

# Астрофизика частиц и анализ экспериментальных данных

Кузьмичев Л.

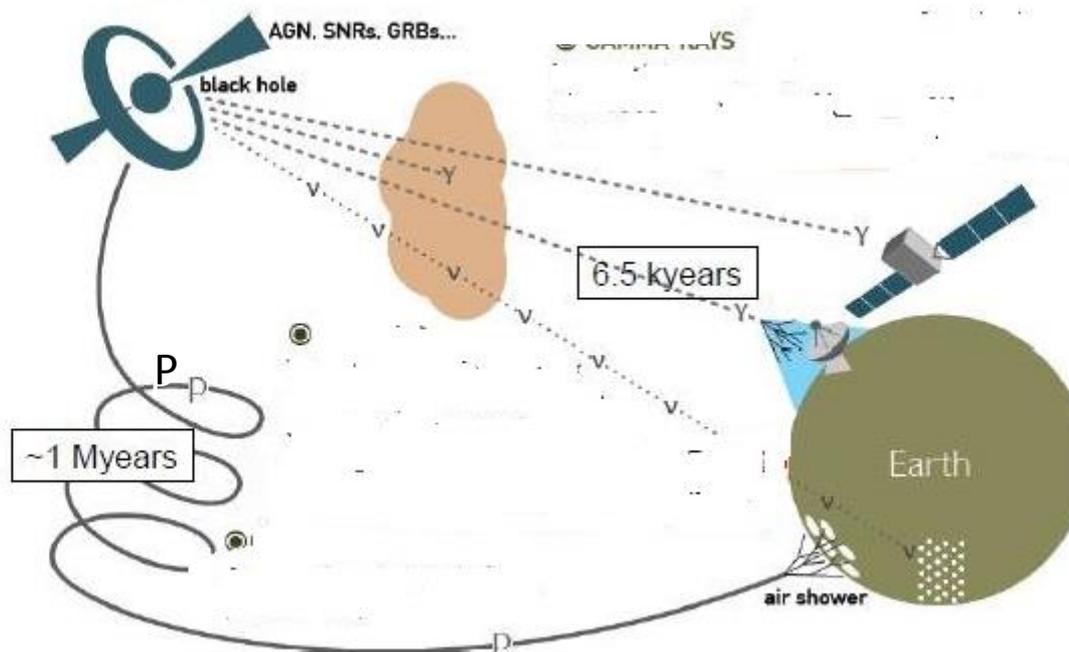
21.06 2024

# 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

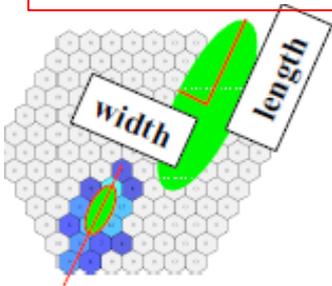
Черенковский  
свет

Эффективная площадь= $10^5 \text{ m}^2$

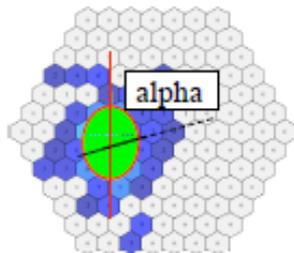
Черенковский телескоп  
(IACT – Imaging Atmospheric  
Cherenkov Telescope)

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

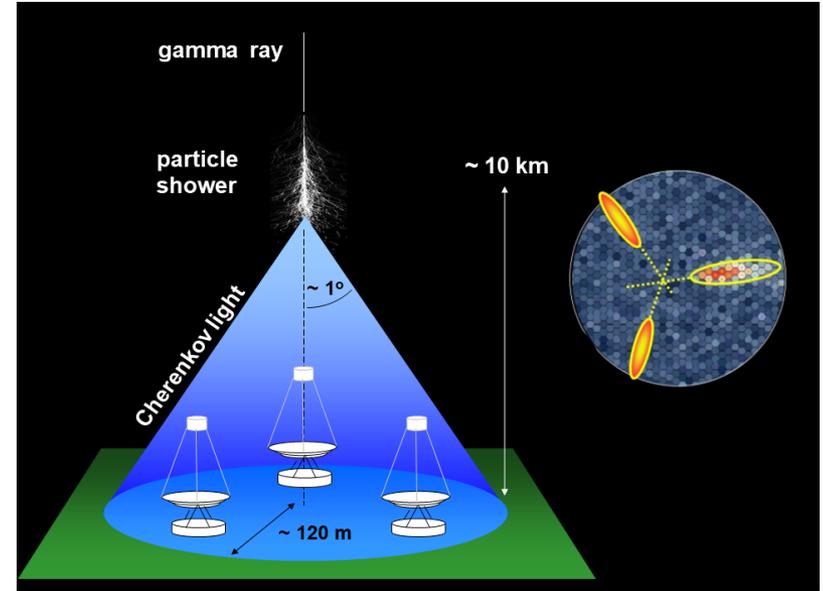
ШАЛ от гамма- кванта



ШАЛ от протона



Сtereo метод



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

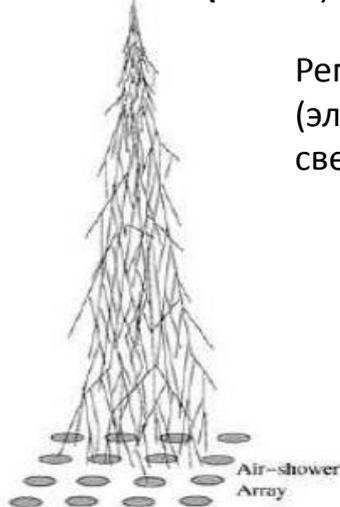
$10 \text{ m}^2 \rightarrow 1 \text{ ТэВ}$

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

# Установки, регистрирующие заряженную компоненту ШАЛ

**Энергетический порог:**  
для высоты 4000 м  $\sim 1$  ТэВ  
для уровня моря  $\sim 1$  ПэВ

Гамма –квант ( $>1$  ТэВ)



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

«Компактность»  
Установка HAWC

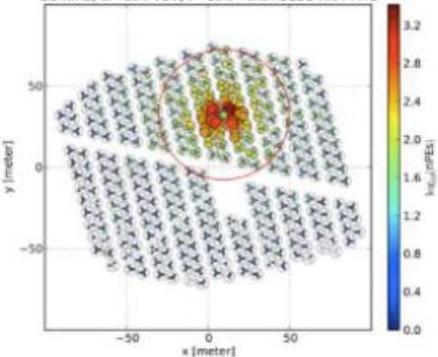
Режекция ШАЛ от протонов

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

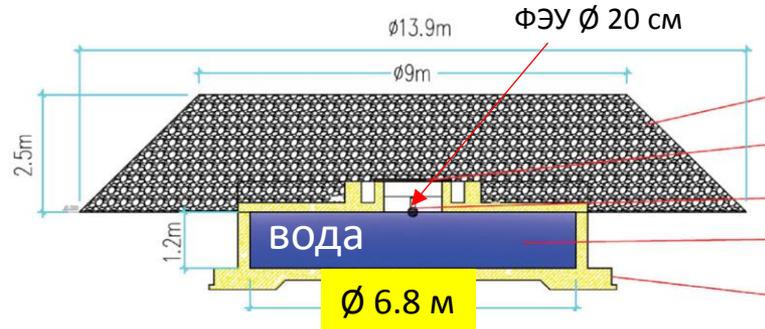
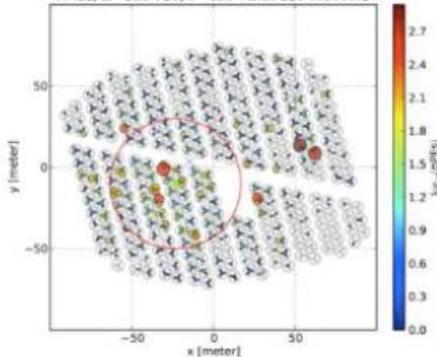
$E_\gamma = 20$  TeV

$E_p = 20$  TeV

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

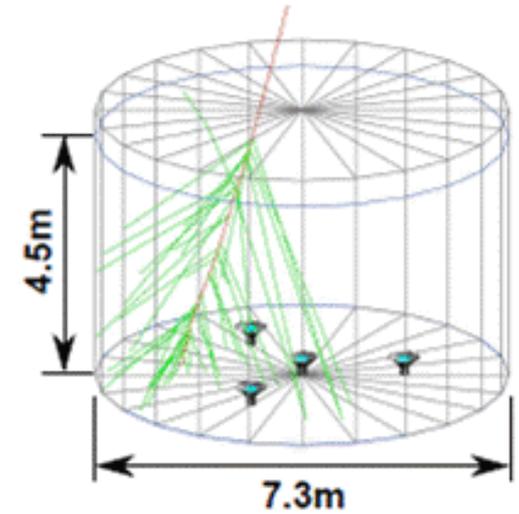
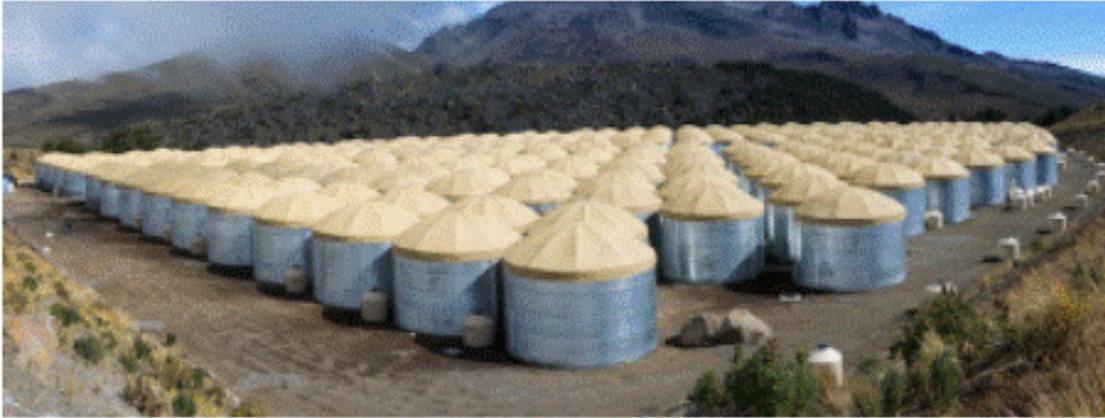


PPi.us,  $E=24.0$  TeV,  $\theta=43.5^\circ$  with 837 Hit PMTs



В установке LHAASO 1100 мюонных детекторов

# HAWS 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

## Muon content

$Compactness = N_{hit} / C_{xPE40}$       ( число p.e вне 40 м)

