

В.С. Имшенник

О.Г. Ряжская

Вращающийся коллапсар

и

возможная интерпретация нейтринного сигнала,
зарегистрированного под Монбланом

от

Сверхновой SN 1987A

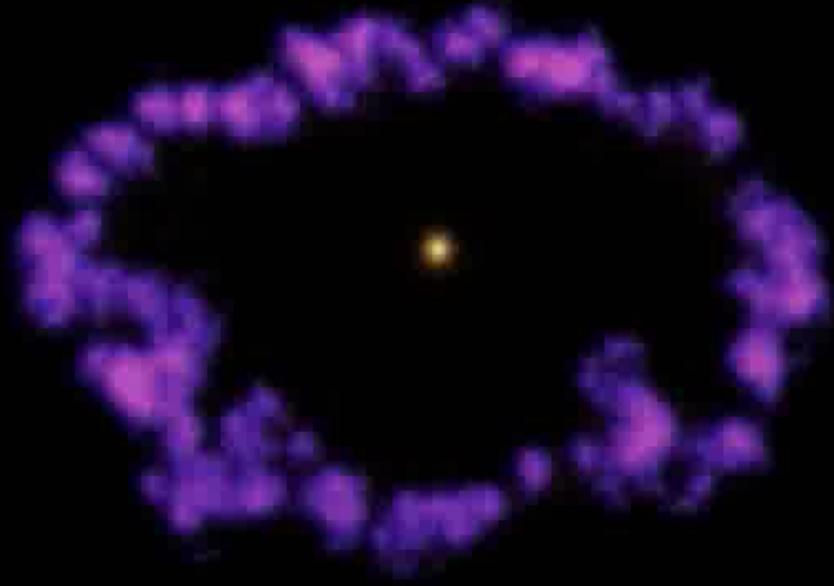
23 Февраля 1987 г.

Работа касается возможного объяснения результатов, полученных с помощью подземных детекторов во время вспышки Сверхновой SN 1987 А.

Название SN возникло из наблюдательных астрономических данных и касается практически мгновенного появления на небе очень яркой звезды, светимость которой в десятки миллионов раз больше светимости Солнца.



**Но самом деле это не рождение новой звезды,
а гибель звезды, исчерпавшей свое ядерное горючее.**

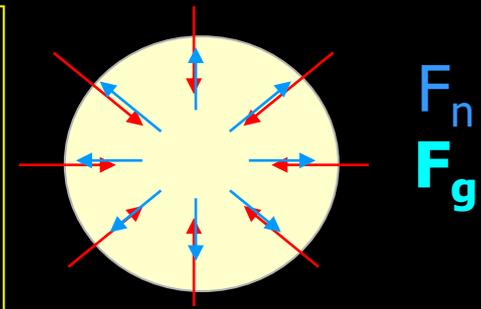


**Во время жизни звезды
(ее эволюции) на нее
действуют : ядерные
силы, силы гравитации,
силы вращения, силы
магнитных полей.**

Упрощенный случай: звезда сферически – симметричная,
невращающаяся, немагнитная.

Стационарное состояние:

Силы **давления горячего газа** компенсируют **гравитационные** силы. Температура горячего газа поддерживается ядерным излучением. $F_n = F_g$



В начале эволюции звезда состоит, в основном, из водорода. Со временем, благодаря ядерным реакциям синтеза



выделяется энергия, которая удерживает звезду в состоянии равновесия. После образования ядер железа дальнейшая эволюция требует затрат энергии.

В центре звезды происходит формирование **Fe** - ядра. $F_n < F_g$. Звезда начинает сжиматься, **коллапсировать**. Под действием гравитационных сил ядра железа разрушаются, и электроны практически вдавливаются в атомные ядра. При этом излучаются электронные нейтрино.

Полная энергия $\varepsilon_\nu \approx 10\% M_{зв} c^2$ — 10 % энергии покоя звезды

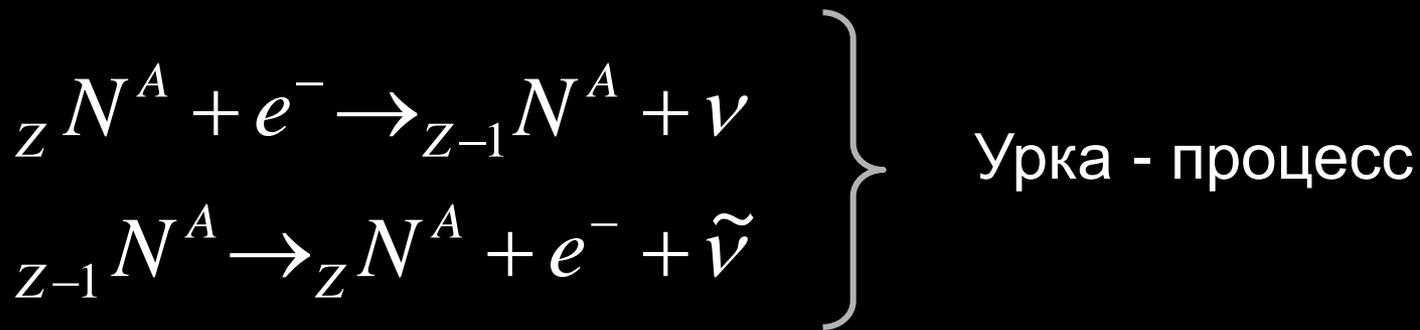
60 лет назад проблема регистрации коллапсов звезд по детектированию нейтринного излучения выглядела как научная фантастика, смешанная с шуткой.

1 апреля 1941 г. Phys. Rev. опубликовал статью Г. Гамова и М. Шоэнберга **«Нейтринная теория звездных коллапсов»**

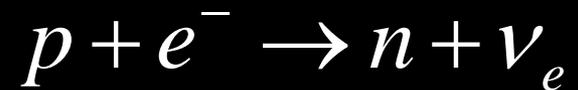
«Процессы поглощения и повторного излучения свободных электронов атомными ядрами, которые содержатся в изобилии в звездной материи, могут привести к таким огромным потерям энергии за счет нейтринного излучения, что коллапс всего звездного тела со скоростью практически равной скорости свободного падения становится очень вероятным»



© Anglo-Australian Observatory



Эта идея родилась в Рио де Жанейро в казино «УРКА», где большое количество денег мгновенно испарялось.



«Мы разработали общие идеи относительно роли нейтринного излучения в **звездных катастрофах**, **известных в астрономии**, в то время как **нейтрино** до сих пор рассматриваются как **чисто гипотетические частицы** в связи с тем, что все усилия по их регистрации терпели неудачу.»

Г. Гамов, М. Шозэнберг

- 1957** Ф. Райнес и К. Коуэн детектируют реакторные антинейтрино.
- 1959** Начинается интенсивное обсуждение роли нейтрино в астрофизике. Б. Понтекорво утверждает, что νe -рассеяние может приводить к макроскопическим эффектам.
- 1965** Я.Б. Зельдович и О.Х. Гусейнов показывают, что звездный гравитационный коллапс сопровождается мощным коротким (~ 10 мс) импульсом нейтринного излучения.
- 1965** Г.В. Домогацкий и Г.Т. Зацепин предлагают идею поиска коллапсирующих звезд, используя сеть нейтринных детекторов.
- 1965** Рождение экспериментальной нейтринной астрофизики.
- 1964-1966** У. Фаулером и Ф. Хойлом исследована роль нейтрино на поздних стадиях звездной эволюции. Получено, что диссоциация железного ядра имеет решающее значение при потере стабильности массивными звездными оболочками.

- 1966** Первое вычисление динамики коллапса. С. Колгейт, Р. Уайт
- 1966-1967** Рассмотрен процесс взрыва звезд, имеющих массу 32, 8, 4 или 2 солнечных массы (У. Арнетт). Получены параметры нейтринного излучения.
- 1967-1978** В гидродинамической модели В.С. Имшенника, Л.И. Ивановой, Д.К. Надёжина и И.В. Отрощенко (далее – Модель I) исследуется как временная структура нейтринного всплеска, так и энергетические спектры ν_e и $\tilde{\nu}_e$. В этих исследованиях впервые показано, что основной поток нейтрино излучается на стадии охлаждения родившейся нейтронной звезды. Оказалось, что длительность нейтринного импульса составляет ~ 10 с.
- 1980-1982** В расчетах Р. Боуэrsa и Дж. Р. Уильсона (далее – Модель II) получены временная структура и энергетический спектр $\tilde{\nu}_e, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ для начальной стадии (< 100 мкс) коллапса.
- 1987** Расчеты С. Бруэнна.

Детектирование нейтрино от коллапсирующей звезды даст возможность:

- Зарегистрировать гравитационный коллапс, даже если он является «тихим» (не сопровождается вспышкой Сверхновой);
 - Изучить динамику коллапса;
 - Оценить температуру в центре звезды.
- Параметры нейтринных потоков при коллапсе немагнитных, невращающихся, сферически симметричных звезд

(стандартная модель):

Модель	Полная энергия 10^{53} эрг	Энергия уносимая $\tilde{\nu}_e$ 10^{53} эрг	Энергия уносимая ν_e 10^{53} эрг	Средняя энергия $\tilde{\nu}_e$ МэВ	Средняя энергия ν_e МэВ	$E(\nu_e)$ МэВ	Длительность всплеска
Модель I	3-14	0.5-2.3	0.1	12.6	10.5	-	~20
Модель II				10	8	25	5

Из теории «стандартного» коллапса следует, что суммарная энергия, уносимая нейтрино всех типов: $\nu_e, \tilde{\nu}_e, \nu_\mu, \tilde{\nu}_\mu, \nu_\tau, \tilde{\nu}_\tau$ соответствует ~ 0.1 массы ядра звезды и делится поровну между этими шестью компонентами.

Основная идея

Как зарегистрировать поток нейтрино от коллапсирующих звезд?

До сих пор для поиска и регистрации нейтринного излучения использовались **черенковские (H₂O)** и **сцинтилляционные (C₂H_{2n})** детекторы, способные регистрировать преимущественно $\tilde{\nu}_e$. Этот выбор естественен и связан с большим сечением взаимодействия $\tilde{\nu}_e$ с протоном.



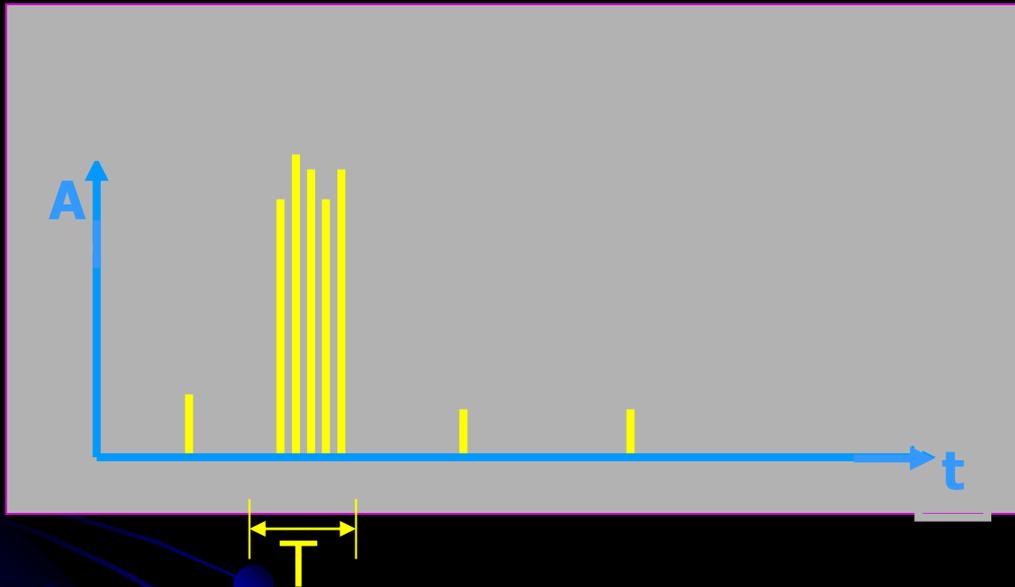
$$\sigma_{\tilde{\nu}_e p} \sim 9.3 E_{e^+}^2 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2 \quad E_{e^+} \gg 0.5 \text{ МэВ}$$

Как впервые показано в работе Г.Т.Зацепина, О.Г. Рязской, А.Е.Чудакова (1973), можно использовать протон как захватчик нейтрона с дальнейшим образованием дейтерия (d) и с испусканием γ - кванта с временем $\tau \sim 180 - 200$ мкс.



Специфическая роспись события

Как идентифицировать нейтринную вспышку ?



*Регистрация вспышки с
N импульсами в
коротком временном
интервале T*

$$N \sim \frac{1}{4\pi R^2} \cdot \sum_i \int_{E_{thr}}^{\infty} I_{\nu_i}(E_{\nu_i}) \cdot \sigma(E_{\nu_i}) dE \cdot M$$

Возможность наблюдать нейтринную вспышку зависит от фоновых условий

Источники фона:

1. Космические лучи $0 < E < \infty$
 - а) мюоны
 - б) вторичные частицы, производимые мюонами (e, γ, n и долго живущие изотопы)
 - с) продукты реакций ядерных и электромагнитных взаимодействий в детекторе
2. Естественная радиоактивность $E < 30$ МэВ, в основном $E < 2.65$ МэВ
 - а) γ ,
 - б) $n, (n \gamma), U^{238}, Th^{232}$
 - с) $\alpha, (\alpha n)$
 - д) Rn^{222}

Подавление фона

1. Размещение детекторов глубоко под землей;
2. Использование низкорadioактивных материалов;
3. Использование системы антисовпадений;
4. Использование реакций с хорошей росписью;
5. Совпадение сигналов по времени в нескольких детекторах



Теоретики

Развивают модели коллапса

Теория предсказывает возможность гравитационного коллапса без сброса оболочки (без наблюдения вспышки сверхновых) раз в 10 лет.

