质量差与反应堆测量的差异
- 太阳中微子亮度

2. MNS+MSW

- 中微子振荡从物质到真空的过渡区--upturn
- 惰性中微子或新相互作用的可能性
- 地球上的物质效应

六、地球中微子

板块构造, 能量对流, 地质生态学



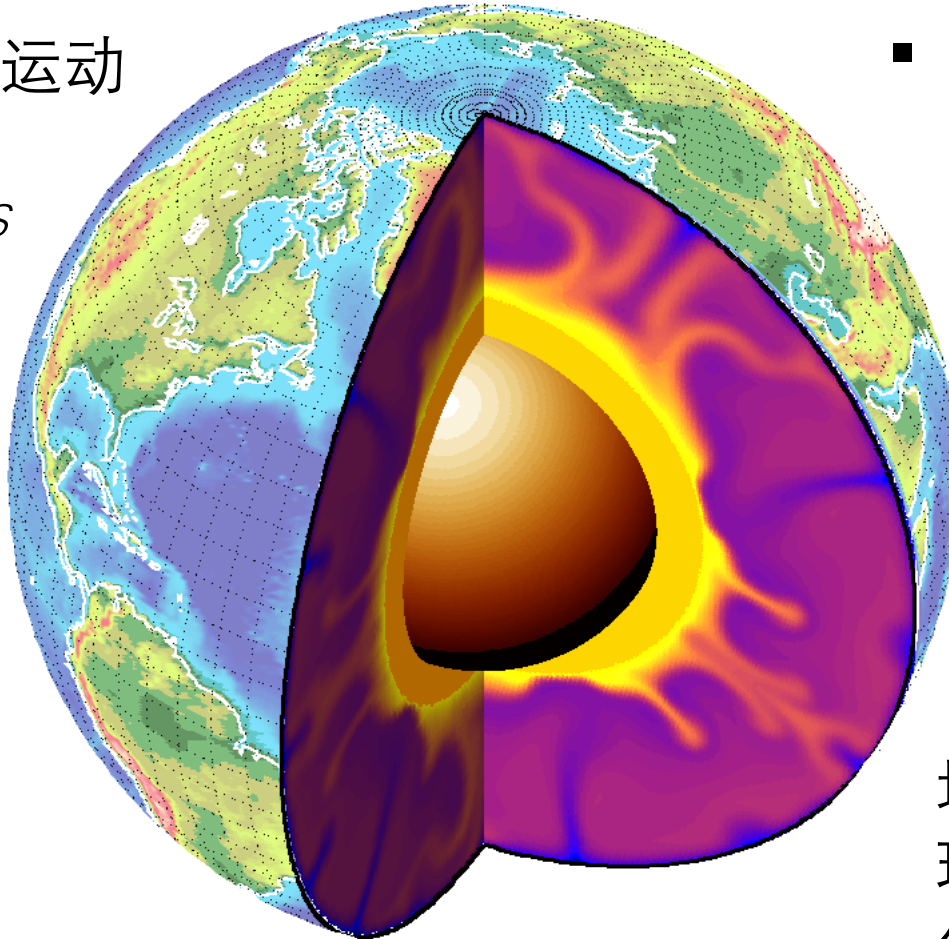
放射性能量在驱动着地球

K, Th & U!

关于地球的重要问题

- 地热，板块运动
原动力？
核素衰变 *vs*
原初塌缩
引力势能

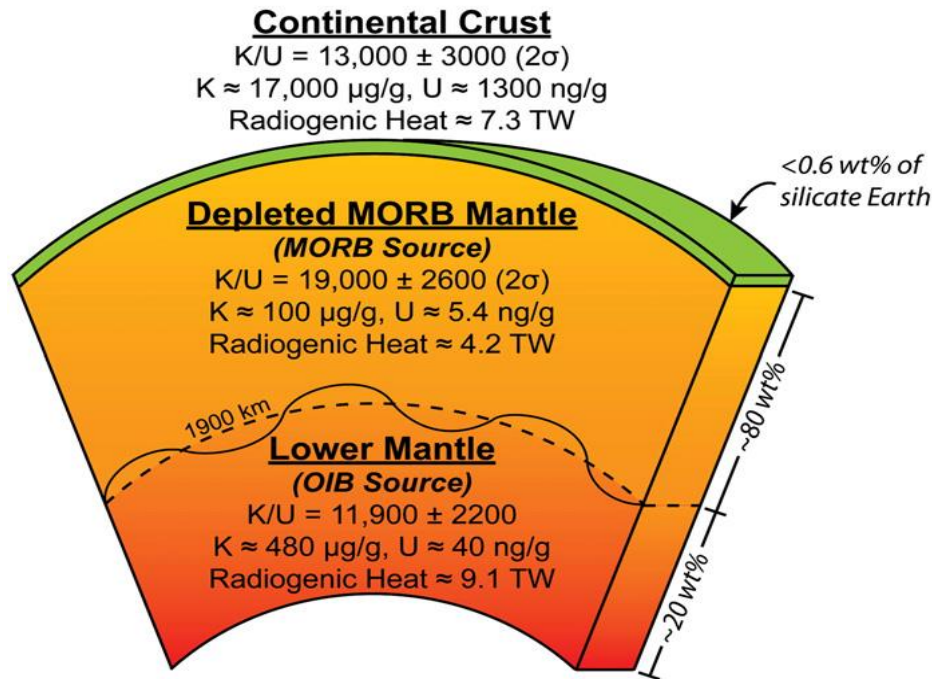
- 热产生放射性元素的地下分布
- 地壳中微子
- 地幔中微子



- 地核内有核反应堆吗？

- 地球的原初构成成分？
地球动力学，地球化学，与陨石化学

放射性热与地球热演化历史

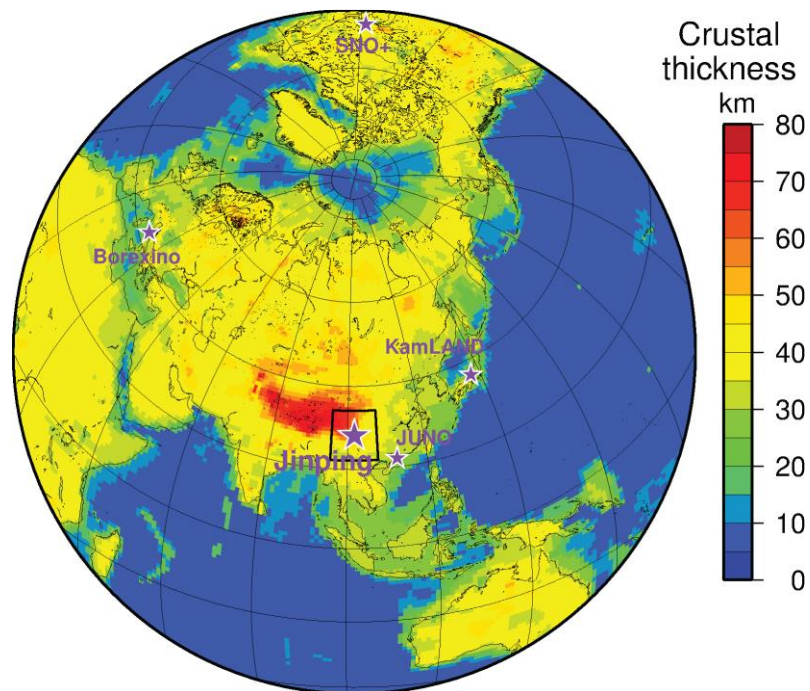


$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_m(t) + Q_c(t) + Q_s(t)}{C_m}$$

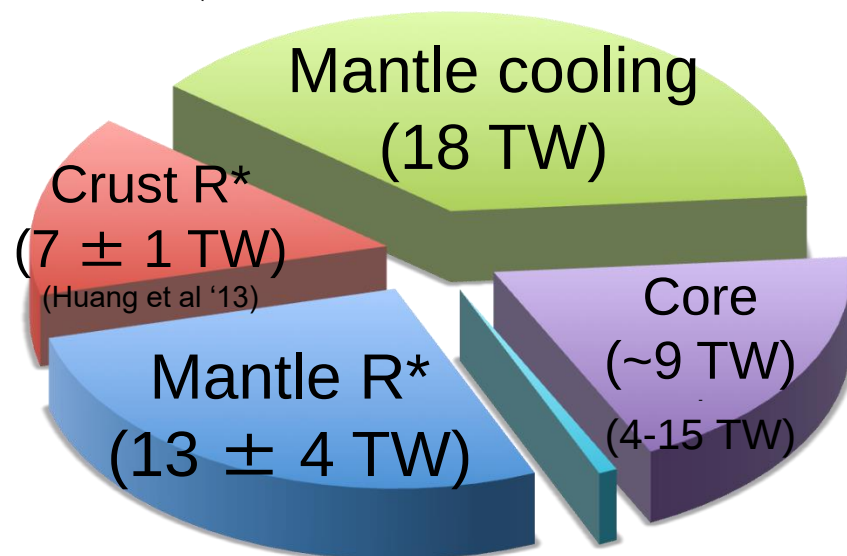
地幔热演化历史：
地幔温度变化率 $\Rightarrow$ 放射性热，核幔边界热交换，地幔表面热散失

地球的热能是维持地球磁场的核心因素，是维持地球宜居环境关键，理解放射性热是一个重要任务

放射性热与地球热演化历史



地表热流 46 ± 3 TW

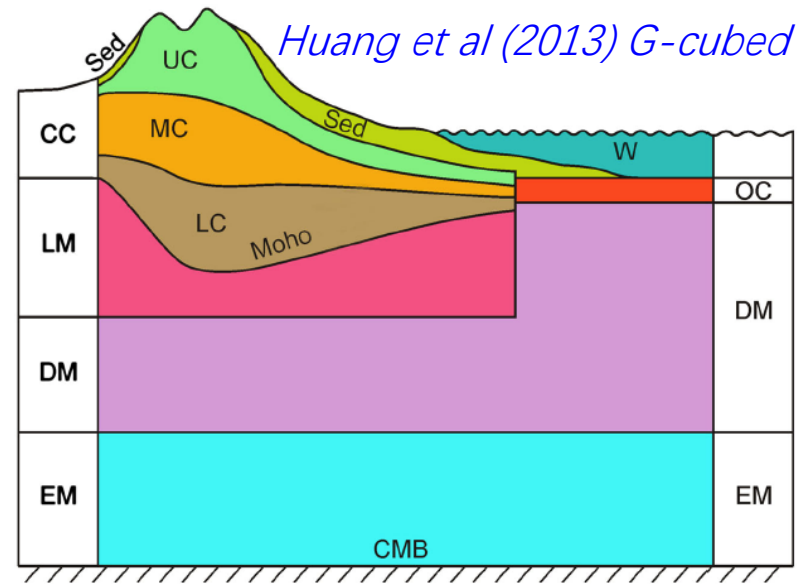
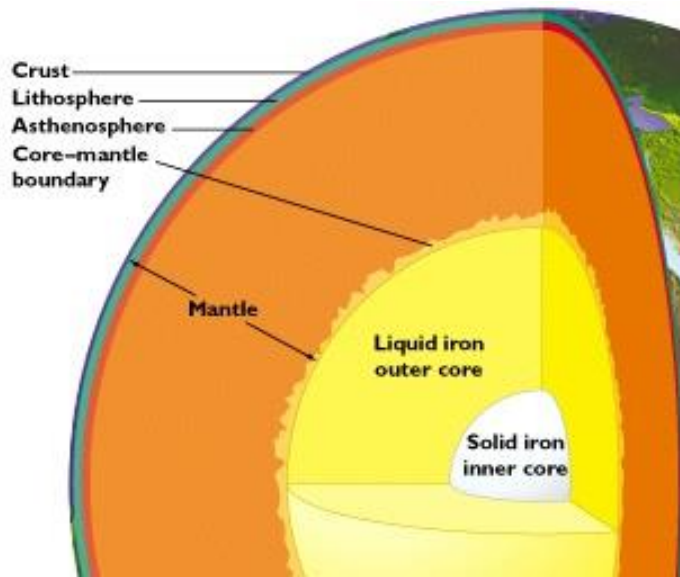


总放射性热 $R^* 20 \pm 4$ TW ?

锦屏地处川藏高原位置，对地壳最厚的世界屋脊的地球中微子最灵敏，对地壳结构的重要证明

- 最近江门实验报道一个偏全放射性的地球

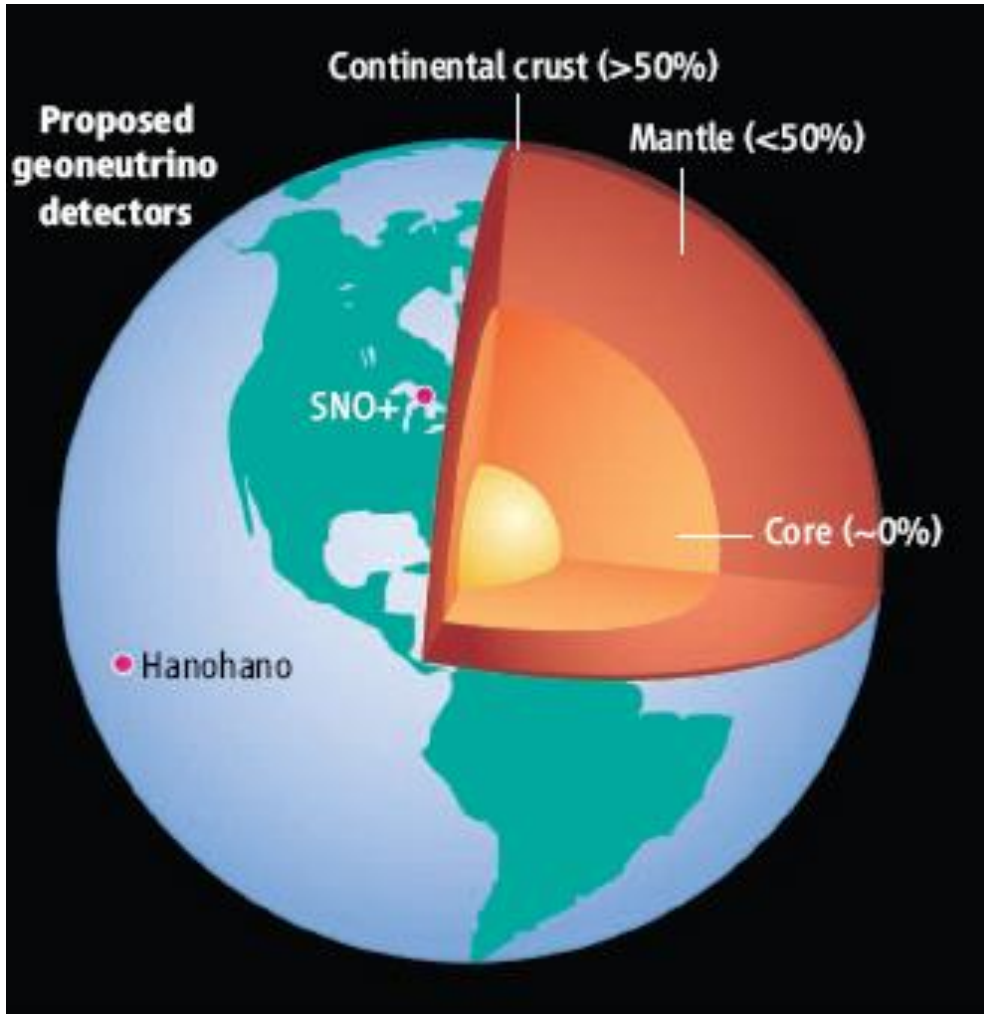
地球中分层与元素分层



- 地层中随深度增加，压力增加，物质的熔点相对降低，物质状态可以从固态转变为液态
- 金属元素，岩性元素会逐渐分层
- 亲岩元素和亲金属元素，也会随之分层
- 各层的运动状态不同，例如对流过程

地球中U元素含量

[Th/U = 3.9, K/U = 1.3×10^4]



平均13 ng/g U in the Earth

Metallic sphere (core)
 $\lll 1 \text{ ng/g U}$

Silicate sphere
 20^* ng/g U

*O'Neill & Palme (2008) 10 ng/g

*Turcotte & Schubert (2002) 31 ng/g

Continental Crust
 1300 ng/g U (~7 TW)

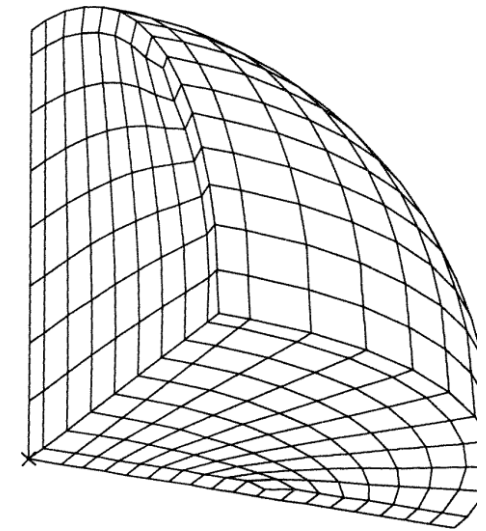
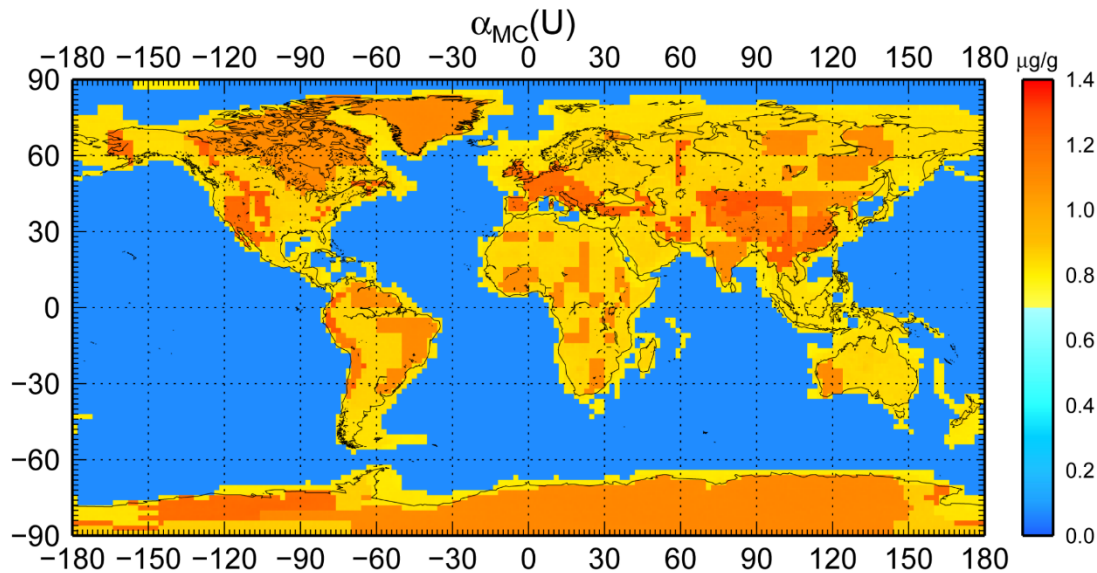
Mantle
 $\sim 13^* \text{ ng/g U}$ (~13 TW)

