

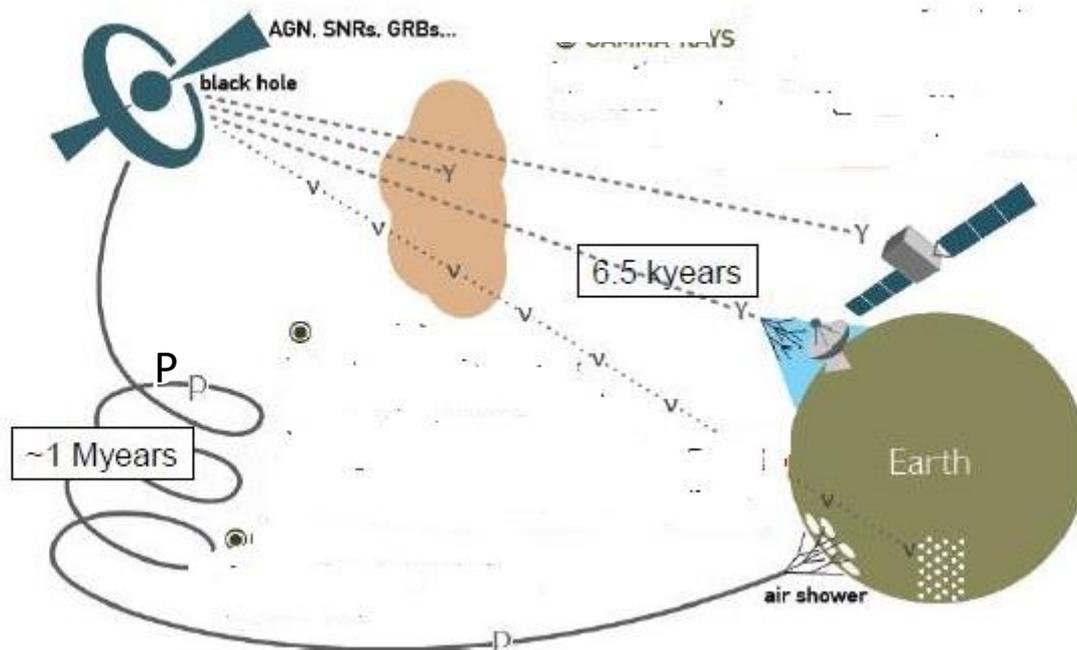
Астрофизика частиц и
анализ
экспериментальных
данных

Гамма-кванты и нейтрино и космические лучи



В каких астрофизических источниках ускоряются и как распространяются частицы высоких энергий во Вселенной

Движение протонов в магнитном поле



Гамма-астрономия высоких энергий

Атмосферные черенковские гамма-телескопы

(IACTs – Imaging Atmospheric Cherenkov telescopes)

Камера телескопа
500-1000 пикселей



Гамма –квант (>50 ТэВ)



ШАЛ
в атмосфере

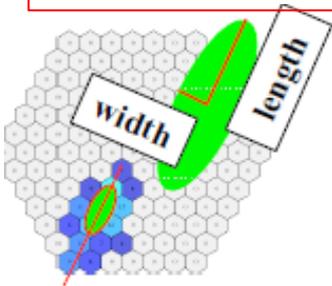
Черенковский
свет

Эффективная площадь= 10^5 m^2

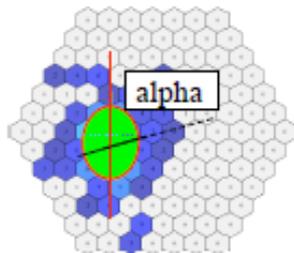
Черенковский телескоп
(IACT – Imaging Atmospheric
Cherenkov Telescope)

Режекция событий от
космических лучей на
уровне 10^{-4} по форме
изображения в камере

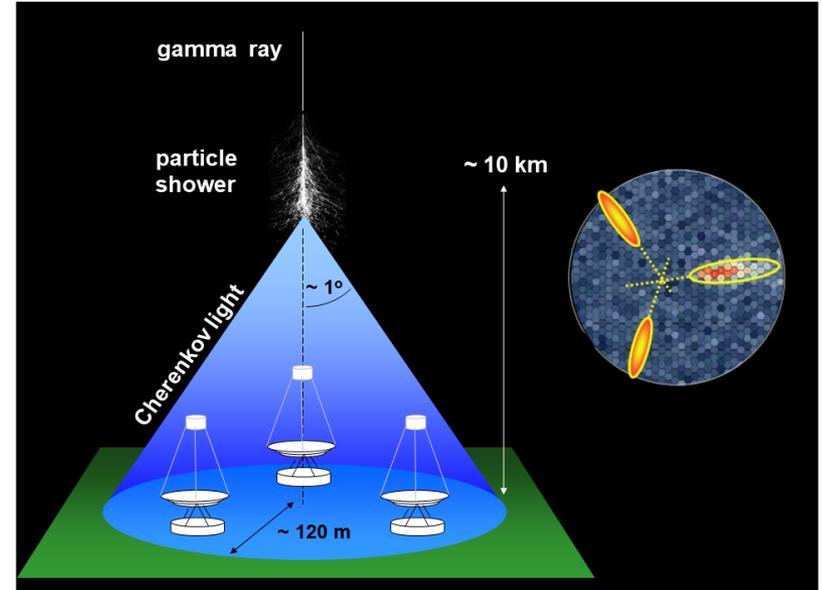
ШАЛ от гамма- кванта



ШАЛ от протона



Сtereo метод



Энергетический порог $\sim 1 / (\text{площадь зеркал})$

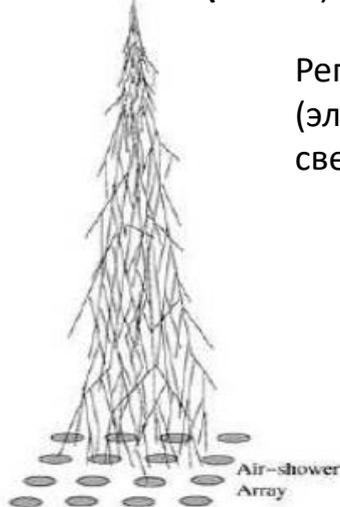
$10 \text{ m}^2 \rightarrow 1 \text{ ТэВ}$

$200 \text{ m}^2 \rightarrow 50 \text{ ТэВ}$

Установки, регистрирующие заряженную компоненту ШАЛ

Энергетический порог:
для высоты 4000 м ~ 1 ТэВ
для уровня моря ~ 1 ПэВ

Гамма –квант (>1 ТэВ)



Регистрация заряженных частиц ШАЛ (электроны и мюоны) и черенковского света системной разнесенных детекторов

«Компактность»
Установка HAWC

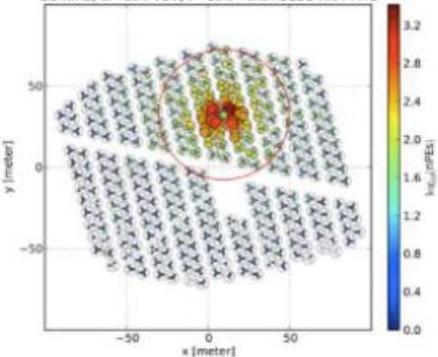
Режекция ШАЛ от протонов

малое число мюонов.
В протонном ШАЛ мюонов в 10 раз больше, чем в ШАЛ от гамма

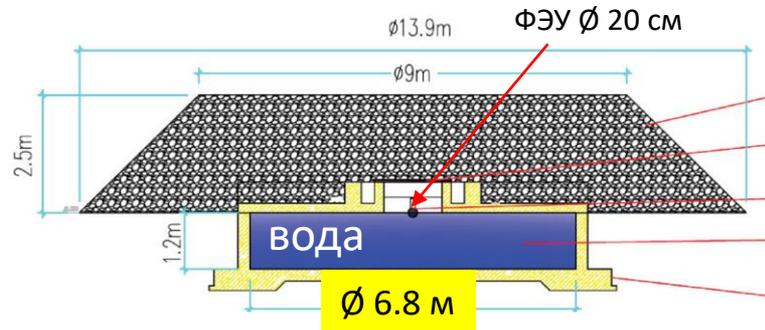
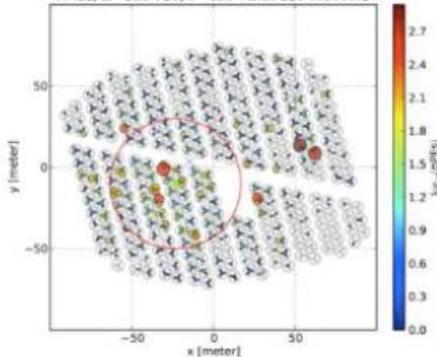
$E_\gamma = 20 \text{ TeV}$

$E_p = 20 \text{ TeV}$

Gamma, $E=20.7 \text{ TeV}$, $\theta=21.0^\circ$ with 1131 Hit PMTs

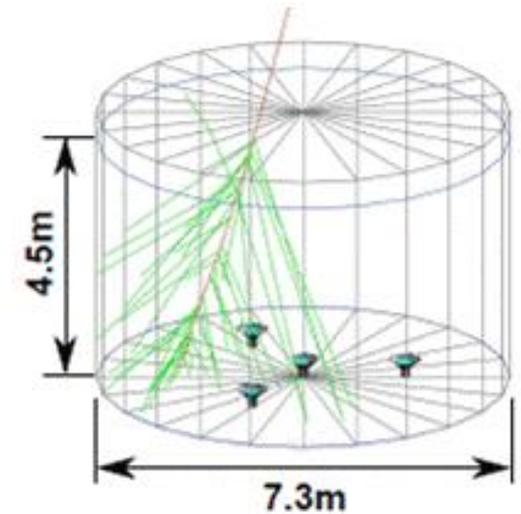
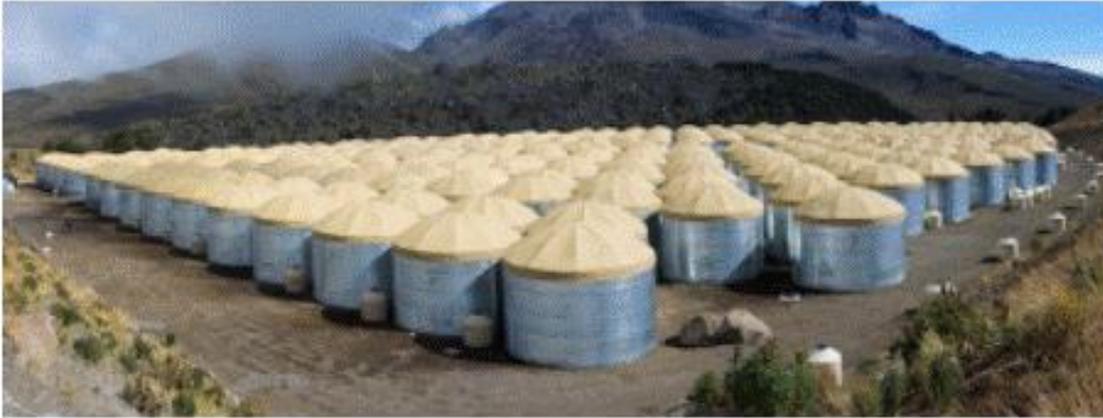


PPi.us, $E=24.0 \text{ TeV}$, $\theta=43.5^\circ$ with 837 Hit PMTs



В установке LHAASO 1100 мюонных детекторов

NAWC Array (4100 м над уровнем моря)



