

Подземная физика и эксперименты на детекторе

Ряжская Ольга Георгиевна
ИЯИ РАН

- Подземная физика (UP) обсуждается как эффективный метод изучения широкого класса редких процессов в физике космических лучей и элементарных частиц, особенно связанных с ролью нейтрино в Астрофизике.
- В этом докладе я хотела бы отметить наиболее важную тематику выполненных за последнее время работ на подземном детекторе LVD, рассказать о самых интересных современных экспериментах.

Изучение проникающей компоненты космических лучей (КЛ) под землёй

- Работы, которые положили начало UR, шли одновременно с открытием и исследованием природы КЛ. Изучением проникающей способности КЛ, измерением функции интенсивность-глубина занималось все большее число физиков. Пионерами этих работ были итальянец Доменико Пачини и советский физик Лев Мысовский, разместившие свои приборы под водой. Первый сделал это в 1905-1912 гг., второй в 1927-1929 гг. Было показано, что КЛ не являются гамма-квантами.

- В последующие 40 лет большая группа физиков активно изучает КЛ на различных глубинах под землёй. Измерена кривая зависимости интенсивности мюонов от глубины (до 7000 м.в.э.)

1938 V. Wilson

1939 J. Clay and A. Van Gemert

1950 L.M. Bollinger

1951 C.A. Randall and W.E. Hazen

1955 L. Avan and M. Avan

1965 C. Castagnoli et al.

- Для изучения нейтрино атмосферного и астрофизического происхождения нужно было начать создавать **большие детекторы** с массами 100-1000 тонн, также требовалось **знание фоновых условий** в подземных лабораториях. Шла интенсивная работа по созданию этих детекторов: радиохимических детекторов (Cl-Ar, Ga-Ge), больших сцинтилляционных детекторов, черенковских детекторов и детекторов, снабженных трековыми системами.
- Cl-Ar эксперимент был предложен Б. Понтекорво в 1946, и был реализован Р. Дэвисом в 1967.
- В начале 60-х гг. в ФИАНе была создана лаборатория нейтрино (зав. лабораторией Г.Т. Зацепин). На Баксане планировалось создать подземную лабораторию
 1. для регистрации атмосферных нейтрино, идущих с обратной стороны Земли (руководитель проекта А.Е. Чудаков),
 2. для детектирования солнечных нейтрино Cl-Ar методом (руководитель проекта А.А. Поманский).
- Было решено построить Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп. Для него в 1965-1968 гг. был разработан эффективный жидкий сцинтиллятор (А.В. Воеводский, В.Л. Дадыкин, О.Г. Рязская), который был использован в дальнейшем для нескольких подземных детекторов ИЯИ.
- БПСТ был введен в эксплуатацию в 1979 году. Был начат эксперимент по регистрации нейтрино с обратной стороны Земли (А.Е. Чудаков и др.).

Для всех подземных экспериментов вопрос фонов играет очень важную роль.

Например, фон для солнечных



Статистика ν событий на 1 атом мишени в 1 сек составляет

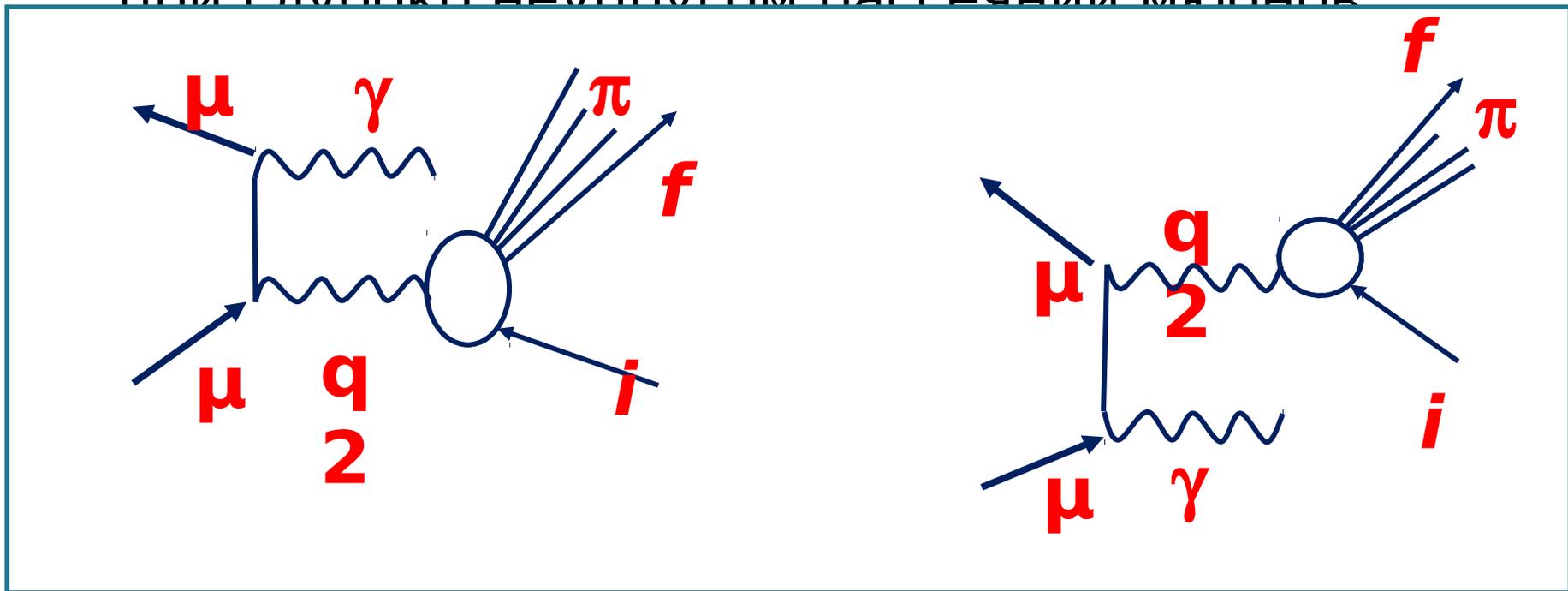
$\sim 10^{-34} - 10^{-37}$ (ppe)

Ядерно-активная компонента космических лучей при взаимодействии с хлором может



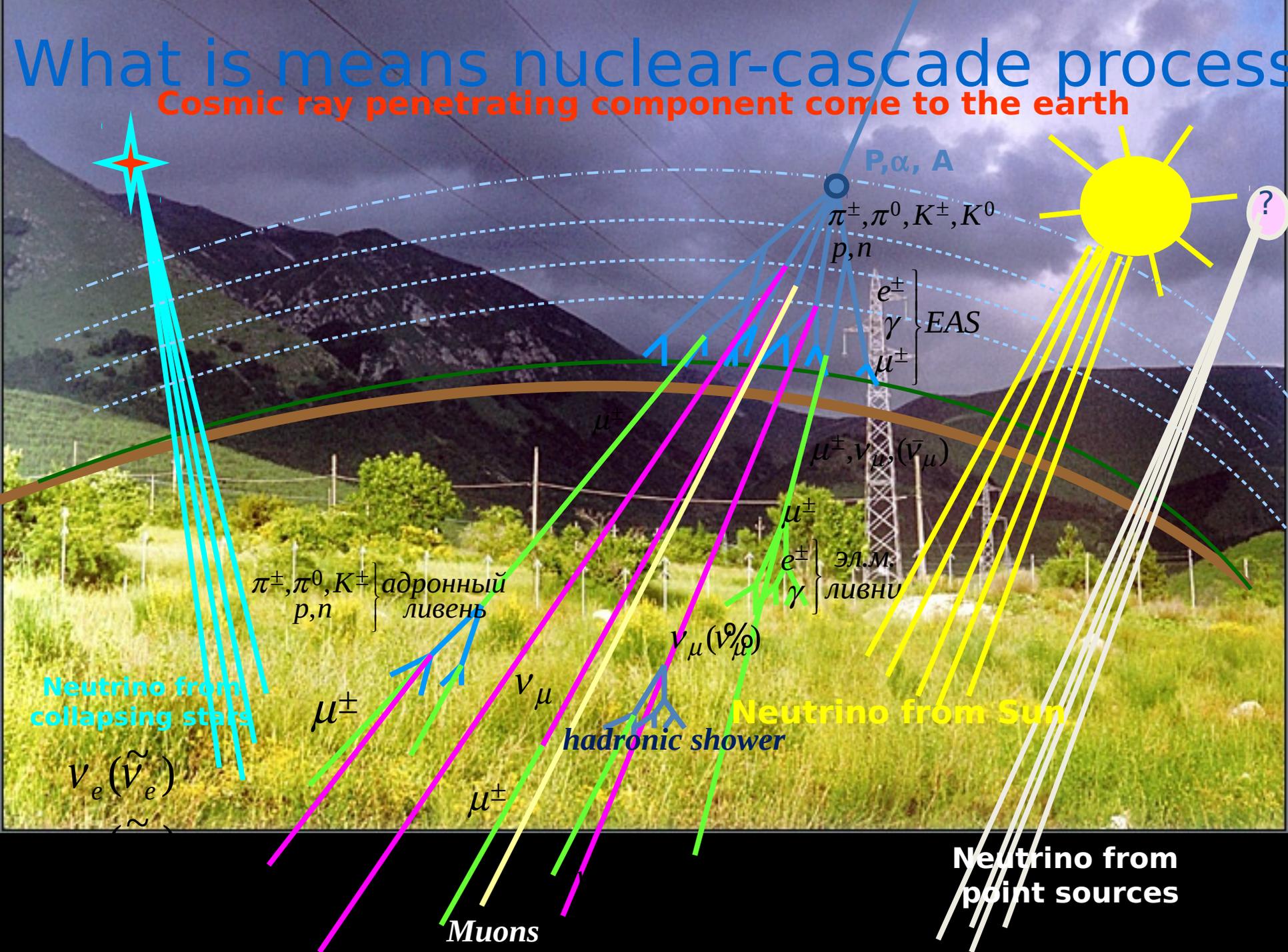
До 1964 считалось, что ядерно-активная компонента создается в электромагнитных каскадах, генерируемых мюонами под землёй.

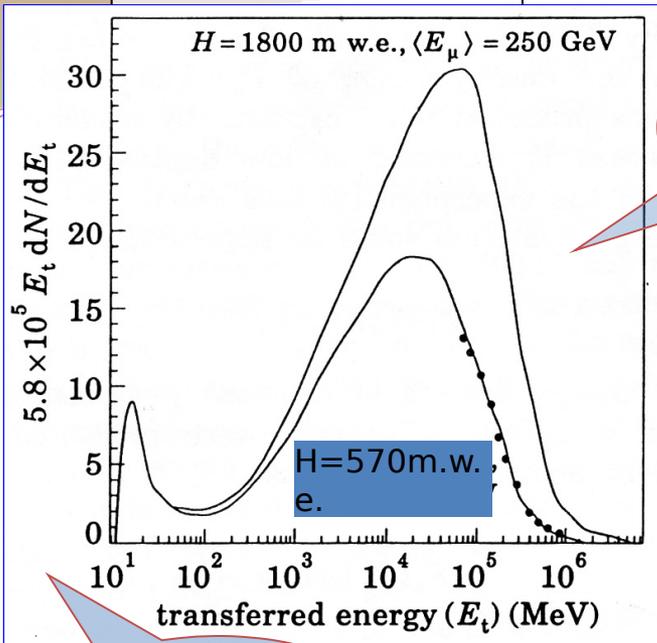
В работах Г.Т. Зацепина и О.Г. Ряжской было показано, что основным механизмом являются ядерные каскады, возникающие при глубоко неупругом рассеянии мюонов



What is means nuclear-cascade process

Cosmic ray penetrating component come to the earth



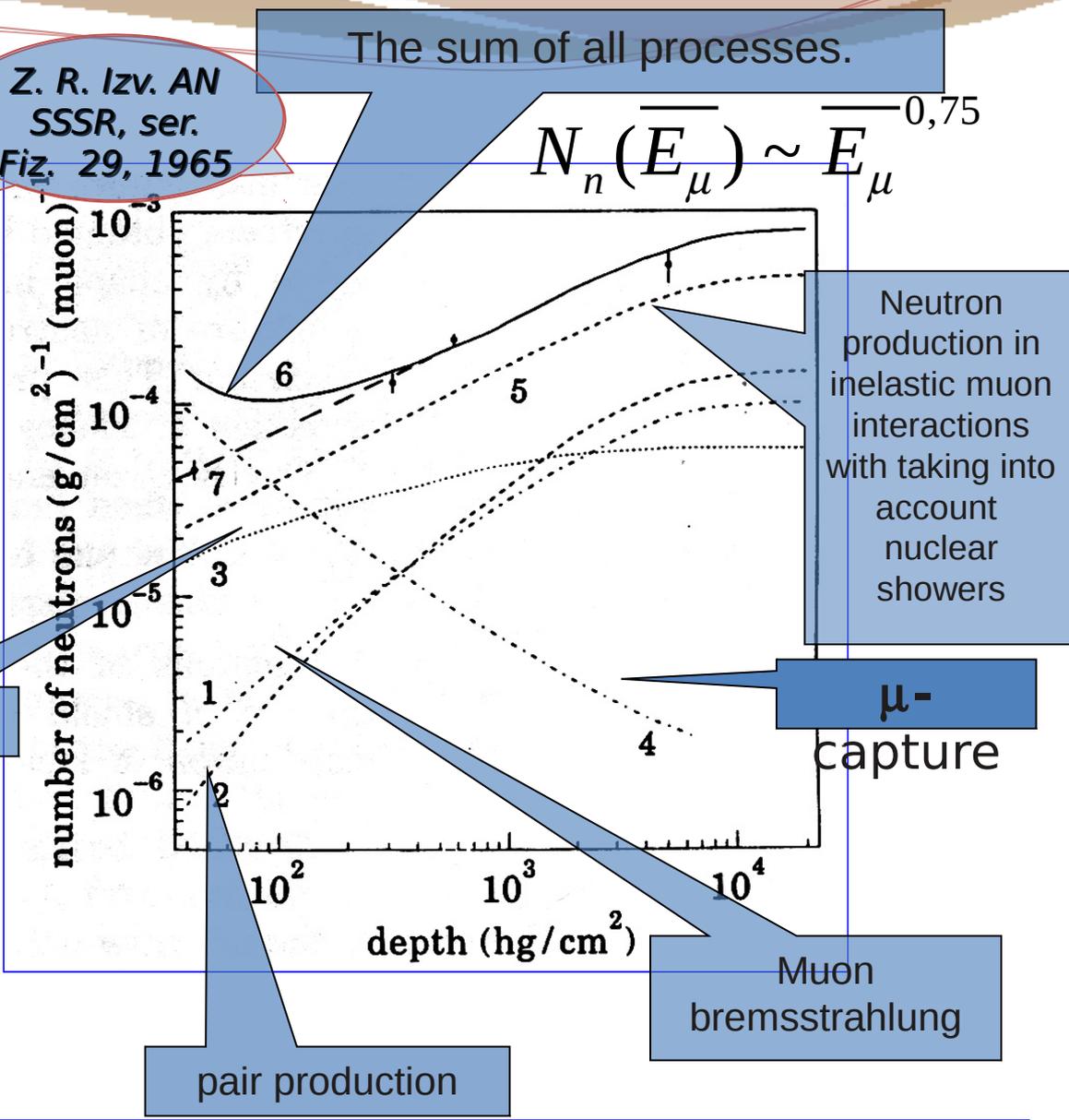


Z. R. Izv. AN SSSR, ser. Fiz. 29, 1965

Kh. M. R. R. JETP Lett., 36, 1982

δ -электроны

Dependence of the contribution of neutrons, produced in inelastic muon interactions, on the energy transfer in the interaction E_t



$$N_n(\overline{E}_\mu) \sim \overline{E}_\mu^{0,75}$$

Neutron production in inelastic muon interactions with taking into account nuclear showers

μ -capture

Muons bremsstrahlung

pair production

The number of generated neutrons per 1 muon per 1 g/cm² vs the depth from the top of the atmosphere.

- В течение последующих 40 лет результаты этого расчета были подтверждены на подземных детекторах ИЯИ, расположенных на разных глубинах под землёй.
- АСД («Коллапс»), Артёмовск, ИЯИ, 105 тонн сцинтиллятора, 1977 г.
- LSD (ИЯИ и Институт космо-геофизики Италии), Монблан, 90 тонн сцинтиллятора, 200 тонн железа, 1984 г.
- LVD (ИЯИ РАН совместно с Национальной лабораторией Гран Сассо НИЯФ Италии), 1000 тонн сцинтиллятора, 1000 тонн железа, 1992 г.

• Discussion about underground physics, 1969



- Второй уровень
- Третий уровень
- Четвертый уровень
- Пятый уровень



- Второй уровень
- Третий уровень
- Четвертый уровень
- Пятый уровень



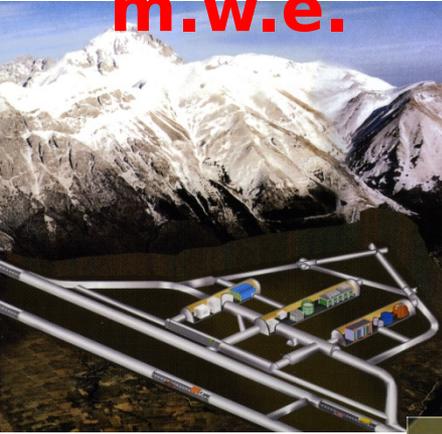
• Discussion about Russian-Italian collaboration, 1977



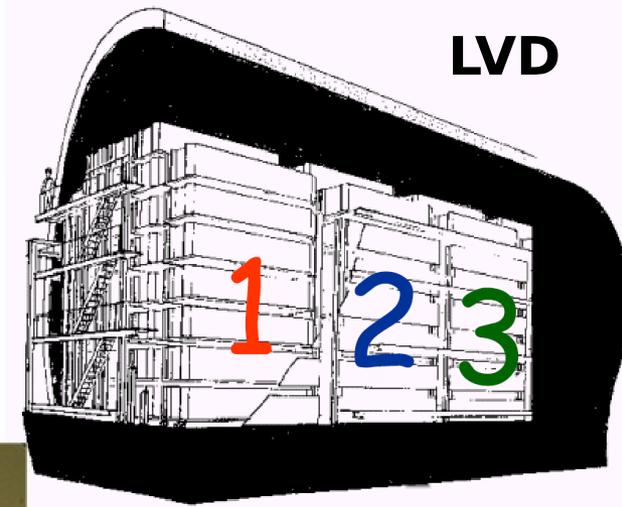
1978: B. Pontecorvo about Gran Sasso lab:

“I regret not to be young enough to participate in this formidable project. The scientific content of the project appears to me extremely interesting”.

