

Обзор литературы по теме:  
“Прикладные и фундаментальные  
аспекты антинейтринного  
мониторинга ядерных реакторов”

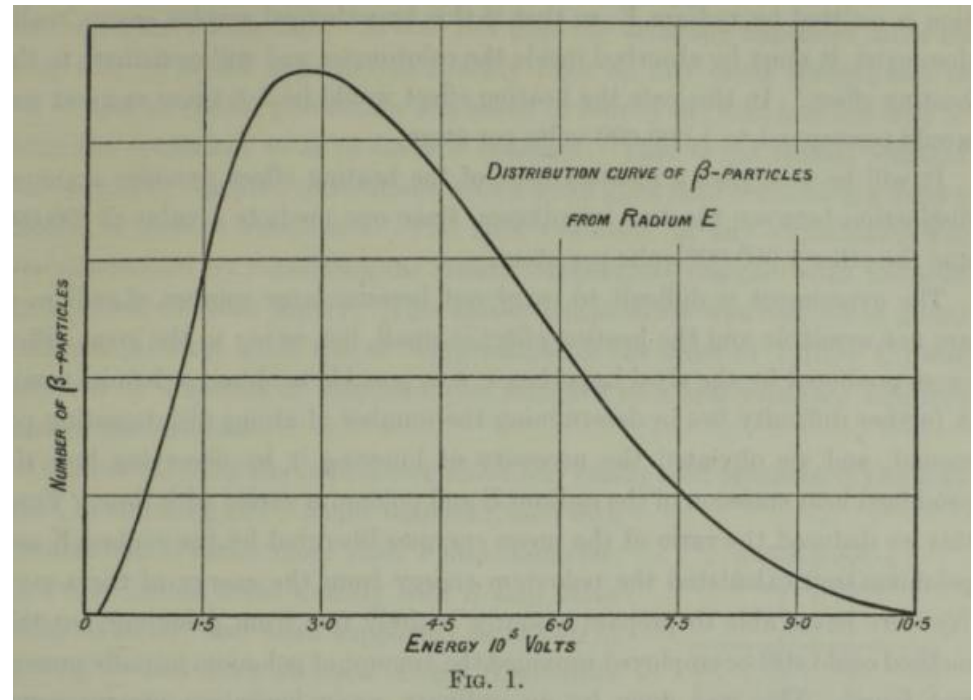
Жутиков Иван группа А23-121

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Литвинович Е.А.

# Возникновение нейтринной гипотезы и становление нейтринной физики

К концу 1920-х годов одна из центральных проблем ядерной физики была связана с  $\beta$ -распадом. Если рассматривать распад ядра как двухчастичный переход, регистрировался, то энергия испускаемого электрона должна была бы принимать фиксированное значение. Однако экспериментально наблюдался **непрерывный энергетический спектр** электронов J. Chadwick, Verh. Dtsch. Phys. Ges. 16, 383–391 (1914). Что ставило под сомнение справедливость закона сохранения энергии в микромире

Charles Drummond Ellis, W. A. Wooster;  
The average energy of disintegration of radium E. *Proc. A* 1 December 1927; 117 (776): 109–123.



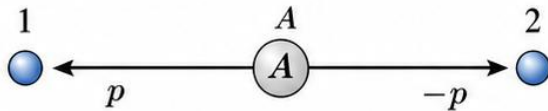


# Основная идея предложенная Паули

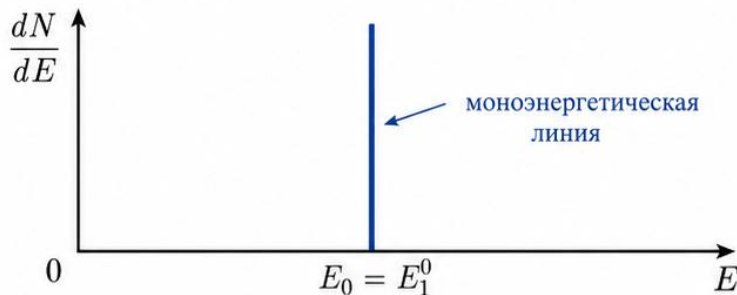
В трехчастичном распаде энергия распределяется между электроном, ядром отдачи и антинейтрино. Поэтому электрон уже не обязан иметь одну фиксированную энергию, а может обладать непрерывным спектром. Так гипотеза Паули позволяет сохранить закон сохранения энергии и одновременно объяснить форму  $\beta$ -спектра.

## 1. Двухчастичный распад: $A \rightarrow 1 + 2$

Кинематика в системе покоя исходной частицы  $A$ :

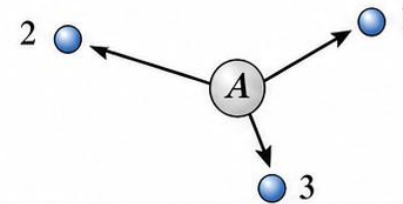


$$E_1^0 = \frac{M^2 + m_1^2 - m_2^2}{2M} \quad E_2^0 = \frac{M^2 + m_2^2 - m_1^2}{2M}$$

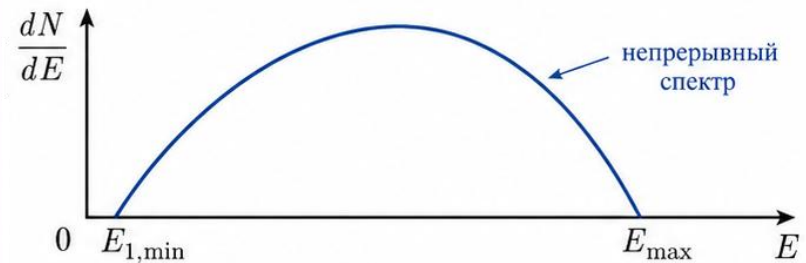


## 2. Трёхчастичный распад: $A \rightarrow 1 + 2 + 3$

Кинематика в системе покоя исходной частицы  $A$ :

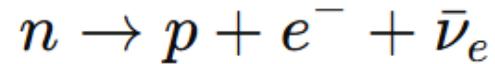


$$E_{1,\min} \leq E_1 \leq E_{1,\max}$$



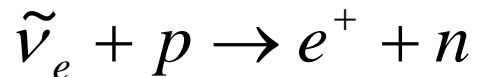
# Дальнейшее развитие теории нейтрино

Гипотеза Паули достаточно быстро стала основой для дальнейшего развития теории  $\beta$ -распада. Ключевым шагом стала работа Энрико Ферми 1934 года *Versuch einer Theorie der  $\beta$ -Strahlen. I.*, в которой идея нейтрино была включена в первую количественную теорию  $\beta$ -распада. Ферми описал распад нейтрона как процесс



то есть как элементарный акт нового взаимодействия. В современной терминологии эта работа стала первой теорией слабого взаимодействия: Ферми ввёл точечное четырёхфермионное взаимодействие между нейтроном, протоном, электроном и нейтрино.

Следующий важный этап связан с Бруно Понтекорво. В 1946 году в работе *Inverse  $\beta$  Process* он предложил использовать обратный  $\beta$ -процесс для непосредственной регистрации нейтрино.

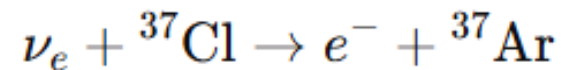


**Bruno Pontecorvo**  
**Inverse  $\beta$  Process**

(National Reserach Council of Canada, Division of Atomic Energy, Chalk River, 1946, Report PD-205.  
This version was kindly provided by Prof. W.F.Davidson).

## Introduction

The Fermi theory of the  $\beta$  disintegration is not yet in a final stage; not only detailed problems are to be solved, but also the fundamental assumption - the neutrino hypothesis - has not yet been definitely proven. I will recall briefly the main experimental facts which have led Pauli to propose the neutrino hypothesis.



**Versuch einer Theorie der  $\beta$ -Strahlen. I<sup>1</sup>).**

Von **E. Fermi** in Rom.

Mit 3 Abbildungen. (Eingegangen am 16. Januar 1934.)

Eine quantitative Theorie des  $\beta$ -Zerfalls wird vorgeschlagen, in welcher man die Existenz des Neutrinos annimmt, und die Emission der Elektronen und Neutrinos aus einem Kern beim  $\beta$ -Zerfall mit einer ähnlichen Methode behandelt, wie die Emission eines Lichtquants aus einem angeregten Atom in der Strahlungstheorie. Formeln für die Lebensdauer und für die Form des emittierten kontinuierlichen  $\beta$ -Strahlenspektrums werden abgeleitet und mit der Erfahrung verglichen.

# Детектирование сигнала от антинейтрино

Первое успешное экспериментальное обнаружение нейтрино связано с работами Фредерика Райнеса и Клайда Коуэна. Предварительное сообщение появилось в 1953 году, а окончательное подтверждение — в статье 1956 года *Detection of the Free Neutrino: a Confirmation*. Эксперимент был выполнен на реакторе Savannah River, который обеспечивал интенсивный поток антинейтрино деления. Для регистрации использовалась реакция обратного  $\beta$ -распада

## Detection of the Free Neutrino\*

F. REINES AND C. L. COWAN, JR.

*Los Alamos Scientific Laboratory, University of California,  
Los Alamos, New Mexico*

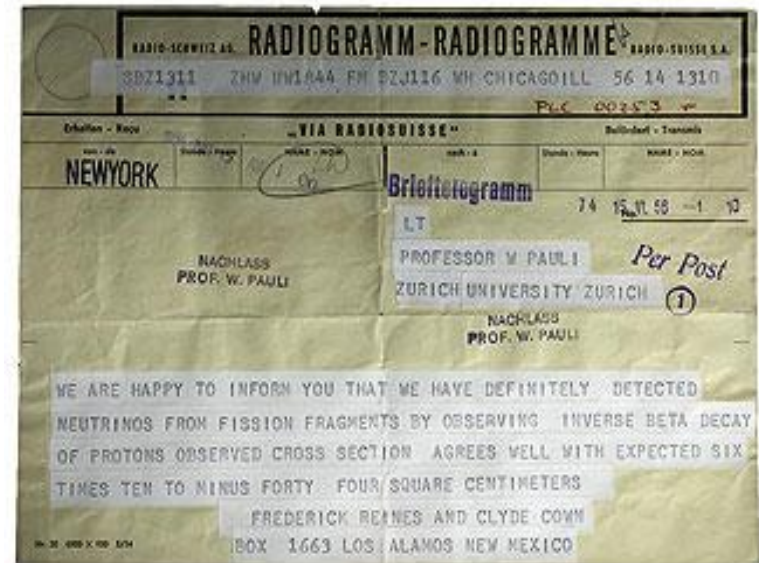
(Received July 9, 1953; revised manuscript received September 14, 1953)

**A**N experiment<sup>1</sup> has been performed to detect the free neutrino. It appears probable that this aim has been accomplished although further confirmatory work is in progress. The cross section for the reaction employed,



has been calculated<sup>2,3</sup> from beta-decay theory to be given by the expression,

$$\sigma = \left(\frac{G^2}{2\pi}\right) \left(\frac{\hbar}{mc}\right)^2 \left(\frac{p}{mc}\right)^2 \left(\frac{1}{v/c}\right), \quad (2)$$



# Детектирование сигнала от антинейтрино

Ключевая идея эксперимента состояла в **методе задержанных совпадений**. Позитрон давал быстрый сигнал через ионизацию и аннигиляцию, а нейтрон после замедления захватывался ядрами кадмия с испусканием задержанного гамма-каскада. Такое двухступенчатое событие имело характерную временную структуру и позволило отделить сигнал от фона. Тем самым Райнес и Коуэн не только открыли нейтрино, но и фактически заложили методический стандарт реакторной нейтринной физики на десятилетия вперёд. Сигнал:  $3.0 \pm 0.2$  соб./час

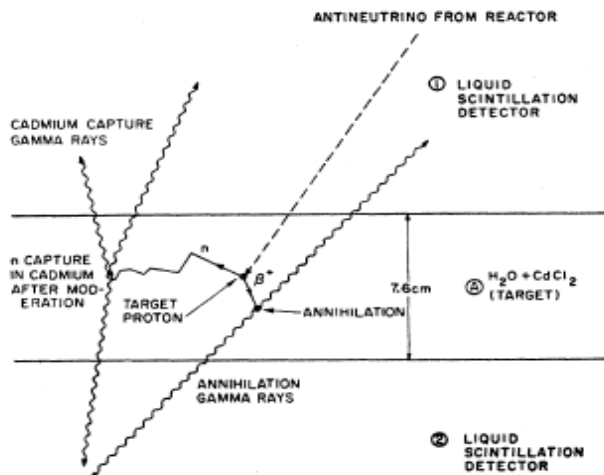
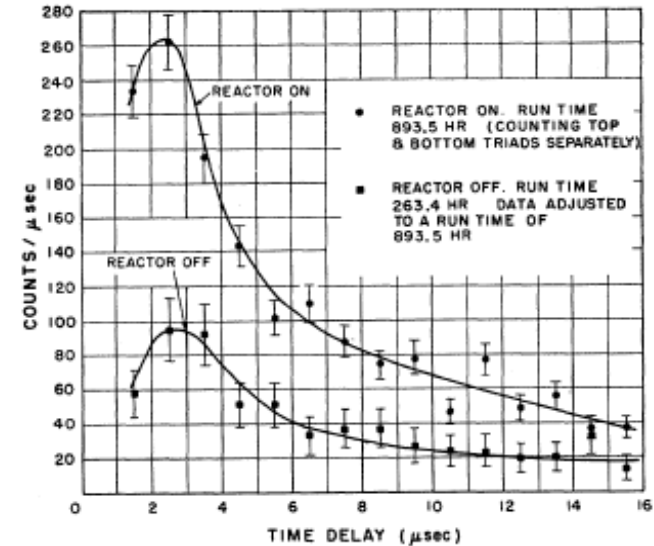
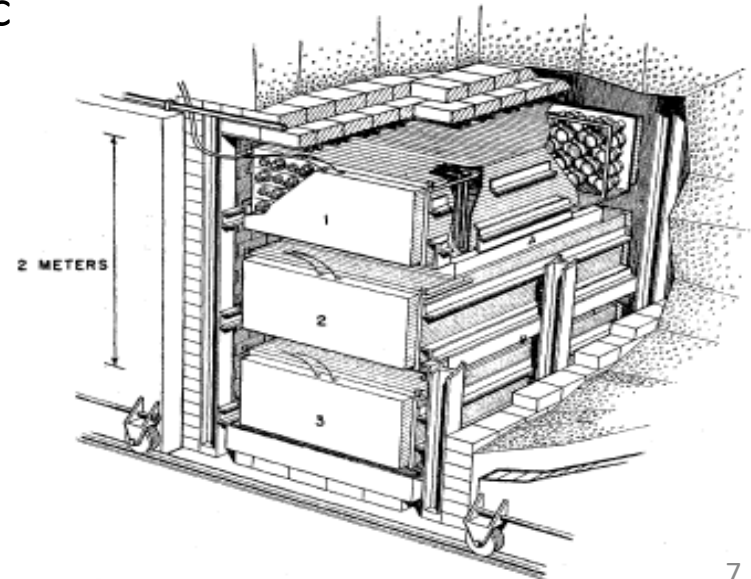


FIG. 1. Schematic diagram of antineutrino experiment.



