



晨光杯评选答辩报告

PHYSICAL REVIEW LETTERS **123**, 111801 (2019)

Extraction of the ^{235}U and ^{239}Pu Antineutrino Spectra at Daya Bay

胡健润

高能物理研究所

2021年8月16日

概要

PHYSICAL REVIEW LETTERS **123**, 111801 (2019)

Extraction of the ^{235}U and ^{239}Pu Antineutrino Spectra at Daya Bay

本人为该大亚湾合作组文章的主要贡献者

- 研究背景
- 文章介绍
- 文章影响

概要

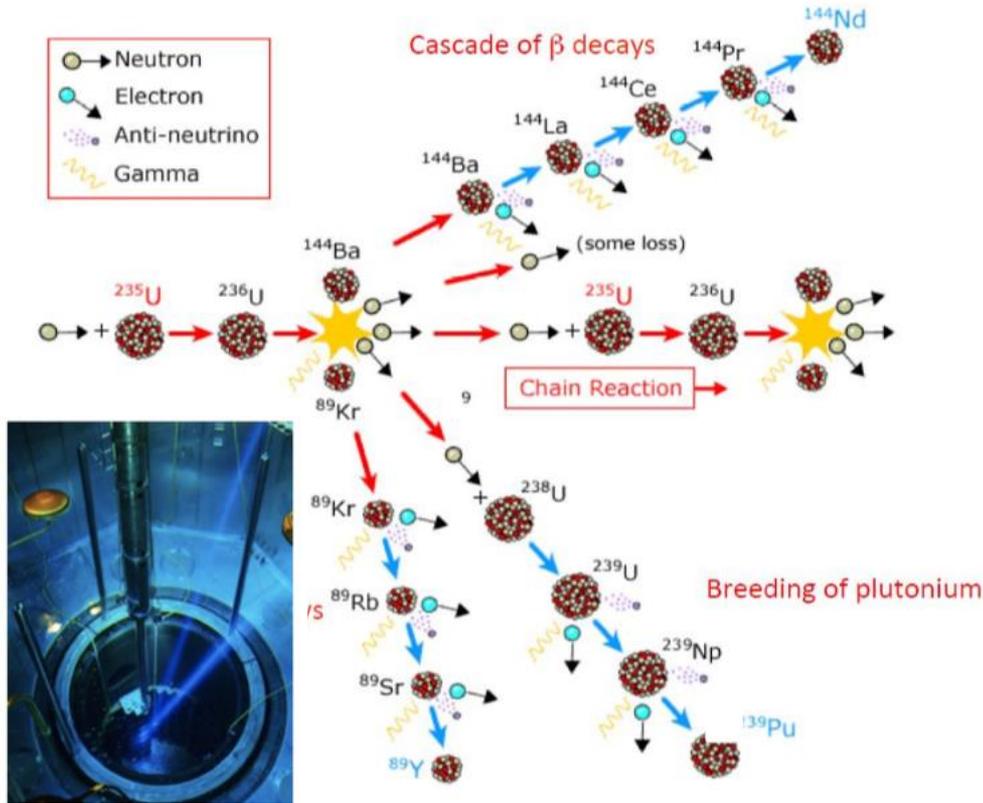
PHYSICAL REVIEW LETTERS **123**, 111801 (2019)

Extraction of the ^{235}U and ^{239}Pu Antineutrino Spectra at Daya Bay

- 研究背景
- 文章介绍
- 文章影响

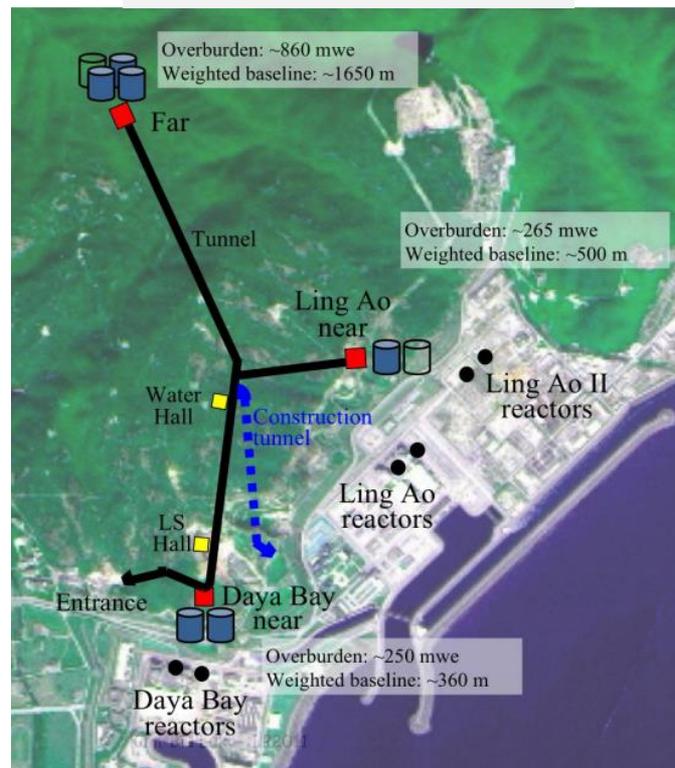
反应堆中微子

- 反应堆在运行过程中， ^{235}U ， ^{238}U ， ^{239}Pu ，和 ^{241}Pu 的自持链式反应 \rightarrow 把原子核的结合能释放出来 \rightarrow 实现核能的利用。
- 这四种核素的裂变产物中有大量的丰中子核素，容易发生 β 衰变并产生电子型反中微子 ($\bar{\nu}_e$)。



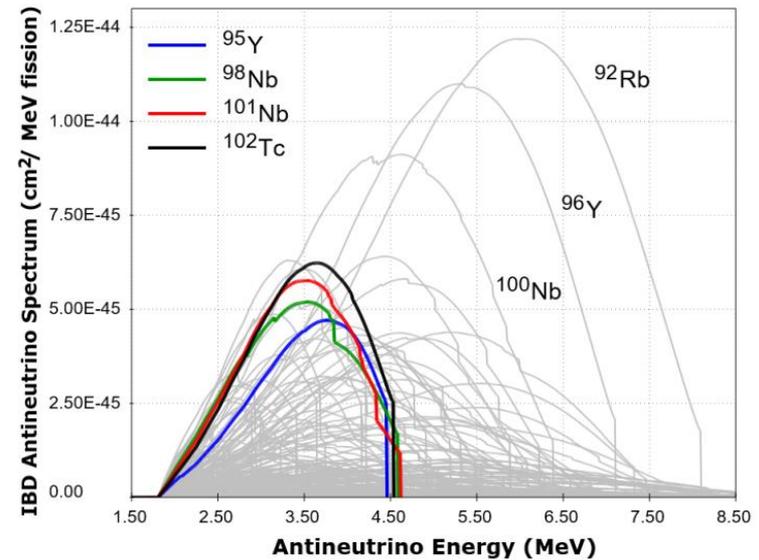
Jianrun Hu

大亚湾中微子实验

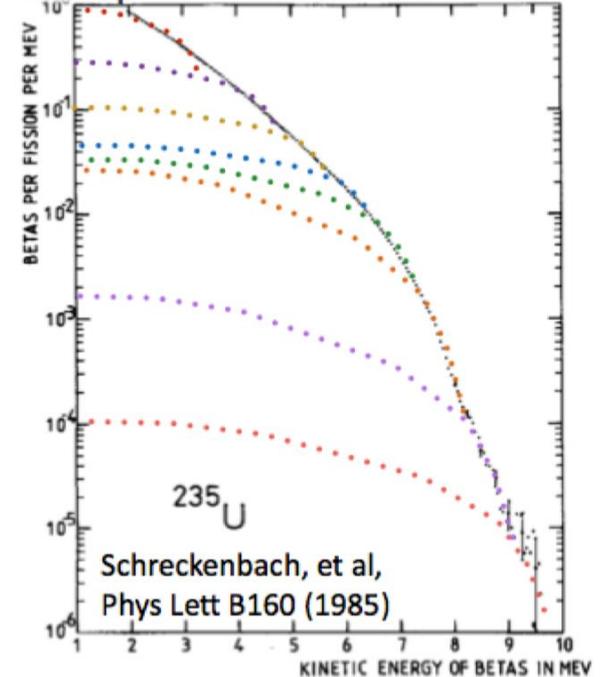


反应堆中微子能谱

- Summation (ab initio) 方法
 - > 6000 β 衰变分支
 - 核数据中有大量缺失数据
 - ~30% 禁介跃迁
 - ~10% 的相对误差
- Conversion方法
 - 用大于30条 β 衰变虚拟分支去拟合ILL实验的测量数据得到转换的中微子谱 (^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu)
 - 旧模型: ILL + Vogel (^{238}U) model (1980s)
 - 新模型: Huber + Mueller (^{238}U) model (2011)
 - ~2.4% 的相对误差

