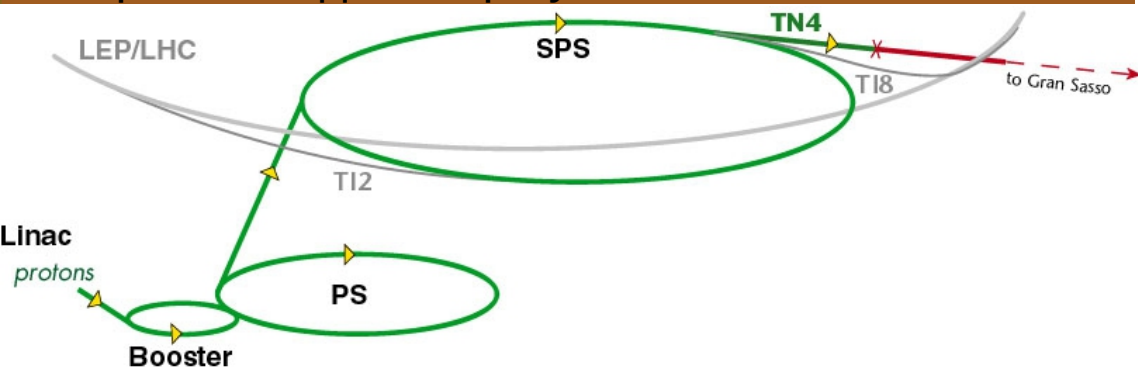
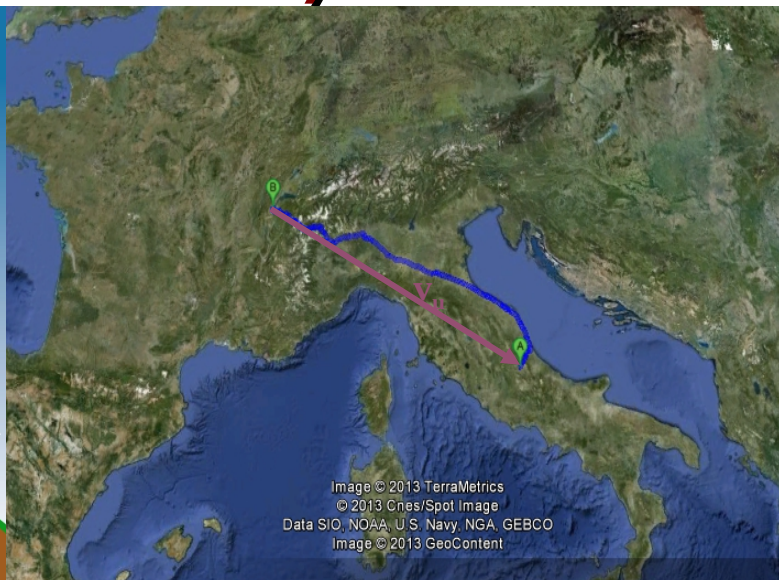


# Генерация нейтронов горизонтальными мюонами от нейтринного пучка из ЦЕРНа

# Структура доклада

- Для чего необходимо знать величину генерации нейтронов от мюонов на  $1 \text{ г/см}^2$
- О проекте CNGS
- Детектор LVD
- Экспериментальная формула для вычисления величины генерации нейтронов от мюонов
- Критерии отбора счетчиков установки
- Получение величины общего числа захватных гамма-квантов
- Моделирование событий
- Измерение средней длины трека мюона
- Вычисление эффективности регистрации нейтронов в детекторе LVD
- Сравнение с полученными ранее результатами.