# Возникновение солнечной нейтринной проблемы

Солнечная нейтринная проблема возникла из попытки напрямую проверить термоядерную природу энергии Солнца. В 1964 году Джон Бакалл в работе *Solar Neutrinos. I. Theoretical* рассчитал ожидаемые потоки солнечных нейтрино и показал, что хлорный радиохимический эксперимент должен быть чувствителен к высокоэнергетическим солнечным нейтрино.

В 1968 году Дэвис, Хармер и Хоффман опубликовали первые результаты эксперимента Homestake. Измеренный поток оказался заметно ниже теоретического предсказания. Это расхождение получило название **солнечной нейтринной проблемы**.

На тот момент оно ещё не было доказательством осцилляций: дефицит можно было объяснять либо неточностью солнечных моделей, либо новыми свойствами нейтрино. Поэтому проблема оставалась открытой несколько десятилетий.

## SOLAR NEUTRINOS. I. THEORETICAL\*

John N. Bahcall  
California Institute of Technology, Pasadena, California  
(Received 6 January 1964)

The principal energy source for main-sequence stars like the sun is believed to be the fusion, in the deep interior of the star, of four protons to form an alpha particle.<sup>1</sup> The fusion reactions are thought to be initiated by the sequence  ${}^1\text{H}(\rho, e^+\nu){}^2\text{H}(\rho, \gamma){}^3\text{He}$  and terminated by the following

star is typically less than  $10^{-10}$  of the radius of the star. Only neutrinos, with their extremely small interaction cross sections, can enable us to see into the interior of a star and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in stars.

VOLUME 20, NUMBER 21

PHYSICAL REVIEW LETTERS

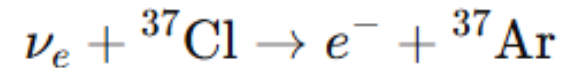
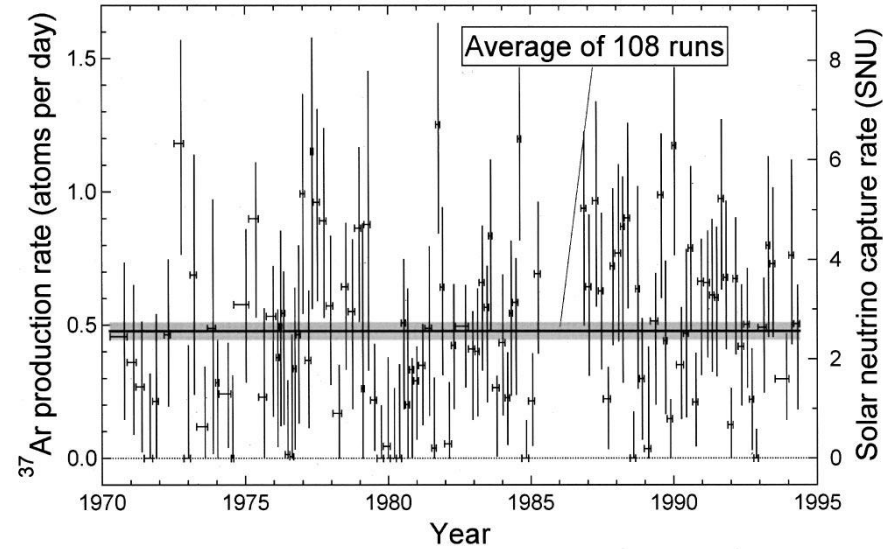
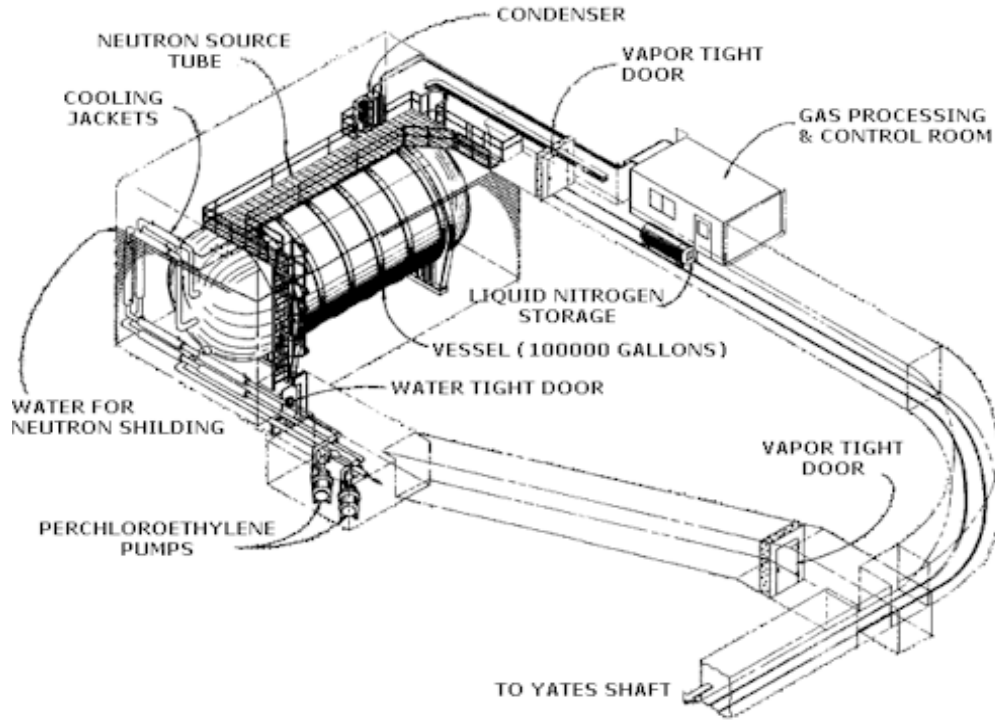
20 MAY 1968

## SEARCH FOR NEUTRINOS FROM THE SUN\*

Raymond Davis, Jr., Don S. Harmer,† and Kenneth C. Hoffman  
Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973  
(Received 16 April 1968)

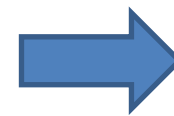
A search was made for solar neutrinos with a detector based upon the reaction  $\text{Cl}^{37}(\nu, e^-)\text{Ar}^{37}$ . The upper limit of the product of the neutrino flux and the cross sections for all sources of neutrinos was  $3 \times 10^{-36} \text{ sec}^{-1}$  per  $\text{Cl}^{37}$  atom. It was concluded specifically that the flux of neutrinos from  $\text{B}^8$  decay in the sun was equal to or less than  $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  at the earth, and that less than 9% of the sun's energy is produced by the carbon-nitrogen cycle.

# Эксперимент Homestake



$$R(\nu)_{\text{эксп.}} = 2.56 \pm 0.16_{\text{стат}} \pm 0.16_{\text{сист}} \text{ SNU}$$

$$R(\nu)_{\text{CCM}} = 9.3 \pm 1.3 \text{ SNU}$$



**Загадка солнечных нейтрино**

1 SNU =  $10^{-36} \text{ c}^{-1}$  (SNU – Solar Neutrino Unit, единица числа событий на атом мишени, поток · сечение)

# Нейтринные осцилляции

Первую идею нейтринных осцилляций предложил Бруно Понтекорво. В работе *Mesonium and Antimesonium* 1957 он провёл аналогию с осцилляциями нейтральных мезонов, а в статье *Inverse Beta Processes and Nonconservation of Lepton Charge* 1958 прямо обсуждал переходы при нарушении лептонного числа. Это ещё не была современная теория flavor-осцилляций, но здесь появилась ключевая идея: состояния, рождающиеся в слабом взаимодействии, могут отличаться от состояний, распространяющихся в пространстве.

Следующий шаг сделали Маки, Накагава и Саката в 1962 году. Они ввели смешивание нейтринных состояний: нейтрино, рождающееся в слабом процессе, может быть суперпозицией состояний с определёнными массами. Этот подход стал основой формализма MNS, позднее расширенного до матрицы PMNS, лежащей в современной теории нейтринных осцилляций.

Progress of Theoretical Physics, Vol. 28, No. 5, November 1962

## Remarks on the Unified Model of Elementary Particles

Ziro MAKI, Masami NAKAGAWA and Shoichi SAKATA

*Institute for Theoretical Physics  
Nagoya University, Nagoya*

(Received June 25, 1962)

A particle mixture theory of neutrino is proposed assuming the existence of two kinds of neutrinos. Based on the neutrino-mixture theory, a possible unified model of elementary particles is constructed by generalizing the Sakata-Nagoya model.<sup>\*)</sup> Our scheme gives a natural explanation of smallness of leptonic decay rate of hyperons as well as the subtle difference of  $G_{\beta}$ 's between  $\mu$ -e and  $\beta$ -decay.

Starting with this scheme, the possibility of  $K_{e3}$  mode with  $\Delta S/\Delta Q = -1$  is also examined, and some bearings on the dynamical role of the  $B$ -matter, a fundamental constituent of baryons in the Nagoya model, are clarified.

172

LETTERS TO THE EDITOR

## INVERSE BETA PROCESSES AND NONCONSERVATION OF LEPTON CHARGE

B. PONTECORVO

Joint Institute for Nuclear Research

Submitted to JETP editor October 19, 1957

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) **34**, 247-249  
(January, 1958)

RECENTLY the question was discussed<sup>1</sup> whether there exist other "mixed" neutral particles beside the  $K^0$  mesons,<sup>2</sup> i.e., particles that differ from the corresponding antiparticles, with the transitions between particle and antiparticle states not

neutrino and antineutrino are "mixed" particles, i.e., a symmetric and antisymmetric combination of two truly neutral Majorana particles  $\nu_1$  and  $\nu_2$  of different combined parity.<sup>5</sup>

The possibility outlined above does not simplify the theory of  $\beta$  decay and, in addition, it probably does not correspond to actuality. Nevertheless, we are setting it forth since it leads to consequences which, in principle, can be tested experimentally. Thus, for example, a stream of neutral leptons consisting mainly of antineutrinos when emitted from a nuclear reactor, will consist at some distance  $R$  from the reactor of half neutrinos and half antineutrinos. Under the condition that  $R \lesssim 1$  m (the probability for this is dis-

# Эксперимент Super-Kamiokande

В 1998 году Super-Kamiokande подтвердил дефицит солнечных нейтрино, но ещё не мог однозначно показать, исчезают ли  $\nu$  или превращаются в другие типы.

