

РНЦ «Курчатовский институт»

М.Д. Скорохватов

Детектор Борексино.  
Физические результаты

НИИЯФ МГУ 2 декабря 2008 г.

# Солнечные нейтрино

Солнечные нейтрино

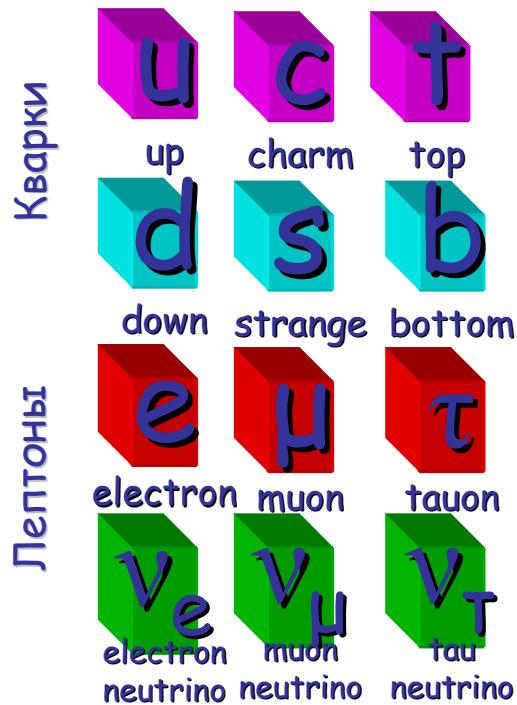


К числу наиболее ярких и вместе с тем трудных страниц в истории развития физики в XX веке принадлежит открытие нейтрино, необычным путём вошла в науку эта новая частица, удивительными оказались ее свойства, и не исключено, что именно с ней связаны самые глубокие тайны природы.

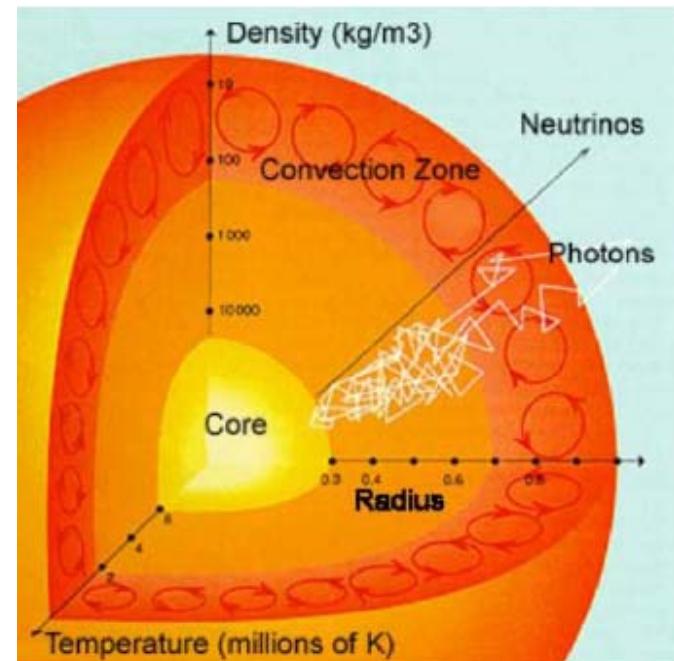
# Солнечные нейтрино



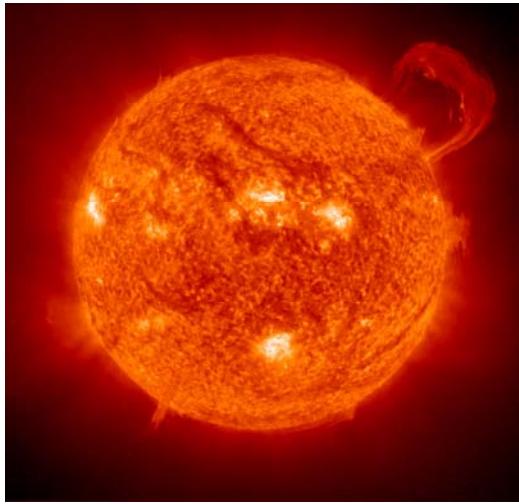
Модель частиц



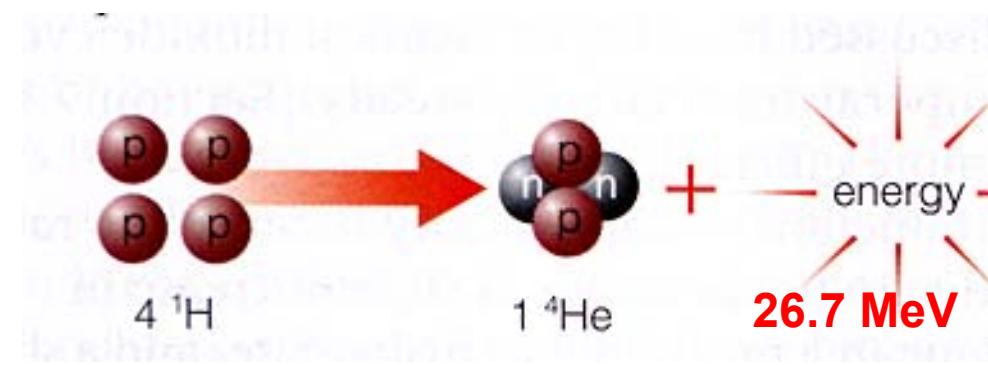
Модель Солнца



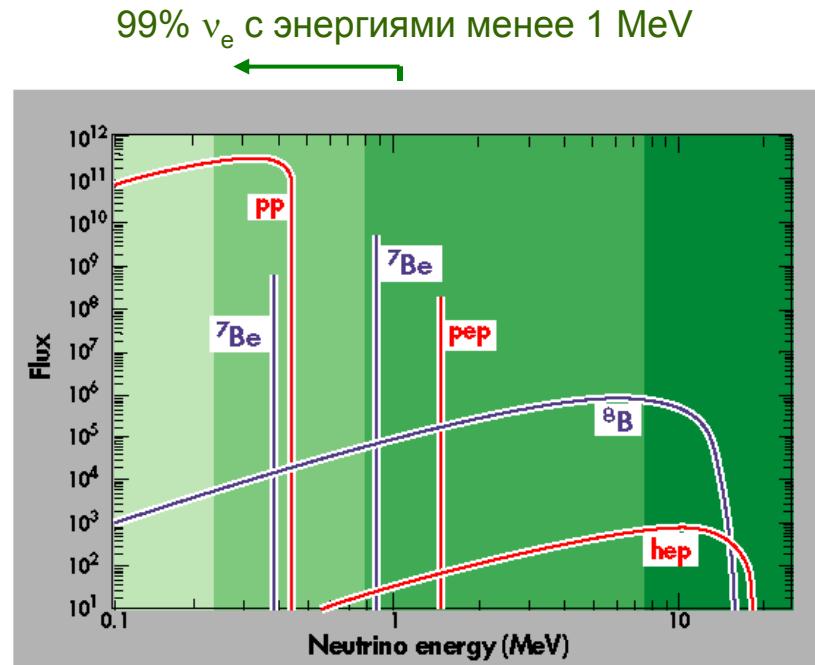
Расширение Стандартной модели  
Окно в новую физику



# Генерация энергии Солнца



термоядерный процесс	энергия $\nu$ MeV	Solar Model поток, $\nu/\text{см}^2\text{с}$
$\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{d} + \text{e}^+ + \nu_e$	< 0.4	$5.97 \times 10^{10}$
$^7\text{Be} + \text{e}^- \rightarrow ^7\text{Li} + \nu_e$	0.86 (90%) 0.38 (10%)	$5.07 \times 10^9$
$\text{p} + \text{e}^- + \text{p} \rightarrow \text{d} + \nu_e$	1.4	$1.41 \times 10^8$
$^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be} + \text{e}^+ + \nu_e$	< 15	$5.94 \times 10^6$
$^3\text{He} + \text{p} \rightarrow ^4\text{He} + \text{e}^+ + \nu_e$	< 19	$7.90 \times 10^3$



# Солнечная модель

Октябрь 2008 года

термоядерный процесс	Solar Model HM ПОТОК, $\nu/\text{см}^2\text{с}$	Solar Model LM ПОТОК, $\nu/\text{см}^2\text{с}$	разница
$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$	$5.97 \times 10^{10}$	$6.04 \times 10^{10}$	1.2%
$^7\text{Be} + e^- \rightarrow ^7\text{Li} + \nu_e$	$5.07 \times 10^9$	$4.55 \times 10^9$	10%
$^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$	$5.94 \times 10^6$	$4.72 \times 10^6$	21%

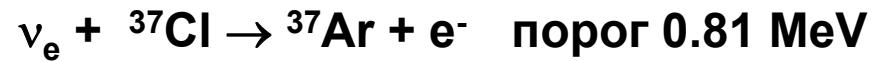
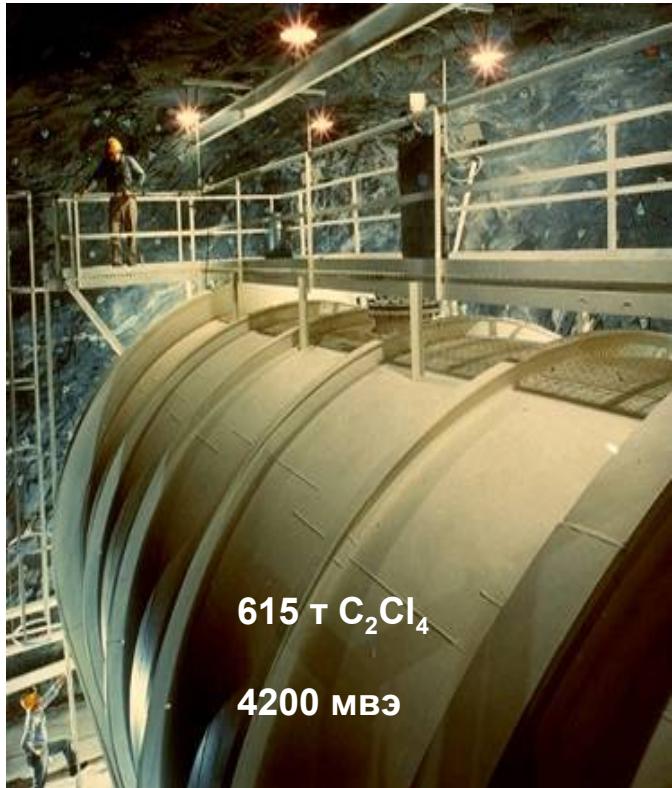
## Задачи

Экспериментальная проверка моделей

Прецизионные измерения интенсивности нейтринного излучения

Спектрометрия нейтрино низких энергий

# Парадокс солнечных нейтрино



Первый радиохимический эксперимент:  
1964-1968 гг., шахта Хоумстейк, Северная Дакота



скорость образования  ${}^{37}\text{Ar}$   
меньше (~1/3) ожидаемого  
значения !

Р.Дэвис.  
Нобелевская премия, 2002 г.



# Нейтринные осцилляции

Б. Понтекорво, 1957-1958 гг.

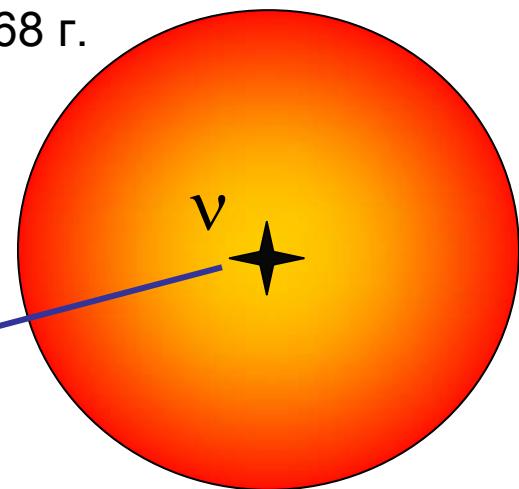
З.Маки, М.Накагава и С.Саката, 1962 г.

В.Грибов, Б.Понтекорво, 1968 г.

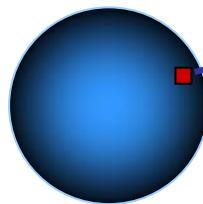
$m_\nu \neq 0 !$

Распространение в вакууме

$L \sim 1.5 \times 10^8$  км



*Бруно Понтекорво*



$$\phi = \phi_e + \phi_{\mu(\tau)} = P_{ee} \times \phi_{\odot} + (1 - P_{ee}) \times \phi_{\odot}$$

$$P_{ee}(t) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E}) = 1 - 1/2 \sin^2 2\theta$$

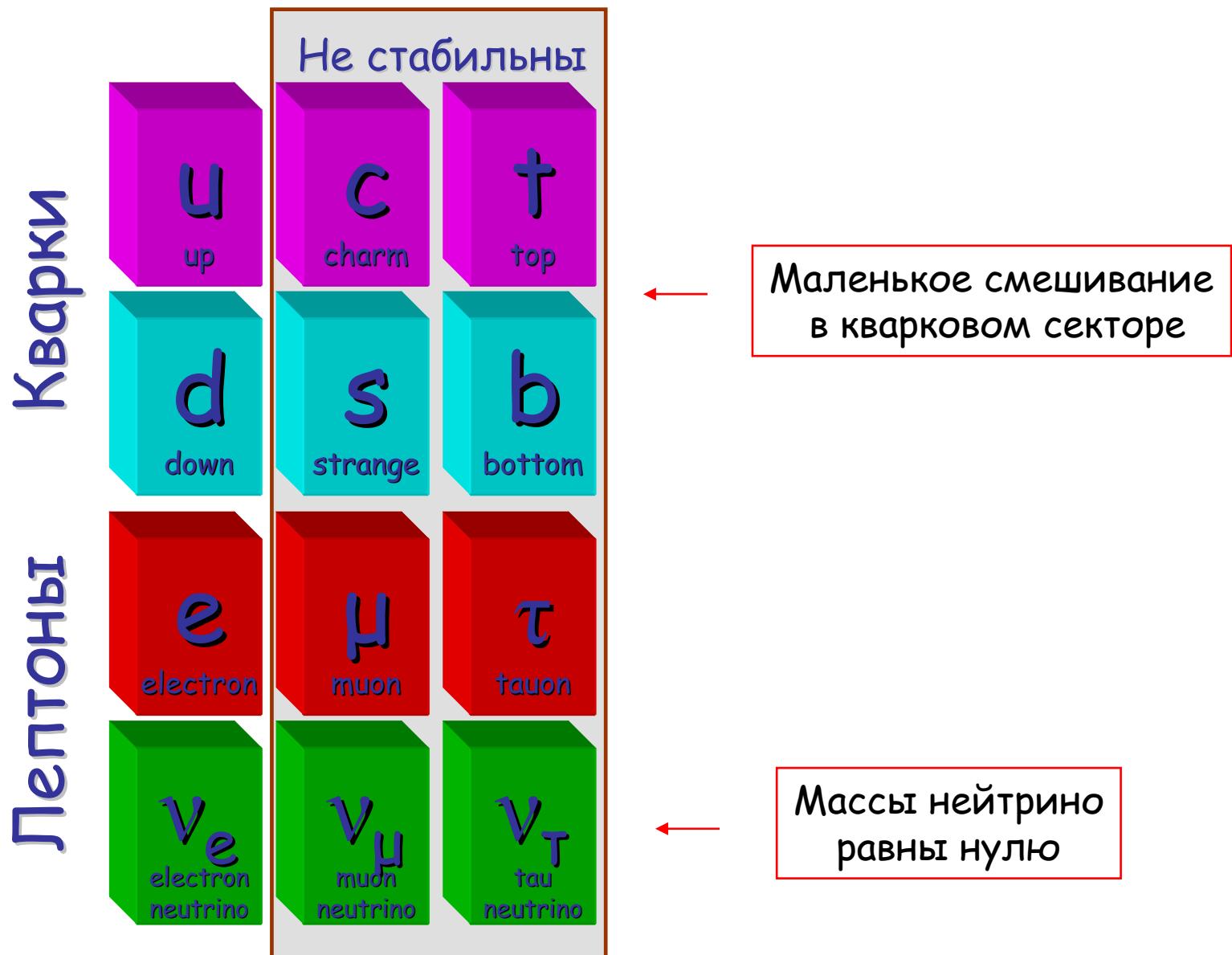
$\theta$  - угол смешивания,

$\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$  разность квадратов масс

«... поток наблюдаемых солнечных нейтрино должен быть в два раза меньше полного потока солнечных нейтрино.»