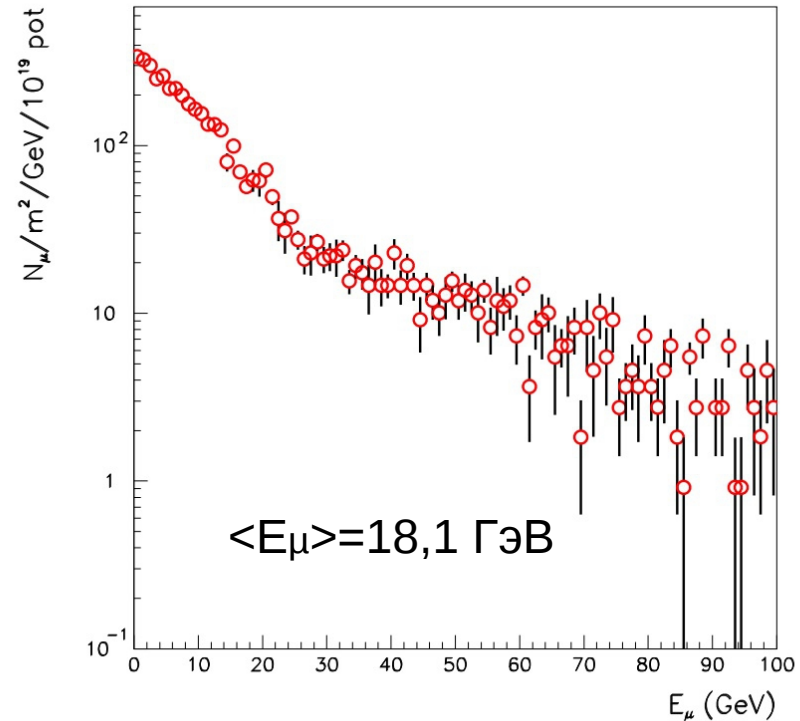
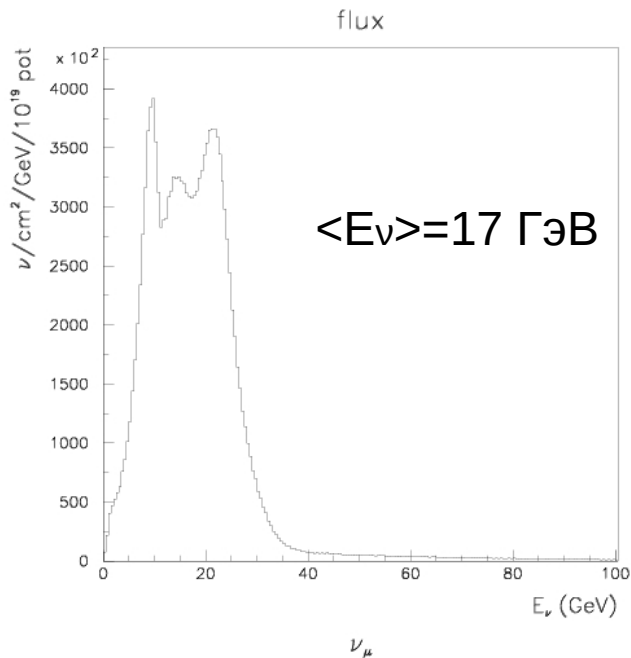
# О проекте CNGS (нейтрино из ЦЕРНа в Гран Сассо)



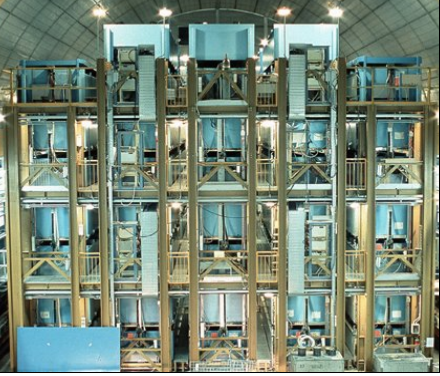
**Энергии протонов в SPS: до 400 ГэВ**

- PS : Proton Synchrotron
- SPS : Super Proton Synchrotron
- LHC : Large Hadron Collider

# Энергетические спектры нейтрино и мюонов от нейтрино



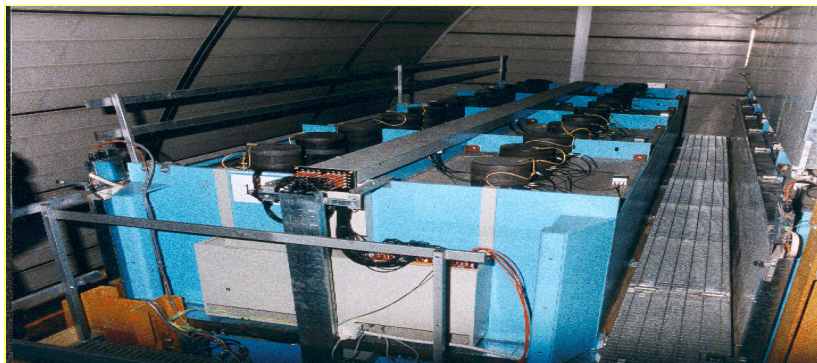
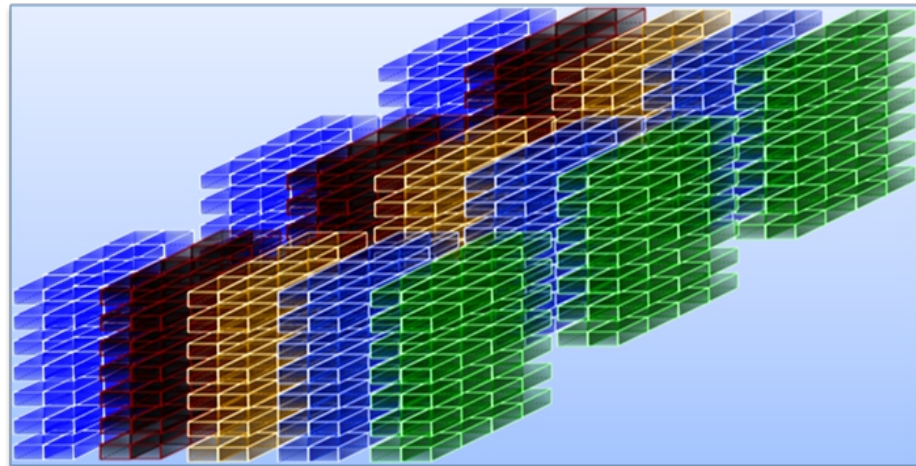
<http://www.mi.infn.it/~psala/Icarus/cngs.html>