**Mantle could have as little
1-3 TW or as much as 28 TW*

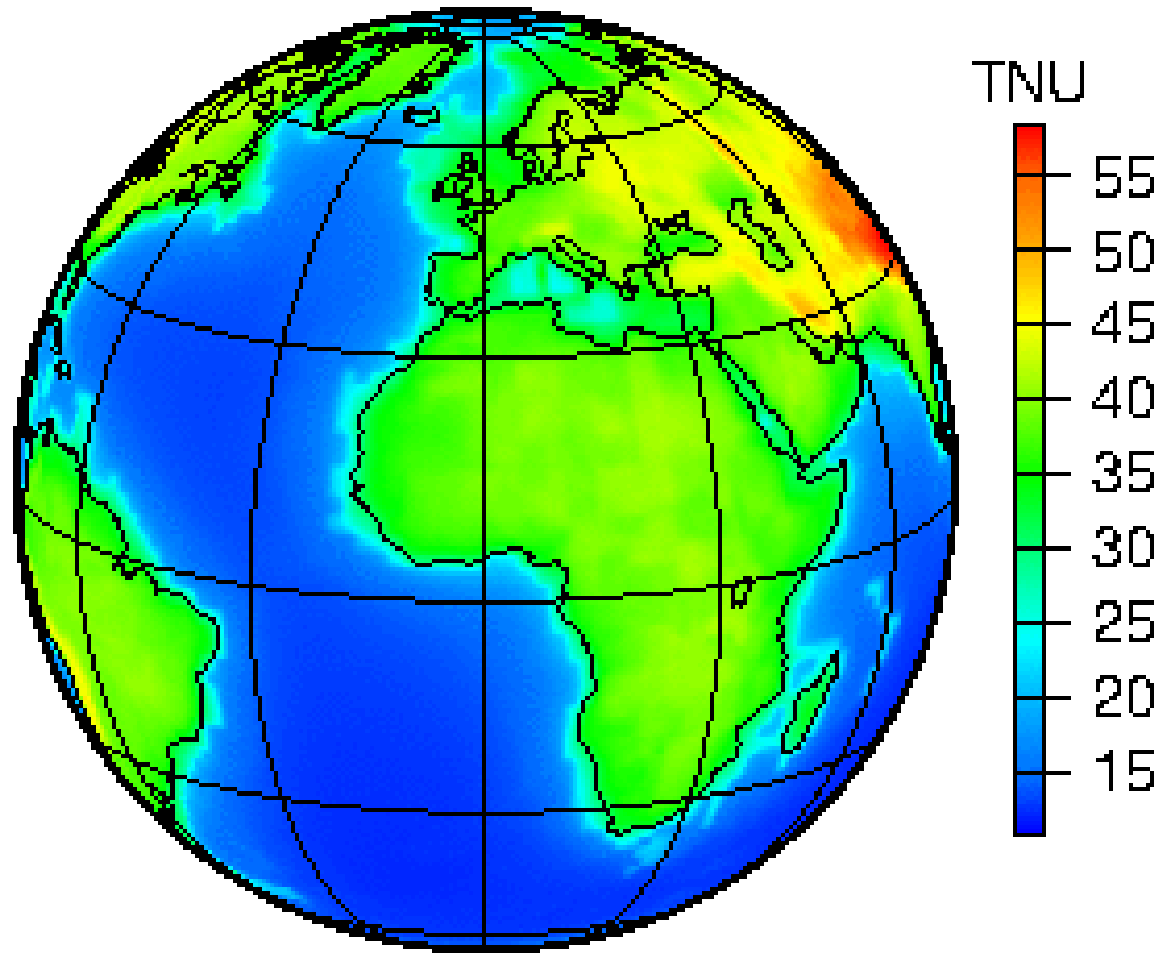
地球中U，Th元素导致的中微子含量的预期

3维地球参考模型，地壳，地幔结构，U,Th丰度

$$\frac{d\phi(E_\nu, \mathbf{r})}{dE_\nu} = A \frac{dn(E_\nu)}{dE_\nu} \int_{V_\oplus} d^3 \mathbf{r}' \frac{a(\mathbf{r}') \rho(\mathbf{r}') P(E_\nu, |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2}$$

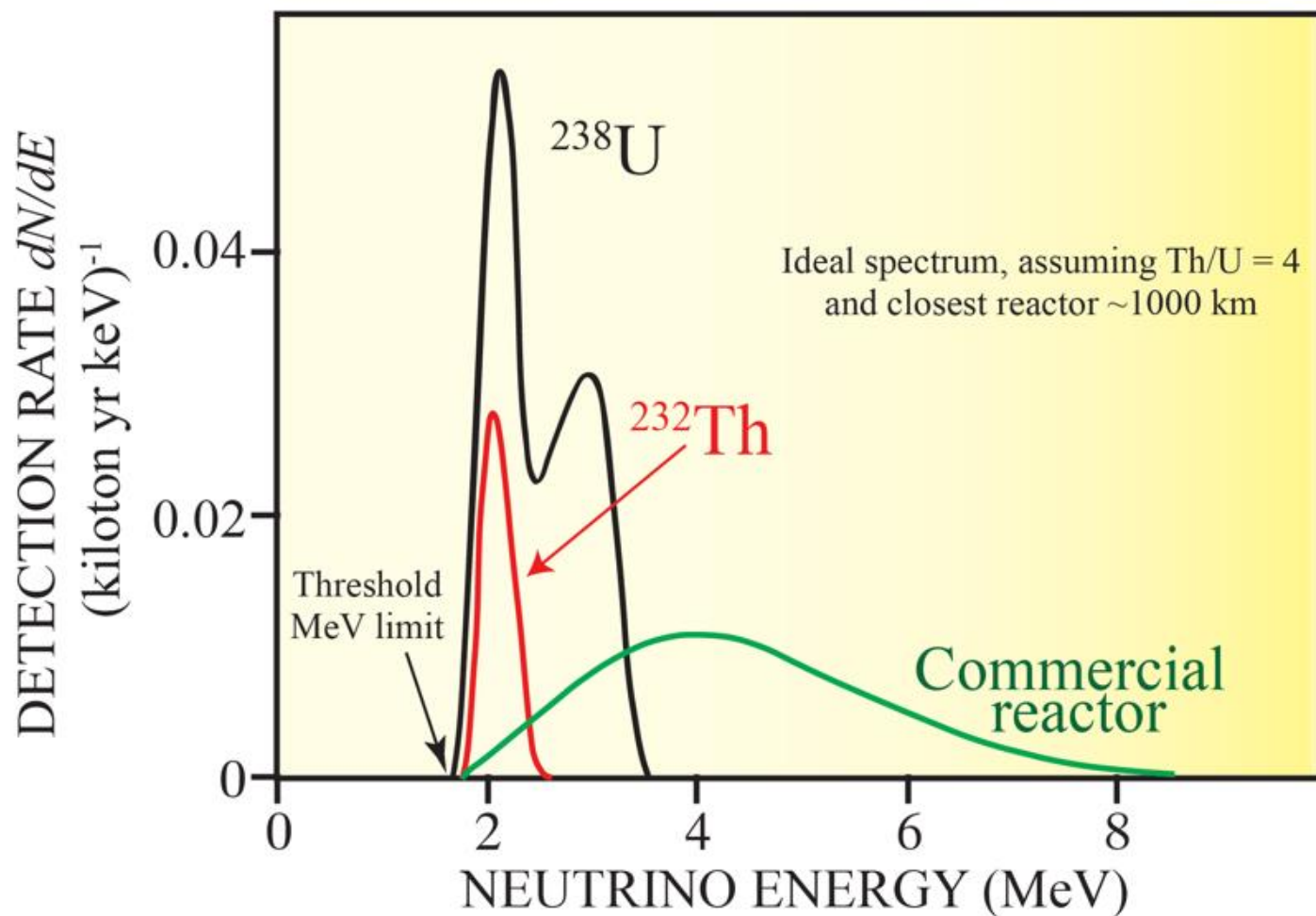


地球表面U，Th中微子通量预期

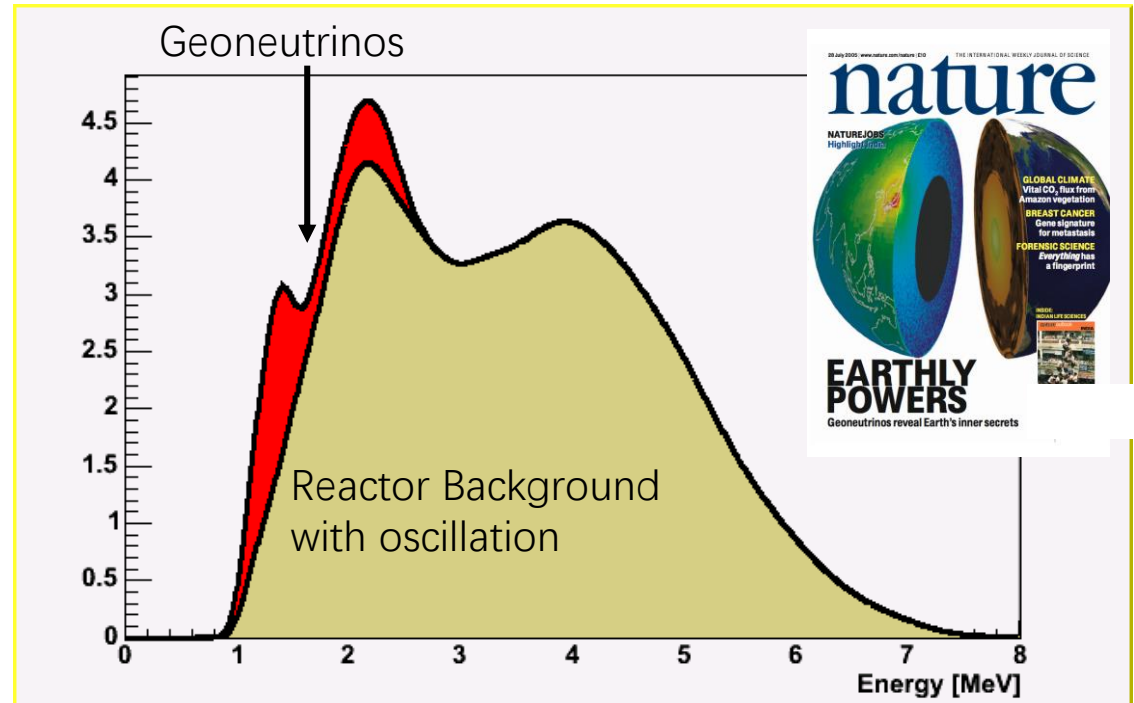
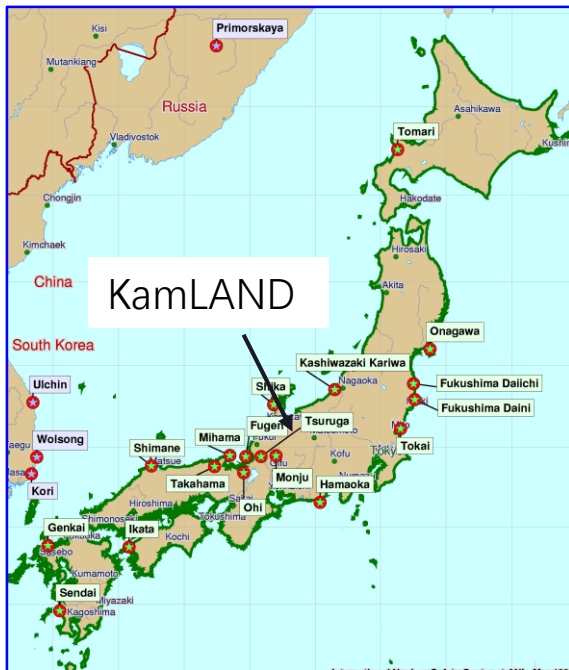


Huang et al (2013) G-cubed, 14:6,
[doi:10.1002/ggge.20129](https://doi.org/10.1002/ggge.20129)

地球U, Th中微子的探测

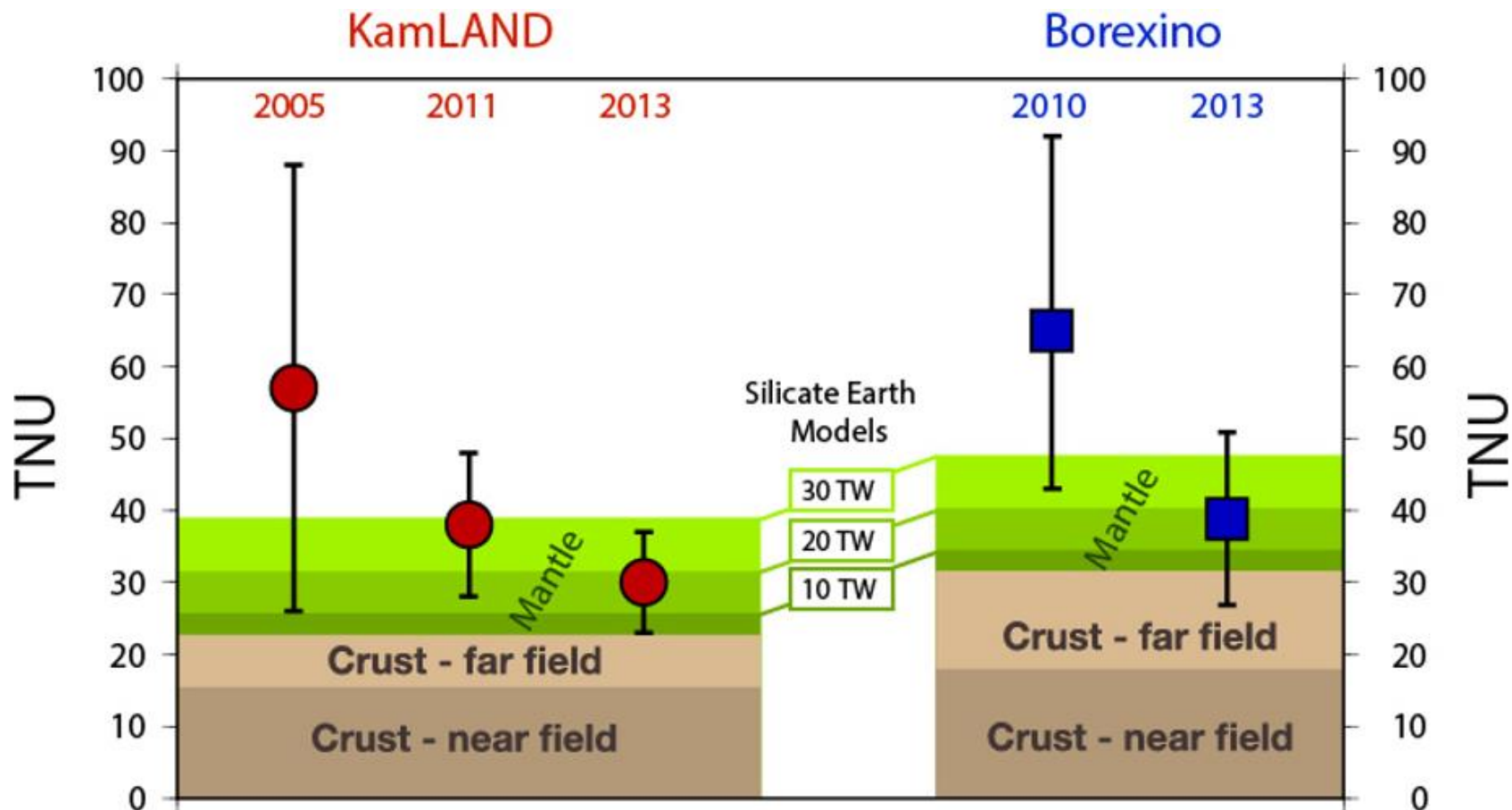


地球中微子信号的成功探测



- KamLAND was designed to measure reactor antineutrinos.
- Reactor antineutrinos are the most significant contributor to the total signal.