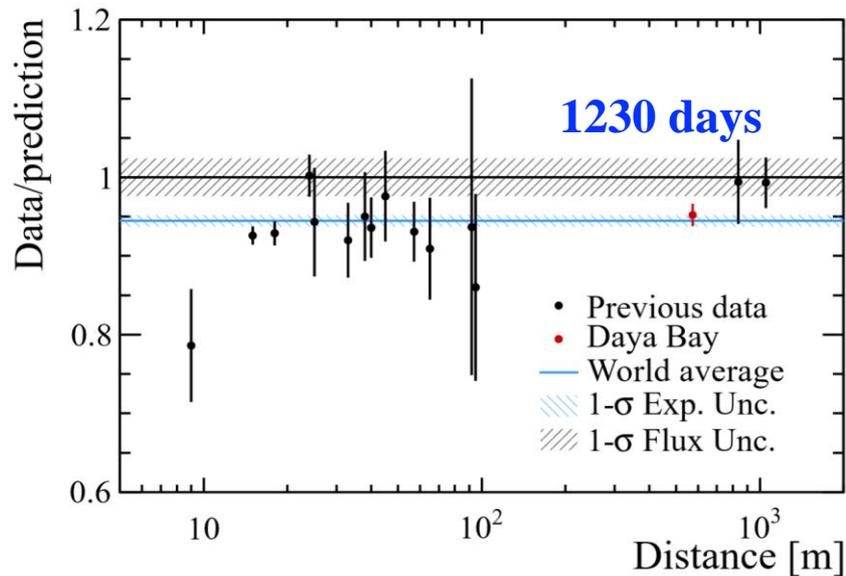


Example: Fit virtual beta branches



反应堆中微子反常

- 大亚湾实验测量到的反应堆中微子流强和之前短基线实验的结果一致，但是比Huber-Mueller模型的预期偏低5%



- 可能原因：

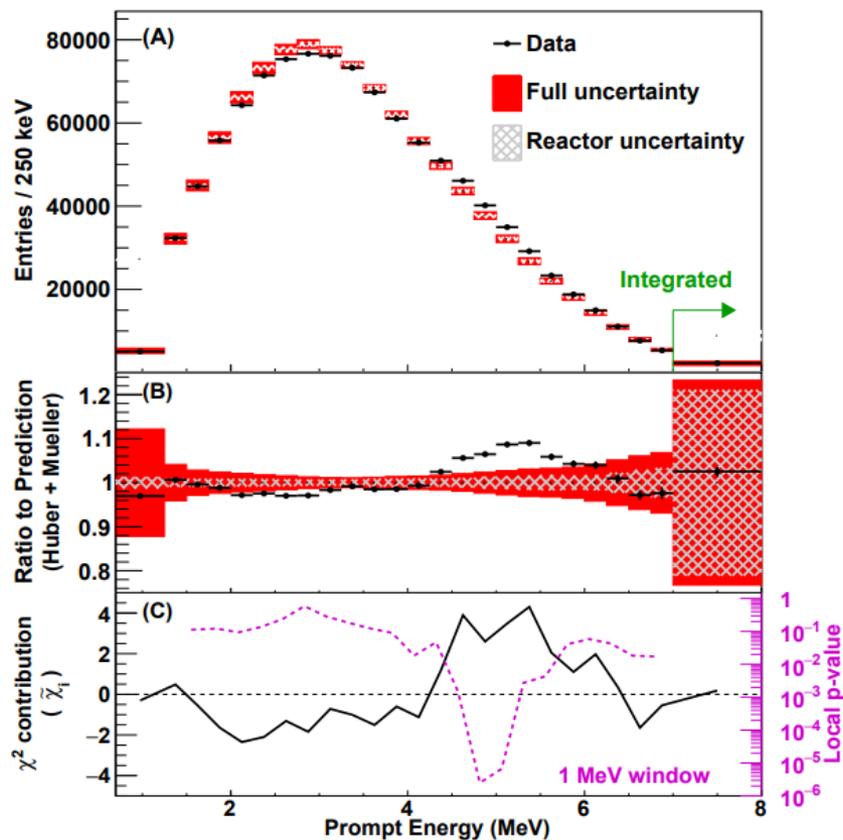
- 新物理：eV量级的惰性中微子
- 模型中未考虑完整的核物理效应造成的。
- 测量的beta谱绝对归一化因子不准。

$$R = \frac{\text{data}}{\text{Model (Huber + Mueller)}}$$
$$= 0.952 \pm 0.014(\text{exp}) \pm 0.023(\text{model})$$

PRD 100 052004 (2019)

反应堆中微子能谱异常

- 大亚湾实验测量到的反应堆中微子能谱谱形与Huber-Mueller模型的预期不一致
 - 特别在4~6 MeV之间有一个明显的鼓包。



- 同时期的法国Double Chooz实验和韩国RENO实验同样发现类似的现象。
- 可能原因：
 1. conversion方法中禁介跃迁的谱形修正处理不当。
 2. 虚拟分支拟合方法存在未知的系统误差。

本课题的研究意义

对中微子能谱的研究有助于：

1. 理解上述测量和模型之间的偏差
2. 为核物理的研究提供额外的信息
3. 为未来基于反应堆中微子的研究（如质量顺序，coherent反应截面）提供精确的中微子能谱
4. 推广反应堆中微子应用（反应堆监控等）

概要

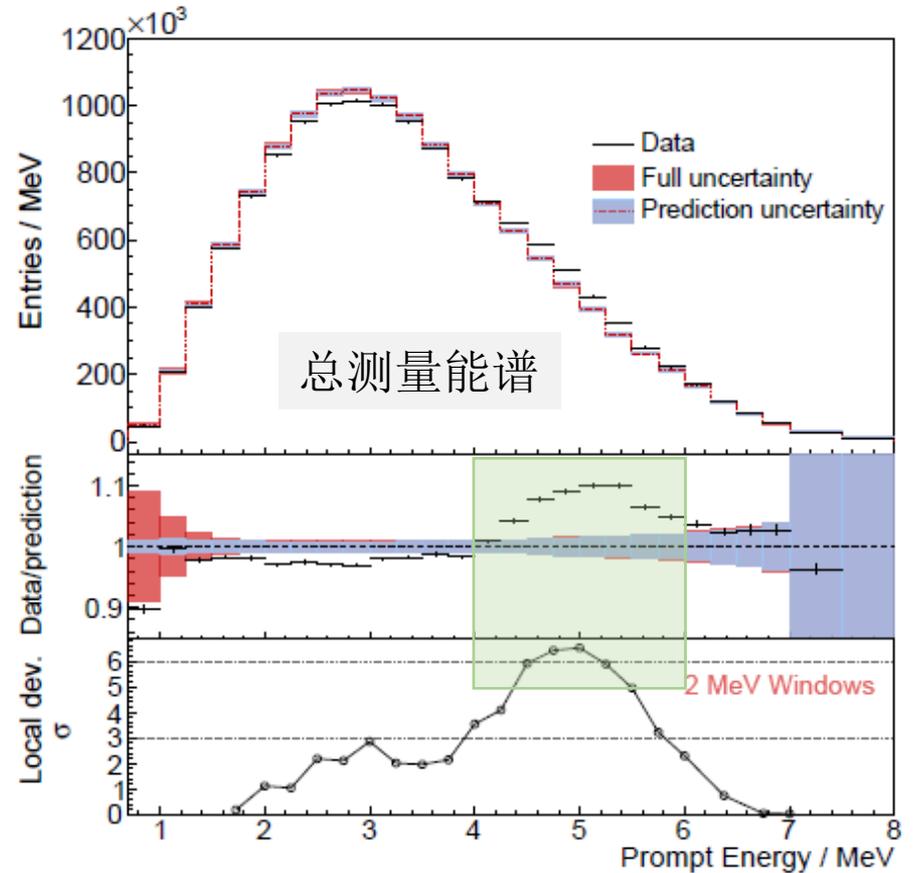
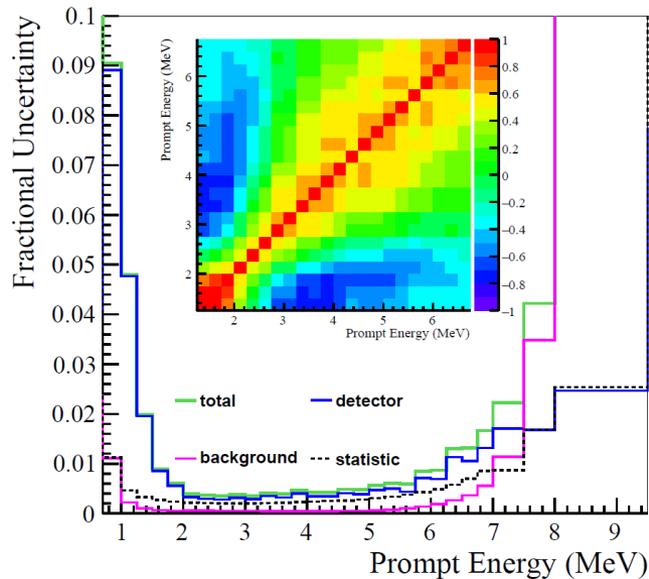
PHYSICAL REVIEW LETTERS **123**, 111801 (2019)