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

DisMax - расстояние в метрах между ФЭУ с наибольшими амплитудами

Восстановление энергии  
 программа  
 Neural network  
 ( 0703039

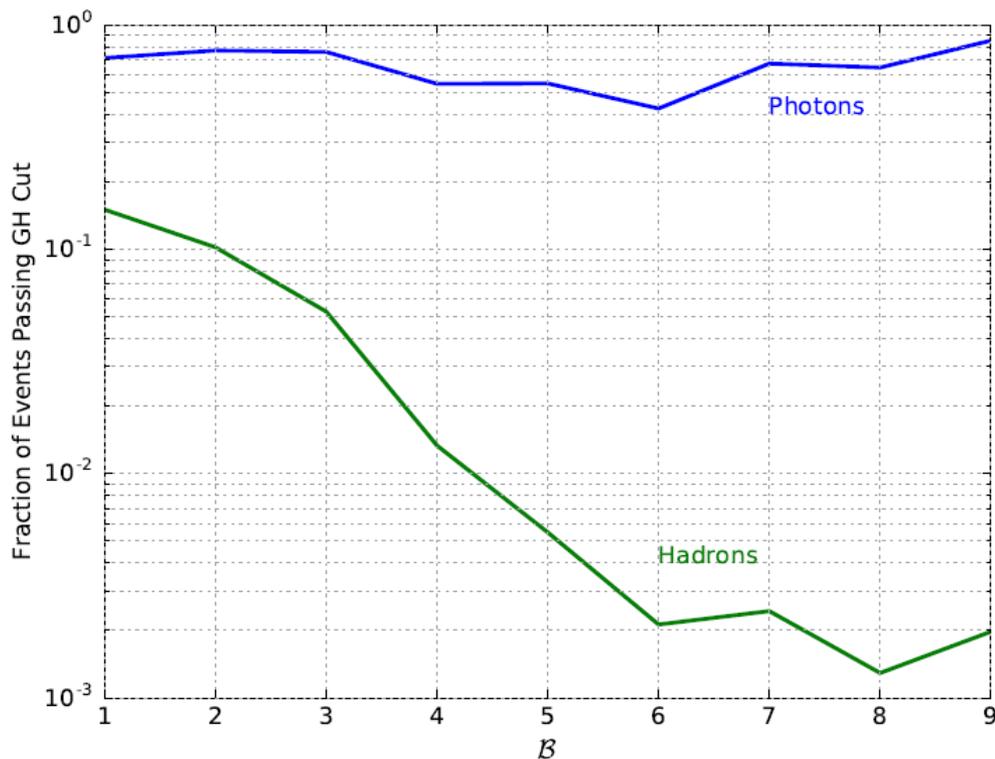
## Функция пространственного распределения (ФПР)

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

50 TeV

# Зависимость коэффициента режекции адронов от энергии

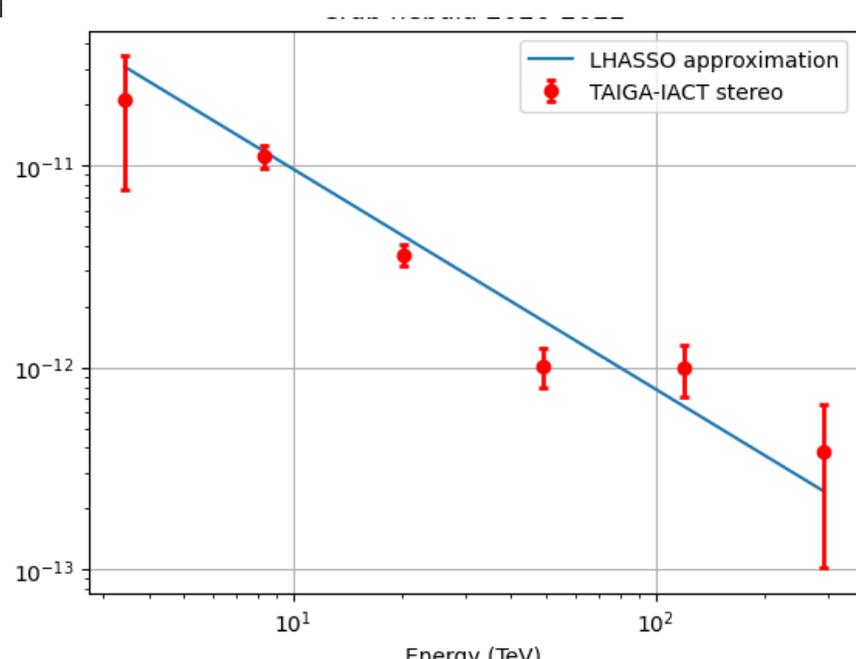
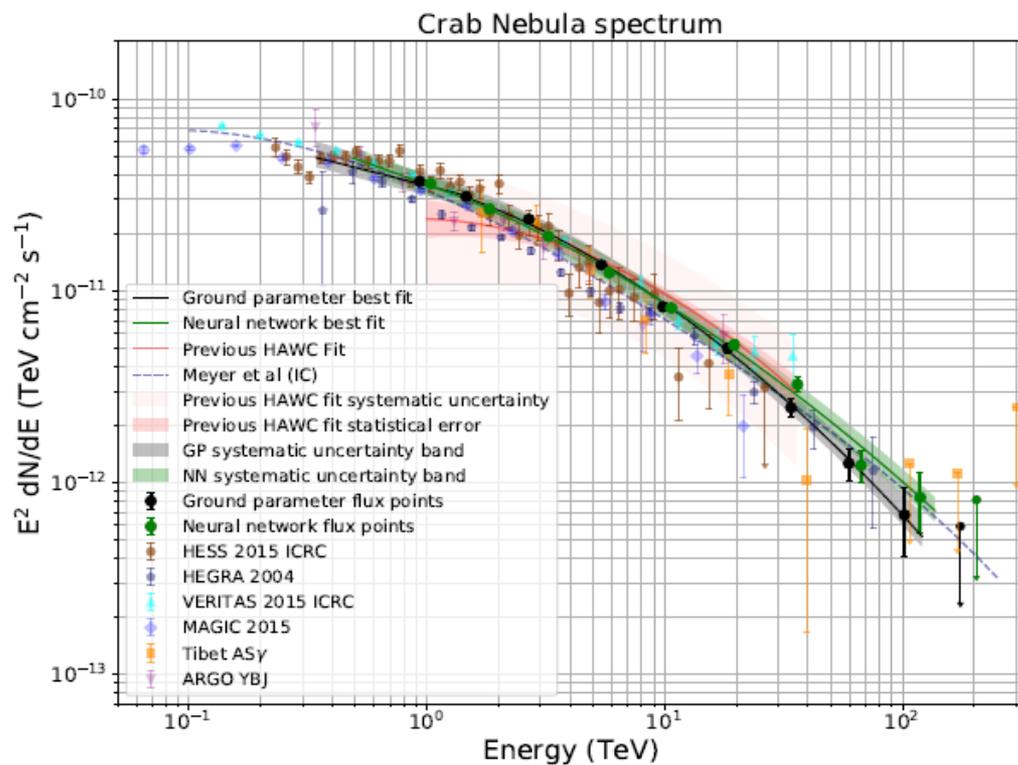
Стандартный подход (1701.01778)



PoS (icrc2021)745

**Use of Machine Learning for gamma/hadron separation with HAWC**

# Спектр гамма-квантов от Крабовидной туманности

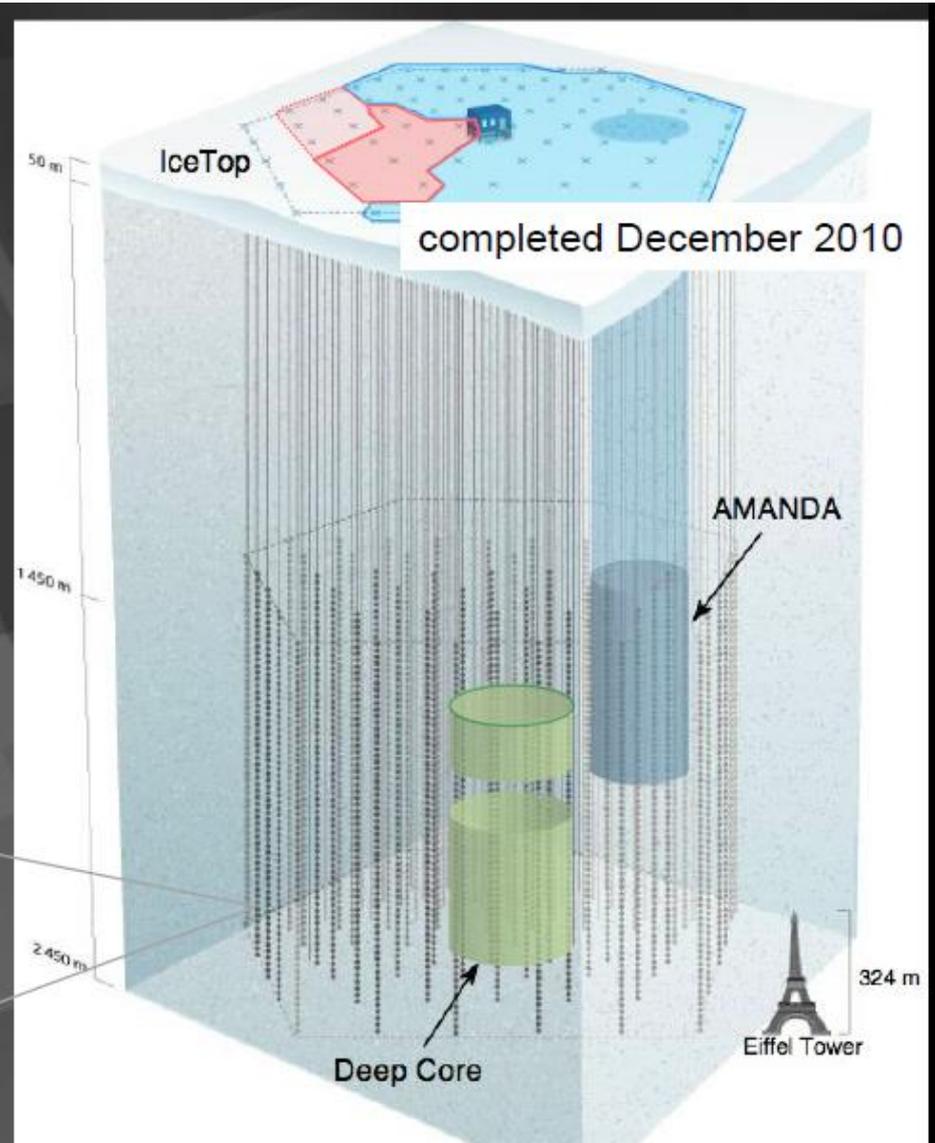
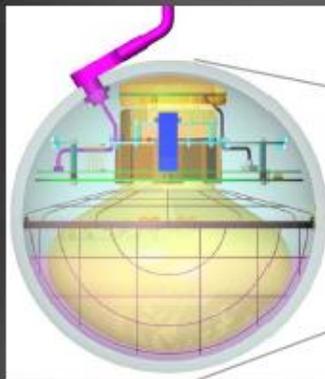


