

Изучение генерации нейтронов, мюонами космических лучей в железе, с помощью детектора LVD

Агафонова Н.Ю., Ашихмин В.В., Добрынина Е.А.,
Дадыкин В.Л., Еникеев Р.И., Мальгин А.С.,
Мануковский К.В., Ряжская О.Г., Рясный В.Г.,
Шакирьянова И.Р., Юдин А.В., Якушев В.Ф. и
Коллаборация LVD

1 Институт Ядерных Исследований РАН
2 Институт Теоретической и Экспериментальной
Физики

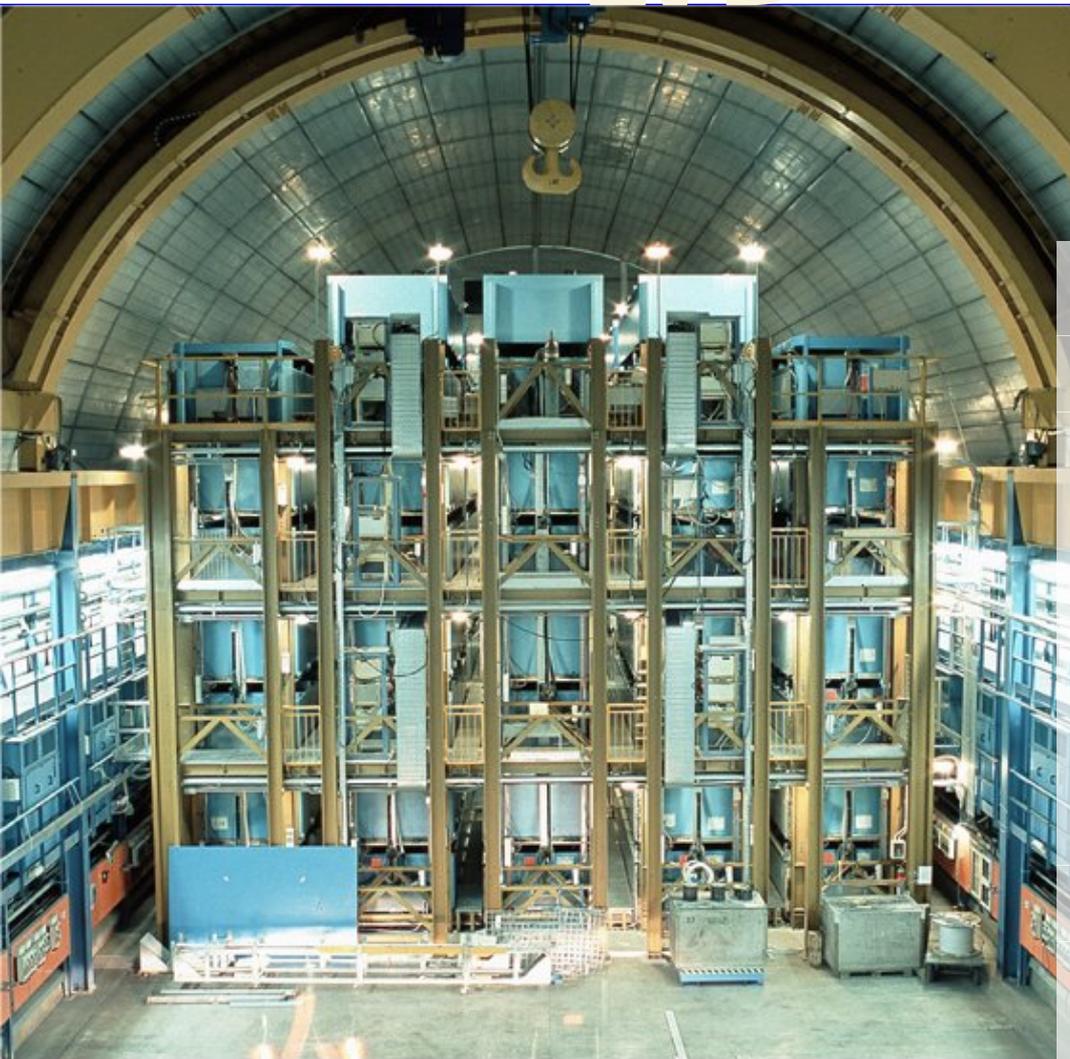
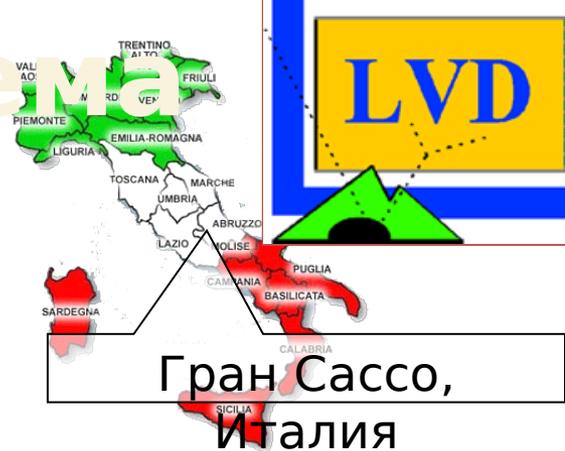
В эксперименте LVD проводится изучение генерации нейтронов мюонами в железе (Fe) и свинце (Pb). Для $A=57$ (Fe) выполнена полная Монте-Карло симуляция. Получены первые результаты измерений.

СОДЕРЖАНИЕ:

- ❑ Детектор Большого Объема LVD
- ❑ Нейтроны в мюонных событиях
- ❑ Конструкция для измерения выхода нейтронов, генерированных в железе
- ❑ М-К симуляция эксперимента
- ❑ Анализ экспериментальных данных
- ❑ Заключение

Детектор Большого Объема

LVD



Длина × Ширина × Высота 22.7 × 13.2 × 10 м

Масса железа 1020 т

Масса сцинтиллятора 1008 т

Число сцинт. счетчиков 840

Число PMTs (ФЭУ) 2520

Средняя глубина 3620 м.в.э.
(минимальная) 3000 м.в.э.