$S = 0.02 \text{ km}^2$, 300 водных баков

Gamma/hadron separation

Energy 1 nHit/ all pmt - Range параметр B -
 2. $E = F(\text{SIZE40}, \theta)$

B	Range (%)	ebin
0	4.4 – 6.7	2.50
1	6.7 – 10.5	2.75
2	10.5 – 16.2	3.00
3	16.2 – 24.7	3.25
4	24.7 – 35.6	3.50
5	35.6 – 48.5	3.75
6	48.5 – 61.8	4.00
7	61.8 – 74.0	4.25
8	74.0 – 84.0	4.50
9	84.0 – 100.0	4.75
		5.00
		5.25

50 TeV

Muon content

$$\text{Compactness} = N_{hit} / C_{xPE40}$$

$$LIC = \log_{10} \frac{1}{compactness} = \log_{10} \frac{C_{xPE40}}{nHit}, \quad \text{Log Inverse of Compactness} \quad \text{Log E(GeV)}$$

DisMax - расстояние в метрах между ФЭУ с наибольшими амплитудами

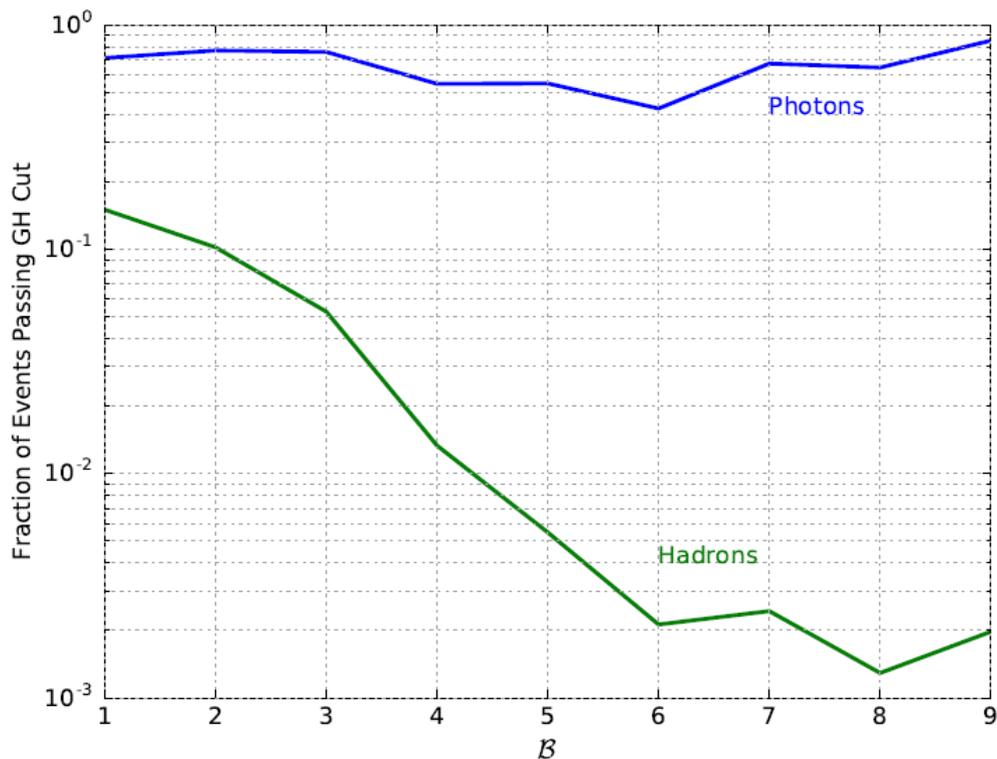
Восстановление энергии
 программа
 Neural network
 (0703039)

Функция пространственного распределения (ФПР)

PINC (parameter of identification if CR) – параметр «гладкости» ФПР

Зависимость коэффициента режекции адронов от энергии

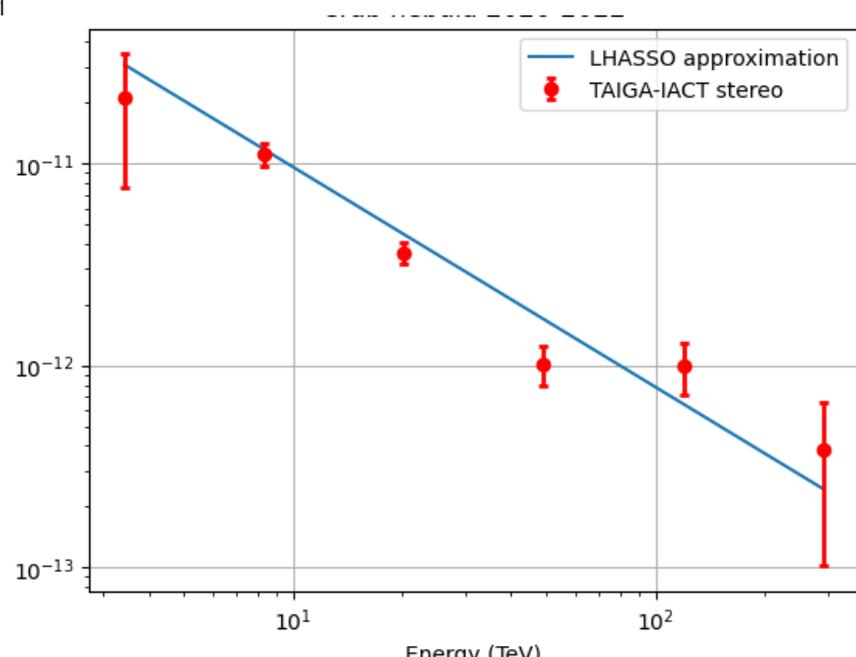
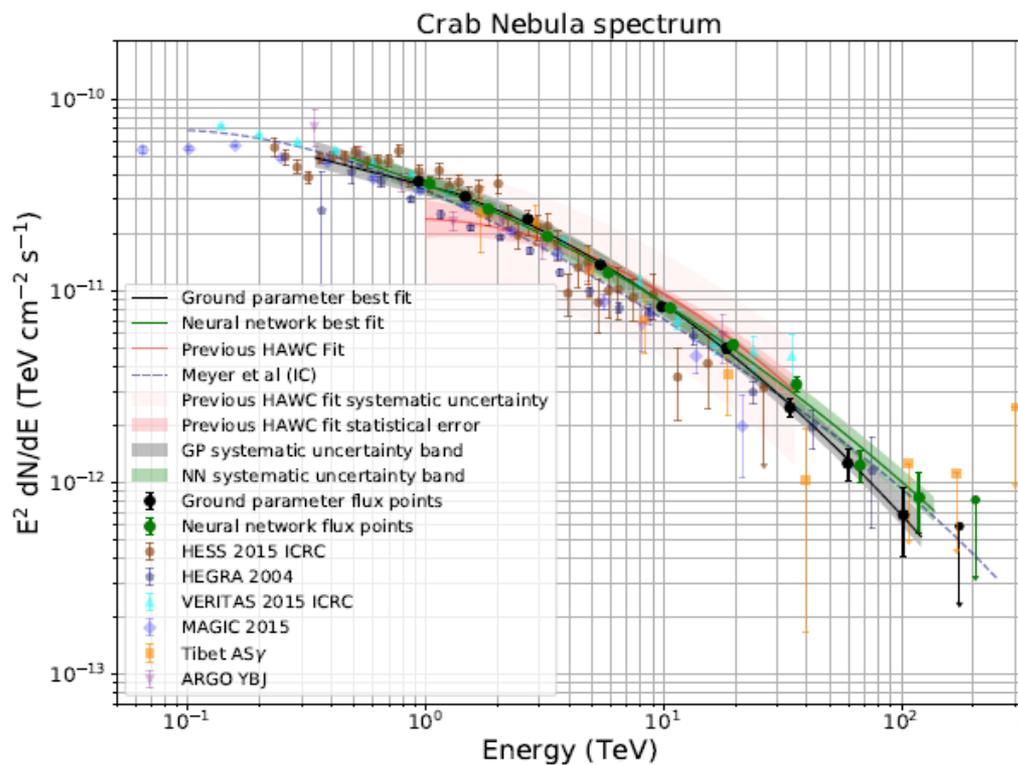
Стандартный подход (1701.01778)



PoS (icrc2021)745

Use of Machine Learning for gamma/hadron separation with HAWC

Спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности

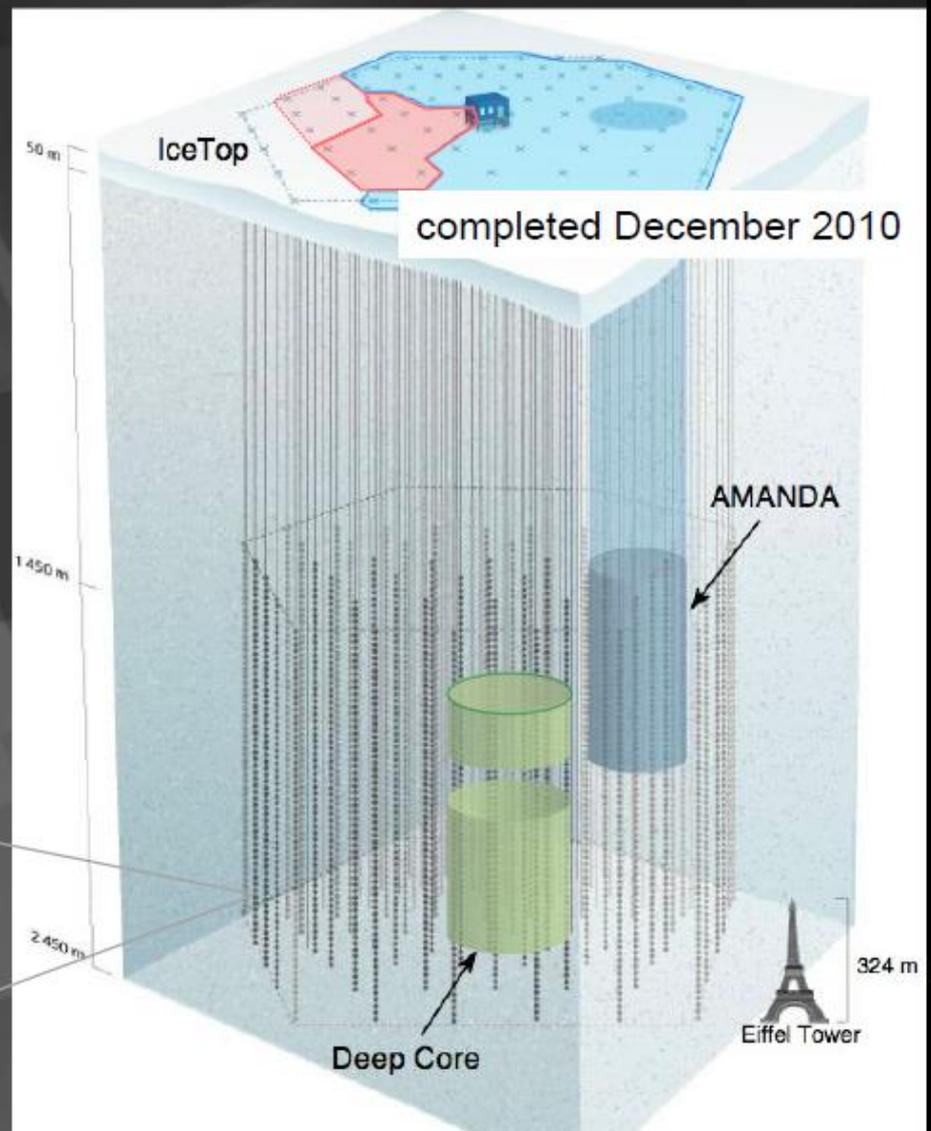
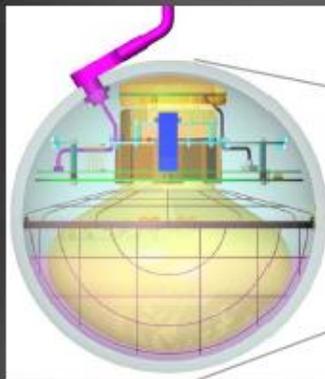


