



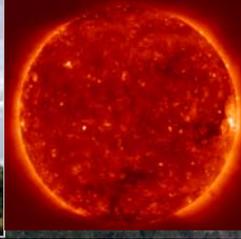
Фифак МГУ
24 ноября 2010 г.

С тех пор как Паули в 1933 г. постулировал существование нейтрино, оно остается одной из наиболее интересных частиц ядерной физики

Дж.Аллен. 1957 г.

СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

(физика Солнца и физика нейтрино)



1. Немного истории

2. Завершенные и выполняемые в настоящее время солнечные нейтринные эксперименты: последние результаты и планы

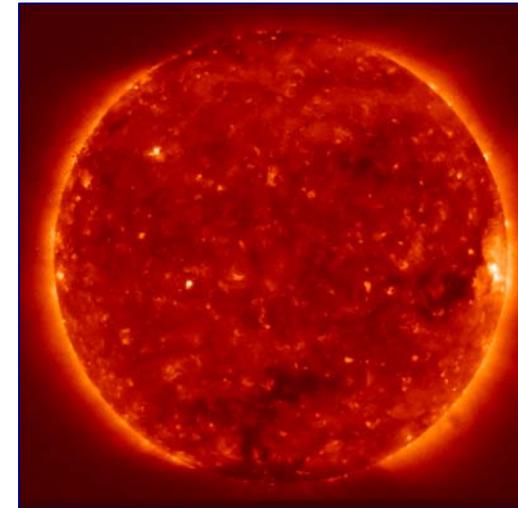
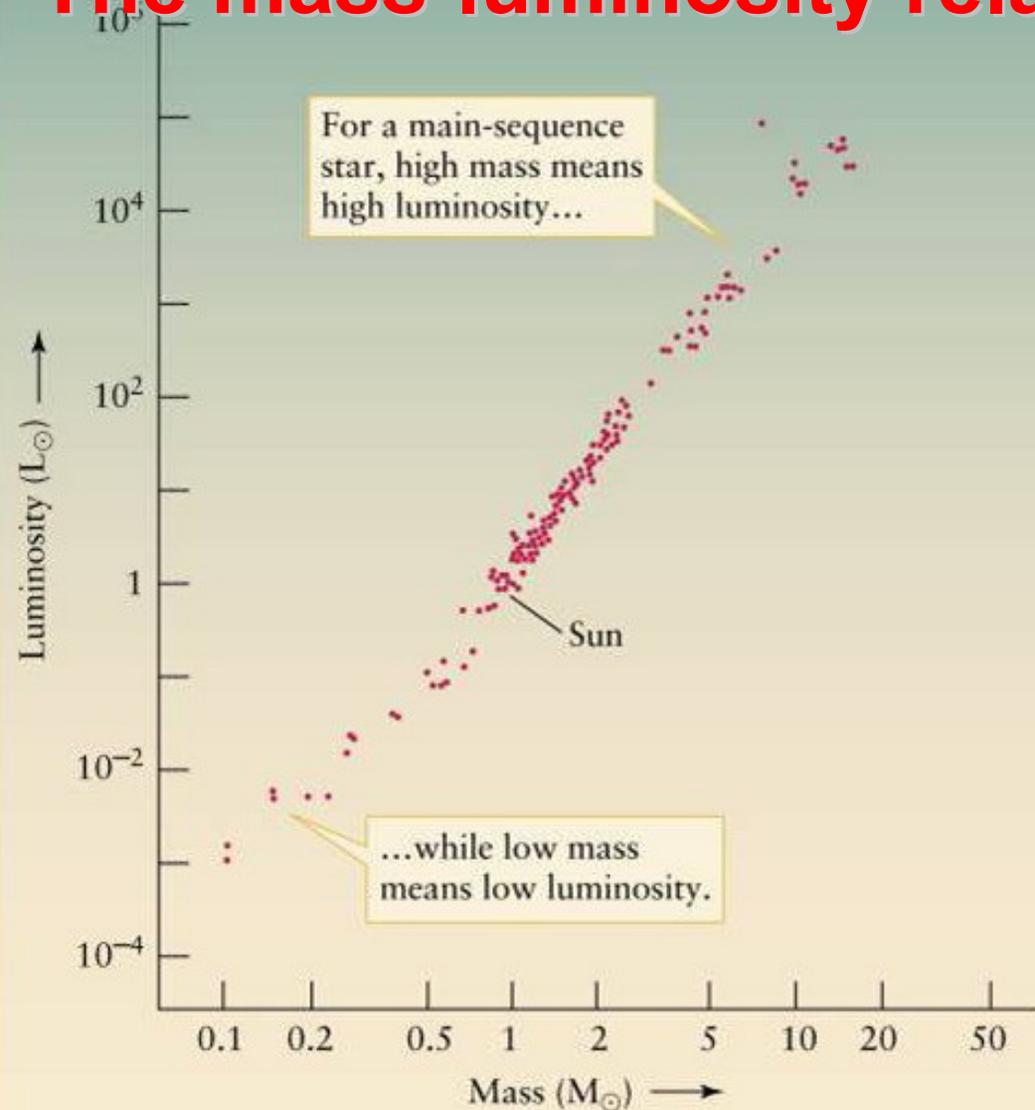
3. Будущие проекты



Основные этапы

- 1919** Sir **Arthur Eddington** впервые высказал идею, что Солнце генерирует энергию в своих недрах в результате реакций ядерного синтеза.
- 1924** Стандартная модель **А.Эддингтона** (равновесие звезды – баланс между силами гравитации и силами газового и лучевого давления)
- 1928** **Г.А. Гамов** – туннельный эффект
- 1930** **В. Паули** постулировал существование нейтральной частицы малой массы как “выход из сложившейся ситуации” (“*a desperate way out*”).
- 1934** **Э. Ферми** назвал частицу Паули “нейтрино”. Представление о нейтрино в теории β -распада, которую годом позже развил Ферми, оказалось настолько плодотворным, что нейтрино уверенно было внесено в число элементарных частиц задолго до того, как оно было открыто.
- 1939** **Г. Бете** дал описание двух термоядерных механизмов генерации энергии в звёздах Главной последовательности, необходимой для их наблюдаемой светимости (pp-цепочка, CNO-цикл)

The mass-luminosity relationship for stars



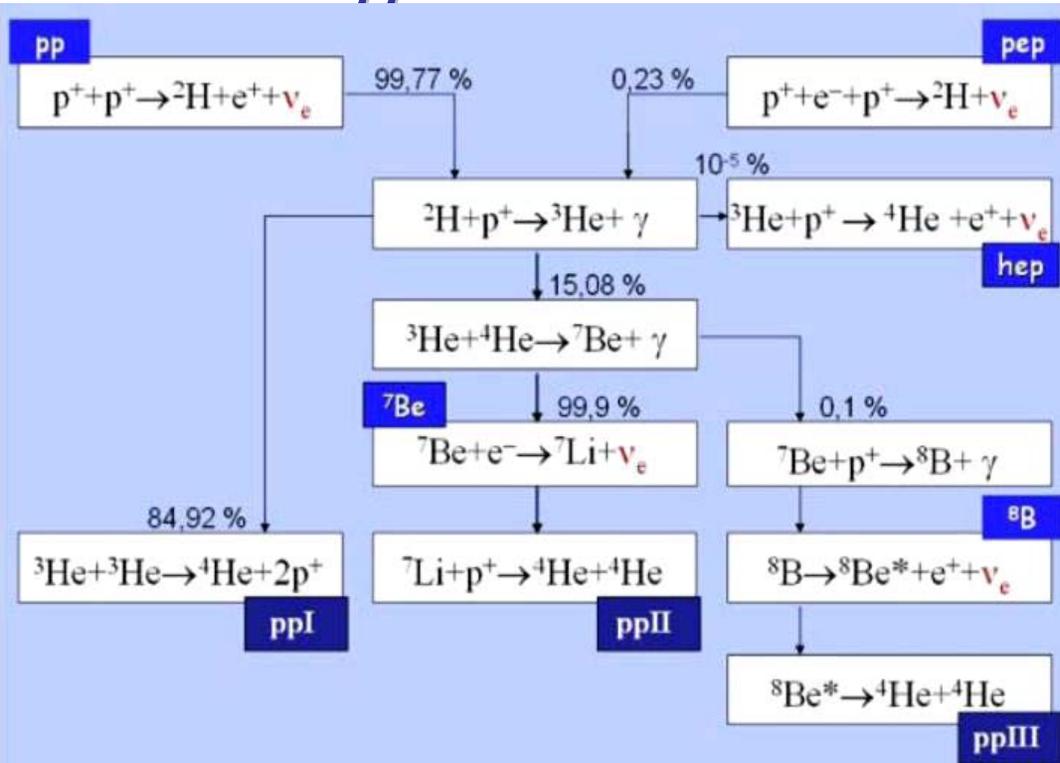
Солнце – звезда Главной последовательности, находящееся на стадии стабильного горения водорода



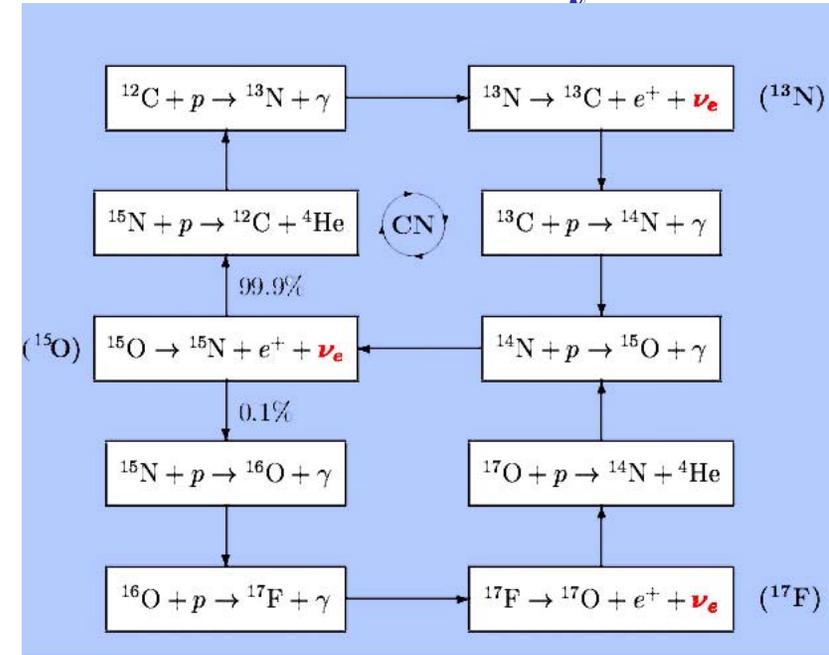
Neutrino production in the Sun

There are different steps in which energy (and neutrinos) are produced

The *pp* chain reaction



The CNO cycle



<1% in CNO cycle

>99% of the energy is created in *pp* chain reaction



Паули: *“I have invented something that cannot be detected”*

(Очевидно, что он недооценил изобретательность экспериментаторов.)

1946 **Б.М.Понтекорво** показал, что “observation of neutrinos is not out of question” и предложил для детектирования нейтрино использовать “inverse beta process”:



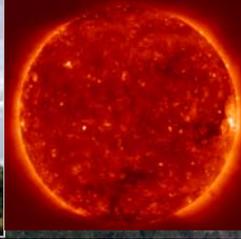
Он предложил в качестве источников ν Солнце и реактор. (“The neutrinos emitted by the sun, however, are not very energetic”). Среди возможных мишеней ^{37}Cl рассматривался как наиболее многообещающий:



Понтекорво предложил использовать миниатюрный низкофонный счетчик высокого усиления.

Эти две его идеи стали основой всех радиохимических экспериментов. В точности они будут осуществлены Р. Девисом.

1956 **Ф. Райнес** и **К. Коуэн** регистрируют ν от Savannah River реактора $p(\nu, e^+)n$.



1960's * **Рэй Девис** строит Хлорный детектор для измерения скорости образования в реакции $^{37}\text{Cl}(\nu, e^-)^{37}\text{Ar}$

* **Джон Бакалл** создает ССМ и на основе модели вычисляет потоки ν “...to see into the interior of a star and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in stars...”

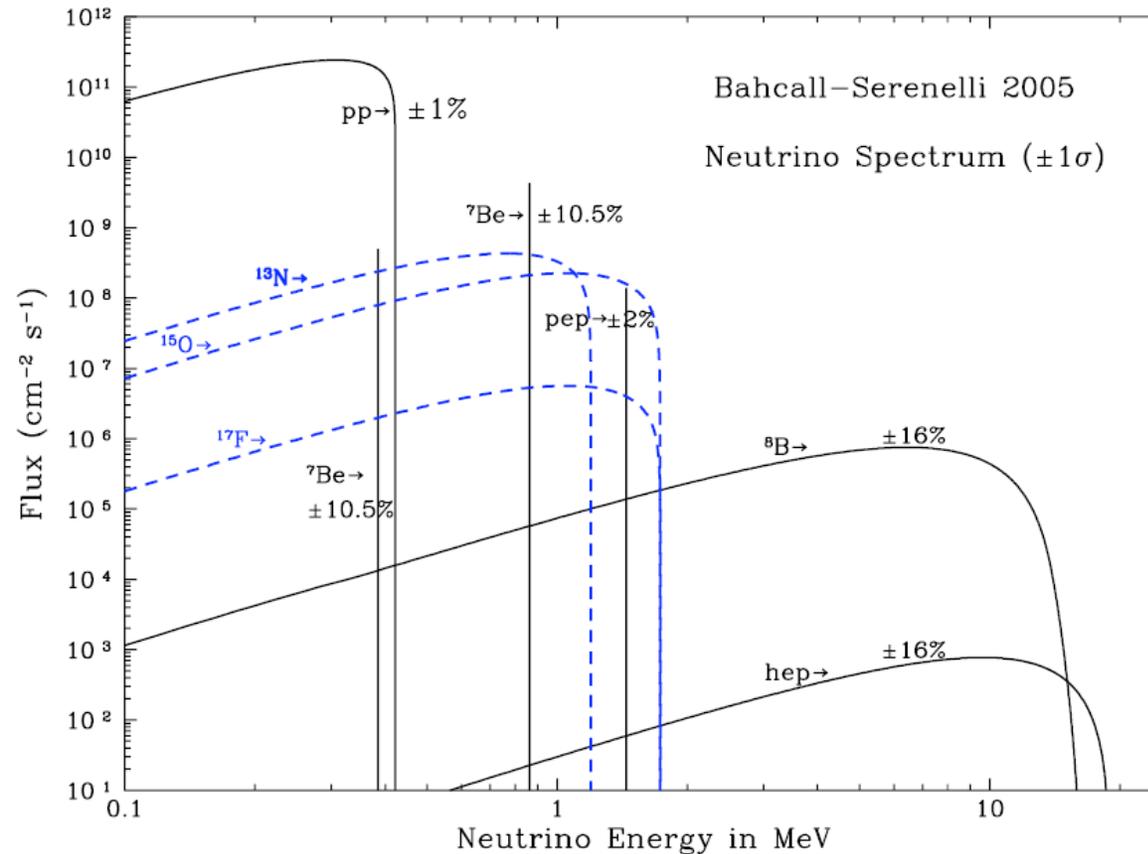
* начато строительство **Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН**

* **В.А.Кузьмин** предложил использовать реакцию $^{71}\text{Ga}(\nu, e^-)^{71}\text{Ge}$ для детектора солнечных ν и искусственный ^{51}Cr источник нейтрино для его калибровки.



Neutrino production in the Sun

Neutrino energy spectrum as predicted by
the Solar Standard Model (SSM)



John Norris Bahcall
(Dec. 30, 1934 – Aug. 17, 2005)

⁷Be: 384 keV (10%)
862 keV (90%)
Pep: 1.44 MeV

Время прохождения
из центра до поверхности:

Тепловая энергия –
~ 10 млн. лет

Фотоны –
~ 10 тыс. лет

Энергетический
ПОТОК

Нейтрино –
8 минут
до Земли

$6 \cdot 10^{10} \text{ (см}^2 \cdot \text{сек)}^{-1}$

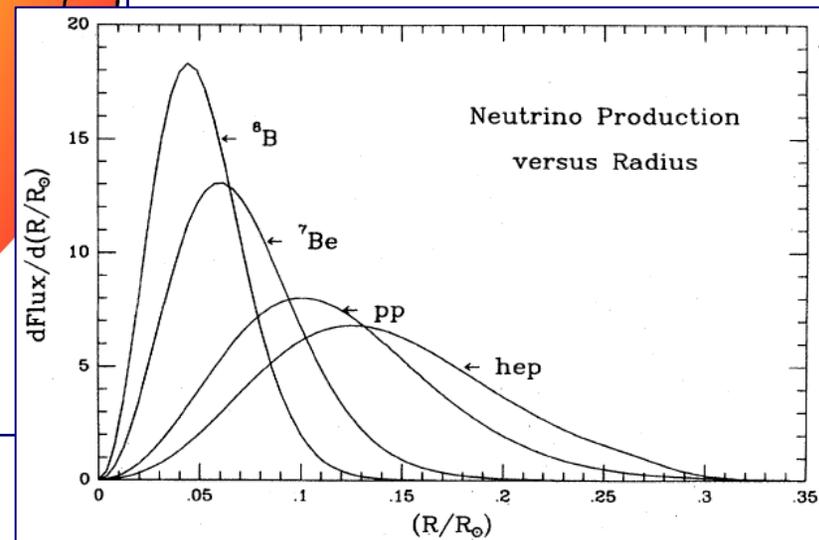


$$R_{\odot} = 7 \cdot 10^8 \text{ м}$$

$$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ г/см}^3$$

Плотность ядра ($1/4 R_{\odot}$)

$$\rho = 20-158 \text{ г/см}^3$$





Homestake Gold Mine (Lead, South Dakota, USA)

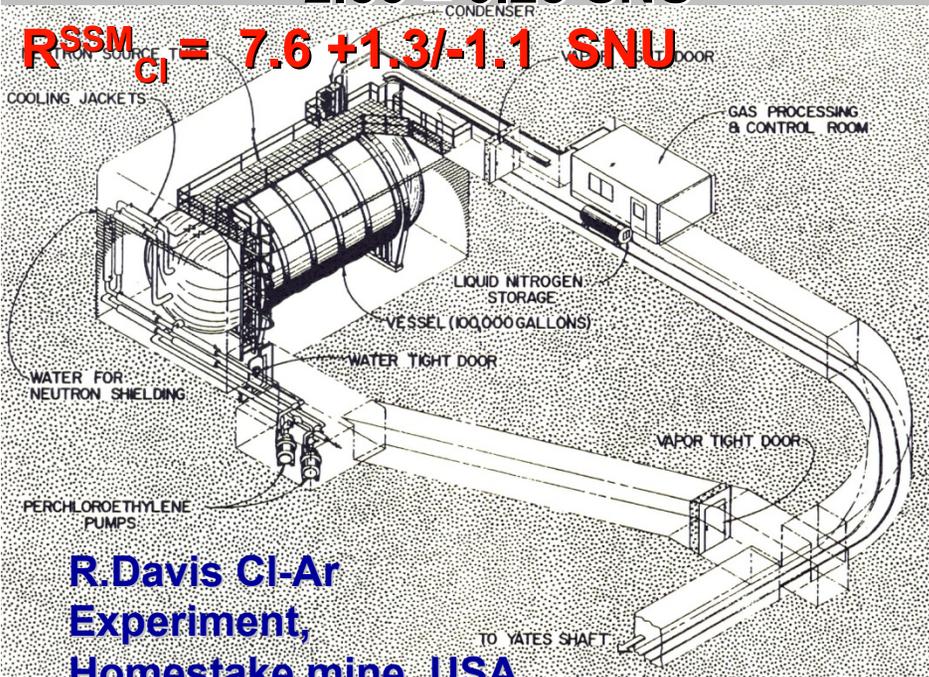
1478 m deep, 4200 m.w.e. $\Rightarrow \Phi_\mu \sim 4\text{m}^{-2}\text{day}^{-1}$
 steel tank, 6.1 m diameter, 14.6 m long
 (6×10^5 liters) 615 tons of tetrachlorethylene

(C_2Cl_4),
 2.16×10^{30} atoms of ${}^{37}\text{Cl}$ (133 tons)

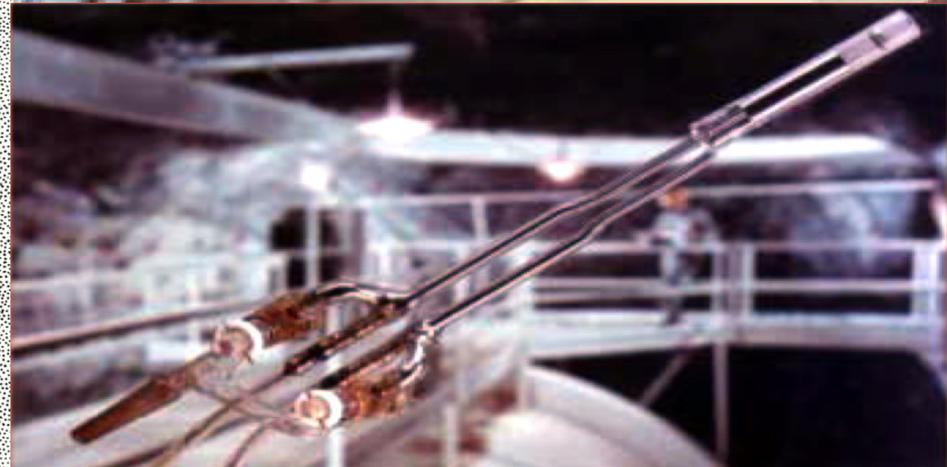
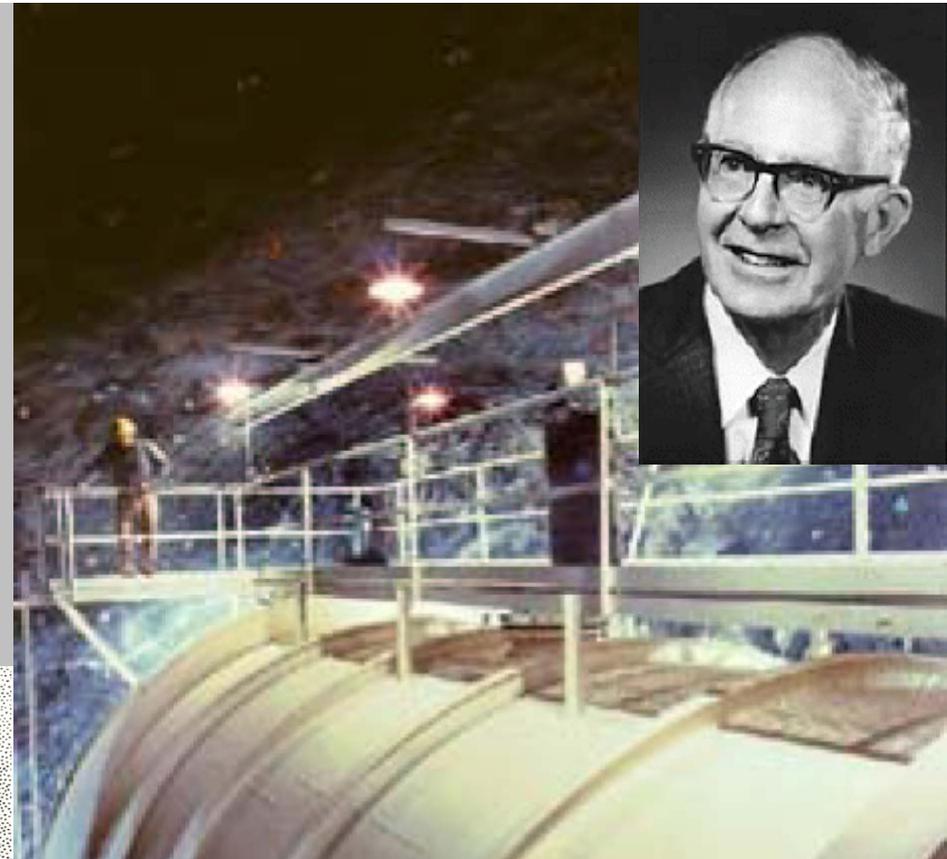
$E_{\text{th}}^{\text{Cl}} = 0.814\text{ MeV} \Rightarrow {}^8\text{B}, {}^7\text{Be}, pep, hep$
 data taking: 1970-1994, 108 extractions

$R_{\text{Cl}}^{\text{exp}} = 2.56 \pm 0.16 \pm 0.16\text{ SNU} =$
 $= 2.56 \pm 0.23\text{ SNU}$

