

Детекторные технологии в астрофизике

Е.А.Кравченко

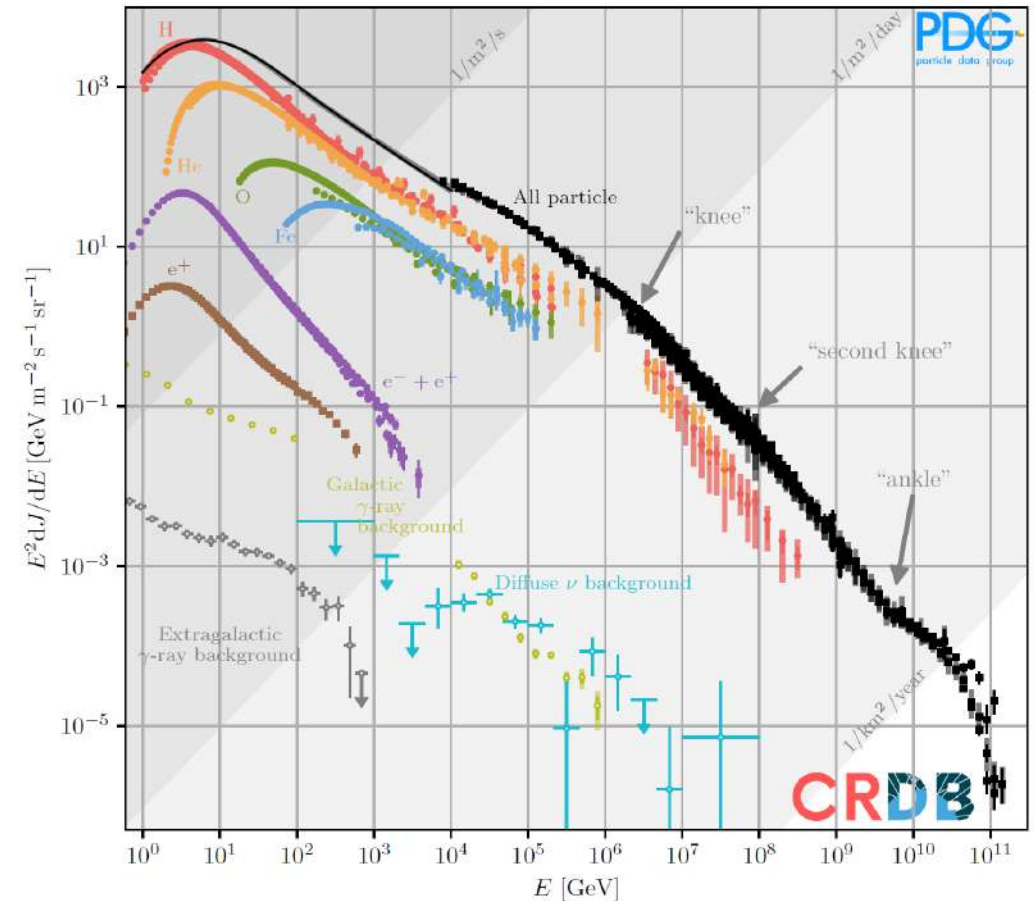
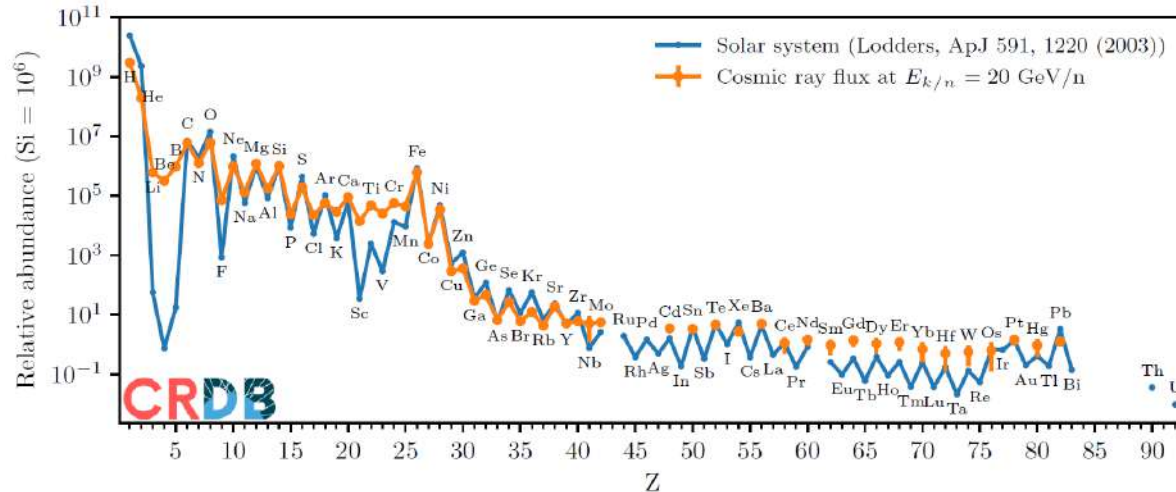
ИЯФ СО РАН/НГУ

План доклада

- Введение
 - характерные задачи астрофизических экспериментов
 - спектр частиц и вытекающая разница в подходах регистрации частиц ниже 1 ТэВ и выше
- Методики регистрации ПКЛ в диапазоне ниже 1 ТэВ
 - особенности экспериментов на спутниках и стратостатах
- Эксперименты при энергиях выше 1 ТэВ
 - регистрация широких атмосферных ливней
 - регистрация высокоэнергичных нейтрино
 - специфические требования к сцинтилляционным детекторам,
 - специфические требования к оптическим черенковским детекторам
 - специфические требования к водным черенковским детекторам
- Калибровка детекторов в астрофизических экспериментах
 - калибровки шкалы
 - определение абсолютного и относительного углового разрешения
 - важность систем синхронизации, GPS, Интернет
- Заключение

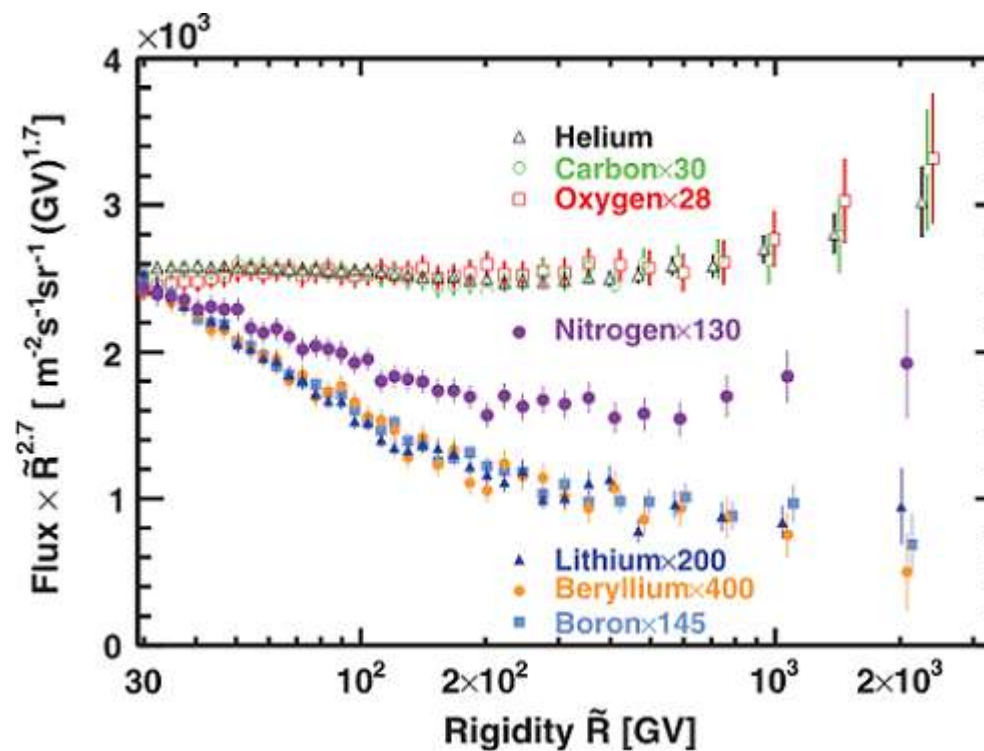
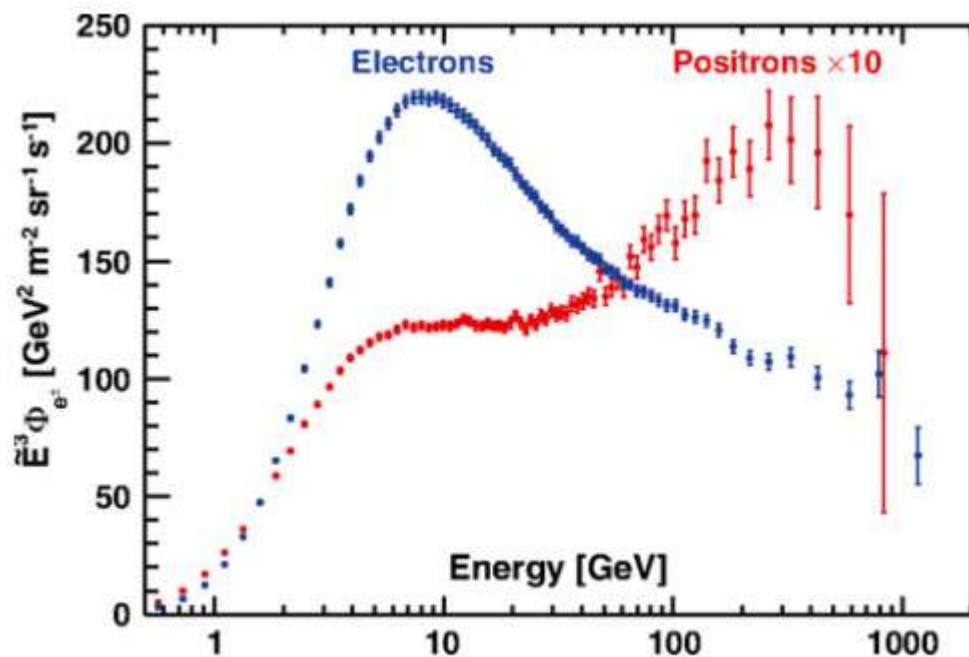
Характерные задачи астрофизических экспериментов (1)

- Спектр частиц и его особенности (в том числе передел ГЗК)
- элементный состав (в том числе антиядра)
- спектр электронов и позитронов в КЛ
- поток гамма-квантов – диффузный и от источников
- Регистрация нейтрино из Космоса