LVD – detector under Gran Sasso (LNGS) @ 3300 m.w.e.



- ✓ the largest iron-scintillation telescope in the world
- ✓ 3 towers:
 - ✓ 840 scintillation counters (1010)



Study & important results in:

- neutrino physics
- astrophysics
- cosmic ray physics
- search for rare processes

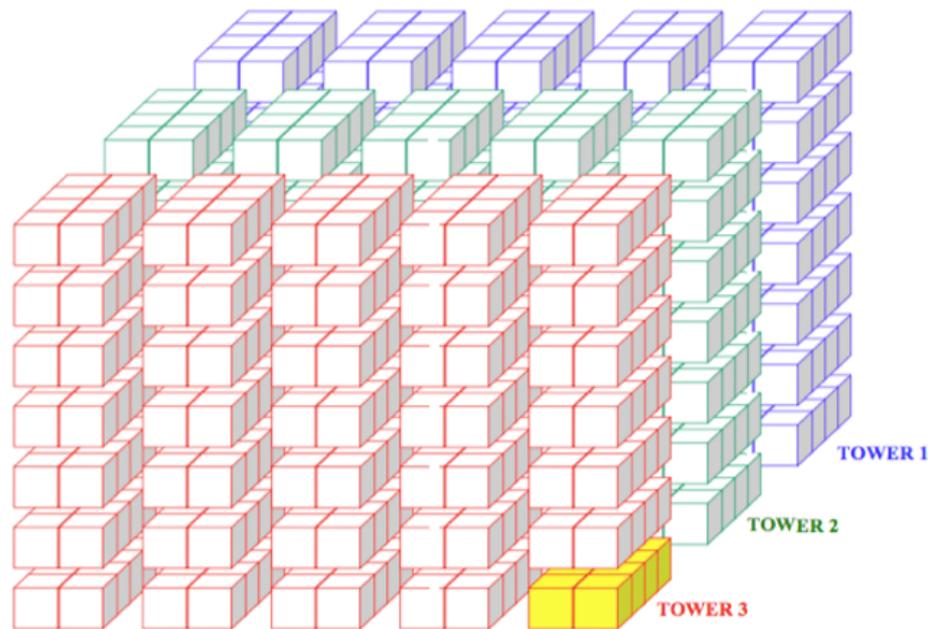
The main goal is to search for ν bursts from collapsing



LVD is 10 times expanded version of the LSD (Mont Blanc) apparatus which has detected the ν -burst from SN 1987A at 2:52 UT on February, 23, 1987. LSD & LVD are Russian-Italian projects. Scintillator & scintillation counters were elaborated

The Large Volume Detector

- modular liquid scintillator detector made by 840 stainless steel 1.5m³ counters arranged in 3 identical towers
- each counter is viewed by 3 PMTs (3-fold coincidence).
- each TOWER is fully independent and can run all alone.



Main features:

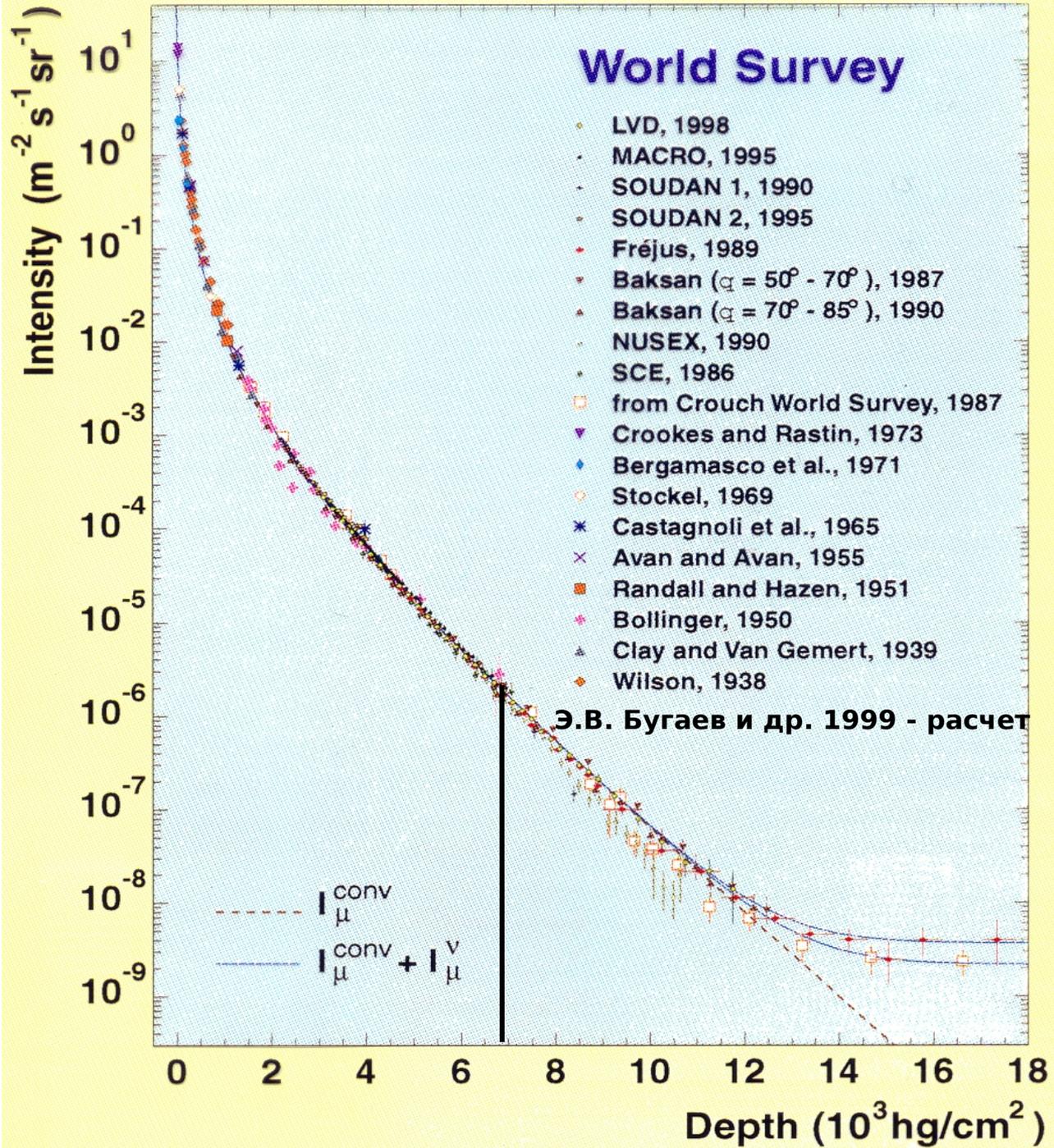
Liquid Scintillator: C_nH_{2n+2} $\langle n \rangle = 9.6$ + 1g/l PPO + 0.03g/l

POPOP, $\rho = 0.8$ g/cm³ **total 1 kt**

840 stainless steel, 1.5 m³, counters **total 0.85 kt**

(FEU49b or FEU125) 15 cm diameter **2520 PMTs**





LVD is modular and unshielded

consequences:

- ❑ very high duty cycle
- ❑ Fe target
- ❑ leakage affects E resolution and detection efficiencies

✓ bk rate gradient among detector shells
self shielding

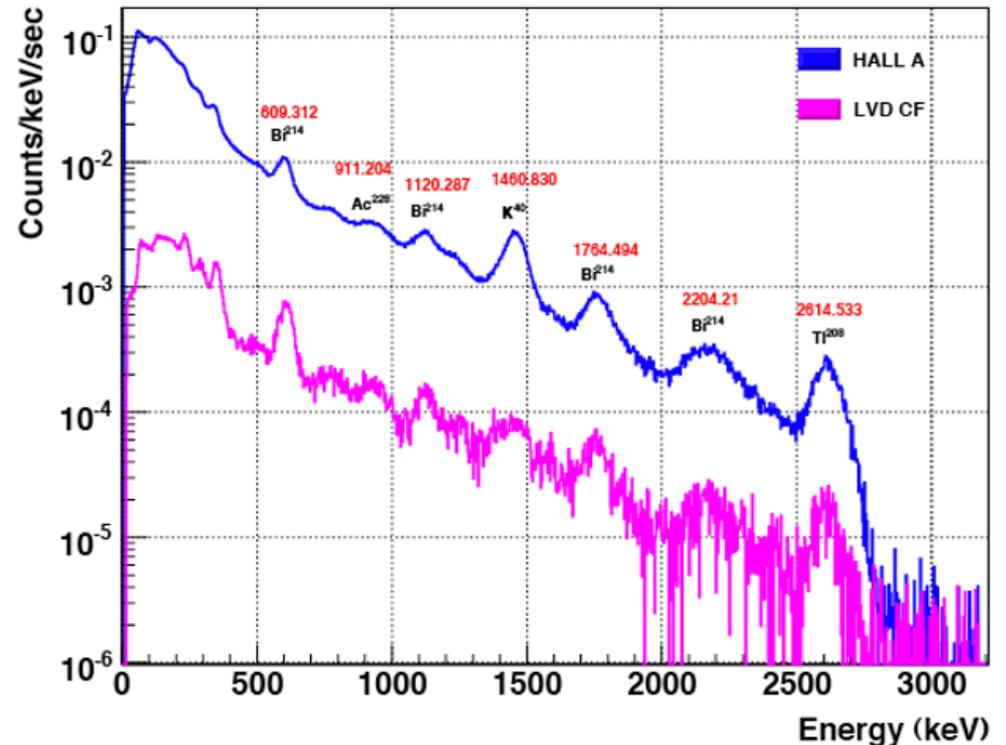
❑ Gamma-spectra, have been measured inside and outside the LVD array. The flux, in the LVD Core, is attenuated by a factor 20.

❑ The bk rate gradient is used to check the consistency of neutrino burst candidates.

✓ Rn contamination of the cavern can be utilized

❑ to monitor single counter sensitivity to 609 KeV

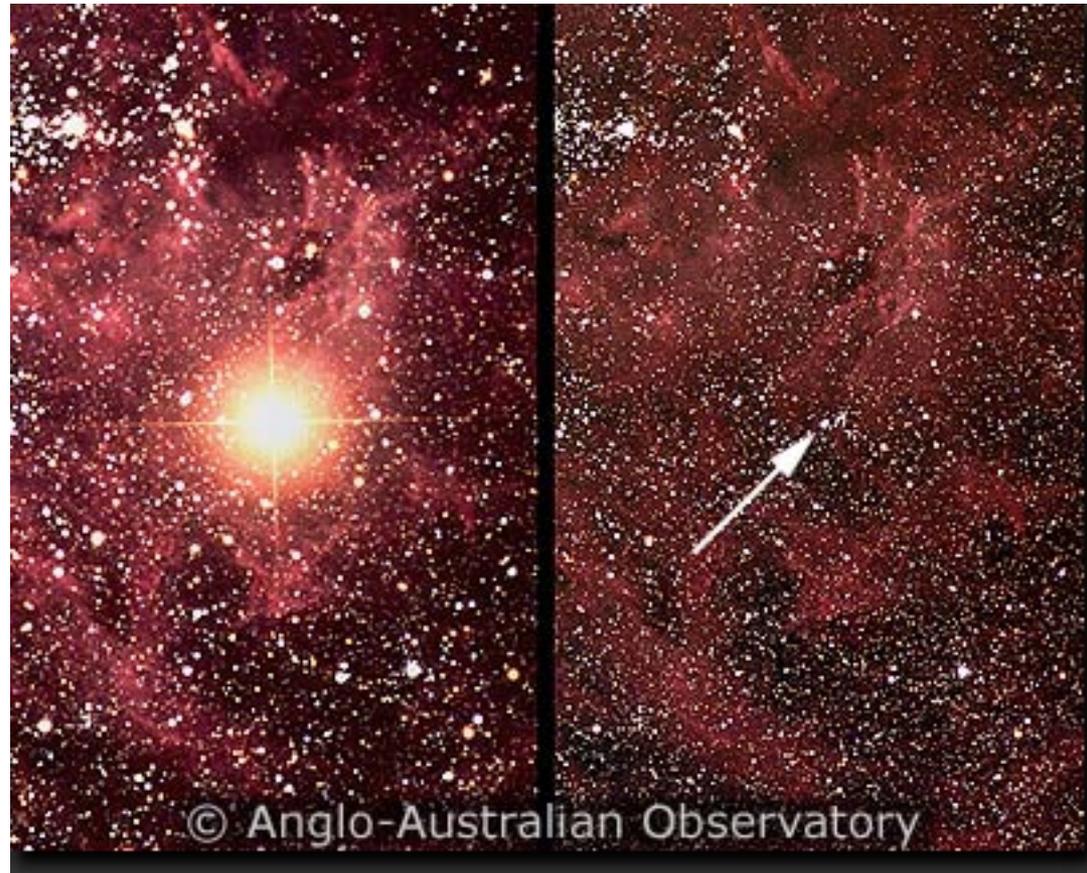
Main characteristics

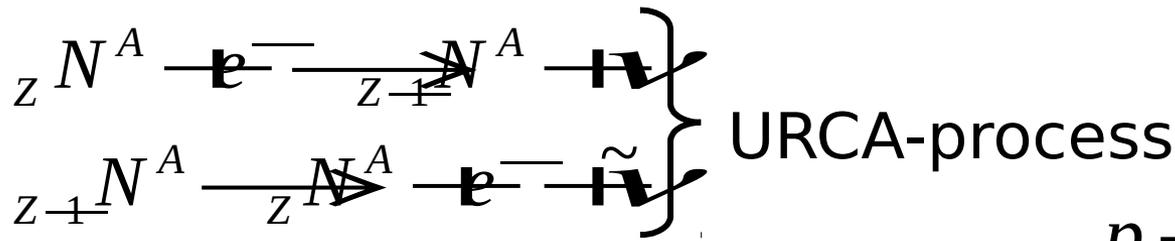


Нейтрино от звёздных коллапсов и вспышка
сверхновой SN1987A.

- Попытки понять, осмыслить, каким образом проходит заключительный этап эволюции массивных звёзд главной последовательности, когда уже исчерпаны термоядерные резервы, когда макрообразования приобретают ядерную плотность, когда возникают условия для гравитационного коллапса и образования чёрных дыр, а влияние гравитационных сил делается определяющим, имеют многолетнюю историю. В апреле 2011 года исполнилось 70 лет с момента публикации работы Гамова и Шоенберга, в которой было указано на особую роль процессов с участием нейтрино в звёздных катастрофах.
- Как значительные достижения теории за прошедший период можно было бы также отметить разработку модели стандартного коллапса (Имшенник, Надёжин, Арнетт, Иванова, Бауерс, Вильсон и др.) и модели вращающегося коллапсара (Имшенник 1995 г.)

The name "SN" came from the observational astronomy data and deals with an instant appearance of a very bright star, with luminosity of about tens millions of the solar one.





The idea was born in Rio casino "Urca"

1941 where it was possible to lose a lot of money very quickly. «We have developed the general views regarding the role of neutrino emission in the **vast stellar catastrophes** known to astronomy, while the neutrinos are still considered as highly hypothetical particles because of the failure of all efforts made to detect them».

G.Gamov,

M.Schoenberg,

1965 Ya. B. Zel'dovich and O. H. Guseinov show, that gravitational collapse is accompanied by powerful and short (~10 ms) pulse of neutrino radiation. The neutronization process $\rightarrow \nu_e$

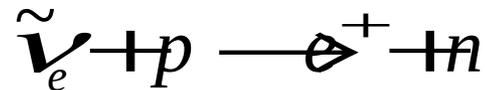
1965 The first proposal to search for collapsing stars (c.s.) using neutrino detectors by G. V. Domogatsky and G.T. Zatsepin

1965 *The birth of an experimental neutrino astrophysics.*

General idea

How can one detect the neutrino flux from collapsing stars?

Until now, **Cherenkov (H2O)** and **scintillation (CnH2n)** detectors which are capable of detecting mainly $\tilde{\nu}_e$ have been used in searching for neutrino radiation, This **choice is natural and connected with large σ - p cross-section**



$$\sigma \approx 9.3 E_e^2 M^{-44} \quad E_{e^+} \gg 0.5 \text{ MeV}$$

As was shown at the first time by G.T.Zatsepin, O.G.Ryazhskaya, A.E.Chudakov (1973), the proton can be used for a neutron capture with the following production of deuterium (d) with γ - quantum emission with $\tau \sim 180 - 200 \mu\text{s}$.



The specific signature of

Neutrino detection from a collapsing star makes it possible:

- To detect gravitational collapse even it is “silent” (isn’t accompanied by Supernova explosion);

- To investigate the dynamics of collapse;

- To estimate the temperature in the star center.