# Нейтринная астрофизика

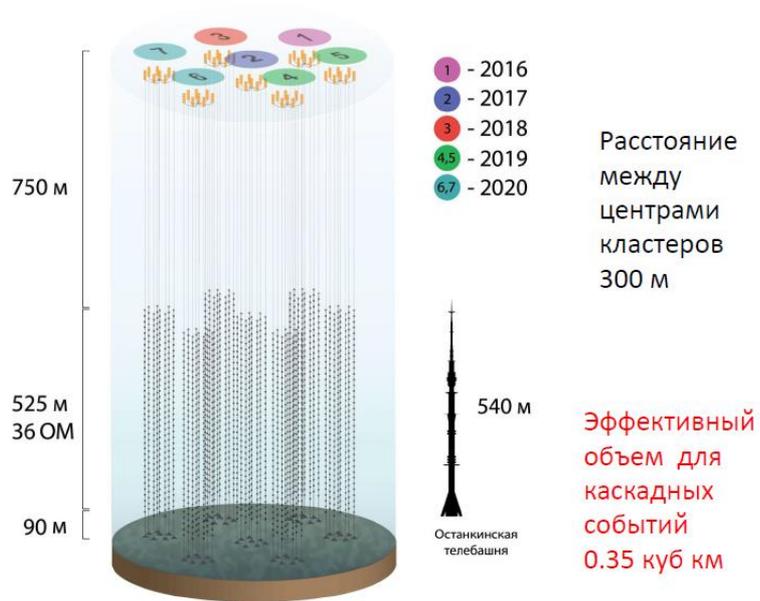
# Ice Cube

## 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 - 1km<sup>3</sup>



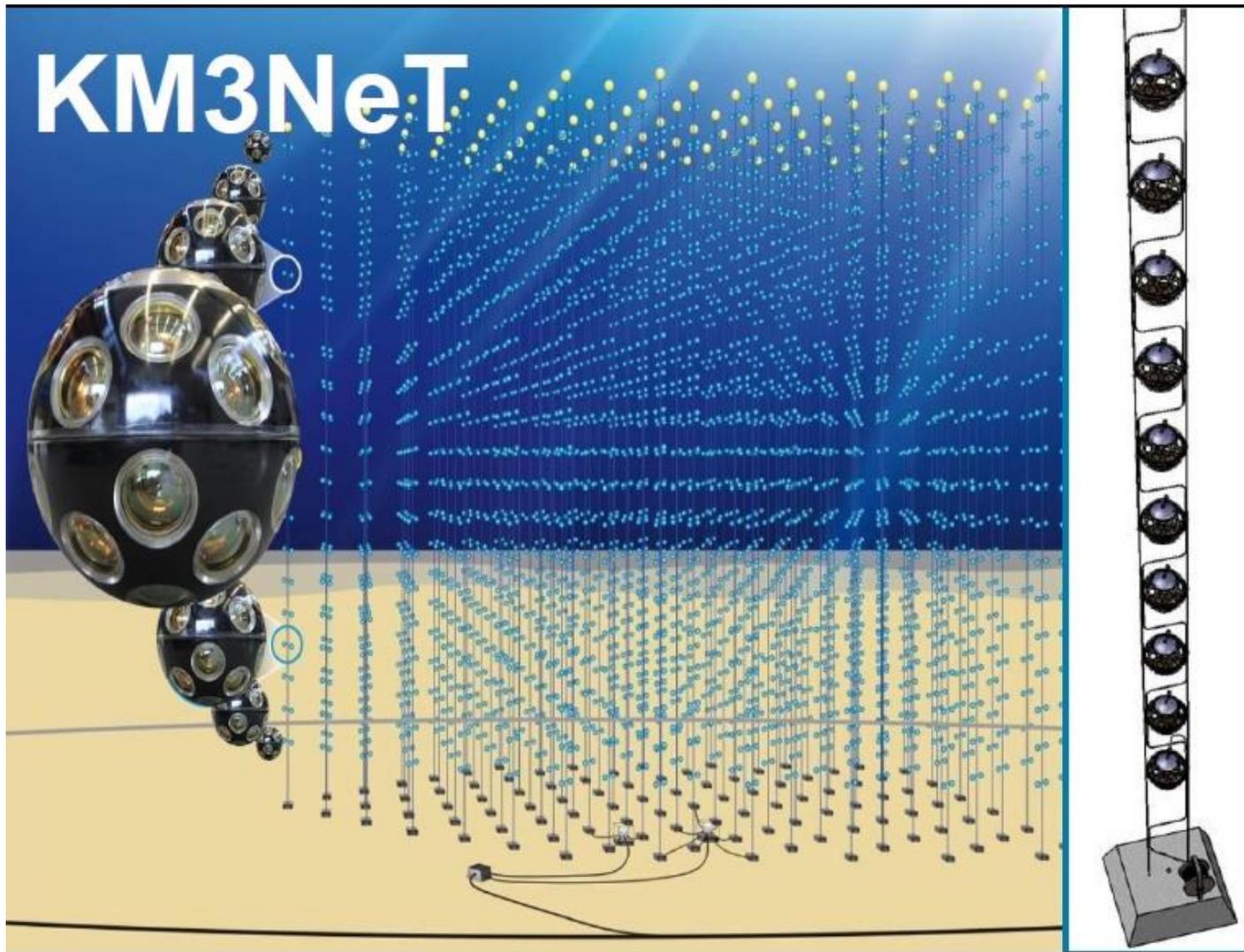
План развертывания детектора

Год	Суммарное число кластеров	Число ОМ
2016	1	288
2017	2	576
2018	3	864
2019	5	1440
<b>2020</b>	<b>7</b>	<b>2016</b>
2021	9	2592