Нейтринная астрофизика

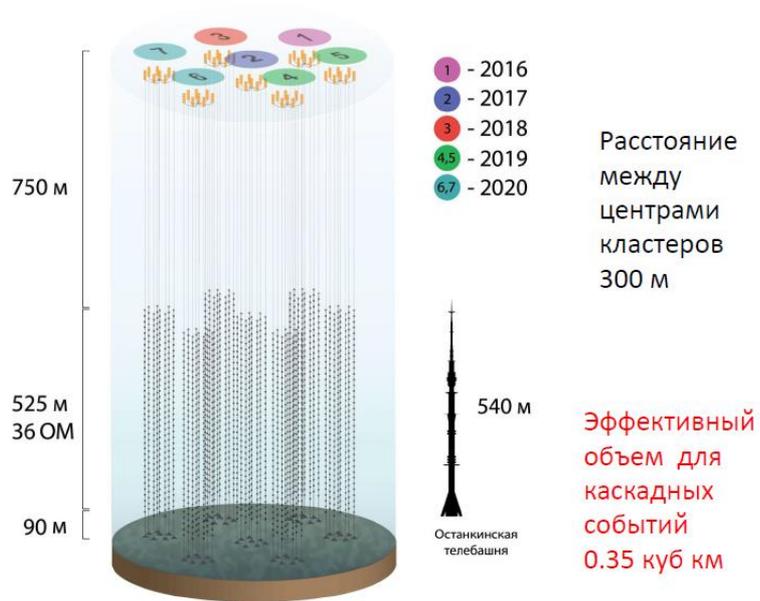
Ice Cube

IceCube / Deep Core

- 5160 optical sensors between 1.5 ~ 2.5 km
- 10 GeV to infinity
- ~ 0.5 degree on-line
< 0.2 degree off line
- < 30% energy resolution



BAIKAL-GVD - 1km³



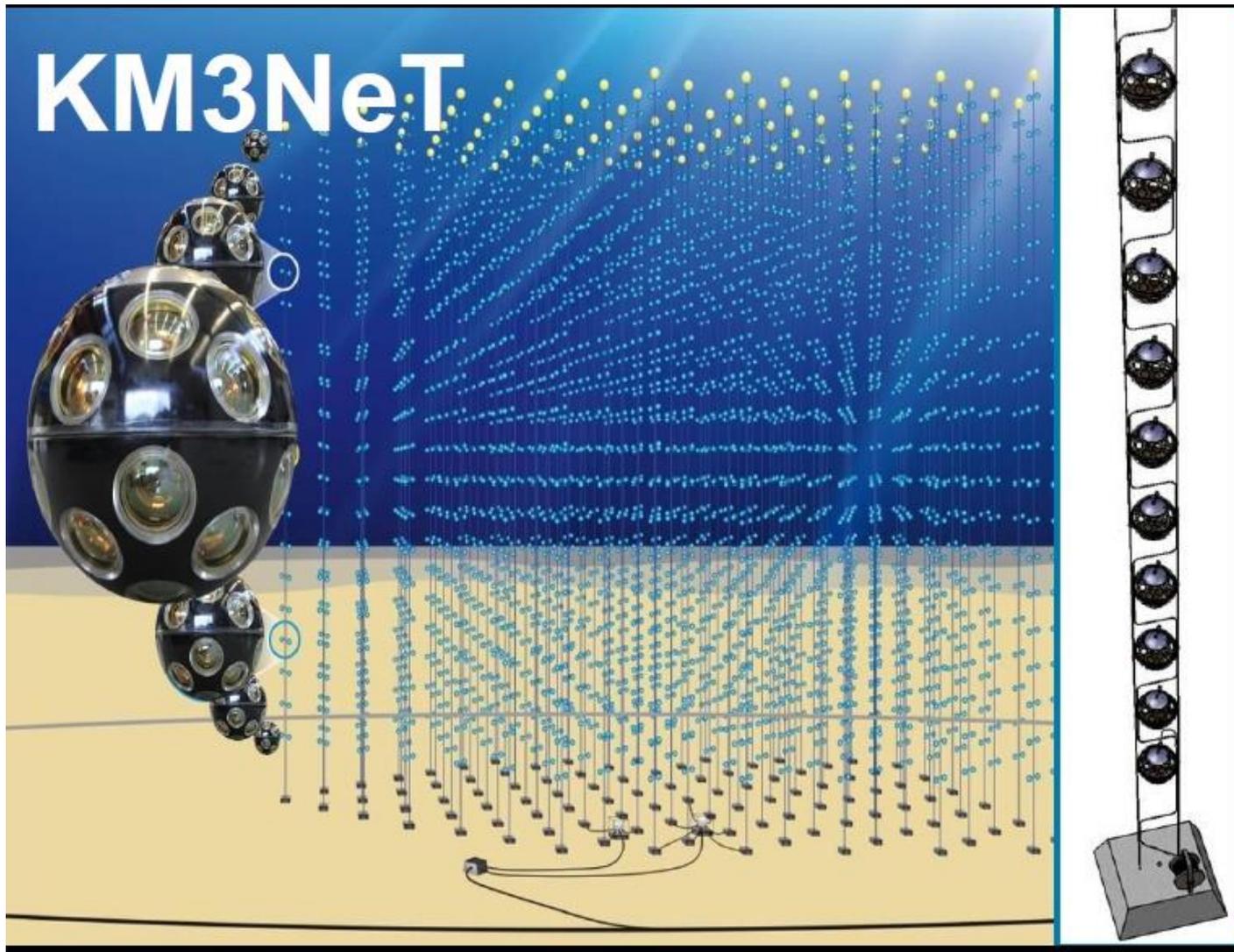
План развертывания детектора

Год	Суммарное число кластеров	Число OM
2016	1	288
2017	2	576
2018	3	864
2019	5	1440
2020	7	2016
2021	9	2592

2024 –
14 кластеров

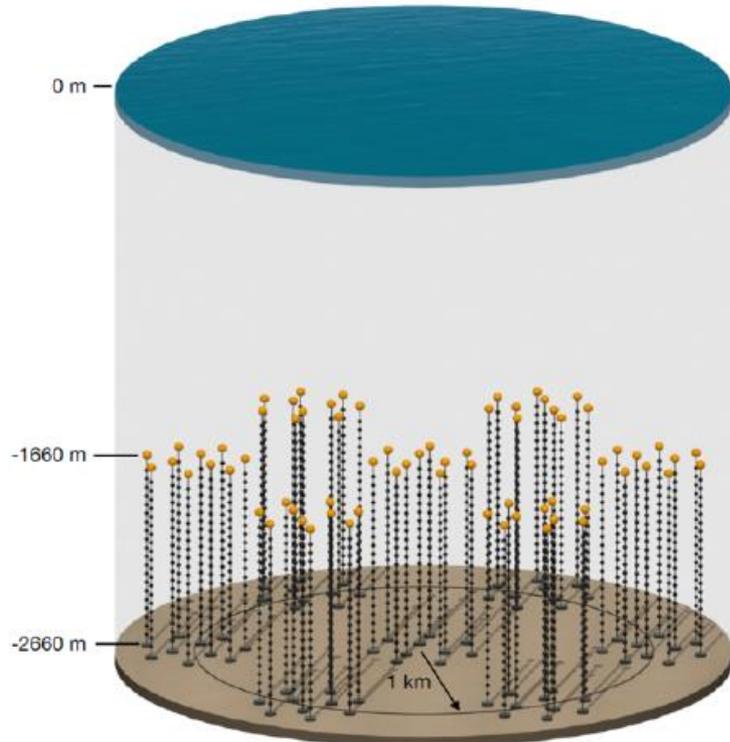


KM3NeT – в средиземном море (1 км³)

