Нейтринная астрофизика

Нейтрино

- Гипотеза Паули в 1930

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

- Зарегистрированы в 1953 (Рейнс, Коуэнн)
- Большая проникающая способность
- Сечения от 10^{-44} до 10^{-34} см^2

Виды нейтрино

- Космологические (5x10^{-4} эВ)
- Звездные (десятки М эВ)
- Высоких энергий (>1 ГэВ)

Космологические нейтрино

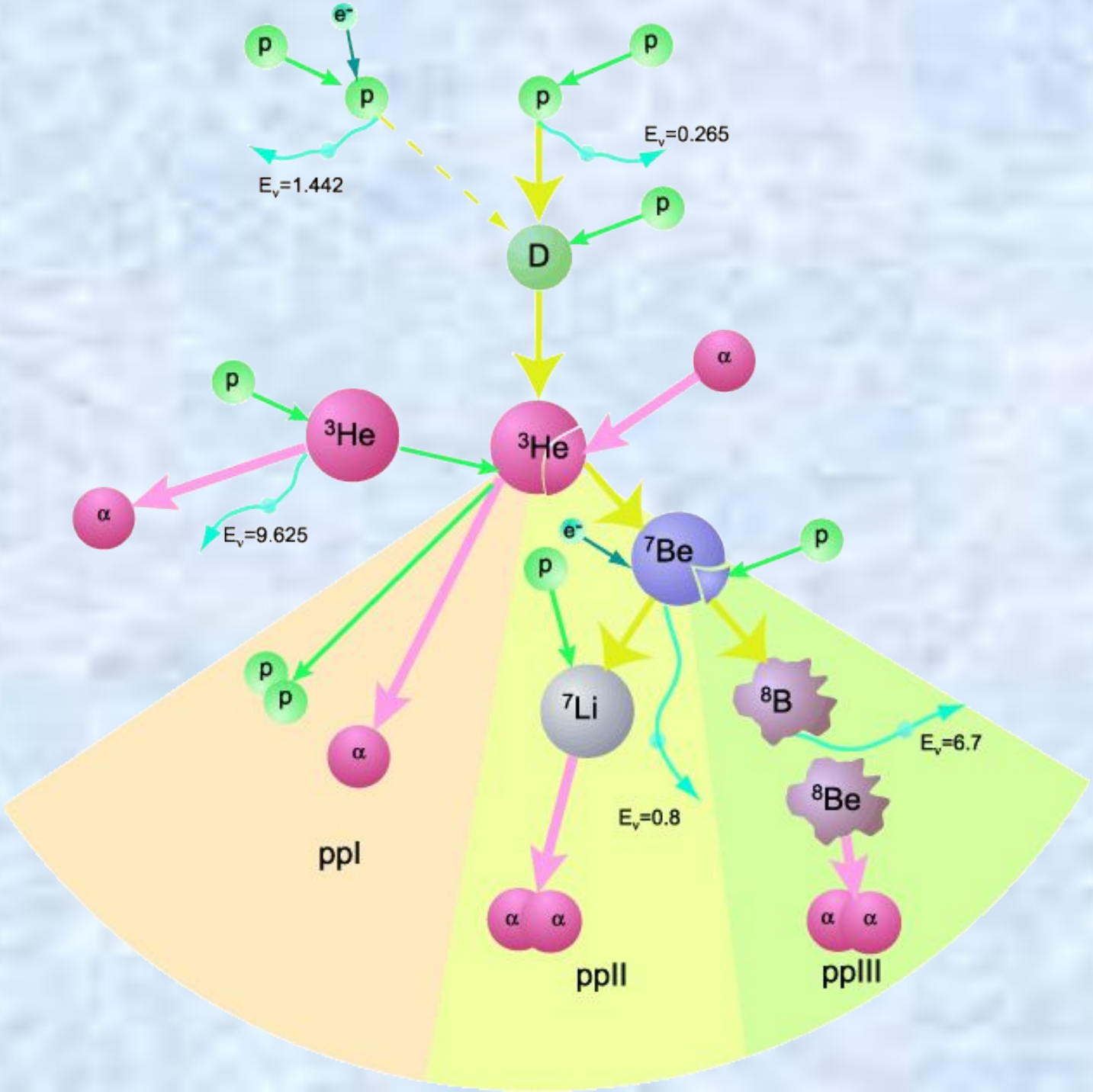
- Через 1 секунду после большого взрыва нейтринный газ отделился от вещества
- T ~ 2 K (300 – 400 нейтрино/см^3)
- Нет метода регистрации
- Из космологических оценок ограничение на сумму масс $\sum_i m_{\nu_i} < 40$ эВ

