

Нейтринная астрофизика

Нейтрино

- Гипотеза Паули в 1930

$$\beta^+ : p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

- Зарегистрированы в 1953 (Рейнс, Коуэнн)
- Большая проникающая способность
- Сечения от 10^{-44} до 10^{-34} см²

Виды нейтрино

- Космологические (5×10^{-4} эВ)
- Звездные (десятки М эВ)
- Высоких энергий (>1 ГэВ)

Космологические нейтрино

- Через 1 секунду после большого взрыва нейтринный газ отделился от вещества
- $T \sim 2 \text{ К}$ (300 – 400 нейтрино/см³)
- Нет метода регистрации
- Из космологических оценок ограничение на сумму масс

$$\sum_i m_{\nu_i} < 40 \text{ эВ}$$

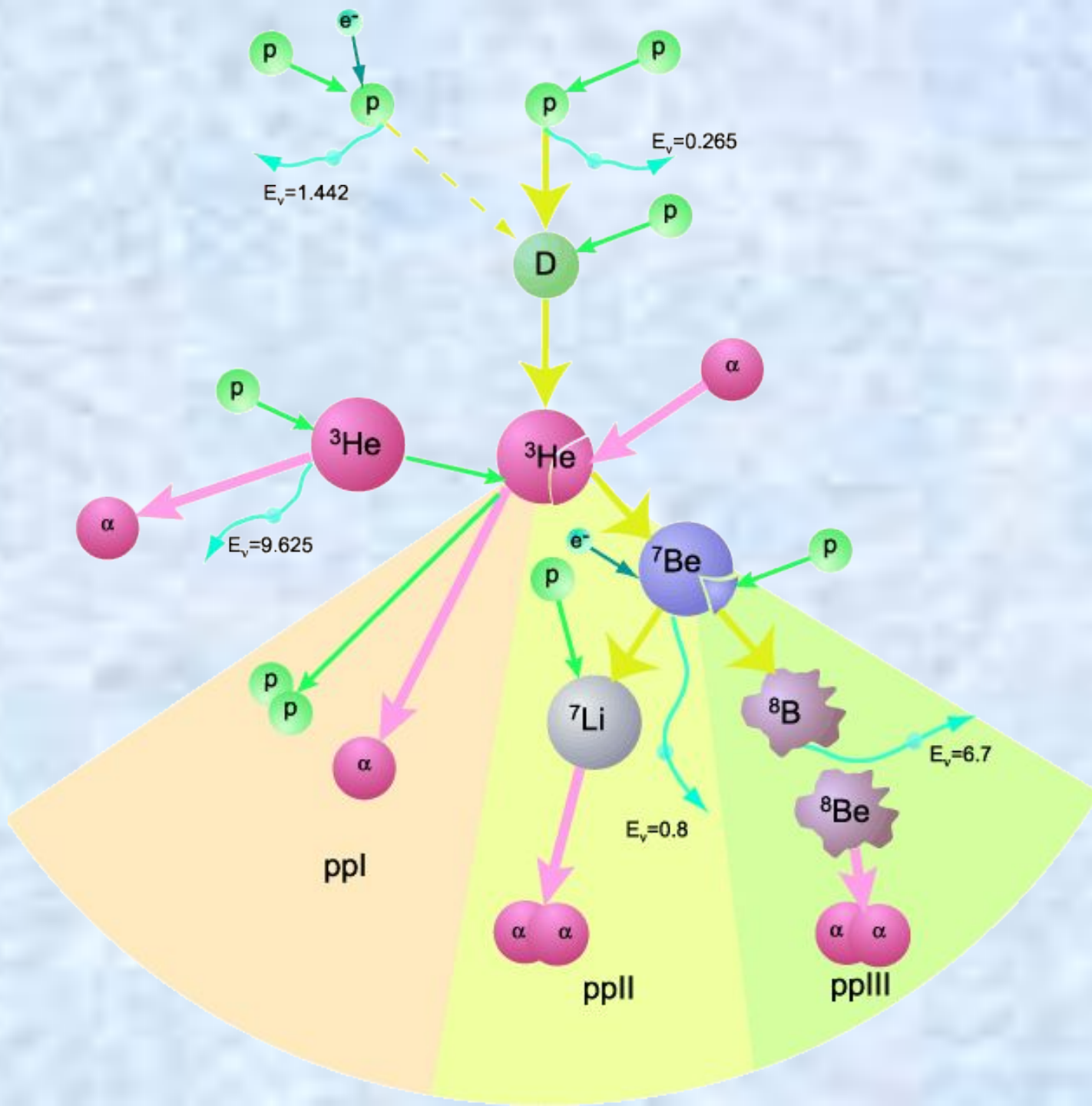
Звездные нейтрино

1. Солнечные нейтрино

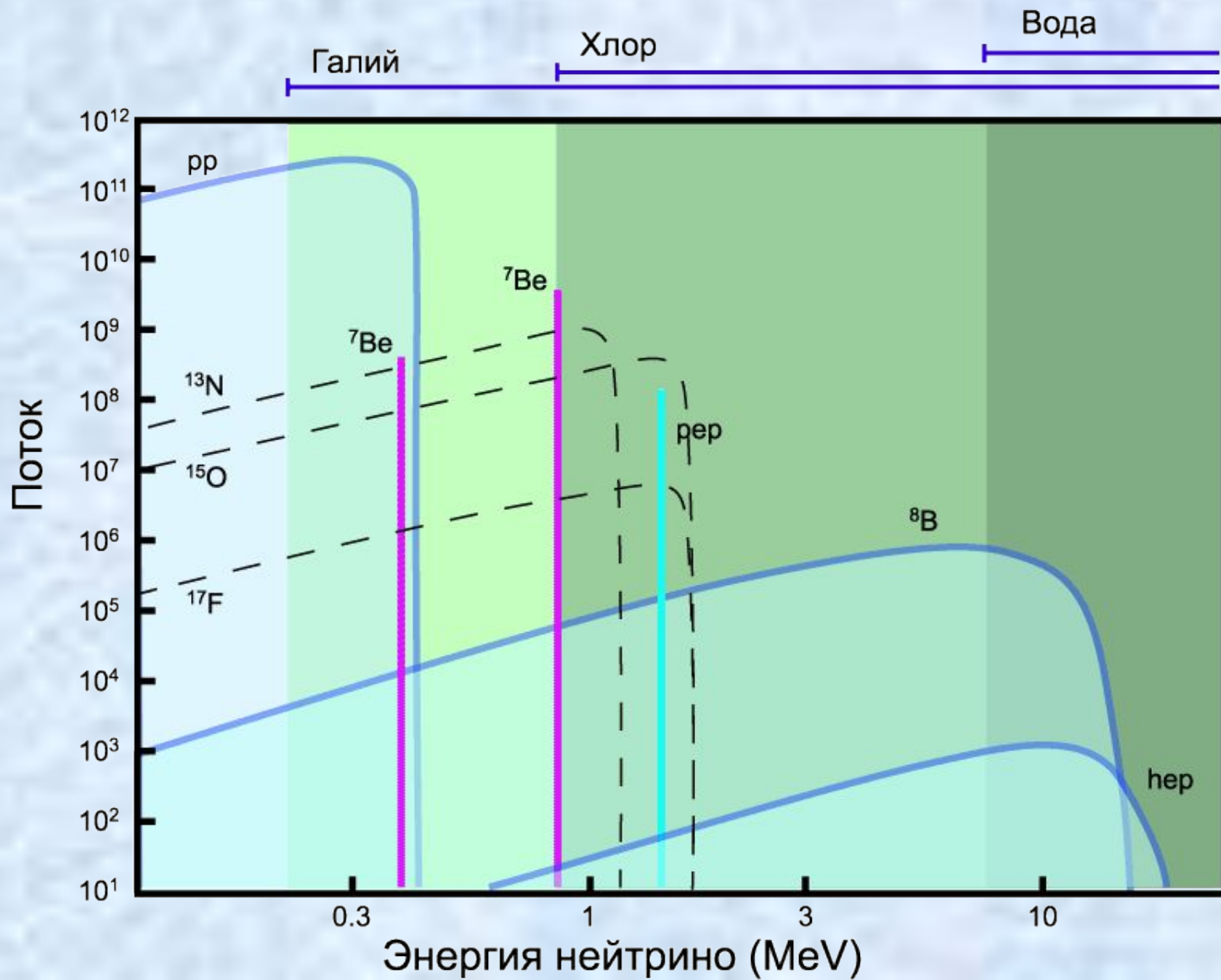
$$4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^- + 2\nu_e \quad Q=26.7 \text{ МэВ}$$

$$L_{\text{sun}} = 3.86 * 10^{33} \text{ эрг/с}$$

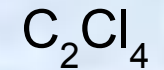
$$N_{\nu} = 2 * L_{\text{sun}} / Q = 1.8 * 10^{38} \text{ нейтрино/с}$$