Средняя энергия мюонов 270 ГэВ

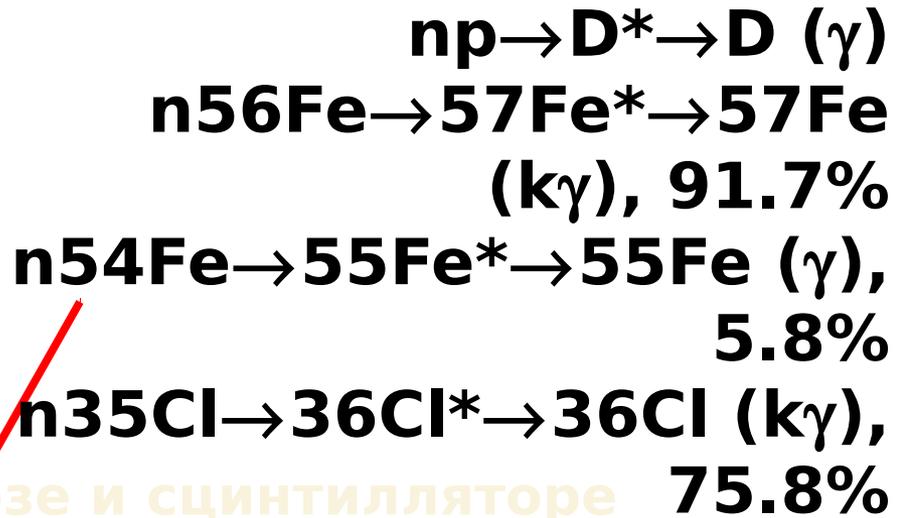
Ем на уровне моря (мин.) 1.8 ТэВ

Скорость счета мюонов
(на 1 башню) ~ 120 ч⁻¹

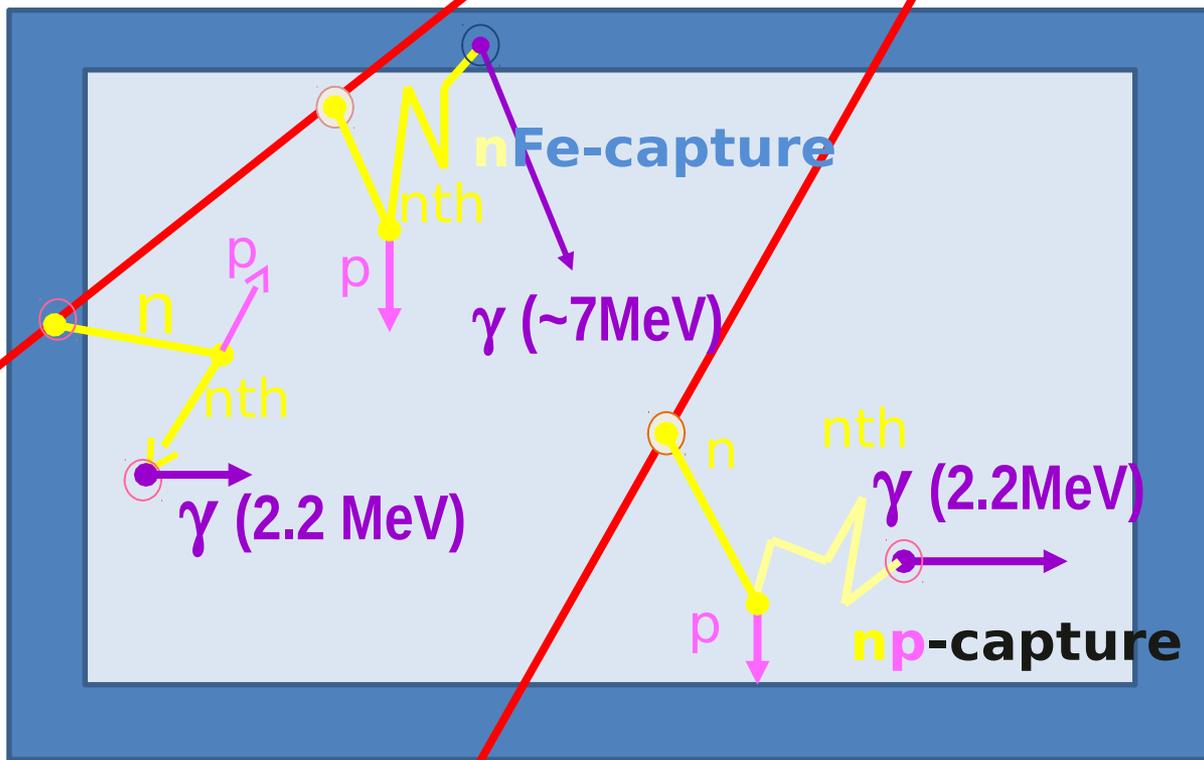
ϵ_{th} порог – внутренние 4 MeV,
– наружные счетчики 7 MeV

Основная цель – **регистрация нейтрино от коллапсов звездных**

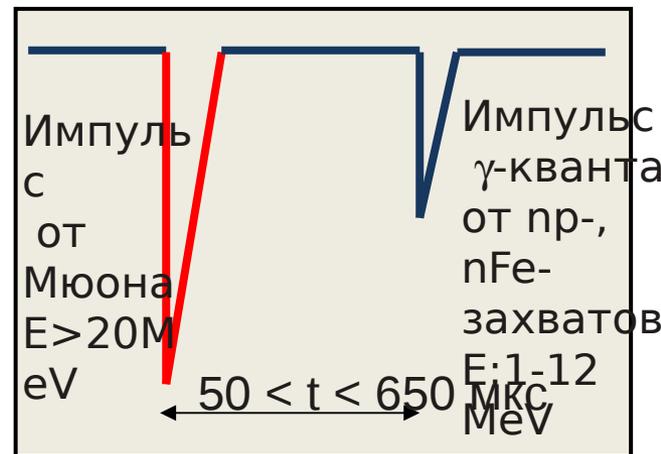
Мюон проходя через установку рождает нейтроны посредством виртуальных фотонов (это нейтроны прямой генерации), а также в электромагнитных и адронных ливнях (это вторичные нейтроны). Все эти нейтроны замедляются в веществе детектора до энергии 0.4 эВ в столкновениях, в основном, с протонами. Затем термализуются до энергии 0.025 эВ и захватываются или протонами сцинтиллятора или ядрами железа