Extraction of the ^{235}U and ^{239}Pu Antineutrino Spectra at Daya Bay

- 研究背景
- 文章介绍
- 文章影响

大亚湾实验总测量能谱分析

- 这里利用大亚湾1958天的最新数据，详细分析了测量谱形的各项误差
- 总体谱形误差 (detector + background + statistic): $\sim 0.5\%$
 - 目前世界上最精确的能谱
- 测量到的快信号能谱和反应堆模型预期不一致，在4-6 MeV处有超出 6σ 的差别
- 总体偏离置信度超过 5σ

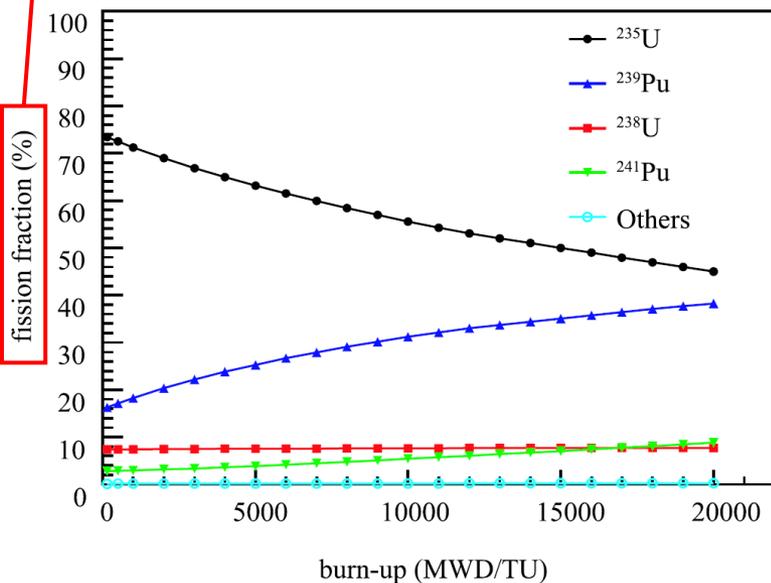


来自本文章的结果
Phys. Rev. Lett. 123, 111801 (2019)

反应堆燃料演化

- 随着燃料的演化，反应堆中核素的裂变份额会发生变化。
- 四种核素对应中微子谱不一样 → 总的中微子流强会发生变化

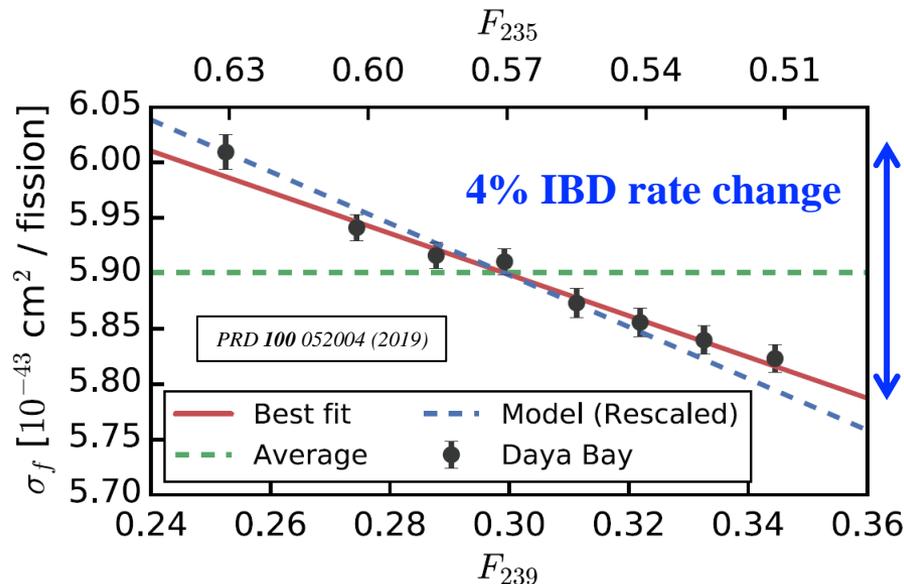
不同裂变核素对总中微子流强的占比



核素裂变份额 vs. 模拟中一个完整换料周期中的燃料

加权裂变份额

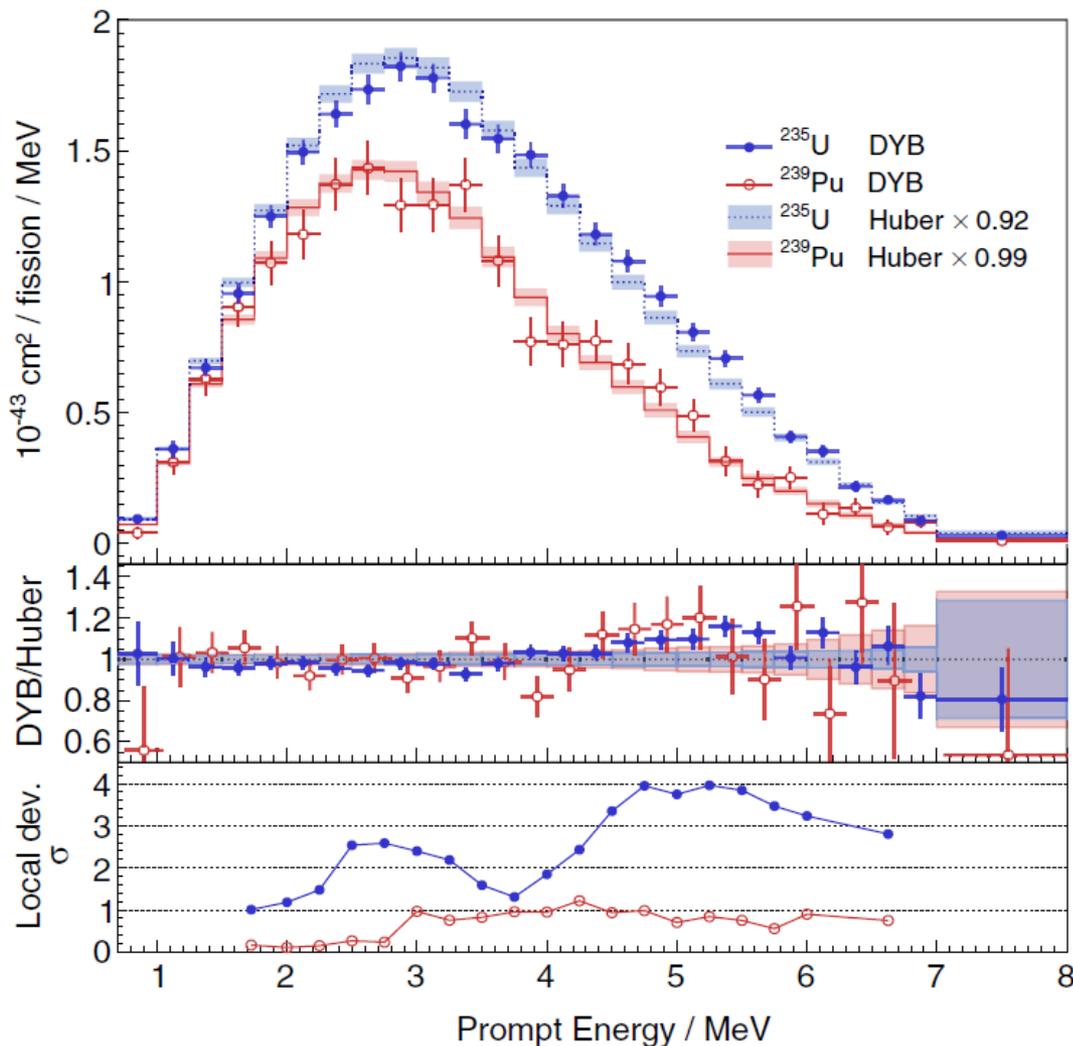
$$\sigma_f(t) = \sum_i F_i(t) \sigma_i$$