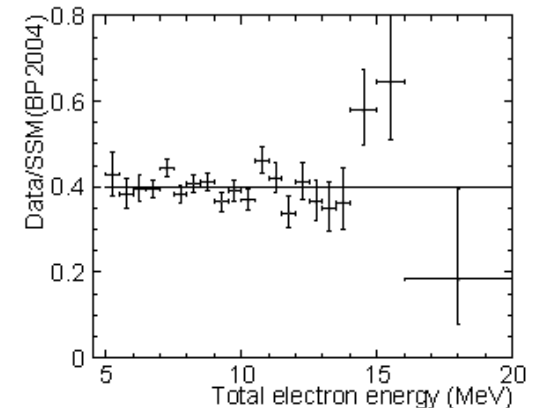
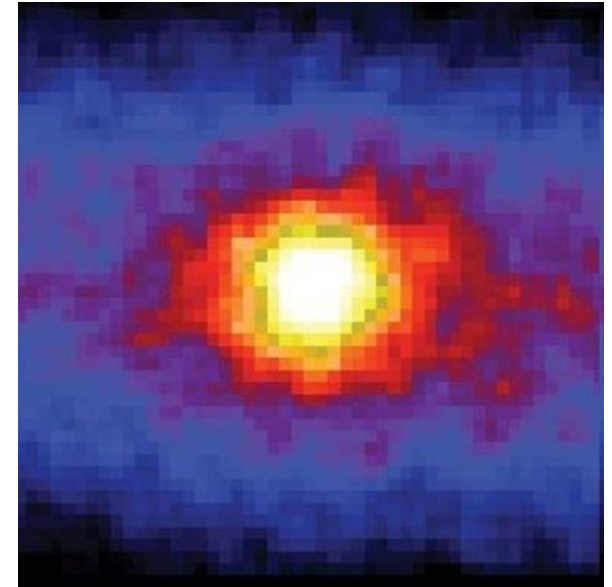
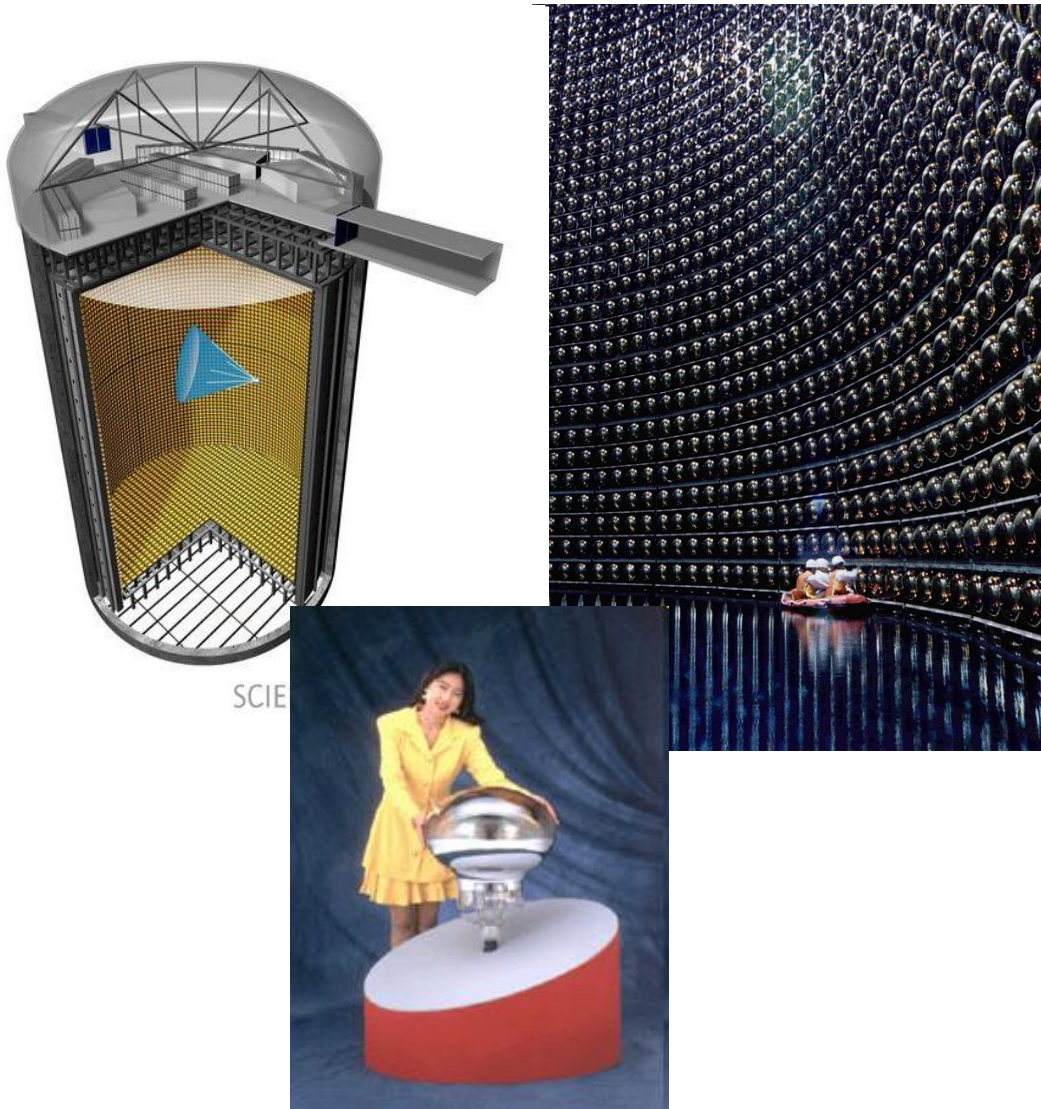
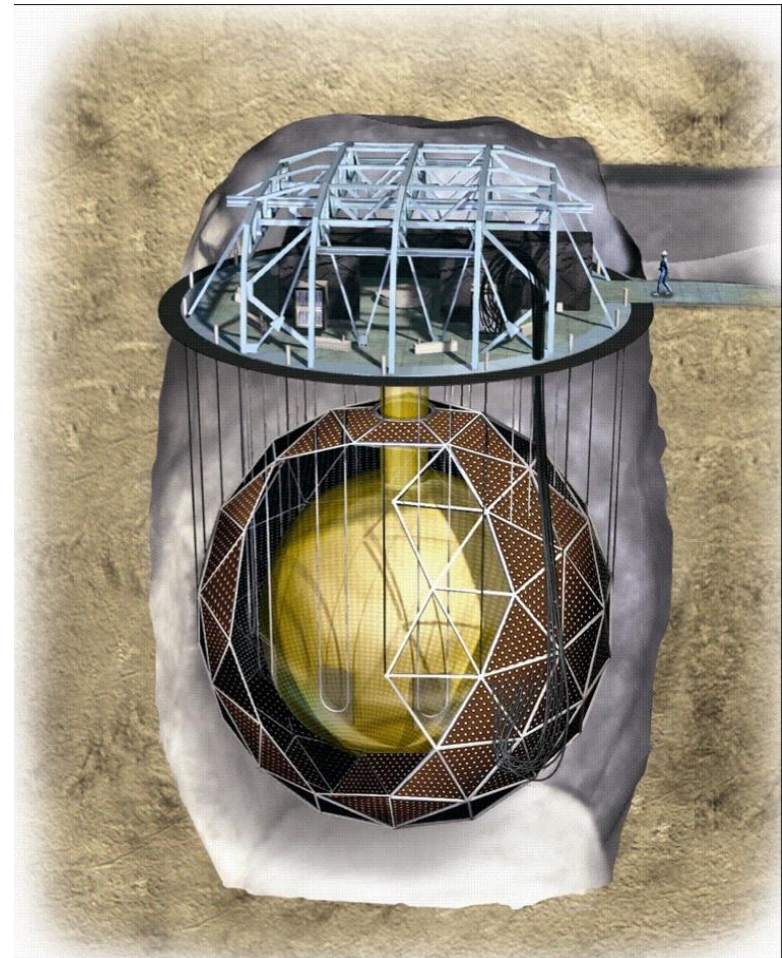


FIG. 27: Ratio of observed and expected energy spectra. The dashed line represents the SK-III average.



# Эксперимент SNO

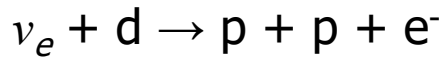
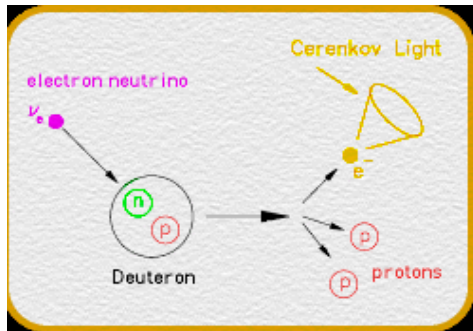
Решающим стал эксперимент SNO (*Sudbury Neutrino Observatory*). В 2002 году он отдельно измерил поток электронных нейтрино и полный поток всех активных нейтрино.



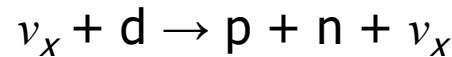
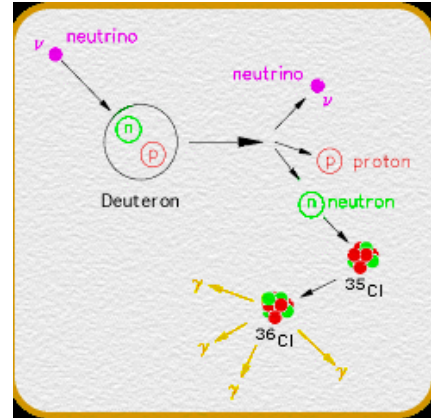
# Обнаружение осцилляций нейтрино

## 2. NC

### 1. CC

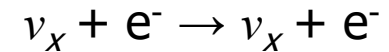
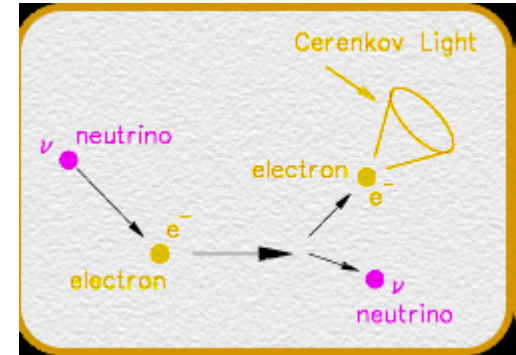


$$E_{\text{пор}} = 1.4 \text{ МэВ}$$



$$E_{\text{пор}} = 2.2 \text{ МэВ}$$

### 3. ES



- $R_{\text{эксп}} / R_{\text{ожид}} (\text{CC}) = 0.347 \pm 0.027$
- $R_{\text{эксп}} / R_{\text{ожид}} (\text{ES}) = 0.473 \pm 0.074$
- $R_{\text{эксп}} / R_{\text{ожид}} (\text{NC}) = 1.008 \pm 0.122$

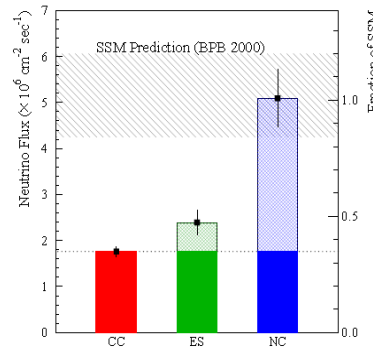


Figure 6: Ratio of the measured CC, ES, and NC reaction rates to the SSM predictions, assuming undistorted CC and ES energy spectra. The cross-hatched region corresponds to the solar model prediction.

**SNO:** Ahmad et al., *Phys. Rev. Lett.* **89**, 011301  
200220022002

# Изучение реакторных антинейтрино

После открытия нейтрино ядерные реакторы стали одним из главных лабораторных источников  $\bar{\nu}_e$ . Их преимущество состоит в том, что они создают интенсивный и контролируемый поток антинейтрино, возникающий в  $\beta$ -распадах продуктов деления. Опыт Райнеса и Коуэна показал, что реакторные  $\bar{\nu}_e$  удобно регистрировать через обратный  $\beta$ -распад. Этот канал стал основным для большинства последующих реакторных экспериментов.

Дальнейшее развитие области было связано не только с улучшением детекторов и подавлением фона, но и с уточнением модели самого реакторного источника. Важную роль сыграли измерения  $\beta$ -спектров деления  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  в ILL, а затем их современная переработка в моделях Мюллера и Хубера.

В результате реакторы стали не просто удобным источником антинейтрино, а прецизионной лабораторией для изучения свойств нейтрино.

## EXPERIMENTAL BETA-SPECTRA FROM $^{239}\text{Pu}$ AND $^{235}\text{U}$ THERMAL NEUTRON FISSION PRODUCTS AND THEIR CORRELATED ANTINEUTRINO SPECTRA

F. von FEILITZSCH <sup>a</sup>, A.A. HAHN <sup>b,1</sup> and K. SCHRECKENBACH <sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Physik Department, Technische Universität München, 8046 Garching, West Germany*

