



О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕТЕКТОРА WSDA ЭКСПЕРИМЕНТА LHAASO В КАЧЕСТВЕ ПАРАМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА АТМОСФЕРНЫХ МЮОНОВ

СТЕНЬКИН Ю.В., БУТКЕВИЧ А.В., КАРПИКОВ И.С., КУЛЕШОВ Д.А., КУРИНОВ К.О., МА Х.Н.,
ЩЕГОЛЕВ О.Б.

ИЯИ РАН & IHEP CAS

Мотивация и современное состояние проблемы

2

38 ВЖА 2024

Измерение спектра атмосферных мюонов имеет долгую историю.

Для этого поначалу использовались «кривые поглощения» в воде или в грунте, затем магнитные спектрометры (MUTRON), которые, однако, имеют верхний предел измерений, когда отклонения мюонов в магнитном поле становятся меньше пространственного разрешения.

Разработанная в 80-х годах теория ПАРМЕТРА (Кокоулин & Петрухин, 1988), не имеет ограничений сверху на энергию мюона и позволяет продвинуться в область существенно более высоких энергий.

Позже предпринимались попытки использовать в качестве ПАРМЕТРА некоторые готовые установки (БАРС, ПСТ), однако их параметры были далеки от оптимального ПАРМЕТРА.

Мы предлагаем использовать для этой цели работающий детектор **WCDA** эксперимента **LHAASO**, имеющего параметры **близкие к оптимальным**.

Старые

Новые (HAWC)

3

arXiv:1710.04290v1 [astro-ph.HE] 11 Oct 2017

arXiv:2107.14475v1 [physics.ins-det] 30 Jul 2021

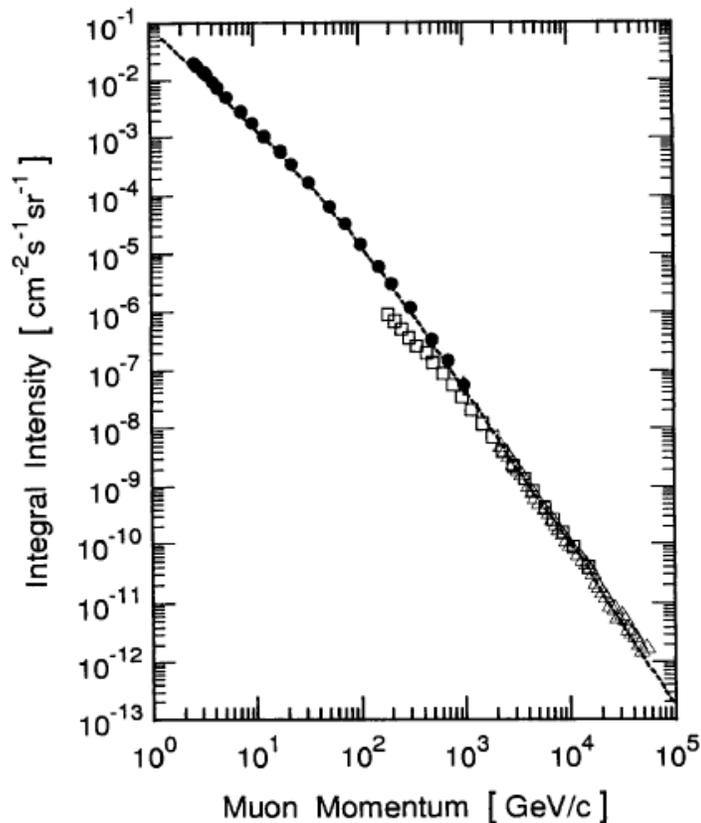


Figure 3.38: Combined vertical integral muon momentum spectrum at sea level in the range $1 \leq p \leq 10^5$ GeV/c. The data by Berger et al. are derived from the Fréjus underground experiment (for details see Rhode, 1993), those from Matsuno et al. (1984) from the MUTRON horizontal data. The spectrum of Gaisser (1990) is the result of a calculation.

● Allkofer et al. (1971b) | □ Matsuno et al. (1984)
 △ Berger et al. (1989) | --- Gaisser (1990), Theory

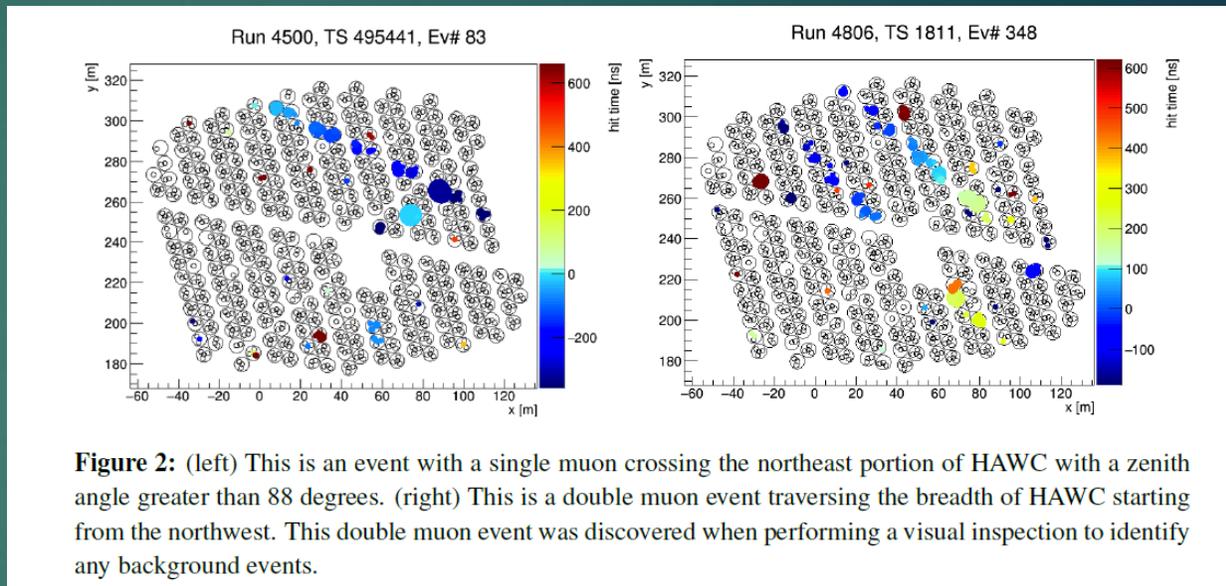


Figure 2: (left) This is an event with a single muon crossing the northeast portion of HAWC with a zenith angle greater than 88 degrees. (right) This is a double muon event traversing the breadth of HAWC starting from the northwest. This double muon event was discovered when performing a visual inspection to identify any background events.

Model	Tracks identified	False positives
A	103	3
B	125	5
Object detection	92	0
Filtering of candidate tracks	9	0

Table 2: Comparison of tracks identified by all models for the same set of real data.

The HAWC detector is composed of 300 water tanks, each 7.3 m in diameter and 4.5 m tall

Результаты измерений пока не опубликованы



A LARGE HIGH ALTITUDE AIR SHOWER OBSERVATORY (LHAASO)

Расположение: 4410 м над уровнем моря, восток Тибетского плато, Даоченг, Сычуань, КНР



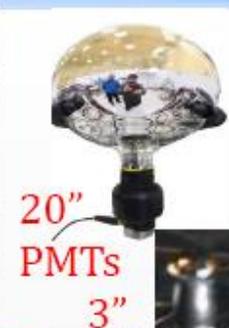
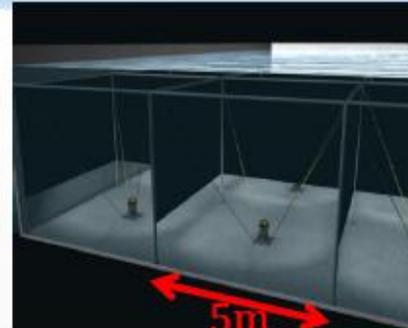
Решаемые задачи

