



中微子振荡和 液闪探测器研究

卓越中心2017年工作汇报

于泽源

高能所

2017年12月2日

科研教育经历

- 2004年-2008年，中国科学技术大学，本科
- 2008年-2013年，中科院高能所，博士
 - 大亚湾实验探测器刻度、重建、本底分析，结果被合作组文章采用
 - 2012年大亚湾实验发现 θ_{13} 非零的中方三个核心分析人员之一
 - 2012年晨光杯特别奖：温良剑，占亮，于泽源
- 2013年至今，中科院高能所，助理研究员、副研究员
 - 参与并领导大亚湾实验物理分析
 - 大亚湾实验中美两套重建算法，2012年至今5篇 θ_{13} 文章中4篇使用本人重建算法
 - 不断改进系统误差：如相对能标误差（设计值0.5%，2012年0.5%，2015年0.2%）
 - 新重建方法研究
 - 缪子径迹重建、反卷积、深度学习等
 - 液闪探测器核心技术研究

2017年工作总结

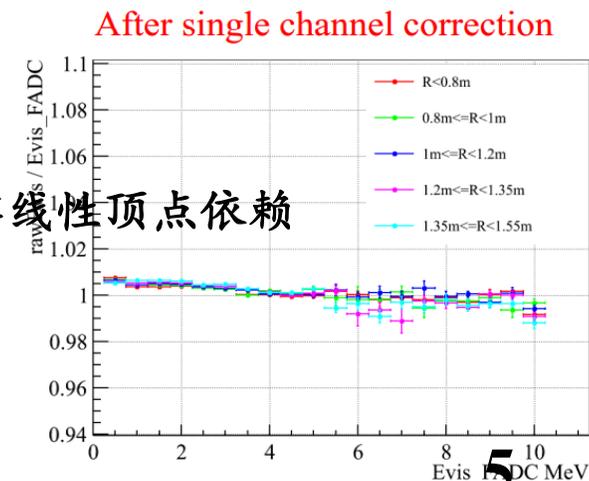
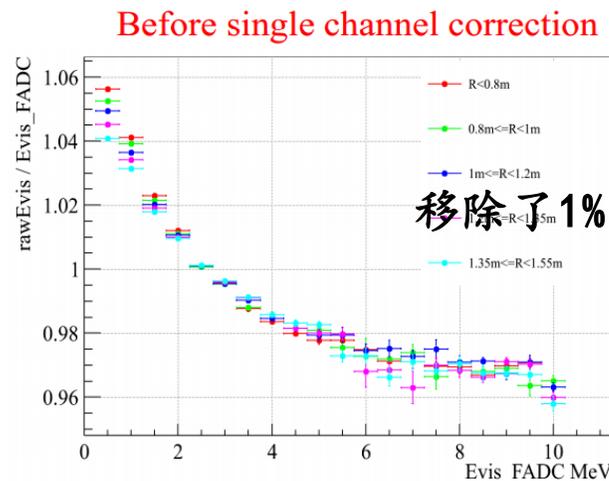
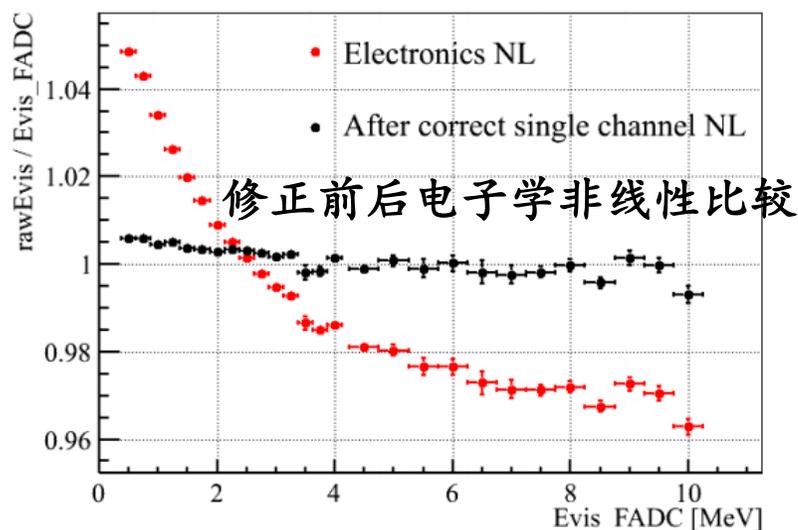
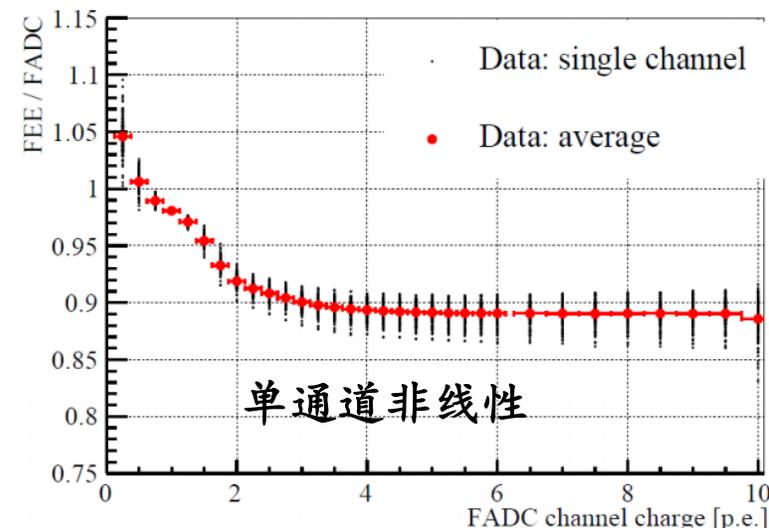
- **担任大亚湾实验分析协调委员会(ACC)委员 (40%时间)**
 - 2016年12月起, 领导高能所分析小组开展数据分析工作
 - 准备新一轮数据产生和中微子振荡分析
- **光电倍增管波形重建 (10%时间)**
 - 开发了反卷积算法, 克服了以往简单积分、波形拟合等算法缺点
 - 完成技术文章一篇, arXiv 1707.03699, 综述了各种重建方法
- **液体闪烁体核心技术研究 (50%时间)**
 - 液闪能量模型、光学模型、天然放射性本底研究
 - 本人自2015年起推动大亚湾液闪置换实验
 - 2017年2月完成置换, 本人负责数据获取和数据分析