- 明显看到中微子流强随着燃料演化的变化

- 后面利用中微子能谱随燃料演化的变化，解出两种主要核素的能谱。

两种主要核素的能谱谱形



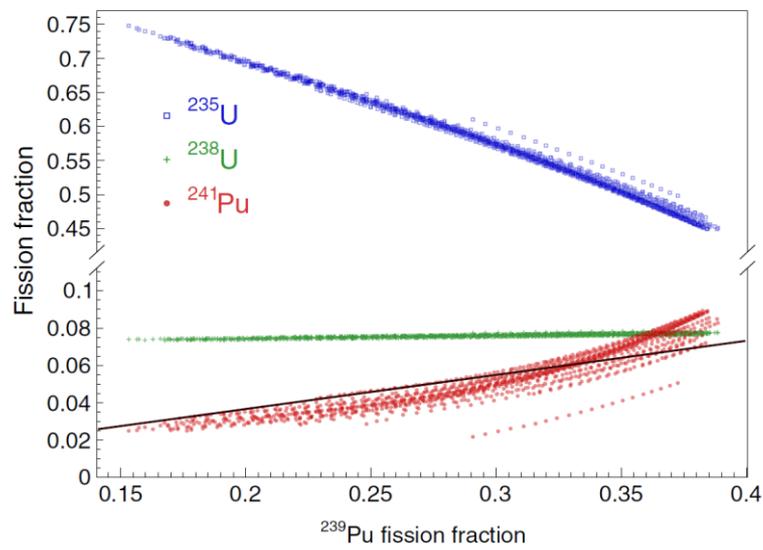
- 在4–6 MeV能区, ^{235}U (^{239}Pu) 能谱的谱形相对于Huber-Mueller模型有7% (9%) 的超出。
- 通过 χ^2 测试:
 - ^{235}U 能谱谱形相对Huber-Mueller模型局部偏离的置信度最大为 4.0σ
 - ^{239}Pu 能谱由于有更大的误差置信度最大为 1.2σ
- ^{239}Pu 能谱在4 MeV区域有不连续结构
 - 经检查很大可能是由于统计涨落造成的

Pu组合能谱

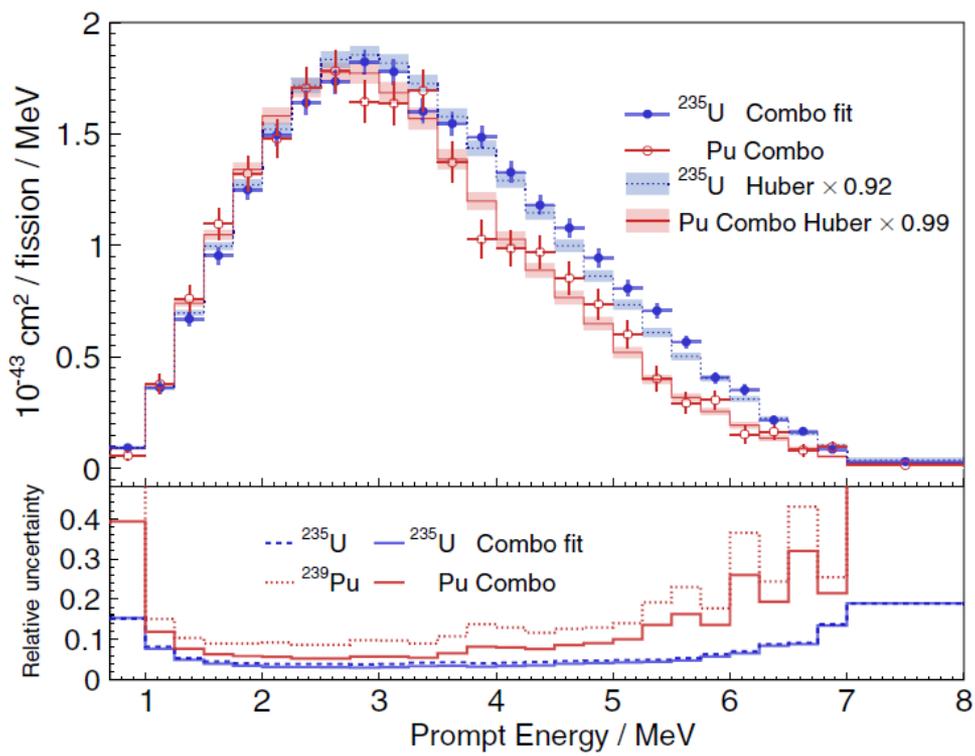
- ^{239}Pu 和 ^{241}Pu 的裂变份额之间有很强的相关性
 - 线性拟合为0.183
- 将 ^{239}Pu 和 ^{241}Pu 的能谱组合在一起
 - 减少拟合结果对 ^{241}Pu 输入能谱的依赖
 - 得到更精确的Pu能谱
- 可与模型进行更精确的比较
- 后面用于给其他实验提供一个数据驱动的预期

$$f_{241} = 0.183 \times f_{239}$$

$$S_{\text{combo}} = S_{239} + 0.183 \times S_{241}$$



Pu裂变份额关系



Pu组合能谱

概要

PHYSICAL REVIEW LETTERS **123**, 111801 (2019)

Extraction of the ^{235}U and ^{239}Pu Antineutrino Spectra at Daya Bay

- 研究背景
- 文章介绍
- 文章影响

文章引用

- 发表在[PRL](#)上。
- 目前有35次引用。
- 基于本文章的结果，大亚湾实验后续还展开一系列重要的物理分析。

PHYSICAL REVIEW LETTERS

Highlights Recent Accepted Collections Authors Referees Search Press About Sta

Open Access Access by The Library of Institute Hig

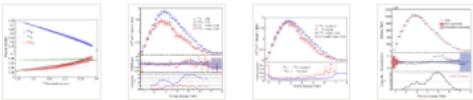
Extraction of the ^{235}U and ^{239}Pu Antineutrino Spectra at Daya Bay

D. Adey *et al.* (Daya Bay Collaboration)
Phys. Rev. Lett. **123**, 111801 – Published 13 September 2019

Article References Citing Articles (11) Supplemental Material PDF HTML Export Citation