Звездные нейтрино
1.Солнечные нейтрино

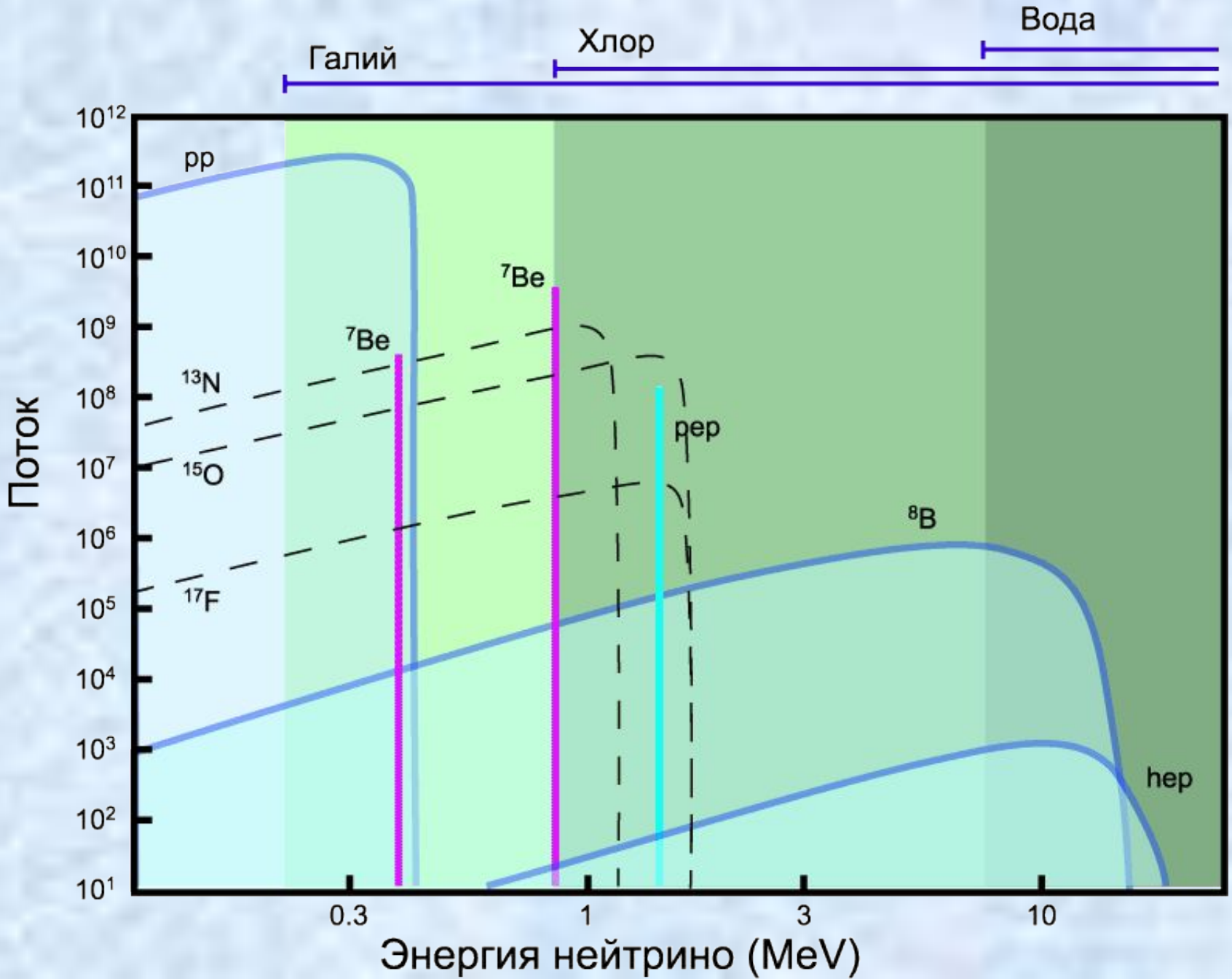
$4p \rightarrow {}^{4}He + 2e^{-} + 2\,\nu_{e}$ Q=26.7 МэВ

$L_{sun} = 3.86 * 10^{33}$ эрг/с

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


e⁻
p
p
p
p
p
E_ν=0.265
E_ν=1.442
p
D
α
p
³He
³He
α
E_ν=9.625
e⁻
⁷Be
p
p
p
p
⁷Li
⁸B
α
E_ν=6.7
⁸Be
E_ν=0.8
ppI
α α
α α
ppII
ppIII