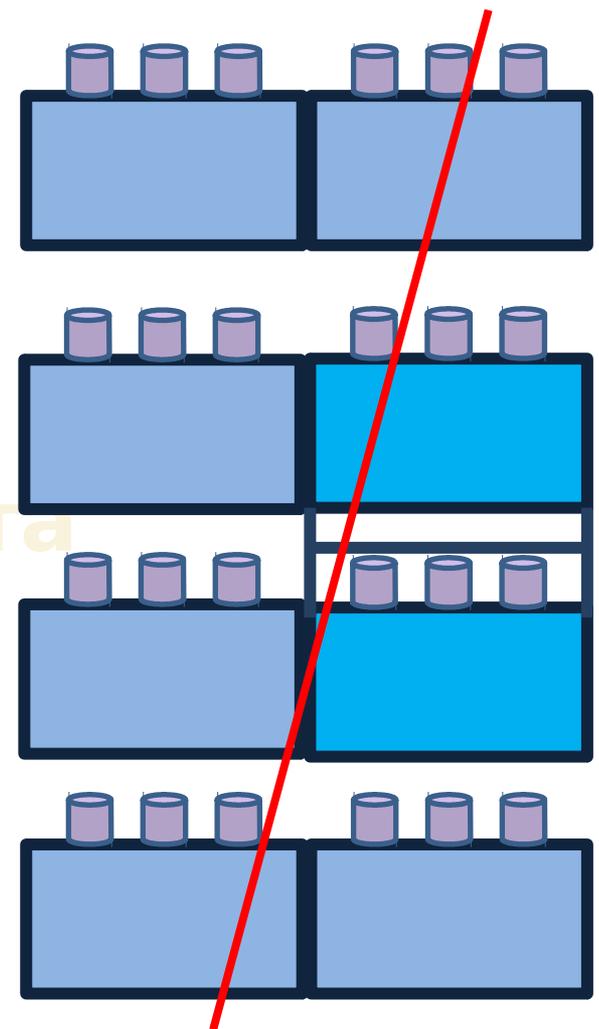
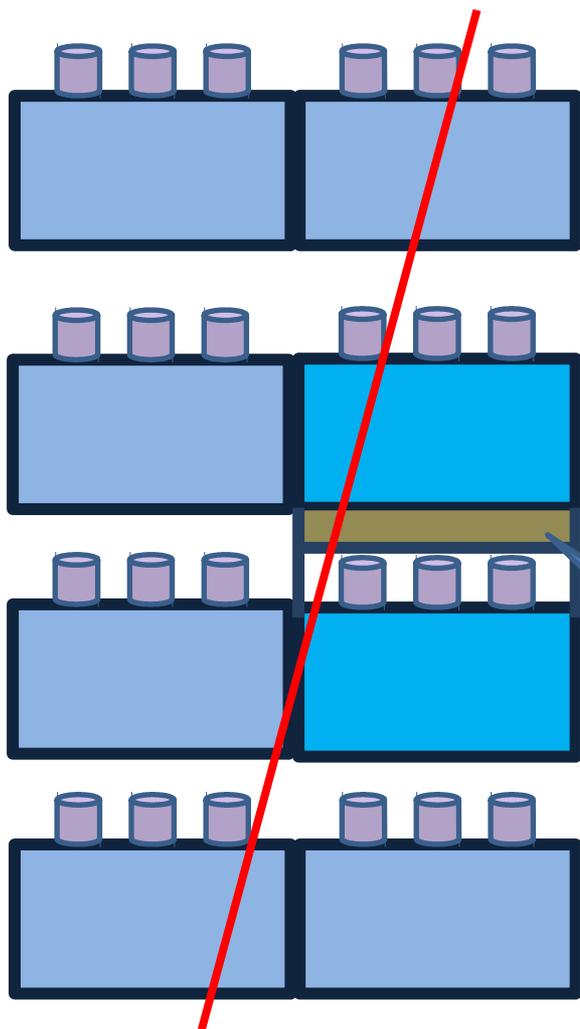
Регистрация нейтронов мюонами в железе и сцинтилляторе



Регистрация нейтронов в счетчиках



Конструкция для измерения выхода нейтронов, генерированных в железе



Идея эксперимента

Дополнительное железо 4 см
470 кг

Конструкция для установки железа

В третьей башне детектора LVD, проводится эксперимент по измерению числа нейтронов, генерируемых мюонами в железе.

Установка состоит из двух счетчиков, расположенных один над другим, и специальной конструкции для введения дополнительного вещества (пластин железа или свинца).

14 мая 2013 года между счетчиками 3446 и 3436 было установлено 4 см железа. Масса железа составляет 470 кг. Пластины железа придвинуты ко дну верхнего счетчика вплотную.



- Образец текста
 - Второй уровень
 - Третий уровень
 - Четвертый уровень
 - Пятый уровень

Анализ экспериментальных данных

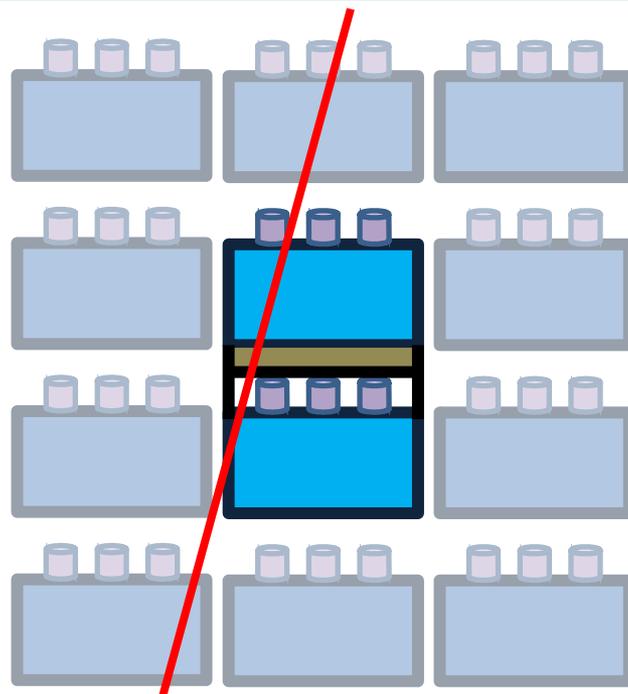
счетчики 3446 и 3436

ГОД	2008	2009	2010	2011	2012	С 14.05.2013 – 14.05.2014
Число МЮОНОВ	5206	5492	5345	5180	4364	4037