ABSTRACT

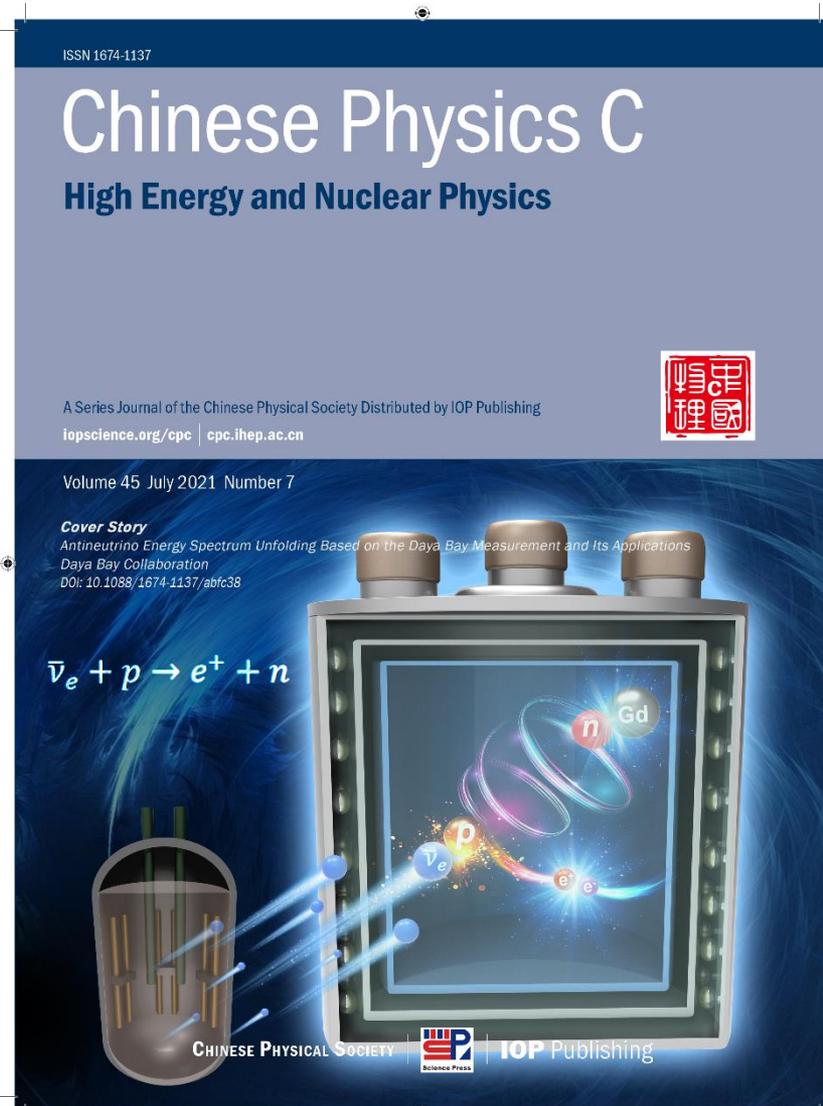
This Letter reports the first extraction of individual antineutrino spectra from ^{235}U and ^{239}Pu fission and an improved measurement of the prompt energy spectrum of reactor antineutrinos at Daya Bay. The analysis uses 3.5×10^6 inverse beta-decay candidates in four near antineutrino detectors in 1958 days. The individual antineutrino spectra of the two dominant isotopes, ^{235}U and ^{239}Pu , are extracted using the evolution of the prompt spectrum as a function of the isotope fission fractions. In the energy window of 4–6 MeV, a 7% (9%) excess of events is observed for the ^{235}U (^{239}Pu) spectrum compared with the normalized Huber-Mueller model prediction. The significance of discrepancy is 4.0σ for ^{235}U spectral shape compared with the Huber-Mueller model prediction. The shape of the measured inverse beta-decay prompt energy spectrum disagrees with the prediction of the Huber-Mueller model at 5.3σ . In the energy range of 4–6 MeV, a maximal local discrepancy of 6.3σ is observed.



Received 16 April 2019 Revised 4 August 2019

中微子能谱的反解

- 基于本报告评审文章的结果，利用unfolding方法，将快信号谱转为中微子谱。
- 为其他实验提供数据驱动的预期。
- 已发表在Chinese Physics C上
 - [Chinese Phys. C 45 073001](#)
 - 评为该杂志的封面文章



与PROSPECT实验的联合分析

- 基于本报告评审文章的方法，首次实现低浓缩铀反应堆实验与高浓缩铀反应堆实验的联合分析。
- arXiv:2106.12251，已投稿PRL期刊
 - Referees回复了积极肯定的意见

Nuclear Experiment

[Submitted on 23 Jun 2021]

Joint Determination of Reactor Antineutrino Spectra from ^{235}U and ^{239}Pu Fission by Daya Bay and PROSPECT

F. P. An, M. Andriamirado, A. B. Balantekin, H. R. Band, C. D. Bass, D. E. Bergeron, D. Berish, M. Bishai, S. Blyth, N. S. Bowden, C. D. Bryan, G. F. Cao, J. Cao, J. F. Chang, Y. Chang, H. S. Chen, S. M. Chen, Y. Chen, Y. X. Chen, J. Cheng, Z. K. Cheng, J. J. Cherwinka, M. C. Chu, T. Classen, A. J. Conant, J. P. Cummings, O. Dalager, G. Deichert, A. Delgado, F. S. Deng, Y. Y. Ding, M. V. Diwan, T. Dohnal, M. J. Dolinski, D. Dolzhikov, J. Dove, M. Dvorak, D. A. Dwyer, A. Erickson, B. T. Foust, J. K. Gaisan, A. Galindo-Uribarri, J. P. Gallo, C. E. Gilbert, M. Gonchar, G. H. Gong, H. Gong, M. Grassi, W. Q. Gu, J. Y. Guo, L. Guo, X. H. Guo, Y. H. Guo, Z. Guo, R. W. Hackenburg, S. Hans, A. B. Hansell, M. He, K. M. Heeger, B. Heffron, Y. K. Heng, Y. K. Hor, Y. B. Hsiung, B. Z. Hu, J. R. Hu, T. Hu, Z. J. Hu, H. X. Huang, J. H. Huang, X. T. Huang, Y. B. Huang, P. Huber, J. Koblanski, D. E. Jaffe, S. Jayakumar, K. L. Jen, X. L. Ji, X. P. Ji, R. A. Johnson, D. C. Jones, L. Kang, S. H. Kettell, S. Kohn, M. Kramer, O. Kyzlyova, C. E. Lane, T. J. Langford, J. LaRosa, J. Lee, J. H. C. Lee, R. T. Lei, R. Leitner, J. K. C. Leung, F. Li, H. L. Li, J. J. Li, Q. J. Li, R. H. Li, S. Li, S. C. Li et al. (140 additional authors not shown)

A joint determination of the reactor antineutrino spectra resulting from the fission of ^{235}U and ^{239}Pu has been carried out by the Daya Bay and PROSPECT collaborations. This Letter reports the level of consistency of ^{235}U spectrum measurements from the two experiments and presents new results from a joint analysis of both data sets. The measurements are found to be consistent. The combined analysis reduces the degeneracy between the dominant ^{235}U and ^{239}Pu isotopes and improves the uncertainty of the ^{235}U spectral shape to about 3%. The ^{235}U and ^{239}Pu antineutrino energy spectra are unfolded from the jointly deconvolved reactor spectra using the Wiener-SVD unfolding method, providing a data-based reference for other reactor antineutrino experiments and other applications. This is the first measurement of the ^{235}U and ^{239}Pu spectra based on the combination of experiments at low- and highly enriched uranium reactors.