大亚湾物理分析

- 推动ACC决定2018年发布新的中微子振荡结果
- 2017年3月以来，推动新一轮数据重建
 - 使用新的重建算法重建所有数据（2011年12月-2017年9月）
 - 降低探测器能量非线性模型的系统误差
 - 困难：数据分析人员越来越少
 - 美方参与度大幅度降低
 - 高能所：大部分人力在江门实验，需要从头培养学生开展工作
 - 目前克服多重困难，完成算法更新，预期12月10日开始重建
 - 带领博士生韦良红、胡健润、吴文杰等从零基础开始参加数据分析

大亚湾物理分析：重建更新

- 大亚湾实验新安装的FADC系统**精确测量**了原有电子学系统的**非线性**
 - 使用了新开发的反卷积波形重建
 - 该方法已传播到德国、法国、清华大学等
- **推动**合作组采用**单通道非线性修正**
 - 原来**8%**的电子学非线性降为**0.5%**
 - 移除了非线性对顶点的依赖：**1%**

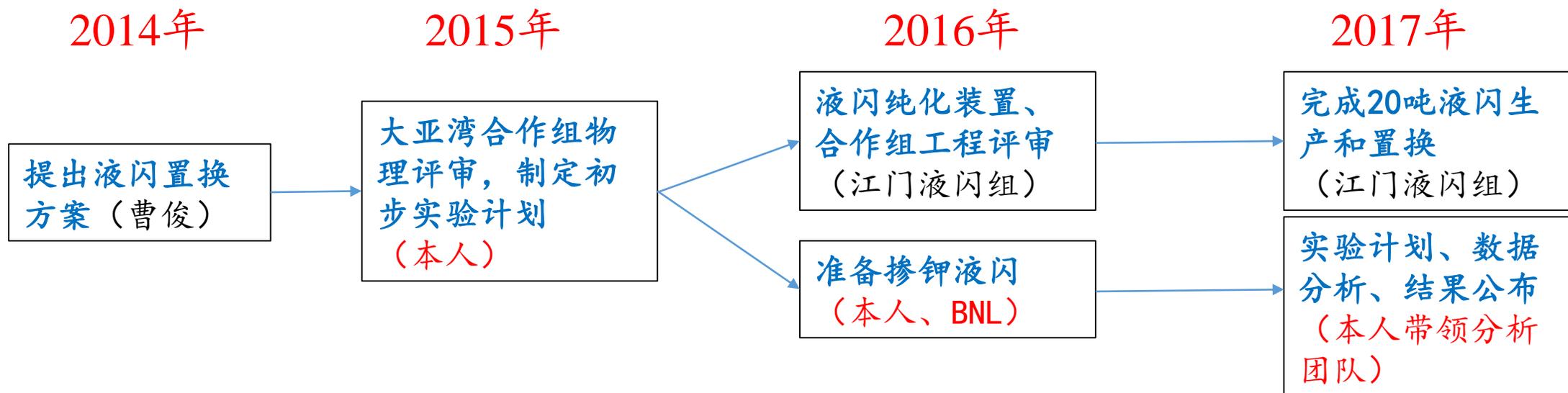


液闪核心性能研究

- 液体闪烁体是反应堆中微子实验的经典探测介质
