Baikal-Top: система детекторов на берегу озера Байкал для совместной регистрации ШАЛ с Baikal-GVD.

Д.С. Жадан[1,2], Е.А. Кравченко[1,2,3], Г.И Рубцов[3]

Новосибирский Государственный Университет(1)

Институт Ядерных Физики СО РАН(2)

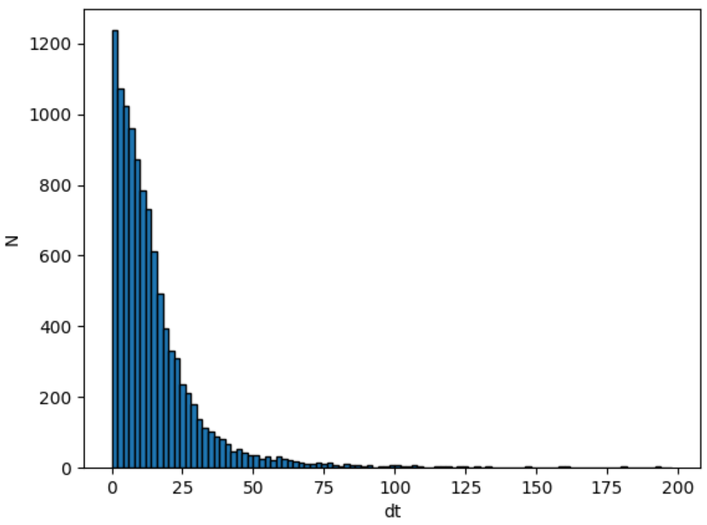
Институт Ядерных Исследований РАН(3)

Мотивация

- Исследование нейтрино высокой энергии (> 1 ТэВ) проводятся на 3-х установках: IceCube, KM3Net, Baikal-GVD.
- Атмосферные нейтрино (рожденные ШАЛ) являются основным, неустранимым фоном при регистрации астрофизических нейтрино.
- Расчет (моделирование) потока атмосферных нейтрино является важной задачей, определяющей достоверность регистрации астрофизических событий.
- Атмосферные нейтрино рождаются в основном в распадах мюонов и пионов (совместно с мюонами). Измерив поток атмосферных мюонов высокой энергии можно верифицировать поток атмосферных нейтрино сопоставимых энергий.
- Одновременное измерение высоко- и низкоэнергетических мюонов в одном и том же ливне важно для проверки высокоэнергетических адронных взаимодействий и для решения 'мюонной загадки'[1].

Особенности регистрации наклонных ШАЛ, ΔΘ → 69°—85°

Разброс времен срабатываний детекторов $dt = T_{max} - T_{min}$



- Время совпадения: dt = 100 нс → eff. = 98%
  dt = 50 нс → eff. = 95%
- Загрузка 1 детектора → ~ 2 кГц

Оценка частоты случайных запусков:

	dt = 100 нс		dt = 50 нс	
	≥ 2 дет.	≥ 3 дет.	≥ 2 дет.	≥ 3 дет.
$S_{\Sigma дет}$ = 100 м², 10 детекторов	18 c^{-1}	0.01 c^{-1}	9 c^{-1}	0.0025 c^{-1}
$S_{\Sigma дет}$ = 300 м², 30 детекторов	170 c^{-1}	0.3 c^{-1}	85 c^{-1}	0.075 c^{-1}
$S_{\Sigma дет}$ = 600 м², 60 детекторов	700 c^{-1}	2.7 c^{-1}	350 c^{-1}	0.7 c^{-1}

Заключение

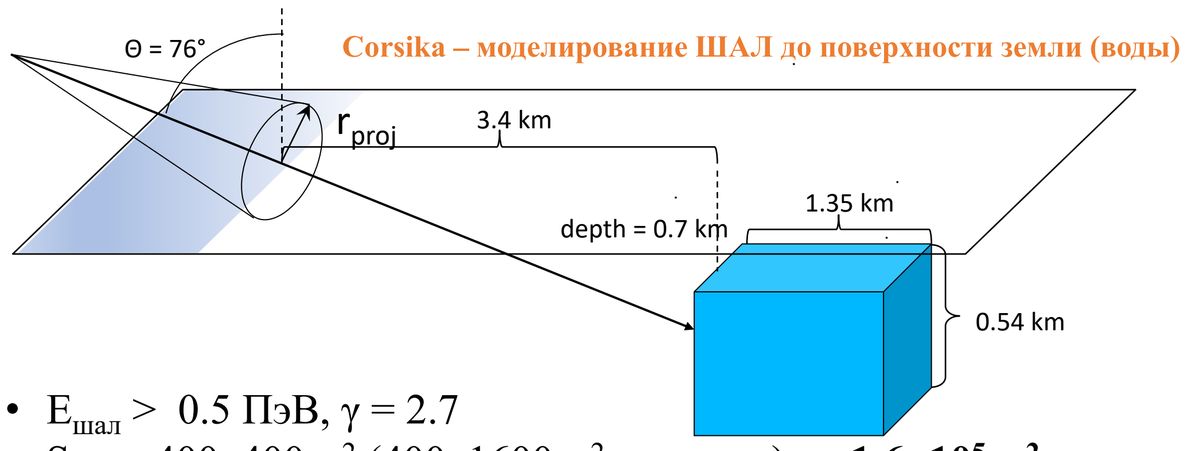
Регистрация наклонных ШАЛ одновременно с Baikal-GVD возможна. Для этого необходима установка с площадью регистрации частиц 100—600 м². Число зарегистрированных совместных событий составит от 10000 до 100000 событий в год.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Наука» по контракту 075-15-2024-54.