Экспериментаторы



Разрабатывают методы регистрации

Известно, что в Галактике было 5 видимых Сверхновых:

1604 (Кеплер)

1572 (Тихо Браге)

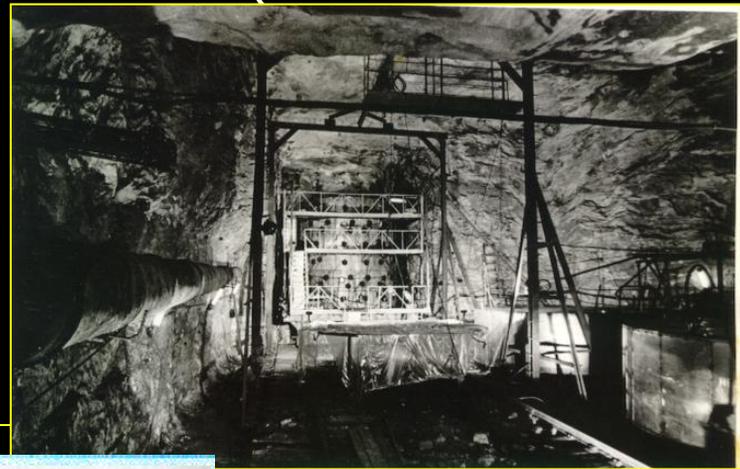
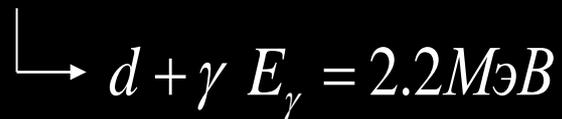
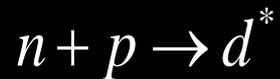
1181

1054 (которая образовала Крабовидную туманность)

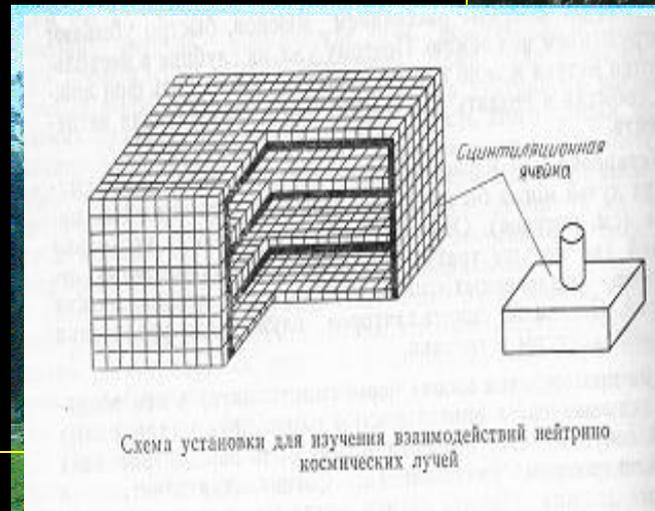
1006

В связи с редкостью таких событий детекторы должны работать с максимальным рабочим временем и быть многоцелевыми.

1977 Артемовский сцинтилляционный детектор (ИЯИ РАН) масса сцинтиллятора 105 тонн хорошая роспись событий (возможность регистрации обеих частиц в реакции:)



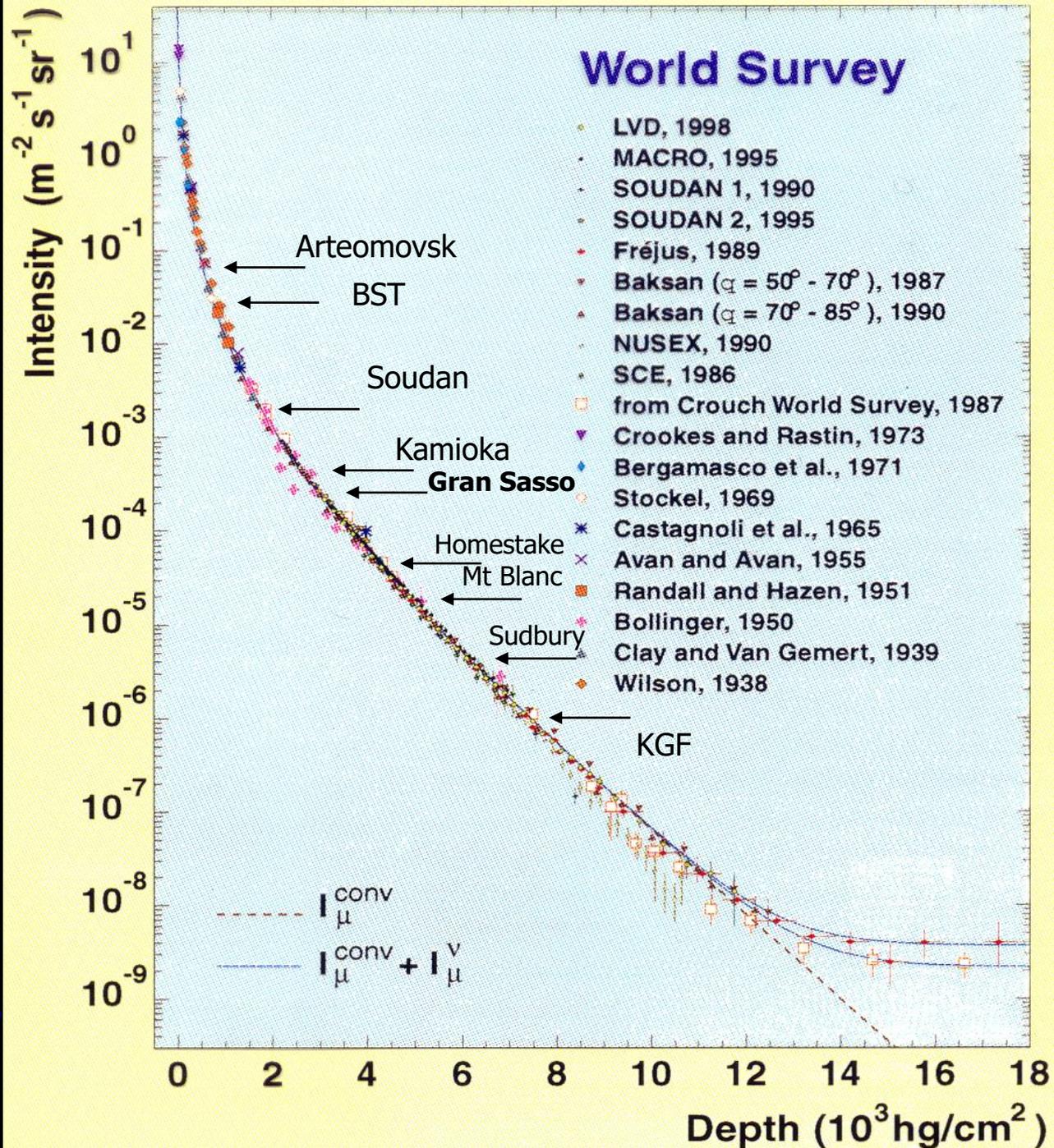
1978 Баксанский сцинтилляционный детектор (ИЯИ РАН) масса 330 тонн



1984 LSD – (Большой сцинтилляционный детектор, СССР – Италия), масса 90 тонн, хорошая роспись событий (возможность регистрации обеих частиц в реакции: $\tilde{\nu} p \rightarrow ne^+$)



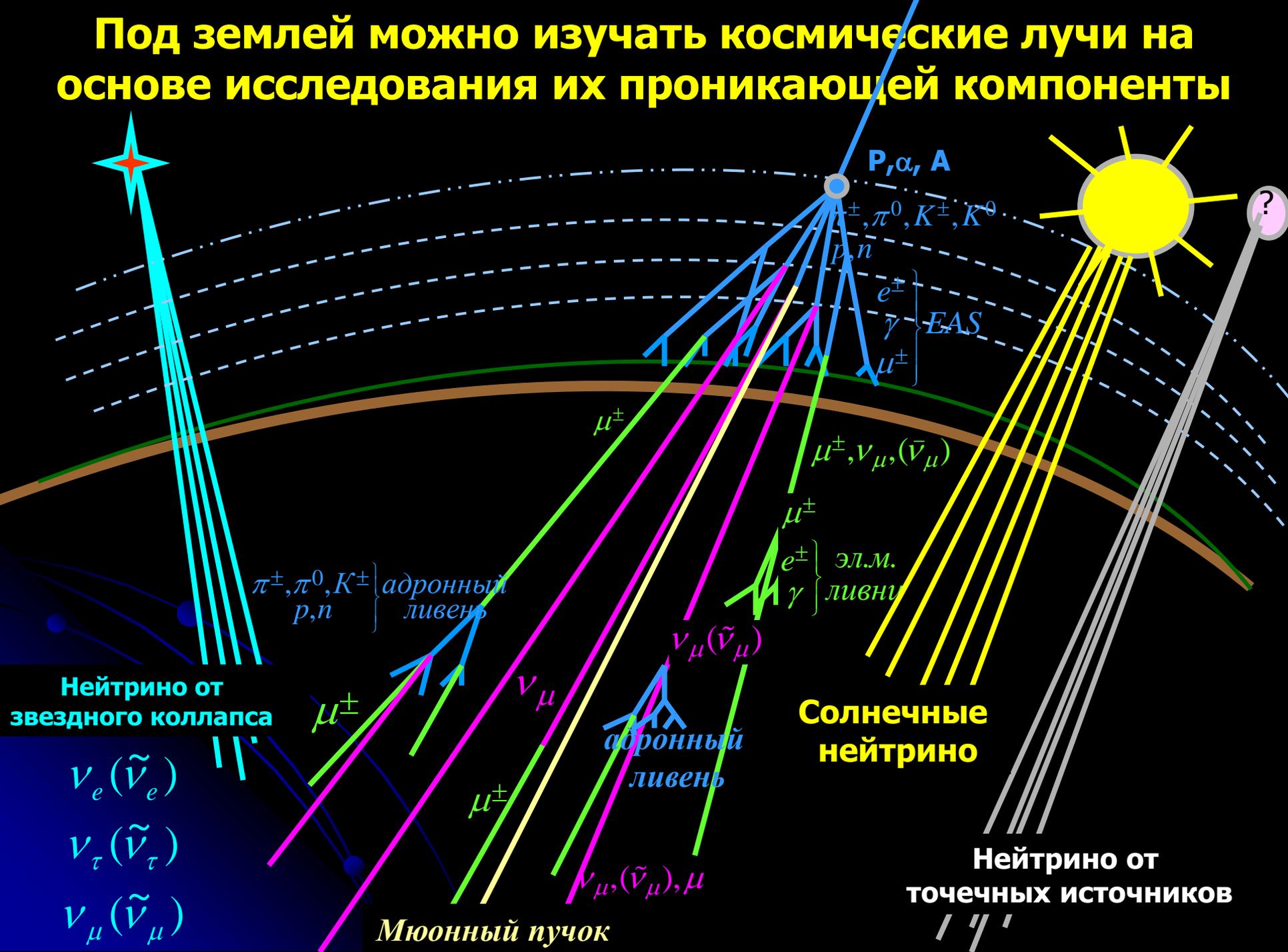
Кривая глубина –
 интенсивность
 мюонов (подземные
 наблюдения);
 кривая - расчеты
 Бугаев и др., 1998



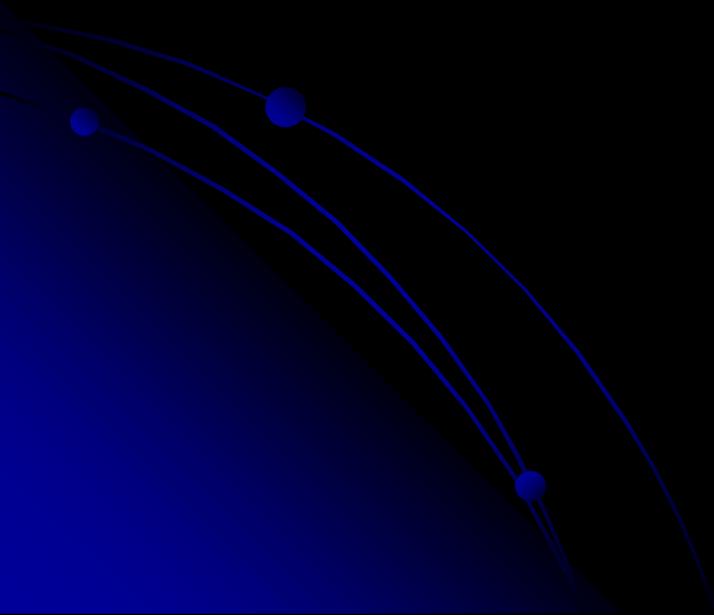
Под землей используются детекторы больших объёмов, которые фактически являются подземными обсерваториями для задач:

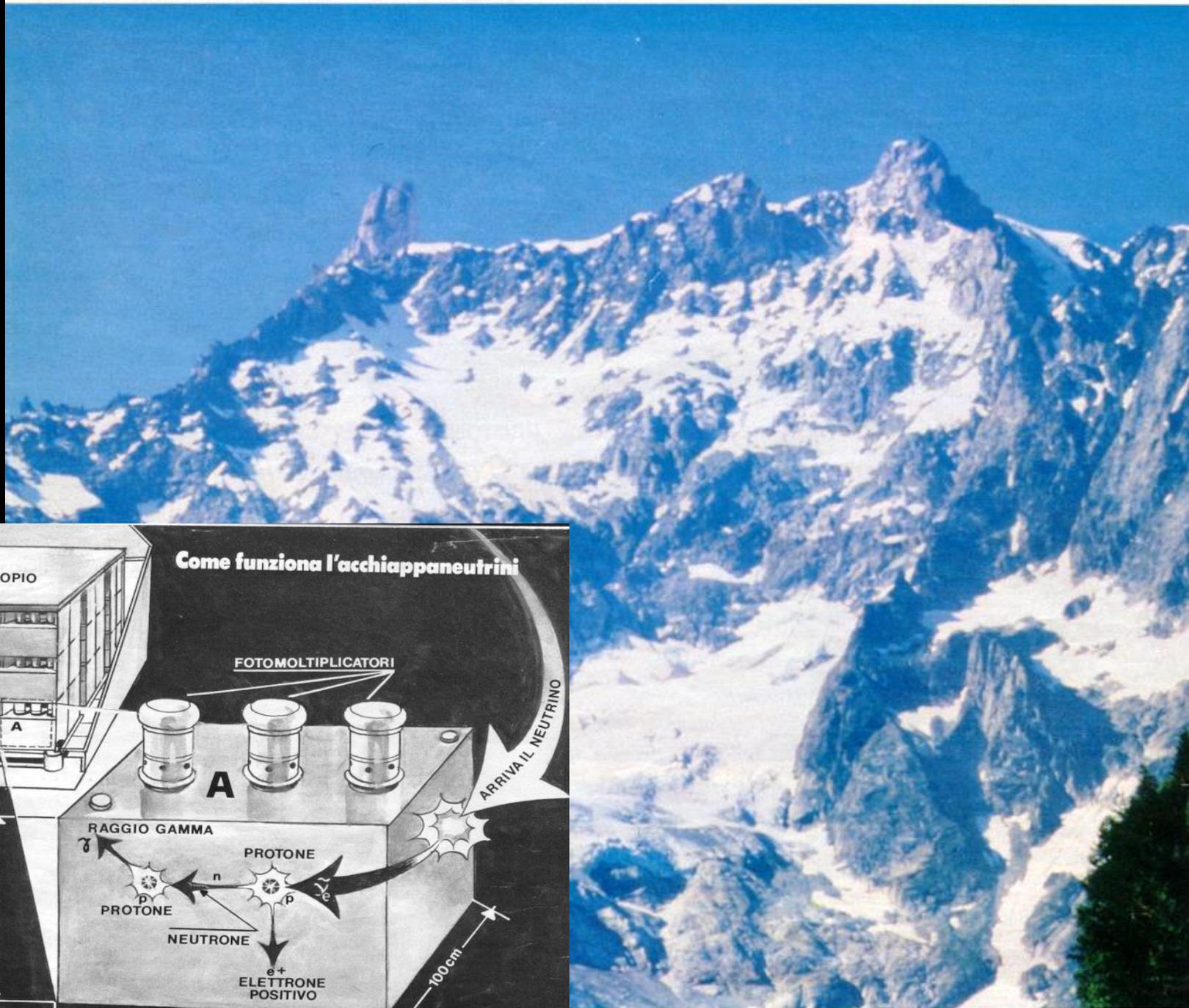
- *Нейтринной астрономии*
- *Физики космических лучей*
- *Поиска точечных источников космических лучей*
- *Изучения нейтринных осцилляций*
- *Поиска редких событий, предсказываемых теорией (протонный распад, монополи, темная материя и др.)*
- *Геофизических явлений*