地球U, Th中微子探测目前的结果总结



SILICATE EARTH MODELS

Cosmochemical: uses meteorites – 10 TW

Geochemical: uses terrestrial rocks – 20 TW

Geodynamical: parameterized convection – 30 TW

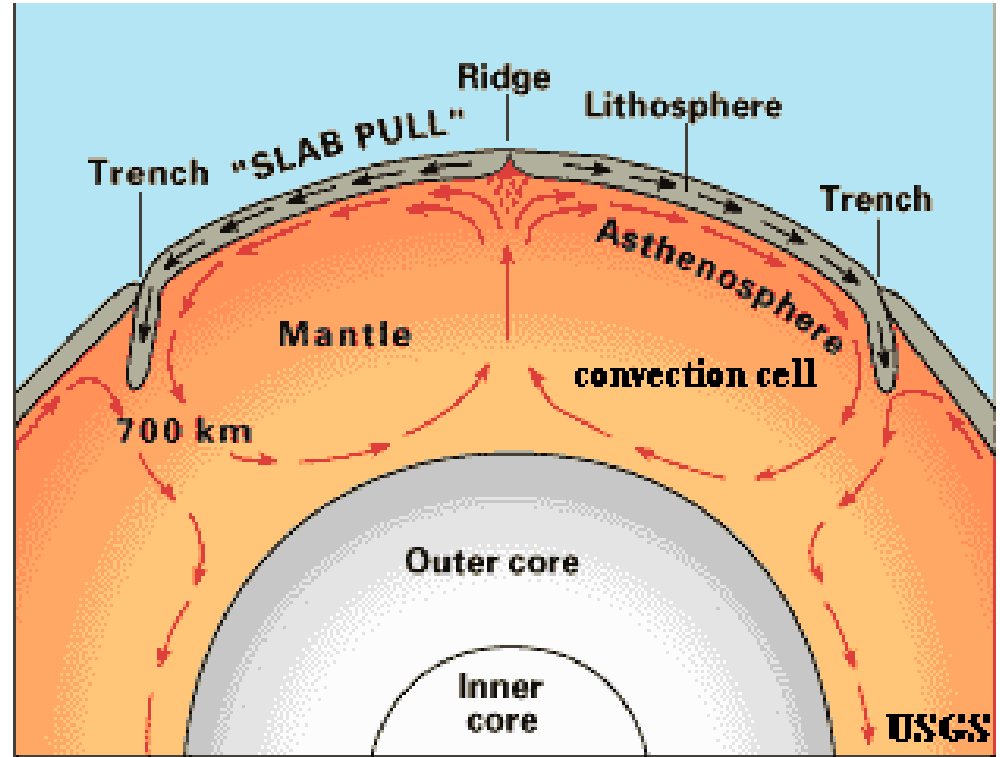
U, Th测量与地球的地表热流测量结果的比较

- 地球引力塌缩势能？
- 地球内部的核衰变，核裂变？



目前的知识：

- 全球地热测量 47 ± 3 TW
- 对核衰变热的预期：
 - Cosmochemical模型：10 TW
 - Geodynamical模型：15-30 TW
 - Geochemical模型：20 TW
- 地球中微子实验测量10-30 TW之间

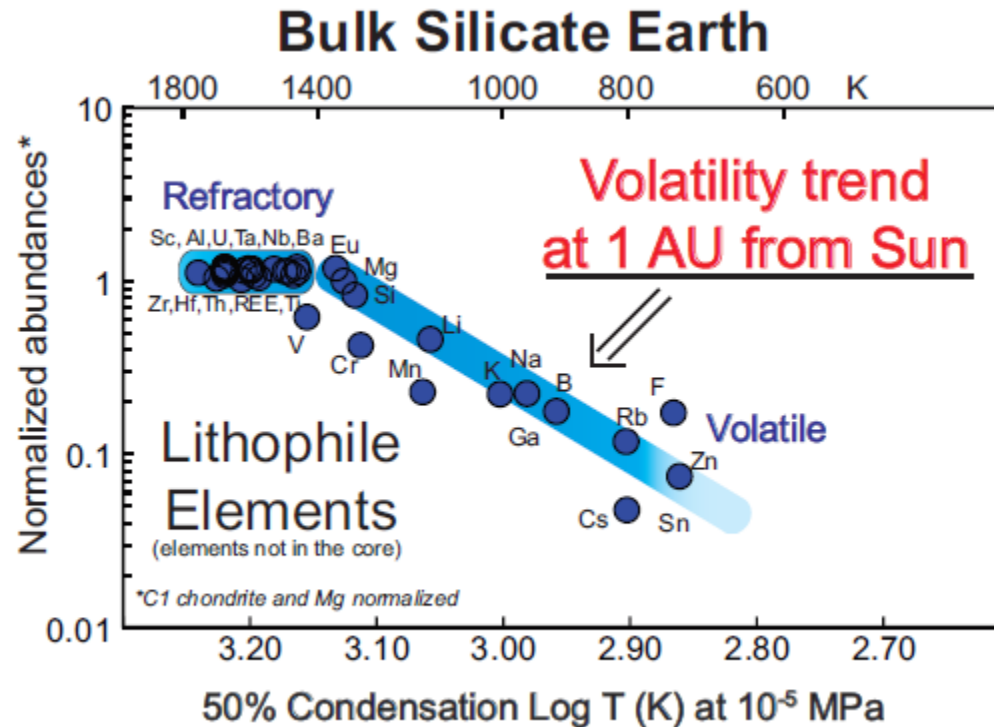


答案：

- 我们还在消耗地球形成之初的引力势能
- 核衰变情形基本未知
- 需要测量地球中微子

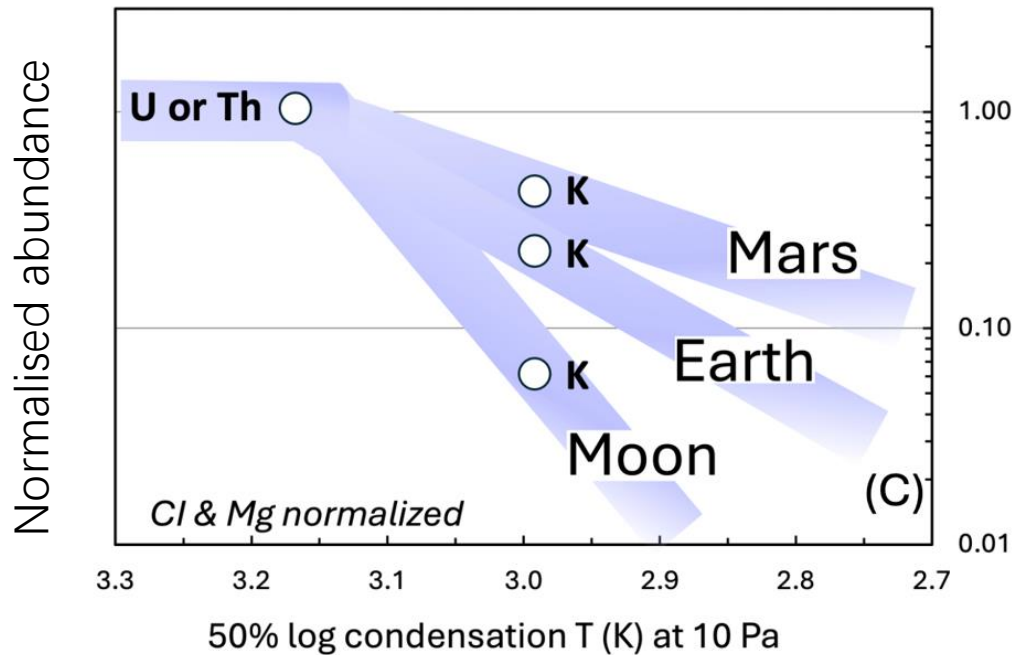


K元素及K-40中微子



- U, Th亲岩性元素（Lithophile，喜欢silicate），难熔元素，凝聚温度高，丰度与太阳系内其他物质基本持平
- K也是亲岩性元素，但为易挥发性元素，凝聚温度低，丰度非常不确定

放射性热与地球挥发性元素曲线



难熔元素：U，Th
(可以归一化到CI陨石以及太阳的元素丰度)

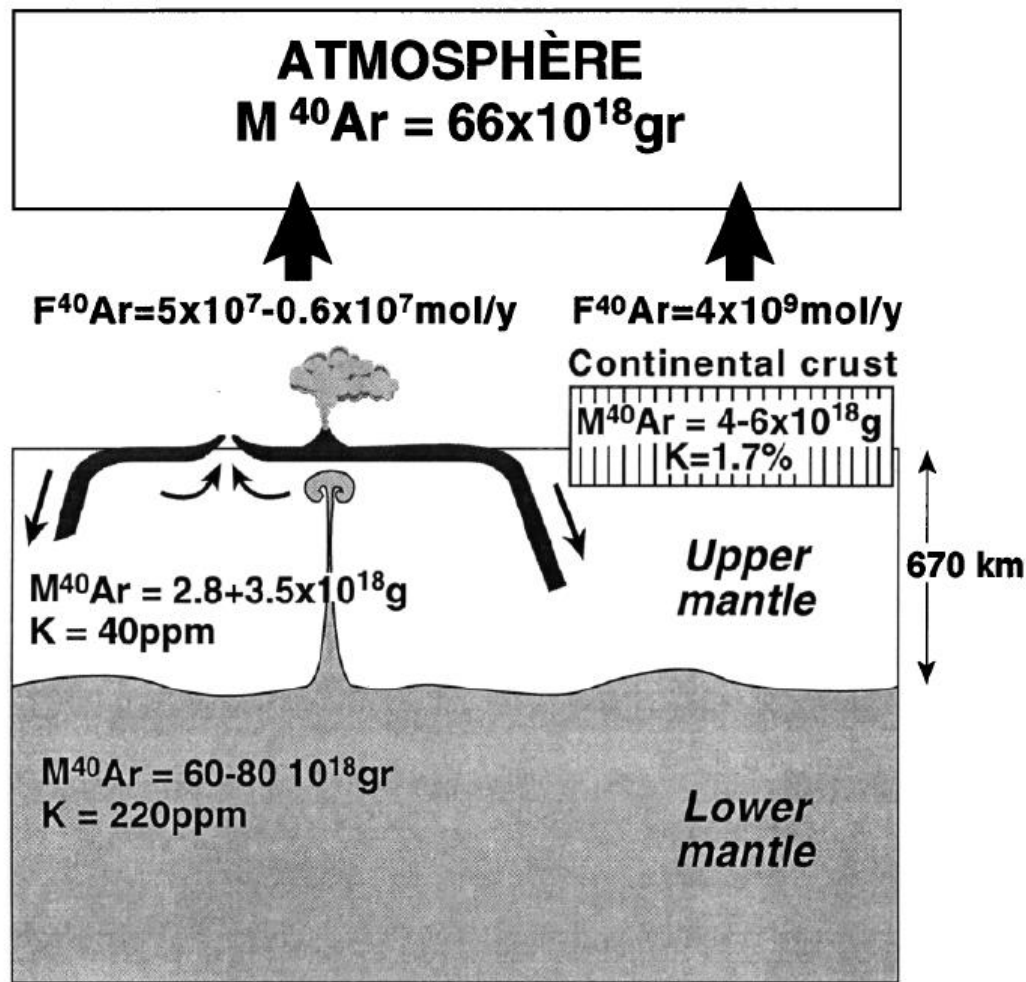
挥发性元素：K
丰度小于CI陨石，并且各个太阳系内的行星丰度不同

U，Th和K中微子为产热元素的主体
K中微子低于IBD探测过程阈值

在锦屏有可能首个完成地球K中微子的探测

K40-Ar40平衡与上下地幔

- Ar40由K40衰变而来，总量有平衡关系
- 原初地幔Ar40含量预期=空气中含量+大陆地壳Ar40释放量+上地幔含量+下地幔含量
- 预示着地幔可能是分层的，有一层Ar40富集的下地幔



K-40中微子从来没有被观测到

七、超新星中微子

超新星爆发、遗迹中微子研究

1987A超
新星中微

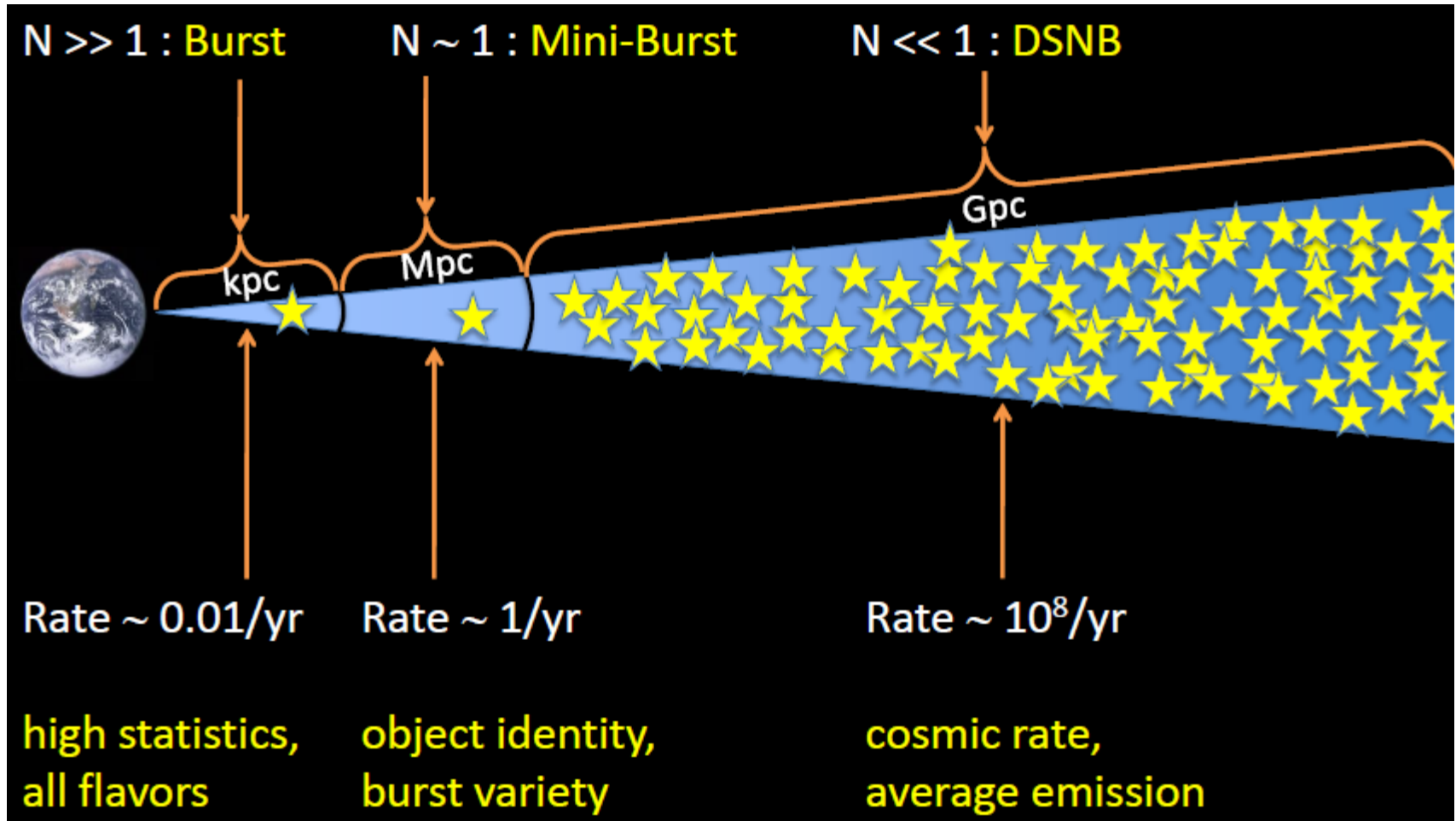
爆发之后

爆发之前

中微子物理，恒星演化，恒星动力学

© Anglo-Australian Observatory

超新星遗迹中微子



超新星中微子的研究现状

- 超级神冈和IMB实验等观测到了1987A超新星爆发中微子
事件概率低，靶质量低是主要问题
- 而超新星遗迹中微子仍待发现
主要问题在于高本底

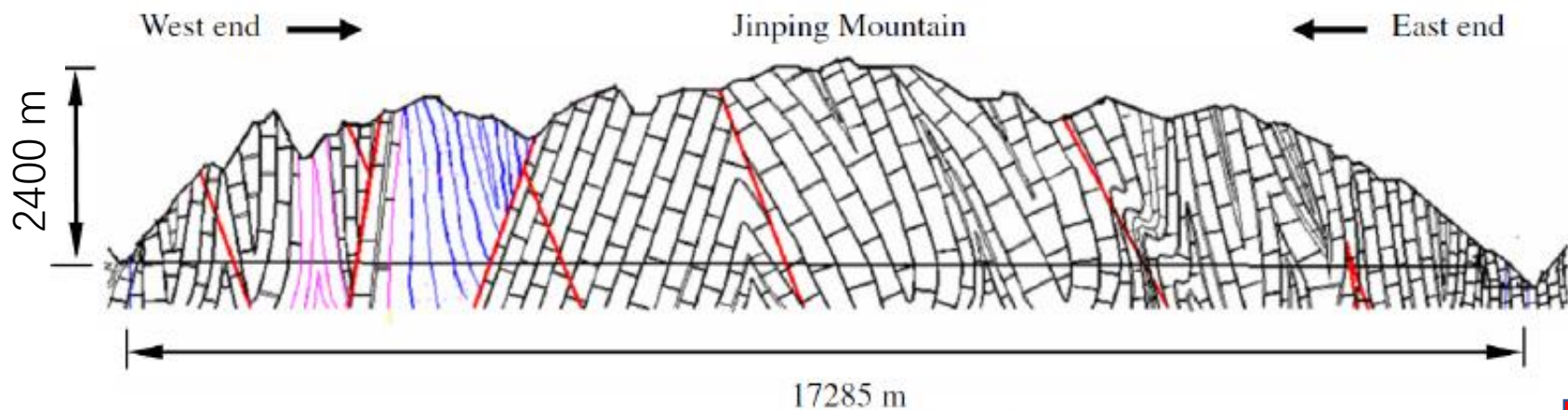
遗迹中微子研究的问题

➤ 实验困难

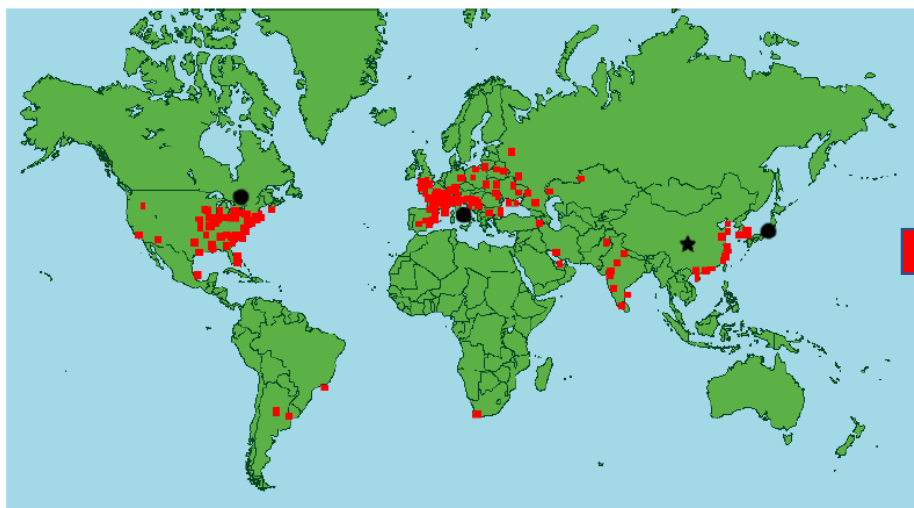
- 大气中微子的中性流过程，类似反beta衰变
- KamLAND（液闪）：大气中性流本底，无法鉴别缪子，核子反冲
- 超级神冈（纯水）：很难鉴别反beta衰变的中子