Эксперимент по регистрации нейтринного излучения от сверхновых **LVD** (**Large Volume Detector** – детектор большого объема).

Установка LVD предназначена для исследований в области нейтринной физики, астрофизики, физики космических лучей и поиска редких процессов, предсказываемых теорией, но, как было обнаружено в последние годы, может быть использована и в ядерной геофизике для изучения и возможного предсказания землетрясений.

LVD состоит из трех башен, имеющих модульную структуру (по 35 портатанков в каждой башне). Каждый портатанк содержит по 8 сцинтилляционных счетчиков.



# Экспериментальная формула для вычисления величины генерации нейтронов от мюонов

- $Y_i = N_\gamma \cdot f_i / (N_\mu \cdot \rho_i \cdot l_i \cdot \epsilon_i)$ , где
- $Y_i$  – величина генерации нейтронов от мюонов на  $1\text{г}/\text{см}^2$  вещества
- $N_\gamma$  – число захватных гамма-квантов, зарегистрированных в детекторе
- $f_i$  – доля нейтронов, продуцированных в данном  $i$ -ом веществе от всего количества продуцированных нейтронов
- $N_\mu$  – число зарегистрированных мюонных событий
- $\rho_i$  – плотность  $i$ -ого вещества (0,78 – для сцинтиллятора, 7,8 для железа)
- $l_i$  – средняя длина трека, которую прошел мюон в  $i$ -ом веществе
- $\epsilon_i$  – эффективность регистрации нейтронов в установке
- $i$  – сцинтиллятор или железо

# Критерии отбора мюонных событий от нейтринного пучка на LVD

- Данные отбирались за период с 2008 по 2011 гг.
- Время между запуском пучка и регистрацией события на установке должно укладываться в промежуток  $2,44 \pm 0,1$  мс
- В установке должно сработать не менее 2 триггеров с порогом 5 МэВ.
- Энерговыделение в одном из счетчиков должно быть не менее, чем 50 МэВ.