2024 –  
14 кластеров

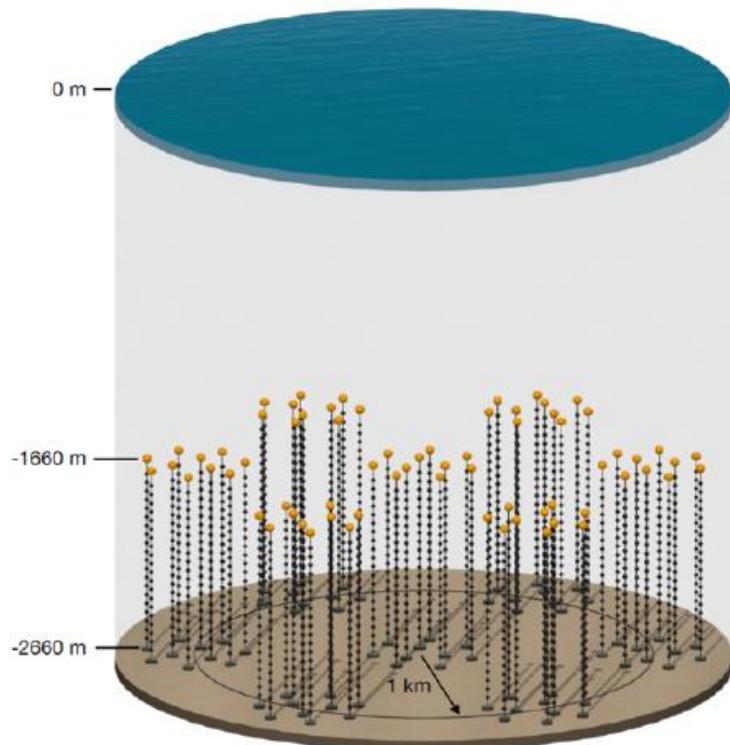


# KM3NeT – в средиземном море (1 км<sup>3</sup>)

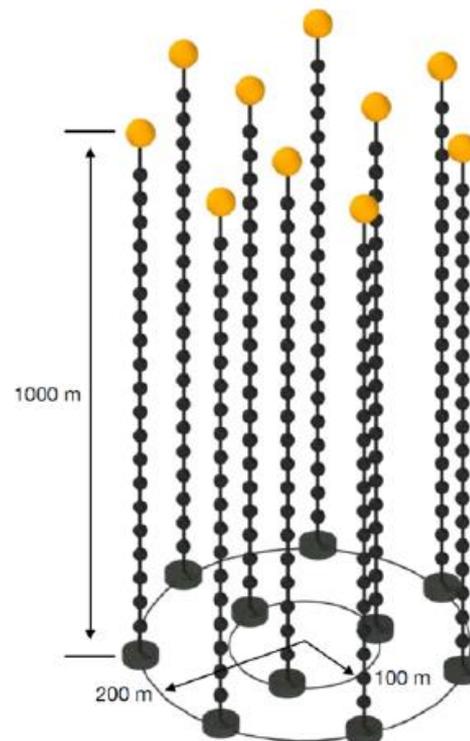


# Pacific Ocean Neutrino Experiment (P-ONE) – 1 км<sup>3</sup>

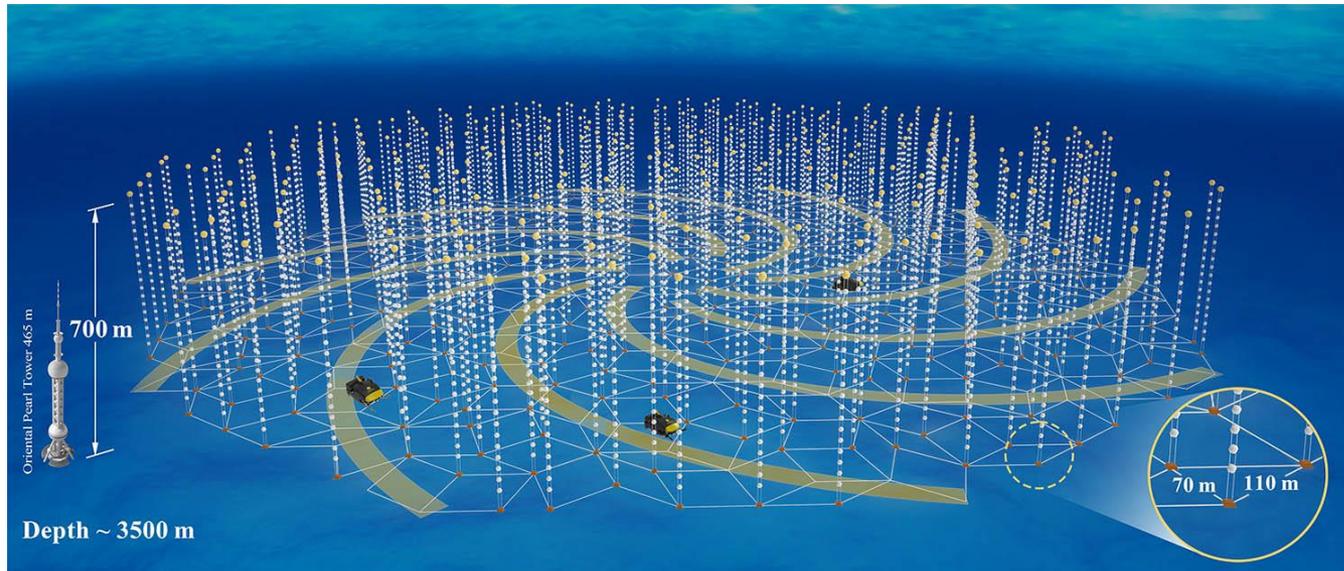
7 кластеров



10 стрингов



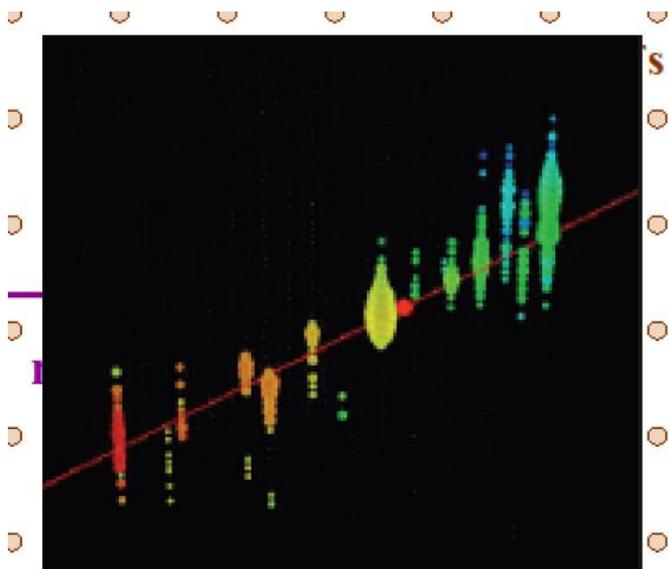
# Trident – нейтринный телескоп в Южно-Китайском море



1200 стрингов, объем 8 км<sup>3</sup>

Будет готов к 2030 году!

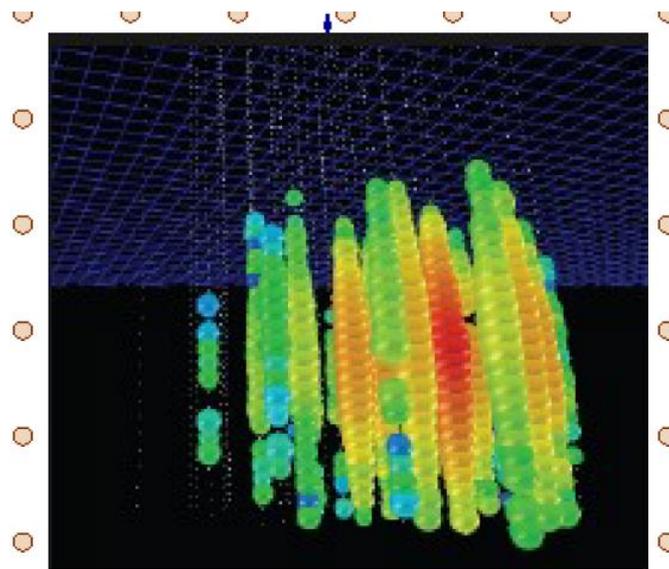
# Что регистрируют нейтринные телескопы



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

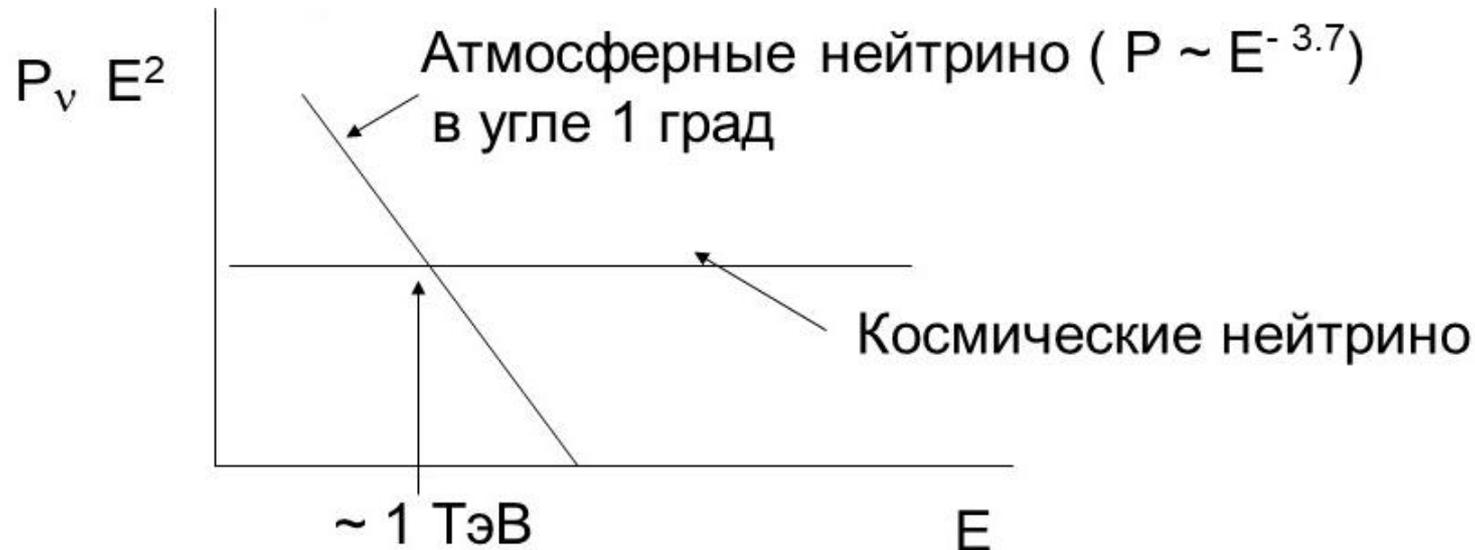
На Земле :  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1:1:1$     Осцилляции нейтрино