5

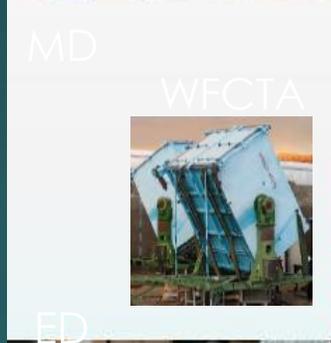
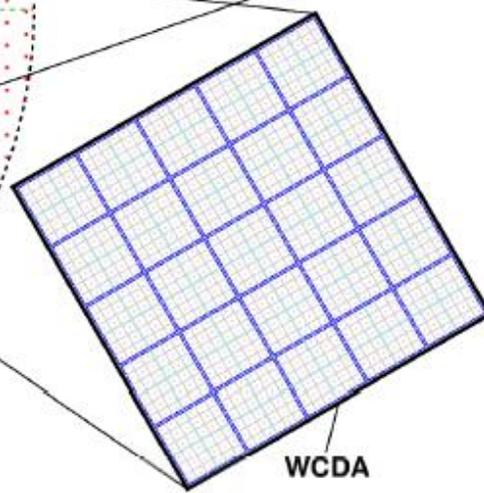
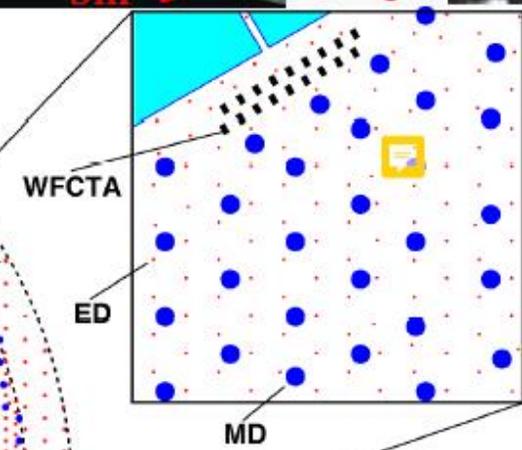
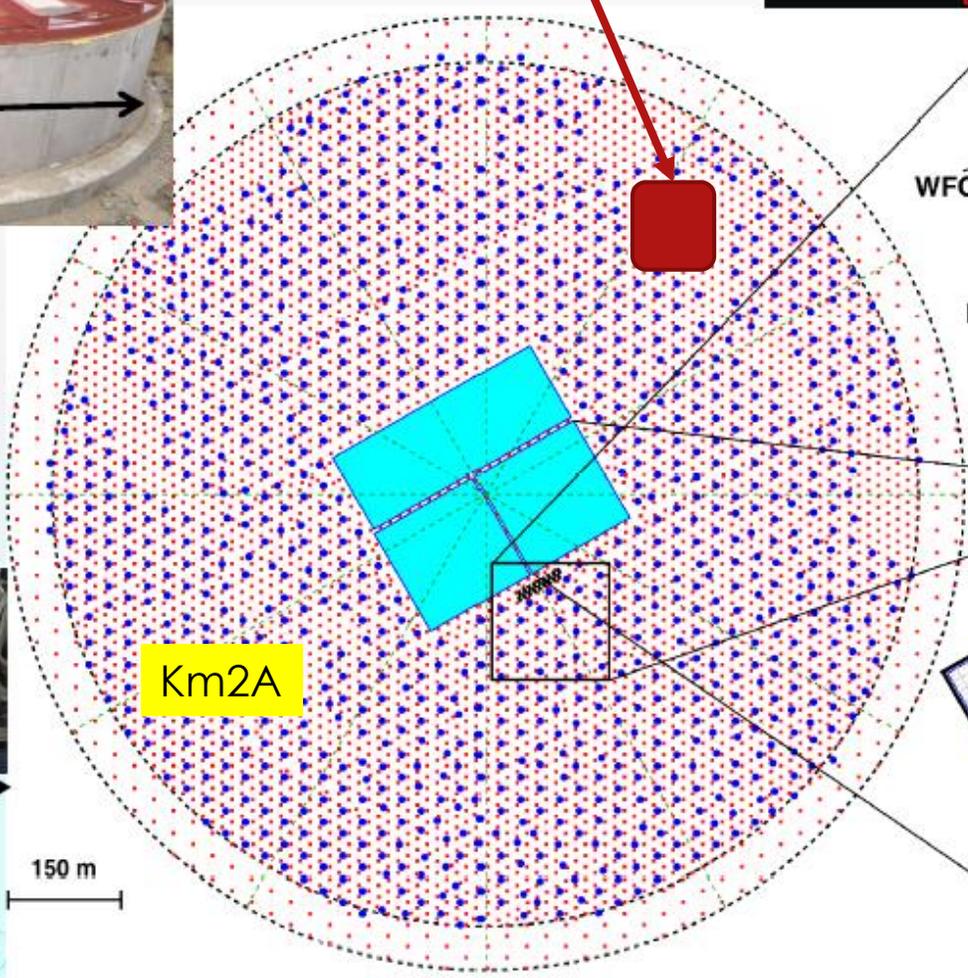
- What are the origins of cosmic rays?
 - Are the accelerators of hadrons different from electrons?
 - How high in energy can galactic sources produce particles?
 - What are the sources of the UHECRs?
- How do astrophysical sources accelerate particles?
 - What is the role of the extreme gravitational and magnetic fields surrounding black holes and neutron stars?
 - How are particles accelerated within relativistic jets?
 - Is there a limit of the nature accelerators? What are they?
 - How do GRBs release so much energy in such a short time?
- How do CRs propagate inside/outside our galaxy?
 - What are origins of both “knees”?
- Fundamental physics & cosmology
 - What is the EBL and how did it evolve?
 - What is the dark matter?
 - What are the tightest constraints on Lorentz invariance?
 - Are there primordial black holes?
- Geophysical researches

Нет МЮОННЫХ и НЕЙТРИННЫХ задач

Detector Layout in LHAASO



ENDA-400



150 m



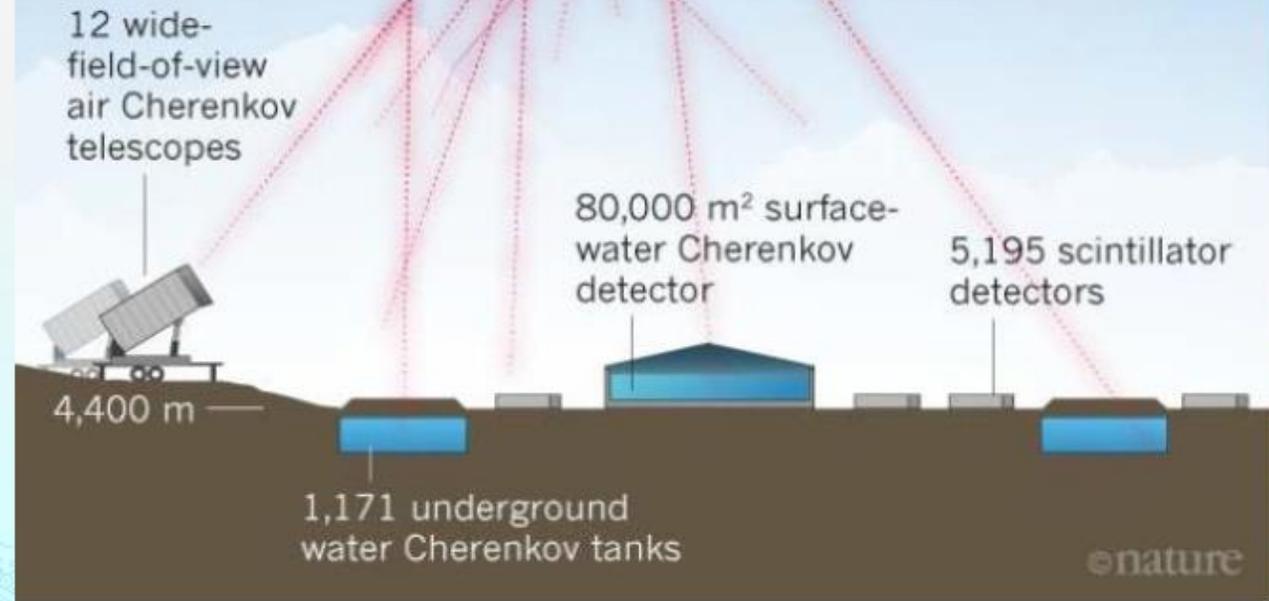
LHAASO

in the eyes of
reporters from
Nature

CATCHING RAYS

China's new observatory will intercept ultra-high-energy γ -ray particles and cosmic rays.