Под землей можно изучать космические лучи на основе исследования их проникающей компоненты

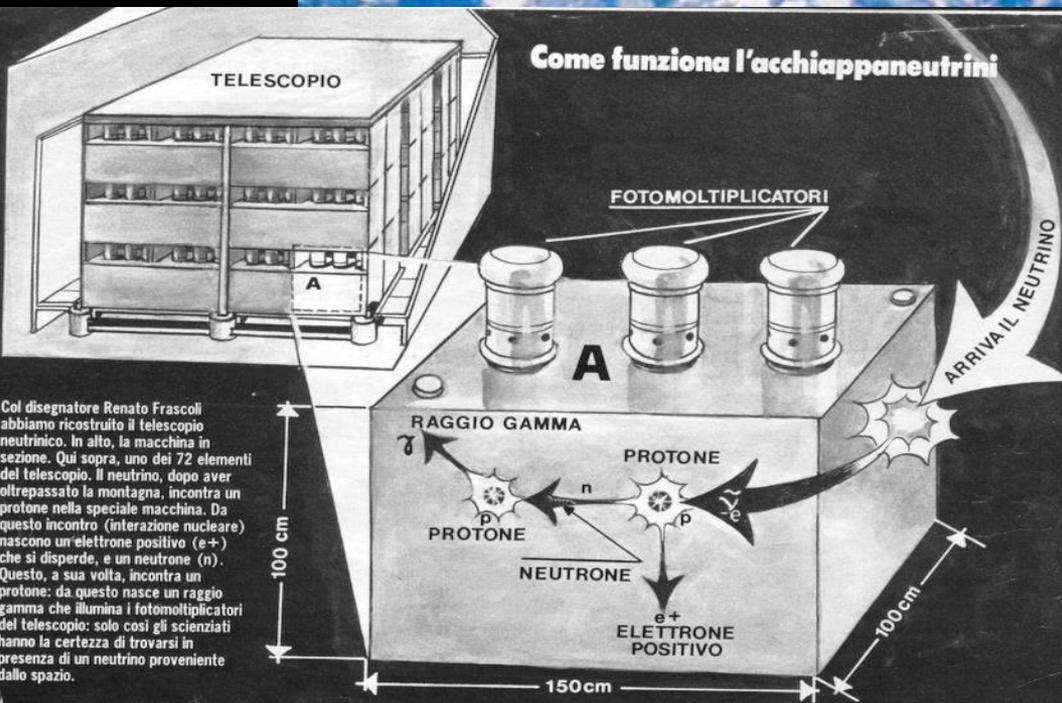


23 февраля 1987
2 часа 52 мин.





Come funziona l'acchiappaneutrini



Col disegnatore Renato Frascoli abbiamo ricostruito il telescopio neutrino. In alto, la macchina in sezione. Qui sopra, uno dei 72 elementi del telescopio. Il neutrino, dopo aver oltrepassato la montagna, incontra un protone nella speciale macchina. Da questo incontro (interazione nucleare) nascono un elettrone positivo (e^+) che si disperde, e un neutrone (n). Questo, a sua volta, incontra un protone: da questo nasce un raggio gamma che illumina i fotomoltiplicatori del telescopio: solo così gli scienziati hanno la certezza di trovarsi in presenza di un neutrino proveniente dallo spazio.

События, зарегистрированные LSD

23 февраля, 1987 г. (SN 1987 A)

№ события	Время, UT±2мс	Энергия, МэВ
1	2:52:36,79	6,2 – 7
2	40,65	5,8 – 8
3	41,01	7,8 – 11
4	42,70	7,0 – 7
5	43,80	6,8 – 9
1	7:36:00,54	8
2	7:36:18,88	9