$R_{\text{Cl}}^{\text{RSM}} = 7.6 +1.3/-1.1\text{ SNU}$



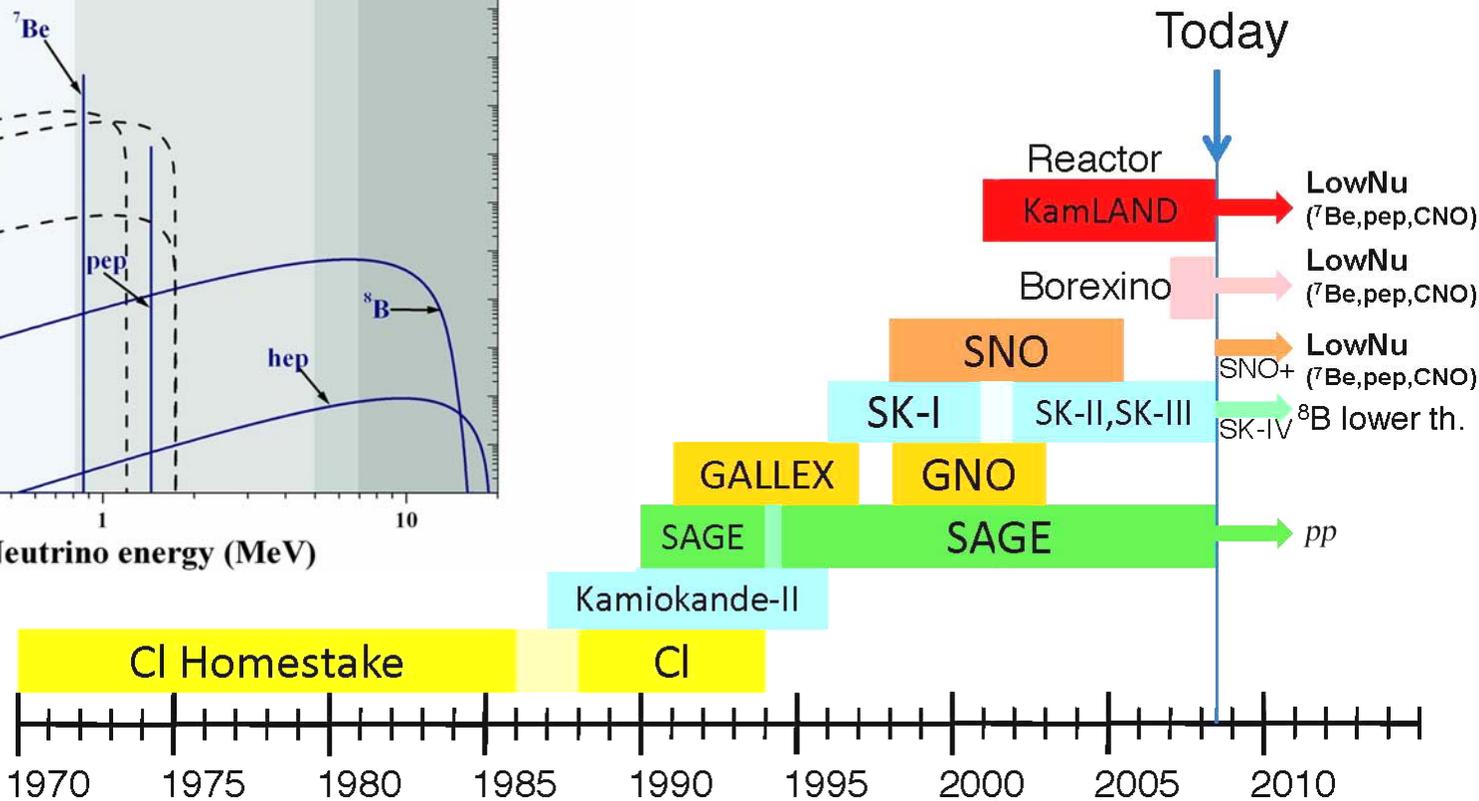
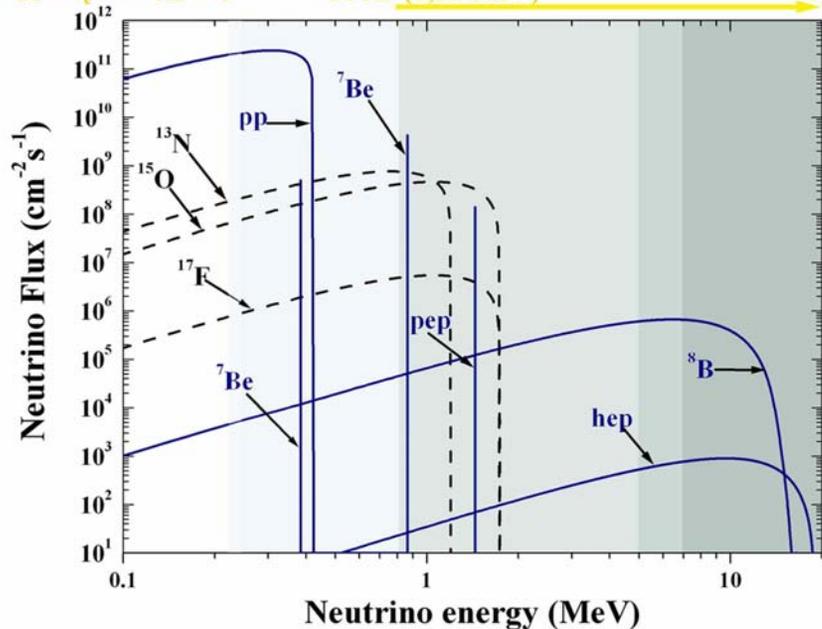
R.Davis Cl-Ar
 Experiment,
 Homestake mine, USA





40 years of solar neutrino mystery

ν_e	BOREXINO (0,25 MeV)	$0,63 \pm 0,19$
ν_e, CC, NC	SNO (5,0 MeV)	$0,90 \pm 0,08$
ν_e	SuperK (5,0 MeV)	$0,406 \pm 0,09$
${}^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$	Ga-Ge (0,23 MeV)	$0,50 \pm 0,05$
ν_e	Kamiokande II (7,0 MeV)	$0,48 \pm 0,08$
${}^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$	Cl-Ar (0,81 MeV)	$0,30 \pm 0,07$



Today

Reactor
 KamLAND → LowNu (${}^7\text{Be}, \text{pep}, \text{CNO}$)

Borexino → LowNu (${}^7\text{Be}, \text{pep}, \text{CNO}$)

SNO → LowNu (${}^7\text{Be}, \text{pep}, \text{CNO}$)

SK-IV → ${}^8\text{B}$ lower th.

SNO+ (${}^7\text{Be}, \text{pep}, \text{CNO}$)

pp

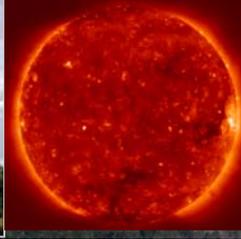
Температурная зависимость

$$\Phi(pp) \propto T^{-1.2}$$

$$\Phi(^7\text{Be}) \propto T^8$$

$$\Phi(^8\text{B}) \propto T^{18}$$

$$\Phi(^{13}\text{N}+^{15}\text{O}) \propto T^{14}$$



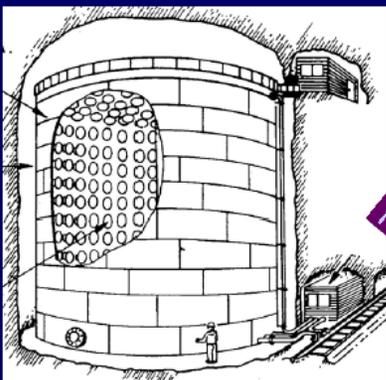
- 1984** Херб Чен предложил детектор солнечных нейтрино на основе тяжёлой воды
- 1985** С.П.Михеев и А.Ю.Смирнов развили теорию резонансных осцилляций.
«Мир» начал верить в нейтринные осцилляции
- 1990** SAGE показал значительное подавление скорости захвата нейтрино на Ga
- 1990** Началось сооружение SNO

From p decay to solar neutrino

1986 – 1995



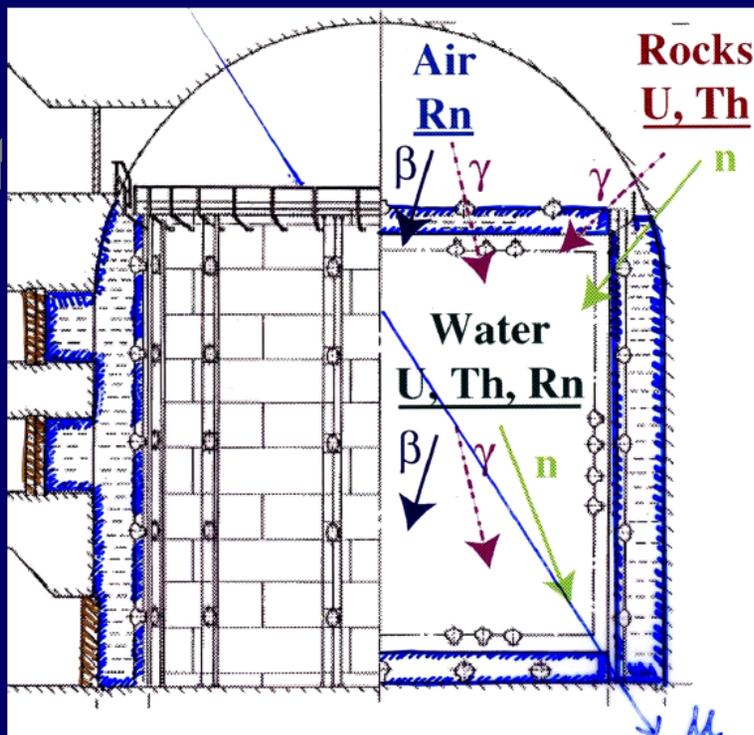
Kamiokande-I



upgrade :

- hermetic, live anticounter
- water purification system
- multi-hit time and charge measurements

Kamiokande-II Detector



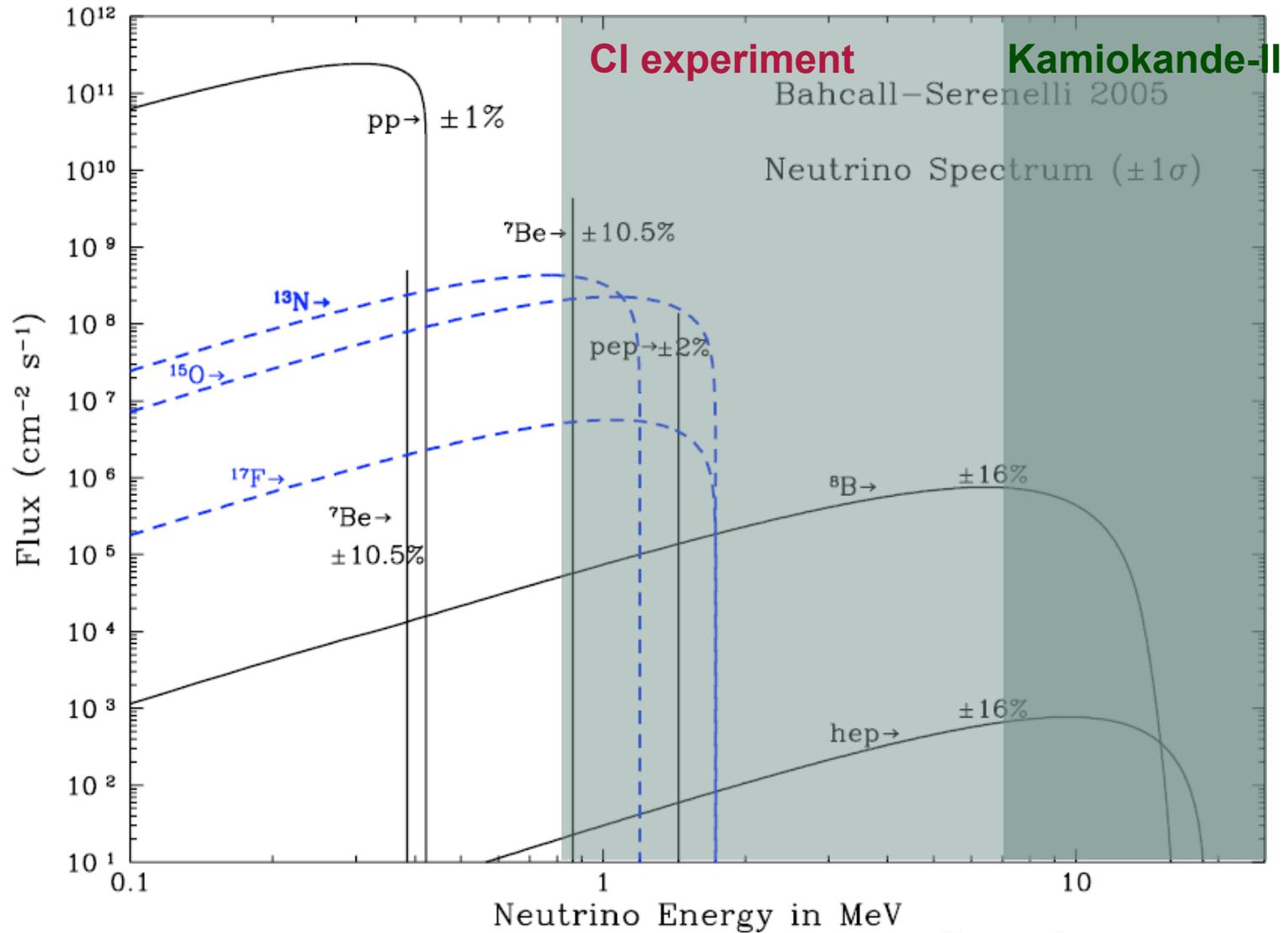
The Kamiokande II detector:
3,000 tons of water, viewed
by 948 PMTs.

The final data sample in the
fiducial volume of 680 tons
with energy above 7 MeV
(7.5 MeV) and less than 20
MeV consists of 6368
events.

Direction to the Sun.

The number of solar neutrino
events is 390^{+35}_{-33} , where
as expected is 785 for the

Solar Neutrinos Spectrum



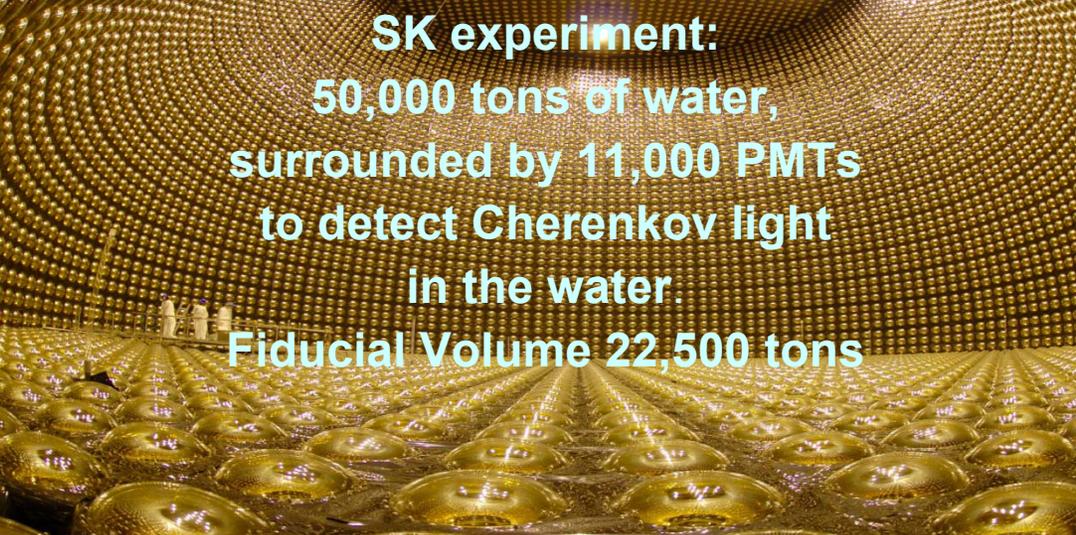
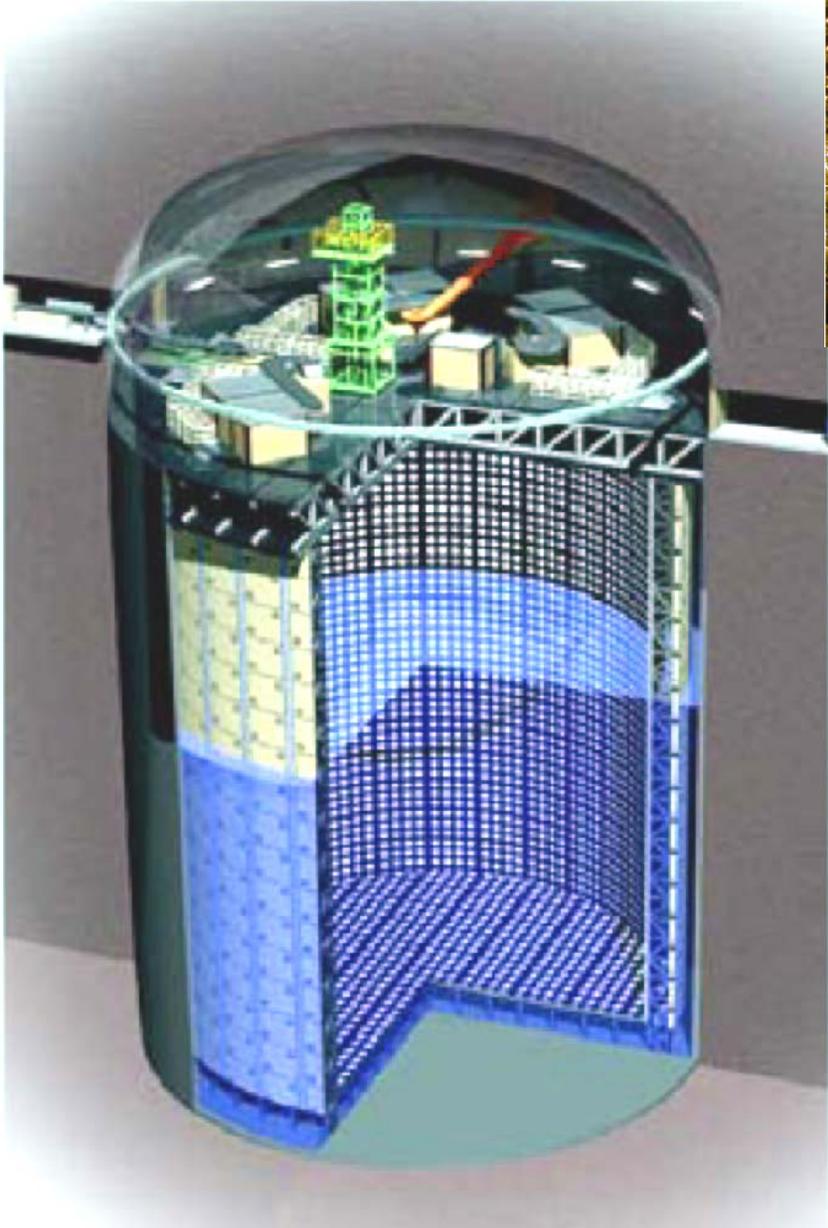
$$R_{K_{II}} = \frac{\Phi_{\text{measured}}}{\Phi_{\text{predicted}}} = 0.48 \pm 0.08$$

Paradox:

$$R_{\text{CI}}(^8\text{B} + ^7\text{Be}) - R_{\text{KII}}(^8\text{B}) \sim 0$$

(~15%)

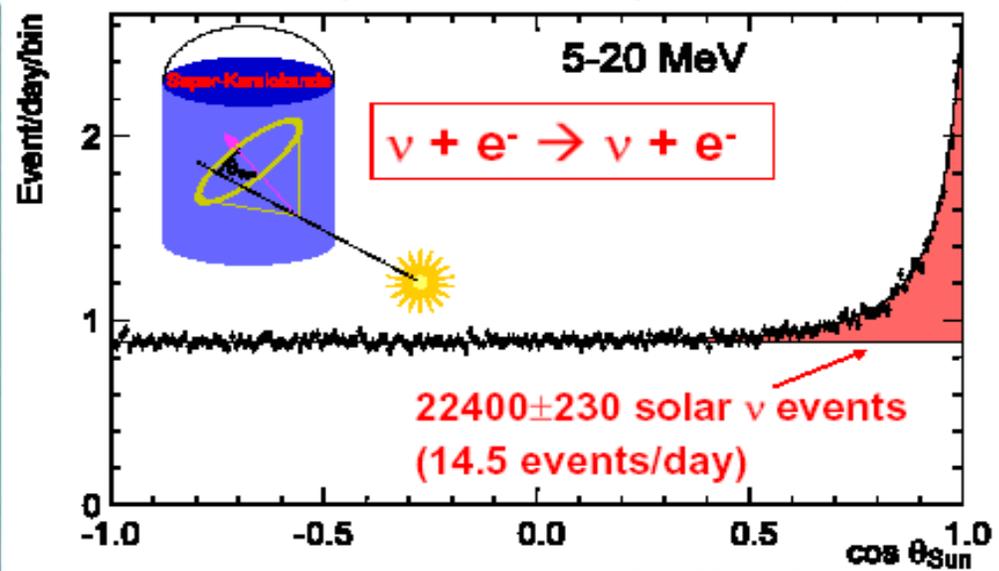
Super-Kamiokande (1996)



SK experiment:
 50,000 tons of water,
 surrounded by 11,000 PMTs
 to detect Cherenkov light
 in the water
 Fiducial Volume 22,500 tons

Super-Kamiokande-I solar neutrino data

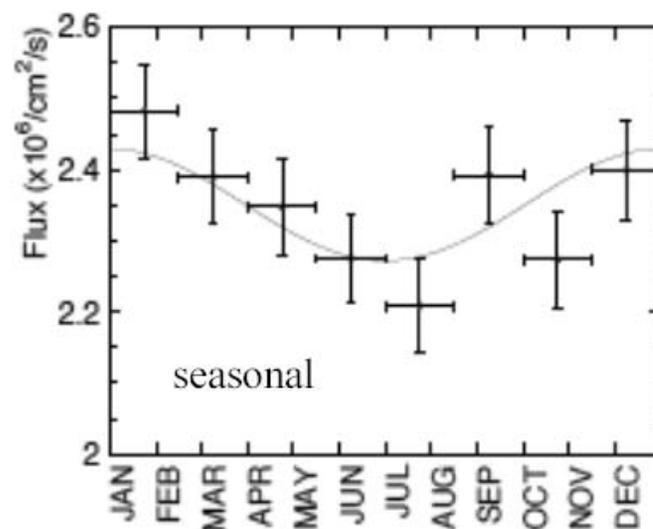
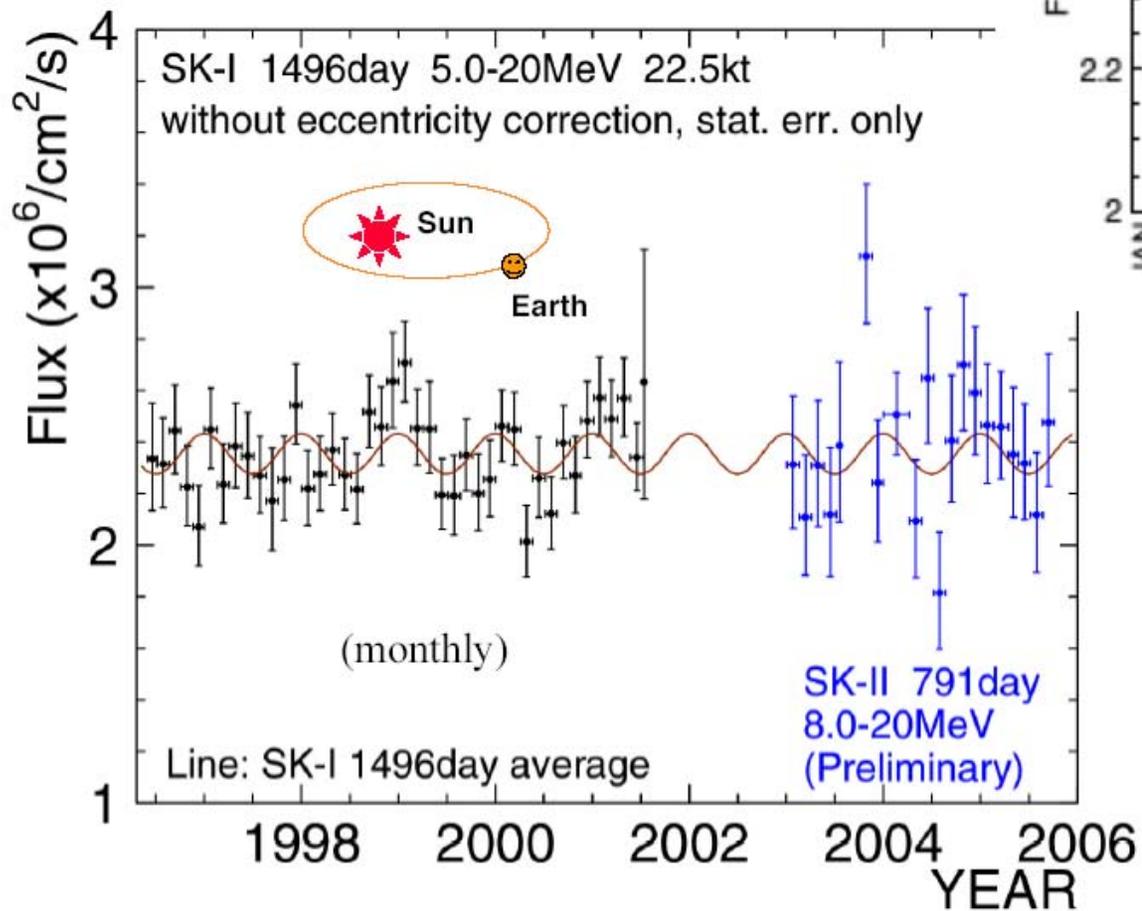
May 31, 1996 – July 13, 2001 (1496 days)



