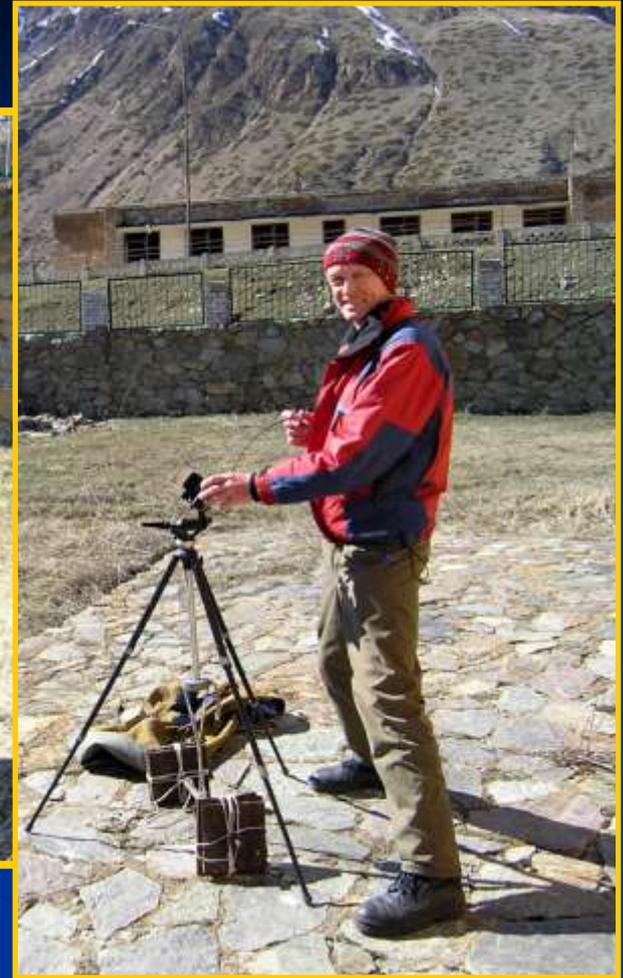




**Михаил  
Михайлович  
Молоденский  
1938 - 2008**

# Баксан-2006



# Наблюдаются ли вариации потока солнечных нейтрино в экспериментах SAGE и GALLEX/GNO ?

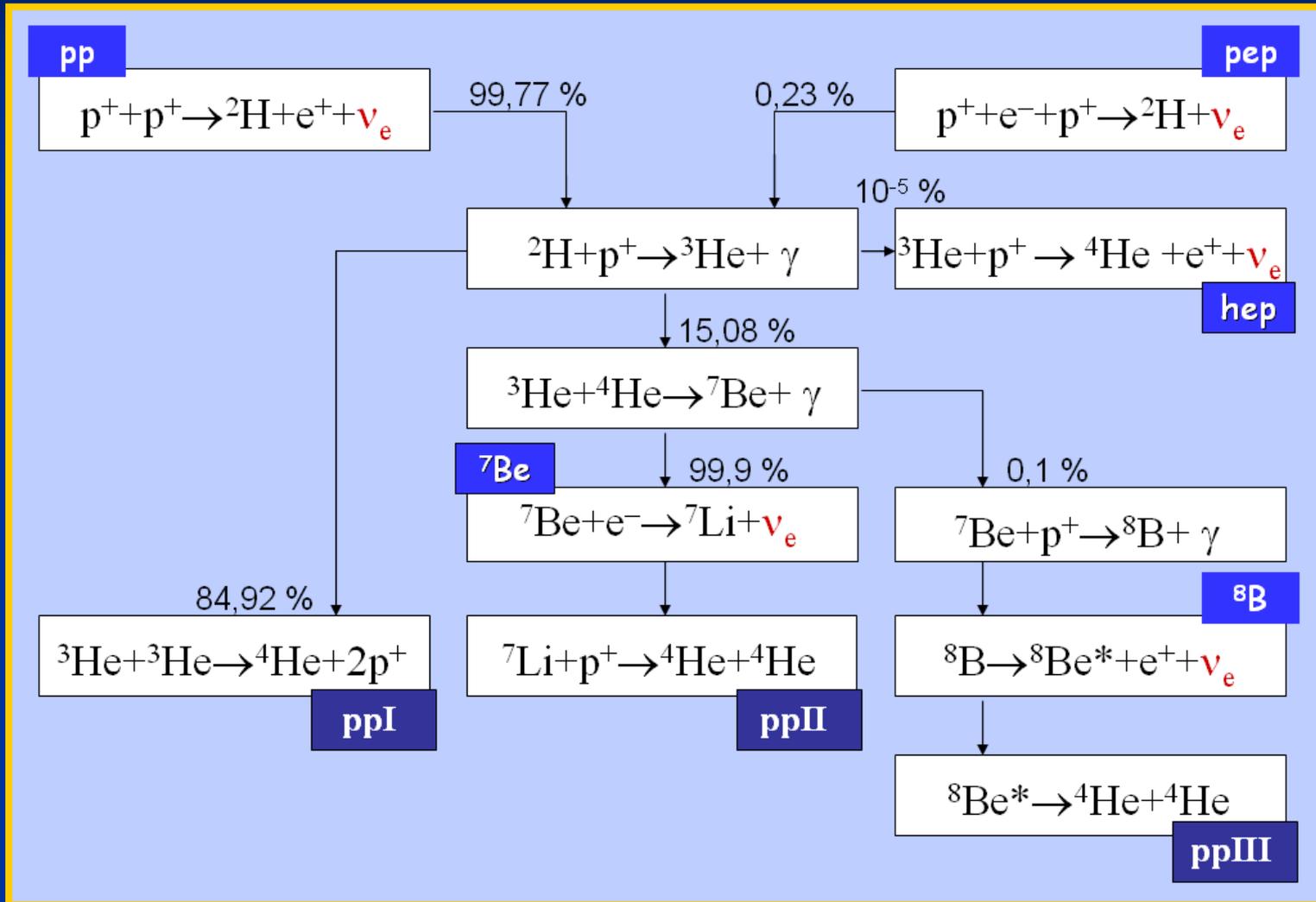
В.А. Кутвицкий (ИЗМИРАН)

- $^{71}\text{Ga} - ^{71}\text{Ge}$  эксперименты GALLEX/GNO и SAGE.
- Наблюдаются ли сезонные вариации потока нейтрино ?
- Есть ли связь потока нейтрино с циклом солнечной активности ?
- Есть ли корреляция числа событий с вращением Солнца ?
- Имеются ли указания на отклонение от пуассоновского процесса во всем массиве данных SAGE и GALLEX/GNO ?

Троицк, 2 декабря 2013 г.

# Солнечные нейтрино

## Основные реакции протон-протонного цикла

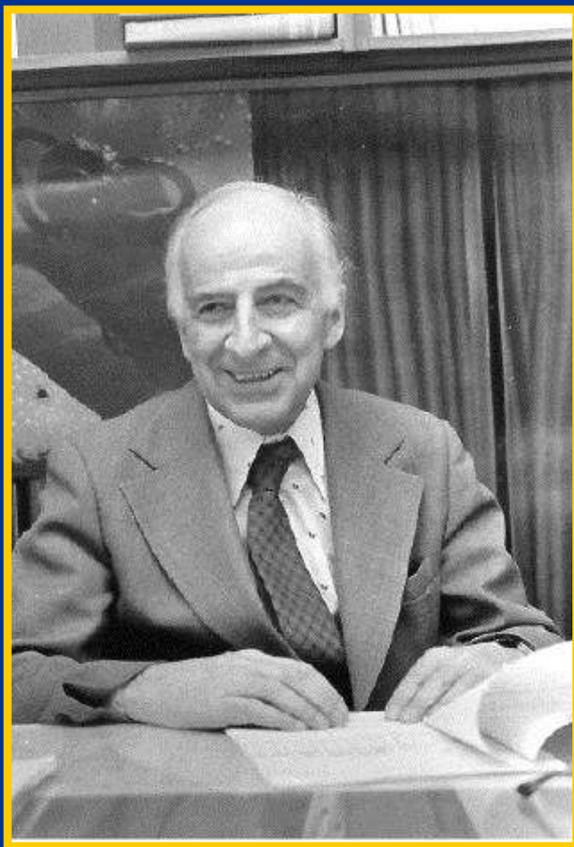


# Солнечные нейтрино

## Возможность измерения потока нейтрино

W. Pauli: “I have invented something that cannot be detected”

Б. Понтекорво, 1946 год: “...Observation of neutrinos is not out of question”



- Для регистрации можно использовать обратный бета-процесс  $\nu + (A, Z) \rightarrow e^{-} + (A, Z+1)$ ;

- В качестве источника нейтрино можно рассматривать ядерный реактор и **Солнце**;

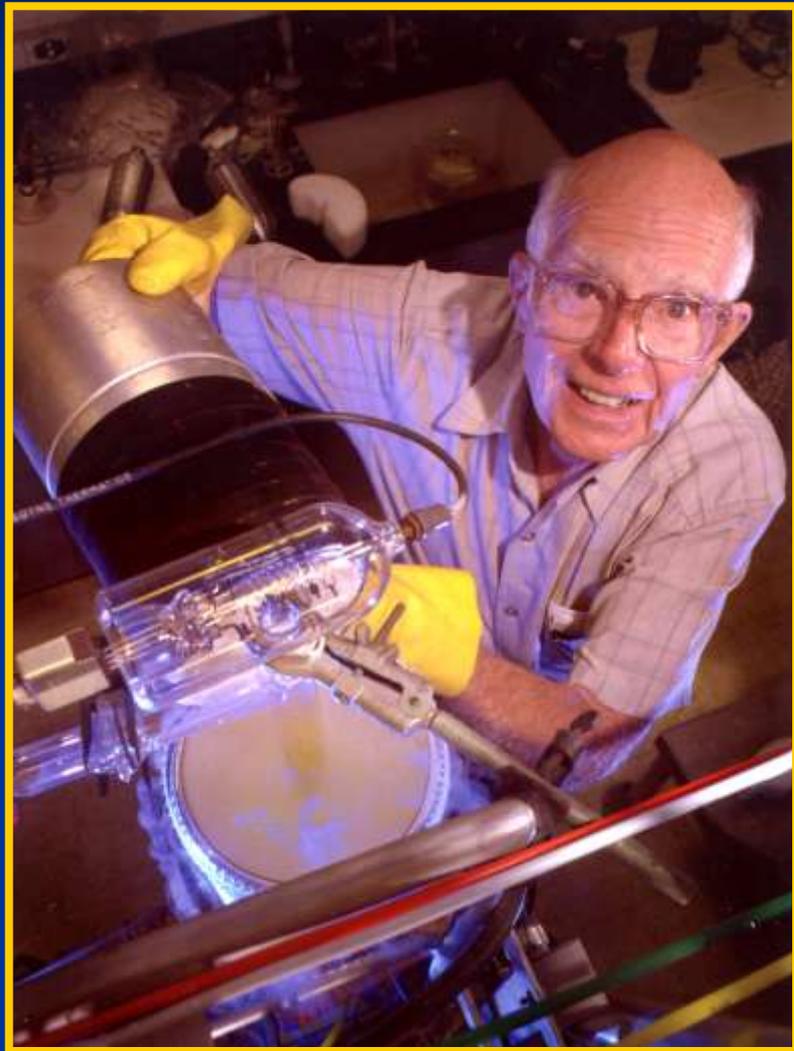
- Наиболее многообещающей мишенью можно считать ядро  $^{37}\text{Cl}$ :



- Для счета распадов нужно использовать новый миниатюрный низкофоновый пропорциональный счетчик с большим коэффициентом усиления.

# Солнечные нейтрино

Raymond Davis и  $^{37}\text{Cl} - ^{37}\text{Ar}$  эксперимент Homestake



Нобелевская премия по физике 2002 года :  
( R. Davis Jr., M. Koshiba, R. Giacconi )

R. Davis, 14.10.1914 – 31.05.2006

<http://www.bnl.gov>

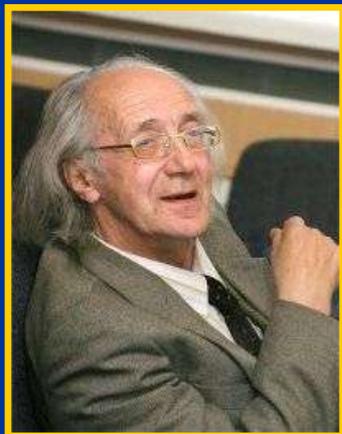
# Солнечные нейтрино

## Радиохимические детекторы

Table 1. Radiochemical solar neutrino detectors

<u>Neutrino capture on target</u>	<u><math>T_{1/2}</math></u>	<u>Energy threshold</u>	<u>Comments</u>
Chlorine, $^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar}$	35.0 days	0.814 MeV	“successful”
Gallium, $^{71}\text{Ga} \rightarrow ^{71}\text{Ge}$	11.4 days	0.233 MeV	“successful”
Iodine, $^{127}\text{I} \rightarrow ^{127}\text{Xe}$	36 days	0.789 MeV	prototype only
Molybdenum, $^{98}\text{Mo} \rightarrow ^{98}\text{Tc}$	$4 \times 10^6$ years	$>1.74$ MeV	“unsuccessful”
Lithium, $^7\text{Li} \rightarrow ^7\text{Be}$	53 days	0.862 MeV	R&D only
Bromine, $^{81}\text{Br} \rightarrow ^{81}\text{Kr}$	$2 \times 10^5$ years	0.470 MeV	R&D only
Tantalum, $^{205}\text{Tl} \rightarrow ^{205}\text{Pb}$	$14 \times 10^6$ years	0.054 MeV	R&D only

*J. N. Bahcall, 1989 Neutrino Astrophysics (Cambridge: Cambridge University Press)*

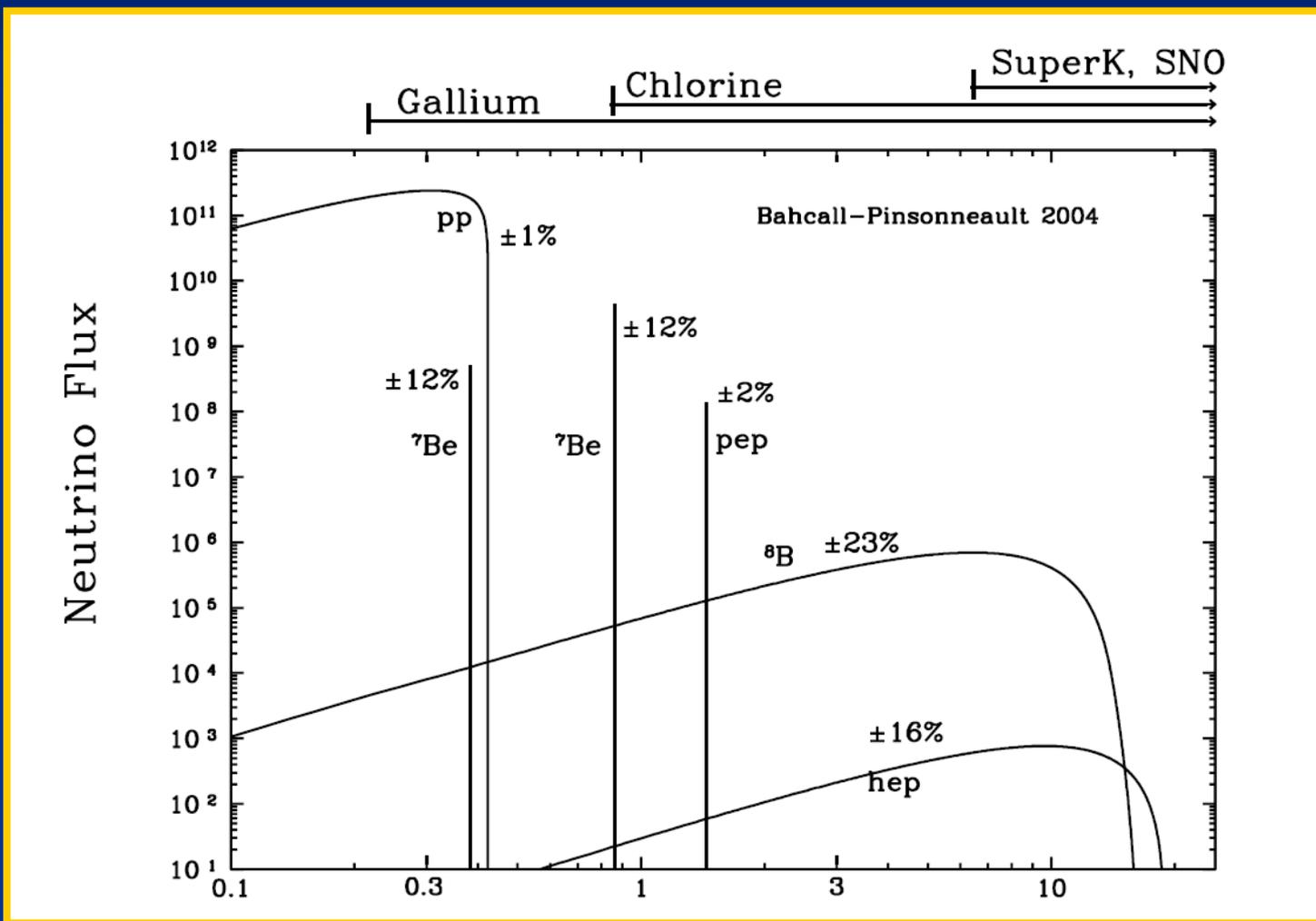


- Детектор, основанный на процессе  $^{71}\text{Ga} \rightarrow ^{71}\text{Ge}$  ;
- $^{51}\text{Cr}$  в качестве источника для калибровки такого детектора.

Вадим Алексеевич Кузьмин - [ *Кузьмин В.А. ЖЭТФ 49 (1965), 1532* ].

# Солнечные нейтрино

Распределение нейтрино протон-протонного цикла по энергиям



# Солнечные нейтрино

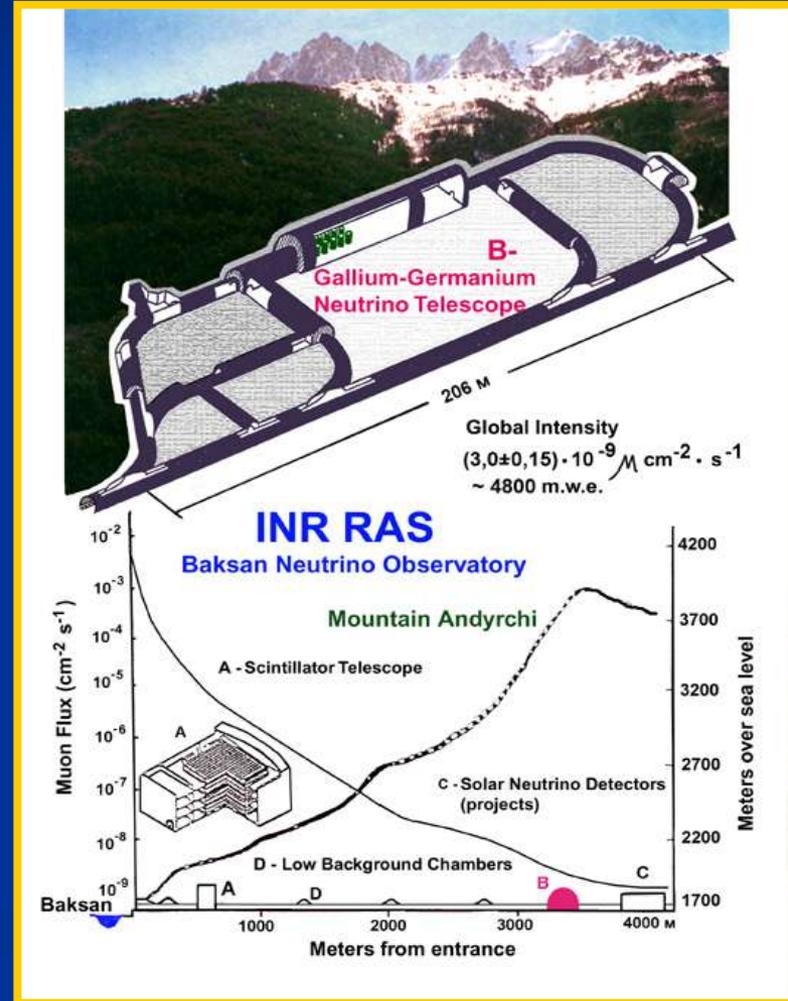
$^{71}\text{Ga} - ^{71}\text{Ge}$  радиохимический эксперимент SAGE



# Солнечные нейтрино

SAGE :  $^{71}\text{Ga} - ^{71}\text{Ge}$  радиохимический эксперимент (январь 1990).