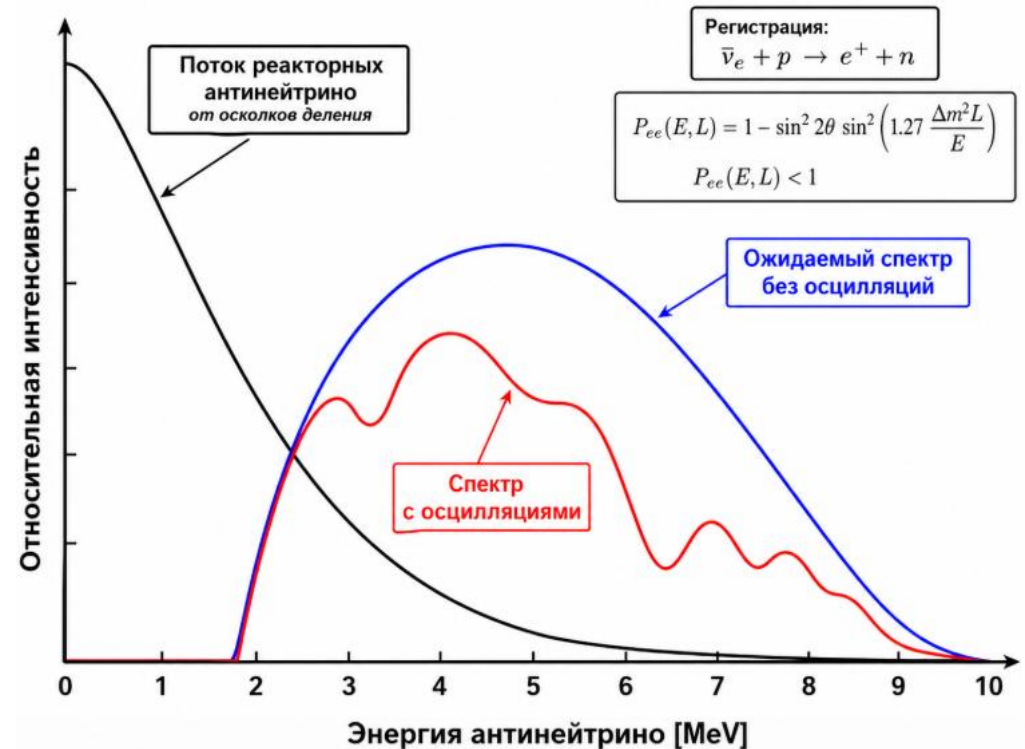
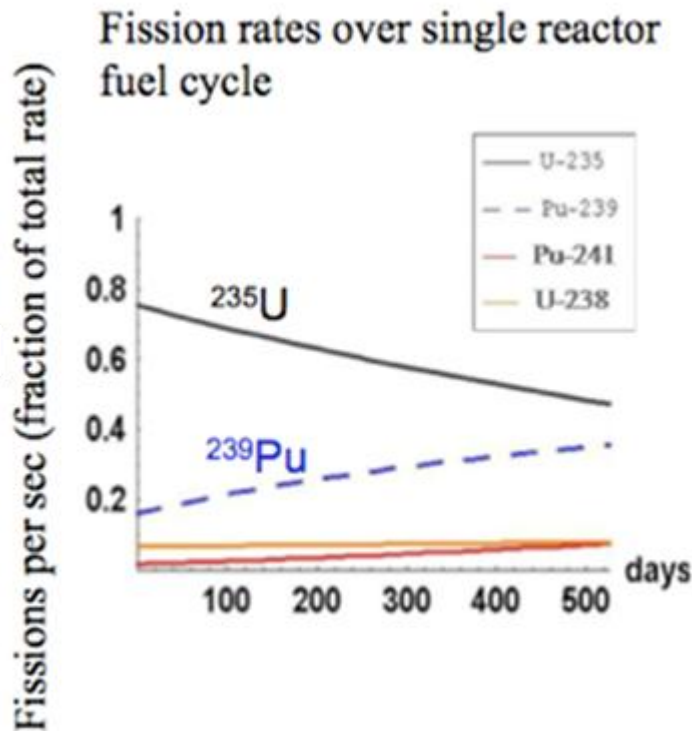
<sup>b</sup> *California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA*

<sup>c</sup> *Institut Laue-Langevin, 38042 Grenoble, France*

Received 28 July 1982

# Спектр антинейтрино от реактора

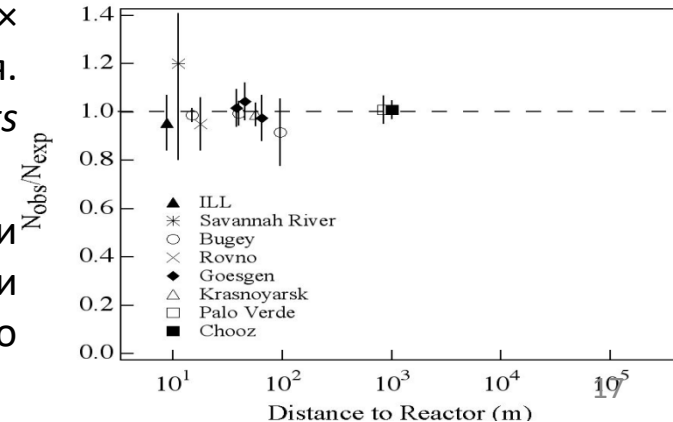
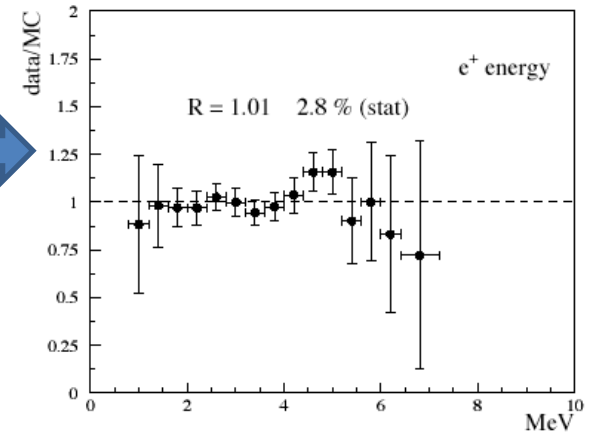
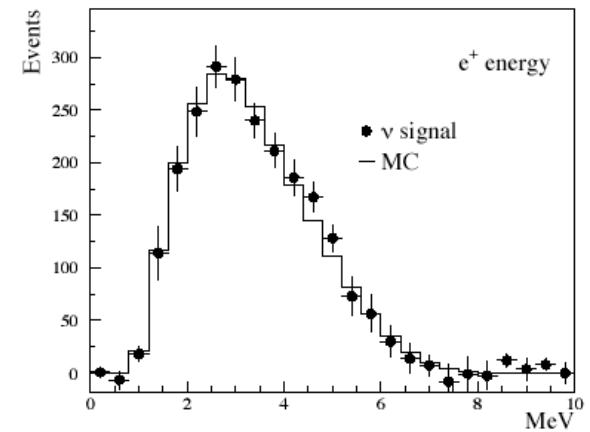
$$\Phi(t, E_{\bar{\nu}}, \vec{L}_0) = \frac{1}{4\pi} \sum_k \frac{N_f(t, \vec{r}_k)}{(\vec{L}_0 - \vec{r}_k)^2} S_f(t, E_{\bar{\nu}}, \vec{r}_k)$$



# Первые короткобазовые реакторные эксперименты

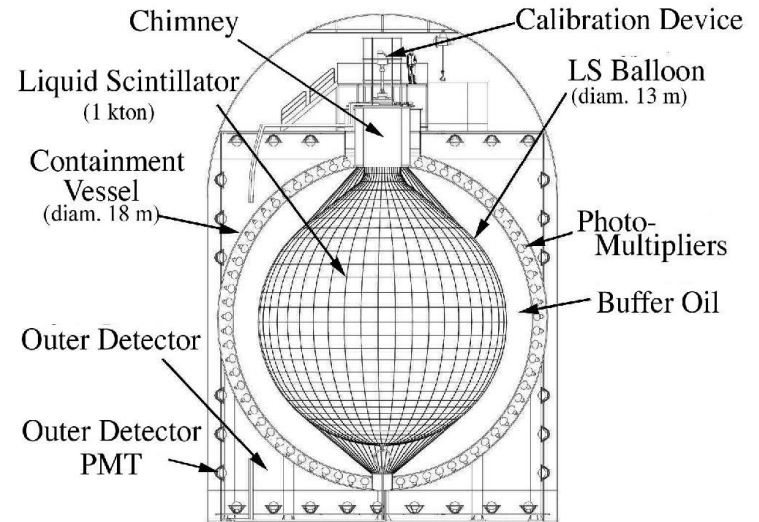
- **Gösgen** — L=37.9, 45.9, 64.7 м Измерялся спектр реакторных  $\bar{\nu}_e$  на трёх расстояниях. **Осцилляции не обнаружены**; получено согласие спектров с ожиданием без осцилляций. *Zacek et al., Phys. Rev. D 34, 2621 (1986)*.
- **Bugey-3** — L=15, 40, 95 м Высокостатистический поиск короткобазового исчезновения  $\bar{\nu}_e$ . **Осцилляции не обнаружены**; получены сильные ограничения на параметры короткобазовых осцилляций. *Achkar et al., Nucl. Phys. B 434, 503 (1995)*.
- **CHOOZ** — L~1 км Поиск исчезновения  $\nu$  на атмосферном масштабе  $\Delta m^2 \sim 10^{-3} eV^2$ . **Сигнал осцилляций не найден**; установлено ограничение на малость  $\theta_{13}$ . *Apollonio et al., Eur. Phys. J. C 27, 331–374 (2003)*
- **Palo Verde** — L~750–890 мЛ Километровый реакторный эксперимент с сегментированным детектором. **Осцилляции не обнаружены**; исключено исчезновение  $\bar{\nu}_e$  при  $\Delta m^2 > 1.12 \times 10^{-3} eV^2$  для полного смешивания. *Boehm et al., Phys. Rev. D 62, 072002 (2000); final results Phys. Rev. D 64, 112001 (2001)*.

**Итог:** эти эксперименты не нашли осцилляций, но заложили методику сравнения спектров на разных базах и показали необходимость много-детекторных установок для точного измерения  $\theta_{13}$ .

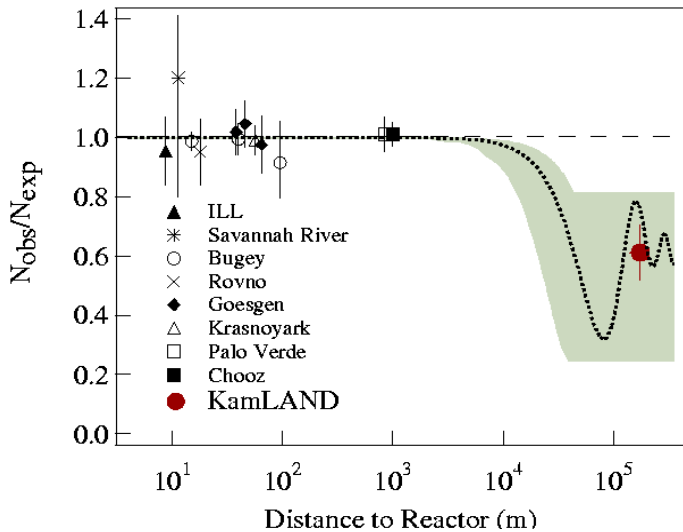
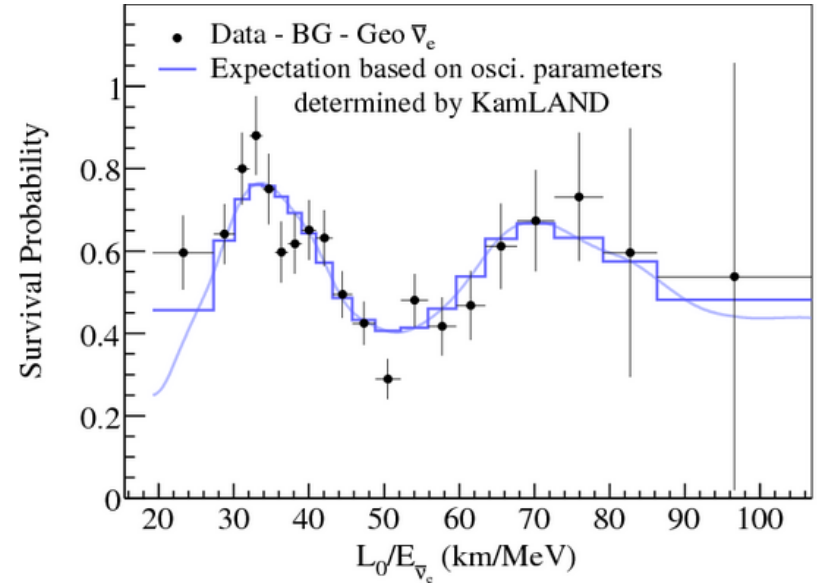
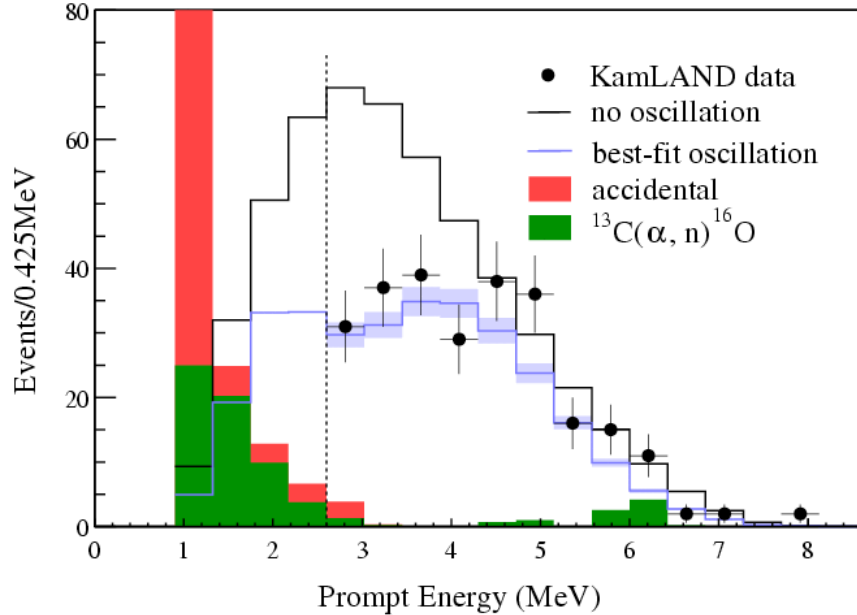


# Эксперимент KamLAND

- KamLAND – **KAMioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector**
- Детектор расположен в шахте Камиока на глубине 1 км (2700 м.в.э.)
- Детектор «видит» 53 атомных станции
  - 26 реакторов (~80 ГВт) находятся на расстояниях 138-214 км от детектора
- Среднее эффективное расстояние до реакторов 180 км



# Подтверждение осцилляций реакторных антинейтрино



Araki et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 081801  
200520052005,

$$\Delta m_{21}^2 = (7.9^{+0.6}_{-0.5}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \quad \tan^2 \theta_{12} = 0.40^{+0.10}_{-0.07},$$