«Нейтринные опыты и вопрос о сохранении лептонного заряда» ЖЭТФ, 1967, т.53, вып.5, с.1717-1725.

# Стандартная модель



# Усиление осцилляций в веществе (эффект MSW)



Возможны решения

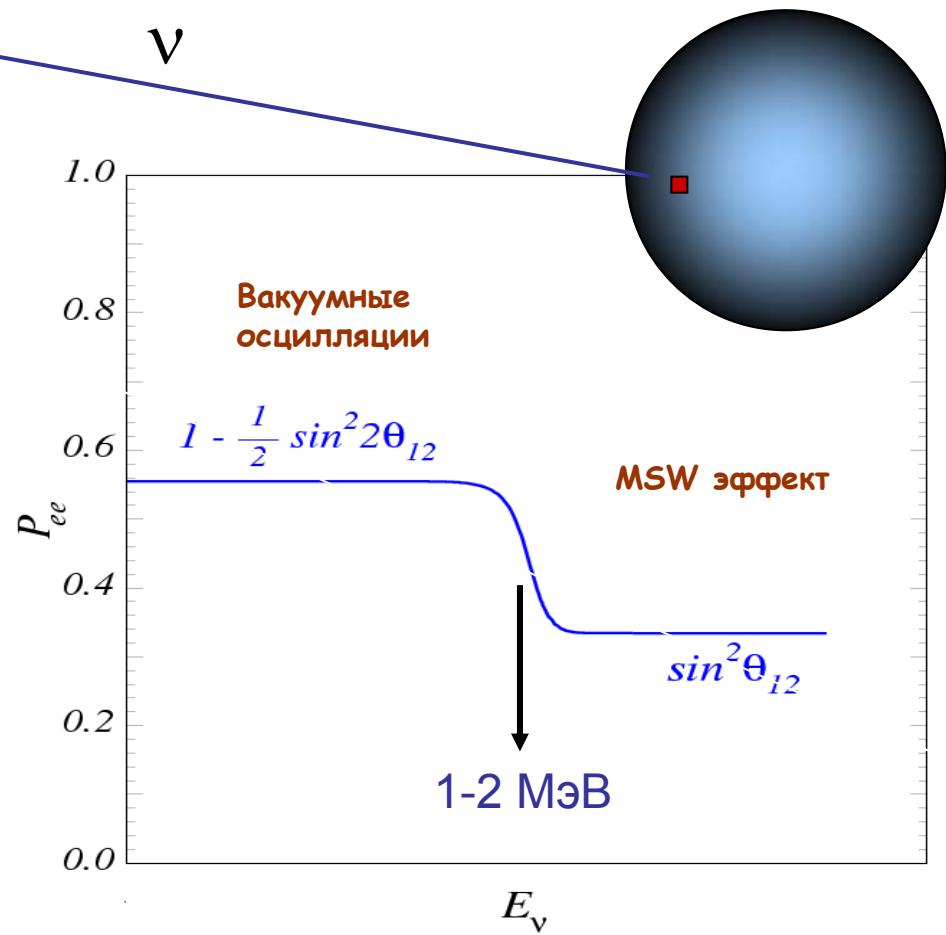
- LMA,  
большой угол смешивания
- SMA,  
маленький угол смешивания

Влияние вещества

Л. Валфенстейн, 1978 г.

Конверсия нейтрино

С. Михеев и А. Смирнов, 1985 г.



# Нейтринные эксперименты

1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020
------	------	------	------	------	------	------

## Радиохимия:

Cl-Ar (выполнен)

SAGE (выполнен)

GALLEX/GNO (выполнен)

Нет  
спектрометрической  
информации



## Черенковские детекторы:

Kamiokande (выполнен)

SK (выполнен)

SNO (выполнен)

высокий порог  
регистрации (5-7 МэВ),  
только 8B-нейтрино



## Сцинтилляционные детекторы:

Borexino (запущен, 2007 г.)

KamLand (готовится)

SNO+ (планируется)

LENS (планируется)

.....

# Результаты экспериментов

Энергия (MeV)	Процесс регистрации	Экспер. точность	$\phi_{\text{экс.}}/\phi_{\odot}$ без осцилляций	$\phi_{\text{ожид.}}/\phi_{\odot}$ MSW-LMA
> 0.23	${}^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-){}^{71}\text{Ge}$	~5%	~0.53	0.56
> 0.81	${}^{37}\text{Cl}(\nu_e, e^-){}^{37}\text{Ar}$	~9%	~0.30	0.30
> 5÷5.5	d( $\nu_e, e^-$ )pp	~9%	~0.29	0.30
> 5÷7	$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	~4%	~0.40	0.41
> 2.2	d( $\nu_e, \nu_e$ )np	~9%	~0.93	1

Данные могут быть описаны  
единным образом в модели MSW  
при

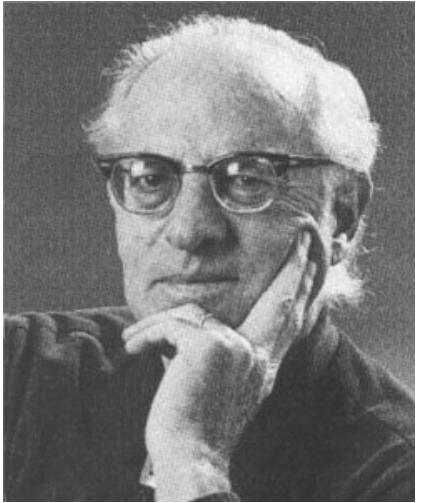
$$\Delta m^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta \sim 0.3$$

$$P_{ee} = 1 - 1/2 \times \sin^2 2\theta - \text{для энергий } < 1 \text{ MeV} \\ (\text{pp-, } {}^7\text{Be нейтрино})$$

$$P_{ee} = \sin^2 \theta - \text{для энергий } > 1 \text{ MeV} \\ ({}^8\text{B нейтрино})$$

$$P_{ee} \times \phi_{\odot} + 0.154(1 - P_{ee}) \times \phi_{\odot}$$

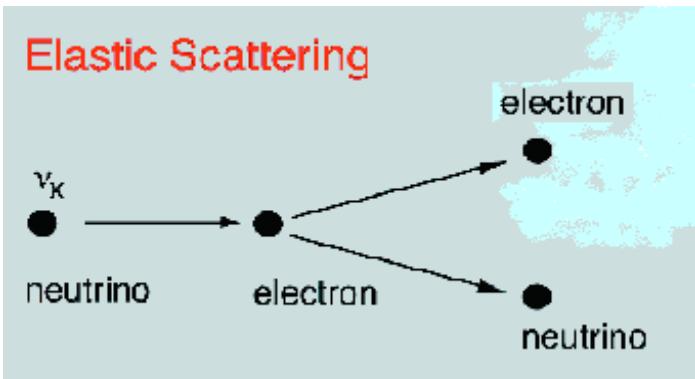


# Рассеяние нейтрино на электроне

«Очевидны преимущества прямой регистрации каждого случая поглощения нейтрино, равно как и определения энергетического спектра. Такой путь предполагает использование детектора, с помощью которого измеряется энергия образующегося электрона».

Ф. Райнес 1964-1966 гг.

ES



$$\sigma = 10^{-44} \text{ cm}^2$$

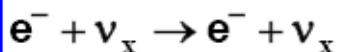
?



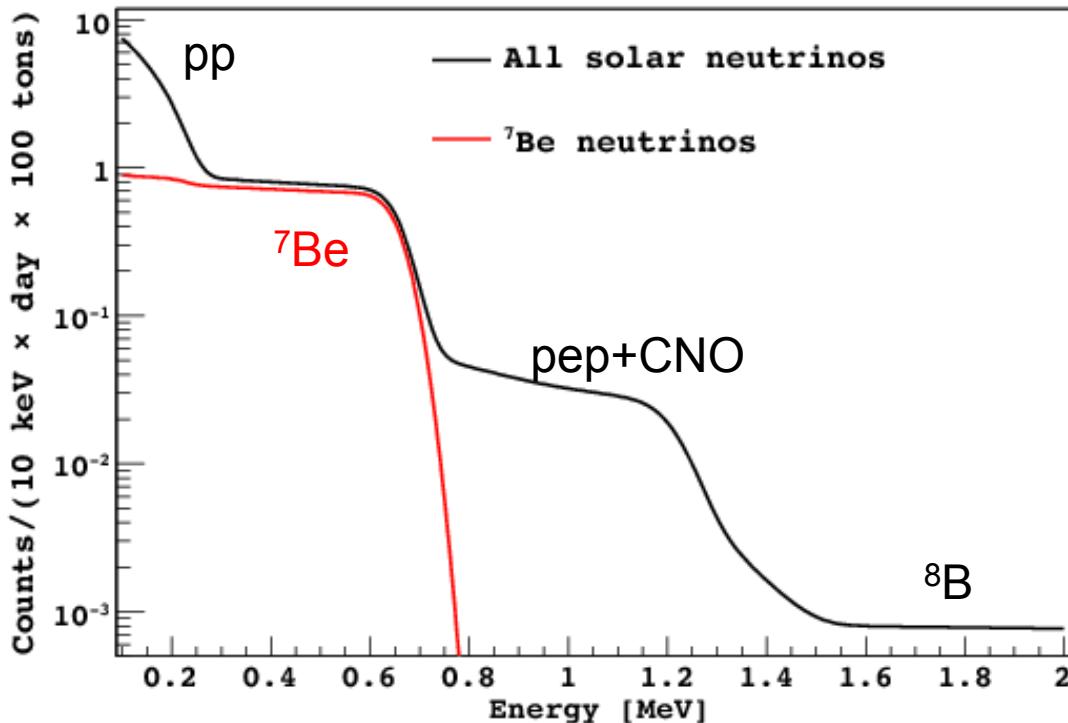
$$\phi_{ES} = Pee \times \phi_{\odot} + 0.154(1-Pee) \times \phi_{\odot}$$

1964 г. 200 л ЖС,  $E > 9$  MeV

# ФОН СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ детекторов



РНЦ КИ, ИЯИ РАН, 1976



Скорость счета  $^7\text{Be}-\nu$  на 100т ЖС:

75  $\pm$  4 соб./день без осцилляций

48  $\pm$  4 соб./день MSW-LMA

$\sim 5 \times 10^{-9} \text{ Bq/Kg}$



3 кг ЖС, 660 мвэ

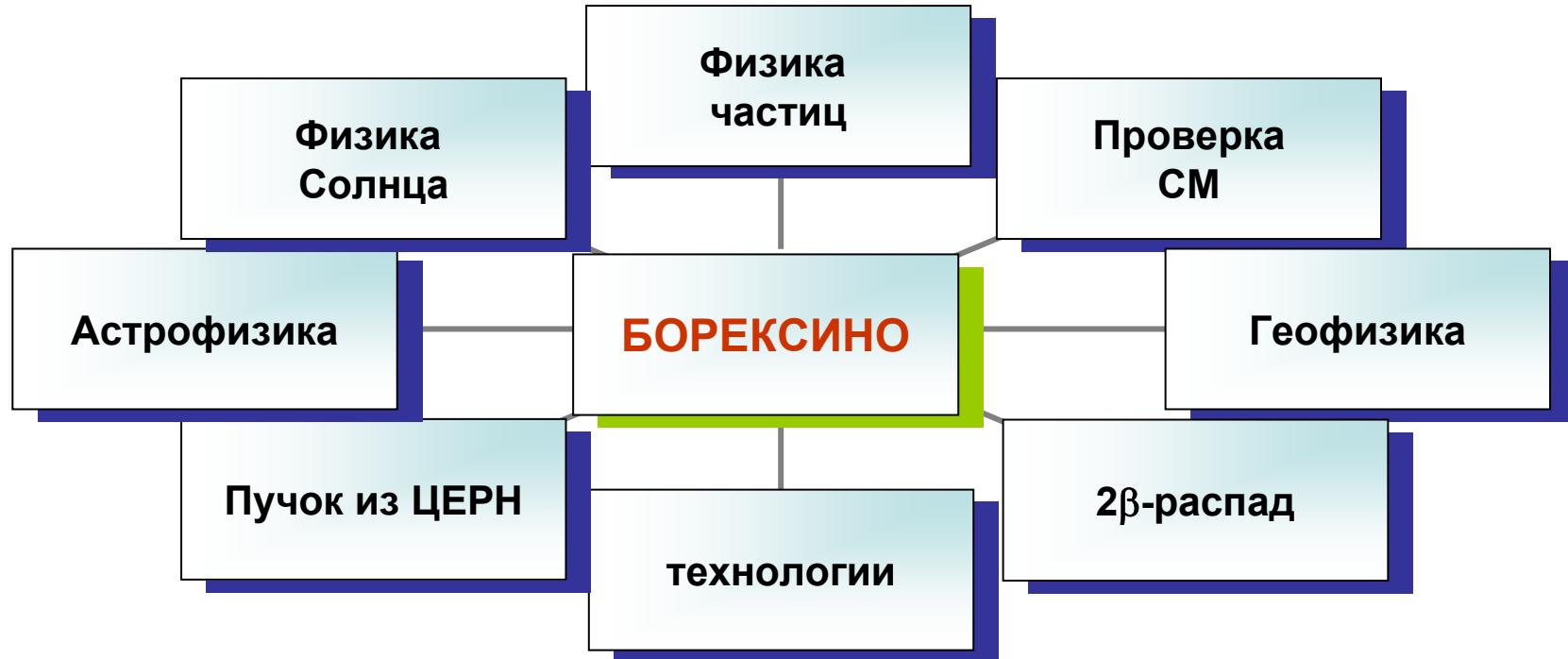
Фоновая скорость счета на 100т:

$\sim 2 \times 10^{-2} \text{ Bq/Kg}$  для  $E > 1 \text{ MeV}$

Для сравнения:

вода 10 Bq/Kg по  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$   
воздух 10 Bq/m<sup>3</sup> по  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{222}\text{Rn}$

# Проект BOREXINO



## Научные центры:

Германия: Technische Universität Muenchen, Max-Planck-Institut für Kernphysik

Италия: Università degli Studi e INFN, Milano; Università e INFN, Genova; Università e INFN, Perugia;  
Laboratori Nazionali del Gran Sasso INFN

Польша: M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University

Россия: RRC Kurchatov Institute; Joint Institute for Nuclear Research; St. Petersburg Nuclear Physics Institute;  
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University

США: Princeton University; University of Massachusetts; Virginia Polytechnic Institute and State University

Украина: Kiev Institute for Nuclear Research

Франция: IN2P3, Laboratoire AstroParticule et Cosmologie,

# Национальная лаборатория Гран Сассо



# Ультра низкофоновый детектор

15 лет работы

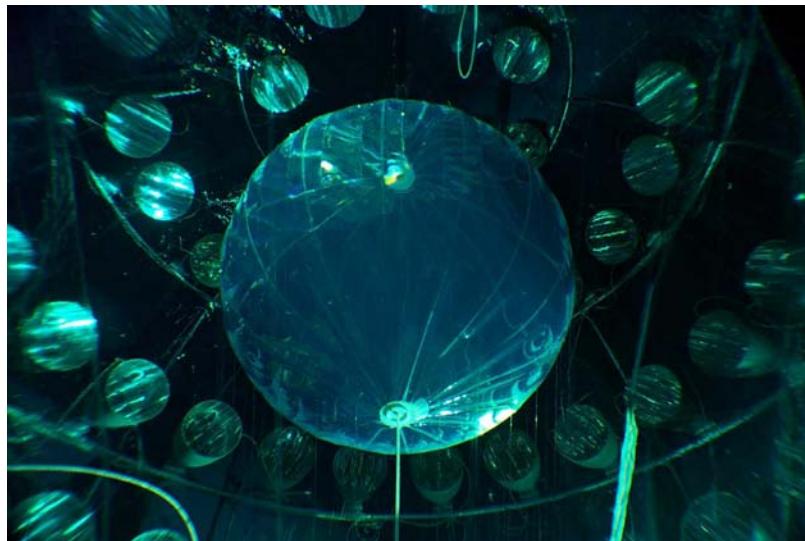
БОРЕКСИНО

Техника:

Технология:

Компьютинг:

Идеи построения детектора



Прототип детектора Борексино

Путь к низкофоновым сцинтилляторам

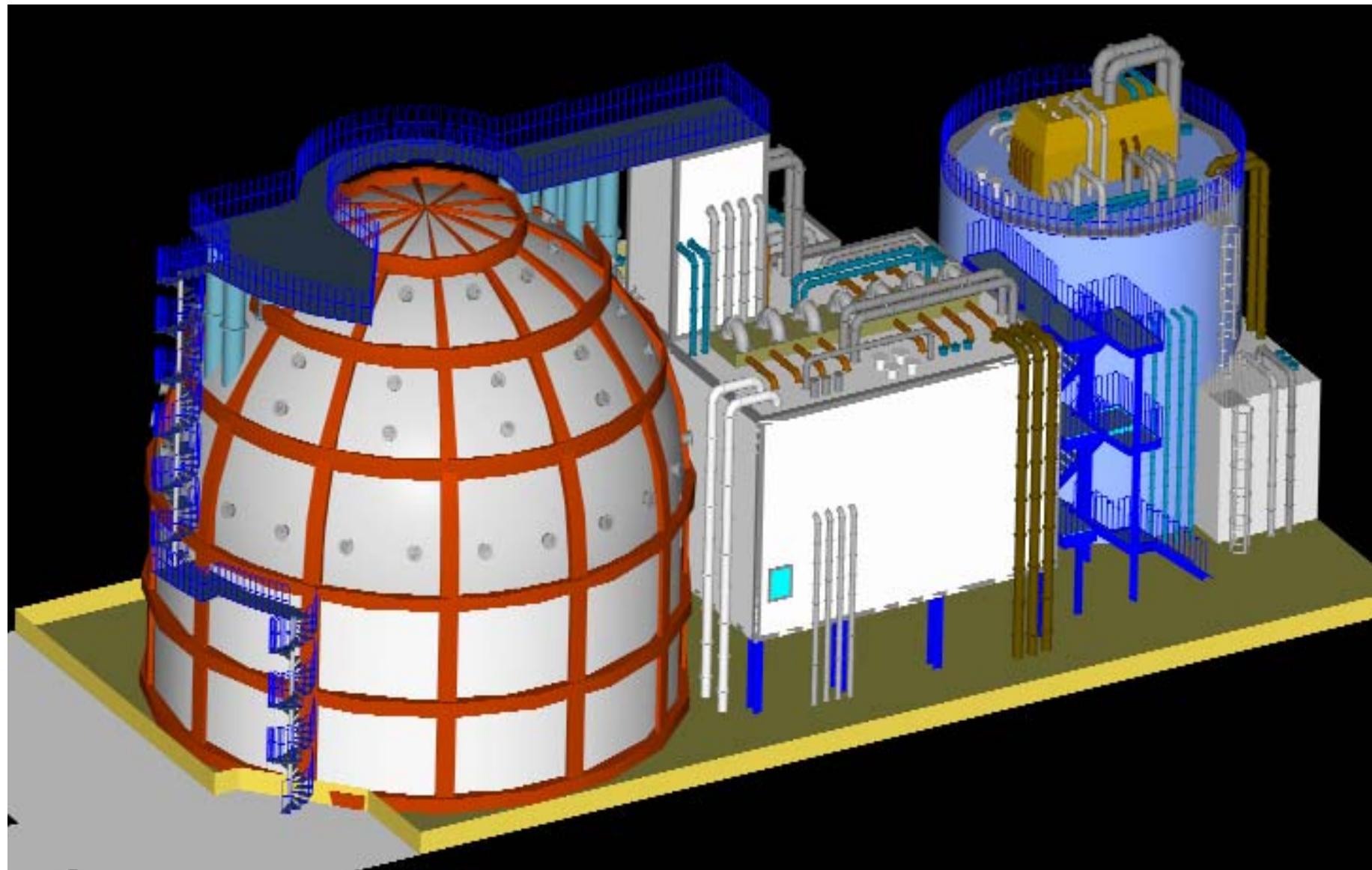
Концентрация ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ )  $< 10^{-16}$  г/г

Производство ЖС с ультра низким содержанием  
 $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{222}\text{Rn}$

добыча, доставка

очистка: дистилляция, водная экстракция,  
фильтрация, продувка очищенным азотом.

# Экспериментальный комплекс Борексино



# Ультра низкофоновый детектор

$$\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$$

Центр детектора: 300 т ЖС в нейлоновой сфере радиусом 4.25 м;

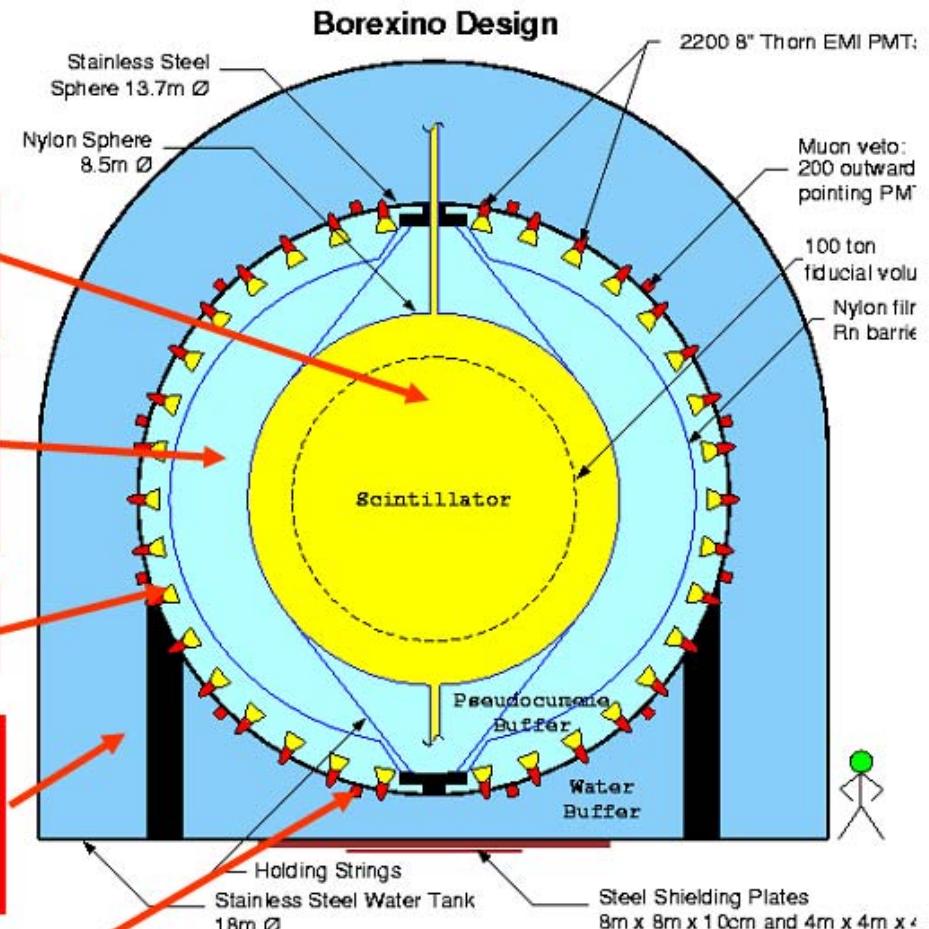
1<sup>ый</sup> защитный слой: 1000 т ультра чистой жидкости (РС) в стальной сфере радиусом 7 м;

2214 ФЭУ;

2<sup>ой</sup> защитный слой : 2400 т ультра чистой воды в цилиндрическом корпусе;

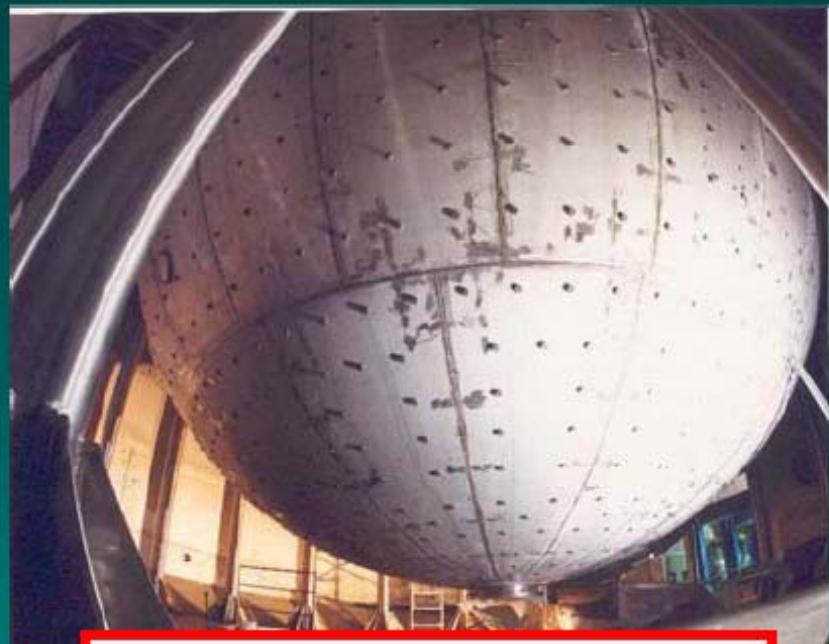
200 ФЭУ

18 м диаметр., 16.9 м высота





Experimental Hall In Gran Sasso (Hall C)



Stainless Steel Sphere (SSS)