Руководители: Владимир Гаврин, Георгий Зацепин, Tom Bowles



# Солнечные нейтрино

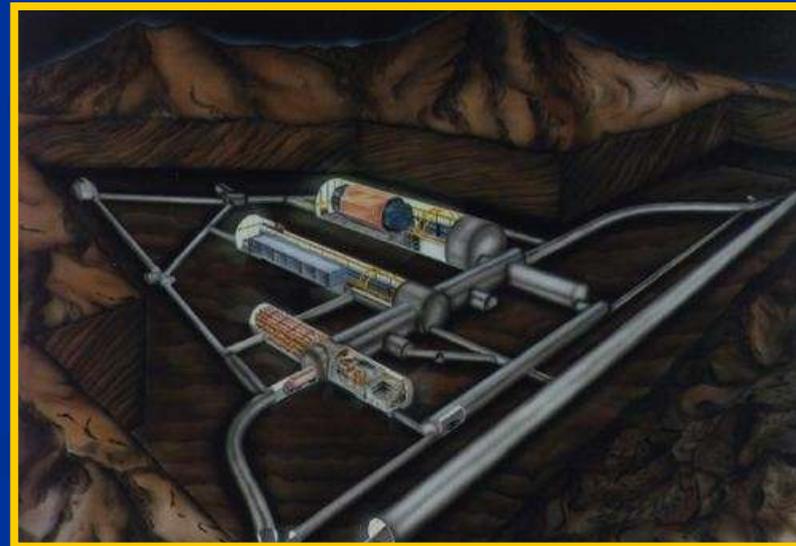
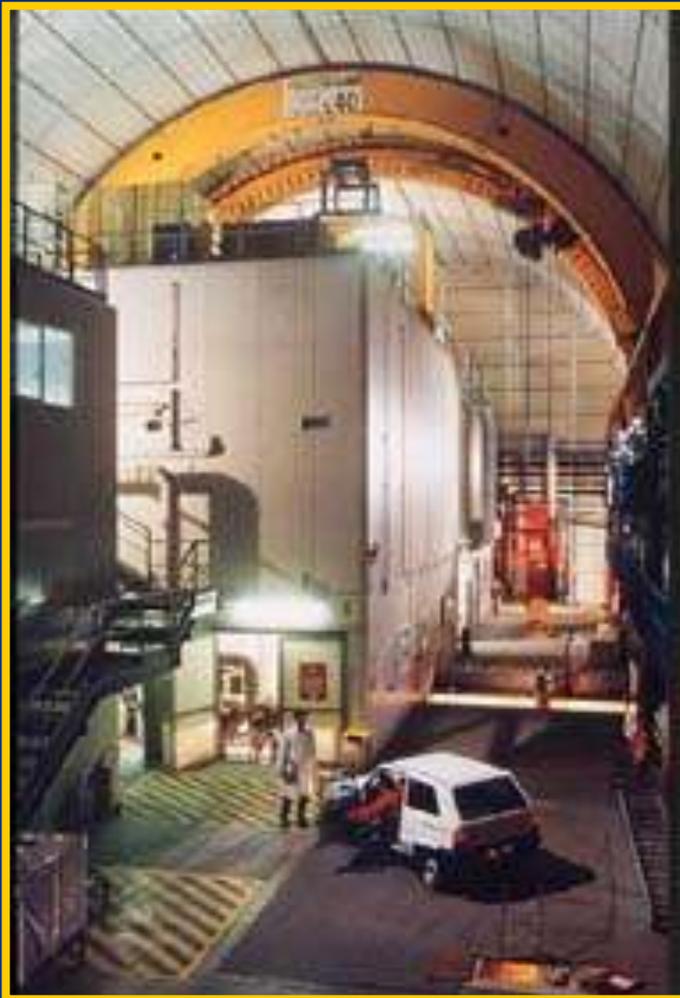
Радиохимический эксперимент GALLEX/GNO в Гран Сассо



# Солнечные нейтрино

## Эксперимент GALLEX/GNO

Руководитель: Till Kirsten (Max-Planck-Institut für Kernphysik)



# Солнечные нейтрино

Радиохимический эксперимент SAGE:  ${}^{71}_{32}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow {}^{71}_{33}\text{Ge} + e^-$



Детектор :

- до 57 т галлия
- 39.6 %  ${}^{71}\text{Ga}$
- $E_\nu > 233 \text{ keV}$

Экспозиция

( 4-6 недель )



Экстракция Ge

( 1.5 дня )



Измерения

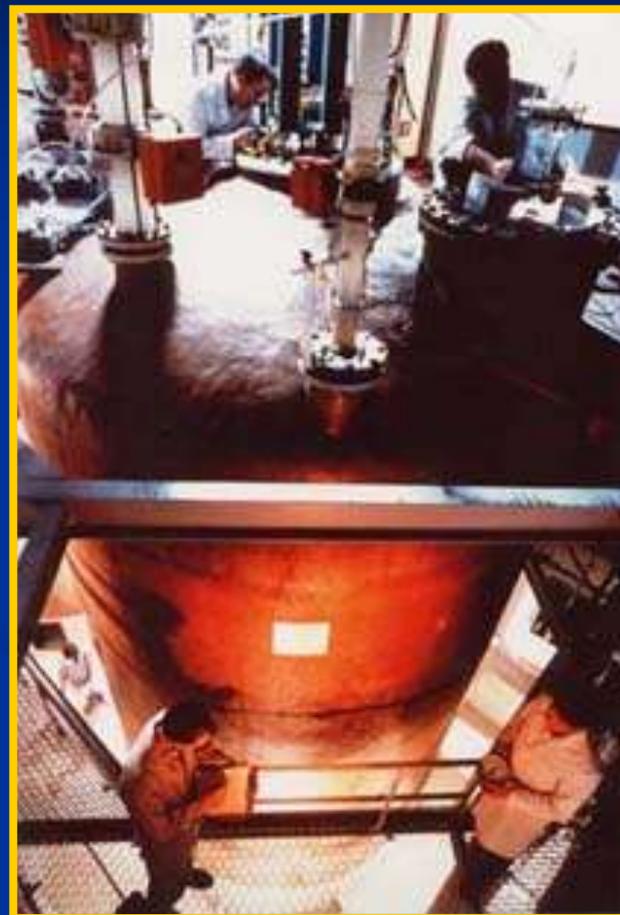
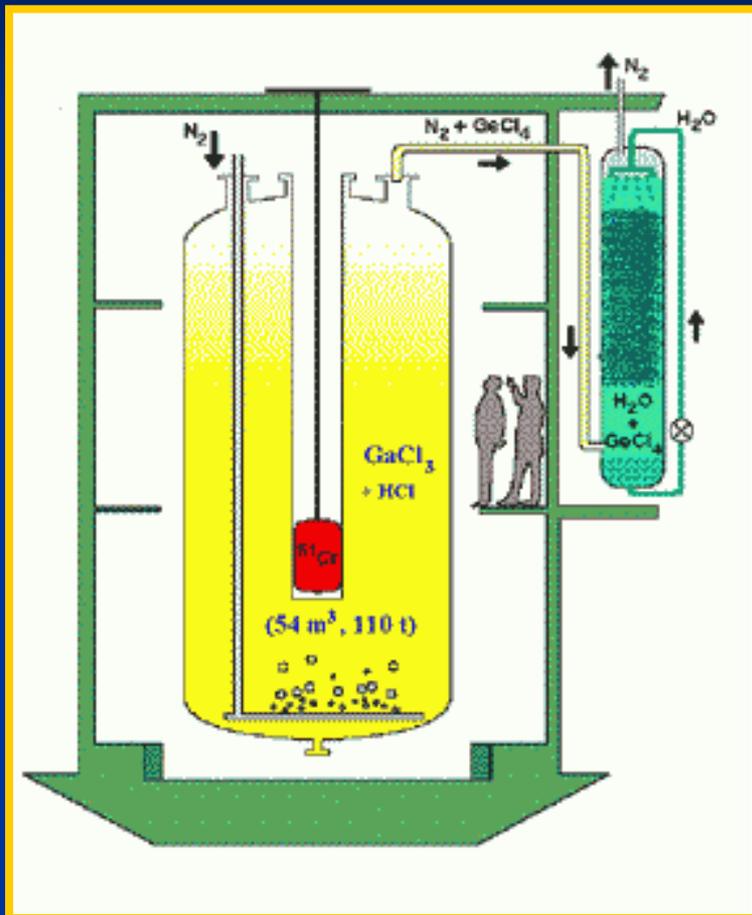
( 5 месяцев )

${}^{71}\text{Ge} \rightarrow {}^{71}\text{Ga} :$

$T_{1/2} \approx 11.4 \text{ дня}$

# Солнечные нейтрино

Радиохимический эксперимент GALLEX/GNO (1991-1997 / 1998-2003)



- Детектор : 30.3 т природного галлия в виде концентрированного раствора  $\text{GaCl}_3 - \text{HCl}$
- Экспозиция : 4 – 6 недель
- Извлечение  $\text{GeCl}_4$  : продувка азотом в течение 12 / 9 часов ( $2500 \text{ m}^3$  /  $1700 \text{ m}^3$ )

# Солнечные нейтрино

## Предсказания стандартной модели Солнца

STANDARD MODEL PREDICTIONS (BP2000)

Source	Flux ( $10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	Cl (SNU)	Ga (SNU)	Li (SNU)
<i>pp</i> .....	$5.95(1.00^{+0.01}_{-0.01})$	0.0	69.7	0.0
<i>pep</i> .....	$1.40 \times 10^{-2}(1.00^{+0.015}_{-0.015})$	0.22	2.8	9.2
<i>hep</i> .....	$9.3 \times 10^{-7}$	0.04	0.1	0.1
$^7\text{Be}$ .....	$4.77 \times 10^{-1}(1.00^{+0.10}_{-0.10})$	1.15	34.2	9.1
$^8\text{B}$ .....	$5.05 \times 10^{-4}(1.00^{+0.20}_{-0.16})$	5.76	12.1	19.7
$^{13}\text{N}$ .....	$5.48 \times 10^{-2}(1.00^{+0.21}_{-0.17})$	0.09	3.4	2.3
$^{15}\text{O}$ .....	$4.80 \times 10^{-2}(1.00^{+0.25}_{-0.19})$	0.33	5.5	11.8
$^{17}\text{F}$ .....	$5.63 \times 10^{-4}(1.00^{+0.25}_{-0.25})$	0.0	0.1	0.1
Total .....	...	$7.6^{+1.3}_{-1.1}$	$128^{+9}_{-7}$	$52.3^{+6.5}_{-6.0}$

SOLAR NEUTRINO RATES

Experiment	BP2000	Measured	Measured/BP2000
Chlorine .....	$7.6^{+1.3}_{-1.1}$	$2.56 \pm 0.23$	$0.34 \pm 0.06$
GALLEX + GNO .....	$128^{+9}_{-7}$	$74.1^{+6.7}_{-7.8}$	$0.58 \pm 0.07$
SAGE .....	$128^{+9}_{-7}$	$75.4^{+7.8}_{-7.4}$	$0.59 \pm 0.07$
$^8\text{B}$ -Kamiokande .....	$5.05[1.00^{+0.20}_{-0.16}]$	$2.80[1.00 \pm 0.14]$	$0.55 \pm 0.13$
$^8\text{B}$ -Super-Kamiokande .....	$5.05[1.00^{+0.20}_{-0.16}]$	$2.40[1.00^{+0.04}_{-0.03}]$	$0.48 \pm 0.09$
<i>hep</i> -Super-Kamiokande .....	9.3	$11.3(1 \pm 0.8)$	$\sim 1$

# Эксперимент SAGE

## Ожидаемое число событий

- При 129 SNU частота захватов в 50 т Ga ( 39.6 %  $^{71}\text{Ga}$  ):  $\mathbf{P = 1.92}$  сутки $^{-1}$ ;
- С учетом обратного распада  $^{71}\text{Ge}$  ( $T_{1/2}=11.4$  сут.) за время экспозиции (25 суток) в мишени образуется  $\mathbf{N=P\tau [1 - \exp(-t_{\text{эксп.}}/\tau)] \approx 25}$  атомов  $^{71}\text{Ge}$ ;
- Измеренная частота событий 65 SNU, т.е.  $\mathbf{N \approx 12}$ .

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| • Эффективности: химические процедуры | $\epsilon_{\text{хим}} - 0.92,$   |
| отбор импульсов                       | $\epsilon_{\text{счёт}} - 0.70,$  |
| живое время счёта                     | $\epsilon_{\Delta} - 0.80 ; \epsilon = \prod \epsilon_i \approx 0.52 .$ |



**Число регистрируемых импульсов  $\mathbf{N \sim 7}$**

# Эксперимент SAGE

Счет распадов  $^{71}\text{Ge}$



$V \sim 0.6 \text{ см}^3$ ,  $\text{Xe} + 10\% \text{ GeH}_4$ ,  $P \approx 1 \text{ атм.}$

Счёт – 5 месяцев  $\sim 2$  имп/сутки  $\rightarrow 300$  импульсов в 1 “ране” (run).

Отбор событий:

1) NaI	$\times 2/3$ ,
2) энергетические окна K- и L-пику	$\times 1/3$ ,
3) $T_N$	$\times 1/3$ .

После отбора остаётся 15-20 событий;

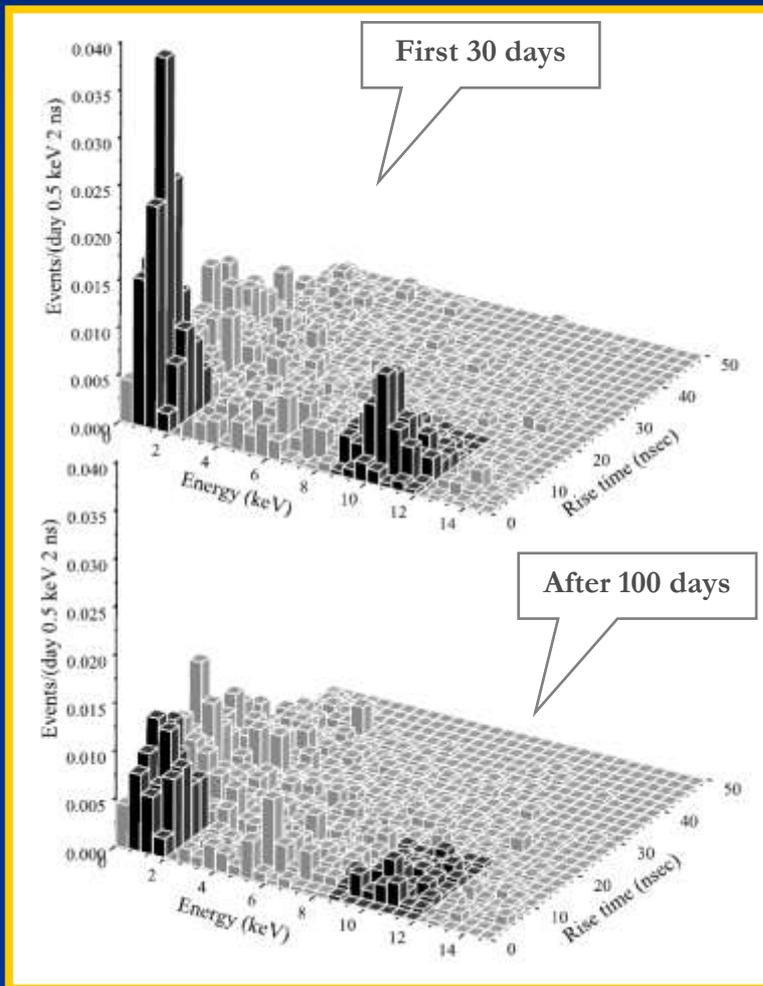
Число распадов  $^{71}\text{Ge}$  определяется временным анализом ( $N \sim 7$ );

Пуассоновская статистика:  $\delta\Pi = 1/\sqrt{N} \sim 40\%$ ,  $\delta \sim 1.5 \cdot \delta\Pi \sim 60\%$ .

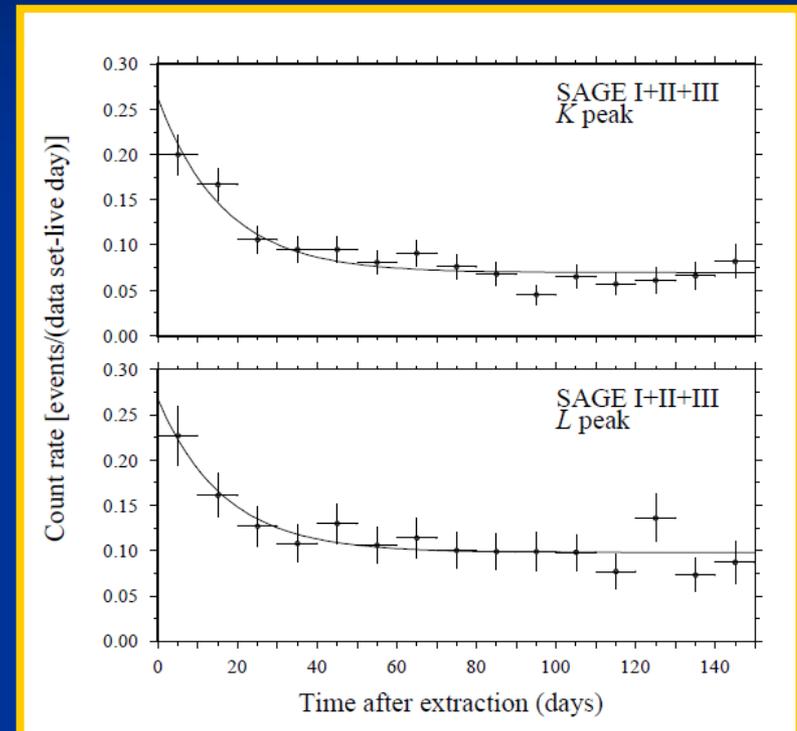
# Эксперимент SAGE

## Результаты счета распадов $^{71}\text{Ge}$

Averaged on 77 extraction, 2002-2007



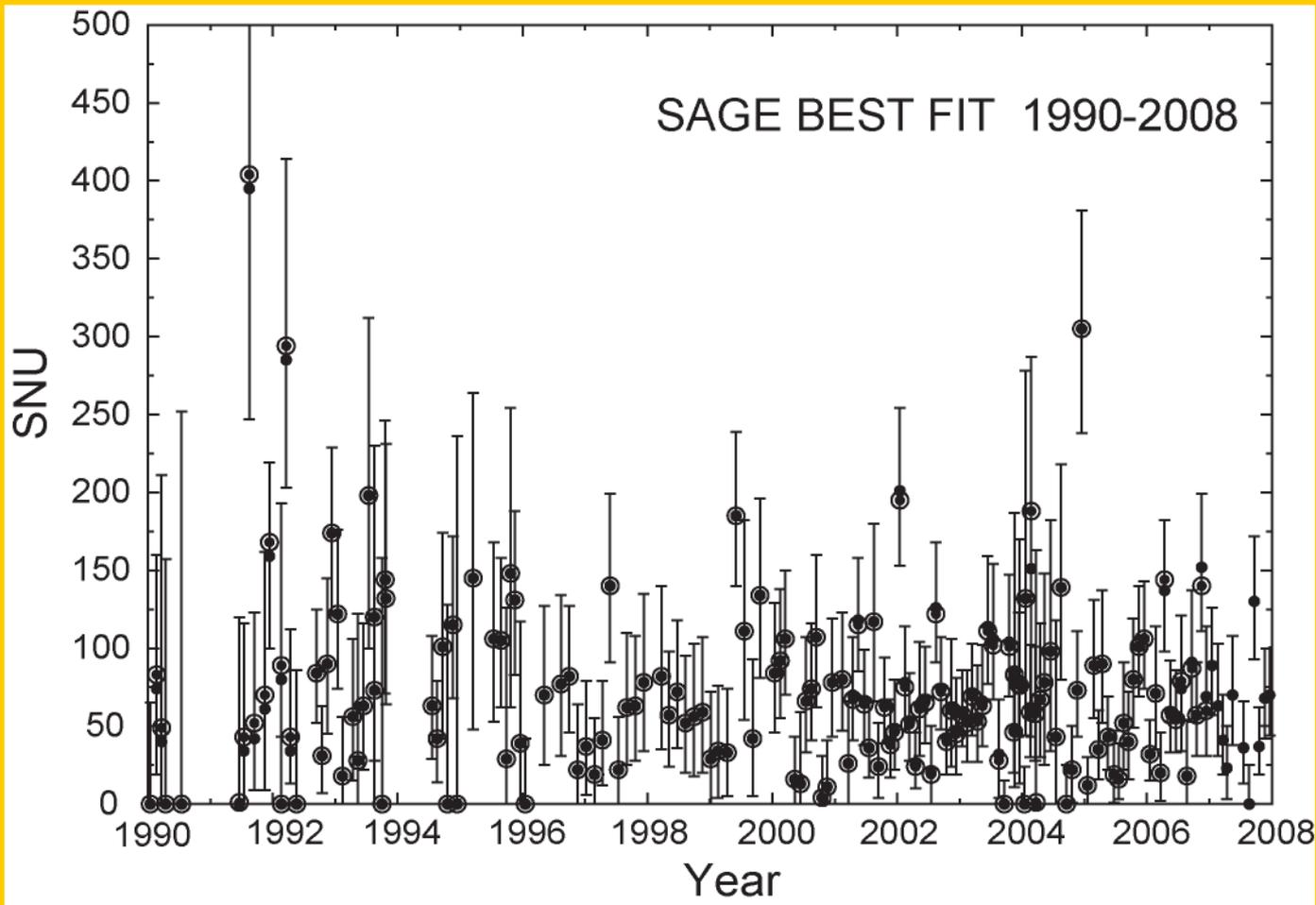
January 1990 through December 1997



SAGE Collab., *arXiv: astro-ph/9907113v2*

# Эксперимент SAGE

## Результаты 18 лет наблюдений



1 SNU =  $10^{-36}$   
захватов в  
секунду на 1 атом  
мишени.

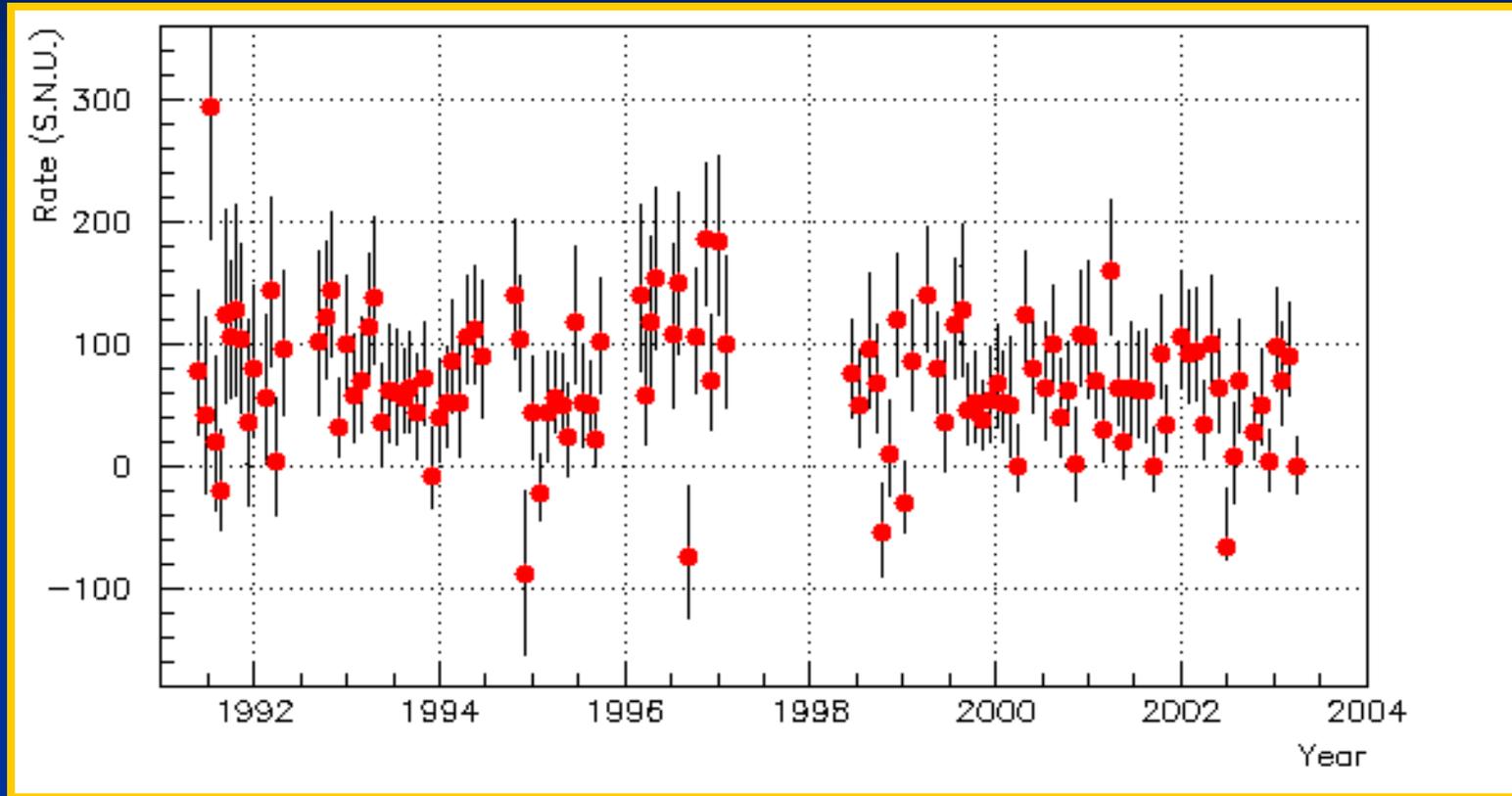
**Результат** после  
168 экстракций  
(декабрь 2007) :  
**65.4 SNU**