Comments: 7 pages, 5 figures, Supplementary Material Included

Subjects: **Nuclear Experiment (nucl-ex)**; High Energy Physics - Experiment (hep-ex)

Cite as: arXiv:2106.12251 [nucl-ex]

(or arXiv:2106.12251v1 [nucl-ex] for this version)

Submission history

From: Jianrun Hu [view email]

[v1] Wed, 23 Jun 2021 09:13:48 UTC (935 KB)

文章总结

PHYSICAL REVIEW LETTERS **123**, 111801 (2019)

Extraction of the ^{235}U and ^{239}Pu Antineutrino Spectra at Daya Bay

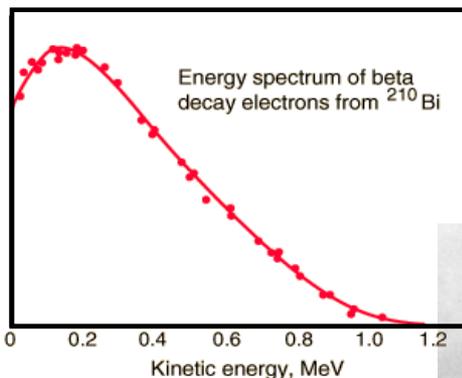
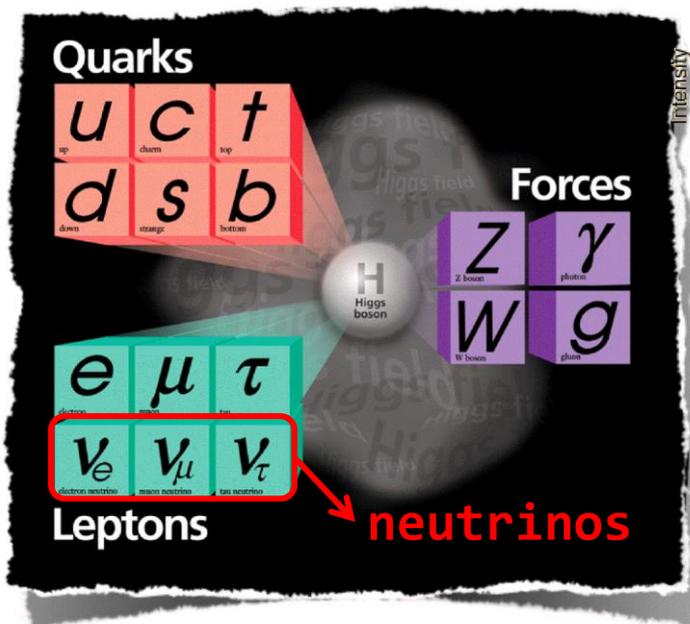
- 首次利用商业反应堆解出两种主要核素（ ^{235}U 和 ^{239}Pu ）的中微子快信号能谱
- 得到目前世界上最精确的中微子测量谱
 - 与模型有 5σ 的偏离
- 后续大亚湾实验基于该文章的结果开展了两个重要的物理研究

谢谢大家聆听



中微子

标准模型中的基本粒子



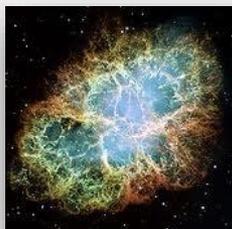
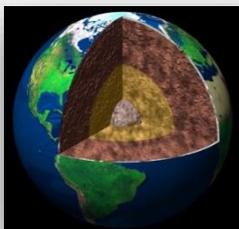
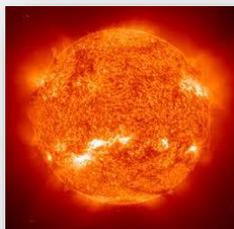
β 衰变产生连续谱
玻尔：能动能量不守恒？



中性，
无质量，
相互作用弱

1930年泡利
提出中微子
存在的假定

天然中微子源

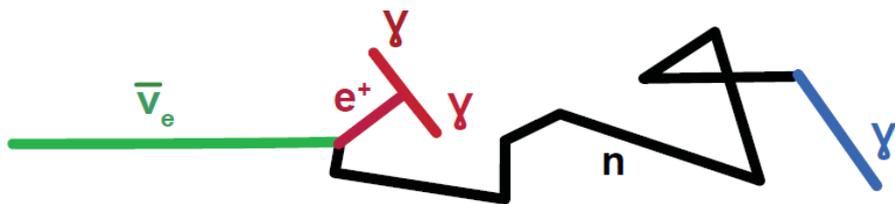


人工中微子源



中微子的发现

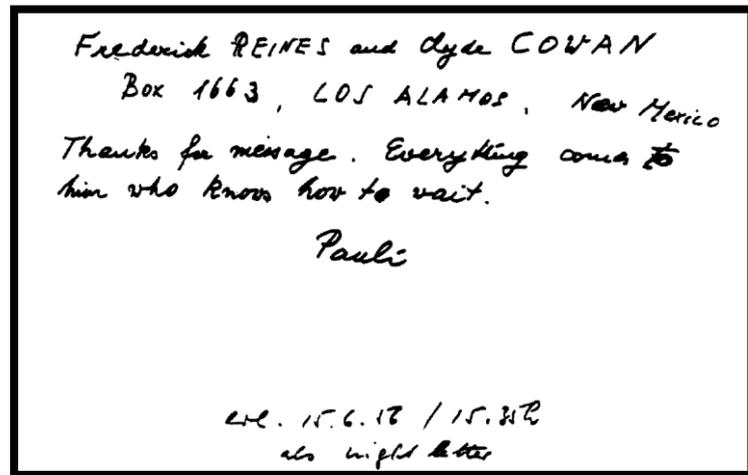
- 1956年，莱因斯和科温，在佐治亚州萨凡纳（Savannah）河工厂实验，观测到反应堆中微子（电子反中微子）。
- 用含有氯化镅的水作为捕获中微子的靶。
- 反中微子与水中的质子反应产生一对快慢符合信号
 - 正电子快速沉积能量
 - 中子隔一段时间之后被镅核俘获并沉积能量



反贝塔衰变（Inverse Beta-Decay, IBD）



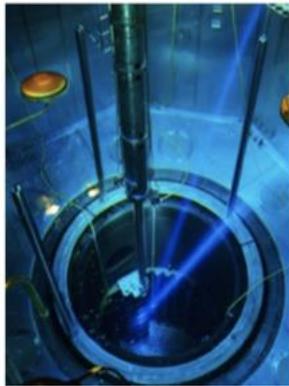
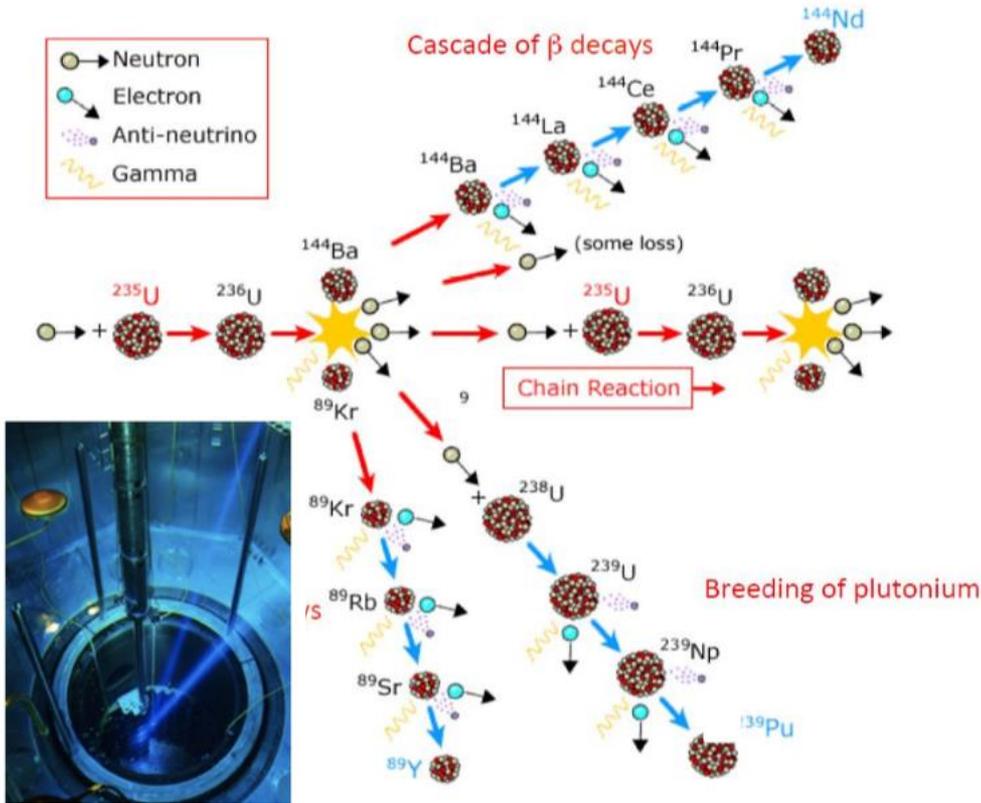
弗雷德里克·莱因斯 克莱德·科温
(1956年诺贝尔奖)