^8B flux : $2.35 \pm 0.02 \pm 0.08$ [$\times 10^6$ /cm²/sec]

$$\frac{\text{Data}}{\text{SSM(BP2004)}} = 0.406 \pm 0.004 \begin{matrix} +0.014 \\ -0.013 \end{matrix}$$

(Data/SSM(BP2000) = $0.465 \pm 0.005 \begin{matrix} +0.016 \\ -0.015 \end{matrix}$)

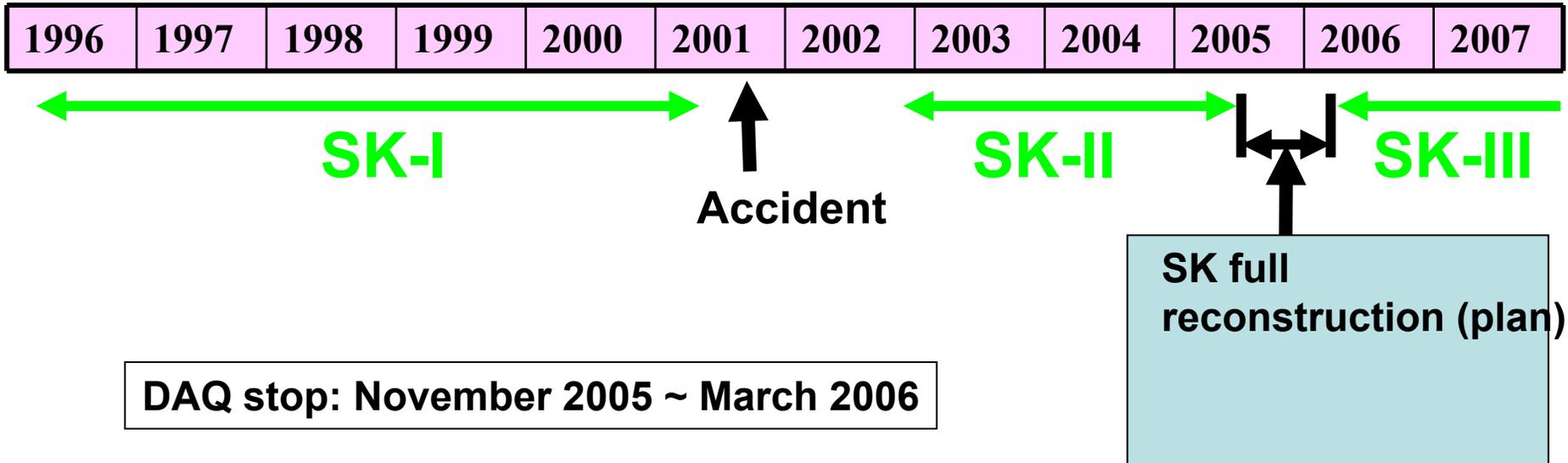


SK-I



Eccentricity = $(2.1 \pm 0.3) \%$

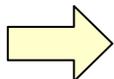
Schedule for Future



ID PMT: SK-II = ~5200 SK-III → 11146 (same as SK-I)
Original energy & vertex resolutions for low-energy events



Solar neutrinos below 5.0MeV with improved analysis tools and lower Rn backgrounds



Precise study on spectrum distortion in SK-III

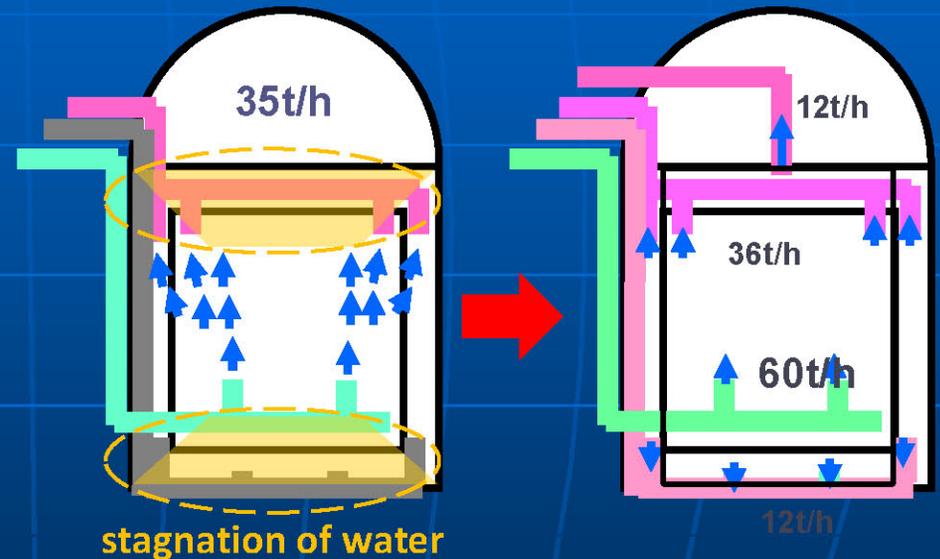
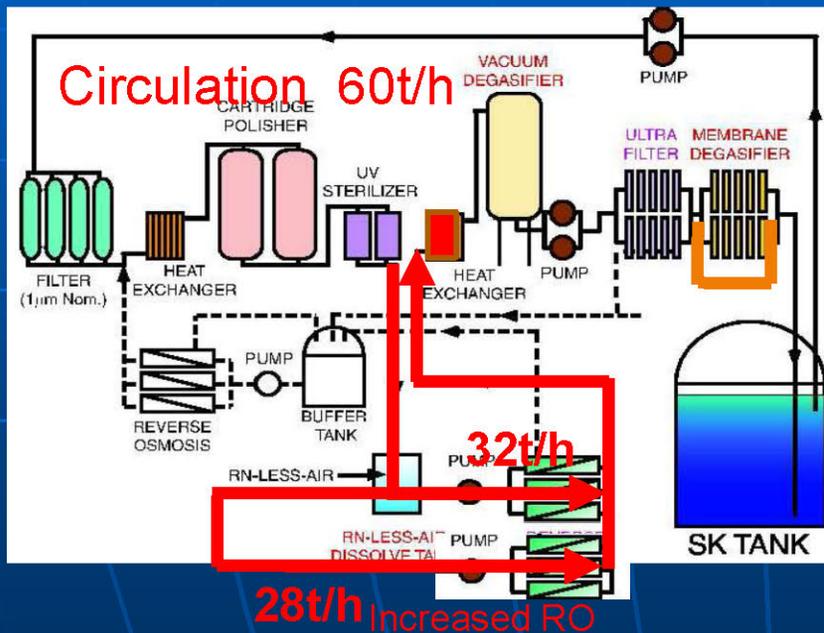
2-1, Reduction of background

Improvement of water circulation and purification system

1, Improved water quality

- Doubled circulation rate
- Increased purification power

2, Optimized water flow in the tank



→ Lower Rn concentration in fiducial volume

Solar Neutrino measurement at Super-K

$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$ (elastic scattering)

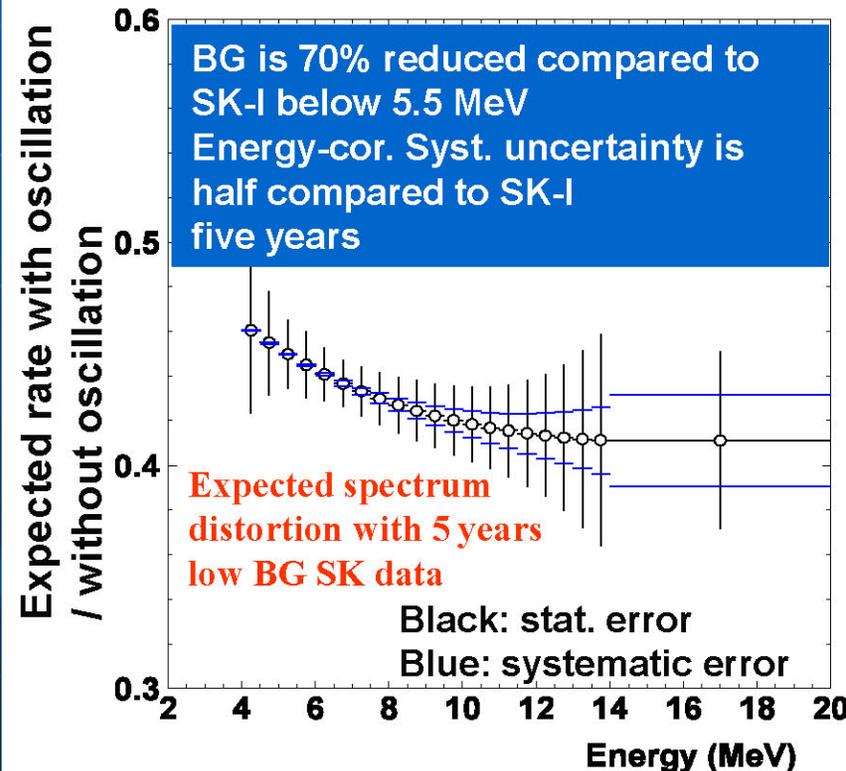
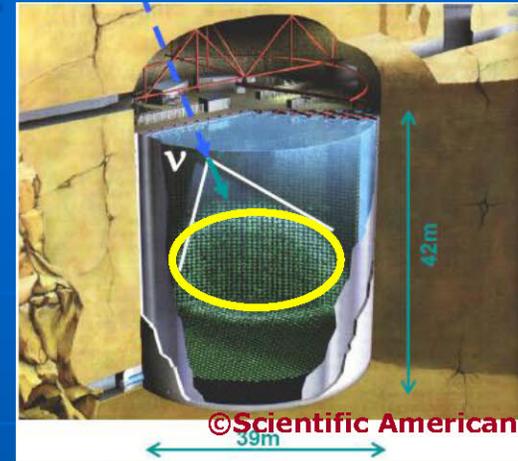
- Measure Cherenkov ring pattern from recoiled electron

- Timing information \rightarrow Vertex of interaction
- Hit pattern \rightarrow Direction
- # of hit PMTs \rightarrow Energy

- High statistics for ^8B neutrino (~ 15 events/day for $E_e > 5\text{MeV}$)
- good angular resolution

Goal:

- Precise measurement of the solar neutrino parameters (flux, timing variation, oscillation parameters etc)
- Reduce the b.g. level and measure the upturn in the solar neutrino spectrum .



**GALLIUM SOLAR
NEUTRINO
EXPERIMENT**



$Q = 233,2 \text{ keV}$

$T_{1/2} = 11,43 \text{ d}$

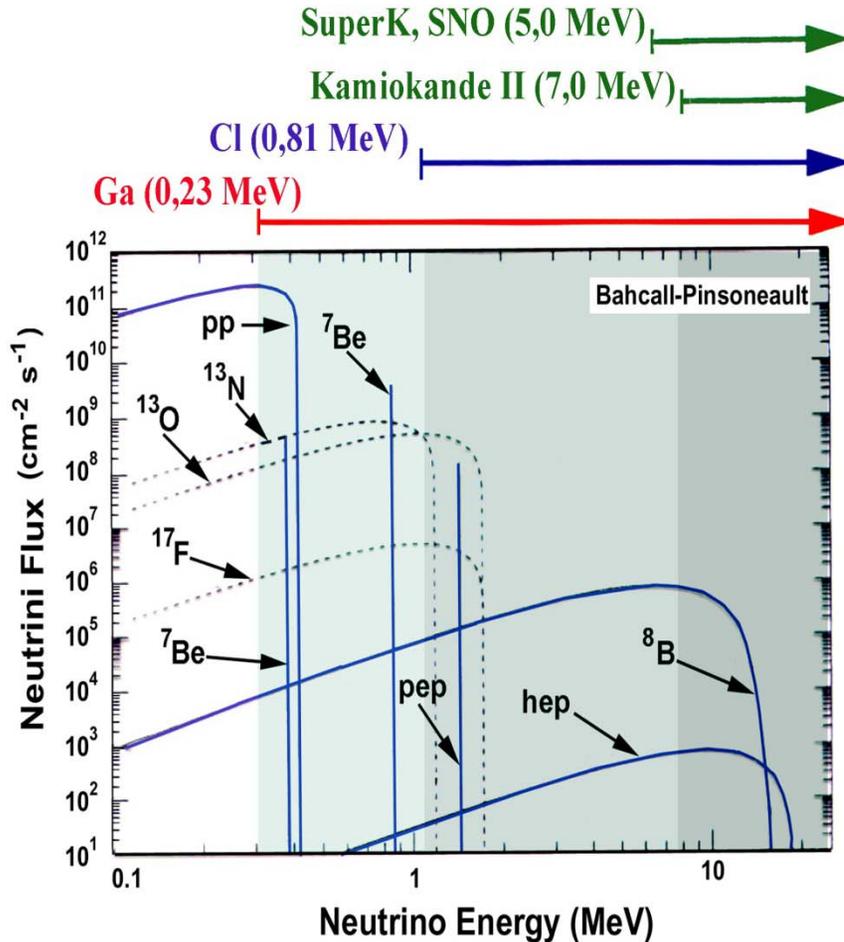
LOW THRESHOLD:
233 keV

SENSITIVE TO
DOMINANT p-p NEUTRINOS

SSM PREDICTIONS:
BAHCALL-PINSONNEAULT:
128 +9 / -7 SNU (1σ)

p-p NEUTRINOS CONTRIBUTE
70 SNU (54%) OF THE RATE

IF ONE ASSUMES ONLY THAT THE
SUN IS INTHERMAL EQUILIBRIUM,
THEN THE MINIMUM RATE IN A
GALLIUM EXPERIMENT IS 79 SNU.



- **1 SNU** = 1 interaction / sec in a target that contains 10^{36} atoms of the neutrino absorbing isotope.

(из письма в ЦК КПСС, 1963 г.)

В последние годы развитие физики элементарных частиц привело к возникновению новых перспективных направлений современной науки – физики нейтрино и нейтринной астрофизики. Исследования по физике нейтрино открывают совершенно новые возможности в исследовании структуры элементарных частиц, природы так называемых слабых взаимодействий и других вопросов ядерной физики.

Вследствие того, что нейтрино чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом, проведение исследований в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики возможно только в условиях надежного экранирования от фона, создаваемого космическими лучами. Это диктует необходимость сооружения подземной станции, защищенной скальными породами толщиной около 2000 м.

Намечаемые исследования по физике нейтрино и нейтринной астрофизике необходимо проводить в ускоренном темпе, поскольку мы значительно отстаем в этой области от США. До сих пор такие исследования не проводились, в то время как развитие этой области физики в США началось 10 лет назад и особенно форсируется в последние годы. В частности, в ближайшее время в США начнутся эксперименты с использованием нейтрино, образованных космическими лучами в атмосфере Земли, а также нейтрино солнечного происхождения. Предлагаемая Академией наук СССР программа нейтринных исследований позволит за ближайшие 5-7 лет в значительной степени ликвидировать наше отставание в этой области физики.

В связи с изложенным Академия наук СССР просит рассмотреть прилагаемый проект постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР о развитии исследований в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики и строительстве с этой целью подземной нейтринной станции.

Президент Академии наук СССР
академик

М.В.Келдыш

НИИЯФ МГУ,
март 2009г.,
Москва

БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин



М.А. Марков и Б.М. Понтекорво на Международной конференции по физике нейтрино и нейтринной астрофизике. Баксанское ущелье, Чегет, 1977 г.

Баксан начался в 1963 г., когда

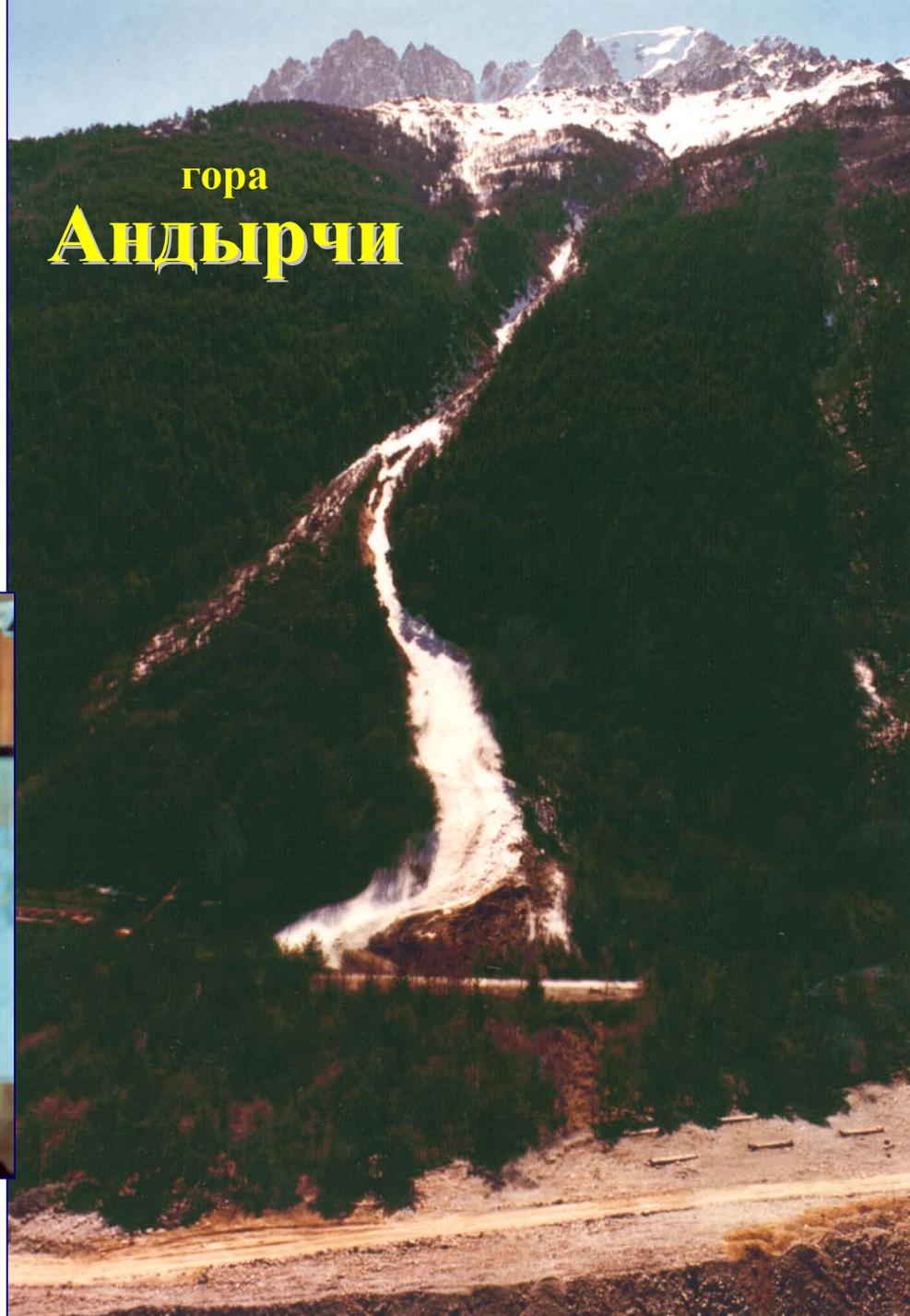
Георгий Зацепин и

Александр Чудаков



начали набирать молодых людей, в основном выпускников физфака МГУ, для развития программы подземных исследований, которые включают: космические лучи, атмосферные и солнечные нейтрино, нейтрино от суперновой.

Г.Т. Зацепин выбрал гору
Андырчи в Баксанском
ущелье на Северном Кавказе.
Это был самый экономичный
вариант из всех возможных
для создания подземной
лаборатории.



гора
Андырчи



Баксанская нейтринная обсерватория

БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин

Гора Андырчи

EAS array
“Andyrchy”



“Karpet-2”
EAS array



Tunnel
entrance



Neutrino
village



Баксанская нейтринная обсерватория

Гора Андырчи

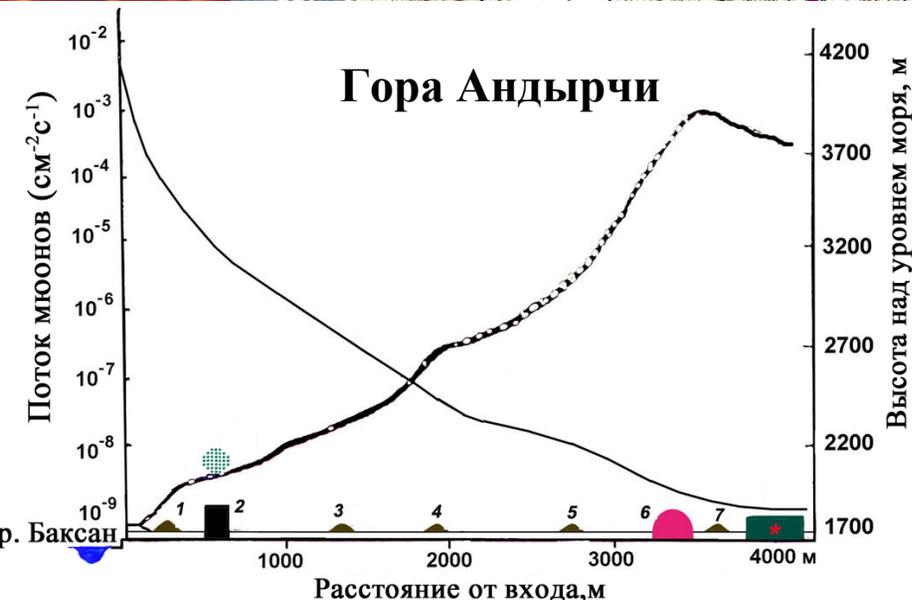
- 1,7 – Низкофоновая лаборатория
- 2 - Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп
- 3 - Лазерный интерферометр
- 4 - Акустическая гравитационная антенна
- 5 - Геофизическая лаборатория
- 6 - Галлий-германиевый нейтринный телескоп (SAGE)

- * - Для будущих проектов
-  - Установка "Андырчи"