八、锦屏中微子实验的计划和进展

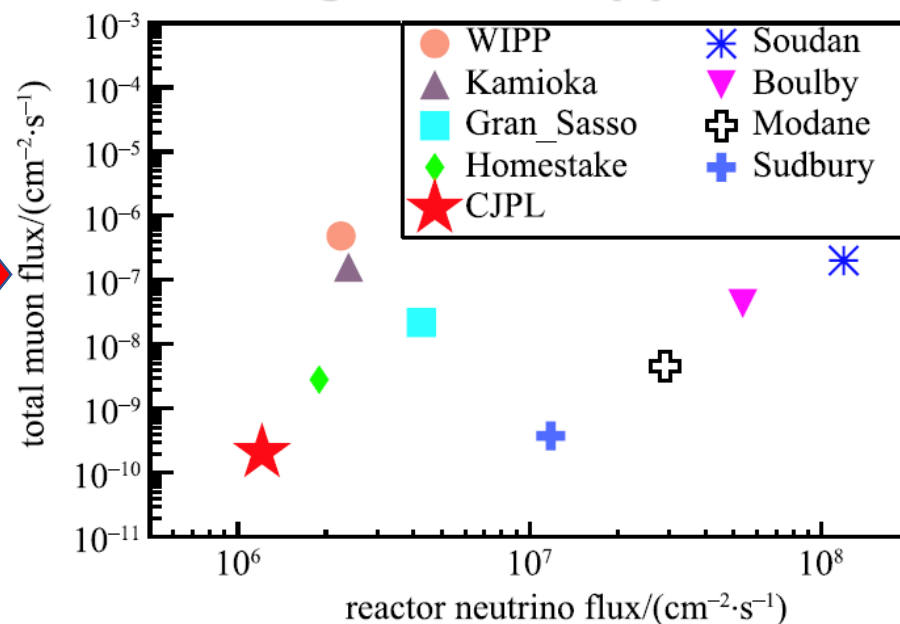
深地和远离反应堆的优势



2400 m overburden, C10, C11 background suppressed



950 km to closest reactor

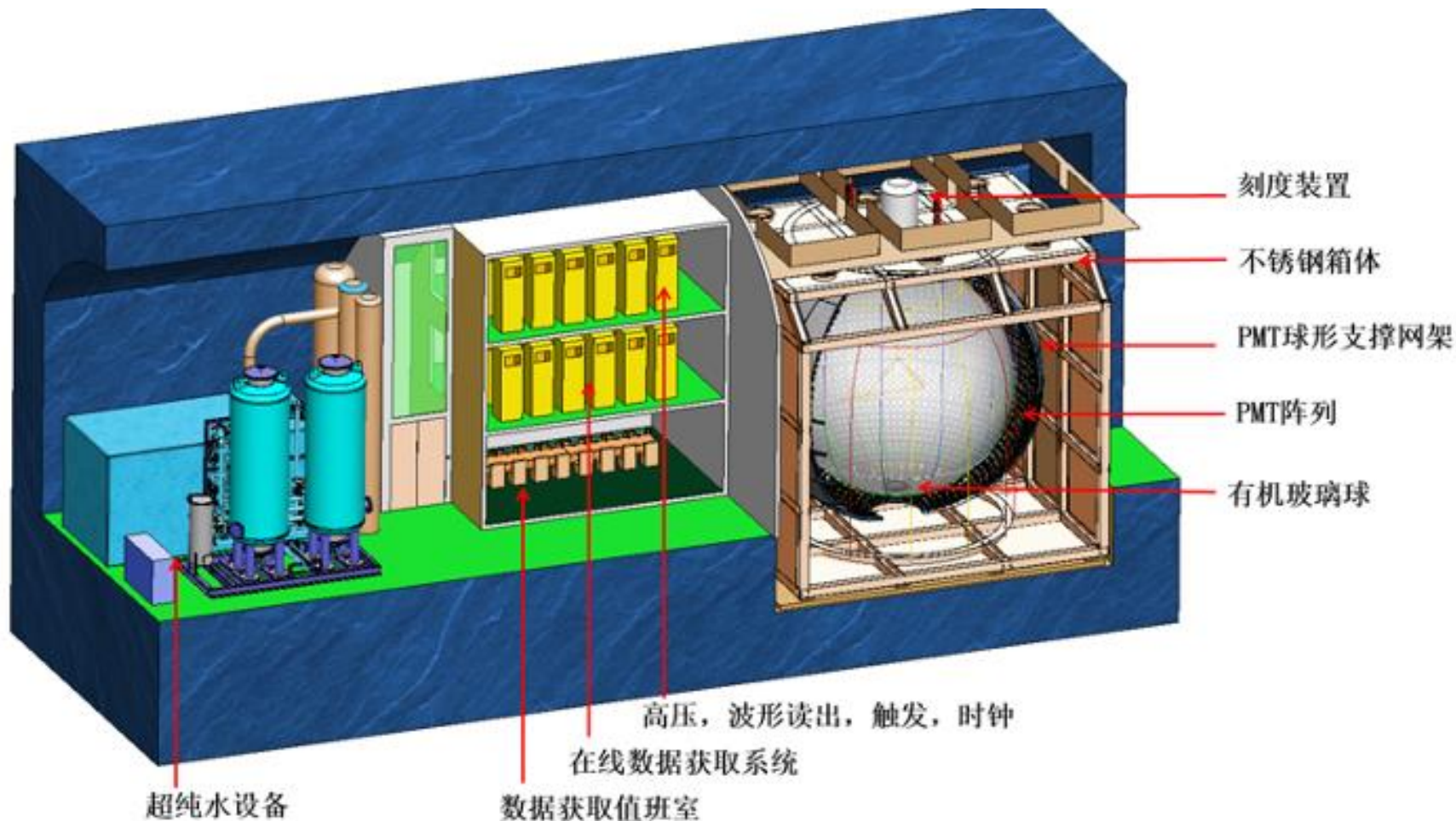


实验厅状态



2024/03/20 09:14

实验厅布置计划



探测器主体性质

不锈钢水箱:

14.5 m (L)*12.9 m (W)*13.2 m (H)

PMT不锈钢网架:

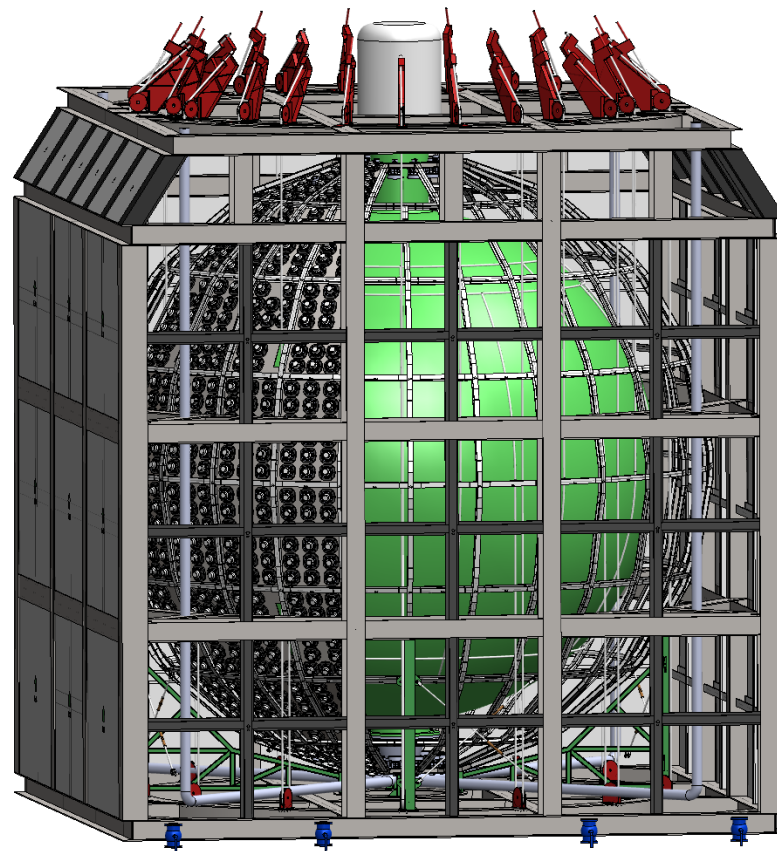
12.16 m (diameter)

亚克力球壳:

9.96 m (diameter), 0.05 m (thickness)

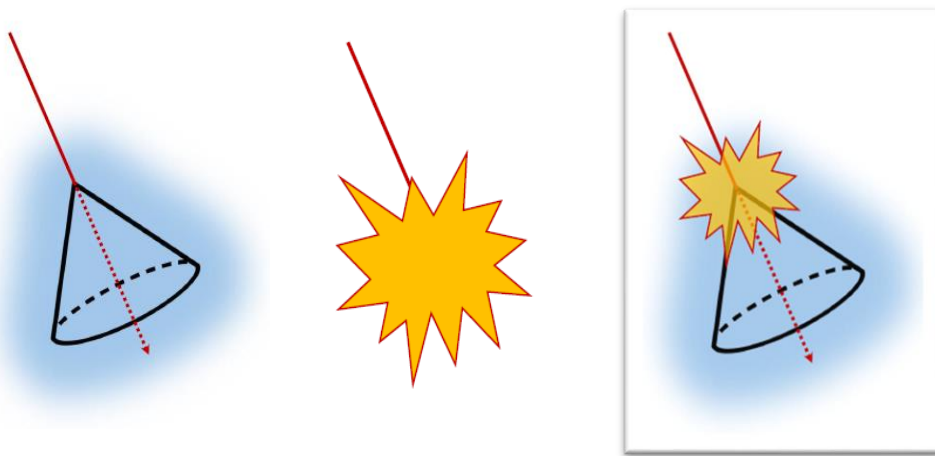
液体闪烁体体积:

500 cubic meters

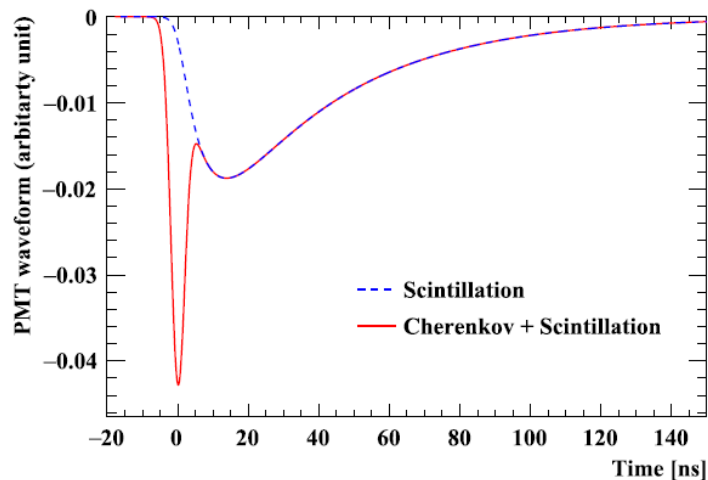


探测器建设开展中

切伦科夫液体闪烁体

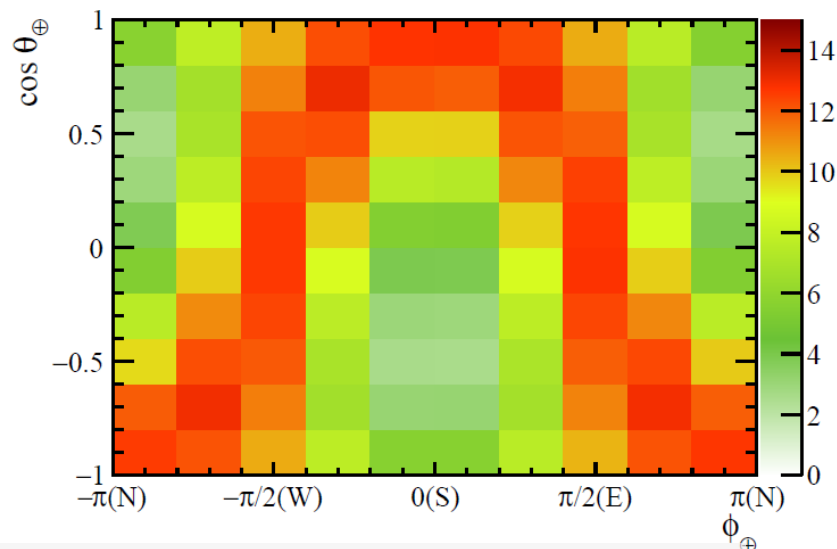
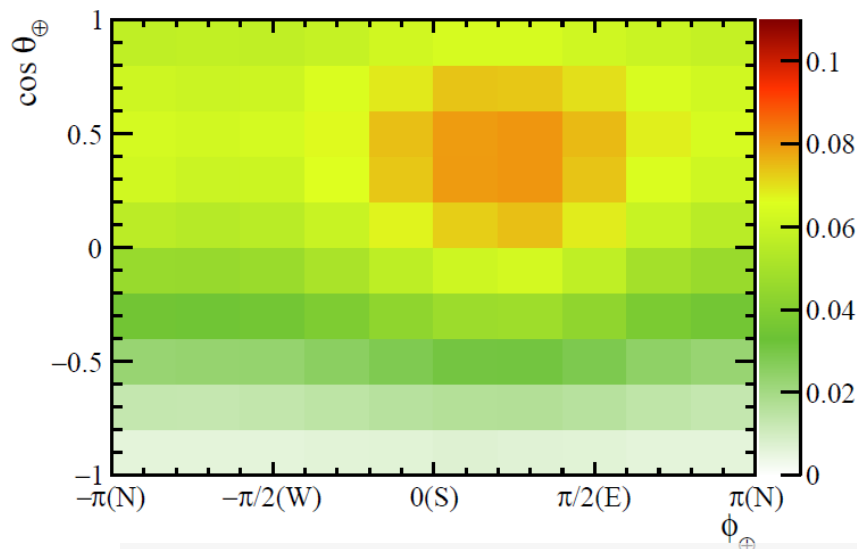


1. 区分切伦科夫光
2. 同时实现能量和方向重建
3. 粒子鉴别



我们的早期工作已被同行实验引用：
Borexino (PRL)
and SNO+ (PRD)

切伦科夫液体闪烁体与地球中微子

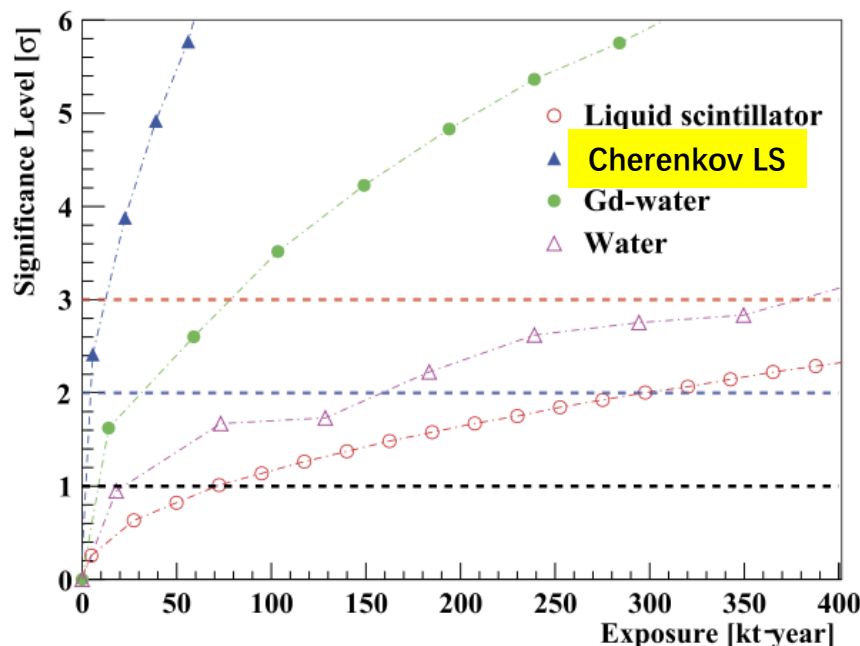
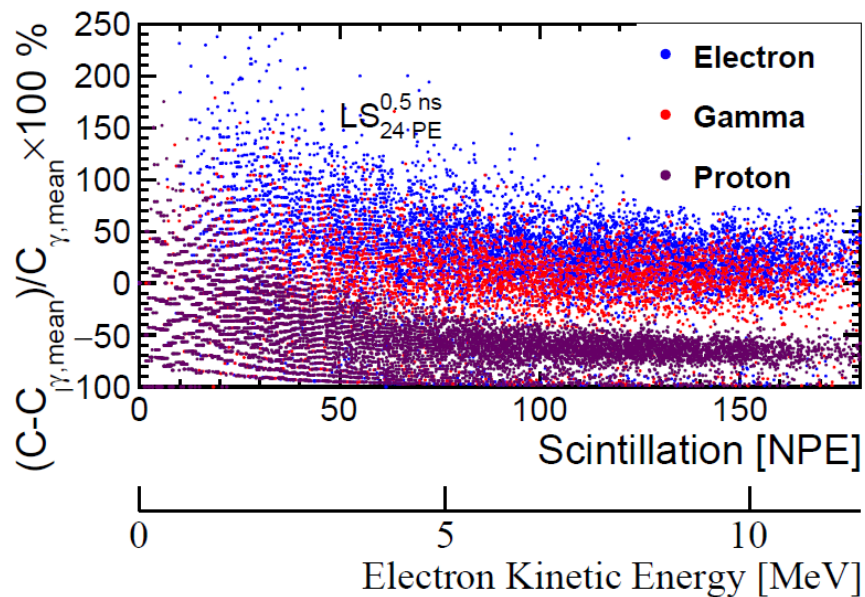