Области чувствительности различных типов детекторов



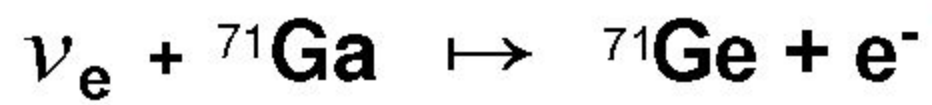
Установка Дэвиса



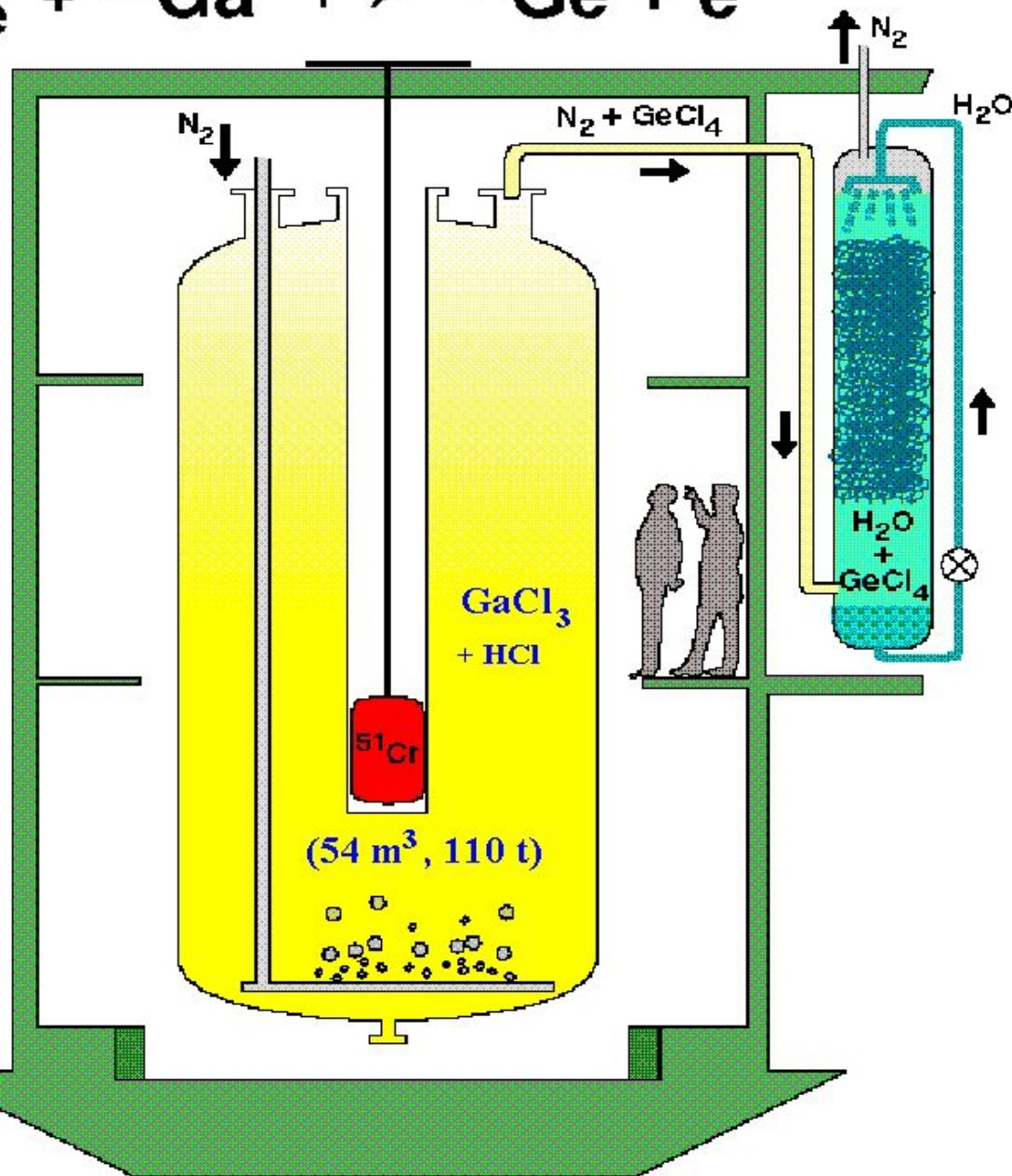
$V = 380$ тыс.
литров

Результат:
 $1,8 \pm 0,3$ SNU

