



清华大学

Tsinghua University

# 锦屏中微子物理预研和实验计划

---

王喆

清华大学

2020年10月20日

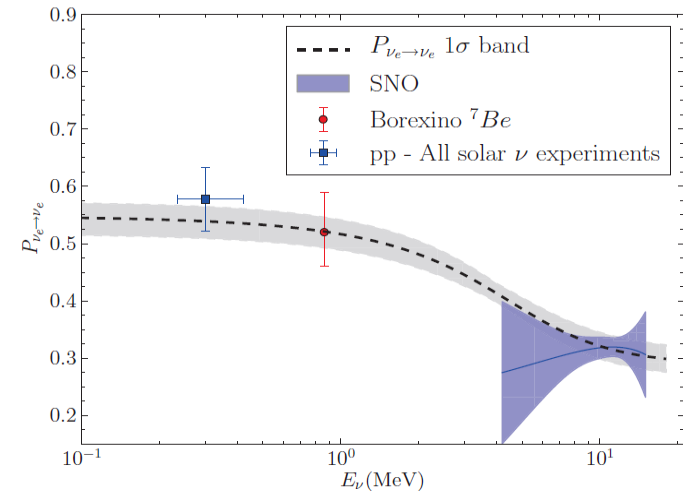
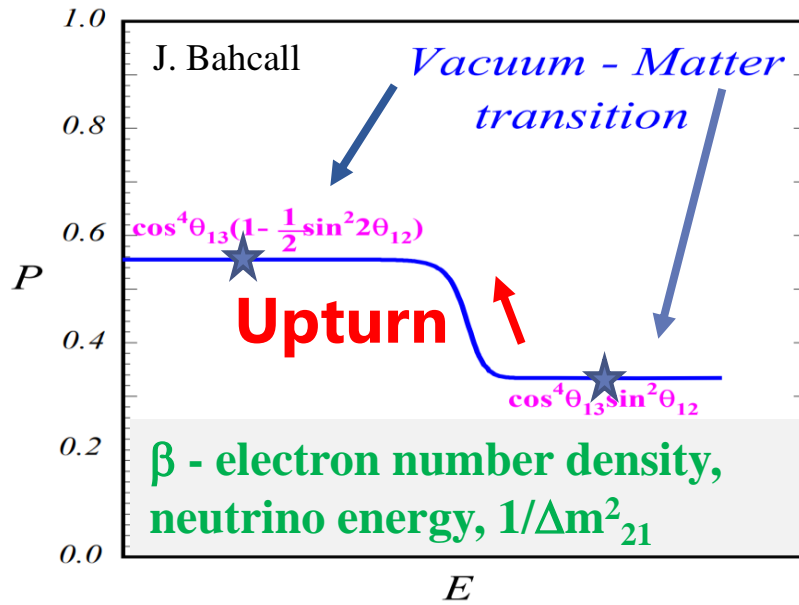
<http://jiping.hep.tsinghua.edu.cn/>

于高能物理所EPD seminar

1. 研究动机
2. 物理过程和特征
3. 探测器方案和测试
4. 物理敏感度分析
5. 国内外研究形势

# 研究动机

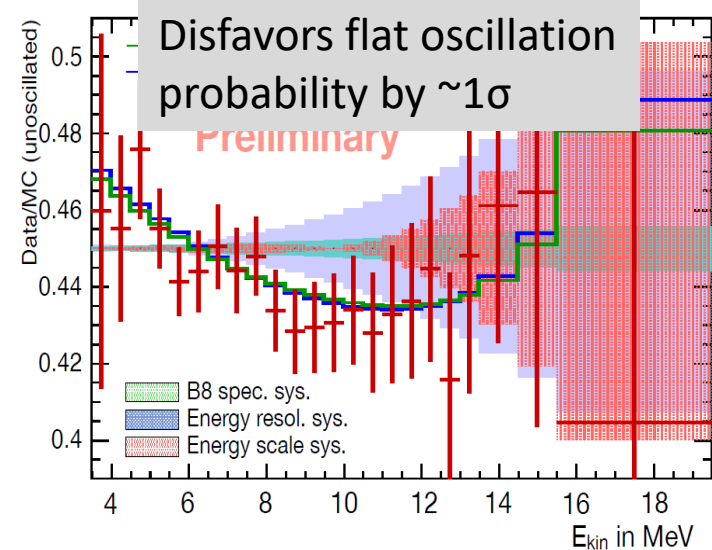
# 太阳中微子振荡



SNO, PRC 88, 025501 (2013)

始终没有Upturn的验证，  
MSW效应是残缺的

可以对比的是KamLAND  
和Daya Bay实验对振荡  
曲线的测量

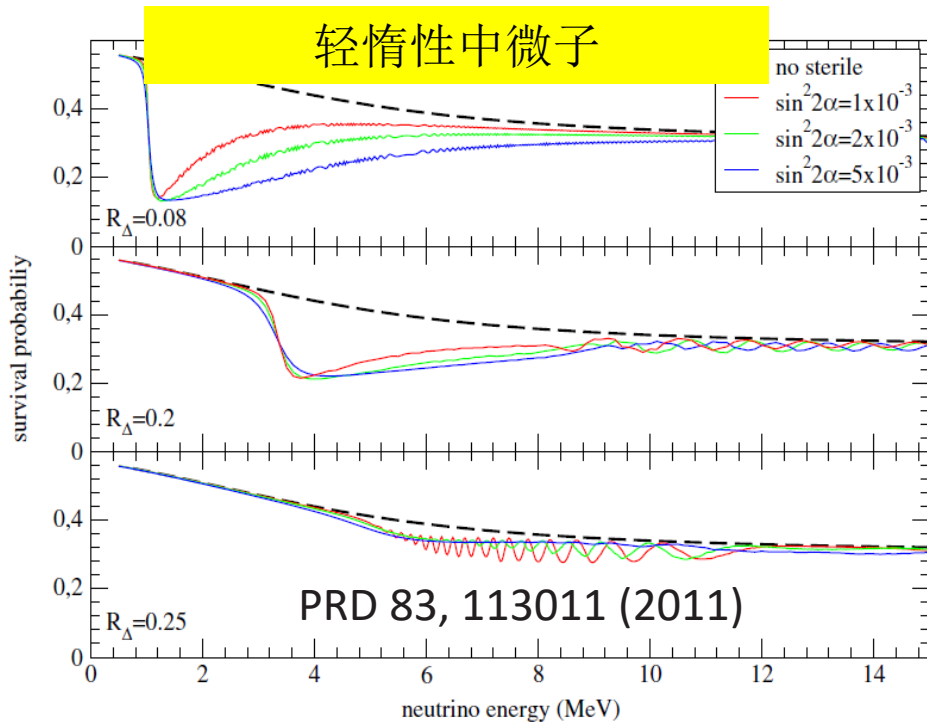


SK, Neutrino2020



# 太阳中微子振荡中的新物理

轻惰性中微子



轻惰性中微子存在，而不改变所有太阳中微子的实验结果

该参数区间完全不同于反应堆反常，Gallium反常，LSND等等， $\Delta m^2$ 在 $eV^2$ 附近

这是太阳中微子实验的一个独特之处

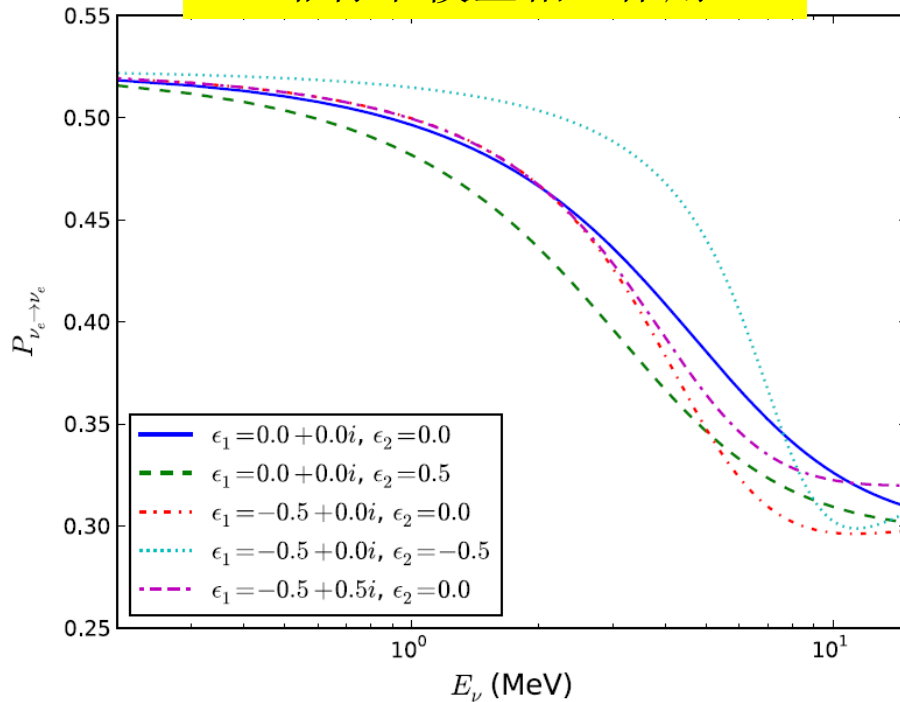
$$R_{\Delta} \equiv \frac{\Delta m_{01}^2}{\Delta m_{21}^2} \quad \text{对应}$$

$$\Delta m_{01}^2 \sim (0.2-2) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$



# 太阳中微子振荡中的新物理

## 非标准模型相互作用



非标准模型相互作用也可以在不影响现有实验结果的情况下存在

新物理表现在中微子的产生、飞行、或探测过程中

虽然很难研究，但确实是未来可能的突破之一

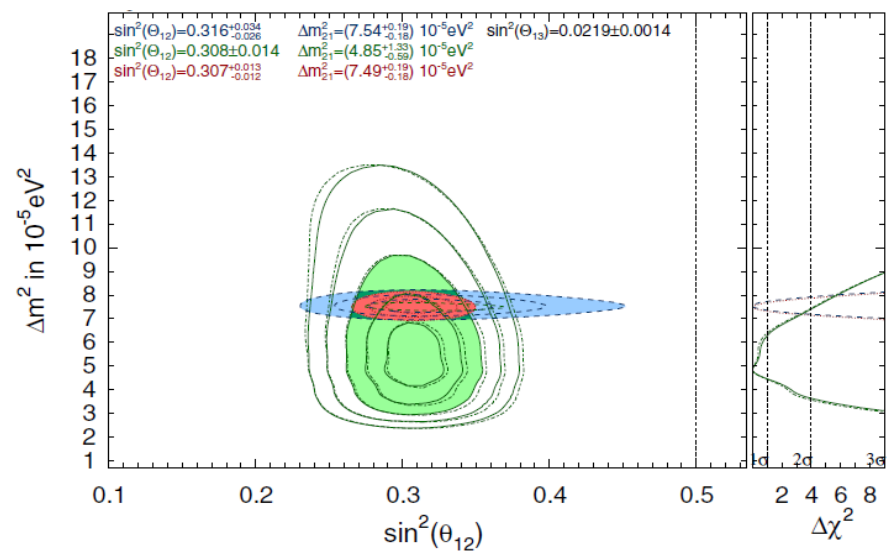
$$\mathcal{H} = \sqrt{2}G_F n_e \begin{pmatrix} 1 + \epsilon_{ee} & \epsilon_{e\mu}^* & \epsilon_{e\tau}^* \\ \epsilon_{e\mu} & \epsilon_{\mu\mu} & \epsilon_{\mu\tau}^* \\ \epsilon_{e\tau} & \epsilon_{\mu\tau} & \epsilon_{\tau\tau} \end{pmatrix}$$

PRD 88, 053010 (2013)

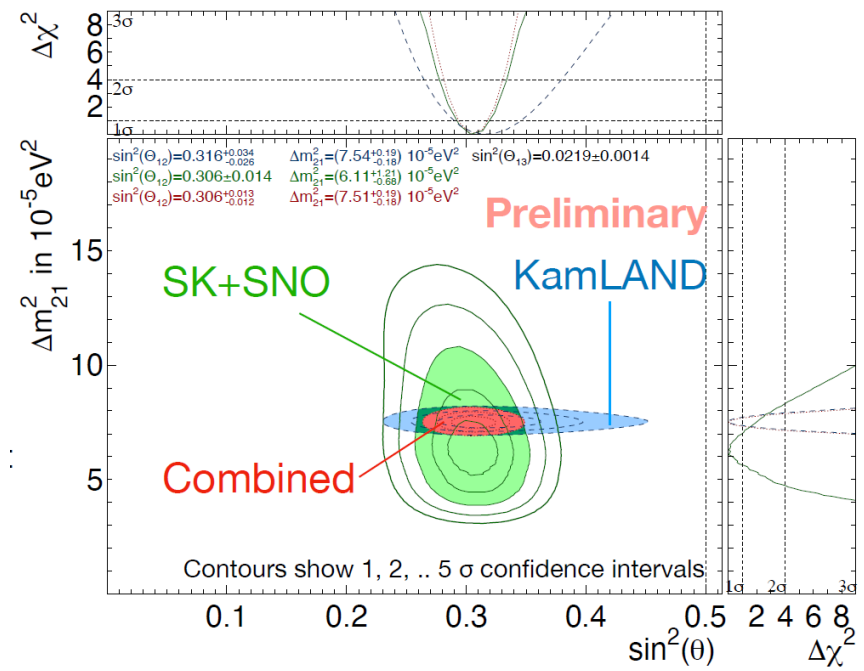


# 太阳和反应堆正反中微子参数的一致性检验

## 太阳和反应堆混合参数对比



$4.8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$  (2019)