切伦科夫闪烁体：

- 可以测量川藏地区的U，Th中微子，验证地壳模型
- 同时利用方向性信息，可以鉴别太阳中微子本底
- 由此可以利用 (ν_e, e) 弹性散射探测K40地球中微子

未来可能是一项变革性成果

新型液闪对超新星遗迹中微子

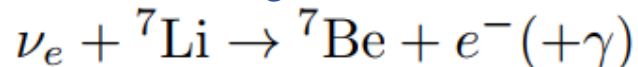


利用切伦科夫液体闪烁体

1. 粒子鉴别，出射电子鉴别，抑制核反冲等本底
2. 期待500吨探测器，10年内，可以有几个黄金事例

LiCl水溶液与太阳中微子探测

1. CC过程, ν_e : 测量中微子能量

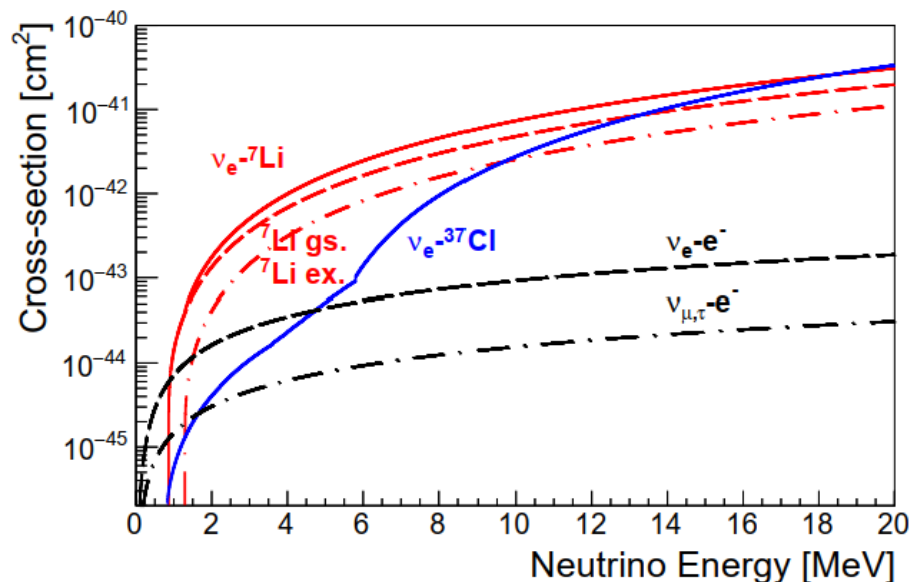


2. 高截面:

ν_e -Li7: 60 times of ν_e -e elastic for solar B8 neutrinos

3. Li7天然丰度: 92%

4. 高水溶性: 80 g LiCl in 100 g water

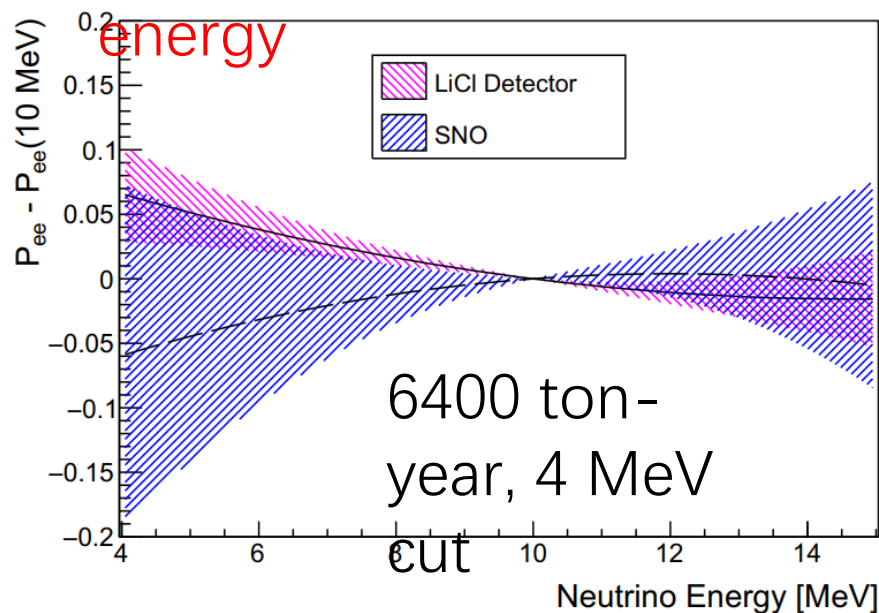


B8 Event rate/100 ton-year solution

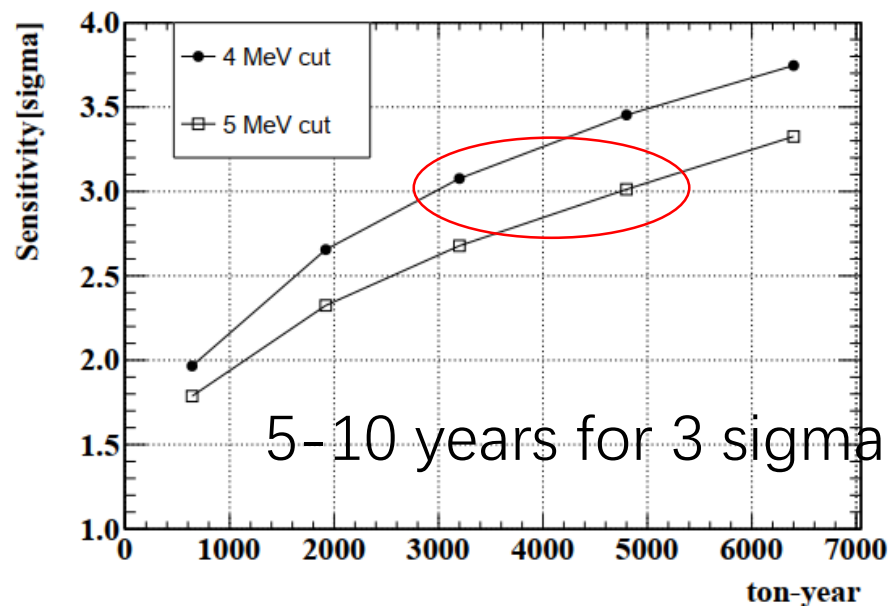
	⁷ Li	³⁷ Cl	All CC	e ⁻
Molarity (mol/L)	11	2.9	NA	610
Event rate (No Osci)	305	22.7	328	271
Event rate (Osci)	101	7.28	108	124
Event rate (Osci & >4 MeV)	94.5	7.24	102	48.0
Event rate (Osci & >5 MeV)	87.3	7.17	94.4	34.5

LiCl水溶液与太阳中微子探测

Solar neutrino survival probability-average vs

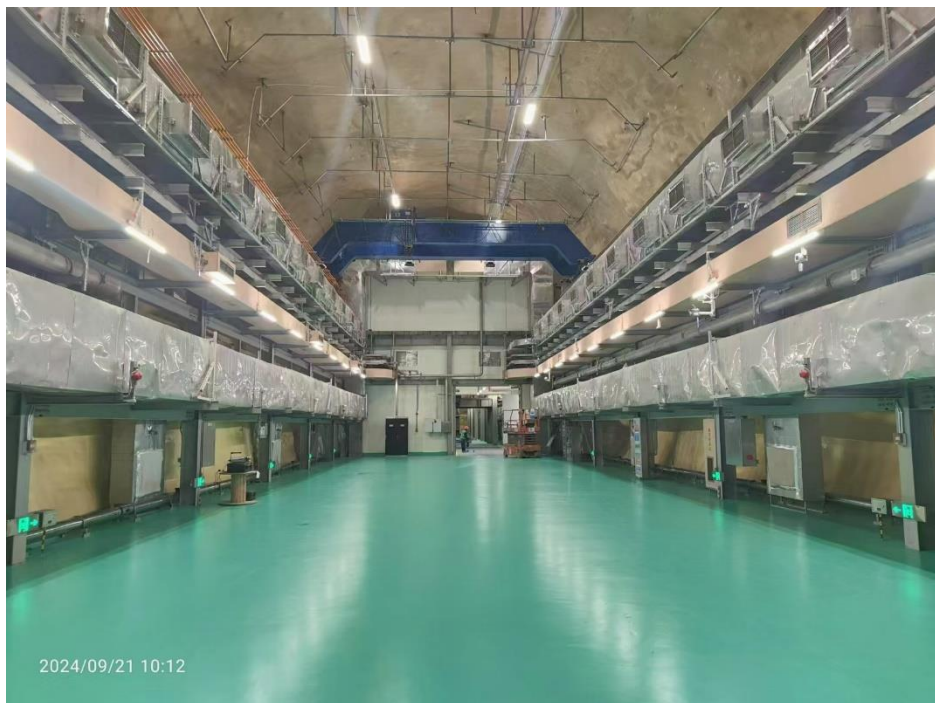


Upturn discovery sensitivity versus exposure



Li7上的 ν_e CC过程对测量中微子的能量相关的物理过程有出色的灵敏度，远超以往的超级神冈和SNO实验。

实验大厅，实验基坑



D2厅实验室情况

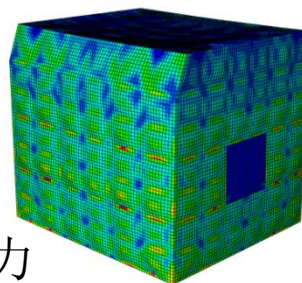
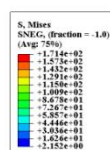
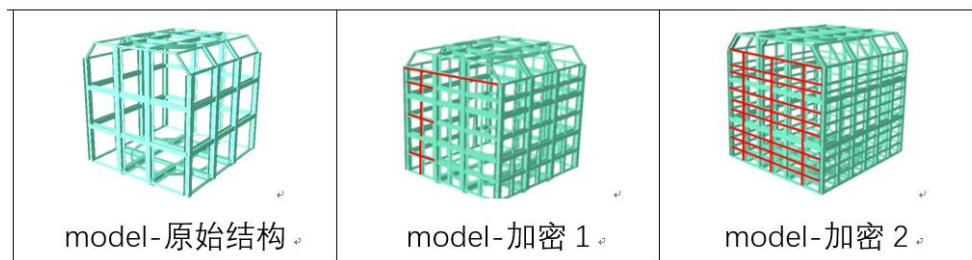


D2厅实验基坑完成

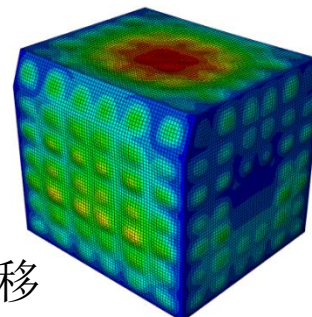
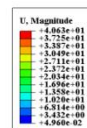
探测器结构设计

结构设计完毕

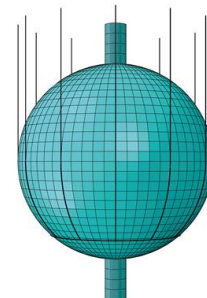
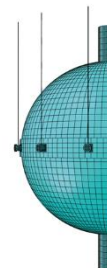
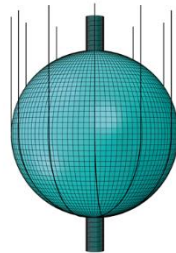
1. 多方案优化选择
2. 初步零件设计完毕
3. 初步安装流程设计完毕
4. 合作组结构评审完毕
5. 清华设计院的设计报告完成