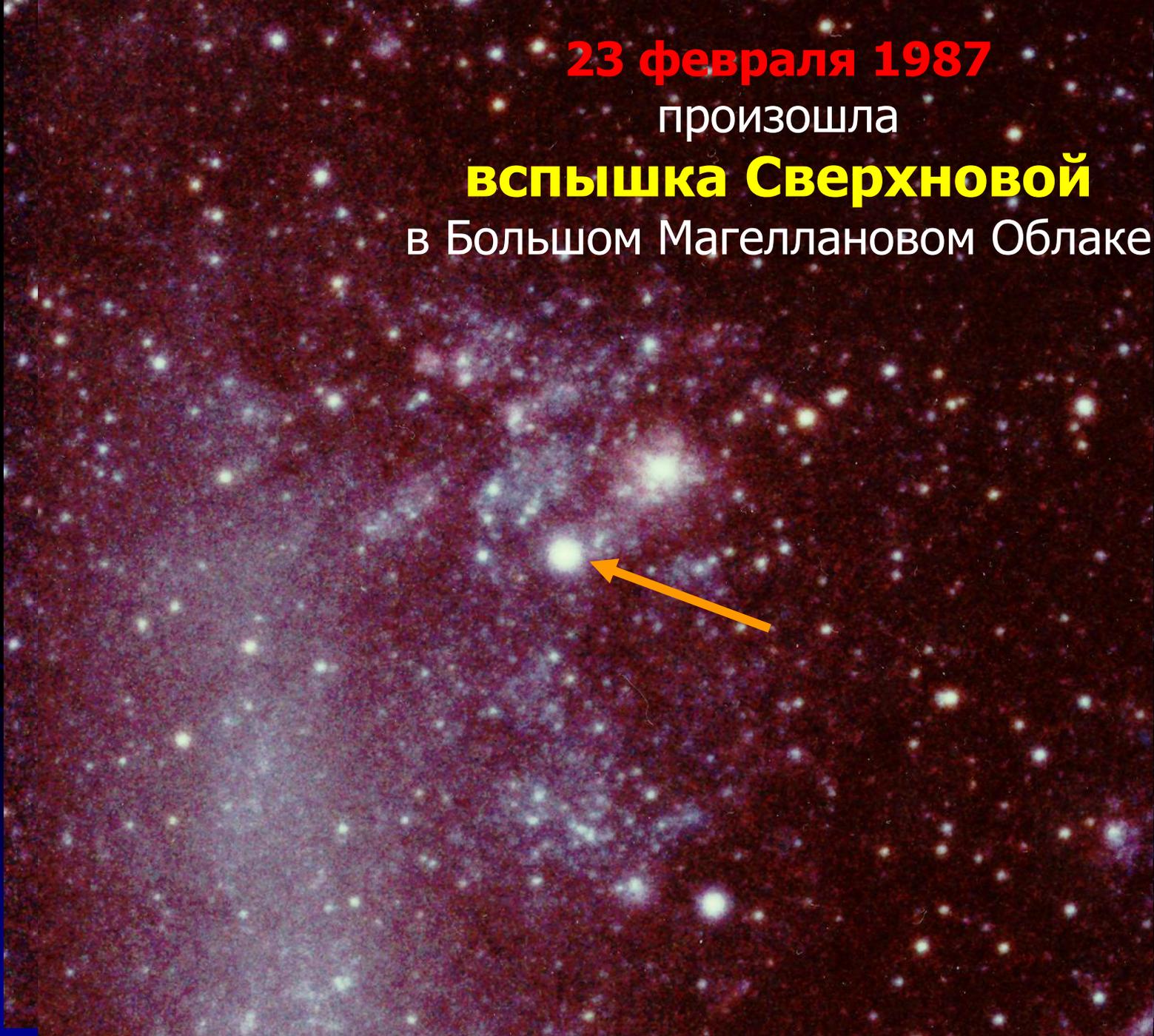


23 февраля 1987

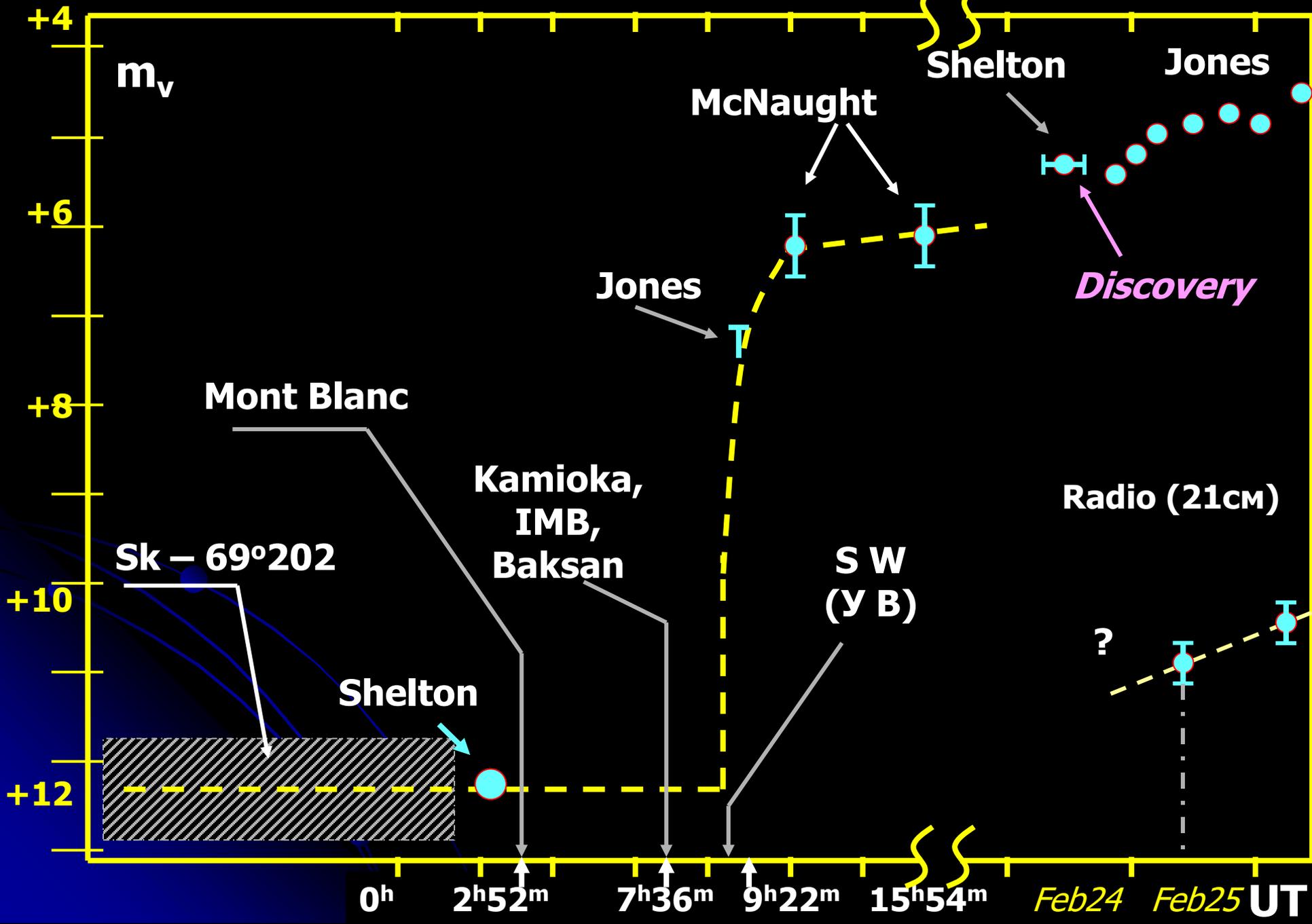
произошла

вспышка Сверхновой

в Большом Магеллановом Облаке

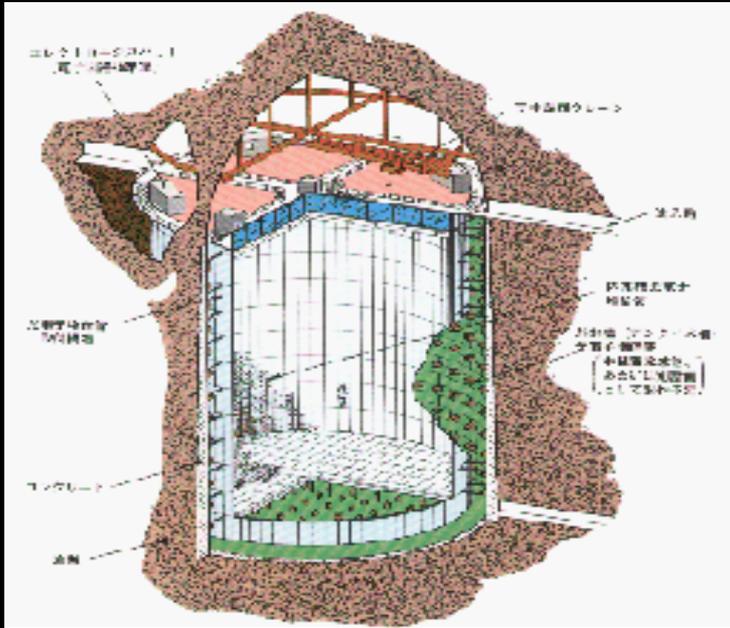


1987A

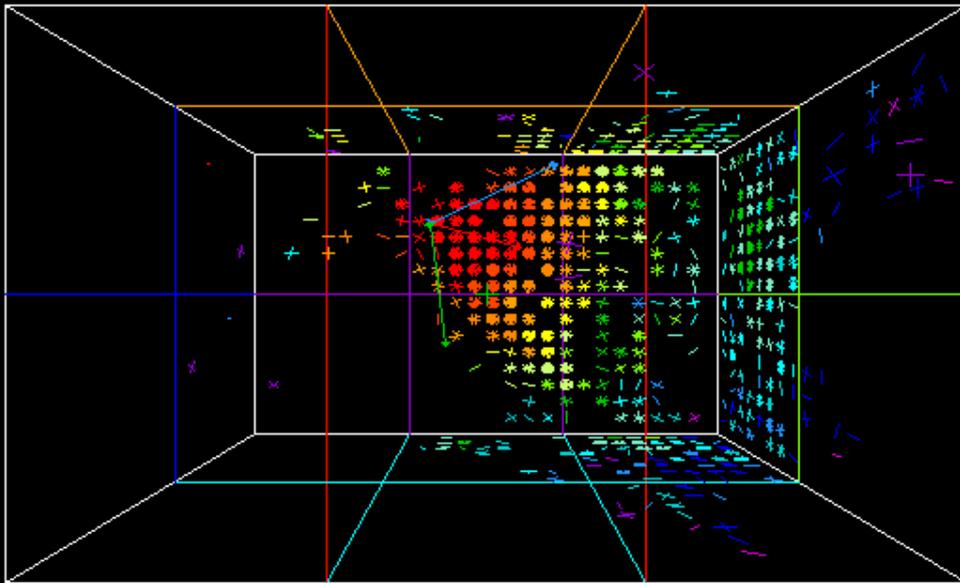
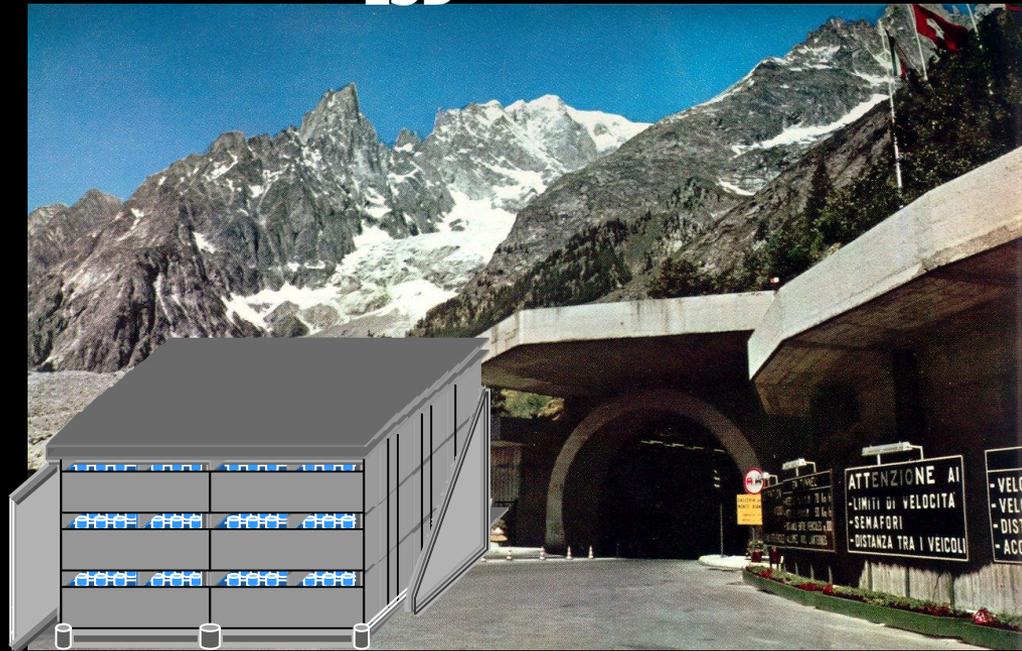


Детектор	Глубина водного эквивалента м	Рабочая масса, т	Вещест во	порог регист рации МэВ	Эффективность регистрации		Частота фоновых импульсов с ⁻¹
					Спектр e ⁺ реакции $\tilde{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$	Спектр e ⁻ реакции $\tilde{\nu}_i e^- \rightarrow \nu_i e^-$	
БПСТ СССР	850	130 (200) 160	C_nH_{2n} Fe	10	0.6	0.15 (0.54)	0.013 (0.033)
LSD СССР – Италия	5200	90 200	C_nH_{2n} Fe	5-7	0.9	0.4(0.7)	0.01
KII Япония – США	2700	2140	H₂O	7-14	0.7	0.17 (0.54)	0.022
IMB США	1570	5000	H₂O	20-50	0.1	0.02 (0.18)	3.5x10⁻⁶

Kamiokande



LSD

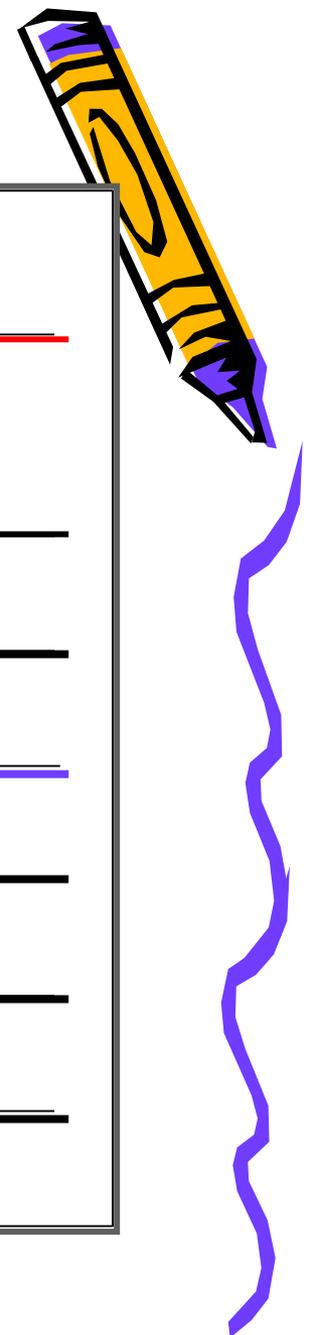


IMB



Баксан

Февраль 23, 1987



1 3 5 7 9 11

Optical observations

$m_v = 12^m$

$m_v = 6^m$

Geograv 2:52:35,4

LSD 5 2:52:36,8
43,8

2 7:36:00
19

KII 2 2:52:34
(4) 44

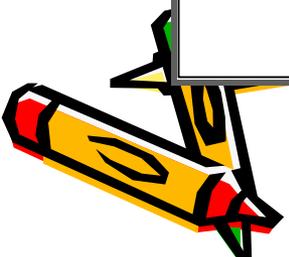
12 7:35:35
47

IMB

8 7:35:41
47

BUST 1 2:52:34

6 7:36:06
21



Отклик детекторов на звездный коллапс в Большом Магеллановом Облаке в рамках стандартной модели

Детектор	K_{e^+} (1)	K_{e^-} (2a) + (2b)	K_{e^-} (2b)
LSD	1.5	0.043	0.024
BUST	2	0.052	0.036
KII	17	0.53	0.36
IMB	6	0.4	0.35

$$\Phi_{\tilde{\nu}} (s^{-1} MeV^{-1}) \sim \frac{\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^2} e^{-\alpha\varepsilon^2} \quad \left(\varepsilon = \frac{E_{\tilde{\nu}}}{kT} \right) \quad kT \sim 2 MeV$$

kT, MeV	α	$W_{\tilde{\nu}_e} \cdot 10^{54},$ <i>эрг</i>	k_i			
			LSD	BUST	KII	IMB
1.7	0.1	2.1±1.0	5	0.2	5±2.5	0
2.1	0.1	1.8±0.8	5	0.5	12±6	0

Полная энергия нейтринного излучения от SN 1987A на порядок больше энергии связи нейтронной звезды с барионной массой около $2M_{\odot}$

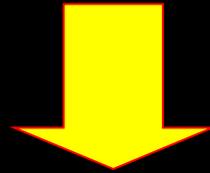
$$E_{tot} = 6W_{\tilde{\nu}_e} \approx (1 \div 2) \cdot 10^{55} \text{ эрг}$$

Возможное решение вопроса –

Вращающийся коллапсар

Краткий обзор ротационного механизма:

На пороге гравитационного коллапса
ядро звезды **Fe**

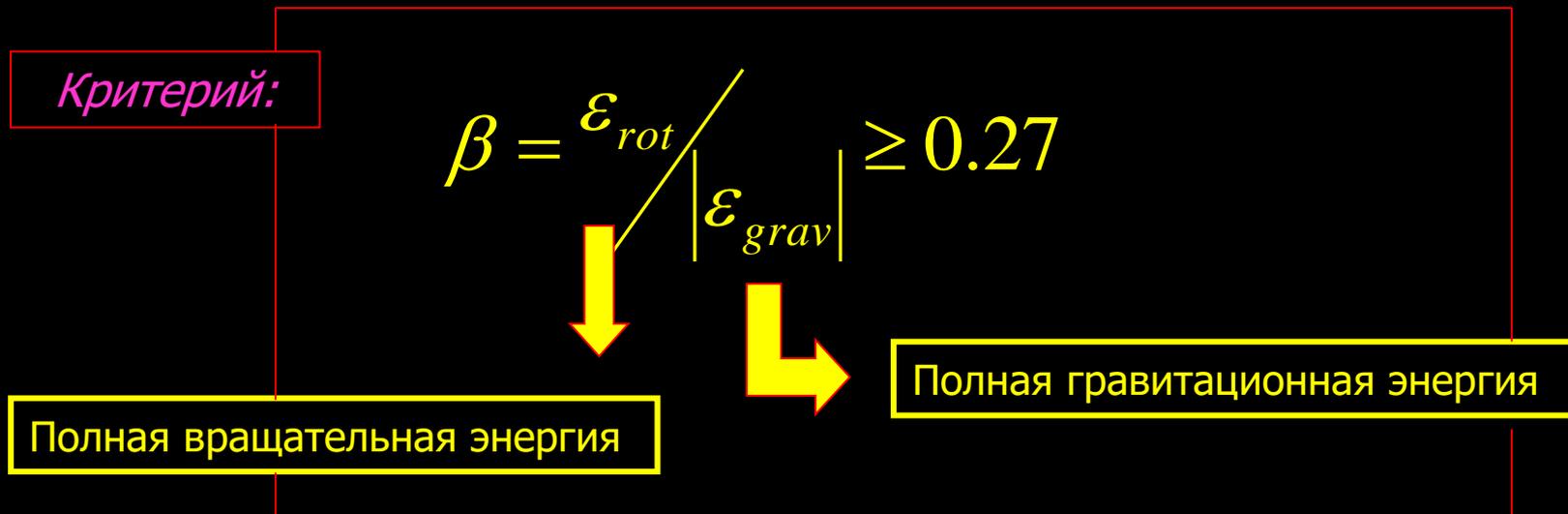


M_t - общая масса, I_0 - полный вращательный момент.

сохраняются

во время коллапса ядра звезды
во вращающийся коллапсар

С высокой вероятностью коллапсар попадает в область динамической нестабильности.



Во время коллапса ϵ_{rot} **значительно** возрастает по сравнению с $|\epsilon_{grav}|$, которая тоже растёт.

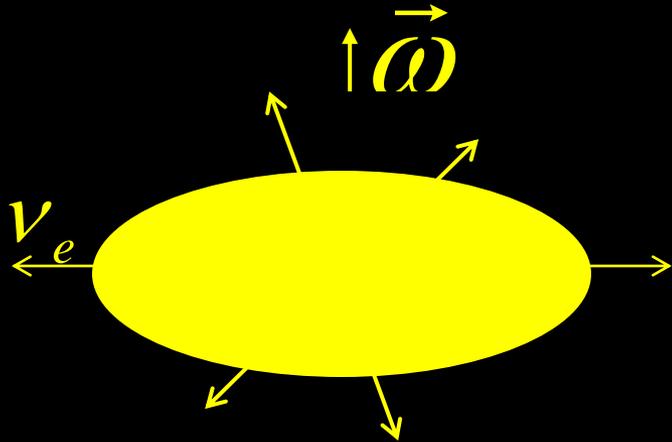
Эта нестабильность развивается с характерным гидродинамическим временем и приводит к разрыву коллапсара на части.

Вращающийся коллапсар

Модель двухступенчатого гравитационного коллапса

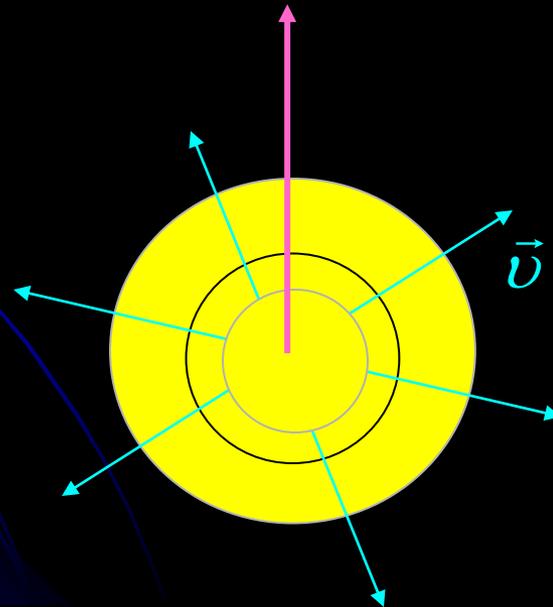
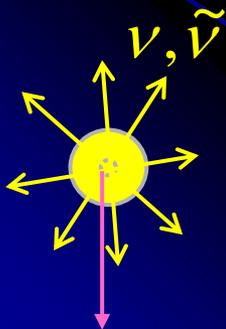
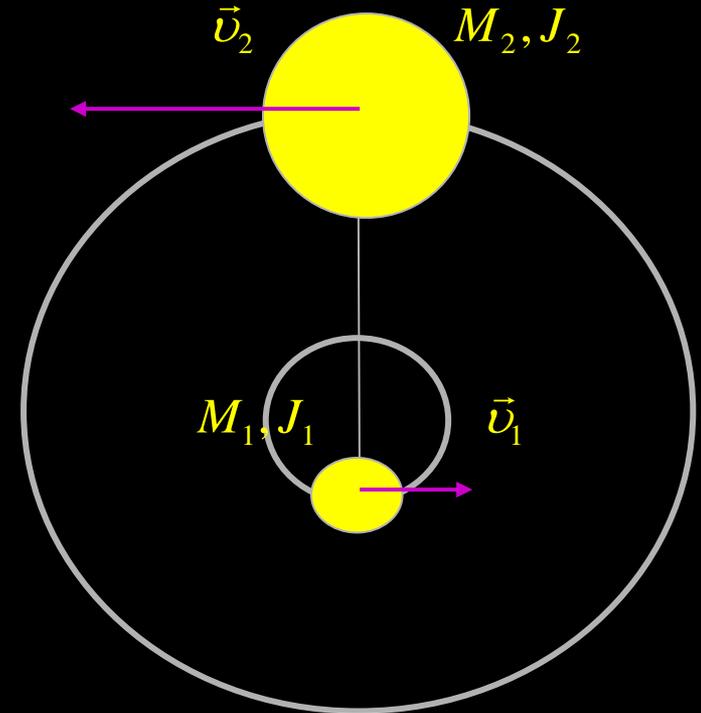
[Имшенник В.С., Space Sci Rev, 74, 325-334 (1995)]