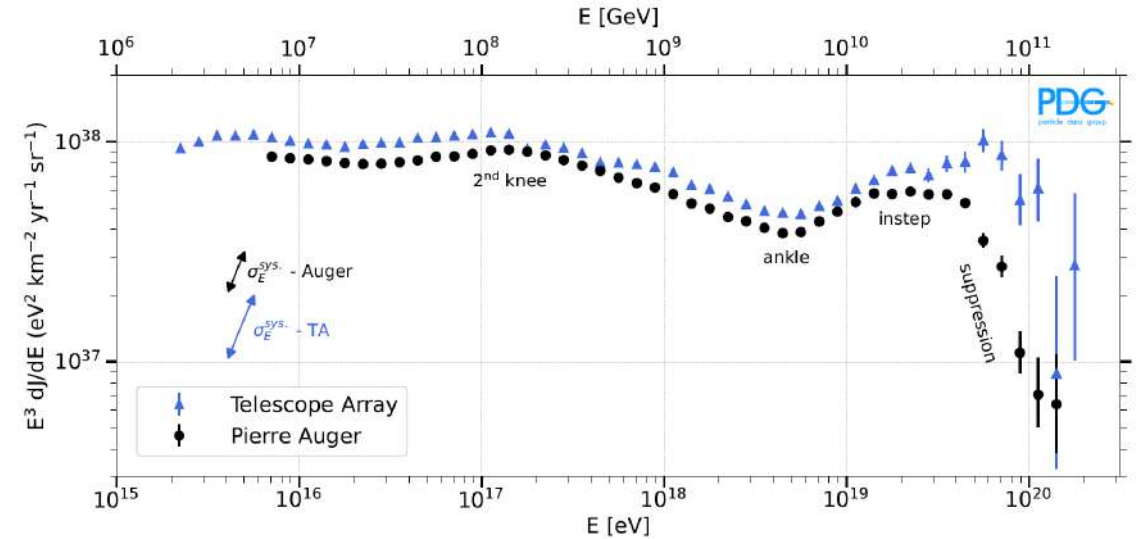
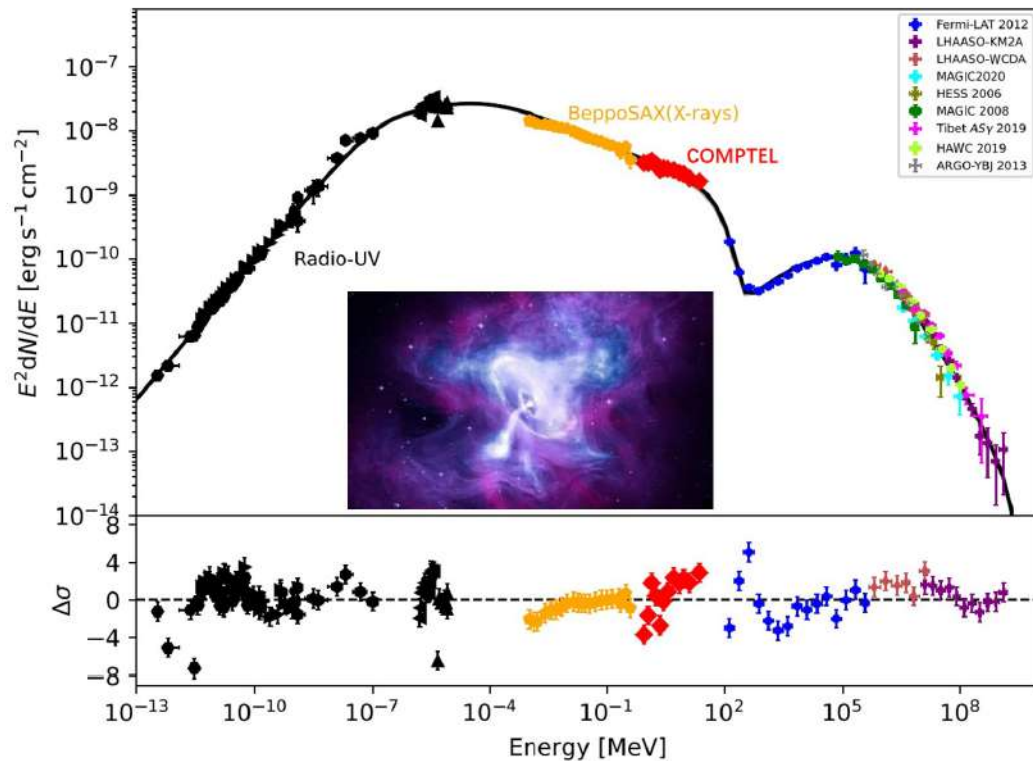
Характерные задачи астрофизических экспериментов (2)

Результаты AMS-02



Характерные задачи астрофизических экспериментов (3)

Спектр излучения Крабовидной туманности



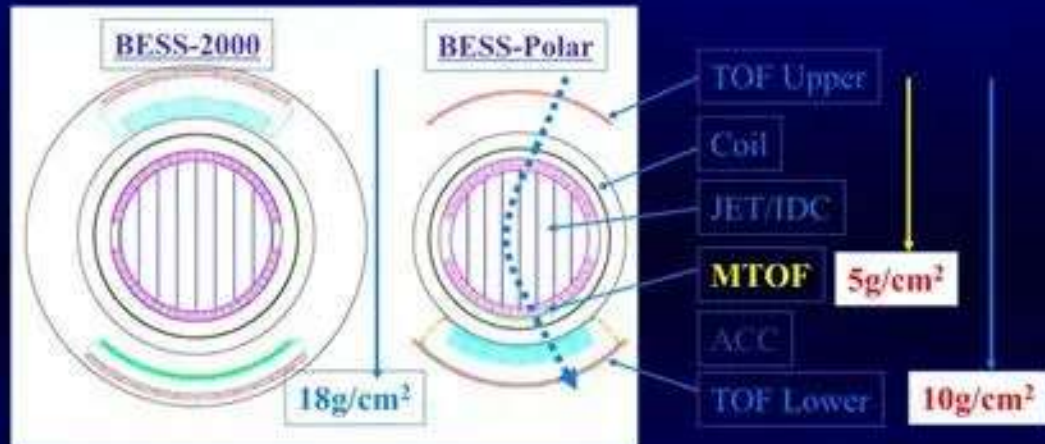
Статистика и взаимодействие ПКЛ с атмосферой определяют принципиальную разность в экспериментальных подходах для изучения частиц ниже и выше 1 ТэВ.

Методики регистрации ПКЛ в диапазоне ниже 1 ТэВ

	Трековая система	Магнитное поле	ToF (направление)	Черенковские детекторы (RICH, Аэрогель)	Детектор переходного излучения	Калориметр
Импульс						
+/-	X	X	X			
Заряд	$dE/dX \sim z^2$			$\Delta N_{\text{фот}} \sim z^2$		
e/адроны					X	
γ -кванты	X					X

Bess-Polar

Feature of BESS-Polar Spectrometer

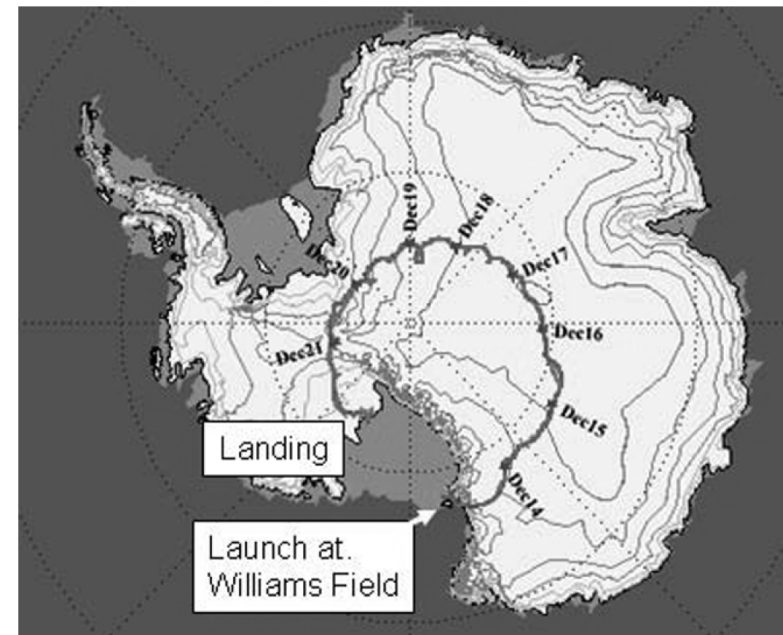


Minimize material in spectrometer
New detector (Middle TOF)

Energy range extended
down to 0.1 GeV

Low power electronics
Solar Power System, Longer life of cryogen, LHe

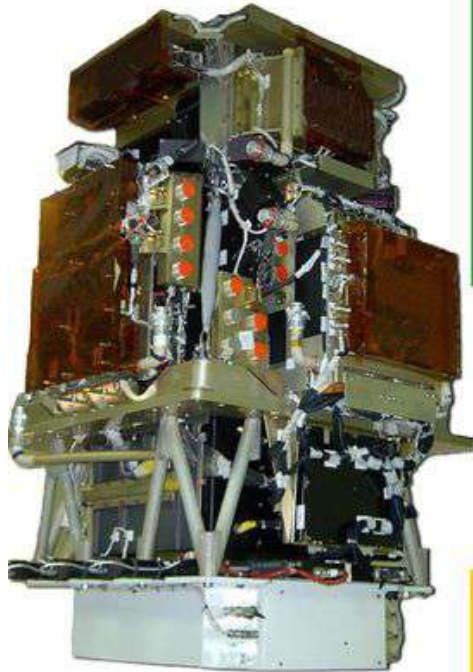
Long duration flight



Магнитное поле – СП катушка

PAMELA detectors

Main requirements → high-sensitivity antiparticle identification and precise momentum measure



GF: 21.5 cm² sr
Mass: 470 kg
Size: 130x70x70 cm³
Power Budget: 360W

Time-Of-Flight

plastic scintillators + PMT:

- Trigger
- Albedo rejection;
- Mass identification up to 1 GeV;
- Charge identification from dE/dX.