- 江门实验将使用2万吨液闪，对液闪有了新的要求：
 - 衰减长度大于20m（波长430 nm光子）
 - 最大化光产额
 - 低天然放射性本底污染
 - 能量非线性误差小于1%
- 在大亚湾建立了20吨液闪中试工厂，开展液闪纯化实验
 - 如何检验纯化后液闪质量？

实验	液闪质量	^{238}U 含量	^{232}Th 含量
Borexino	约600吨	$< 10^{-17}$ g/g	$< 10^{-17}$ g/g
KamLAND	约1000吨	$< 10^{-16}$ g/g	$< 10^{-16}$ g/g
Daya Bay	160吨普通液闪	2×10^{-14} g/g	4×10^{-14} g/g
JUNO	20,000 吨	要求小于10^{-15} g/g	要求小于10^{-15} g/g

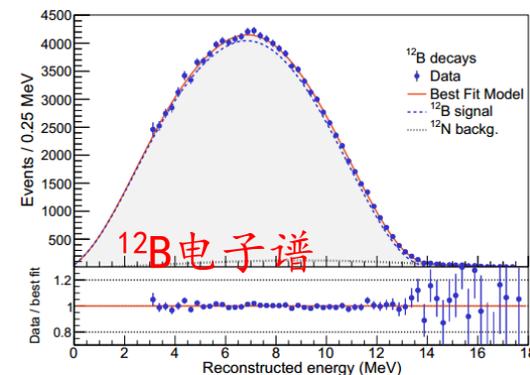
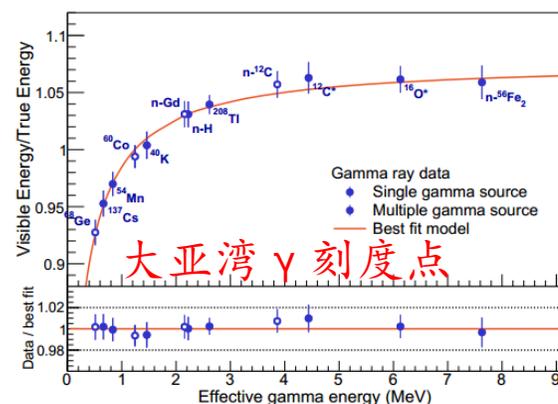
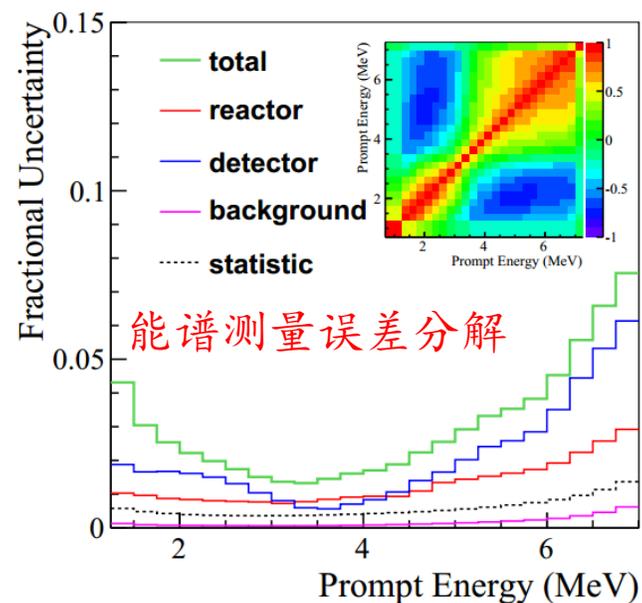
大亚湾液闪置换