~25,000 m

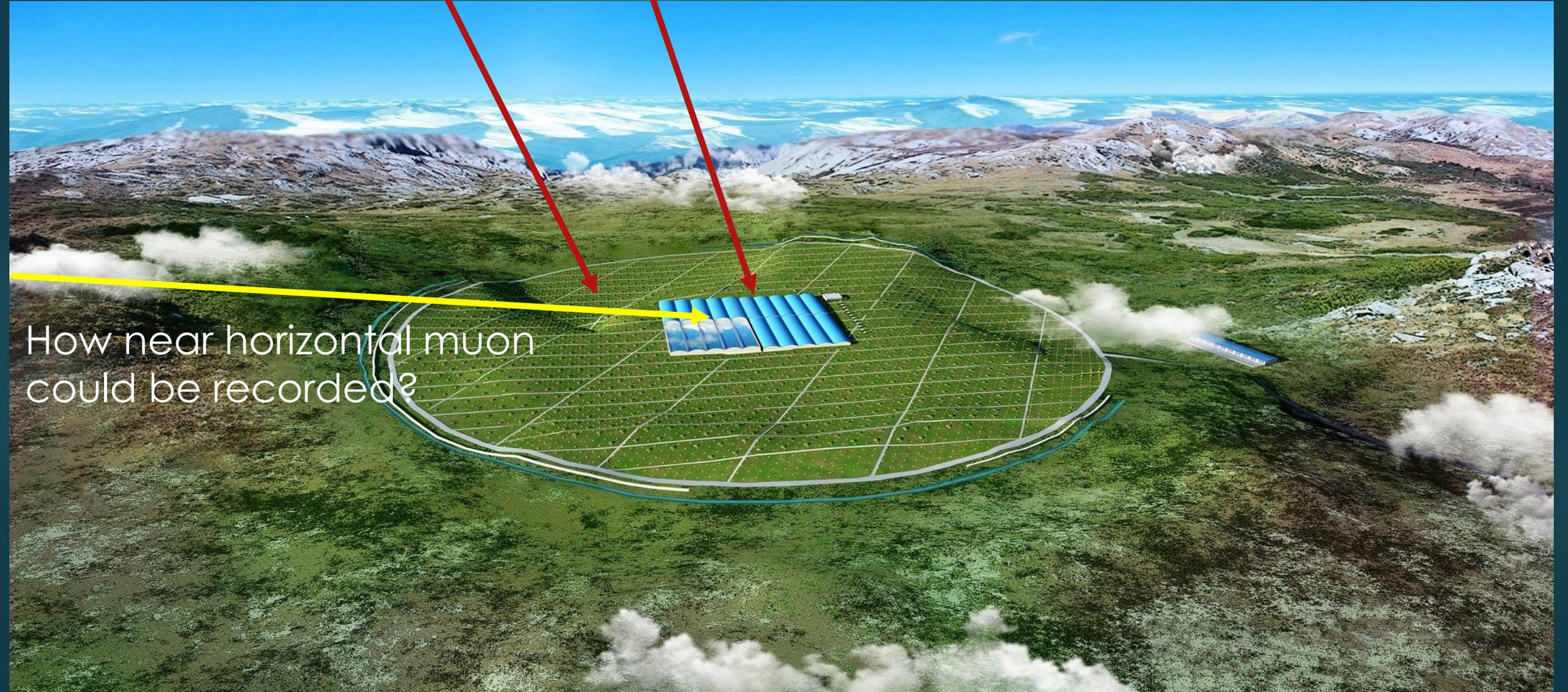


LHAASO

Km2A

WCDA

8



How near horizontal muon could be recorded?

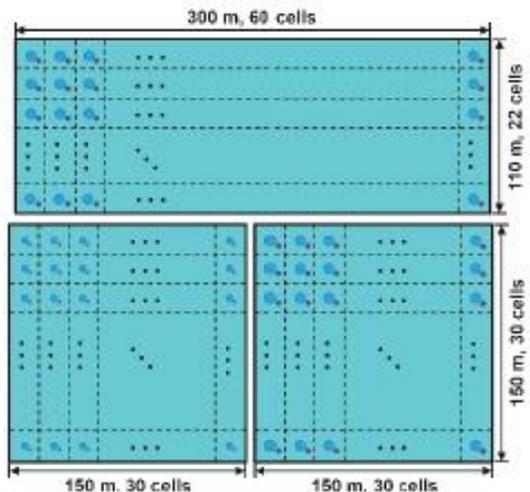


Fig. 27. (color online) Layout of WCDA.

ray detection sensitivity, enlarging the sensitive photocathode of the PMT is considered as one effective way to catch the faint signals. LHAASO's upgrading design is to replace the 8-inch PMTs by 20-inch PMTs in the other two pools with total area of 55,500 m² (Fig. 30 and Fig. 31). The customized design of the 20-inch PMTs using multi-channel-plate (MCP) instead of the traditional dyn-

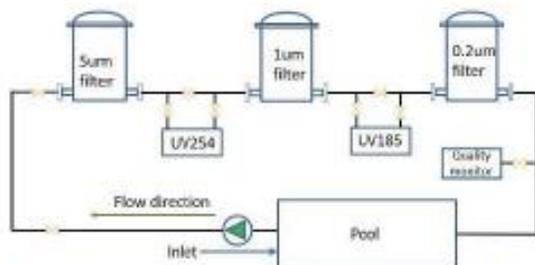


Fig. 29. (color online) Schematics of water recirculation system of WCDA.

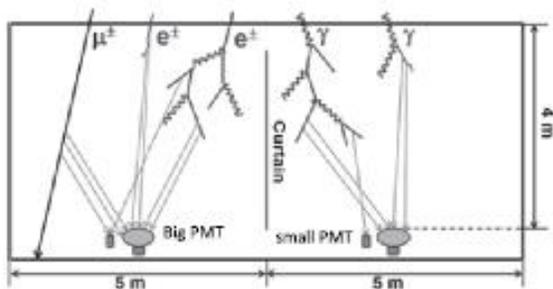


Fig. 28. Sketch map of WCD.

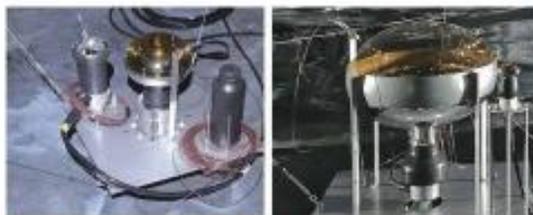


Fig. 30. (color online) Photos of WCDs installed in the first pool (left) and the second pool (right).

