

大亚湾反应堆中微子实验 nGd振荡分析的最新结果

吴文杰

中国科学院高能物理研究所

- 大亚湾反应堆中微子实验简介
 - 实验设计
 - 探测器和探测原理
- 近期的实验进展
 - 精度更高的能量响应模型
 - 精度更高的Li9/He8本底和乏燃料估计
 - 精度更高的中子探测效率
- 中微子事例挑选
 - 挑选条件
 - 实验本底及其系统误差
- 振荡分析结果
- 总结与展望

大亚湾实验设计示意图

4 x 20 tons target mass at far site

Far site (EH3)
1540 m from Ling Ao 1
1910 m from Daya Bay
860 m.w.e overburden

Ling Ao Near site (EH2)
470 m from Ling Ao 1
265 m.w.e overburden

Daya Bay Near site (EH1)
363 m from Daya Bay
250 m.w.e overburden

Ling Ao-II NPP
2x2.9 GW

Ling Ao NPP, 2x2.9 GW

Daya Bay NPP, 2x2.9 GW

Water hall

Liquid Scintillator hall

entrance

SAB

Construction tunnel

1006 m

465 m

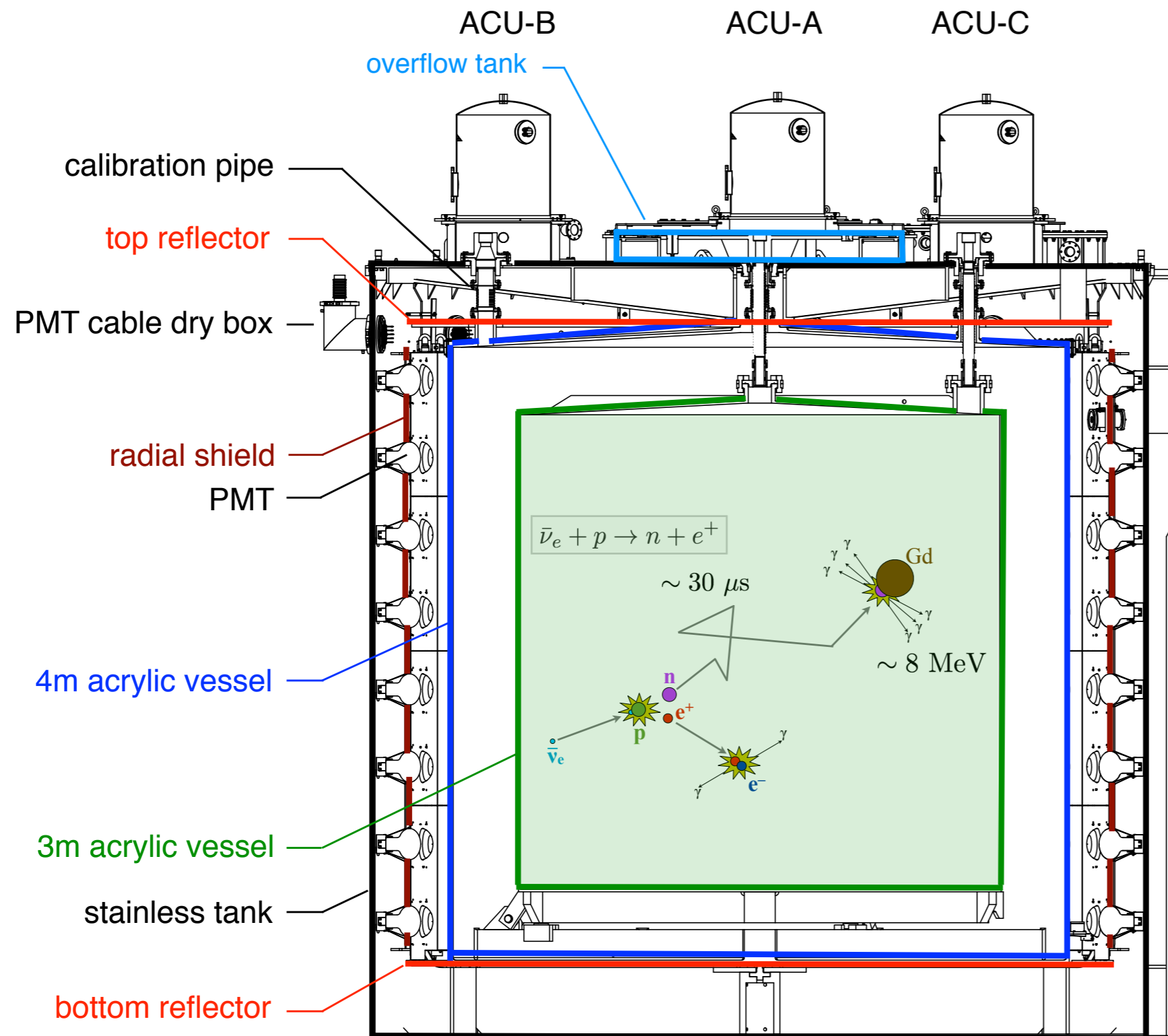
810 m

295 m

Total Tunnel length
~ 3000 m



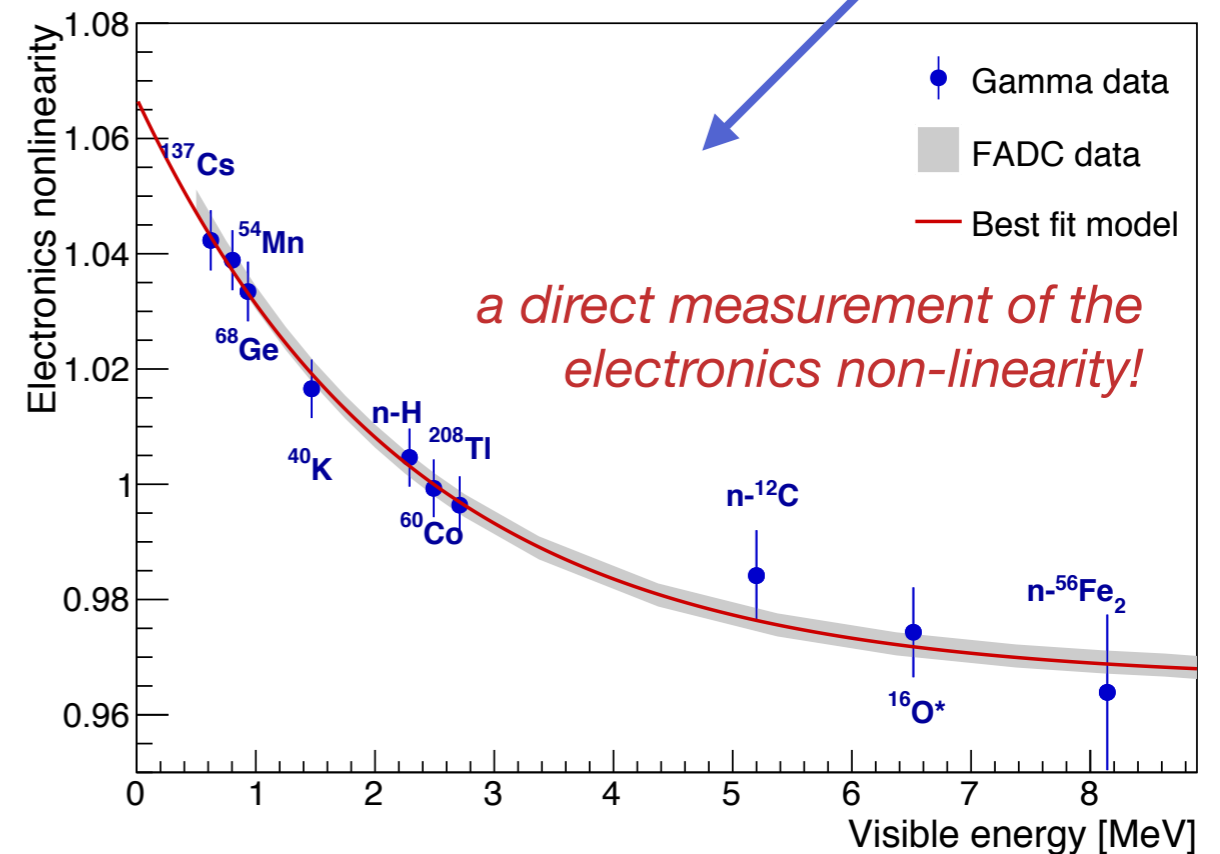
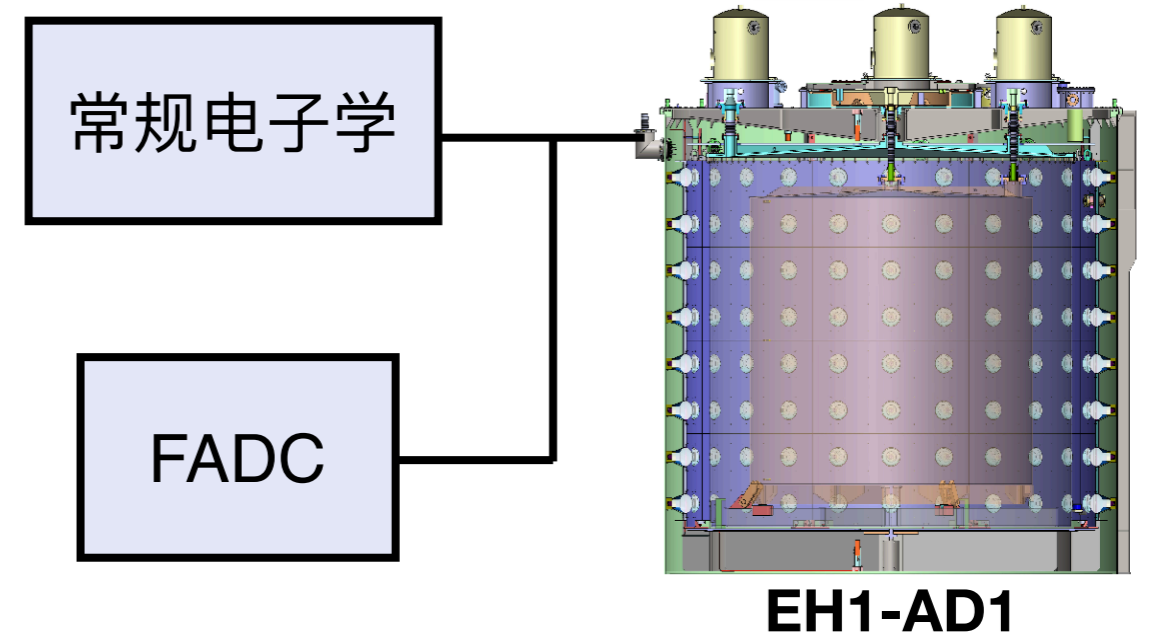
探测中微子事例



