

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»



#### Черенковское излучение высокоэнергичных каскадных ливней, рожденных мюонами космических лучей в воде

По материалам кандидатской диссертации

Диссертант: Хомяков В.А. Руководитель: д. ф.-м. н. Кокоулин Р.П.

Семинар Отдела экспериментальной физики ИЯИ РАН

Троицк, 23 марта 2017 г.

#### Введение. Актуальность работы

• черенковские водные детекторы (ЧВД) активно используются в исследованиях мюонов сверхвысоких (выше сотен ГэВ) энергий;

• энергии частиц оцениваются по рождаемым ими в ЧВД каскадным ливням;

 изучение распределения черенковского света от каскадных ливней в воде – актуальная проблема. Ее решение позволит проверить модели развития ливней, улучшить восстановление их параметров;

 на больших черенковских установках (ANTARES, IceCube, Байкал) получить детализированную пространственную картину ливня в черенковском свете практически невозможно;

 решение этой задачи возможно на ЧВД с плотной решеткой измерительных модулей.

### Цель работы

Измерить пространственное распределение черенковского излучения высокоэнергичных каскадных ливней в воде;

Разработать на его основе методы выделения каскадных ливней высоких энергий, рожденных мюонами в водном детекторе, и восстановления их параметров.

### Структура доклада

- 1. Экспериментальная установка и данные;
- 2. Исследование характеристик установки:
  - свойство сферичности отклика измерительного модуля;
  - отклик модуля на одиночный мюон;
- 3. Измерение пространственного распределения черенковского излучения от каскадных ливней в воде;
- 4. Проверка моделей углового распределения ливневых частиц;
- 5. Разработка критериев отбора высокоэнергичных каскадных ливней;
- 6. Измерение дифференциального энергетического спектра ливней.

### Черенковский водный детектор НЕВОД



- Объем 2000 м<sup>3</sup>.
- Пространственная решетка:
   91 квазисферический модуль (КСМ) в 25 гирляндах (шаг 2 х 2 х 2.5 м<sup>3</sup>).
- Каждый КСМ имеет 6 ФЭУ-200
- Динамический диапазон каждого ФЭУ: 1 – 10<sup>5</sup> ф.э.



Устройство и параметры измерительного модуля, а также малый шаг пространственной решетки позволяют детектору работать как в режиме годоскопа, так и в режиме калориметра.

### Экспериментальный комплекс и серия измерений



Данные - 11-я измерительная серия: Период - с 16 июля 2013 по 8 апреля 2015 года 11 897 часов живого времени.

### Проблема регистрации черенковского излучения

ФЭУ с плоским фотокатодом





$$A_1(r,\alpha) = \frac{C \cdot \cos \alpha}{r} \cdot \exp(-\frac{r}{l}),$$

$$A_1(r) = \frac{C}{r} \cdot \exp(-\frac{r}{l})$$

где *r* – расстояние до трека излучающей частицы;

- α угол падения черенковского света на фотокатод;
- *l* эффективный радиус ослабления черенковского света в воде.

Конфигурация из нескольких ФЭУ с плоским фотокатодом может иметь свойство сферического ФЭУ, т.е. обладать изотропным откликом. Оптический модуль с такой конфигурацией называется квазисферическим.

### Принцип построения квазисферических модулей

Расположение ФЭУ, обеспечивающее модулю свойство сферичности, определяется на основе геометрии правильных многогранников:



#### Исследование сферичности отклика модуля

- исследуется не отдельно взятый модуль, а средние характеристики отклика КСМ решетки;
- данные события с одиночным мюоном, трек которого определен по данным координатно-трекового детектора ДЕКОР;
- количественные параметры отклика КСМ приводятся к сферическому треугольнику, составляющему 1/48 часть сферы:



#### Анализируемые характеристики

Рассматривался отклик КСМ для разных диапазонов расстояний до трека в двух вариантах:



Расстояние R, углы θ, φ падения света на КСМ берутся относительно центра модуля

# Зависимость отклика модуля от направления прихода черенковского излучения



#### Итог:

- 1. Предпочтителен вариант отклика В2
- 2. Среднеквадратичное отклонение < 8%

#### Отклик ФЭУ в событиях с одиночным мюоном



#### Отклик на одиночную заряженную частицу



- 1. Радиус ослабления около 10 м
- 2. Аппроксимация для отклика КСМ (с исключением вклада отраженного света):