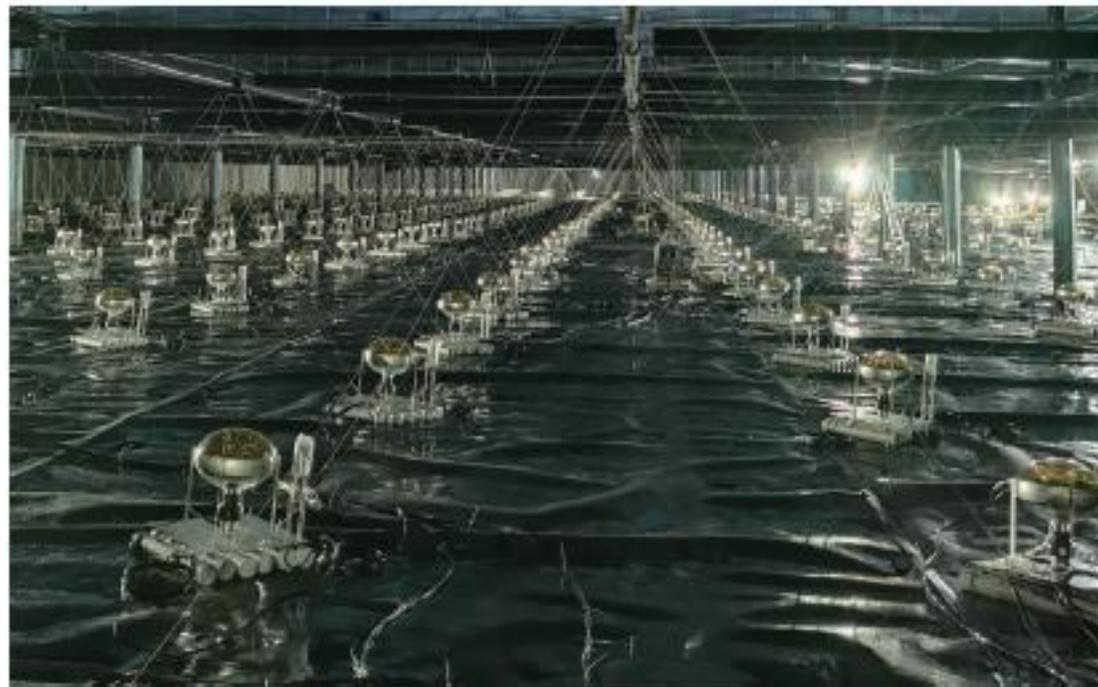
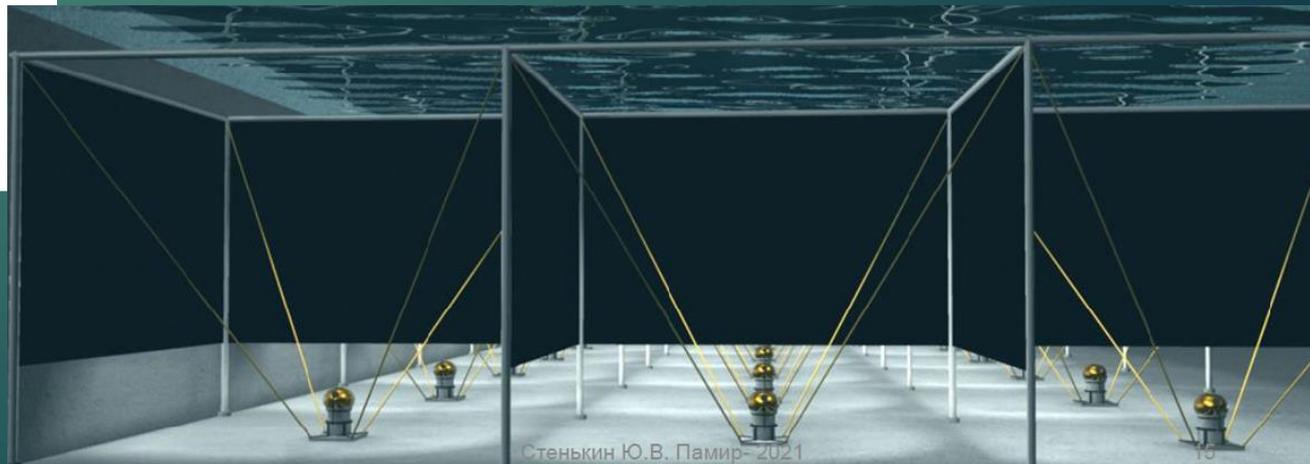


Fig. 31. (color online) Photo inside one hall of WCDA without water and curtains.

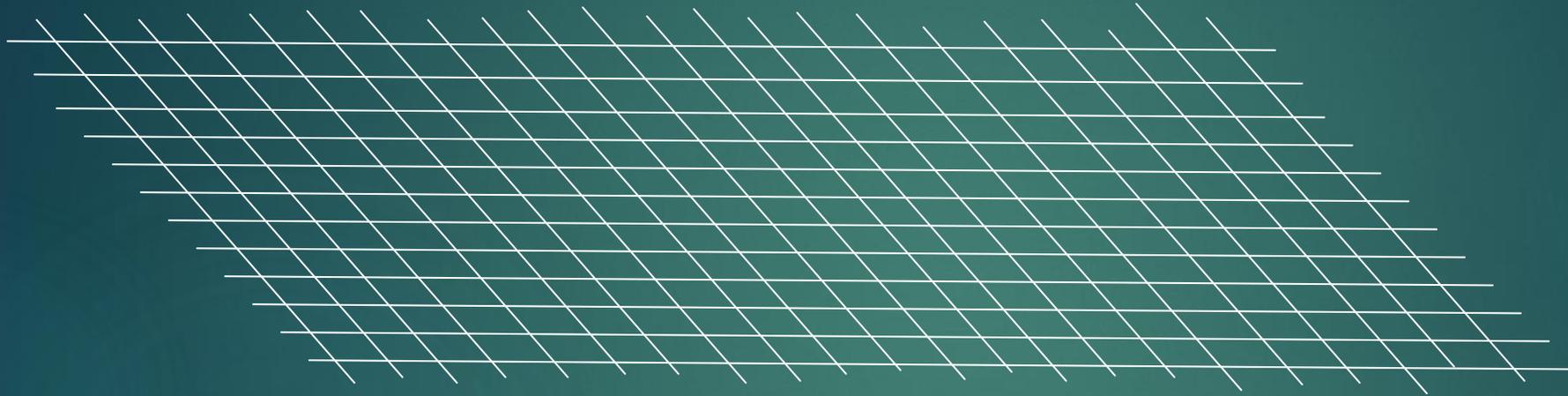




WCDA is a good track instrument for HE interactions measurements.

For example, it could be used as a pair-meter

11



Due to 3120 5m x 5 m x 4.5m independent sells  WCDA resolution is ~5 m or 10 times better than, for example, in IceCube.

Flux Determination through Ultra High Energy Muons by Using Pair-Meter Technique

Sharda Pandey* and Satendra K Chauhan

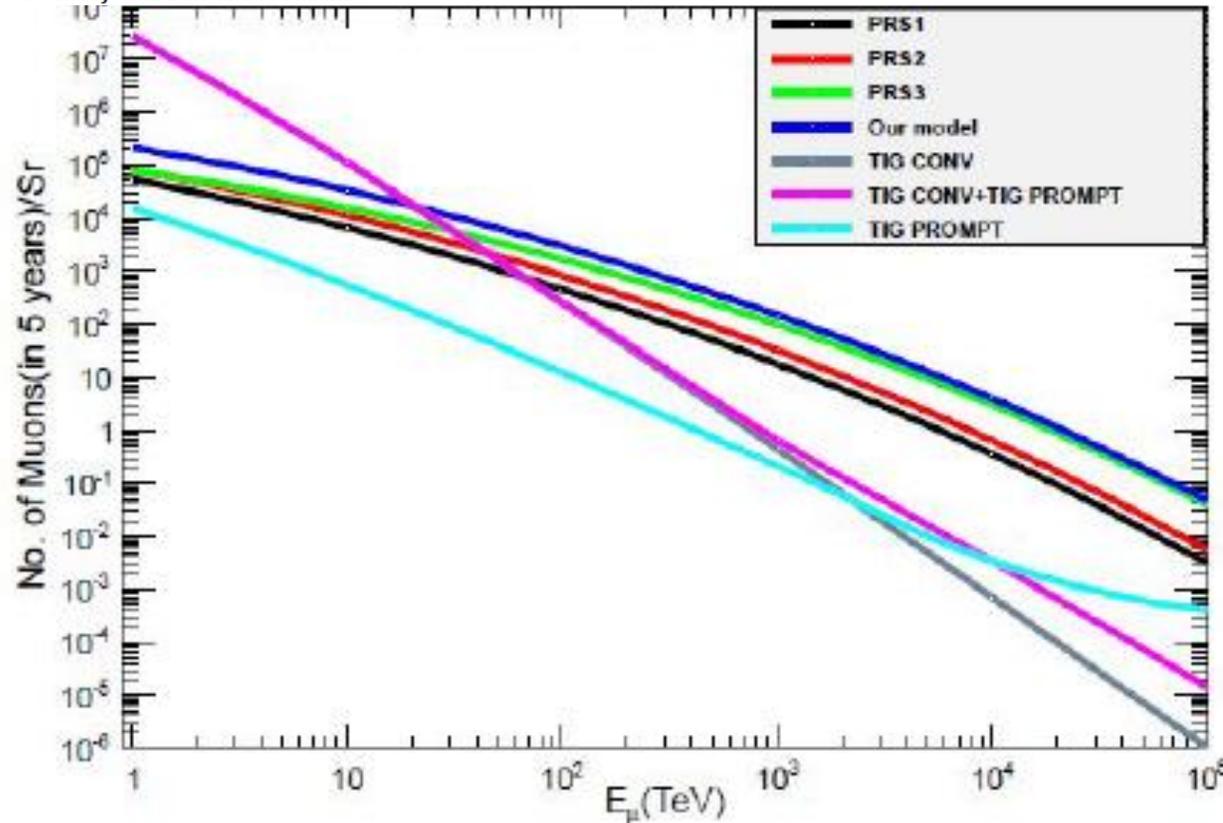


Figure 8: The figure shows number of muons vs. muon energy entering in the detector for five years of exposure time of 100 KT detectors per steradians. The surrounding effect of rock are taken into account. PRS1 (Black), PRS2 (Red), PRS3 (Green), TIG conv (Gray), TIG prompt (Sky blue), TIG (conv + prompt) (Pink), our model (Blue).