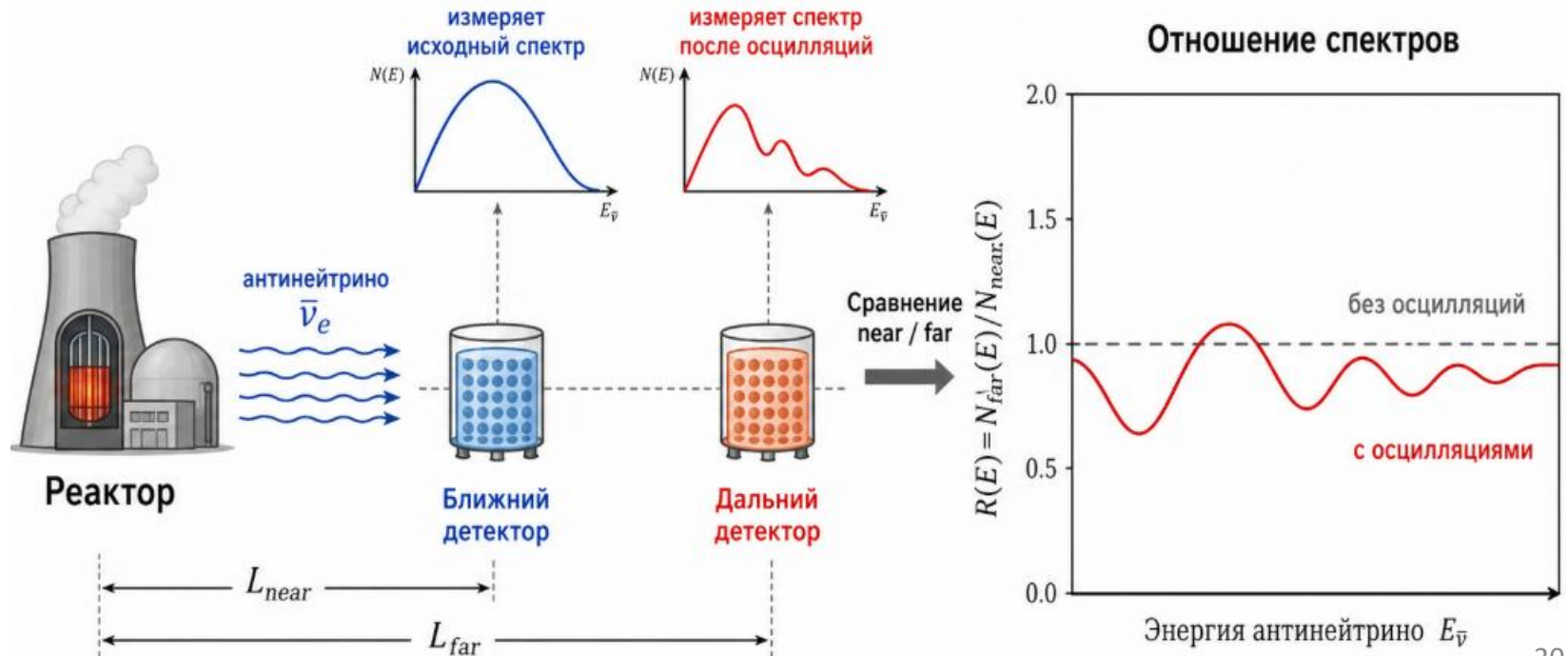
$$\sin^2 \theta_{12} \simeq 0.29^{+0.05}_{-0.04}, \quad \sin^2 2\theta_{12} \simeq 0.82 \pm 0.07.$$

# Переход к многодетекторным экспериментам

После CHOOZ и Palo Verde стало ясно, что для измерения малого угла  $\theta_{13}$  главным ограничением являются не статистика, а систематические ошибки: неопределённость реакторного потока, спектра  $\bar{\nu}_e$ , эффективности детектора и фонов.

Идея решения — **near-far схема**: поставить два почти одинаковых детектора на разных расстояниях от реактора. Ближний детектор измеряет исходный спектр, дальний — спектр после осцилляций. Тогда сравнение отношения спектров позволяет увидеть исчезновение  $\nu$ , почти не завися от точного знания реакторного потока.

L. A. Mikaelyan, V. V. Sinev, "Neutrino oscillations at reactors: what next?" 1999.

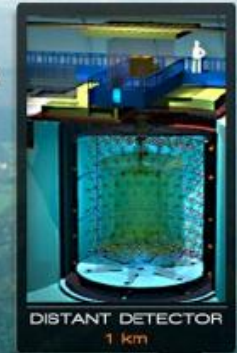


# Эксперимент Double CHOOZ



2 identical targets  $\nu$  oscillation  
of 8.3t @1050m

$\bar{\nu}$  flux  
Normalisation  
@400m

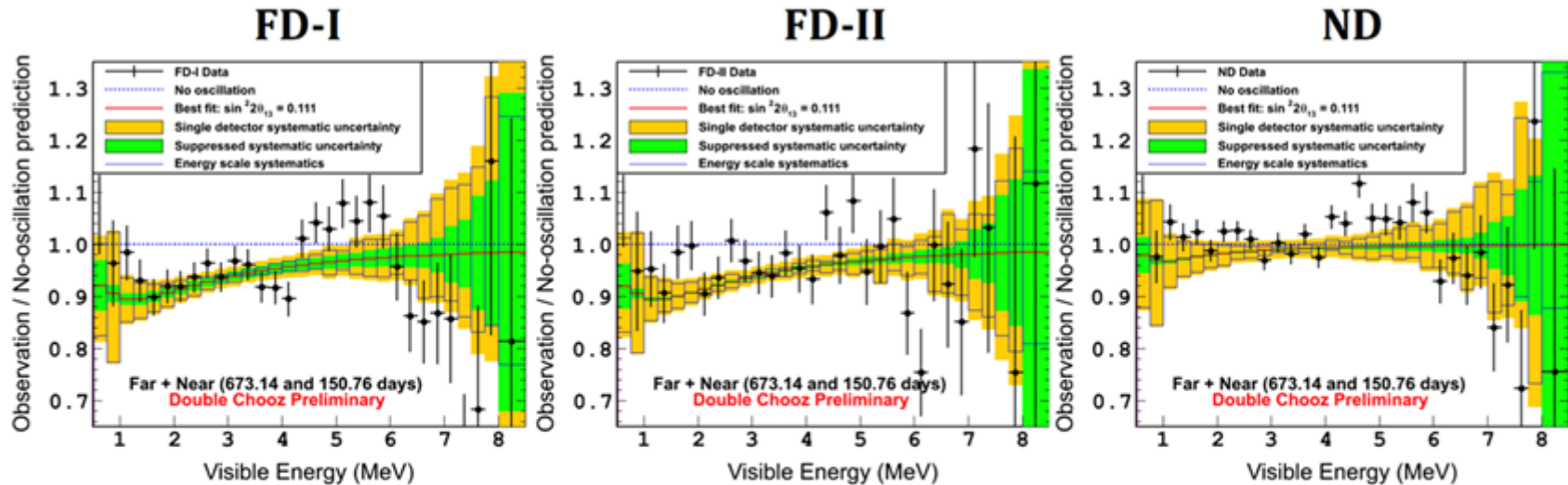


- PHASE 1 (2011-12)
  - far detector only
  - $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.06$
  - (1,5 years, 90% C.L.)
- PHASE 2 (2012-13)
  - far + near
  - $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.03$
  - (3 years, 90% C.L.)



2 reactors-N4  
2x4.27 GW<sub>th</sub>  
10<sup>21</sup> ν<sub>e</sub>/s

# Результат Double CHOOZ

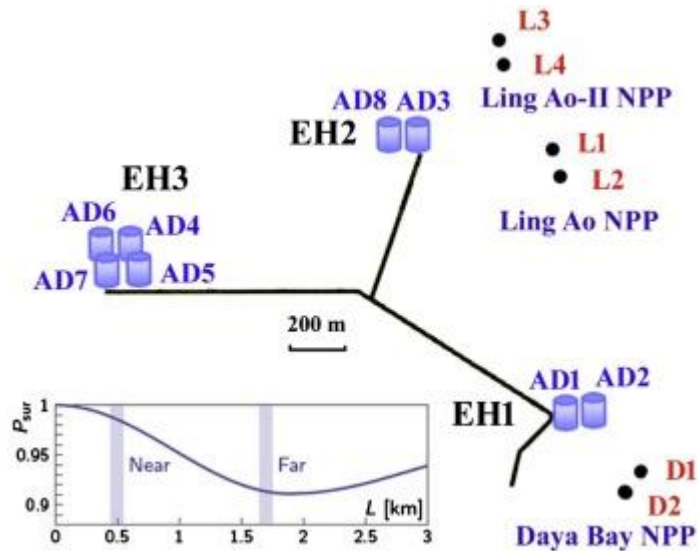


- Best-fit:  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.111 \pm 0.018$  (stat.+syst.) ( $\chi^2/\text{dof} = 128.8/120$ )  
– Non-zero  $\theta_{13}$  observation at  $5.8\sigma$  C.L.

Y. Abe et al. (Double Chooz Collaboration), “Indication of Reactor  $\bar{\nu}_e$  Disappearance in the Double Chooz Experiment”, Phys. Rev. Lett. 108, 131801 (2012).

# Эксперимент Daya Bay

- Китай: 6 энергоблоков (3 ГВт каждый), 8 детекторов: 4+2+2
- Сцинтиллятор: LAB + Gd
- Начало DAQ: 2011
- Наиболее точное измерение  $\theta_{13}$  на сегодня



# Эксперимент Daya Bay

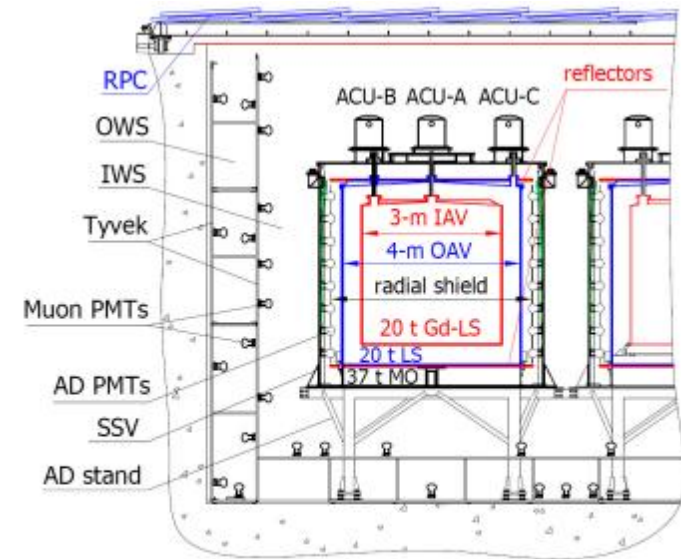
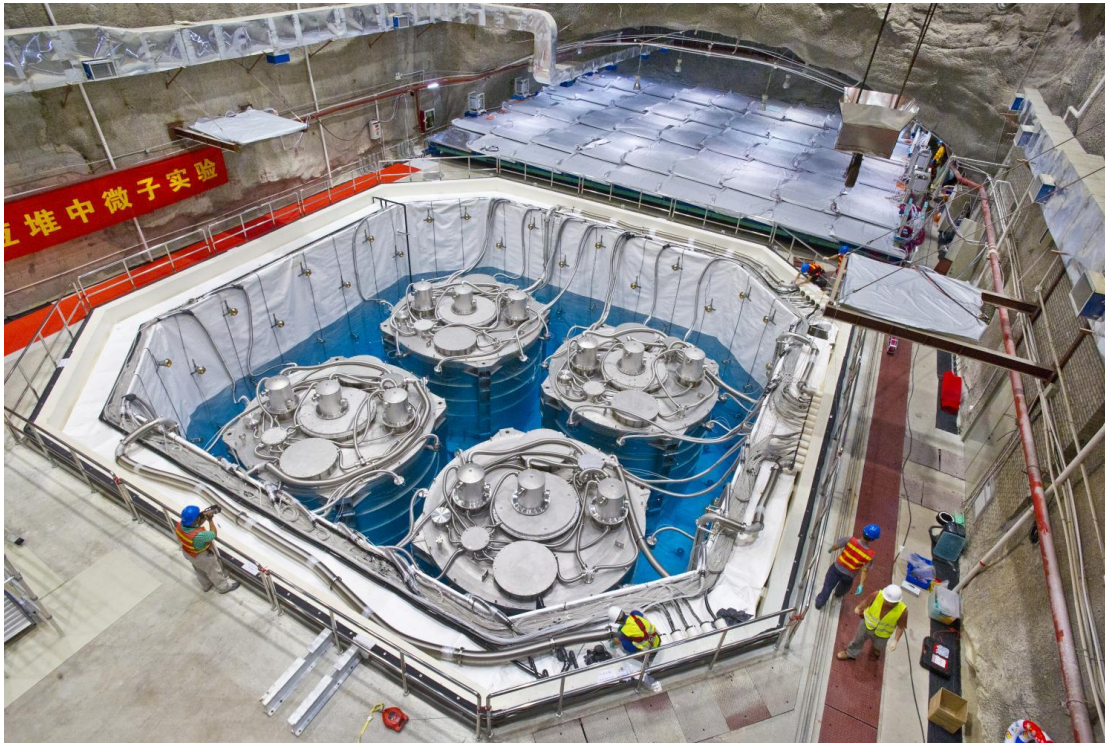


FIG. 2. Schematic diagram of the Daya Bay detectors.