Electromagnetic calorimeter

W/Si sampling (16.3 X₀, 0.6 λI)

- Discrimination e⁺ / p, anti-p / e⁻ (shower topology)
- Direct E measurement for e⁻

Neutron detector

³He tubes + polyethylene moderator:

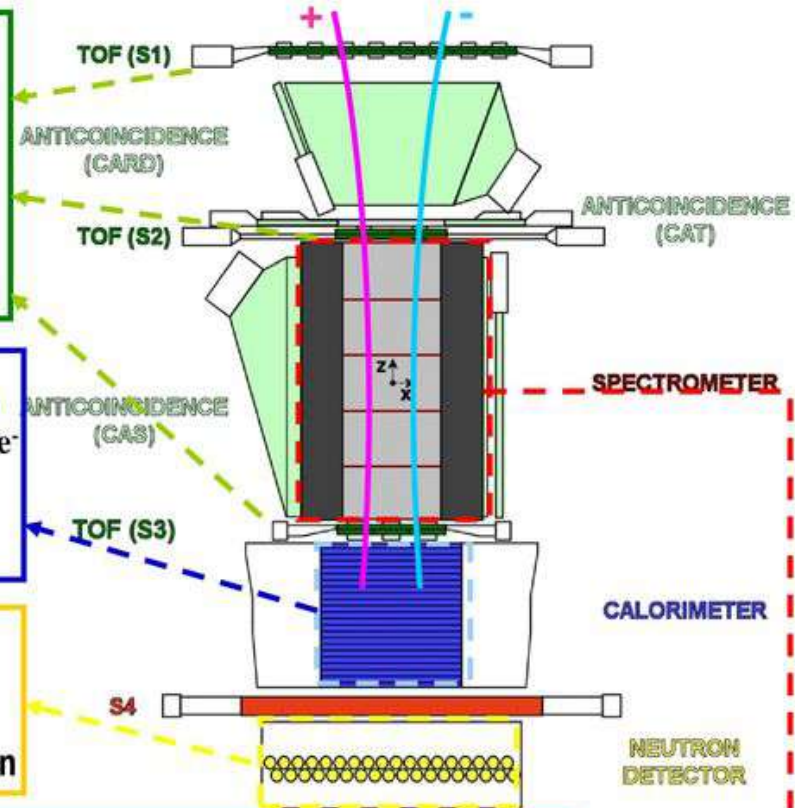
- High-energy e/h discrimination

Spectrometer

microstrip silicon tracking system + permanent magnet

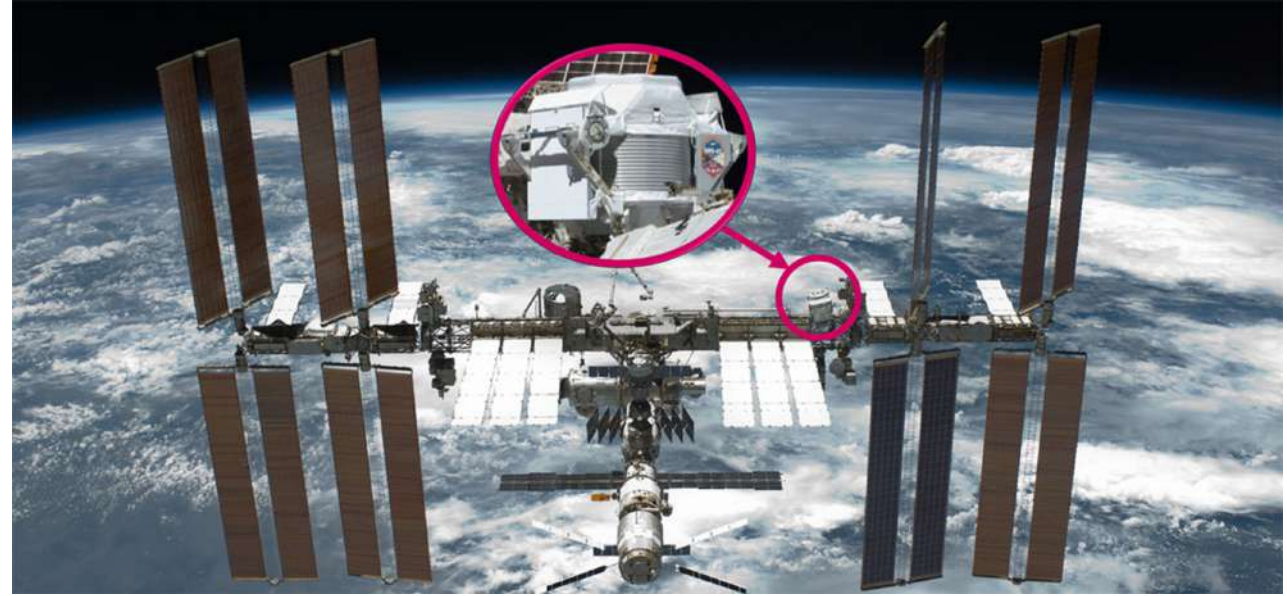
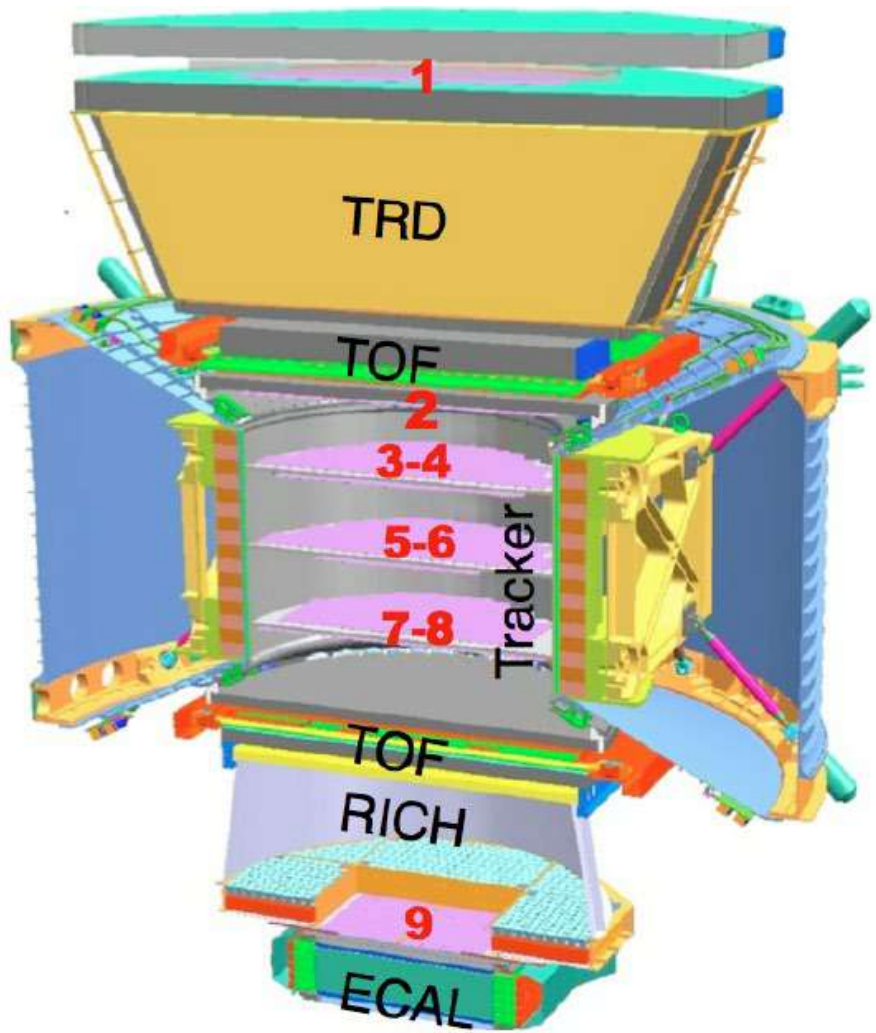
It provides:

- Magnetic rigidity → $R = pc/Ze$
- Charge sign
- Charge value from dE/dx



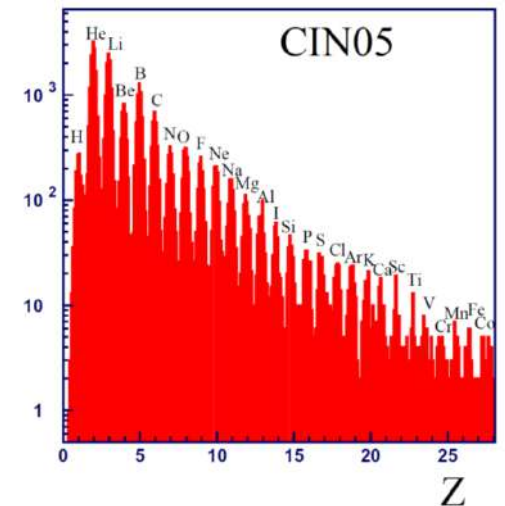
Магнитное поле — постоянный магниты

AMS-02



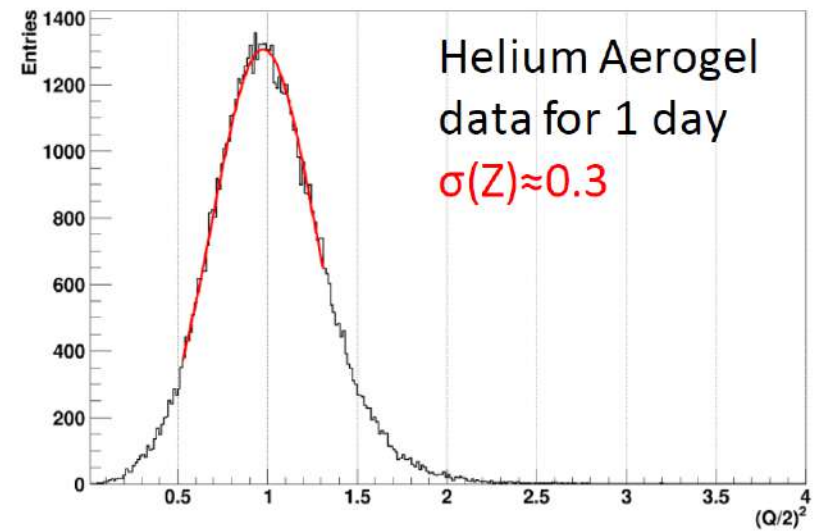
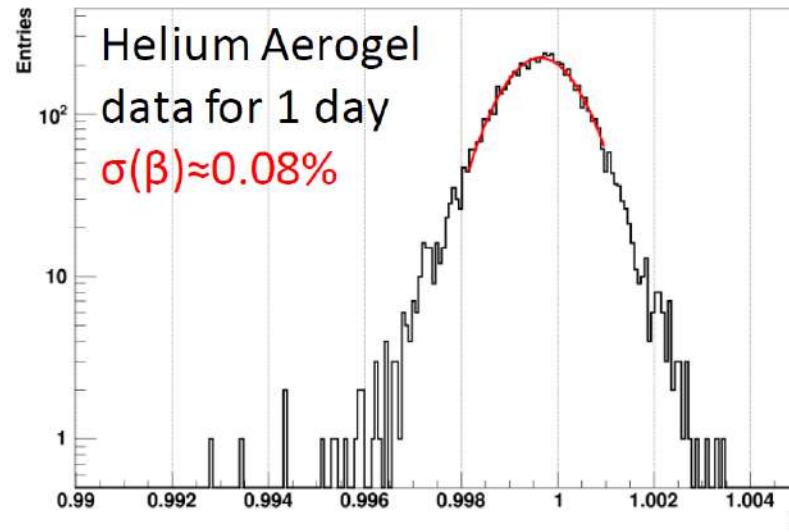
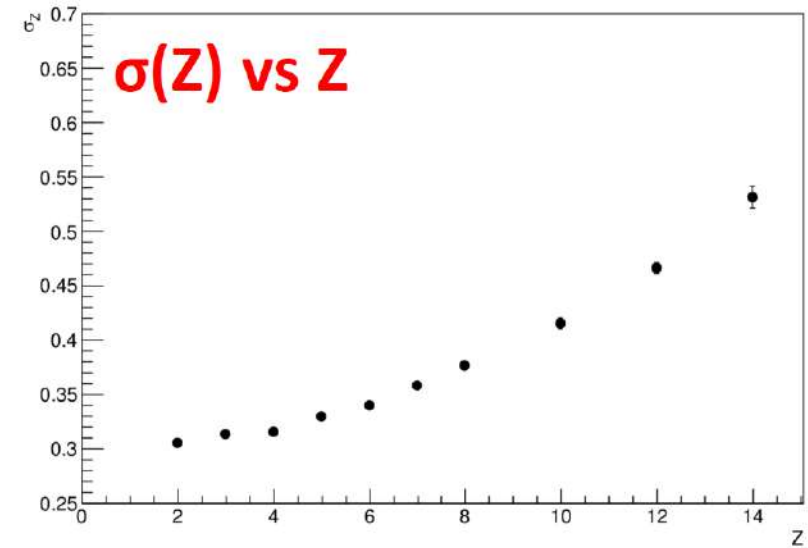
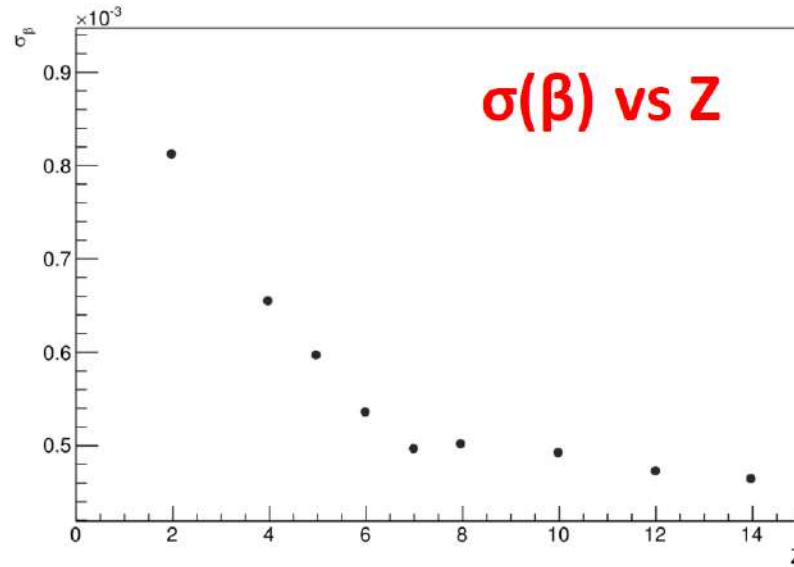
Магнитное поле – постоянный магниты
(но была и СП катушка)