应力



位移



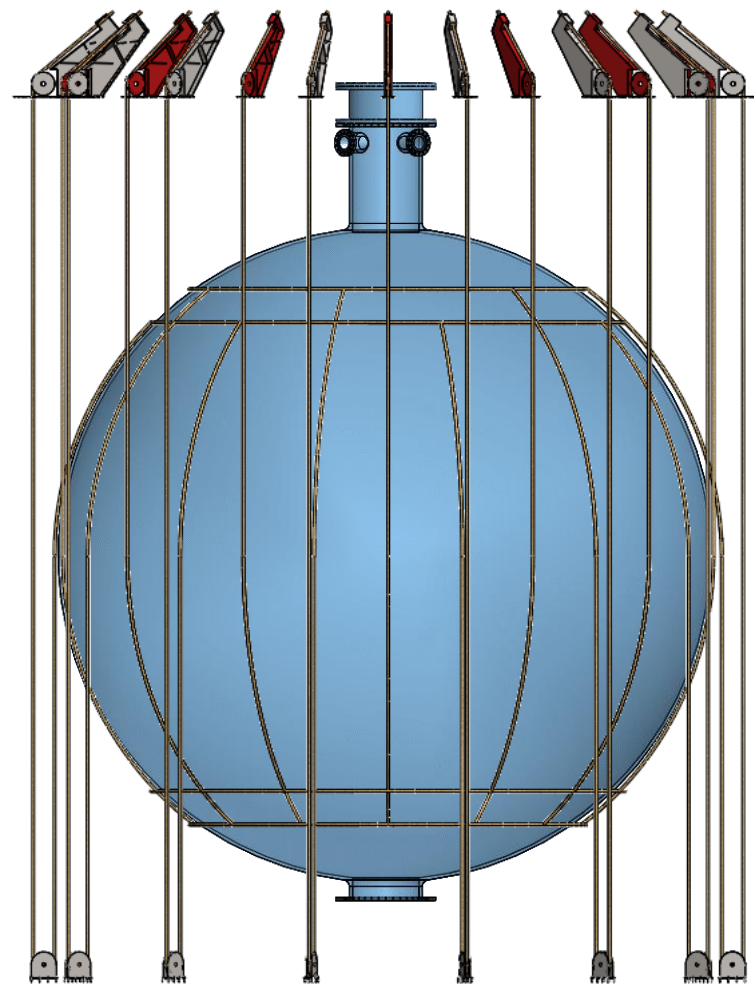
双相探测器容器

适合各种中微子探测
介质，一机多用

- 水相
- 油相
- 掺杂的液体闪烁体

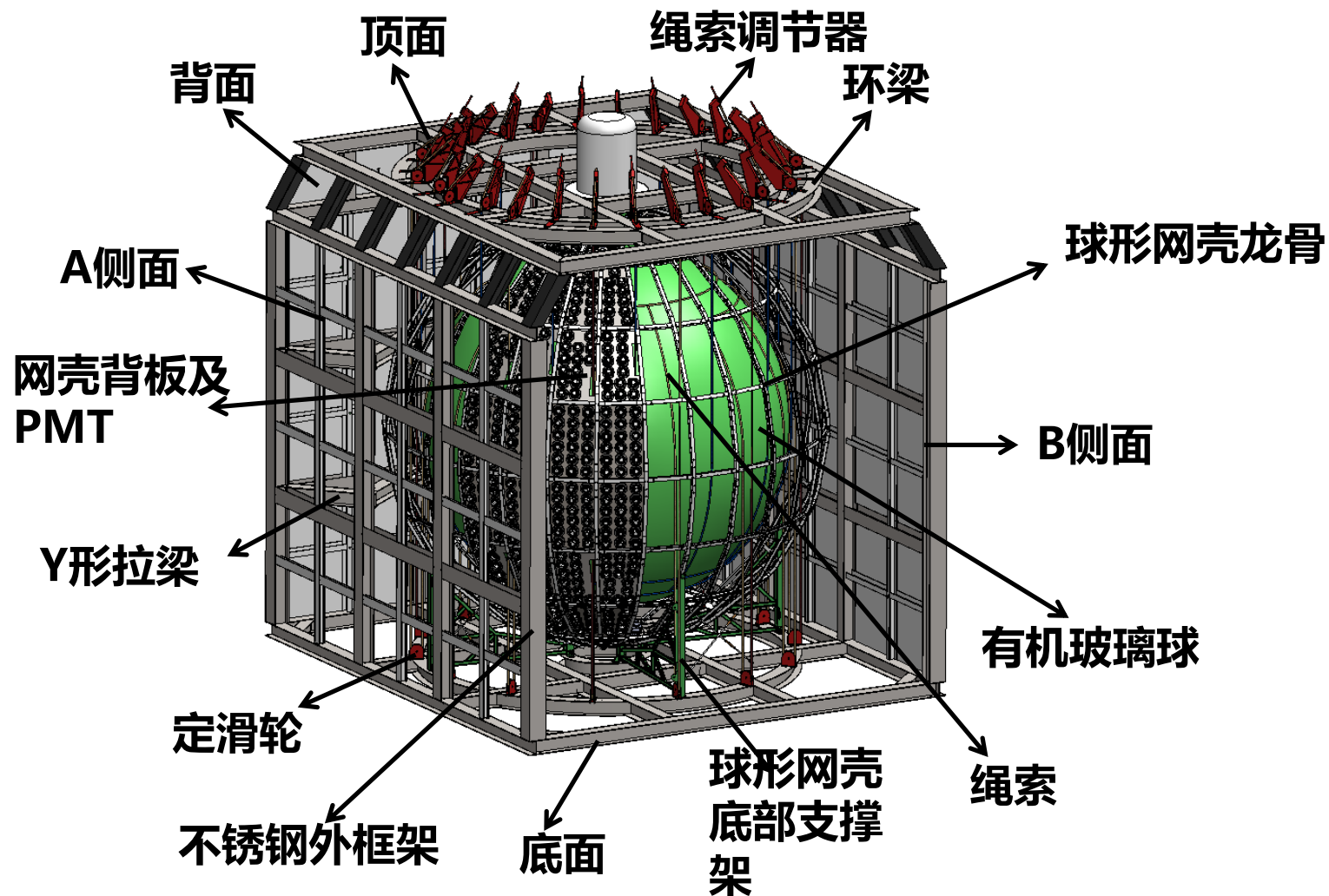
超高分子量聚乙烯 32mm

- 低本底、化学兼容
 - 抗拉 50 kN/8 mm
 - 低蠕变 0.5%/200天
 - 拉力监控，长度可调
- 申请多项专利技术

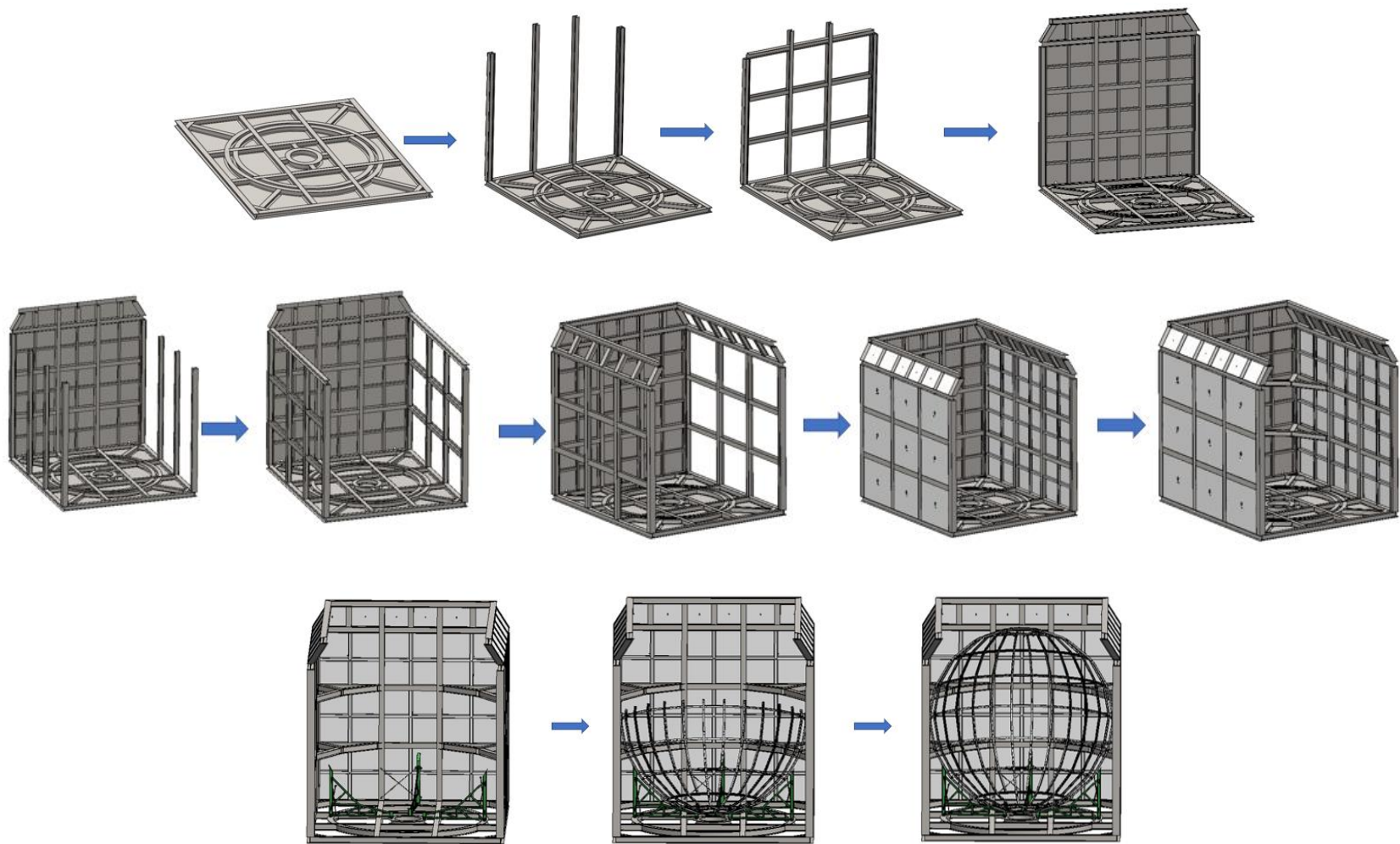


土木系，王元清老师团队

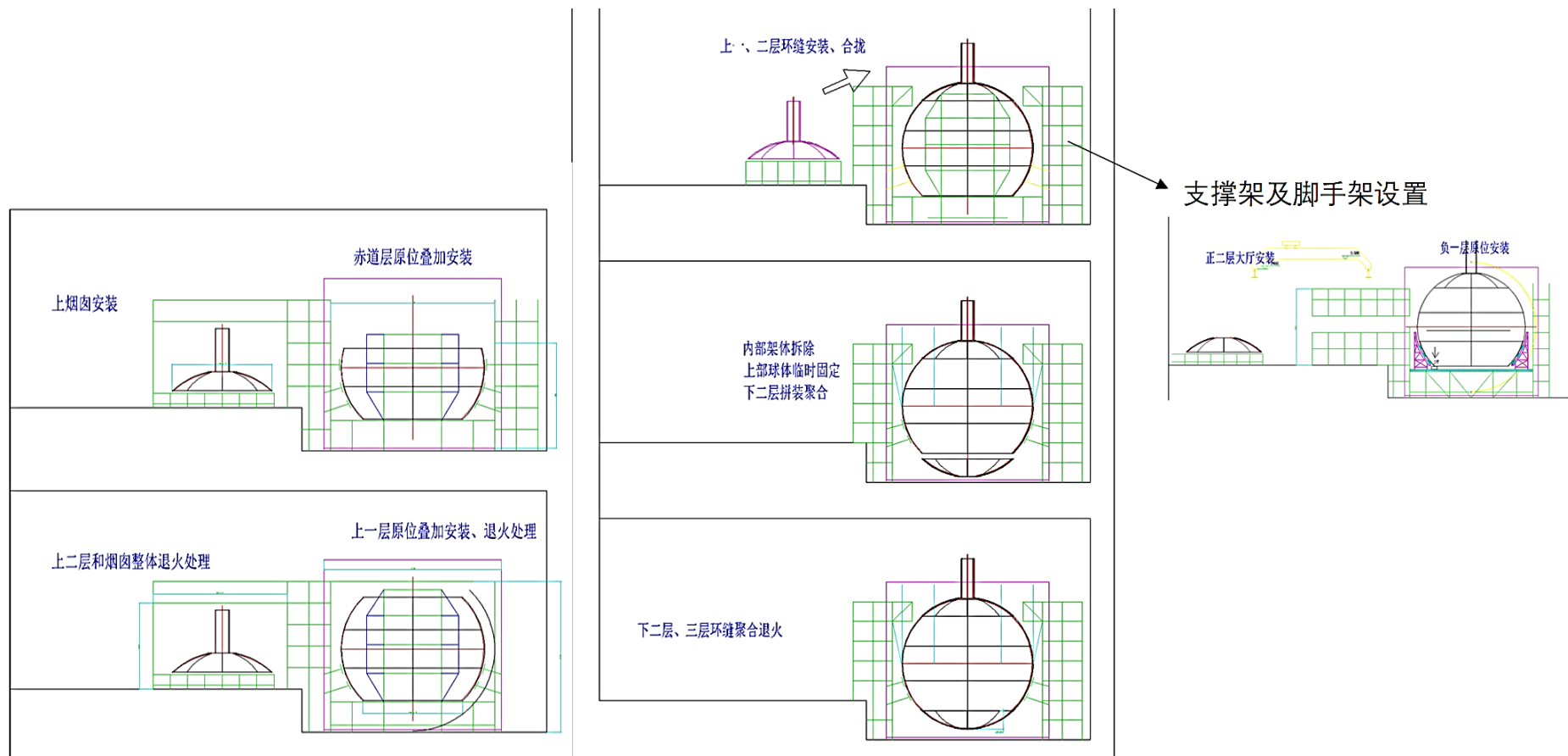
安装方案



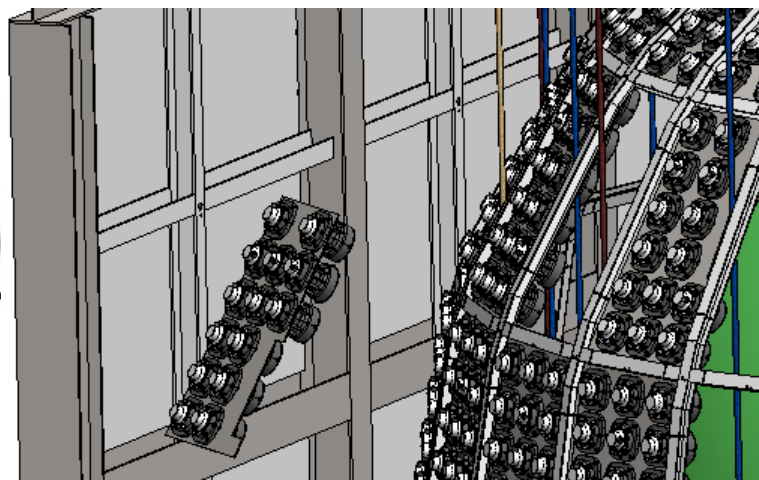
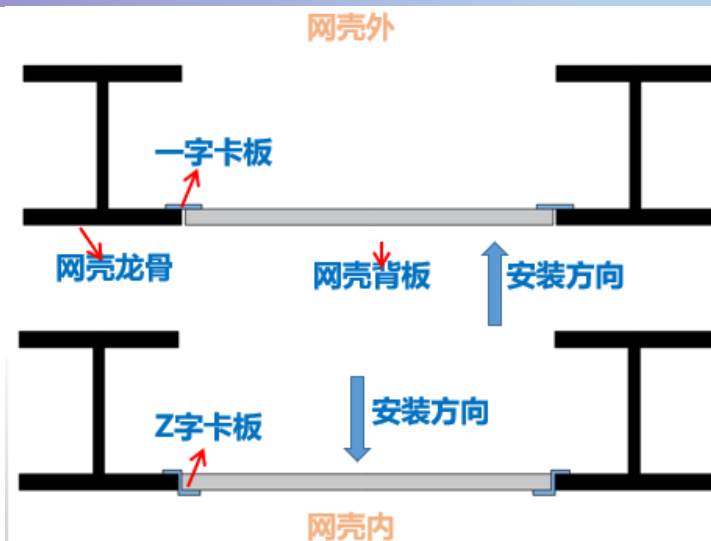
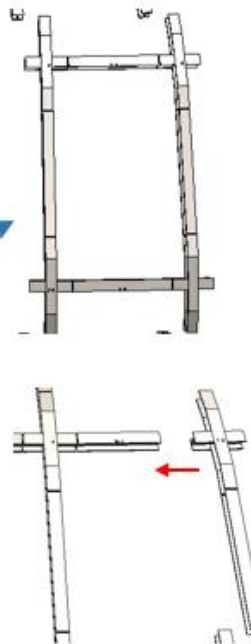
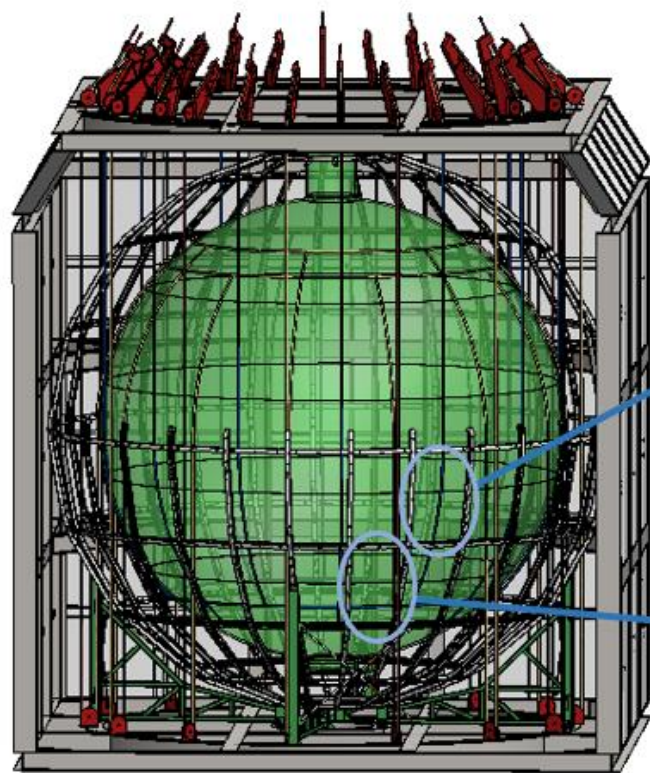
安装方案



安装方案



具体PMT的安装方案



绳索测试（超高分子量聚乙烯，1600D）

Kevlar纤维具有高强度、高模量、耐高温、耐酸碱性，但耐光性较差，易发生老化。日本帝人公司在Kevlar纤维基础上进行共聚改性得到了**Technora纤维**，具有优异的耐磨、耐疲劳和抗蠕变性能

Vectran纤维不仅具有与Kevlar纤维相当的力学性能，还具有较高的耐光、耐腐蚀和耐湿热性等，尤其抗蠕变性能优于其他三种纤维，但存在高应力易断裂的风险

HMPE纤维在密度、强度、模量、伸长率、冲击性和耐磨性等方面具有明显优势，但抗蠕变性差，熔点低、耐热耐高温性差



Kevlar纤维



Technora纤维



Vectran纤维

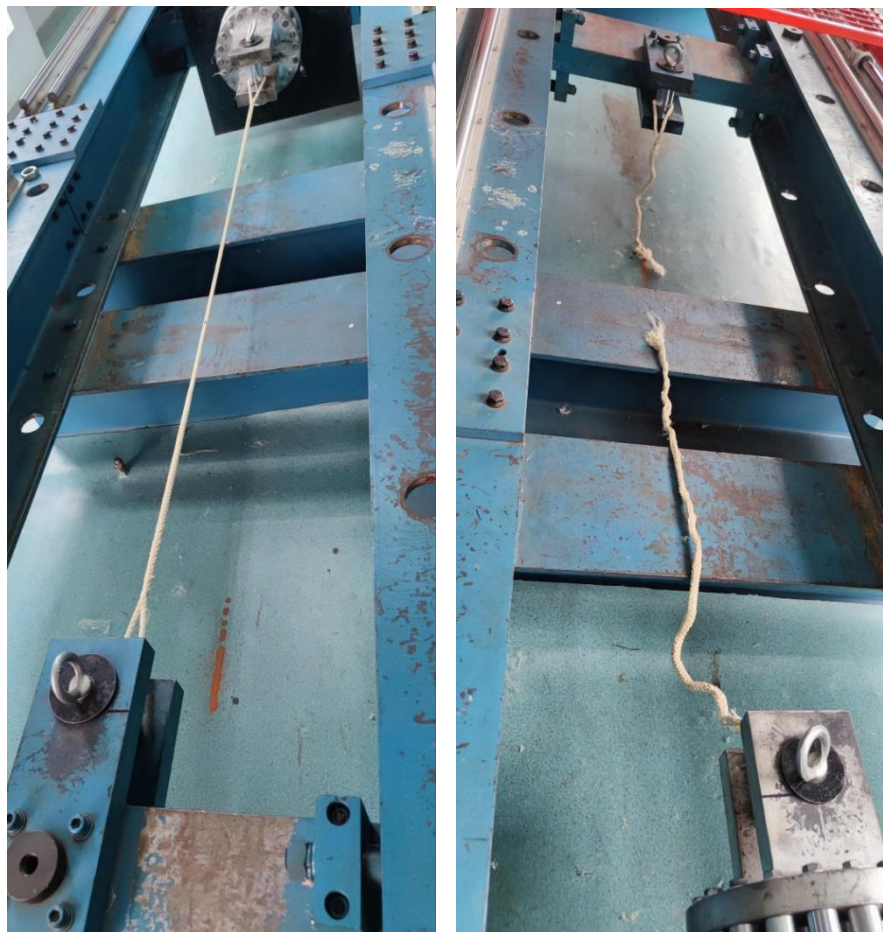


HMPE纤维

品种	密度g/cm3	抗拉强度GPa	拉伸模量GPa	断后伸长率%
Kevlar纤维	1.44	2.9	60	3.6
Technora纤维	1.39	3.4	72	4.6
Vectran纤维	1.41	3.3	73	4
HMPE纤维	0.97	3.0	95	3-4.5