If the star is nonmagnetic, nonrotating, spherically symmetrical the parameters of neutrino burst are the following (Standard model):

Model	Total energy, 10^{53} erg	Total energy $\tilde{\nu}_e, 10^{53} \text{ erg}$	Total energy $\nu_e, 10^{53} \text{ erg}$	$\bar{E}_{\tilde{\nu}_e}, \text{ MeV}$	$\bar{E}_{\nu_e}, \text{ MeV}$	$E(\nu_e) \text{ MeV}$	Duration, s
Model I				12.6	10.5	-	~20
Model II	3-14	0.5-2.3	0.1	10	8	25	5

From the theory of the Standard collapse it follows that the total energy, carried out by all types of neutrinos, corresponds to ~ 0.1 of star core mass and is divided among these 6

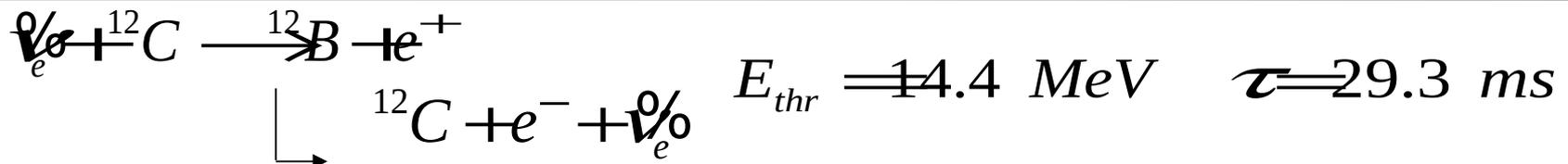
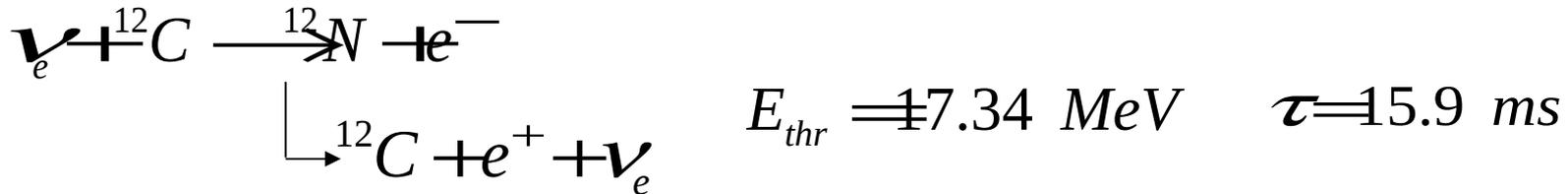
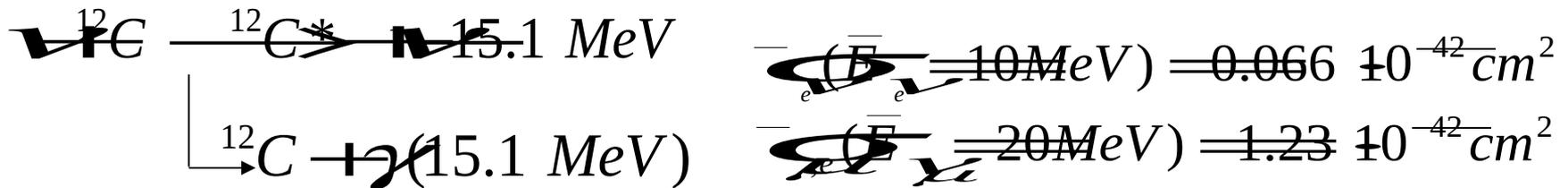
Reactions for scintillation and Cherenkov counters

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad \sigma_{\bar{\nu}p} \sim 9.3 E_{e^+}^2 \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2 \quad E_{e^+} \gg 0.5 \text{ MeV}$$

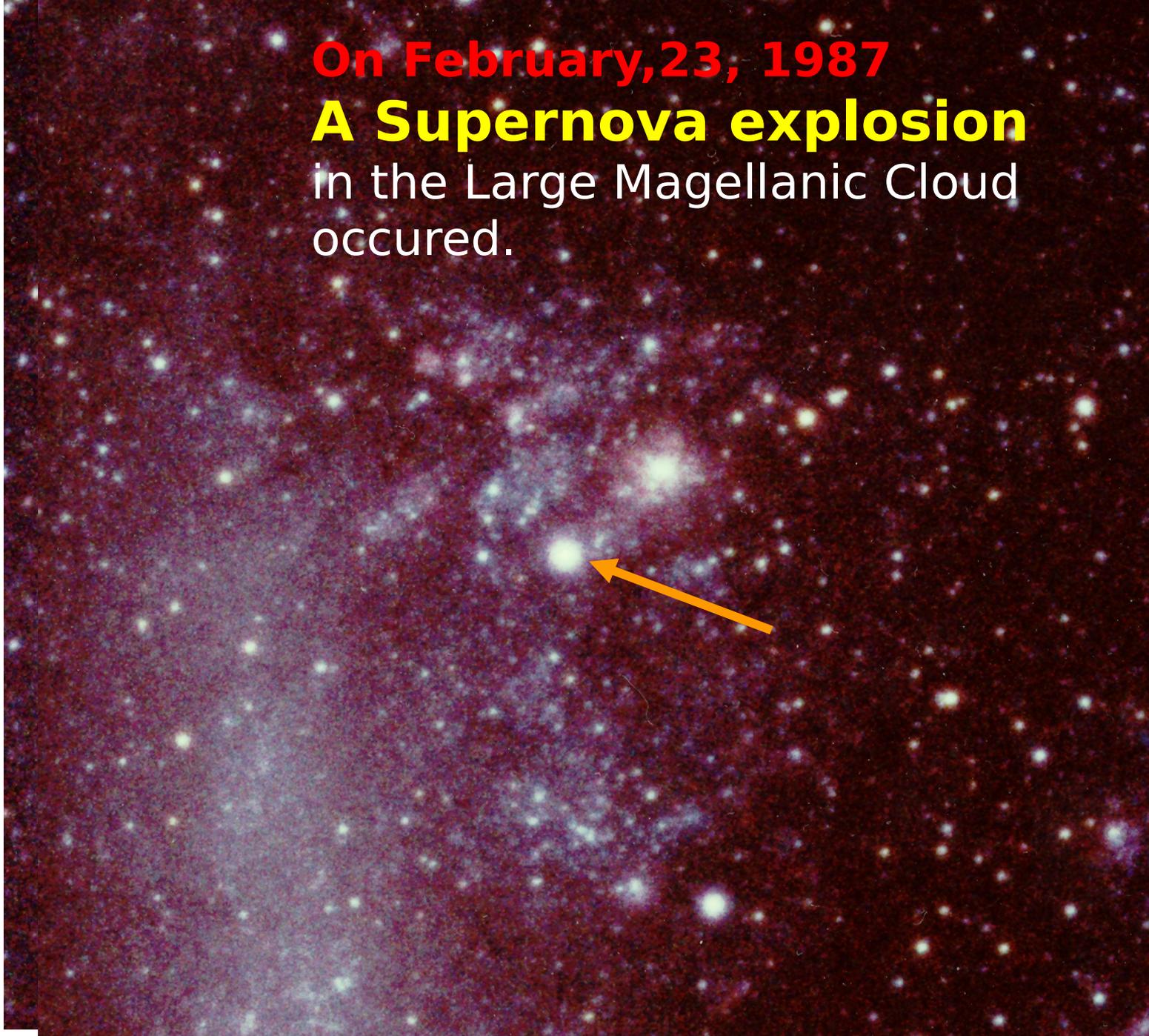
$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^- \quad \sigma_{\nu e^-} \sim 9.4 E_{\nu_e} \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$$

$$\nu_i + e^- \rightarrow \nu_i + e^- \quad \sigma_{\nu e^-} \sim 1.6 E_{\nu_i} \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$$

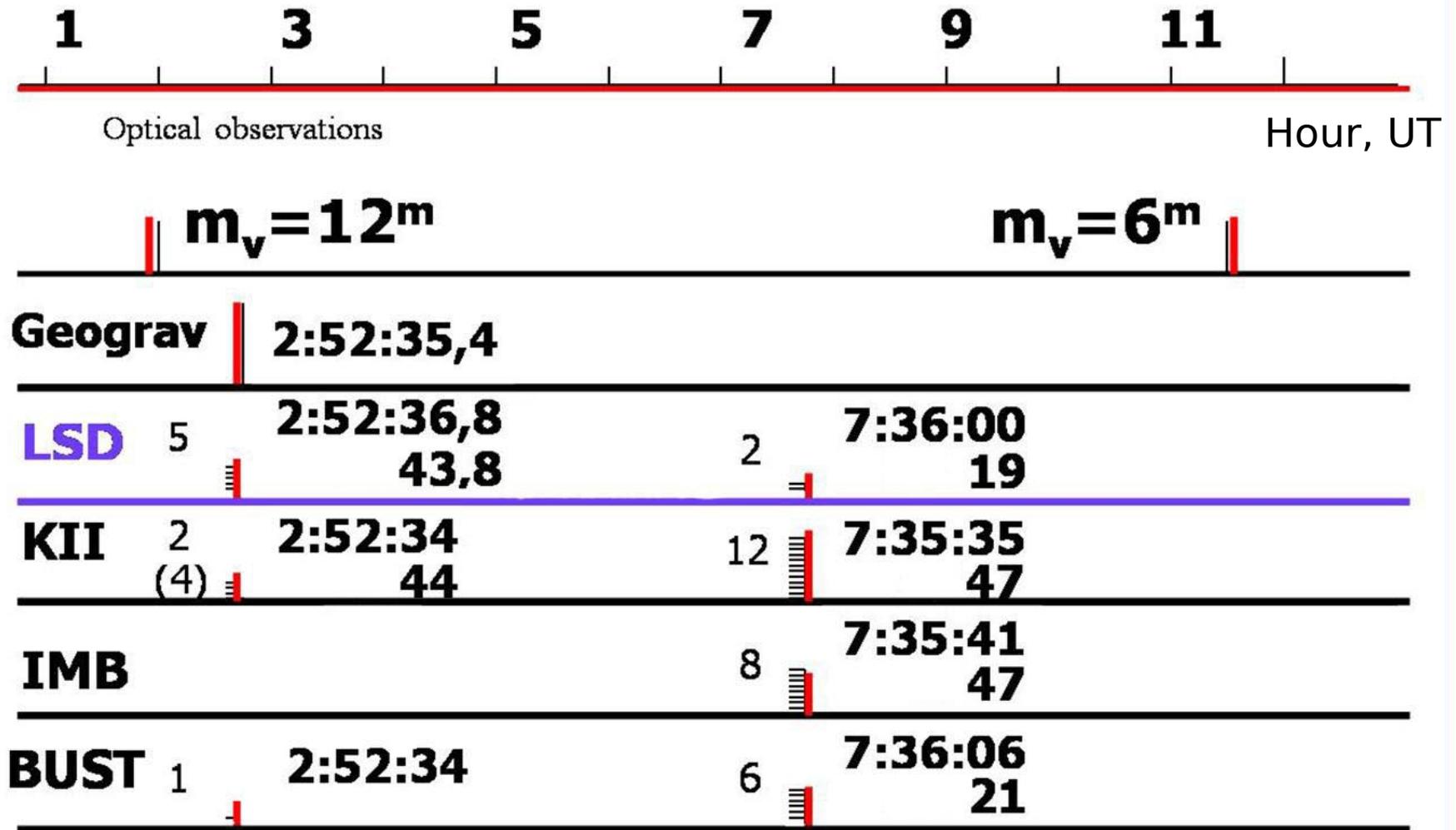
$$\tilde{\nu}_i + e^- \rightarrow \tilde{\nu}_i + e^- \quad \sigma_{\tilde{\nu} e^-} \sim 1.3 E_{\tilde{\nu}_i} \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$$



On February, 23, 1987
A Supernova explosion
in the Large Magellanic Cloud
occurred.



February 23, 1987

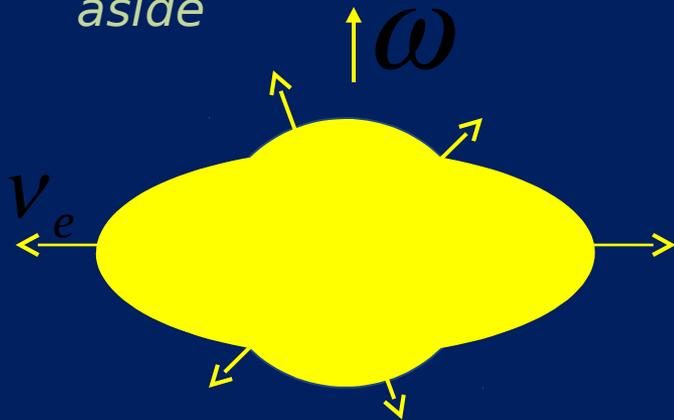


A rotating collapsar

The Two-Stage Gravitational Collapse Model

[Imshennik V.S., Space Sci Rev, 74, 325-334 (1995)]

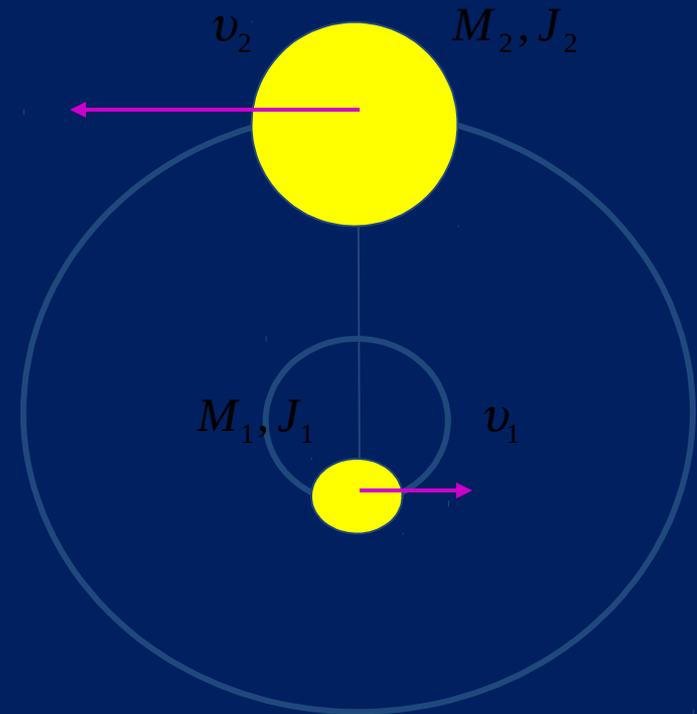
View from
aside



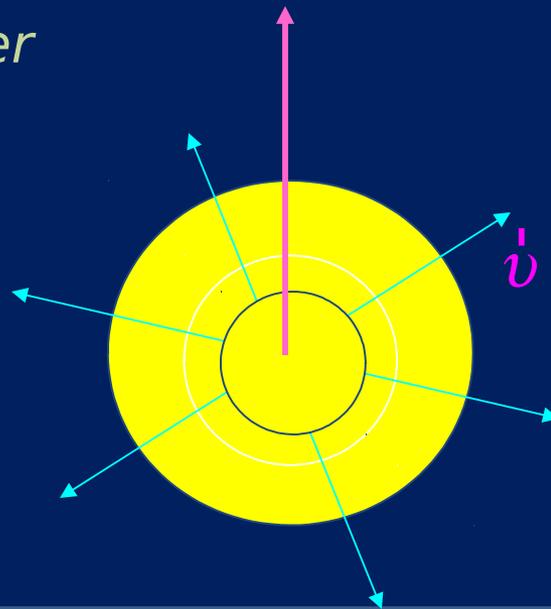
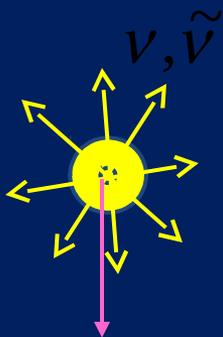
$$M_2 < M_1$$