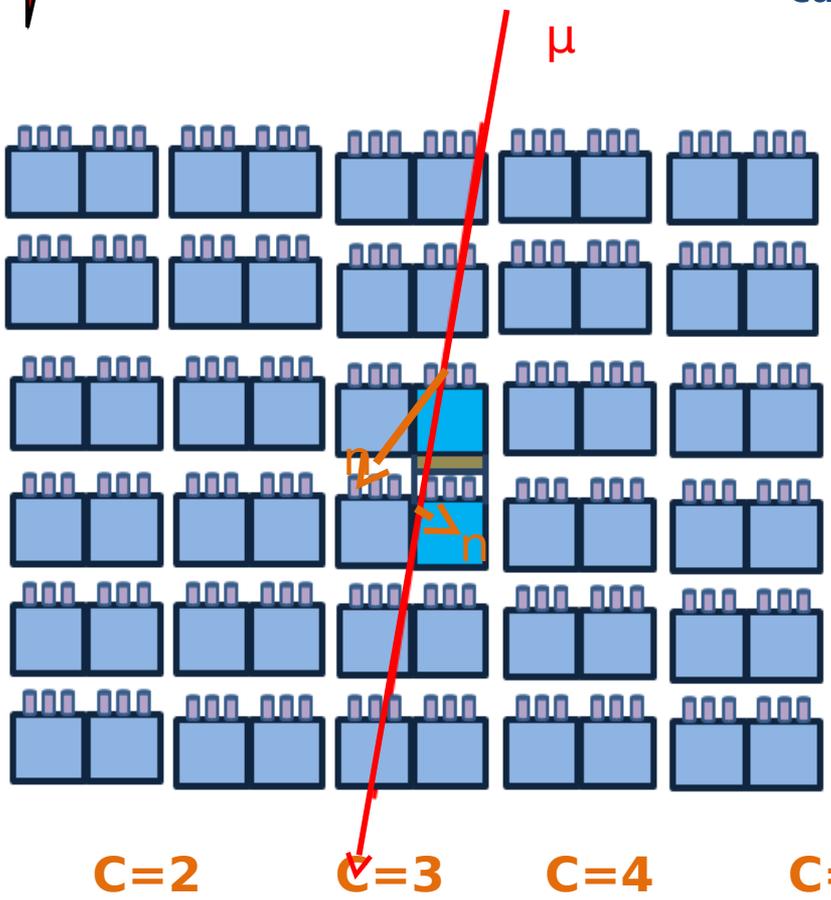
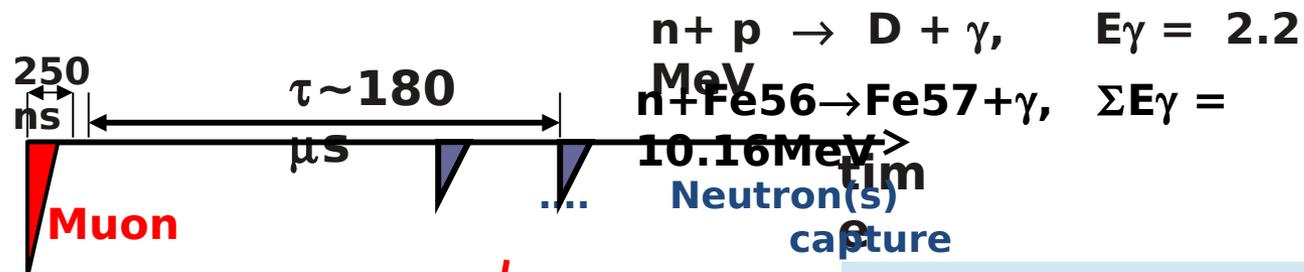
Отбор мюонов

- Число сработавших счетчиков больше 4;
- Энерговывделение мюона в верхнем и нижнем счетчиках $E(u) > 20$ МэВ и $E(d) > 20$ МэВ;
- Суммарное энерговывделение в $E(u)+E(d) > 200$ МэВ

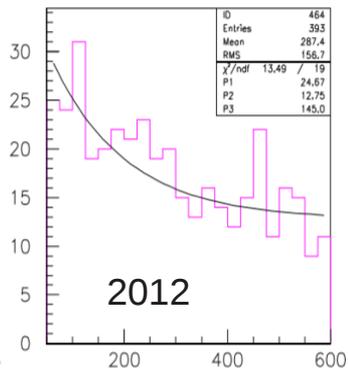
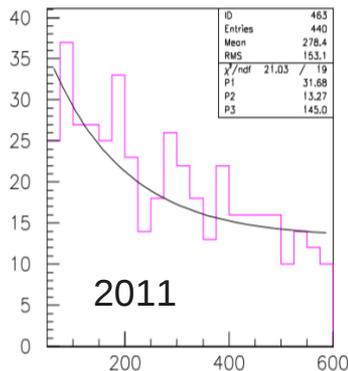
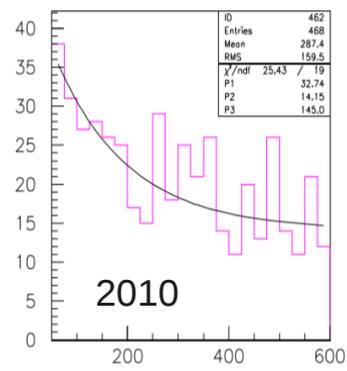
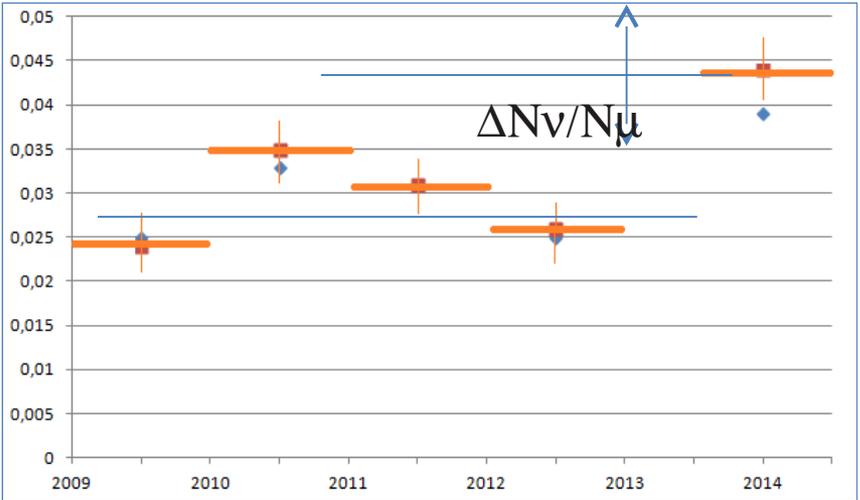
Регистрация гамма-квантов двумя счетчиками.