сбоку



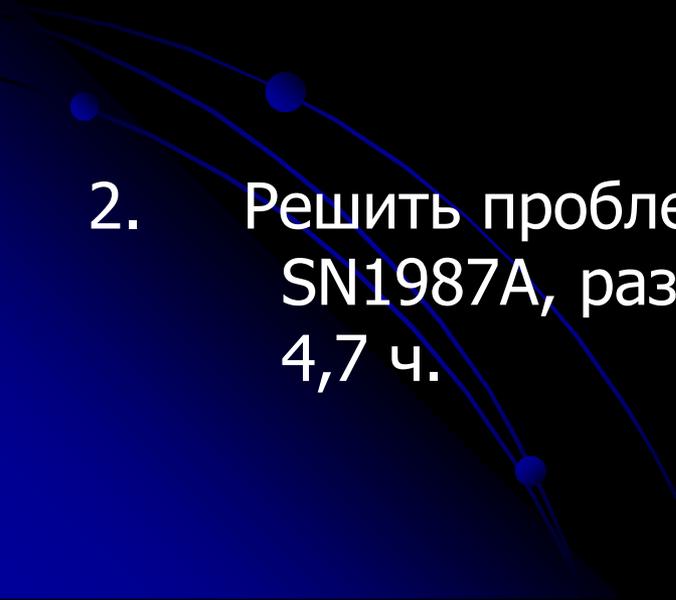
$$M_2 < M_1$$

$$v_2 > v_1$$



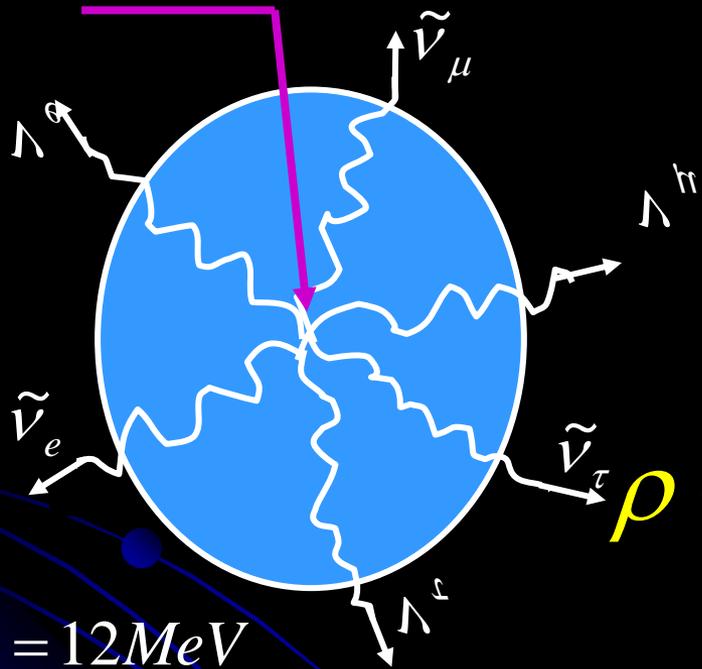
сверху

Эффекты вращения дают возможность:

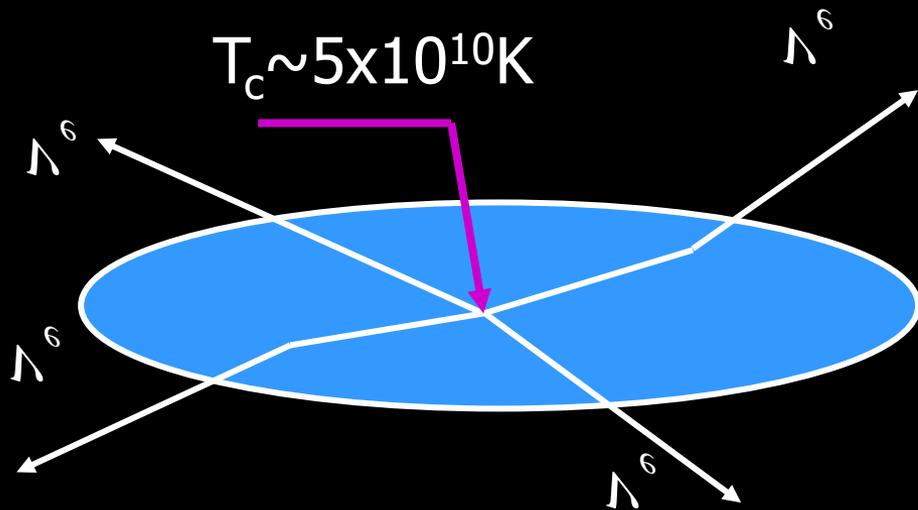
1. Решить проблему трансформации коллапса во взрыв для массивных и коллапсирующих сверхновых (все типы SN, кроме Ia - термоядерных SN)
 2. Решить проблему двух нейтринных сигналов от SN1987A, разделенных временным интервалом 4,7 ч.
- 

Разница выхода нейтрино в модели стандартного коллапса и в модели вращающегося коллапсара

$$T_c \sim 5 \times 10^{12} \text{ K}$$



$$T_c \sim 5 \times 10^{10} \text{ K}$$



$$\rho \sim 2.6 \cdot 10^{14} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$$

$$\bar{E}_{\tilde{\nu}_e} = 12 \text{ MeV}$$

$$\bar{E}_{\nu_e} = 10 \text{ MeV}$$

$$\bar{E}_{\nu_\mu, \tilde{\nu}_\mu, \nu_\tau, \tilde{\nu}_\tau} = (20 - 25) \text{ MeV}$$

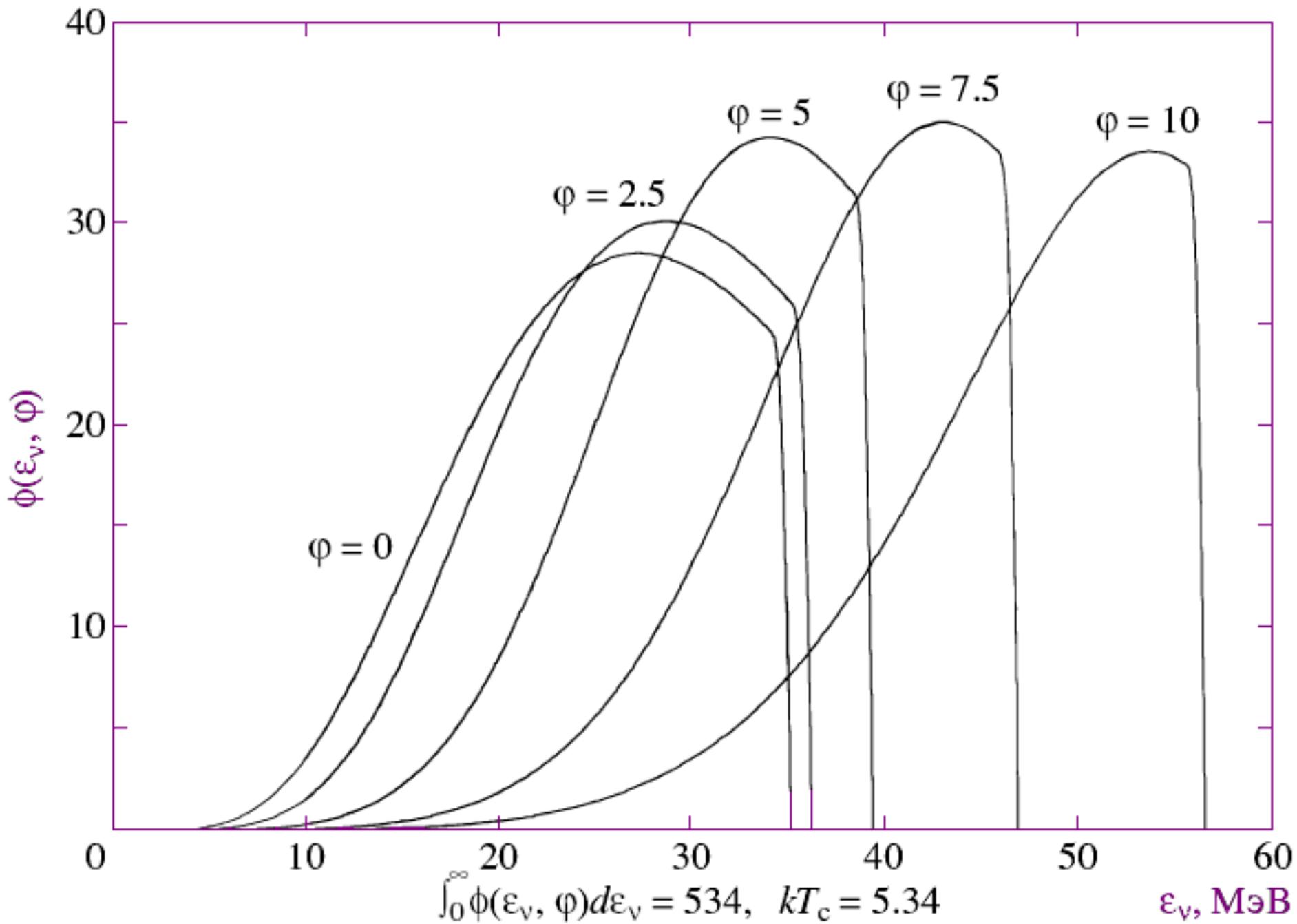
$$\varepsilon_{\nu, \tilde{\nu}} = 5.3 \cdot 10^{53} \text{ эрг}$$

Основная реакция - УРКА-процесс:



$$\bar{E}_\nu = (30 - 50) \text{ MeV}$$

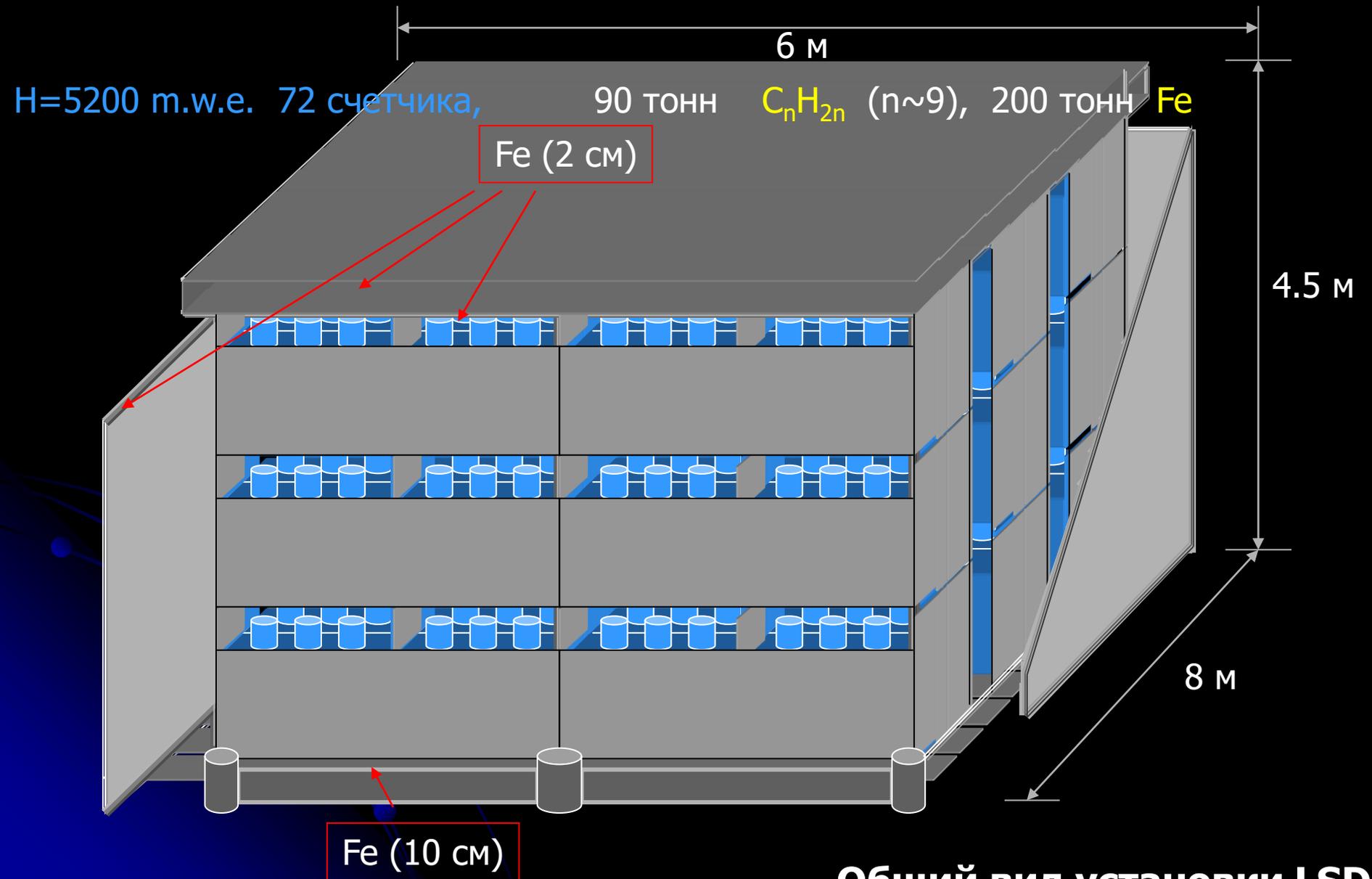
$$\varepsilon_{\nu_e, \tilde{\nu}_e} \approx \varepsilon_{\nu_e} = 8.9 \cdot 10^{52} \text{ эрг}$$



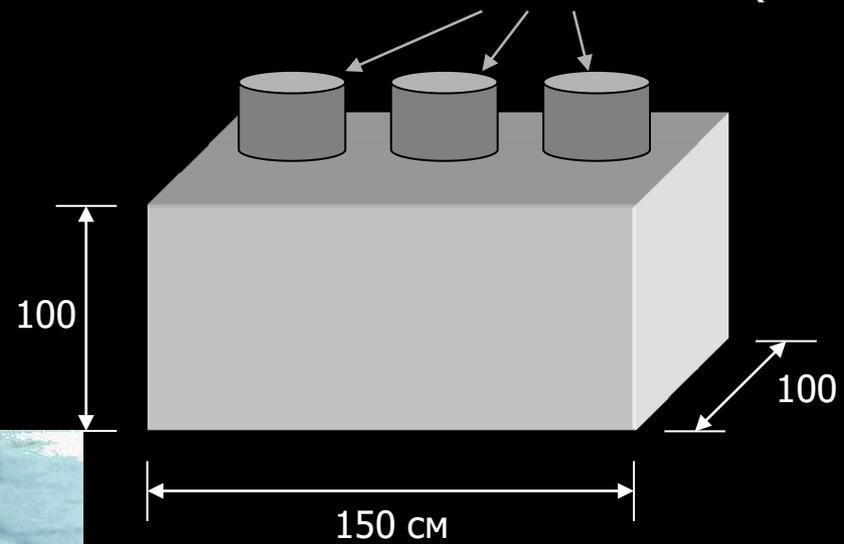
Рассмотрим, как различные детекторы, работавшие во время вспышки SN1987A, могли зарегистрировать нейтринные сигналы в рамках модели вращающегося коллапсара, которая сводится к следующему:

1. Должны существовать две нейтринные вспышки, разделенные временем $t_{\text{грав}} \sim 5$ ч.
2. Нейтринный поток во время первой вспышки состоит из электронных нейтрино, энергетический спектр – жесткий и асимметричный со средними энергиями в диапазоне 25-50 MeV. Полная энергия нейтрино 8.9×10^{52} эрг, длительность $t \sim 2.4 - 6$ с.
3. Вторая нейтринная вспышка соответствует теории стандартного коллапса.