绳索测试

破断试验



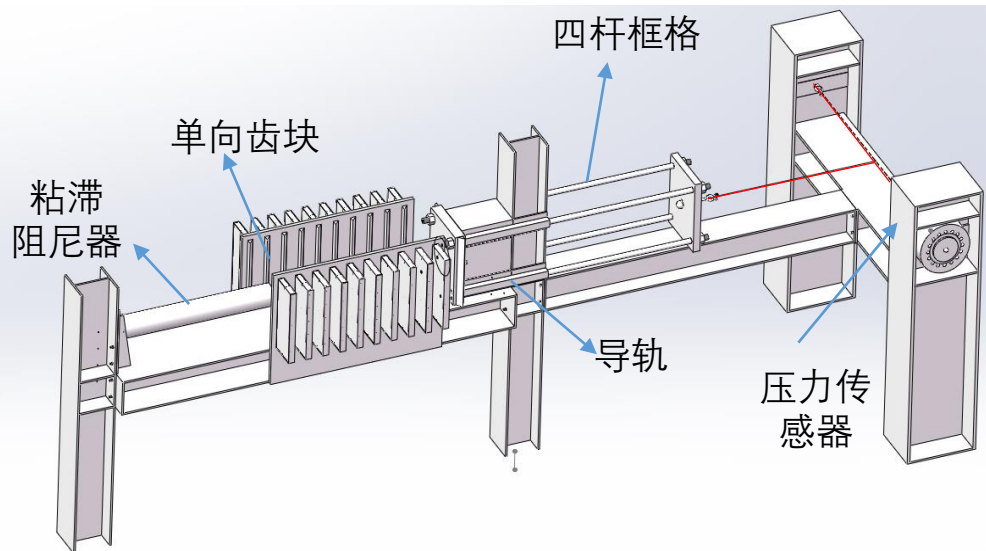
蠕变试验



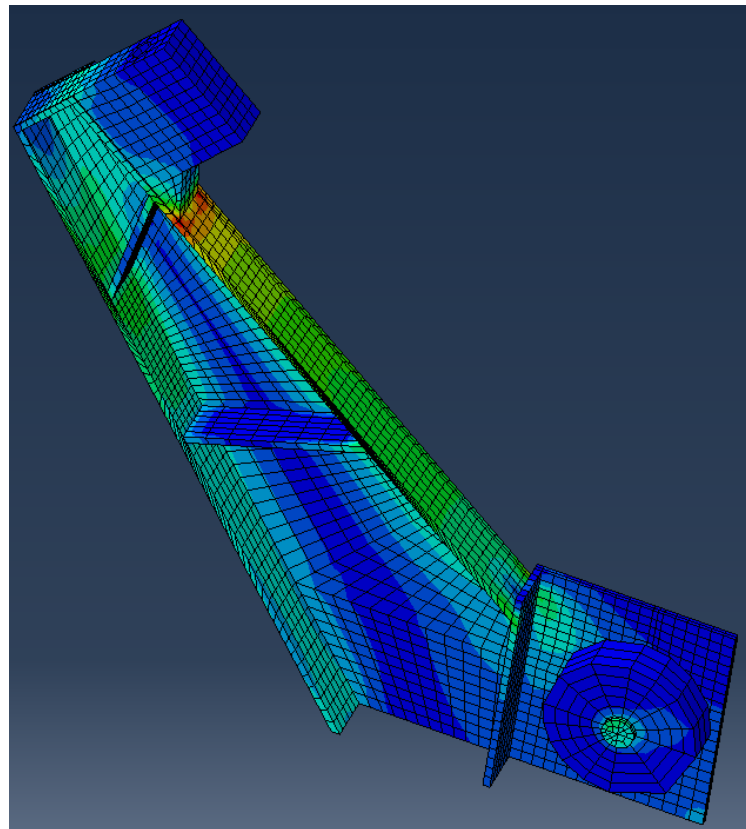
持续多年.....

绳索测试

纤维绳接头试验

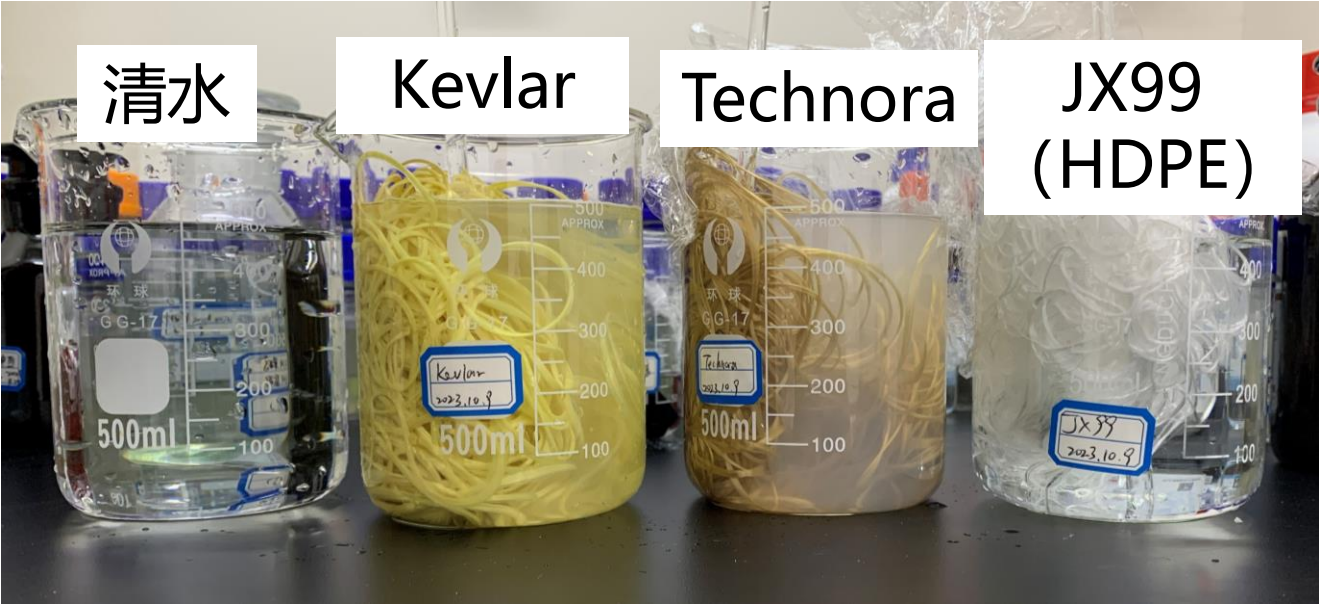


绳索张紧和调节装置



绳索测试

纤维绳
化学兼容性

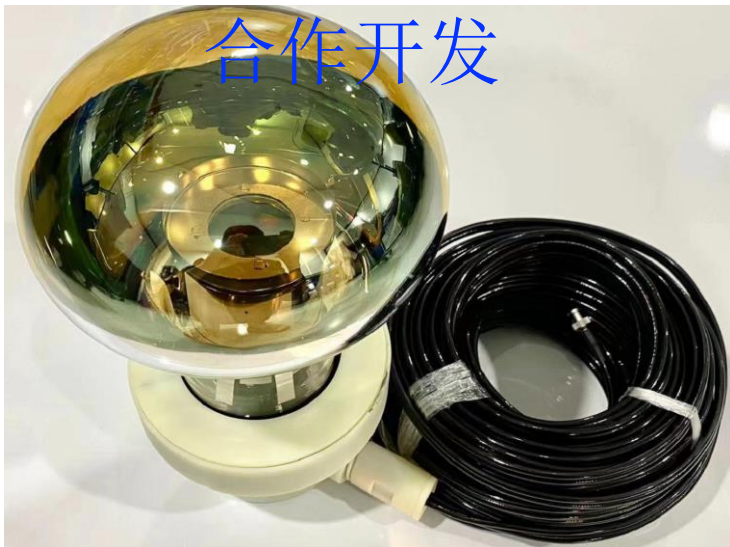


纤维绳HPGe低本底测量

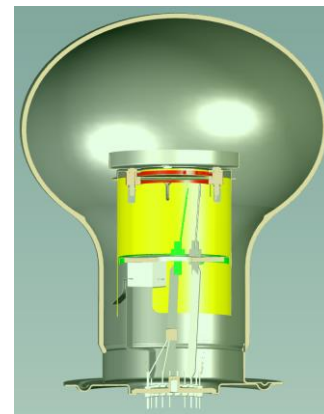
汇报时间	样品名称	210Pb (238U)	226Ra (238U)	214Pb (238U)	214Bi (238U)	228Ac-911keV (232Th)	228Ac-969keV (232Th)	208TI (232Th)	40K (nat K)	137Cs	60Co
2023. 6. 8	Vectran (白色绳索)	18.47 ppb	3.17 ppb	4.41 ppb	2.87 ppb	7.82 ppb	19.66 ppb	4.3 ppb	154.81 ppm	7.27 mBq/kg	11.10 mBq/kg
2023. 6. 16	Technora (黄色绳索)	46.19 ppb	55.55 ppb	35.06 ppb	28.31 ppb	71.34 ppb	66.65 ppb	20.05 ppb	17.83 ppm	8.61 mBq/kg	14.24 mBq/kg
2023. 10. 17	Vectran (白色绳索)	13.03 ppb	7.12 ppb	3.78 ppb	4.85 ppb	12.72 ppb	17.14 ppb	3.41 ppb	44.84 ppm	6.47 mBq/kg	8.74 mBq/kg
2023. 10. 22	Technora (黄色绳索)	37.82 ppb	46.43 ppb	11.70 ppb	8.19 ppb	48.82 ppb	37.19 ppb	24.56 ppb	10.78 ppm	16.42 mBq/kg	15.68 mBq/kg
2023. 10. 27	含硼聚乙烯	90.23 ppb	77.34 ppb	28.26 ppb	21.88 ppb	75.66 ppb	52.27 ppb	74.70 ppb	32.62 ppm	8.02 mBq/kg	10.95 mBq/kg
2023. 11. 05	亚克力	7.28 ppb	4.88 ppb	1.35 ppb	1.51 ppb	5.2 ppb	6.94 ppb	2.03 ppb	1.08 ppm	3.32 mBq/kg	2.66 mBq/kg
2023. 12. 10	JX99纤维	15.57 ppb	11.34 ppb	/	/	9.1 ppb	7.75 ppb	3.78 ppb	8.08 ppm	5.04 mBq/kg	9.60 mBq/kg
2023. 12. 10	TM32纤维	39.84 ppb	19.67 ppb	/	/	11.1 ppb	8.89 ppb	3.18 ppb	14.80 ppm	6.97 mBq/kg	9.48 mBq/kg
2024. 5. 30	C90聚乙烯	14.19 ppb	23.71 ppb	/	/	4.63 ppb	/	3.66 ppb	7.64 ppm	4.51 mBq/kg	7.99 mBq/kg

最高性价比PMT

与北方夜视、高能所
合作开发



材料控制



结构设计

新型8寸MCP PMTs

1. 低本底 U、Th: <1 Bq/kg
K-40: <2.4 Bq/kg
2. 高量子效率: 30%
3. 快速时间响应: $TTS < 1.8$ ns

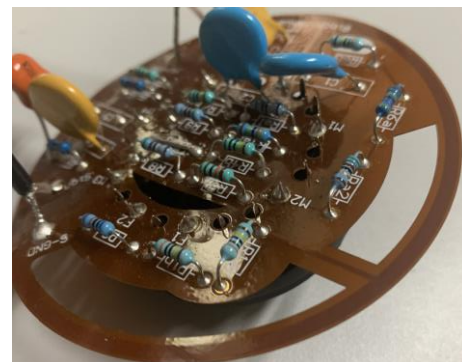
国防科技工业电离辐射一级计量站
核工业辐射计量测试中心
检测报告

证书编号: JC-A21-220916A204 第 3 页 共 3 页

检测结果

名称	编号	核素	比活度 Bq/kg	相对扩展不 确定度(k=2)	参考日期
玻璃柱样品	H150-220916	^{232}Ra	$<0.33^*$	/	2022-09-16
		^{232}Th	$<0.18^*$	/	
		^{40}K	0.49	43%	

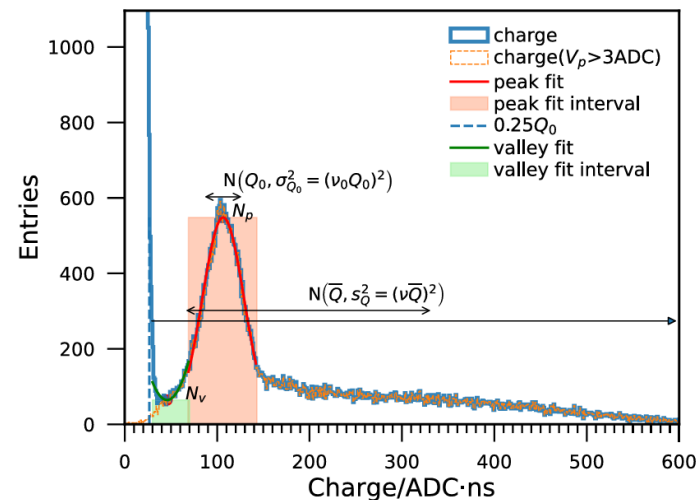
*注: 表中的比活度值为测量装置置信度为 95% 时的探测下限。
以下空白



分压器设计
线缆挑选

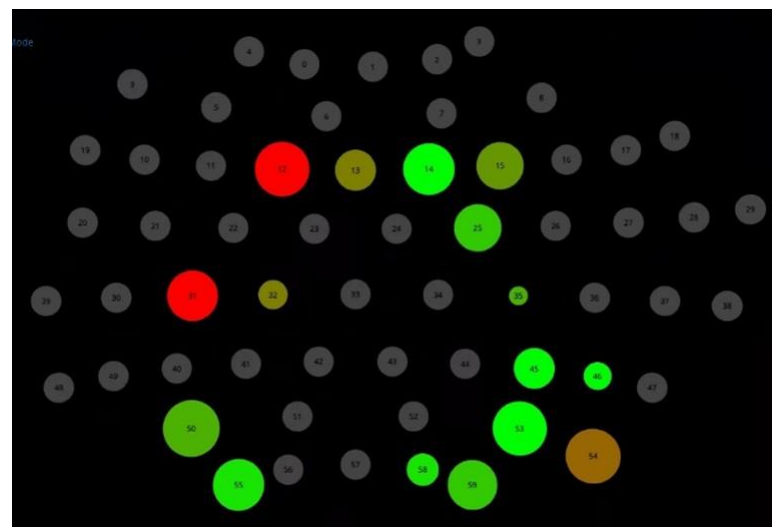
PMT性能测试（测试合格）

Parameters	Value	Criteria	Notes
$\bar{Q}/Q_0$	1.8 ± 0.1		Entire-sample to main-peak gain ratio
$\nu_0 = \sigma_{Q_0}/Q_0$	0.25 ± 0.02		Peak resolution
$\nu = \sqrt{s_Q^2}/\bar{Q}$	0.69 ± 0.03		Sample resolution
N^{1e}/N^{hit}	0.59 ± 0.02		Main-peak fraction
P/V	5.9 ± 1.4	>5	Peak-to-valley ratio
t_r/ns	3.71 ± 0.15	<4	Rise time
t_f/ns	15.6 ± 1.8	<20	Fall time
$\sigma_{\text{SER}}/\text{ns}$	1.63 ± 0.06		Shape parameters of SER
$\tau_{\text{SER}}/\text{ns}$	7.2 ± 1.1		
TTS/ns	1.73 ± 0.08	<1.8	Transit time spread
DCR/kHz	5.8 ± 1.6	~5	Dark count rate
P_{pre}	$1\text{E}-6 \pm 6\text{E}-6$	<0.001	Pre-pulse probability
P_{after}	0.009 ± 0.005	<0.048	After-pulse probability
ϵ^0	1.71 ± 0.06	>1.6	Relative PDE



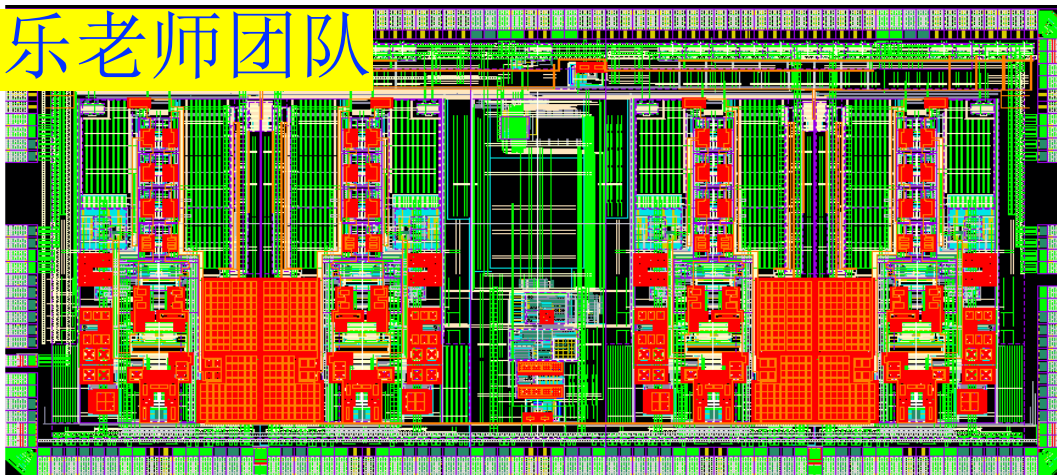
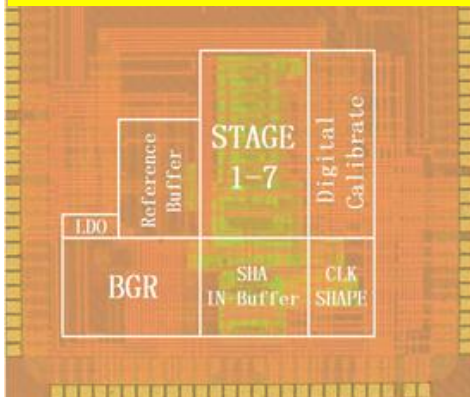
1. 量子效率
2. 单光电子分辨率
3. 跃迁时间分辨率
4. 暗噪声计数率
5. 单光电子响应
(长尾特性)