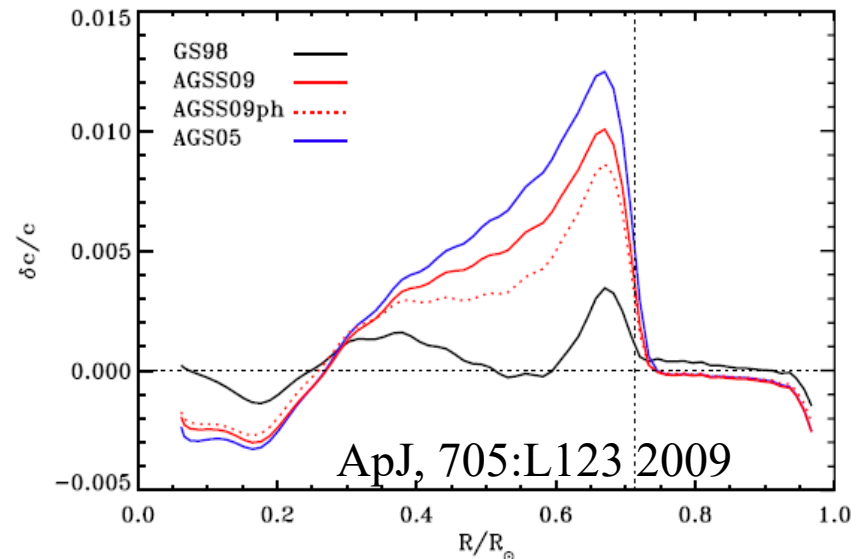
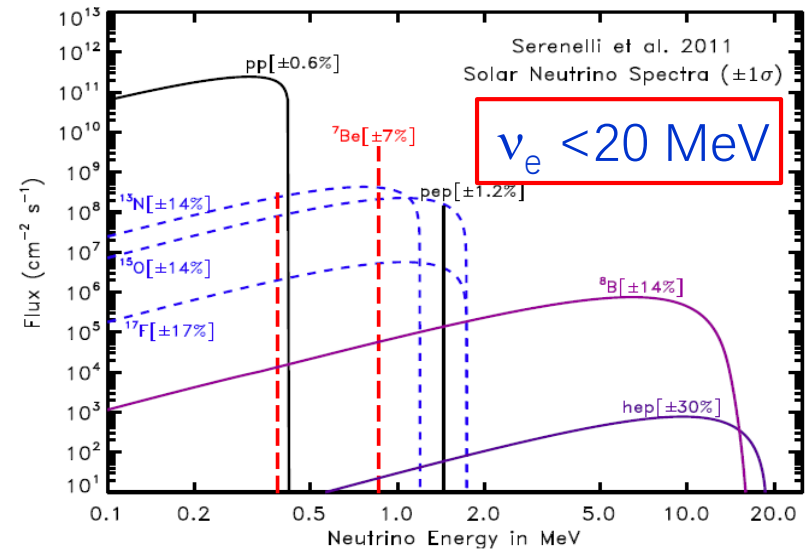


$6.1 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$  (2020)

- 太阳 $\nu_e$ 混合参数的测量与地球上反应堆 $\bar{\nu}_e$ 的测量结果不完全一致，SK是目前唯一一个高精度实验了
- NC过程除了SNO的积分结果就没有了，限制了太阳中微子混合参数测量的精度

# 太阳物理

- 对太阳内部的观测只有“两种”：中微子和日震学研究
- 精确的中微子观测“屈指可数”
- 太阳，还有很多未知问题，比如太阳金属丰度问题，聚变截面，能量运输
- 太阳是天体物理研究的刻度源，是高能物理，天体物理的未知领域。



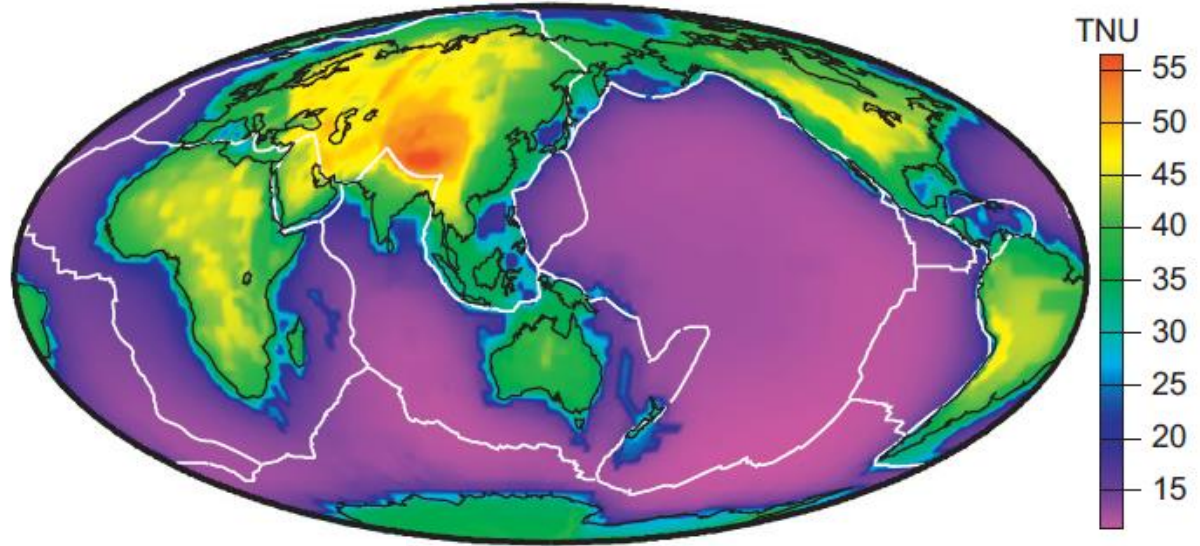


# 地球中微子探测

预期世界屋脊也是地球中微子通量的顶峰

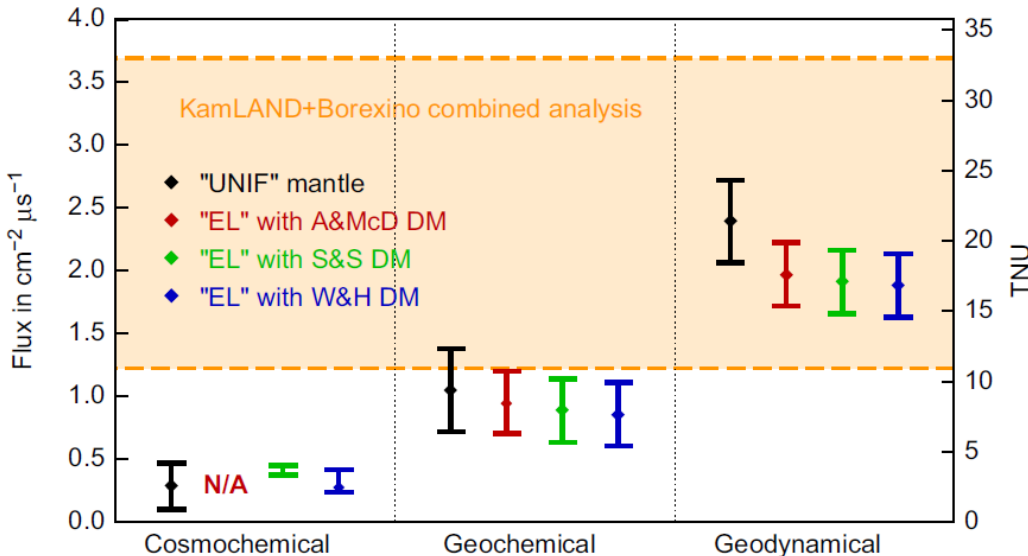
Earth and Planetary Science Letters 361 (2013) 356–366

Crust+mantle geoneutrino signal



Geochemical BSEA &McD DM

三种不同的地幔中微子通量预期



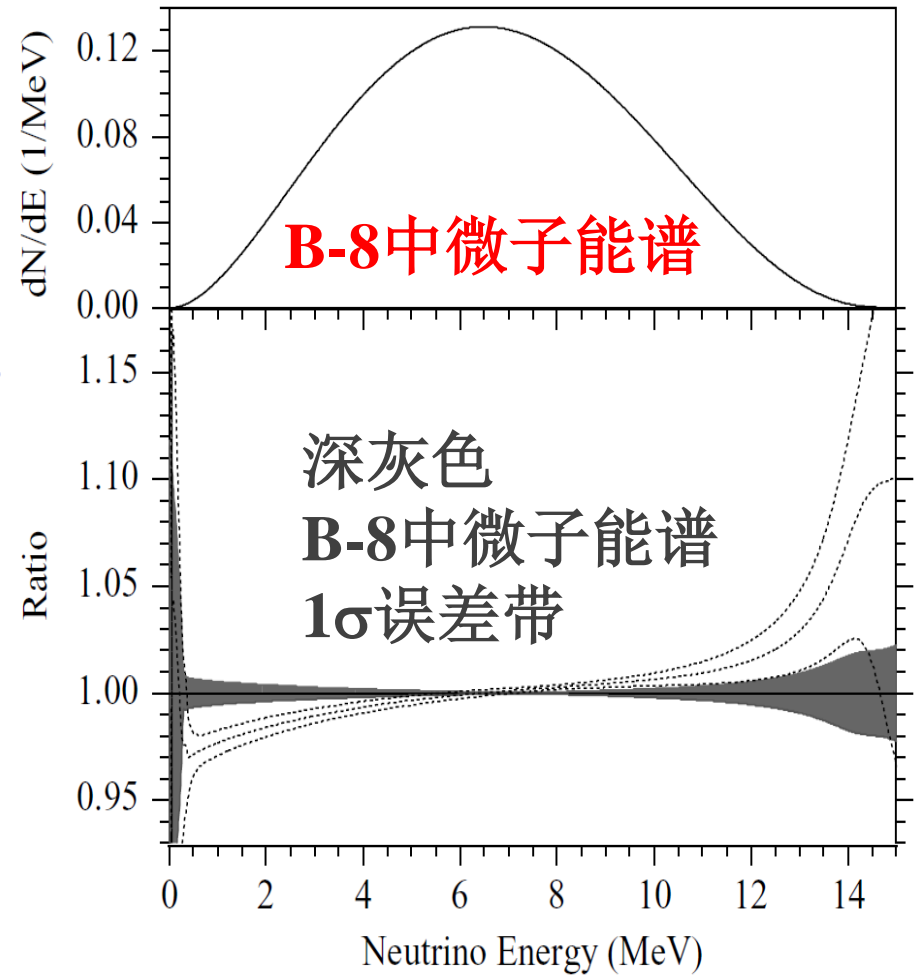
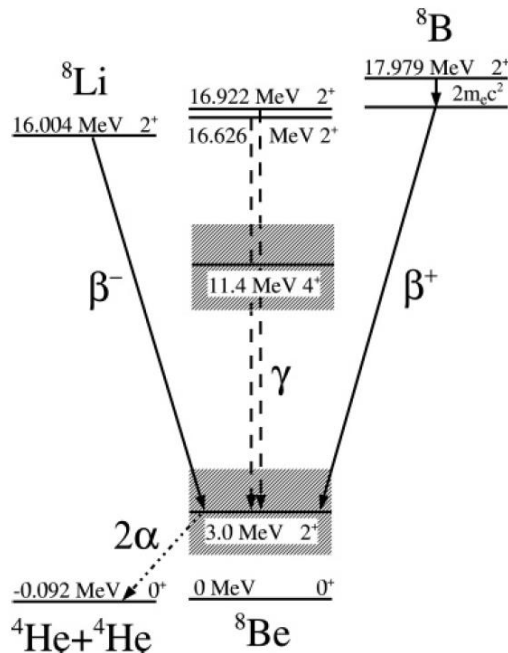
注意：  
地球中微子是“ $\bar{\nu}_e$ ”

# 物理过程和特征



# B-8中微子能谱

1. B8能谱有误差，源自Be8中间态的宽结构，有测量
2. 理论估计：  
在4 MeV处的误差为0.29%  
在12 MeV处的误差为0.68%
3. 暂时没有考虑B8能谱误差



W. T. Winter, et al., PRC 73, 025503 (2006)



# 太阳中微子振荡

$P_{ee}$ 依赖于

1.  $\theta_{12}$ ,  $\Delta m_{21}^2$ ,  $\theta_{13}$
2. 电子数密度  $n_e$

$P_{e\mu} = 1 - P_{ee}$

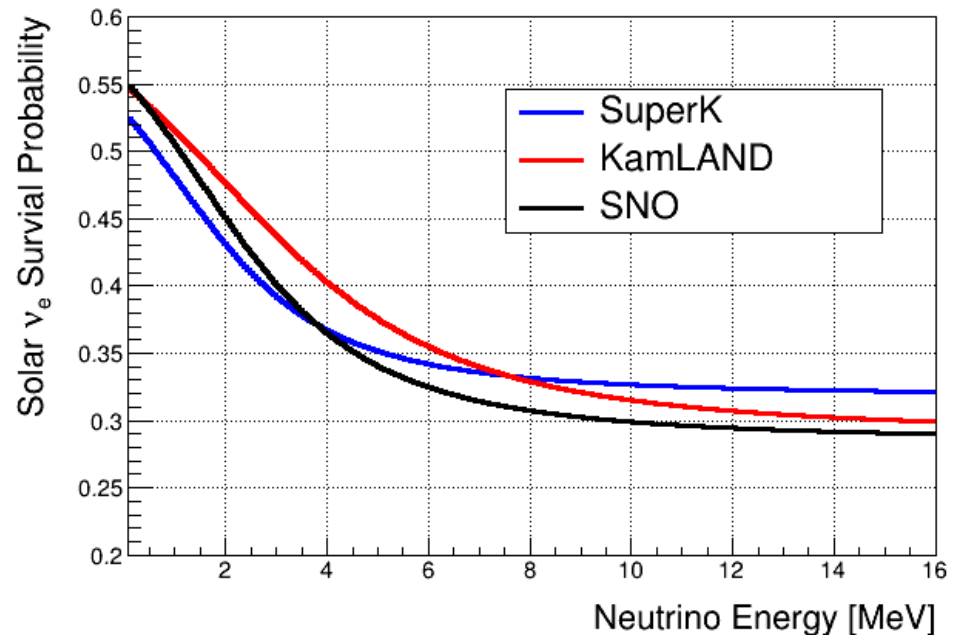
$$P_{ee}^{\odot} = \cos^4 \theta_{13} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\theta_{12}^M \cos 2\theta_{12} \right), \quad (1)$$

$$\cos 2\theta_{12}^M = \frac{\cos 2\theta_{12} - \beta}{\sqrt{(\cos 2\theta_{12} - \beta)^2 + \sin^2 2\theta_{12}}}, \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\sqrt{2}G_F \cos^2 \theta_{13} n_e E_{\nu}}{\Delta m_{12}^2}, \quad (3)$$