- 三层圆柱探测器
 - 掺钆液闪：靶物质
 - 液闪：集能区
 - 矿物油：屏蔽层
- 大亚湾实验的靶物质为掺钆液闪，利用IBD反应产生的正电子和中子探测中微子信号
- 正电子和中子事例在时间上形成关联信号，做时间符合可以排除大部分本底；
- 俘获中子的钆退激发释放的总能量约为8 MeV，大于天然放射性衰变的能量，做能量符合可以有效地排除本底

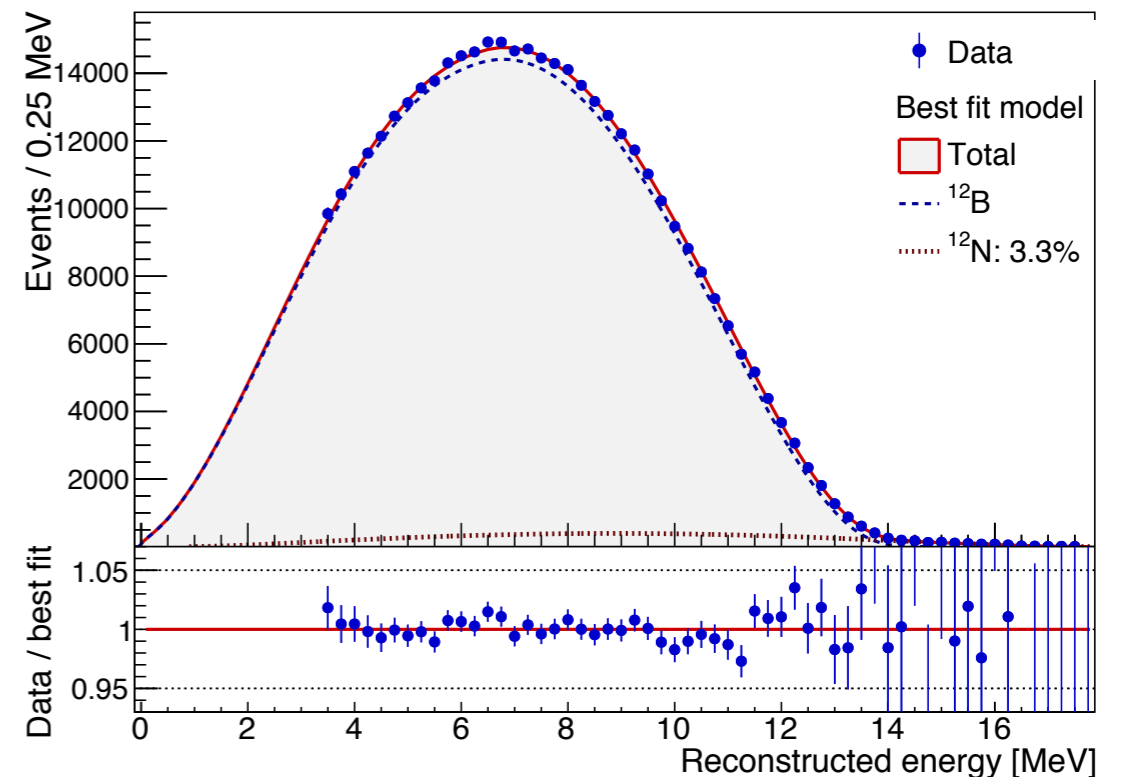
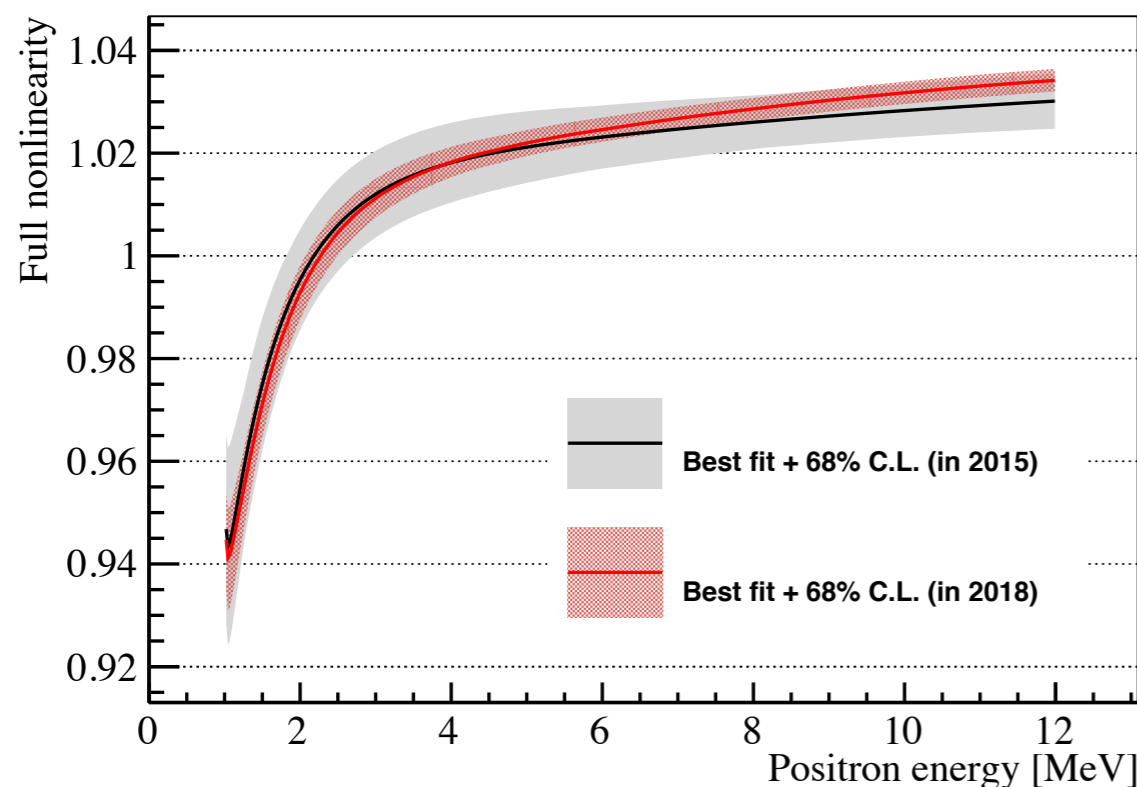
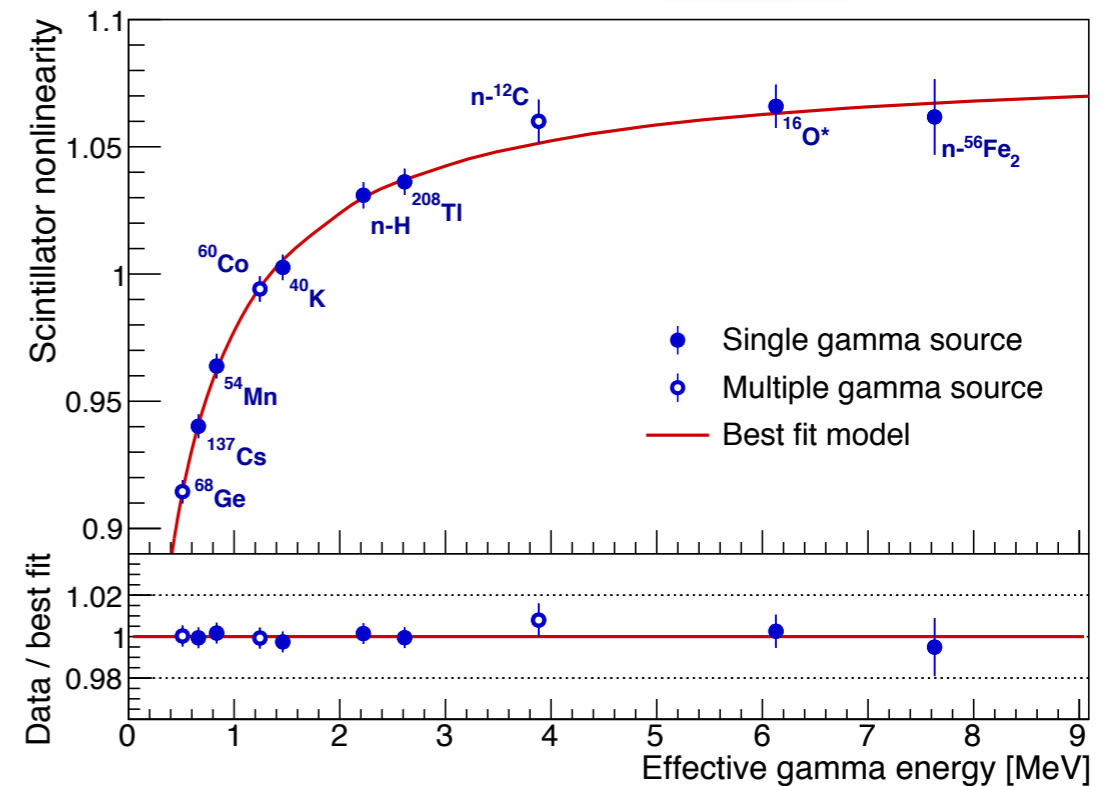
精度更高的能量响应模型