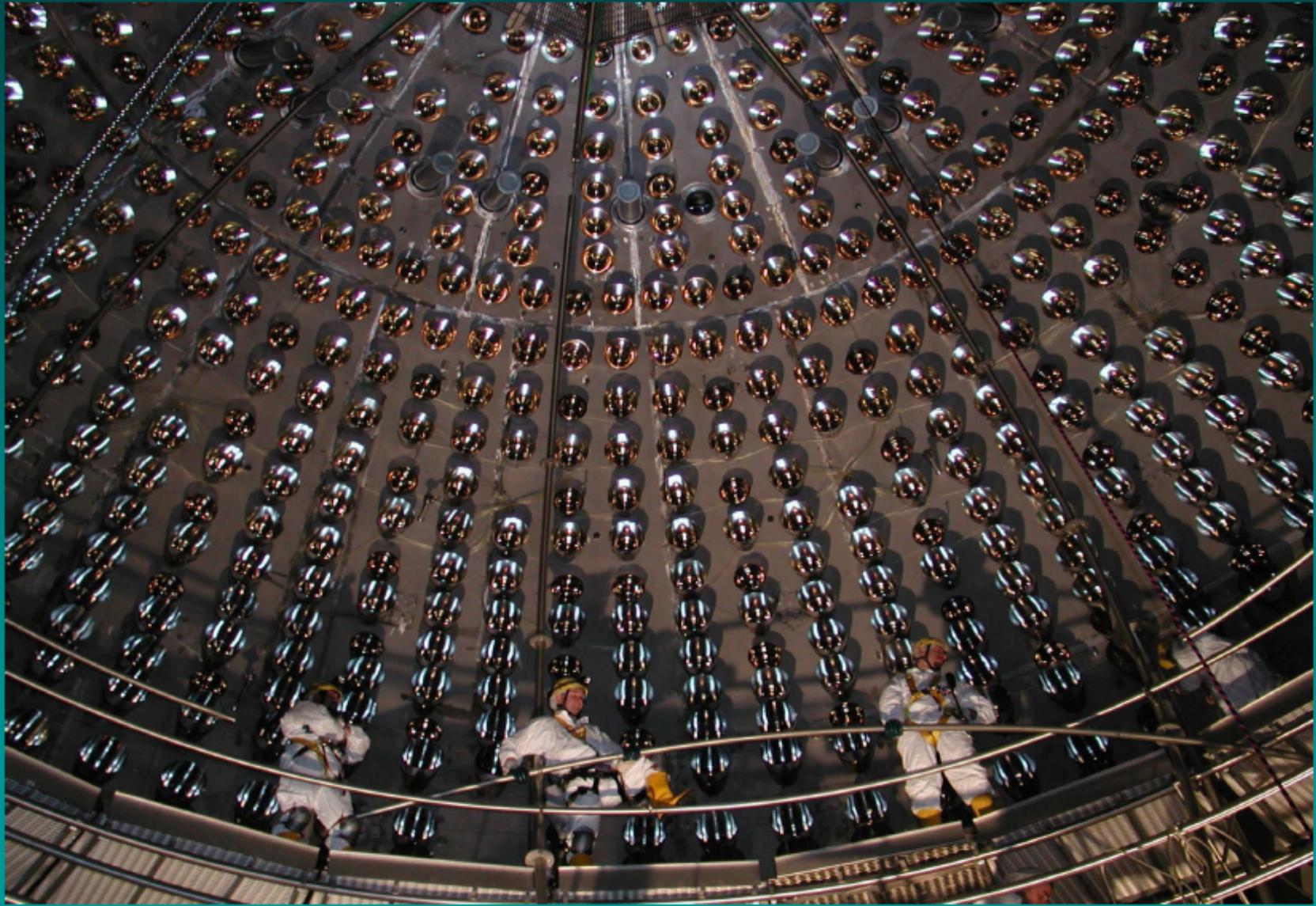
PMTs ready to be mounted



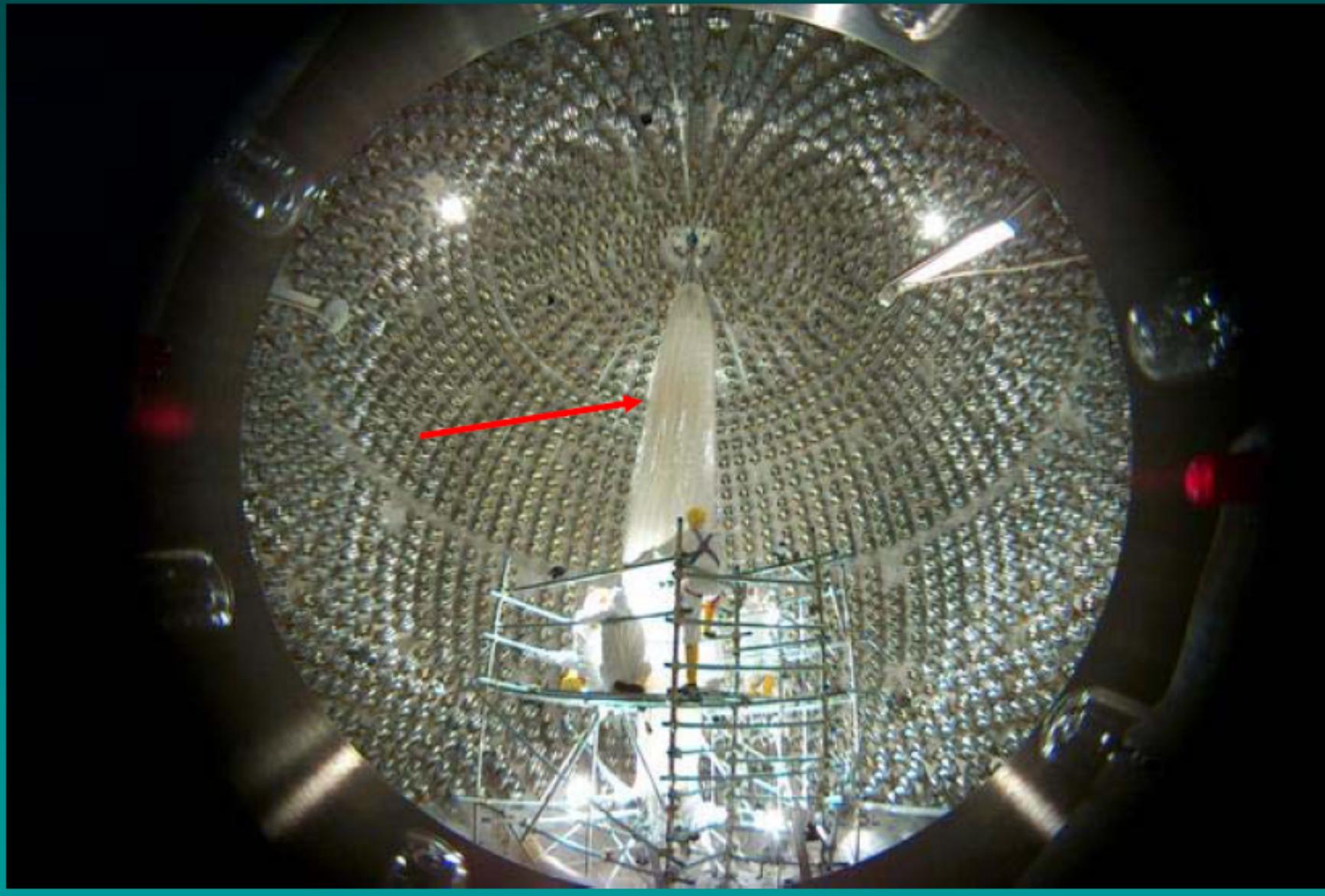
Cacciani

Optical fiber istallation

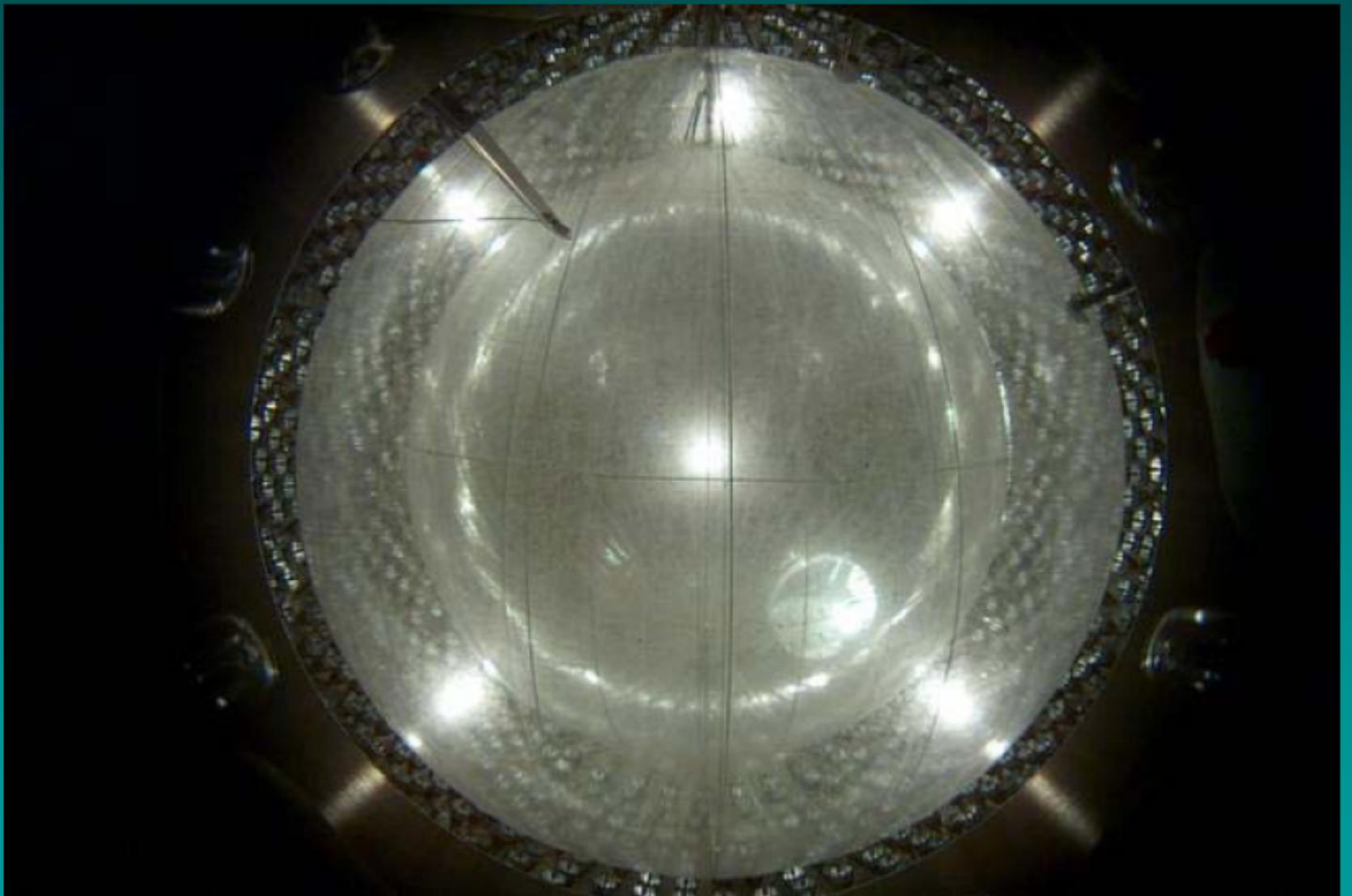
# PMTs installation (2001-2002)