Ошибки:  
+3.1/-3.0 (stat)  
+2.6/-2.8 (syst)

**Ожидаемое**  
значение потока  
**126 SNU,**  
при учете  
осцилляций  
**63 - 66 SNU**

# Эксперимент GALLEX/GNO

## Результаты пяти лет наблюдений

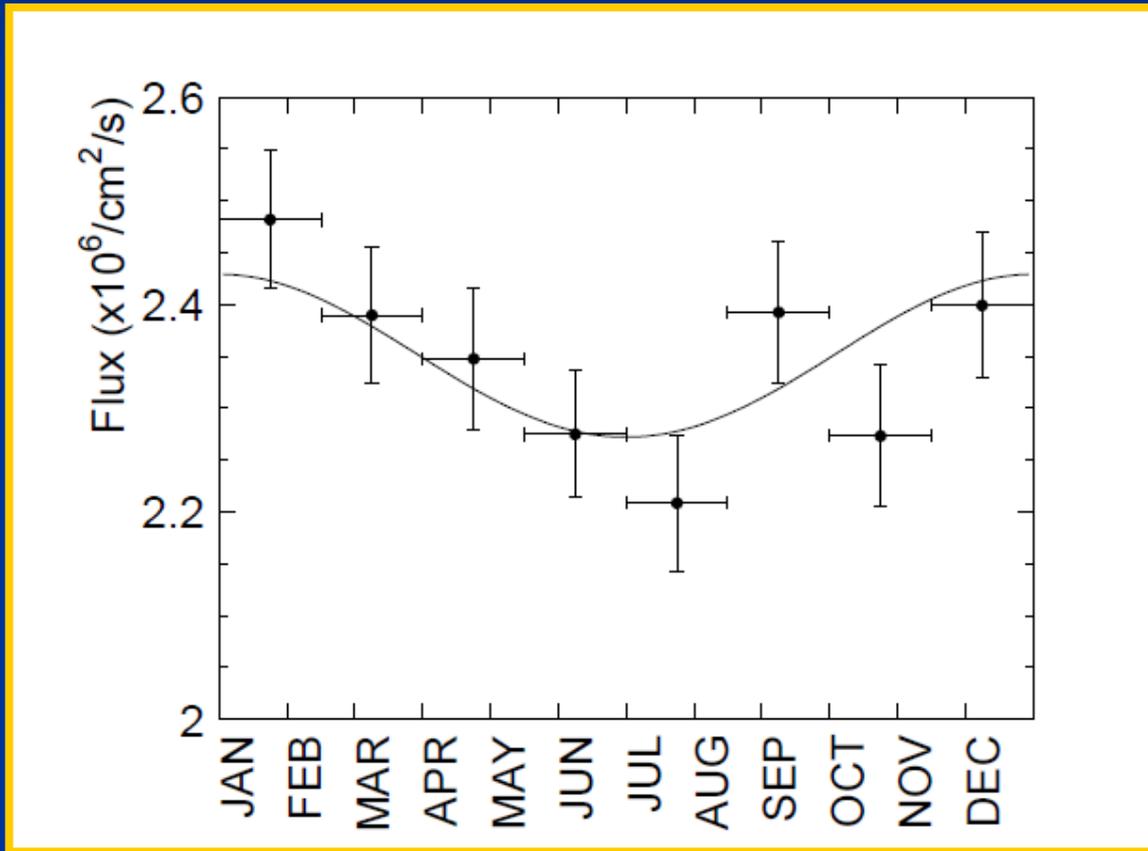


- Комбинированный результат для 3 этапов GNO:  $62.9^{+6.0}_{-5.9}$  SNU ( $1 \sigma$ )
- Комбинированный результат для GALLEX+GNO:  $69.3^{+5.5}_{-5.5}$  SNU ( $1 \sigma$ )

# Солнечные нейтрино

## Эксперимент SuperKamioKande-I (1996)

Обнаружены сезонные вариации потока нейтрино



Эксцентриситет :  $2.1 \pm 0.3\%$

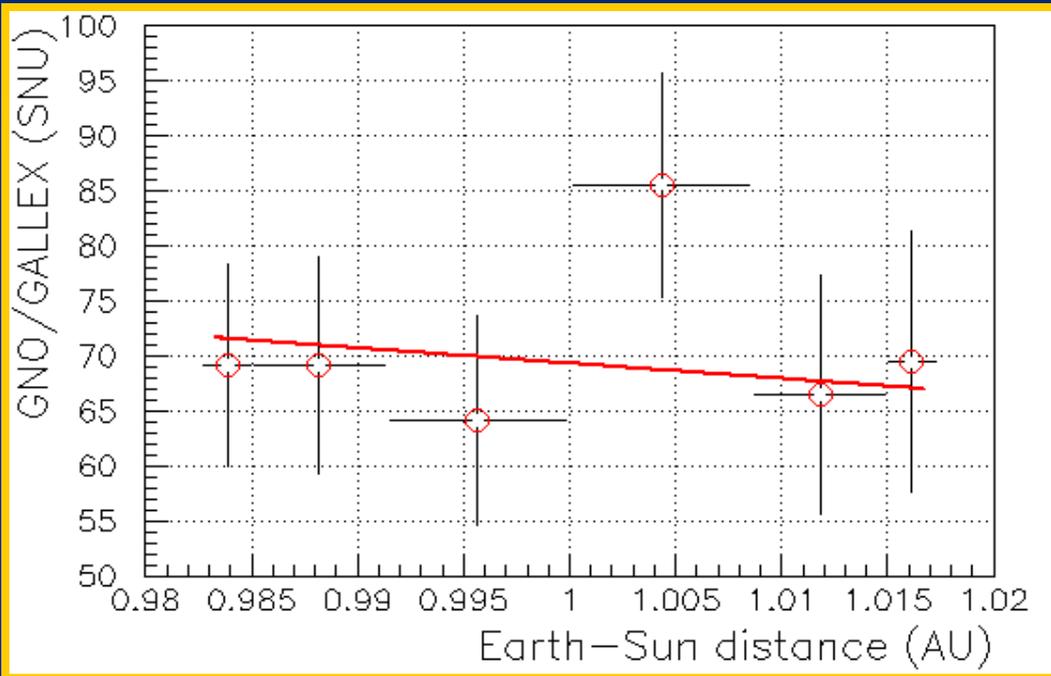
Сдвиг перигелия :  $13 \pm 18$  дней

Первое в мире измерение эксцентриситета земной орбиты с помощью нейтрино!!!

# Сезонные вариации

## Эксперимент GALLEX/GNO

Наблюдаются ли сезонные вариации ?



Данные GALLEX+GNO (123 точки) отсортированы по гелиоцентрическому расстоянию  $R$  и сгруппированы в 6 примерно равнонаселенных групп.

- $\chi^2$  – тест гипотезы о постоянстве потока солнечных нейтрино и наличии только геометрической модуляции  $1/R^2$  дает значение  $\chi^2/\text{DOF} = 3.0/5$  (вероятность **69 %**).

При существующем уровне ошибок данные GALLEX/GNO не позволяют выявить сезонные вариации потока  $\nu_e$ .



- Разница между зимними измерениями  $W$  ( $\pm 3$  месяца от перигелия) и летними  $S$  (в другие месяцы)  **$D(W-S) = -7.6 \pm 8.4 \text{ SNU}$**

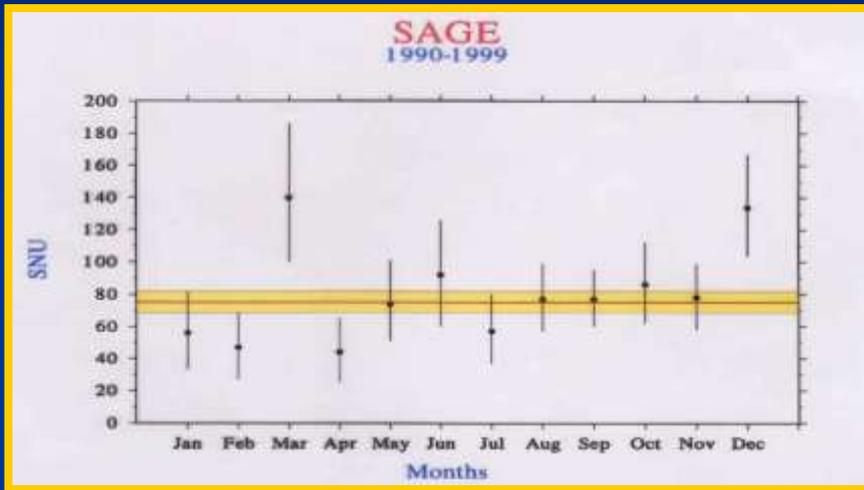
Однако модуляция  $1/R^2$  дает  **$+2.3 \text{ SNU}$**  !

# Сезонные вариации

## Эксперимент SAGE

Наблюдаются ли сезонные вариации ?

Поправка на модуляцию  $1/R^2$  учтена уже на стадии оценки ошибки измерений.



Разница между зимним и летним периодами:

$$R_W - R_S = 5.8 (+6.2 -6.1) \text{ SNU},$$

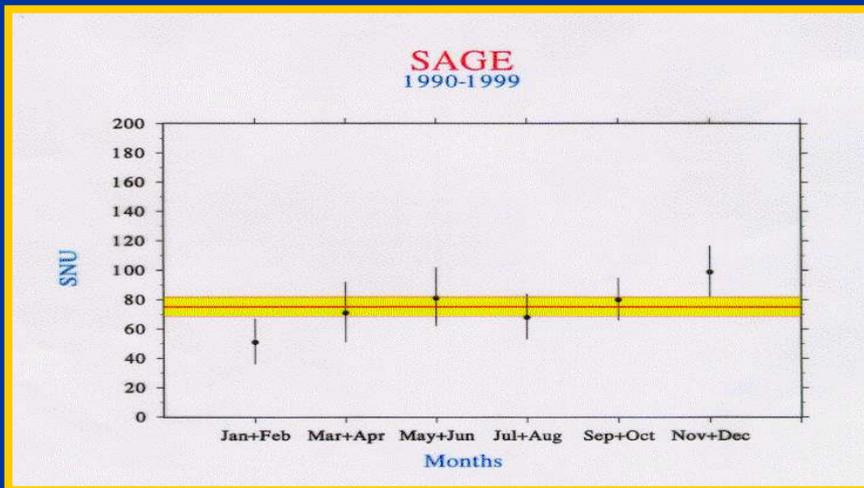
если серединой лета считается день летнего солнцестояния 21 июня, и

$$R_W - R_S = 4.2 (+6.2 -6.1) \text{ SNU},$$

если середина лета — момент прохождения афелия, 5 июля.

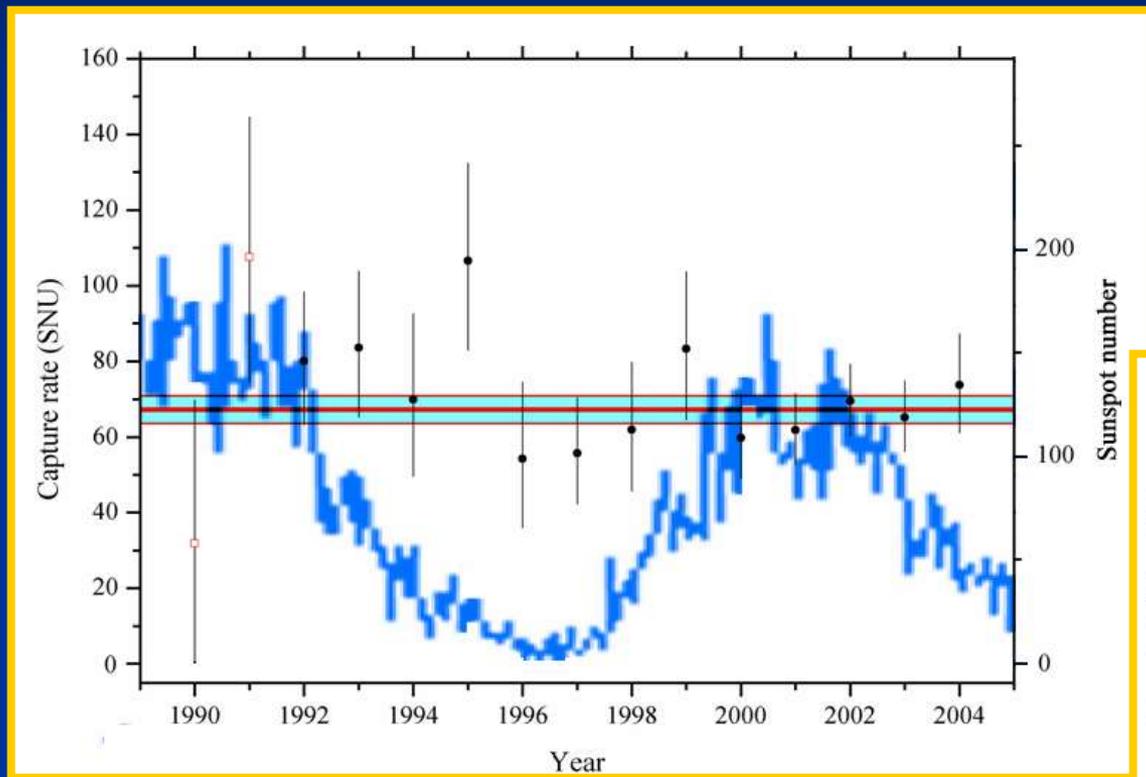
- Можно считать, что эта разница действительно равна нулю (с точностью до ошибки измерений).

- Судить о характере зависимости по двум средним точкам мы не можем.



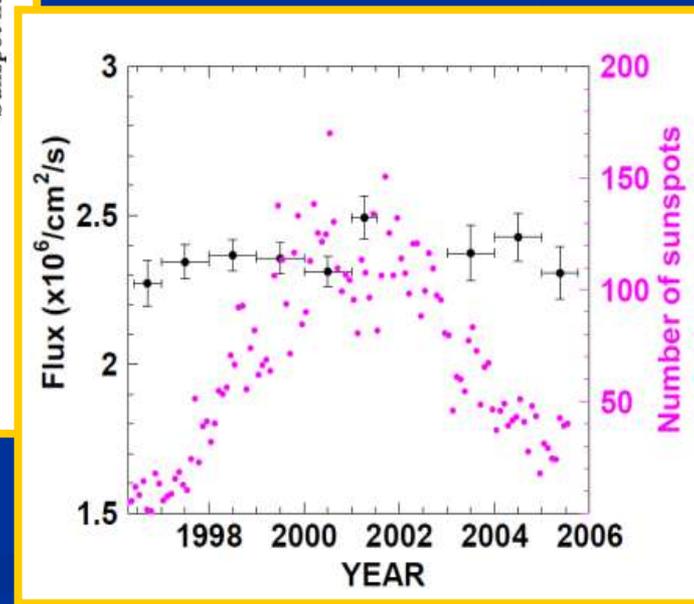
# Эксперимент SAGE

Есть ли связь потока нейтрино с солнечной активностью ?



SAGE

Super Kamiokande

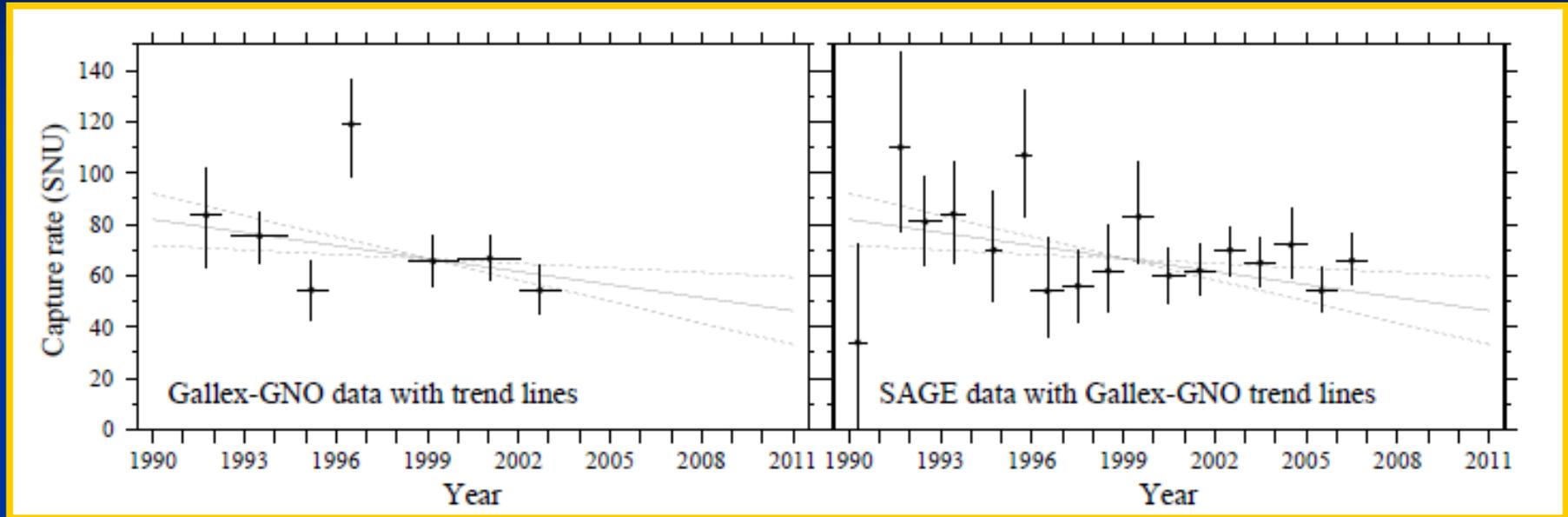


*SAGE : В.Н. Гаврин, Отчет БНО РАН, ноябрь 2005*

*SuperKamiokande : J.P. Cravens et al., (the Super-Kamiokande Collaboration), 2008*

# Эксперименты SAGE и GALLEX-GNO

Есть ли тренд во временных рядах данных GALLEX/GNO и SAGE ?



$$\text{Capture rate} = 82 \pm 10 - (1.7 \pm 1.1) \times [t(\text{year}) - 1990].$$

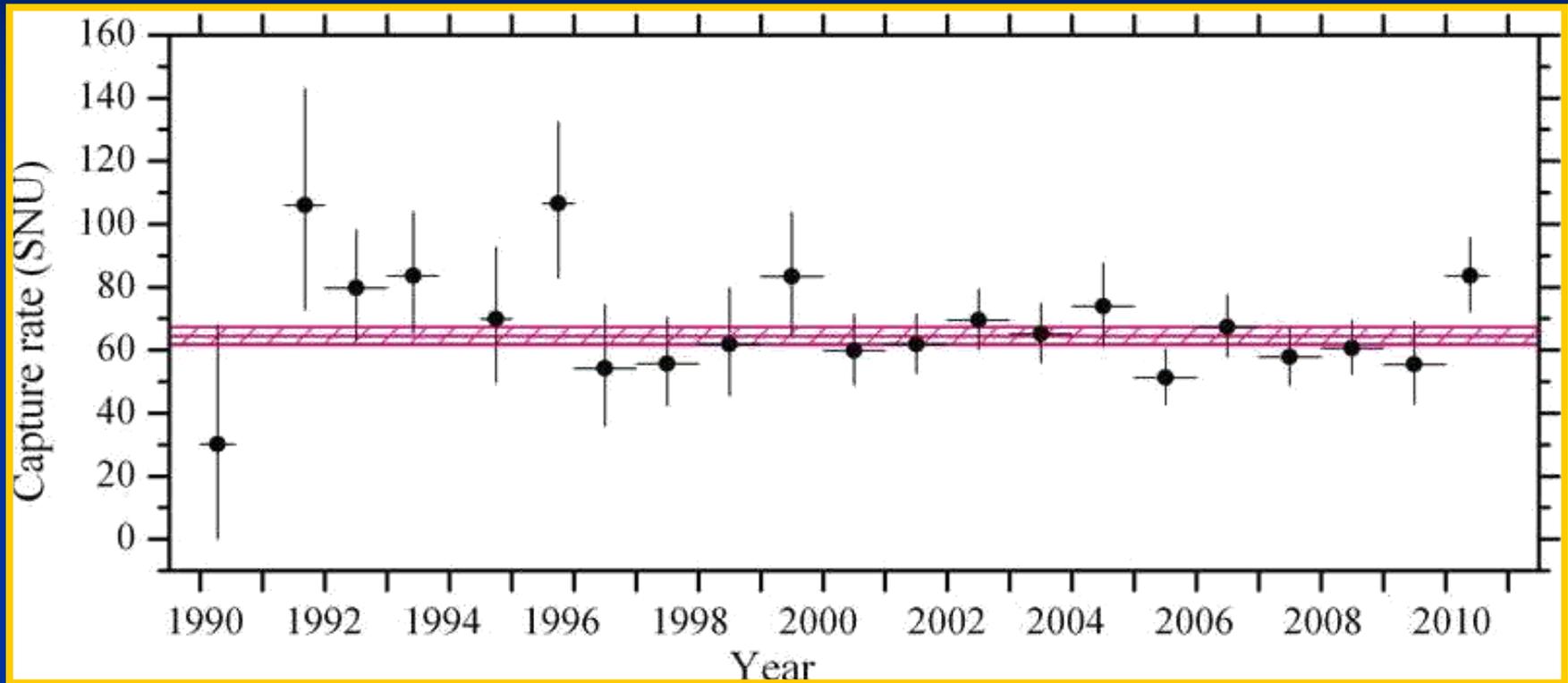
$\chi^2$ -тест данных Gallex-GNO при учете (без учета) тренда дает неожиданный результат:  
 $\chi^2/\text{DOF} = 10.8/5$  ( $13.2/6$ ), вероятность: 5.6% (4.0%).