液闪核心问题	大亚湾液闪置换实验
光产额优化和光学模型建立	分步增加PPO和bis-MSB含量, 测量光产额并调节模拟
能量非线性误差小于1%	掺 ⁴⁰ K以研究1 MeV区间电子的非线性
天然放射性纯度	运行15天可达 10^{-15} g/g检测线

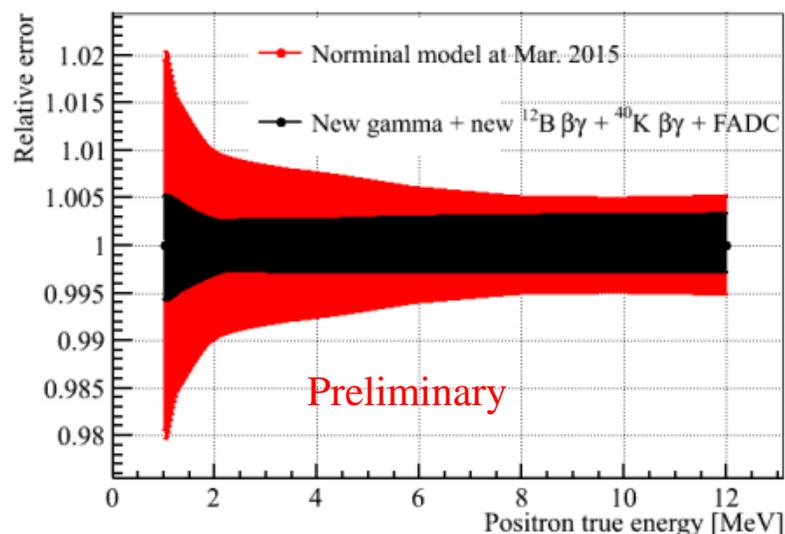
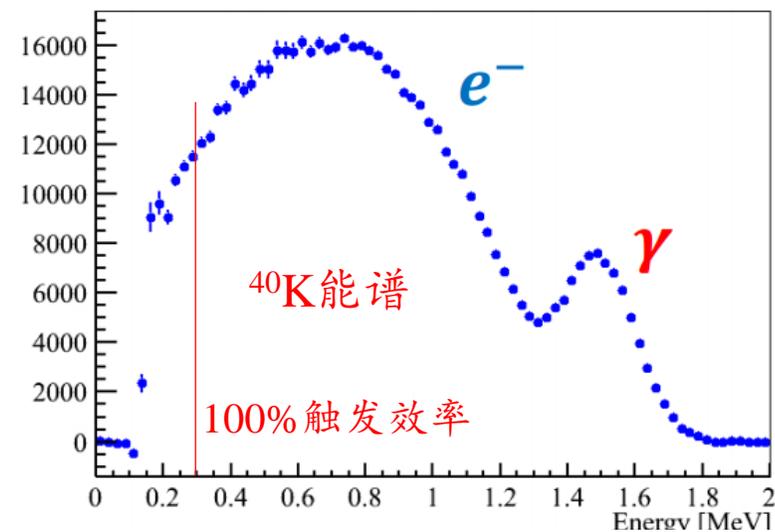
液闪能量响应模型