$$v_2 > v_1$$

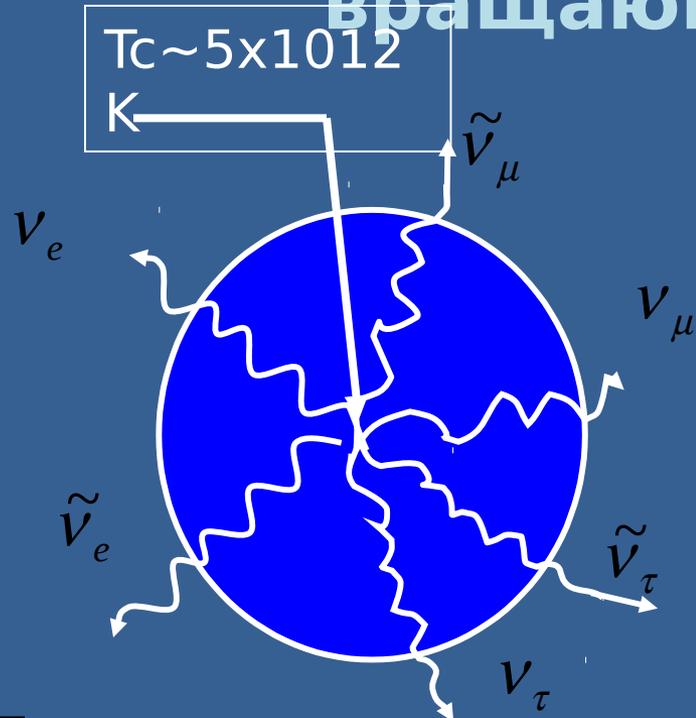


5 h later



View from
above

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

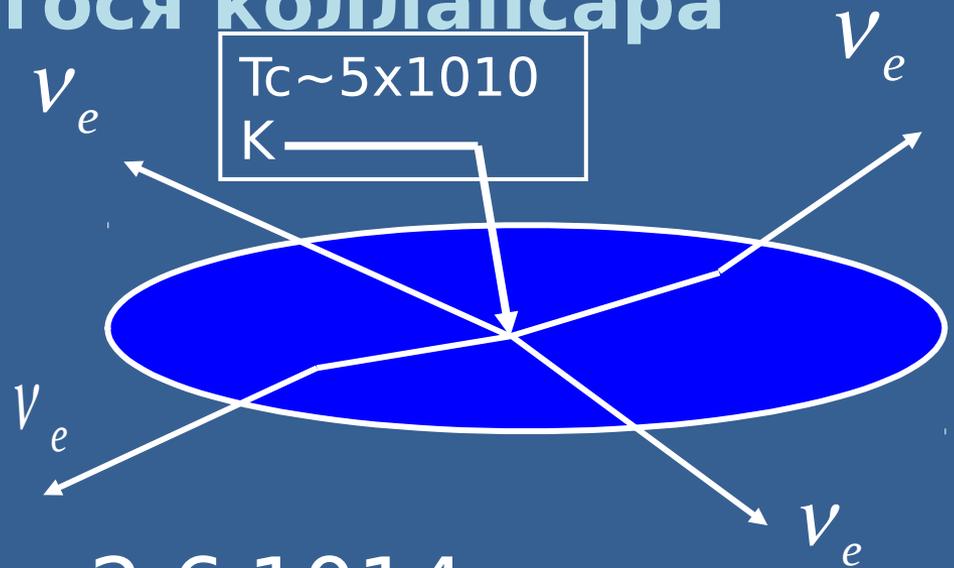


$$\bar{E}_{\tilde{\nu}_e} = 12 \text{ MeV}$$

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

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

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



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

$$\text{см}^{-3}$$

Основная реакция - УРКА-процесс



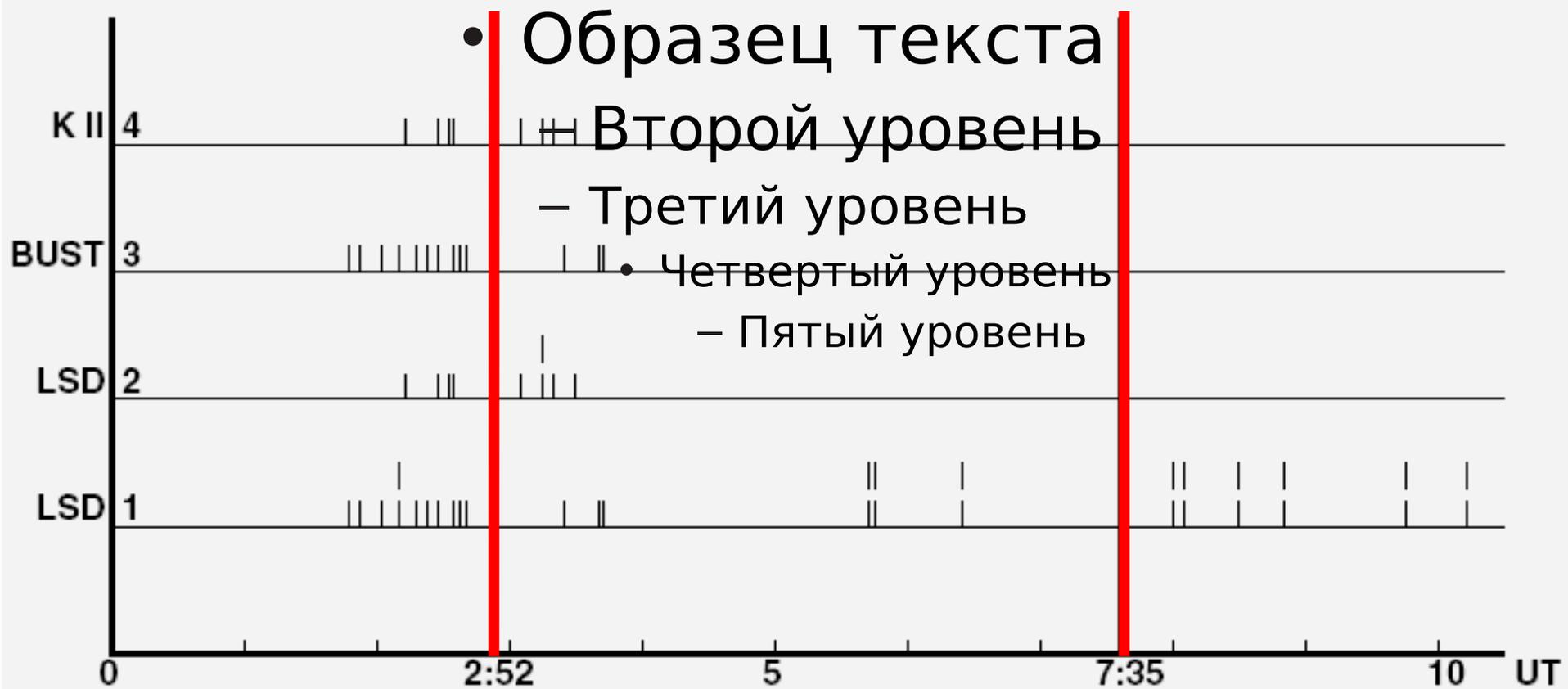
$$\bar{E}_{\nu} = (30 - 50) \text{ MeV}$$

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

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.

Кроме упоминавшихся выше эффектов в четырех нейтринных детекторах в 2:52 UT и 7:35 UT 23.02.1987 г. есть и другие, менее известные результаты, полученные на тех же детекторах в тот день. Это группа работ, в которых изучались совпадения во временном окне около 1 с между импульсами в различных нейтринных детекторах (LSD, BUST и KII) между собой, а также совпадения между импульсами в этих детекторах и импульсами в гравитационных антеннах в Риме и Мериленде.



Timing diagram of the BUST pulses coincident with the LSD pulses within 1 s and similar coincidences for the K2 and LSD detectors as well as double pulses in LSD over the period from 0:00 to 10:00 UT on February 23, 1987.

$N_c(\text{LSD-K2}) = 8$; $N_{c.\text{by chance}} = 2$
 $N_c(\text{LSD-BUST}) = 13$; $N_{c.\text{by chance}} = 3$
 $N_{\text{pairs by chance}} = 1,2$

**Coincidence by chance
with SN 1/3000 years**

1. The coincidences between the signals from the Maryland and Rome gravitational antennas and the signals in the LSD and K2 detectors were studied [Amaldi et al.// Ann.New York Acad. Sci. **571**,561 – 1989; Aglietta et al.//Proc. 21 ICRC, **2**, 246 – 1990, Nuovo Cimento C **14**, 171 – 1991].

2.LSD – K2 correlations [Aglietta et al. // Ann. New York Acad. Sci, **571**, 584 – 1989, Nuovo Cimento C **12**, 75 – 1989, Proc. 21 ICRC, **2**, 246 - 1990]

3.LSD – BUST correlations [Aglietta et al. Ann. New York Acad. Sci, **571**, 584 – 1989, Nuovo Cimento C **12**, 75 – 1989, Proc. 21 ICRC, **2**, 246 - 1990; Chudakov 1989 Ann. New York Acad. Sci, **571**,577 – 1989]

4. The double pulsar in LSD [D. J. Helfand et al.//Proc. 21 ICRC, **2**, 246 - 1990]

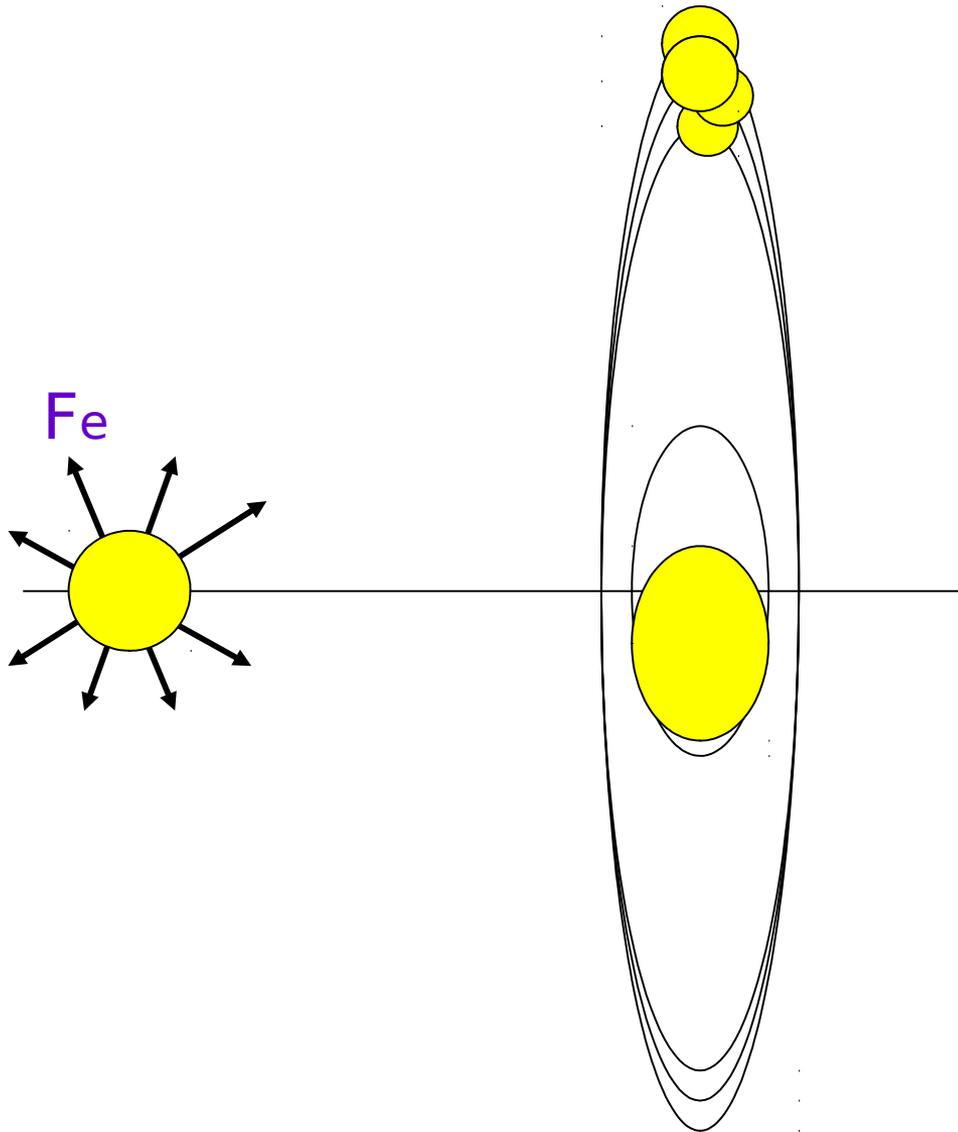
- 2:52 UT and 7:35 UT are two key instants in the evolution of SN 1987A. These instants are marked by the neutrino signals: 5 pulses over 7 s at 2:52 UT in LSD and from 6 to 12 pulses over 10 s at 7:35 UT in each of the three remaining detectors.
- Present day models explain them better or worse.
- Effects related to the excess of coincidences and double pulses still remain outside the scope of these models

On the interpretation

The excess of coincidences near 2:52 UT may be indicative of a very-low-intensity pulsed neutrino source operating in the regime of a pulsar at the presupernova stage.

- **$\Delta t \sim 1 \text{ sec}$** – time emission
- **$t \gg 1 \text{ sec}$** – irregular pulse repetition period
- **$t \sim 2 \text{ hours}$** – lifetime period

This undoubtedly phenomenological scheme leaves a number of questions open but basically seems plausible to us.



$$J_{Fe}(E > 1 \text{ GeV}) \sim 10\% J_{Fe}^{tot}$$

$$(E > 10 \text{ GeV}) \sim 3\% J_{Fe}^{tot}$$

$$J_{Fe}(E) \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$$

Fe + Fe
Fe + p
Fe + n

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} (\nu_{\mu}^0)$$

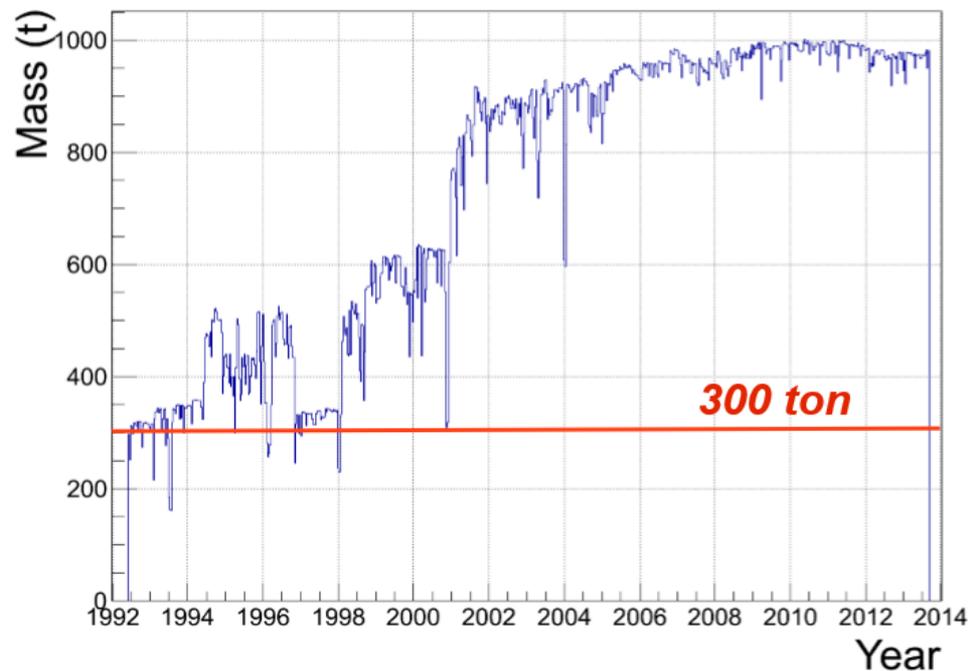
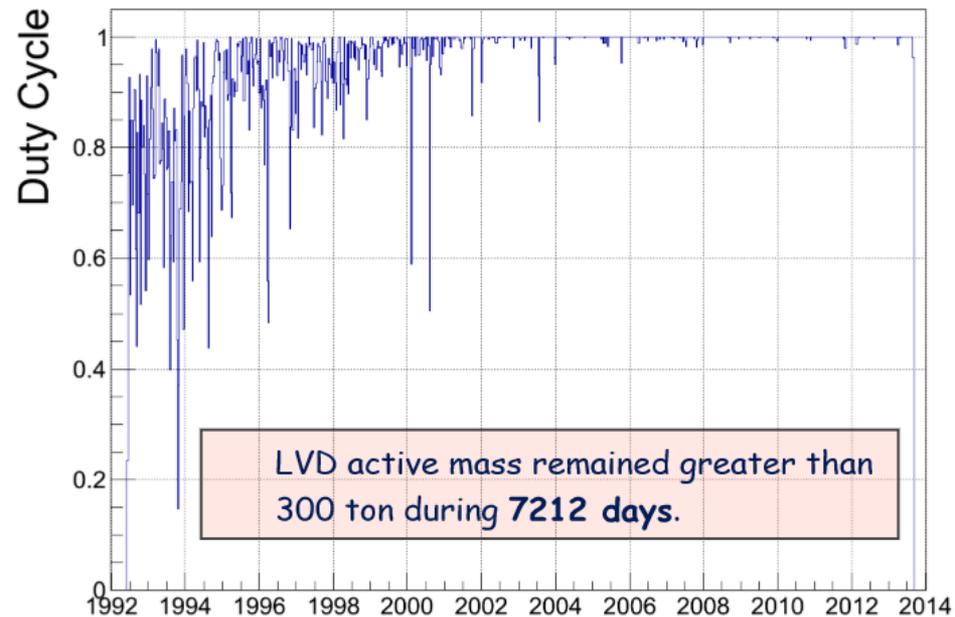
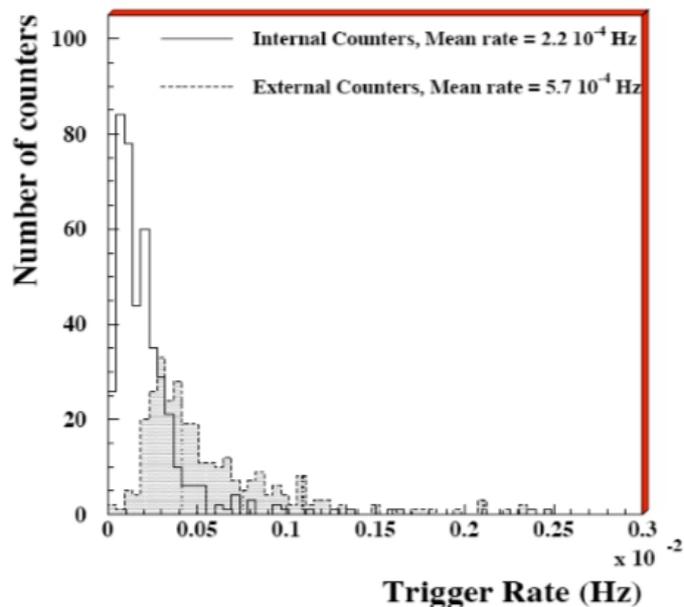
$$\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \nu_e + \nu_{\mu}^0$$

$$\mu^{-} + Fe^{56} \rightarrow \nu_{\mu} + Mn^{56} (Mn^{55}) + \dots$$

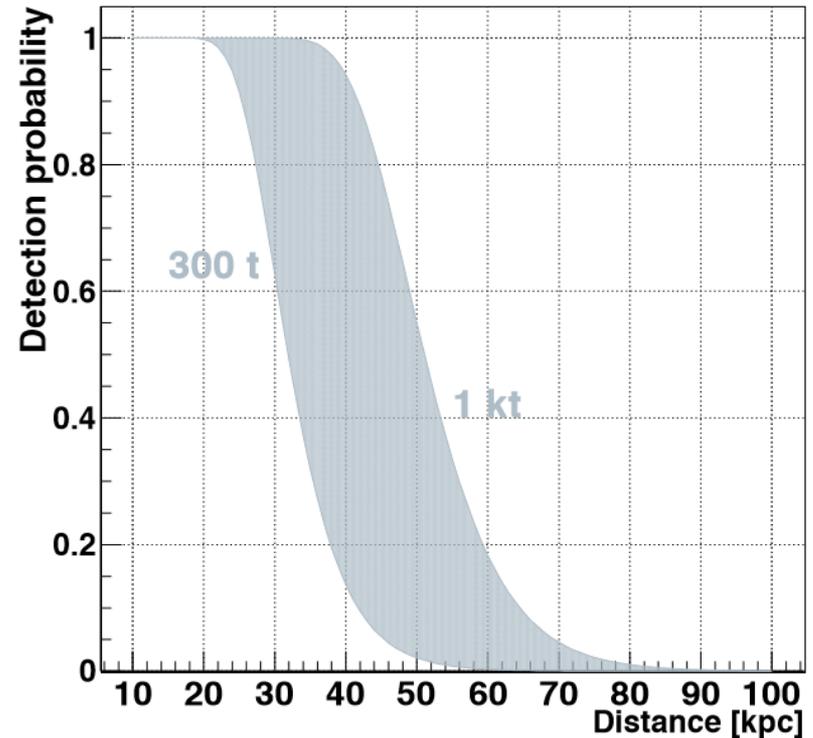
LVD data set

The detector active mass, M_{act} , is updated every 8 hours:

- The response to atmospheric muons is used to identify and discard bad working counters.
- Counters with a background rate: $R(E \geq 7\text{MeV}) \geq 3 \cdot 10^{-3}/\text{s}$ are rejected as noisy.