# Nylon vessels installation (2004)

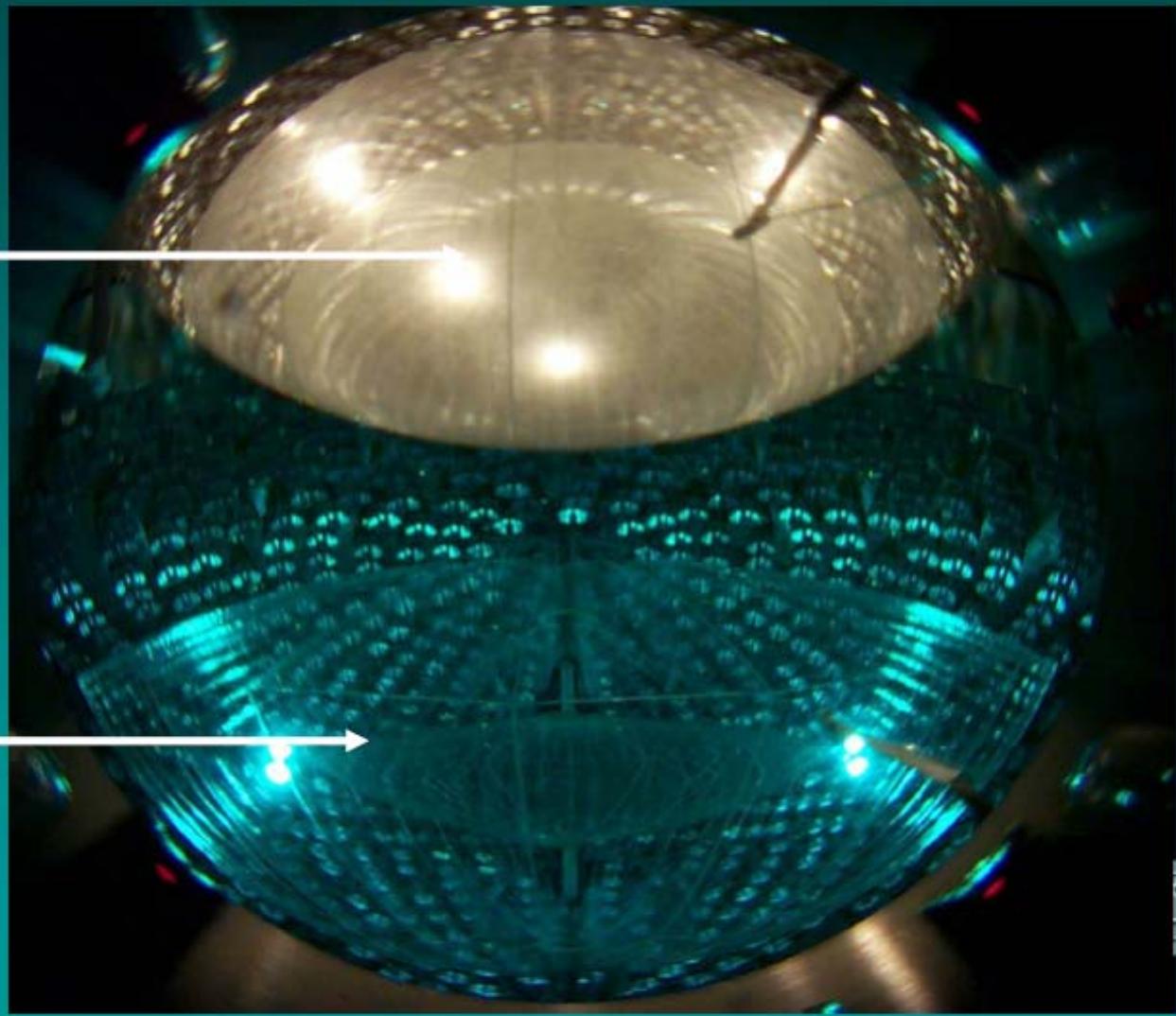


# Nylon vessels installed and inflated (May 2004)



# Filling with water (fall 2006)

Low Ar and Kr Nitrogen



Ultra-pure water

# Filling with pseudocumene (started Jan 2007)

Liquid scintillator

Ultra-pure water

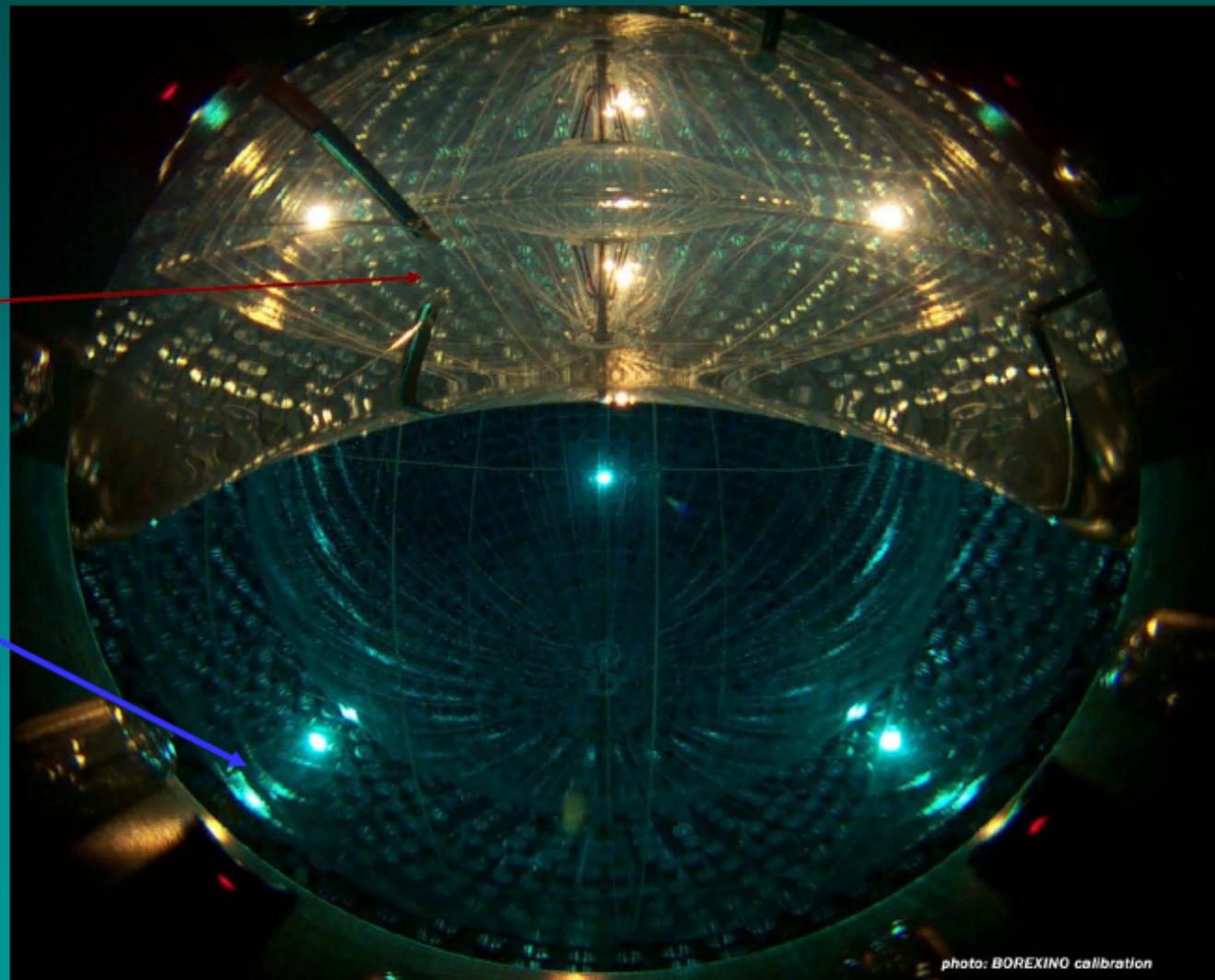
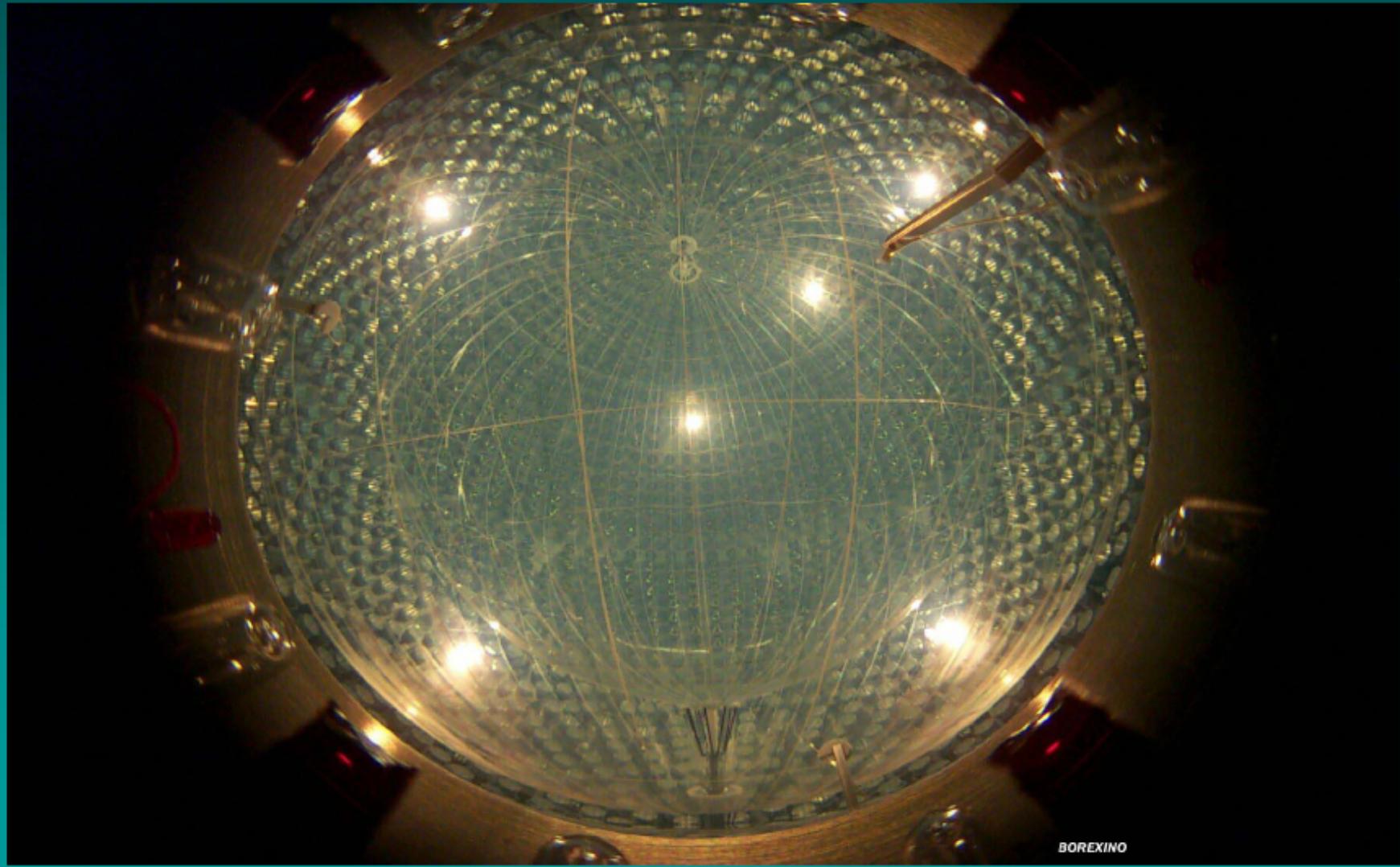


photo: BOREXINO calibration

# Filling with pseudocumene completed

15<sup>th</sup> May 2007



# Отбор событий, регистрируемых детектором

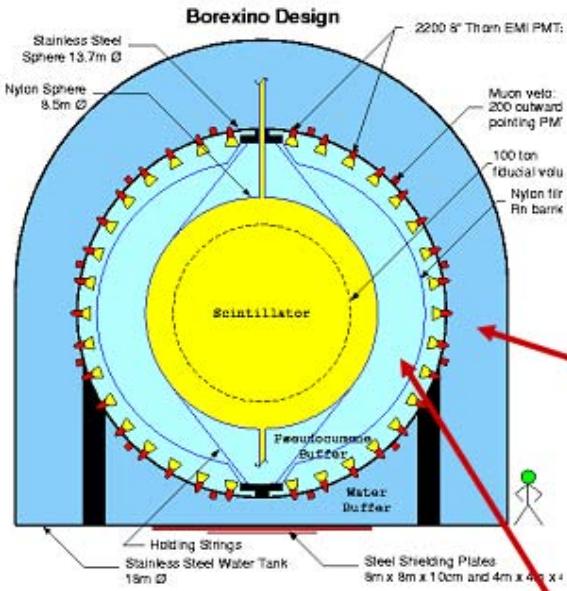
Отбор событий - многоступенчатая процедура, основанная на использовании компьютерных методов:

- отбирались одиночные события, которые могли быть ассоциированы с сигналами от одиночных электронов в реакции

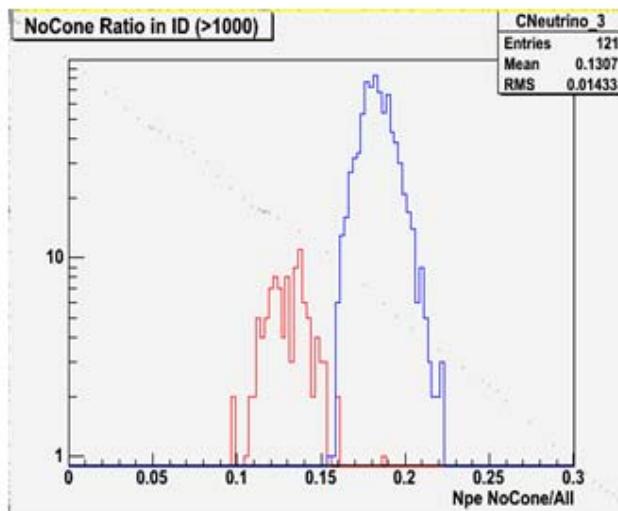


- корреляции с сигналами от регистрируемых мюонов космического излучения и продуктами распада радиоактивных примесей.
- анализ импульсов по форме с целью отделения регистрации электронов и альфа-частиц.
- реконструкция событий