有不同的测量结果。

- KamLAND, Upturn最显著
- SNO次之
- SK最平缓（实验上也最不敏感）
- 合并结果接近KamLAND





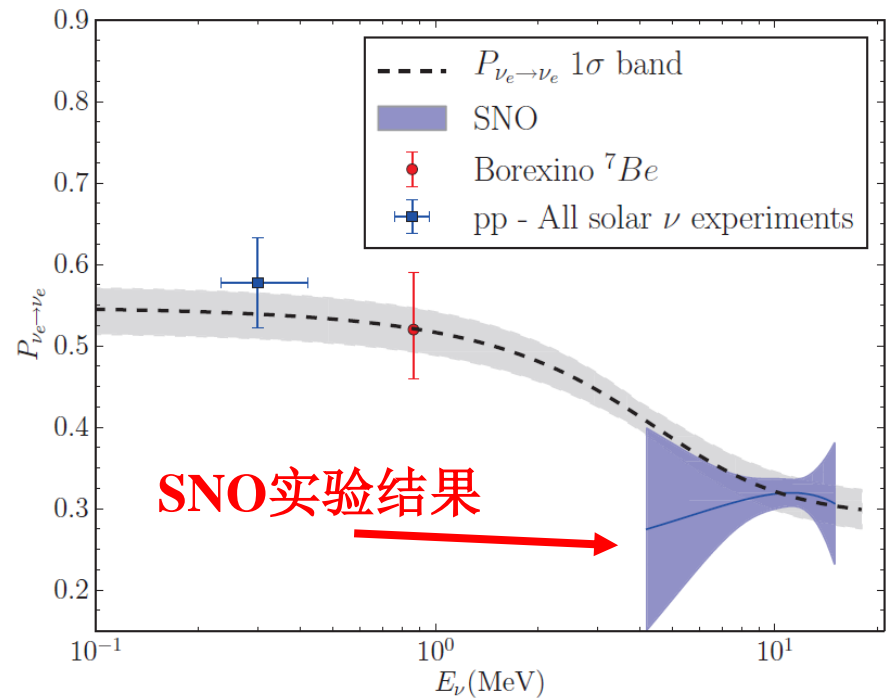
# 太阳中微子振荡的近似公式 (SNO)

- ▶ 对于4-20 MeV，可以采用一个简单公式

$$P_{ee}^d(E_\nu) = c_0 + c_1(E_\nu[\text{MeV}] - 10) + c_2(E_\nu[\text{MeV}] - 10)^2$$

- ▶ 不同于MSW理论公式，该公式在4 – 6 MeV能区可以下陷，更具宽泛性 (SK也有类似的近似公式)

$c_0$ ，在10 MeV处的 $P_{ee}$   
 $c_1$ ，在两侧4 MeV，16 MeV是上翘还是下陷  
 $c_2$ ，在两侧上翘和下陷的不对称性

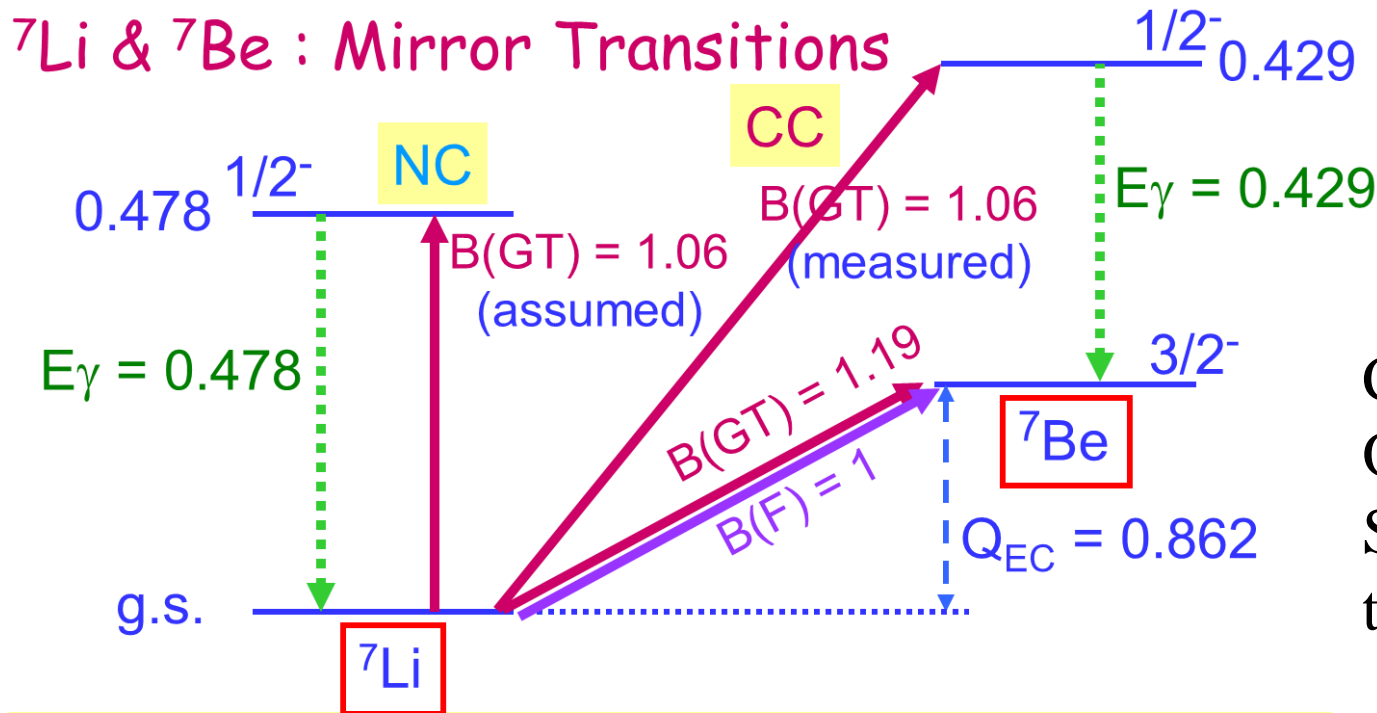


SNO, PRC **88**, 025501 (2013)

# $\nu_e$ 在 ${}^7\text{Li}$ 上的反应过程

**带电流CC**  $\nu_e + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be} + e^-$  ( $E_{\text{th}} = 0.862$  or  $1.429$  MeV)

**中性流NC**  $\nu_e + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li}^* + \gamma$  ( $0.478$  MeV)



CC:  
One Fermi + Two  
Superaligned GT  
transitions

\*Min. Detection  $E_\nu$ : NC  $\rightarrow$   $0.478$  CC  $\rightarrow$   $0.862$  MeV

Yoshitaka Fujita, 5<sup>th</sup> Solar Neutrinos

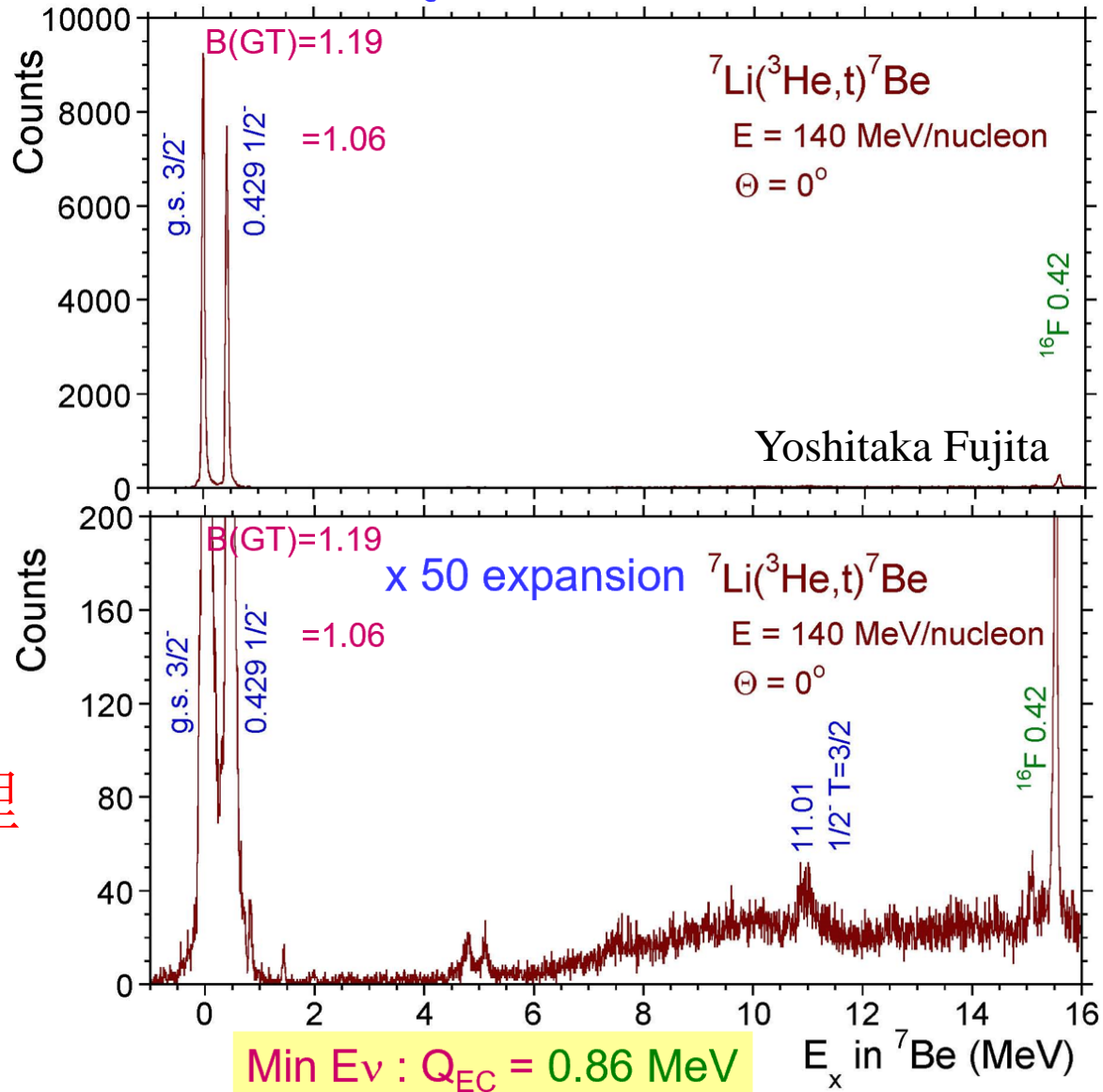
# $^7\text{Li}$ CC截面误差

利用



测量的BGT

- 清晰、简单的跃迁结构
- 精确的BGT测量
- 考虑到Gallium anomaly, 截面的理论误差为2%



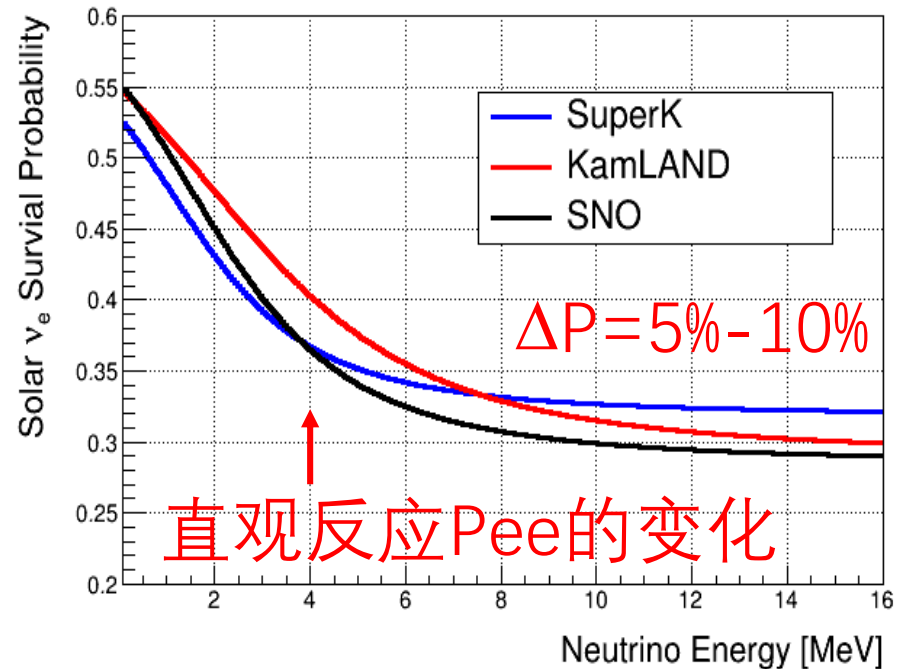
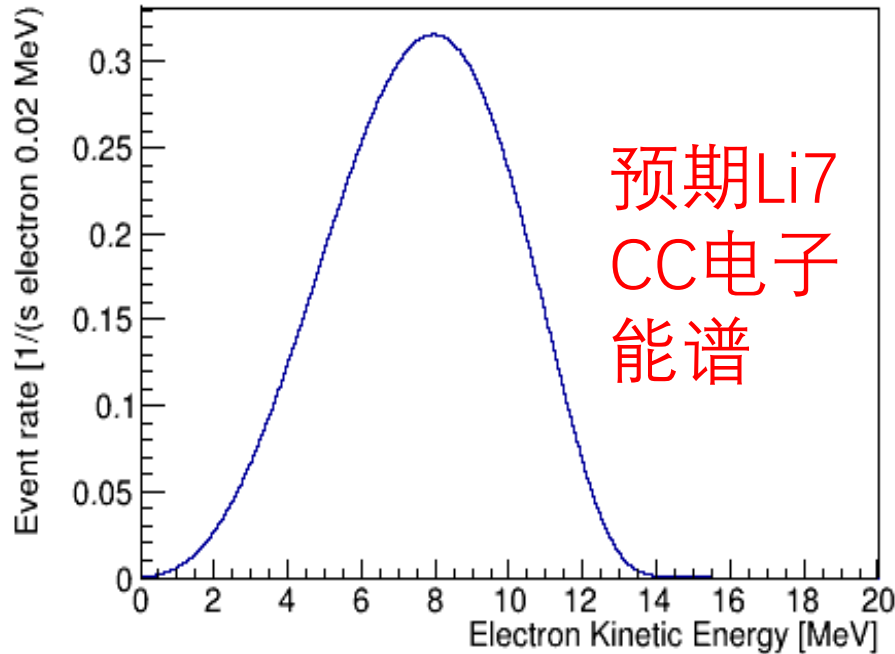


# ${}^7\text{Li}$ CC过程的角分布和末态电子能谱

## 角分布

- Fermi跃迁,  $1+\cos\theta$
- GT跃迁,  $1-1/3\cos\theta$
- 综合考虑:  $1+\alpha \cos\theta$ ,  $\alpha=-0.02$  for  $5 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV}$