**Т.о., обе гипотезы (постоянство потока или линейный тренд) одинаково плохие!**

В случае SAGE без учета тренда  $\chi^2/\text{DOF} = 11.7/16$  (76%), а при учете тренда Gallex-GNO  $\chi^2/\text{DOF} = 11.4/17$  (вероятность 83%), т.е. **обе гипотезы одинаково хорошие!**

# Эксперимент SAGE

Наблюдается ли тренд во временном ряду данных SAGE ?



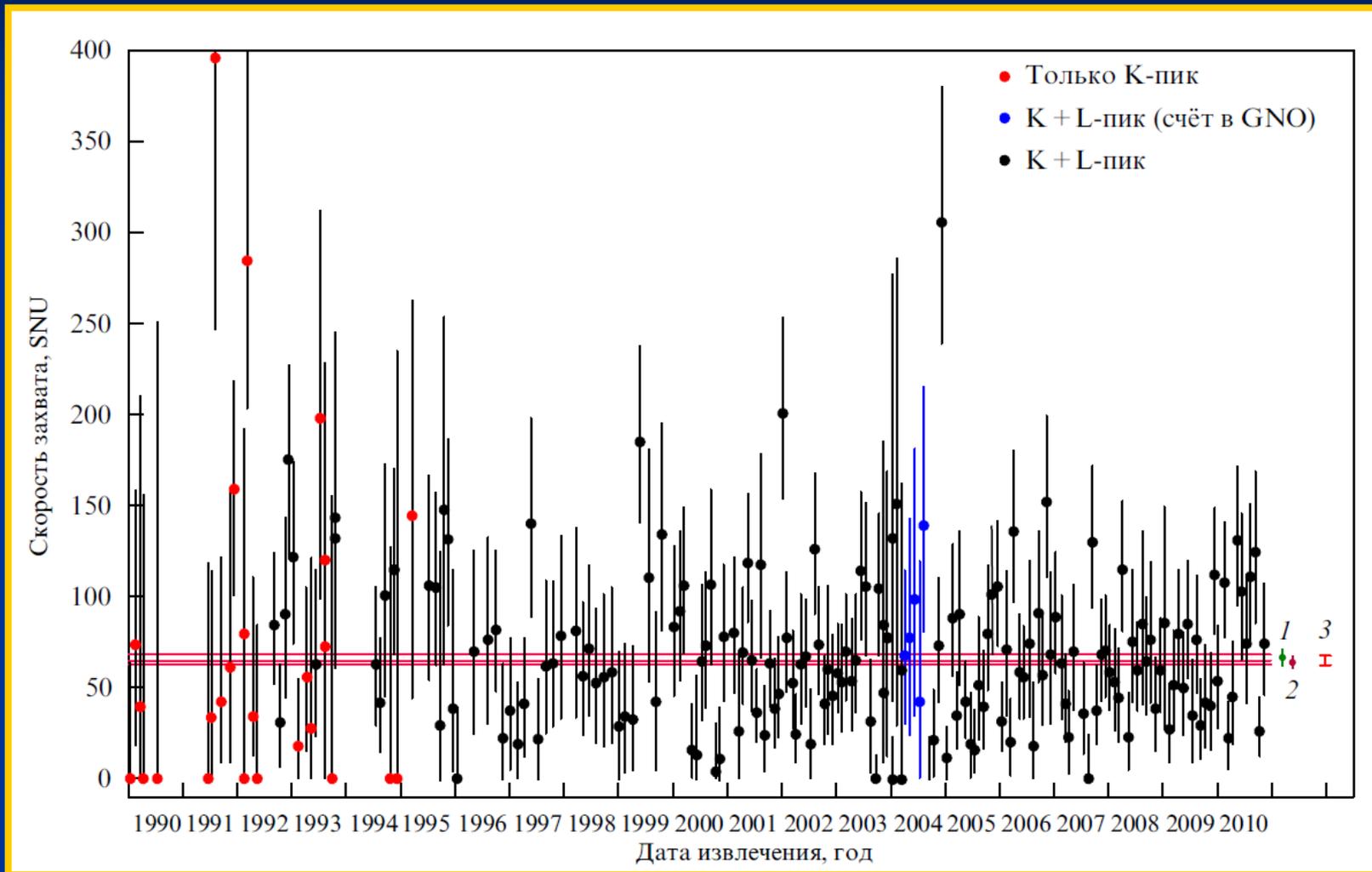
Гаврин В.Н., УФН **181**, № 9 (2011)

Проверка по критерию  $\chi^2$  : гипотеза о постоянстве потока на уровне 65.4 SNU дает  $\chi^2/\text{DOF} = 12.0/17$ , что соответствует вероятности 80% (2007 год включительно)

Abdurashitov J N (SAGE Collab.) *Phys. Rev. C* 80 015807 (2009); *arXiv:0901.2200v3 [nucl-ex]* 10 Aug 2009

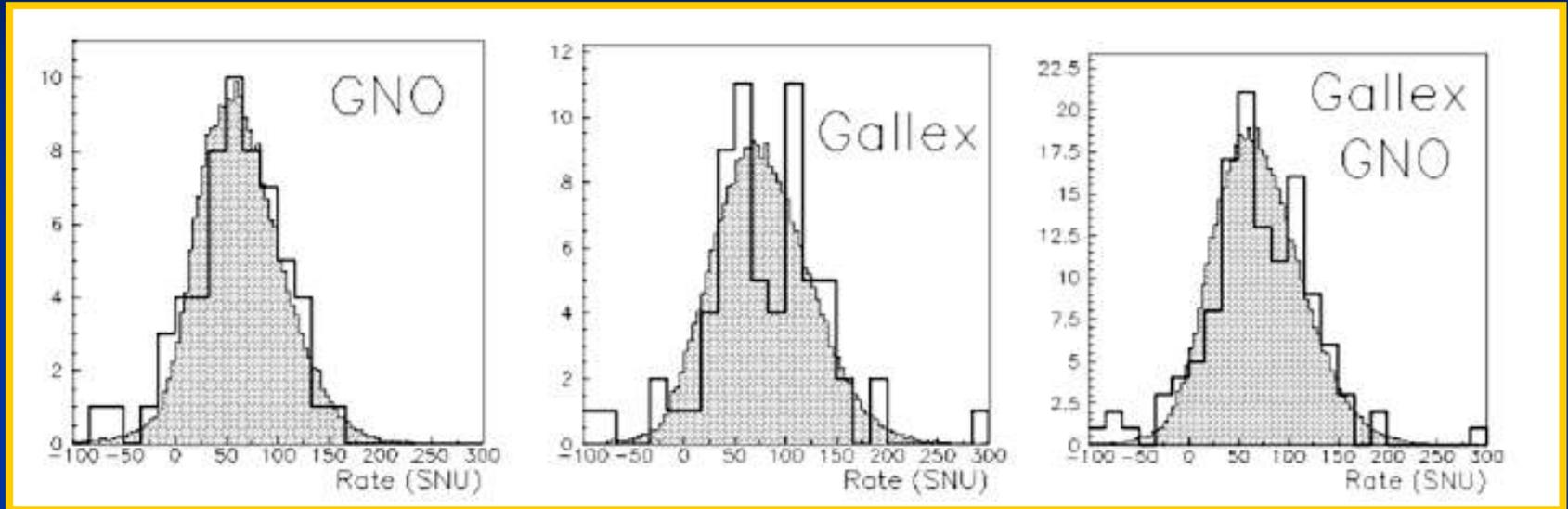
# Эксперимент SAGE

Полный набор данных за 21 год наблюдений



# Эксперимент GALLEX/GNO

## Результаты пяти лет наблюдений



*GNO COLLABORATION: M. Altmann et. al. , Phys.Lett.B 616 (2005), pp. 174-190*

Проведенный анализ показывает, что возможно существует связь между бимодальностью этих гистограмм и вращательной модуляцией...

*Sturrock, P.A., and Scargle, J.D.: 2001, Astrophys. J. (Letters) 550, L101*

- Спин-ароматная конверсия нейтрино в конвективной зоне, где есть области усиленного магнитного поля ?
- Радиальное смещение зоны (зон) термоядерного горения (!) ?

**Как можно локализовать радиальное положение зоны модуляции?**

# Поиск скрытых периодичностей

## Метод Скаргла-Ломба

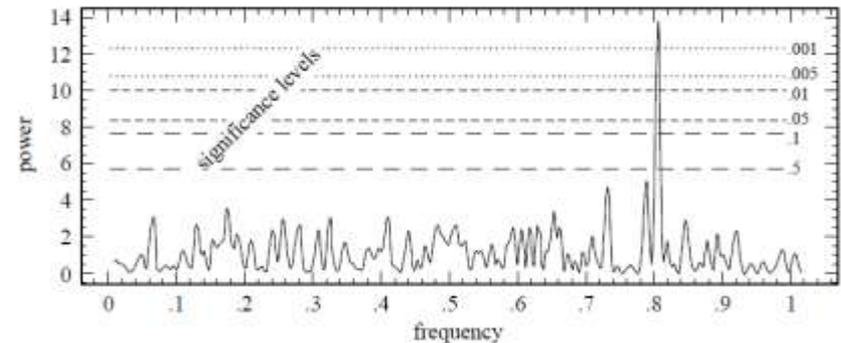
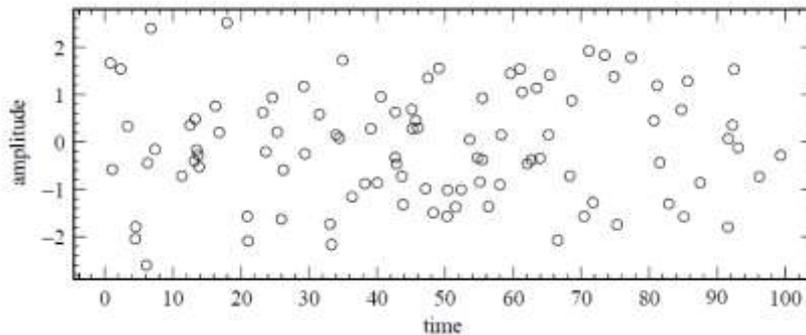
$$h_i \equiv h(t_i), \quad i = 1, \dots, N. \quad \bar{h} \equiv \frac{1}{N} \sum_1^N h_i \quad \sigma^2 \equiv \frac{1}{N-1} \sum_1^N (h_i - \bar{h})^2$$

Нормализованная периодограмма Ломба:

$$P_N(\omega) \equiv \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left[ \sum_j (h_j - \bar{h}) \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[ \sum_j (h_j - \bar{h}) \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}$$

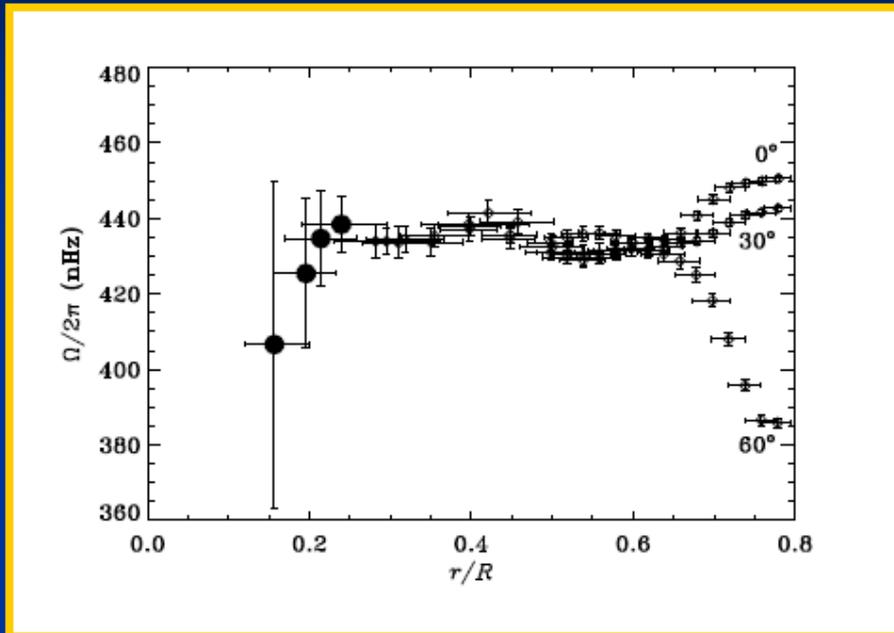
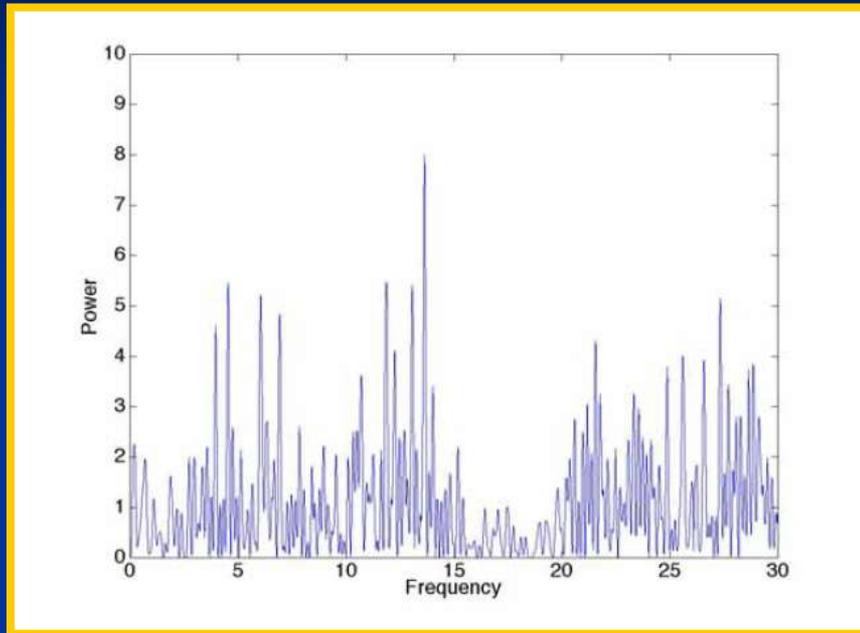
$$\omega \equiv 2\pi f > 0 \quad \tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_j \sin 2\omega t_j}{\sum_j \cos 2\omega t_j}$$

### Пример применения



# Эксперимент GALLEX

## Периодограмма временного ряда



### **P.A. Sturrock:**

- В данных GALLEX имеются две основные частоты модуляции,  $11.87 \text{ yr}^{-1}$  и  $13.63 \text{ yr}^{-1}$ ;
- Анализ показывает, что истинная модуляция соответствует  $11.87 \text{ yr}^{-1}$ ;
- Из данных гелиосейсмологии следует, что эта модуляция имеет место либо чуть ниже зоны тахоклина, либо в самом ядре, предположительно как следствие неоднородности термоядерного горения.

*Lecture Notes on Stellar Oscillations, Jorgen Christensen-Dalsgaard, 2003*

*P.A. Sturrock, 2008*

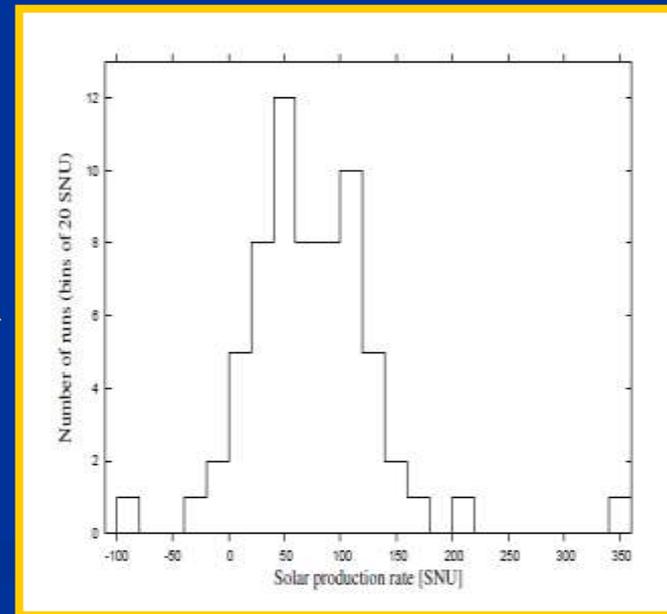
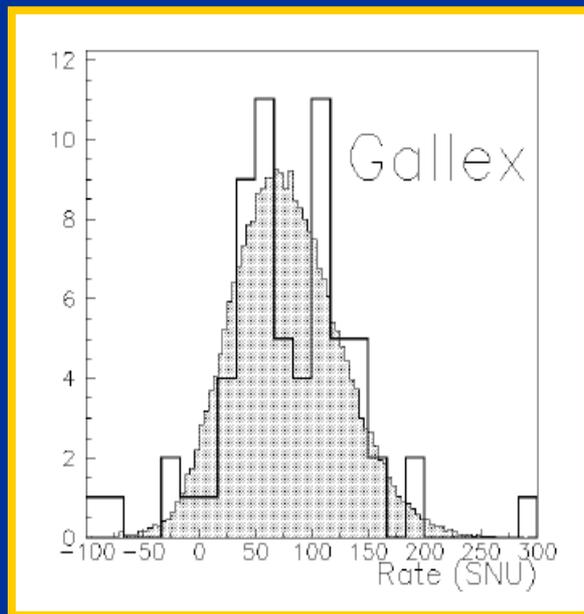
# Эксперимент GALLEX

Ревизия данных – форма импульса вместо времени нарастания

*L. Pandola (2004): “... не найдено статистических доказательств наличия временных вариаций; при существующей чувствительности эксперимента результаты полностью согласуются с ожидаемым постоянством уровня частоты захватов на протяжении всего периода измерений”.*

*Pandola L., arXiv:hep-ph/0406248v1 23 Jun 2004*

*GNO Collaboration:  $73.4^{+7.1}_{-7.3}$  SNU - на 5.3% ниже прежнего значения  $77.5^{+7.5}_{-7.8}$  SNU*



*F. Kaether, W. Hampel, G. Heusser, J. Kiko, T. Kirsten. arXiv:1001.2731v1 [hep-ex] 15 Jan 2010.*

# Эксперимент GALLEX/GNO

## Временные вариации

### **P.A. Sturrock:**

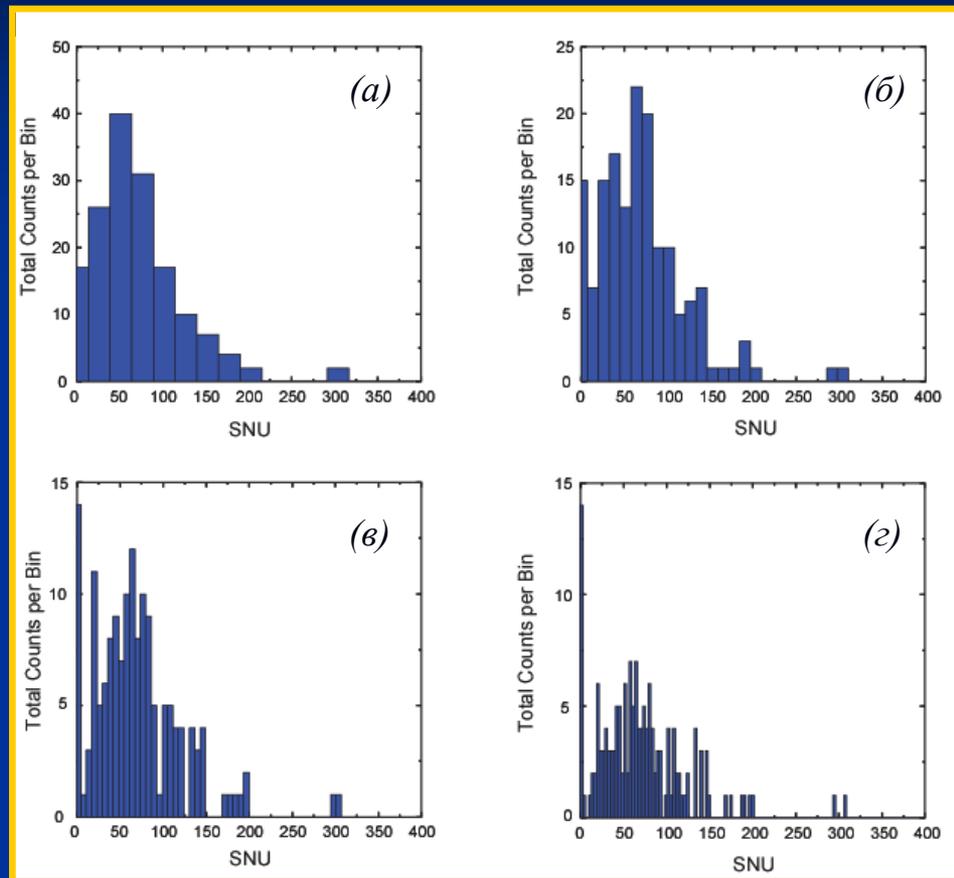
- “Гистограмма, полученная на основе анализа формы импульсов, по-видимому, является одномодальной”;
- “... признаки бимодальности в ранних наборах данных GALLEX были обусловлены систематическими эффектами в экспериментальных процедурах, а не изменчивостью потока нейтрино”.

*P.A. Sturrock, [arXiv:0904.4236](https://arxiv.org/abs/0904.4236), 2009*

- При имеющемся уровне статистических и систематических ошибок, в рядах данных эксперимента GALLEX/GNO не выявляются какие-либо циклические модуляции, указывающие на изменчивость потока солнечных нейтрино.
- При существующей чувствительности эксперимента полученные результаты полностью согласуются с естественным предположением о постоянстве потока нейтрино и не указывают на существование в рядах данных какого-либо долговременного тренда.