# Характеристики детектора

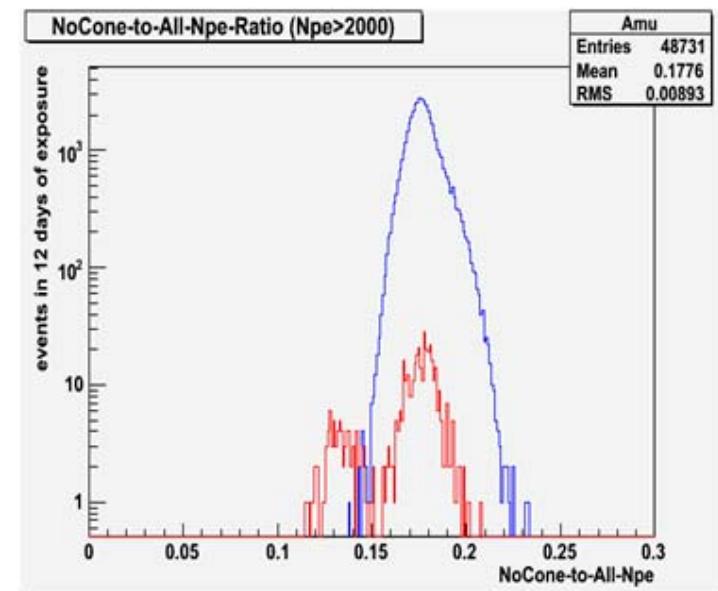


Внутреннее вето

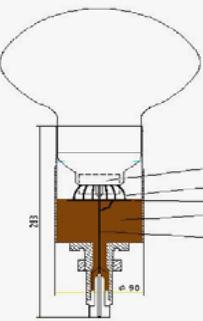


Мюонное вето - активная защита от космического излучения

Внешнее вето

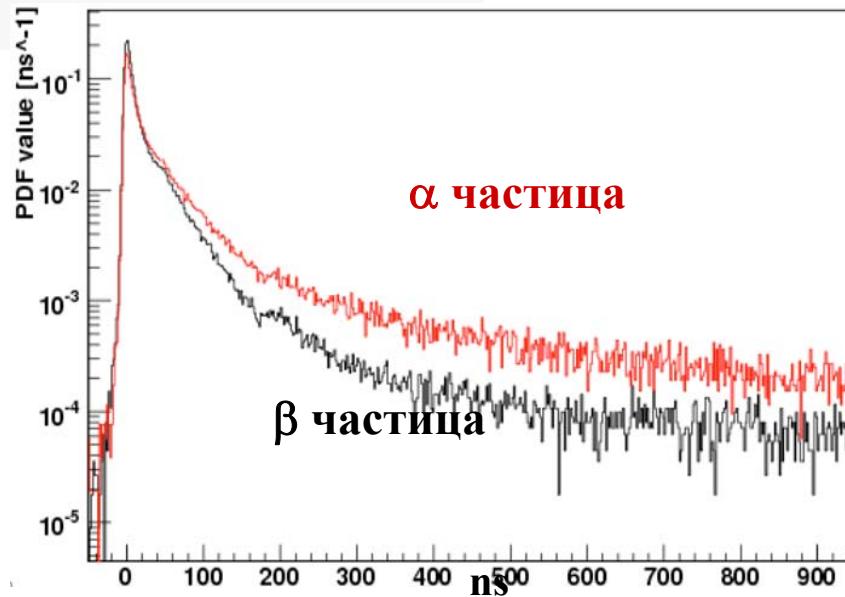


Общая эффективность подавления 99.99%

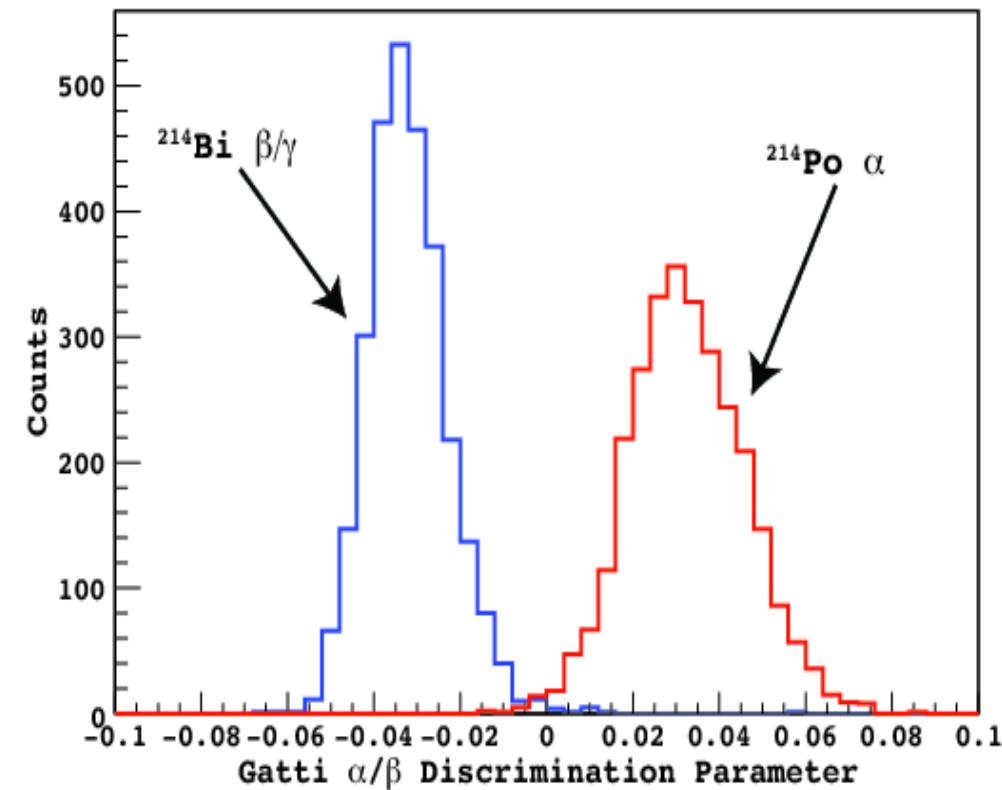


# $\alpha/\beta$ Анализ формы импульса

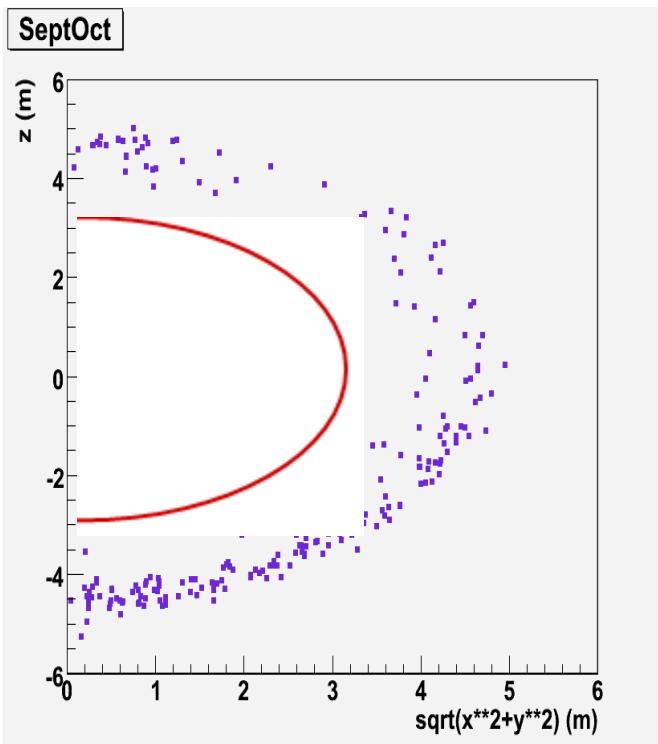
8' ФЭУ ETL9351



$\alpha/\beta$  разделение



# Реконструкция событий: энергетический и геометрический отбор



Цель – подавление внешнего фона, в основном, внешних гамма-квантов.

Выделение чувствительного объема мишени **R < 3 м** (100 т)

**Энергетическое разрешение ( $\sigma$ ):**

~5% при 1 MeV

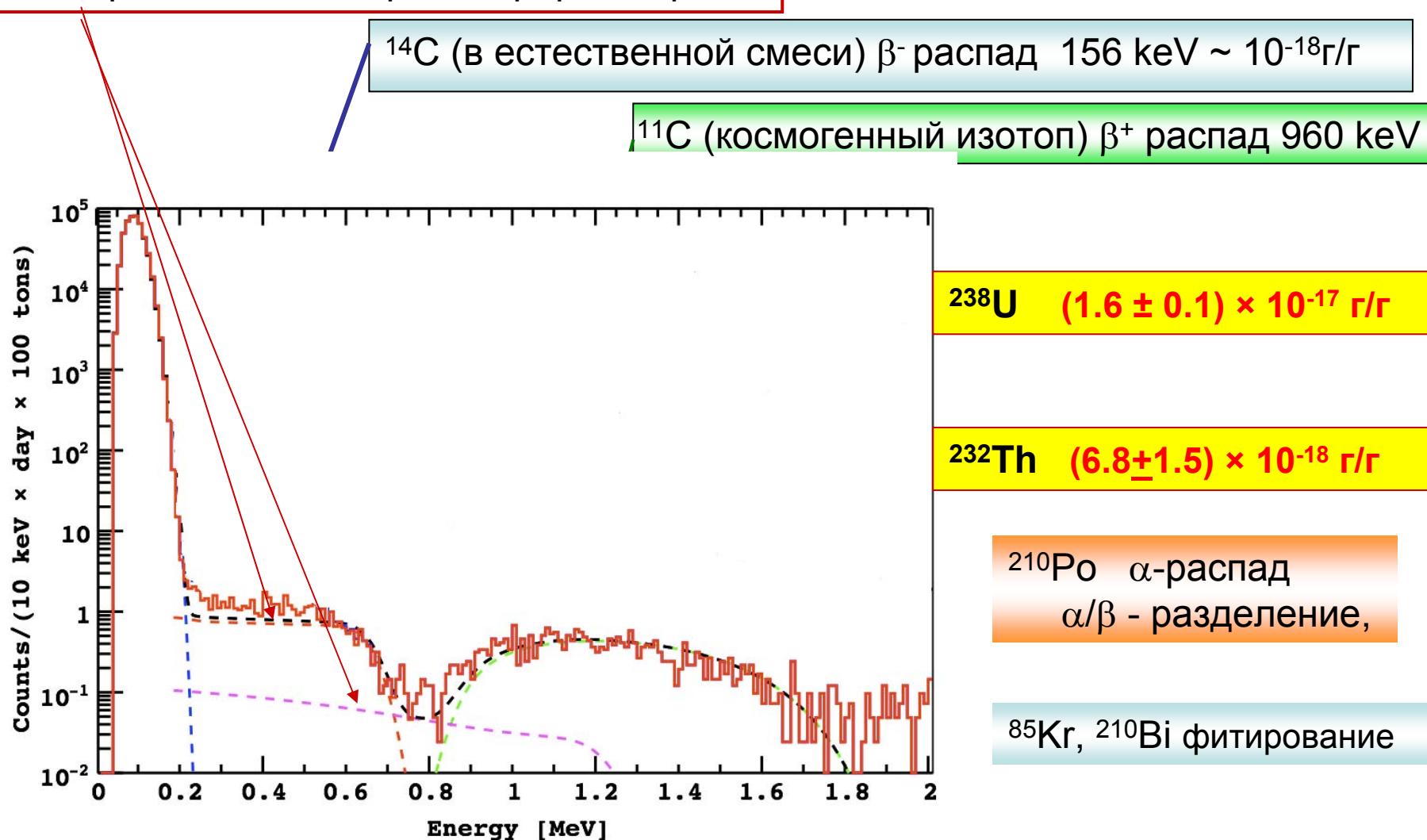
**Пространственное разрешение:**

~ 5 см при 1 MeV

# Ожидаемый спектр событий в низко энергетической области

Многолетние исследования с прототипом детектора:

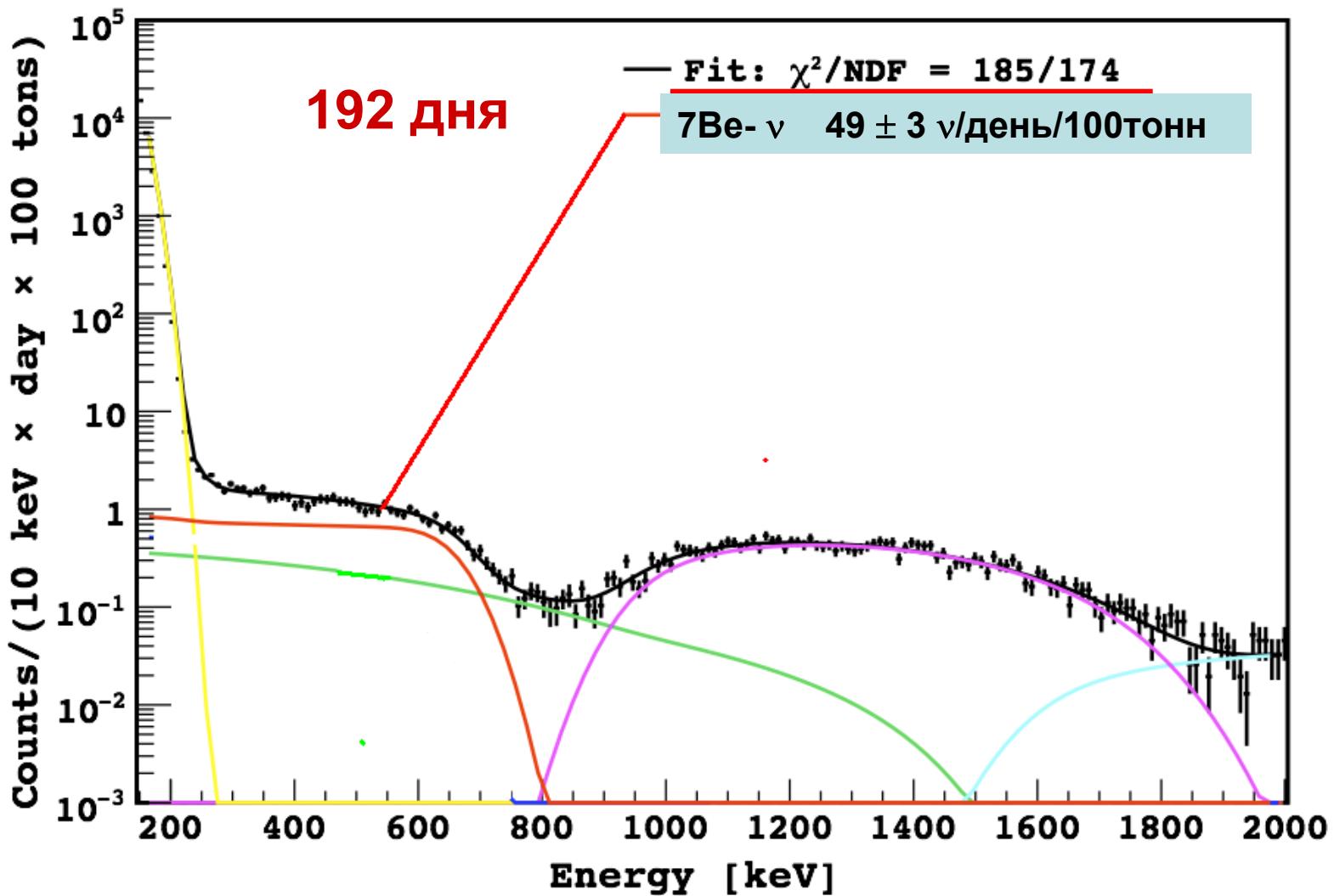
Регистрация  $7\bar{\nu}e$ -нейтрино и  $\bar{\nu}e$ -нейтрино



# **Подавление фоновых событий от распада $^{11}\text{C}$**

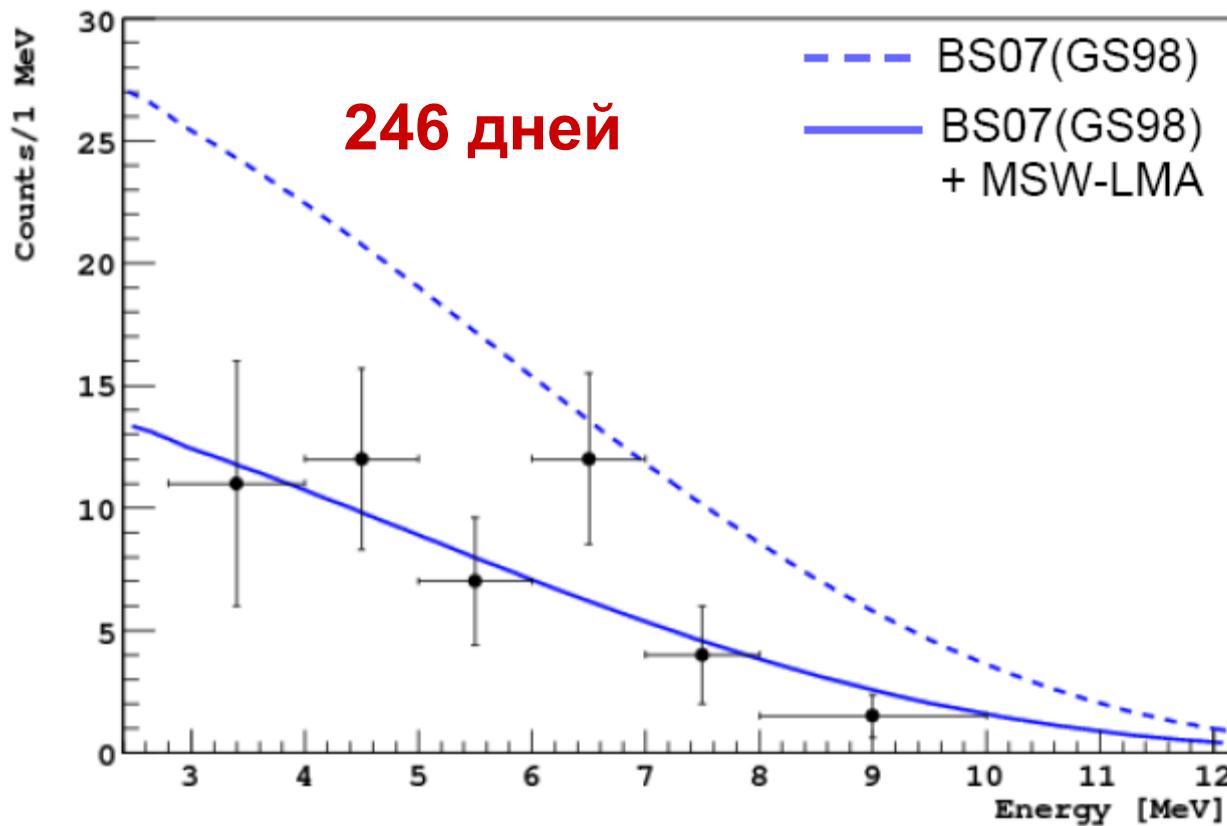
- Использование 3-х кратных совпадений
- Пространственный отбор вокруг положения нейтрана и мюонного трека

# Измерение низко энергетической части спектра



# Измерение спектра ${}^8\text{B}$ -нейтрино

Энергетический порог 2.8 MeV



Измеренная скорость счета  
7Ве-нейтрино:

$$49 \pm 3_{\text{stat}} \pm 4_{\text{syst}} \nu / \text{день} / 100 \text{ тонн}$$