- 能量非线性模型是目前大亚湾中微子能谱测量最大误差来源
- 构建正电子能量模型的一般方法
 - 基于 γ 刻度源和 ^{12}B β 谱
 - 利用MC构建 γ 和 β 之间转换关系
 - 大亚湾模型误差仍大于1%
- 提高大亚湾能量模型精度的意义
 - 精确测量反应堆中微子能谱
 - 给江门实验提供更精确的输入
 - 江门探测器刻度方法的预研



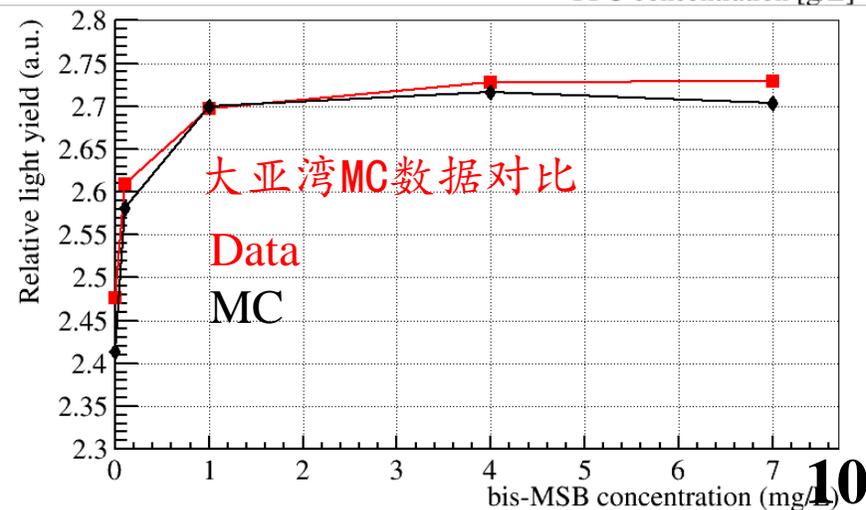
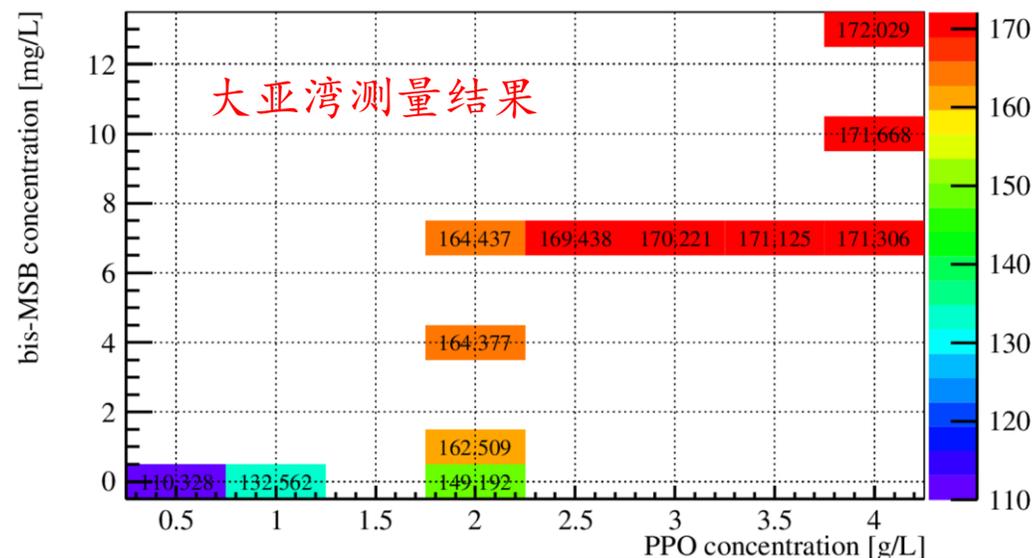
液闪能量响应模型