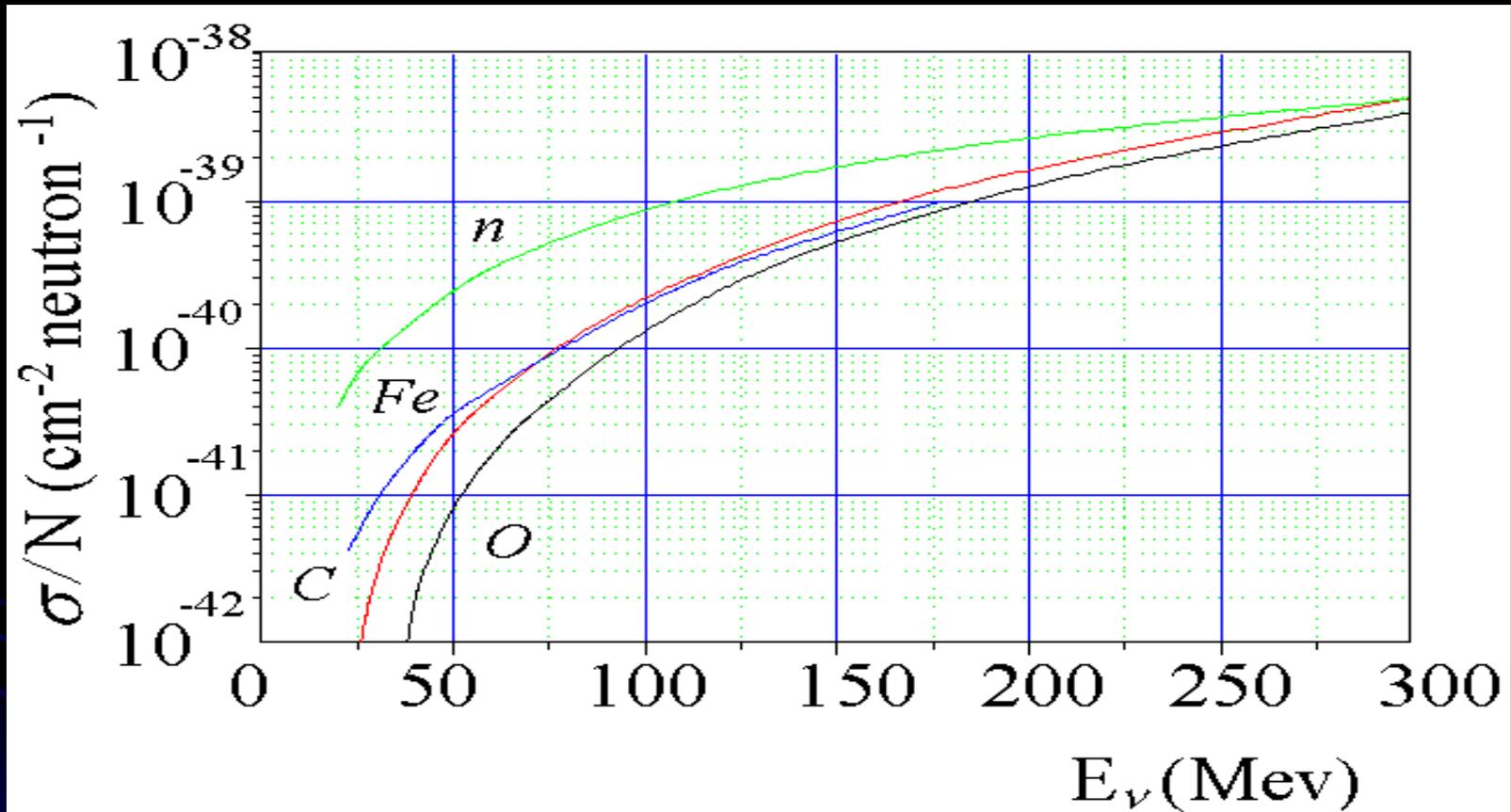
Жидкостной сцинтилляционный детектор (LSD)



PM FEU - 49B (\varnothing 15 cm)



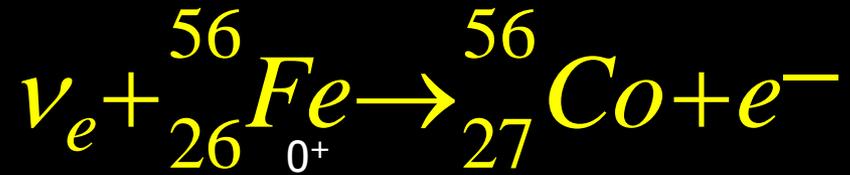
**Бугаев Е.В., Бисноватый – Коган С.С. И др.
1979 г.**



Сравнение приведенных полных сечений с сечением нейтрино на свободном нейтроне для реакции



1 ⁺ GT	_____	10,589
1 ⁺ GT	_____	7,589
1 ⁺ GT	_____	4,589
0 ⁺ IAS	_____	3,589
1 ⁺	_____	1,72
4 ⁺	_____	
	⁵⁶ ₂₇ Co	

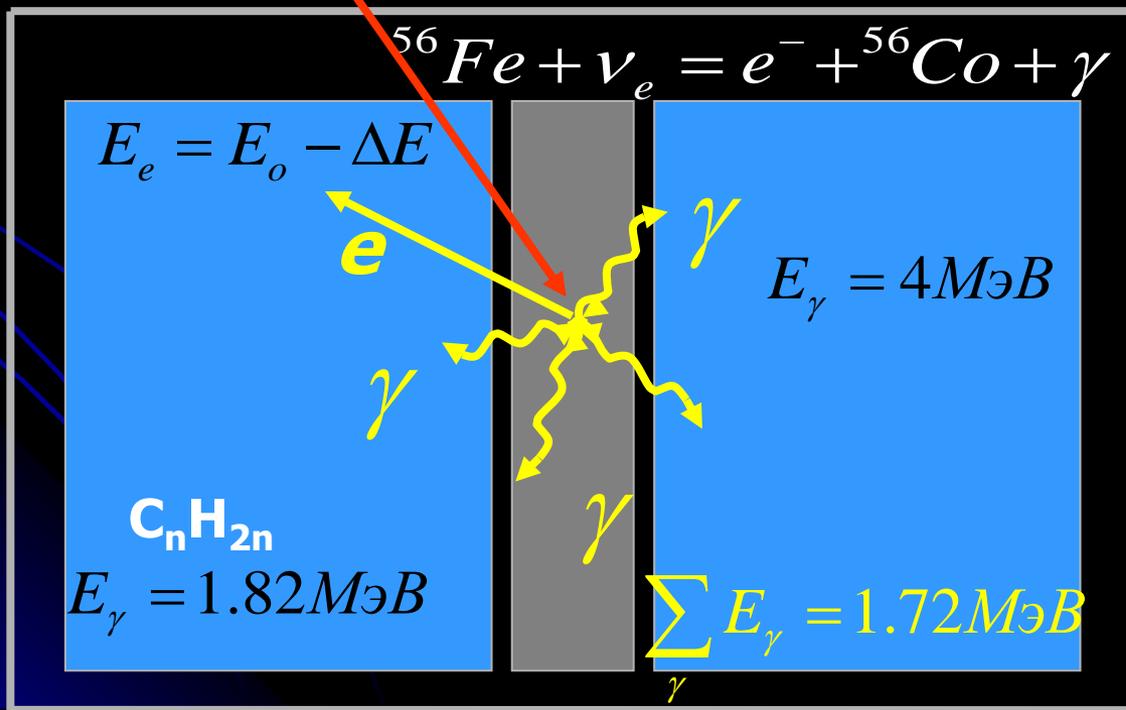
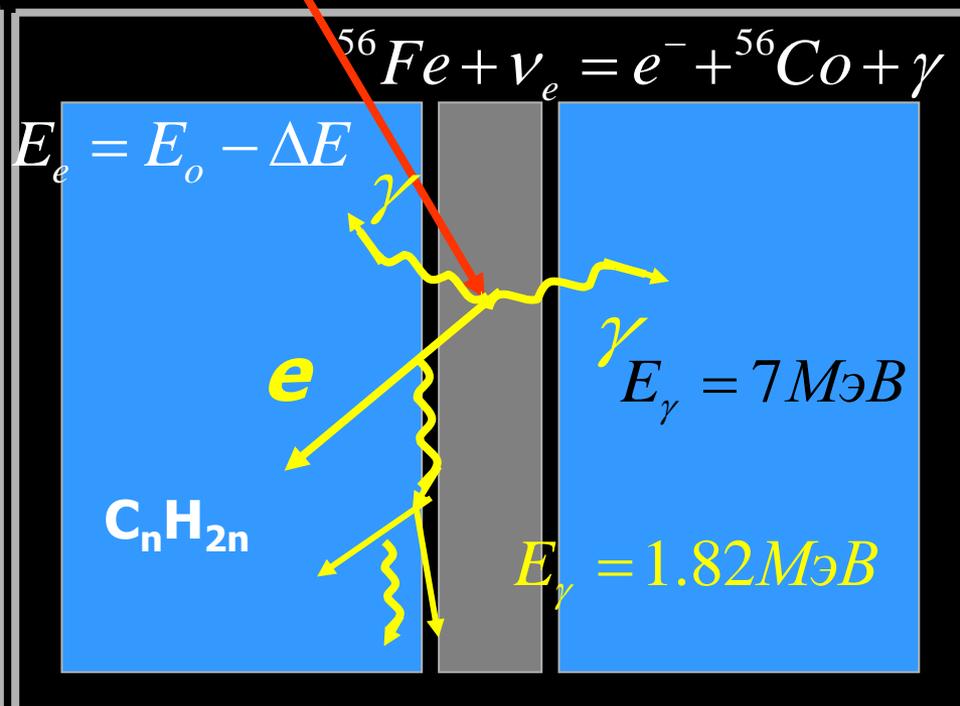
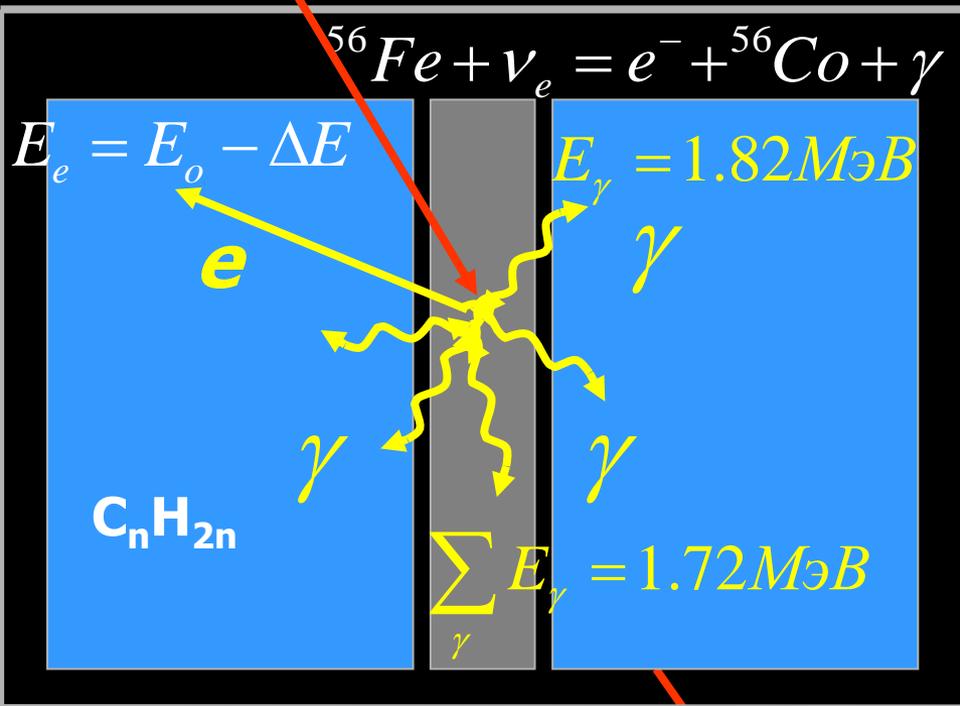


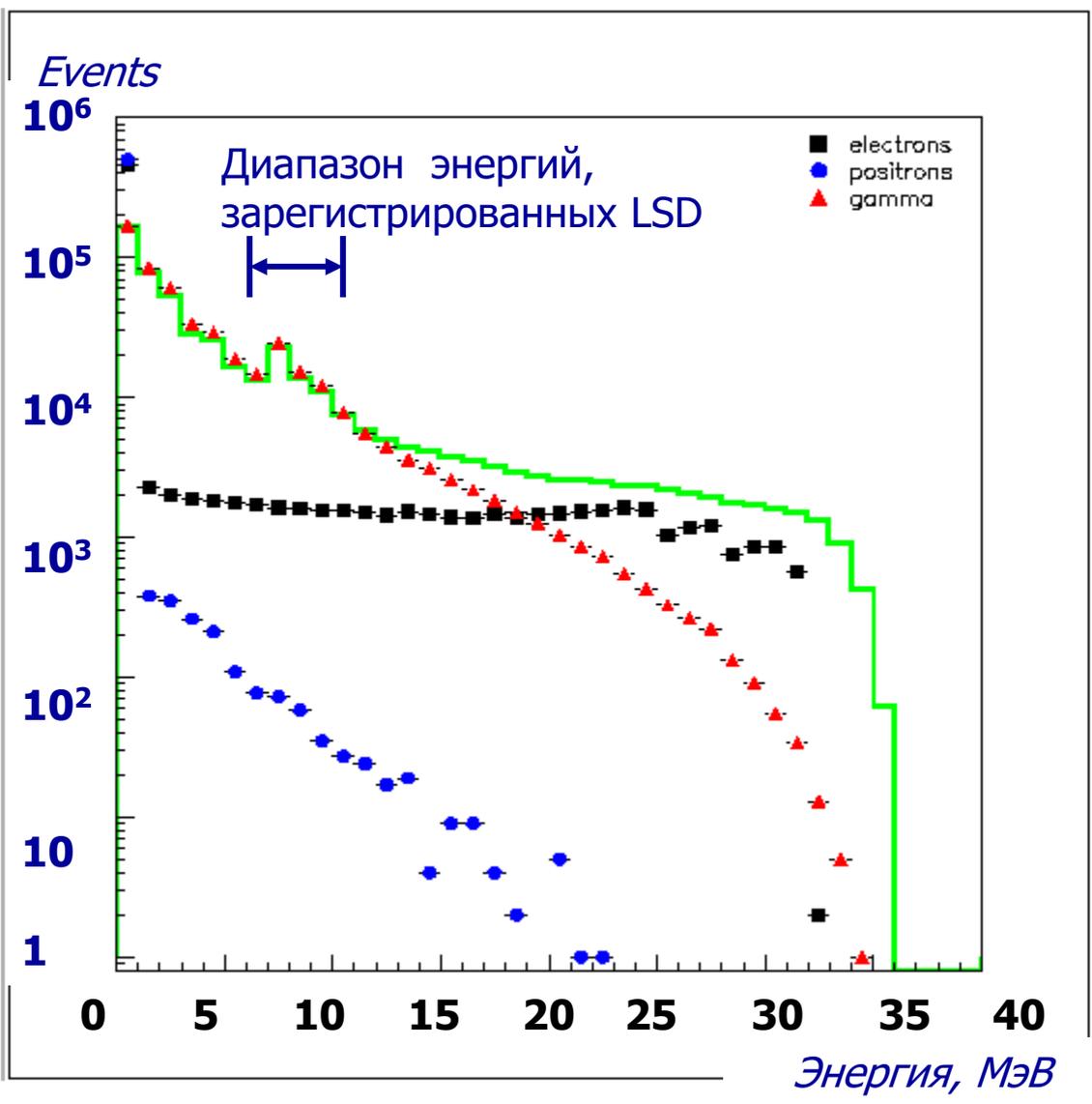
$$E\left({}_{27}^{56}\text{Co}\right) - E\left({}_{26}^{56}\text{Fe}\right) = 4.056 \text{ MeV}$$

$$E_\nu = 40 \text{ MeV}$$

$$\sigma_{tot} = 4.24 E^{-40} \text{ cm}^2$$

F	$\sigma = 1.27 \cdot 10^{-40} \text{ cm}^2$	$E_{K,e^-} = 31.84 \text{ MeV}$ $E_\gamma = 1.82 \text{ MeV} \sum E_\gamma = 1.72 \text{ MeV}$
GT	$\sigma = 6.41 \cdot 10^{-41} \text{ cm}^2$	$E_{K,e^-} = 30.84 \text{ MeV} \quad E_\gamma = 1 \text{ MeV}$ $E_\gamma = 1.82 \text{ MeV} \sum_n E_\gamma = 1.72 \text{ MeV}$
GT	$\sigma = 1.05 \cdot 10^{-40} \text{ cm}^2$	$E_{K,e^-} = 27.84 \text{ MeV} \quad E_\gamma = 4 \text{ MeV}$ $E_\gamma = 1.82 \text{ MeV} \sum_n E_\gamma = 1.72 \text{ MeV}$
GT	$\sigma = 1.27 \cdot 10^{-40} \text{ cm}^2$	$E_{K,e^-} = 24.84 \text{ MeV} \quad E_\gamma = 7 \text{ MeV}$ $E_\gamma = 1.82 \text{ MeV} \sum_n E_\gamma = 1.72 \text{ MeV}$