Отбор нейтронных импульсов в μ событиях

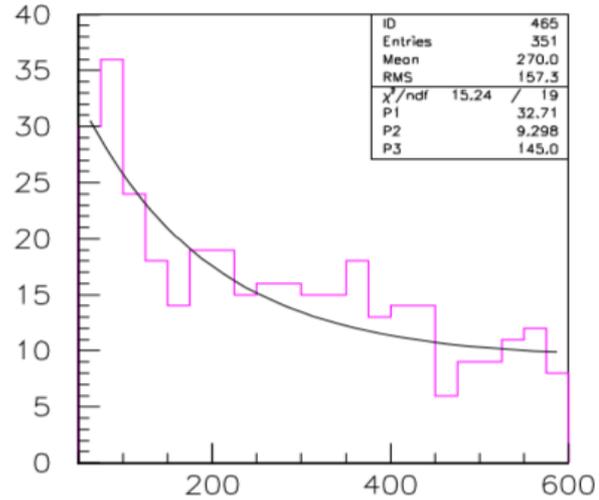
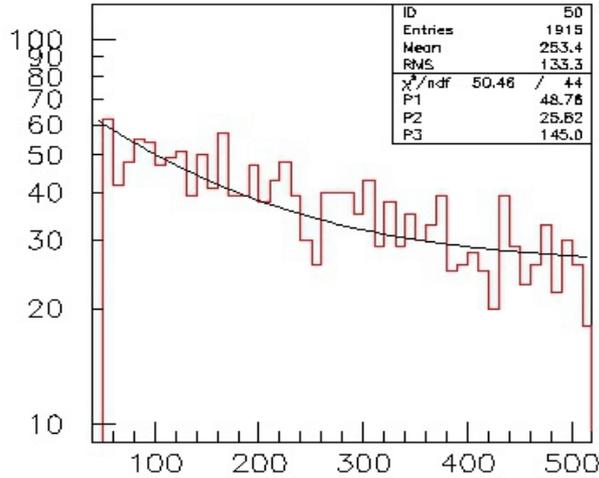
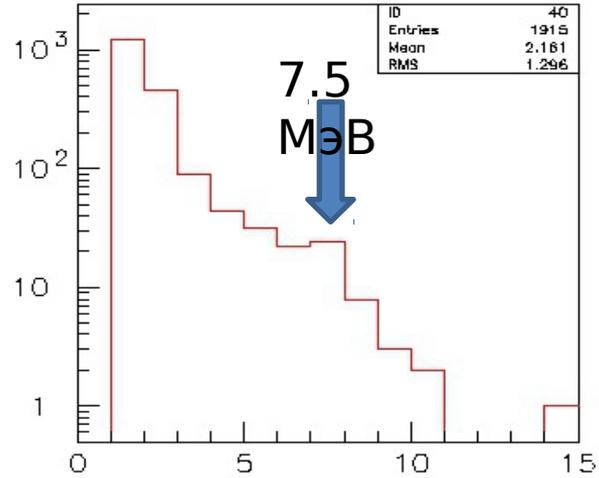


Год	Число зарегистрированных нейтронов	Число мюонов N_m	N_n/N_m
2008	135	5206	0.026
2009	137	5492	0.025
2010	176	5345	0.033
2011	160	5181	0.031
2012	130	4364	0.030
14/5/2013 – 14/5/2014	170	4037	0.042



2008-2012 → 14/5/12

2 МэВ



итическое и временное распределение импульсов от пр - и nFe - захватов

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.

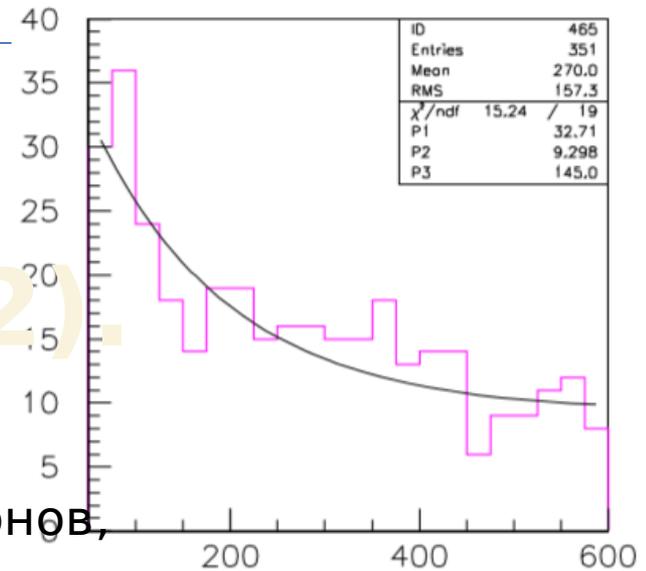
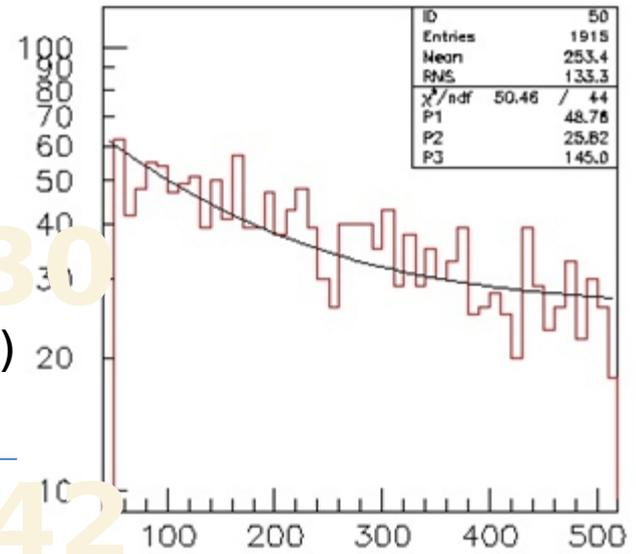
После установки пластины:

$N_n/N_\mu = 0.042$

$$Y_n = (\Delta N_n / N_\mu) / \eta \rho l =$$

$$(6 \pm 4) \times 10^{-4} \text{ n}/\mu / (\text{ г}/\text{см}^2)$$

$\eta = 0.21$ - эффективность регистрации нейтронов,
рожденных в доп. пластине, двумя
счетчиками LVD
 $\rho l = 35.6$ - длина пробега мюона в пластине
в г/см²