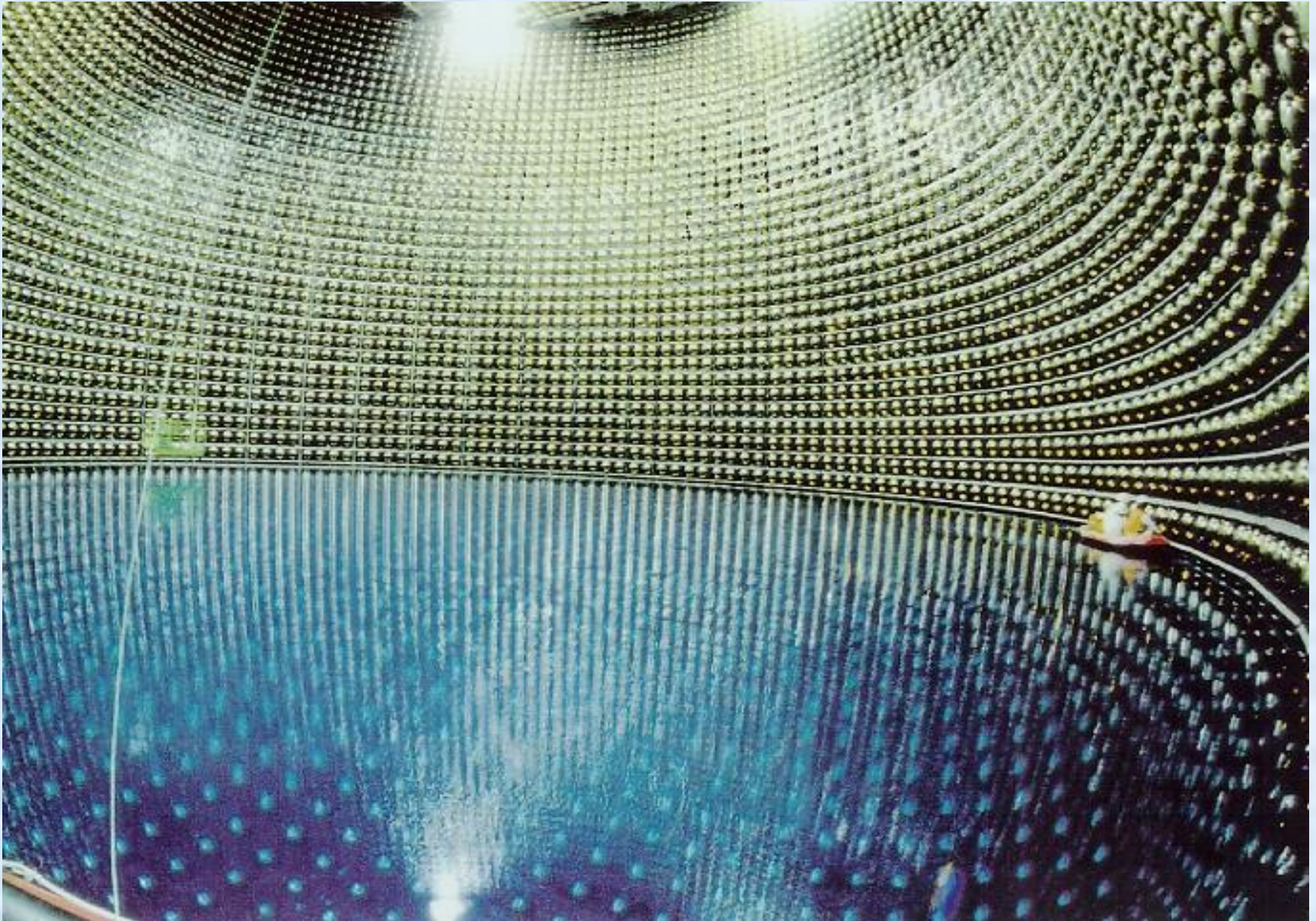
Теория:
 $7,6 \pm 3,3$ SNU



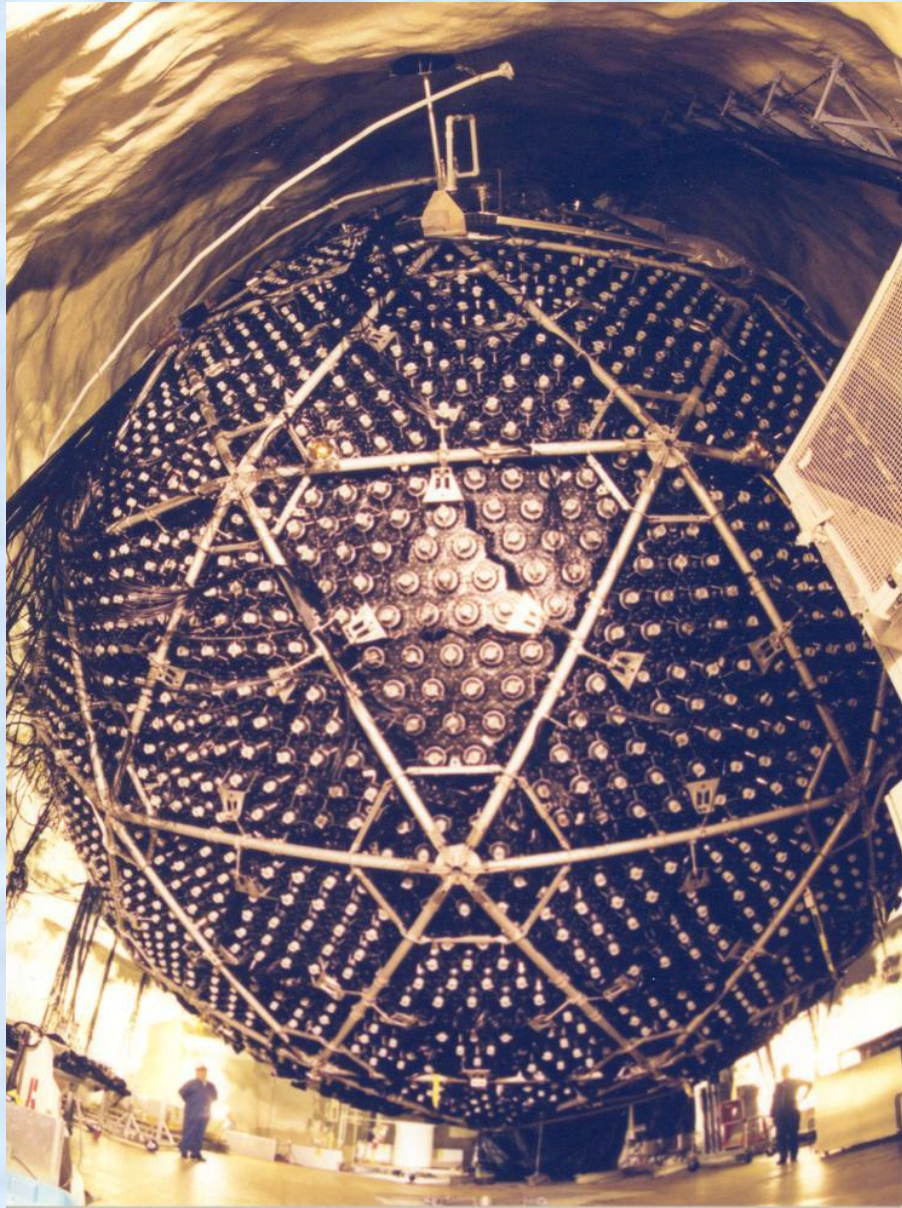
GALLEX



Super-Kamiokande



SNO



Kamiokande:

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

SNO:

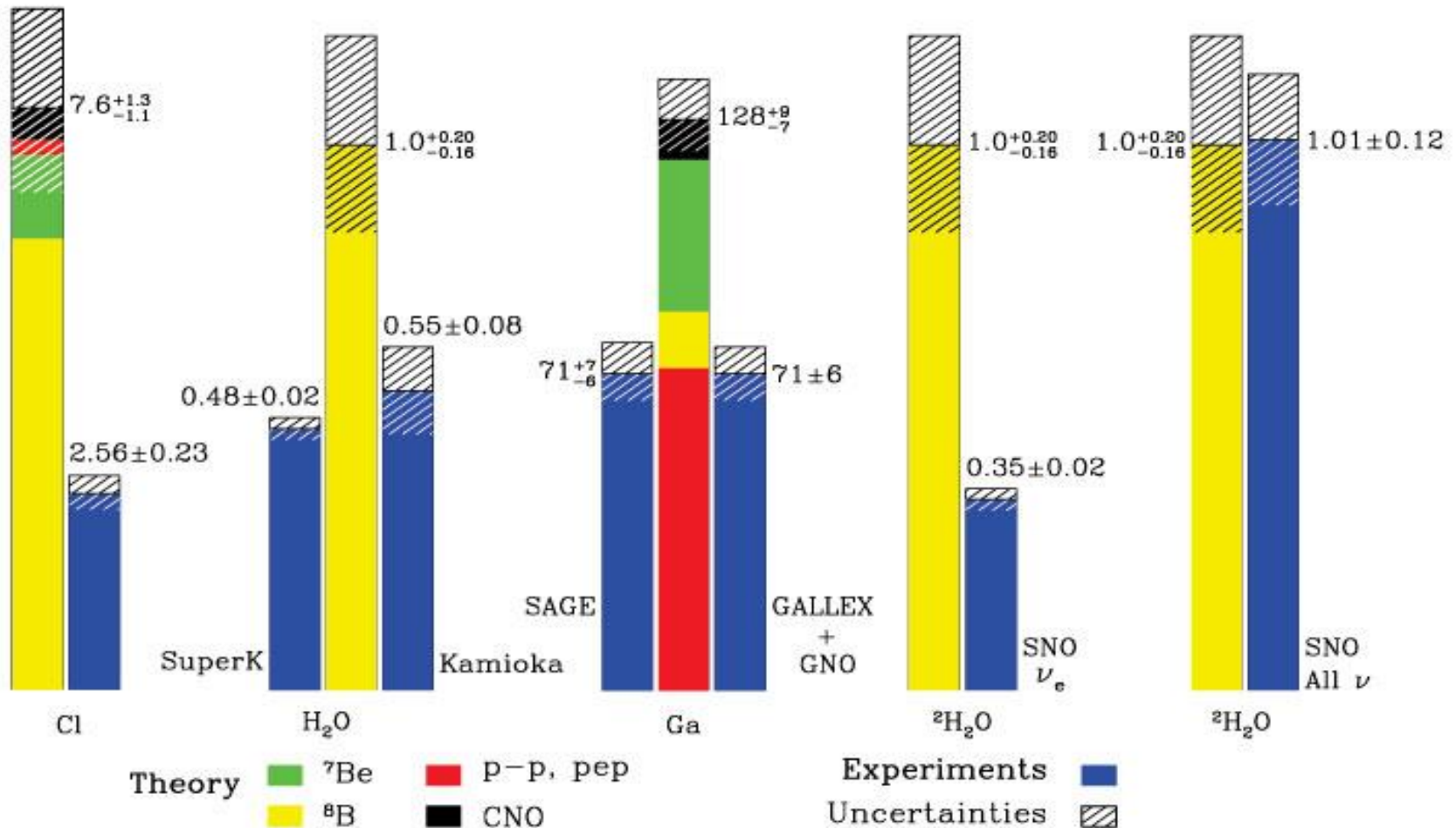
$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- .$$

Результаты различных экспериментов

Experiment	measured flux	ratio exp/BP98	threshold energy	Years of running
Homestake	$2.56 \pm 0.16 \pm 0.16$	$0.33 \pm 0.03 \pm 0.05$	0.814 MeV	1970-1995
Kamiokande	$2.80 \pm 0.19 \pm 0.33$	$0.54 \pm 0.08^{+0.10}_{-0.07}$	7.5 MeV	1986-1995
SAGE	$75 \pm 7 \pm 3$	$0.58 \pm 0.06 \pm 0.03$	0.233 MeV	1990-2006
Gallex	$78 \pm 6 \pm 5$	$0.60 \pm 0.06 \pm 0.04$	0.233 MeV	1991-1996
Super-Kamiokande	$2.35 \pm 0.02 \pm 0.08$	$0.465 \pm 0.005^{+0.016}_{-0.015}$ (BP00)	5.5 (6.5) MeV	1996-
GNO	$66 \pm 10 \pm 3$	$0.51 \pm 0.08 \pm 0.03$	0.233 MeV	1998-
SNO	$1.68 \pm 0.06 \pm^{+0.08}_{-0.09}$ (CC) $2.35 \pm 0.22 \pm 0.15$ (ES) $4.94 \pm 0.21^{+0.38}_{-0.34}$ (NC)		6.75 MeV	1999-