Ожидаемая скорость счета  
в модели без осцилляций:

$$75 \pm 4 \nu / \partial / 100 m$$

В модели с осцилляциями:

$$48 \pm 4 \nu / \partial / 100 m$$

Систематические погрешности [%] \*

Total Scintillator Mass	0.2
Fiducial Mass Ratio	6.0
Live Time	0.1
Detector Resp. Function	6.0
Cuts Efficiency	0.3
Total	8.5

\*До проведения систематических калибровок

Поток 7Ве-нейтрино  
в модели без осцилляций:

SSM      BPS07(GS98) HM

$$(3.32 \pm 0.20_{\text{stat}} \pm 0.27_{\text{syst}}) \times 10^9 \nu / \text{см}^2 \text{с}$$

$$\phi_{\odot} = (5.08 \pm 0.25) \times 10^9 \nu / \text{см}^2 \text{с}$$

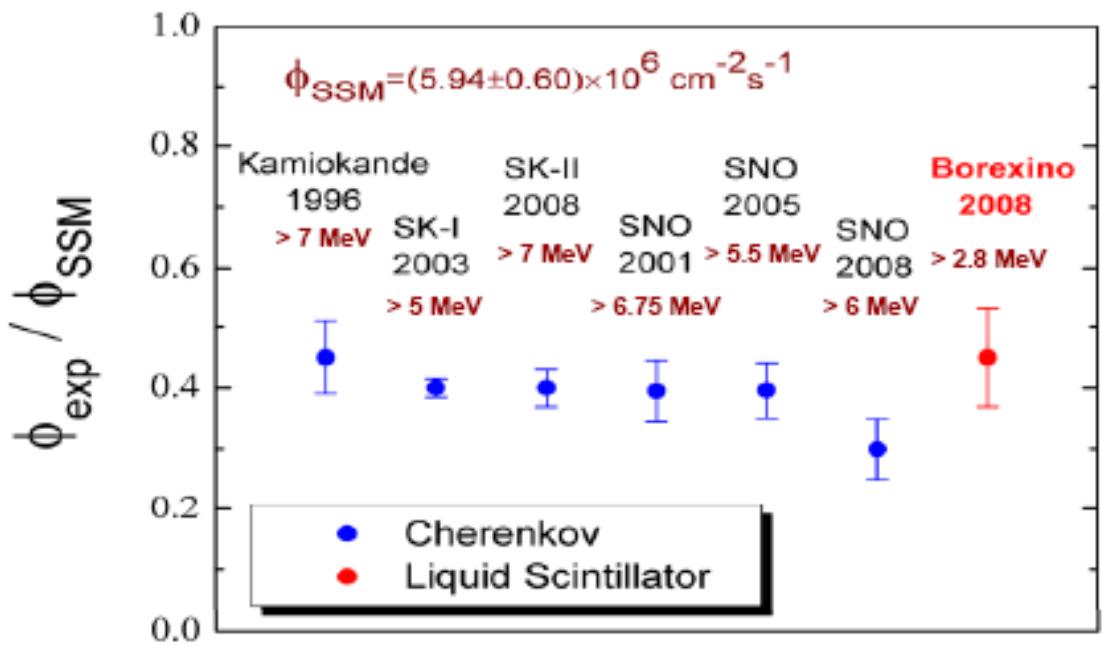
Измеренная скорость счета

8В-нейтрино:

$$0.26 \pm 0.04_{\text{stat}} \pm 0.02_{\text{syst}} \nu / \text{день} / 100 \text{ тонн}$$

Поток 8В-нейтрино

$$(2.65 \pm 0.44_{\text{stat}} \pm 0.18_{\text{syst}}) \times 10^6 \nu / \text{см}^2 \text{с}$$



В модели без осцилляций:

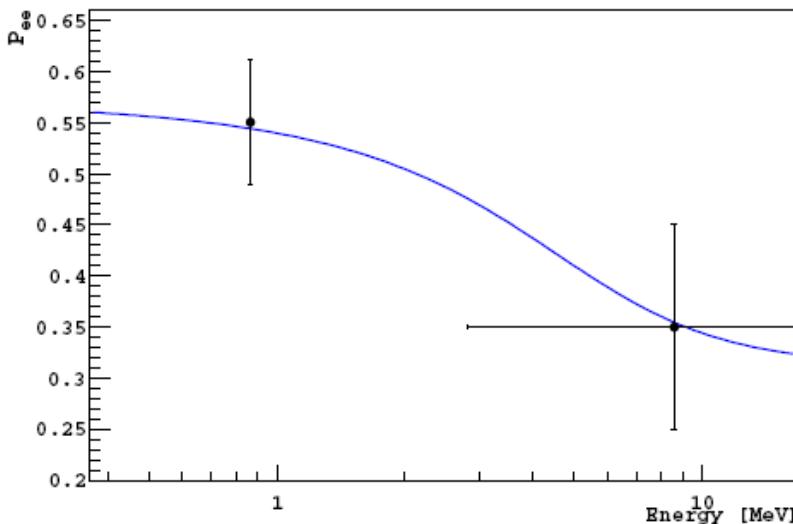
$$\left( \frac{\Phi_{\text{exp}}}{\Phi_{\text{теор.}}} \right)_{> 2.8 \text{ MeV}} = 0.45$$

В модели с осцилляциями:

$$\left( \frac{\Phi_{\text{exp}}}{\Phi_{\text{теор.}}} \right)_{> 2.8 \text{ MeV}} = 0.96 \pm 0.19$$

# Результаты измерений

## Вероятность выживания $P_{ee}$

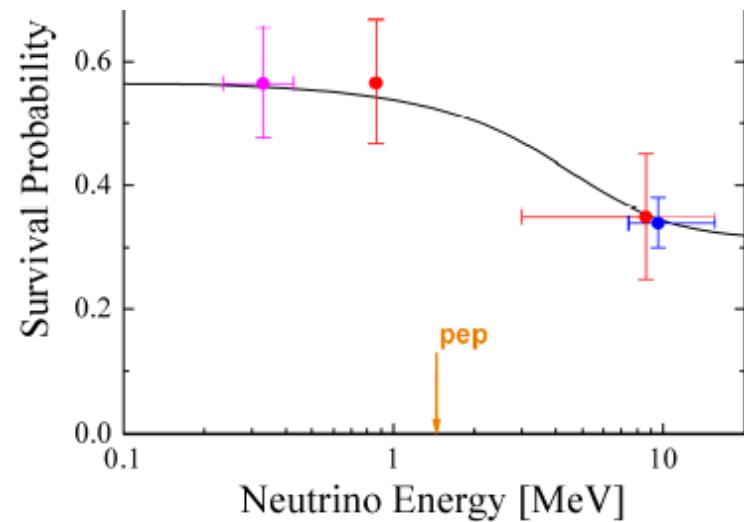
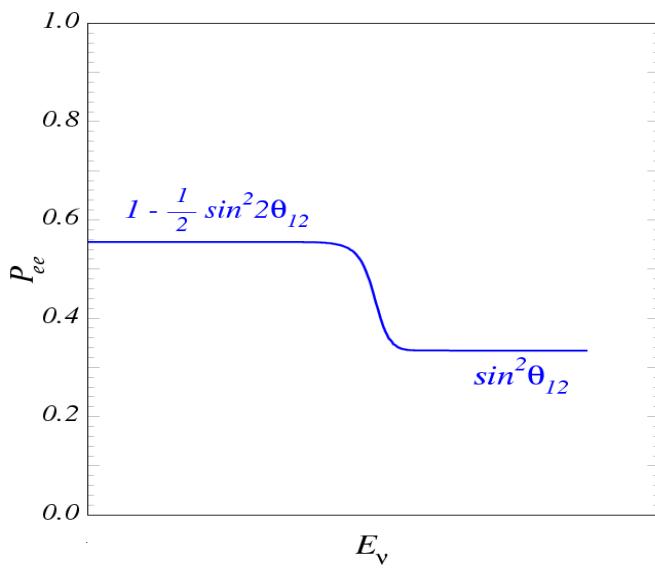


Впервые в одном эксперименте получены данные, подтверждающие MSW эффект

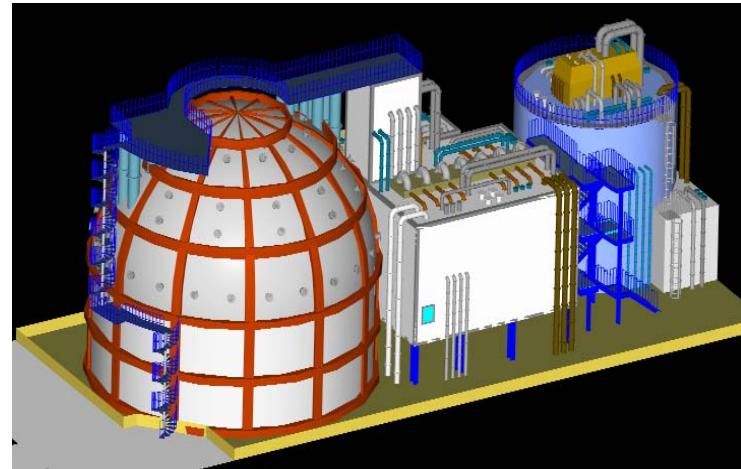
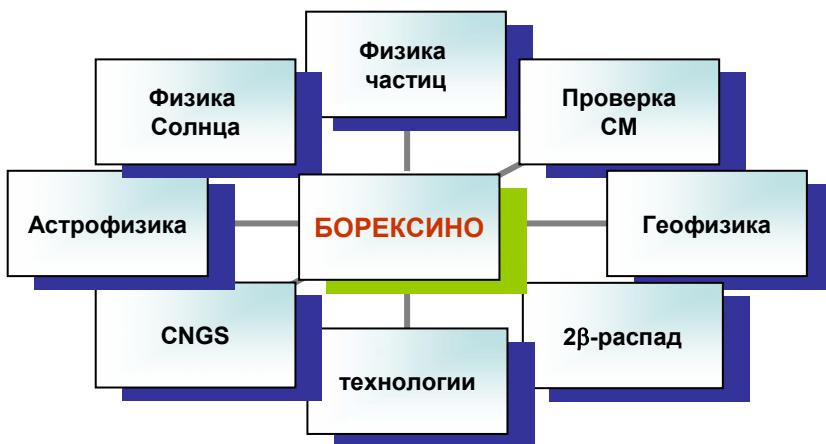
Используя SM (BPS 07) и данные измерений:

$$P_{ee} ({}^7\text{Be}) = 0.56 \pm 0.10$$

$$P_{ee} ({}^8\text{B}) = 0.35 \pm 0.10$$



# Перспективы проекта Борексино



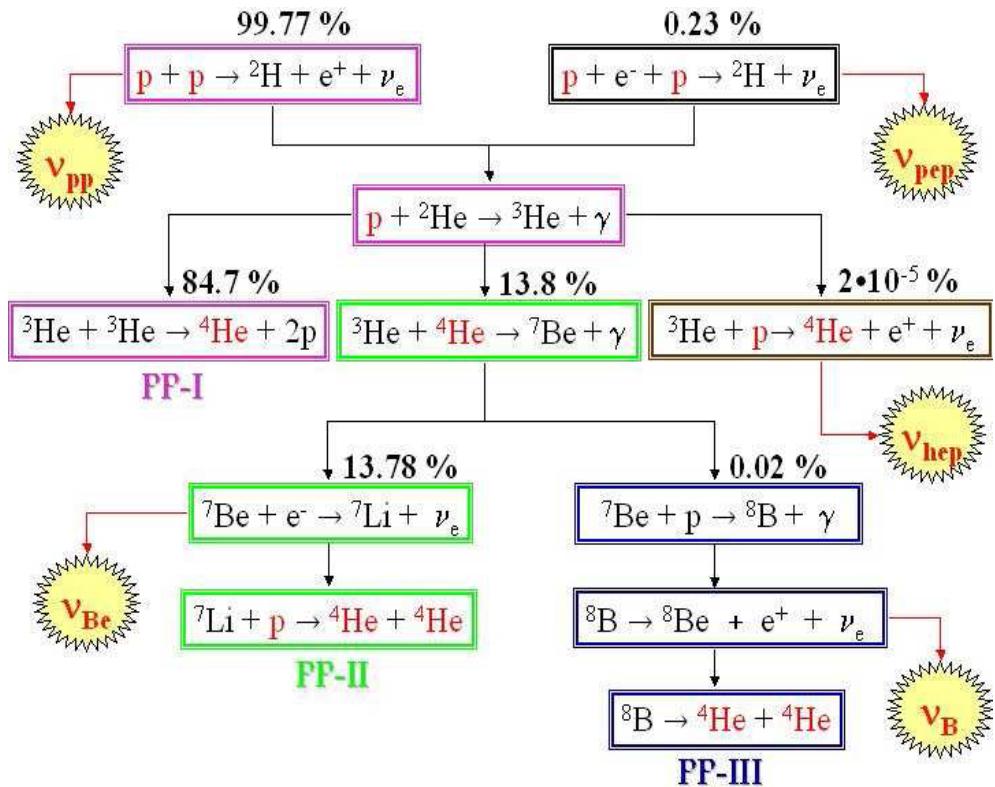
- \* Уточнение потока  $7\text{Be}$  (лучше 5 %, что сравнимо с предсказанием модели), наблюдение годовых вариаций потока (эксцентриситет 7%)
- \* Уточнение потока  $8\text{B}$  : проанализировать всю мишень, т.е. около 300 т., понизить порог анализа.
- \* Вакуумные осцилляции антинейтрино,  
регистрация антинейтрино от всех реакторов Европы
- \* Геонейтрино
- \* Сверхновые
- \* 2-бета распад.
- \* Редкие процессы – проверка Стандартной модели