моделирование эксперимента с помощью GEANT4



определение эффективности регистрации нейтронов

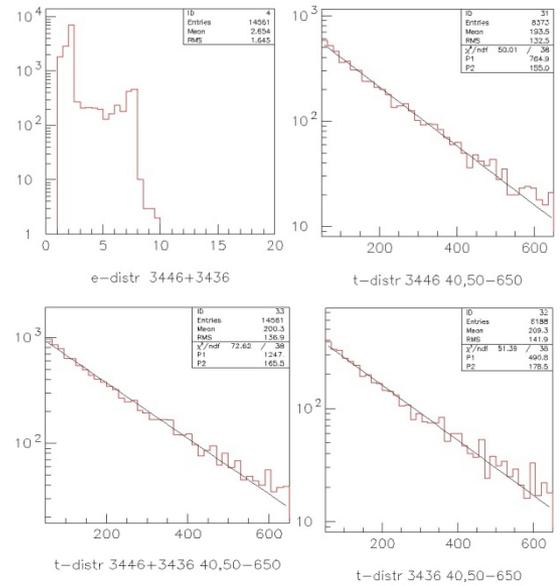
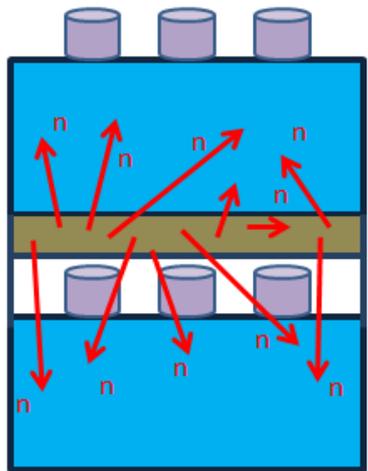
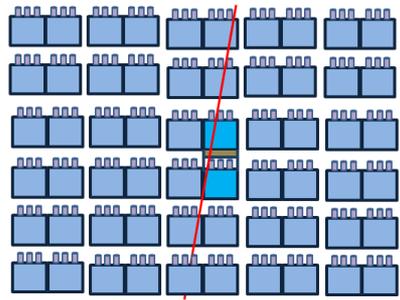
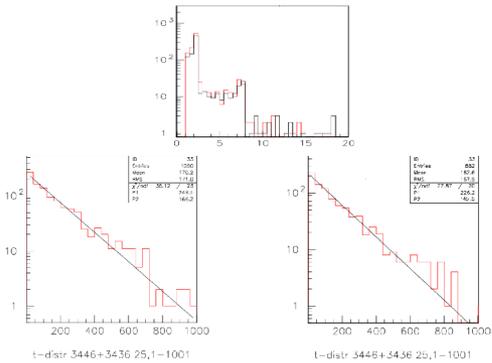
Полное моделирование
прохождения мюона
через установку с
рождением нейтронов и
фиксацией гамма-
квантов от захватов
ядрами вещества

$$\eta = 0.21$$



Моделирование
равномерно
рождающихся
нейтронов (с энергией,
распр. по изв. спектру) в
доп. пластине железа и
фиксацией гамма-
квантов от захватов
ядрами вещества

$$\eta = 0.22$$



Monte-Carlo calculations

	With added Fe	Without added Fe
Number of muons	30000	30000
length (pl) in scintillator	441.5	441.3
length (pl) in iron	361.2	361.2
LVD matter	Neutron production number	
iron-plate	1041	0
Scintillator	3125	3336
Iron	10475	10284
Iron of portatank 344	1136	1090
iron 3446/3436	101/90	79/95
LVD matter	Neutron captured number	
iron-plate	106	0
Scintillator	10049	9508
Iron	4197	3891
Iron of portatank 344	396	307
iron 3446/3436	46/29	30/24
Threshold, MeV	Number of γ-quantas/τ in 3446, 3436*	
0.7	1139/166 μ s	901/150 μ s
1	1031/166 μs	821/145 μs
1.5	881/164 μ s	705/145 μ s
Efficiency for (Eth=1)	0.202	
N_γ/N_n		

Eth	counter	No	t	Nn	Nm	Detect ed efficie ncy
0.7	3446	832 ± 21	154 ± 3	8542	61081	0.140
	3436	532 ± 15	179 ± 4	6348		0.104
	46+36	1353±25	165 ± 2	14883		0.243
1.0	3446	765 ± 20	155 ± 3	7905	61081	0.129
	3436	491 ± 15	178 ± 4	5827		0.095
	46+36	1247± 24	165 ± 2	13717		0.224
1.5	3446	676 ± 19	154 ± 3	6940	61081	0.114
	3436	424 ± 13	179 ± 4	5060		0.083
	46+36	1089± 23	166 ± 2	12051		0.197

Определение выхода нейтронов, генерируемых мюонами в железе

Измеренная величина

$$Y_n = \frac{N_n}{N_\mu} \frac{1}{\langle l \rangle \rho \cdot \eta}$$

Средняя длина трека мюона в доп. пластине
 $\langle l \rangle \rho = 35.6$
г/см²

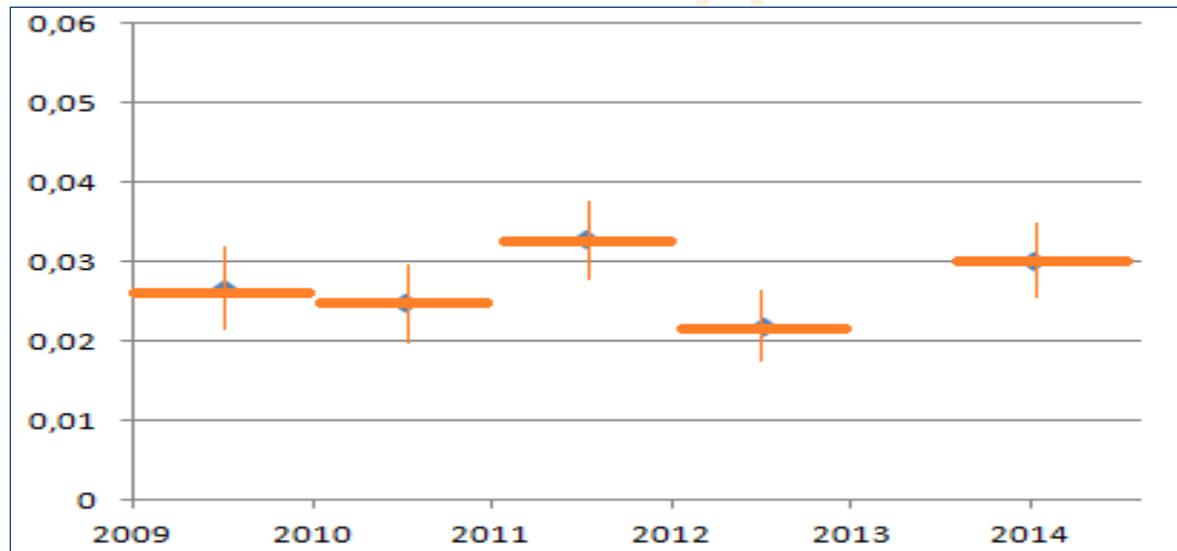
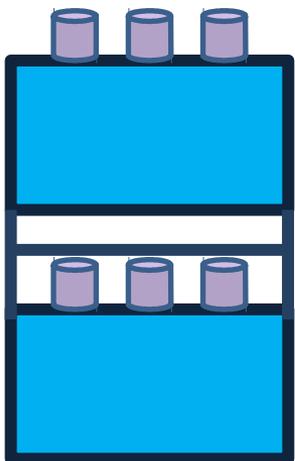
$$= \frac{0.012}{35.6 \cdot 0.21}$$