- 预期探测到的快信号能谱时，需要利用探测器的能量响应模型对中微子能谱进行转换
- 探测器的能量响应是非线性的，来源于
 - 液闪的淬灭效应和切伦科夫效应
 - 电子学的非线性
- 2015年底，EH1-AD1开始同时使用常规的电子学和FADC取数，**测量了常规电子学的非线性**
- 2017年初，使用不同包装材料的 ^{60}Co 放射源对探测器进行刻度，**测量了包装材料对刻度源的屏蔽效应**



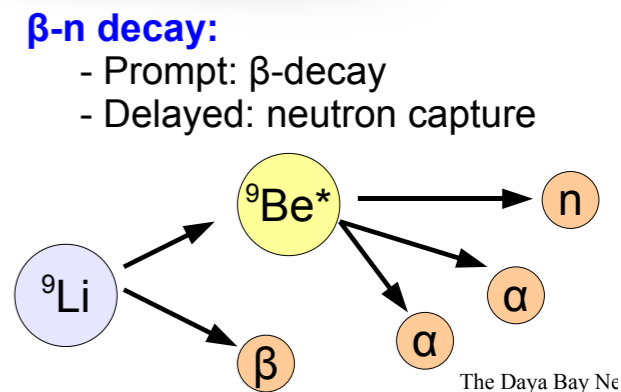
精度更高的能量响应模型

- 利用不同能量的 γ 峰和 ^{12}B 发生 β 衰变的连续能谱对能量模型的参数进行约束
 - 利用 ^{212}Bi 和 ^{214}Bi 的 $\beta+\gamma$ 对能量模型进行检验
 - 新的能量模型降低了50%的误差
- 精度更高的能量模型可以对绝对中微子能谱做更精确的测量

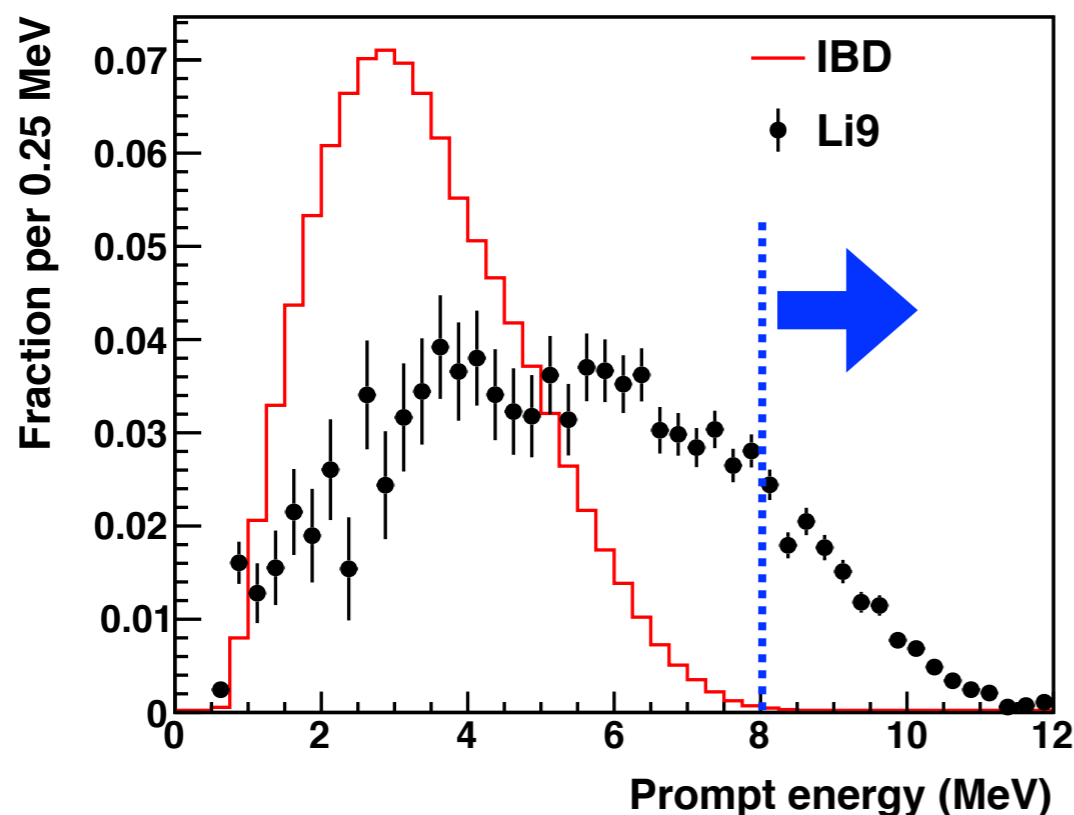


精度更高的Li9/He8本底与乏燃料估计 Daya Bay 13

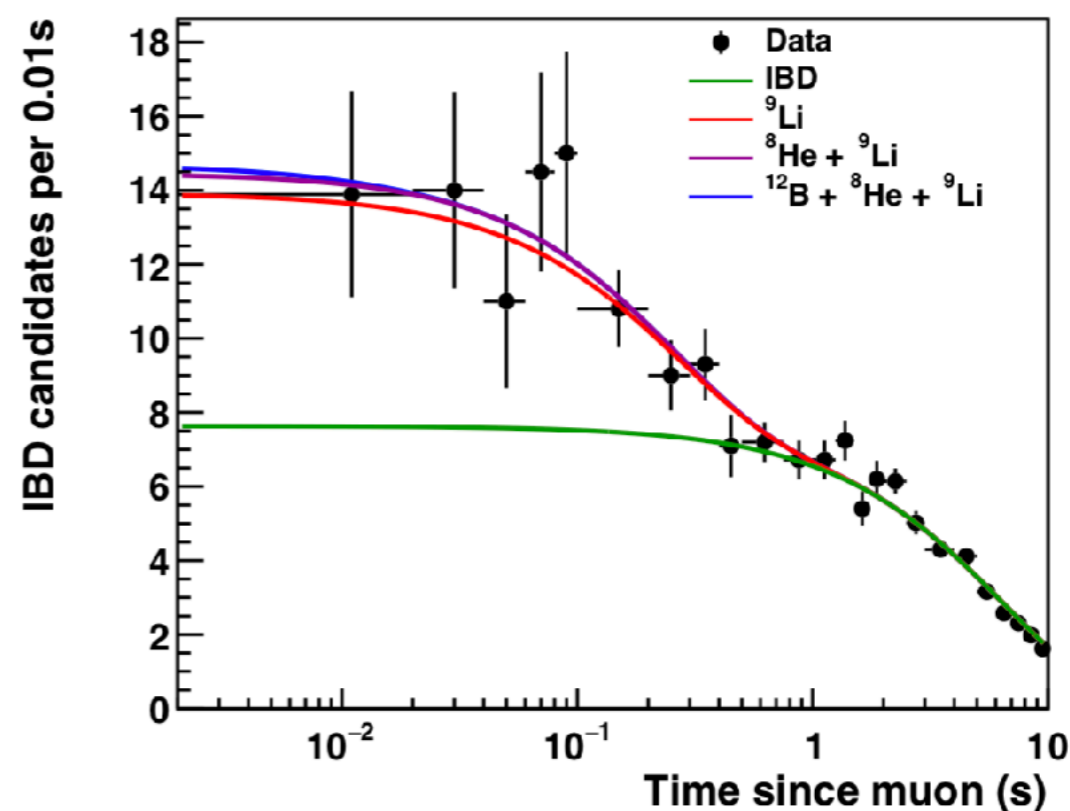
- 宇宙线与碳核反应产生的Li9/He8是第二大本底来源，它们可以发生β-n级联衰变，难以和中微子信号区分开来
- 利用更大统计量的数据，可以对Li9/He8的能谱和事例率做精度更高的测量，近点探测器的该项本底误差从50%降低到30%