本研究中, 就认为均匀角分布



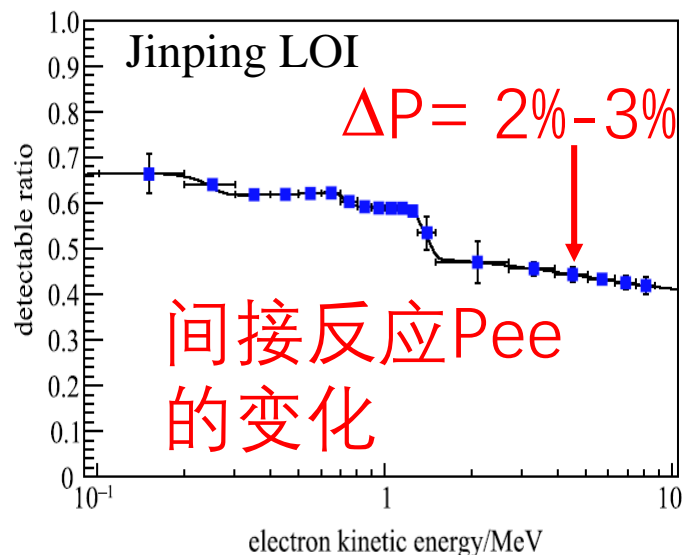
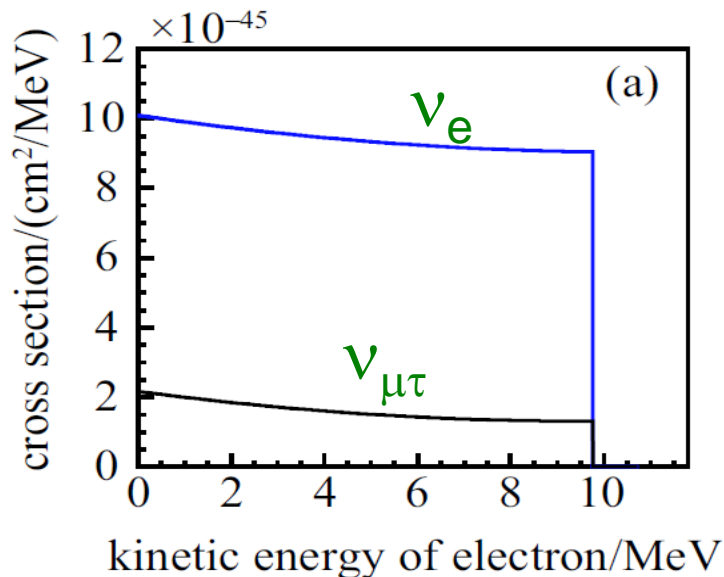
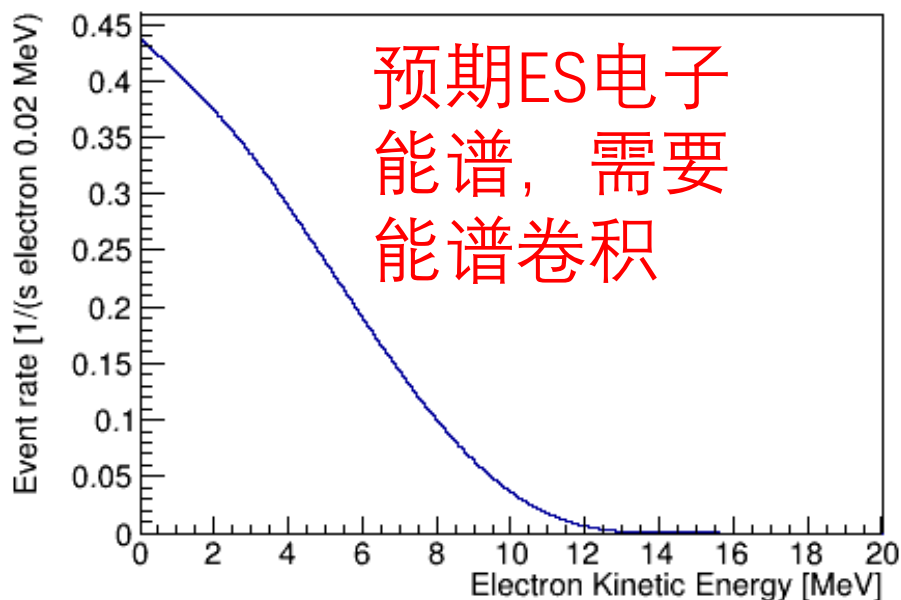




# 中微子-电子弹性散射: ES



1. 散射电子能量与中微子能量关系一多对应
2. 电子方向与太阳方向关联
3. 带电流和中性流混合  
CC+NC





# $^7\text{Li}$ 和ES截面和其他性质的对比

## 与 $^7\text{Li}$ 的散射



1.  $3.5 \times 10^{-42} \text{ cm}^2$
2.  $^7\text{Li}$ 自然丰度92.4%
3. 水溶性达到(10°C)  
75 g LiCl/100 g H<sub>2</sub>O

## 与电子散射:

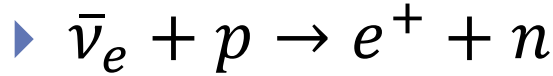


1.  $0.061 \times 10^{-42} \text{ cm}^2$

- ▶ Li不用富集
  - ▶ 截面高
  - ▶ 水溶性也高
- ➔ 适合实验

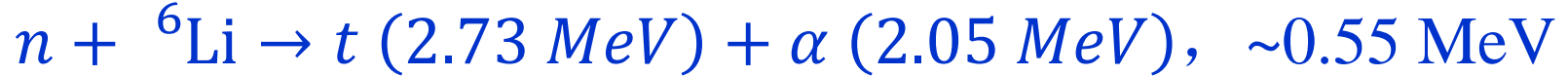


# “ $\bar{\nu}_e$ ”在含LiCl液闪中的反应，地球中微子也可以探测



H俘获0.3 barn

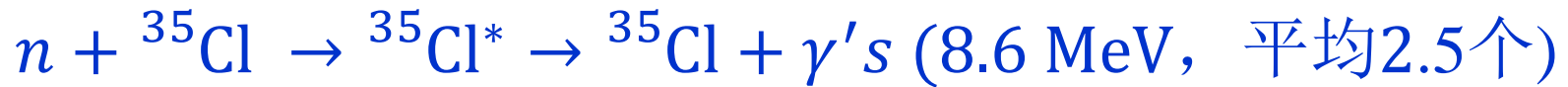
▶ 延迟信号:



${}^6\text{Li}$ 丰度为7.59%，截面940 barn

H. K. M. Tanaka, H. Watanabe, SCIENTIFIC REPORTS 4 : 4708 (2014)

或者



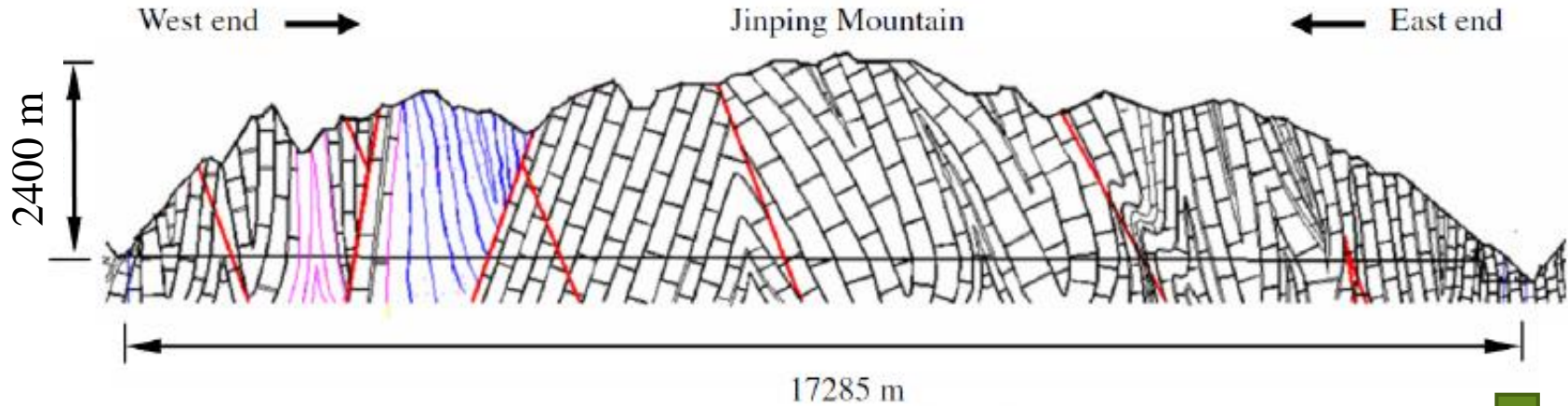
${}^{35}\text{Cl}$ 丰度为75.76%，截面44 barn

SNO, PhysRevC.72.055502(2005)

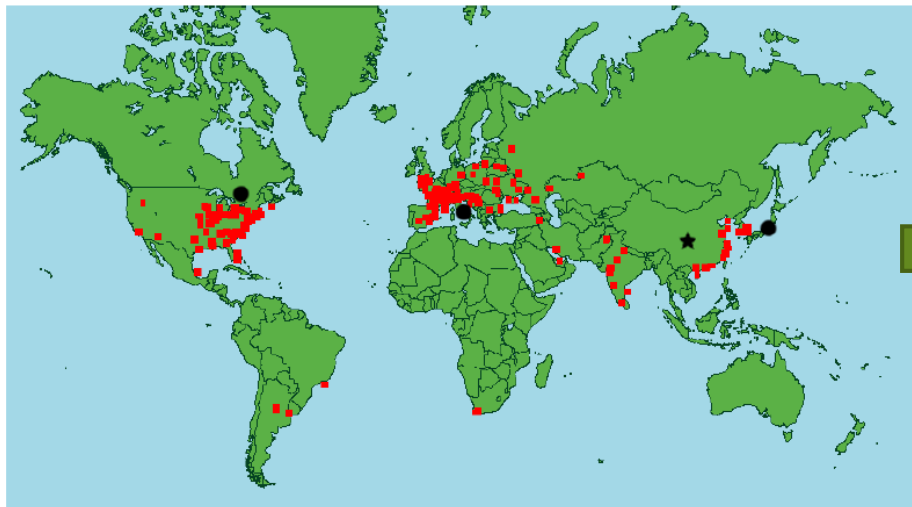
- ▶ 约30%是在 ${}^{35}\text{Cl}$ 上俘获，能量高，容易通过本底判选
- ▶ 约70%是在 ${}^6\text{Li}$ 上俘获，可能有挑战

# 探测器方案和测试

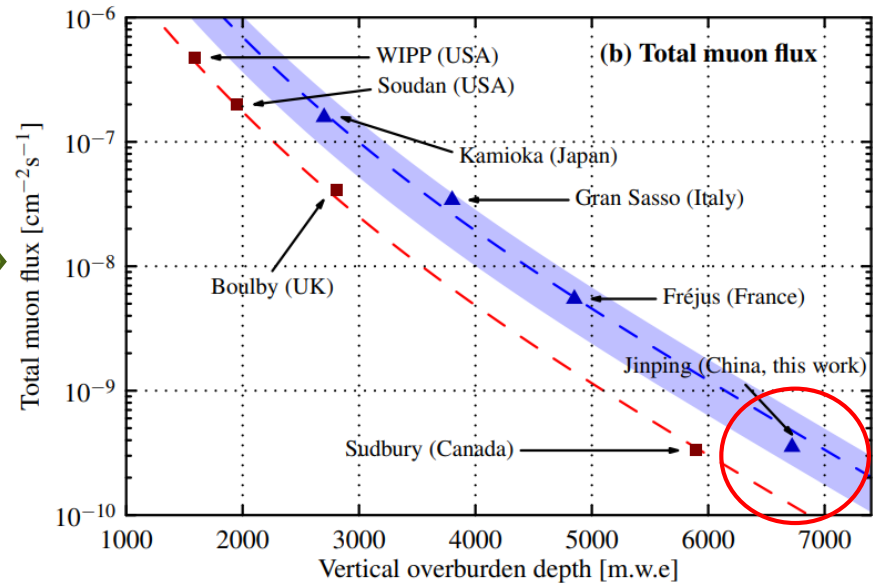
# Low muon flux and reactor neutrino background