Tunnel
entranceNeutrino
village

Баксанская нейтринная обсерватория

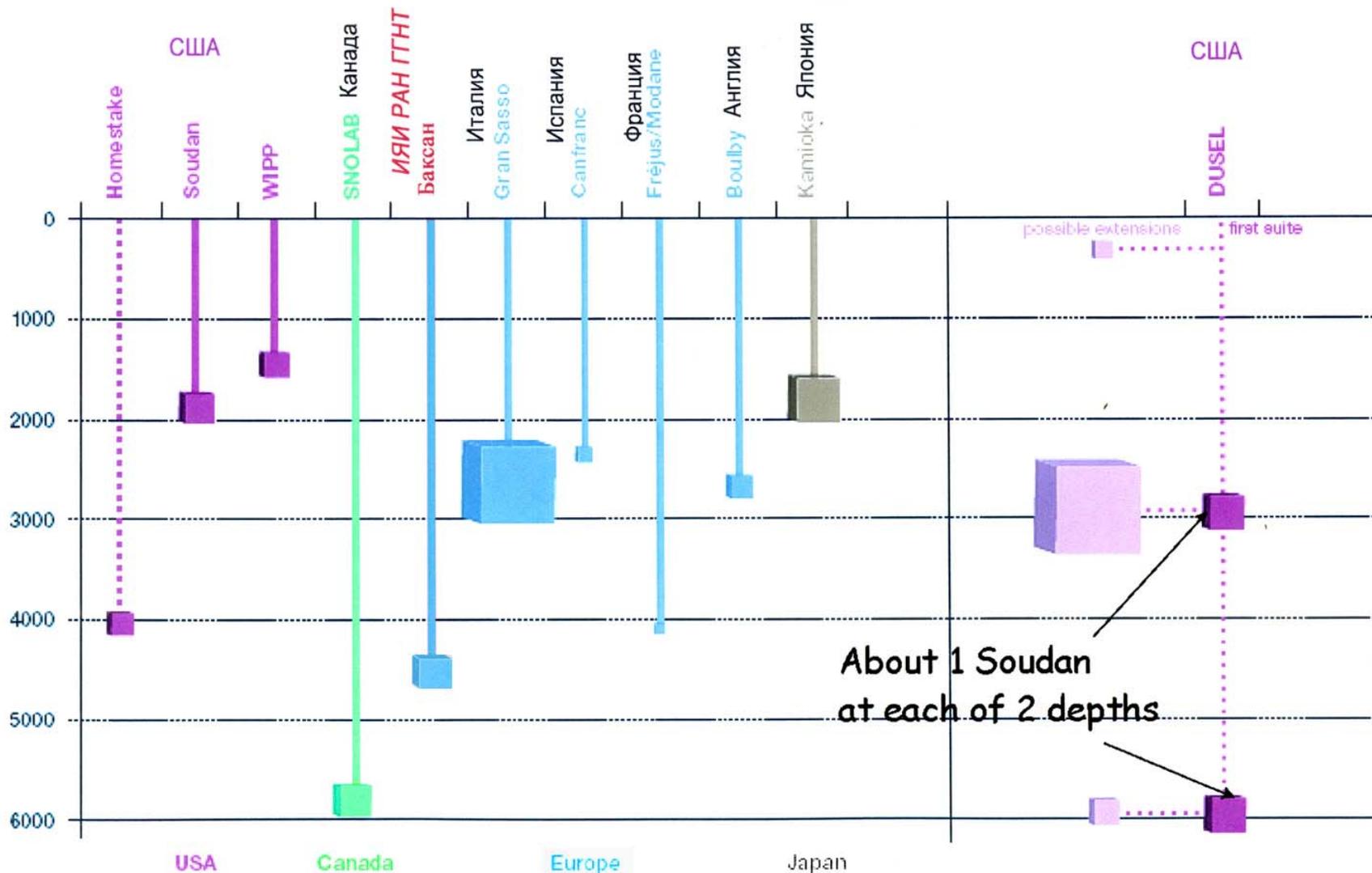
БНО ИЯИ РАН
В.Н. Гаврин



- 1,7 – Низкофоновая лаборатория
- 2 - Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп
- 3 - Лазерный интерферометр
- 4 - Акустическая гравитационная антенна
- 5 - Геофизическая лаборатория
- 6 - Галлий-германиевый нейтринный телескоп (SAGE)
- * - Для будущих проектов
- - Установка “Андырчи”



Science Underground



SAGE

Глобальная интенсивность мюонов $(3.03 \pm 0.19) \times 10^{-9} \text{ (см}^2\text{с)}^{-1}$

Средняя величина энергии мюонов 381 ГэВ

Поток быстрых нейтронов ($>3 \text{ МэВ}$)

$(6.28 \pm 2.20) \times 10^{-8} \text{ (см}^2 \text{ с)}^{-1}$

Ga ~ 50 тонн



The SAGE Collaboration

Measurement of the Solar Neutrino Capture Rate with gallium metal

J.N.Abdurashitov, V.N.Gavrin*, S.V.Girin, V.V.Gorbachev, P.P.Gurkina,
T.V.Ibragimova, A.V.Kalikhov, N.G.Khairnasov, T.V. Knodel, I.N.Mirmov, A.A.Shikhin,
E.P.Veretenkin, V.M.Vermul, V.E.Yants, and G.T.Zatsepin*

Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, 117312 Moscow, Russia

M.L. Cherry

Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana 70803

T.J. Bowles*, W.A. Teasdale and D.L. Wark

Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, USA

J.S.Nico

National Institute of Standards and Technology, Stop 8461, Gaithersburg, Maryland 20899, USA

B.T. Cleveland, S.R. Elliott, and J.F. Wilkerson*

University of Washington, Seattle, Washington 98195, USA

K. Lande, R. Davis, Jr., P. Wildenhain

*Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania
Philadelphia, PA, 19104, USA*

SAGE

Баксанская нейтринная обсерватория, Северный Кавказ, 3.5 км от входа в горизонтальный туннель
Глубина заложения 2100 м (4700 м.в.э.)

50 тонн металлического Ga

Атомы ^{71}Ge химически извлекаются и их распад регистрируется в пропорциональных счетчиках.

Чувствительность: **один атом ^{71}Ge из $5 \cdot 10^{29}$ атомов Ga с эффективностью $\sim 90\%$**



^{71}Ge $T_{1/2} = 11,43 \text{ d}$

^{71}Ga

Electron capture



Результаты SAGE

- показали наличие дефицита солнечных нейтрино во всем диапазоне энергии нейтрино:

SAGE :	$[pp+{}^7\text{Be}+\text{CNO}+pep+{}^8\text{B} \text{Ga}] = 64.6 \pm 3.8 \text{ SNU}$	
	BPS08(GS)	BPS08(AGS)
SSM:(Ga)	$127.9^{+8.1}_{-8.2}$	$120.5^{+6.9}_{-7.1}$

- дали прямое экспериментальное доказательство существования протон-протонной цепочки в реакциях термоядерного синтеза в Солнце :

$$[pp|\text{Ga}] = 39.9 \pm 5.2 \text{ SNU}$$

Измеренный поток электронных pp нейтрино на Земле:

$$(39.9 \pm 5.2) / \text{cross. sect.} = (3.40^{+0.44}_{-0.46}) \times 10^{10} \nu_e / (\text{cm}^2 \text{ s})$$

- показали правильность SSM и LMA решения для нейтринных осцилляций :

- поток pp нейтрино на Земле:

$$(3.40^{+0.44}_{-0.46}) \times 10^{10} / (\langle P_{ee} \rangle = 0.560(1^{+0.030}_{-0.045})) = (6.1 \pm 0.84) \times 10^{10} \nu_e / (\text{cm}^2 \text{ c})$$

Ожидаемый поток pp нейтрино, предсказываемый двумя современными SSM:

$$(5.97 \pm 0.05) \times 10^{10} \nu_e / (\text{cm}^2 \text{ s}) \text{ (BPS08(GS)) (high metallicity)}$$

$$(6.04 \pm 0.05) \times 10^{10} \nu_e / (\text{cm}^2 \text{ s}) \text{ (BPS08(AGS05)) (low metallicity)}$$

Ga-эксперименты



Измерение скорости захвата солнечных нейтрино
- на металлическом галлии:

SAGE, 50 тонн металлического ${}^{71}\text{Ga}$

197ранов за 20.5-летний период (Янв 1990 – май 2010) дают результат: **$64.6 \pm 3.8 \text{ SNU}$**
(1 SNU = 1 захват нейтрино/сек в мишени, содержащей 10^{36} атомов нейтрино поглощающего изотопа).

Хорошее согласие между результатами **Ga экспериментов** увеличивает достоверность получаемых результатов. Это была замечательная ситуация, что в течение нескольких лет существовали два **Ga** эксперимента, **SAGE** и **GALLEX/GNO**, которые вели набор данных в одно и то же время и действительно заслуживает большого сожаления тот факт, что эксперимент **GNO** был остановлен по ненаучным причинам.

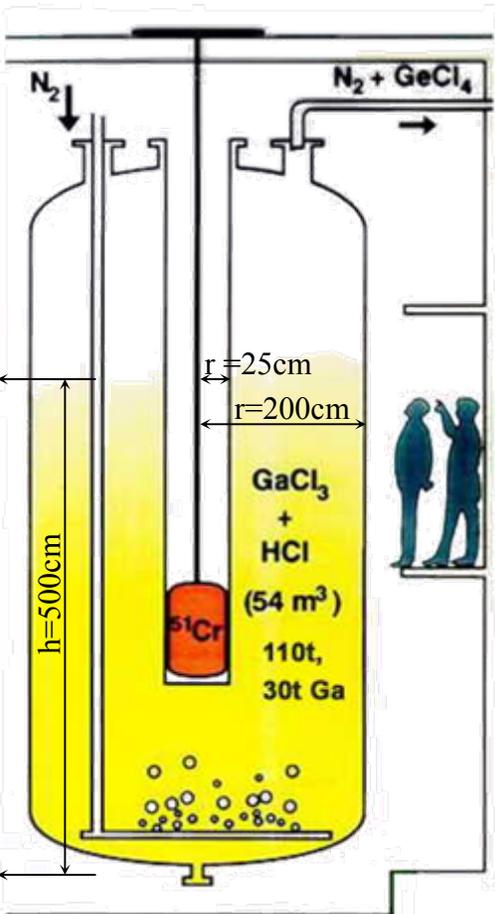
Средневзвешенная величина результатов всех
Ga экспериментов составляет в настоящее время

$66.1 \pm 3.1 \text{ SNU}$

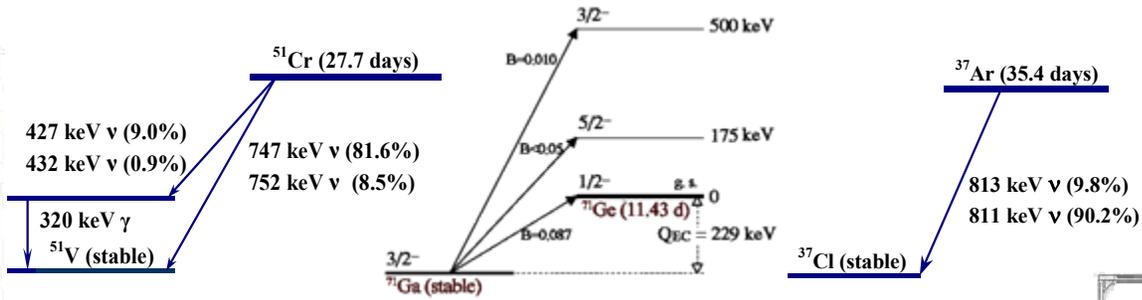
Gallium source experiments

The experimental procedures of the **SAGE** and **Gallex** experiments, including the chemical extraction, counting, and analysis techniques, have been checked by exposing the gallium target to reactor-produced neutrino sources

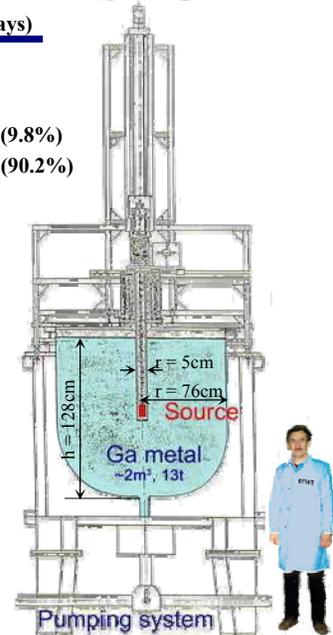
GALLEX



Gallex has twice used ^{51}Cr

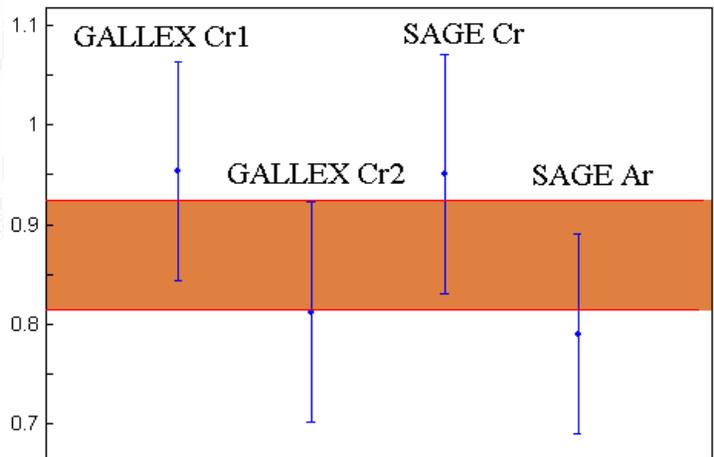


SAGE



	GALLEX m(Ga)=30 t		SAGE m(Ga)=13 t	
Source	^{51}Cr -1	^{51}Cr -2	^{51}Cr	^{37}Ar
Activity, MCi	1.714	1.868	0.517	0.409
$R = (p_{\text{meas}}/p_{\text{pred}})$	0.95 ± 0.11	0.81 ± 0.11	0.95 ± 0.12	0.79 ± 0.10
R_{comb}	0.88 ± 0.08		0.86 ± 0.08	

$$R = p_{\text{measured}}/p_{\text{predict}} = 0.87 \pm 0.05$$



SAGE has used ^{51}Cr and ^{37}Ar

$R = AD < L > \sigma$
 $D = \rho N_0 f M$ – плотность ^{71}Ga в мишени
 $< L >$ – средняя длина пробега нейтрино в мишени

Ga эксперименты:

- «have given a great impact upon a view of neutrino oscillation and have supplied most important motivation for creation of **SNO**

* **1990 - SAGE shows greatly suppressed Ga rate**

* **1990 - Start of construction of SNO»**

(David Sinclair, May 2007)

• впервые показали, что подавляющая часть солнечных нейтрино, достигающих Земли, это низкоэнергетические нейтрино от ***pp*** реакции

• показывают отличное согласие между теорией и экспериментом. Более того, точность измерений в эксперименте достигла точности теоретических предсказаний

* в настоящее время обеспечивают единственное прямое измерение скорости ***pp*** реакции

* развили технологию изготовления интенсивных искусственных источников нейтрино – идеального инструмента для калибровки детекторов солнечных нейтрино низких энергий, и которые также могут быть использованы для исследования свойств нейтрино

The Sudbury Neutrino Observatory: SNO



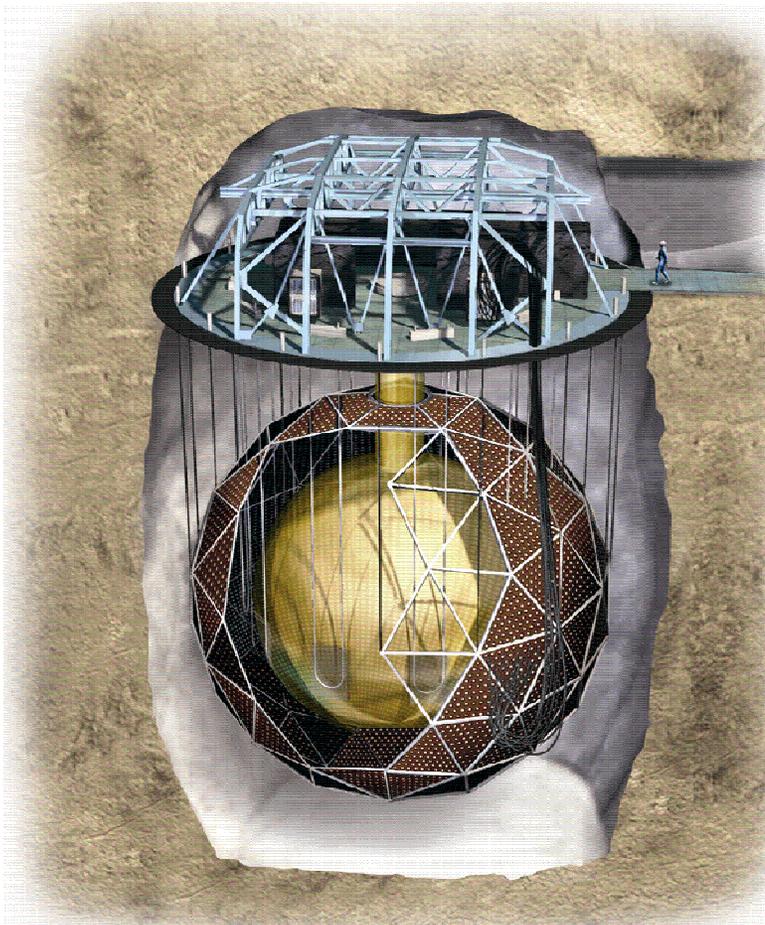
Acrylic vessel (AV)
12 m diameter

1000 tonnes D_2O
(\$300 million)

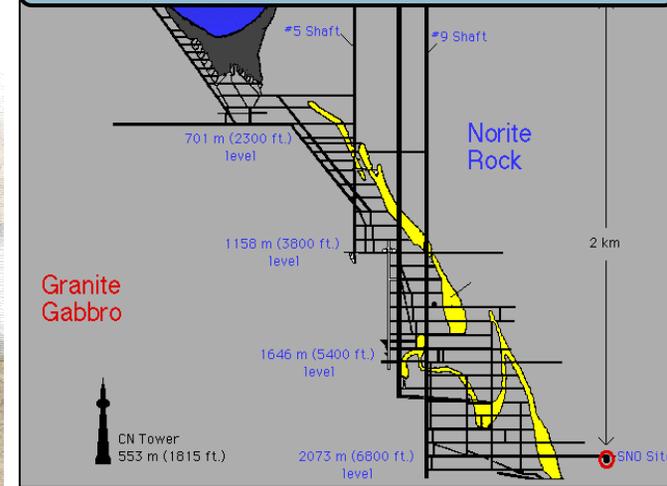
1700 tonnes H_2O
inner shielding

5300 tonnes H_2O
outer shielding

~9500 PMT's



6800 feet (~2km) underground



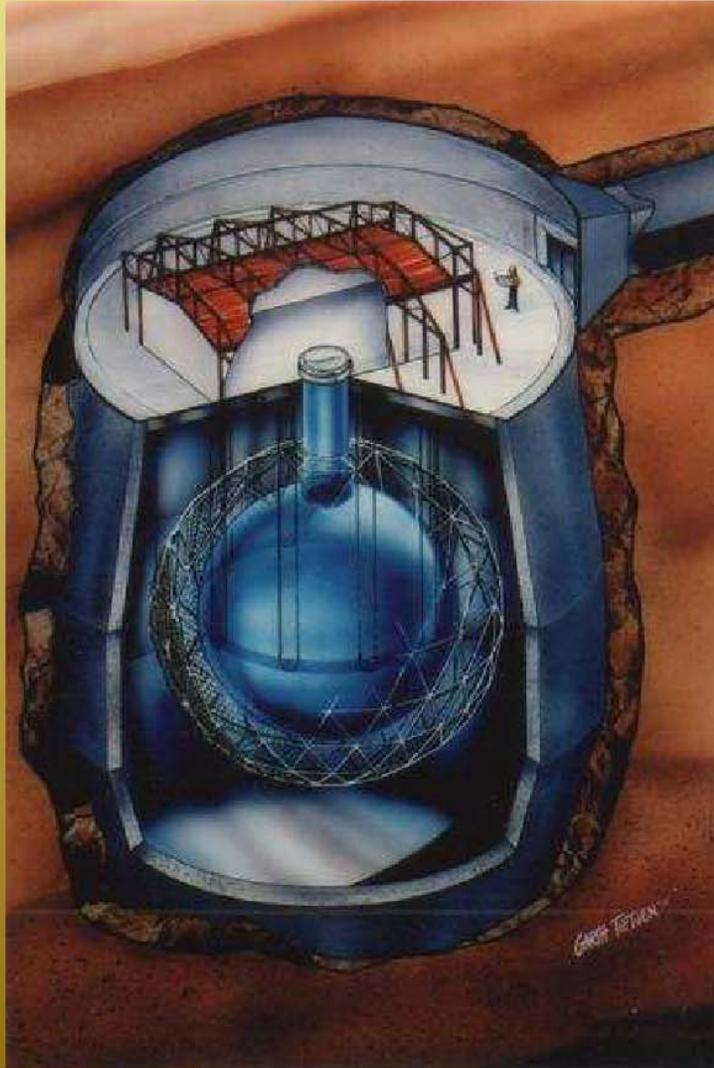
Creighton mine
Sudbury, CA

- Entire detector
Built as a Class 2000
Clean room
- Low Radioactivity
Detector materials

The heavy water has been returned and development work is in progress on SNO+ with liquid scintillator and ^{150}Nd additive.

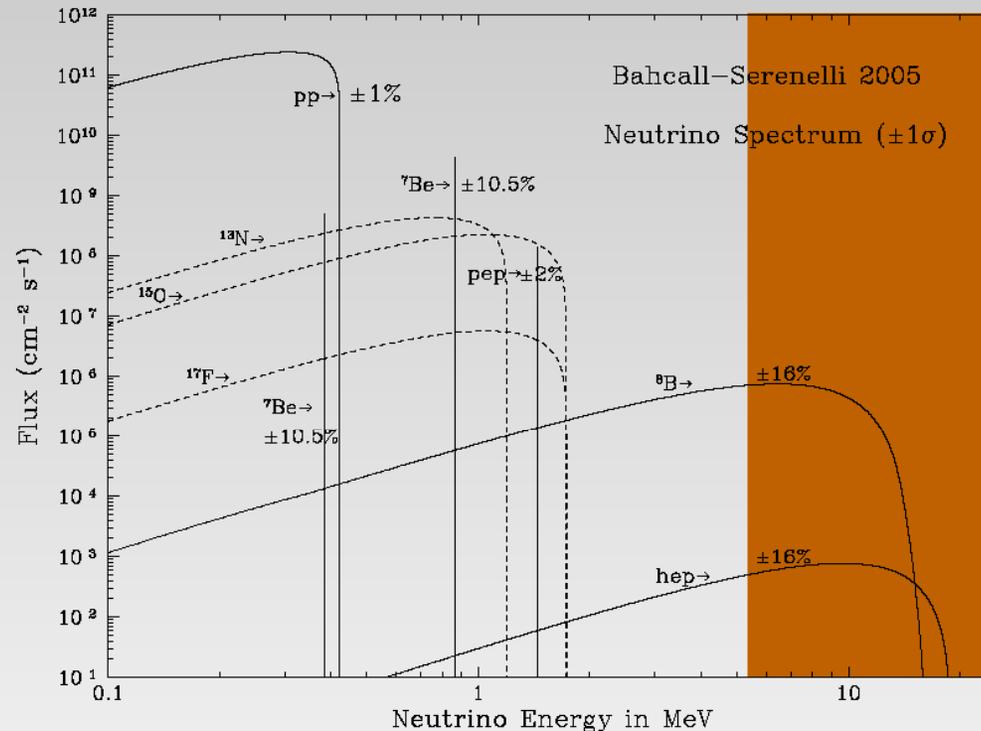
Sudbury Neutrino Observatory

с 2001 г.