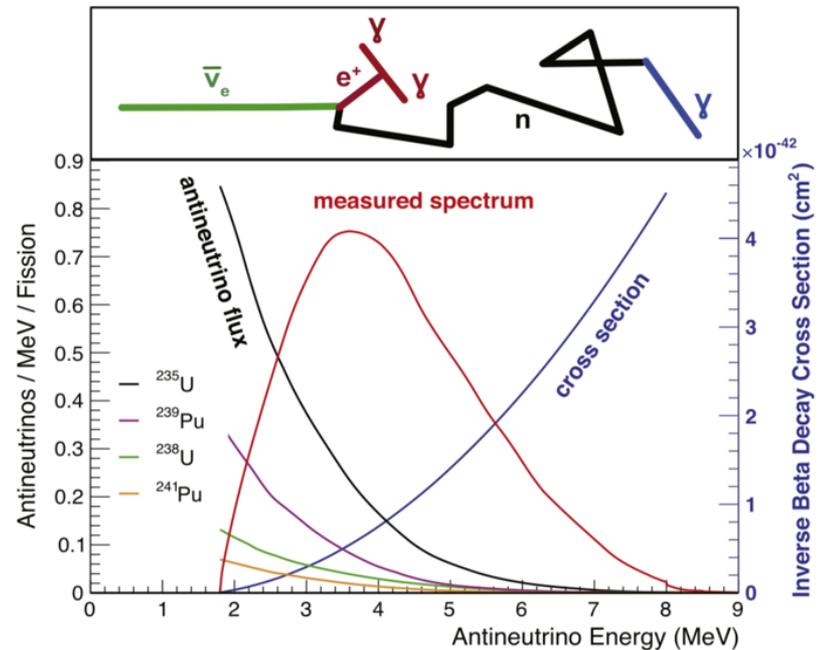
泡利给莱因斯和科温的电报稿
“谢谢告知，任何事情都青睐懂得等待的人”

反应堆中微子

- 反应堆在运行过程中， ^{235}U ， ^{238}U ， ^{239}Pu ，和 ^{241}Pu 的自持链式反应→把原子核的结合能释放出来→实现核能的利用。
- 这四种核素的裂变产物中有大量的丰中子核素，容易发生 β 衰变并产生电子型反中微子 ($\bar{\nu}_e$)。



Jianrun Hu



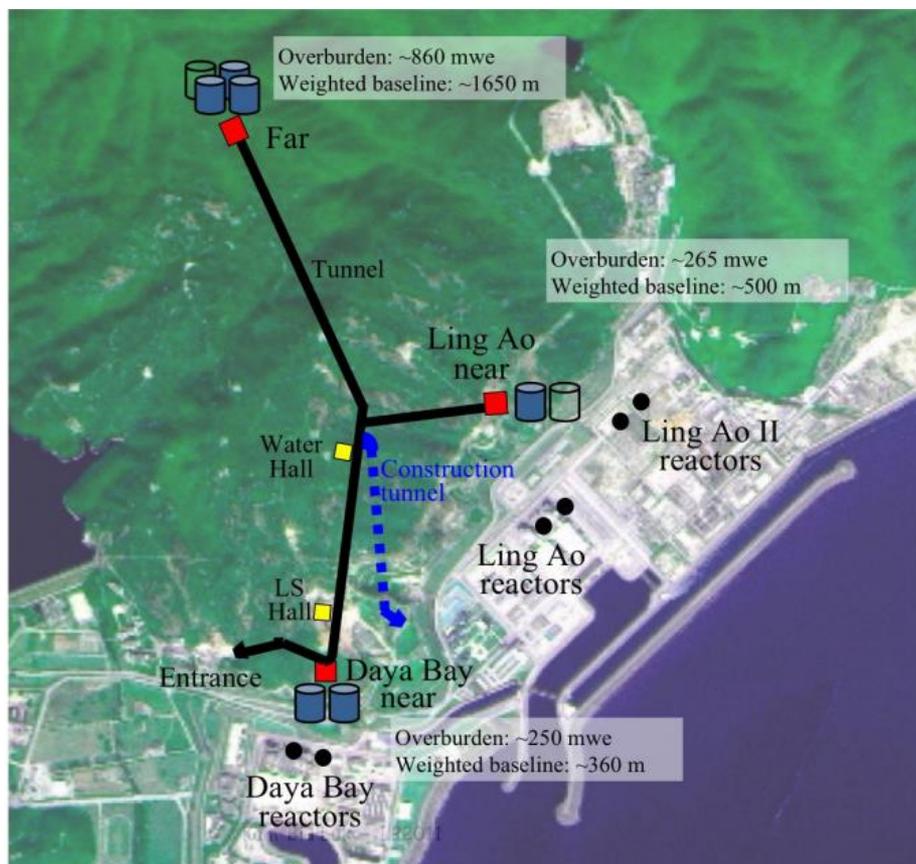
Inverse β decay (IBD):

- 快信号: $E_{\text{prompt}} \approx E_{\nu} - 0.8 \text{ MeV}$
- 慢信号: nGd ($\sim 8 \text{ MeV}$)
nH ($\sim 2.2 \text{ MeV}$)

大亚湾中微子实验

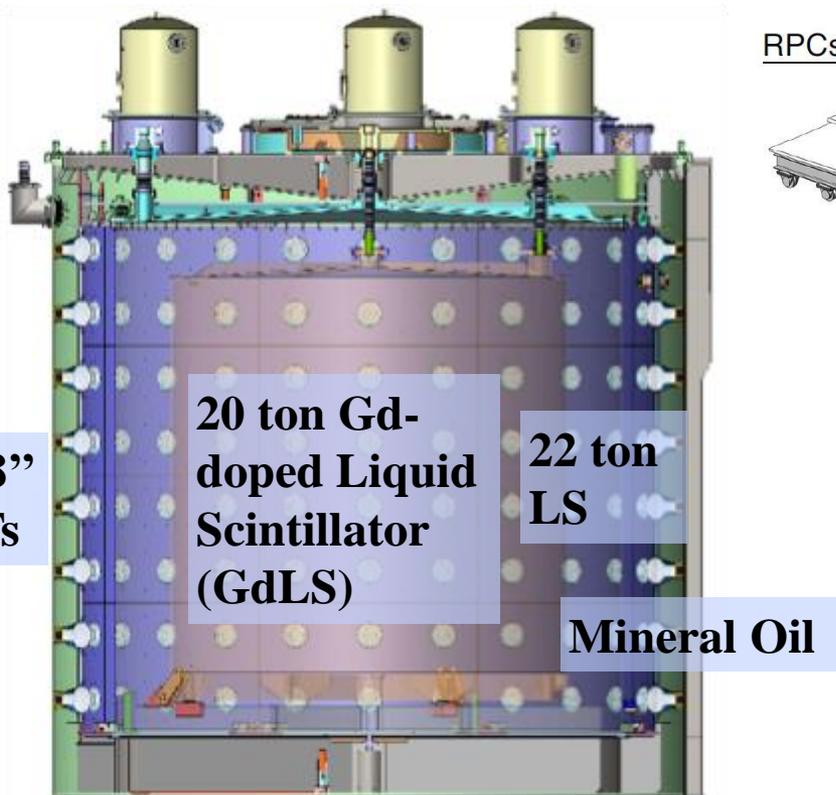
- ◆ 地点：广东省深圳市大亚湾核电站
- ◆ 物理目标：远近点所有探测器运行三年之后，测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度在90%置信水平上达到0.01。

- 6个反应堆，总功率17.4 GW_{th} ，世界前三反应堆群
- 远近点相对测量反应堆中微子的事例率和能谱
 - 2近点, 1远点
- 同一个实验点多个探测器模块
- 利用附近的山体屏蔽宇宙线本底