- 首次完成液闪掺 β 衰变核素的刻度方法
 - 液闪置换前，将1升K-LS混入Gd-LS
 - 精确测量了 ^{40}K β 谱，降低 γ 到电子转换模型的影响
- 指导博士生黄永波完成
 - γ 刻度源数据重分析，误差从1%降低至0.5%
 - 新安装FADC系统对大亚湾电子学非线性精确测量，误差从2%降低至0.5%
 - ^{12}B β 谱分析，统计量提高了2倍
 - 拟合得到能量模型，相对误差较之前降低了1.5至3倍
- 计划用于2018年大亚湾新的中微子振荡和反应堆能谱测量结果中



光产额和光学模型研究

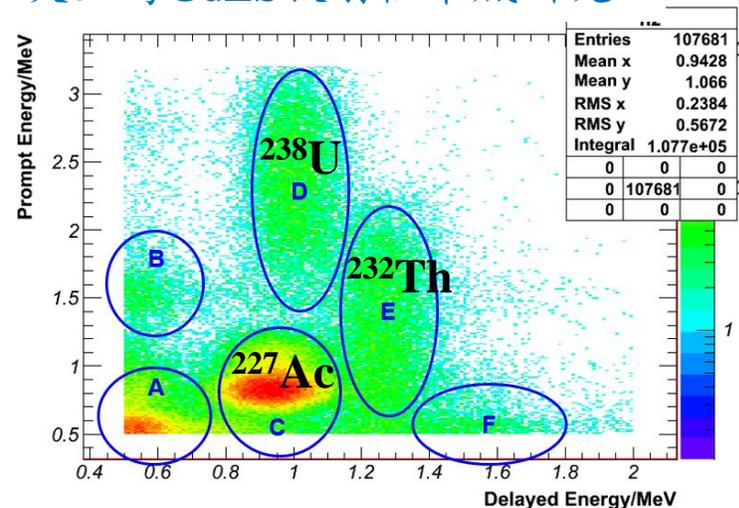
- 江门实验光产额是确定中微子质量顺序的最重要参数
- 在液闪置换后，逐步提高PPO和bis-MSB含量，精确测量光产额
 - 指导博士生张成才完成
 - 误差0.15%，以往小实验1%误差
- 通过刻度数据double ratio和调节模拟两种方法，给出江门液闪配方
 - PPO 2.5 g/L (确定了PPO采购总量)
 - Bis-MSB 1.0 mg/L (待确定)
- 和直接使用大亚湾液闪配方相比，模拟显示光产额提高了5%



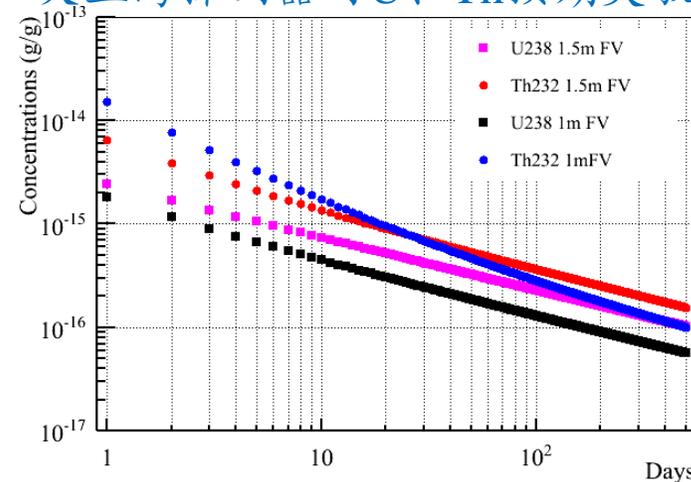
放射性本底研究

- 本人详细研究了大亚湾实验中天然放射性本底
 - 首次发现GdLS中 ^{227}Ac 的富集效应
 - 对未来实验Gd纯化方法提出要求
 - 计算了天然放射性中 α 在液闪中产生的 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 本底
 - 计算结果被大亚湾文章沿用至今
 - 发表文章 CPC 38, No. 11 (2014) 116201
- 基于上述工作, 计算了大亚湾探测器对U、Th的90% C.L.探测灵敏线
 - 运行15天可达 10^{-15} g/g