- 2092m underground (6010m water equivalent)
- 1000t of heavy water on loan from AECL in 12m diameter acrylic vessel surrounded by light water
- 9465 Hamamatsu PMTs (60% coverage)
- In phase II (Salt phase) 2000kg of NaCl dissolved in D₂O
- Currently in phase III (NCD phase) ³He Counters in D₂O

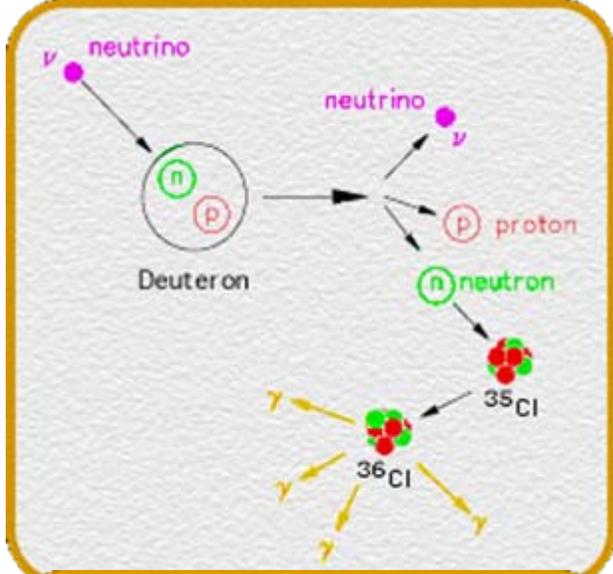
Solar Neutrino Energy Spectrum



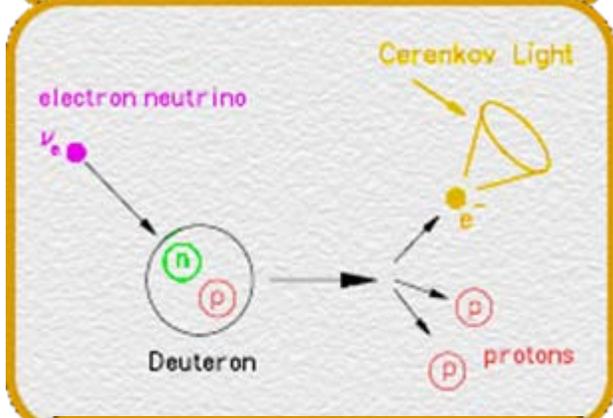
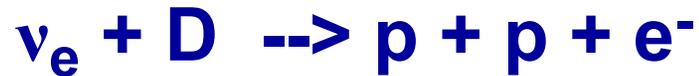
- SNO energy threshold for salt phase 5.5 MeV
- SNO is sensitive to ⁸B neutrinos

SNO is sensitive to

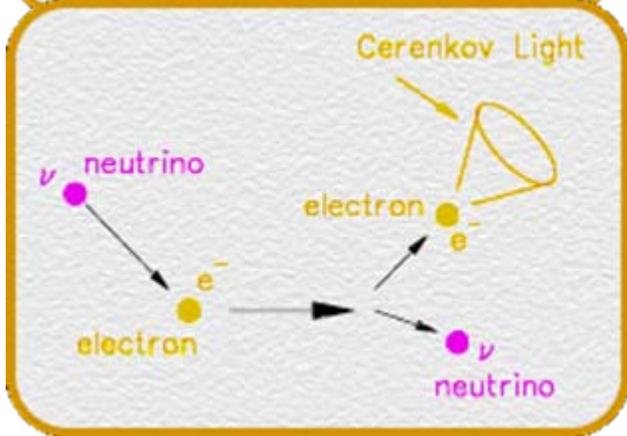
- Neutral current reactions with any neutrino flavour

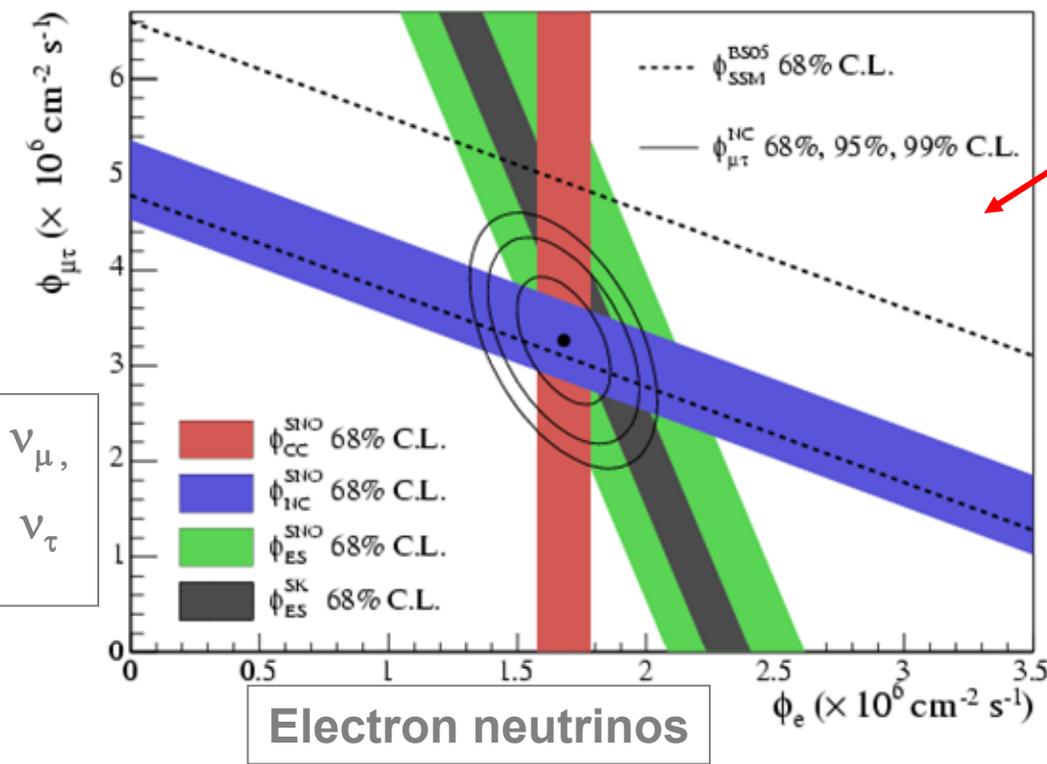


- Charged current reactions with electron neutrinos



- Elastic scattering with predominantly ν_e





**Flavor change
determined by $> 7 \sigma$.**

**CC, NC FLUXES
MEASURED
INDEPENDENTLY**

**The Total Flux of Active
Neutrinos is measured
independently (NC) and agrees
well with solar model
Calculations:
5.82 +/- 1.3 (Bahcall et al),
5.31 +/- 0.6 (Turck-Chieze et al)**

$$\phi_{CC} = 1.68^{+0.06}_{-0.06}(\text{stat.})^{+0.08}_{-0.09}(\text{syst.})$$

$$\phi_{NC} = 4.94^{+0.21}_{-0.21}(\text{stat.})^{+0.38}_{-0.34}(\text{syst.})$$

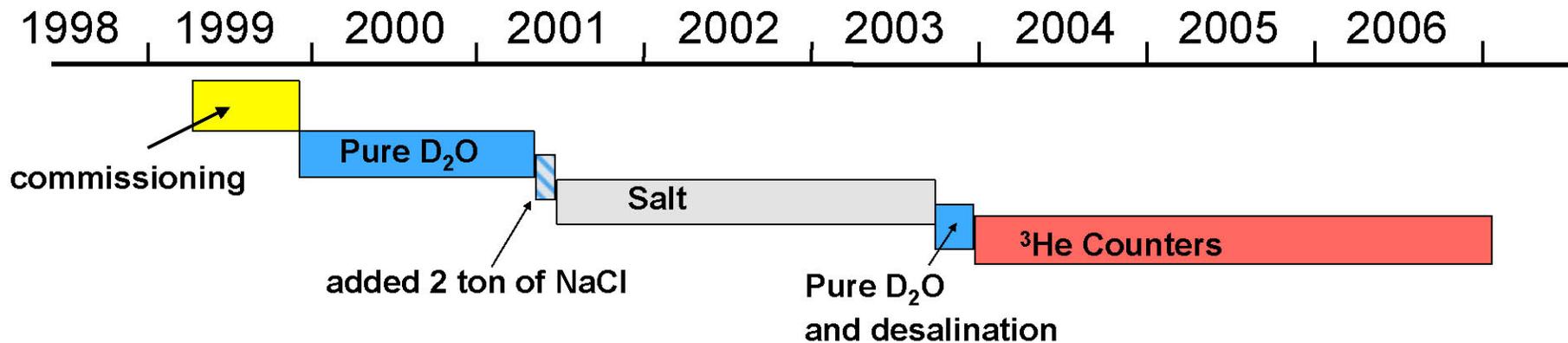
$$\phi_{ES} = 2.35^{+0.22}_{-0.22}(\text{stat.})^{+0.15}_{-0.15}(\text{syst.})$$

(In units of $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

$$\frac{\phi_{CC}}{\phi_{NC}} = 0.34 \pm 0.023(\text{stat.})^{+0.029}_{-0.031} = \cos^4 \theta_{13} \sin^2 \theta_{12}$$

**Improved accuracy
for θ_{12} .**

SNO Timeline Summary



- pure D₂O phase discovered active solar neutrino flavors that are not ν_e
- salt phase moved on to precision determination of oscillation parameters; flux determination had no spectral constraint (thus could use it rigorously for more than just the null hypothesis test) – day/night effect and spectral shape were studied as well as the total active ^8B solar neutrino flux
- Phase III configuration offered CC and NC event-by-event separation, for improved precision and cleaner spectral shape examination; analyses combining all three phases are in progress



Solar + KamLAND fit results

$$\Delta m^2 = 7.59_{-0.21}^{+0.19} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\phi_{8B} = 4.91 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} (\pm \sim 7\%)$$

$$\theta_{12} = 34.4_{-1.2}^{+1.3} \text{ degrees}$$

$$\theta_{12} = 33.9_{-2.2}^{+2.4} \text{ deg (previous)}$$

Neutrino flavour symmetry phenomenology:
(Smirnov summary at Neutrino 2008)

Tri-Bi-Maximal Mixing: 35.2 deg

Quark-Lepton Complementarity: 32.2 deg

($\theta_{12} + \theta_{\text{Cabbibo}} = 45 \text{ deg}$)

The accuracy on θ_{12} and ϕ_{8B} will improve
with new data analysis: SNO LETA

This work:

- SNO NCD results agree well with previous SNO phases. Minimal correlation with CC. Different systematics.
- New precision on θ

Future solar analysis:

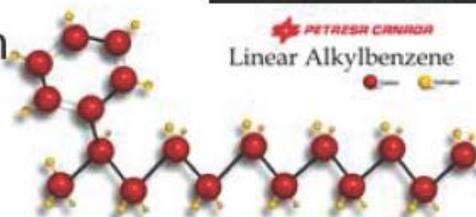
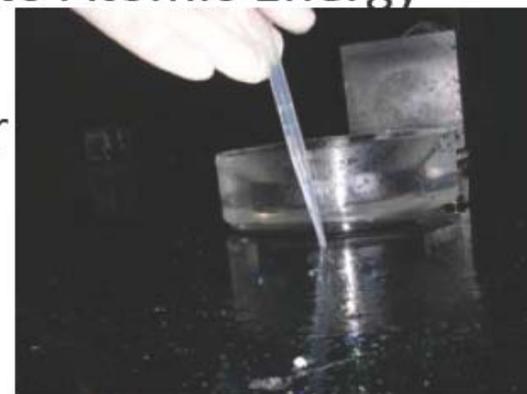
- LETA (Low Energy Threshold Analysis)
- 3-neutrino analysis
- *hep* flux
- Day-night, other variations

- Muons, atmospheric ν

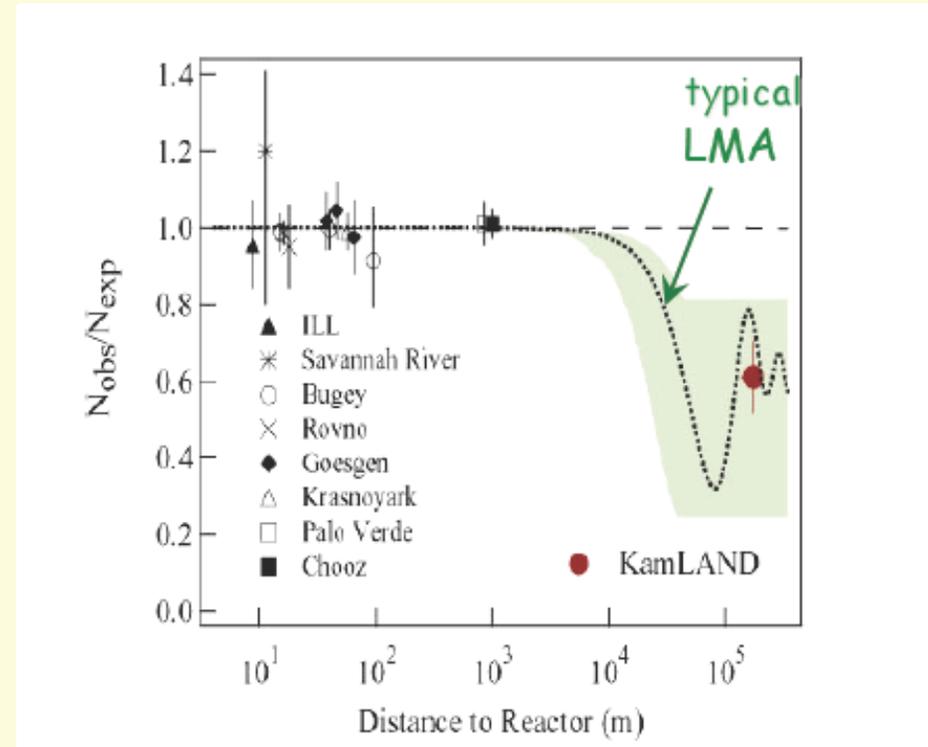
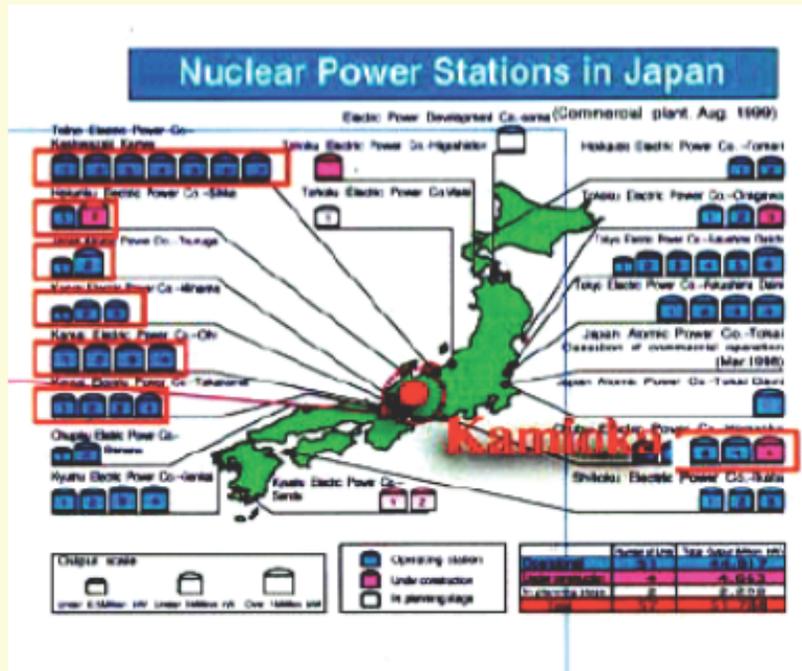
SNO+



- \$300M of heavy water removed and returned to Atomic Energy of Canada Limited (every last drop)
- SNO detector to be filled with liquid scintillator
 - 50-100 times more light than Čerenkov
- linear alkylbenzene (LAB)
 - compatible with acrylic, undiluted
 - high light yield, long attenuation length
 - safe: high flash point, low toxicity
 - cheaper than other scintillators
- physics goals: *pep* and *CNO* solar neutrinos, geo neutrinos, reactor neutrino oscillations, supernova neutrinos, double beta decay with Nd



KamLAND: long-baseline multi-reactor experiment



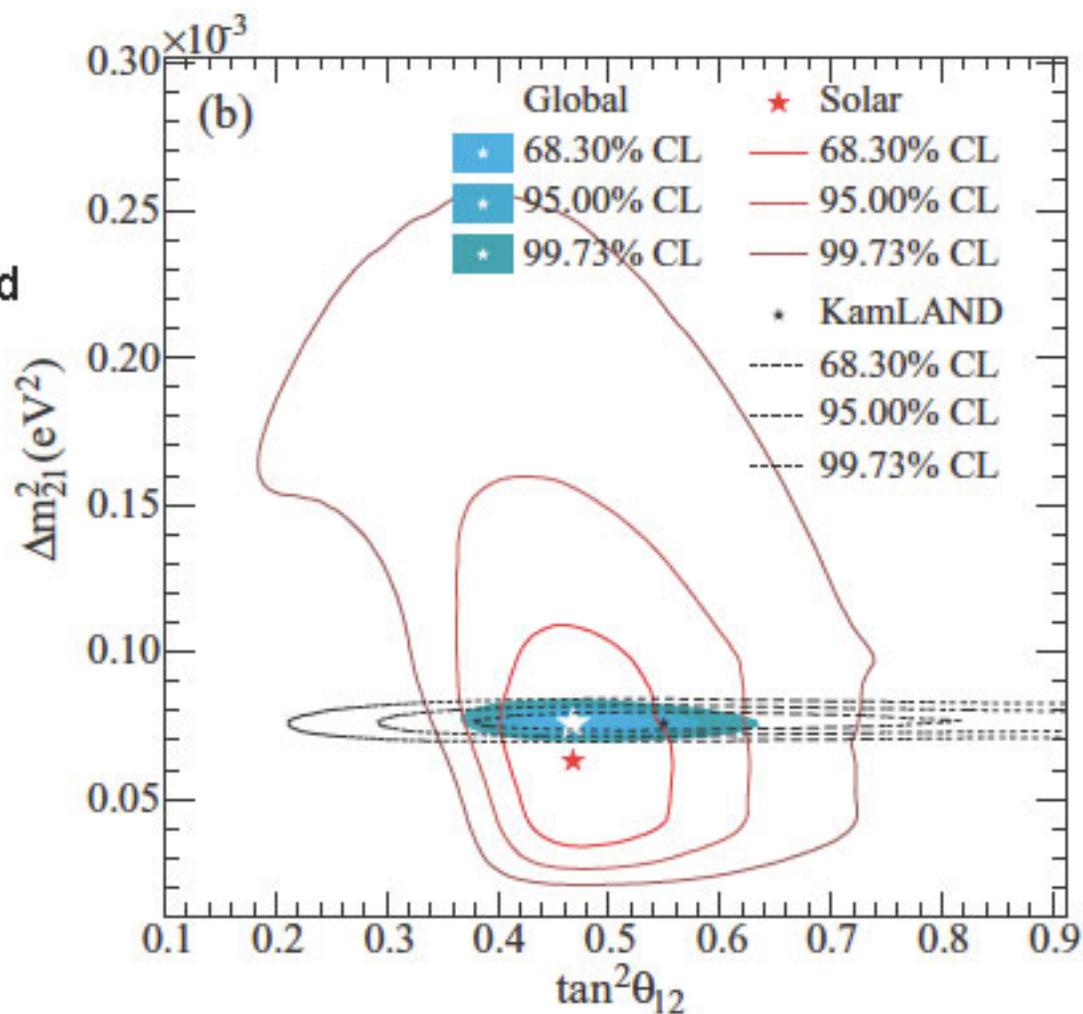
Average distance: ~180 km

Typical ν energy: few MeV

Sensitivity to $\delta m^2 \sim \text{few} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

Solar + KamLAND 3-Neutrino Overlay

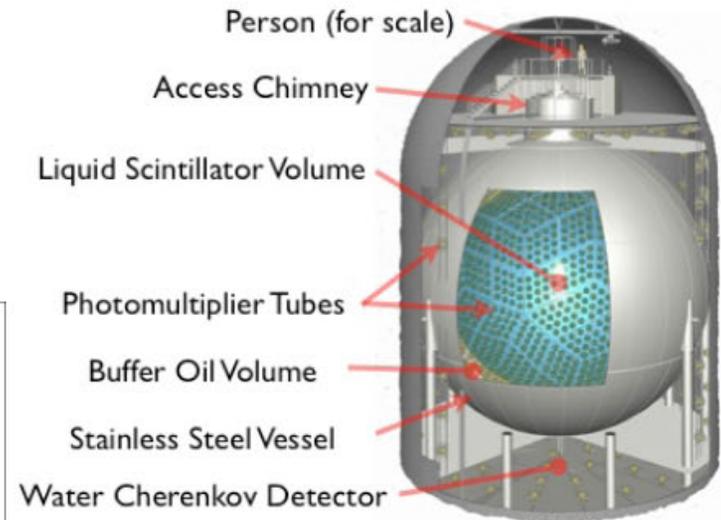
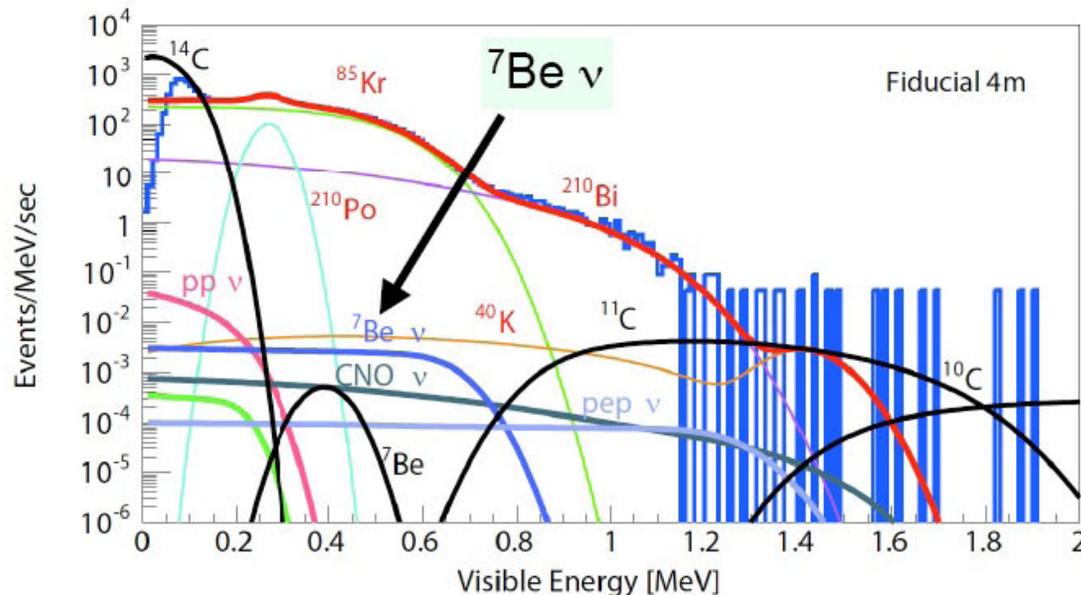
global solar and
KamLAND
separately



KamLAND



- 1000 tons (80% dodecane, 20% pseudocumene)
- 1880 PMTs (17" and 20")
 - 34% photocathode coverage
- singles spectrum shows ^{210}Pb and ^{85}Kr and also ^{40}K contamination