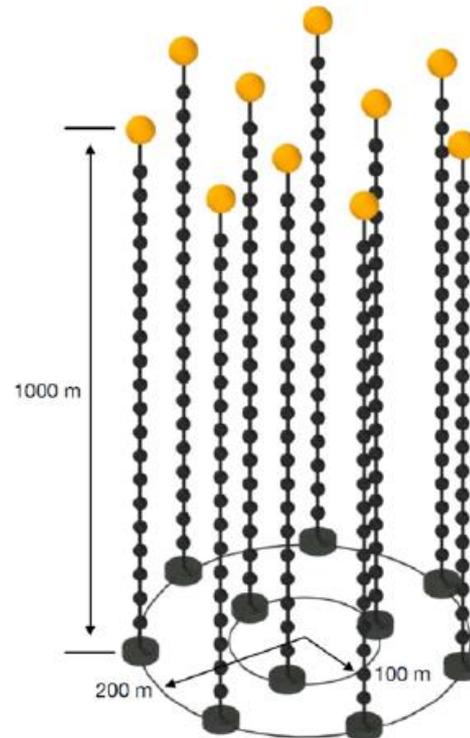


Pacific Ocean Neutrino Experiment (P-ONE) – 1 км³

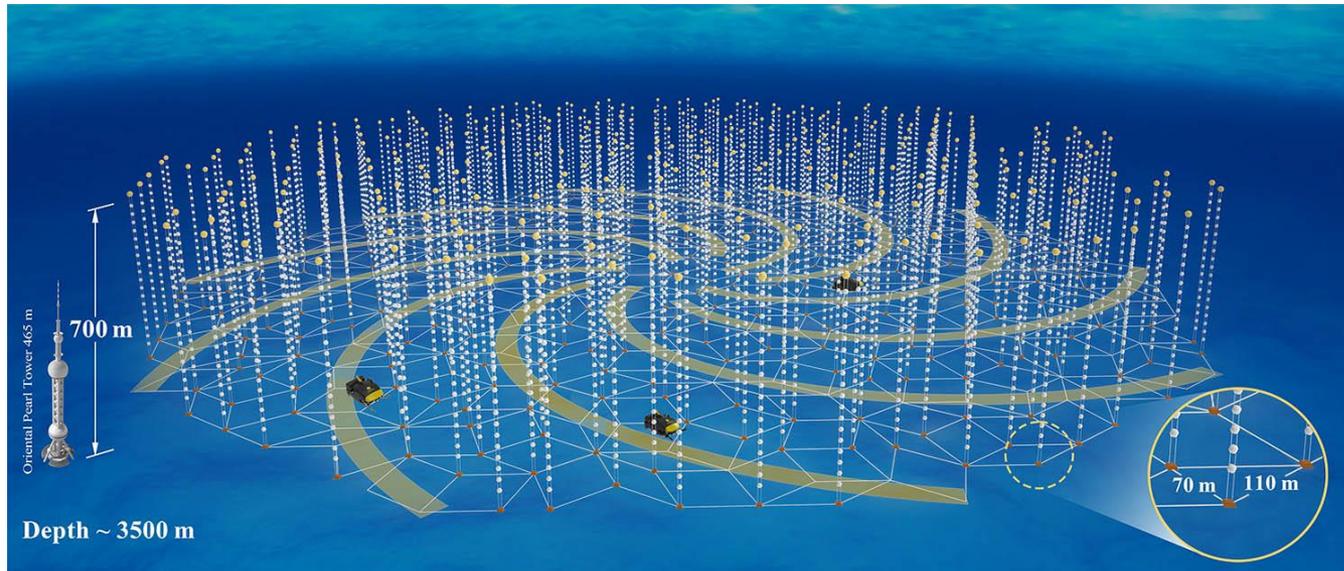
7 кластеров



10 стрингов



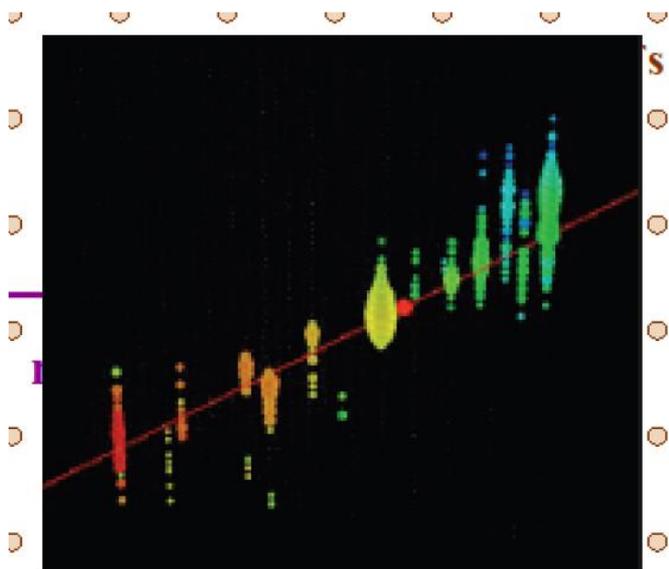
Trident – нейтринный телескоп в Южно-Китайском море



1200 стрингов, объем 8 км³

Будет готов к 2030 году!

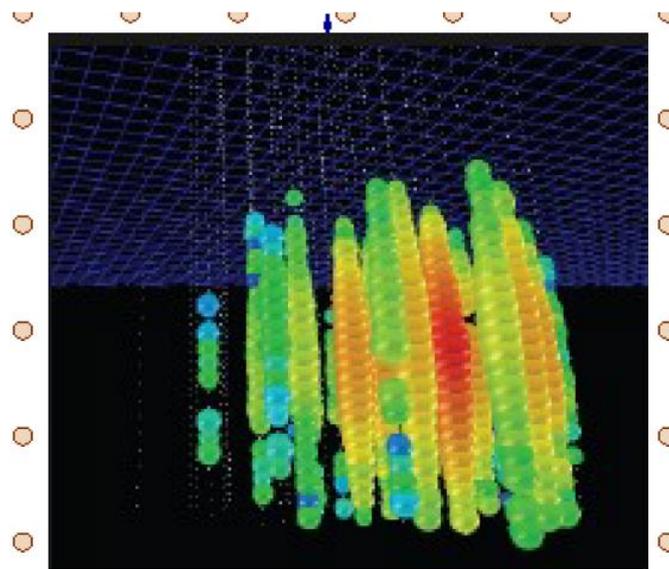
Что регистрируют нейтринные телескопы



Мюонный трек



Точность восстановления угла $< 1^{\circ}$



электромагнитный+ адронный каскад



точность угла - $10 - 15^{\circ}$

Мюонные нейтрино могут атмосферными и астрофизическими
Тау – нейтрино – только атмосферными

Основные методические задачи

1. Выделить нейтринное событие
2. Восстановить направление трека мюона и энергию мюона
3. Восстановить энергию каскада и направление
4. Отличить событие от атмосферного нейтрино от астрофизического

Атмосферное нейтрино - нейтрино рождаемое в атмосфере от космических лучей

В источнике: $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 2:1:0$

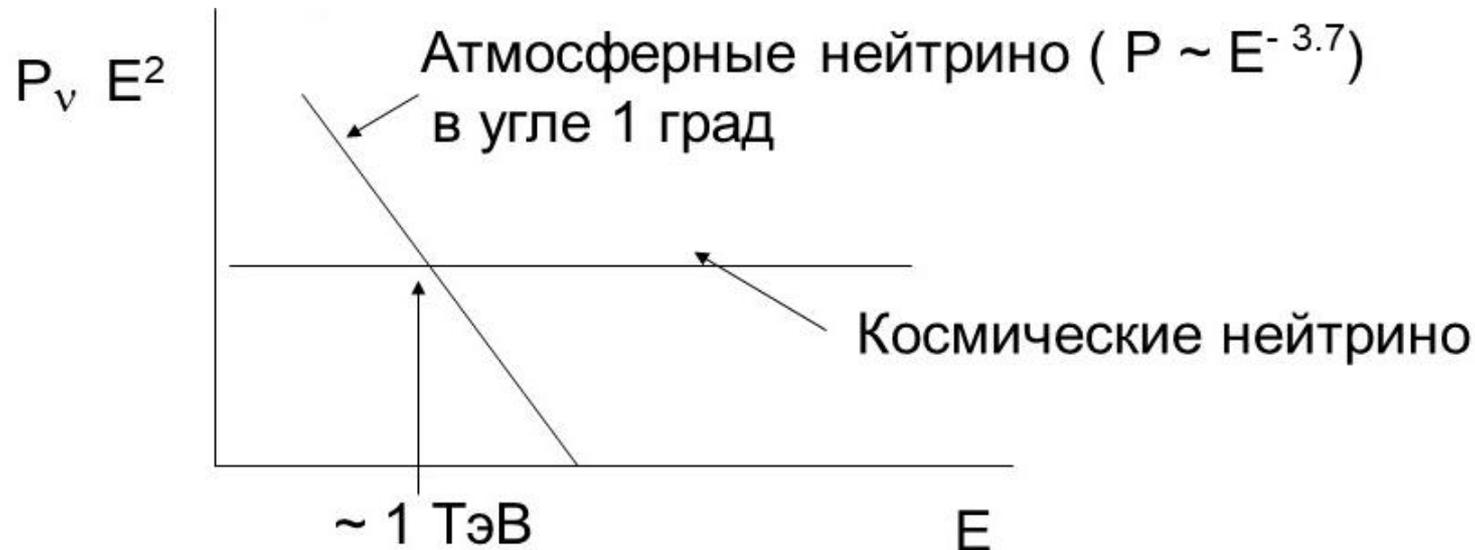
На Земле : $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:1:1$ Осцилляции нейтрино

Источники фона

1. Фоновый сигнал на оптическом модуле: вспышка света, ^{40}K
2. Группы мюонов от ШАЛ
3. Атмосферные нейтрино для регистрации астрофизических

$$P_{\text{atm}} \sim 1/\cos\theta$$

P_{astr} - изотропные



Machine learning in IceCube

Approx. 50 literature results covering:

- Boosted decision trees [[1705.08103](#)]
- Random forests [[2006.05215](#)]
- Deep neural networks [[1906.04317](#)]
- Convolutional neural networks [[2101.11589](#)]
- *Etc.*

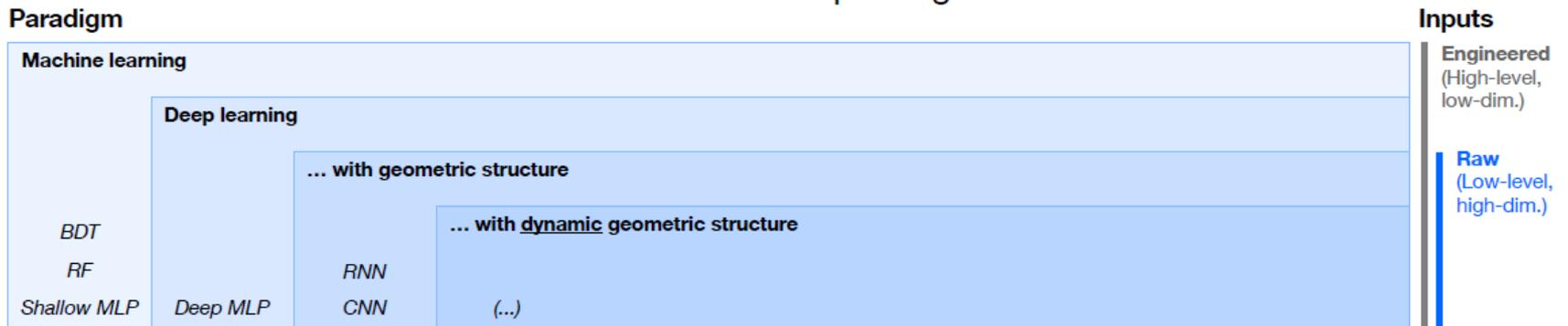
+ Many not-yet-public efforts

Arc of ML in physics (not just IceCube):