Энергетический спектр частиц, выходящих из железной пластинки толщиной 2,8 см

(расчет выполнен с использованием Geant4; гистограмма – общее энерговыделение)

Detector	Detection threshold	Estimated number of $\nu_e A$ interaction				Estimated Effect $N_2 \cdot \eta$	Exp.
		N_1	N_2	N_3	N_4		
LSD	5 – 7	3.2	5.7	3.5	4.9	3.2	5
KII	7 – 14	0.9	3.1	1.2	2.5	2.7	2*
BUST	10	2.8	5.2			~1	1***

$$E_{\nu_e} = 30 \text{ MeV } (N_1)$$

$$E_{\nu_e} = 40 \text{ MeV } (N_2)$$

$$f(E_{\nu_e}) \text{ with } \varphi = 5 (N_3)$$

$$f(E_{\nu_e}) \text{ with } \varphi = 7.5 (N_4)$$

$$\varphi = \frac{\mu_e}{kT}$$

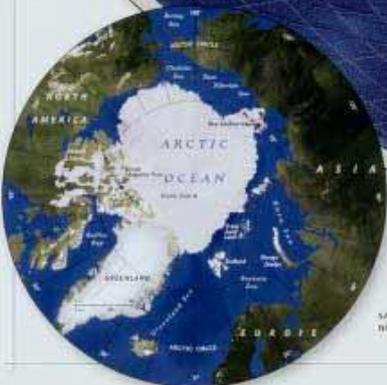
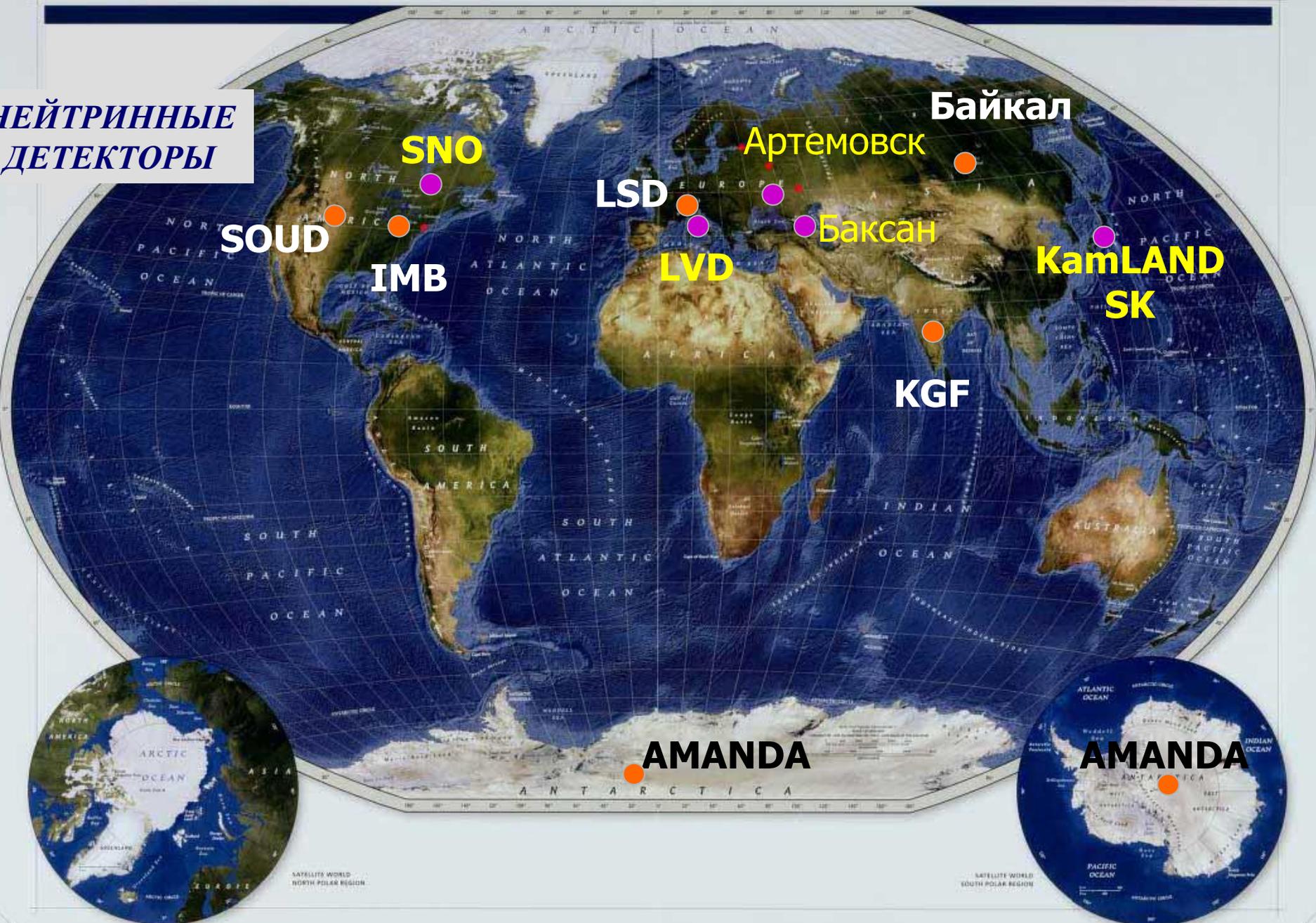
$$kT_c = 5.34 \text{ MeV}$$

$$\rho = 2.6 \cdot 10^{14} \text{ g / cm}^3$$

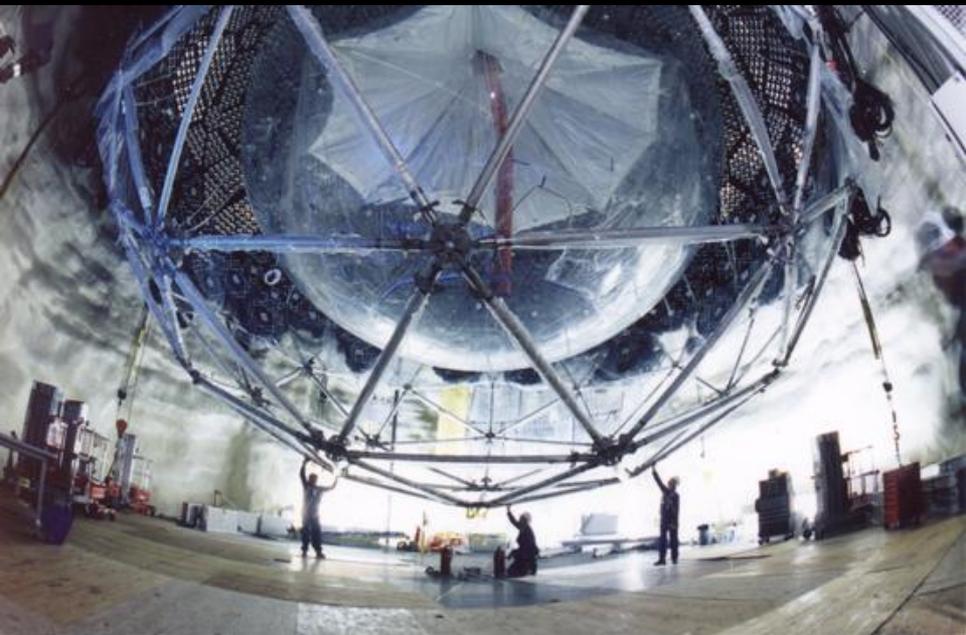
* De Rujula, 1987

** Alexeyev, 1987

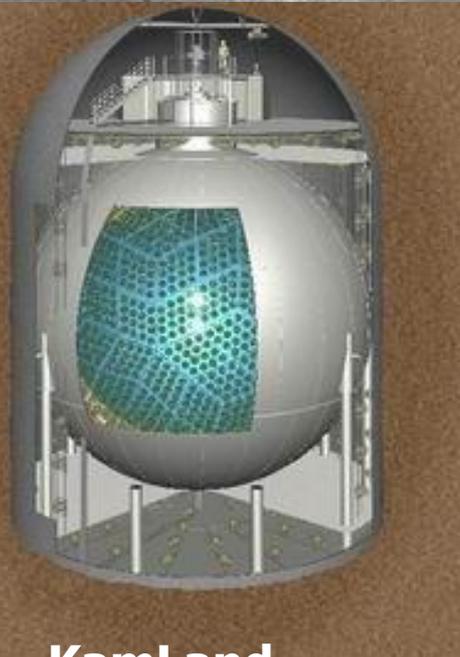
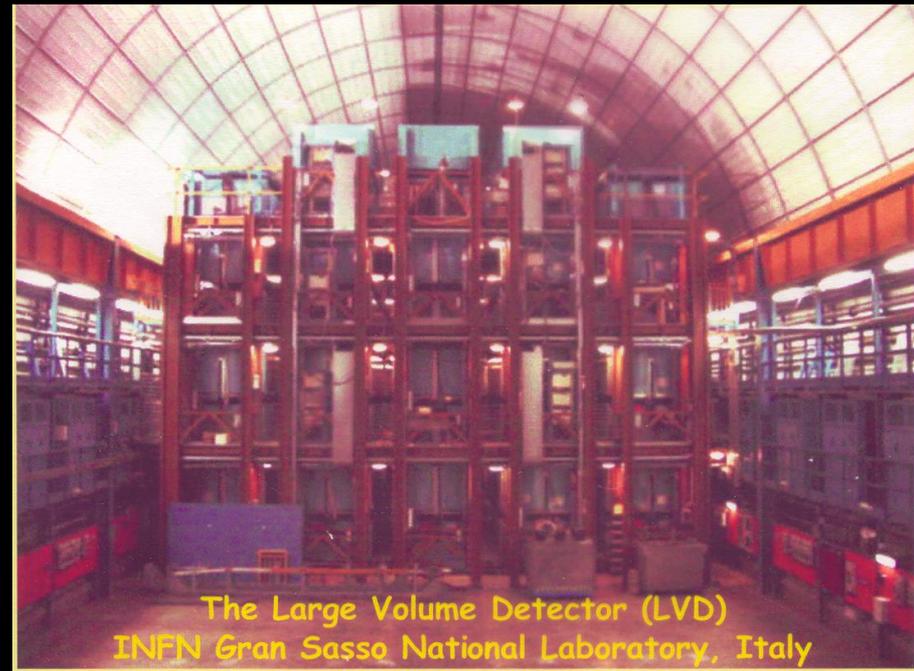
**НЕЙТРИННЫЕ
ДЕТЕКТОРЫ**