2400 m overburden, C10, C11 background suppression



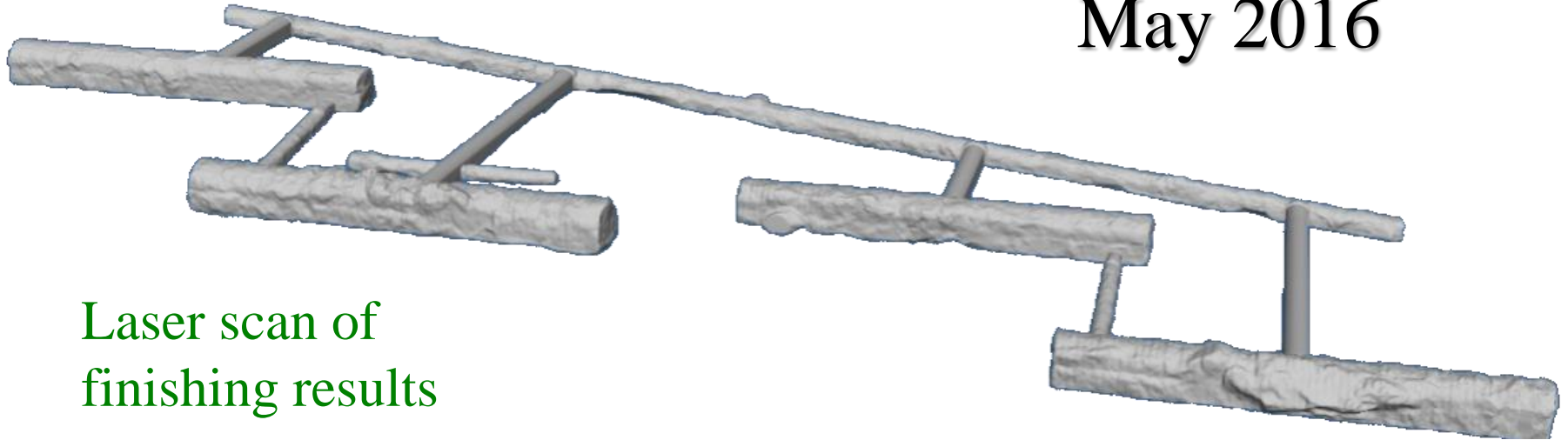
950 km to closest reactor



Jinping, CPC, 2020

# 二期实验室完成情况

May 2016



Laser scan of finishing results



CDEX pit and PandaX pit done

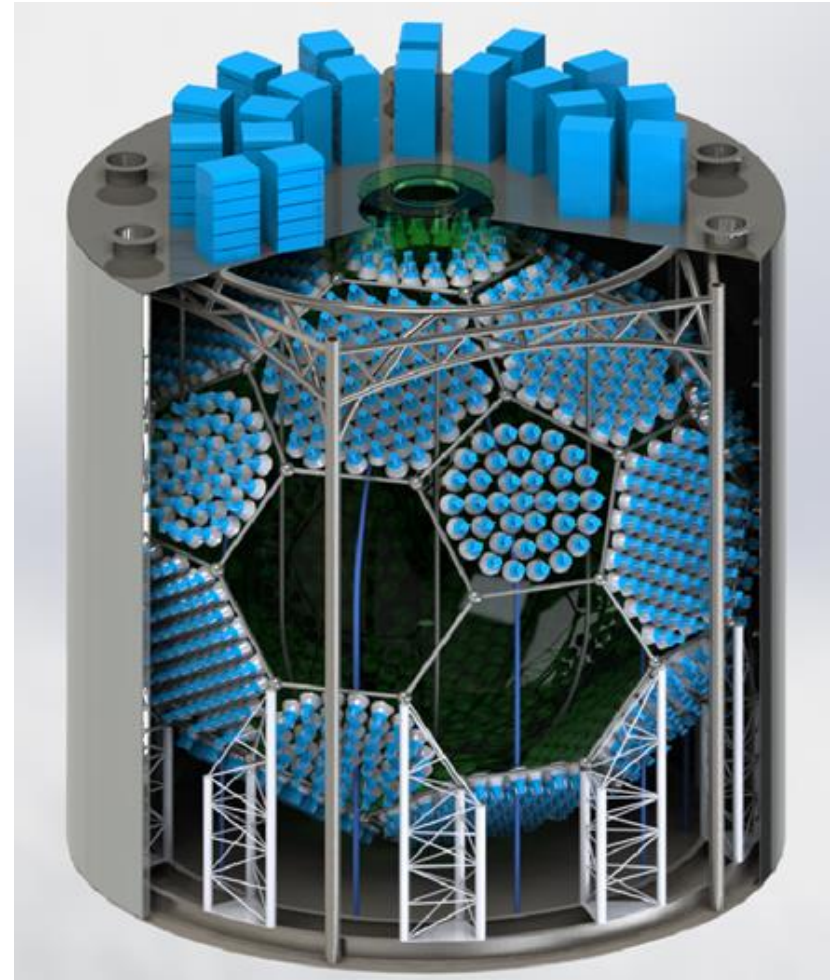


One hall



# 环境本底模拟和探测器主结构设计

- 针对3 MeV以上事例的探测器结构设计
- 最外层钢桶跨度12m  
充满纯水
- 内切钢球 $\Phi 12\text{m}$   
充满白油
- 亚克力球壳 $\Phi 10\text{m}$   
充满液闪





## 一些基本参数

---

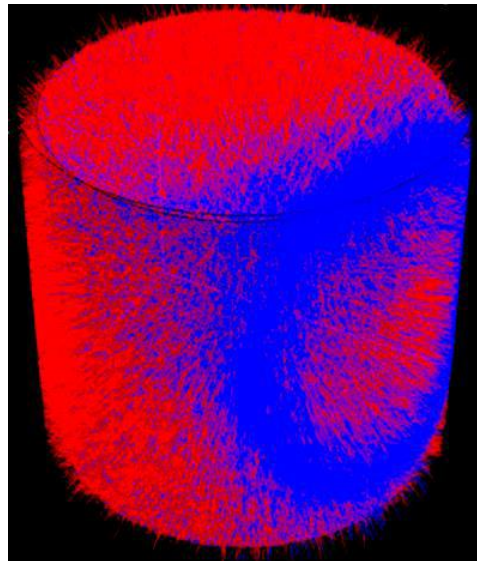
- ▶ PMT数目： 5400只 8 inch (~40% 覆盖率)  
2700只 8 inch (~20% 覆盖率)
- ▶ 白油： 380 m<sup>3</sup>, 323吨
- ▶ 纯水
- ▶ 总液闪质量： 628吨
- ▶ 有效靶体积： **有效靶体积268 m<sup>3</sup>, 有效靶质量320吨**
- ▶ **LiCl含量： 考虑74.5 g/ 100 g water @ 10° C, LiCl需要268吨**



# 含Li的Cherenkov液体闪烁体

- ▶ LiCl, 工业级 (99%) 15000/吨-20000/吨
- ▶ LiCl, 吞咽有害, 对皮肤, 眼睛刺激。无致癌性, 不可燃。
- ▶ LiCl+H<sub>2</sub>O+TritonX (或SAB等), 可能能够形成掺Li的Cherenkov液体闪烁体
- ▶ 液体闪烁体光产额可控, Cherenkov/scintillation可控, 可以用ADC读出

Cherenkov – 蓝  
scintillation – 红



可以实现方向重建和Li7散射事例的分离



# 方向性的精度和液闪性能的考虑

- ▶ 三个因素影响方向重建的精度
  1. 电子自身的库伦散射——主要因素
  2. 有限的Cherenkov光子数——次要因素
  3. 闪烁光的干扰——控制闪烁光产额，控制发光速度，使之成为次要因素
- ▶ Cherenkov光的空间分布，占 $4\pi$ 的 $1/3$
- ▶ 选择液闪，
  1. 总光产额约为20 PE/MeV  
(SNO+和SK的3-4倍)
  2. Cherenkov: 5-8 PE/MeV
  3. Scintillation: 12-15 PE/MeV  
保证足够好的信噪比

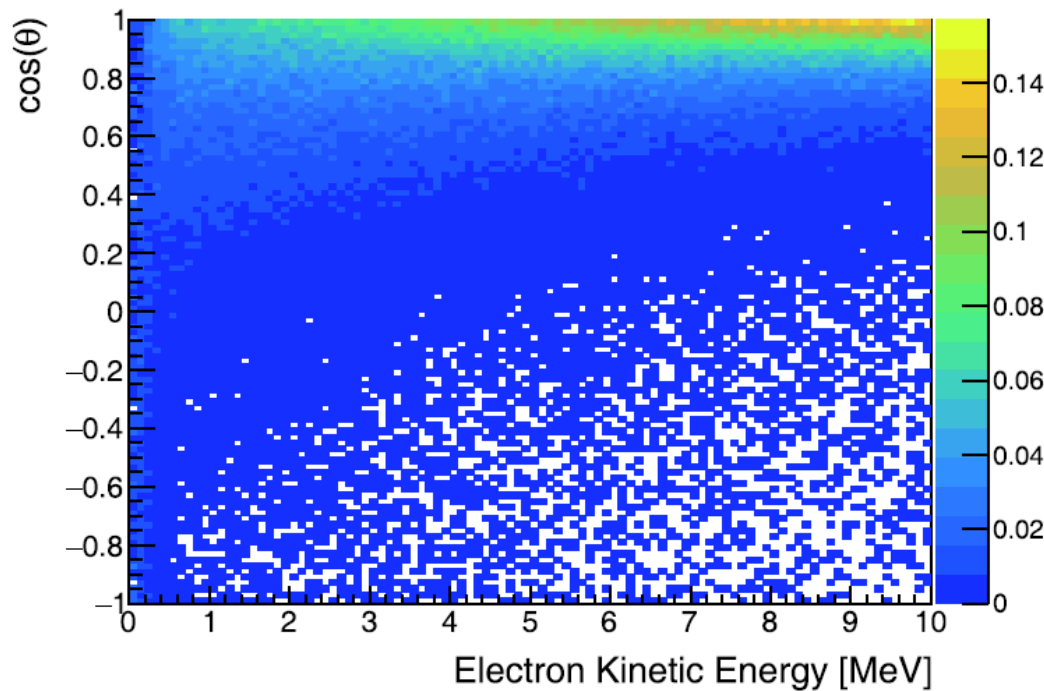


# 方向性的精度

- 在产生模拟事件，利用简单重建研究中，待完善

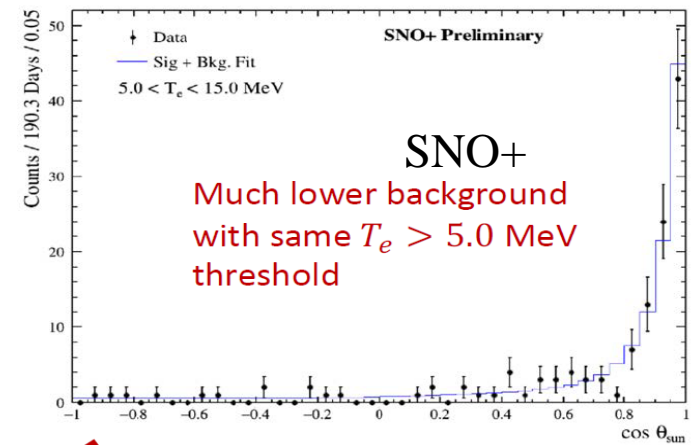
$$\vec{R} = \frac{1}{N_{PE}} \sum_{i=1}^{N_{PE}} \vec{r}_i$$

$r_i$ 为所有击中的  
PMT位置方位



PRC Vol. 44, No. 3 (2020) 033001

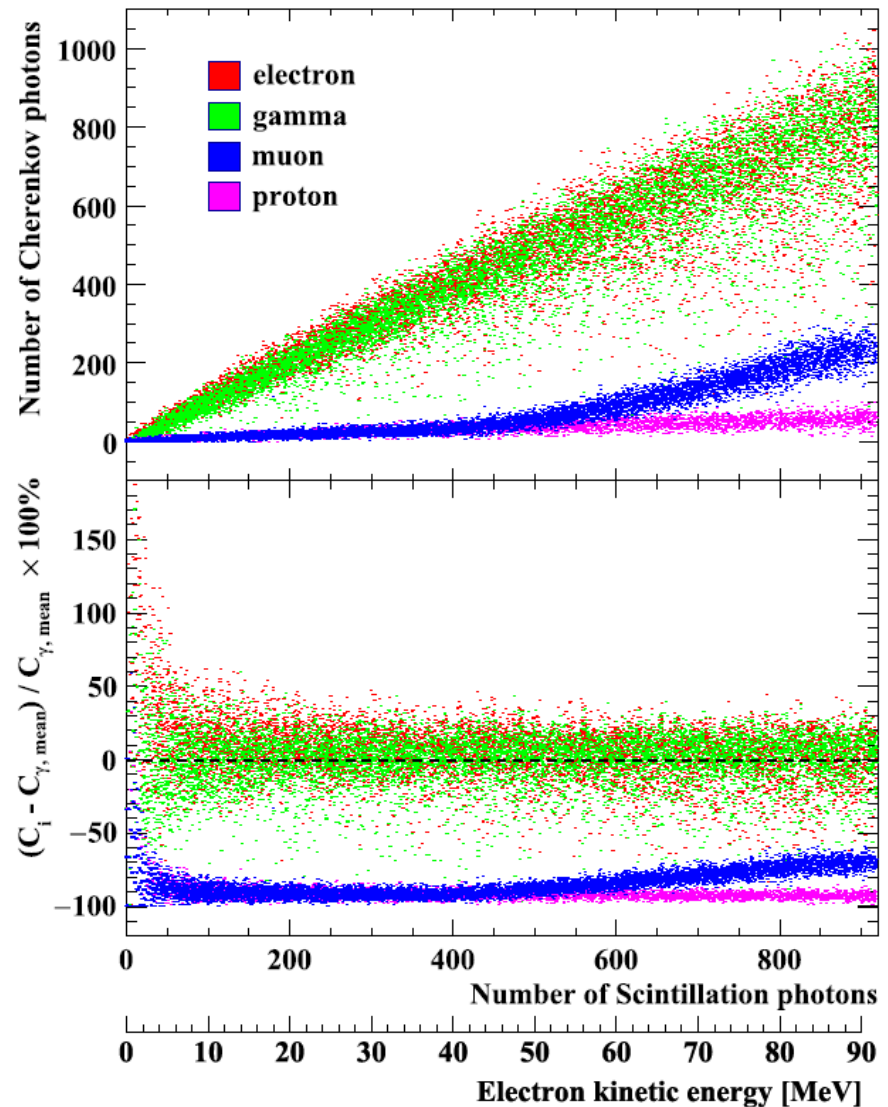
- ES过程会有部分事例混入LiCC事例中
- 大致和SNO+实验吻合





# 有微弱的电子-光子鉴别能力

1. 在4 MeV, 电子有  $4 \times 5 = 20$  C-PE, 前向 (1/3球面) 对应也有  $4 \times 15/3 = 20$  S-PE, C光统计上是显著的
2. 而光子, 只有次级电子过域才有C光
3. 除了对质子, 缪子强的粒子鉴别外, 对电子和光子也有弱的鉴别能力