# Источники фона

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

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

$P_{\text{astr}}$  - 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.*

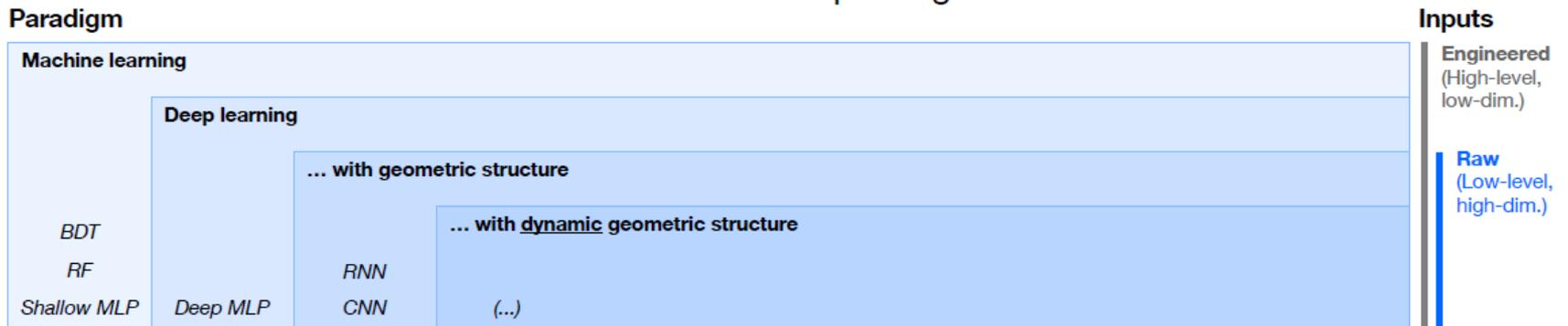
+ Many not-yet-public efforts

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

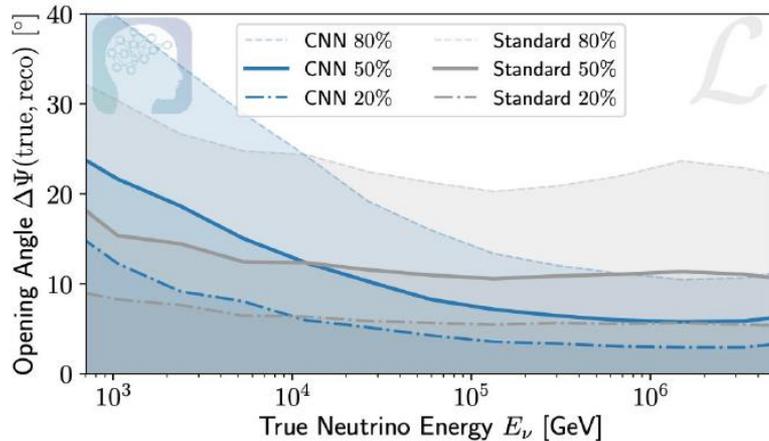


# Результаты применения ML

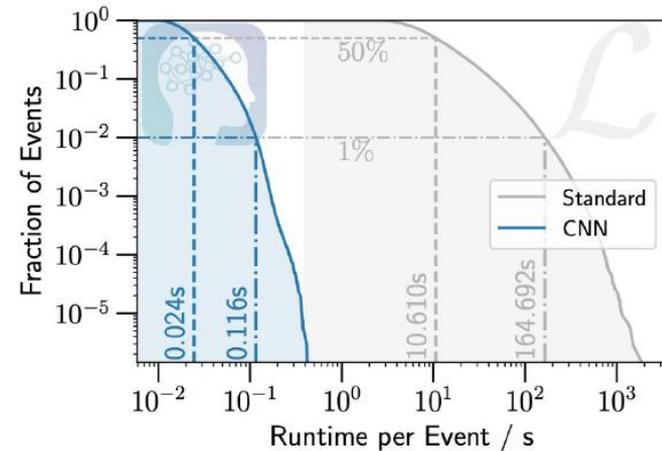
## CNNs

### Точность реконструкции каскадов

50% improvement in resolution at high energies



2-3 orders of magnitude reduction in reconstruction time<sup>1</sup>

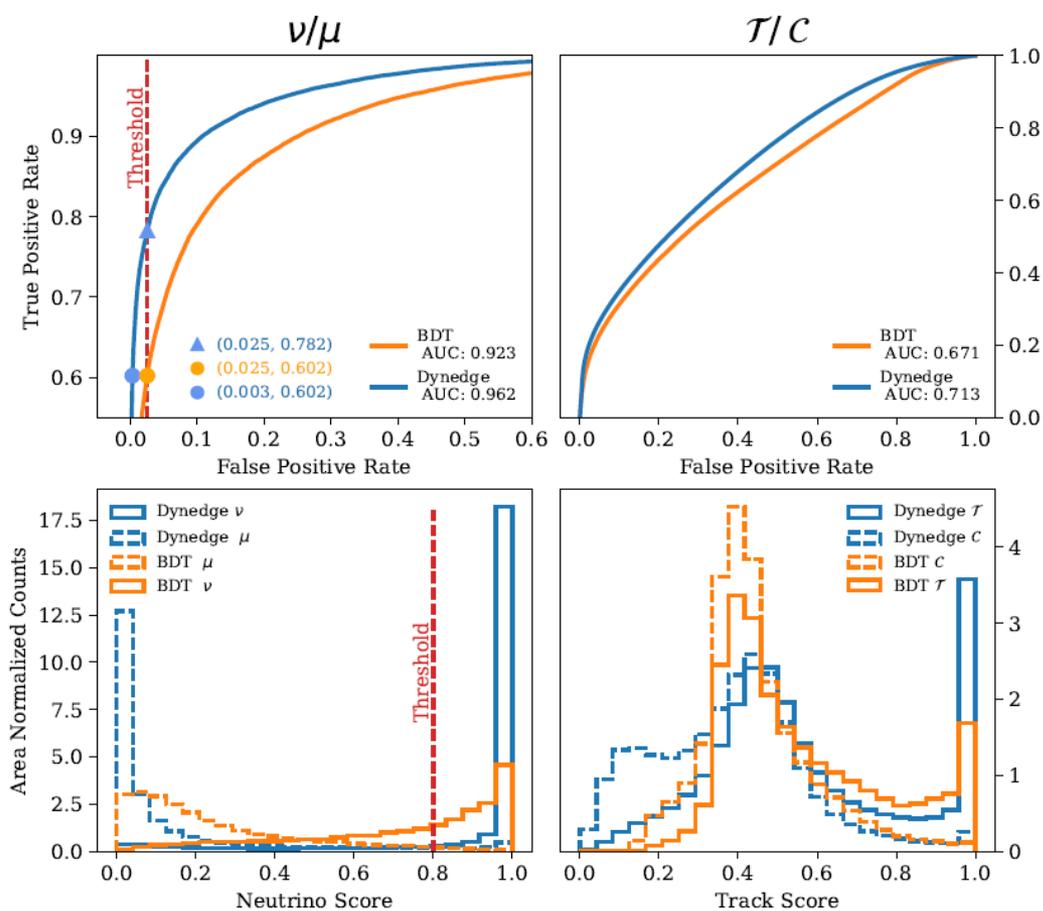


2101.11589

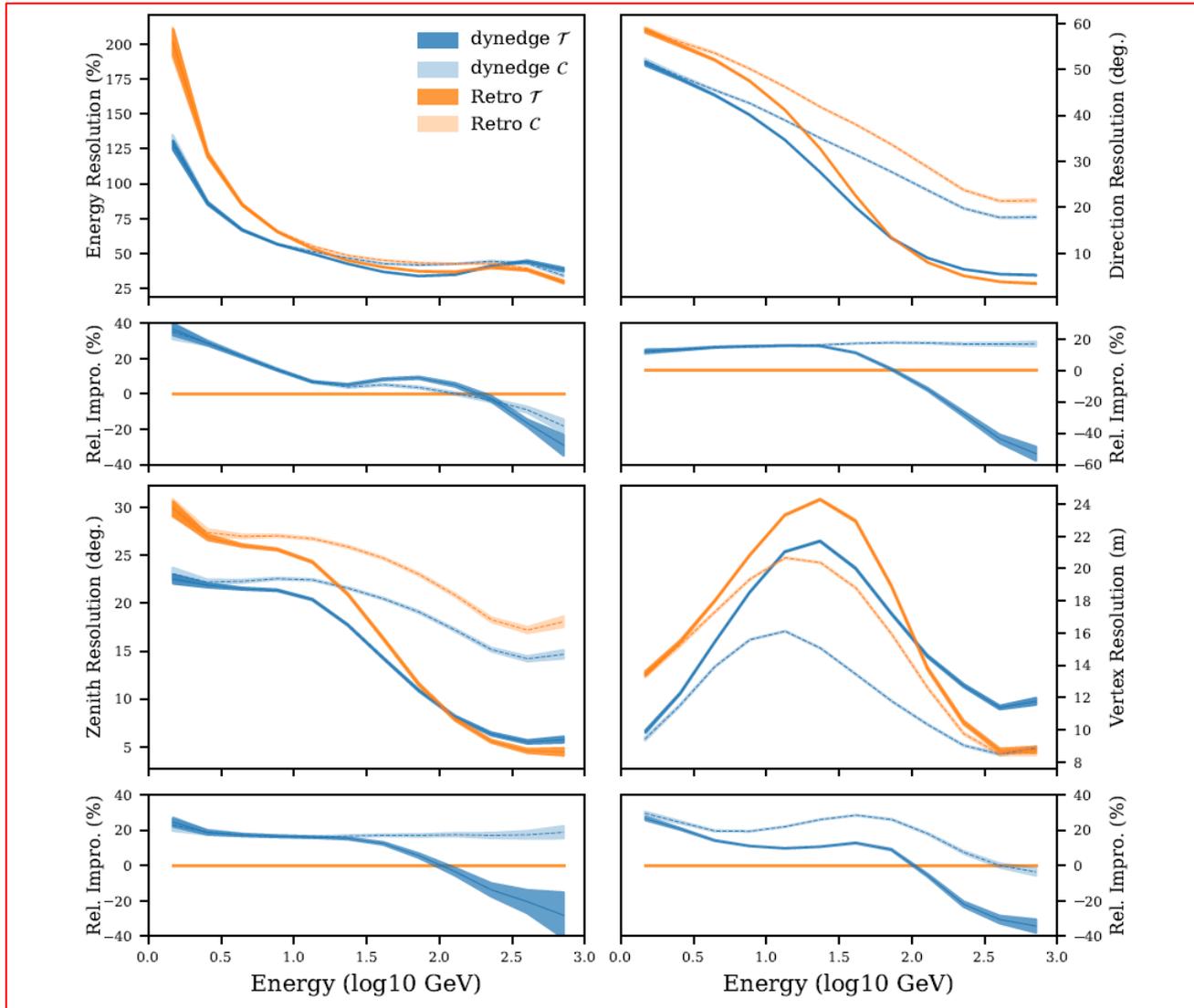
# Graph Neural Networks for Low energy events Classification & Reconstruction (2209.03042)

Targets	Description	Residual Definition
$\nu/\mu$	Classification of neutrino vs. muon events	–
$E$	Deposited energy of neutrino interaction	$R_E = \log_{10}(E_{\text{reco}}) - \log_{10}(E_{\text{true}})$
$\theta, \phi$	Zenith and azimuth angles of neutrino	$R_{\text{angle}} = \text{angle}_{\text{reco}} - \text{angle}_{\text{true}}$
$\vec{r}$	Direction vector of neutrino	$R_{\vec{r}} = \arccos \frac{\vec{r}_{\text{reco}} \cdot \vec{r}_{\text{true}}}{ \vec{r}_{\text{reco}}   \vec{r}_{\text{true}} }$
$V_{\text{xyz}}$	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	–