From Simple, analysis-level models on high-level features

Towards Complex, multi-purpose models on low-level features

→ Focus on **neural networks** as a highly flexible ML paradigm

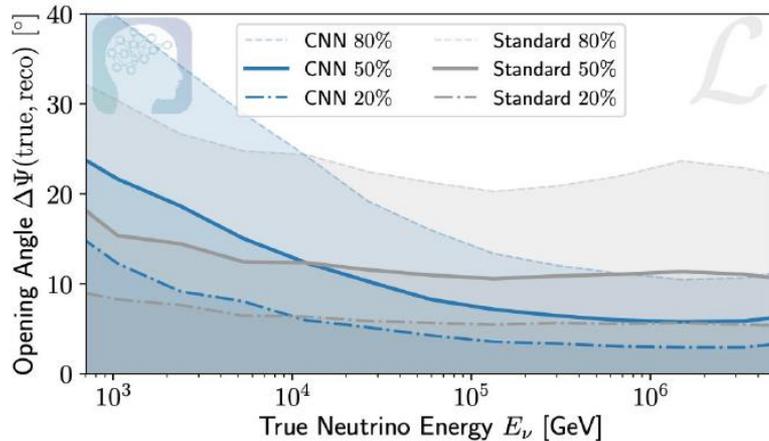


Результаты применения ML

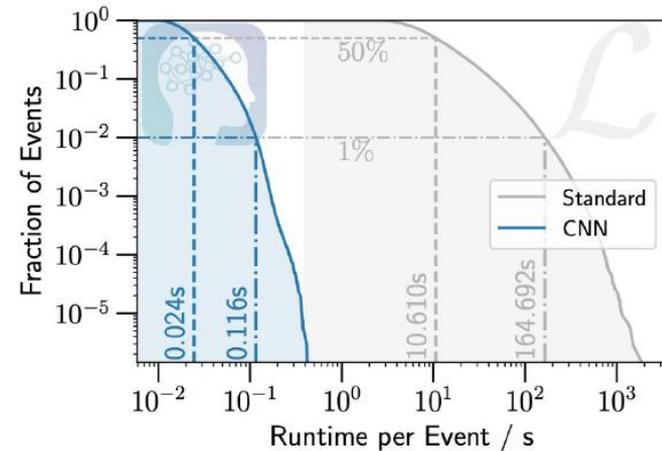
CNNs

Точность реконструкции каскадов

50% improvement in resolution at high energies



2-3 orders of magnitude reduction in reconstruction time¹

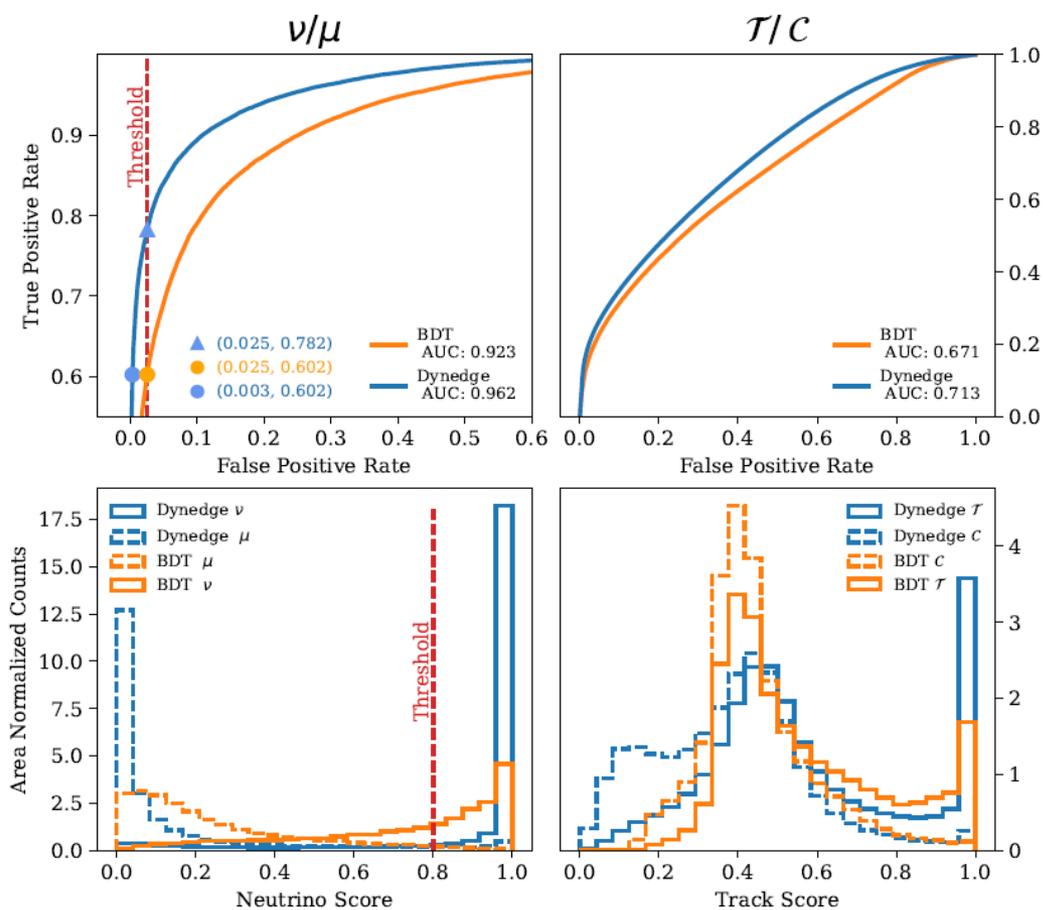


2101.11589

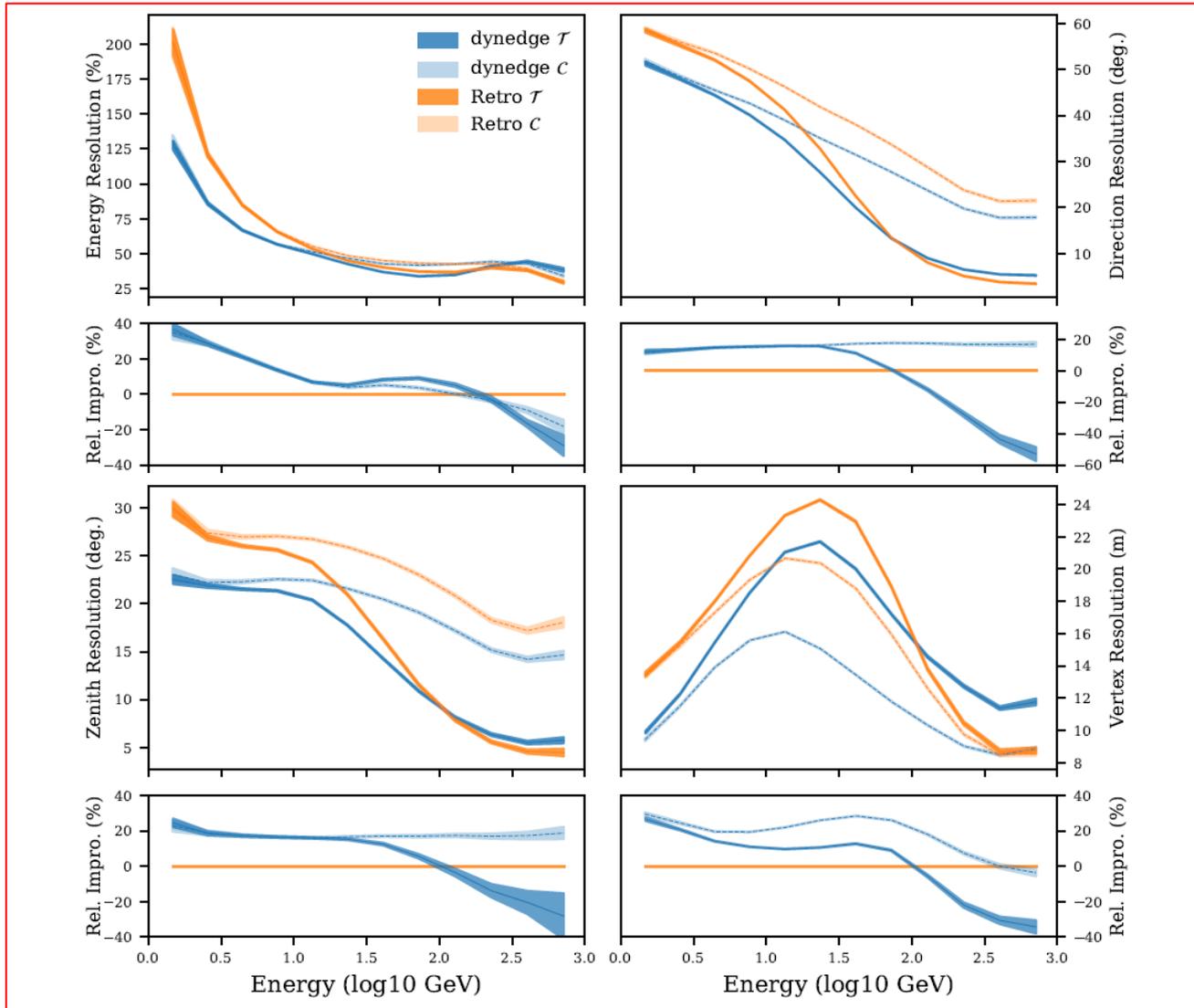
Graph Neural Networks for Low energy events Classification & Reconstruction (2209.03042)

Targets	Description	Residual Definition
ν/μ	Classification of neutrino vs. muon events	–
E	Deposited energy of neutrino interaction	$R_E = \log_{10}(E_{\text{reco}}) - \log_{10}(E_{\text{true}})$
θ, ϕ	Zenith and azimuth angles of neutrino	$R_{\text{angle}} = \text{angle}_{\text{reco}} - \text{angle}_{\text{true}}$
\vec{r}	Direction vector of neutrino	$R_{\vec{r}} = \arccos \frac{\vec{r}_{\text{reco}} \cdot \vec{r}_{\text{true}}}{ \vec{r}_{\text{reco}} \vec{r}_{\text{true}} }$
V_{xyz}	Vertex position of neutrino interaction	$R_{V_{\text{xyz}}} = \vec{P}_{\text{reco}} - \vec{P}_{\text{true}} $
\mathcal{T}/\mathcal{C}	Classification into tracks and cascades	–

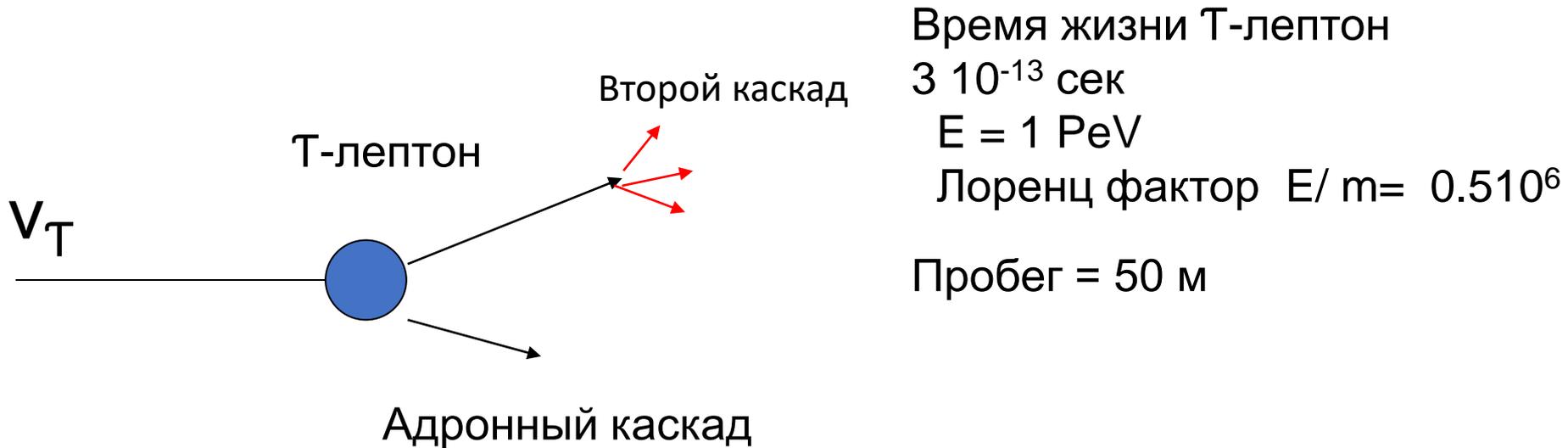
Классификация событий



Улучшение реконструкции (GNN)