- Results of the analysis of data taken during 7212 days, from 1992 to 2013.
- The detector is considered active only if $M_{\text{act}} > 300$ tons, being, in this way, fully sensitive to core collapse SN occurring at a distance $D \leq 25$ kpc from the Earth.
- No neutrino burst candidate has been detected during the whole period, the corresponding upper limit on the rate of gravitational stellar collapse, at 90% C.L. is: 0.116 year^{-1} .



По данным полученным за 36 лет работы нейтринного детектора АСД (Артемовская Научная станция) и российско-итальянского нейтринного детектора LVD (Научная лаборатория Гран Сассо, Италия) установлено самое лучшее в настоящее время экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 15.64 года на 90% уровне достоверности.



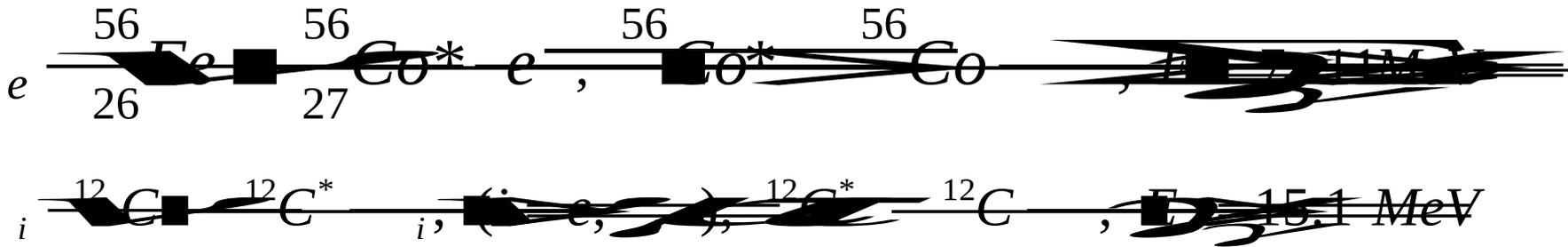
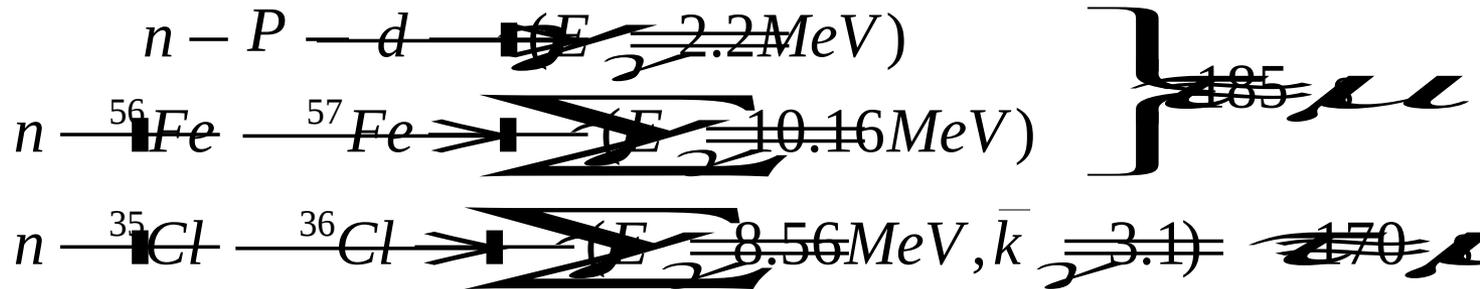
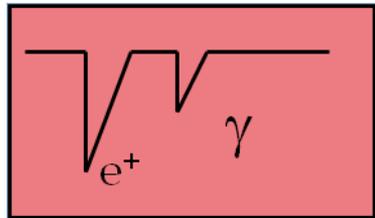
LVD



АСД

АСД и LVD

могут детектировать все типы нейтрино



Основные детекторы в современной службе поиска звездных колл

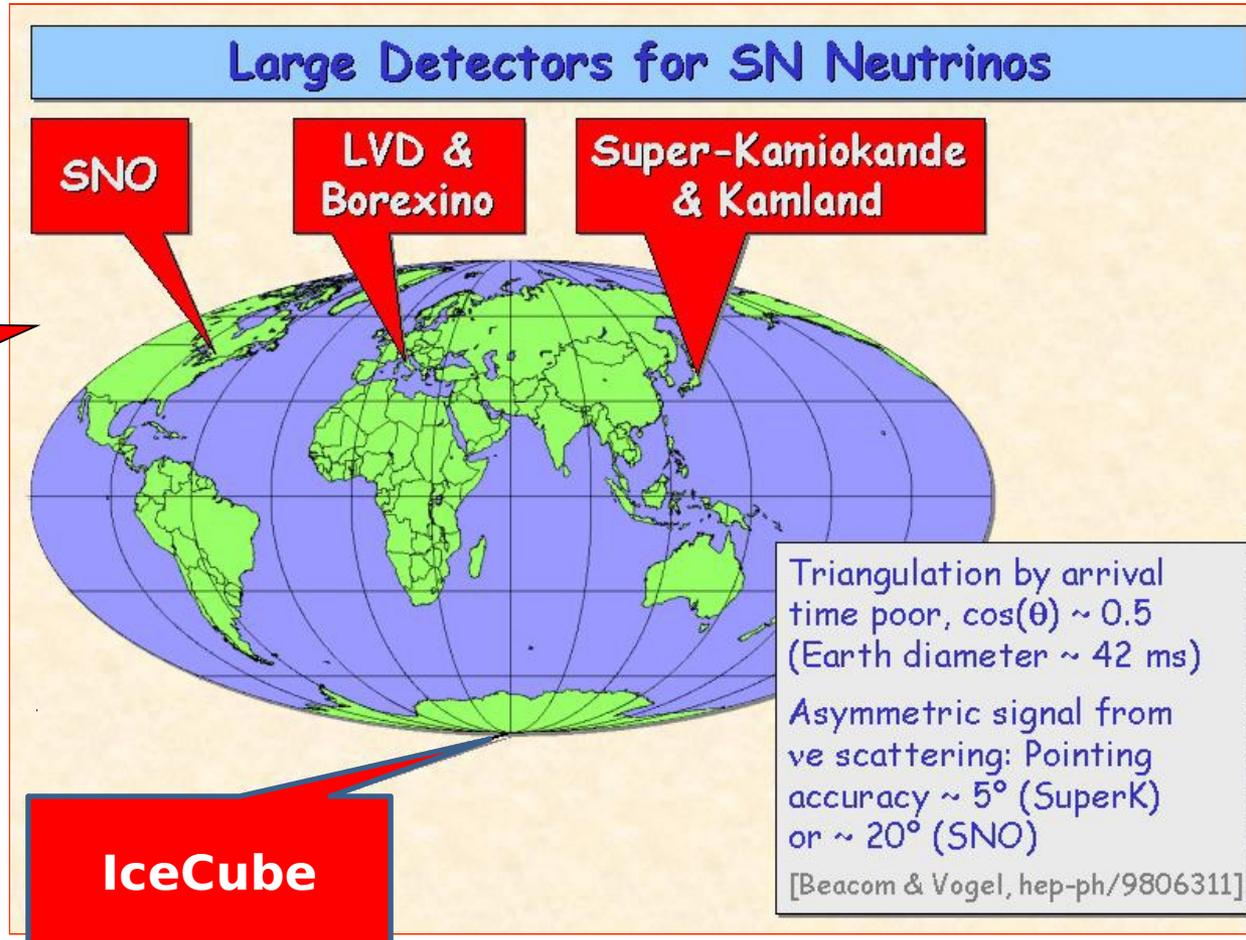
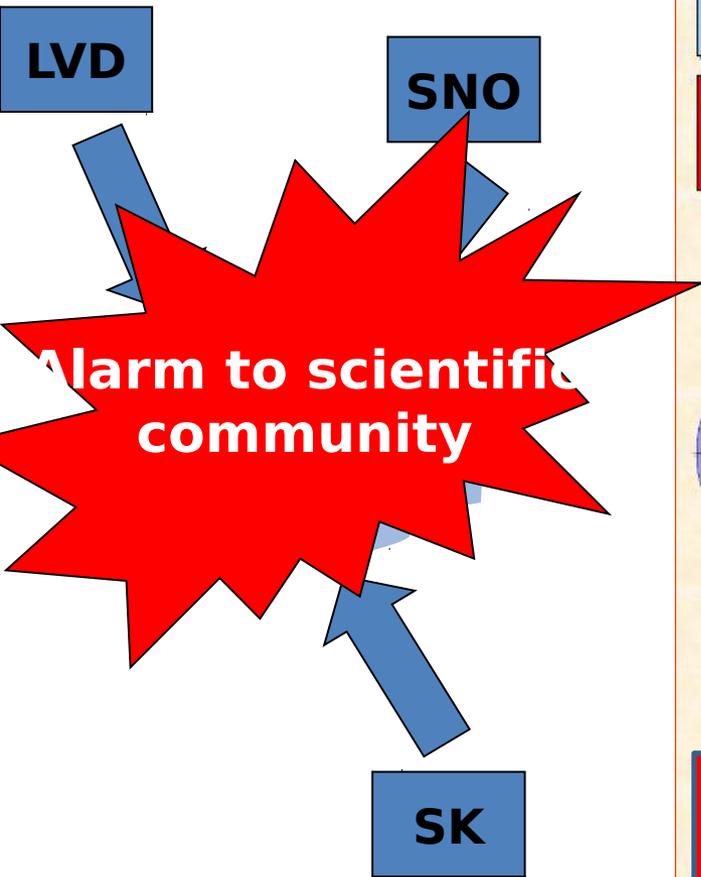
Детектор	Страна*	Масса и тип мишени	Число $N_{\bar{\nu}_e}$ (МСК)**	Число N_{ν_e} (МВК)***
АСД	Россия	0,1 кт ЖС, 1 кт NaCl	57	44
БПСТ	Россия	0,2 кт ЖС, 0,16 кт Fe	67	8
KamLAND	Япония, США	1 кт ЖС	500	180
Borexino	Италия	0,3 кт ЖС	120	60
LVD	Россия, Италия	1 кт ЖС, 1 кт Fe	500	410
SuperK	Япония, США	22,5 кт H ₂ O	9400	650

* Страна (страны), осуществившая разработку и сооружение детектора.

** Число регистрируемых электронных антинейтрино согласно МСК.

*** Число регистрируемых электронных нейтрино для первой стадии коллапса согласно МВК при условии вспышки сверхновой типа SN1987A в центре Галактики.

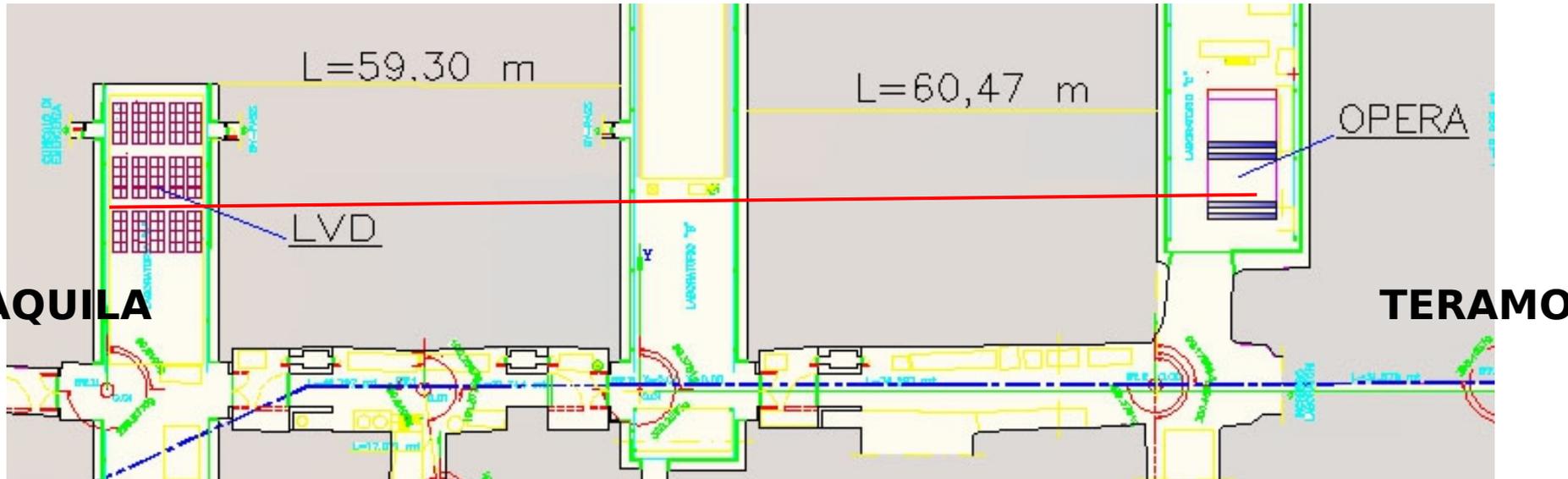
SuperNova Early Warning System



LVD-OPERA horizontal events

Relative position of the detectors LVD and OPERA in the Gran Sasso Laboratory

CERN

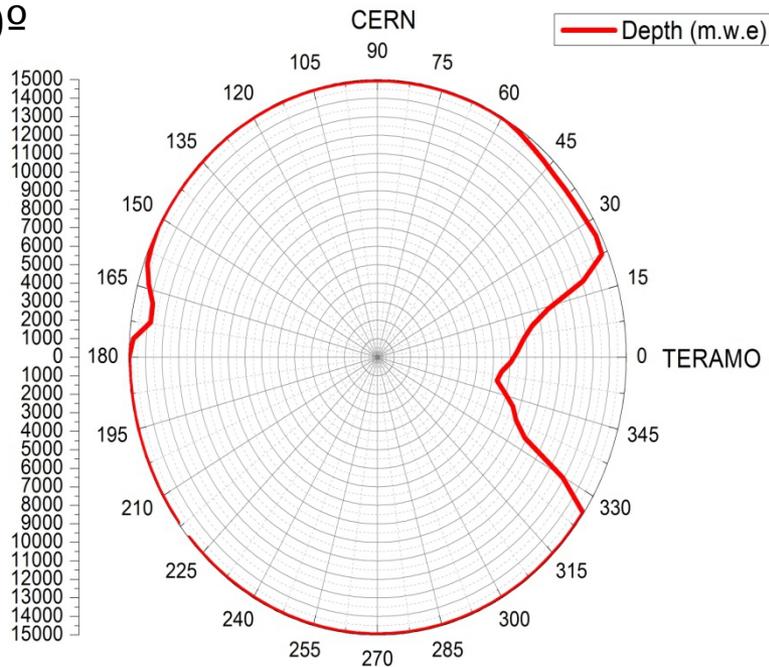


$E_{\text{min}} \sim 70 \text{ GeV}$

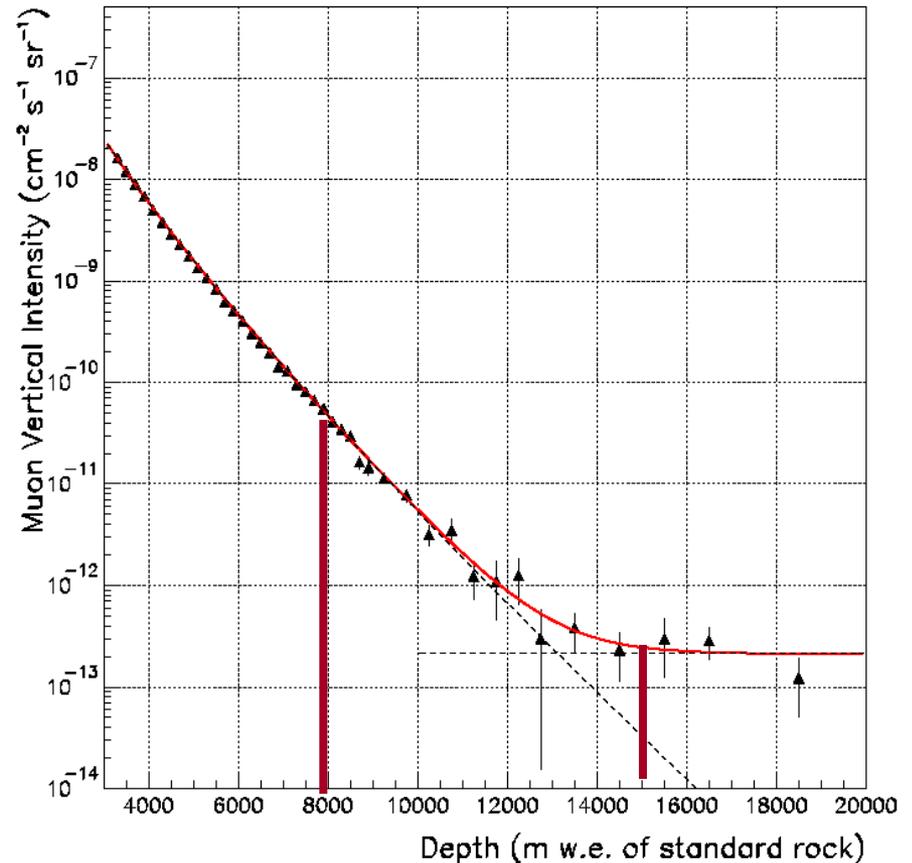
Distance between LVD and OPERA is $\sim 160 \text{ m}$