60只PMT，一吨原型机测试



研究创新性：先进芯片 国产

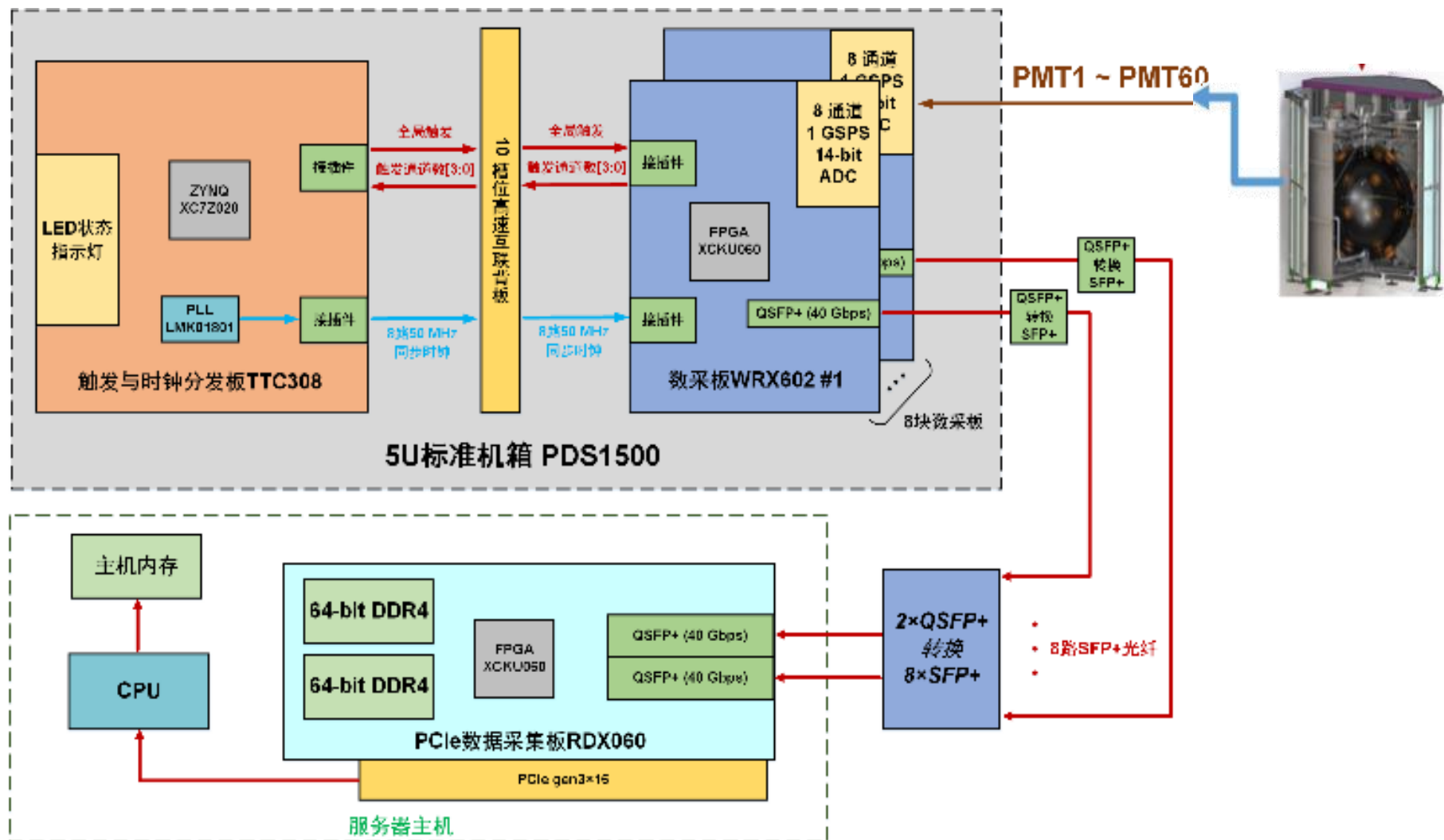
微电子所，李福乐老师团队



高速PMT波形读出芯片： 350 mW, 12 bit, 1 GSps
(低功耗、高精度、高采样率)

指标项	课题目标	实测值
分辨率	12bit	12bit
采样率	1Gsps	1Gsps
功耗	350mW/ch	<300mW/ch
ENOB		10bit
无杂散动态范围		71dBc

60路电子学在1吨原型机测试



60路测试

数据采集卡

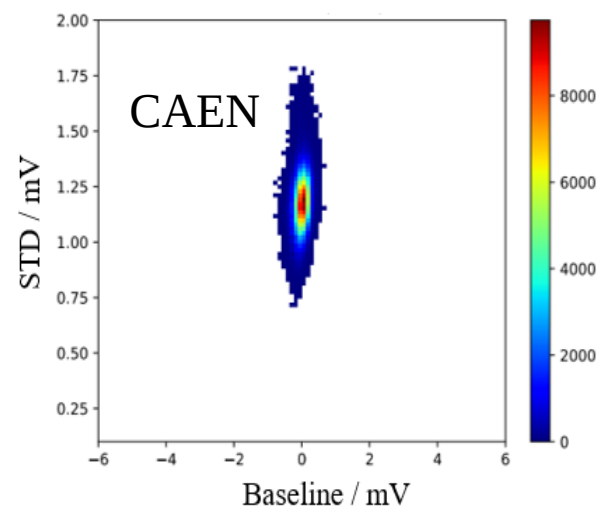
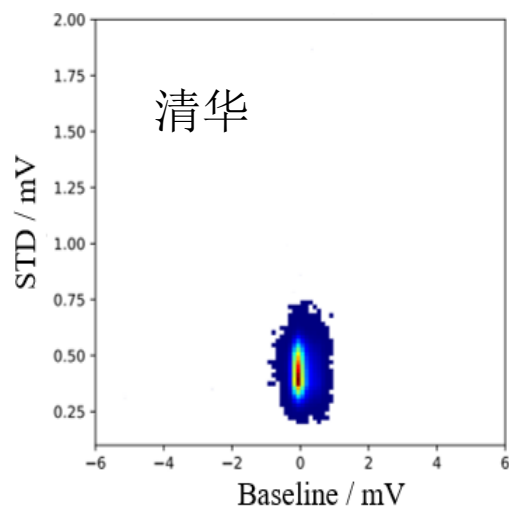


数据读出卡

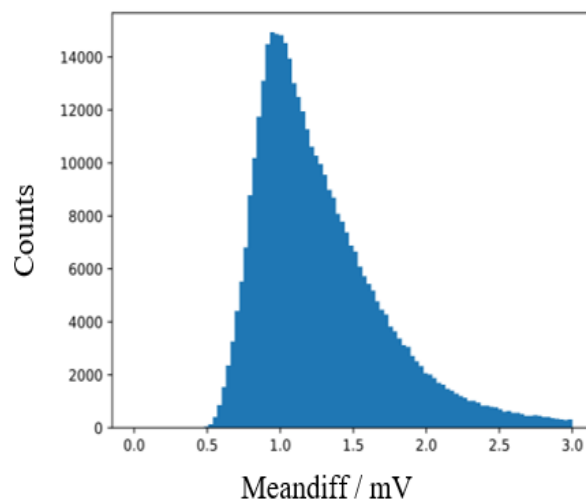
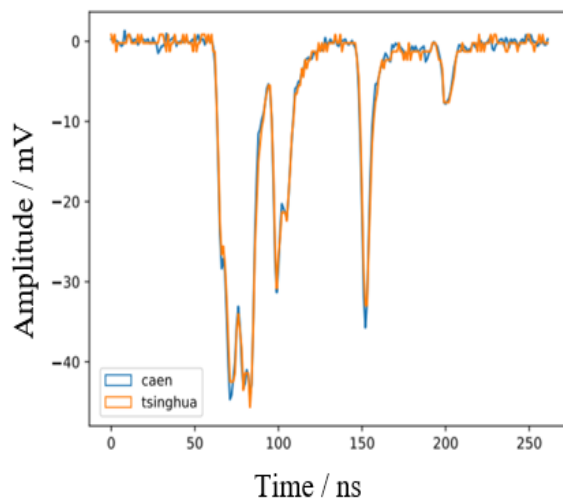


60路测试1吨原型机测试

基线抖动情况
更小

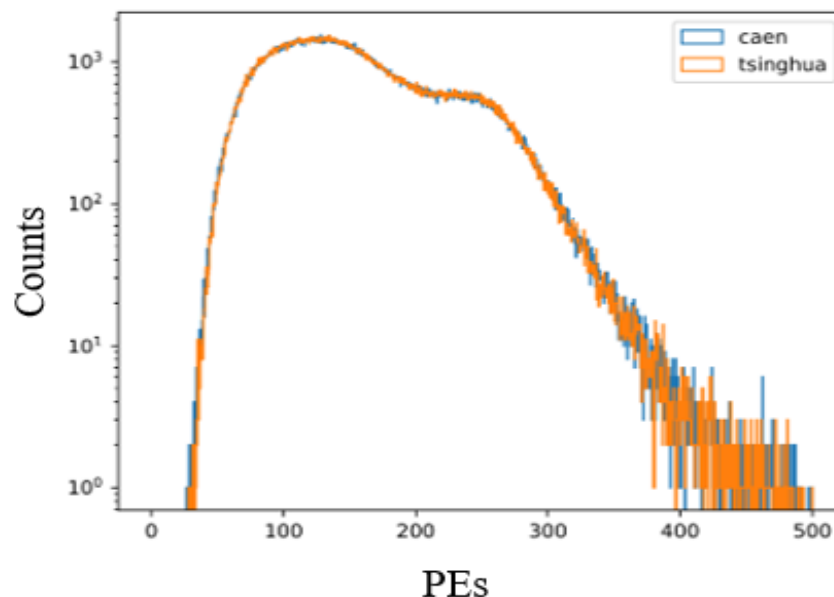


清华和
CAEN波形
对比, 一致



重建精度

光电子谱对比结果：
一致

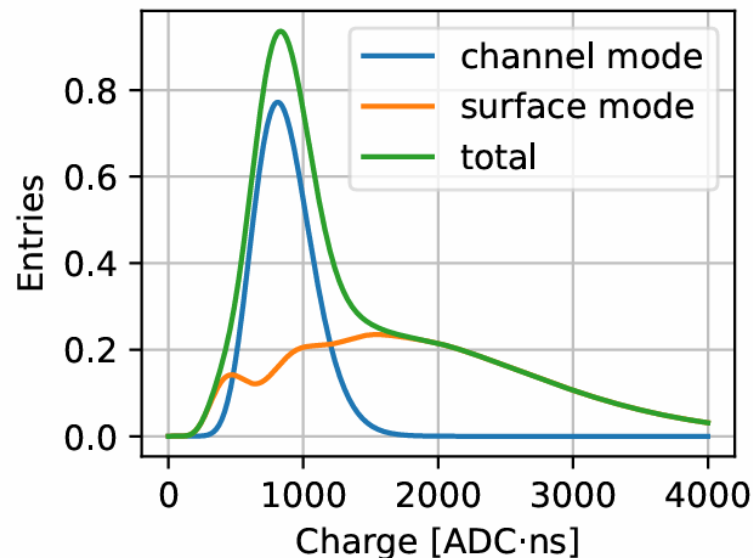
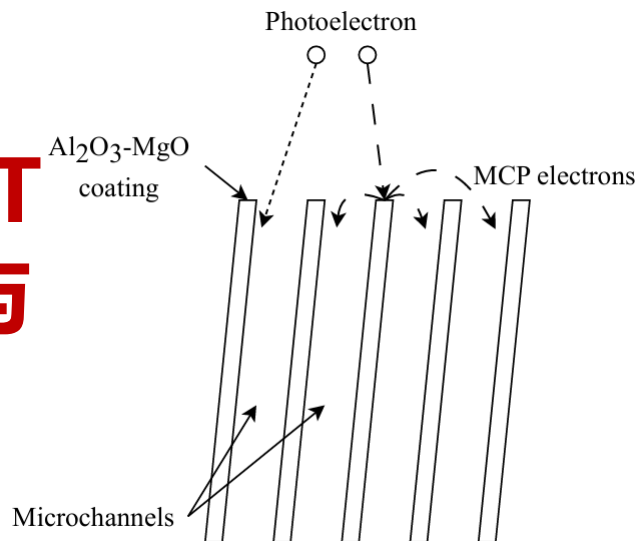


极限读写能力测试：
远超指标

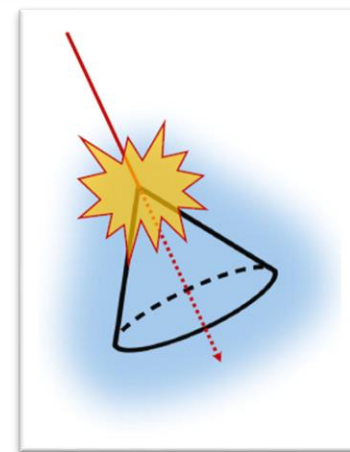
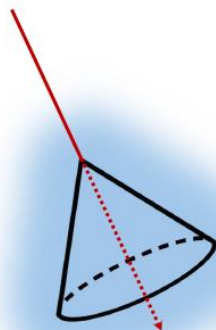
10分钟内共收集到9472个数据文件，每个文件大小为4 Gb。自研系统的极限触发率为193.5 kHz，相比于CAEN系统提升了三个数量级。

重建精度

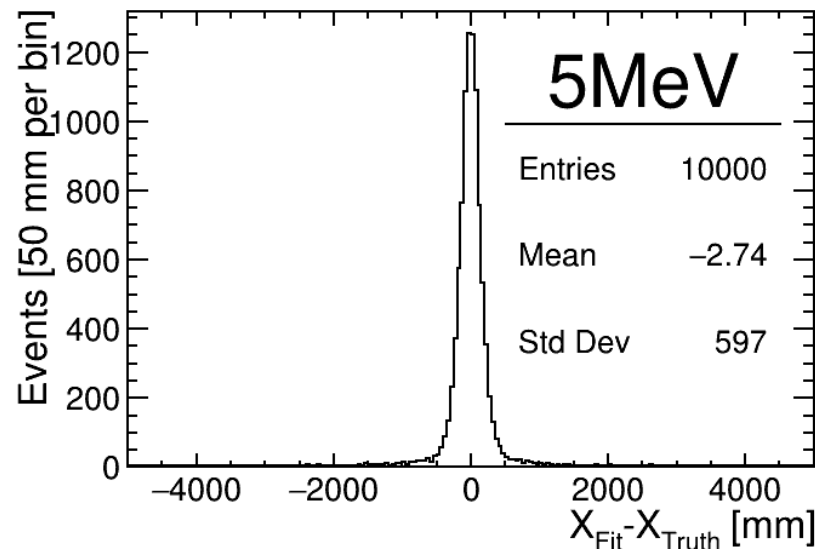
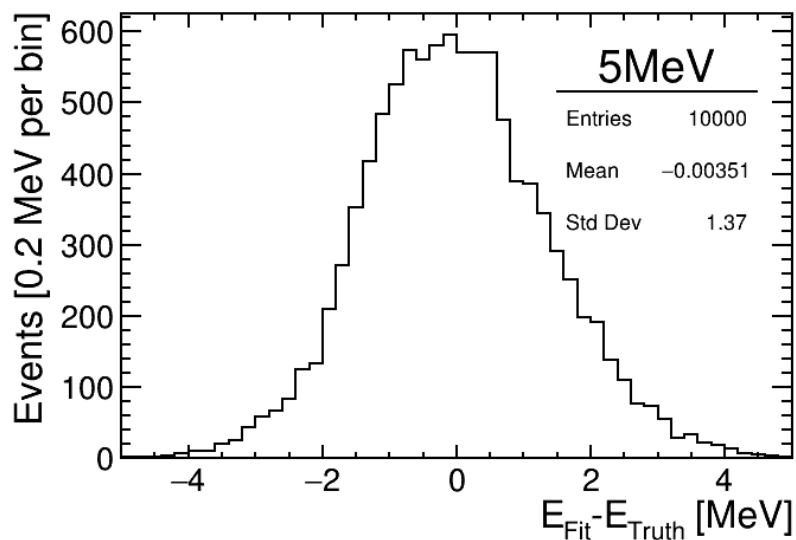
MCP-PMT 波形建模与 识别



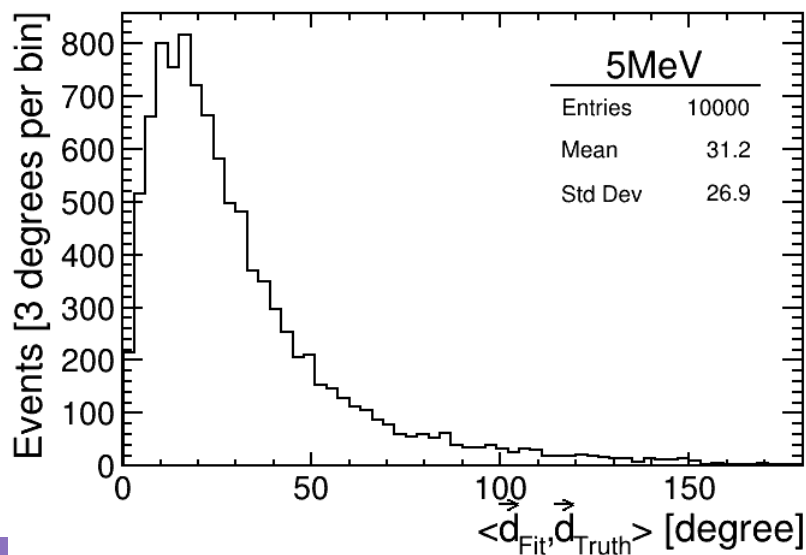
锦屏百吨探 测器建模与 重建算法



重建精度



锦屏百吨角
度分辨为
27度



总结

1. 锦屏的地理优势
2. 可以将太阳中微子的研究带入一个全新的境界
3. 可以推动地球中微子，地球科学的研究
4. 如果实验技术许可，可以对超新星遗迹中微子的研究有所突破
5. 实验研究在开展当中

相信有新的发现在等待着我们

感谢大家的关注