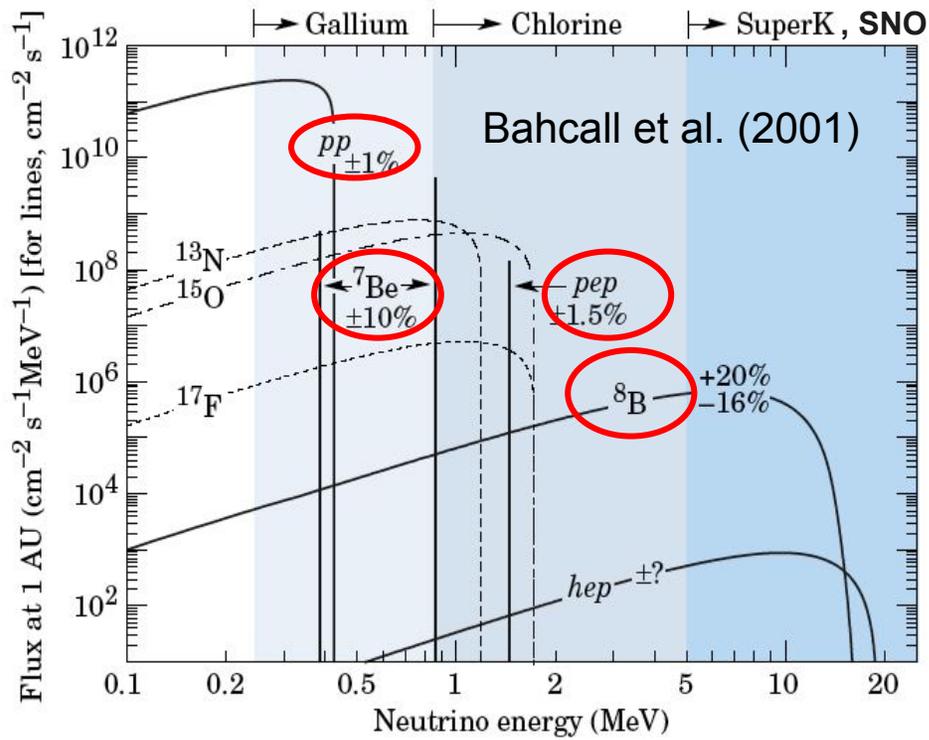


must purify liquid scintillator to achieve solar ν sensitivity

goal: 10^5 to 10^6 reduction

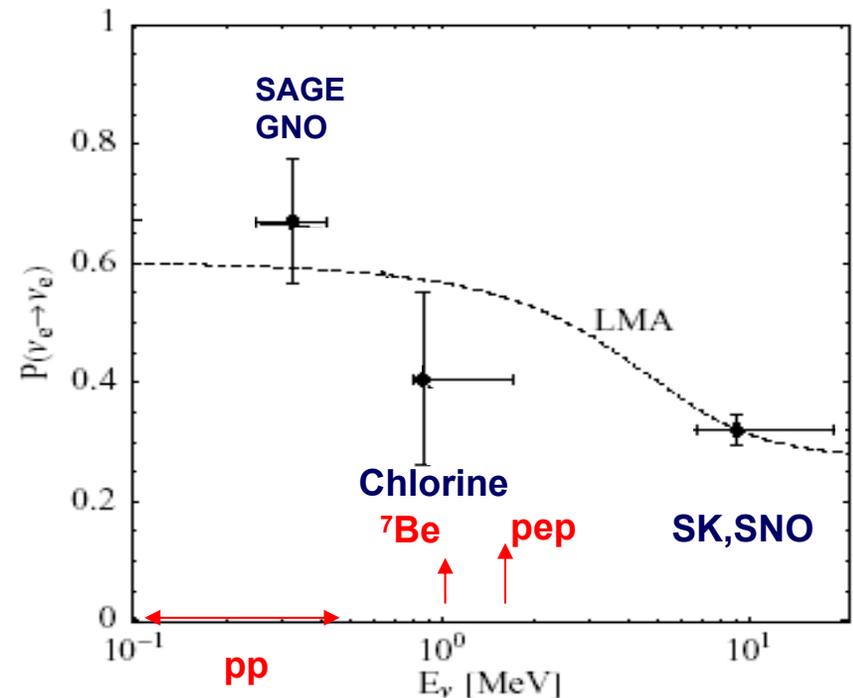
Oscillations for Solar Neutrinos

Solar Model Flux Calculations

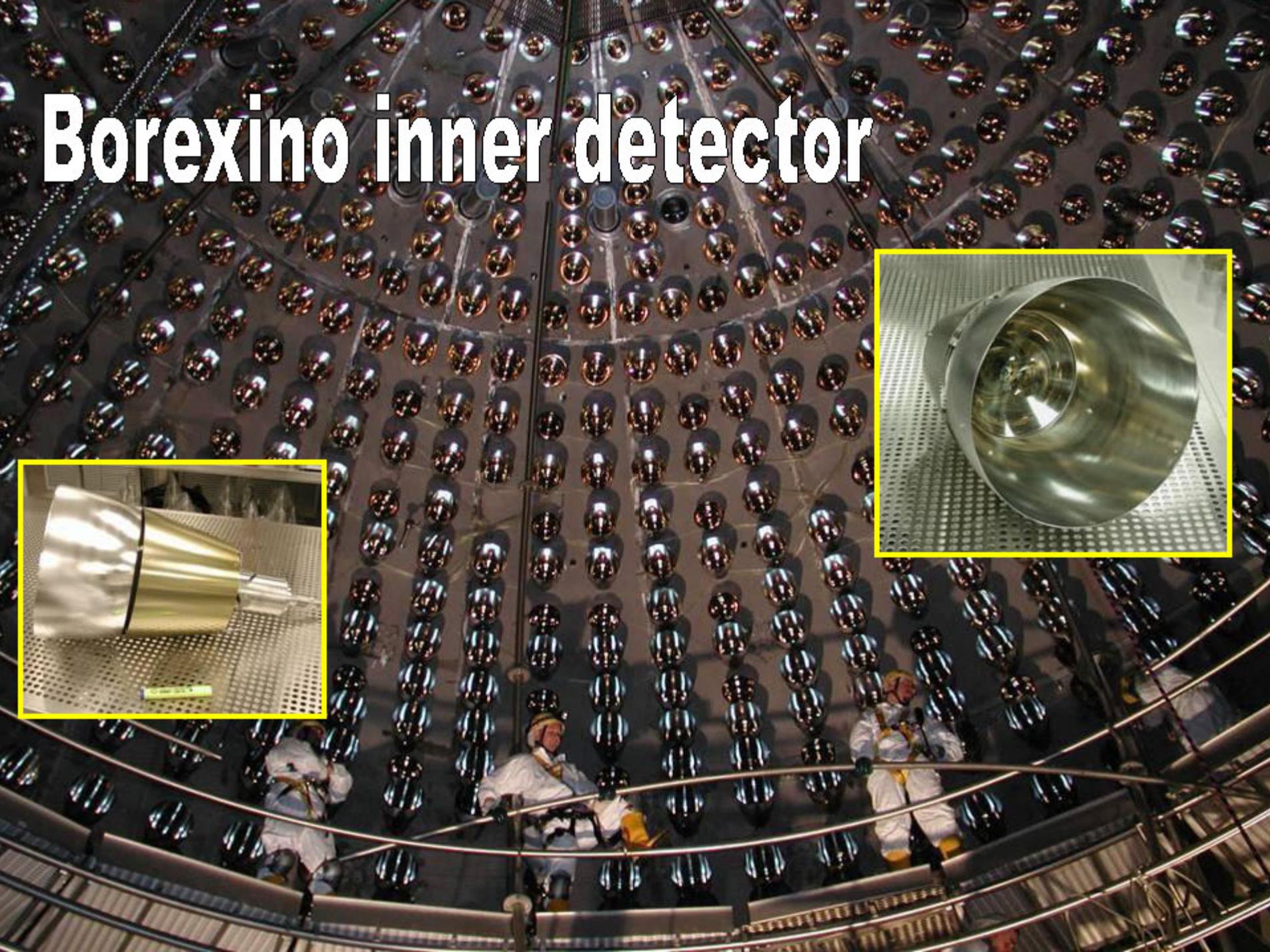
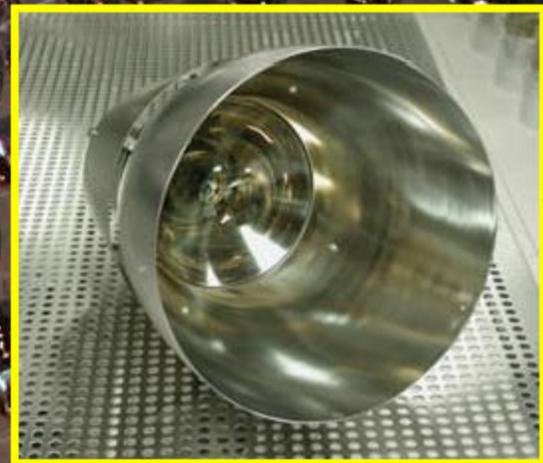


Matter Interaction Effect: LMA

Current Data for ν_e Survival

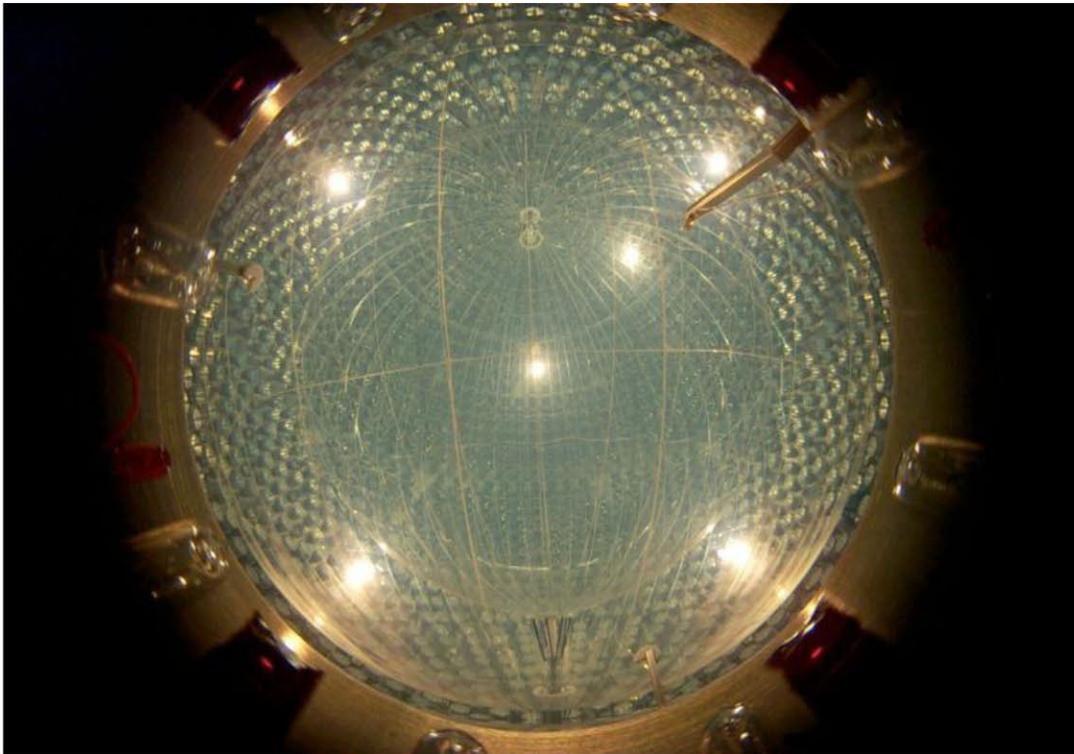


Borexino inner detector



The Borexino Detector at Laboratori Nazionali Gran Sasso

- Low background
- High mass: 270 tons active mass, liquid organic scintillator PC + PPO (1.5 g/l)
- 2200 Photomultipliers

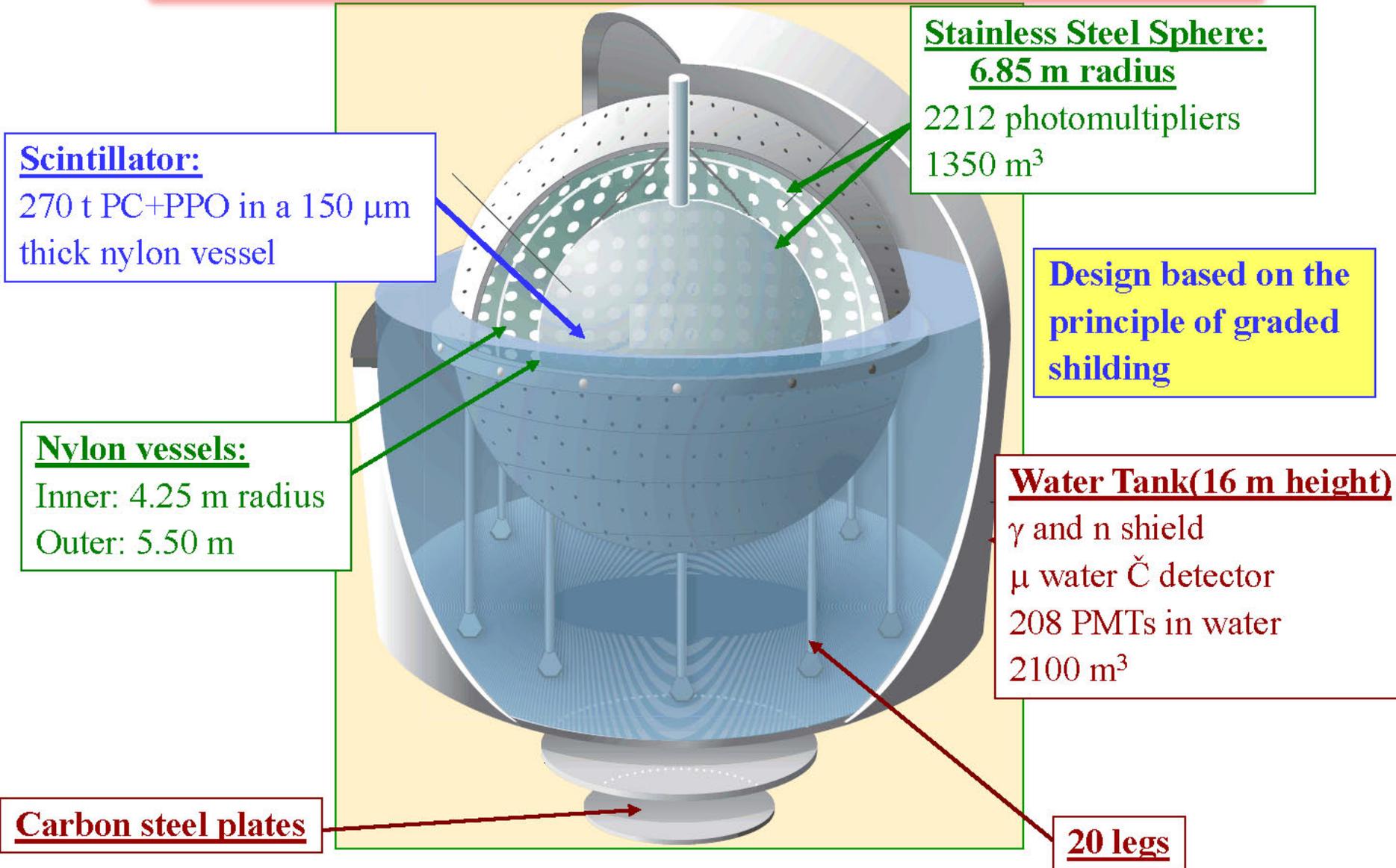


Borexino is continuously
RUNNING since May 16, 2007

We have now **more than 900**
days of live time

Borexino is the results of almost
20 years of R&D and tests!!!

The Borexino Detector layout



Be7 signal after 192 days and before the calibration campaign

${}^7\text{Be}$: $(49 \pm 3_{\text{stat}} \pm 4_{\text{sys}})$ cpd/100 tons (192 days)

No-oscillation hypothesis rejected at 4σ level

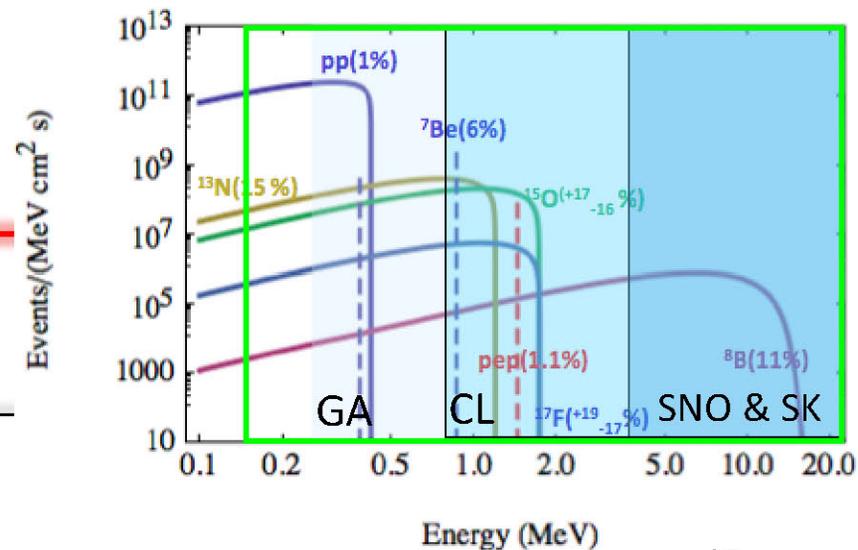
	Expected rate (cpd/100 t)
No oscillation	75 ± 4
BPS07(GS98) HighZ	48 ± 4
BPS07(AGS05) LowZ	44 ± 4

Estimated 1σ Systematic Uncertainties* [%]

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

*Prior to Calibration

Borexino and solar neutrinos



⁷Be solar neutrinos

- This was the main physics motivation
- Borexino is measuring the real time spectrum and flux of the 0.862 MeV neutrinos
- Results after 192 days live time: $49 \pm 3_{\text{stat}} \pm 4_{\text{sys}}$ cpd/100t
- FIRST real time measurement!
- Toward higher precision : the Borexino calibration campaign
- Day night asymmetry

⁸B solar neutrinos

- Low (3MeV) threshold detection

pp, pep, CNO:

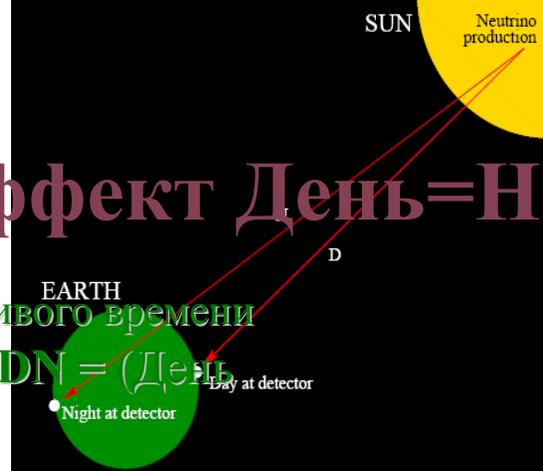
- work in progress

SNO Объединенный набор данных имеет дневное живое время 128.5 дней и ночное живое время 177.9 дней:

$$A_{\text{salt} + \text{D}_2\text{O}} = 0.037 \pm 0.040$$

Отсутствуют свидетельства асимметрии от эффектов вещества на Земле

Эффект День=Н



S-K I набор низкоэнергетических данных соответствует 1496 дням живого времени (с 31 мая 1996 по 15 июля 2001): Наблюденная асимметрия день-ночь $ADN = (\text{День} - \text{Ночь}) / (0.5 * (\text{День} + \text{Ночь})) = -0.021 \pm 0.020^{+0.013}_{-0.012}$

Не наблюдается указаний на нарушение спектра.

BOREXINO – полное живое время 422.12 дней. Ночь 212.87 дней. День 209.25 дней: Для асимметрии День-Ночь от сигнала нейтрино необходима точная подгонка спектра, но на нее влияет статистическая неопределенность

$$\sigma_{ADN^{\nu}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Phi_{7\text{Be}}}{\Phi_{7\text{Be}}}$$

$$ADN^{\nu} = 0.02 \pm 0.04_{\text{stat}}$$

Систематические ошибки исследуются

GNO + Gallex (123 SRs): Зима (66 SR): $66.5^{+5.6}_{-5.4}$ SNU, Лето (57 SR): $74.1^{+6.4}_{-6.2}$ SNU

$$W-S: -7.6 \pm 9 \text{ SNU}$$

(ожидается от $1/d^2$: +2.5)

Отсутствует избыток в 3-Л, как ожидалось для LMA !!

SAGE (168 runs): разница зима минус лето в скорости захвата в SAGE

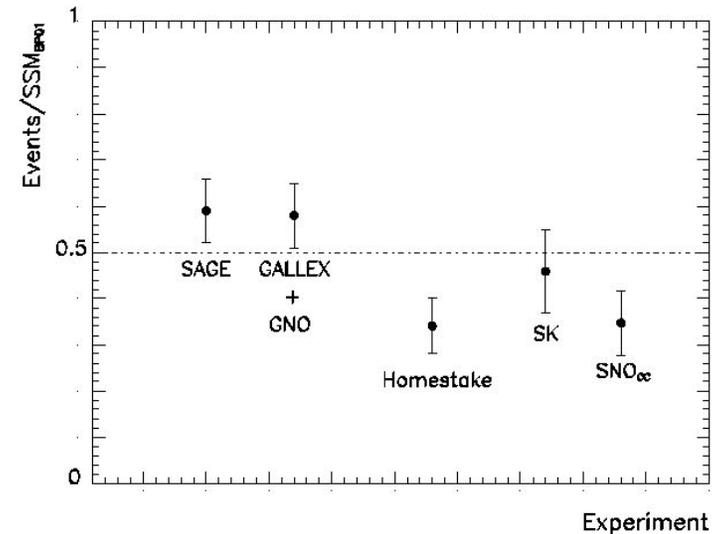
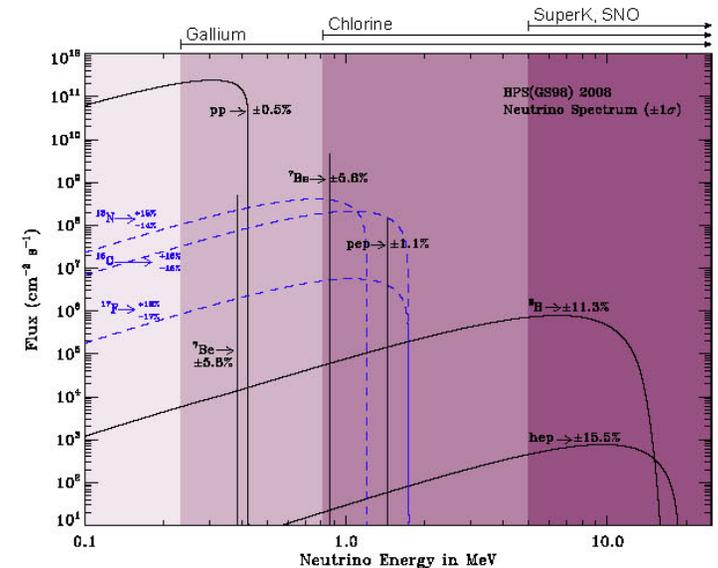
$$R_W - R_S = 5.8^{+6.2}_{-6.1} \text{ SNU}$$

где установленная неопределенность только статистическая. Для этого расчета лето определялось как $\pm 1/4$ -часть года, центрированная по 21 июню, а зима как остаток года.

$R_W - R_S$, исогласуется с нулем, указывая на то, что не существует в измерениях на галлии не существует заметной разницы между скоростями захвата день и ночь, как это ожидалось в недавно определенных значениях параметров нейтринных осцилляций

The solar neutrino problem

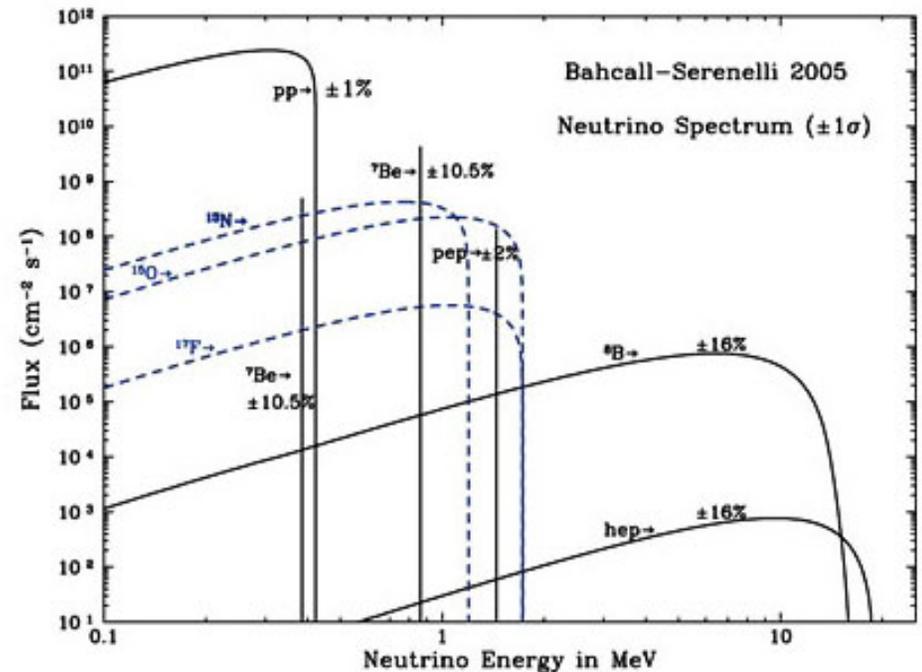
- Nuclear reactions in the core of the Sun produce *electron neutrinos*;
- during the last 40 years, a number of underground experiments has measured their flux in different energy windows;
- it is found that ALL the experiments observe a deficit of about **30 – 60%**;
- the deficit is NOT the same for all the experiments, hence the effect is **energy dependent**.
- it is **not possible** to reconcile the data with the Standard Solar Model (SSM) by simply readjusting the parameters of the model;
- solution: neutrino $\nu_e \rightarrow \nu_{\text{active}}$ oscillations;
- Effect well understood \Rightarrow **PROBLEM SOLVED.**



Solar Neutrinos: What's Known

Putting It All Together

- ${}^8\text{B}$ solar ν well studied
 - by Super-K and SNO
- there are good data on pp solar ν 's from the Ga experiments
 - must determine contribution of ${}^8\text{B}$ and ${}^7\text{Be}$, subtract, and you get pp from the Ga experiments
- Borexino has measured the ${}^7\text{Be}$ flux