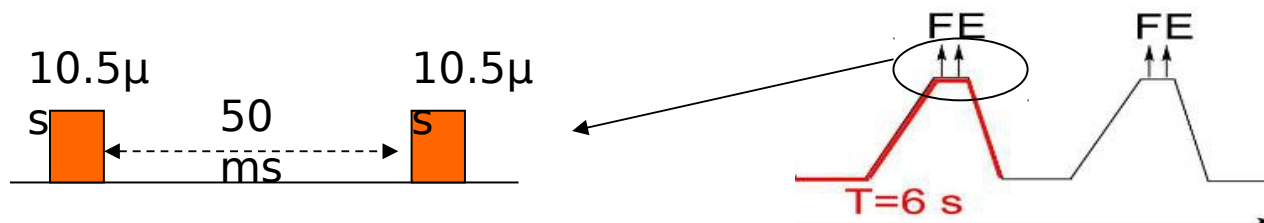


# Структура пучка и полученное мюонное распределение

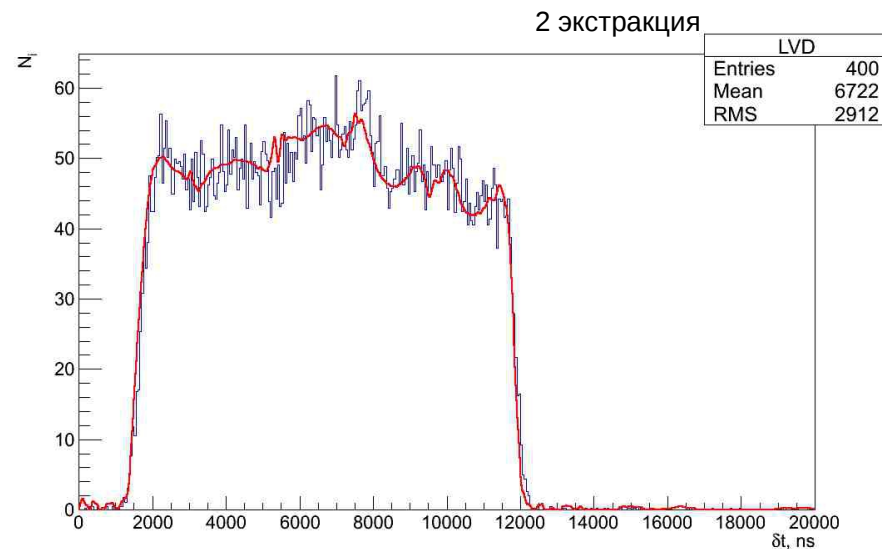
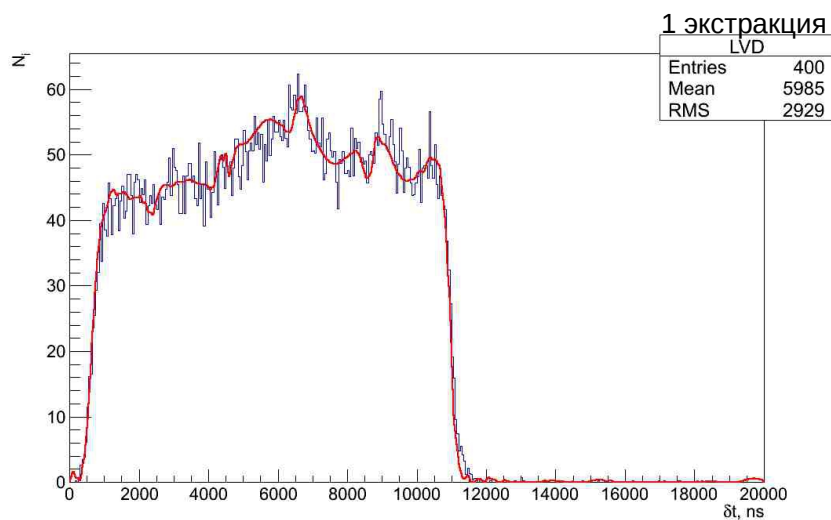
Мюонные нейтрино – более 96,9 %