RICH – идентификация частиц в широком диапазоне + измерение Z



RICH Performance on ISS (Aerogel)

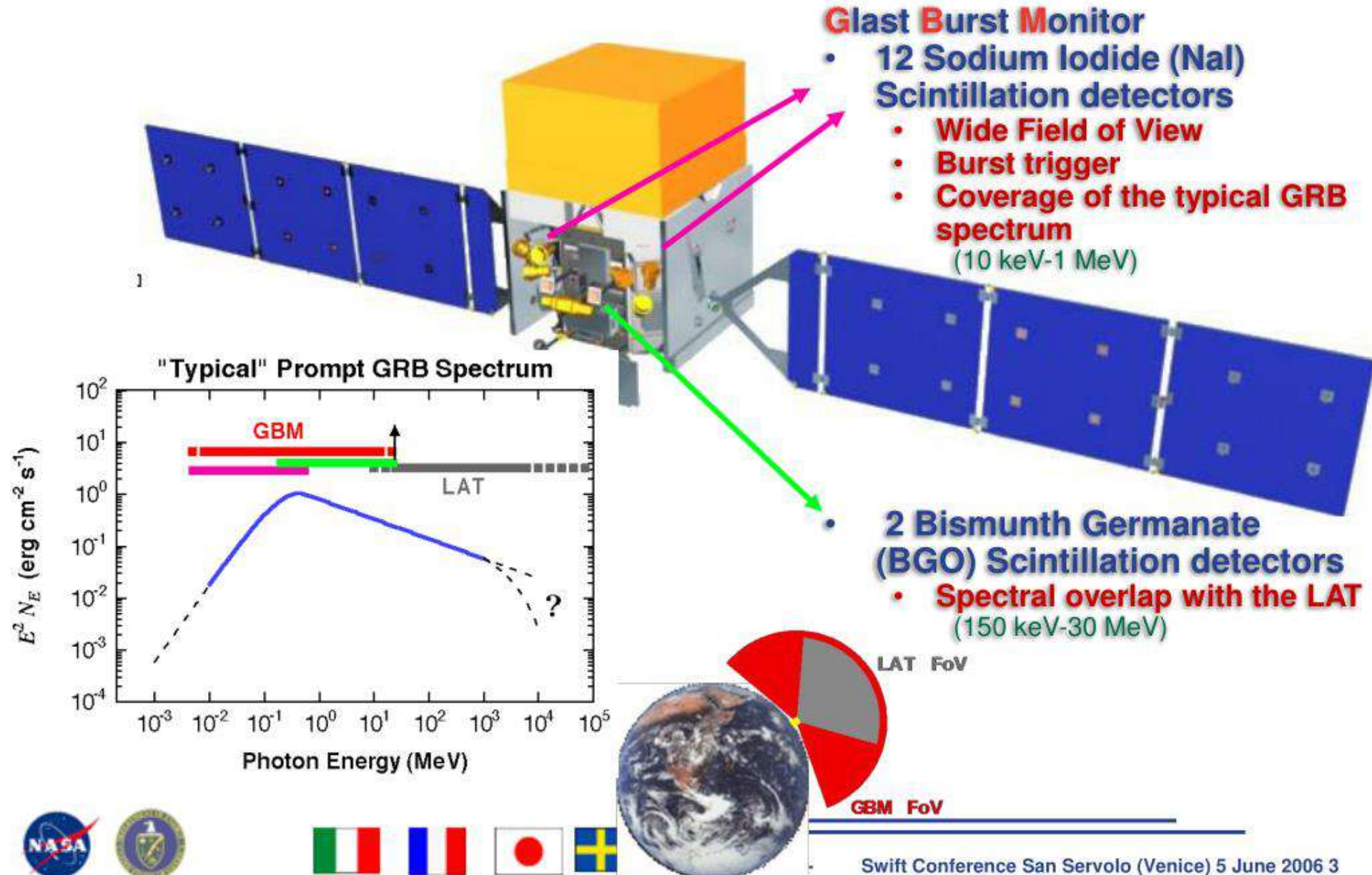
$$\sigma P/P = \gamma^2 \sigma \beta / \beta$$



After 5 years of data taking > 95% of the channels are working properly



The GLAST mission (Gamma-ray Large Area Space Telescope)



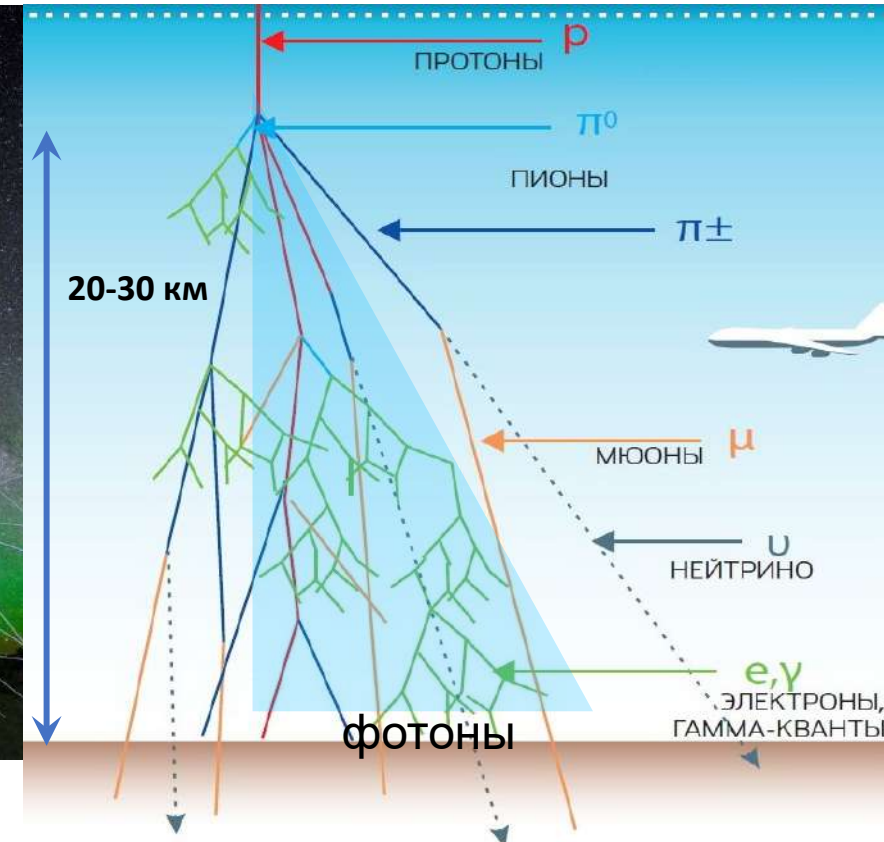
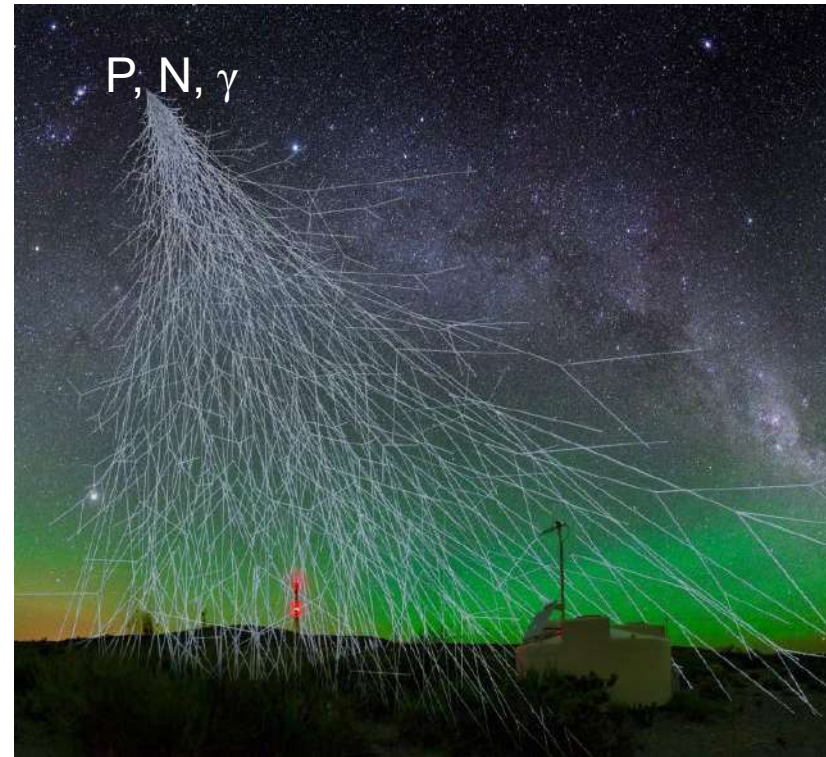
Эксперименты при энергиях выше 1 ТэВ(1)