Результаты экспериментов

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



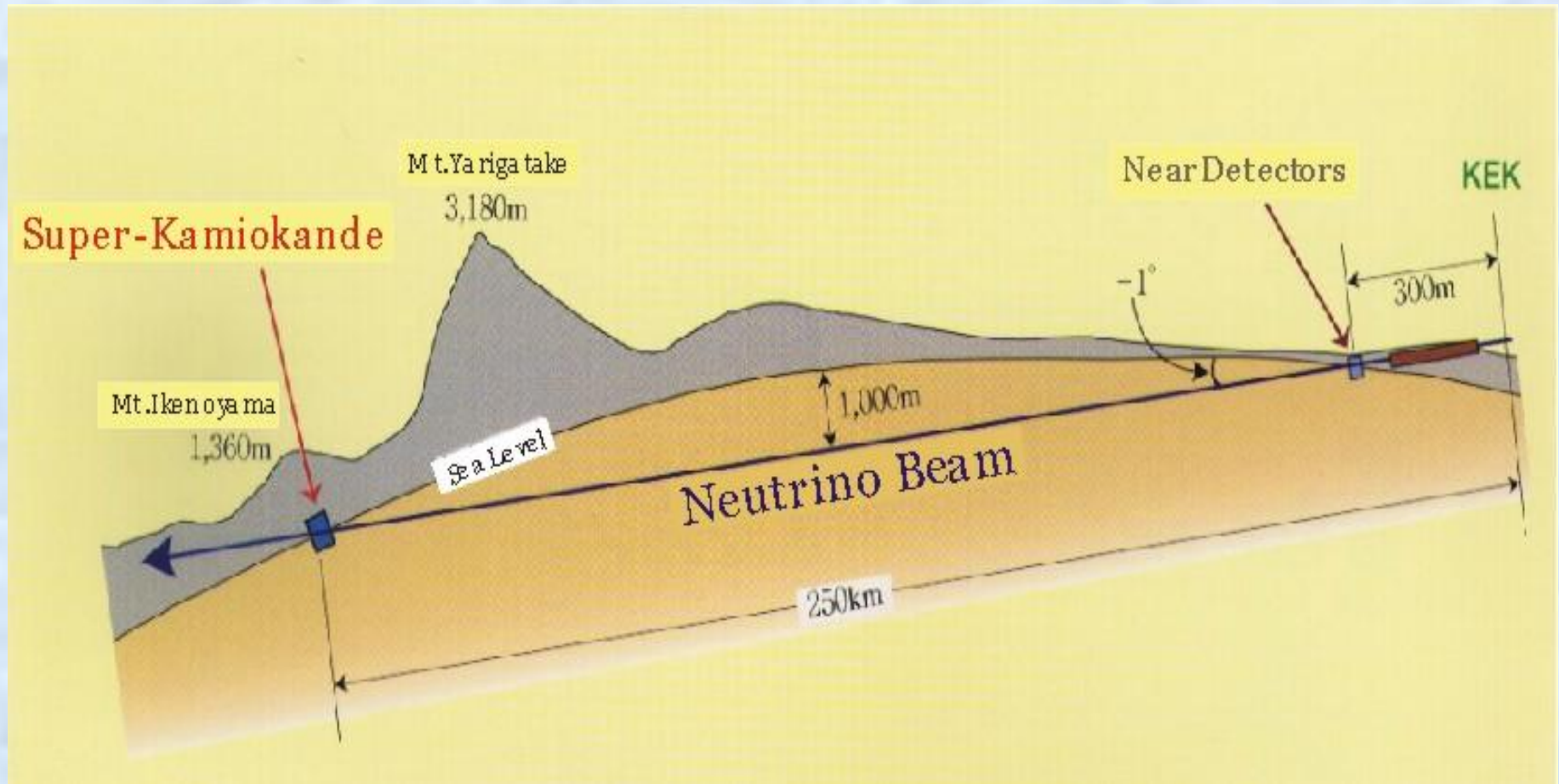
Теория осцилляций

$$\nu_m u = \nu_1 \sin \alpha + \nu_2 \cos \alpha$$

$$\nu_e = \nu_1 \cos \alpha - \nu_2 \sin \alpha$$

$$l = \frac{4\pi\hbar\varepsilon}{c^3(m_1^2 - m_2^2)} = 2,5 \cdot 10^2 \frac{1}{m_1^2 - m_2^2}$$

Эксперимент K2K



Поиски осцилляций в различных проектах

Experiment	Location	Baseline	Observation	Status	Years
Gösgen	Switzerland	37.9 m, 45.9 m, 64.7 m	<u>no osc</u>	finished	81-85
Bugey	France	15 m, 40 m, 95 m	<u>no osc</u>	finished	1981- 1994
Krasnoyarsk	Russia	57 m, 57.6 m, 231.4 m	<u>no osc</u>		19??
<u>Chooz</u>	Ardenne, France	1 km	$O/E = 0.98 \pm 0.4$ ± 0.4	finished	1997- 1998
<u>Palo Verde</u>	Arizona, U.S.A.	750 m	<u>$O/E = 1.01 \pm$ 0.024 ± 0.053</u>	data taking ended	1998- 2000 (July)
KamLAND	Japan	180 km	<u>$O/E = 0.611 \pm$ 0.085 ± 0.041</u>	taking data	2001-
San Onofre	U.S.A.	about km		rejected	

Звездные нейтрино.