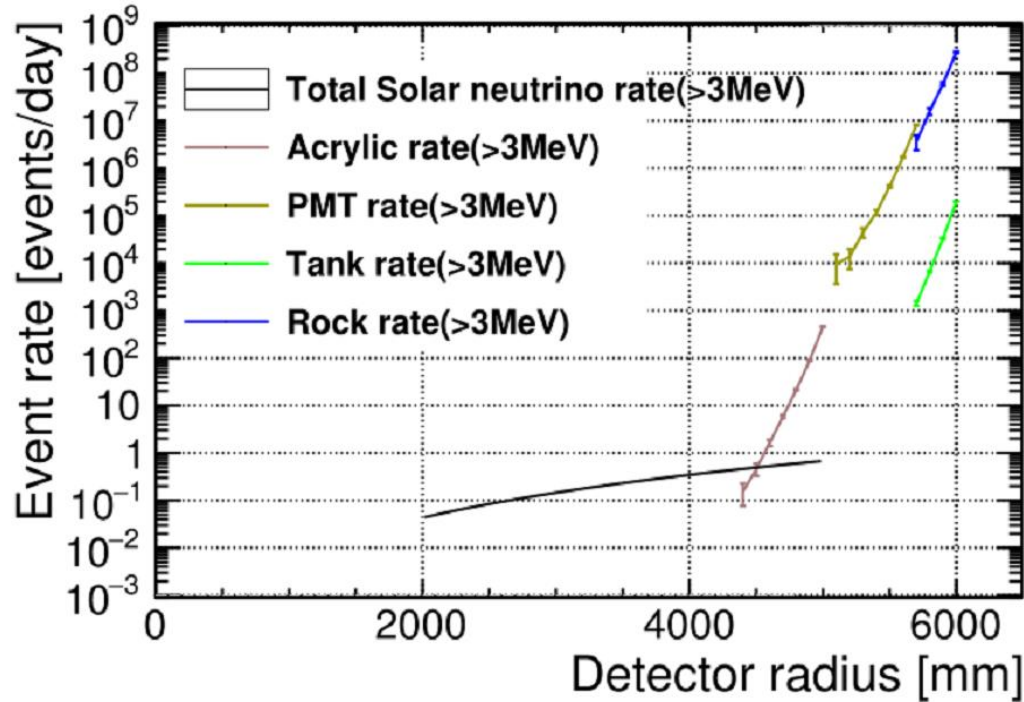


Physics Letters B 769 (2017) 255–261



# 探测器外部本底

	U238[g/g]	Th232[g/g]	K40[g/g]
Acrylic	$6 \times 10^{-13}$	$1.6 \times 10^{-12}$	null
PMT	$7.78 \times 10^{-8}$	$1.72 \times 10^{-7}$	$9.62 \times 10^{-9}$

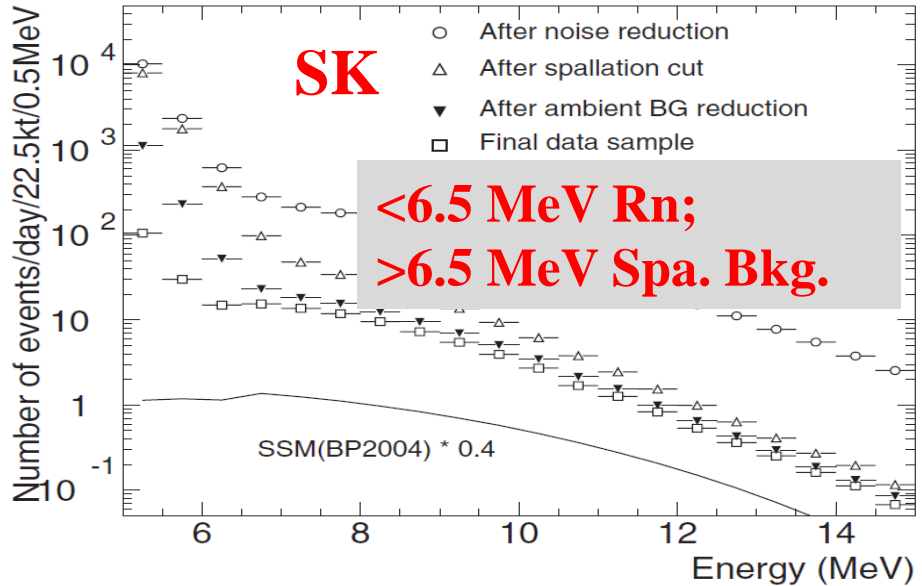
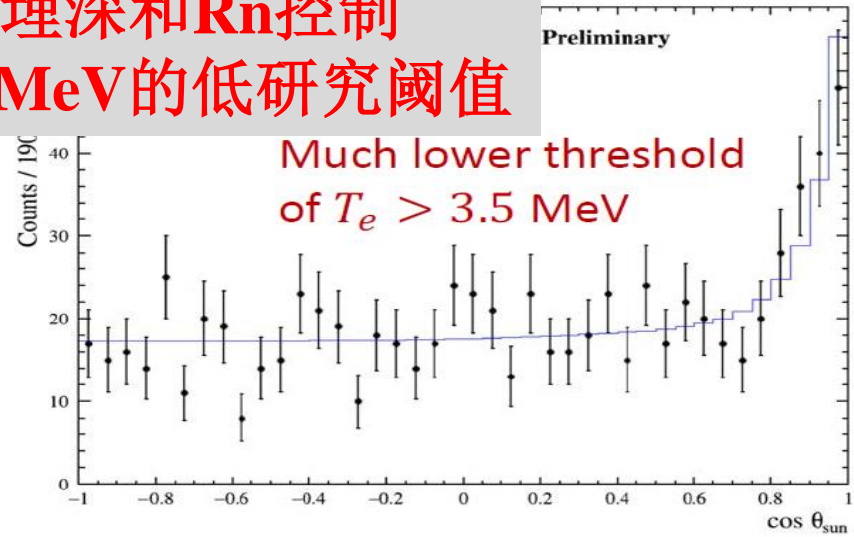
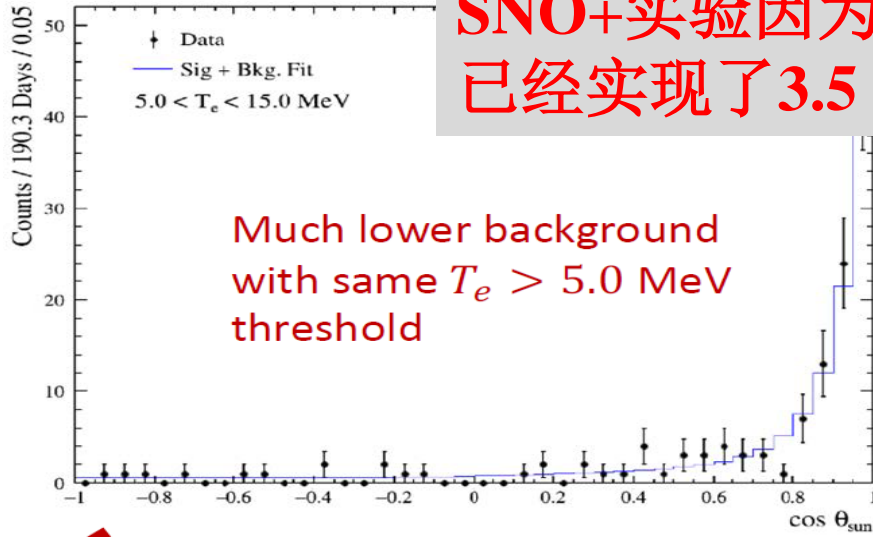


可以实现 $\Phi 8m$ 的有效靶体积，实现3 MeV以上无外部本底



# 深地的优势，宇宙线相关本底

**SNO+实验因为埋深和Rn控制  
已经实现了3.5 MeV的低研究阈值**



- ▶ 锦屏埋深于SNO类似
- ▶ 极低的宇宙线缪子通量和缪致本底
- ▶ 认为  
No Bkg: > 5 MeV  
Minor Bkg: 4-5 MeV  
(3 times light yield & minor gamma-electron ID)



## 内部本底

- ▶ SNO+实验，利用重结晶方法及self-scavenging提纯Te酸，第一阶段目标是达到U，Th含量达到 $1\text{E}-14$  g/g水平
- ▶ 超级神冈掺Gd实验，U，Th的要求分别在 $1\text{E}-11$ 至 $1\text{E}-12$ 水平，计划使用AJ4400，AJ1020树脂
- ▶ 重结晶方法没有理论极限，主要受制于例如纯水的洁净程度
- ▶ 在 $1\text{E}-14$  g/g的本底水平，完全可以忽略内部本底影响





## 重结晶，提出低本底LiCl

- ▶ LiCl水溶性随温度变化  
83.2 g/100 g (20° C)  
128.8 g/100 g (100° C)  
调节水溶液温度重结晶

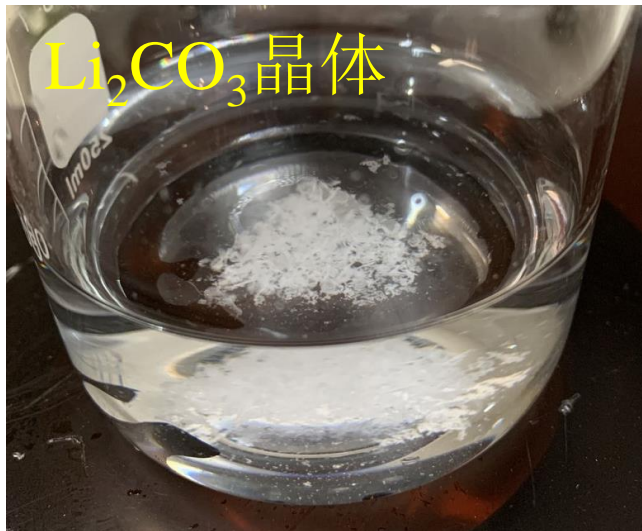
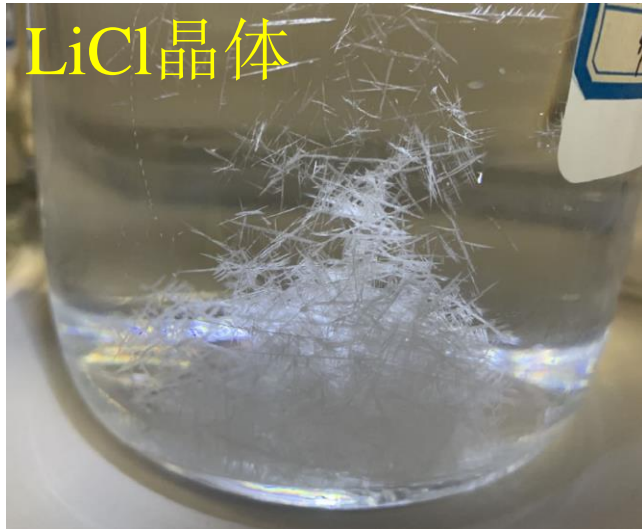
K盐可溶，该方法对K有效

- ▶ Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>水溶性随温度变化  
1.27 g/100 g (25° C)  
0.72 g/100 g (100° C)  
通过调节水溶液温度重结晶，添加HCl

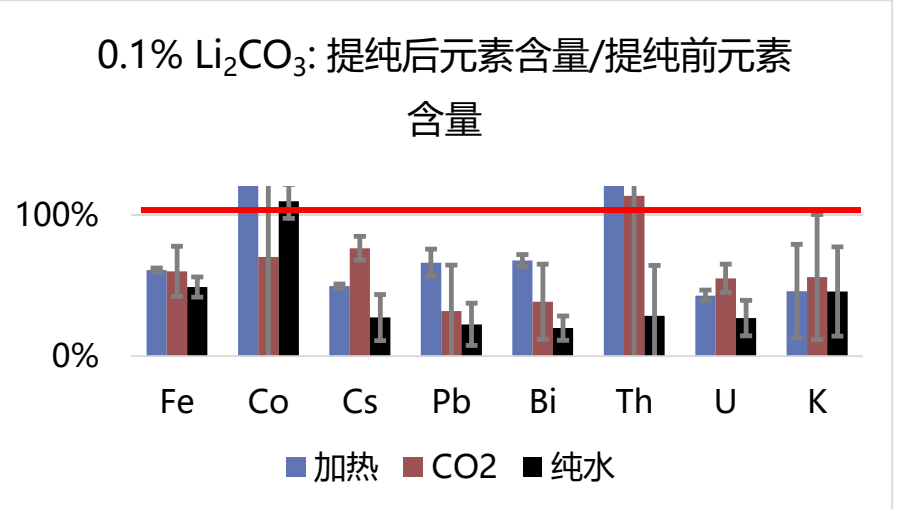
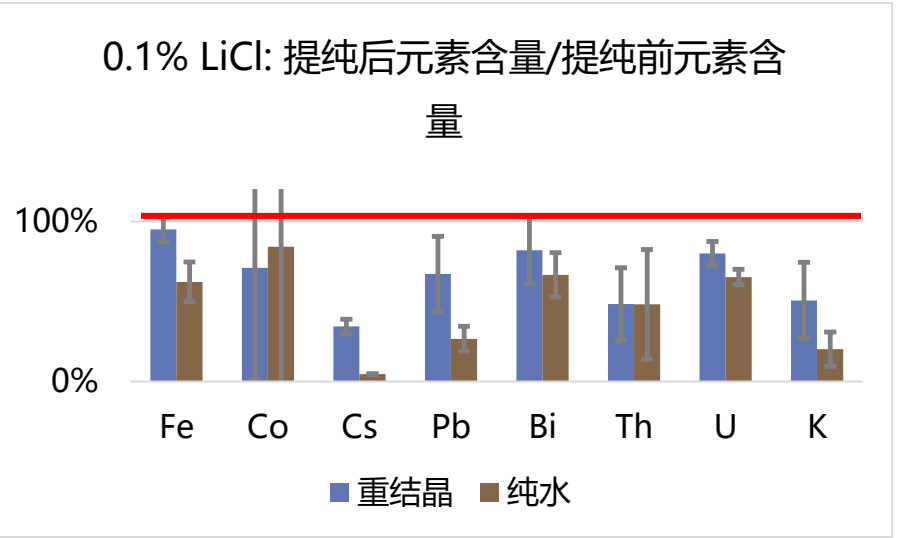
- ▶ CO<sub>2</sub>提高Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>水溶性  
生成LiHCO<sub>3</sub>，LiHCO<sub>3</sub>水溶性7.59 g/100 g (25° C)  
通入高纯CO<sub>2</sub>然后，加热赶出CO<sub>2</sub>，重结晶



# 实现低本底LiCl的初步实验结果



## 初步结果，显示出杂质减少

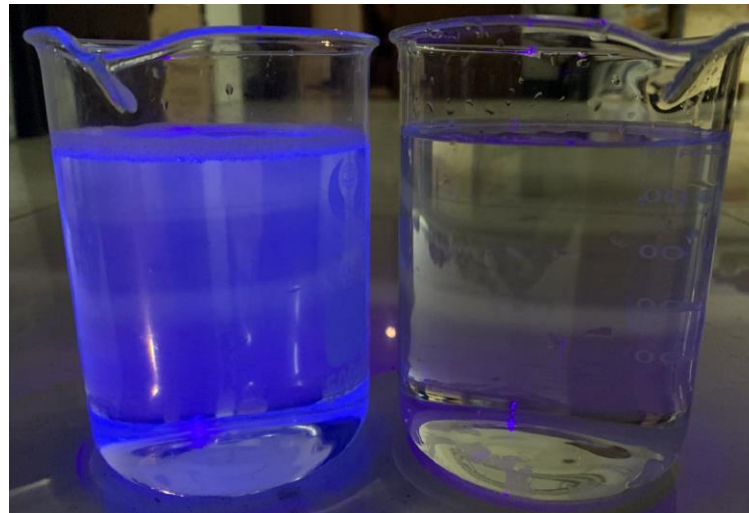


# 含LiCl的水基Cherenkov液体闪烁体

- ▶  $\text{LiCl} + \text{H}_2\text{O}$ ，高盐水溶液  
通过添加表面活性剂，可以添加有机闪烁溶质
- ▶ 实现： $\text{LiCl} + \text{H}_2\text{O} + \text{TritonX} + \text{PPO} + \text{BisMSB}$   
闪烁光产额可以很大，超过需求
- ▶ TritonX可以被替代为SAB等