Эффективность регистрации нейтронов (двумя счетчиками LVD), рожденных в пластине – определено GEANT моделированием

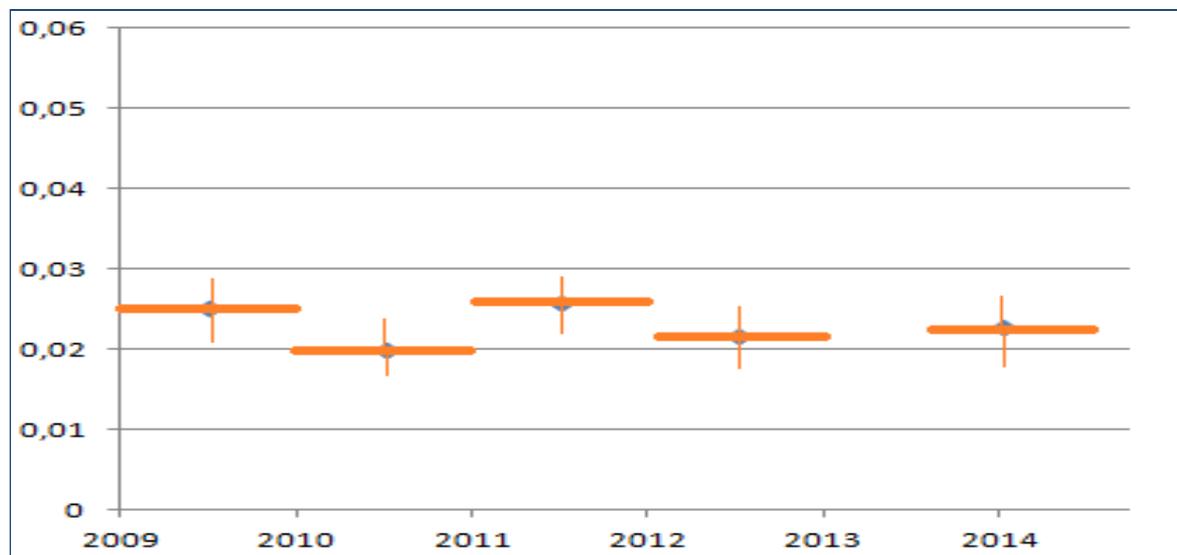
$$Y_n = (16 \pm 4) \times 10^{-4} \text{ н/}\mu\text{/(г}\cdot\text{см}^{-2}\text{)}$$

Проверка методики для пары счетчиков без доп. желез

3343
3333



3344
3334



Следующая стадия эксперимента



Измерение выхода нейтронов для сви

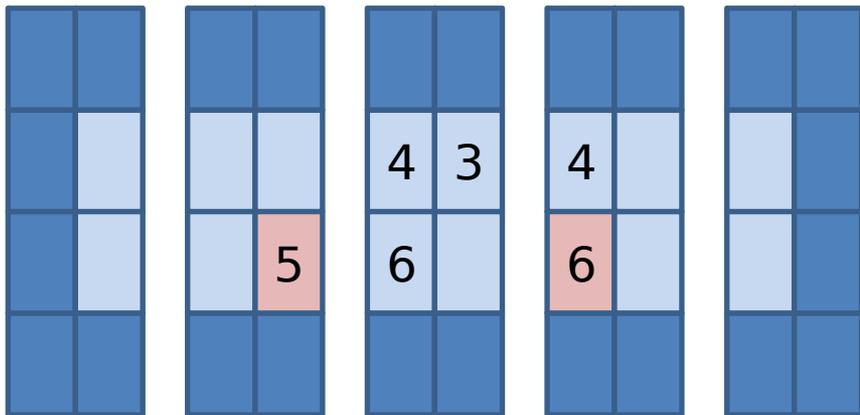


Заключение

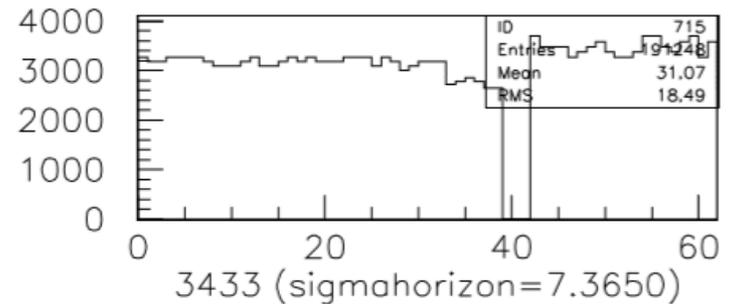
Основные фоновые проблемы в подземных экспериментах связаны не только с мюонами, но и с продуктами их взаимодействий в веществе установок и грунте: электронами, гамма - квантами, пионами, протонами, нейтронами. Проблемы генерации нейтронов мюонами и на сегодня остаются актуальными в связи с интенсивными нейтринными исследованиями и поисками частиц темной материи.