Calculation of expected background UHE prompt muon flux for 5 y exposure for 100 kT Mass Pair-Meter as a function of Muon energy

Этот график показывает ожидаемые потоки UHE мюонов, (включая прямые) в 100 кТ детекторе за 5 лет.

Масса WCDA ~ 400 кТ, т. е. нам можно ожидать в 4 раза больше событий – несколько тысяч за 5 лет с $E > 1$ ПэВ.

THEORY OF THE PAIR METER FOR HIGH ENERGY MUON MEASUREMENTS

R.P. KOKOULIN and A.A. PETRUKHIN

Moscow Physical Engineering Institute, Moscow 115409, USSR

Received 20 May 1987

The main results of the present consideration of the pair meter technique can be formulated as follows.

(1) It is expedient to use the pair meter technique at muon energies of ≥ 300 –1000 GeV (depending upon the substance).

(2) The relative measurement error at asymptotically high energies is mainly determined by the total target thickness in radiation lengths: $\delta = \sqrt{137/T}$.

(3) The setup must ensure the efficient detection of secondary cascades with the energy $\epsilon \geq 10^{-3}E$; a further decrease in the threshold hardly improves the accuracy.

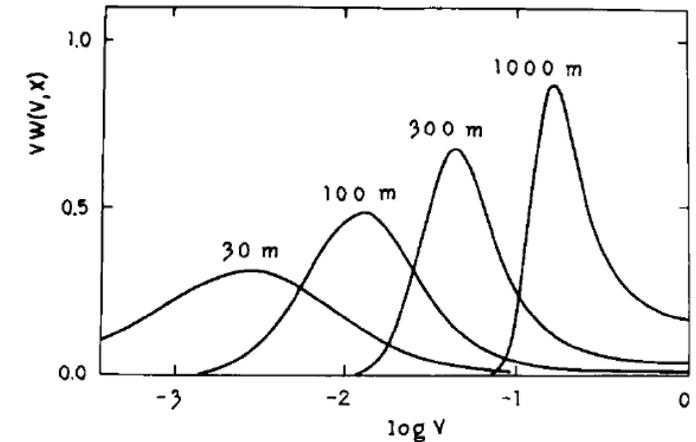


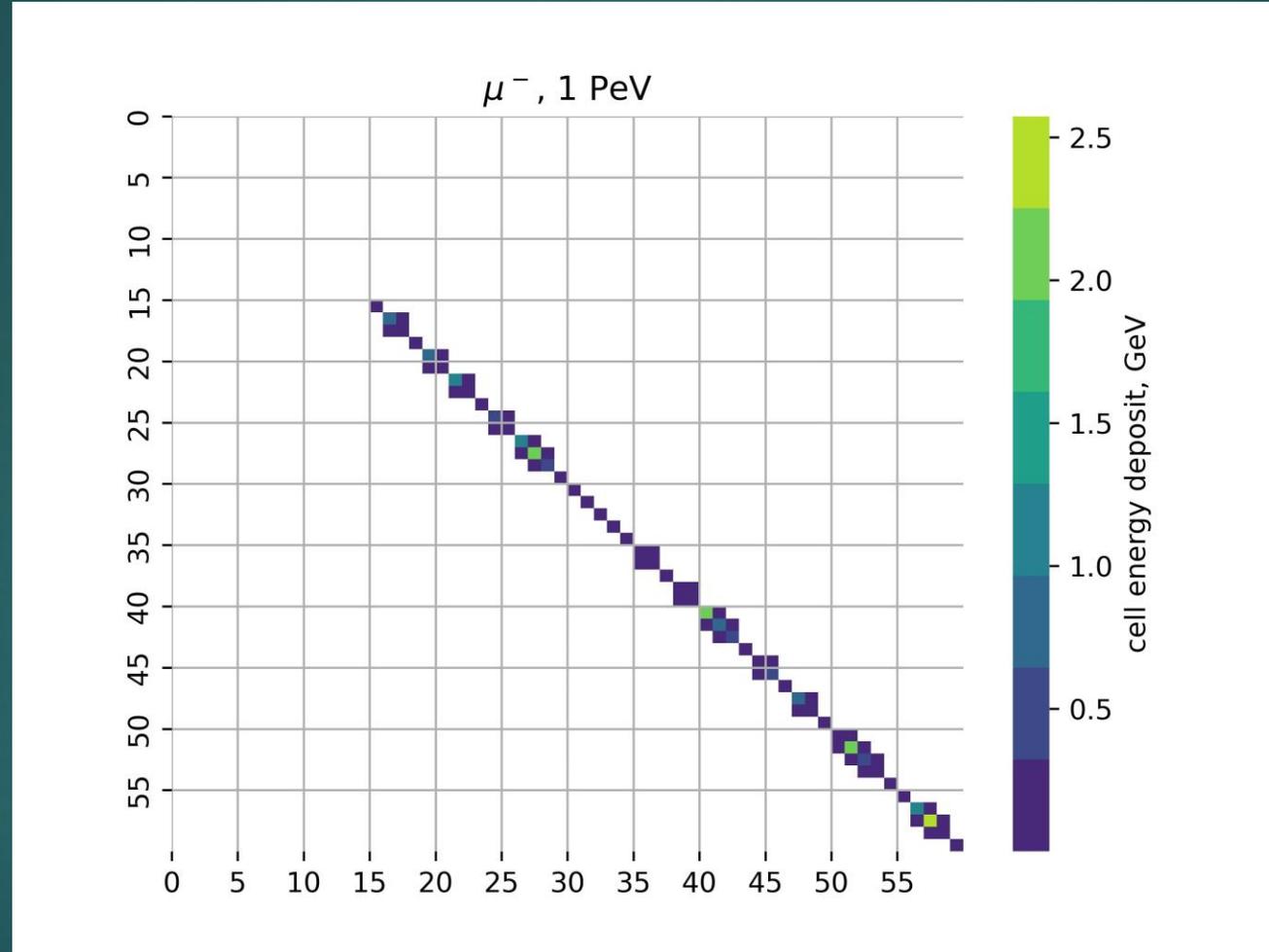
Fig. 6. Distributions of the probability of the relative energy loss V in water layers of different thickness.

$$T_{\text{opt}} \approx T_0 \gamma^2 / 2(1 - q\tau). \quad (46)$$

For the exponent $\gamma = 2.7$ the value of $T_{\text{opt}} \approx 640$ r.l. At an iron absorber mass of 20 000 t and at the optimum thickness the effective area constitutes about 85 m².