Выделение событий от T – нейтрино: двойной каскад



Время жизни T -лептон

$3 \cdot 10^{-13}$ сек

$E = 1$ PeV

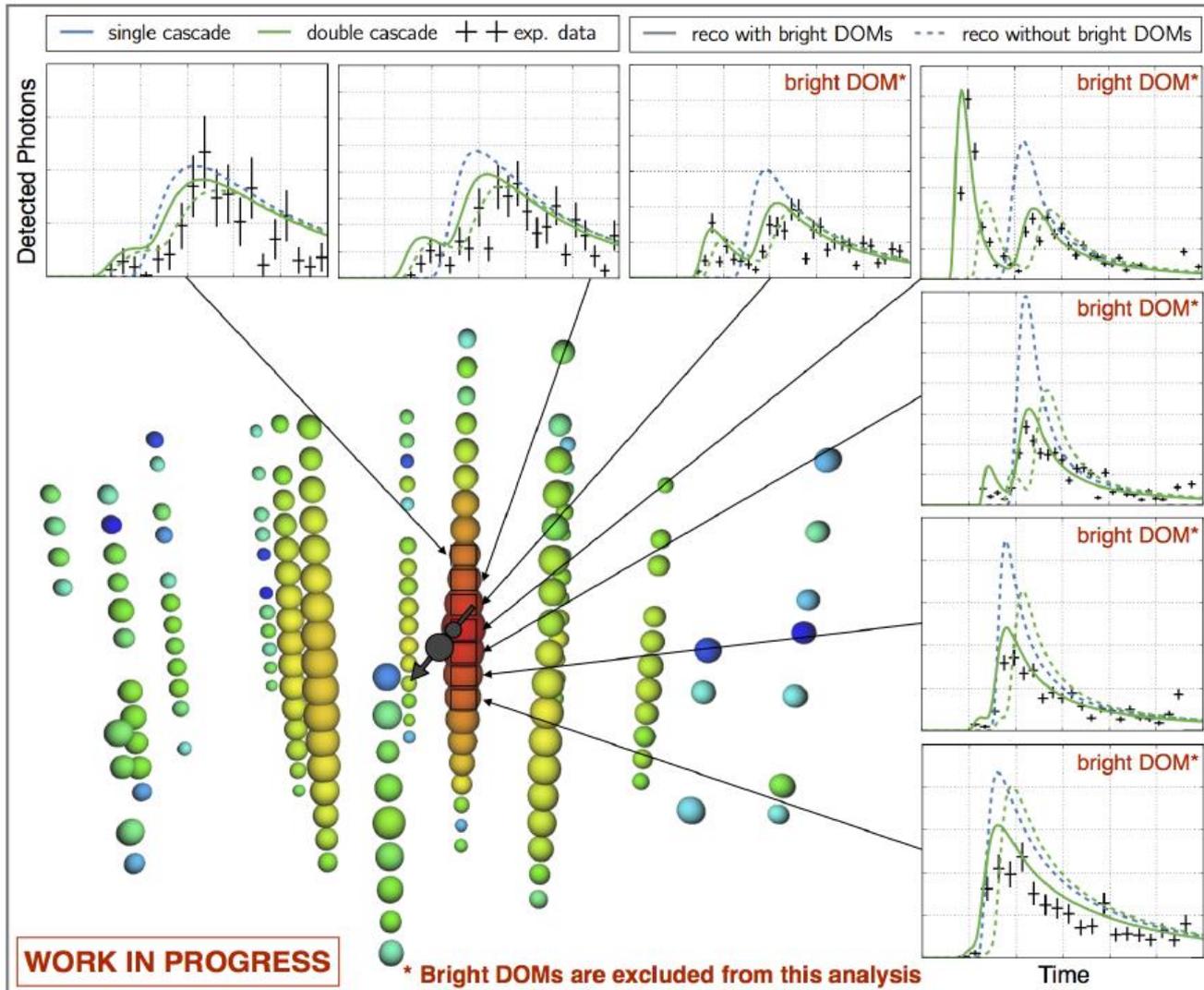
Лоренц фактор $E/m = 0.5 \cdot 10^6$

Пробег = 50 м

Двойной каскад

Тау-нейтрино- 2 кандидата (2016)

Пробег тау-лептона с энергией 1 ПэВ – 50 м



Развертки по времени

Нулевая гипотеза
исключается на
2.8 сигма

В 2024 – 7 тау
нейтрино
Новым методом

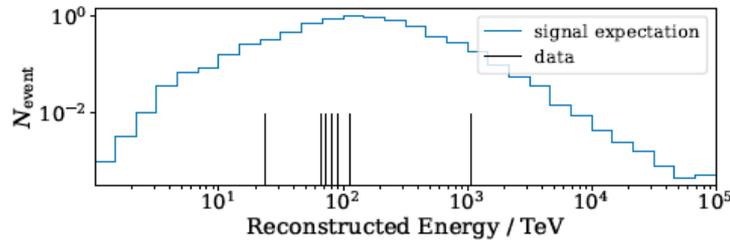
Новый поиск тау-нейтрино (CNN)

50 ТэВ – 1ПэВ

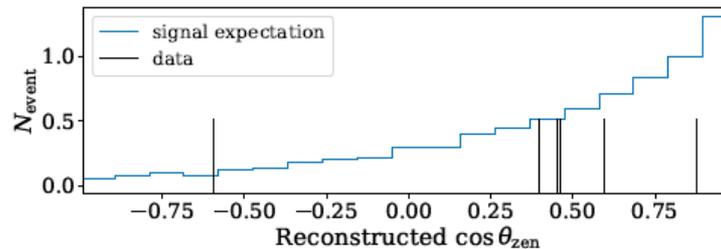
Данные за 10 лет

Ожидаемое число событий после отбора

	$\nu_{\tau, CC}^{\text{astro}}$ [59]	$\nu_{\text{other}}^{\text{astro}}$ [59]	$\nu_{\text{conv.}}^{\text{atm.}}$ [60–63]	$\nu_{\text{prompt}}^{\text{atm.}}$ [56, 64–66]	$\mu_{\text{conv.}}^{\text{atm.}}$ [67–70]	all background
initial	160 ± 0.2 (190 ± 0.3)	400 ± 0.7 (490 ± 0.8)	580 ± 7	72 ± 0.1	8400 ± 110	9450 ± 110 (9540 ± 110)
final	6.4 ± 0.02 (4.0 ± 0.02)	0.3 ± 0.02 (0.2 ± 0.01)	0.1 ± 0.008	0.1 ± 0.001	0.01 ± 0.008	0.5 ± 0.02 (0.4 ± 0.02)



7 Тау -нейтрино



Астрофизические нейтрино

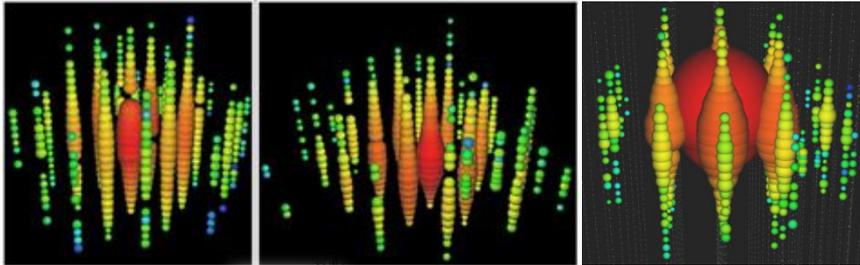
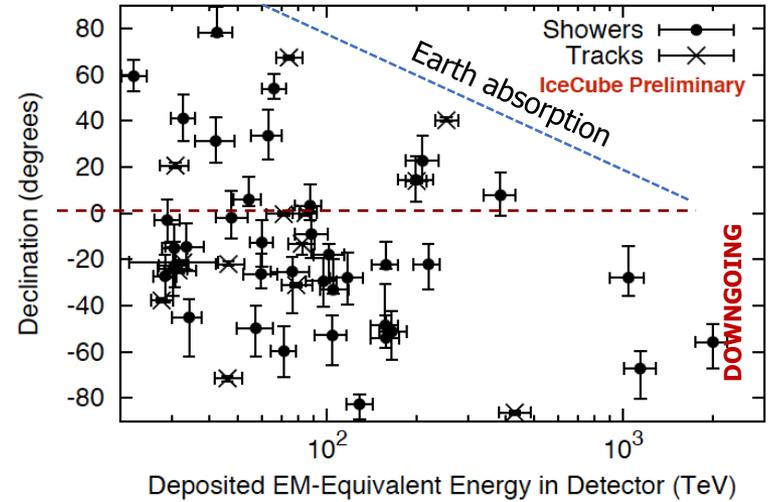
first evidence for an extra-terrestrial flux
shown at IPA2013 [*IceCube, Science 342 (2013)*]

[*IceCube, Phys.Rev.Lett. 113:101101 (2014)*]

- 3 yrs: 37 events in 988 days
 - bkg. 8.4 ± 4.2 atm. μ and $6.6 + 5.9$ atm. ν
 - **4 years: 54 events**
- mostly ν_e CC and NC cascades

5.7σ

$\sim 7\sigma$



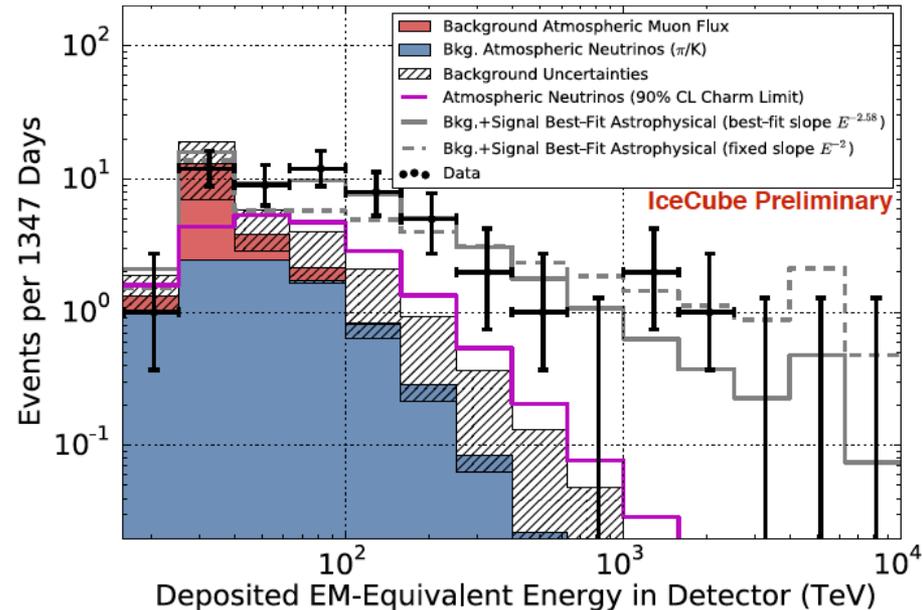
"Bert"
1.04 PeV
Aug. 2011



"Ernie"
1.14 PeV
Jan. 2012



"Big Bird"
2 PeV
Dec. 2012



- zenith distrib. \sim isotropic astrophysical flux

Открытие локального источника нейтрино

22.09 1917 IceCube зарегистрировал нейтринное событие с Энергией ~ 290 ТэВ. Направление совпадает с направлением на блазар TXS -0506+056 (в созвездии Ориона)

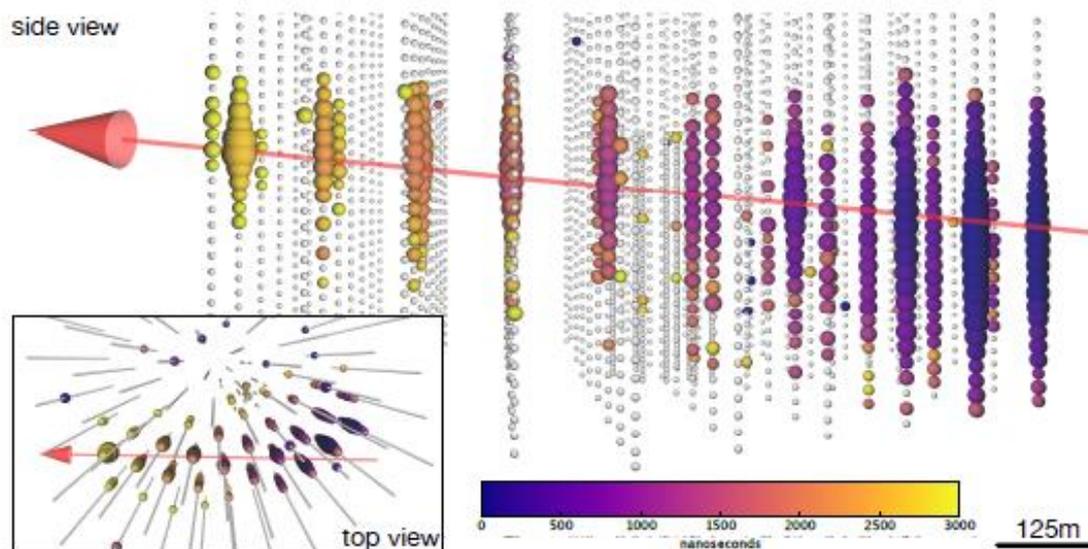
Эксперимент.
(RA) 77:43+0:95 - 0:65
(Dec) +5:72+0:50 -0:30 (degrees)