Толщина атмосферы –
на уровне моря – 760 мм
 $\rightarrow 28 X_0 \rightarrow 11 L_{\text{яд}}$

TAIGA – 675 м,
HAWC – 4100 м,
LHAASO – 4410 м,
ЯкуШАЛ – 110 м,
РАО – 1330–1620 м

4000 м – 460 мм $\rightarrow 17 X_0 \rightarrow$
6.7 $L_{\text{яд}}$

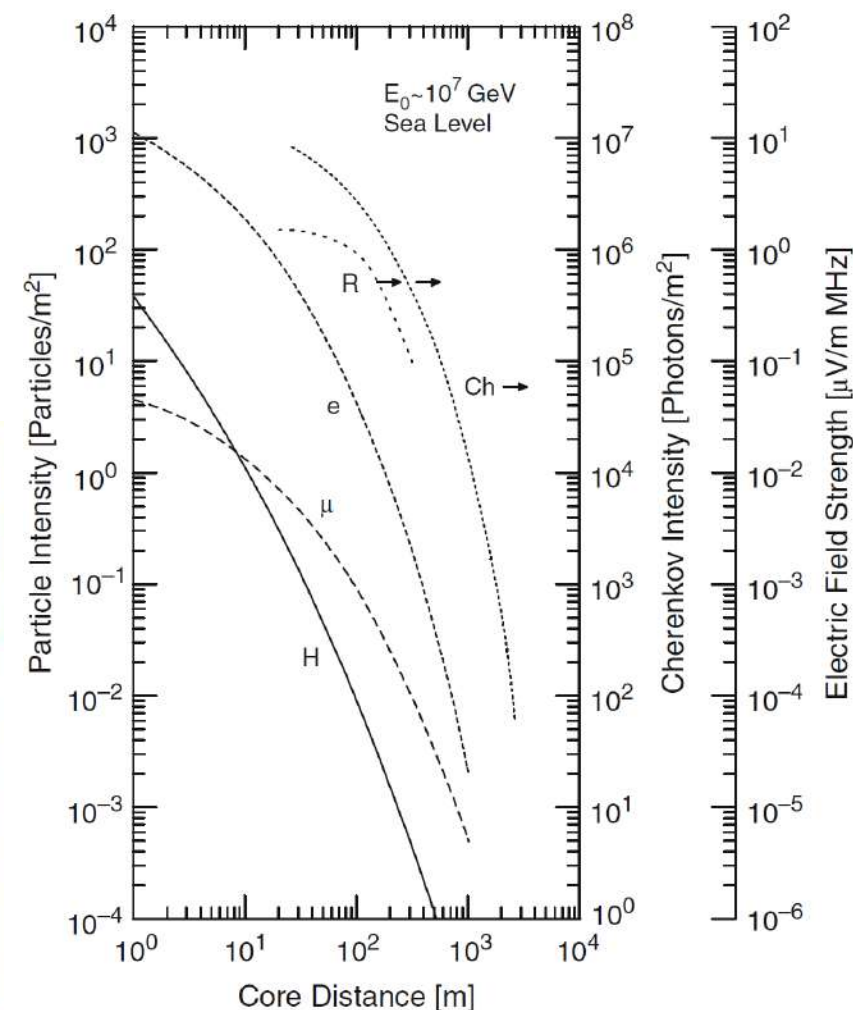
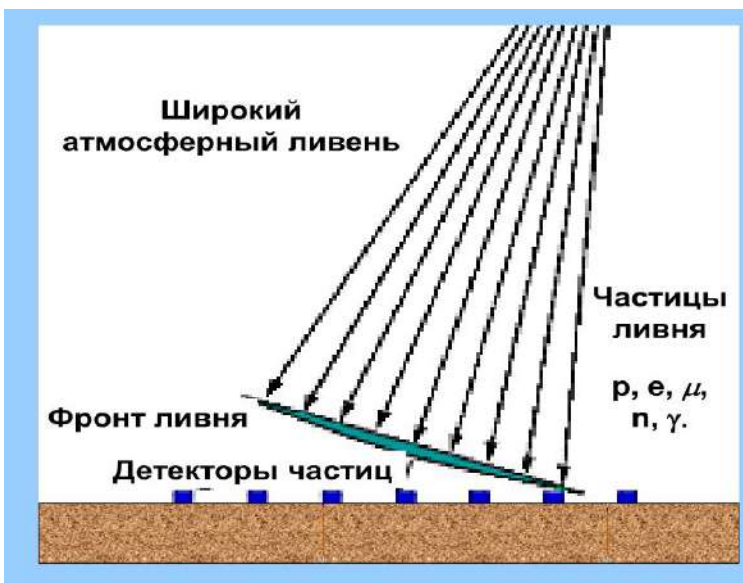
Максимум энерговыделения
адронного ливня с $E=1$ ТэВ



Эксперименты при энергиях выше 1 ТэВ(2)

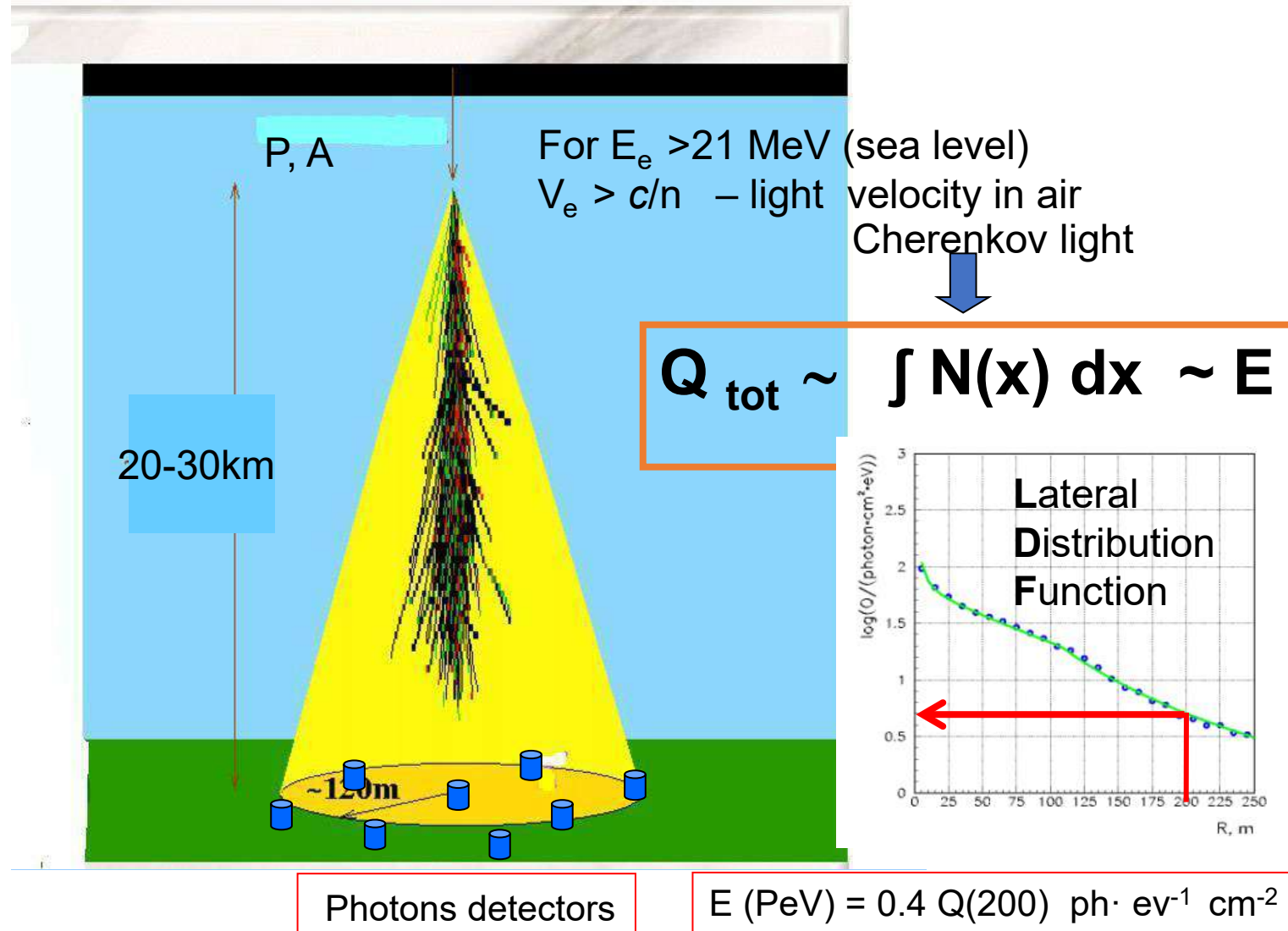
Регистрация ШАЛ:

- Вторичные заряженные частицы,
- Черенковский свет,
- Флуоресценция



Эксперименты при энергиях выше 1 ТэВ(3)

Черенковский свет



Эксперименты при энергиях выше 1 ТэВ(4)

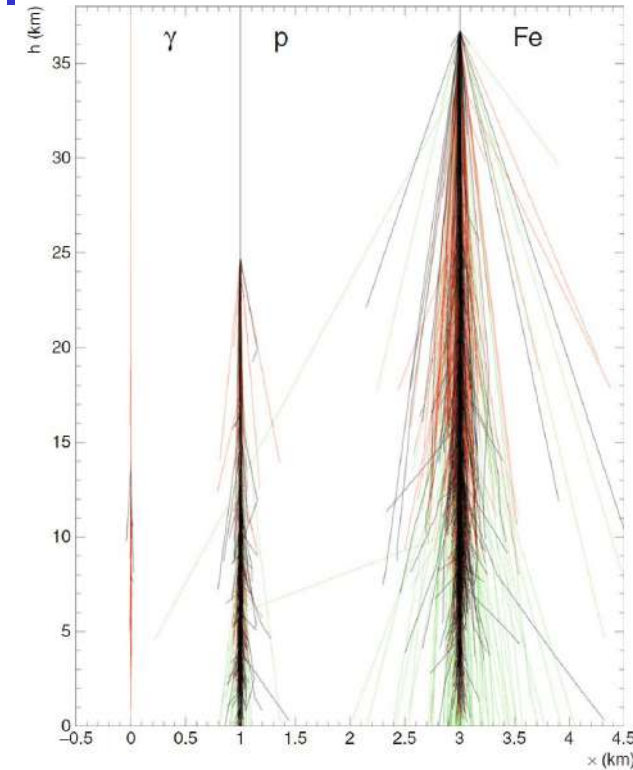
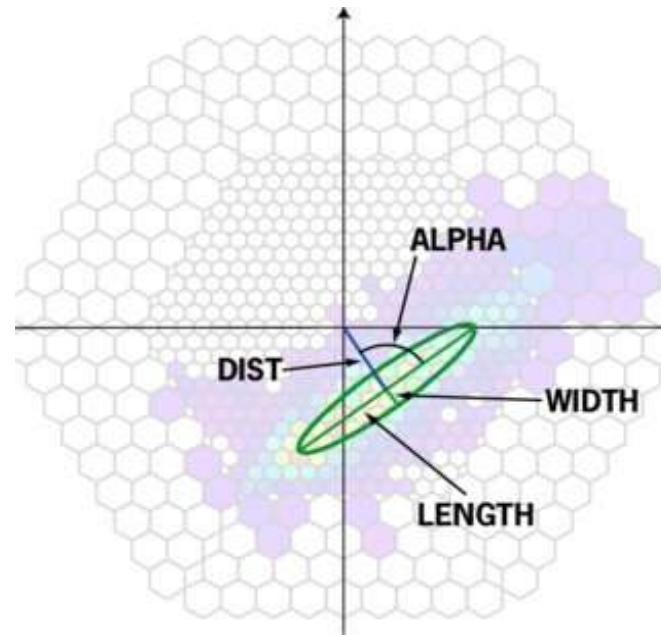
Черенковский свет+изображение

Задача – сфотографировать
ливень и определить его тип.