SNO



LVD

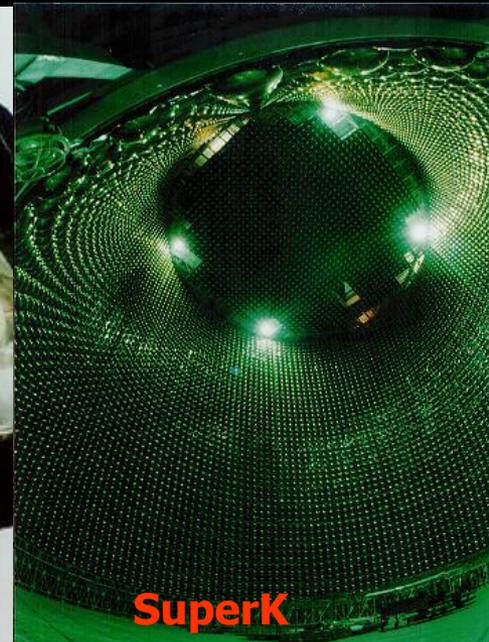


KamLand

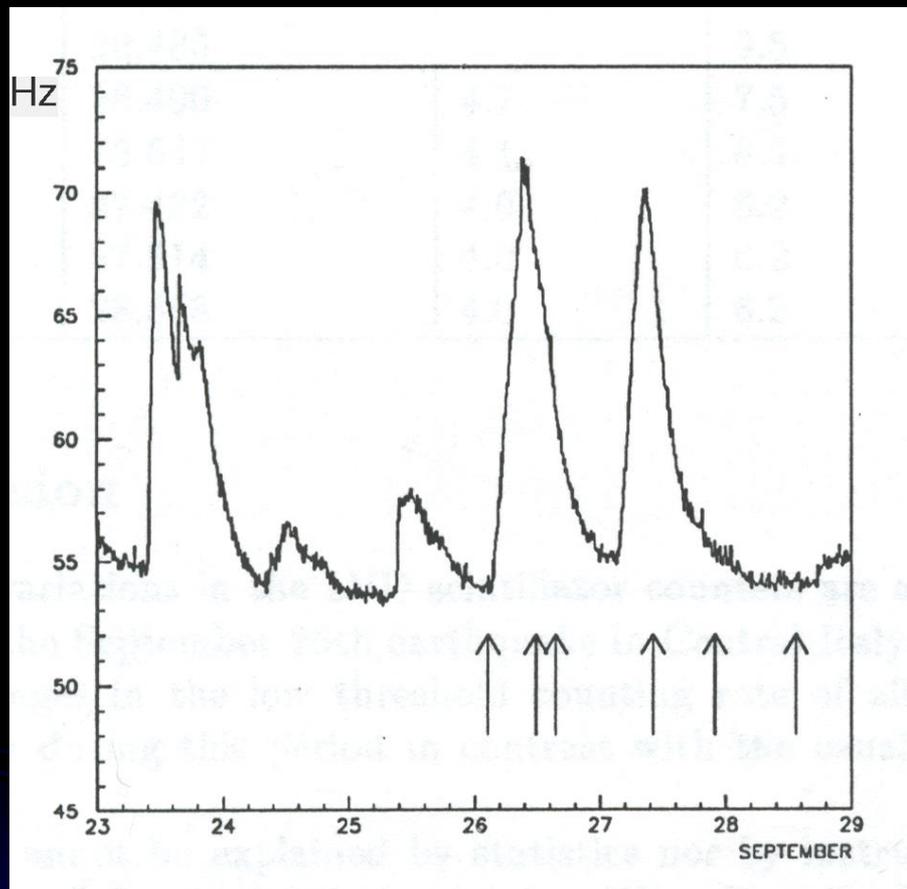


水槽上部（天井ドーム部）
の完成状況

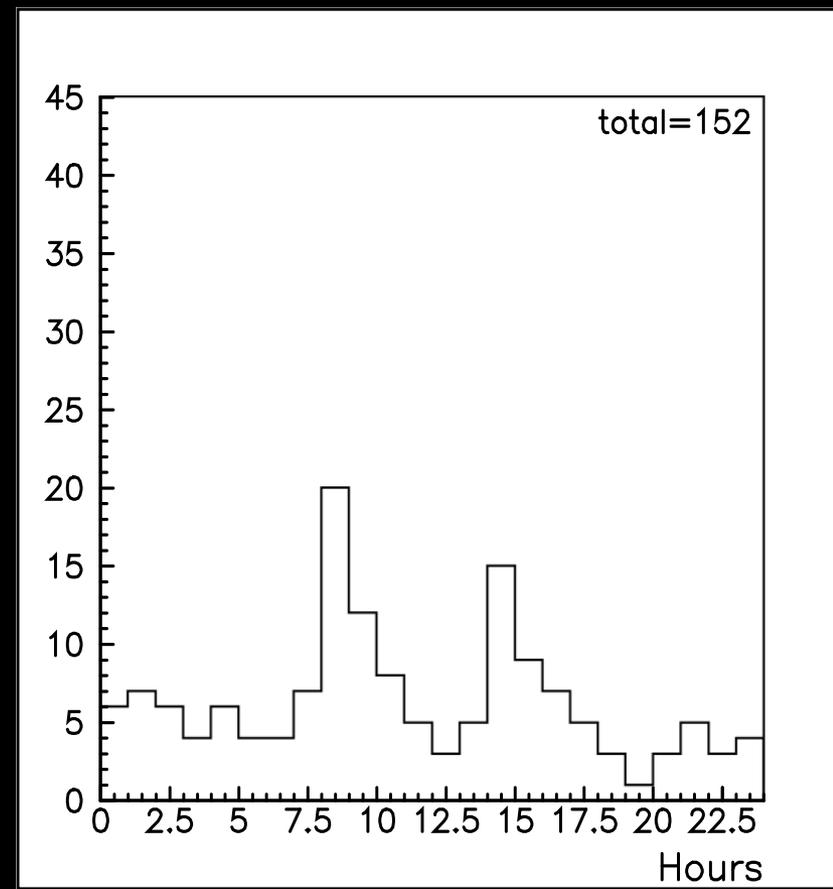
平成18年 6月 7日
撮影（左側はローマ部分）



Detector	Depth m.w.e	Mass, ktons	Thre- shold, MeV	Efficiency			Number of events			Back- ground s ⁻¹
				η_{e^+}	η_n	η_γ	$\bar{\nu}_e p$	$\nu_e A$	$\nu \nu_e C$	
Artemovsk ASD Russia	570	0.1 C _n H _{2n}	5	0.97	0.8	0.85	57	2.1	9.5	0.16
Baksan BUST Russia	850	0.13 (0.2) C _n H _{2n}	10	0.6	-	0.2	45 (67)	1.4 (2.2)	2.8 (4.3)	0.013 (0.033)
KamLAND USA Japan	2700	1. C _n H _{2n}	~ 4				- 500	22	300 54	
Gran Sasso LVD Italy,Russia	3300	0.95 Fe 1.1 C _n H _{2n}	4 – 6	0.9	0.6	0.5	- 550	470 24	300 60	< 0.1
Kamioka Super-K Japan,USA	2700	22.5 H ₂ O	5.5	0.7	-	-	- 6000	750 220	-	
SNO Canada	6000	1.4 H ₂ O 1 D ₂ O	5				530	37 770		



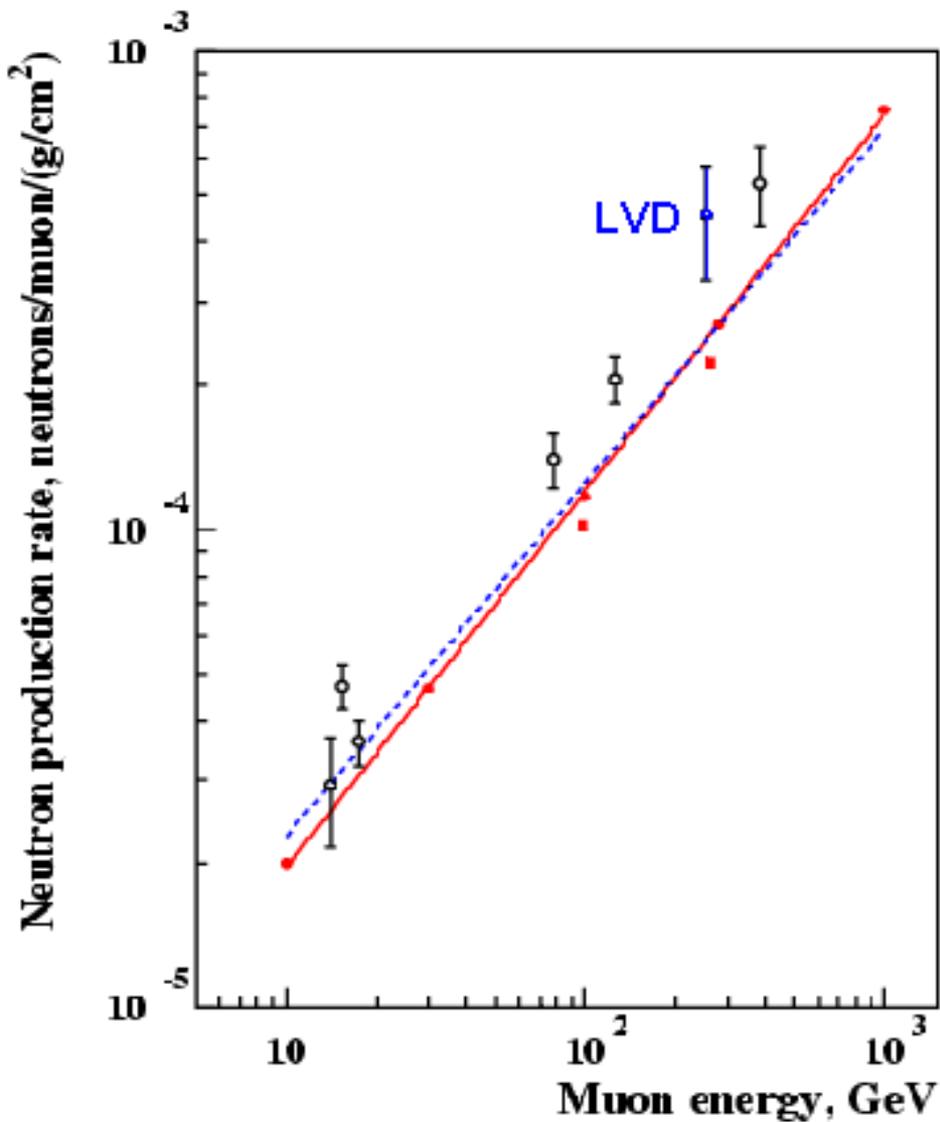
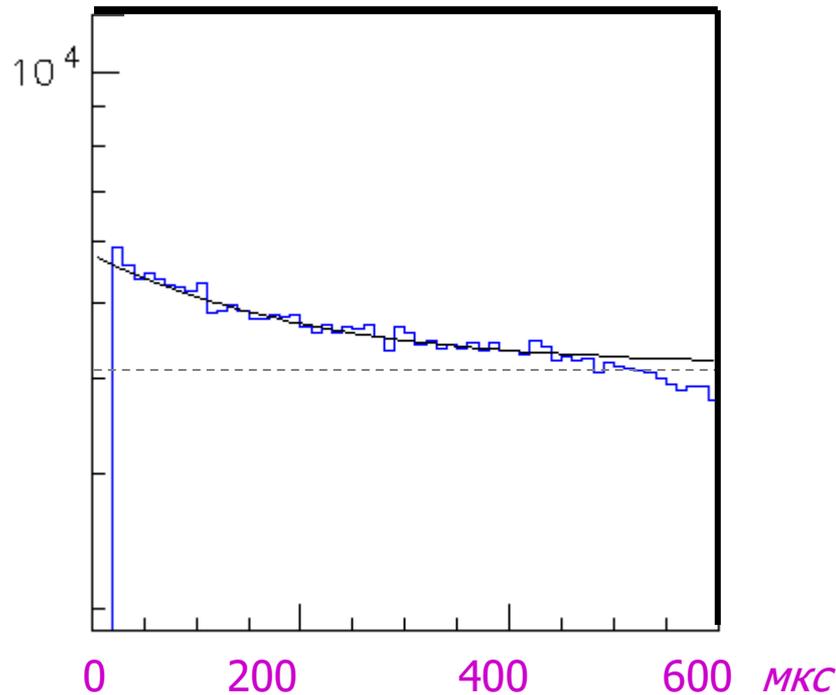
Темп счета установки во время землетрясения в Италии (1997 г.). Стрелками отмечены моменты сейсмических толчков.



Распределение радоновых пиков по времени суток (рабочие дни, ноябрь – март 1997 г.)

Нейтроны генерируемые мюонами на больших глубинах

Количество событий



Наиболее простой случай



двойная нейтронная звезда (НЗ)

Почти весь угловой момент может превратиться в угловой орбитальный момент, $J_{orb} \leq J_o$, $\Delta J = J_o - J_{orb}$ становится спиновым угловым моментом самих нейтронных звезд, особенно в более массивном компоненте этой двойной звезды. **Двойная нейтронная звезда формируется посредством гидродинамической фрагментации вращающегося коллапсара.**

ν_e – spectra of volume radiation for B-nucleonic gas + FD-electronic gas

The only reaction of URCA-processes: $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$

Neutrino radiation luminosity per gramm
(Ivanova et al, 1969; Imshennik, Nadyozhin, 1971, 1972)

$$\theta = \frac{N_n}{N_p}, \quad \varphi = \frac{\mu_e}{kT}$$

$$\frac{q_\nu}{\rho} = \frac{1}{m_0} \cdot \frac{\ln 2}{(ft)_{np}} \cdot \frac{1}{1 + \theta} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\nu_e}}{m_e c^2} \right)^5 \left[1 + \exp \left(\frac{\varepsilon_{\nu_e}}{kT} - \varphi \right) \right]^{-1} g^{-1} \text{sec}^{-1}$$

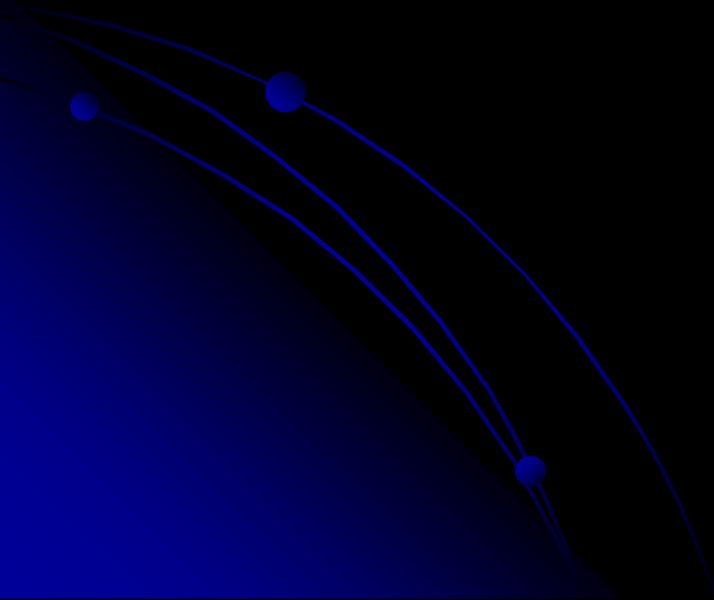
$$\frac{q_\nu}{\rho} \propto \left(\frac{\varepsilon_{\nu_e}}{m_e c^2} \right)^5 \frac{1}{1 + \exp \left(\frac{\varepsilon_{\nu_e}}{kT} - \varphi \right)} \sim \frac{x^5}{1 + \exp(x - \varphi)}$$

Сигнал, зарегистрированный LSD,

-

первое детектирование
нейтринного потока от коллапса
SN 1987A

?



φ	0	2.5	5.0	7.5	10	20
$X_{\max}(\varphi)$	5.033	5.303	6.327	8.008	10.00	18.97
$Y(\varphi)$	5.509	6.750	7.296	8.757	10.57	19.32

1. Central parameter of rotating collapsar ($t \sim 2.5$ sec)
2. Total energy of neutrino radiation ($t \sim 6$ sec)

(Imshennik, Nadyozhin, 1977, 1992):

$$T_c = 6.2 \cdot 10^{10} K \quad (kT_c = 5.34 \text{ MeV}) \quad \rho_c = 2.6 \cdot 10^{14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$2.5 \leq \varphi_c \leq 10 \quad (\theta \sim 10 - 100)$$

$$\langle \varepsilon_\nu \rangle \sim \varepsilon_{\nu_{\max}} = kT_c \cdot x_{\max}(\varphi) \sim (30 - 50) \text{ MeV}$$

$$\varepsilon_{\nu_e \bar{\nu}_e} \sim \varepsilon_{\nu_e} = 8.9 \cdot 10^{52} \text{ erg}$$



Упрощенный случай: звезда сферически – симметричная, невращающаяся, немагнитная.

Гравитационная энергия,
энергия ядерного излучения

Для объяснения взрыва сверхновой Георгий Гамов **полностью исключал** возможность использования модели одномерного сферически-симметричного коллапса.

«На самом деле, гораздо более вероятно, что недостаток поддерживающего давления во внутренней части звезды вызовет нерегулярное движение газовых масс, причем некоторая часть из них будет стремиться в направлении к центру, а другая - «выжиматься» и выбрасываться в виде сильных всплесков.»

«Вращение звезды будет прямо влиять на это явление, так как наличие центробежной силы будет мешать движению материи к центру в экваториальных областях».

[Gamov G.: 1944, Phys. Rev., 65,20]