# Результаты Daya Bay

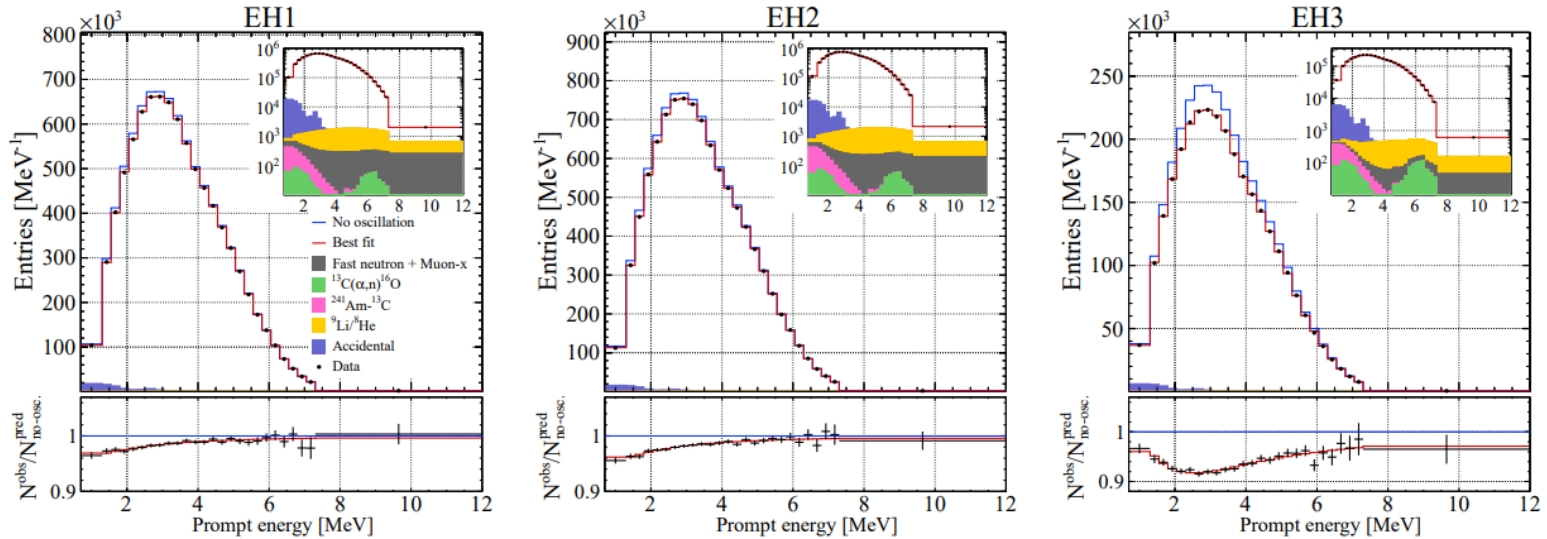


FIG. 2. The measured prompt-energy spectra of EH1, EH2 and EH3 with the best-fit and no-oscillation curves superimposed in the upper panels. The shape of the backgrounds are apparent in the spectra with a logarithmic ordinate shown in the insets. The lower panels shows the ratio of the observed spectrum to the predicted no-oscillations distribution. The error bars are statistical.

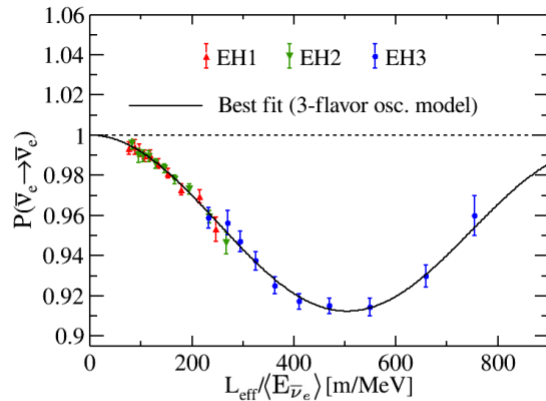


FIG. 3. Measured disappearance probability as a function of the ratio of the effective baseline  $L_{eff}$  to the mean antineutrino energy  $\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle$ .

**Daya Bay final: An et al., *Phys. Rev. Lett.* **130**, 161802 2023,**

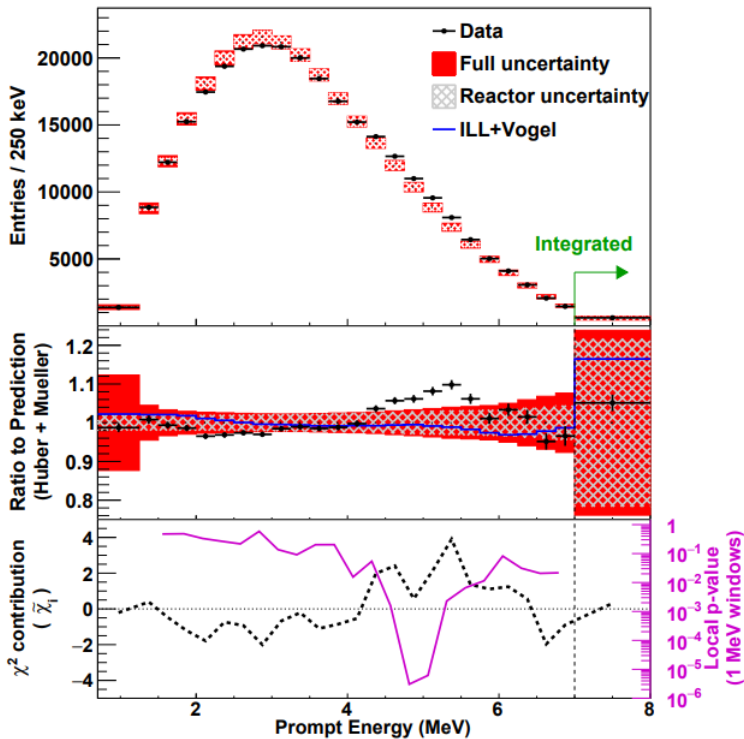
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0851 \pm 0.0024$$

$$\Delta m_{32}^2 = 2.466 \pm 0.060 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{32}^2 = -(2.571 \pm 0.060) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

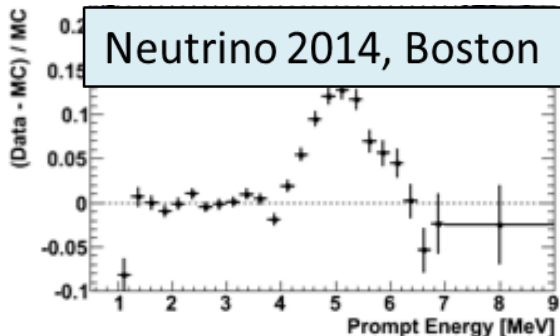
# Спектральная аномалия

Daya Bay: An et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**,  
061801 2016,

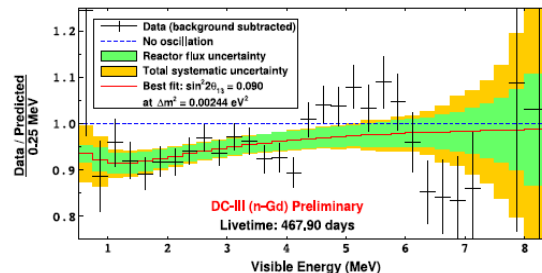


Практически во всех реакторных экспериментах было обнаружено существенное расхождение данных с модельным спектром в районе 5-6 МэВ “бамп” спектральная аномалия. С ростом точности экспериментов стало ясно, что важны не только параметры осцилляций, но и сама модель реакторного источника: абсолютный поток, форма спектра и топливная эволюция. Это привело к новым вопросам: поиск неточностей в моделировании реактора, поиску стерильных нейтрино и уточнению моделей реакторных спектров.

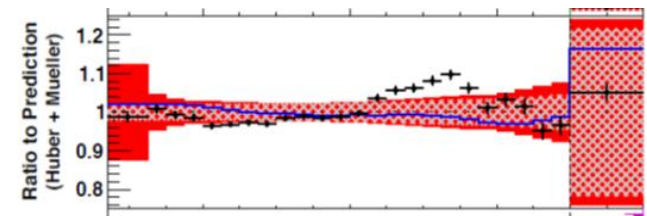
RENO



Double Chooz



Daya Bay



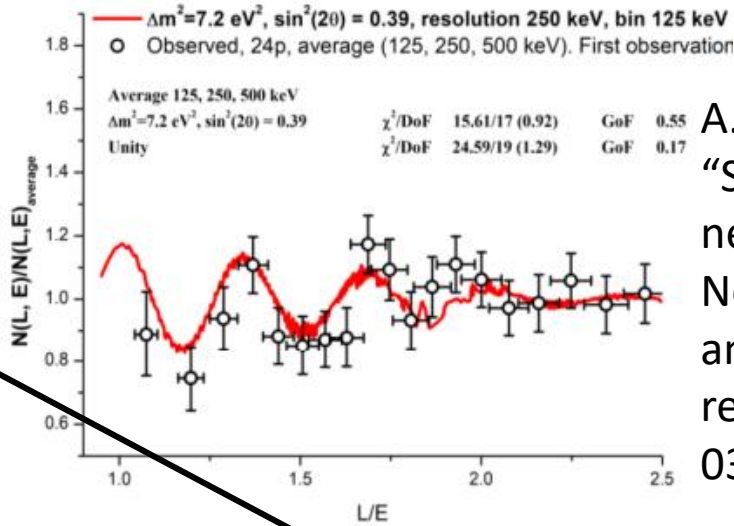
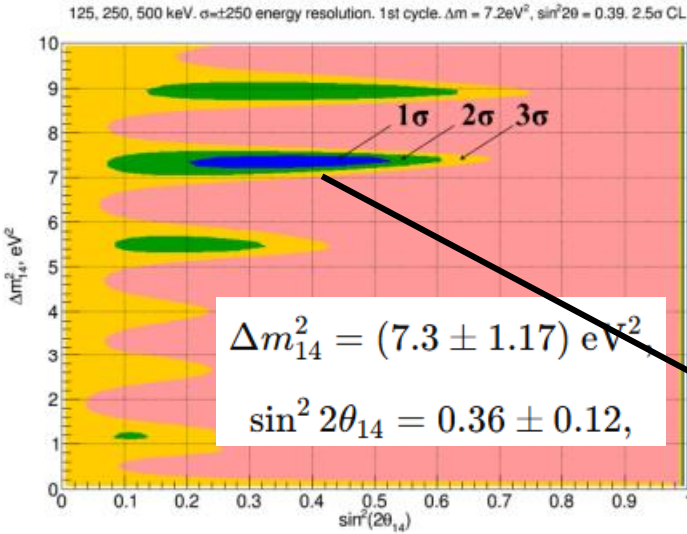
# Короткобазовые эксперименты

Короткие базы  $L \sim 5-20$  м стали актуальны после появления **реакторной антинейтринной аномалии**. Короткобазовые эксперименты проверяют, меняются ли поток и форма спектра уже в нескольких метрах от реактора.

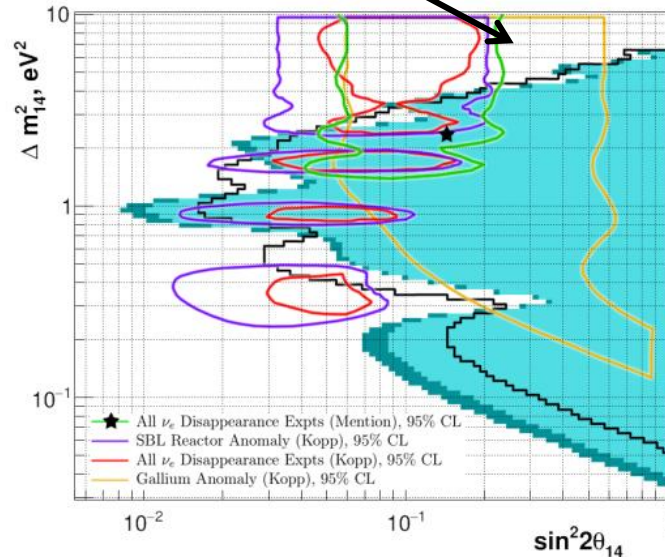
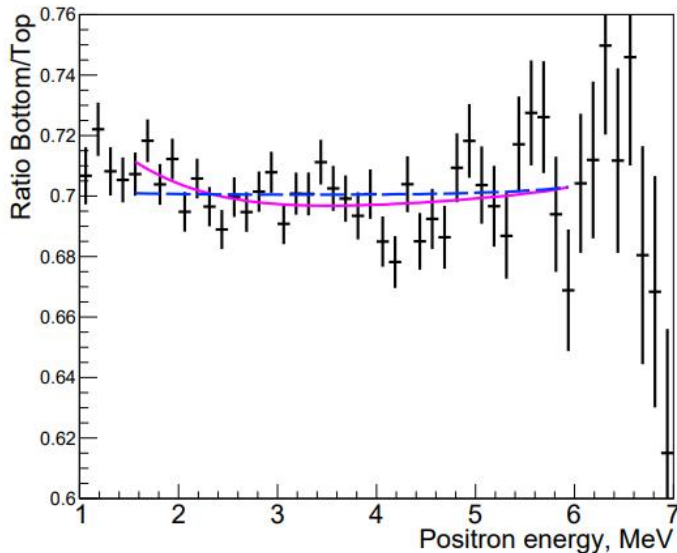
Так же поток  $\nu$  связан с мощностью реактора и составом топлива. Поэтому компактный детектор рядом с реактором может использоваться для **внешнего мониторинга активной зоны** без прямого доступа к ней.