2. Нейтрино от коллапсирующих звезд

$$e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$$

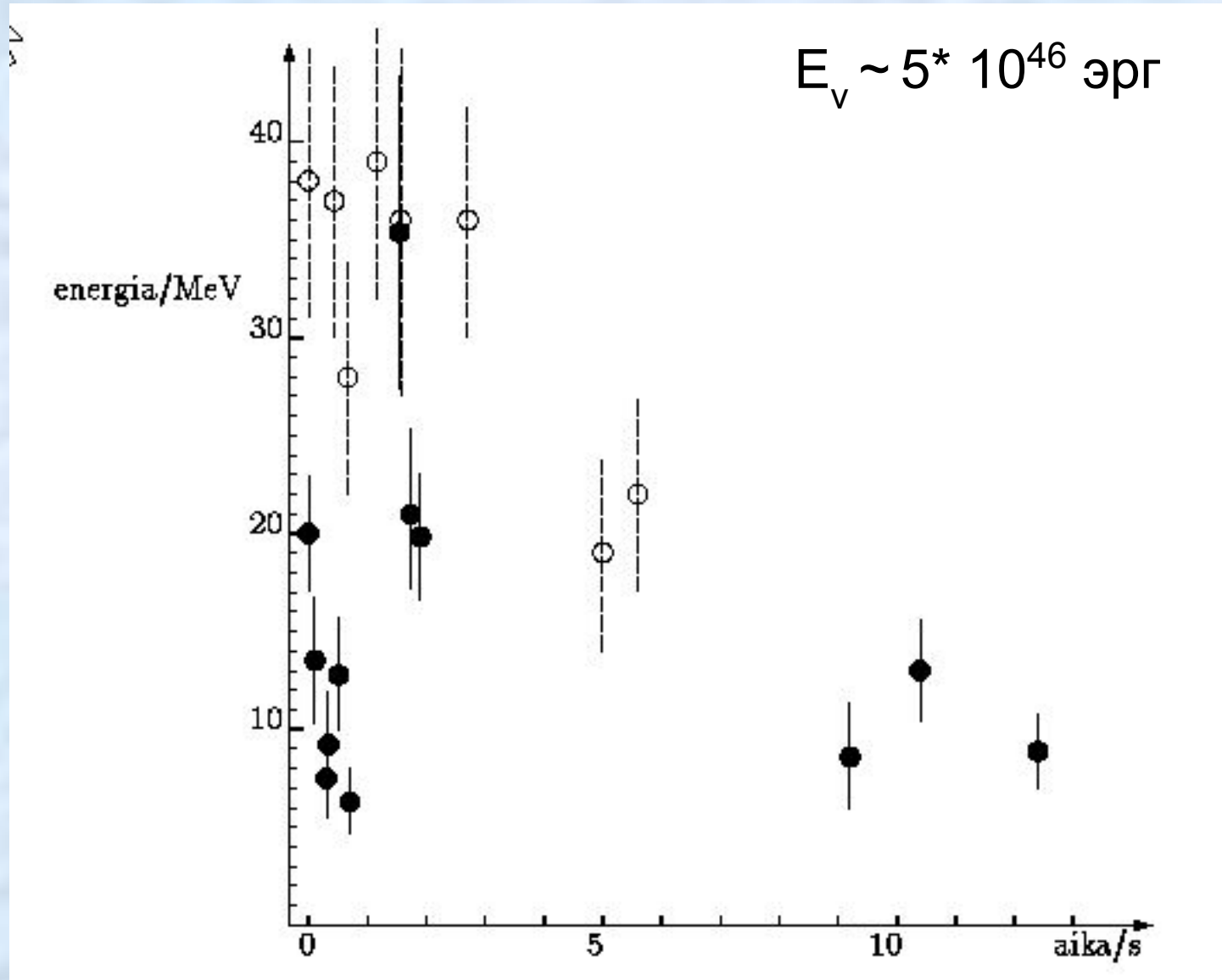
$$e^- + p \rightarrow n + \nu_e$$

$$e^+ + n \rightarrow p + \bar{\nu}_e$$

$$\begin{aligned} \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \mu^- &\rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e, \mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \end{aligned}$$