Моделирование

Corsika – моделирование ШАЛ до поверхности земли (воды)

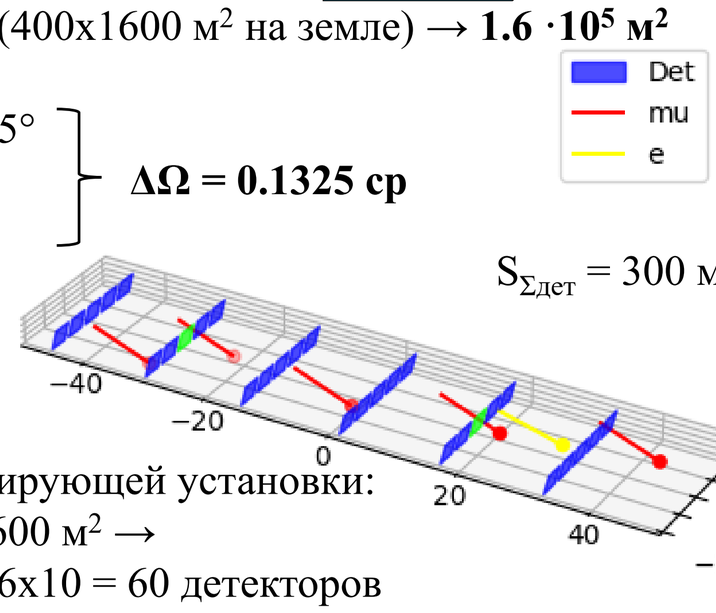


- $E_{шал}$ > 0.5 ПэВ, γ = 2.7
- $S_{рег}$ = 400x400 м² (400x1600 м² на земле) → **1.6 ·10⁵ м²**

Диапазон углов:

- Θ_1—Θ_2 → 69°—85°
- Δφ → 28°

} **ΔΩ = 0.1325 ср**



$S_{\Sigma дет}$ = 300 м²

3 варианта регистрирующей установки:

- $S_{\Sigma дет}$ = 100, 300, 600 м² →

2x5 = 10, 5x6 = 30, 6x10 = 60 детекторов

- 1 детектор $S_{дет}$ = 10 м² → 3.16x3.16 м

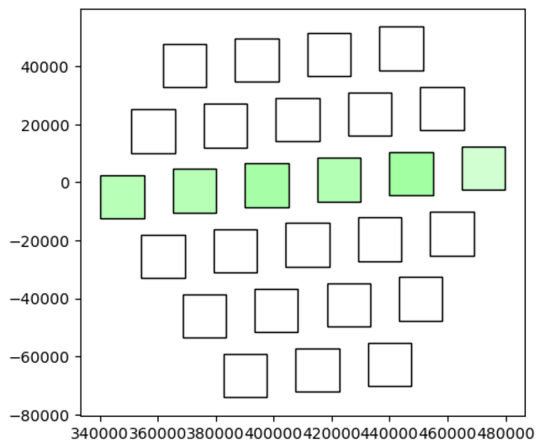
Промоделировано ШАЛ →
$N_{соб}$ = **100000**

Принцип регистрации ШАЛ:

- Плотный детектирующий кластер
- Ось и направление ШАЛ восстанавливается по мюону(нейтрино) в ГВД

PROPOSAL – моделирование прохождения мюонов в воде

- Baikal-GVD – 27 кластеров 150x150 м
- E_{μ}(на входе) > 1 ТэВ
- Порог регистрации – ΔE/кластер = 0.25, 0.5, 1.0 ТэВ



Совместная регистрация ШАЛ + μ в Baikal-GVD

J, поток ПКЛ при E>0.5 ПэВ = 10^{-5} (шт/(м2 сек ср))[2] →
N – число ПКЧ в год через 1.6 ·10⁵ м² и ΔΩ = 0.1325 ср →
6.7·10⁶

Результаты моделирования:

Порог регистрации μ в кластере	0.25 ТэВ	0.5 ТэВ	1.0 ТэВ
$S_{\Sigma дет}$ = 100 м²			
Эффективность рег. при $N_{дет}$ ≥ 2, %/ $N_{рег}$ в год	0.66/**44000**	0.43/**29000**	0.27/**18000**
Эффективность рег. при $N_{дет}$ ≥ 3, %/ $N_{рег}$ в год	0.27/**18000**	0.20/**14000**	0.15/**10000**
$S_{\Sigma дет}$ = 300 м²			
Эффективность рег. при $N_{дет}$ ≥ 2, %/ $N_{рег}$ в год	2.12/**142000**	1.30/**87000**	0.67/**45000**
Эффективность рег. при $N_{дет}$ ≥ 3, %/ $N_{рег}$ в год	1.06/**71000**	0.72/**48000**	0.42/**28000**
$S_{\Sigma дет}$ = 600 м²			
Эффективность рег. при $N_{дет}$ ≥ 2, %/ $N_{рег}$ в год	4.06/**272000**	2.25/**151000**	1.03/**69000**
Эффективность рег. при $N_{дет}$ ≥ 3, %/ $N_{рег}$ в год	2.40/**161000**	1.44/**97000**	0.74/**50000**

Литература

1. L. Pyras, D. Soldin and F. Riehn, PoS ICRC2025 (2025), 368 [arXiv:2509.17150 [Astro-ph.HE]].
2. 2. Peter K.F. Grieder *Extensive Air Showers*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010