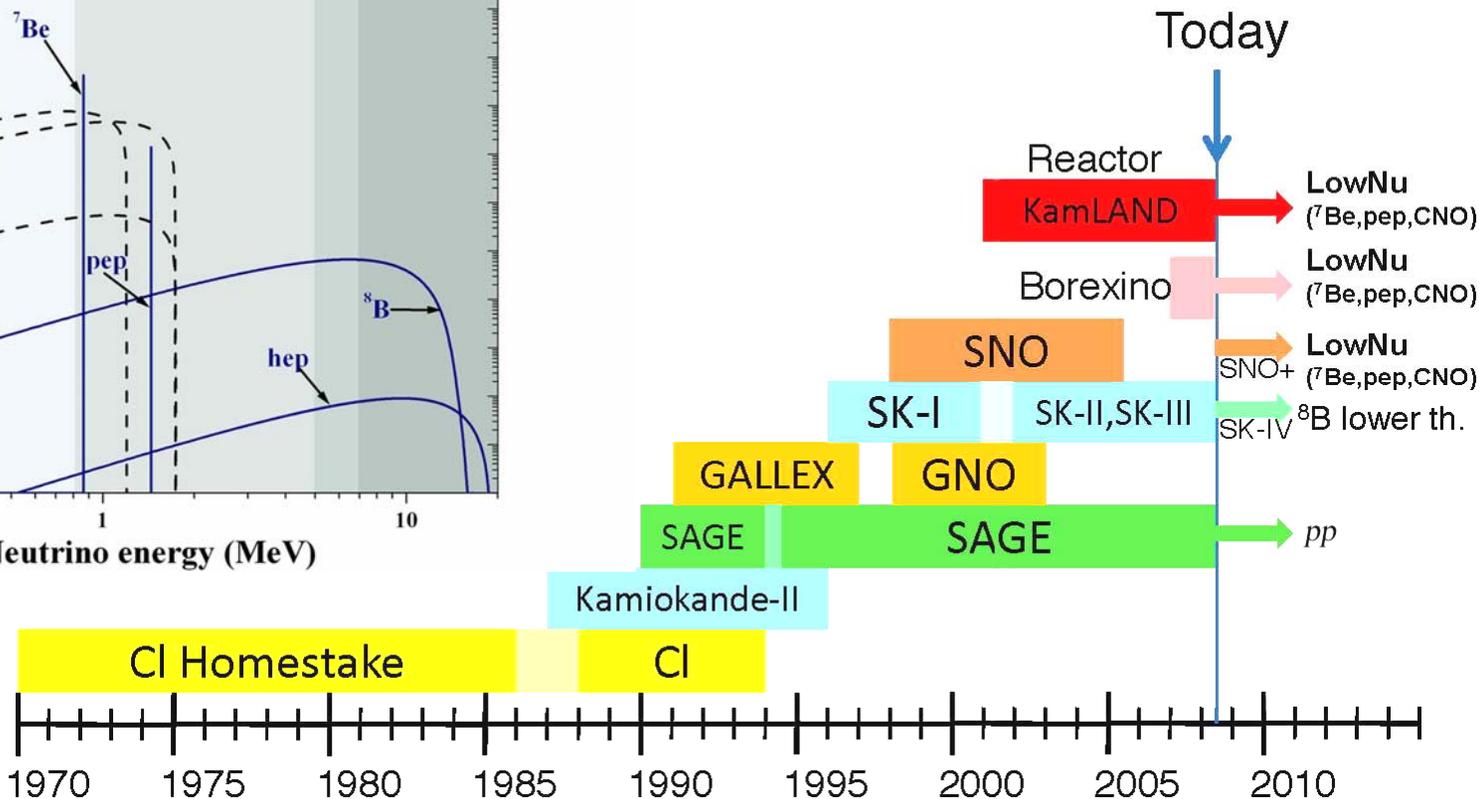
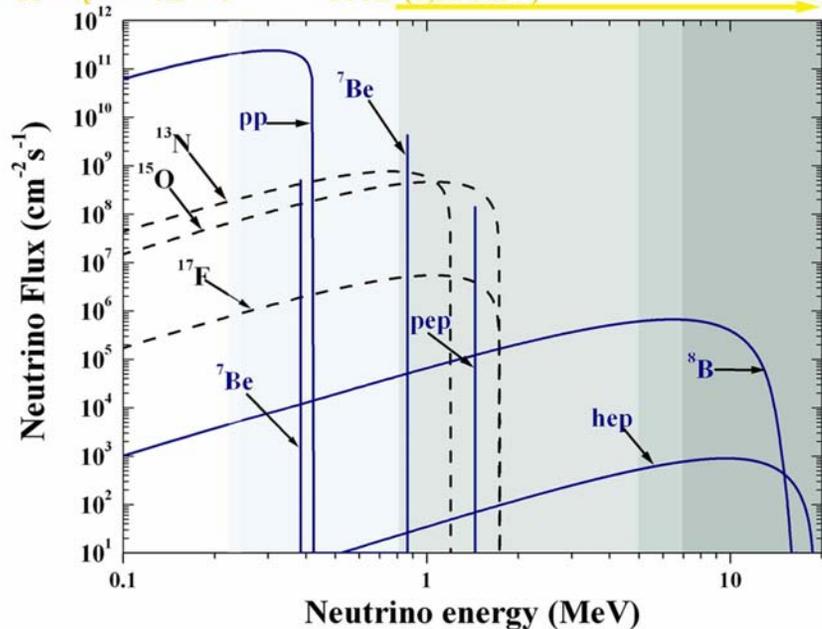


***pep* and *CNO* solar neutrinos are the next targets and SNO+ aims to detect these**



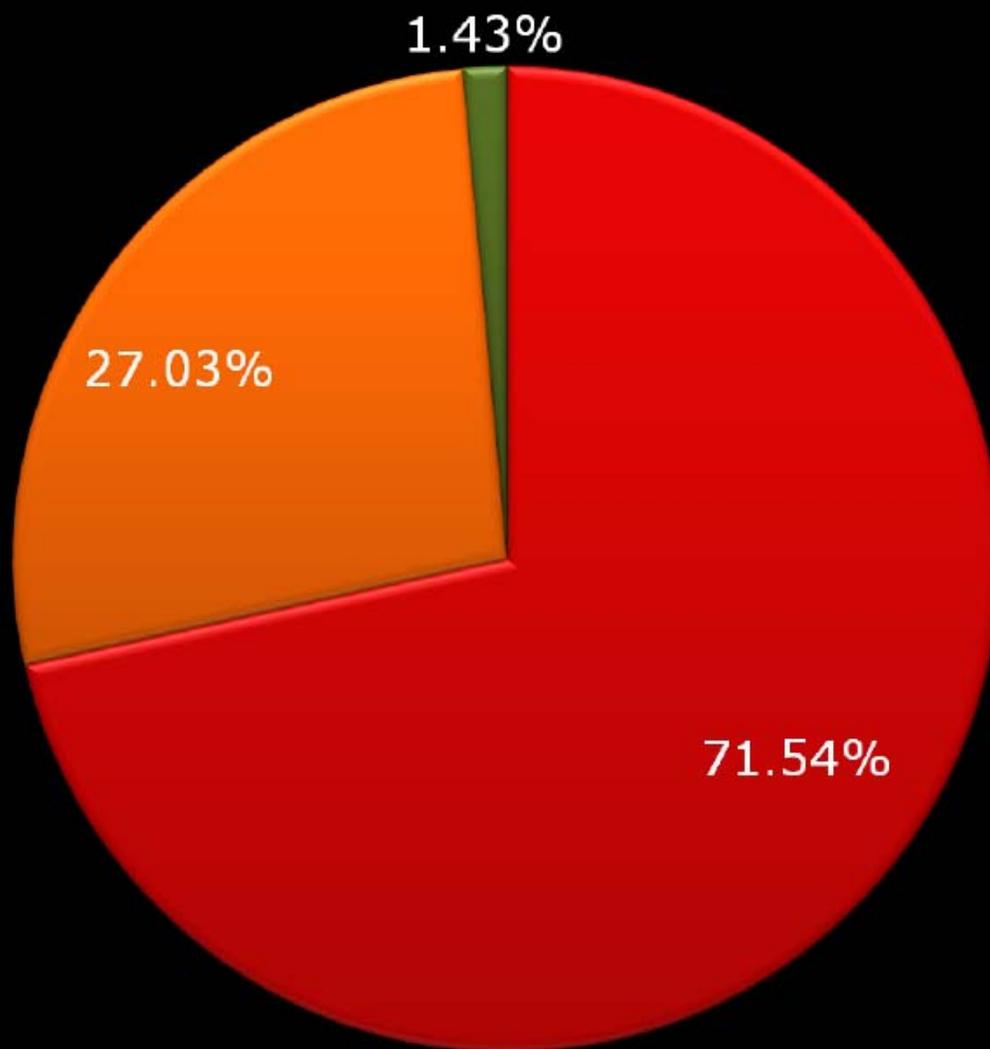
40 years of solar neutrino mystery

ν_e	BOREXINO (0,25 MeV)	$0,63 \pm 0,19$
ν_e, CC, NC	SNO (5,0 MeV)	$0,90 \pm 0,08$
ν_e	SuperK (5,0 MeV)	$0,406 \pm 0,09$
${}^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$	Ga-Ge (0,23 MeV)	$0,50 \pm 0,05$
ν_e	Kamiokande II (7,0 MeV)	$0,48 \pm 0,08$
${}^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$	Cl-Ar (0,81 MeV)	$0,30 \pm 0,07$



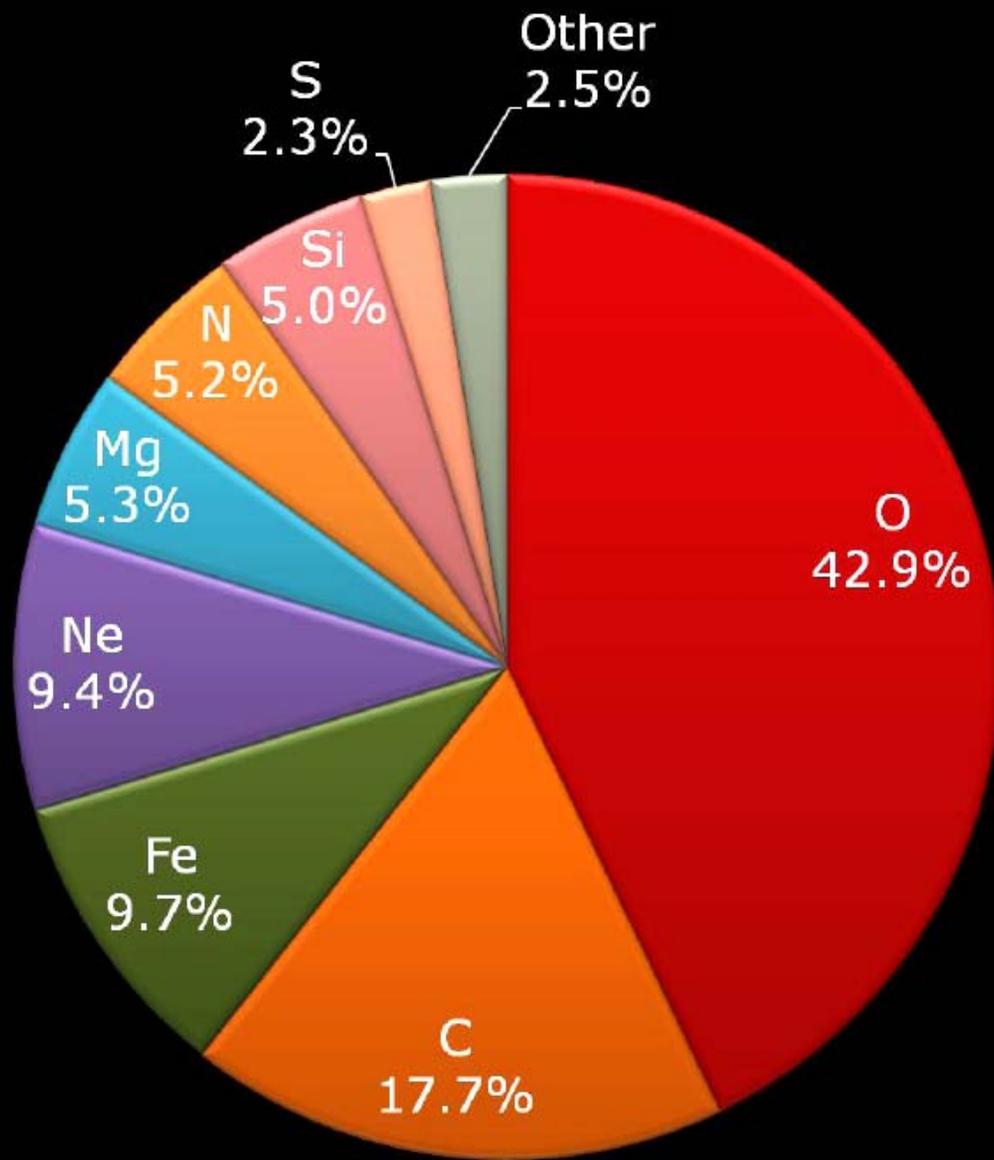
Abundances

Protosolar
X, Y, Z



- H
- He
- Z

Metallicity Z



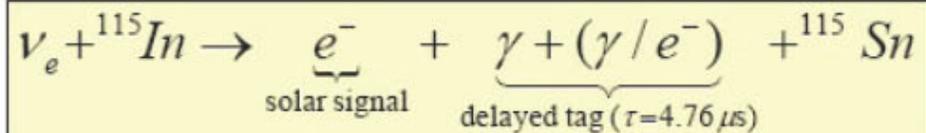
Нейтрино и содержание тяжелых элементов в Солнце

- Одним из фундаментальных вкладов Стандартной Солнечной Модели является возможность исследования содержания в Солнце всех элементов выше гелия.
- Стандартная Солнечная Модель, основанная на модели со старым (высоким) содержанием тяжелых элементов (Grevesse и Sauval), (Space Sci.Rev.85, 161(1998) хорошо согласуется, в пределах 0.5%, с величиной скорости звука на Солнце, измеренной в гелиосейсмологии.
- Новейшая работа Asplund, Grevesse и Sauval (Nucl.Phys.A 777(2006) указывает на понижение содержания тяжелых элементов примерно в два раза. Этот результат разрушает согласие с гелиосейсмологией. Возможно прежнее согласие с высоким уровнем metallicity было случайным?
- Решению этой проблемы могут помочь измерения солнечных нейтрино от ${}^7\text{Be}$ (несовпадение 12%) и от CNO цикла (несовпадение 50-60%).
- Особенно прямое измерение нейтрино от CNO цикла могло бы разрешить эту полемику вокруг Стандартной Солнечной Модели.

Future Experiments

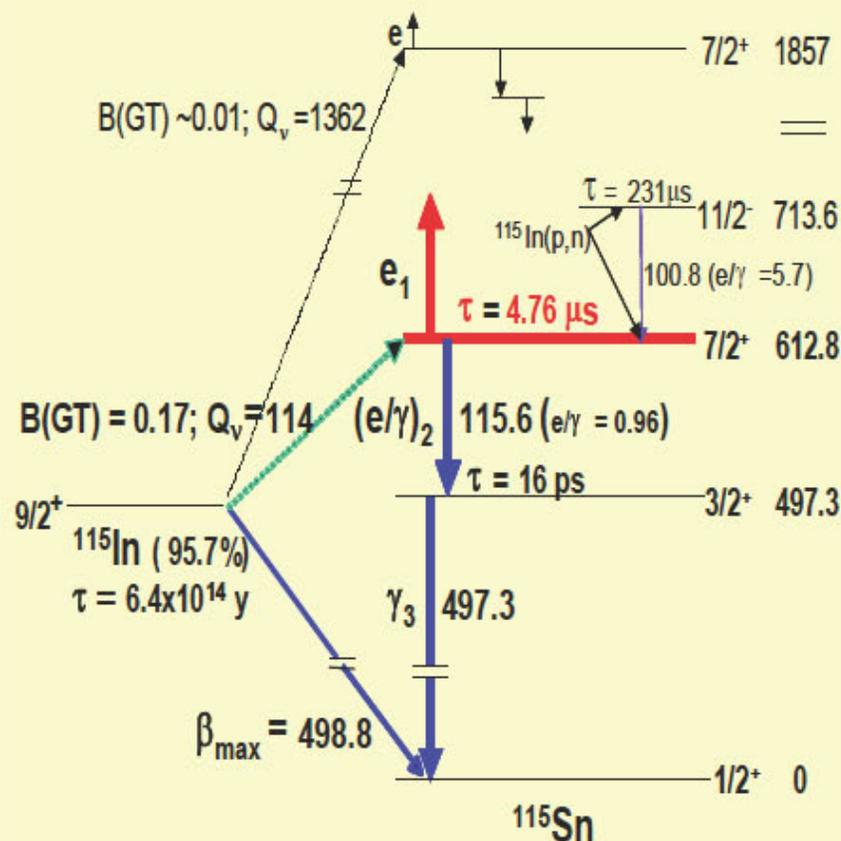
- | | |
|---|--------------------|
| <input type="checkbox"/> charged-current reactions | principal focus |
| ■ LENS (In) [R&D and prototype] | <i>pp</i> |
| ■ MOON (Mo) [small-scale R&D] | <i>pp</i> |
| <input type="checkbox"/> neutrino-electron scattering | |
| ■ KamLAND [purified, analyzing data] | ${}^7\text{Be}$ |
| ■ SNO+ [under construction] | <i>pep+CNO</i> |
| ■ CLEAN [building DM prototype] | <i>pp</i> |
| ■ XMASS [building DM prototype] | <i>pp</i> |
| ■ LENA [R&D] | <i>pep+CNO+hep</i> |
-

LENS – Low Energy Neutrino Spectroscopy



40 *pp* events/(year·ton of In)
includes event tag efficiency

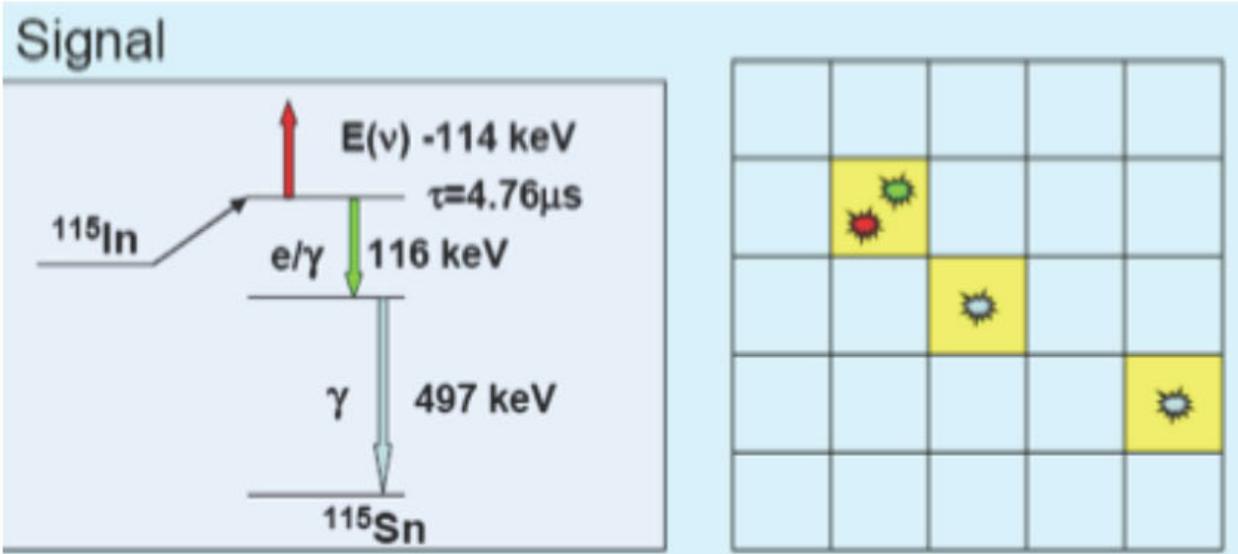
The Indium Low Energy Neutrino Tag



- CC measurement of *pp* flux using an 8% In-loaded scintillator
- suppress ${}^{115}\text{In}$ β^- background
 - 79×10^{11} backgrounds/(yr·ton of In)
 - use spatial event topology
 - use coincidence time
 - β^- energy < 500 keV
 - tagged sum = 613 keV
- requires neutrino source calibration of CC cross section*
- Mini-LENS being built: 125 L of scintillator (1/1000 of LENS)

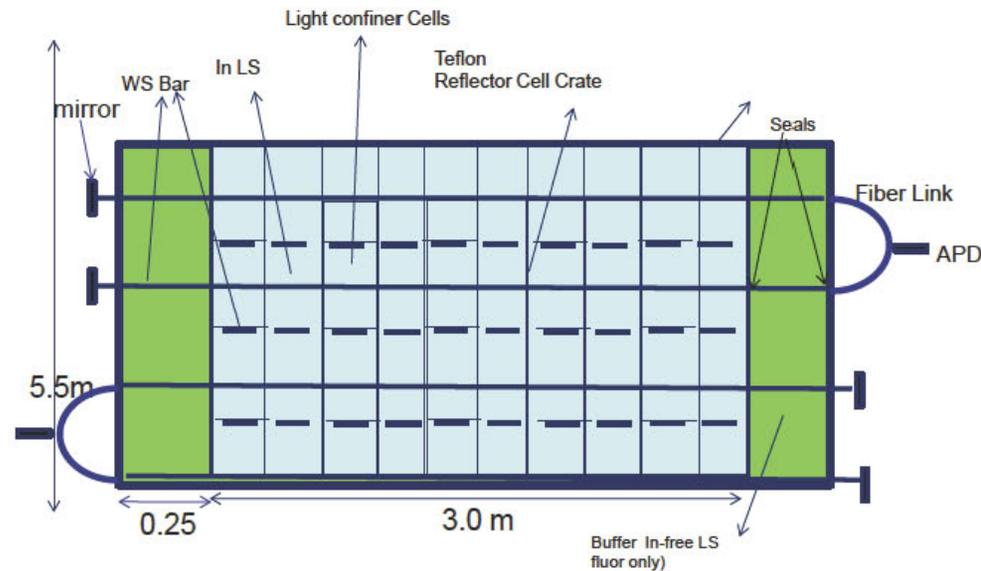
*propose to use Borexino ${}^7\text{Be}$ ν -e to calibrate CC cross section on indium

LENS Novel Lattice Readout



Lens NUFu Chamber—3.5m3.5mx5.5m (including side buffer--~10 ton Indium

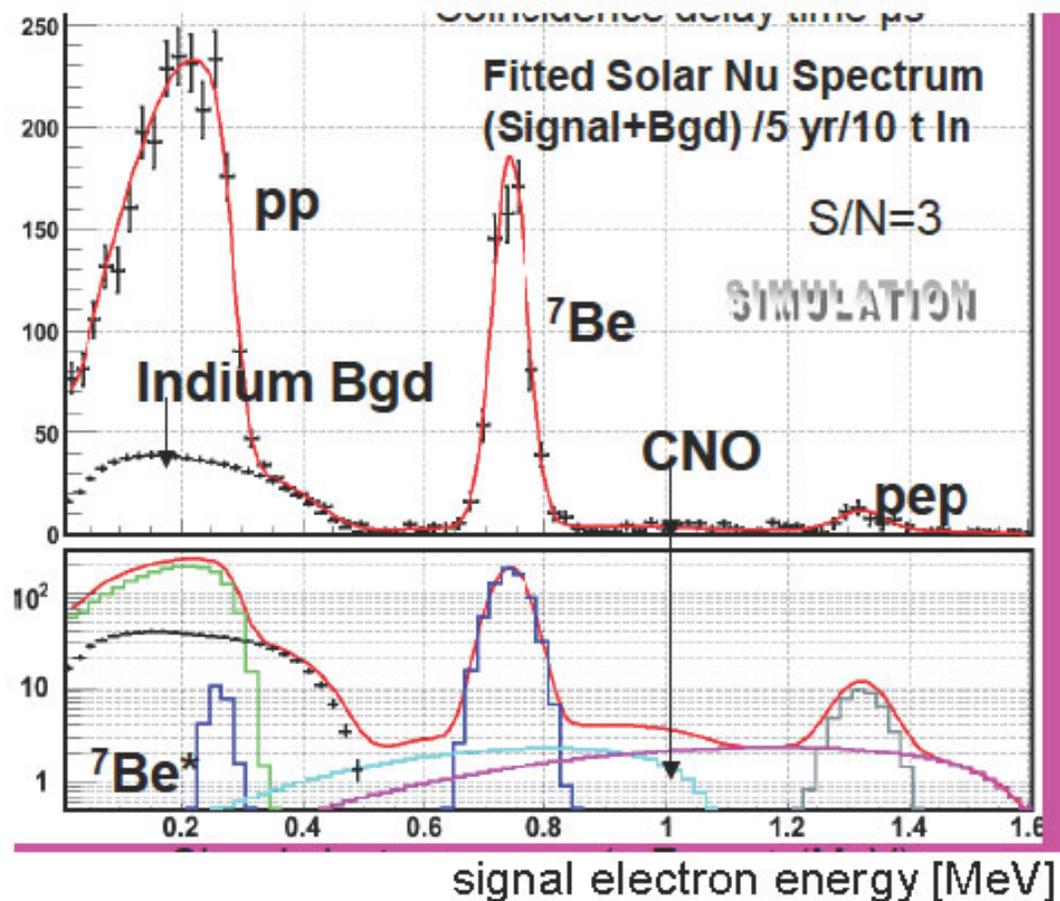
even newer readout idea under R&D



Tagged Signal → No Backgrounds

only pp suffers from the indium beta background

- clean spectroscopy of low energy solar neutrinos
- for 5 yr and 10 ton of In, the pp and ${}^7\text{Be}$ neutrinos are clearly measured
- ~2000 pp events
- ~750 ${}^7\text{Be}$
- ~150 CNO events



MOON – Molybdenum Observatory Of Neutrinos

- CC measurement of pp flux using Mo target foils

- $\nu_e + {}^{100}\text{Mo} \rightarrow {}^{100}\text{Tc} + e^-$ (threshold 168 keV)
- ${}^{100}\text{Tc}$ β decays with 16 s half-life, $Q = 3.0$ MeV

- has background from $2\nu\beta\beta$ of ${}^{100}\text{Mo}$

Reaction	Rate/yr/ton ${}^{100}\text{Mo}$
pp	120
${}^7\text{Be}$	40
pep	2.5
${}^8\text{B}$	5.1
${}^{13}\text{N}$	4.2
${}^{15}\text{O}$	6.1