Обнаружение: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

Наблюдения SN1987A



SNEWS

LVD (Italy) 1kton
Liquid scint ~300 $\bar{\nu}_\mu$



Super-Kamiokande (Japan) 50kton

7000 inv. β decay, 410 on ^{16}O ,
300 elast. scattering, 4° pointing



Sudbury Neutrino Observatory
(Canada) 1.7kton H_2O , 1kton D_2O

710 inv. β decay, 160 ^2H breakup,
45 elast. scattering, 17° pointing



SSL sockets

Server
10s coincidence
window

Coincidence server
securely hosted by
Brookhaven National Lab

PGP signed  email

Email alarms
to astronomers

Sign up yourself to receive an
alert at: <http://cyclo.mit.edu/snnet/>

Космические нейтрино

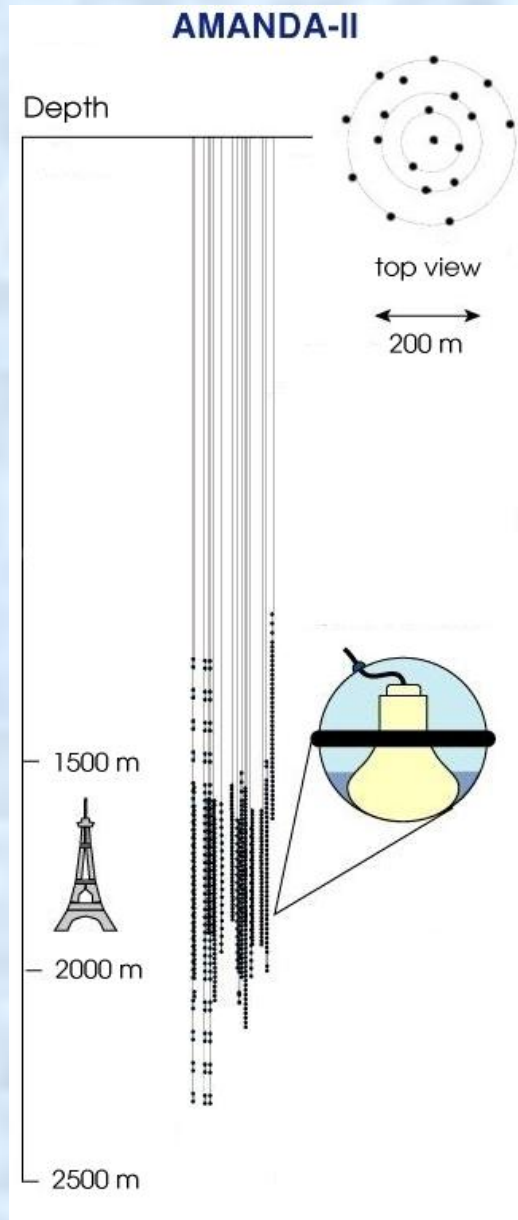
- ν_e, ν_μ - нейтрино
- За 5 месяцев оболочка SN излучает $2 \cdot 10^{48}$ мюонных нейтрино с $E \sim 100$ ГэВ
- Идея метода обнаружения:

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$$

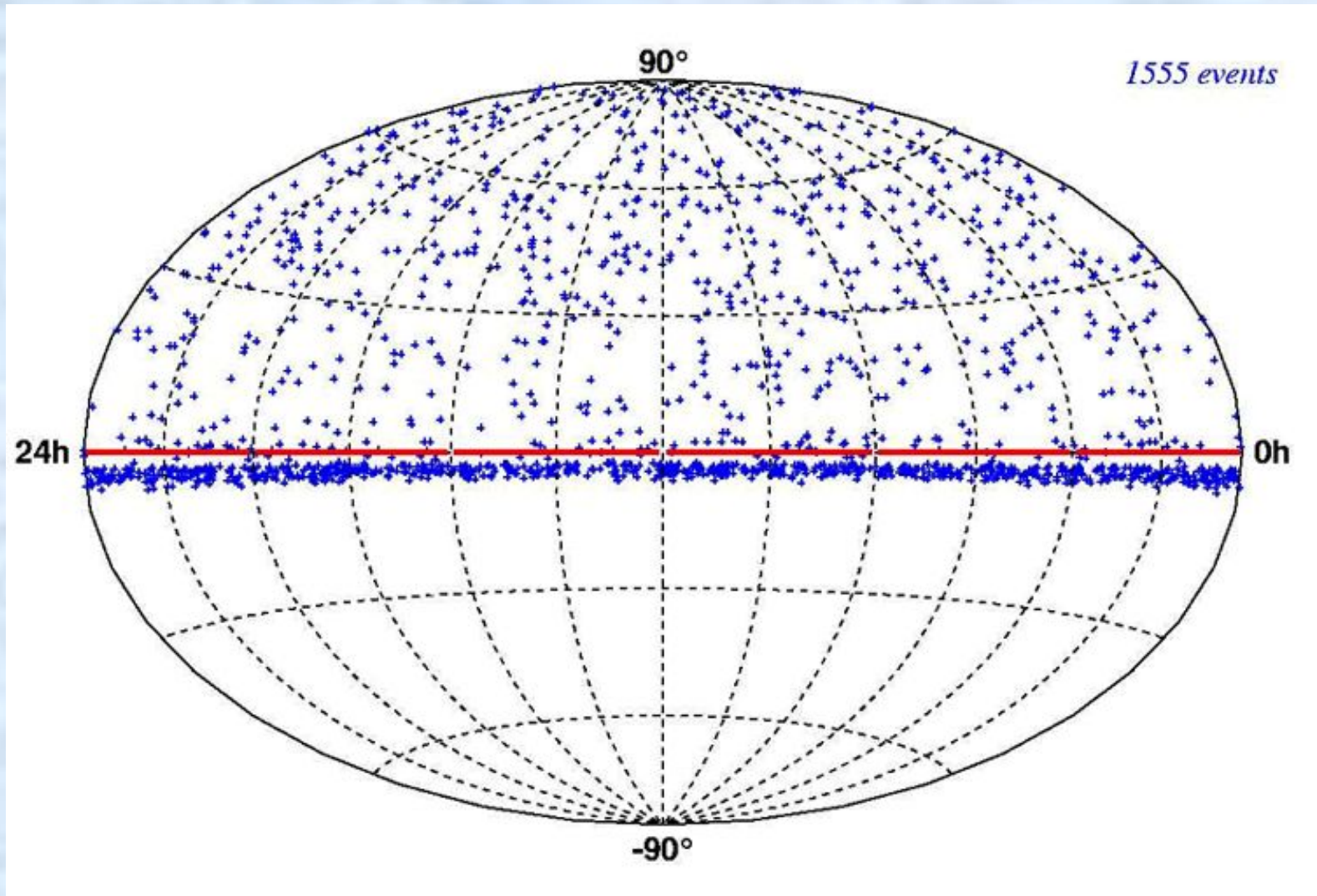
AMANDA

Южный полюс

Черенковское излучение во льду



AMANDA



Нейтрино сверхвысоких энергий

$$E > 10^{15} \text{ эВ}$$

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow \text{адроны} \rightarrow \text{акустич. волны}$$