大亚湾GdLS放射性本底研究

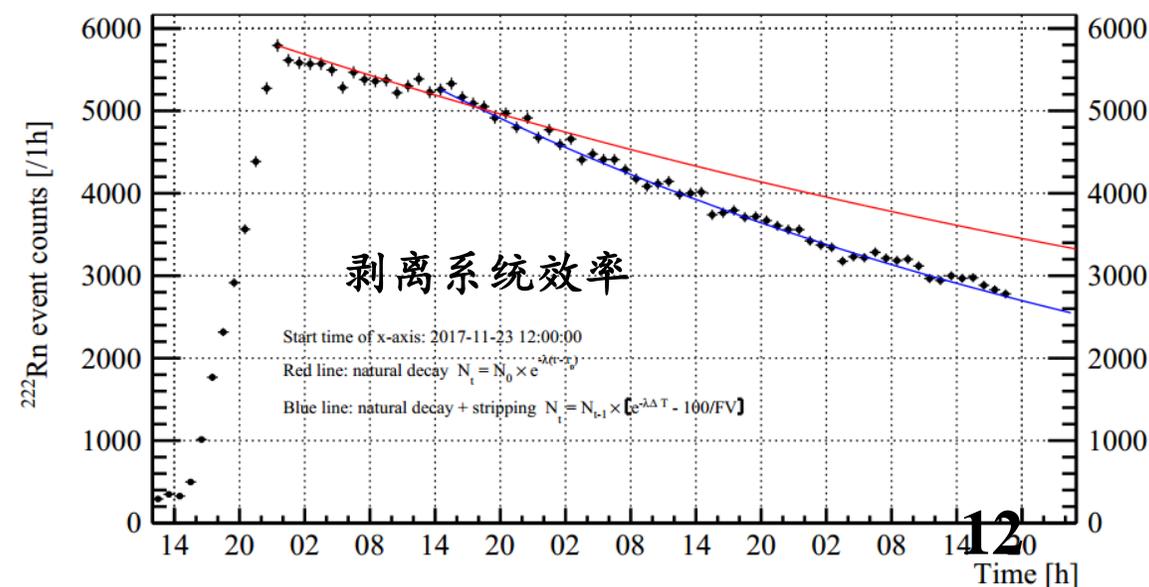
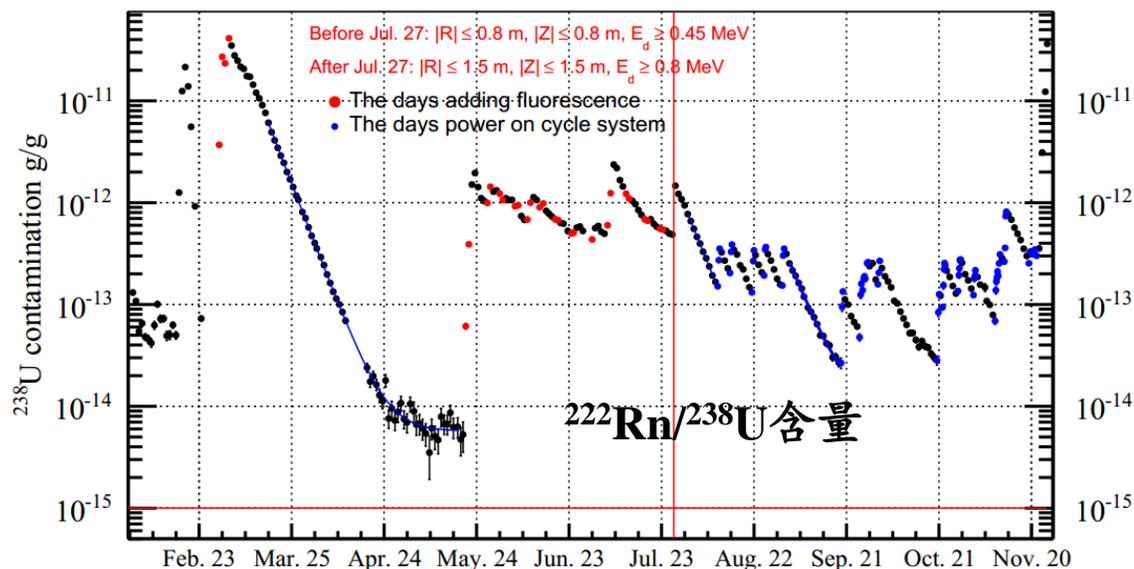