挑选Li9事例时对快信号做更高能量的限制，得到更干净的Li9事例



对距离上个muon信号的时间做拟合，得到Li9/He8的产额



- 乏燃料会贡献额外0.3%的中微子事例，通过对历史移出的乏燃料的估计，误差从100%降低到30%

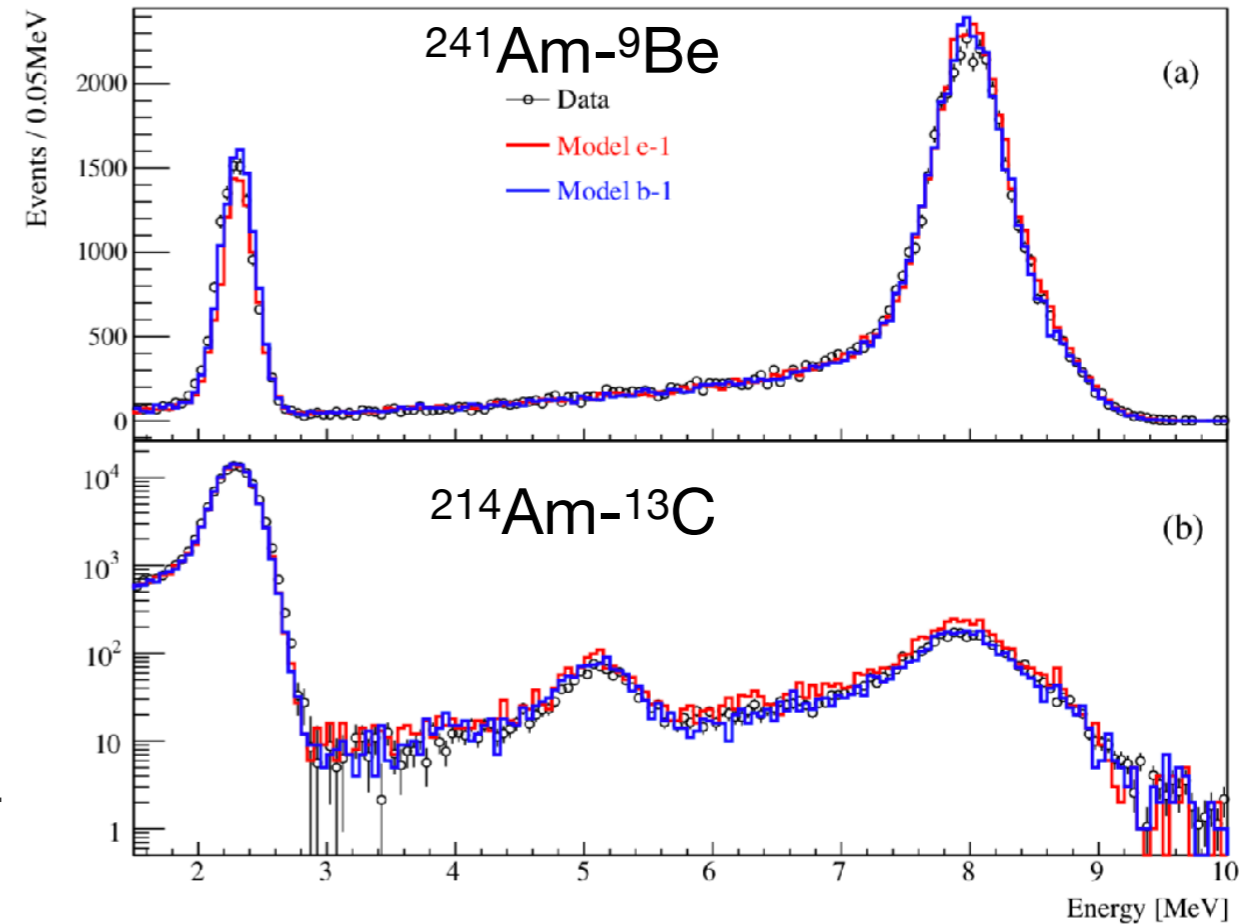
精度更高的中子绝对探测效率

- 探测效率的误差很大一部分来自于中子探测效率的误差，利用新的中子刻度数据可以对中子探测效率 ϵ_n 进行约束

探测效率

Source	ϵ	$\delta\epsilon/\epsilon$
Target protons	-	0.92%
Flasher cut	99.98%	0.01%
Capture time cut	98.70%	0.12%
Prompt energy cut	99.81%	0.10%
Gd capture fraction	84.17%	0.95%
nGd detection efficiency	92.7%	0.97%
Spill-in correction	104.9%	1.00%
Combined	80.6%	1.93%

ϵ_n
相对误差
为1.69%



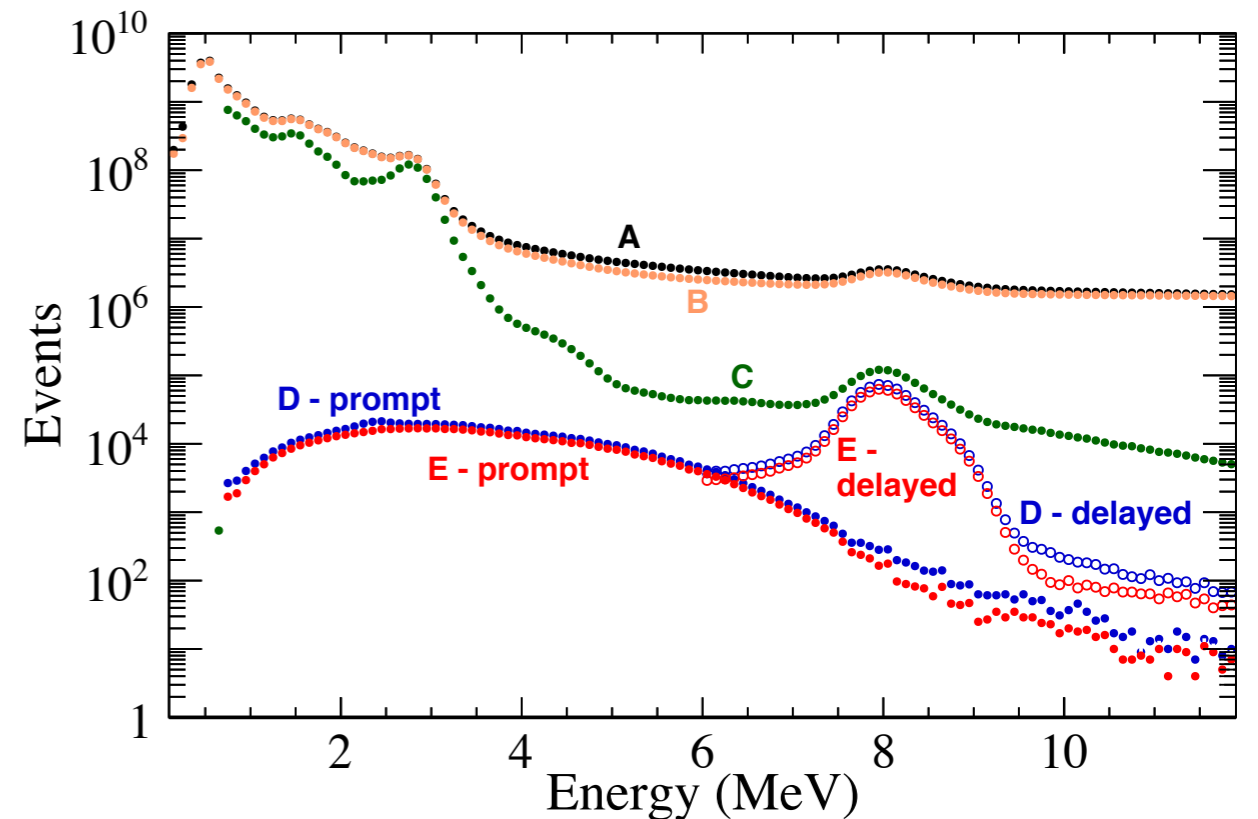
- 2016年底-2017年初，在3个自动刻度装置上安装了两种中子源 $^{241}\text{Am}-^{13}\text{C}$ 和 $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ ，可以在竖直方向的不同位置对探测器进行刻度

- 比较数据与模拟结果，从而评估中子探测效率的误差，利用1230天的数据，得到新的中子探测效率为

$$\epsilon_n = (81.48 \pm 0.60)\% \quad \text{相对误差为} 0.74\%$$

中微子事例挑选

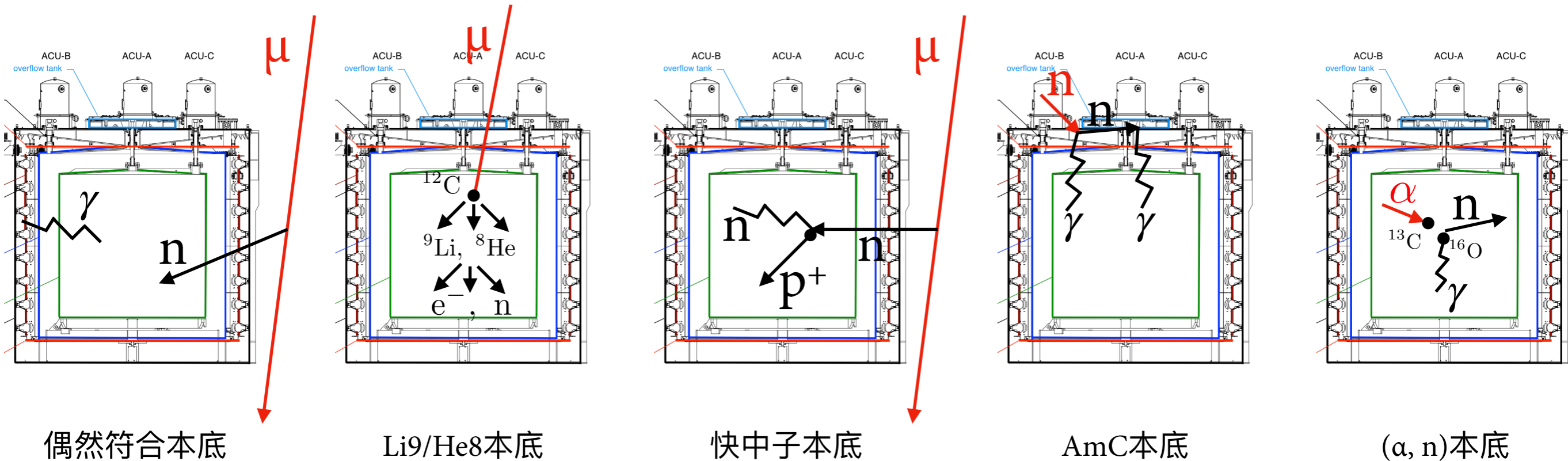
- 本次分析数据基于从2011-12-24到2017-8-30所取的1958天数据
- 挑选条件
 - 去除flasher等坏事例
 - 做宇宙线缪子的反符合
 - 要求快慢信号时间间隔为(1, 200) μs , 且前后没有触发信号
 - 要求快信号能量为(0.7, 12) MeV
 - 要求慢信号能量为(6, 12) MeV
- 近点探测到约350万中微子信号, 远点探测到50万中微子信号, 是目前世界上统计量最大的电子型反中微子数据样本
- 与上次分析相比 (Phys. Rev. D **95**, 07200), 增加了约60%的统计量