9.6% natural isotopic abundance

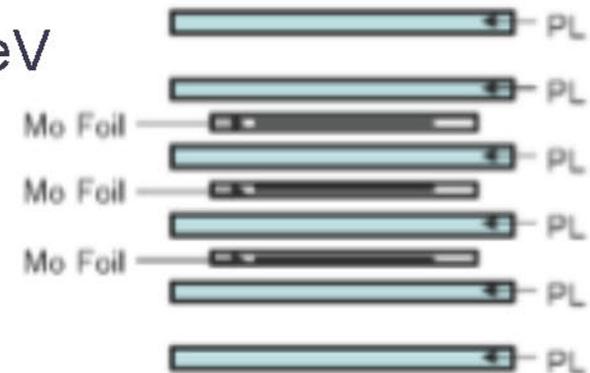
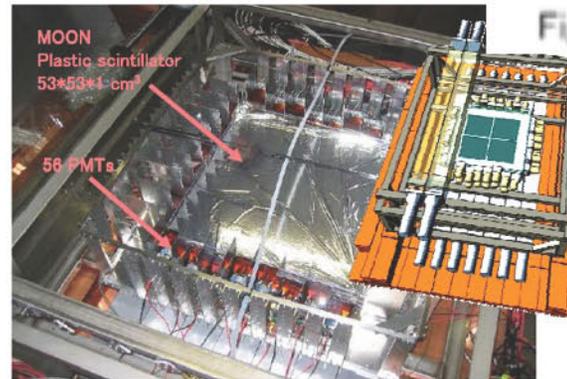


Fig. Cross section view of MOON-1



MOON-1 prototype
142 g of ${}^{100}\text{Mo}$ foil
40 mg/cm²

Elastic Scattering Experiments: CLEAN and XMASS

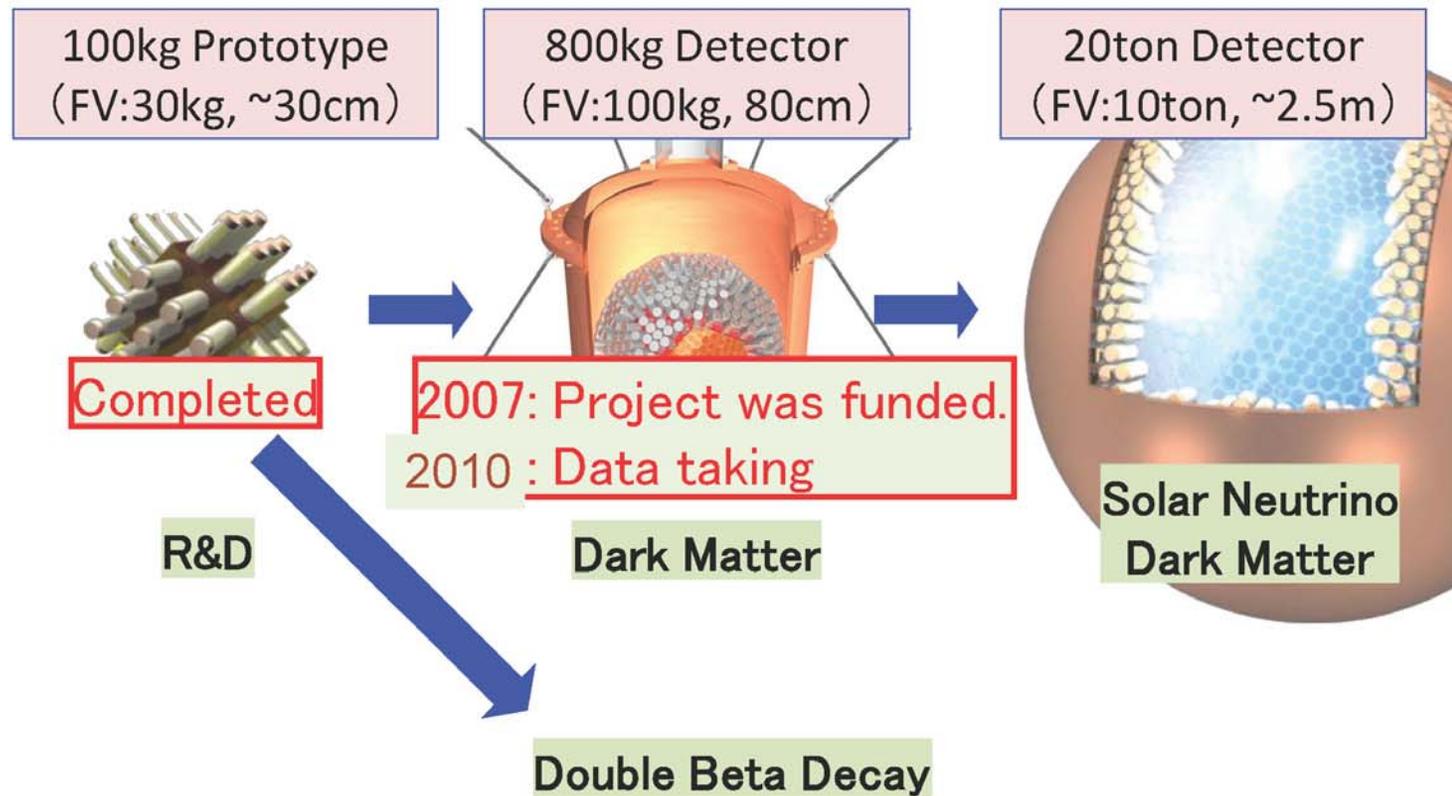
- ν -e scattering in noble liquid (scintillation) to detect pp solar neutrinos
 - these are dual purpose detectors: dark matter and solar ν
 - XMASS also double beta decay of ^{136}Xe
 - oscillated event rate: ~ 1 pp ν event/(day·ton) for 50 keV threshold
 - **main detector concept** behind each experiment
 - CLEAN: liquid neon has **no radioactive contamination**
 - XMASS: liquid xenon has **very effective self-shielding**
-

XMASS – Xenon MASSive Detector

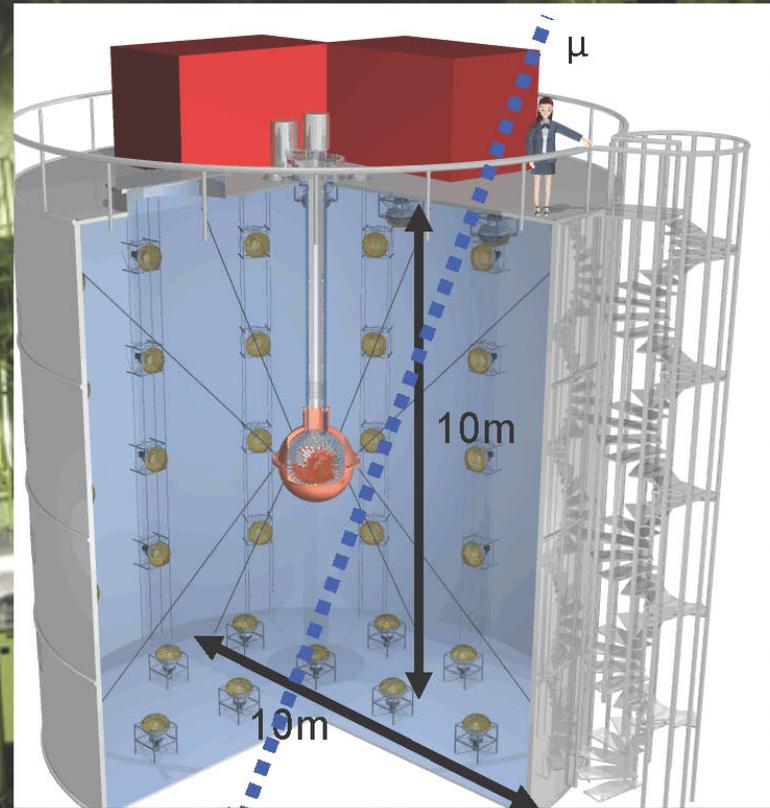


Three phases of XMASS experiment

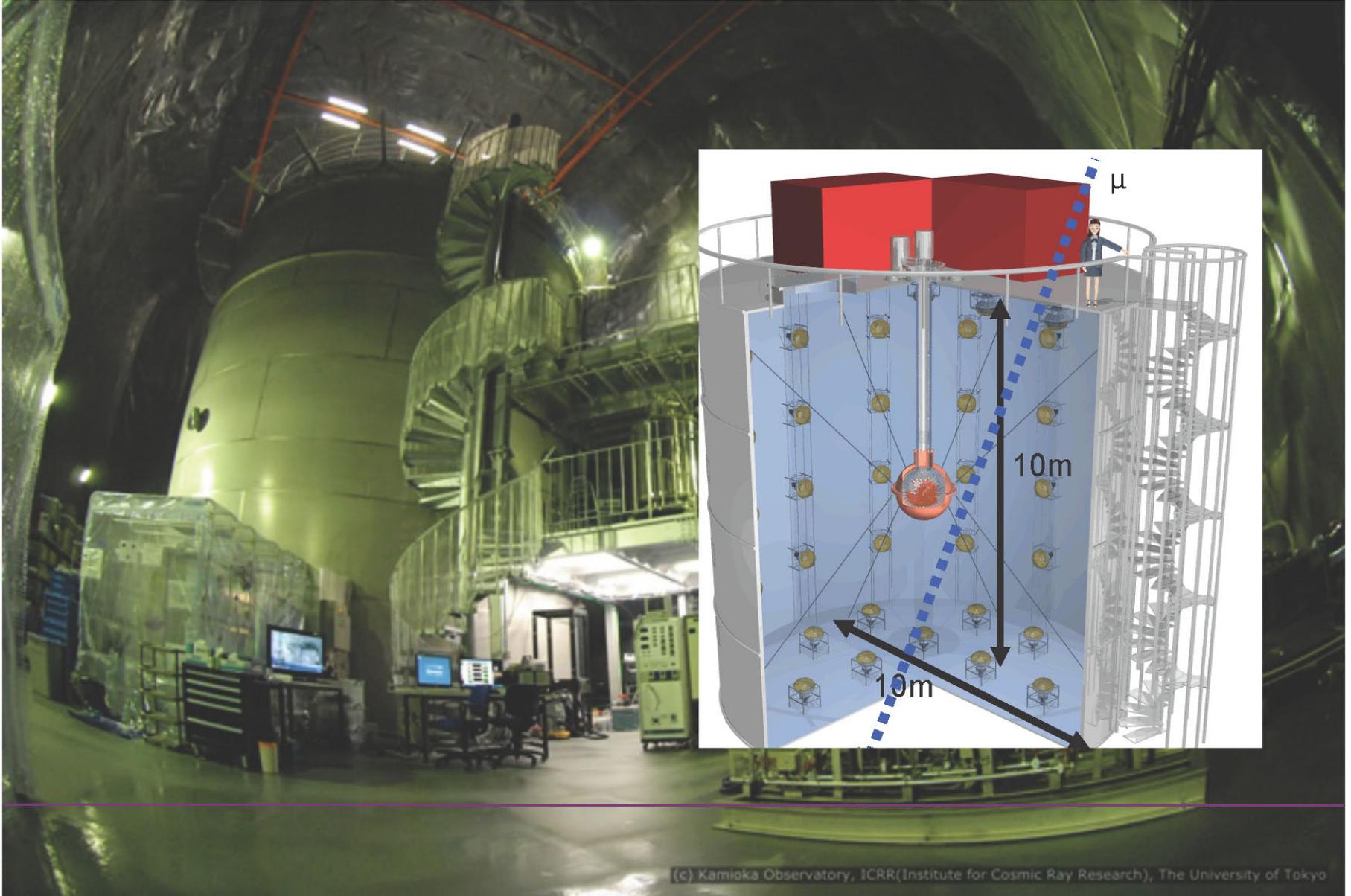
- 100 kg prototype built, operated, studied
- soon (**this week!**) turning on ~850 kg detector for dark matter
- *pp* solar neutrinos require 10 ton fiducial volume and even larger size for self-shielding



XMASS Detector in Kamioka

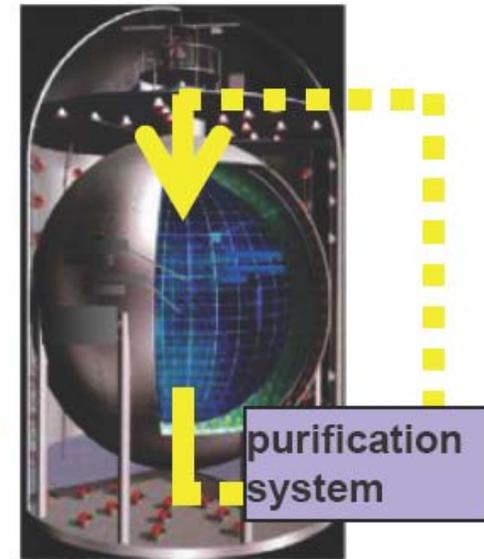
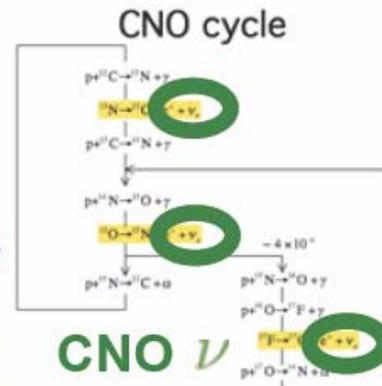
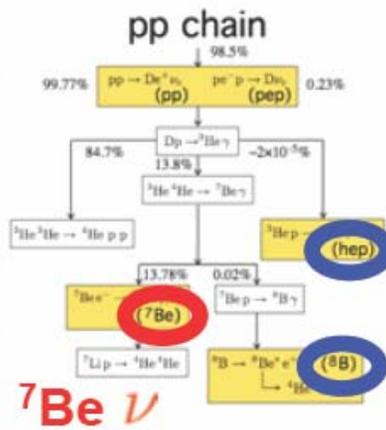
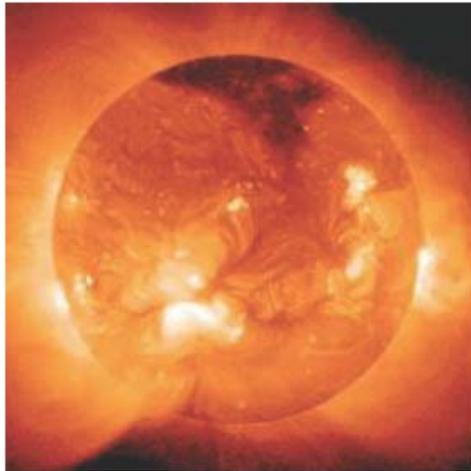


XMASS Detector in Kamioka



Solar Neutrino in KamLAND

nuclear fusion reaction in the sun



Standard Solar Model (SSM)

J.N. Bahcall and A.M. Serenelli, Astro. Phys. J. 621, 85 (2005)

Model	pp	pep	hep	⁷ Be	⁸ B	¹³ N	¹⁵ O	¹⁷ F
BP04(Yale)	5.94	1.40	7.88	4.86	5.79	5.71	5.03	5.91
BP04(Garching)	5.94	1.41	7.88	4.84	5.74	5.70	4.98	5.87
BS04	5.94	1.40	7.86	4.88	5.87	5.62	4.90	6.01
BS05(¹⁴ N)	5.99	1.42	7.91	4.89	5.83	3.11	2.38	5.97
BS05(OI) GS98	5.99	1.42	7.93	4.84	5.69	3.07	2.33	5.84
BS05(AGS,OP) AGS05	6.06	1.45	8.25	4.34	4.51	2.01	1.45	3.25
BS05(AGS,OPAL)	6.05	1.45	8.23	4.38	4.59	2.03	1.47	3.31

Test low abundance of heavy element (AGS05)

-10%

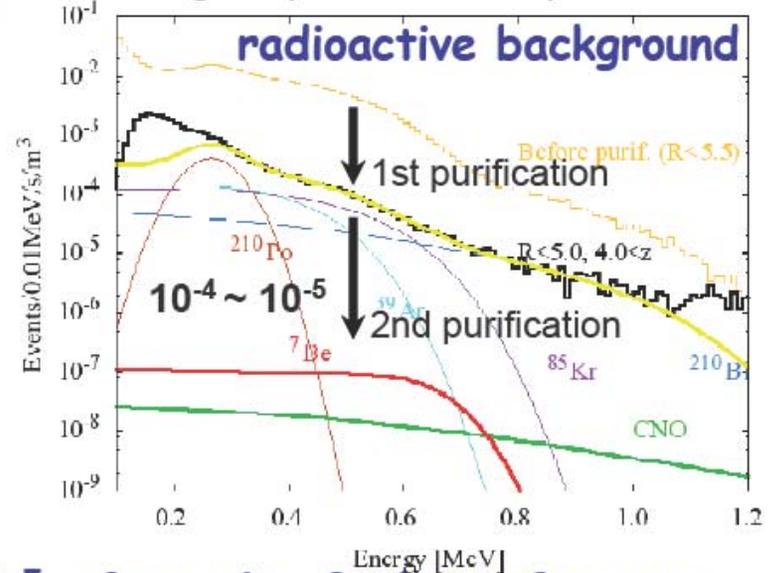
S₃₄ : 2.5%

-38%

S_{1,14} : 8.4%

Radioactive BG reduction (⁸⁵Kr) : 10⁻⁴~10⁻⁵ after the 2nd purification

singles spectra after 1st purification



LENA

Liquid Scintillator
50 kt PXE / 43kt LAB
contained in an
Inner Nylon Vessel
R = 13m, 150mm thick

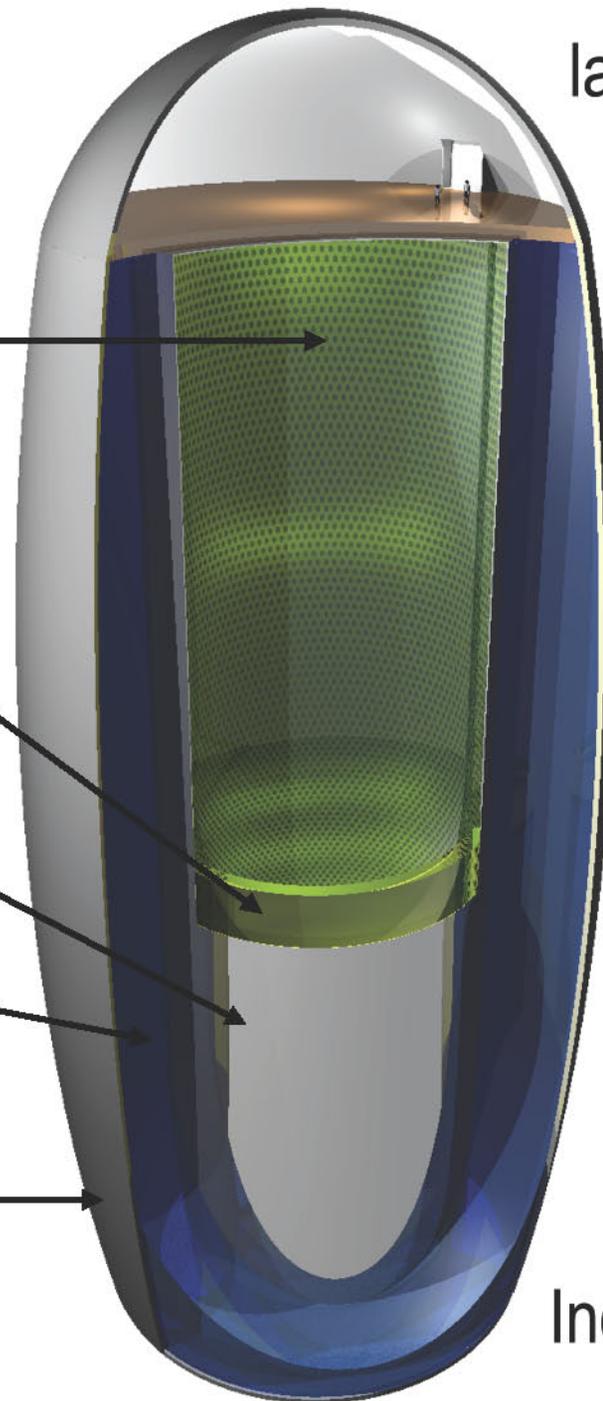
Buffer Region
Quenched scintillation, 2m thick

Steel Tank,
48,000 Pms (8")
R = 15m, h = 100m

Water Čerenkov Veto
1500 PMs, at least 2m

Egg-Shaped Cavern
about 10^8 m³

Overburden:
> 4000 mwe



large-volume multi-
purpose observatory
For Low-Energy
Neutrino Astrophysics

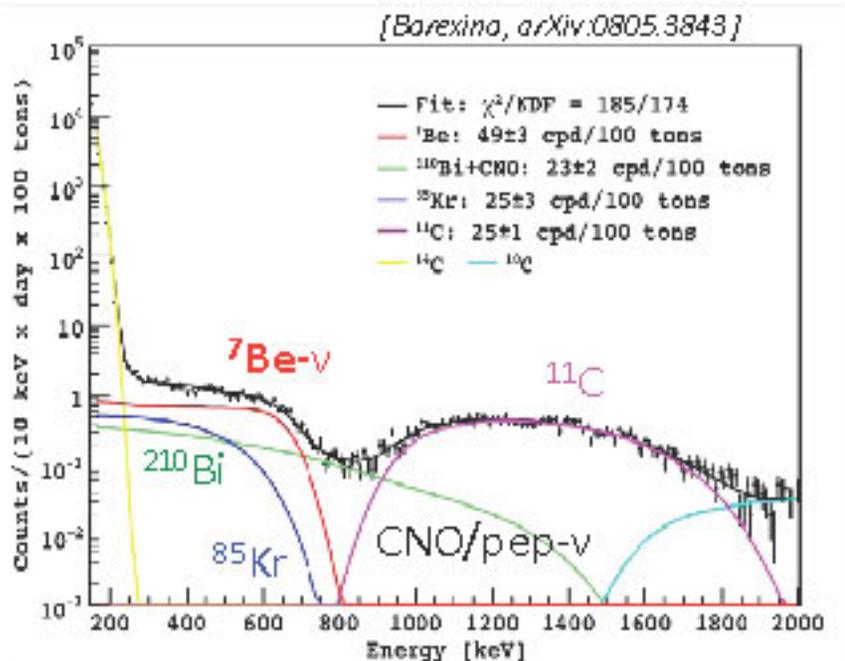
SCIENTIFIC GOALS

Nucleon Decay
Supernova neutrinos
Diffuse SN neutrinos
Geoneutrinos

Solar neutrinos

Atmospheric neutrinos
Neutrino properties by
reactors/accelerators
Indirect dark matter search

Solar Neutrinos in LENA



Detection Channel

elastic ν -e scattering, $E_{\text{th},e} > 0.2\text{MeV}$

Background Requirements

- U/Th concentration of 10^{-18}g/g (achieved in Borexino)
- shielding of $>4000\text{mwe}$ for CNO/pep- ν meas.

Scientific Motivation

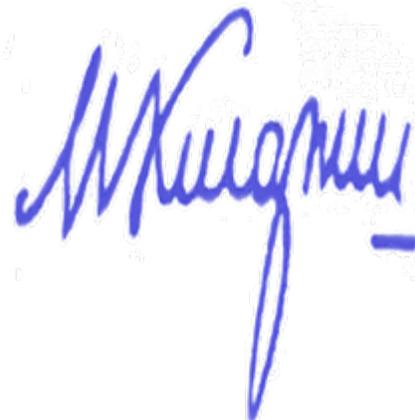
- determination of solar parameters
 - hep- ν contribution
 - total ν -luminosity via pep- ν meas.
 - CNO contribution \rightarrow discrimination of high/low metallicity solar models
- search for temporal modulations in ${}^7\text{Be}$ - ν flux (sensitivity on sub-percent level, g-modes?)
- probe the MSW effect in the vacuum transition region (${}^8\text{B}$, pep- ν) \rightarrow new osc. physics
- search for $\nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ conversion

Channel	Source	Neutrino Rate [d^{-1}]	
		BPS08(GS)	BPS08(AGS)
νe	pp	24.92 ± 0.15	25.21 ± 0.13
	pep	365 ± 4	375 ± 4
	hep	0.16 ± 0.02	0.17 ± 0.03
	${}^7\text{Be}$	4984 ± 297	4460 ± 268
	${}^8\text{B}$	82 ± 9	65 ± 7
	CNO	545 ± 87	350 ± 52
${}^{13}\text{C}$	${}^8\text{B}$	1.74 ± 0.16	1.56 ± 0.14

Rates above threshold, assuming a conservative fiducial mass of 18kt

Я думаю, что помимо общего своего назначения служить инструментом познания природы и общества, помимо своей практической роли, наука есть еще показатель уровня развития страны.

Без большой науки не может быть высокого уровня решения грядущих задач.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "М. И. Мигунов". The signature is written in a cursive style with a horizontal line at the end.

- В заключение хочу выразить благодарность многим моим коллегам из научного сообщества, материалы и слайды которых я использовал в этой лекции