Электронные нейтрино и электронные антинейтрино – менее 1 %

Мюонные антинейтрино – 2,1 %



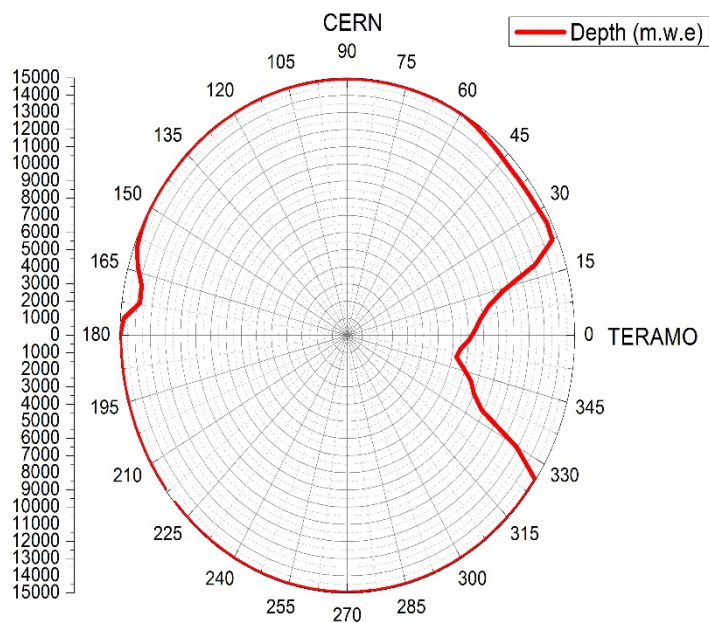
2008-2011



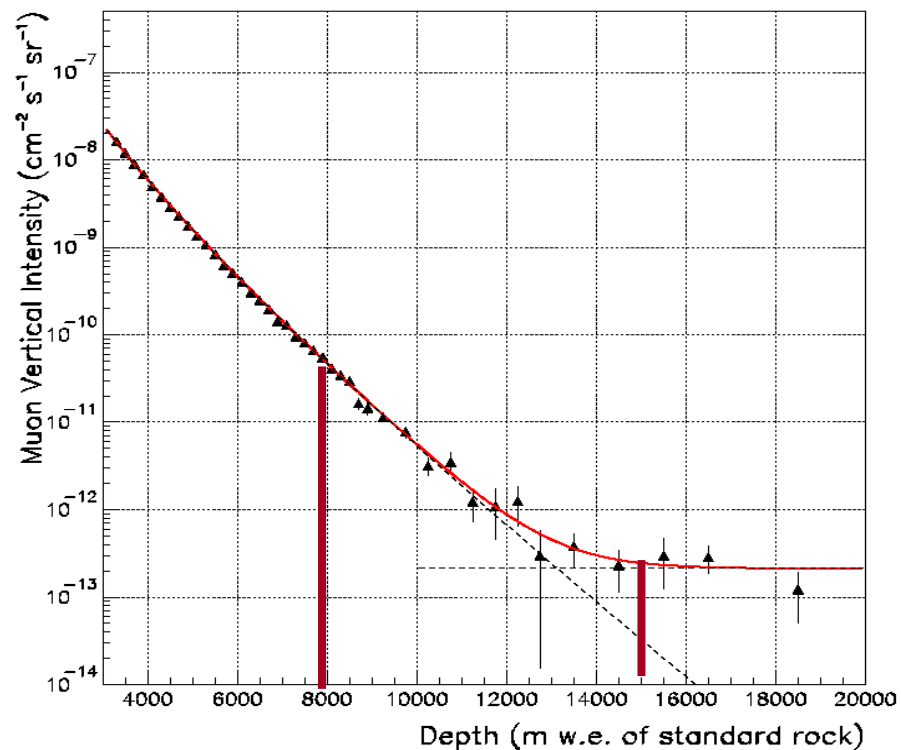


# Фон от случайных событий

Распределение глубин для лаборатории Гран Сассо при углах  $\Theta$  от 87 до 90°



Кривая глубина-интенсивность.



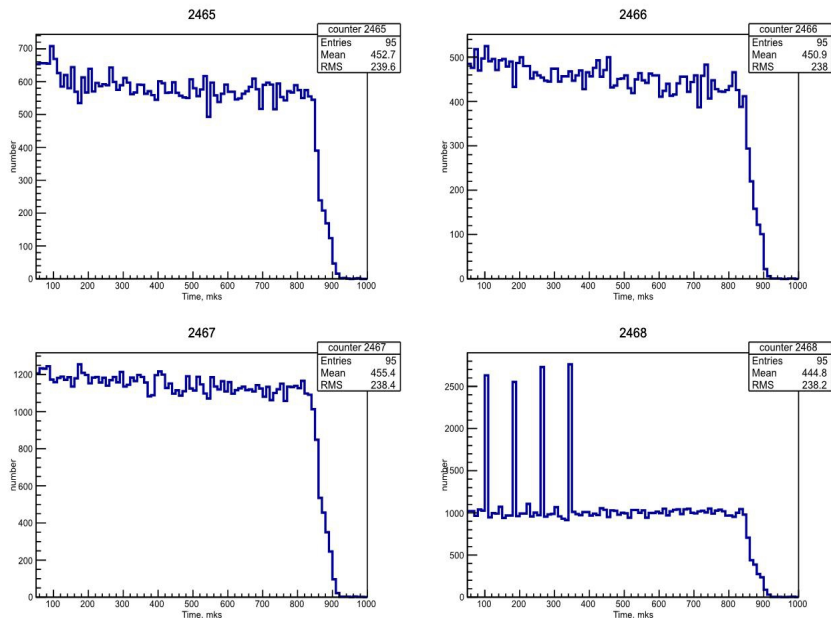
# Экспериментальная формула для вычисления величины генерации нейтронов от мюонов

- $Y_i = N_\gamma \cdot f_i / (N_\mu \cdot \rho_i \cdot l_i \cdot \epsilon_i)$ , где
- $Y_i$  – величина генерации нейтронов от мюонов на  $1\text{г}/\text{см}^2$  вещества
- $N_\gamma$  – число захватных гамма-квантов, зарегистрированных в детекторе
- $f_i$  – доля нейтронов, продуцированных в данном  $i$ -ом веществе от всего количества продуцированных нейтронов
- $N_\mu$  – число зарегистрированных мюонных событий
- $\rho_i$  – плотность  $i$ -ого вещества
- $l_i$  – средняя длина трека, которую прошел мюон в  $i$ -ом веществе
- $\epsilon_i$  – эффективность регистрации нейтронов в установке
- $i$  – сцинтиллятор или железо

# Число зарегистрированных событий

Год	Будни		Выходные		Итого
	1 экстракция	2 экстракция	1 экстракция	2 экстракция	
2008	3866	4309	1993	2221	12389
2009	8287	8371	4365	4388	25411
2010	10408	8280	5544	4305	28537
2011	11628	9114	6476	5005	32223
	34189	30074	18378	15919	
	64263		34297		
Итого событий			98560		