Области чувствительности различных типов детекторов



Установка Дэвиса

C_2Cl_4

V = 380 тыс. литров

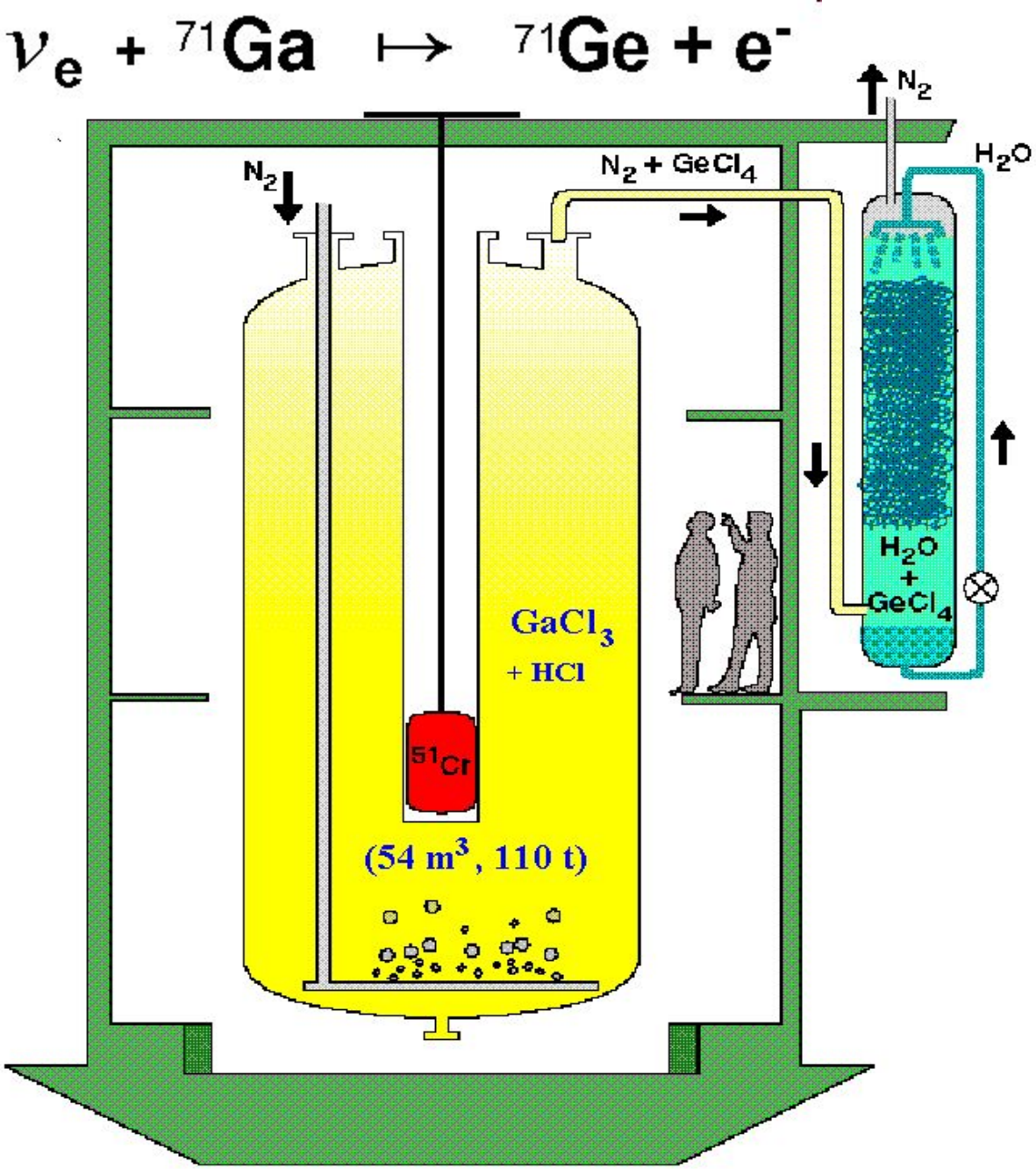
Результат:

1,8 ± 0,3 SNU

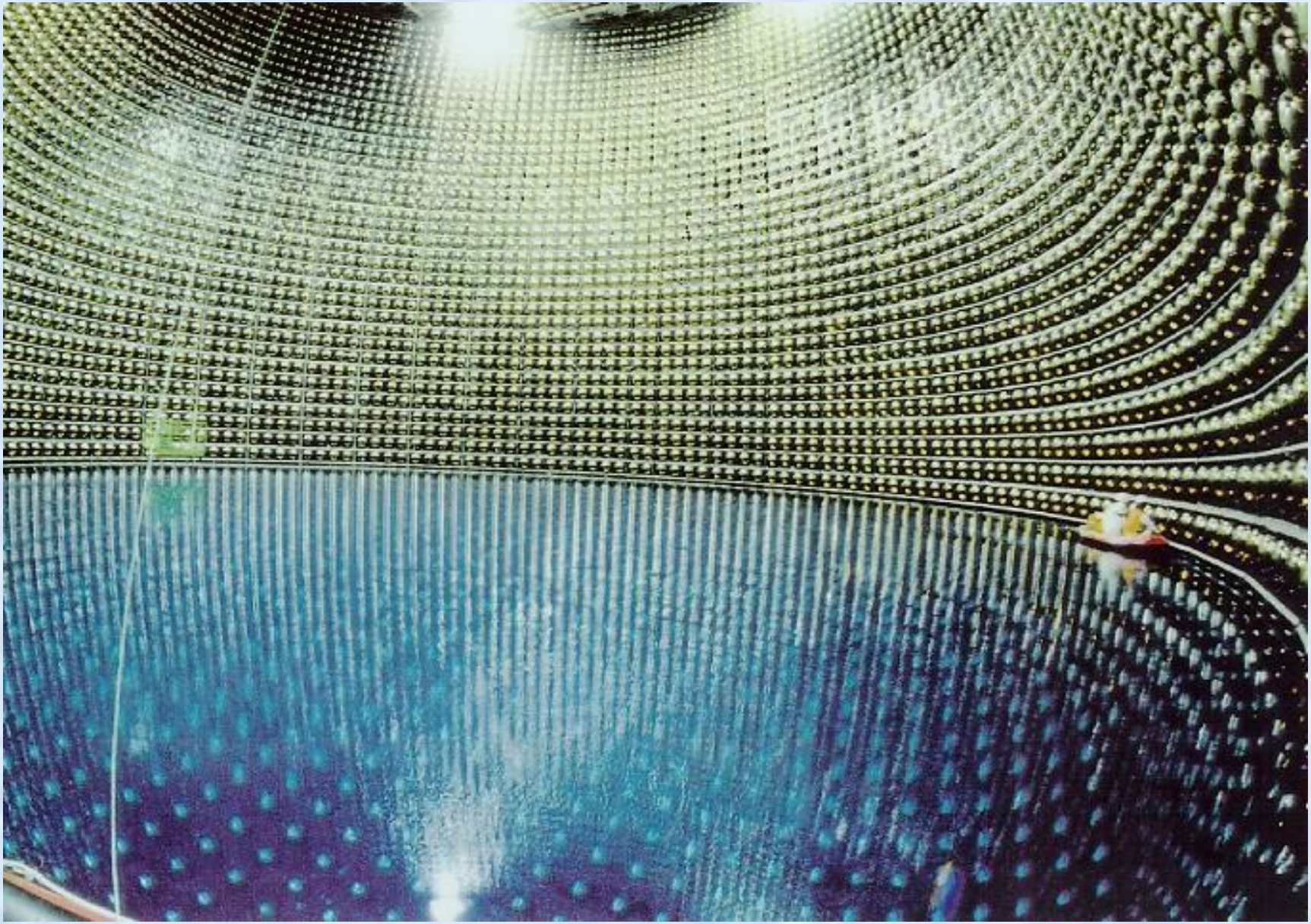
Теория:

7,6 ± 3,3 SNU

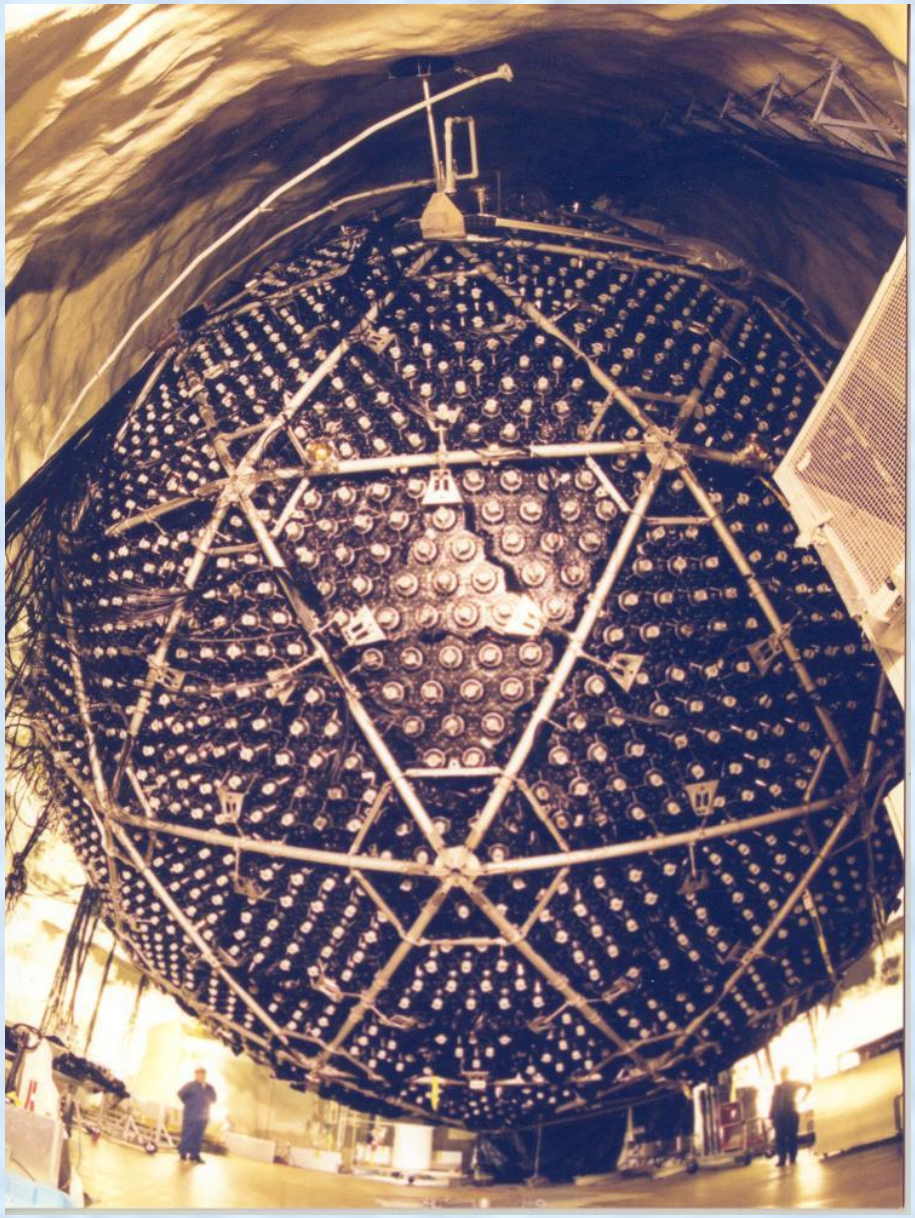
GALLEX


$\nu_e + {}^{71}Ga \mapsto {}^{71}Ge + e^-$
N_2
$N_2 + GeCl_4$
H_2O
N_2
H_2O
+
$GeCl_4$
$GaCl_3$
+ HCl
^{51}Cr
(54 m^3, 110 t)

Super-Kamiokande



SNO



Kamiokande:

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

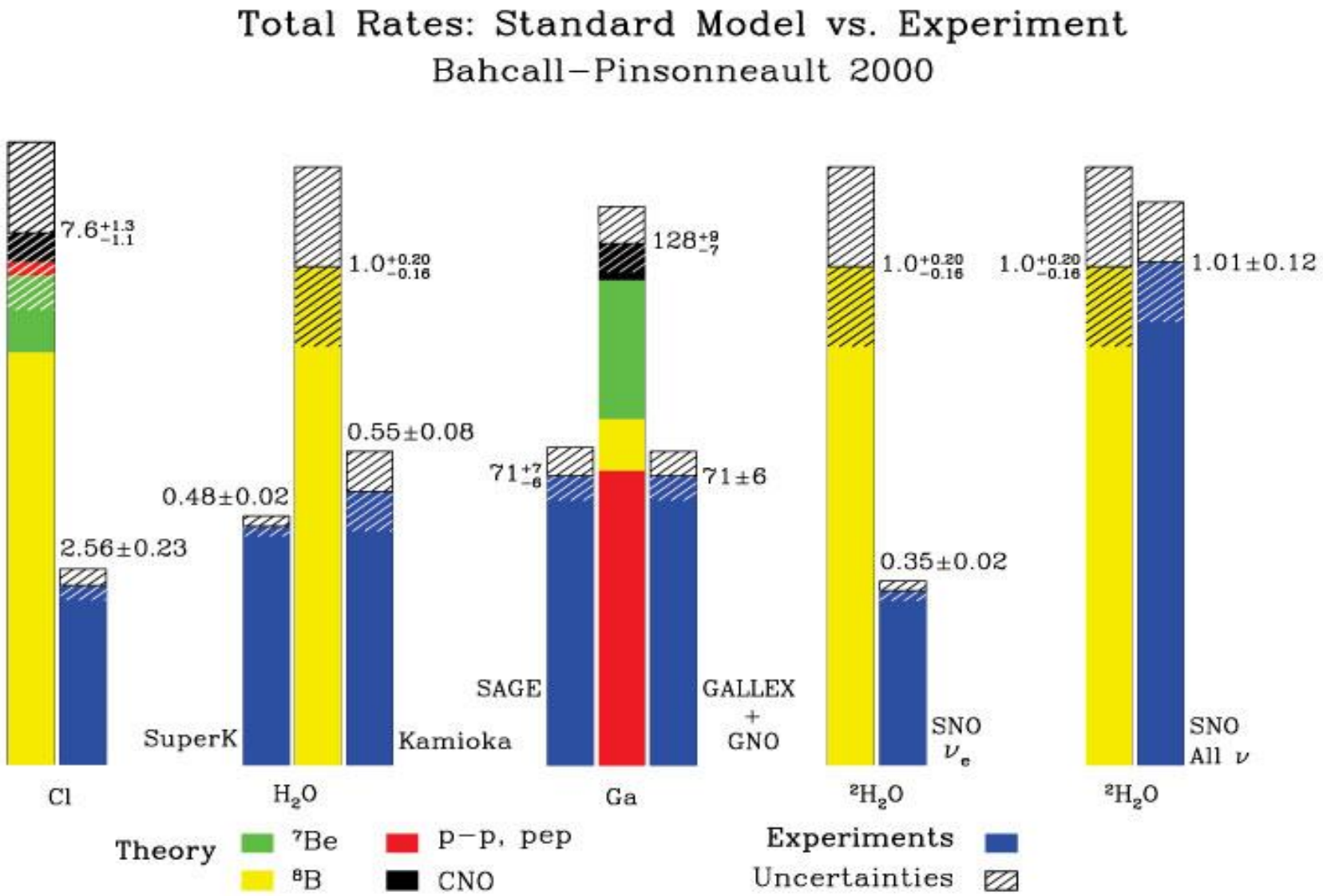
SNO:

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

Результаты различных экспсериментов

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

Результаты экспериментов



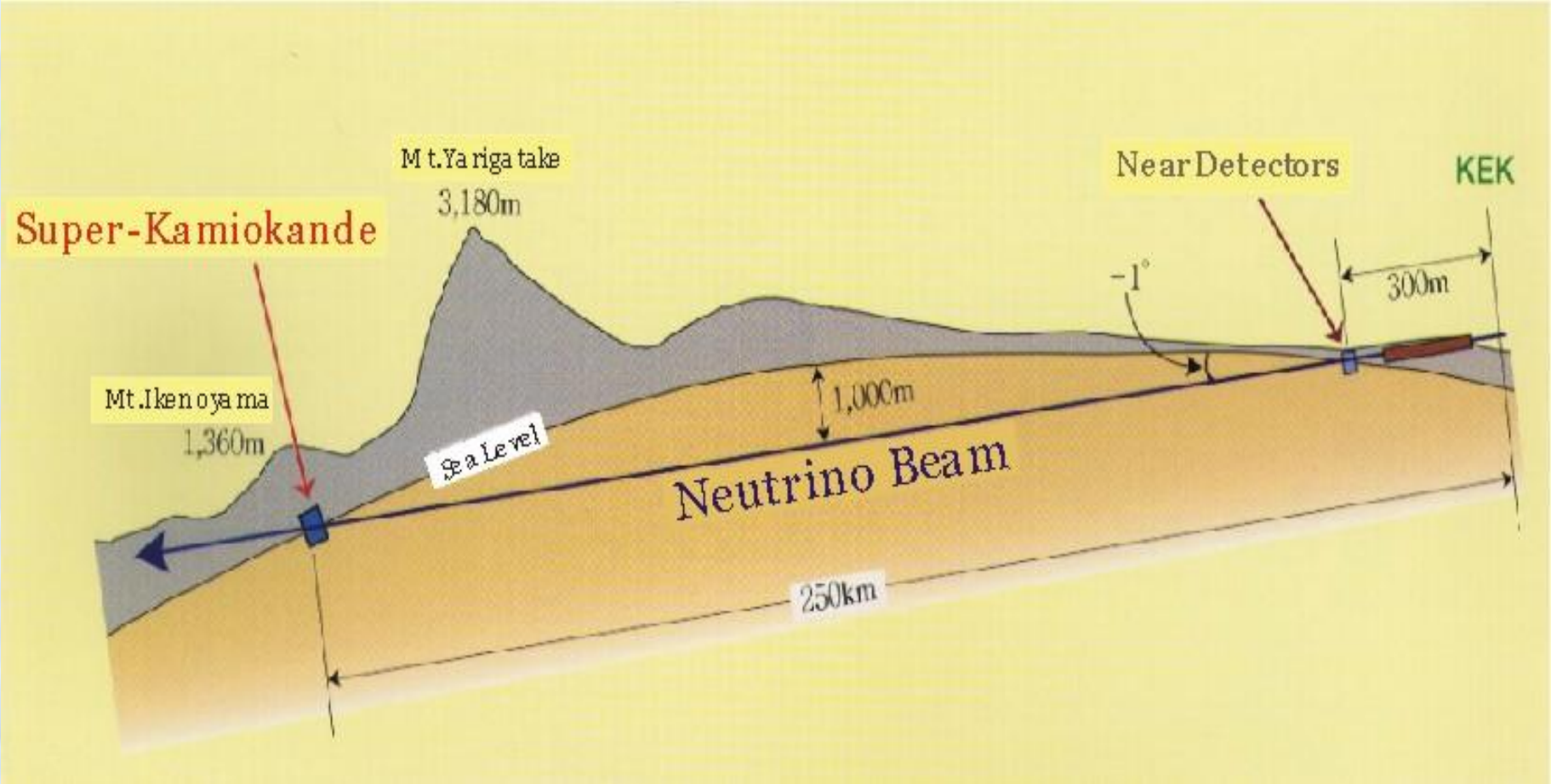
Теория осцилляций

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

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

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

Эксперимент K2K



Поиски осцилляций в различных проэктах

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

Звездные нейтрино.
2.Нейтрино от коллапсирующих звезд

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