# Эксперимент SAGE

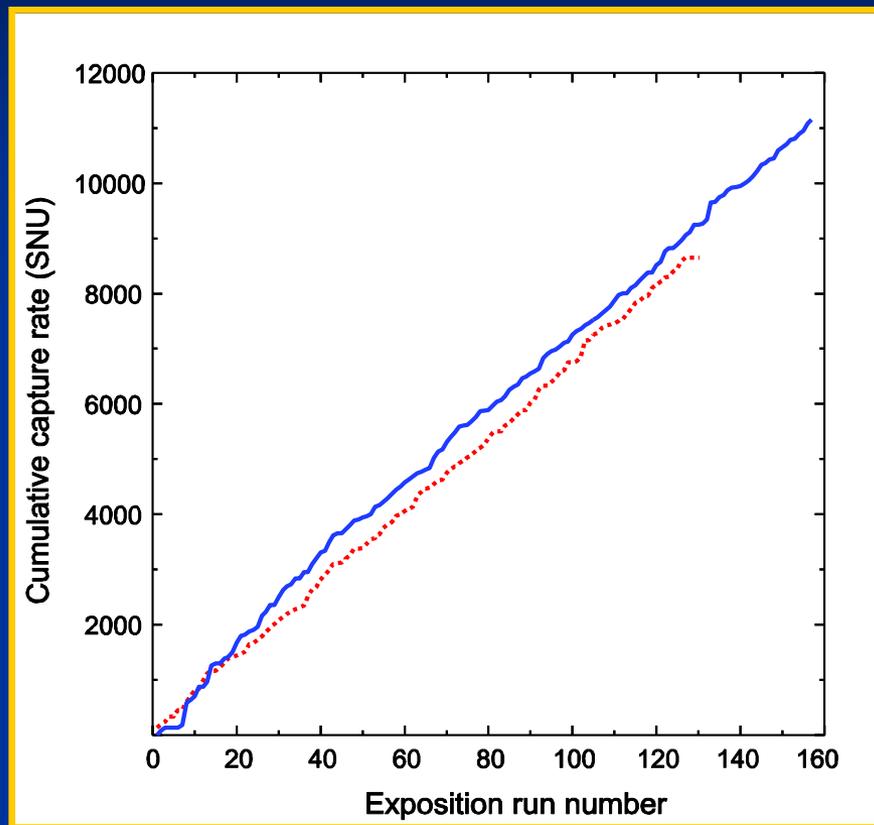
Гистограмма данных SAGE за 1990-2007 гг.



Распределения экспозиций по числу захвата (в единицах SNU):  
(a) — гистограмма плотности распределения с группировкой данных SAGE по 16 интервалам, (b), (v), (z) — то же соответственно для 32, 64 и 128 интервалов группировки.

# Эксперимент SAGE

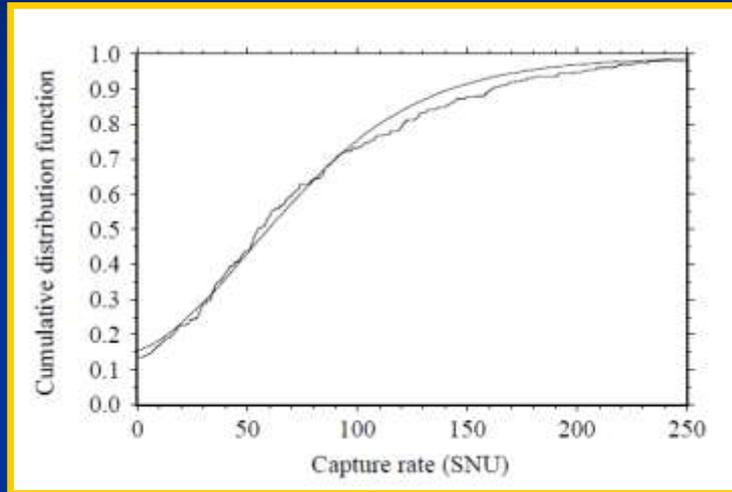
## Кумулятивная диаграмма



Кумулятивное число захватов (в единицах SNU) как функция номера экспозиции в эксперименте SAGE (сплошная линия). Пунктиром показано кумулятивное число захватов для второй фазы эксперимента (после 1993 г.).

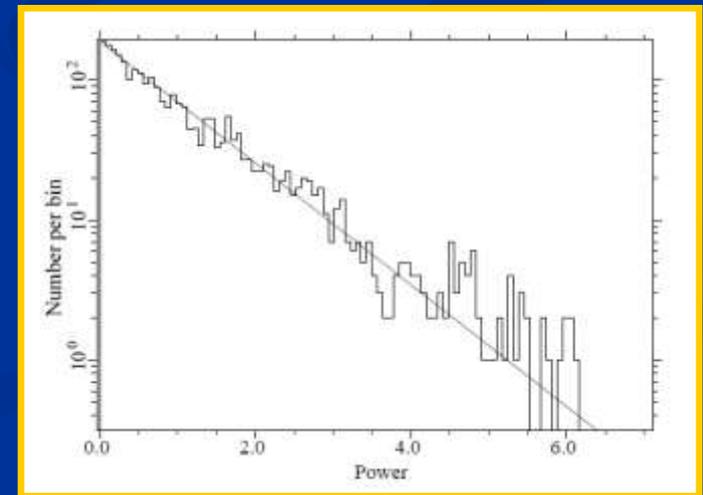
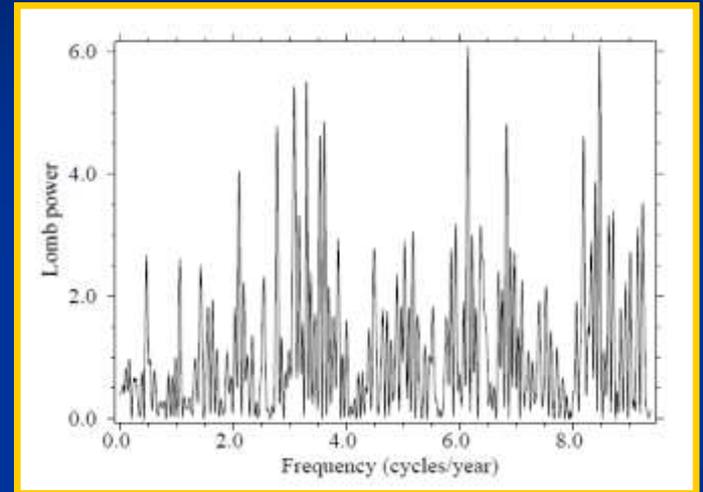
# Эксперимент SAGE

## Функция распределения и спектр Ломба



Экспериментальная функция распределения и ожидаемый результат, полученный методом Монте-Карло.

Спектр Ломба для 168 точек SAGE и его гистограмма. Прямая линия – распределение, ожидаемое при отсутствии осцилляций.



# Эксперимент SAGE

## Временные вариации потока

- Данные SAGE представляют поток солнечных нейтрино как стационарный случайный процесс с одномодальным распределением.
- Своеобразие данных начального периода 1990-2004 гг. не связано с каким-то периодическим процессом, период которого сопоставим со временем существования эксперимента SAGE.
- Эту особенность можно было бы объяснить проявлением какой-либо неустойчивости, возникающей время от времени в РЗ Солнца. Однако **делать такой радикальный вывод** на основании только имеющихся данных **преждевременно**.
- На спаде солнечной активности (1990–1992 гг.) наблюдаемое увеличение нейтринного потока могло бы быть следствием ослабления взаимодействия нейтрино с уменьшающимся магнитным полем в КЗ. Однако мы не наблюдаем повторения такого эффекта спустя 10–12 лет, в 23-м цикле активности.
- По-видимому, другой механизм и другие (более длительные) периоды изменений внутренних характеристик Солнца могут быть ответственными за “подъем” потока нейтрино в эпоху 1990–1992 гг.

Спасибо за внимание!

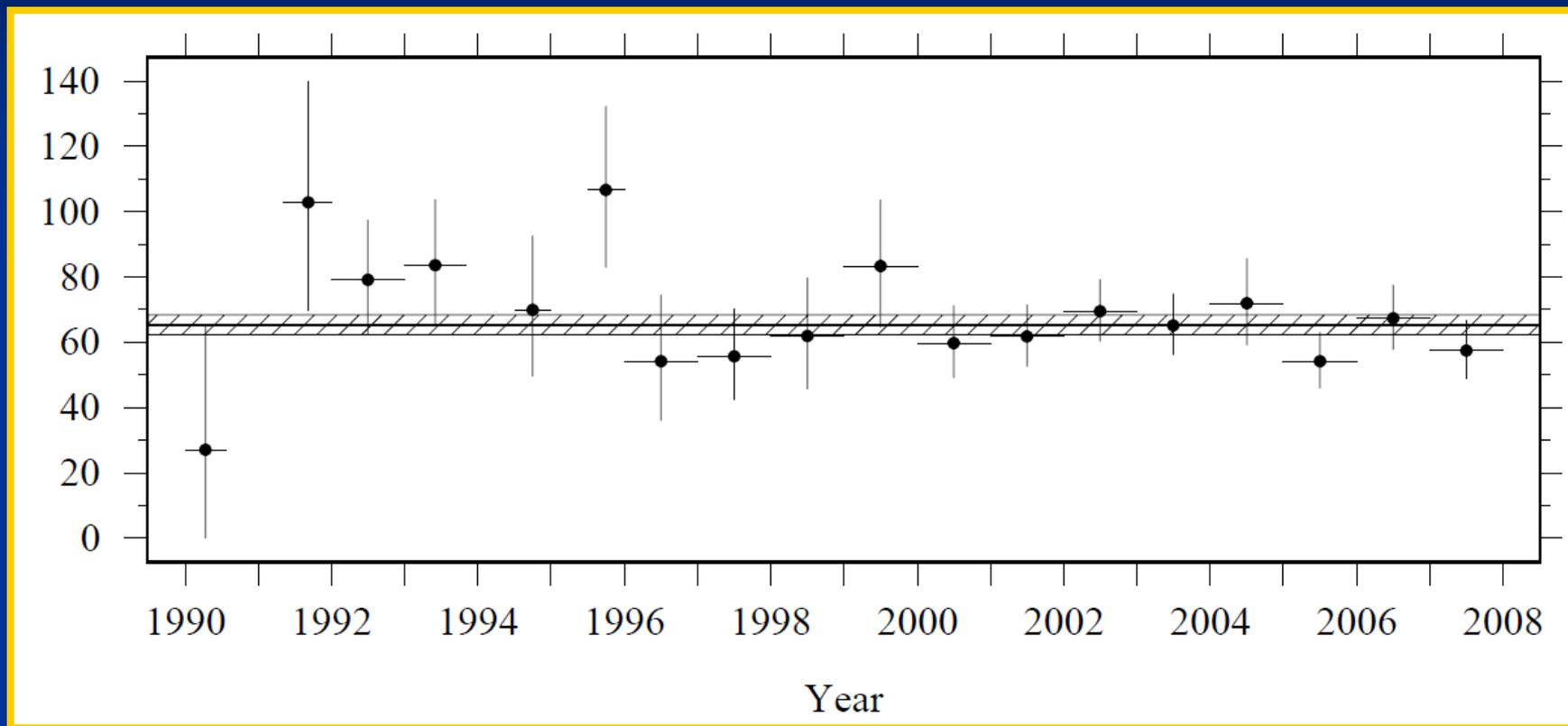


Time period	05/14/91- 01/23/97	05/20/98- 04/09/03	05/14/91- 4/09/03	Full data set 01/90-12/06
Number runs	65	58	123	
GALLEX/GNO	$77.5 \pm 6.2^{+4.3}_{-4.7}$	$62.9^{+5.5}_{-5.3} \pm 2.5$	$69.3 \pm 4.1 \pm 3.6$	-
	$77.5^{+7.6}_{-7.8}$	$62.9^{+6.0}_{-5.9}$	$69.3 \pm 5.5$	
Number runs	45	49	94	157
SAGE	$79.4^{+8.8}_{-38.4} \pm 3.9$	$65.0^{+5.1}_{-4.9} \pm 3.4$	$68.9^{+4.5}_{-4.3} \pm 3.4$	$66.3^{+3.3}_{-3.2}^{+3.5}_{-3.2}$
	$79.4^{+9.6}_{-9.3}$	$65.0^{+6.1}_{-6.0}$	$68.9^{+5.6}_{-5.5}$	$66.3^{+4.8}_{-4.5}$
Number runs	(110)	(107)	(217)	(288)
SAGE+GALLEX/GNO	$78.3 \pm 5.9$	$63.9 \pm 4.2$	$69.1 \pm 3.9$	$67.6 \pm 3.6$

$\Delta \sim 2\sigma$

# Эксперимент SAGE

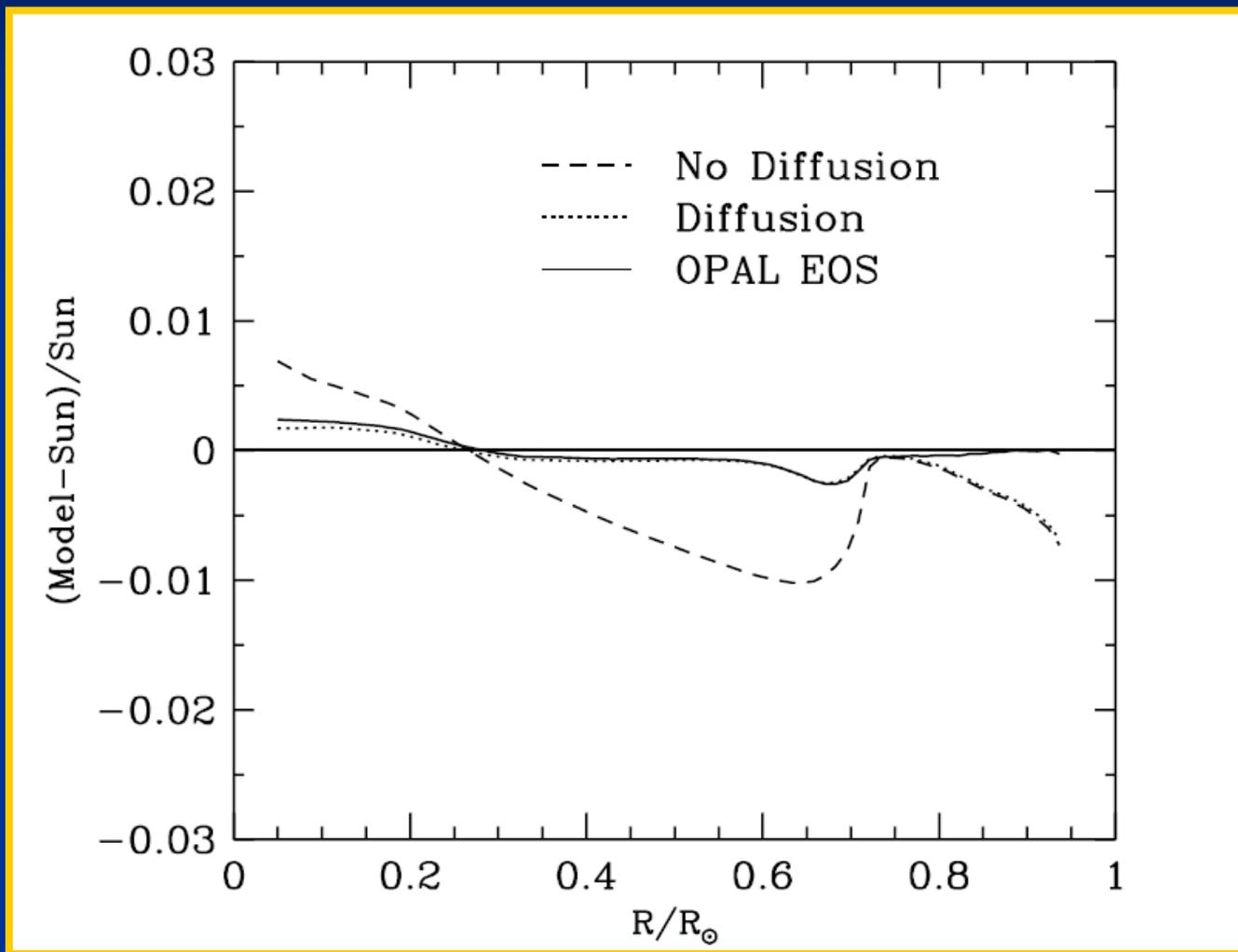
Есть ли связь потока нейтрино с солнечной активностью ?



Проверка по критерию  $\chi^2$  : гипотеза о постоянстве потока на уровне 65.4 SNU дает  $\chi^2/\text{DOF} = 12.0/17$ , что соответствует вероятности 80%

# Стандартная модель Солнца

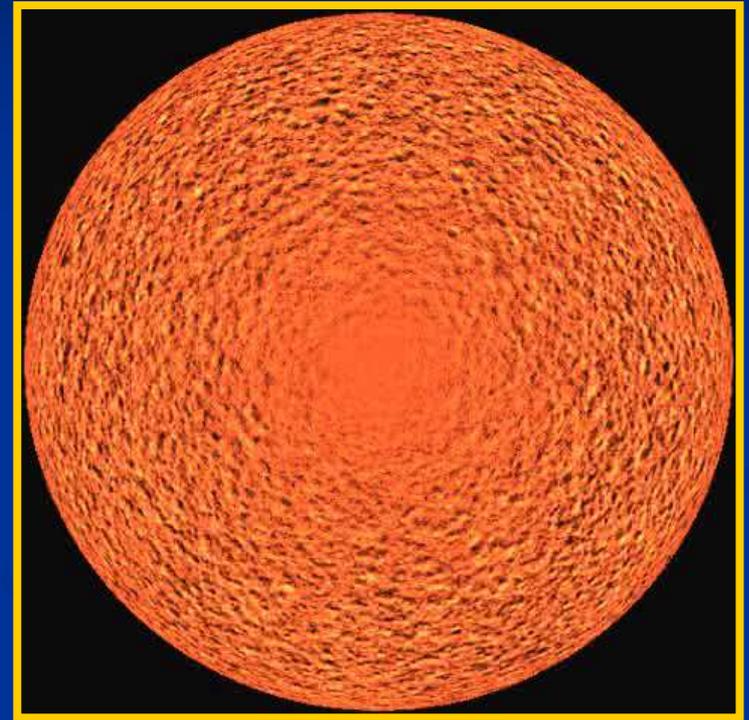
Различия в радиальной зависимости скорости звука



# Гелиосейсмология

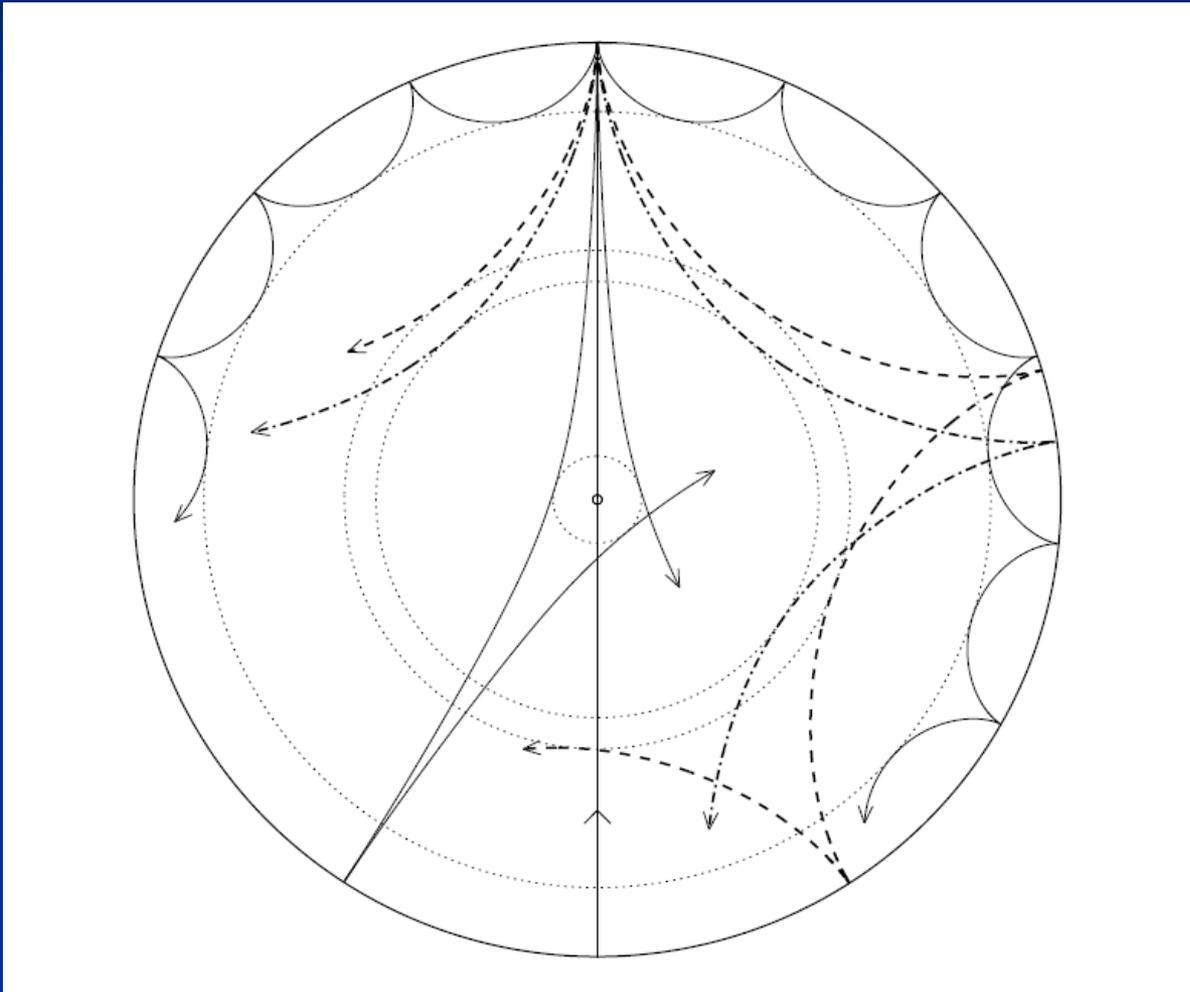
## Типы волн, возбуждаемых в атмосфере и недрах Солнца

- $p$ -моды – акустические (их дискретный спектр – следствие наличия отражающих границ); пятиминутные колебания – нераспространяющаяся (evanescent) мода
- $f$ -мода – поверхностная гравитационная («фундаментальная»,  $n = 0$ )
- $g$ -моды – внутренние гравитационные (в устойчиво стратифицированной лучистой зоне)