3. Отклик КСМ на одиночную заряженную частицу (каскадный электрон):

$$B_{e}(R) = B_{\mu}(R) \cdot \frac{\beta}{\left\langle dE_{\mu} / dx \right\rangle \cdot x_{0}} \approx \frac{B_{\mu}(R)}{1.39}$$

### События с одиночным мюоном «OneTrack»



«OneTrack»: треки, восстановленные каждым из супермодулей ДЕКОР должны совпадать в пределах конуса 5°

Для мюона с энергией 100 ГэВ расчет дает среднеквадратичное значение прогиба трека вследствие многократного рассеяния около 0.6 см (для представленной геометрии Short-Short) <u>Ранее были разработаны</u> методы работы с ливнями в таких событиях (С.С. Хохлов и др.)

Два неизвестных параметра глубина рождения ливня и энергия

# События с большим энерговыделением в решетке ЧВД



#### Ливни в событиях «OneTrack»



## Пространственное распределение черенковского света от ливней



Нормировка отклика на энергию ливня:

$$B = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \sqrt{\sum A_i^2}$$

где *ε*<sub>0</sub> – энергия 200 ГэВ (близкая к средней энергии ливней в выборке);

*є* – восстановленная энергия ливня
 в событии;

*A*<sub>i</sub> – амплитуда i-го ФЭУ в модуле (в фотоэлектронах, ф.э.).



#### Исключение влияния ослабления света в воде

Поскольку параметры ослабления света в воде одинаковы для каскада и для одиночного мюона, рассматривалось отношение интенсивности света для каскадов (*B*) к интенсивности, измеренной для одиночных мюонов (*B*<sub>u</sub>).



#### Влияние рассеяния каскадных частиц



#### Модели рассеяния ливневых частиц

1. Аналитическое решение каскадных уравнений (*I.P. Ivanenko et al. / Proc. of the 1978 DUMAND Summer Workshop*).

2. Аппроксимация (*M.G. Aarsten et al. / Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. A711, 2013*) результатов моделирования в GEANT 3 (*C.H. Wiebusch / Ph.D. Thesis, Physikalische Institute, RWTH Aachen, 1995*).





#### Модельные расчеты распределения света от ливней

#### Заложено в расчеты:

- количество каскадных частиц в зависимости от глубины развития ливня - аппроксимация Грейзена для одномерного ливня в приближении Б;
- угловое распределение каскадных частиц (не зависящее от глубины развития ливня) – модель группы И. Иваненко и модель К. Вибуша;
- отклик модуля на одиночный мюон от расстояния до трека частицы – зависимость, полученная на основе экспериментальных данных;
- отражение света от поверхности воды внутрь бассейна ЧВД.

#### Число ливневых частиц от глубины:

$$N^{\mathrm{annp}}(y_0, t_0, t) = \left(\frac{0.32}{\sqrt{y_0}}\right) \cdot \exp\left((t - t_0) \cdot (1 - 1.5 \ln s)\right),$$
если  $t \ge t_0$ 



#### Отклик модуля от участка ливня dl:

$$dB(t, R, \theta_{\gamma}) = N^{\text{annp}}(y_0, t_0, t) \cdot dI \cdot f(\theta_{\gamma}) \cdot B_1(L \cdot \sin \theta_{\gamma}) \cdot \frac{2\pi \cdot \sin^2 \theta_{\gamma}}{L}$$

## Сравнение эксперимента с результатами модельных расчетов



В области максимума ливня обе модели удовлетворительно согласуются с экспериментом.

На восходящем участке профиля (распространение света в обратную полусферу по отношению к направлению развития ливня) предпочтительнее модель К. Вибуша.



## Критерии отбора событий с ливнями. Отбор высокоэнергичных ливней

Предварительная калориметрическая оценка энергии (на основе обучающей выборки).



#### Критерии отбора событий с ливнями. Компактность зоны наибольшей интенсивности света

Компактность расположения кластера КСМ, имеющих наибольшие отклики (среднеквадратичный радиус кластера < 2.35 м).