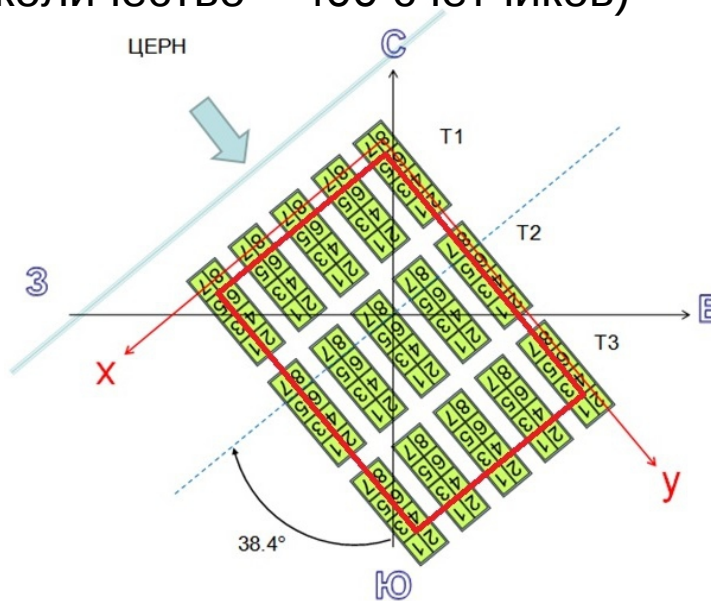
# Критерии отбора счетчиков детектора для регистрации захватных $\nu$ -квантов



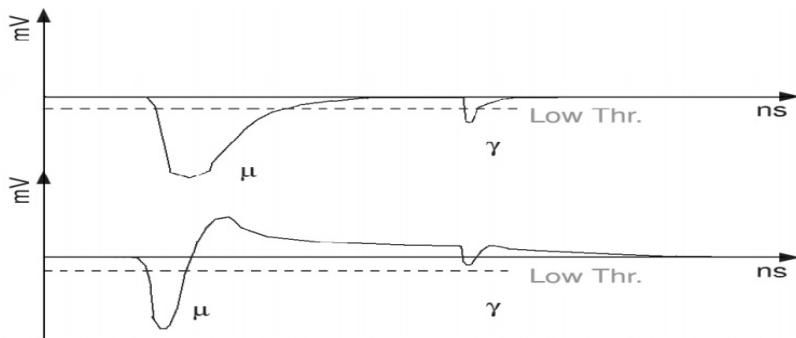
«Гладкий» спектр в диапазоне от 50 до 600 мкс ( $\langle N \rangle \pm 2N$ )

Энерговыделение в счетчике от 1,5 до 10 МэВ (нижний порог установки 0,7 МэВ)

Внутренний объем детектора (общее количество – 400 счетчиков)



# Критерии отбора счетчиков детектора для регистрации захватных $\gamma$ -квантов



Из-за «тау»-эффекта и для уменьшения фоновых эффектов было принято решение искать захватные гамма-кванты в 8 счетчиках вокруг трека мюона