ор вертикальных пар счетчиков

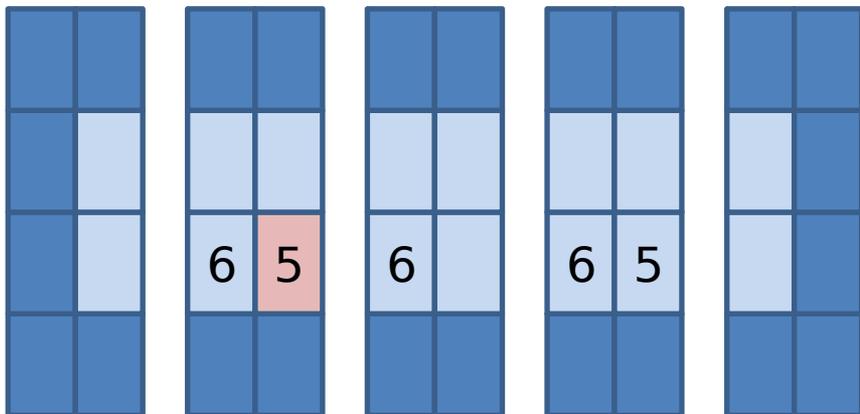
- По положению мюонного пика
- По временному распределению
- По местоположению счетчиков – внутренние счетчики 3 башни, L = 3 и L=5 уровни (для удобства монтажа)



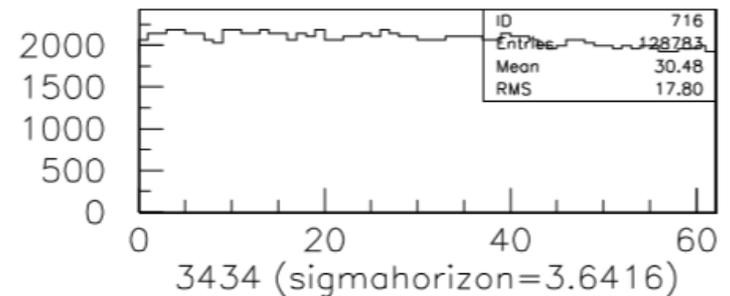
L=3



Плохой счетчик



L=5



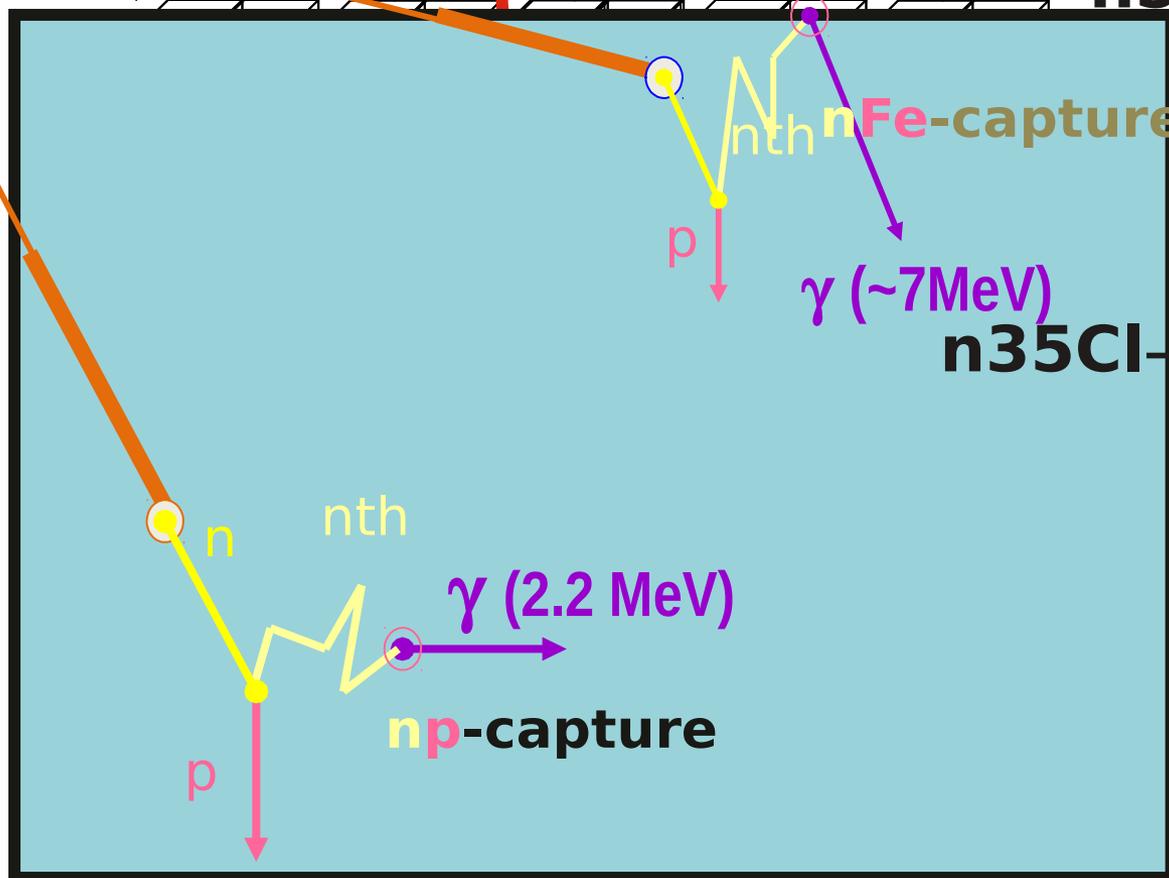
Хороший
счетчик

Установка ЛВД способна регистрировать нейтроны, генерируемые мюонами в веществе детектора. Мюон проходя через установку рождает нейтроны или позитроны (это нейтроны первой генерации) или рождает электромагнитный или адронный ливень в котором рождаются вторичные нейтроны. Эти все нейтроны замедляются в веществе детектора до $E=0.4$ эВ в столкновениях, в основном, с протонами. Затем термализуются до энергии 0.025 эВ и захватываются или протонами сцинтиллятора или ядрами железа или хлора входящими в состав ЛВД с испусканием гамма квантов.

$$\tau_{diff} = 1/V \cdot n \cdot \sigma \cdot C \cdot H^2 \cdot n$$



$$\sigma = 0.334 \text{ барн}$$



Для γ от пр-захватов – 2.2 МэВ, а для γ от nFe-захватов около 7 МэВ. Время жизни термализованного нейтрона в сцинтилляторе 202 мкс. Из-за размеров счетчика и краевых эффектов тау с которым мы регистрируем γ от захватов в сцинтилляторе – 185 мкс, а тау с которым мы регистрируем γ от захватов на железе – 130 мкс.