$E = 100 \text{ ТэВ}$



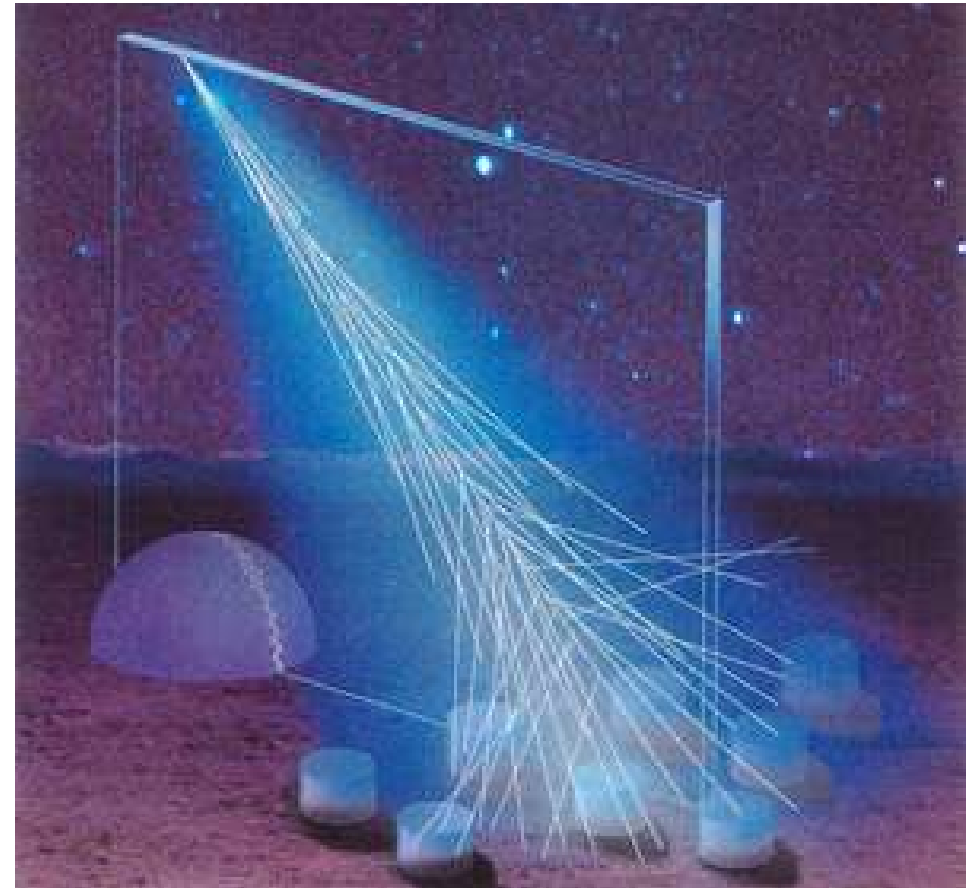
**Imaging Atmospheric
Cherenkov Telescope**



- «вытянутое» изображение → ШАЛ от γ -кванта
- «широкое» изображение → ШАЛ от протона

Эксперименты при энергиях выше 1 ТэВ(3)

- Флуоресценция (сцинтилляции),
 $\Delta I \sim \Delta E \sim E_{\text{ШАЛ}}$
- $E_{\text{ШАЛ}} > 10^{17}$ эВ (недостаток)



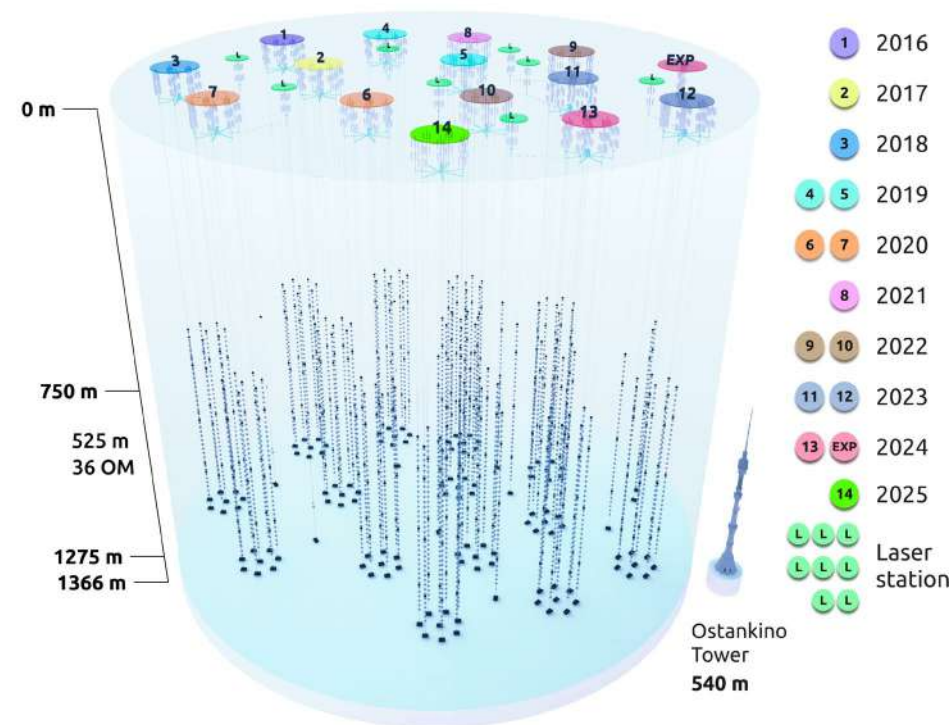
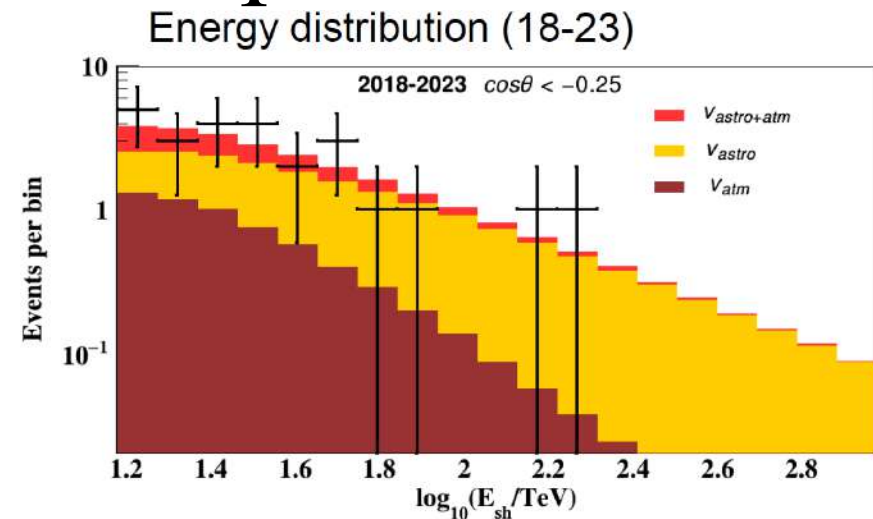
Регистрация астрофизических нейтрино

Из-за смешивания для астрофизических нейтрино:

- $N(\nu_e)N(\nu_\mu):N(\nu_\tau) = 1:1:1$
- $\nu_e \rightarrow e \rightarrow \text{«каскад»}$
- $\nu_\mu \rightarrow \mu \rightarrow \text{«трэк»}$
- $\nu_\tau \rightarrow \tau \rightarrow \text{«каскад»}$

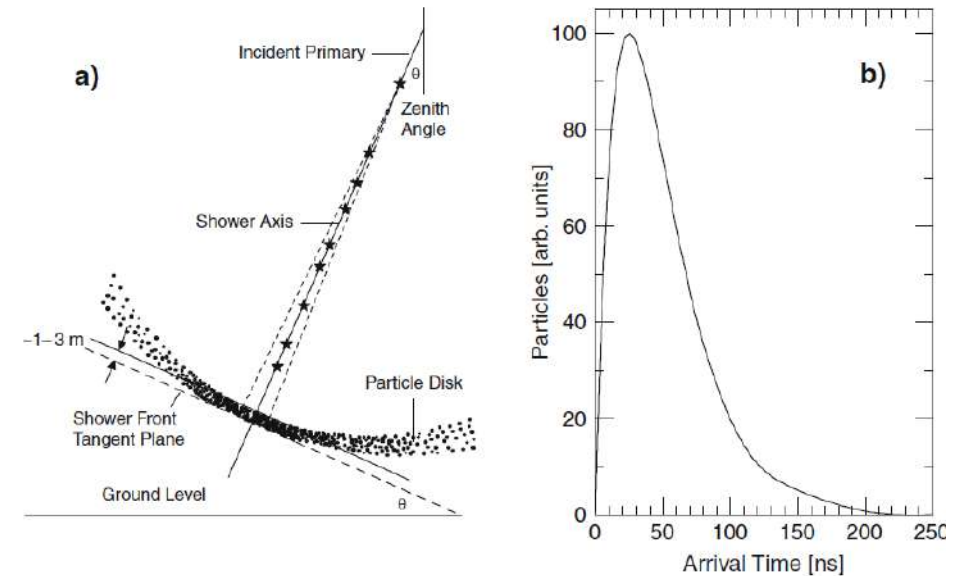
Особенности:

- Атмосферные ν_e, ν_μ
- $\mu \rightarrow E_{\text{кр}}(\text{вода}) = 1 \text{ ТэВ}$, $dE/dx \gg 3 \text{ МэВ/см}$ (пример: $\Delta E/\text{кластер от } \mu \sim 0.05 \text{ ТэВ}$, порог срабатывания $\sim 1 \text{ ТэВ}$)
- $\nu_\tau \rightarrow$ есть ли отличия ν_e каскада?