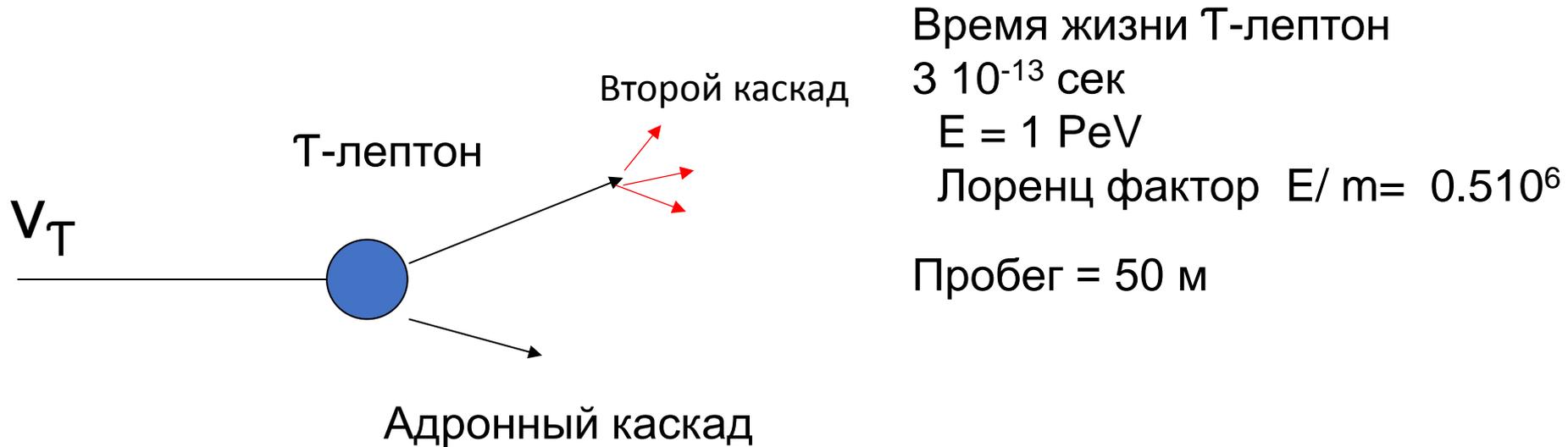
# Классификация событий



# Улучшение реконструкции (GNN)



# Выделение событий от $T$ – нейтрино: двойной каскад



Время жизни  $T$ -лептон

$3 \cdot 10^{-13}$  сек

$E = 1$  PeV

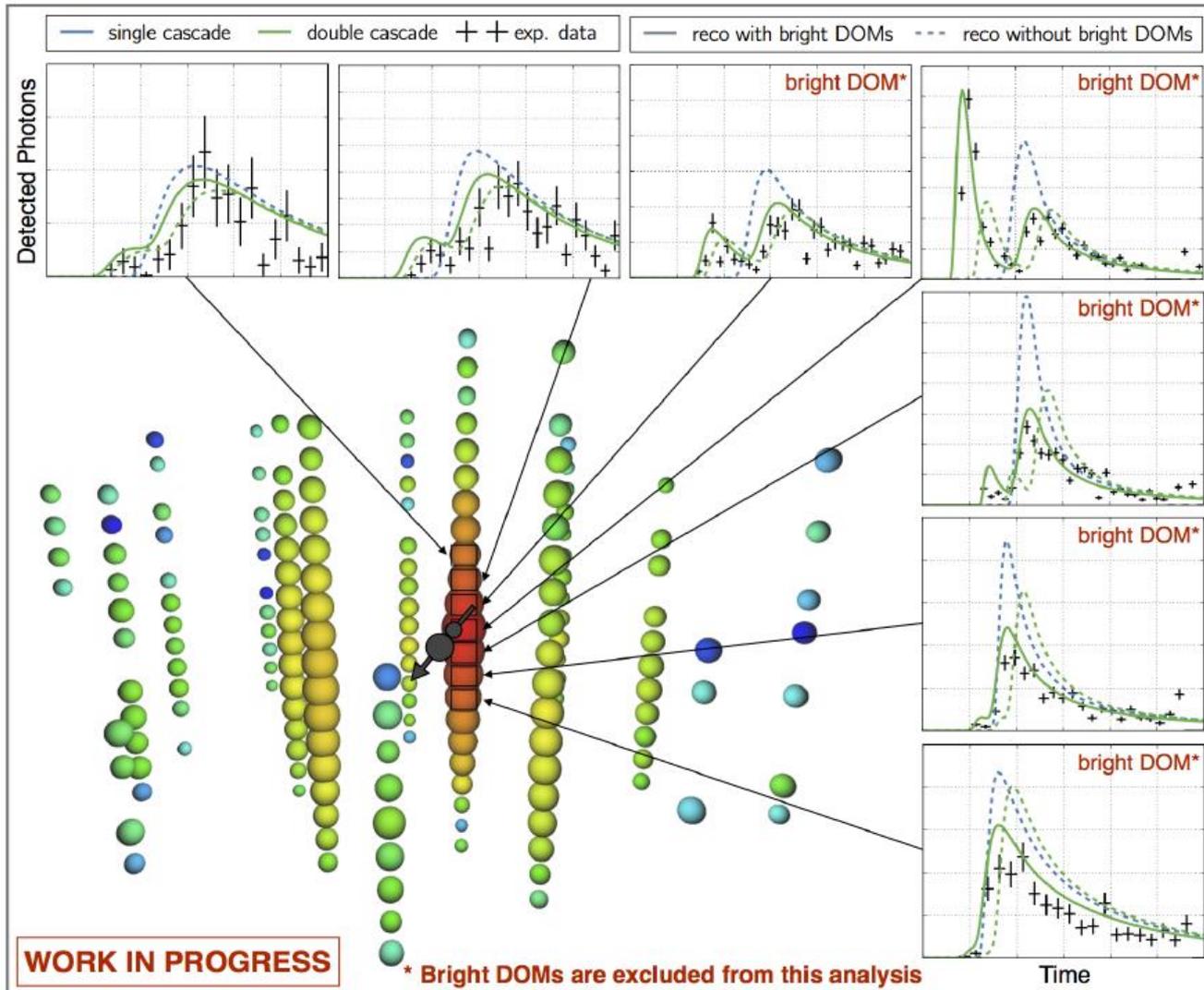
Лоренц фактор  $E/m = 0.5 \cdot 10^6$

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

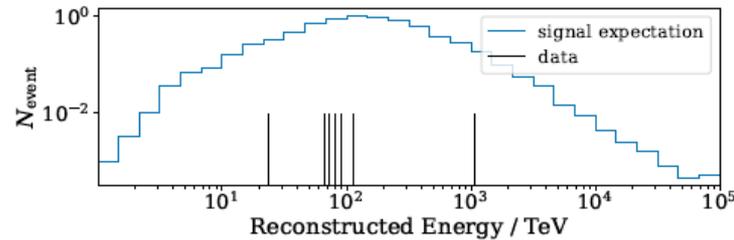
В 2024 – 7 тау  
нейтрино  
Новым методом

# Новый поиск тау-нейтрино (CNN) 50 ТэВ – 1ПэВ

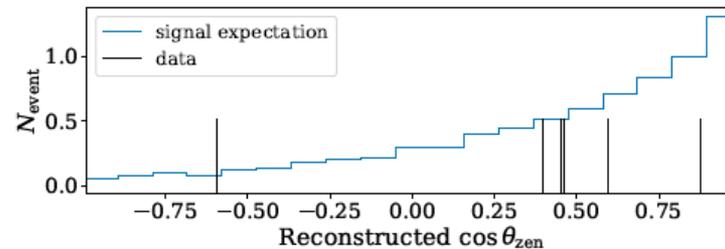
Данные за 10 лет

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	$160 \pm 0.2$ ( $190 \pm 0.3$ )	$400 \pm 0.7$ ( $490 \pm 0.8$ )	$580 \pm 7$	$72 \pm 0.1$	$8400 \pm 110$	$9450 \pm 110$ ( $9540 \pm 110$ )
final	$6.4 \pm 0.02$ ( $4.0 \pm 0.02$ )	$0.3 \pm 0.02$ ( $0.2 \pm 0.01$ )	$0.1 \pm 0.008$	$0.1 \pm 0.001$	$0.01 \pm 0.008$	$0.5 \pm 0.02$ ( $0.4 \pm 0.02$ )



7 Тау -нейтрино



# Астрофизические нейтрино

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

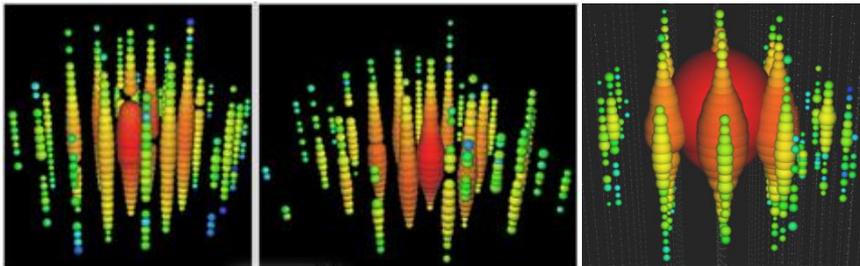
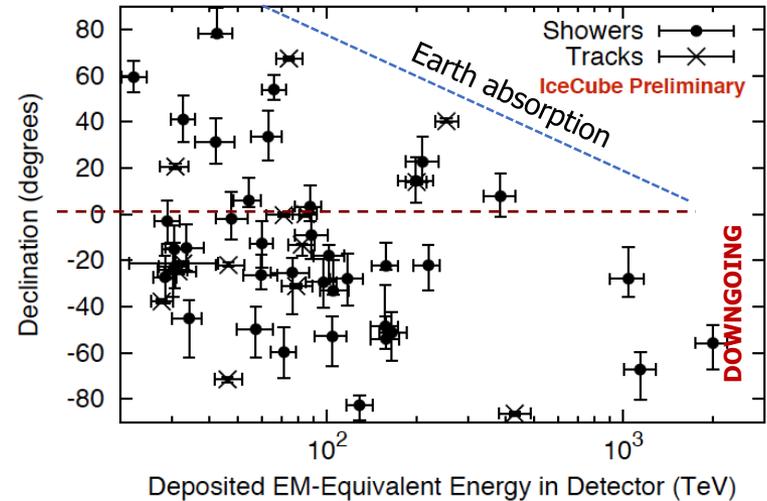
[*IceCube, Phys.Rev.Lett. 113:101101 (2014)*]

- 3 yrs: 37 events in 988 days
- bkg.  $8.4 \pm 4.2$  atm.  $\mu$  and  $6.6 + 5.9$  atm.  $\nu$
- **4 years: 54 events**

mostly  $\nu_e$  CC and NC cascades

$5.7\sigma$

$\sim 7\sigma$



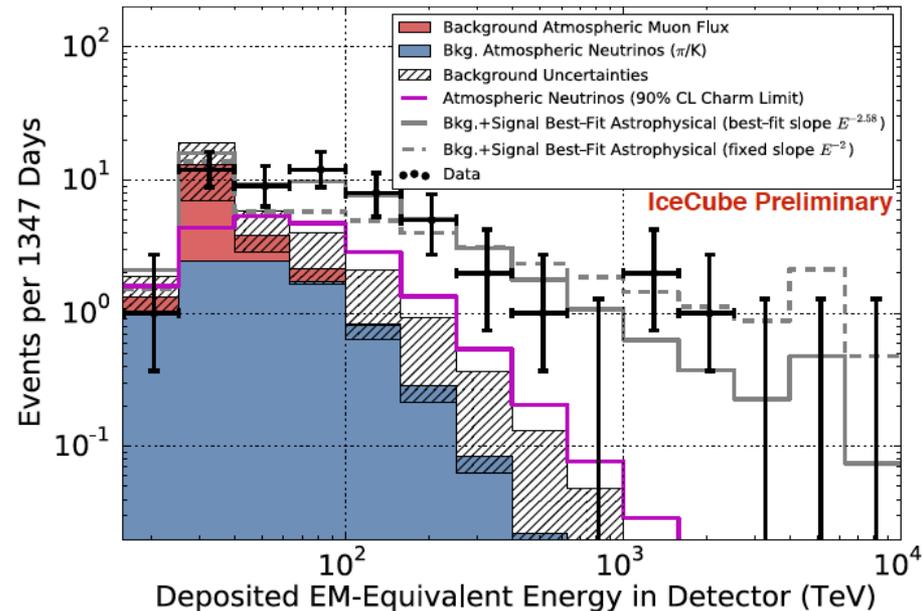
"Bert"  
1.04 PeV  
Aug. 2011



"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  $\sim 290$  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