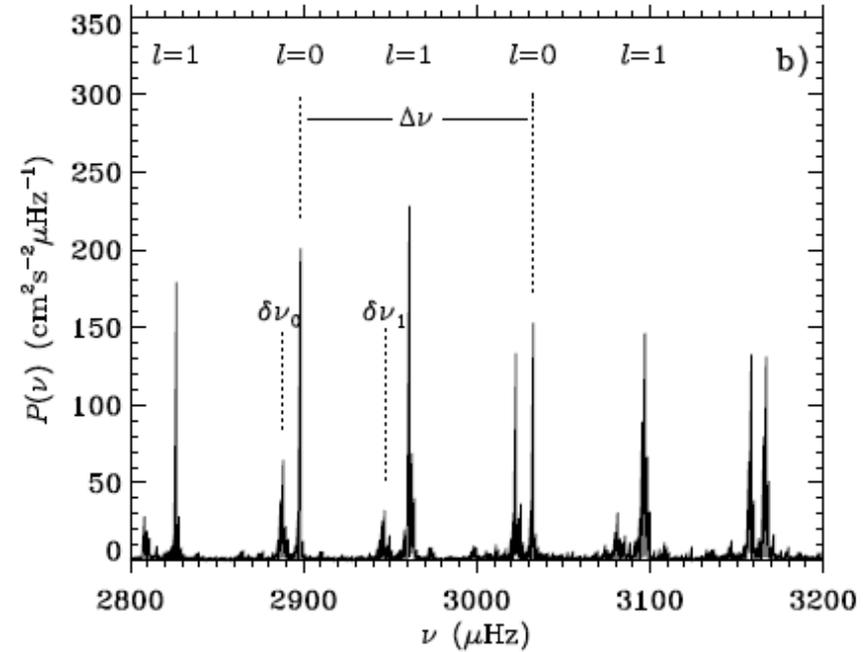
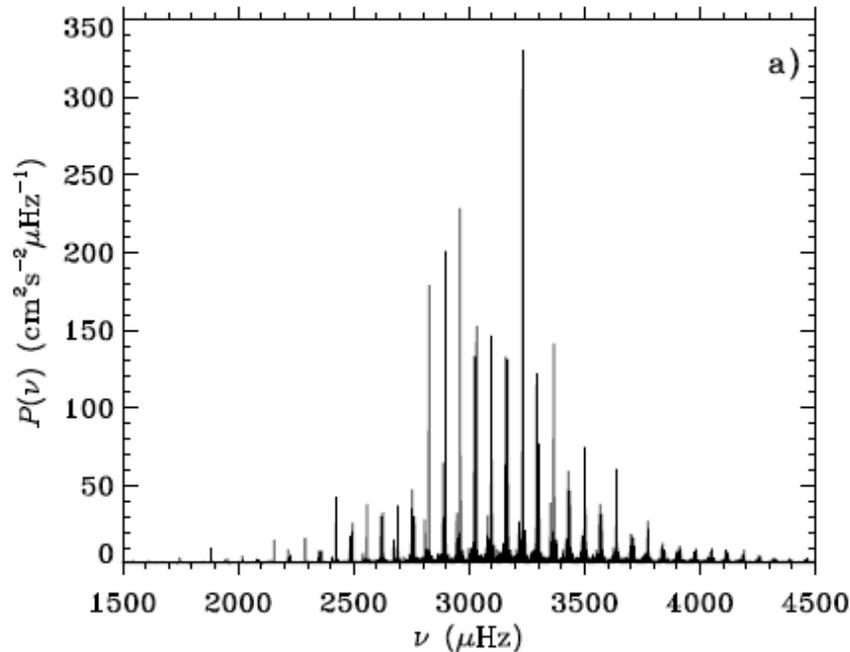
# Гелиосейсмология

Распространение акустических волн (р-мод) в недрах Солнца



# Гелиосейсмология

## Наблюдаемый спектр колебаний



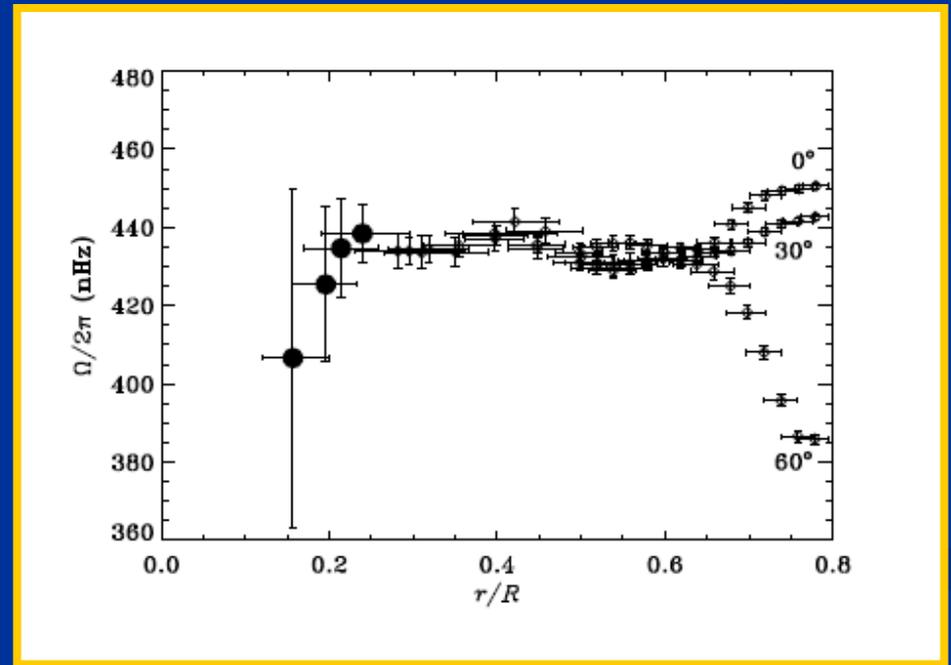
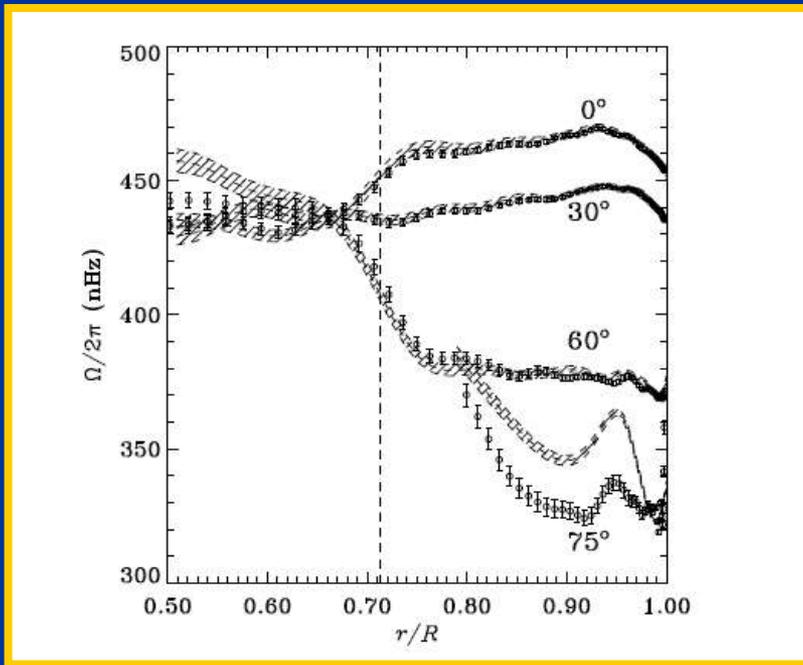
### Свойства колебаний в поверхностных слоях

- Максимальные амплитуды – в диапазоне периодов 3–8 мин
- Амплитуда 5-мин колебаний 0.5–1 км/с
- 5-мин колебания – нераспространяющаяся (evanescent) мода

# Гелиосейсмология

## Вращательное расщепление

- Картина сферических гармоник переносится вращением:
- Наблюдаемые частоты мод, бегущих в направлении вращения, увеличиваются, а частоты мод, бегущих в противоположном направлении, уменьшаются

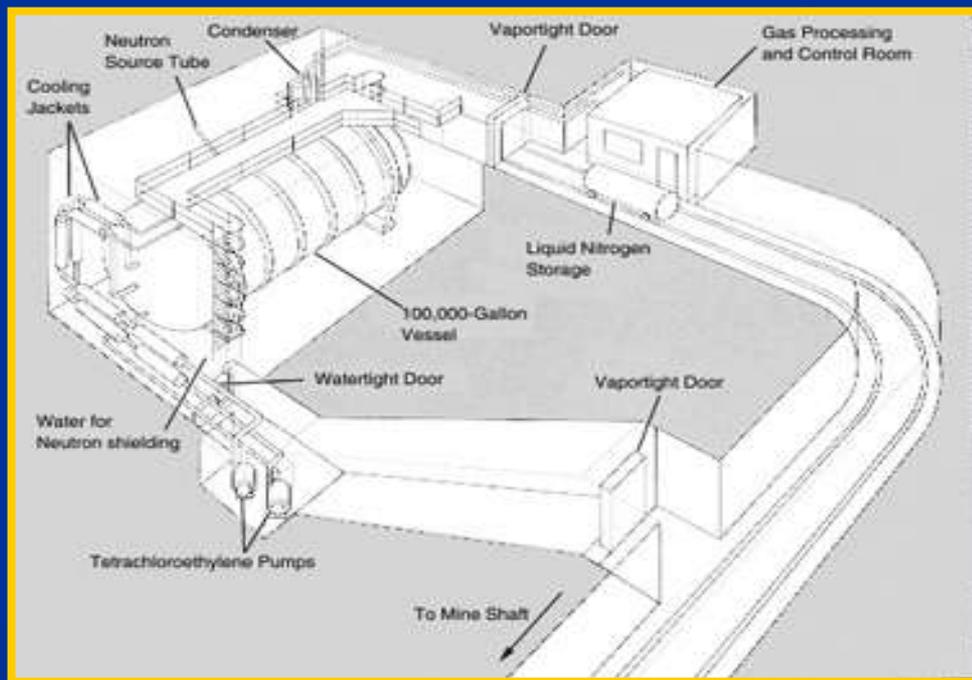


# Солнечные нейтрино

Homestake : Cl–Ar эксперимент. R. Davis, J. Bahcall (1964)



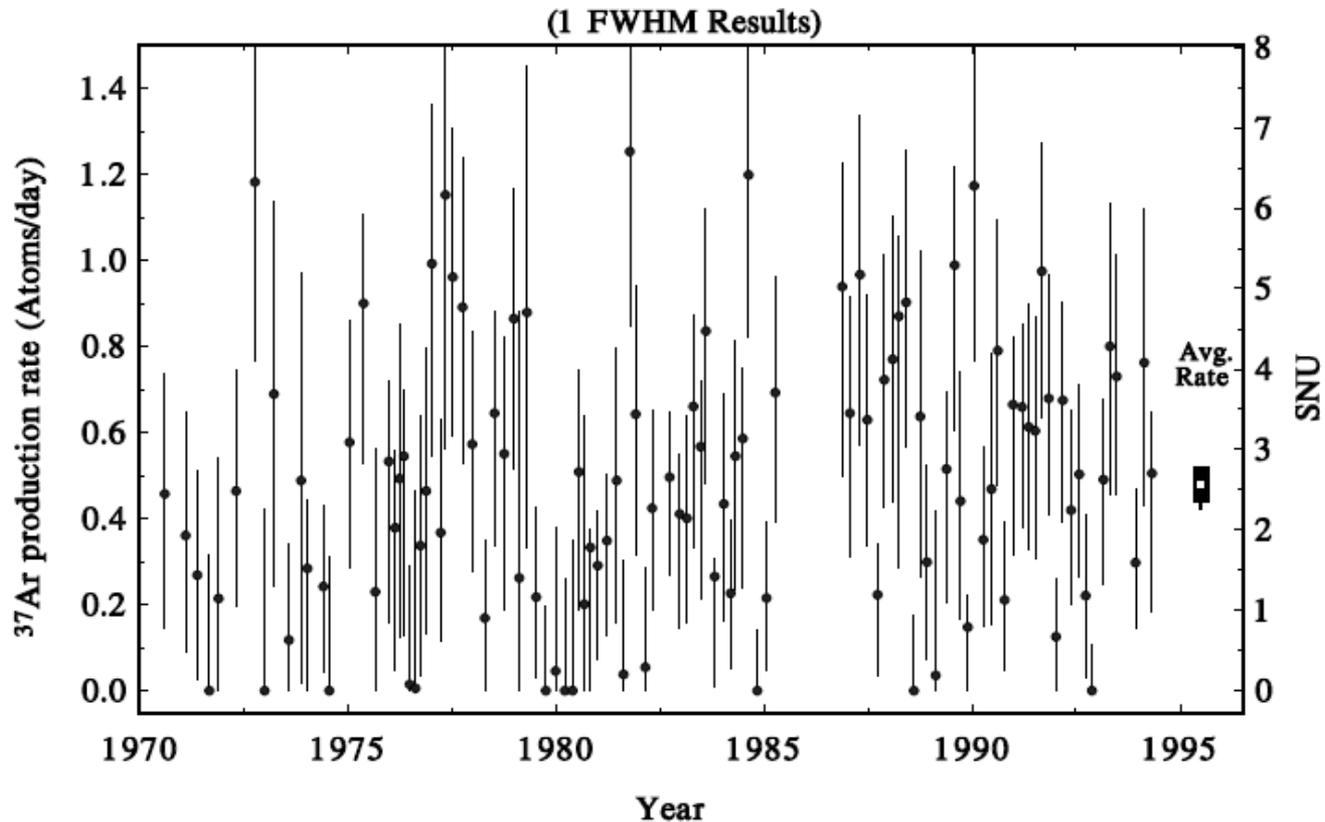
- 100 000 галлонов тетрахлорэтилена ( $C_2Cl_4$ )
- $^{37}_{17}Cl + \nu_e \rightarrow ^{37}_{18}Ar + e^-$
- Накопление аргона  $\rightarrow$  продувка гелием  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  фиксация аргона в криогенной ловушке
- Период полураспада  $^{37}Ar \approx 35$  дней





# Солнечные нейтрино

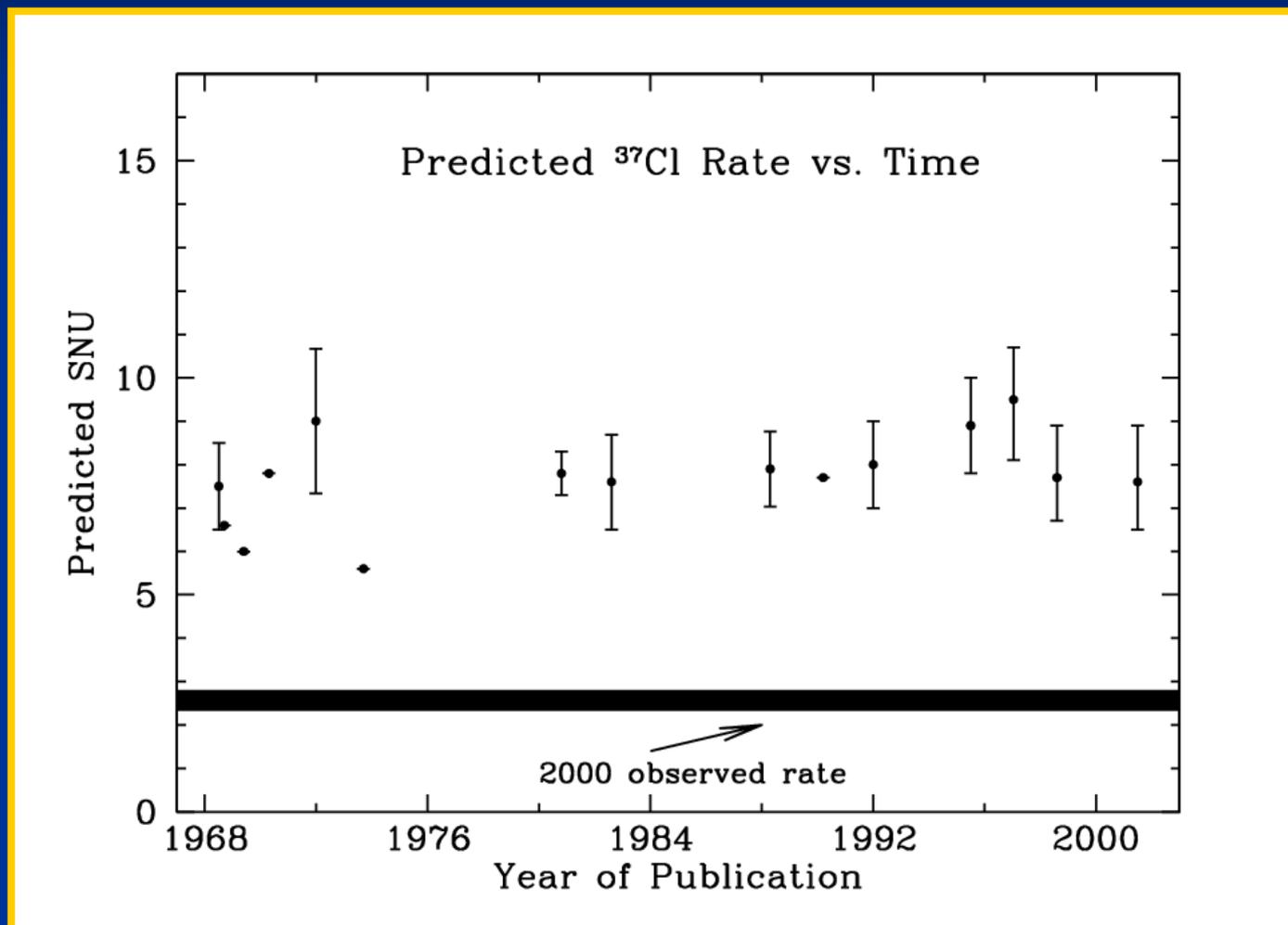
Homestake : Результаты наблюдений до 1995 года



1 SNU =  $10^{-36}$   
захватов в  
секунду на 1 атом  
мишени.

# Солнечные нейтрино

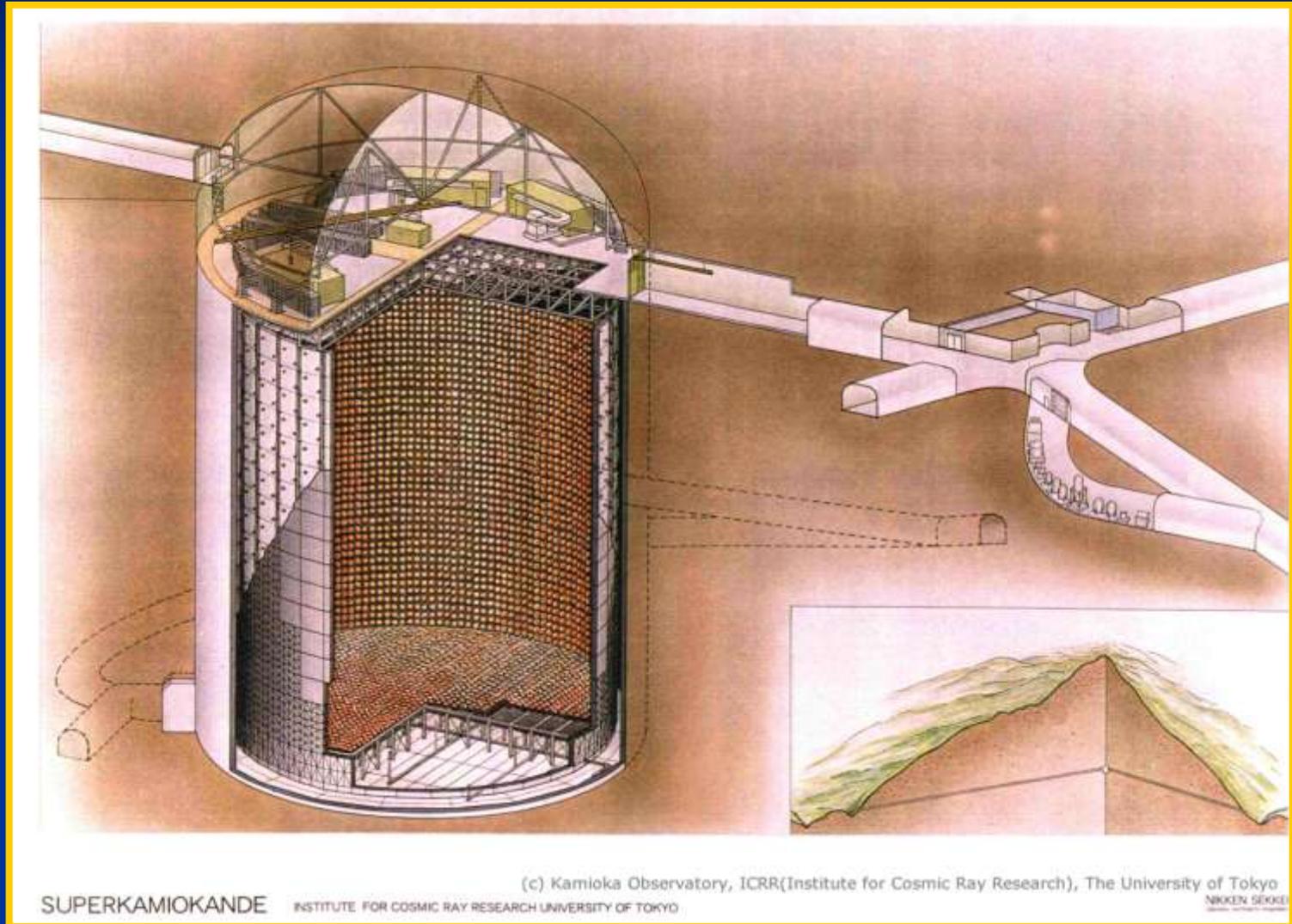
Homestake : Прогнозы и результат за все годы наблюдений



1 SNU =  $10^{-36}$   
захватов в  
секунду на 1 атом  
мишени.

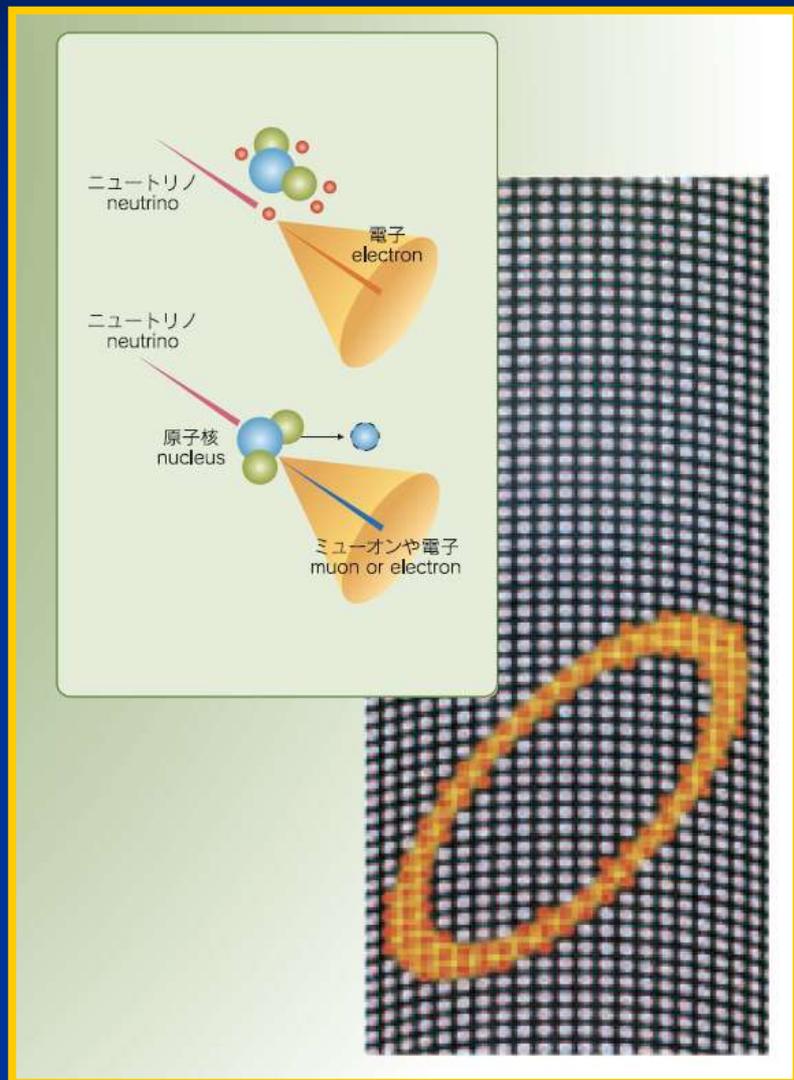
# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SuperKamiokande-I.



# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SuperKamioKande-I (1996).



Masatoshi  
Koshiwa

Реакция упругого рассеяния на электронах:

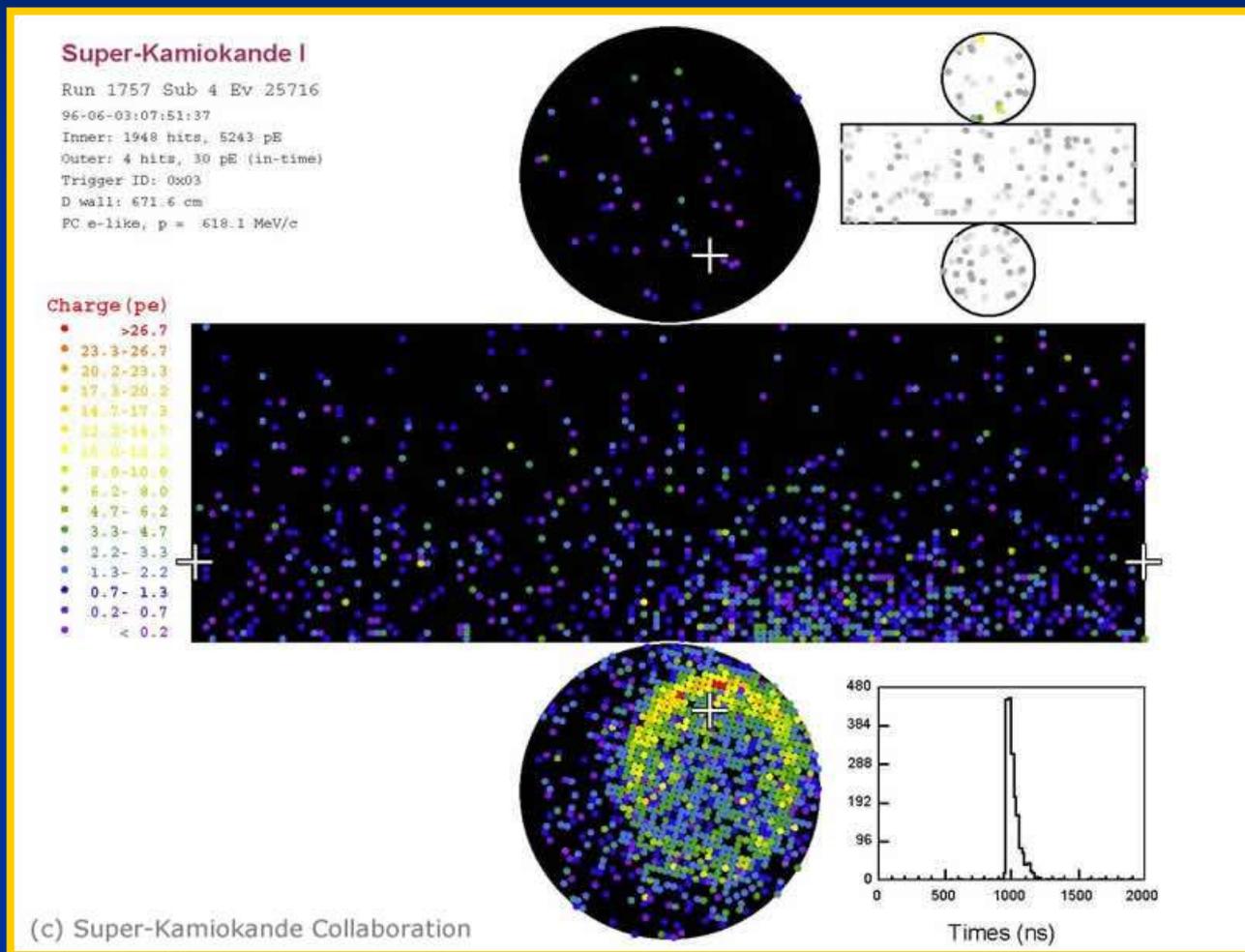


Детектор черенковского излучения:

- Диаметр бака – 39.3 м, высота – 41.4 м
- 50 000 т сверхчистой воды
- 11 129 + 1 885 фотоумножителей

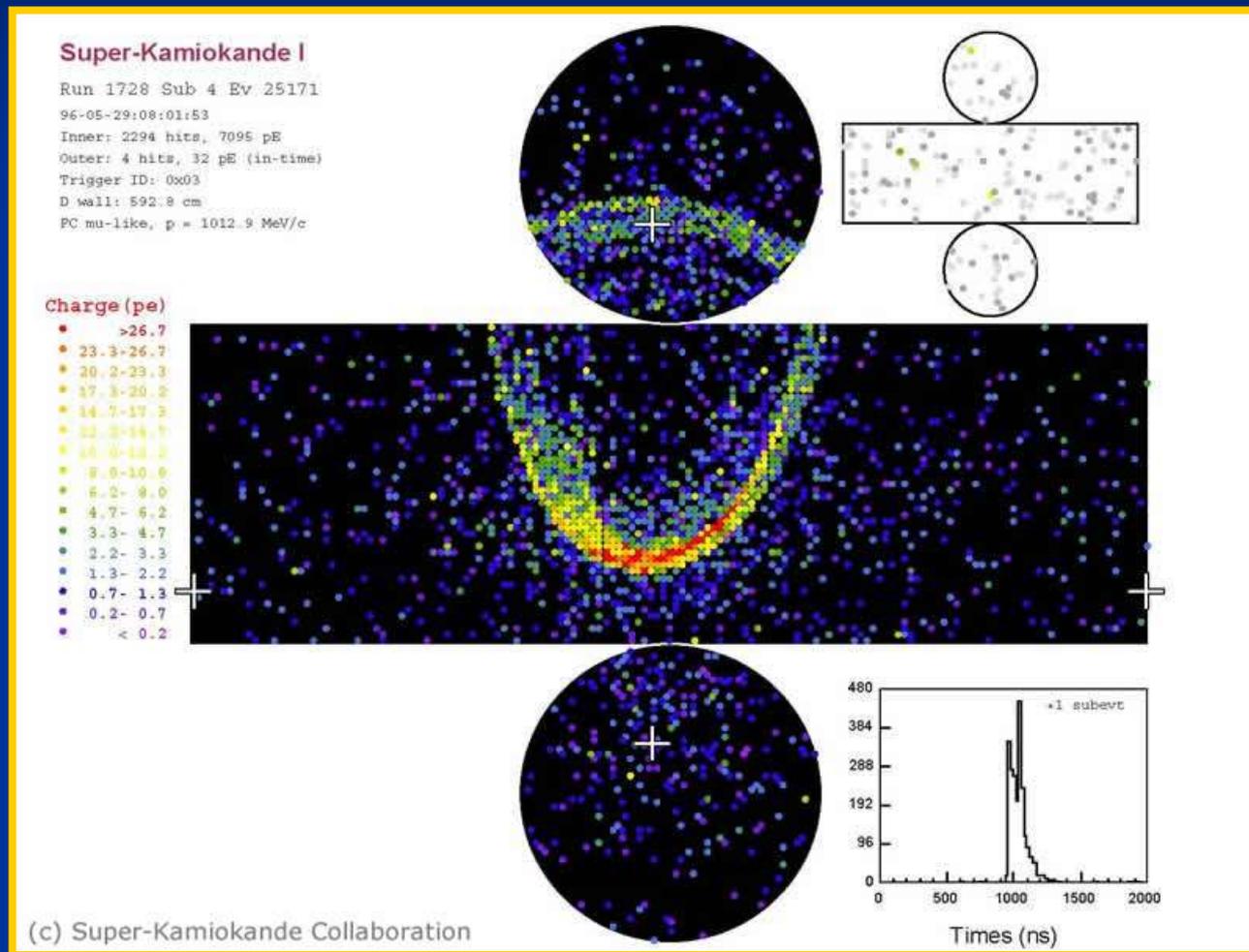
# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SuperKamiokande-I (1996).



# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SuperKamiokande-I (1996).



Мюонное нейтрино

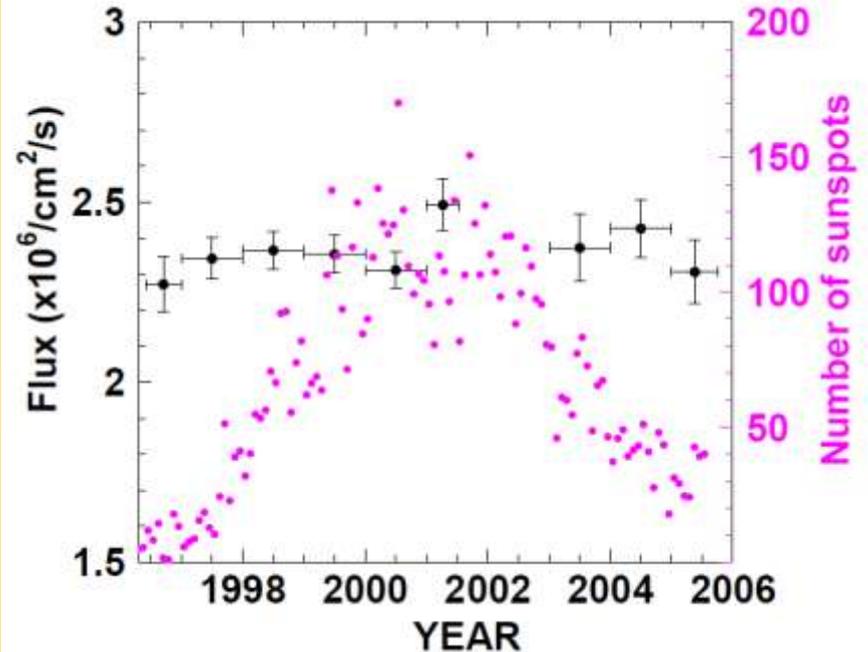
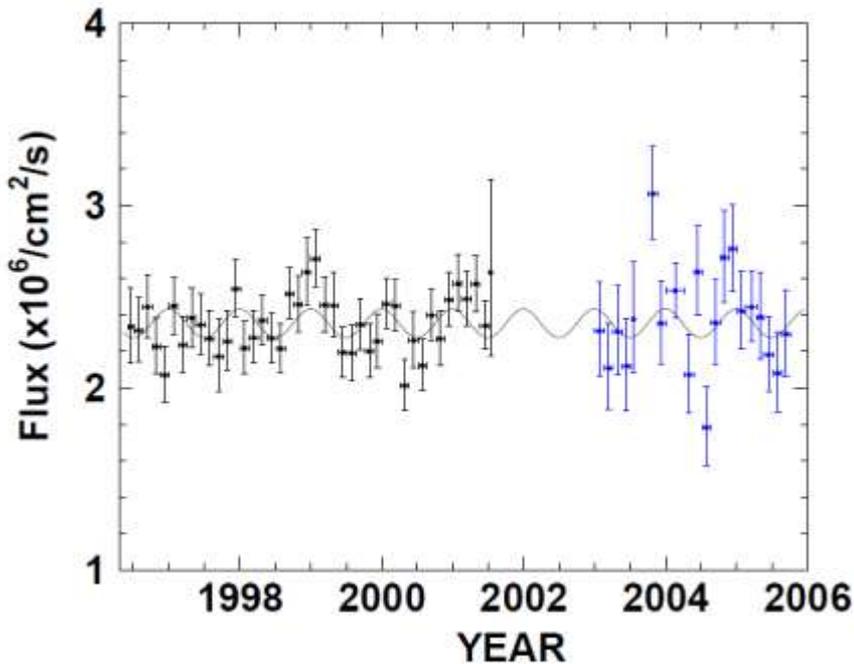
# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SuperKamiokande-I (1996).

Не обнаружено зависимости потока от фазы солнечного цикла

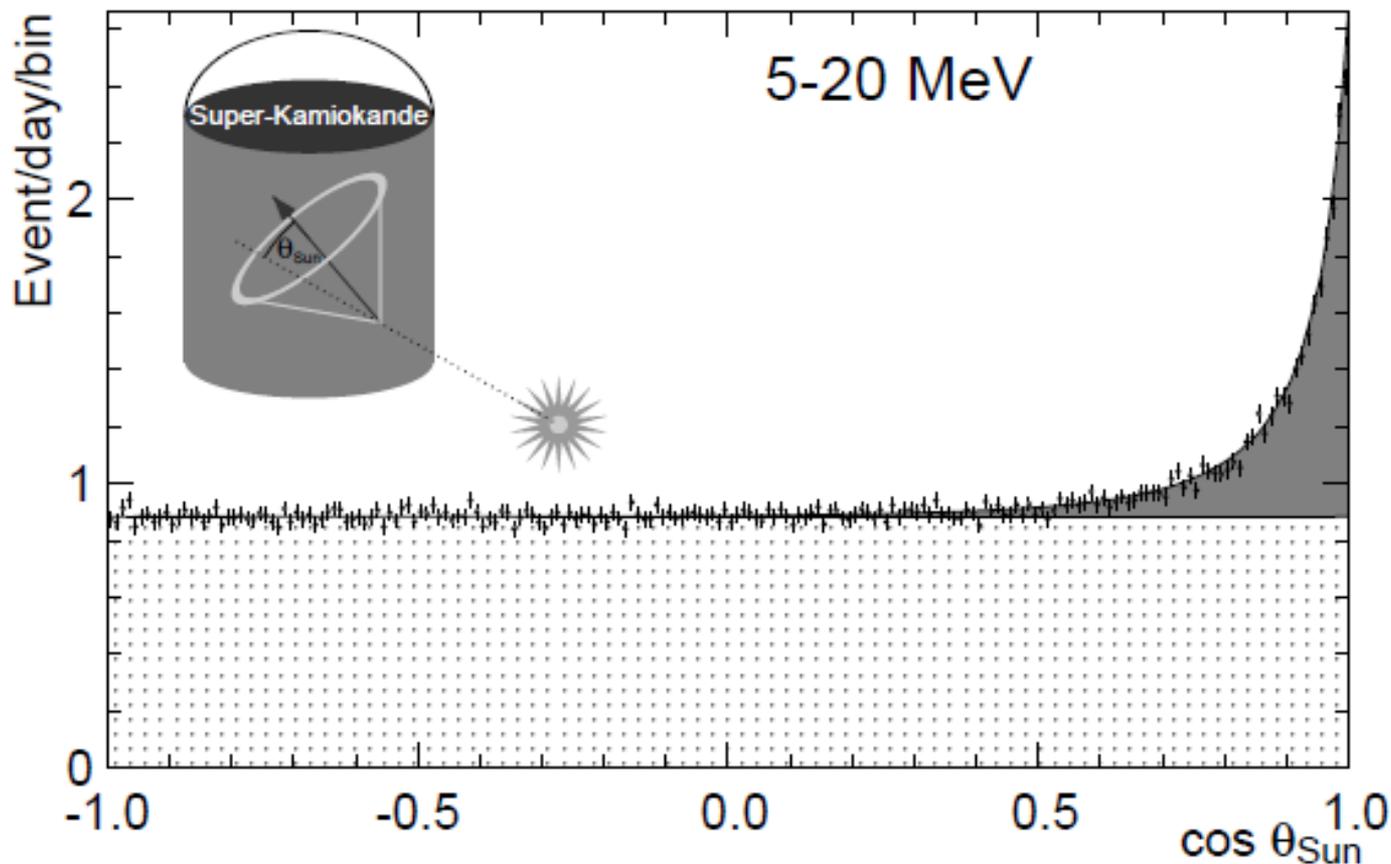
Измеренный поток :  $2.35 \pm 0.02$  (stat.)  $\pm 0.08$  (sys.)  $\times 10^6$  /cm<sup>2</sup>/sec

SSM : поток <sup>8</sup>B-нейтрино:  $5.79 \times 10^6$  /cm<sup>2</sup>/sec (BP2004)



# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SuperKamiokande-I (1996).



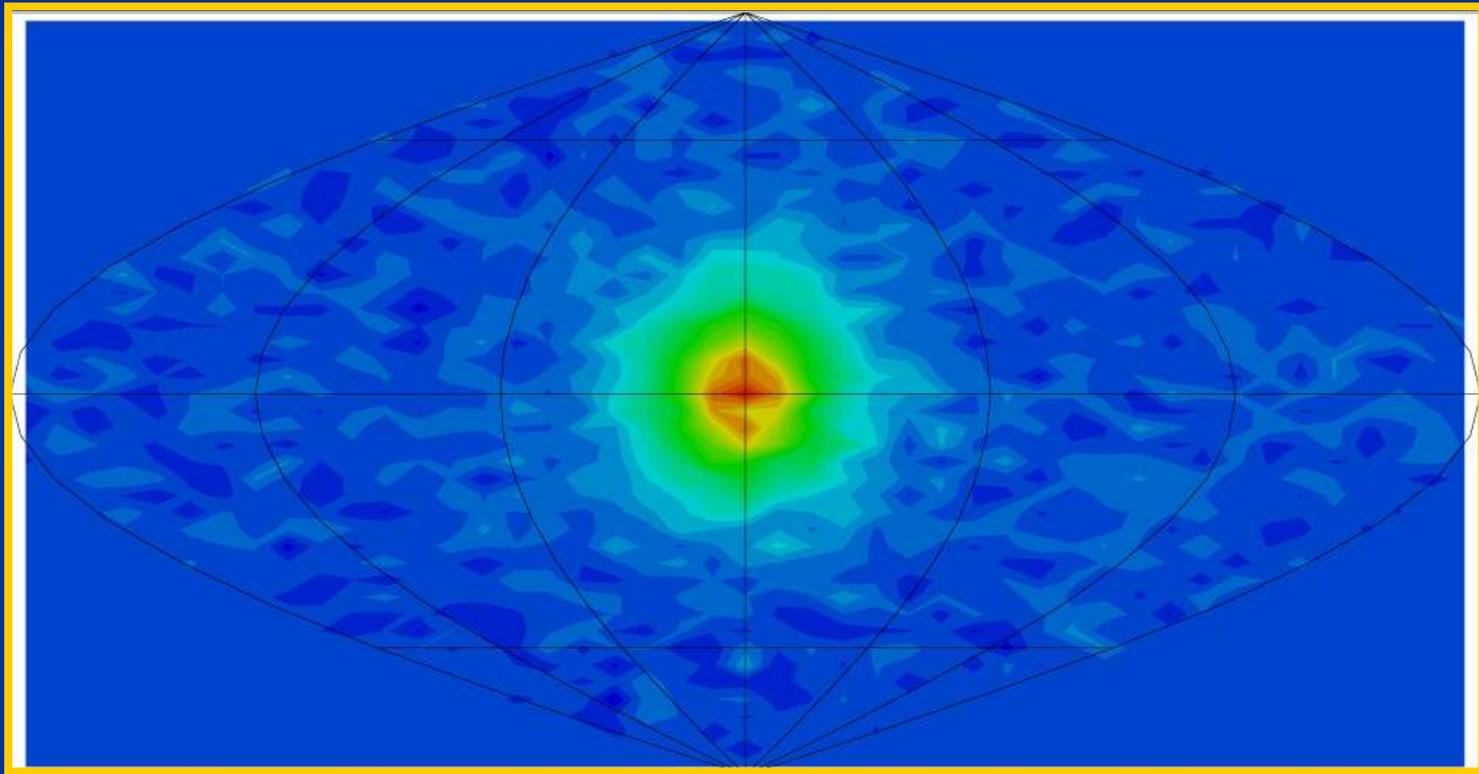
1496 дней SK-I

Все кандидаты  
от 5 до 20 МэВ

# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SuperKamiokande-I (1996).