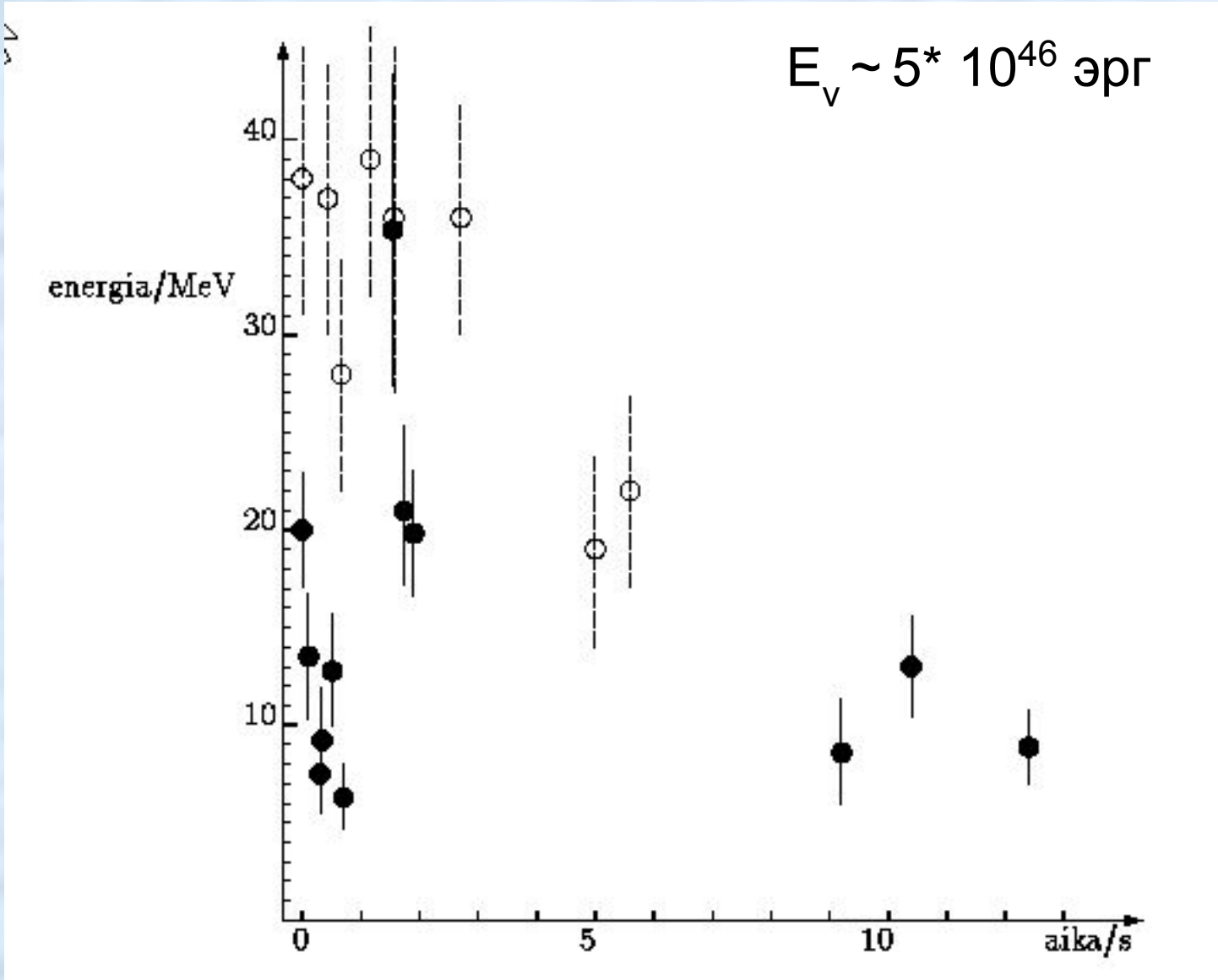
$$e^- + p \rightarrow n + \nu_e$$

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

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu, \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$
$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e, \mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e$$

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

Наблюдения SN1987A



SNEWS

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

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

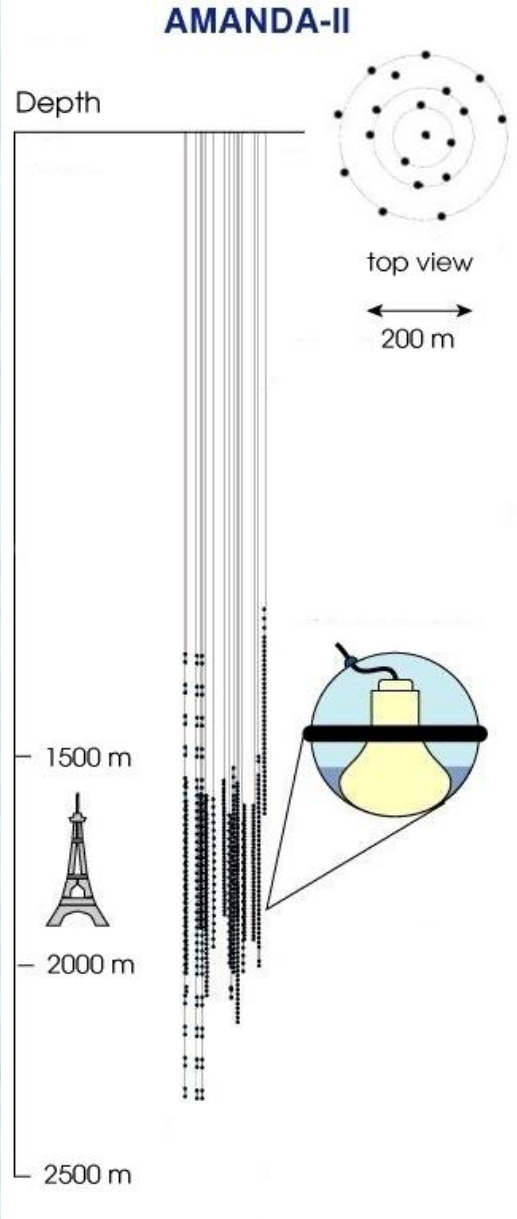
- pp, pγ - нейтрино
- За 5 месяцев оболочка SN излучает