Это делает WCDA идеальным парметром

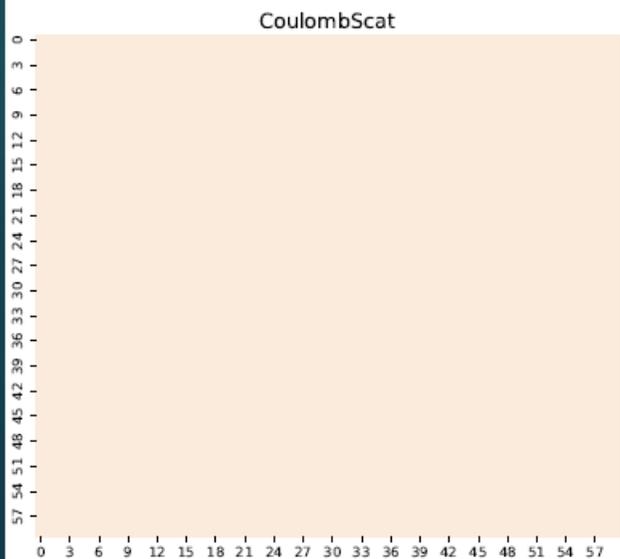
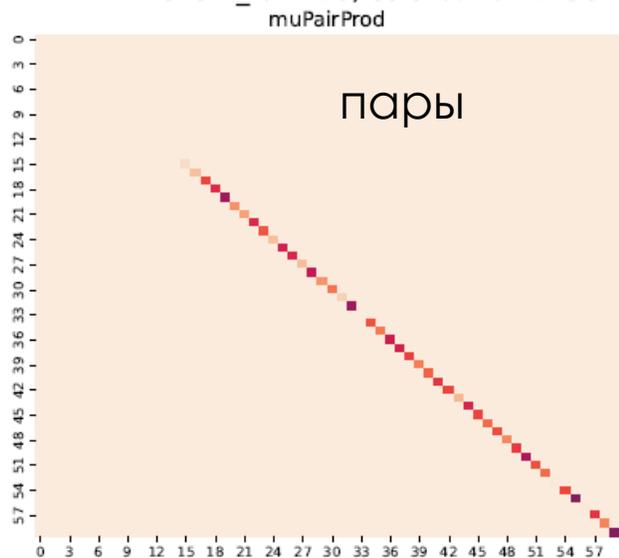
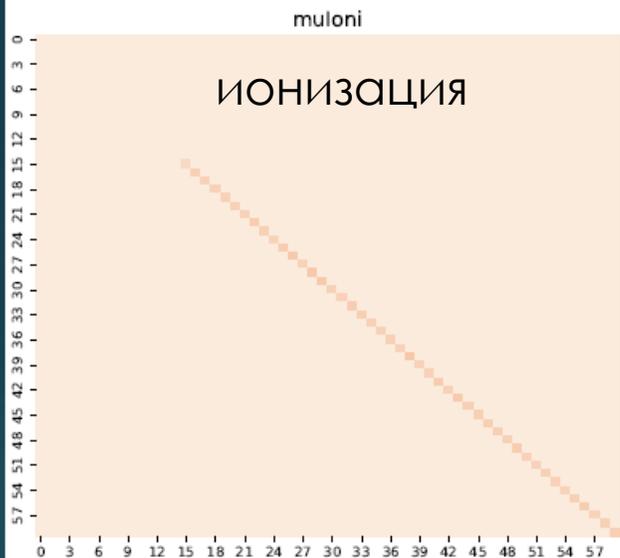
For WCDA: $T = \sim 1000$ r.l., thus $\delta \approx 0.37$ and $S \approx 1350$ m² для углов 80-90 град.



Pair-meter

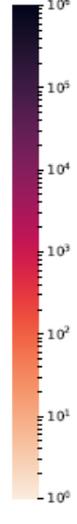
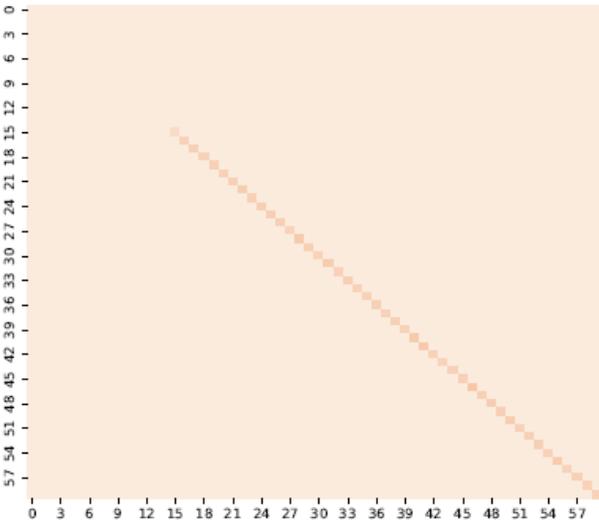
Near horizontal muon track in WCDA, $E_\mu=1$ PeV in FV

event_id = 10, colorbar unit: GeV

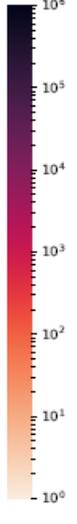
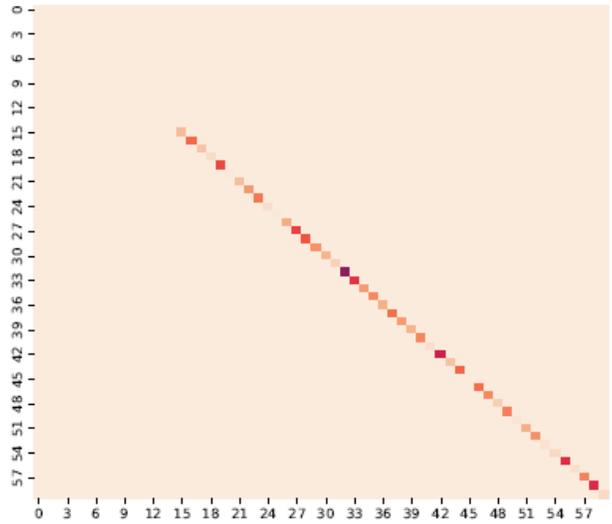


event_id = 72, colorbar unit: GeV

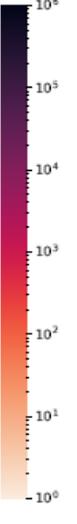
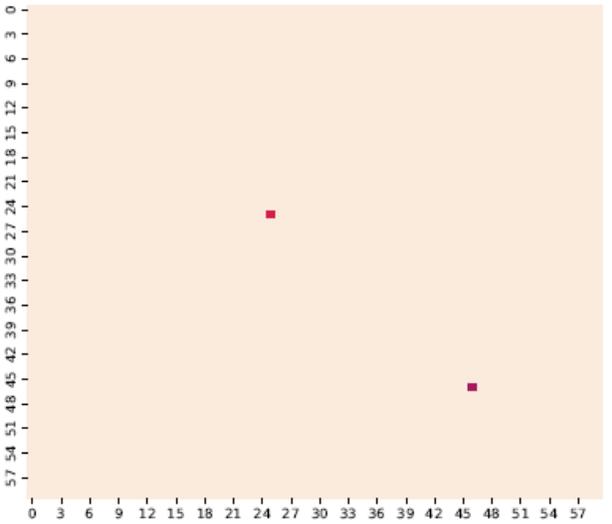
muloni



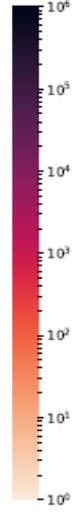
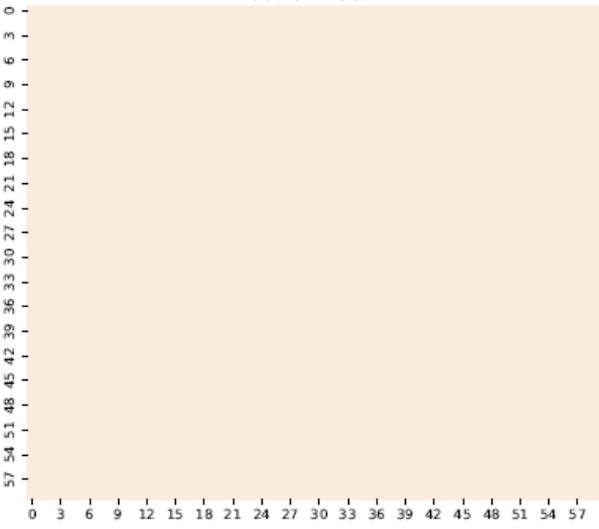
muPairProd