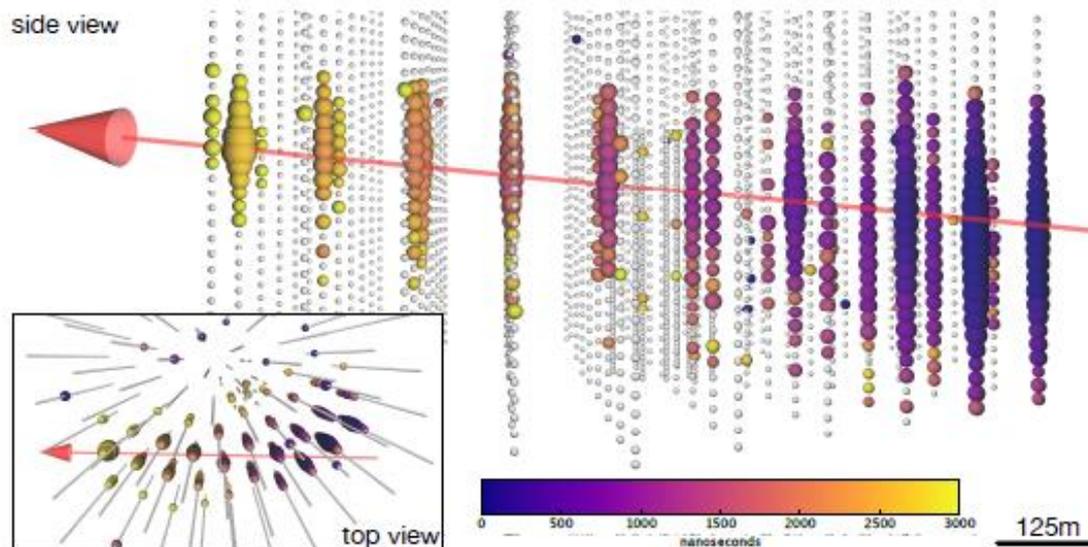
RA 77.36 degrees

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

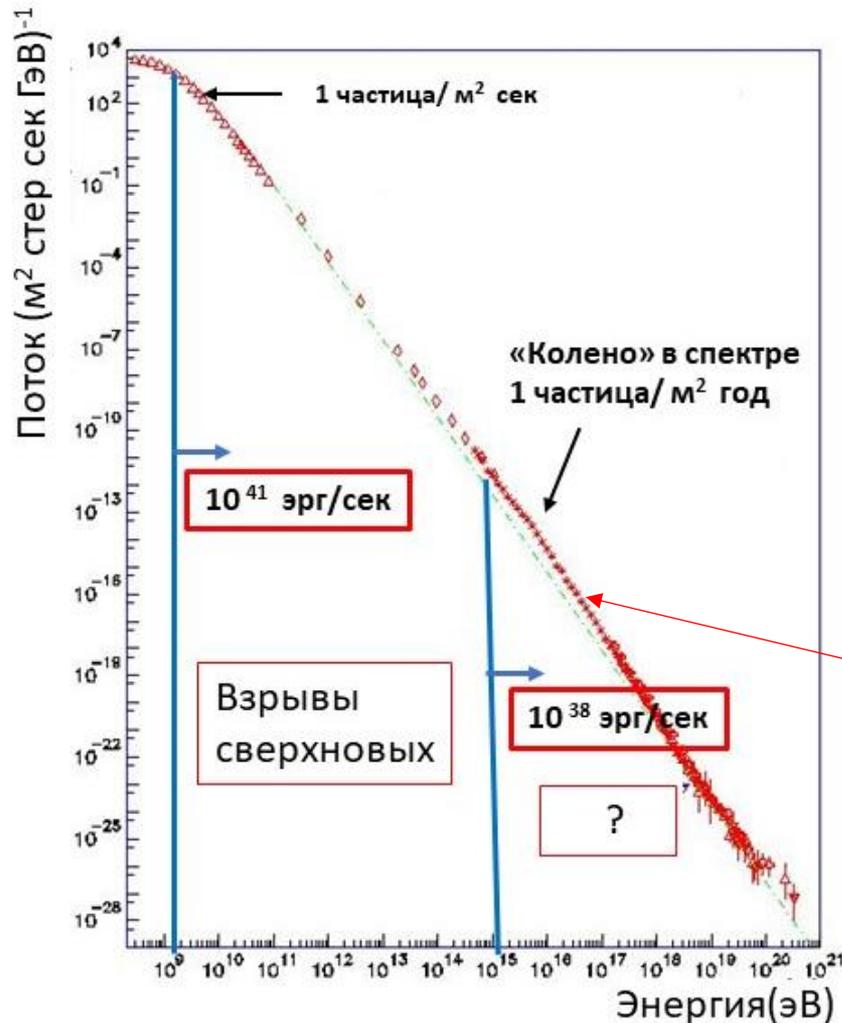
Энергия  
нейтрино  
280 ТэВ



5800 ф.э

Мюон  
выделил  
22 ТэВ

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



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

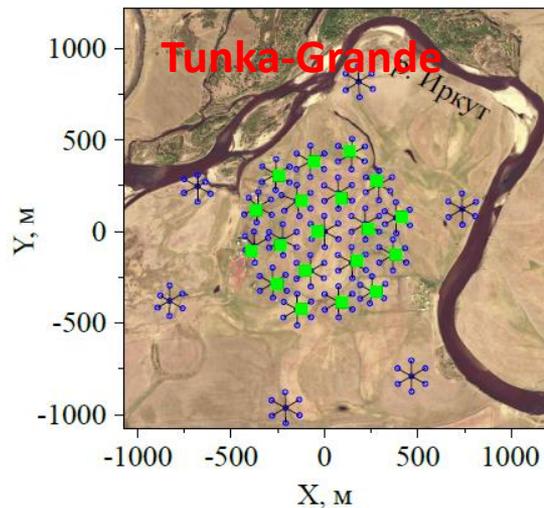
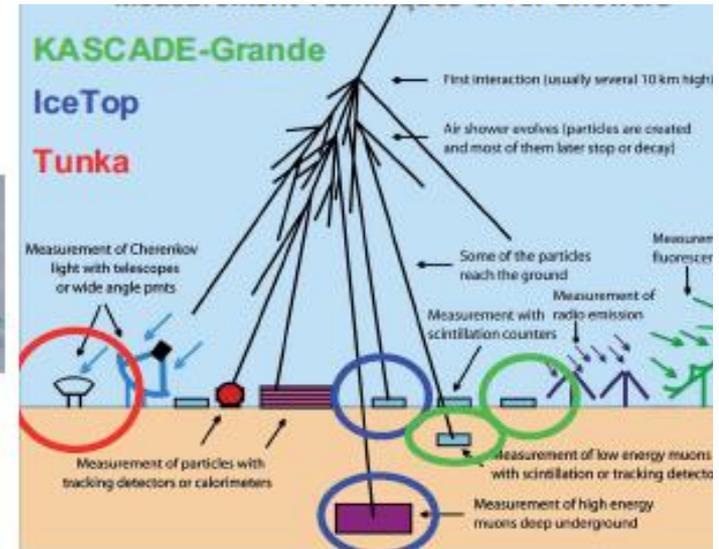
$\gamma$ : от 2.7 до 3

$E < 10^{17}$  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

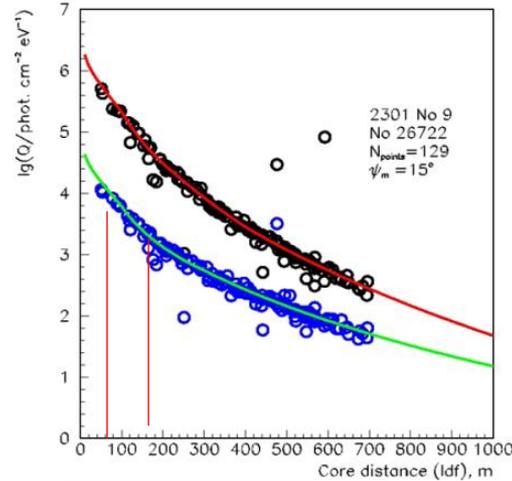
# Широкоугольные черенковские установки для измерения пространственно-временных характеристик черенковского излучения ШАЛ

Энергия ШАЛ

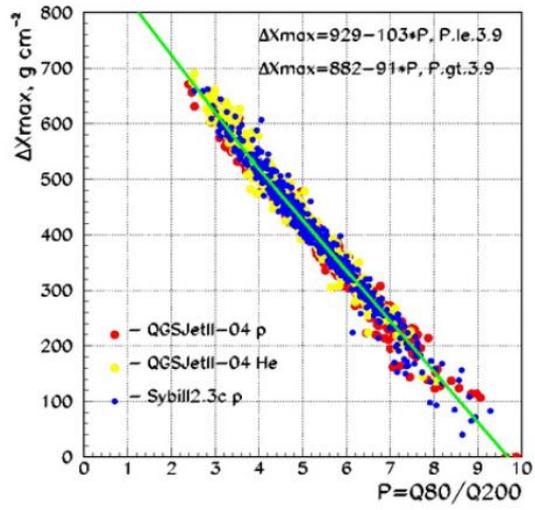
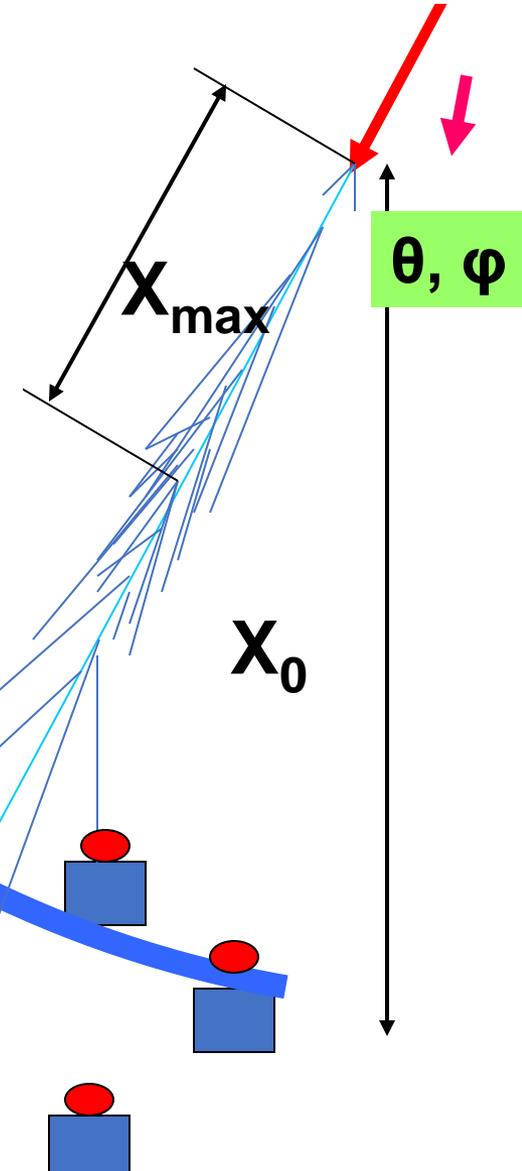
$$E = A \cdot [Q(200m)]^g$$