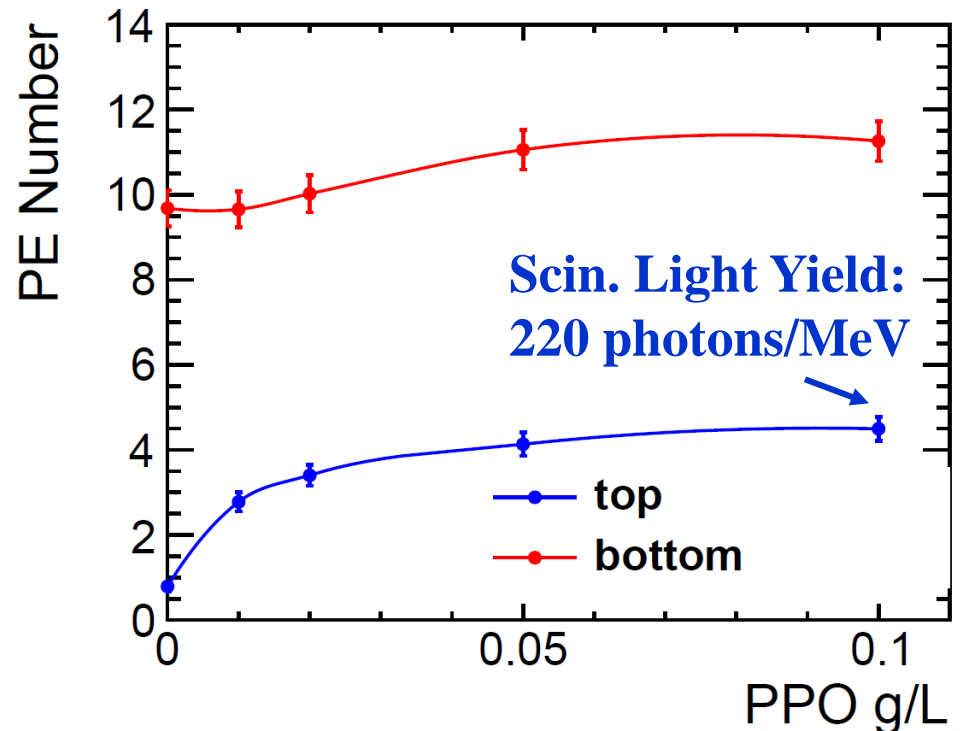
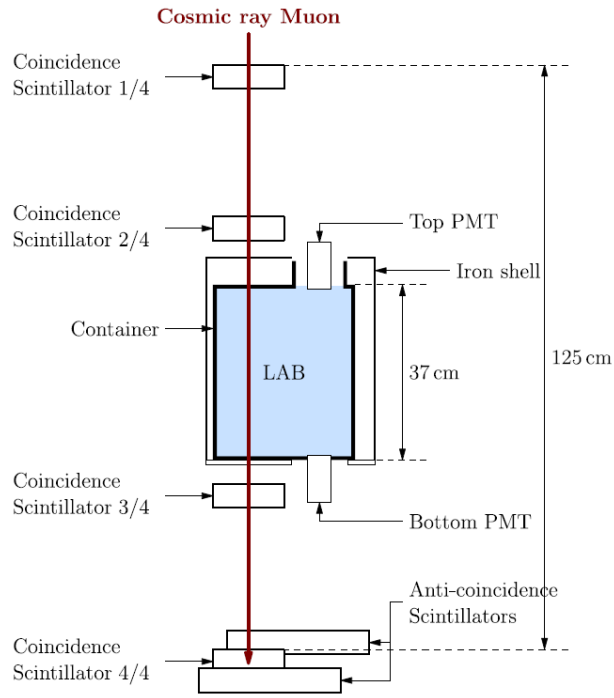
LiCl液闪

$\text{H}_2\text{O}$



# 闪烁光产额实验分析

- ▶ 缪子望远镜系统  
探测前向Cherenkov光和闪烁光
- ▶ LiCl饱和水溶液占90%+TritonX10%水溶液占10%  
扫描PPO (0 g/L——0.1 g/L)





# 锦屏期待的事例数

## 太阳中微子

- ▶ ES事件：3872 events
- ▶ Li7事件：3277 events

太阳中微子事件，能量 $>4$  MeV

- ▶ ES事件：1502 events
- ▶ Li7事件：3026 events

归一化到  
320吨，10年

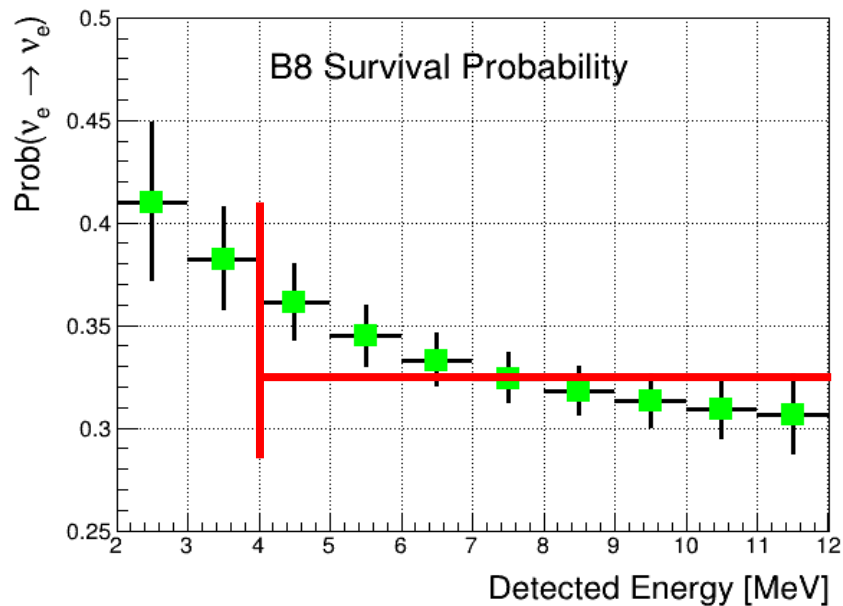
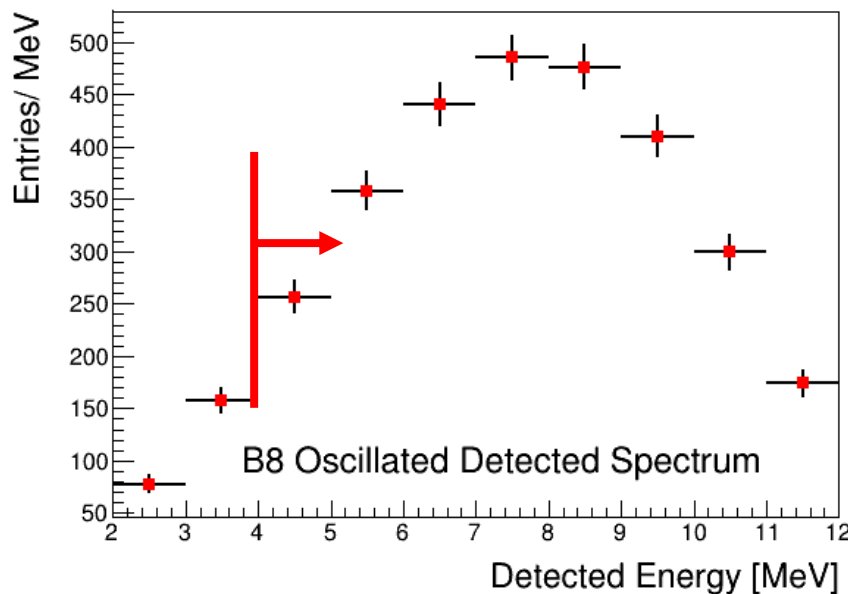
## 地球中微子

- ▶ 快 $+^{35}\text{Cl}$ 俘获慢信号，约20-40个

# 物理敏感度分析



# 基于统计量的直观感受



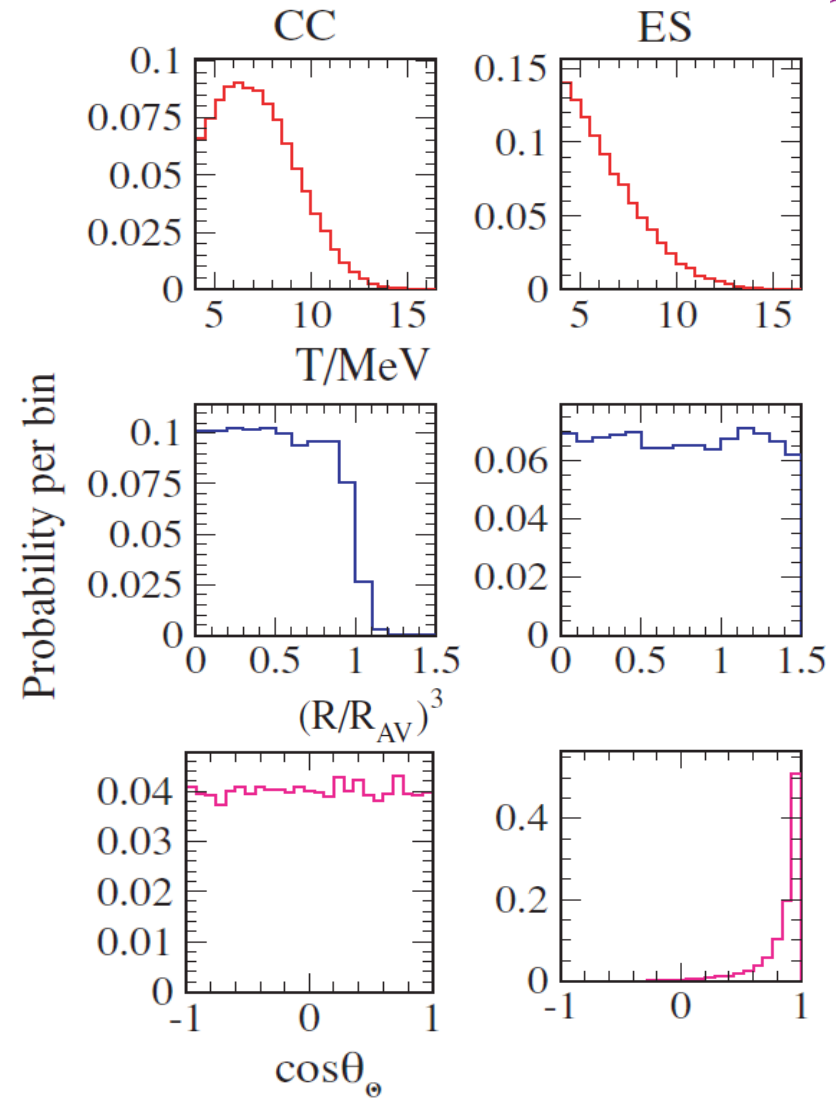
- 纯B8信号，Li7中微子俘获，10年，320吨
- 实现B8中微子微分能谱的直接探测
- 如果是简单直线拟合， $\Delta\chi^2/\text{ndf} > 9/1$



# 期待的多维分析

▶ 可以在三至四个参数空间直接进行一个拟合

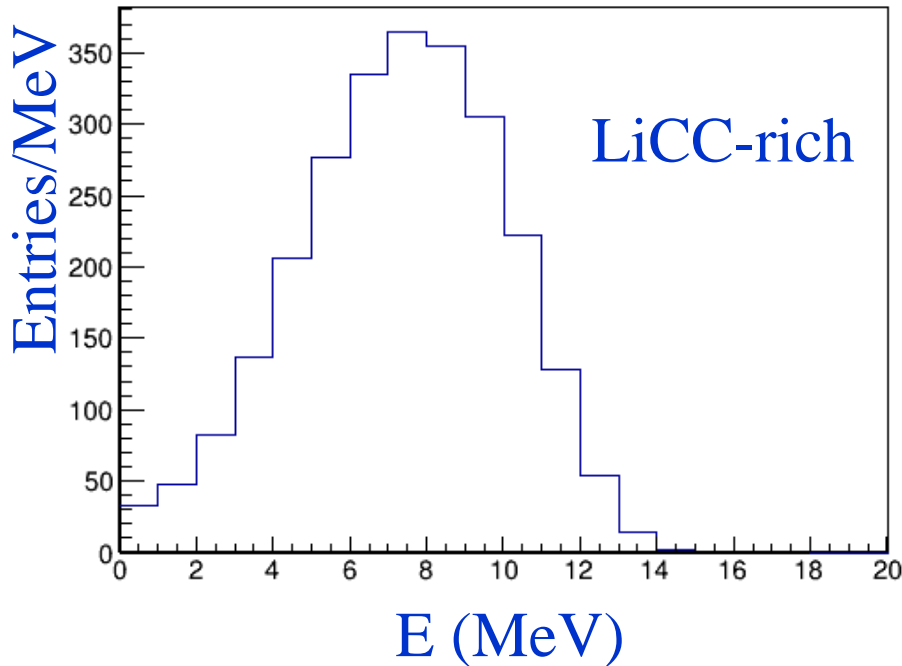
1. 能量
2. 位置
3. 方向
4. 光子/电子鉴别



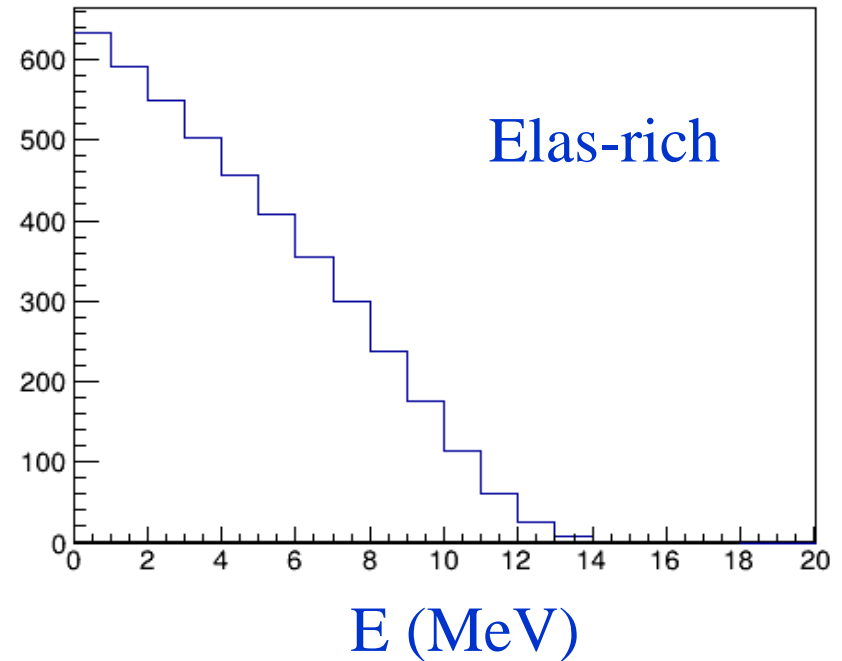


# 目前简化的分析

- cut  $\cos\theta_{\text{sun}} < 0.5$  将用来得到 LiCC-rich 数据和 Elas-rich 数据样本
- 只研究 4 或 5 MeV 以上无本底区间