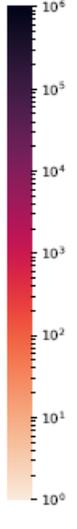
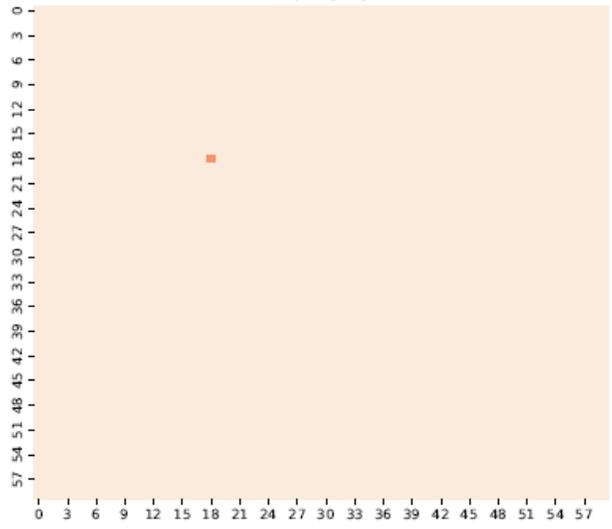
muonNuclear



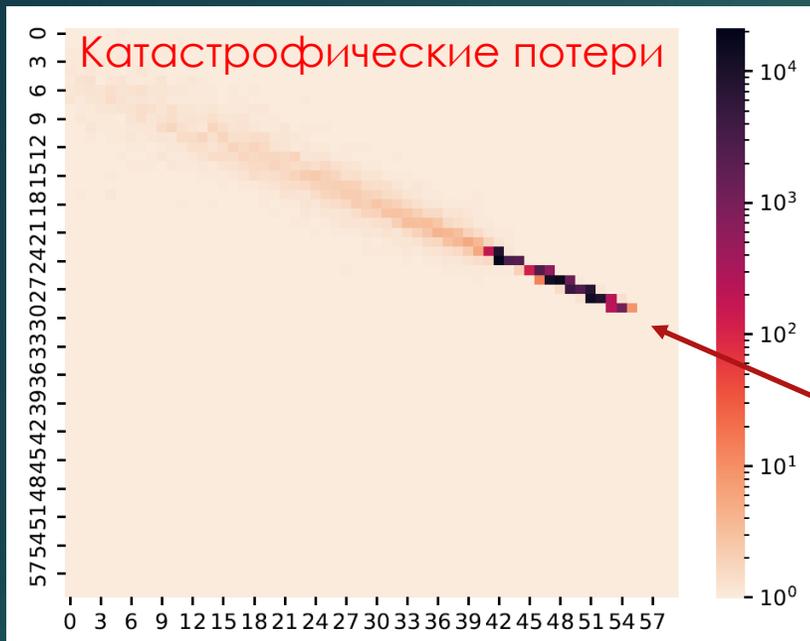
CoulombScat



muBrems

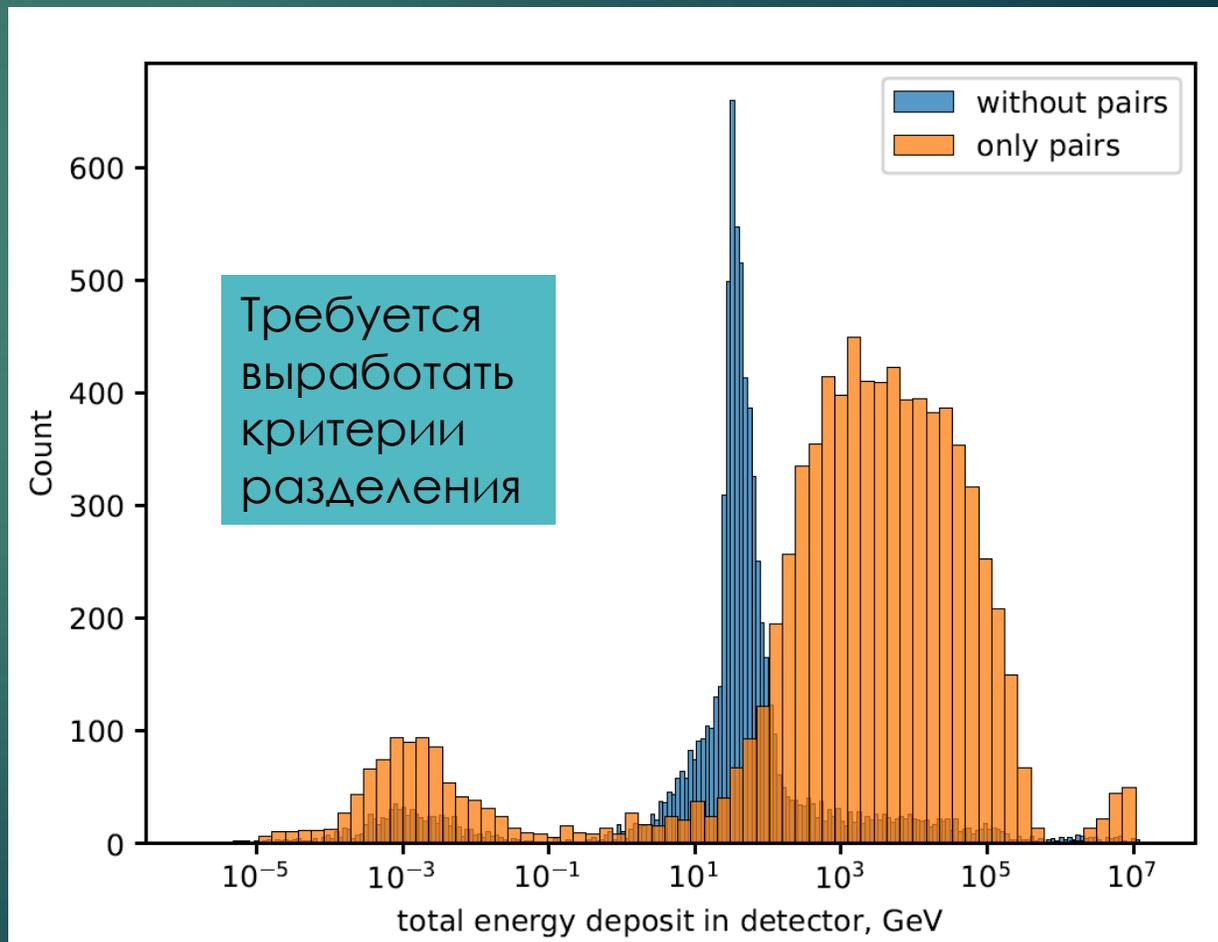
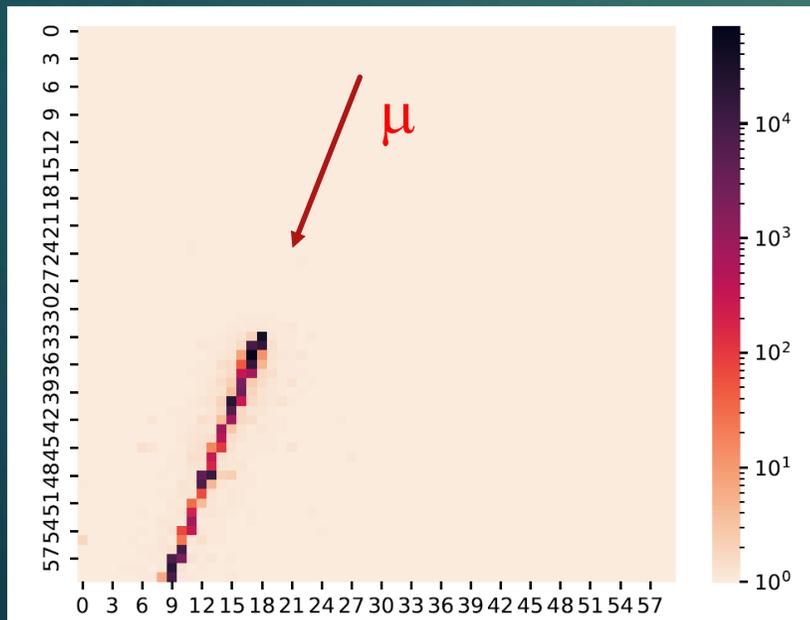