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

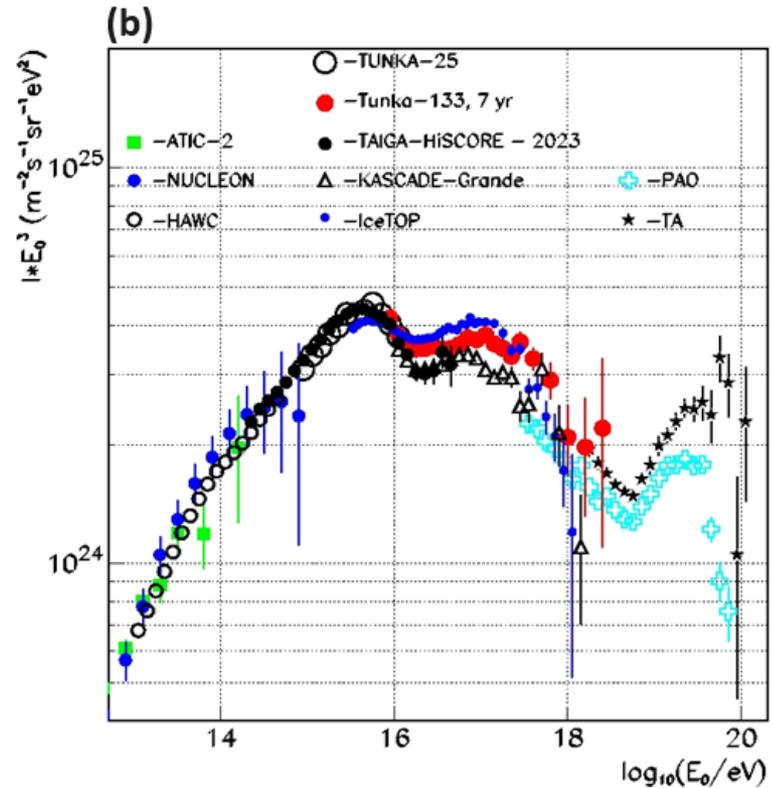
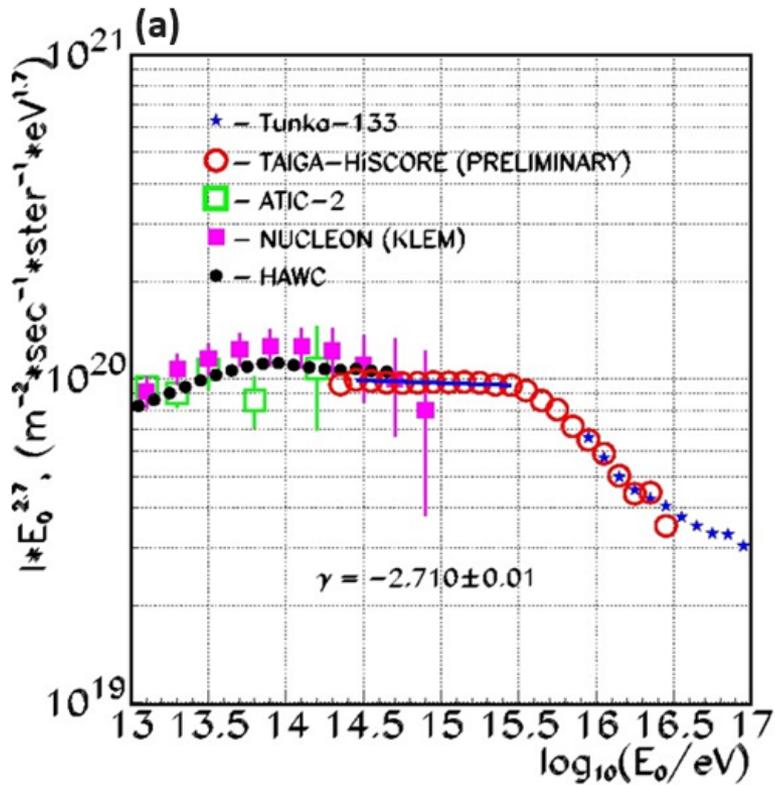
- 1 Положение оси ШАЛ: 5 -10 м
- 2 Угловое разрешение:  $\sim 0.1$  град.
- 3 Энергия ШАЛ:  $\sim 15\%$
- 4  $X_{\max}$  :  $\sim 20 -25 \text{ g/cm}^2$



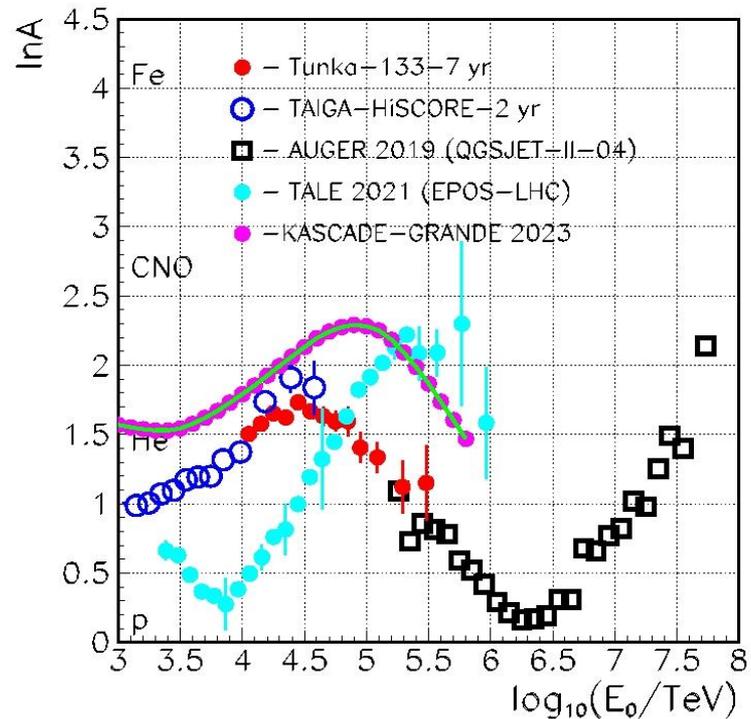
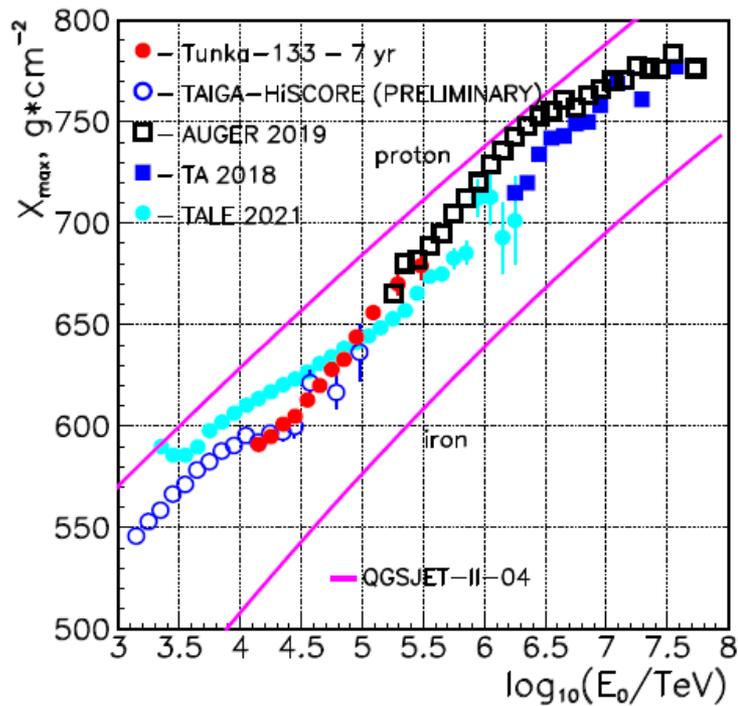
$$P = Q_{80}/Q_{200}$$



# Энергетический спектр

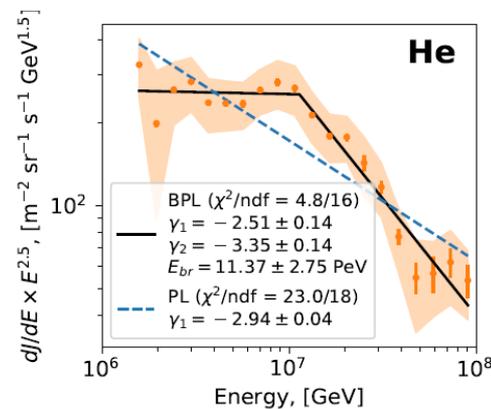
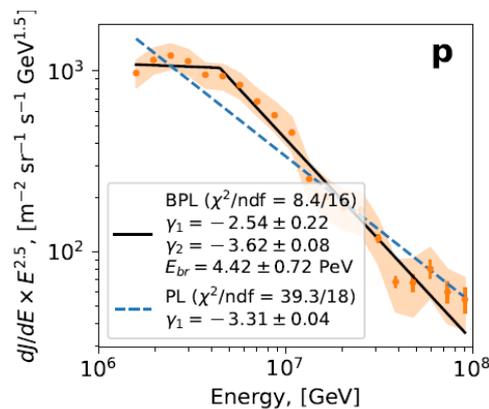
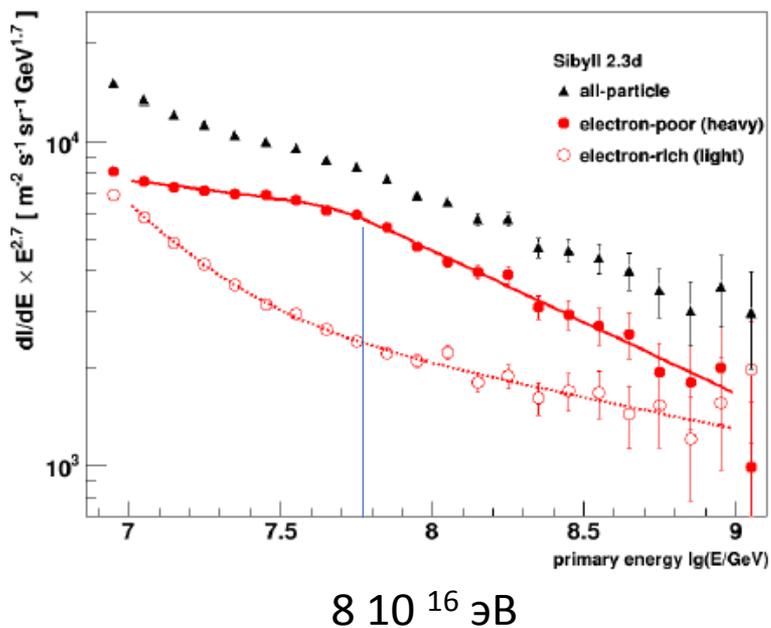


# Средний массовый состав



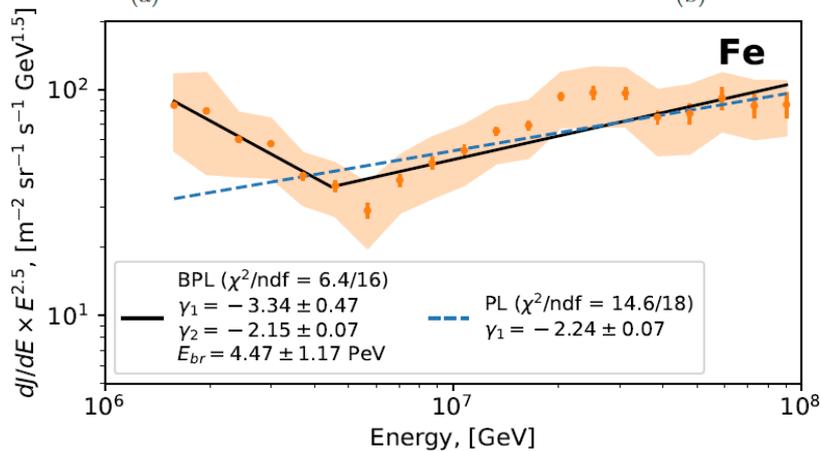
# Новый анализ данных KASCADE по спектру групп ядер ( 2312.08279)

2011 год



(a)

(b)



(c)

$E_{max} \sim Z$  ( заряд ядра)

CNN

2312.08279

# Заключение

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

Спасибо за внимание