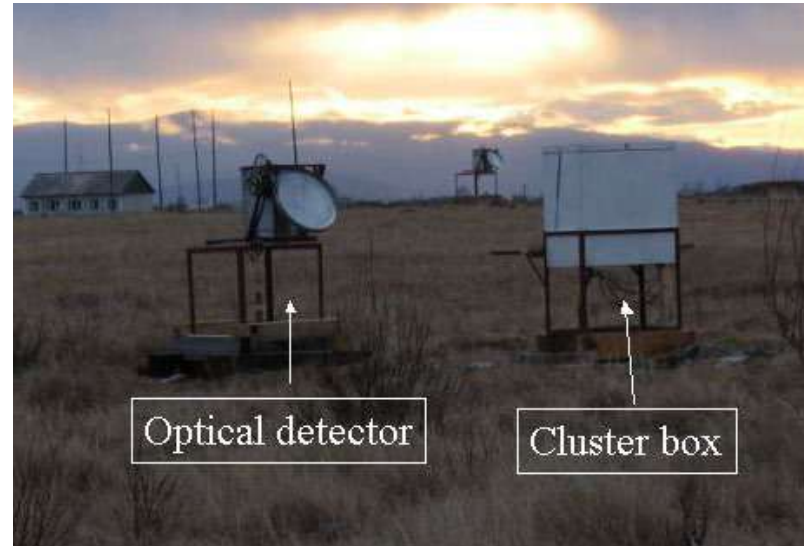
Требования к сцинтилляционным детекторам

- Временное разрешение ~ 1 нс для определения направления ШАЛ ($\sim 1^\circ$), 0.1 нс для измерения структуры фронта ливня (идентификация)
- Линейность отклика 1—100 частиц/м²
- Стоимость! (нужно дешево и много, но хорошо!)



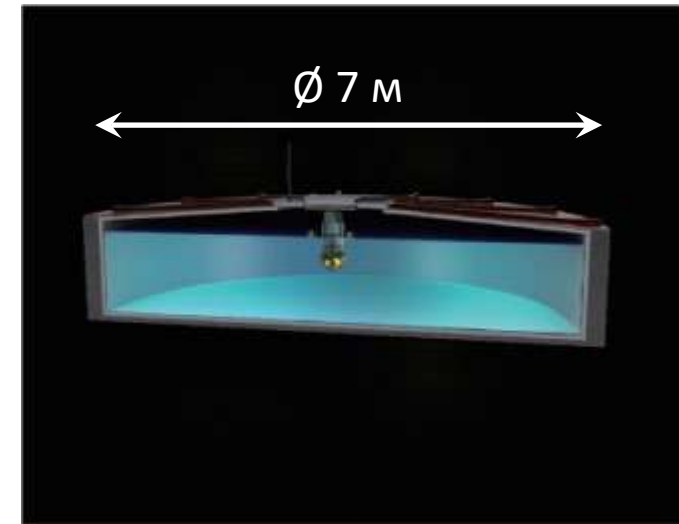
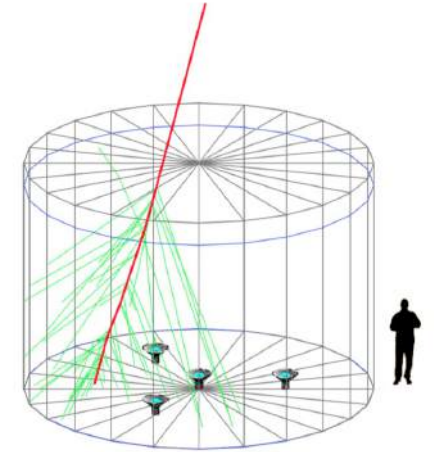
Требования к оптическим черенковским детекторам

- Временное разрешение ~ 1 нс для определения направления ШАЛ ($\sim 0.1^\circ$)
- QE – определяет энергетический порог
- Надежность (срок службы) – ФЭУ работают при постоянной фоновой засветке



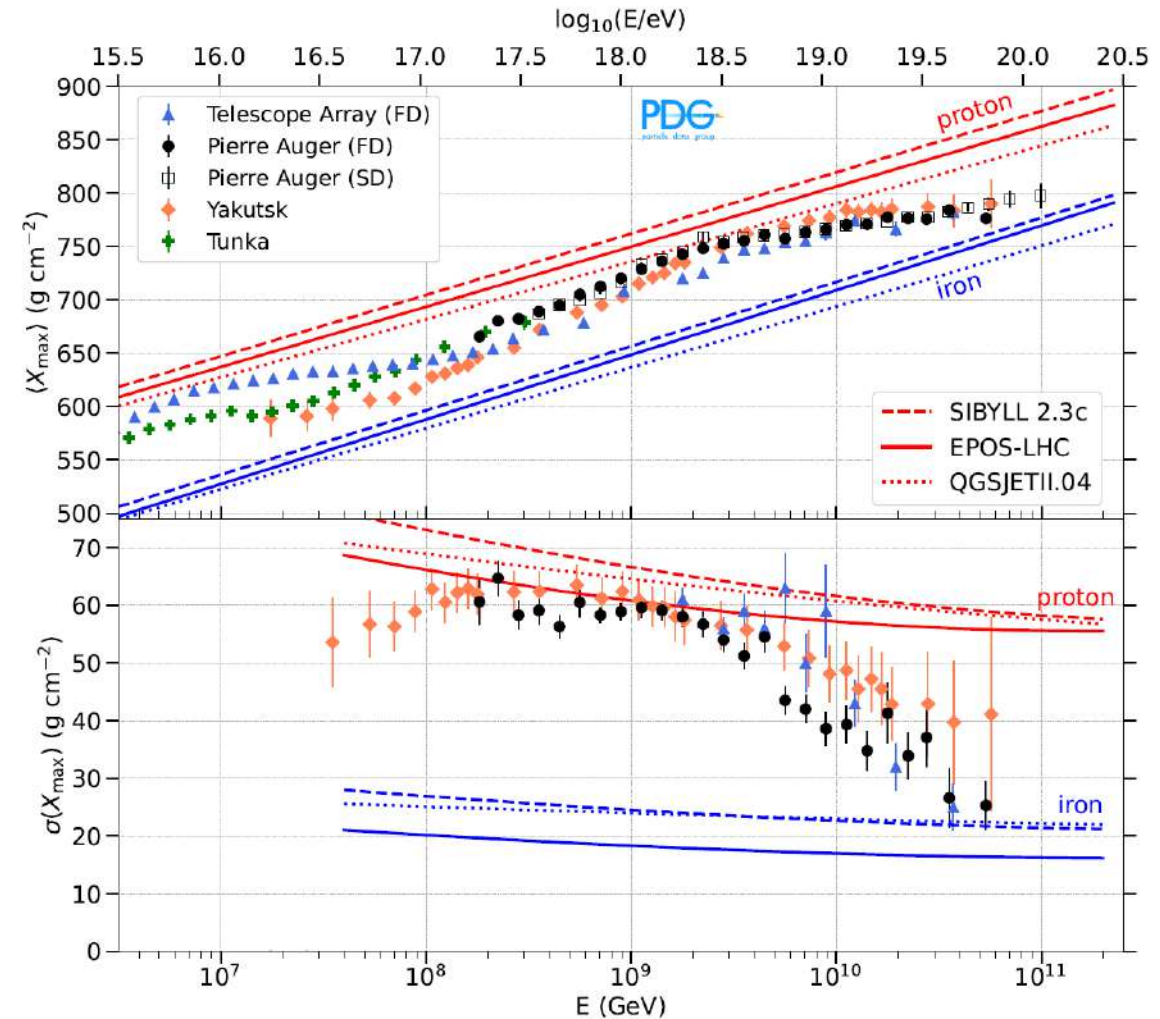
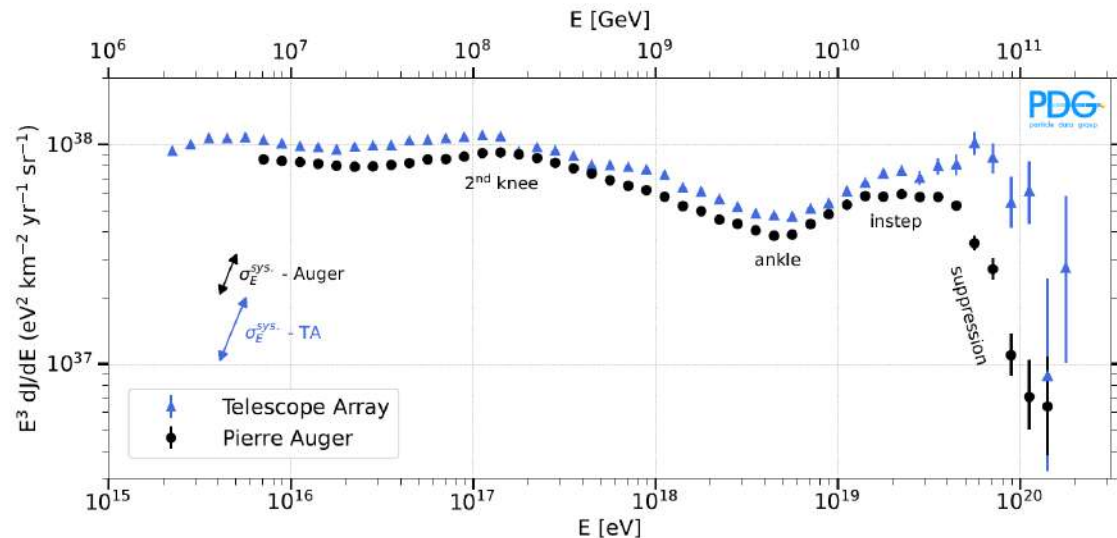
Требования к водным черенковским детекторам

- Временное разрешение ~ 0.1 нс для определения направления ШАЛ ($\sim 0.1^\circ$), прямой свет (HAWC), ~ 1 нс для измерения мюонной компоненты
- QE – определяет размер детектора
- Необходим хороший отражатель (и достаточно дешевый) – Tyvek (вспененный полиэтилен)



Калибровка детекторов в астрофизических экспериментах(1)

- Сложности калибровки энергетической шкалы (регистрация ШАЛ):
 - Аналитические расчеты плотности вторичных частиц + моделирование
 - Зависимость от состава ПКЛ (который плохо известен)
 - Систематика детекторных технологий (черенковский свет от «выстрых» частиц (максимум ливня), плотность заряженных частиц на поверхности земли, флуоресценция – сравнительно малая систематика.
 - Моделирование адронных взаимодействий при сверхбольших энергиях имеет плохую точность. Используемые модели непонятно как проверить экспериментально