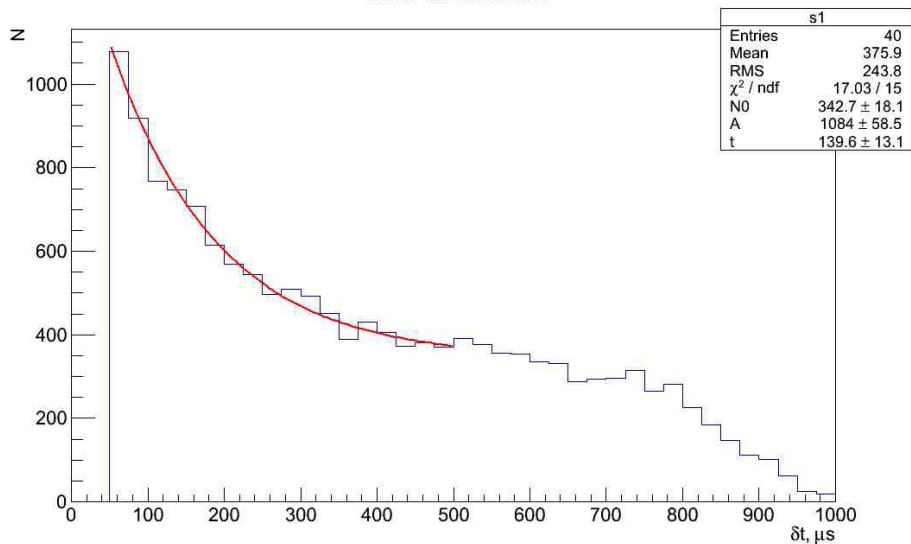


# Экспериментальная формула для вычисления величины генерации нейтронов от мюонов

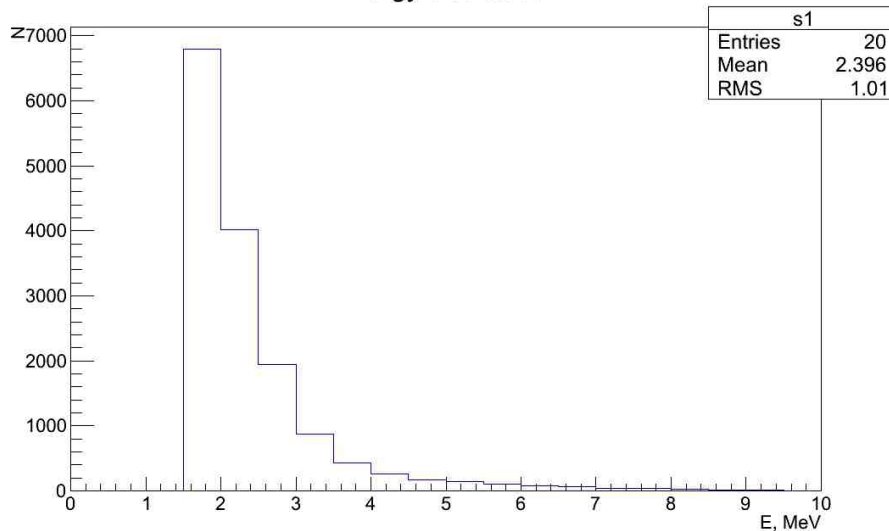
- $Y_i = N_\gamma \cdot f_i / (N_\mu \cdot \rho_i \cdot l_i \cdot \epsilon_i)$ , где
- $Y_i$  – величина генерации нейтронов от мюонов на  $1\text{г}/\text{см}^2$  вещества
- $N_\gamma$  – число захватных гамма-квантов, зарегистрированных в детекторе
- $f_i$  – доля нейтронов, продуцированных в данном  $i$ -ом веществе от всего количества продуцированных нейтронов
- $N_\mu$  – число зарегистрированных мюонных событий
- $\rho_i$  – плотность  $i$ -ого вещества
- $l_i$  – средняя длина трека, которую прошел мюон в  $i$ -ом веществе
- $\epsilon_i$  – эффективность регистрации нейтронов в установке
- $i$  – сцинтиллятор или железо

# Временной спектр и спектр энергосодержаний захватных гамма-квантов $N_\gamma$

Time distribution



Energy distribution



Вне трека

Значение      Ошибка

$N_0$	343	18
$A$	1084	59
$\tau$	140	13
$N_\gamma$	6070	894

$$dN_\gamma/dt = N_0 + A \exp(-t/\tau)$$



# Генерация нейтронов от мюонов. Монте-Карло.

- Всего – 500 000 мюонов. Грунт. Geant4.
- Применялись те же критерии отбора к мюонам, как и для реальных событий (в пределах 250 нс от начала событий, минимум 2 счетчика с энерговыведением  $> 5$  МэВ, один с энерговыведением  $> 50$  МэВ)
- Для поиска захватных гамма-квантов применялись аналогичные условия ( $1,5 < E < 10$  МэВ,  $1 < t < 1000$  мкс, внутренний объем и более жесткое условие – в ближайших 8 счетчиках вне трека мюона)
- В Монте-Карло была подключена «карта» с «плохими» и «хорошими» счетчиками для подсчета числа захватных гамма-квантов (из эксперимента)
- Рожденные нейтроны искались также в только ближайших 8 счетчиках вне трека мюона

# Экспериментальная формула для вычисления величины генерации нейтронов от мюонов

- $Y_i = N_\gamma \cdot f_i / (N_\mu \cdot \rho_i \cdot l_i \cdot \epsilon_i)$ , где
- $Y_i$  – величина генерации нейтронов от мюонов на  $1\text{г}/\text{см}^2$  вещества
- $N_\gamma$  – число захватных гамма-квантов, зарегистрированных в детекторе
- $f_i$  – доля нейтронов, продуцированных в данном  $i$ -ом веществе от всего количества продуцированных нейтронов
- $N_\mu$  – число зарегистрированных мюонных событий
- $\rho_i$  – плотность  $i$ -ого вещества
- $l_i$  – средняя длина трека, которую прошел мюон в  $i$ -ом веществе
- $\epsilon_i$  – эффективность регистрации нейтронов в установке
- $i$  – сцинтиллятор или железо

# Измерение средней длины трека мюона $l_i$

- Для сцинтиллятора  $l_i = \Sigma(N_i * E_i / b) / N_\mu$
- $N_i$  - число счетчиков, через которые прошел мюон
- $E_i$  - энергосодержание в  $i$ -ом счетчике от мюона
- $b$  – потери на ионизацию
- $N_\mu$  – число мюонных событий
- $l_i$  – средняя длина мюонного трека

Средняя длина  
(сцинтиллятор),

$$l_{sc} * \rho_{sc}, \text{Г/см}^2$$

**644±13**

Средняя длина  
(железо),

$$l_{Fe} * \rho_{Fe}, \text{Г/см}^2$$

**519±10**

# Экспериментальная формула для вычисления величины генерации нейтронов от мюонов

- $Y_i = N_\gamma \cdot f_i / (N_\mu \cdot \rho_i \cdot l_i \cdot \epsilon_i)$ , где
- $Y_i$  – величина генерации нейтронов от мюонов на  $1\text{г}/\text{см}^2$  вещества
- $N_\gamma$  – число захватных гамма-квантов, зарегистрированных в детекторе
- $f_i$  – доля нейтронов, продуцированных в данном  $i$ -ом веществе от всего количества продуцированных нейтронов
- $N_\mu$  – число зарегистрированных мюонных событий
- $\rho_i$  – плотность  $i$ -ого вещества
- $l_i$  – средняя длина трека, которую прошел мюон в  $i$ -ом веществе
- $\epsilon_i$  – эффективность регистрации нейтронов в установке
- $i$  – сцинтиллятор или железо