Depth-intensity curve

Gran Sasso laboratory depth distribution for angles θ from 87 up to 90°



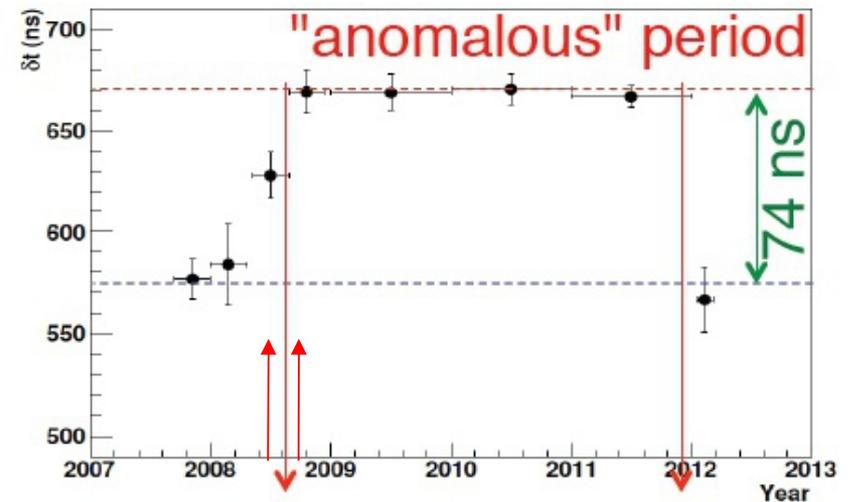
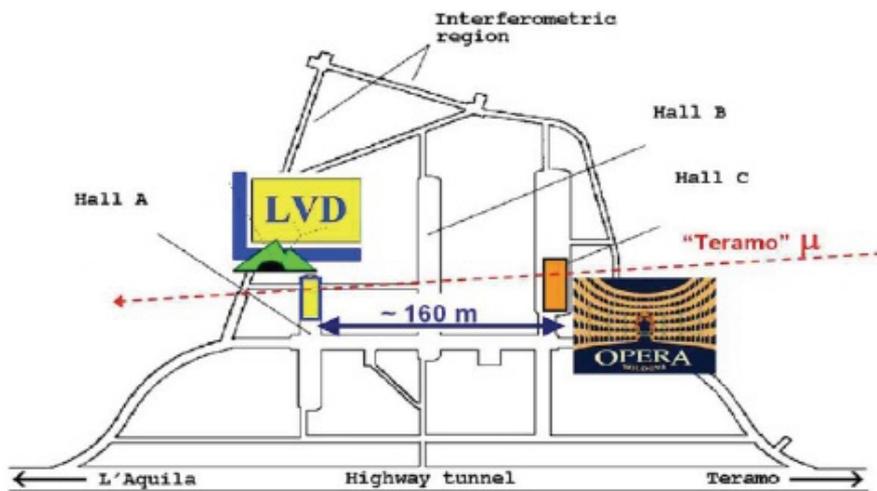
Depth-intensity curve..



Depth from the Teramo side is ~ 8000 m.w.e, from the L'Aquila side is more then 15000 m.w.e. There is only muons from neutrino from the L'Aquila

Chasing systematics with cosmic muons (joint OPERA-LVD analysis)

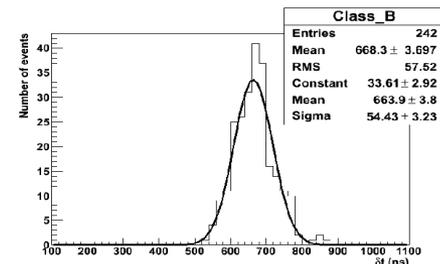
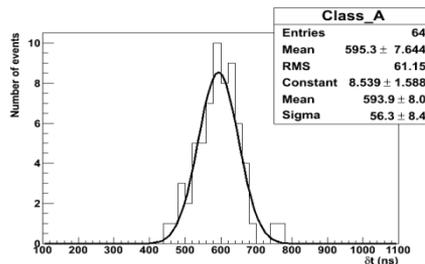
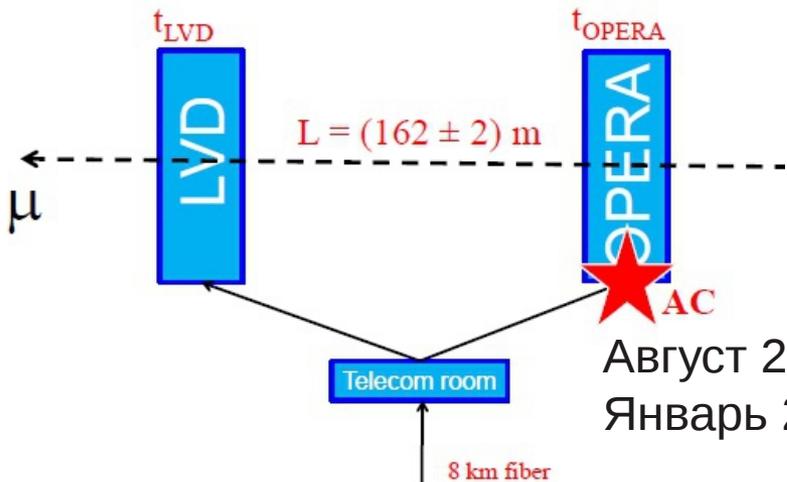
Coincidences using horizontal cosmic muons through the “Teramo anomaly”



29.07.2008 and 01.10.2008 earthquakes were in Gran Sasso Laboratory

An unambiguous indication of an instrumental bias of OPERA
at Gran Sasso

Совпадения LVD-OPERA



Август 2007 - Август 2008
Январь 2012 - Март 2012

Август 2008 –
Декабрь 2011

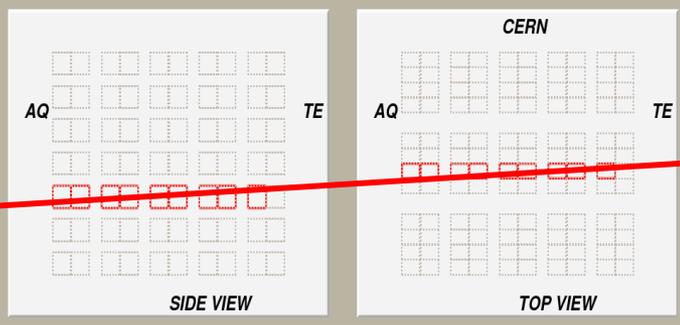
External GPS

8 km fiber

LVD side and top views

MuEvent #201412
Date and time:#81030 83473.44
Total muon energy release: 2161.63 MeV

Energy Scale:

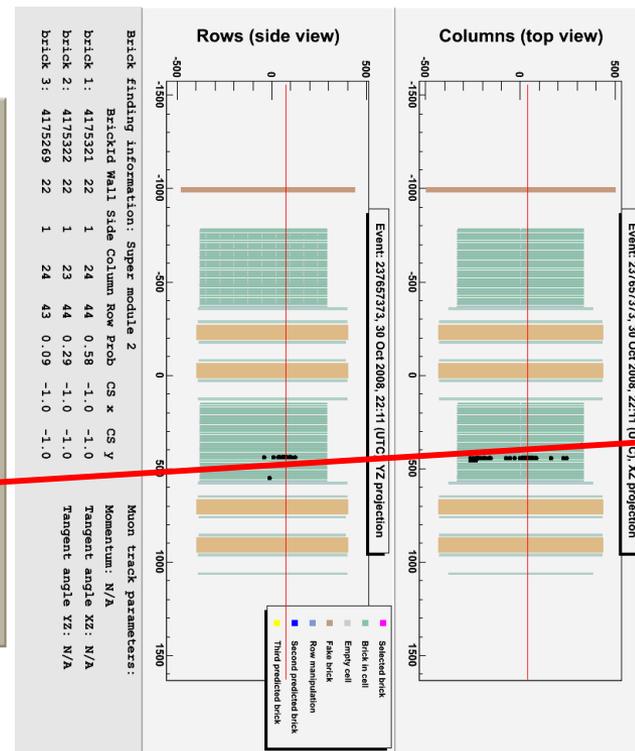


Класс А: $\delta t = (595 \pm 8)$ нс

Класс В: $\delta t = (668 \pm 4)$ нс

$$\Delta_{AB} = \langle \delta t_A \rangle - \langle \delta t_B \rangle$$

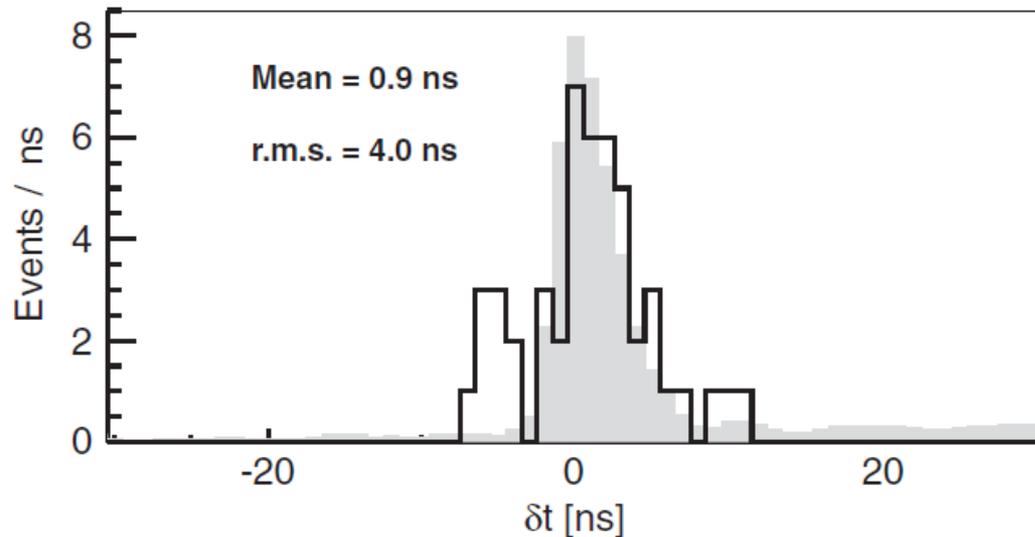
$$= (-73 \pm 9) \text{ ns}$$



LVD
OPERA

Измерение скорости нейтрино на LVD

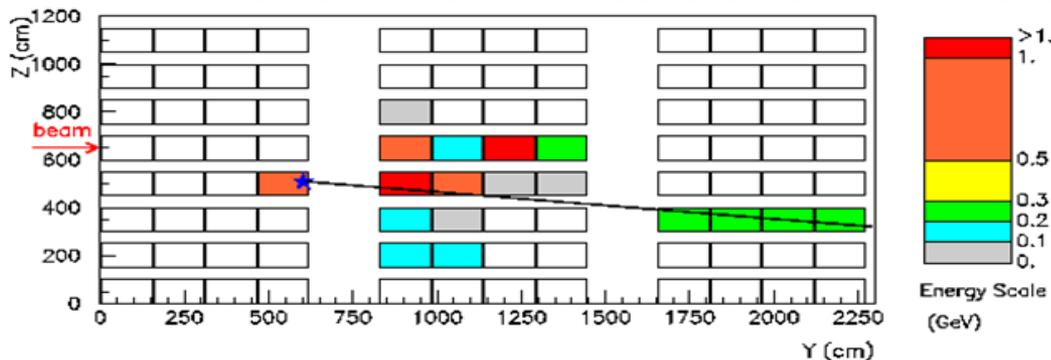
- Ввиду фундаментального характера результатов опытов коллаборации OPERA, обсуждавшихся выше, мы со своей стороны в коллаборации LVD измерили скорость нейтрино в нейтринном пучке, направленном от церновского ускорителя в сторону детектора LVD. Наш результат измерения скорости нейтрино оказался



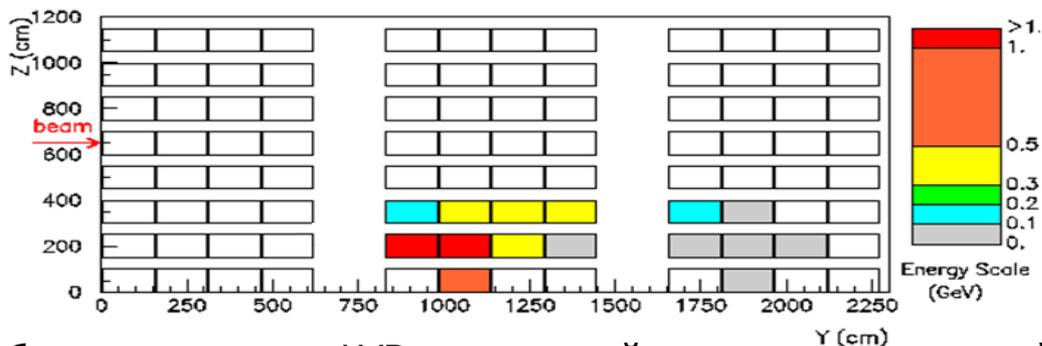
Распределение Δt разности времени-пролета нейтрино и времени-пролета световых фотонов.

С использованием нейтринного пучка ЦЕРН - Гран Сассо, с короткими банчами шириной 3 нс и интервалом между ними 100 нс, измерена величина относительного отклонения скорости нейтрино от скорости света на установке LVD: $-3.3 \cdot 10^{-6} < (v - c)/c < 3.5 \cdot 10^{-6}$ (на 99% уровне достоверности).

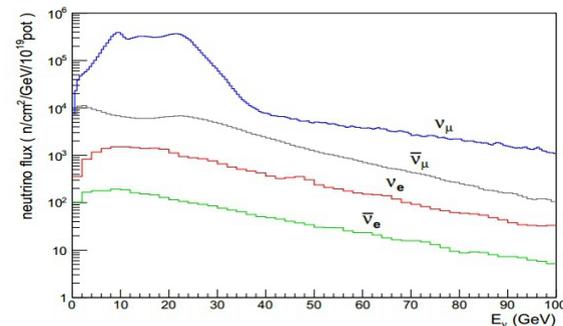
- По результатам обработки данных 2009-2011 эксперимента LVD получены первые результаты по поиску осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ в CNGS пучке мюонных нейтрино. Модульная структура установки позволяет определить топологию событий и разделить события от электронного и мюонного нейтрино. Доля кандидатов на регистрацию ν_e в CNGS мюонном пучке составляет $\delta = 504/60776 = 0.8\%$, величину близкую к доле электронных нейтрино в пучке.



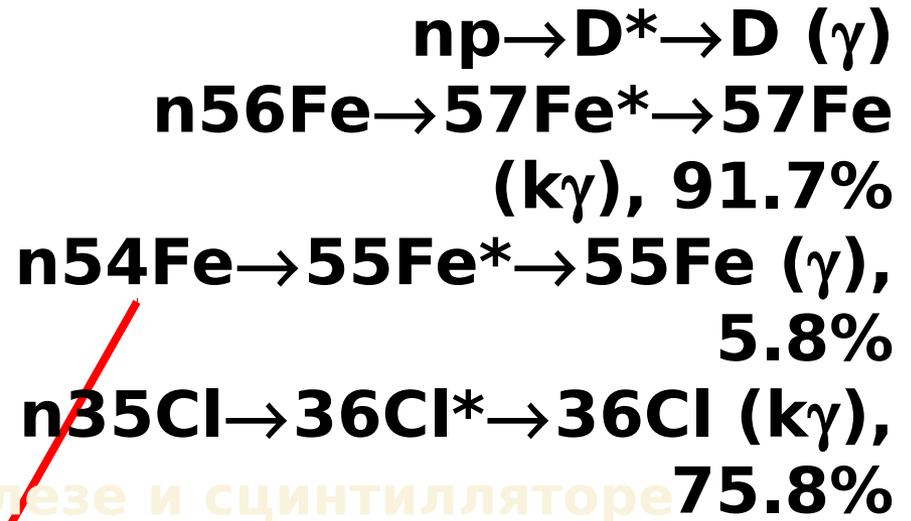
Событие в установке LVD – взаимодействие мюонного нейтрино.