$\Theta=88.87$ градусов, энергия 126 ТэВ



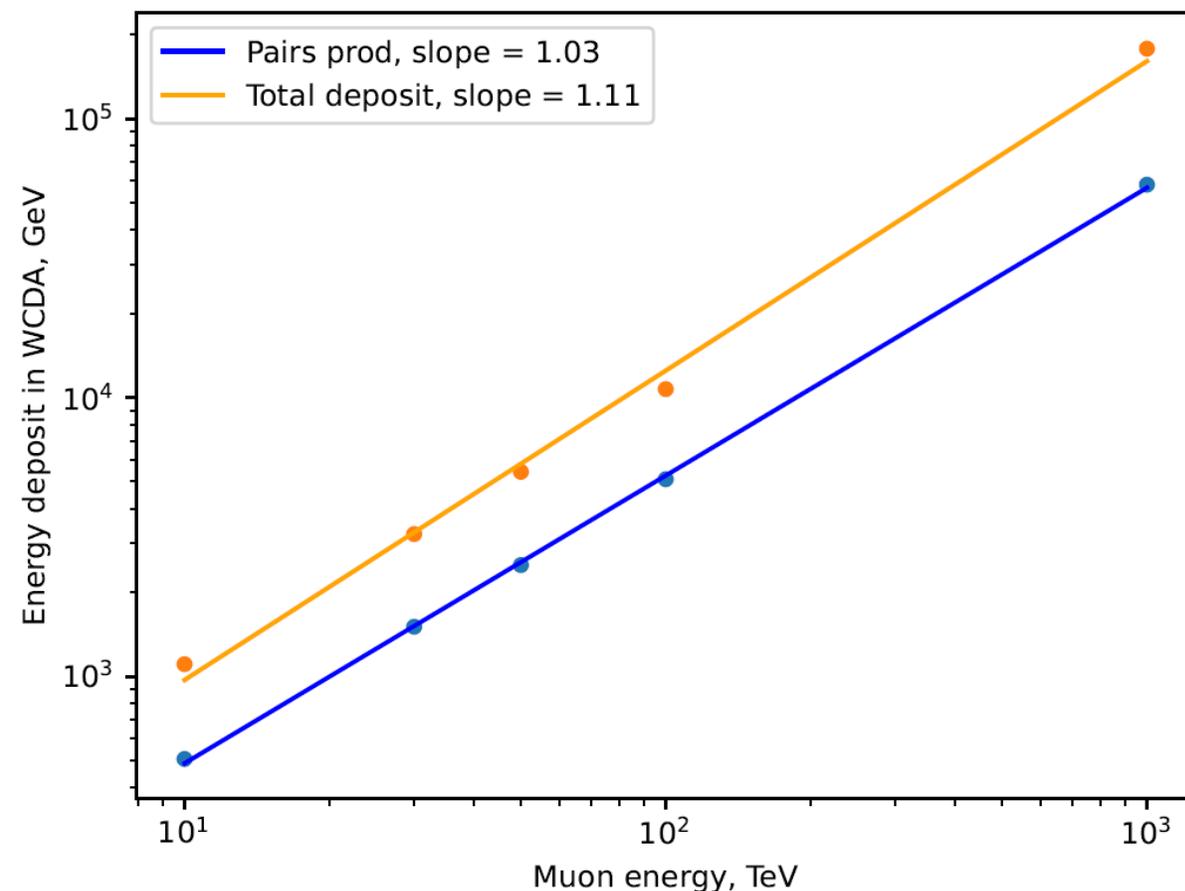
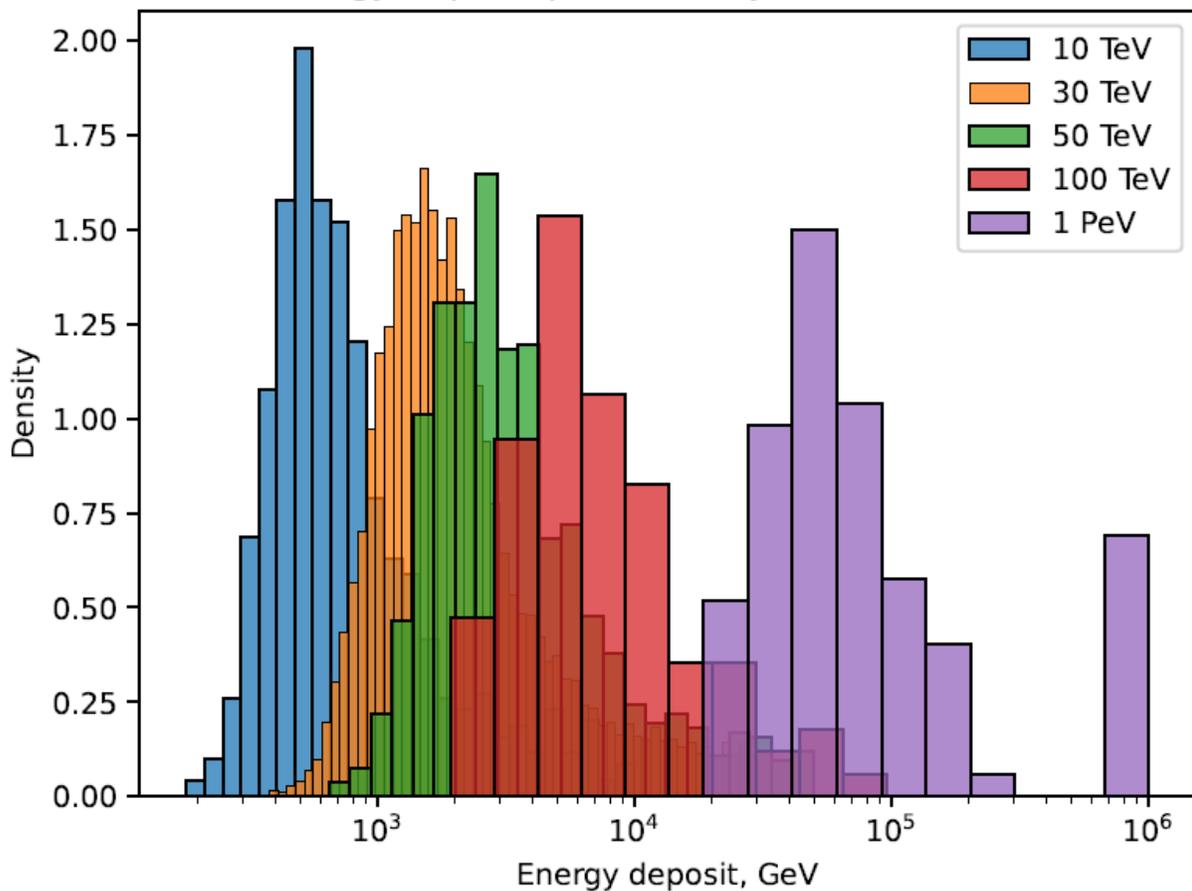
События разыграны по спектру с дифф. показателем -1 в диапазоне от 100 ТэВ до 10 ПэВ. По 10000 событий для каждого типа (только пары, без пар)

$\Theta=89.35$ градусов, энергия 358 ТэВ



GEANT4: Восстановление энергии МЮОНА в параметре WCDA

Energy deposit produced by muons in WCDA



Status and plans

19

- Proposal to use WCDA as a pair-meter is submitted to LHAASO collaboration.
- Важно: имеется готовая установка, не требующая никаких переделок.
- Надо лишь добавить соответствующий триггер для выделения около горизонтальных траекторий в WCDA и разработать алгоритм поиска нужных событий
- Кроме того, эта задача тесно связана с еще одной предложенной нами для LHAASO задачей : «поиск взаимодействий астрофизических нейтрино в WCDA», где около горизонтальные мюоны будут являться фоном

- Ячеистая структура WCDA создает однозначные сигнатуры событий, что позволяет уверенно выделять около горизонтальные треки
- Масса воды в WCDA (400 кТ) и наличие 3120 светоизолированных ячеек $5 \times 5 \times 4.5 \text{ м}^3$ делают его практически идеальным парметром.
- WCDA можно уже сейчас использовать как парметр для измерения спектра мюонов космических лучей с $E_\mu > \sim 10 \text{ ТэВ}$ без каких-либо переделок
- В дальнейшем, после измерения потока около горизонтальных мюонов, можно будет приступить к поиску нейтринных событий, используя WCDA как прототип будущей большой наземной нейтринной установки

Спасибо за внимание!