Калибровка детекторов в астрофизических экспериментах(2)

Baikal-GVD – 4000 модулей в объеме 0.7 км^3

Для хорошего углового разрешения необходимо:

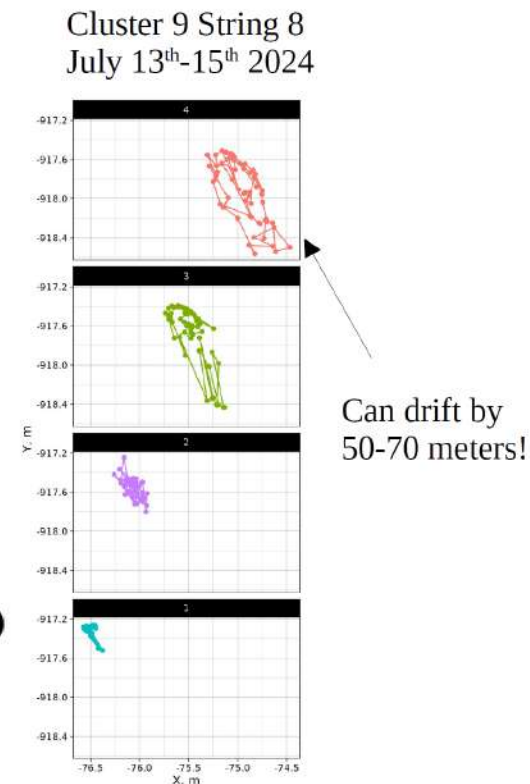
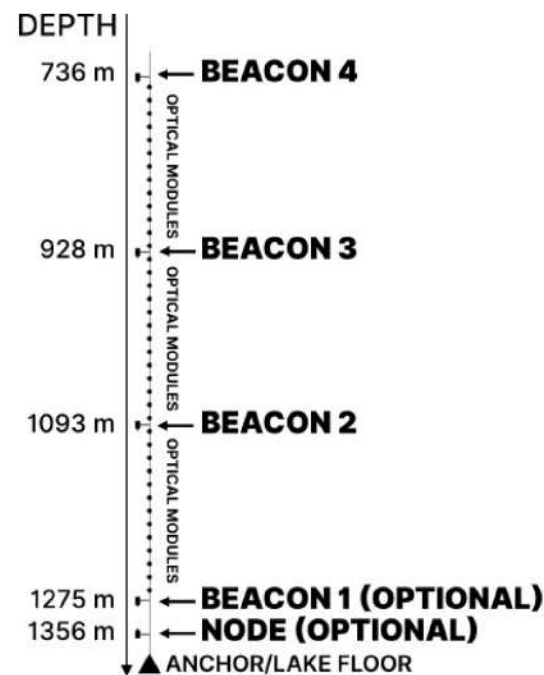
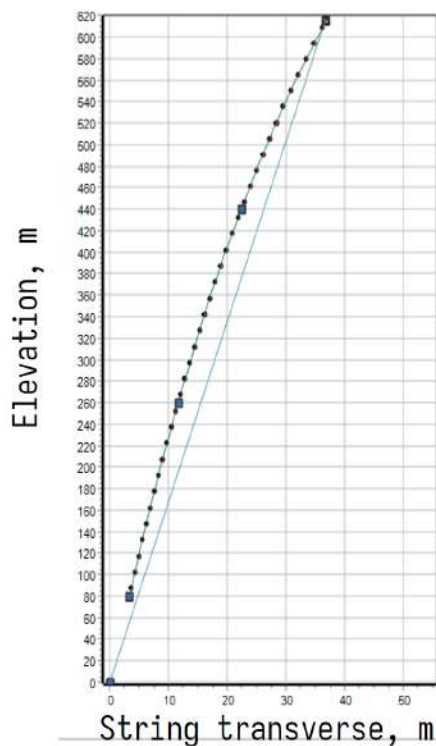
Абсолютная позиция детекторов известна с точностью $\sim 0.2 \text{ м}$.

Система позиционирования гидроакустика + свет

Все детекторы синхронизованы с точностью лучше 100 пс (задержки).

A GVD String in real life

4/14



Калибровка детекторов в астрофизических экспериментах(3)

- TAIGA -- 120 станций на площади 1 км²

Для хорошего углового разрешения необходимо:

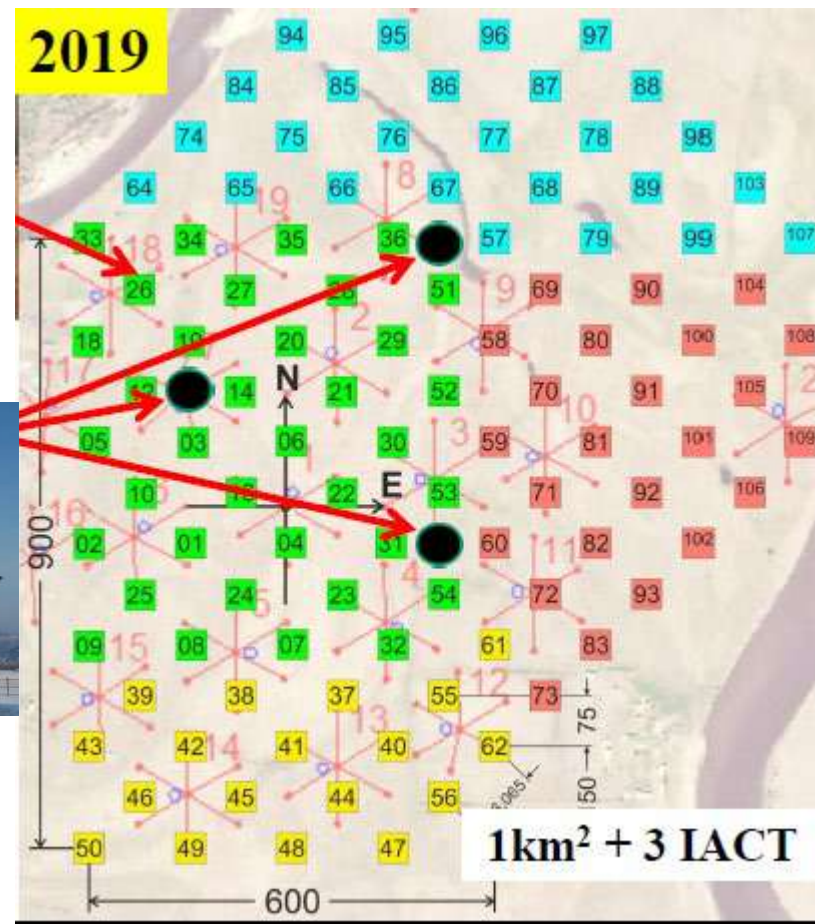
- Абсолютная позиция детекторов известна с точностью ~ 0.1 м.
- Все детекторы синхронизованы с точностью лучше 100 пс.

Особенность TAIGA – по координатам детекторов и абсолютному времени восстанавливается направление на какой-то источник. Сложность проверки. Не было известного источника.

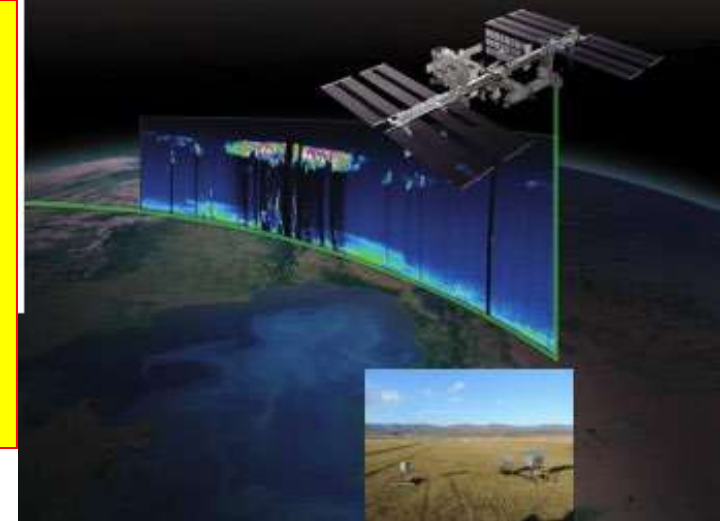
120 stations



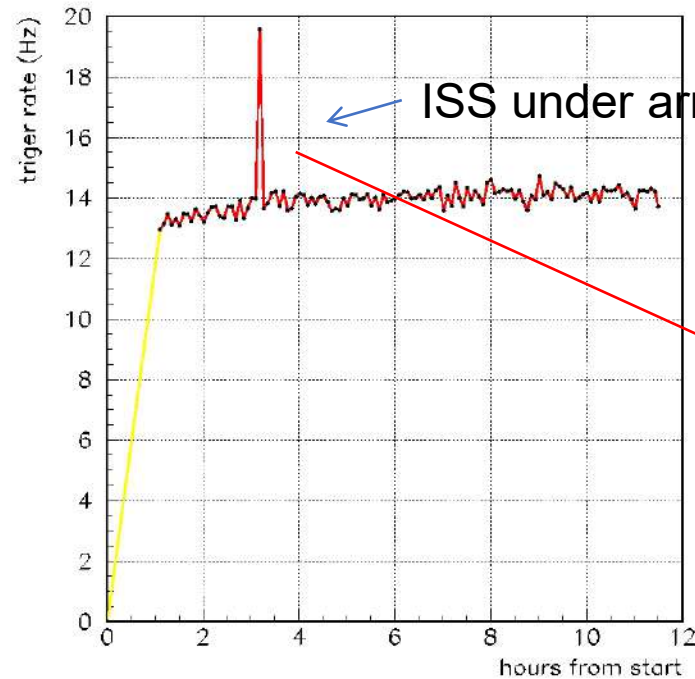
3 IACTs



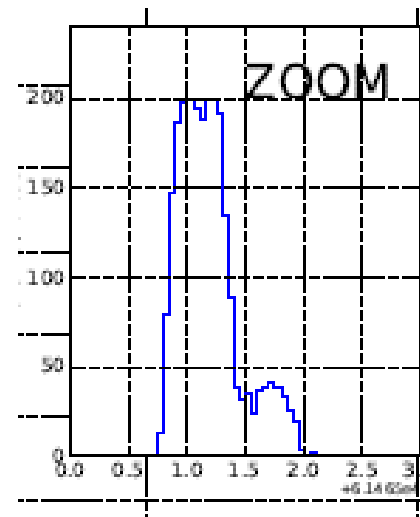
Light Source on board International Space Station (ISS) (2016-2017)



Counting rate per 2 min (on-line data)



Events per 0.05 sec



CATS (Cloud Aerosol
Transport System) Lidar
532 nm, 4 kHz

- Excellent HiSCORE calibration source
- flat timing profile
- precision pointing

Заключение

- Ну очень много интересных задач для всех!