положение блазара
RA 77.36 degrees
Dec +5.69 degrees

Вероятность, что это не атмосферное нейтрино $\sim 56\%$

$E_p \sim 20 \times E_\nu$
 $\sim 6 \cdot 10^{15}$ эВ

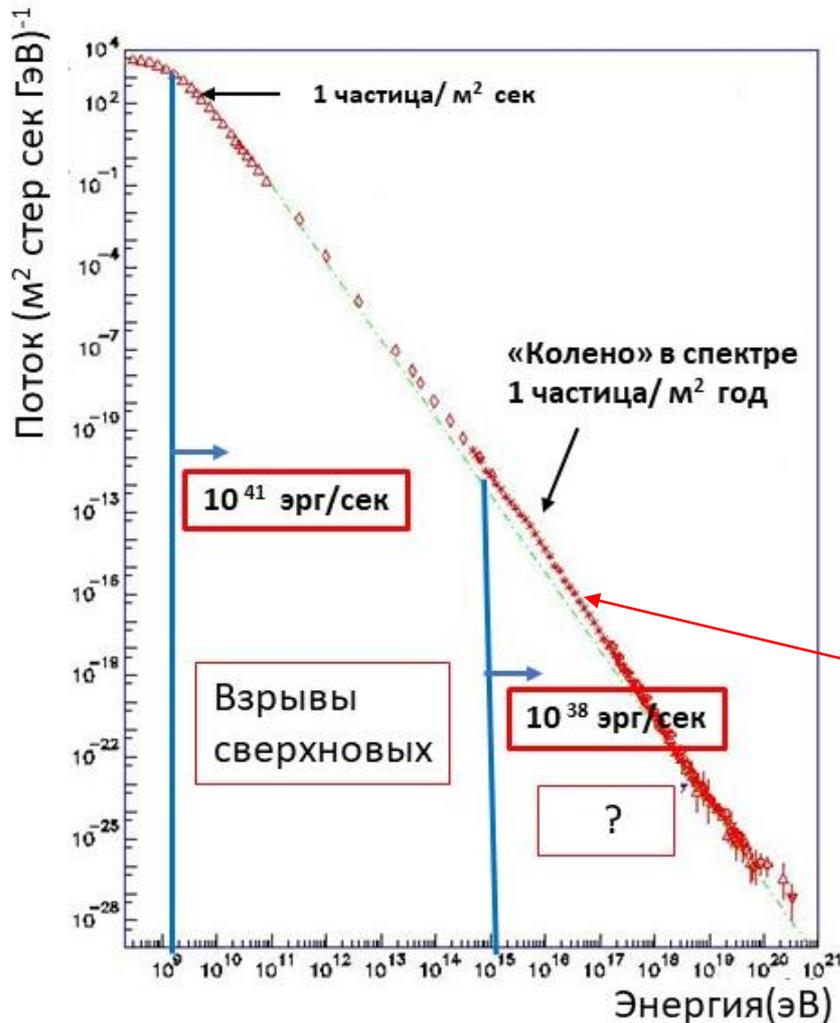
Энергия
нейтрино
280 ТэВ



5800 ф.э

Мюон
выделил
22 ТэВ

Космические лучи: от 10^{15} до 10^{18} эВ (от «колена до лодыжки»)



$$P(E) = \Delta P / \Delta E = A E^{-\gamma}$$

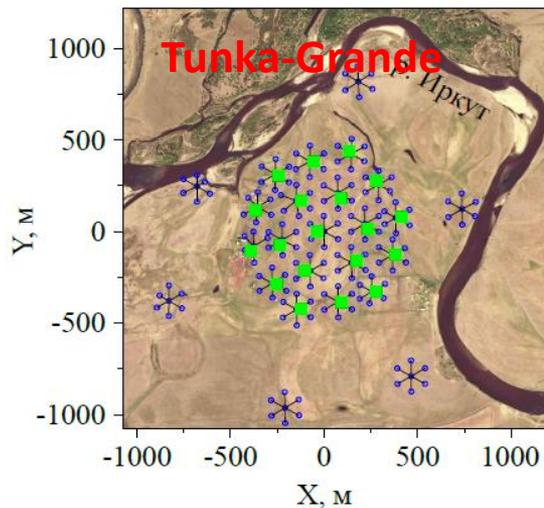
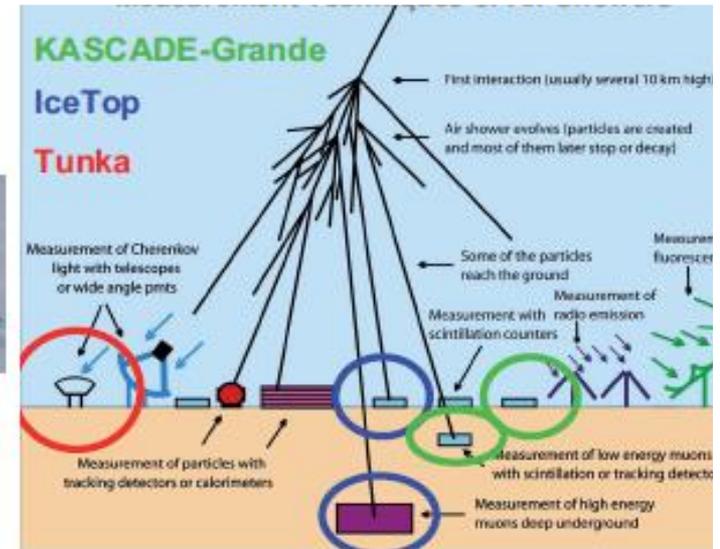
γ : от 2.7 до 3

$E < 10^{17}$ эВ - Галактические
космические лучи

$E > 10^{18}$ эВ - Метагалактические
космические лучи

Галактические Пэватроны

Установки с площадью $\sim 1 \text{ км}^2$



Задачи установок: Восстановить энергетический спектр и массовый состав космических лучей

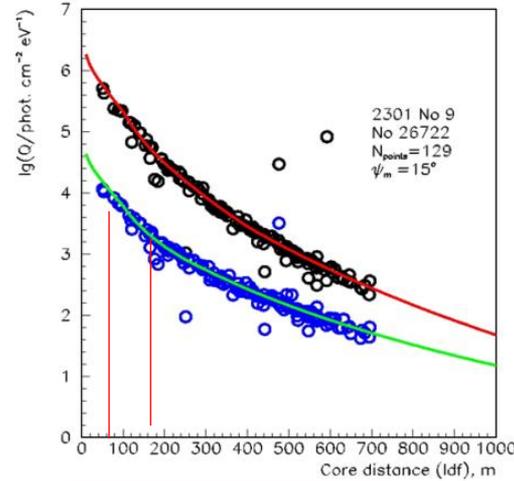
Широкоугольные черенковские установки для измерения пространственно-временных характеристик черенковского излучения ШАЛ

Энергия ШАЛ

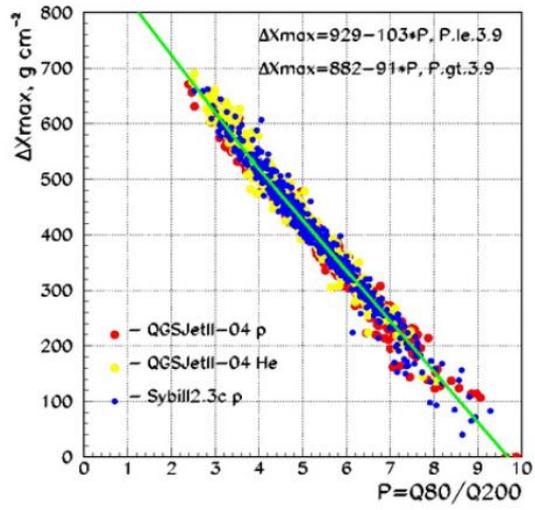
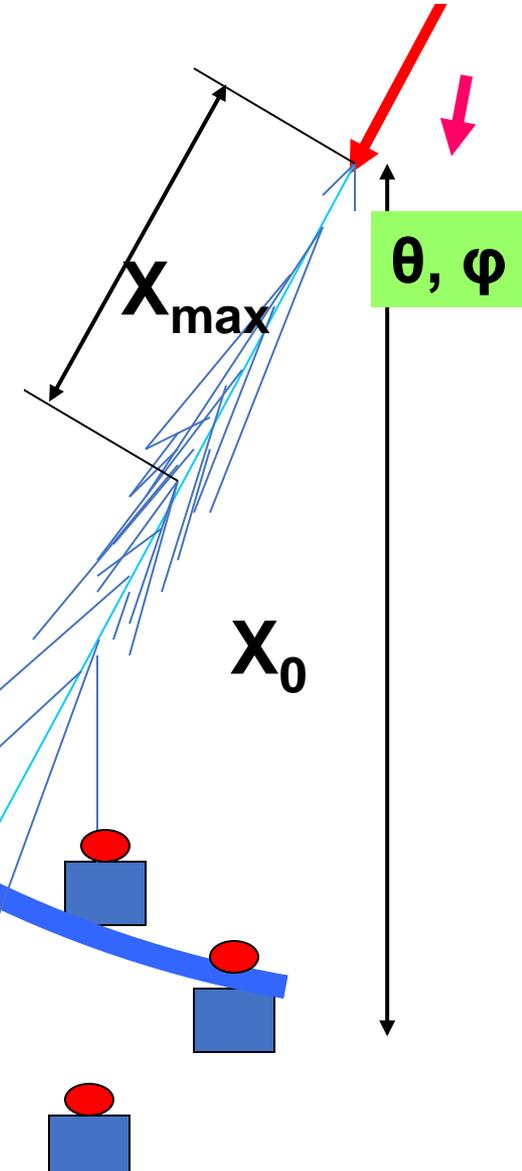
$$E = A \cdot [Q(200m)]^g$$

$g = 0.94 \pm 0.01$ (при $E = 10 - 1000$ ПэВ)