- (A) 所有信号
- (B) 去除flasher事例
- (C) 去除水池标记的缪子事例所在反符合时间窗口的事例
- (D) 挑选符合时间和能量条件的关联事例
- (E) 去除中心探测器标记的缪子事例所在反符合时间窗口的事例

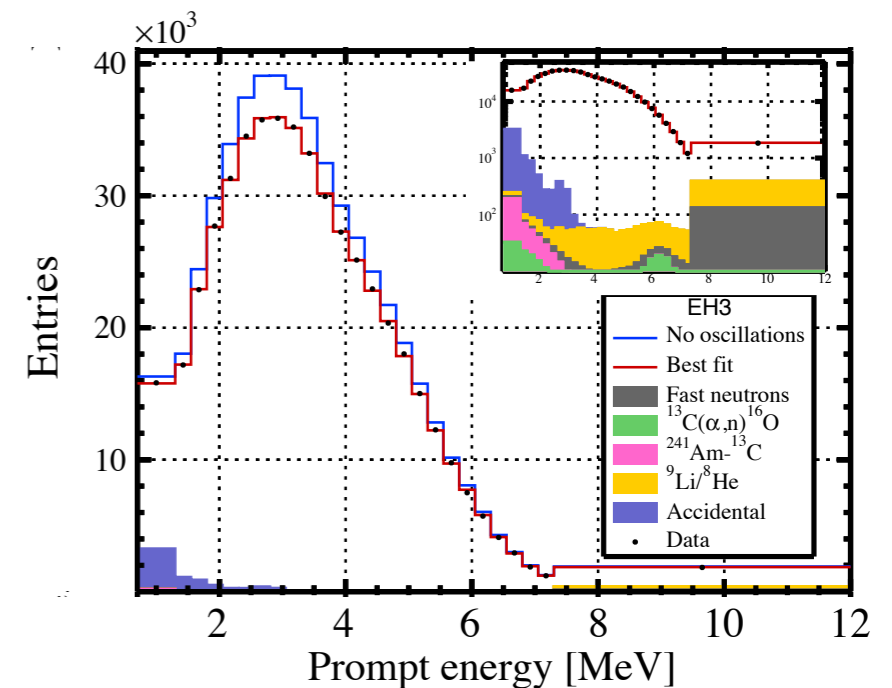
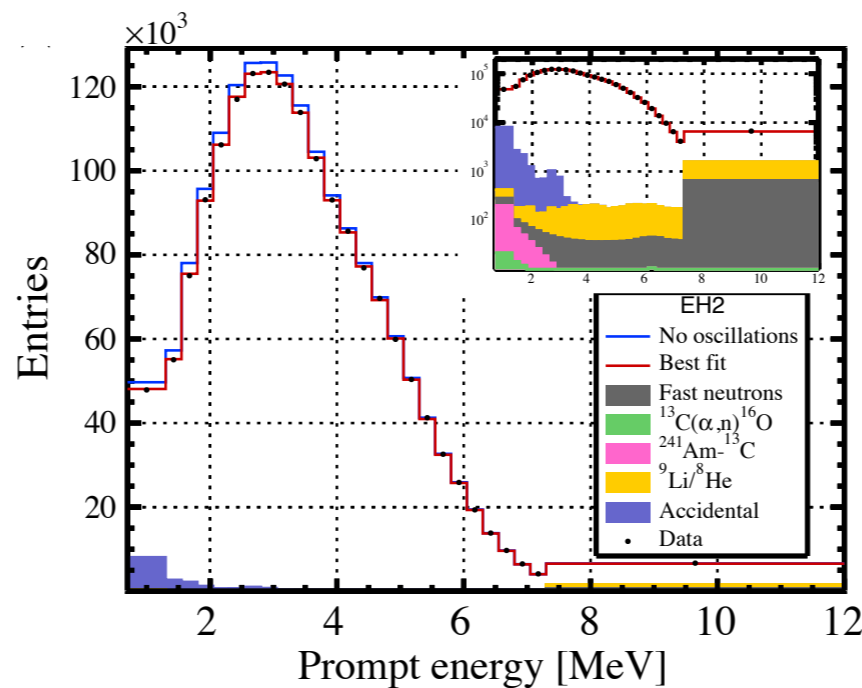
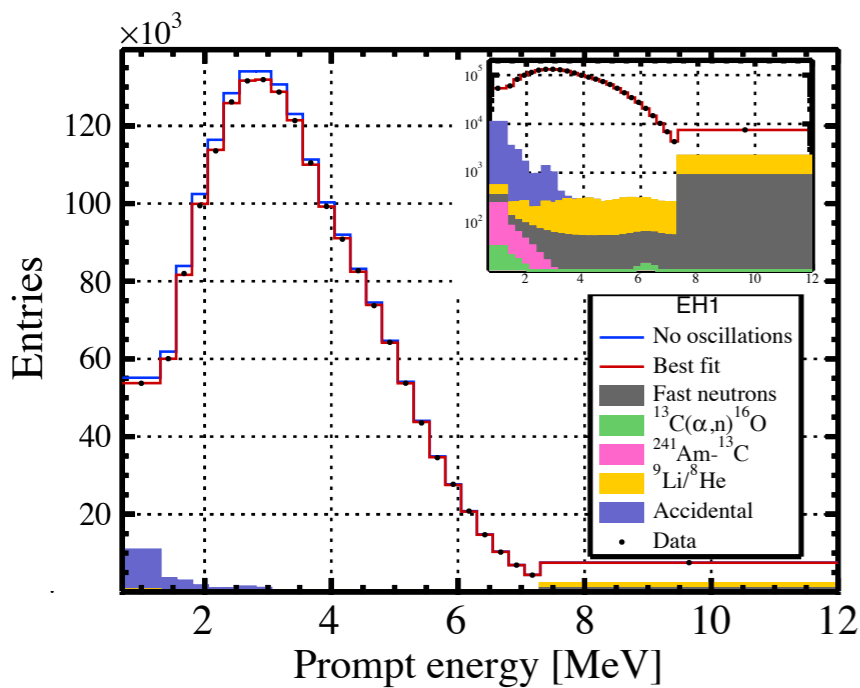
实验本底

		来源	B/S @ 近点	B/S @ 远点	误差
非关联本底	偶然符合本底	$(\gamma, n), (\gamma, \gamma), (n, n)$ 偶然符合	$\sim 1.1\%$	$\sim 1.3\%$	1%
	Li9/He8本底	宇宙线与碳核反应的产物	$\sim 0.3\%$	$\sim 0.3\%$	27%~42%
关联本底	快中子本底	宇宙线与岩石碰撞产生的快中子	$\sim 0.1\%$	$\sim 0.06\%$	< 20%
	AmC本底	中子在铁上的非弹性散射和俘获	$\sim 0.02\%$	$\sim 0.07\%$	45%
	(α, n) 本底	天然放射性 α , $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	$\sim 0.01\%$	$\sim 0.05\%$	50%