# Эффективности регистрации захватных гамма-квантов от нейтронов

Доля нейтронов,  
рожденных в  
сцинтилляторе или в  
железе

Эффективность  
регистрации нейтронов в  
сцинтилляторе и железе

	$f_i$
<b>Сцинтиллятор</b>	0,14673
<b>Железо</b>	0,85327

$\epsilon$
0,47±0,02

# Генерация нейтронов мюонами на 1 г/см<sup>2</sup>

	Сцинтиллятор		Железо	
	Значение	Ошибка	Значение	Ошибка
N <sub>γ</sub>	891	131	5180	763
li*ρ	644	13	519	10
N <sub>μ</sub>	98560		98560	
ε	0,47	0,02	0,47	0,02
Y	2,99E-05	0,63E-05	21,54E-05	4,51E-05
Y <sub>corr</sub> *	3,74E-05	0,78E-05	23,36E-05	4,88E-05

\*С учетом неоднородности детектора, необходимо откалибровать полученный результат на **8%** для железа и **20%** для сцинтиллятора

([http://www.bo.infn.it/lvd/pubdocs/phdThesis\\_PersianiRino.pdf](http://www.bo.infn.it/lvd/pubdocs/phdThesis_PersianiRino.pdf))

# Сравнение с имеющимися данными

$\langle E \rangle = 18,1 \text{ ГэВ}$

$Y_{LS} = 0,37 \pm 0,08$   $Y_{Fe} = 2,33 \pm 0,49$

TABLE I: Measured neutron yield

$\bar{E}_\mu, \text{ GeV}$	H, m.w.e.	$Y_{LS}$	$Y_n \times 10^{-4}, n/\mu/(g/cm^2)$			Ref.	year
			$Y_{Fe}$	$Y_{Pb}$			
$10.0 \pm 6.3^a$	20	-	$0.98 \pm 0.01$	$2.43 \pm 0.13$	[26]	1954	
$10.0 \pm 6.3^a$	60	-	-	$4.8 \pm 0.6$	[27]	1970	
$11.0 \pm 6.6^a$	40	-	$1.32 \pm 0.30$	$4.03 \pm 0.36$	[9]	1971	
$13.0 \pm 7.2$	20	$0.20 \pm 0.07$	-	-	[18]	1995	
$16.5 \pm 8.1$	32	$0.36 \pm 0.03$	-	-	[19]	2000	
$16.7 \pm 8.2$	25	$0.47 \pm 0.05$	-	-	[6]	1973	
		$0.36 \pm 0.05^b$					
$17.8 \pm 8.4^a$	80	-	$1.69 \pm 0.30$	$5.66 \pm 0.36$	[9]	1971	
$20 \pm 9^a$	110	-	-	$6.8 \pm 0.9$	[27]	1970	
$40 \pm 12.6^a$	150	-	$3.31 \pm 0.96$	$11.56 \pm 1.1$	[28]	1968	
$86 \pm 18$	316	$1.21 \pm 0.12$	-	-	[6]	1973	
		$0.93 \pm 0.12^b$					
$110 \pm 21^a$	800	-	-	$17.5 \pm 3.0$	[29]	1970	
$125 \pm 22$	570	$2.04 \pm 0.24$	-	-	[20]	1986	
		$1.57 \pm 0.24^b$					
$260 \pm 8$	2700	$2.8 \pm 0.3$	-	-	[12]	2010	
$280 \pm 33$	4300	-	-	$116 \pm 44$	[30]	1973	
$280 \pm 33$	3100	$4.1 \pm 0.5$	$16.4 \pm 2.3$	-	[21]	2005	
		$3.3 \pm 0.5^b$					
$280 \pm 33$	3100	$3.2 \pm 0.2$	$19.0 \pm 1.0$	-	[11]	2011	
$385 \pm 39$	5200	$5.3^{+0.95}_{-1.02}$	$20.3 \pm 2.6$	-	[8]	1989	
		$4.1 \pm 0.6^b$					

<sup>a</sup>Vertical flux

<sup>b</sup>Corrected values

- N. Yu. Agafonova, A. S. Malgin, Universal formula for the muon-induced neutron yield, Phys. Rev. D 87, 113013 (2013), arXiv:1304.0919, (2013)



- Спасибо за внимание