$2 * 10^{48}$ мюонных нейтрино с E ~ 100 ГэВ

- Идея метода обнаружения:

$$\nu_\mu + \mathrm{N} \rightarrow \mu + \mathrm{X}$$

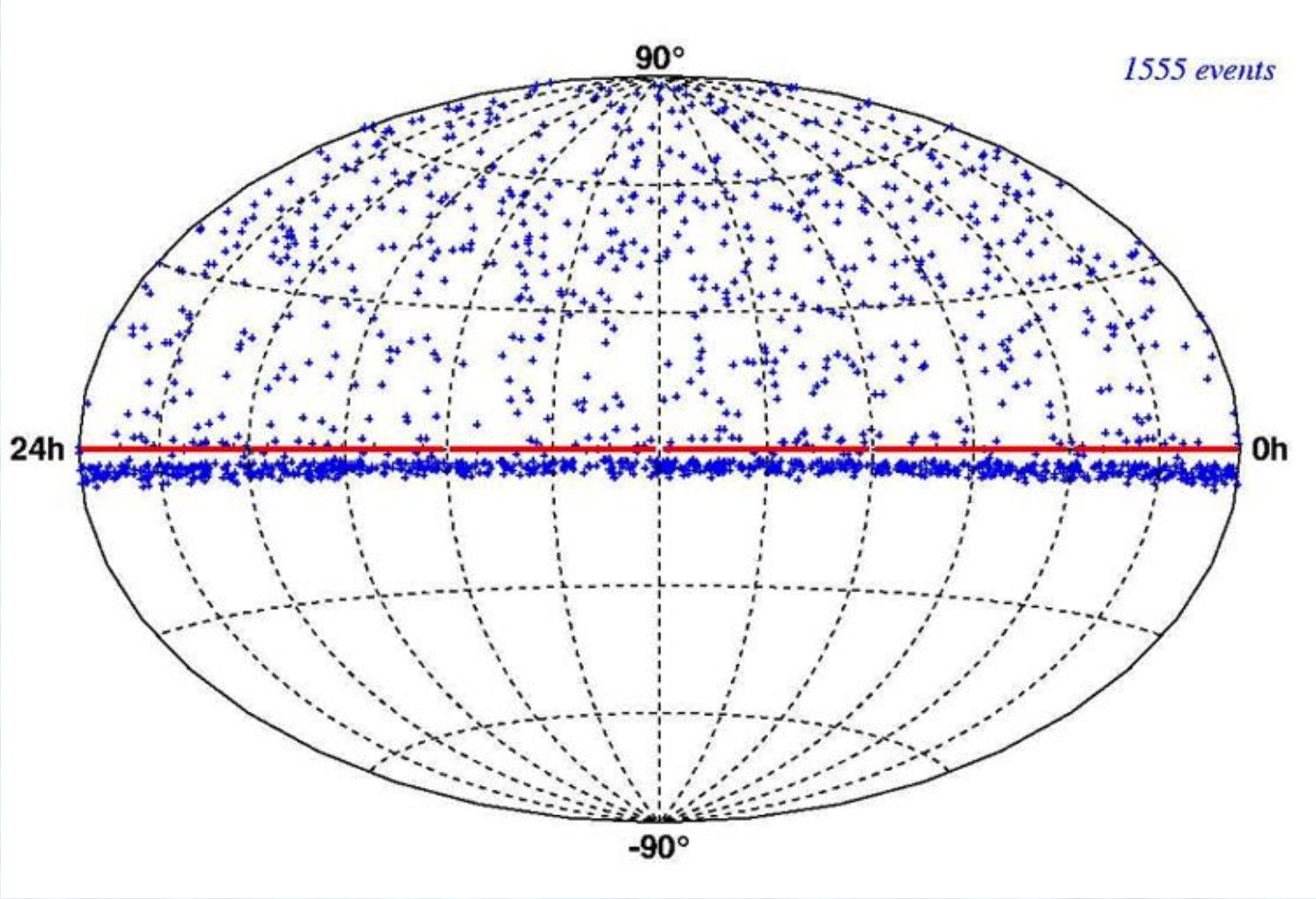
AMANDA



Южный полюс

Черенковское излучение во льду

AMANDA



Нейтрино сверхвысоких энергий

$E > 10^{15}$ эВ

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