1958天的数据

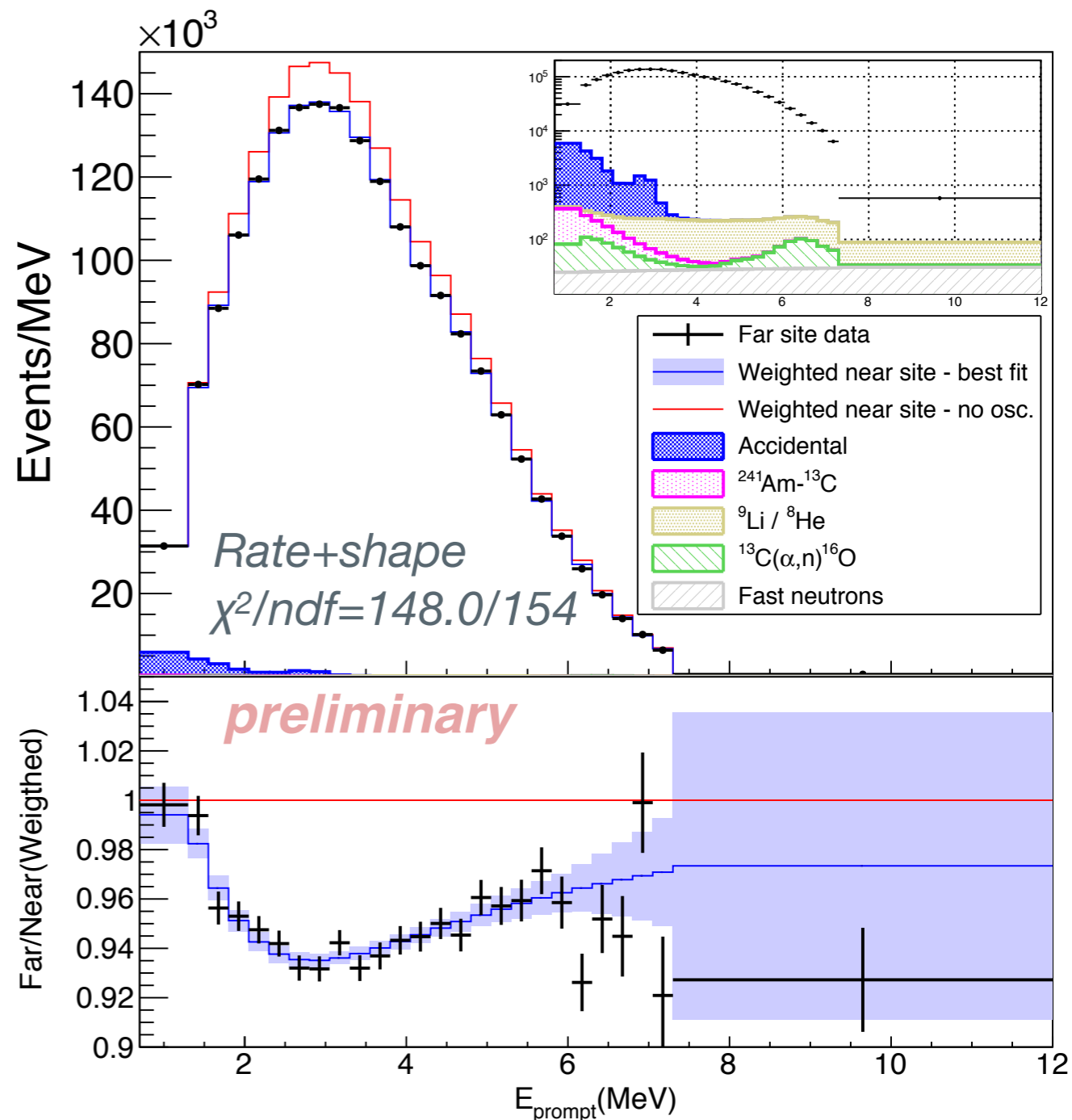
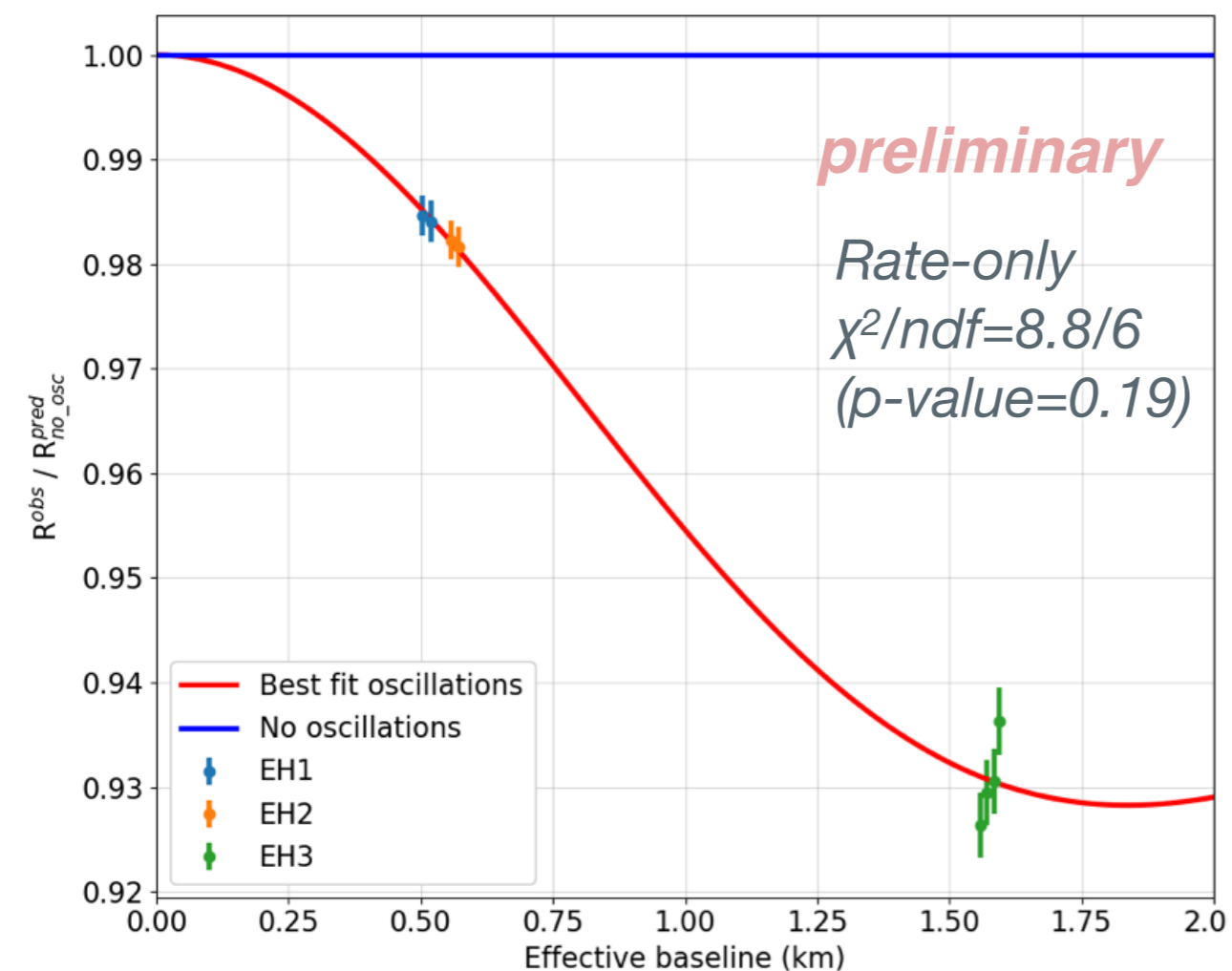
	EH1		EH2		EH3			
	AD1	AD2	AD3	AD8	AD4	AD5	AD6	AD7
$\bar{\nu}_e$ candidates	830036	964381	889171	784736	127107	127726	126666	113922
DAQ live time (days)	1536.621	1737.616	1741.235	1554.044	1739.611	1739.611	1739.611	1551.945
ϵ_μ	0.8261	0.8221	0.8576	0.8568	0.9831	0.9831	0.9829	0.9833
ϵ_m	0.9744	0.9748	0.9758	0.9757	0.9761	0.9760	0.9758	0.9758
Accidentals (day^{-1})	8.27 ± 0.08	8.12 ± 0.08	6.00 ± 0.06	5.86 ± 0.06	1.06 ± 0.01	1.00 ± 0.01	1.03 ± 0.01	0.86 ± 0.01
Fast neutron ($\text{AD}^{-1} \text{day}^{-1}$)	0.79 ± 0.10		0.57 ± 0.07		0.05 ± 0.01			
${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$ ($\text{AD}^{-1} \text{day}^{-1}$)	2.38 ± 0.66		1.59 ± 0.49		0.19 ± 0.08			
Am-C correlated 6-AD (day^{-1})	0.29 ± 0.13	0.27 ± 0.12	0.30 ± 0.14		0.24 ± 0.11	0.23 ± 0.10	0.23 ± 0.10	
Am-C correlated 8-AD (day^{-1})	0.15 ± 0.07	0.14 ± 0.06	0.12 ± 0.05	0.13 ± 0.06	0.04 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.02
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ (day^{-1})	0.08 ± 0.04	0.06 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.06 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02
$\bar{\nu}_e$ rate (day^{-1})	659.36 ± 1.00	681.09 ± 0.98	601.83 ± 0.82	595.82 ± 0.85	74.75 ± 0.23	75.19 ± 0.23	74.56 ± 0.23	75.33 ± 0.24