Эксперимент	Реактор / источник	База (L)	Детектор / идея	Основной результат
<b>NEOS</b>	Hanbit, Южная Корея, 2.8 ГВт	24 м	1 т Gd-сцинтиллятора; сравнение формы спектра с эталонным спектром Daya Bay	Сильного сигнала стерильных осцилляций не найдено; данные согласуются с гипотезой без осцилляций. Также наблюдался избыток около 5 МэВ. ( <a href="#">arXiv</a> )
<b>DANSS</b>	Калининская АЭС, Россия, 3.1 ГВт	10.7-12.7 м	Подвижный сегментированный пластиковый сцинтиллятор под реактором; сравнение спектров на разных расстояниях	Осцилляционного сигнала не найдено; исключены широкие области параметров стерильных нейтрино, анализ почти не зависит от модели реакторного спектра. ( <a href="#">PoS</a> )
<b>STEREO</b>	ILL, Франция, компактный исследовательский реактор	9-11 м	6 сегментов Gd-сцинтиллятора; поиск искажения спектра между ячейками	Данные совместимы с отсутствием осцилляций; область best-fit реакторной антинейтринной аномалии отвергнута с высокой значимостью. ( <a href="#">arXiv</a> )
<b>PROSPECT</b>	HFIR, Oak Ridge, США, HEU-реактор	7-9 м	Сегментированный сцинтиллятор; измерение чистого $^{235}\text{U}$ -спектра и поиск (L/E)-искажений	Первый анализ не нашёл осцилляционного сигнала и отверг best-fit реакторной аномалии на уровне $(2.2)\sigma$ ; финальный анализ усилил ограничения. ( <a href="#">arXiv</a> )
<b>Solid</b>	BR2, Бельгия	5-15 м	Сегментированный детектор на пластиковом сцинтилляторе; very-short-baseline поиск	Цель — проверка реакторной аномалии и поиск стерильных осцилляций на очень малой базе; детектор работал у BR2 в 2018–2022 гг. ( <a href="#">Inspire</a> )
<b>Neutrino-4</b>	CM-3, Россия, компактный исследовательский реактор	6-12 м	Подвижный многосекционный жидкосцинтилляционный детектор	Коллаборация заявляла указание на стерильные осцилляции, но результат остаётся спорным и находится в напряжении с DANSS, STEREO, PROSPECT и NEOS. ( <a href="#">arXiv</a> )
<b>iDREAM</b>	Калининская АЭС, Россия, 3.1 ГВт	20 м	Прототип промышленного детектора для мониторинга реактора; 1 т жидкого сцинтиллятора, регистрация через IBD	Основная цель — демонстрация возможности дистанционного мониторинга реактора по потоку, а не поиск осцилляций. Детектор установлен и введён в работу на Калининской АЭС в 2021 году. ( <a href="#">arXiv</a> )

# Результаты Neutrino-4



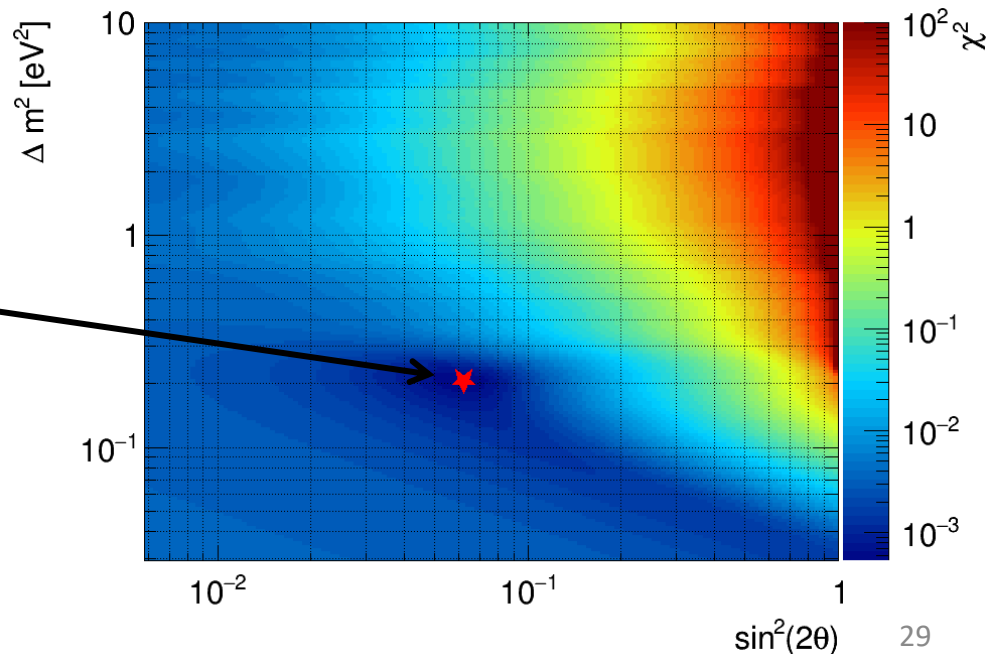
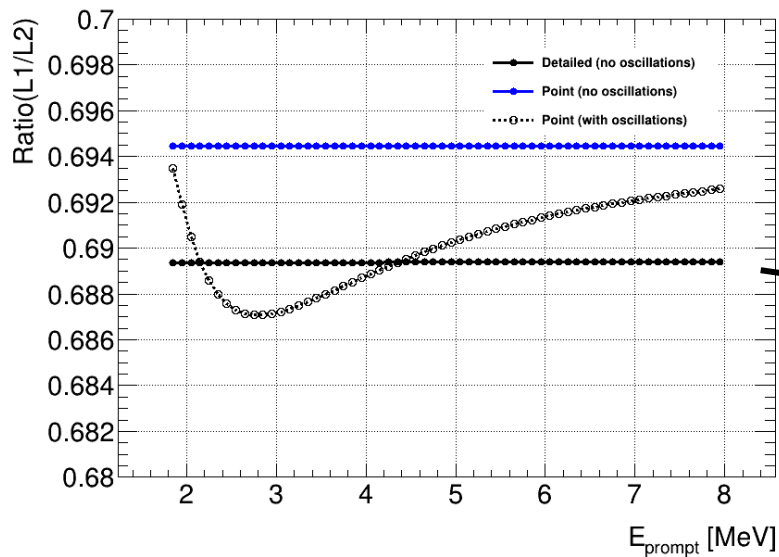
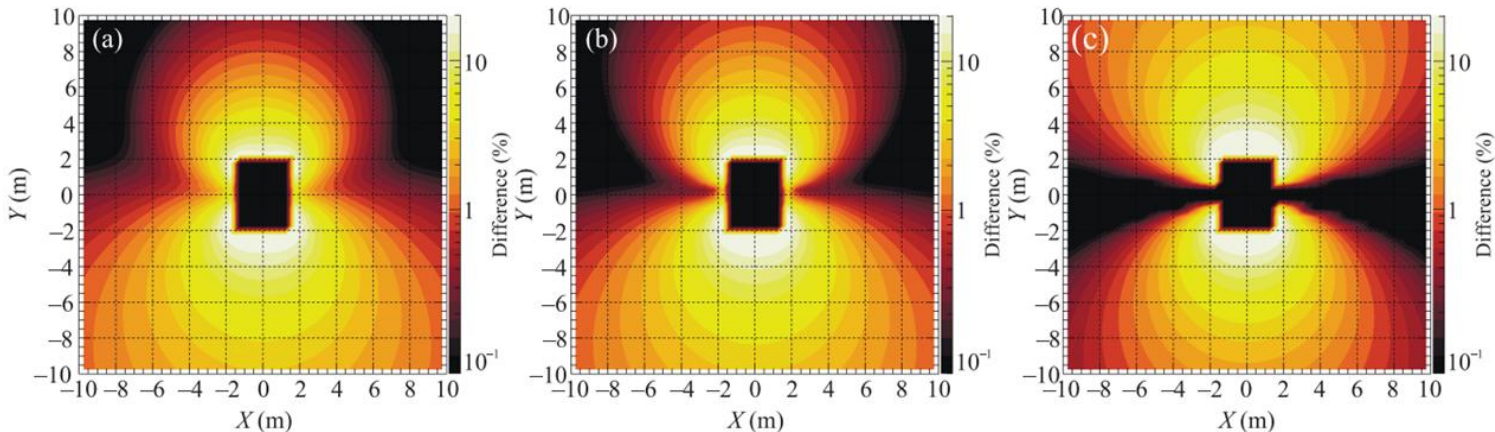
A. P. Serebrov et al.,  
 “Search for sterile neutrinos with the Neutrino-4 experiment and measurement results”, Phys. Rev. D 104, 032003 (2021).



M. Danilov, “Recent results of the DANSS experiment”, arXiv:1911.10140 2019.

# Возможное описание расхождения через неоднородность потока

Zhutikov,  
Litvinovich,  
Khvatov, *JETP  
Letters* 119, 158–  
165 2024



# Мониторинг состояния реактора

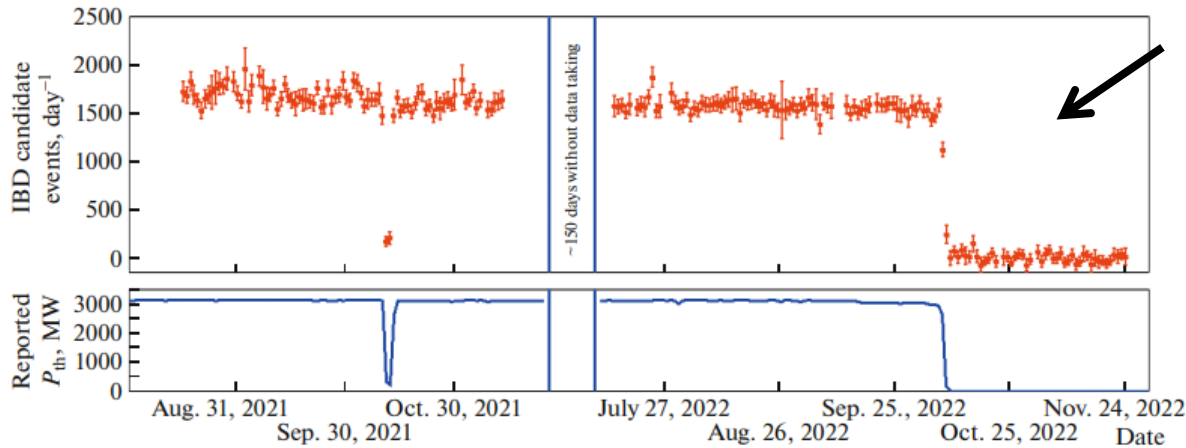
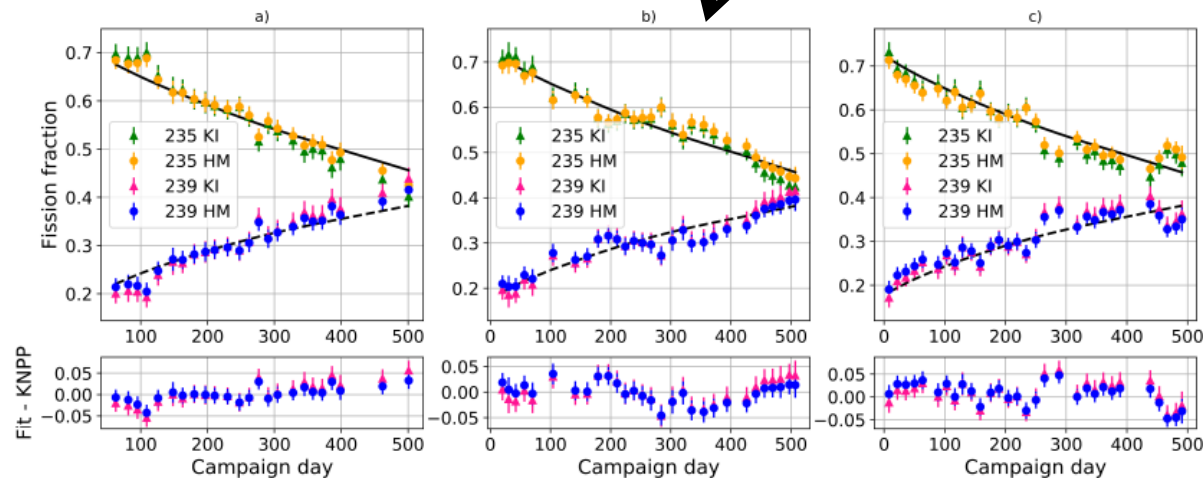
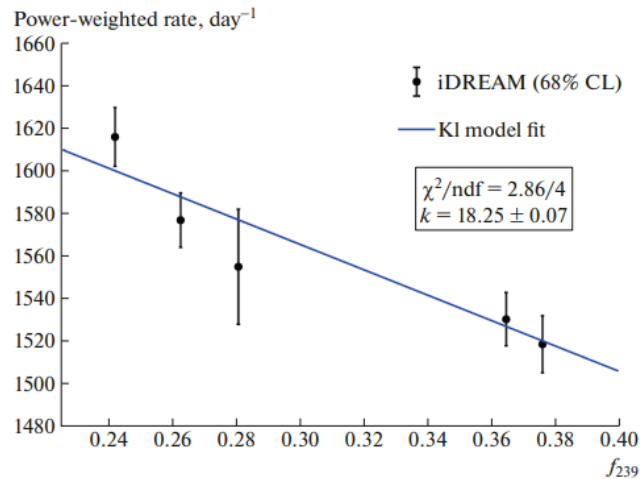


Fig. 3. IBD candidate events' rate (markers with error bars) and the reported thermal power  $P_{th}$  (continuous line below).