Нейтринное “изображение” Солнца



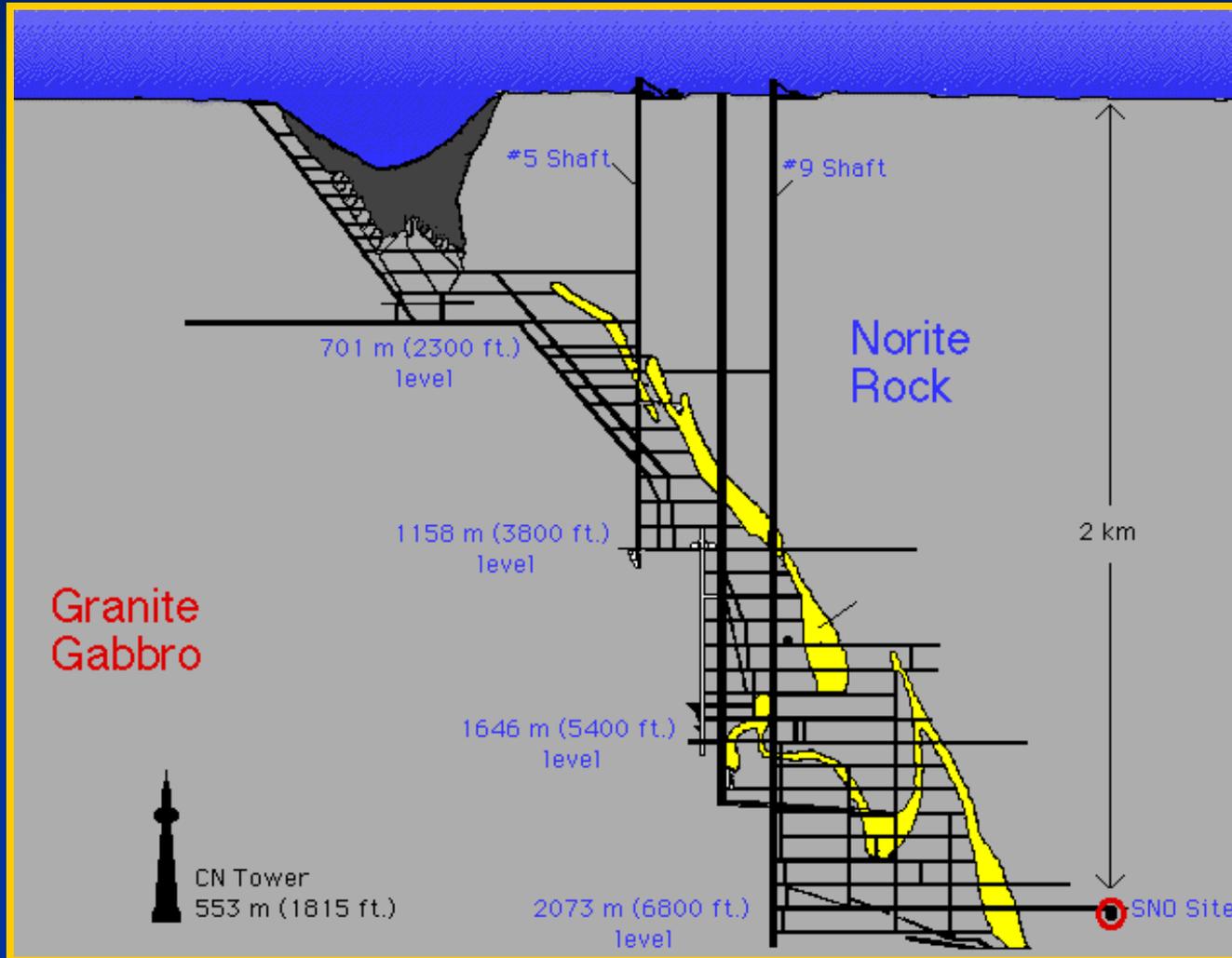
# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SNO (1999).



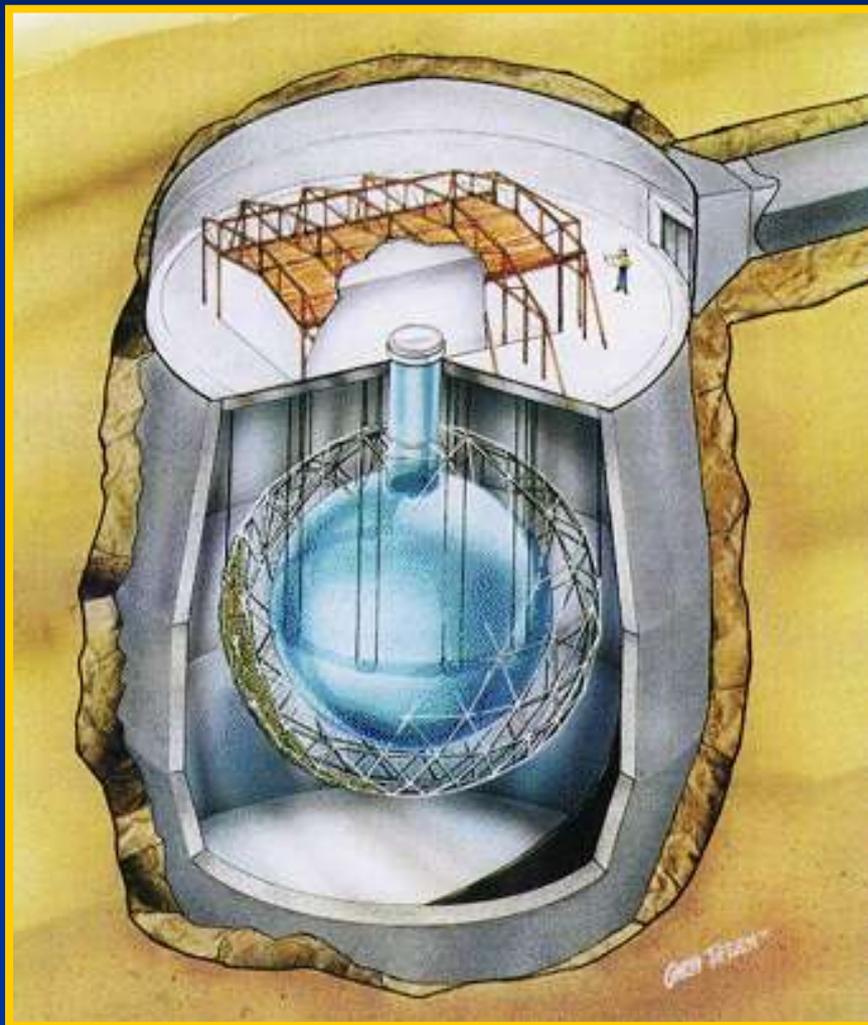
# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SNO (1999).



# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SNO (1999).



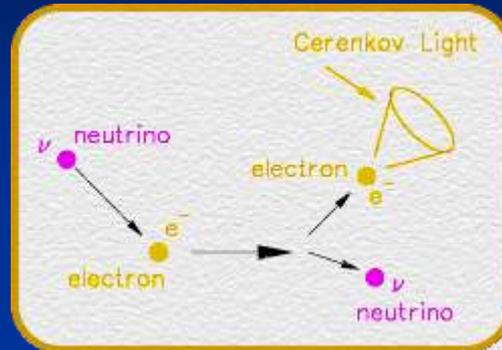
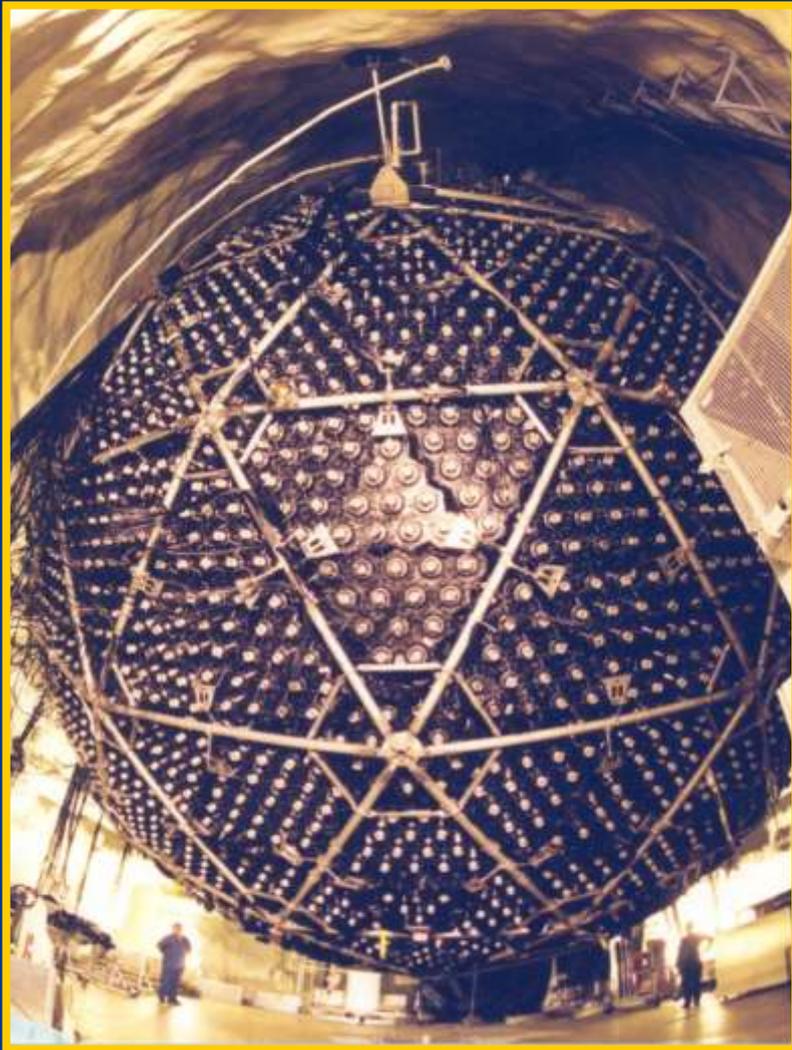
## Детектор :

- 1 000 тонн  $D_2O$  в сфере  $\varnothing$  12 м;
- Сфера погружена в обычную воду с целью разгрузки и для защиты от мюонов;
- 9 456 фотоумножителей на геодезической сфере  $\varnothing$  17 м.

**Полость :**  $\varnothing$  22 м X 34 м

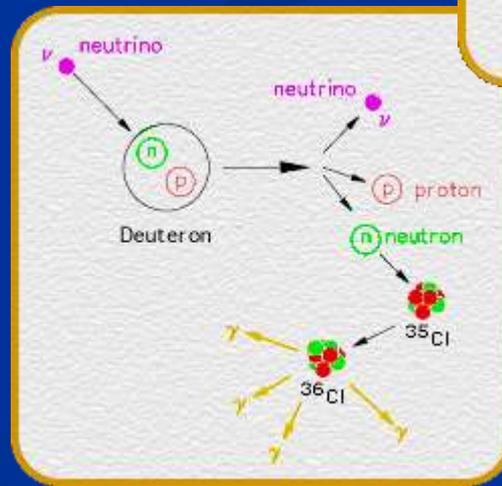
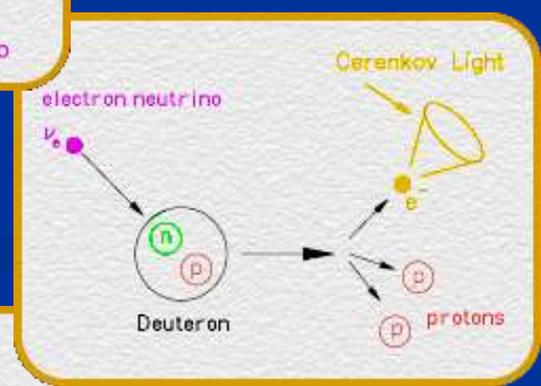
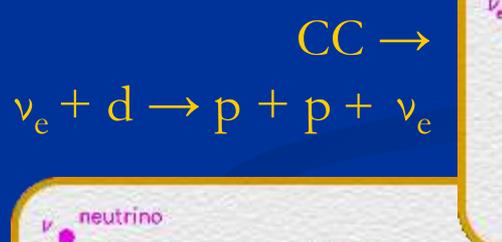
# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SNO (1999).



← ES

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$$



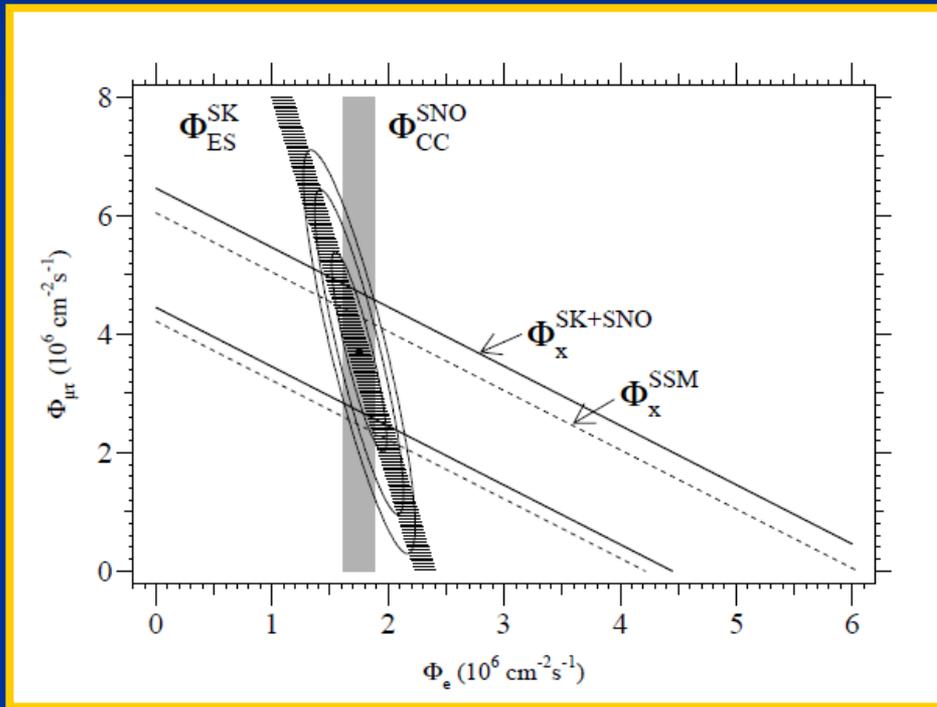
← NC

$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$$

# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SNO (1999).

Полный поток нейтрино всех типов совпадает с предсказаниями SSM !



“The total flux of active  $^8\text{B}$  neutrinos is determined to be:

$$\varphi(\nu_x) = 5.44 \pm 0.99 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

This result ... is in excellent agreement with predictions of standard solar models.”

SSM : поток  $^8\text{B}$ -нейтрино:

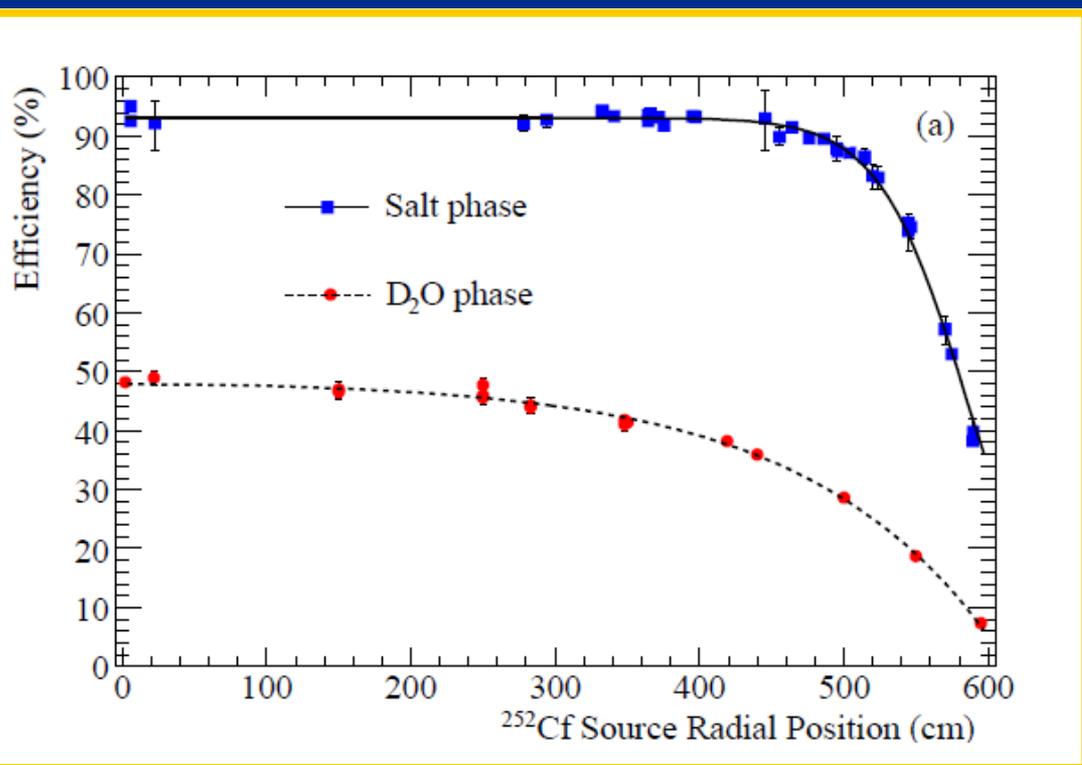
$$5.79 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ (BP2004)}$$

$$5.05 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ (BP00)}$$

# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SNO (1999).

Улучшена эффективность регистрации нейтронов за счет добавки 2 т  $\text{Na}^{35}\text{Cl}$



В единицах  $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  :

$$\varphi(\nu_x) = 5.21 \pm 0.27(\text{stat.}) \pm 0.38(\text{syst.})$$

SSM :

$$5.79 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ (BP2004)}$$

$$5.05 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ (BP00)}$$

# Солнечные нейтрино

## Основные этапы экспериментов по регистрации СН

- **1968:** Ray Davis начинает пионерский радиохимический эксперимент с хлором и обнаруживает, что измеренное значение потока солнечных нейтрино составляет только  $1/3$  от предсказанного.

*Идея нейтринных осцилляций тогда уже существовала: Pontecorvo (1958), Maki, Nakagawa, and Sakata (1962), Pontecorvo and Gribov (1969); но трудности эксперимента и неопределенности в модели Солнца позволяли предполагать, что либо эксперимент, либо модель Солнца, либо они оба содержат ошибки.*

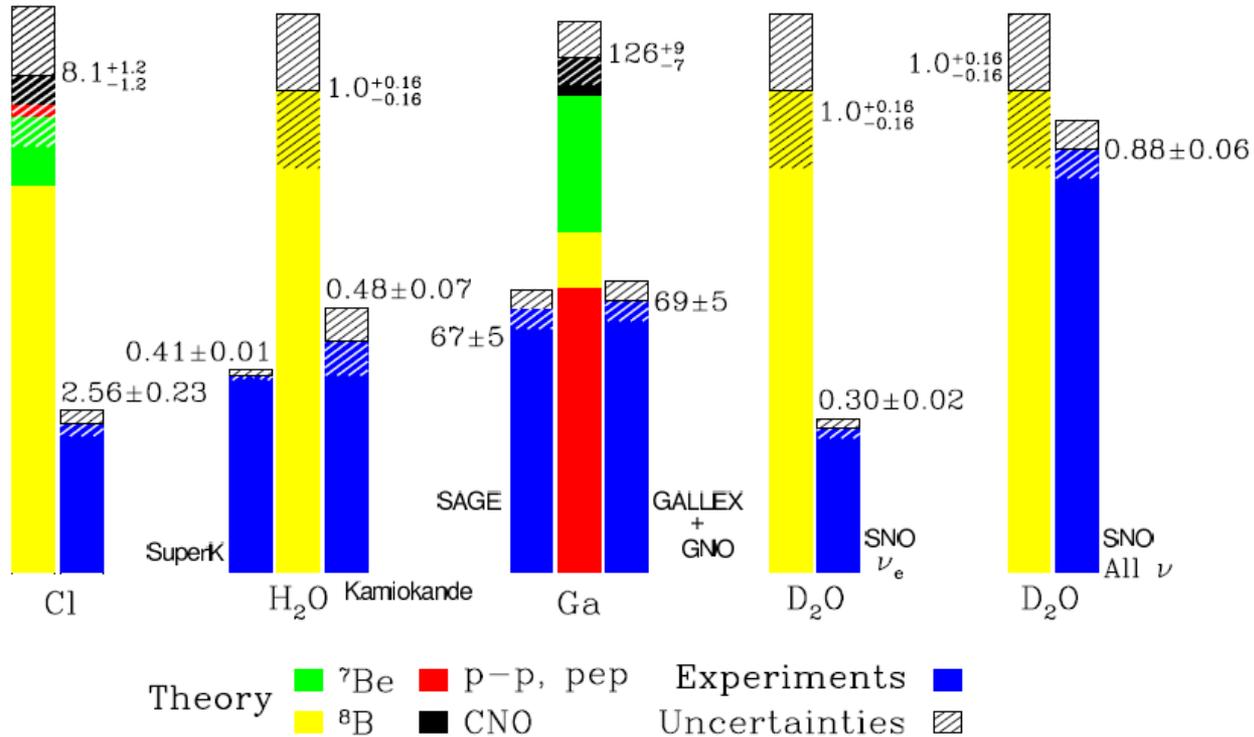
- **После 1968:** Ray Davis улучшает свой эксперимент, а John Bahcall улучшает теорию, никаких ошибок не обнаружено.
- **1990-е:** Радиохимические эксперименты Sage и Gallex подтверждают дефицит солнечных нейтрино.
- **1988-1990:** Kamiokande и IMB обнаруживают намеки на дефицит атмосферных нейтрино.
- **1998:** Super-Kamiokande публикует доказательства осцилляций атмосферных нейтрино.
- **2001:** Решение проблемы солнечных нейтрино: по измерениям SNO полный поток  $\nu_x$ , т.е.  $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ , согласуется со стандартной моделью Солнца. Т.о. детектор SNO, чувствительный ко всем трем типам нейтрино, демонстрирует осцилляции нейтрино.

*Lauren Hsu (Fermi National Accelerator Laboratory), Fermilab Wine & Cheese Seminar October 5, 2007*

# Солнечные нейтрино

## Результаты наблюдений для различных экспериментов

Total Rates: Standard Model vs. Experiment  
Bahcall-Serenelli 2005 [BS05(OP)]



# Солнечные нейтрино

“Прямое” детектирование. Эксперимент SuperKamioKande-I (1996).

Если эти (SNO) высокоточные измерения полного потока солнечных  ${}^8\text{B}$  - нейтрино верны ( а нет оснований считать иначе ), то какие из этого могут быть сделаны выводы о деталях внутреннего строения Солнца?

## Один эффектный пример:

Поток борных нейтрино очень сильно зависит от температуры:

$$\varphi( {}^8\text{B} ) \sim T^{25} !!!$$

Это дает возможность оценить температуру в центре Солнца с точностью до 1% ! :

$$T_{\text{sun}} = 15.7 \times 10^6 \pm 1\% \text{ ( Fiorentini, Ricci, 2001 ).}$$

**Нужны дальнейшие шаги**, в частности, точные измерения потоков солнечных нейтрино малых энергий – BOREXINO (Grand Sasso), SNO+ (Sudbury)

Спасибо за внимание!