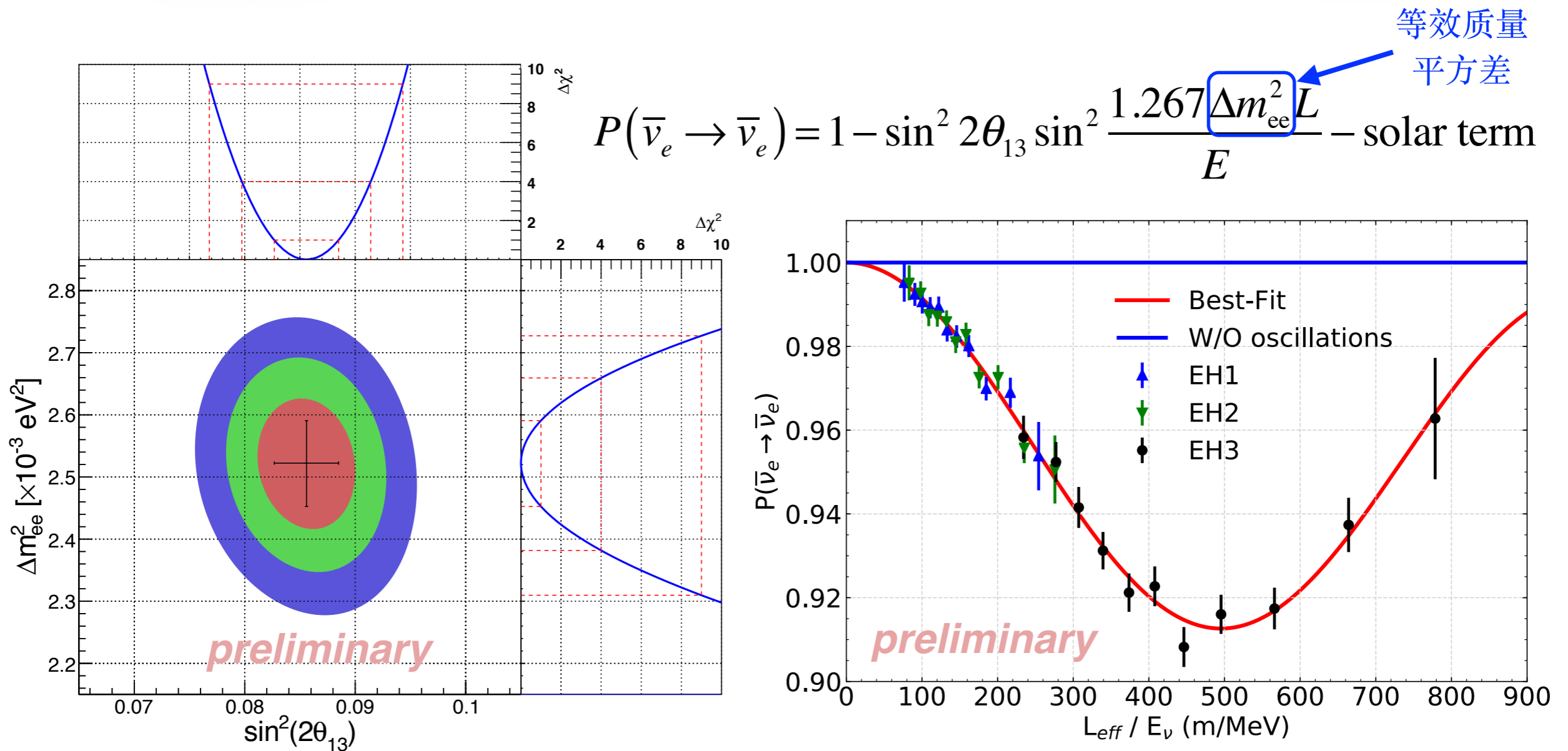
- 中微子事例率的统计误差: $\sim 0.11\%$ (近点), $\sim 0.29\%$ (远点)
- 本底对中微子事例率误差的贡献: $\sim 0.1\%$

振荡分析结果

- 事例数和能谱均显示出明显的振荡效应，拟合结果与3代中微子模型相符



振荡分析结果



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0856 \pm 0.0029$$

3.4%精度

统计误差占比60%

$$|\Delta m_{ee}^2| = (2.52 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

2.8%精度

统计误差占比50%

总结与展望



- 利用1958天的实验数据，分析得到

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0856 \pm 0.0029$$

$$|\Delta m_{ee}^2| = (2.52 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.47 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (NH)}$$

- 大亚湾实验将取数到2020年
 - $\sin^2 2\theta_{13}$ 的测量精度将达到3%
- 从2017年2月份开始，EH1-AD1开始用于液闪置换实验，不再参与中微子取数
 - 对振荡参数的测量影响很小，精度降低 $< 0.05\%$
 - 液闪置换实验将用来研究液闪纯化技术，以及不同液闪配方的光学性能
- 利用FADC的数据，可以修正单通道的电子学非线性，提高绝对能谱的测量精度



谢谢!

Backup

等效质量平方差

- Full oscillation probability:

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \left(\cos^2 \theta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} + \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}$$

- Effective oscillation probability:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{1.267 \Delta m_{ee}^2 L}{E} - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}$$

Advantages:
independent of
mass hierarchy
and solar
oscillation
parameters

- For Daya Bay's L/E values, the full formula becomes:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \simeq 1 - 4s_{13}^2 c_{13}^2 \left[\frac{1 - \cos(2\Delta_{32} \pm \phi)}{2} \right] - (\text{solar term}) \quad \text{where: } \Delta_x = \Delta m_x^2 \frac{L}{4E}$$

$$= 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (\Delta_{32} \pm \phi / 2) - (\text{solar term})$$

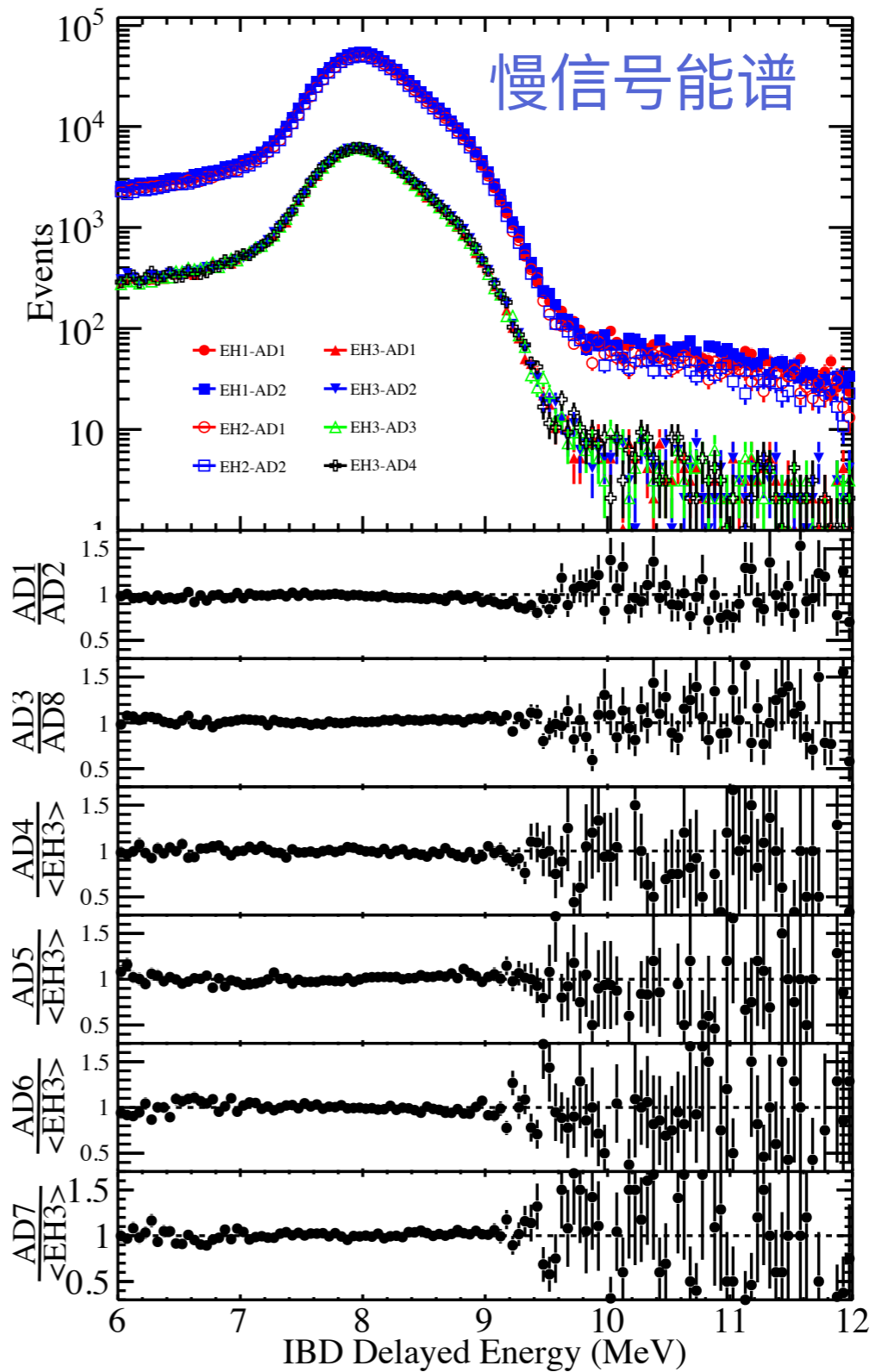
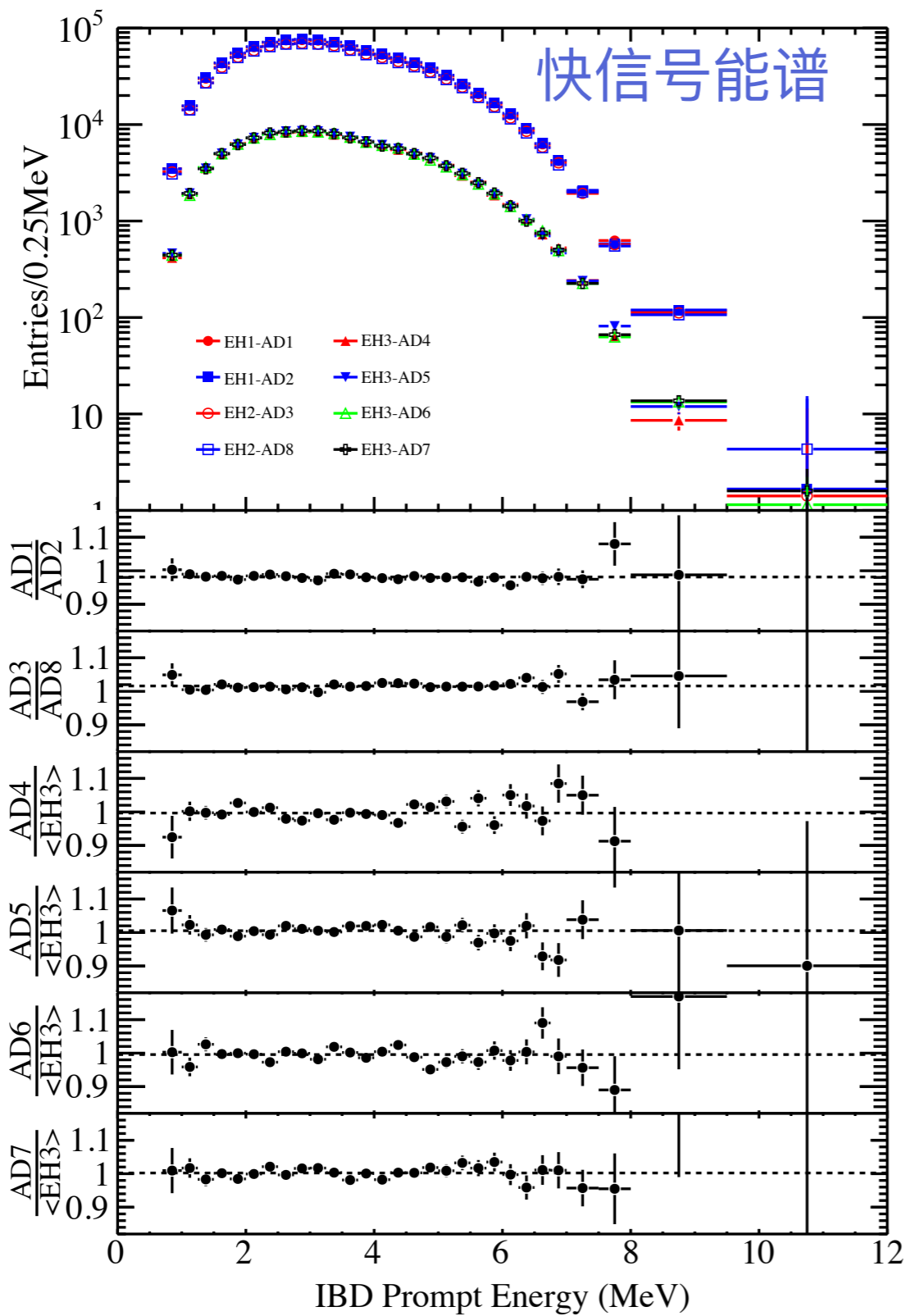
Comparing this expression with the effective one we conclude:

$$|\Delta m_{ee}^2| = |\Delta m_{32}^2| \pm \left(\phi \times \frac{4E}{L} \right) / 2$$

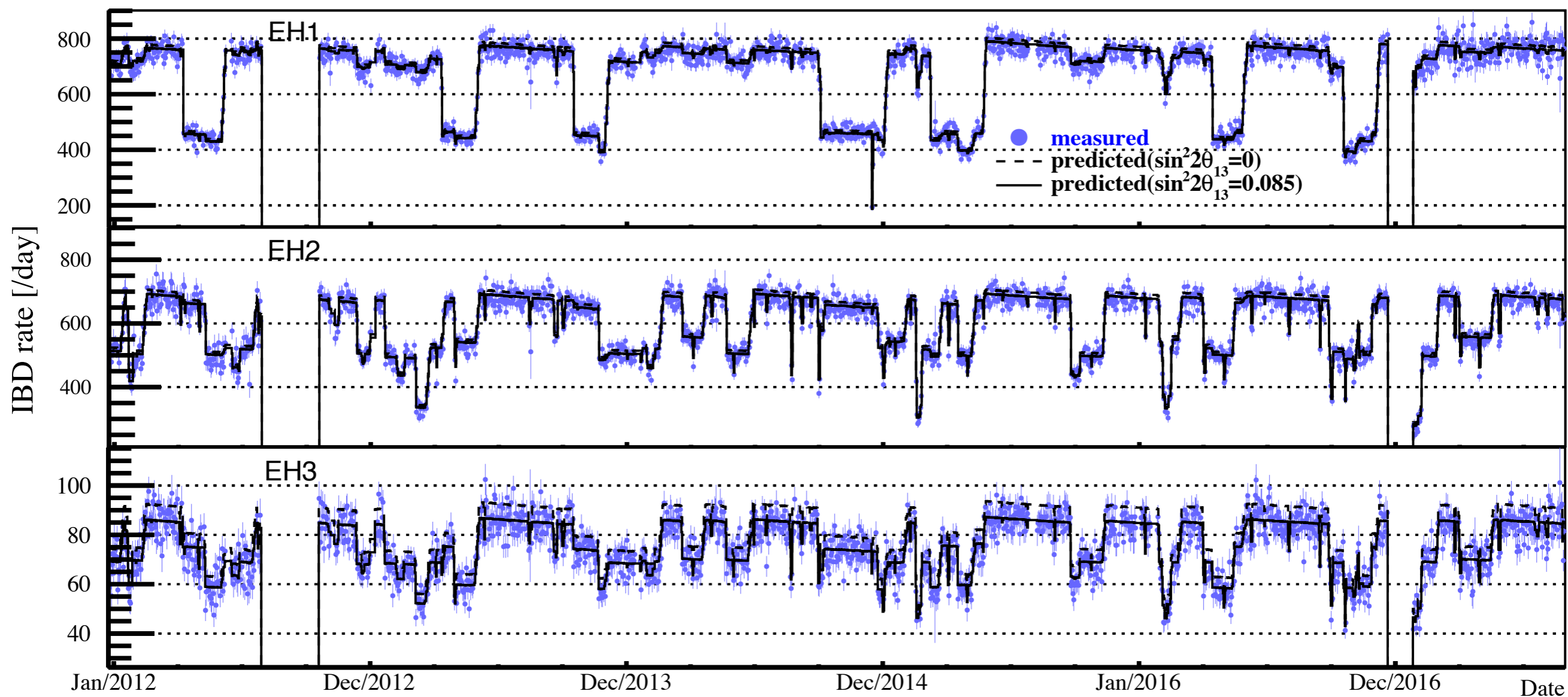
$$= |\Delta m_{32}^2| \pm (5.17 \times 10^{-5}) \text{eV}^2$$

The fit is always done with the
full oscillation probability.

Side-by-side 能谱比较

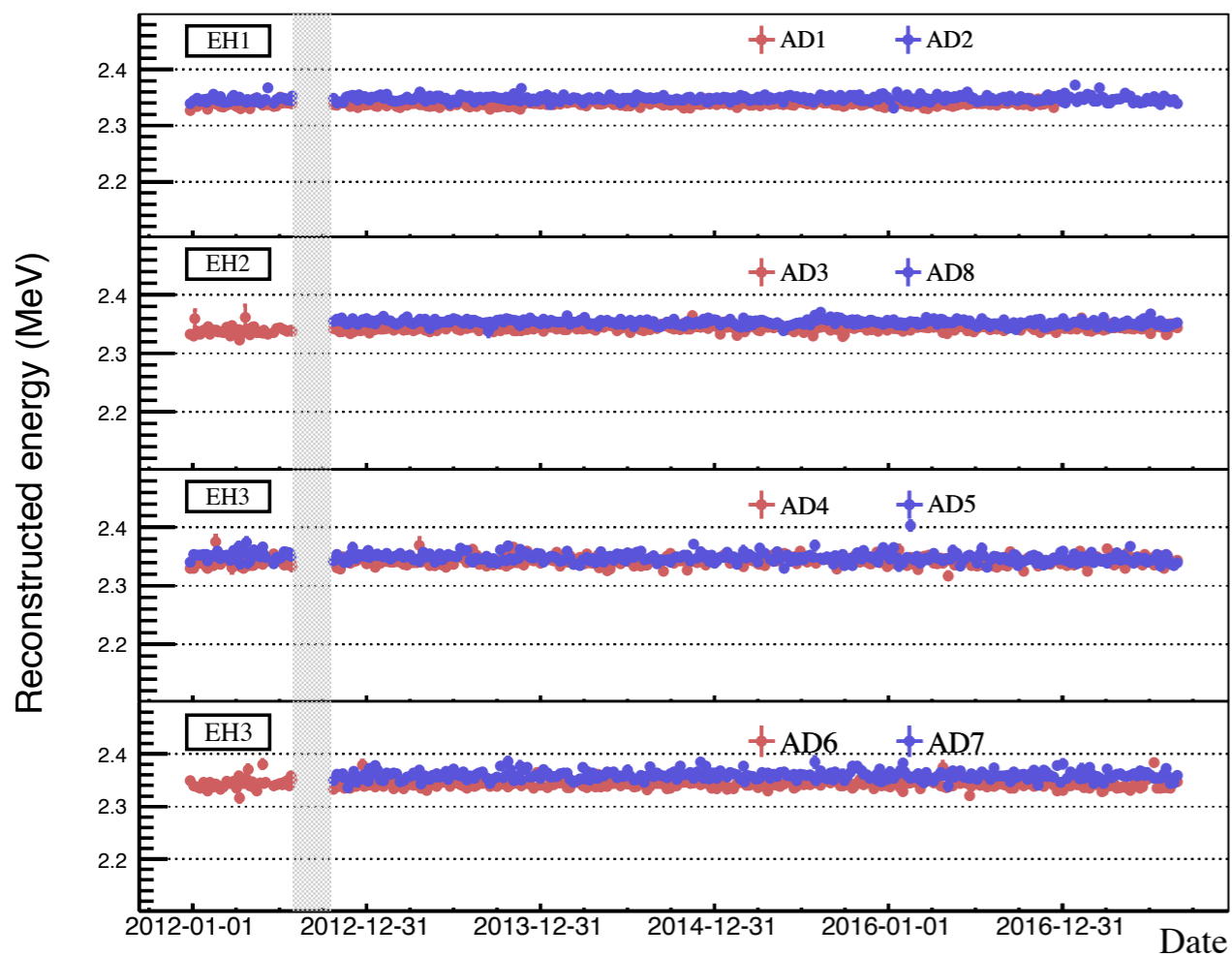


IBD Candidates vs. Real Time



能标的稳定性

^{60}Co calibration method



spn-nGd calibration method