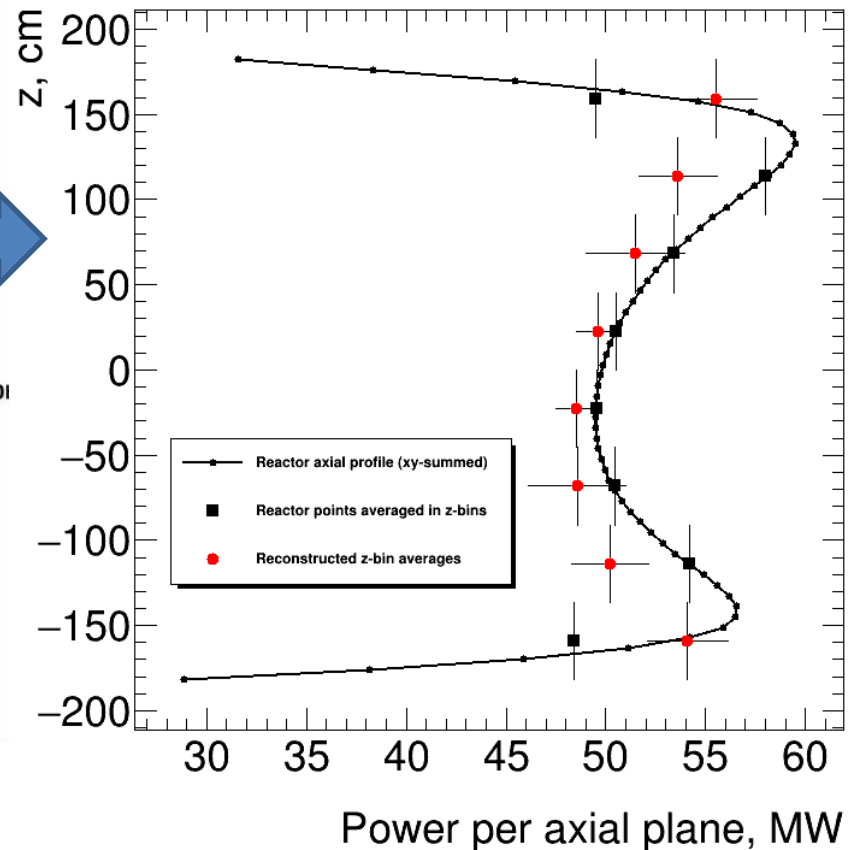
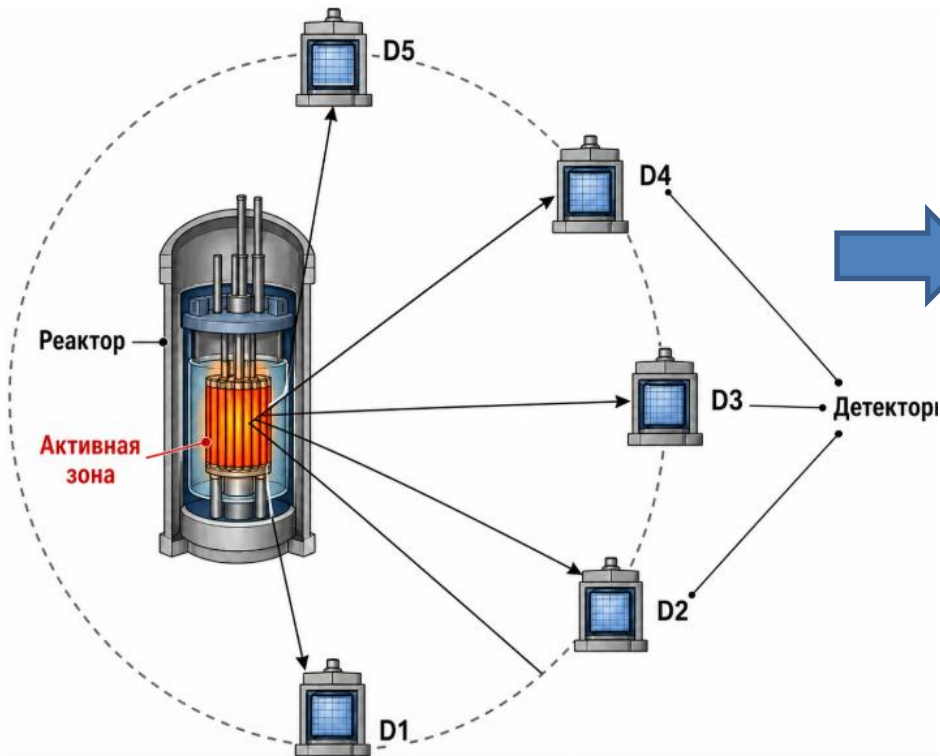
A. Abramov et al., “iDREAM: industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin nuclear power plant”,

I. Alekseev et al., “Long term remote reactor power and fuel composition monitoring using antineutrinos”



# Изучение внутренних процессов в реакторе

Анизотропия антинейтринного потока на малых расстояниях может служить источником информации о процессах, происходящих внутри активной зоны реактора.



# Выводы: современное состояние нейтринной физики

- Нейтринные осцилляции надёжно подтверждены: нейтрино имеют массу, а flavor-состояния не совпадают с mass-состояниями.
- Точно измерены основные параметры смешивания, включая  $\theta_{13}$ , но остаются открытыми вопросы: порядок масс,  $\delta_{cp}$
- Реакторные эксперименты стали прецизионным инструментом для измерения осцилляций и проверки моделей антинейтринного спектра.
- Короткобазовые эксперименты проверяют реакторную антинейтринную аномалию и возможное существование стерильных нейтрино.
- Антинейтринный поток рассматривается не только как объект фундаментальной физики, но и как инструмент мониторинга состояния реактора.

# Список литературы

- Pauli W. *Letter to the Radioactive Ladies and Gentlemen* (“Liebe Radioaktive Damen und Herren”), 4 Dec 1930. CERN Document Server.
- Fermi E. *Versuch einer Theorie der  $\beta$ -Strahlen. I.* **Z. Phys.** 88 (1934) 161–177. doi:10.1007/BF01351864.
- Pontecorvo B. *Inverse Beta Process*. Report PD-205 (1946).
- Davis R. Jr. *Attempt to Detect the Antineutrinos from a Nuclear Reactor by the  $Cl^{37}(v^-, e^-)A^{37}\bar{\nu}, e^- \rightarrow A^{37}Cl^{37}(v^-, e^-)A^{37}$  Reaction.* **Phys. Rev.** 97 (1955) 766–769. doi:10.1103/PhysRev.97.766.
- Cowan C. L. Jr. et al. *Detection of the Free Neutrino: a Confirmation.* **Science** 124 (1956) 103–104. doi:10.1126/science.124.3212.103.
- Lee T. D., Yang C. N. *Question of Parity Conservation in Weak Interactions.* **Phys. Rev.** 104 (1956) 254–258. doi:10.1103/PhysRev.104.254.
- Wu C. S. et al. *Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay.* **Phys. Rev.** 105 (1957) 1413–1415. doi:10.1103/PhysRev.105.1413.
- Goldhaber M., Grodzins L., Sunyar A. W. *Helicity of Neutrinos.* **Phys. Rev.** 109 (1958) 1015–1017. doi:10.1103/PhysRev.109.1015.
- Danby G. et al. *Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos.* **Phys. Rev. Lett.** 9 (1962) 36–44. doi:10.1103/PhysRevLett.9.36.
- Pontecorvo B. *Mesonium and Antimesonium.* **Sov. Phys. JETP** 6 (1957/1958) 429.
- Pontecorvo B. *Inverse Beta Processes and Nonconservation of Lepton Charge.* **Sov. Phys. JETP** 7 (1958) 172–173.
- Maki Z., Nakagawa M., Sakata S. *Remarks on the Unified Model of Elementary Particles.* **Prog. Theor. Phys.** 28 (1962) 870–880. doi:10.1143/PTP.28.870.
- Gribov V., Pontecorvo B. *Neutrino Astronomy and Lepton Charge.* **Phys. Lett. B** 28 (1969) 493–496. doi:10.1016/0370-2693(69)90525-5.
- Apollonio M. et al. *Initial Results from the CHOOZ Long Baseline Reactor Neutrino Oscillation Experiment.* **Phys. Lett. B** 420 (1998) 397–404. doi:10.1016/S0370-2693(97)01476-7.
- Boehm F. et al. *Final Results from the Palo Verde Neutrino Oscillation Experiment.* **Phys. Rev. D** 64 (2001) 112001. doi:10.1103/PhysRevD.64.112001.
- Eguchi K. et al. *First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance.* **Phys. Rev. Lett.** 90 (2003) 021802. doi:10.1103/PhysRevLett.90.021802.

# Список литературы

- Araki T. et al. *Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND*. **Phys. Rev. Lett.** 94 (2005) 081801. doi:10.1103/PhysRevLett.94.081801.
- Abe Y. et al. *Indication of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the Double Chooz Experiment*. **Phys. Rev. Lett.** 108 (2012) 131801. doi:10.1103/PhysRevLett.108.131801.
- Abe Y. et al. *Improved Measurements of the Neutrino Mixing Angle  $\theta_{13}$  with the Double Chooz Detector*. **JHEP** 10 (2014) 086. arXiv:1406.7763.
- An F. P. et al. *Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay*. **Phys. Rev. Lett.** 108 (2012) 171803. doi:10.1103/PhysRevLett.108.171803.
- Ahn J. K. et al. *Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment*. **Phys. Rev. Lett.** 108 (2012) 191802. doi:10.1103/PhysRevLett.108.191802.
- An F. P. et al. *Measurement of Electron Antineutrino Oscillation Based on 1230 Days of Operation of the Daya Bay Experiment*. **Phys. Rev. D** 95 (2017) 072006. doi:10.1103/PhysRevD.95.072006.
- Mention G. et al. *The Reactor Antineutrino Anomaly*. **Phys. Rev. D** 83 (2011) 073006. doi:10.1103/PhysRevD.83.073006.
- Mueller Th. A. et al. *Improved Predictions of Reactor Antineutrino Spectra*. **Phys. Rev. C** 83 (2011) 054615. doi:10.1103/PhysRevC.83.054615.
- Huber P. *Determination of Antineutrino Spectra from Nuclear Reactors*. **Phys. Rev. C** 84 (2011) 024617. doi:10.1103/PhysRevC.84.024617.
- An F. P. et al. *Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay*. **Phys. Rev. Lett.** 116 (2016) 061801. doi:10.1103/PhysRevLett.116.061801.
- An F. P. et al. *Evolution of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay*. **Phys. Rev. Lett.** 118 (2017) 251801. doi:10.1103/PhysRevLett.118.251801.
- Adey D. et al. *Extraction of the  $^{235}\text{U}$  and  $^{239}\text{Pu}$  from the Daya Bay Experiment*. doi:10.1016/j.nima.2006.12.015.
- Boireau G. et al. *Online Monitoring of the Osiris Reactor with the Nucifer Neutrino Detector*. **Phys. Rev. D** 93 (2016) 112006. doi:10.1103/PhysRevD.93.112006.
- Abramov A. et al. *iDREAM: Industrial Detector of REactor Antineutrinos for Monitoring at Kalinin Nuclear Power Plant*. arXiv:2112.09372.
- Alekseev I. et al. *Long Term Remote Reactor Power and Fuel Composition Monitoring Using Antineutrinos*. arXiv:2410.18914.
- Bernstein A. et al. *Colloquium: Neutrino Detectors as Tools for Nuclear Security*. **Rev. Mod. Phys.** 92 (2020) 011003. doi:10.1103/RevModPhys.92.011003.

# MSW-эффект

Решающим шагом стала работа Линкольна Вольфенштейна *Neutrino Oscillations in Matter* 1978. Он показал, что при распространении нейтрино в веществе взаимодействие с электронами среды изменяет эффективные параметры осцилляций: угол смешивания и разность квадратов масс.

Следующий ключевой этап связан с работами Михеева и Смирнова 1985–1986. Они показали, что в Солнце, где плотность вещества меняется постепенно, может возникать резонансное усиление превращений

Этот механизм получил название **MSW-эффекта** и стал естественным объяснением дефицита солнечных электронных нейтрино.

К середине 1980-х годов сформировалась основная теоретическая картина: нейтрино имеют массу, flavor-состояния не совпадают с mass-состояниями, а вещество может существенно усиливать осцилляции. Окончательное подтверждение этой картины потребовало экспериментов нового поколения, способных измерять солнечные нейтрино в разных каналах и энергетических областях.

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 17, NUMBER 9

1 MAY 1978

## Neutrino oscillations in matter

L. Wolfenstein

*Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213*

(Received 6 October 1977; revised manuscript received 5 December 1977)

The effect of coherent forward scattering must be taken into account when considering the oscillations of neutrinos traveling through matter. In particular, for the case of massless neutrinos for which vacuum oscillations cannot occur, oscillations can occur in matter if the neutral current has an off-diagonal piece connecting different neutrino types. Applications discussed are solar neutrinos and a proposed experiment involving transmission of neutrinos through 1000 km of rock.

## Resonant Amplification of $\nu$ Oscillations in Matter and Solar-Neutrino Spectroscopy.

S. P. MIKHEYEV and A. YU. SMIRNOV

*Institute for Nuclear Research of Academy of Sciences  
60th October Anniversary prosp. 7a, Moscow 117 342, USSR*

(ricevuto il 3 Maggio 1985)