$\cos\theta_{\text{sun}} < 0.5$



$\cos\theta_{\text{sun}} > 0.5$





# 分析方法

---

- ▶ 按照前面考虑的各种因素，按照MSW物质效应生成随机样本
- ▶ 以 $P_{ee} = c_0 + c_1(E - 10 \text{ MeV})$ 拟合，观察Upturn的趋势
- ▶ 以 $P_{ee} = c_0 + c_1(E - 10 \text{ MeV}) + c_2(E - 10 \text{ MeV})^2$ 拟合，观察Upturn趋势，并且和SNO实验对比相应分布



# 详细的拟合过程

- 分配成两个样品{N}和{M}，对应LiCC-rich和Elas-rich数据
- Li7和Elas的预期，被分别以一定比例（75%，5%）和（25%，95%）组合，并与数据做对比

$$\chi^2 = \sum_i^{LiCC-rich} \{N_i - [P_{Li,i}75\%(1 + \eta_\sigma) + P_{ES,i}(5\% + \eta_\epsilon)](1 + \eta_{MT})\}^2 / N_i + \sum_i^{Elas-rich} \{M_i - [P_{Li,i}25\%(1 + \eta_\sigma) + P_{ES,i}(1 - 5\% - \eta_\epsilon)](1 + \eta_{MT})\}^2 / M_i + (\eta_\sigma/2\%)^2 + (\eta_\epsilon/20\%)^2 + (\eta_{MT}/2\%)^2$$

考虑Li7截面有2%的系统误差

考虑角度条件对Elas过程有20%的误差，即5% ± 1%

考虑靶质量，时间有2%的误差



# $c_0 + c_1 \cdot (E - 10\text{MeV})$ 拟合

不同取数时间，不同能量阈值情况下的灵敏度

▶ 10年，4 MeV，Solar+KL平均参数

$P(c_1 < 0)$  (即Upturn) = 99.4% (1k samples)

▶ 10年，5 MeV，Solar+KL平均参数

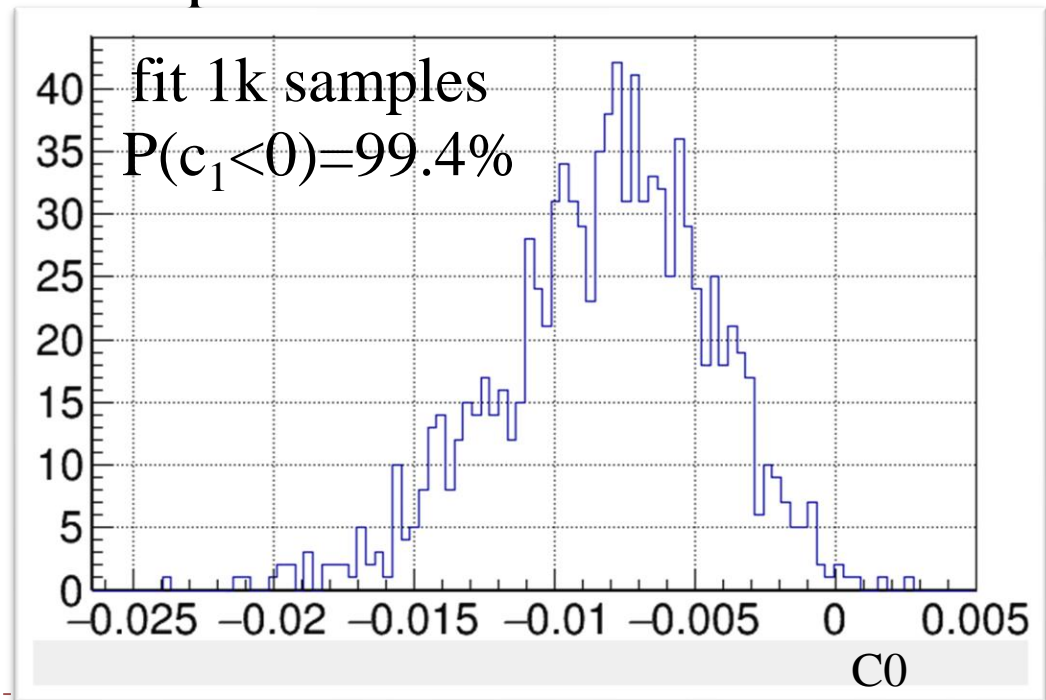
$P(c_1 < 0) = 97.9%$  (1k samples)

▶ 5年，4 MeV

$P(c_1 < 0) = 97%$   
(100 samples)

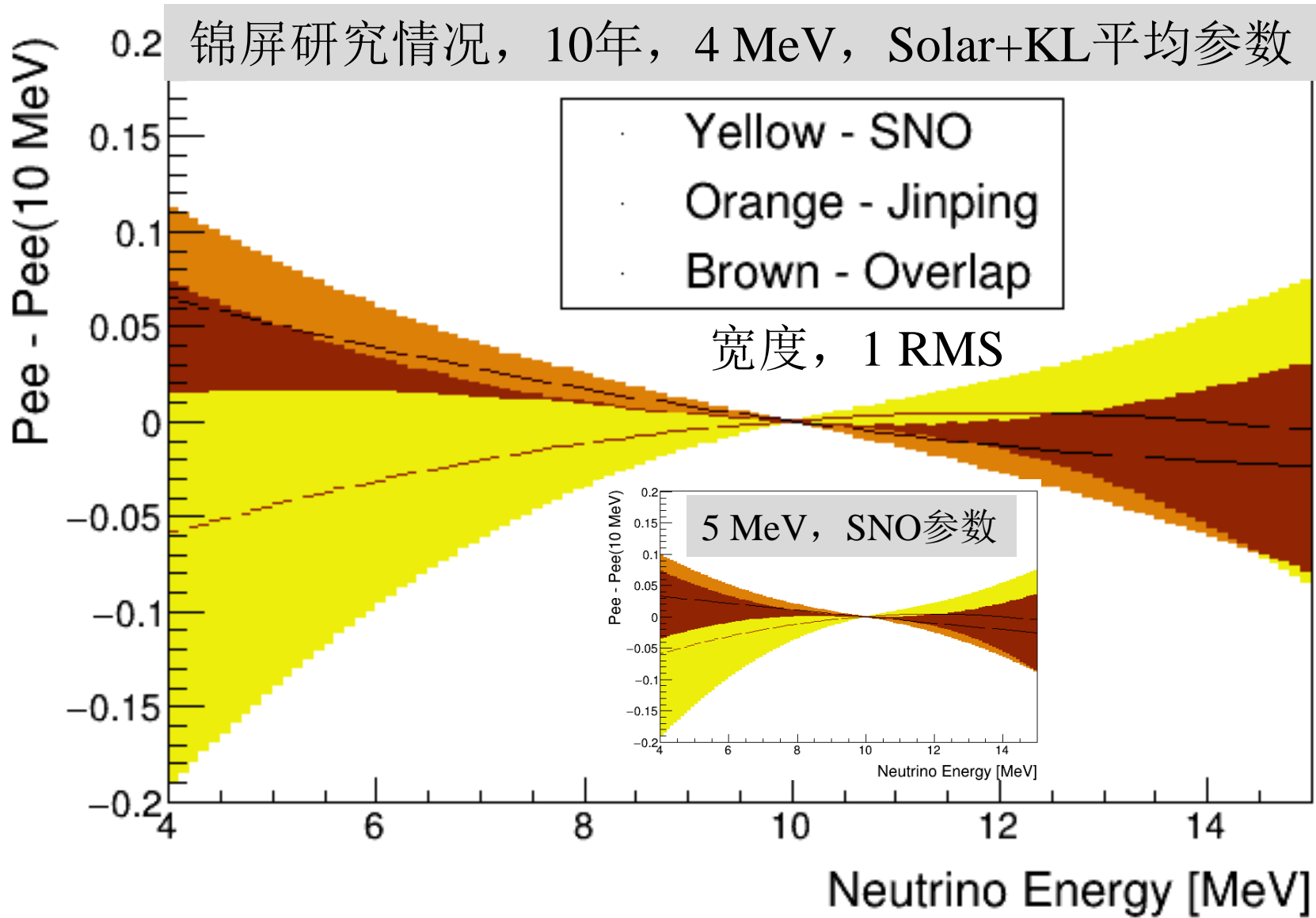
▶ 5年，5 MeV

$P(c_1 < 0) = 94%$   
(100 samples)





# $c_0, c_1, c_2$ 拟合, 与SNO实验的结果对比



# 国内外研究形势和优劣势



# 国内外研究形式

## 和太阳中微子有关的Nobel奖

- ▶ 太阳，大气和超新星中微子探测，2002年诺贝尔奖。
- ▶ 大气与太阳中微子味道转换，2015年的诺贝尔奖。

## 在运行的太阳中微子实验

- ▶ 欧洲Borexino，日本SuperK，KamLAND，加拿大SNO+

## 在提议中的太阳中微子实验

- ▶ 美国THEIA，日本HyperK，俄罗斯Baksan，欧洲LENS（过期），以及一些液氩实验

欧美日各种中微子实验近百个，而我国目前运行和在建的只有两个



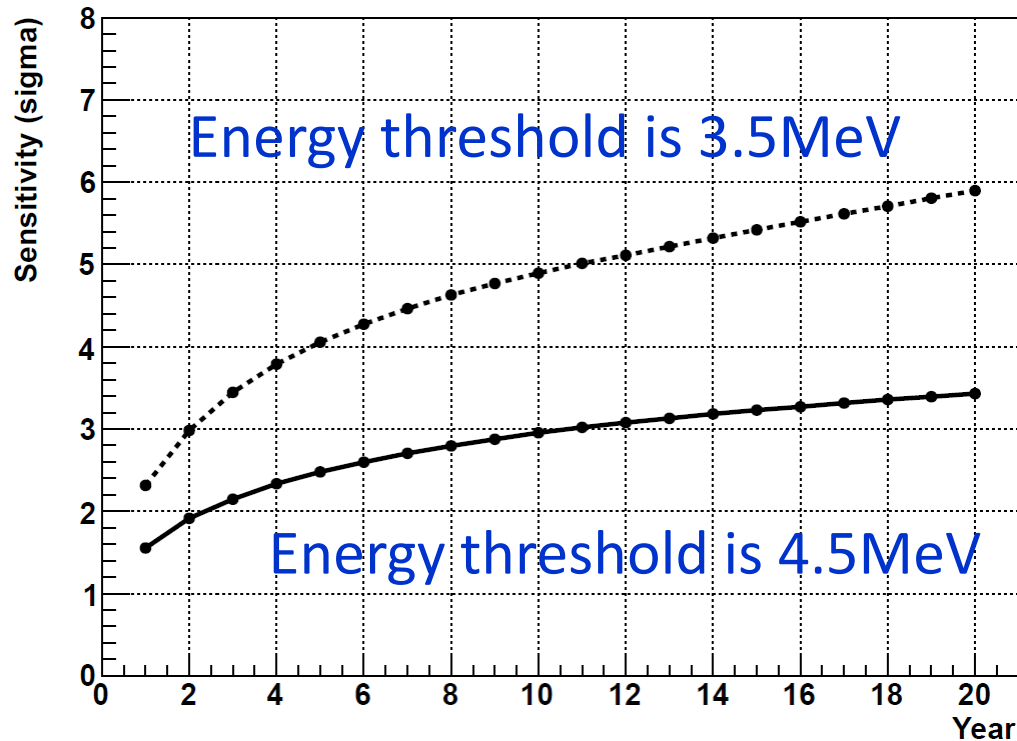
# 在局部优于世界上的其他实验

- ▶ DUNE,  $\nu_e + \text{Ar}$ , 有方向探测, 中微子阈值10 MeV, 超过Upturn研究阈值 PRL 123, 131803 (2019)
- ▶ JUNO,  $\nu_x + e^-$  或  $\bar{\nu}_e$  的IBD, 无方向探测, 没有此能力
- ▶ Borexino,  $\nu_x + e^-$  或  $\bar{\nu}_e$  的IBD, 无方向探测, 没有此能力, 并且2020年拆解
- ▶ SuperK, HyperK,  $\nu_x + e^-$ , 下页
- ▶ SNO+,  $\nu_x + e^-$ , 无方向探测, 没有此能力

Li7想法来自J. Bahcall, SNO, Borexino时代, 但一直没有实行

- Theia实验可能采用Li7方案, 但Theia路线图非常模糊
- Baksan一直在追随锦屏的实验方案

# HyperK灵敏度



HyperK将是Jinping百吨的约500倍  
HyperK埋深浅，PMT数目更多

arXiv:1805.04163v1





# 总结

- ▶ 中微子振荡，太阳地球中微子有许多的“已知的”待解问题
- ▶ 锦屏百吨方案，目标解决三个发现，B-8微分中微子能谱，解决Upturn问题，以95% CL排除常数Pee（5年），99% CL（10年），发现青藏高原的地壳中微子
- ▶ 轻惰性中微子和非标准模型作用的研究
- ▶ 规模小于KamLAND, Borexino, SNO...
- ▶ 补足已知各个大型实验的短板
- ▶ 希望最大的复用大亚湾实验的设备

# 欢迎问题和建议