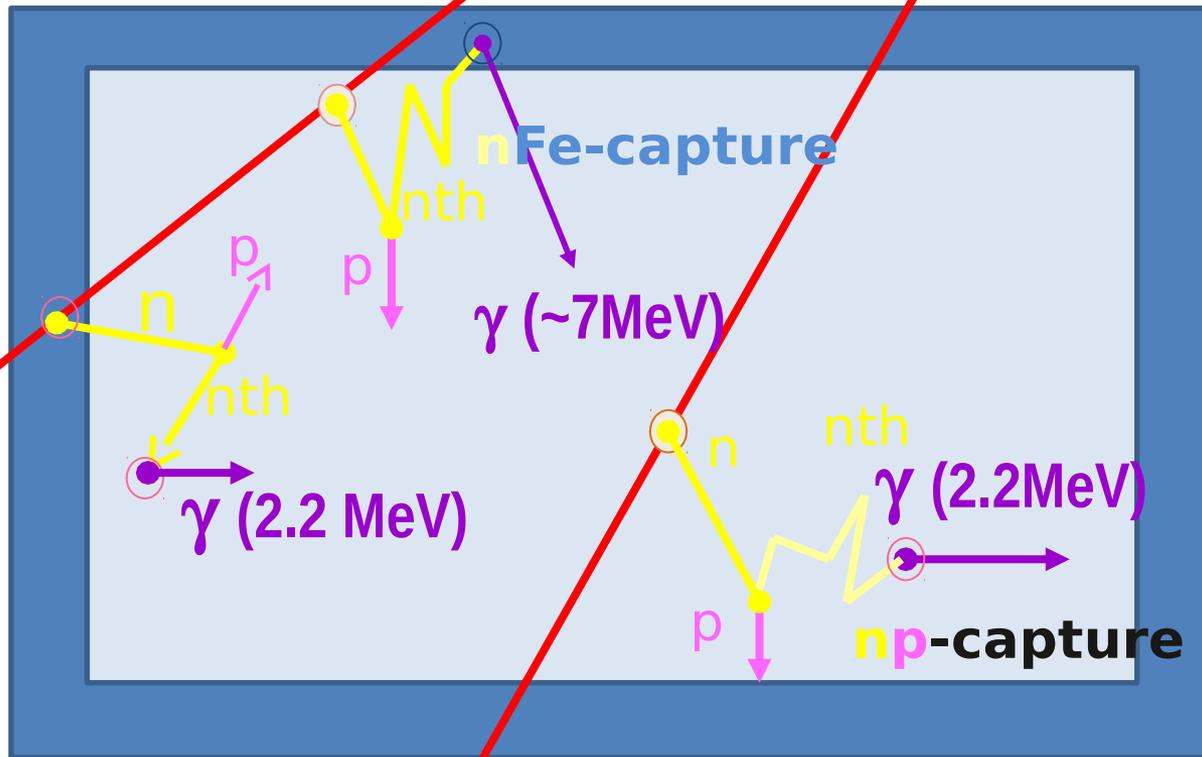
Событие в установке LVD – взаимодействие электронного нейтрино



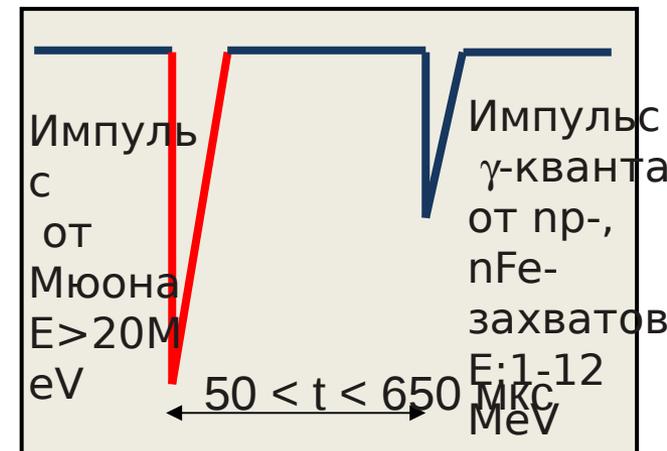
Спектры электронных и мюонных нейтринных, антинейтринных потоков в зависимости от энергии.



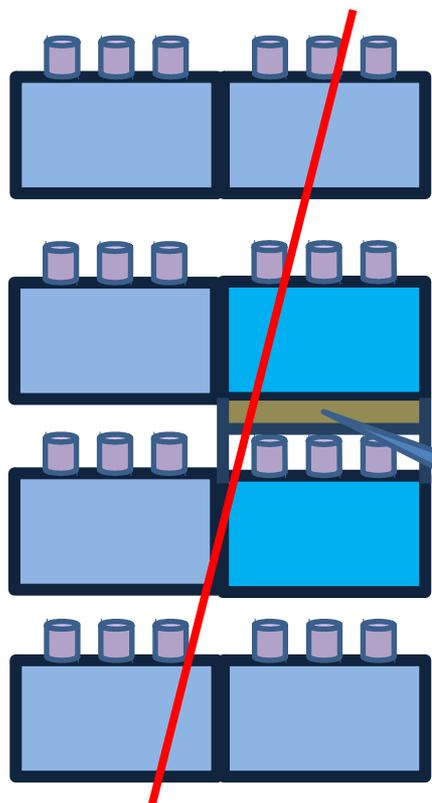
Регистрация нейтронов мюонами в железе и сцинтилляторе



Регистрация нейтронов в счетчиках

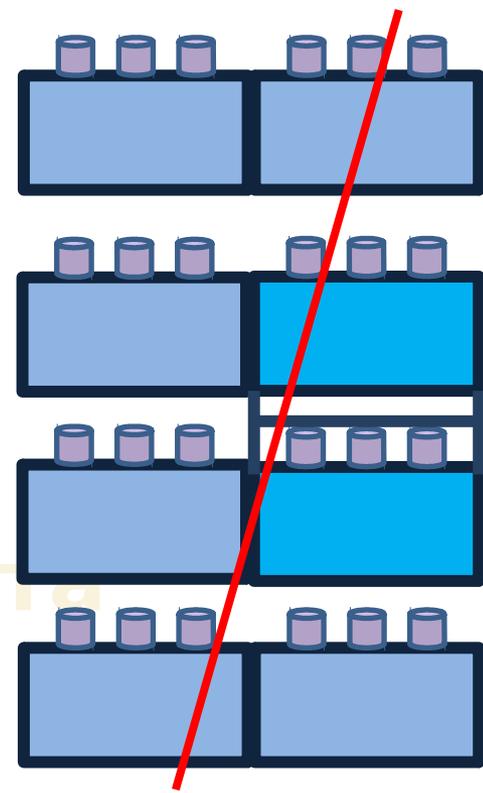


Конструкция для измерения выхода нейтронов, генерированных в железе



Дополнительное железо 4 см
470 кг

Идея эксперимента



ределение числа нейтронов, черированных мюонами доп. Fe-пластине

До установки пластины

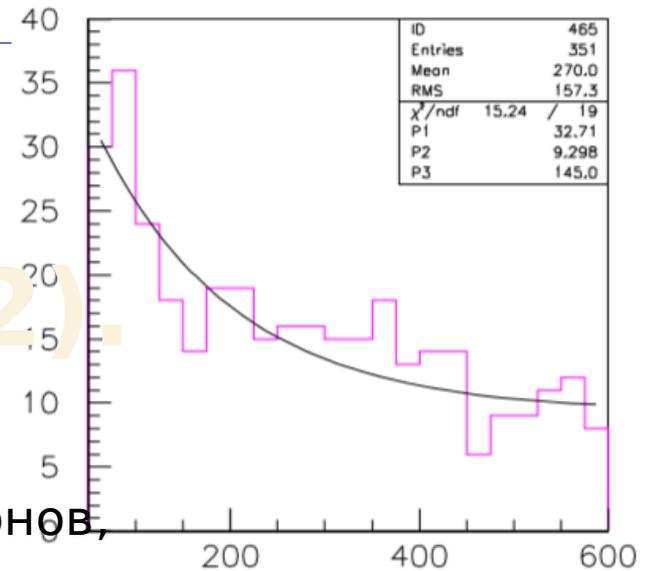
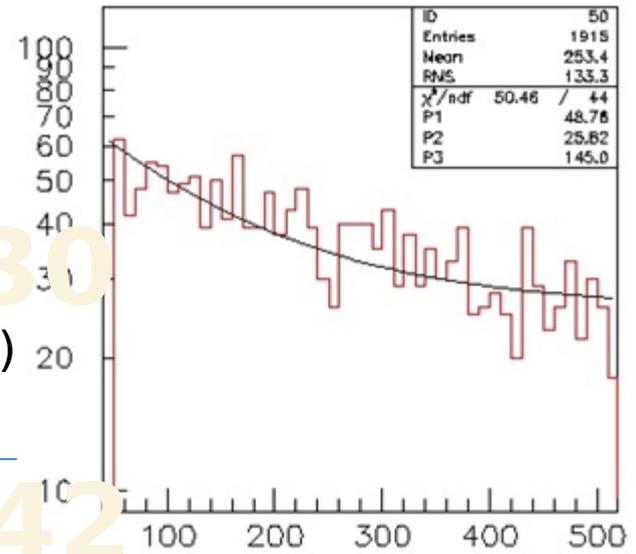
$N_n/N_\mu = 0.030$
- число нейтронов (гамма-квантов)
зарегистрированных в двух
счетчиках LVD.

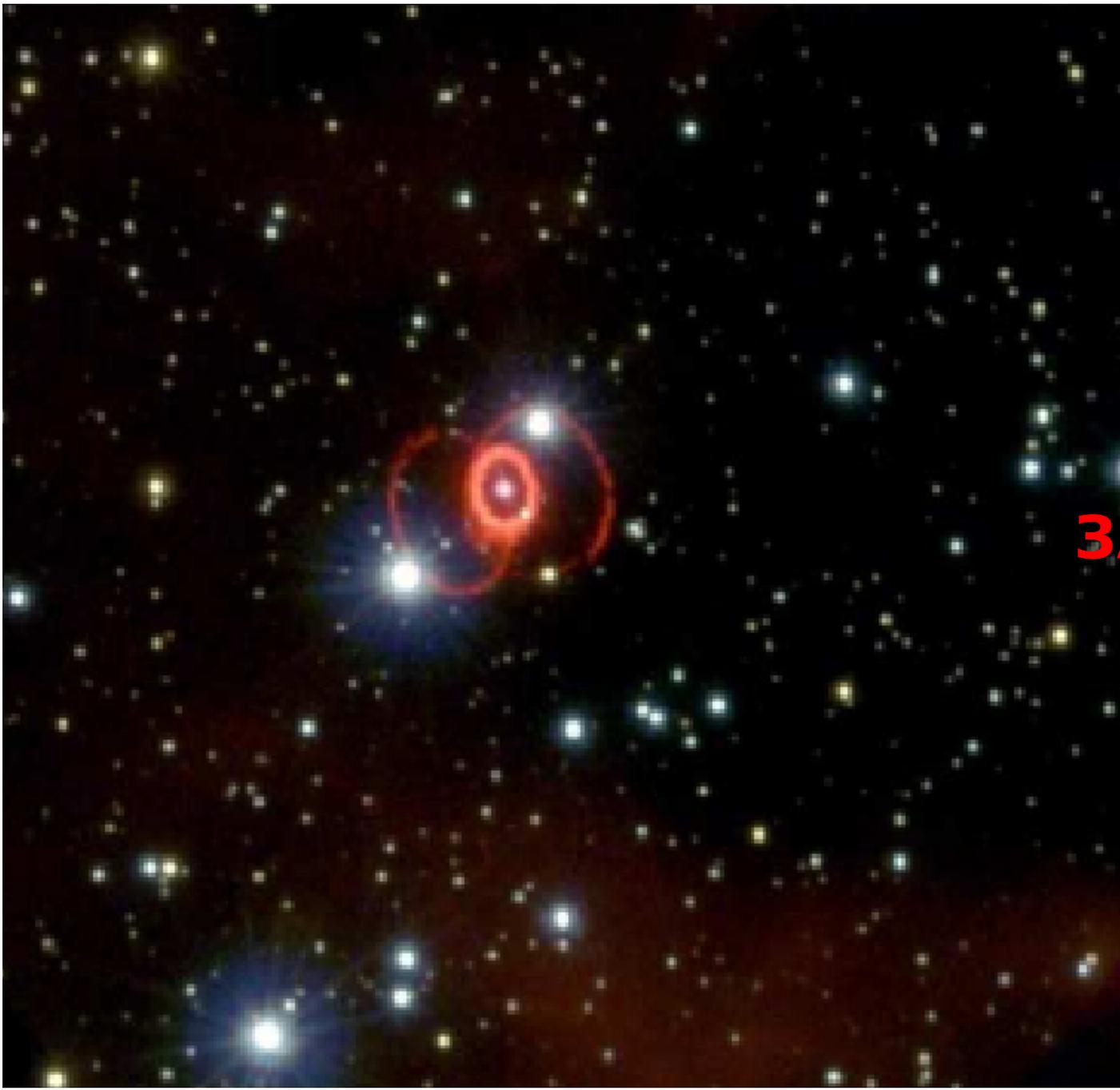
После установки пластины:

$$Y_n = (\Delta N_n / N_\mu) / \eta \rho l =$$
$$(6 \pm 4) \times 10^{-4} \text{ n}/\mu / (\text{ г}/\text{см}^2)$$

$\eta = 0.21$ - эффективность регистрации нейтронов,
рожденных в доп. пластине, двумя
счетчиками LVD

$\rho l = 35.6$ - Средняя длина пробега мюона в пластине
в г/см²





**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ**

- Last June LVD celebrated 21 years of operation.
 - Data set taken from June 9th 1992 to August 31st 2013 corresponding to 7212 live days
- LVD project was approved in 1985, two years before the observation of neutrinos and photons from SN1987A !!
- LVD began taking data on June 1992 with 1/3 of its present mass. At the end of 2001 the detector reached the present configuration.
- LVD has been participating to the SN Early Warning System since its very beginning.
 - In 2001 participated to the High Rate Test together with SUPERKAMIOKANDE and SNO.
- SNEWS started to be operational on July 2005 after a long period of commissioning.
 - At present with LVD, SUPERK, ICECUBE and BOREXINO.

Analysis of the seasonal modulation of the cosmic muon flux and neutrons from muons.

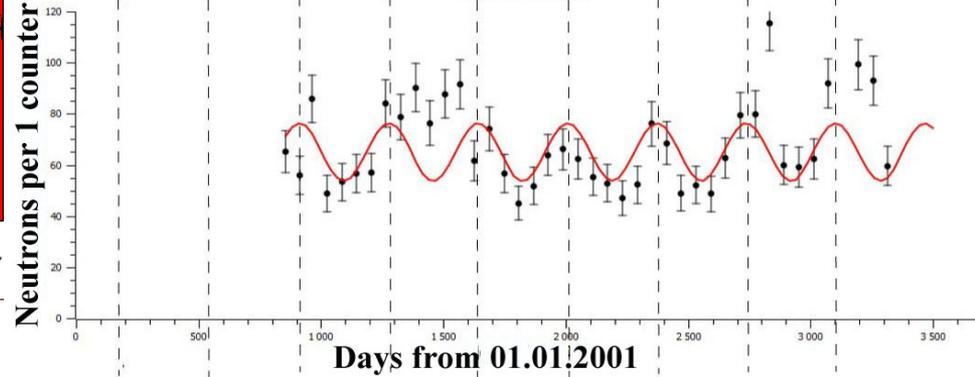
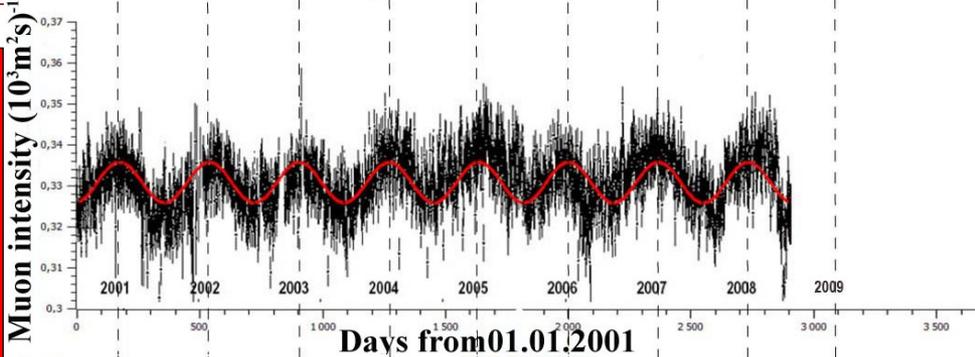
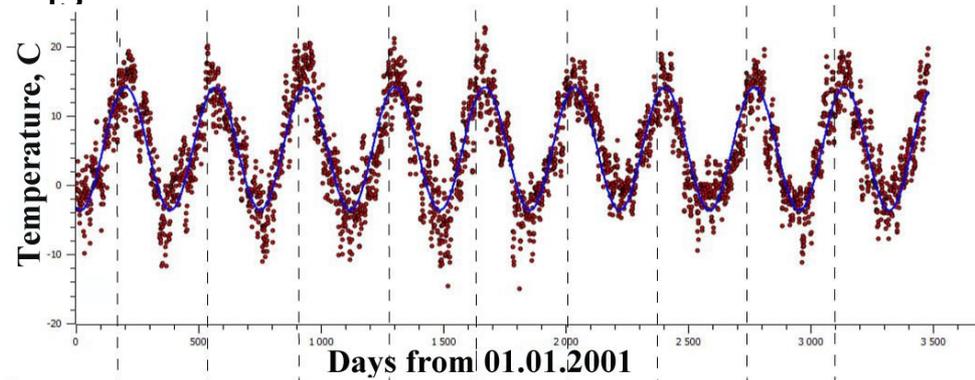
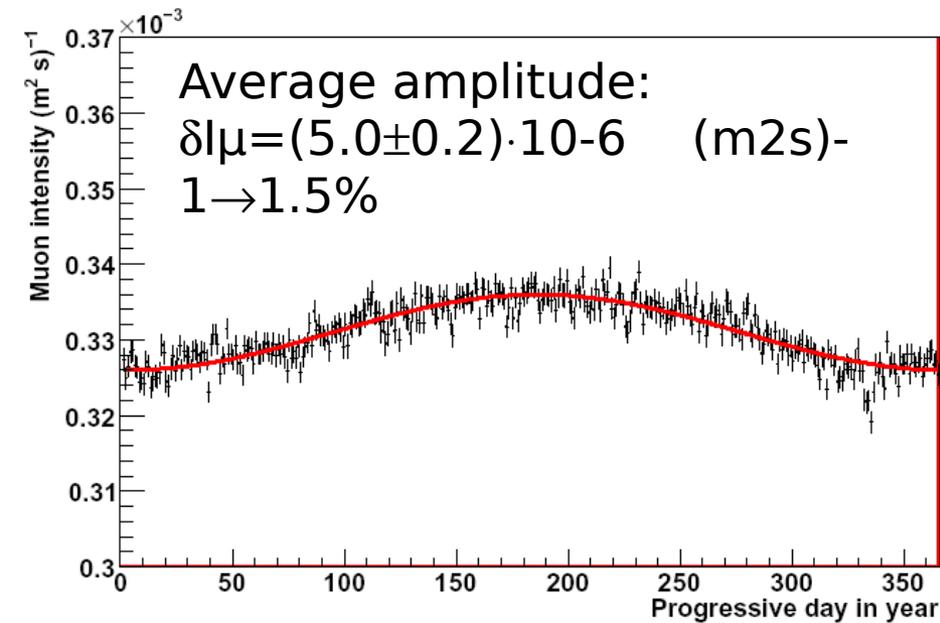
The muon intensity in each run is

defined as: $I_{\mu} = N_{\mu} / A_{\mu} \cdot t$
 Average muon intensity:

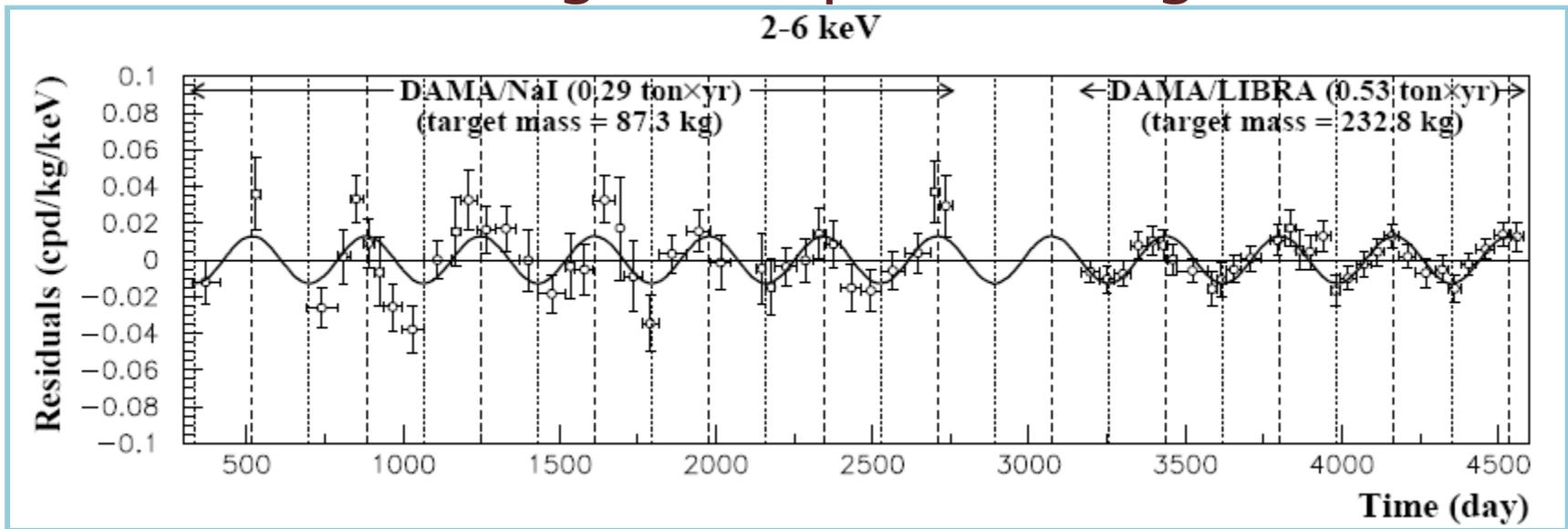
$$I_{\mu} = (3.31 \pm 0.03) \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2\text{s)}^{-1}$$

$$\text{Period: } T = (367 \pm 15) \text{ days}$$

Superposition of the whole muon data set into one year:



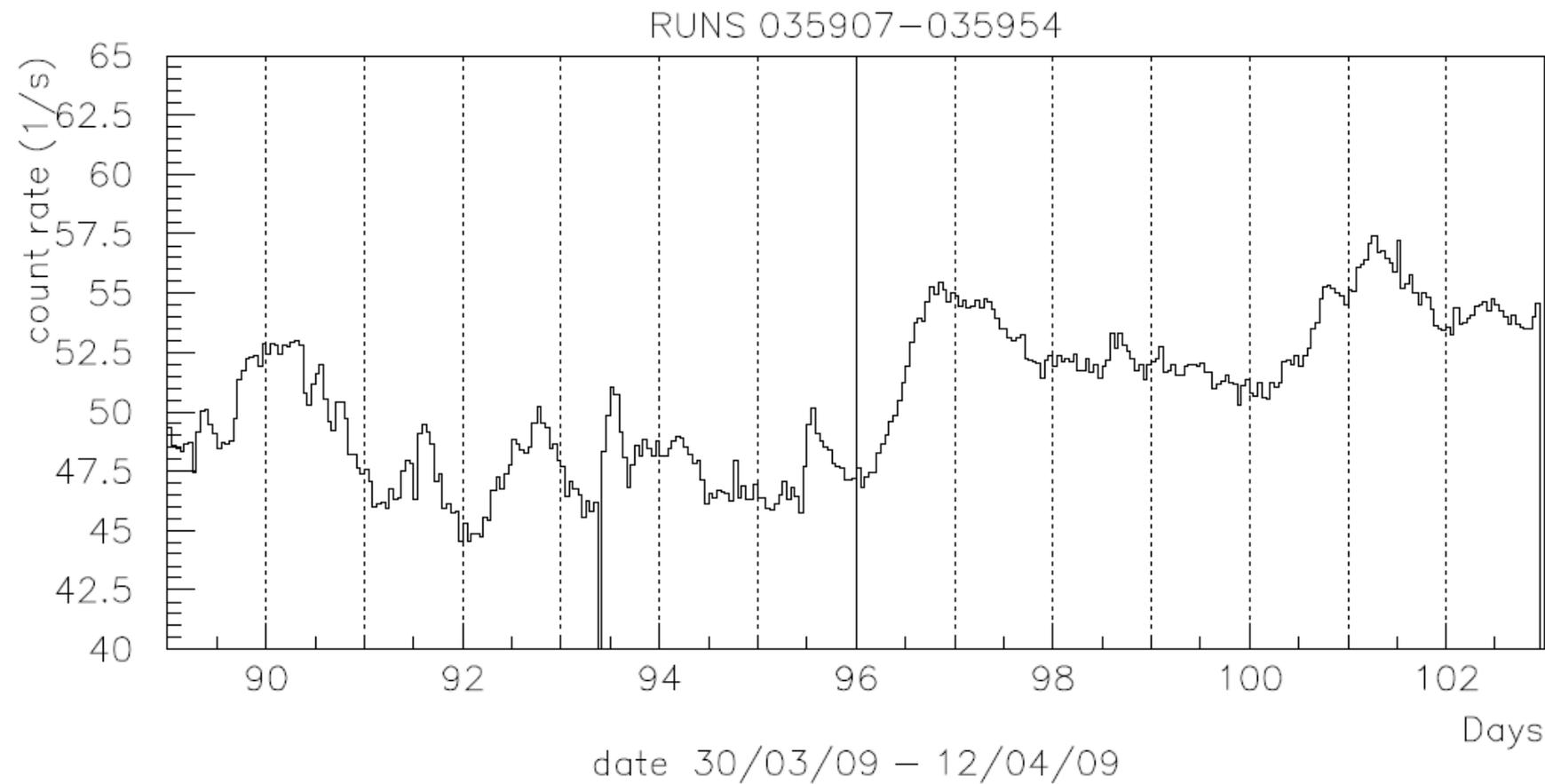
For studying the rare processes, as search for dark matter (for example) it is necessary to take into account the existing of the muon variation at the higher depth underground



The superimposed curves represent the cosinusoidal functions behaviours $A \cos \omega(t - t_0)$ with a period $T = 1$ yr, with a phase $t_0 = 152.5$ day (June 2nd). The dashed vertical lines correspond to the maximum of the signal (June 2nd), while the dotted vertical lines

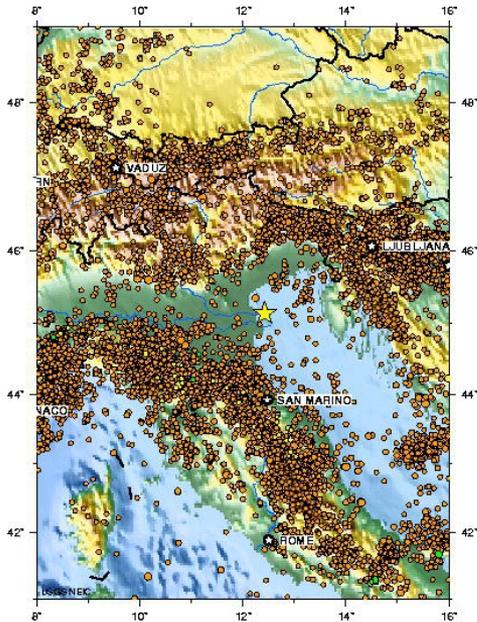
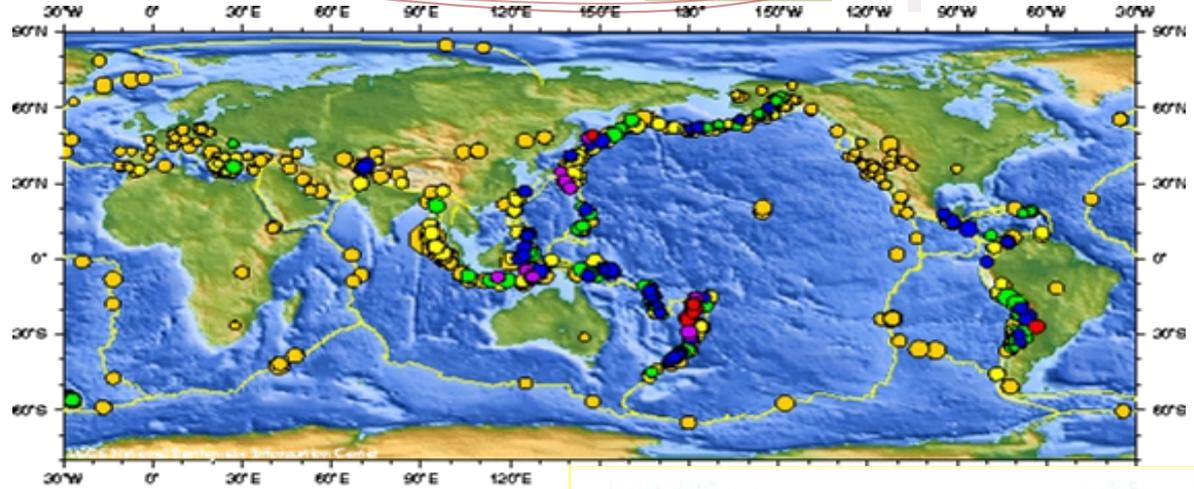
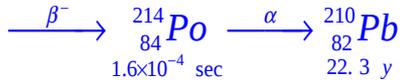
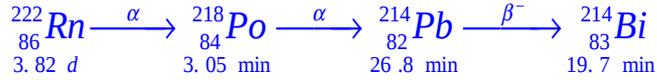
correspond to the minimum.
 R. Bernabei et. al., (DAMA Coll.) // arXiv:0804.2741v1

LVD: radon data

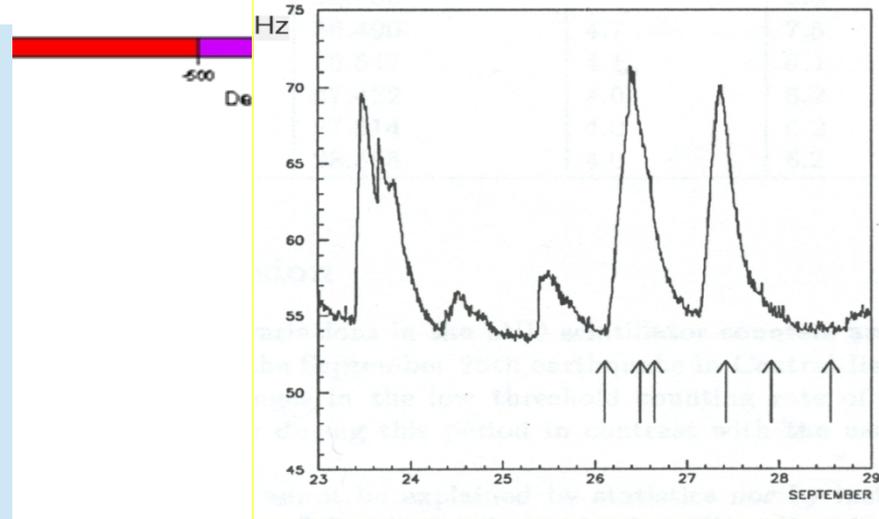


Precursors of earthquake

Radon



Energy of γ , MeV	Number of γ per 100 nuclei of ${}^{214}\text{Bi}$
0,609	47
1,764	17
1,120	17
1,238	6
2,204	5
1,378	5
0,769	5
1,400	4

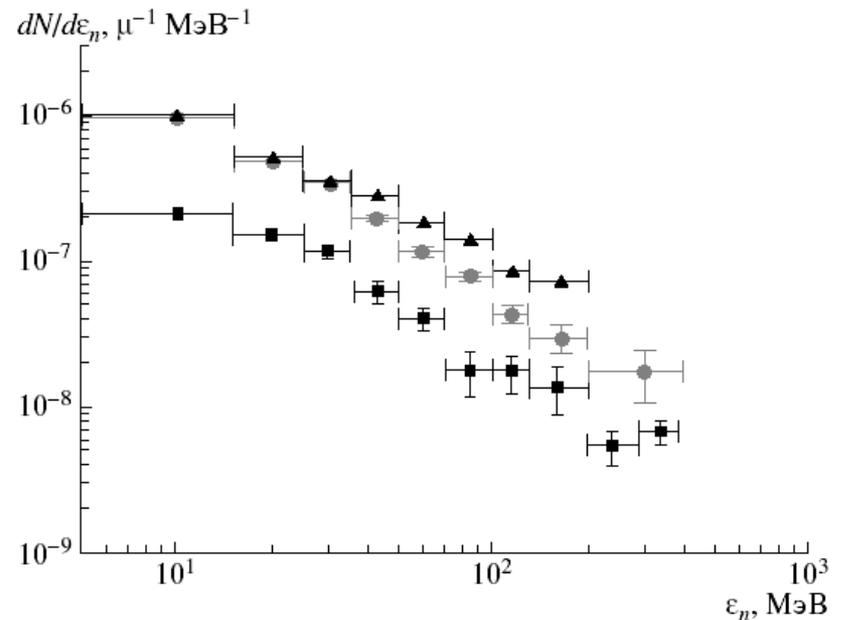
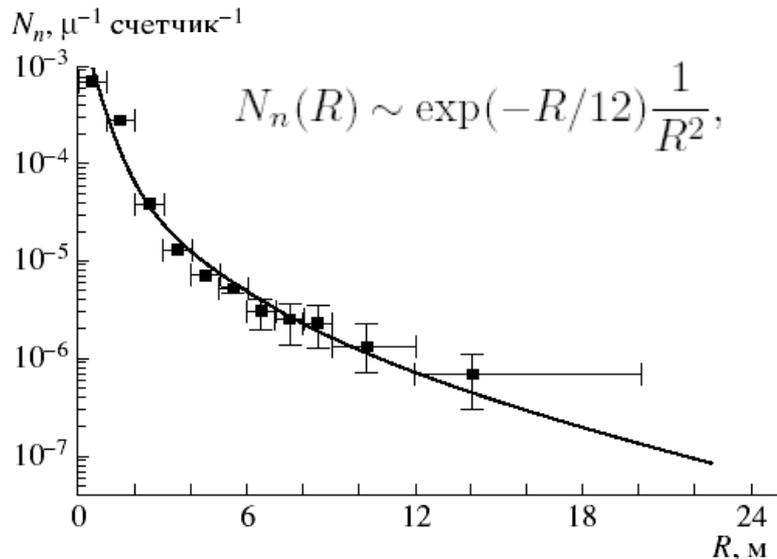


Counting rate of LVD during earthquake in Italy (1997). The moments of shocks are given by arrows.

LVD

Energy spectra of
neutron-produced events
till 300 MeV

Neutron space distribution
22 m from muon trajectories
are measured



траектории мюона и $R > 2$ м

Detector	Depth, m.w.e.	Mass, ktons	Threshold	Efficiency			Expected number of events					Background, s-1
				$\eta_{e\pm}$	η_n	η_γ	Standart model		Rotating collapsar model			
							ν_{ep}	ν_{ie}	ν_{iC}	ν_{eA}	ν_{eAi}	
ASD Artyomovsk Russia	570	0.1 CnH2n	5	0.97	0.80	0.85	57	2.1	9.5		19	0.16
		1.0 NaCl				0.07	0.05				25	
BUST Baksan Russia	850	0.2 CnH2n	8	0.6	-	0.2	67	2.2	4.3		8	0.033
		0.16 Fe										
KamLAND Kamioka Japan	2700	1.0 CnH2n	0.35	0.9			500	48	85		180	
Borexino Gran Sasso Italy	3300	0.3 C9H12	0.2	0.9	0.85		120	12	28		60	
LVD Gran Sasso Italy	3300	1.0 CnH2n	4-6	0.9	0.6	0.55	500	22	55		160	0.1
		0.95 Fe				0.45				250		
Super-K Kamioka Japan	2700	22.5 H2O	7	0.9	-	-	9400	400	-		650	