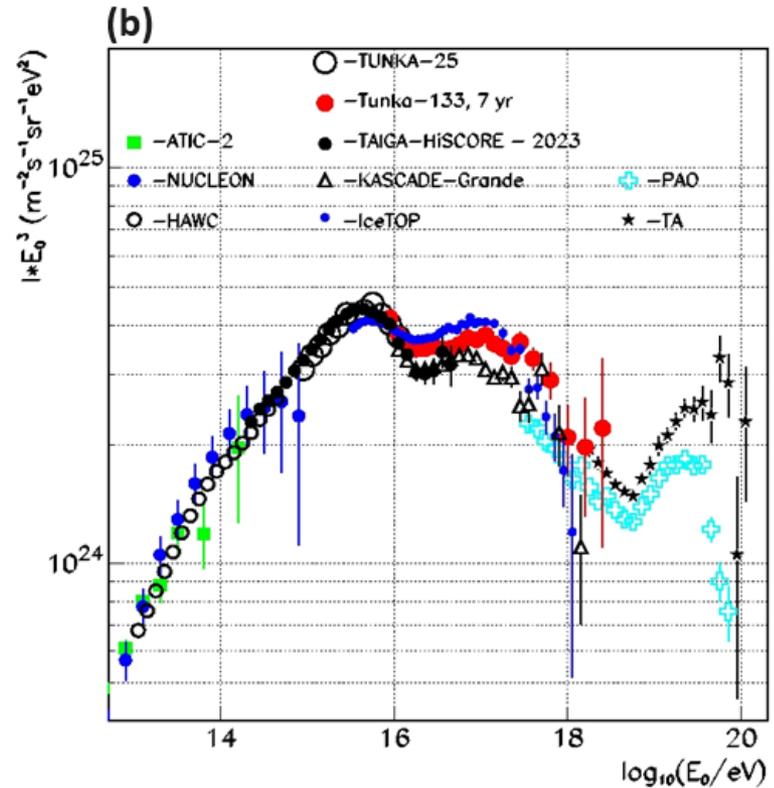
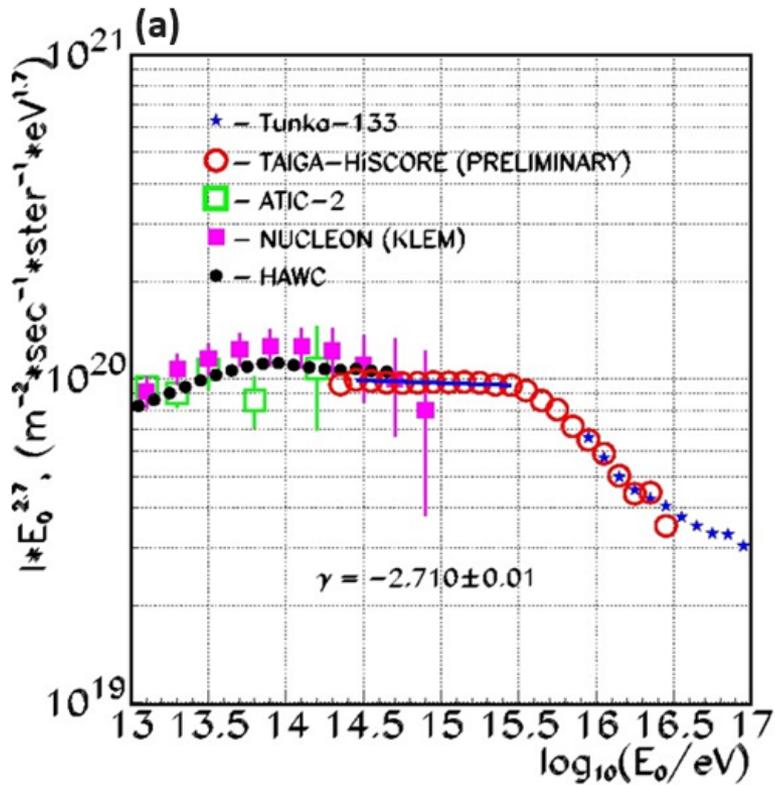
- 1 Положение оси ШАЛ: 5 -10 м
- 2 Угловое разрешение: ~ 0.1 град.
- 3 Энергия ШАЛ: $\sim 15\%$)
- 4 X_{\max} : $\sim 20 -25$ g/cm²)



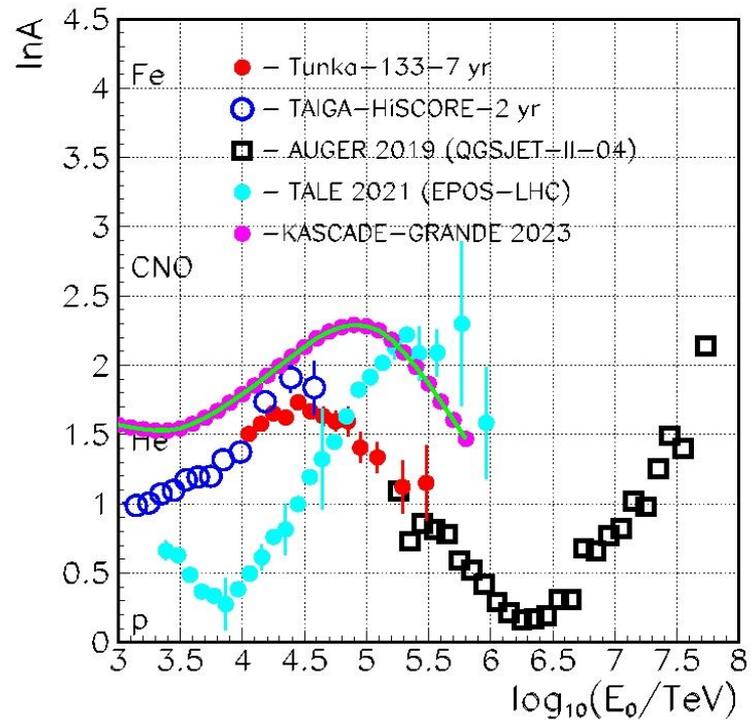
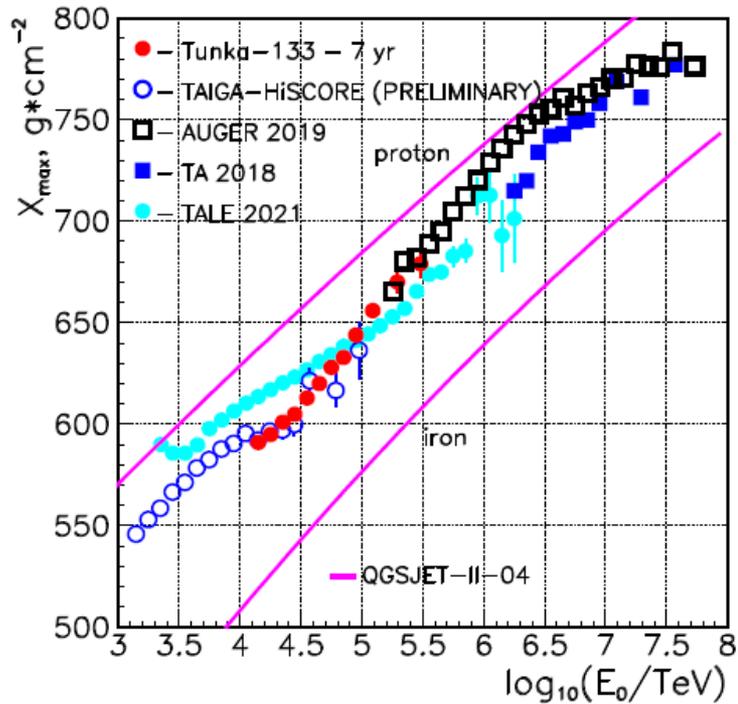
$$P = Q80/Q200$$



Энергетический спектр

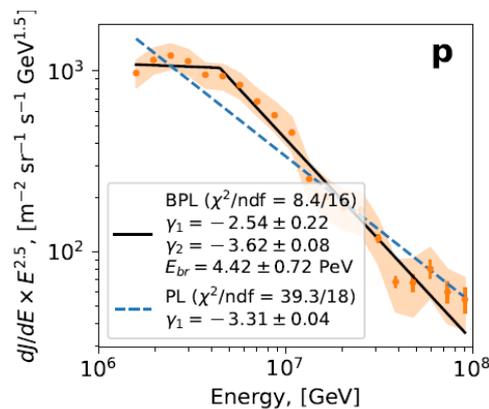
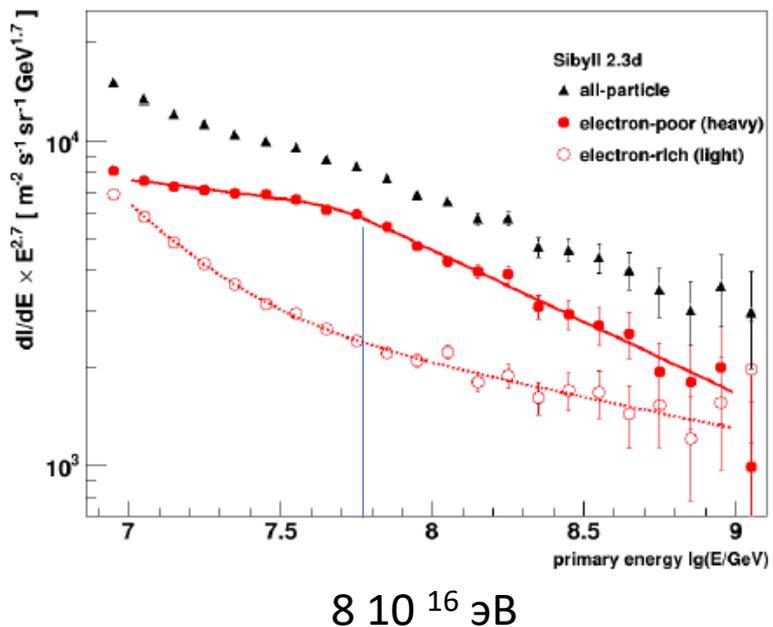


Средний массовый состав

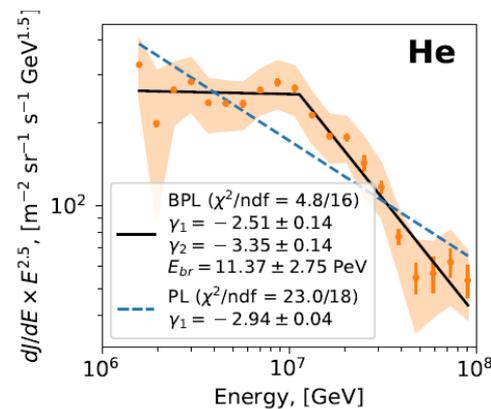


Новый анализ данных KASCADE по спектру групп ядер (2312.08279)

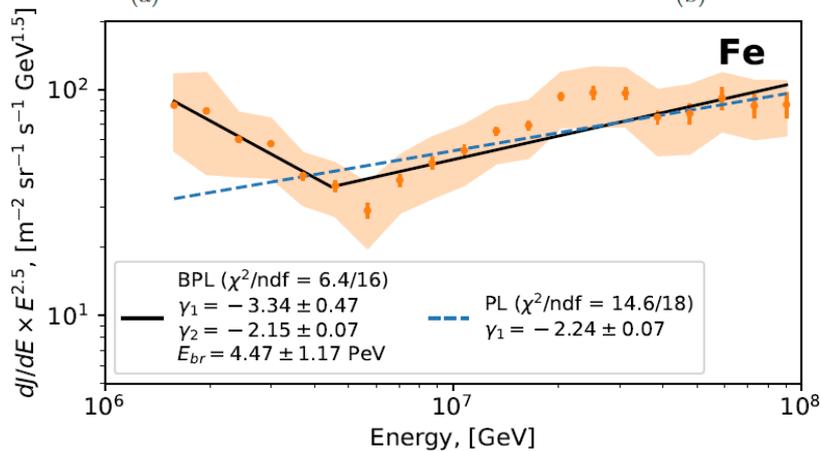
2011 год



(a)



(b)



(c)

$E_{\text{max}} \sim Z$ (заряд ядра)

CNN

2312.08279

Заключение

Методы машинного обучения важны для
Астрофизики частиц высоких энергий и
Область их использования будет
расширяться.

Спасибо за внимание