#### Критерии отбора событий с ливнями. Развитие ливня вблизи чувствительного объема ЧВД

#### 50 тыс. ливней для каждой энергии

٤٥	31.6	100	316	1	3.16	10
	ГэВ	ГэВ	ГэВ	ТэВ	ТэВ	ТэВ
Событий «≥60с»	6657	13306	21993	29949	34217	36243

Моделированные ливни





#### Критерии отбора событий с ливнями: Развитие ливня вблизи чувствительного объема ЧВД



$$-\,4.5\;$$
м $<$   $d_{_{e}}<$  (  $y_{_{0}}^{_{\scriptscriptstyle{\mathrm{BOCCT}}}}\cdot0.33-1)$  м

Отбор ливней, рожденных преимущественно мюонами:

 $heta_{_{
m T}}^{_{
m BOCCT}}>55^\circ$ 

## Точность восстановления параметров ливней (на основе обучающей выборки)



Величины ошибок восстанавливаемых параметров ливней составили:

- около 6° для направления оси ливня;
- около 13% для оценки энергии при ε > 100 ГэВ

## Отбор ливней и восстановление их параметров (экспериментальные данные)



### Дифференциальный энергетический спектр каскадов с энергиями от 100 ГэВ

#### около 150 тыс. событий с восстановленной энергией выше 100 ГэВ



Оценка значений показателя у интегрального спектра генерации пионов: 1.584 – 1.612 (для 95% доверительного интервала).

#### Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

- Измерен отклик ЧВК НЕВОД на одиночный мюон. Получена зависимость отклика квазисферического модуля от расстояния до трека мюона.
- Предложен метод и измерена сферичности отклика измерительных модулей ЧВК НЕВОД. Среднеквадратичное отклонение отклика КСМ, отражающее свойство сферичности модуля, составило около 8% для диапазона 0.5 – 1.0 м и в пределах 5 – 7% для больших расстояний.
- Разработан метод и впервые экспериментально получено пространственное распределение черенковского излучения от рожденных мюонами в воде каскадных ливней с энергиями 100-500 ГэВ.
- Разработан метод и на его основе проверены модели углового распределения ливневых частиц на основе измеренного пространственного распределения черенковского света от ливней. Анализ показал удовлетворительное согласие модели группы И.П. Иваненко и результатов К. Вибуша с экспериментом.

### Заключение (продолжение)

- Разработан и реализован новый метод восстановления параметров высокоэнергичных ливней, основанный на зависимости интенсивности черенковского излучения от глубины развития ливня на разных расстояниях от его оси. Средняя угловая точность восстановления оси ливня составляет около 6°, а энергетическая ~ 13% для энергии каскадов выше 100 ГэВ.
- Разработаны критерии отбора высокоэнергичных каскадных ливней среди событий с большим энерговыделением в решетке ЧВК. Критерии опробованы на событиях обучающей выборки и моделированных данных.
- Измерен энергетический спектр каскадных ливней в интервале зенитных углов более 55° в диапазоне энергий 0.1 20 ТэВ по данным измерительной серии около 12 тыс. часов «живого» времени. Получена оценка показателя интегрального спектра генерации пионов: γ = 1.598 ± 0.014 (95% интервал).
- Новые методы отбора ливней и восстановления их параметров позволили повысить на два порядка статистику событий по сравнению с использовавшимся ранее отбором по данным координатного детектора и продвинуться на порядок в область более высоких энергий.
- Полученные результаты могут быть применены на других черенковских установках сопоставимого класса, а также могут быть взяты за основу для совершенствования подходов к работе с каскадными ливнями в крупномасштабных установках.

#### Статьи, содержащие основные результаты работы

- V. A. Khomyakov, A. G. Bogdanov, V. V. Kindin et al. Reconstructing the parameters of highenergy cascade showers generated by muons in water // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2015. V. 79. No. 3. P. 371–373 (BAK, Scopus)
- V. A. Khomyakov, A. G. Bogdanov, V. V. Kindin et al. Restoration of parameters of highenergy cascades in Cherenkov water calorimeter with a dense array of quasispherical modules // Physics of Atomic Nuclei. 2015. V. 78, No. 13, P. 1511–1516 (WoS, Scopus)
- V. A. Khomyakov, V. V. Kindin, V. D. Burtsev et al. Study of characteristics of the quasispherical measurement modules of the Cherenkov water calorimeter NEVOD // Physics Procedia. 2015. V. 74, P. 442–448 (WoS, Scopus)
- V. A. Khomyakov, A. G. Bogdanov, V. V. Kindin et al. Spatial distribution of Cherenkov light from cascade showers in water // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 675. 032036 (WoS, Scopus)
- R. P. Kokoulin, M. B. Amelchakov, N. S. Barbashina et al. Cascade showers initiated by muons in the Cherenkov water detector NEVOD // Proceedings of Science. PoS(ICRC2015)360 (Scopus).

### Спасибо за внимание!