大亚湾探测器对U、Th预期灵敏度



放射性本底研究

- 液闪置换后，先后指导吴文杰、张晓峰、Andrey完成放射性本底研究
 - LAB+0.5 g/L PPO 液闪本底测量
 - $^{238}\text{U} = (5.5 \pm 1.1) \times 10^{-15} \text{ g/g}$, $^{232}\text{Th} = (2.3 \pm 0.8) \times 10^{-15} \text{ g/g}$
 - LAB+4.0 g/L PPO + 13 mg/L bis-MSB 液闪本底测量
 - $^{238}\text{U} = (2.7 \pm 0.3) \times 10^{-14} \text{ g/g}$
- 组织中意双方每两周召开电话会讨论本底测量结果
- 和液闪组合作完成探测器 ^{222}Rn 检漏、剥离系统效率研究等



会议报告、文章

- 文章

- Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment, PhysRevD.95.072006, 合作组文章, 做出重要贡献
- The Flash ADC system and PMT waveform reconstruction for the Daya Bay Experiment, 通讯作者, arXiv 1707.03699, 投稿NIMA, 已回复审稿人意见

- 会议报告

- 大亚湾

- Neutrino 2016, 代表合作组首次公布多项新结果
 - PANIC 2017, Beijing
 - Neutrino Colloquium 2017, Prague

- 反应堆中微子综述报告

- NuFact 2017, Review of reactor neutrino experiments
 - NuPhys 2017, Current Results on Oscillation Physics from Reactor Neutrino Experiments

指导学生、基金项目

- 副导师：黄永波
 - 其获2017年国科大一等学业奖学金（17位一等/高能所博士总数270人）
- 协助指导：张成才、胡健润、韦良红、吴文杰、张晓峰等
- 主持基金委青年基金一项 2014-1017
 - “基于大亚湾实验的宇宙线研究”
- 基金委重大项目主要参与人员 2015-2018
 - “大亚湾实验物理分析和新探测器关键技术研究”，共五个子课题
 - 能量非线性模型：本人带领分析小组开展攻关研究
 - 中微子质量平方差测量（山东大学）
 - 反应堆能谱（华北电力大学）
 - 电子学非线性：大亚湾安装FADC取数系统，本人负责数据采集和分析
 - 液闪非线性研究：大亚湾进行液闪置换实验，本人负责离线软件、数据分析等

工作计划

- **领导高能所团队继续开展大亚湾实验数据分析工作**
 - 降低液闪非线性模型等系统误差
 - 更新中微子振荡参数测量等物理结果，保持世界领先
 - 培养新学生参加数据分析，研究新的数据分析技术
- **和团队一起掌握液闪探测器核心性能**
 - 深入研究液闪能量模型、光学模型、低本底技术，成为世界范围内的专家
 - 目标做到世界上理解最清楚的液闪探测器
- **准备大亚湾和液闪相关文章（4到5篇）**
 - 能量非线性模型精确刻度、液闪衰减长度监测、氦在液闪中扩散速度
 - 大亚湾探测器模拟、液闪光学模型等