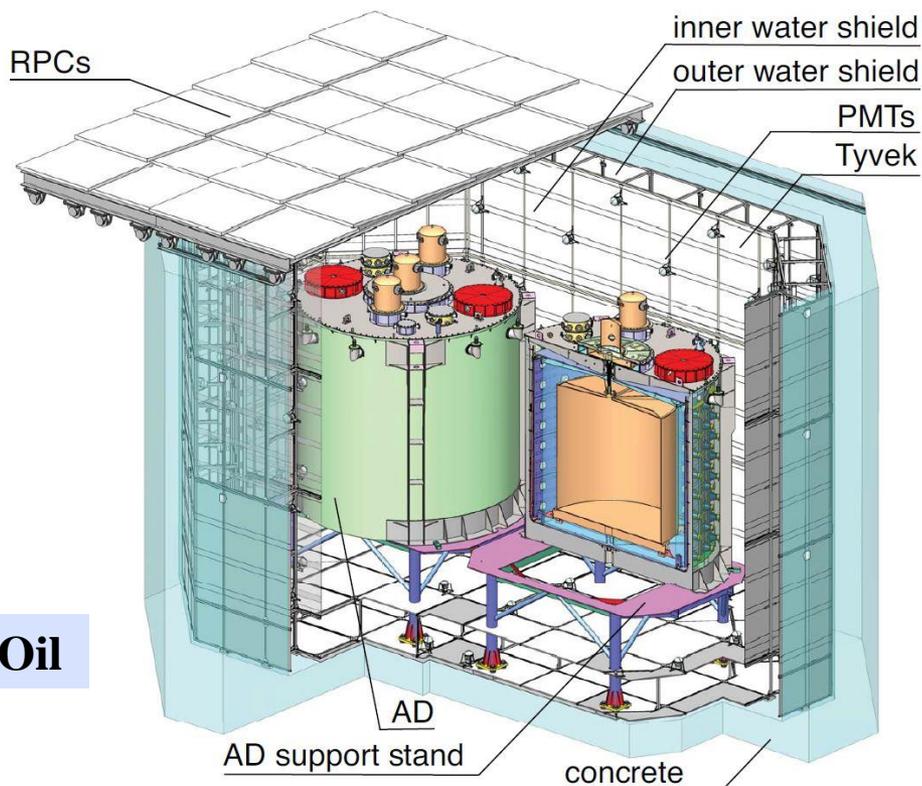
探测器结构

- 中微子探测器 (ADs):
 - 设计成三层同心圆柱体结构
 - 中心GdLS为主要中微子靶物质



NIM A 811, 133 (2016)

- 水切伦科夫光探测器和RPC探测器:
 - 屏蔽AD周围的天然放射性和中子
 - 对宇宙线muon进行屏蔽

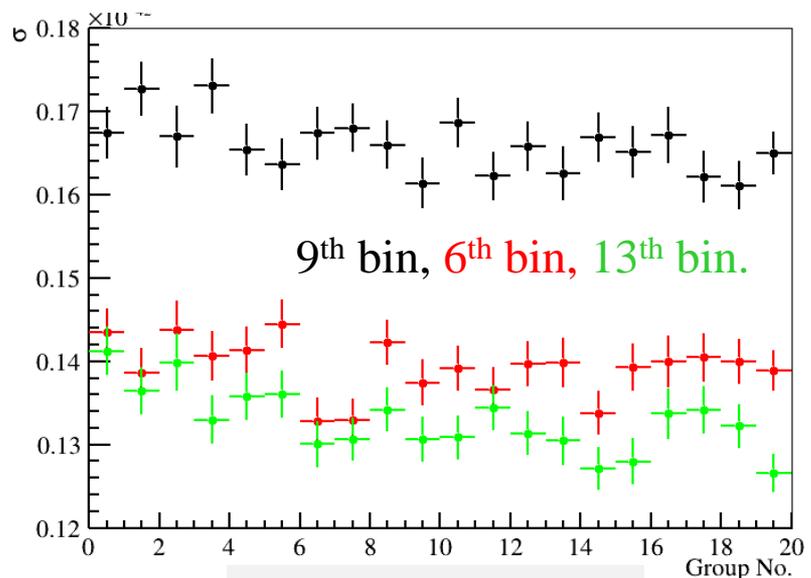
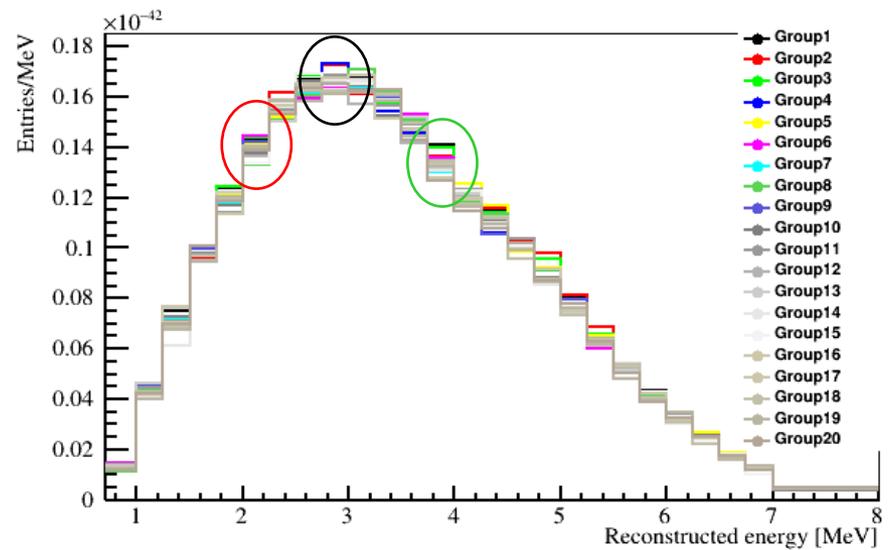
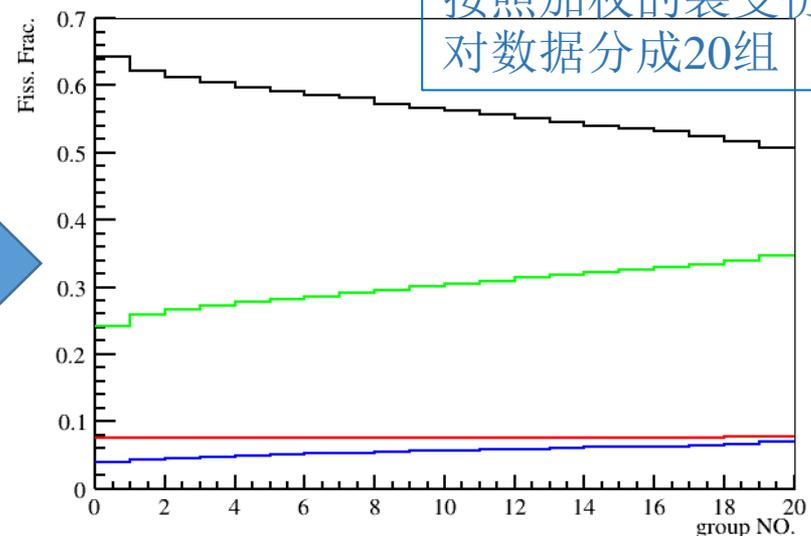
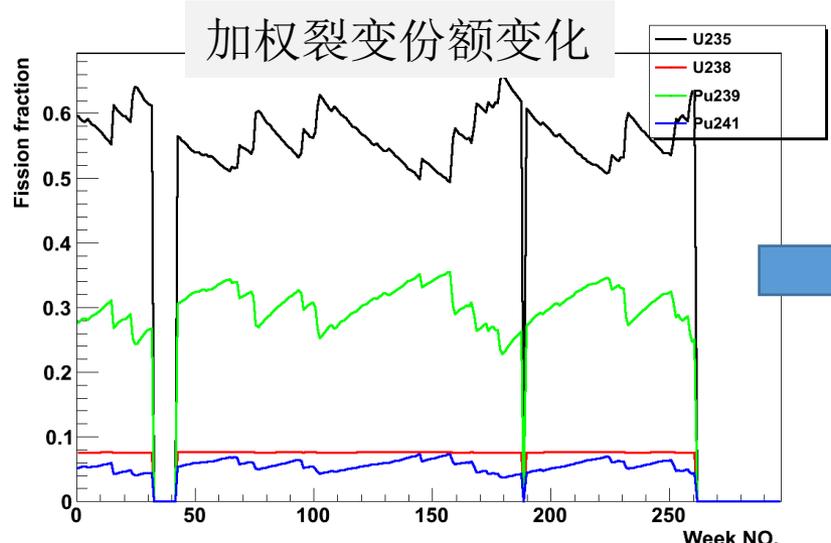


NIM A 773, 8 (2015)

测量能谱的分组

例子: EH1-AD1

按照加权的裂变份额
对数据分成20组



20组数据的快信号能谱

快信号能谱某几个bin
随fission fraction的变化