*Спасибо  
за внимание*

# Генерация энергии Солнца

## pp - цикл

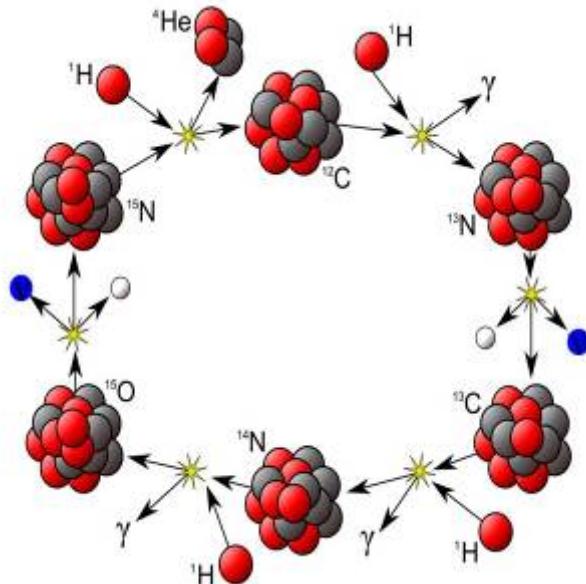


$\nu$  от :

pp pep

$^7Be$   $^8B$  hep

## CNO - цикл



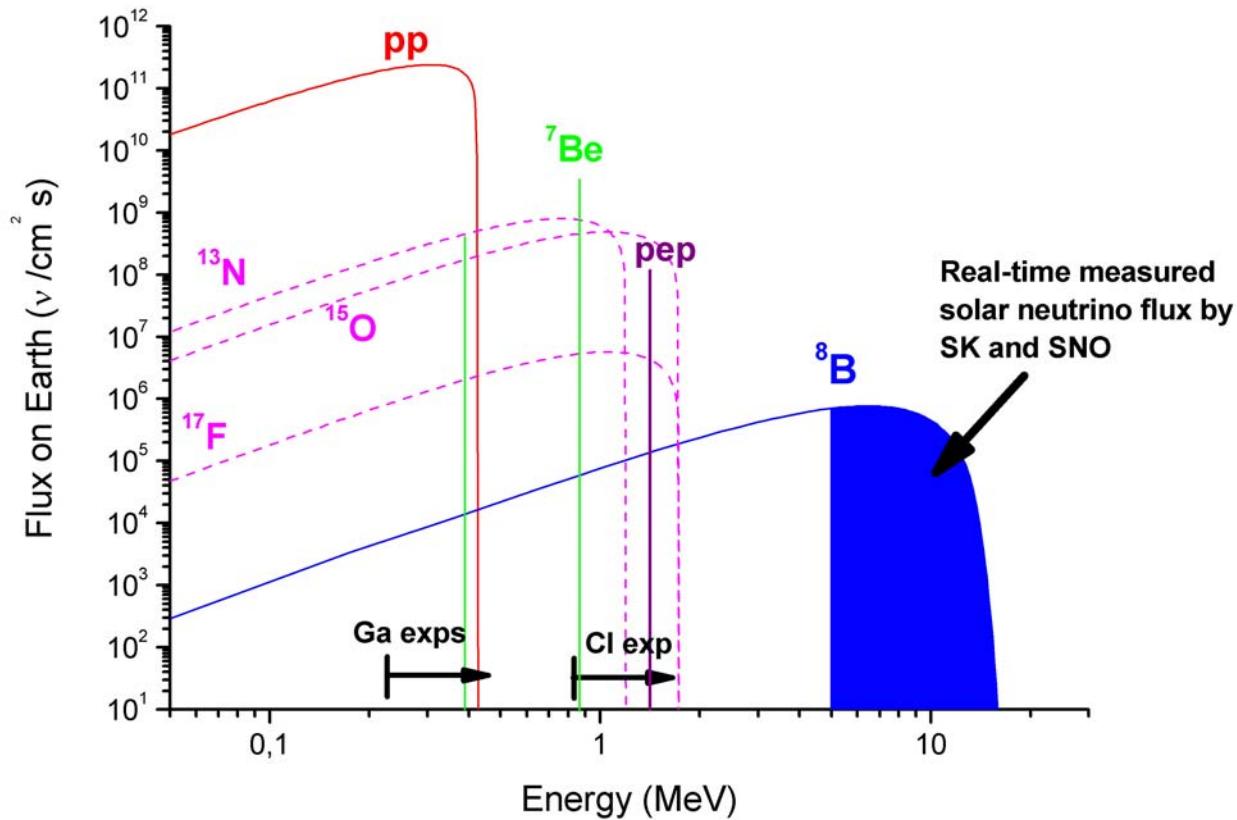
$\nu$  от:

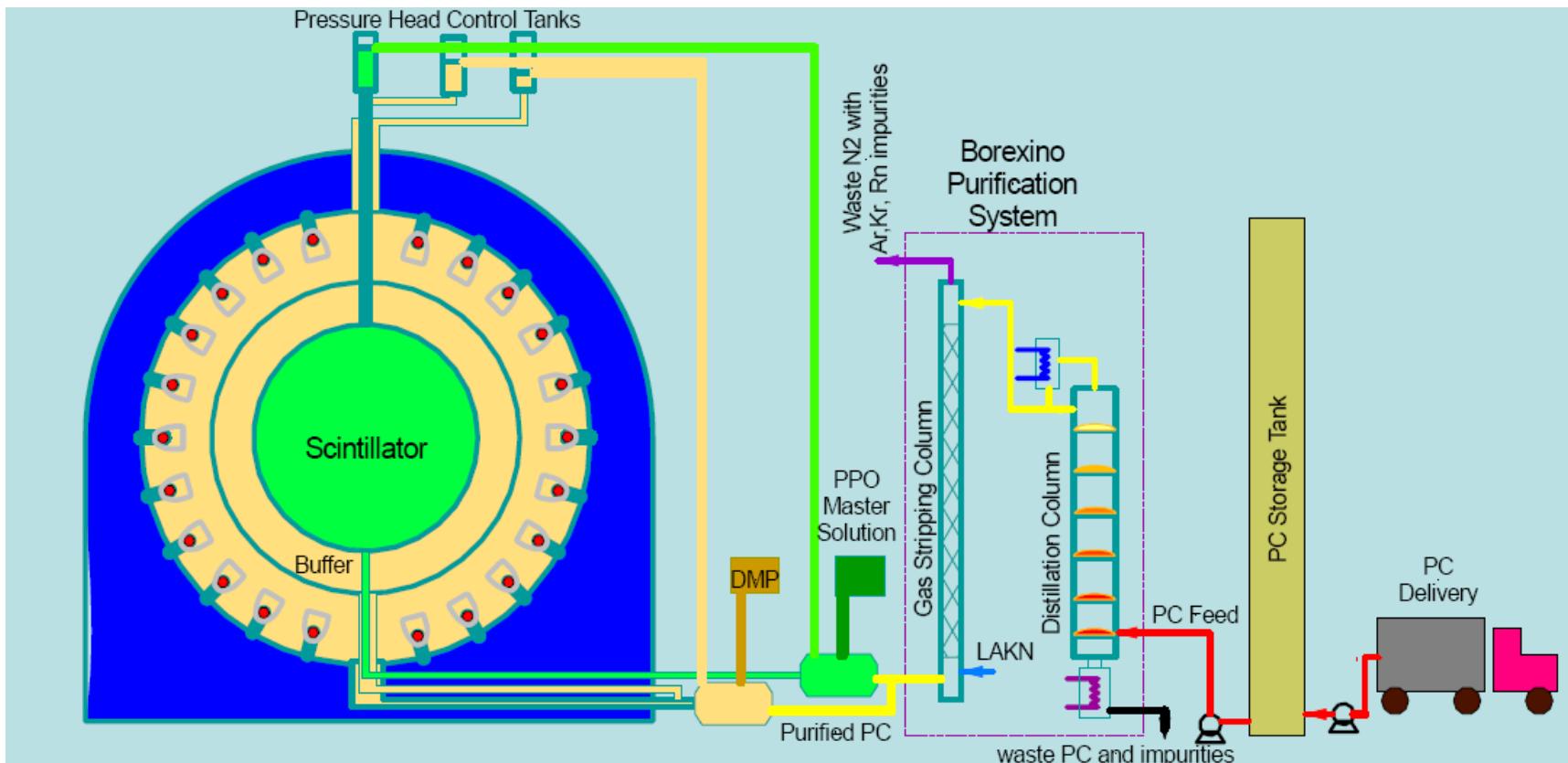
$^{13}N$

$^{15}O$

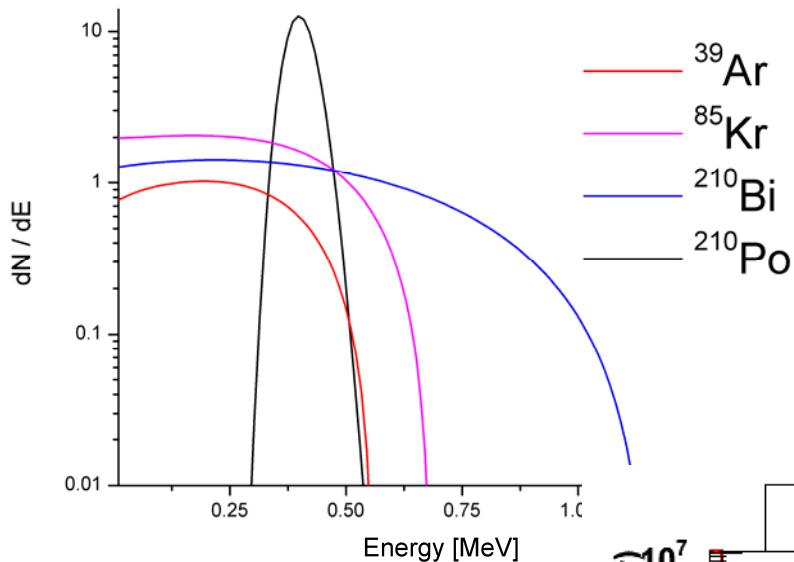
$^{17}F$

**99.994% of solar neutrino spectrum is NOT measured yet in real-time mode**

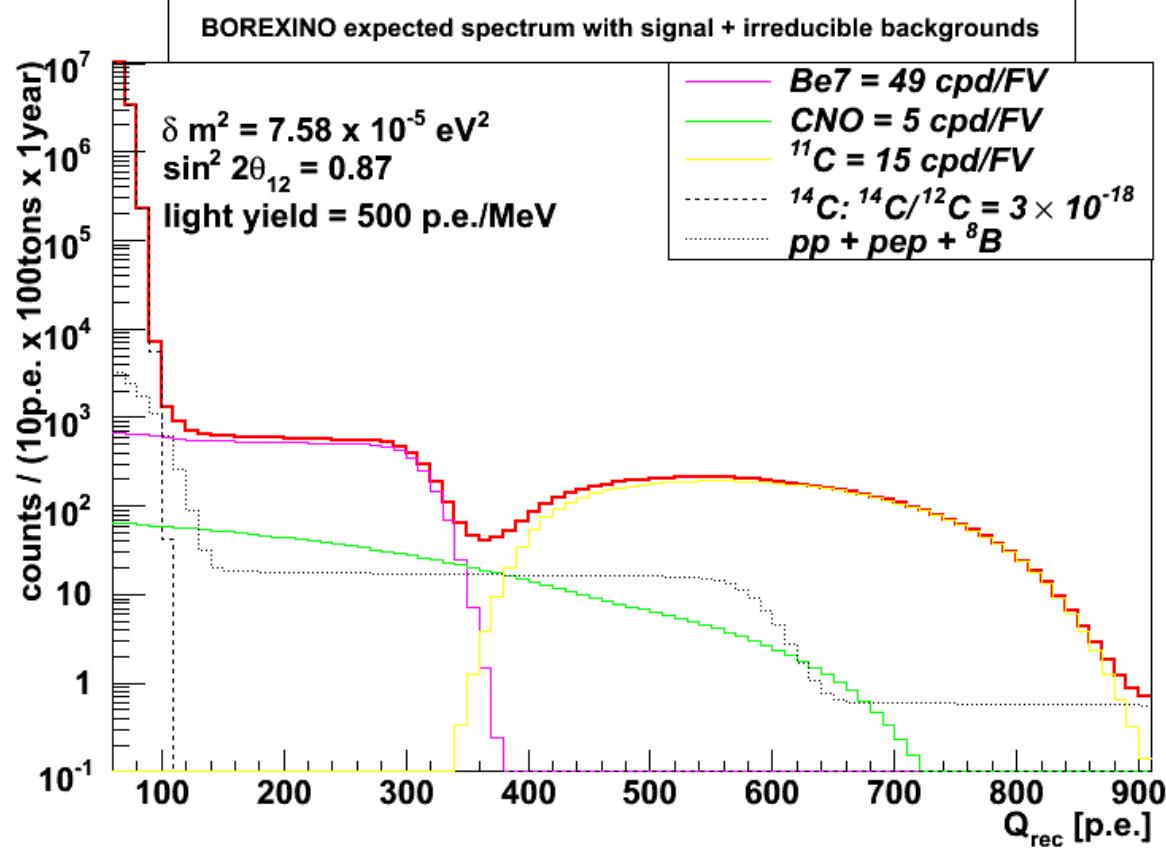




### spectra of main background sources below 1MeV

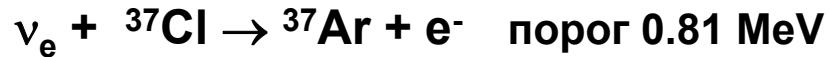


BOREXINO expected spectrum with signal + irreducible backgrounds



# Радиохимические эксперименты

Модернизация и продолжение Cl-Ar эксперимента  
(1970-1994)



R наблюдаемая/ожидаемая

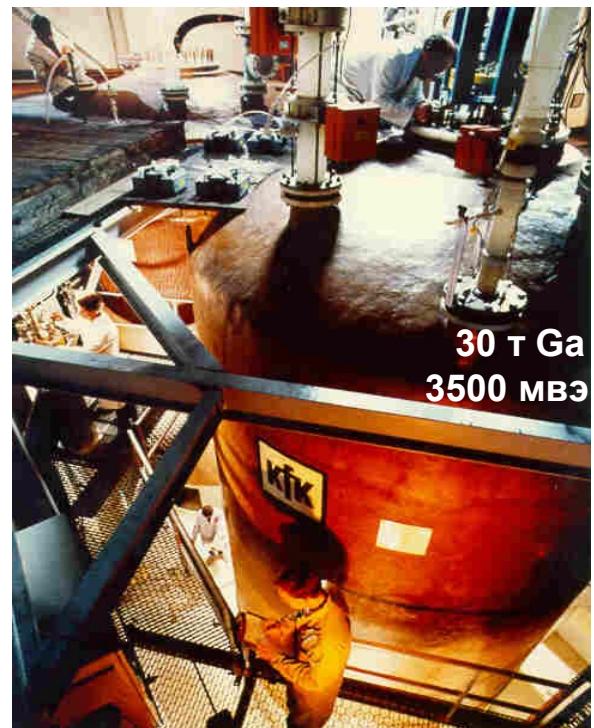
~ 0.3

~ 0.5

**SAGE** (с 1990),  
Баксанская подземная лаборатория ИЯИ РАН



**GALLEX/GNO** (с 1991)  
Подземная лаборатория  
Гран Сассо, Италия



# Водные черенковские детекторы солнечных нейтрино

