



г. Дубна Московской области  
11-15 августа 2014 года



# Перспективный проект «Орбитальная лаборатория высоких энергий» по исследованию космических лучей вплоть до $10^{16}$ эВ

Ю.Бахвалов<sup>1</sup>, А.Владимиров<sup>1</sup>, Д.Карманов<sup>2</sup>,  
Р.Мухамедшин<sup>3</sup>, Д.Подорожный<sup>2</sup>, Л. Свешникова<sup>3</sup>,  
Л.Ткачев<sup>4</sup>, D.Togochkov<sup>2</sup>, А.Турундаевский<sup>2</sup>, А.Чубенко<sup>5</sup>

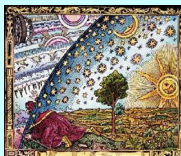
<sup>1</sup> КБ «Салют» ФГУП «ГКНПЦ им.М.В. Хруничева»

<sup>2</sup> НИИЯФ МГУ

<sup>3</sup> ИЯИ РАН

<sup>4</sup> ОИЯИ

<sup>5</sup> ФИАН



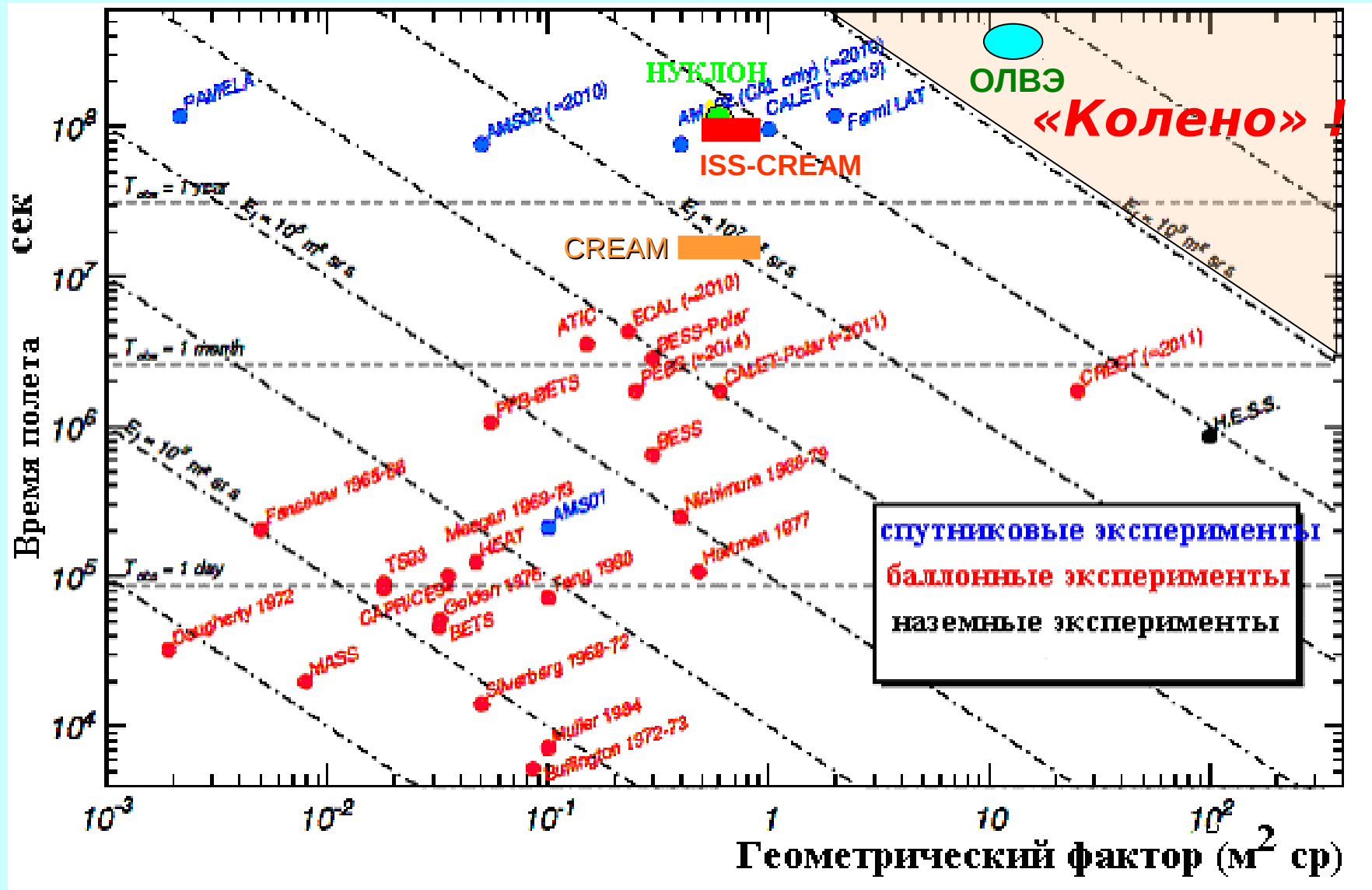
Фундаментальные проблемы:

1. Причины резкого излома энергетического спектра КЛ в области  $10^{15}$  -  $10^{16}$  эВ (феномен «колена» КЛ). Косвенные методы ШАЛ зависят от моделей, что ведёт к различию в интерпретации «колена».
2. Отношение вторичных ядер (генерируемым в межзвездной среде) к первичным (генерируемым в источниках) при  $E_0 > 100$  ГэВ/н.
3. Анизотропия космических лучей, которая может зависеть, например, от стохастического характера взрывов сверхновых.
4. Спектр электронов при  $E_e > 1000$  ГэВ, определяемый близлежащими источниками
5. Спектр диффузного  $\gamma$ -излучения, генерируемого во взаимодействиях КЛ с межзвездной средой, при рассеянии электронов и обратном Комптон-эффекте.
6. Поиск явлений, несущих информацию о параметрах частиц темной материи и «странглетах»

- Прямые эксперименты дают состав и спектр ПКИ при  $E_0 < n \cdot 10^{14}$  эВ ( $n \approx 1 \div 5$  в зависимости от компоненты)
- ШАЛ дают состав и спектр при  $E_0 > 10^{15}$  эВ
- Существует узкая область 1-го «колена» ( $10^{15} - 10^{16}$  эВ), в которой можно проверить измерения состава по ШАЛ **прямыми** экспериментами, если продвинуться в них на порядок по энергии

**Как это сделать?**

КЛ и гамма-эксперименты: геометрические факторы-экспозиция



# **О Л В Э ( H E R O )**

**ОЛВЭ** = Обсерватория космических Лучей  
Высоких Энергий

(**HERO** = High-Energy cosmic-Ray Observatory)  
(исследования КЛ при  $10^{12}$  –  $10^{16}$  эВ)

Проведенные эксперименты, а также планируемые НУКЛОН, CALET, ISS-CREAM, не могут в полной мере решить обсуждаемую проблему. Причина – недостаточный фактор экспозиции.

Расчеты показывают, что для статистики

$$N_{\min} (E_0 > 10^{16} \text{ эВ}) \approx 100 \text{ частиц,}$$

необходим эффективный фактор экспозиции  $\Phi = \Gamma \cdot T \cdot E > 100$  м<sup>2</sup>ср·год, где

- $\Gamma$  – геометрический фактор аппаратуры,
- $T$  – время экспозиции,
- $E$  – эффективность регистрации

|                                |           |           |           |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| E, eV                          | $10^{14}$ | $10^{15}$ | $10^{16}$ |
| N / м <sup>2</sup> ср·год (>E) | 2100      | 46        | 0.8       |

Интегральная интенсивность спектра КЛ в зависимости от энергии

➤ Единственная универсальная методика построения спектрометра сверхвысоких энергий – методика **ионизационного калориметра** (ИК).

➤ Моделирование показало, что для обеспечения требований по точности измерений глубина ИК должна быть

- > 25 радиационных единиц ( $25 X_0$ , rad. length)
- > 5 пробегов для взаимодействия протонов ( $5 \lambda_{inel}^p$ )

➤ Для эффективного использования аппаратуры требуются

- максимально возможно широкая апертура ( $\sim 2\pi$  для низкоорбитального эксперимента).

- квазигомогенная среда для регистрации каскада в объеме ИК
- оптимальная форма для обеспечения максимального геометрического фактора.

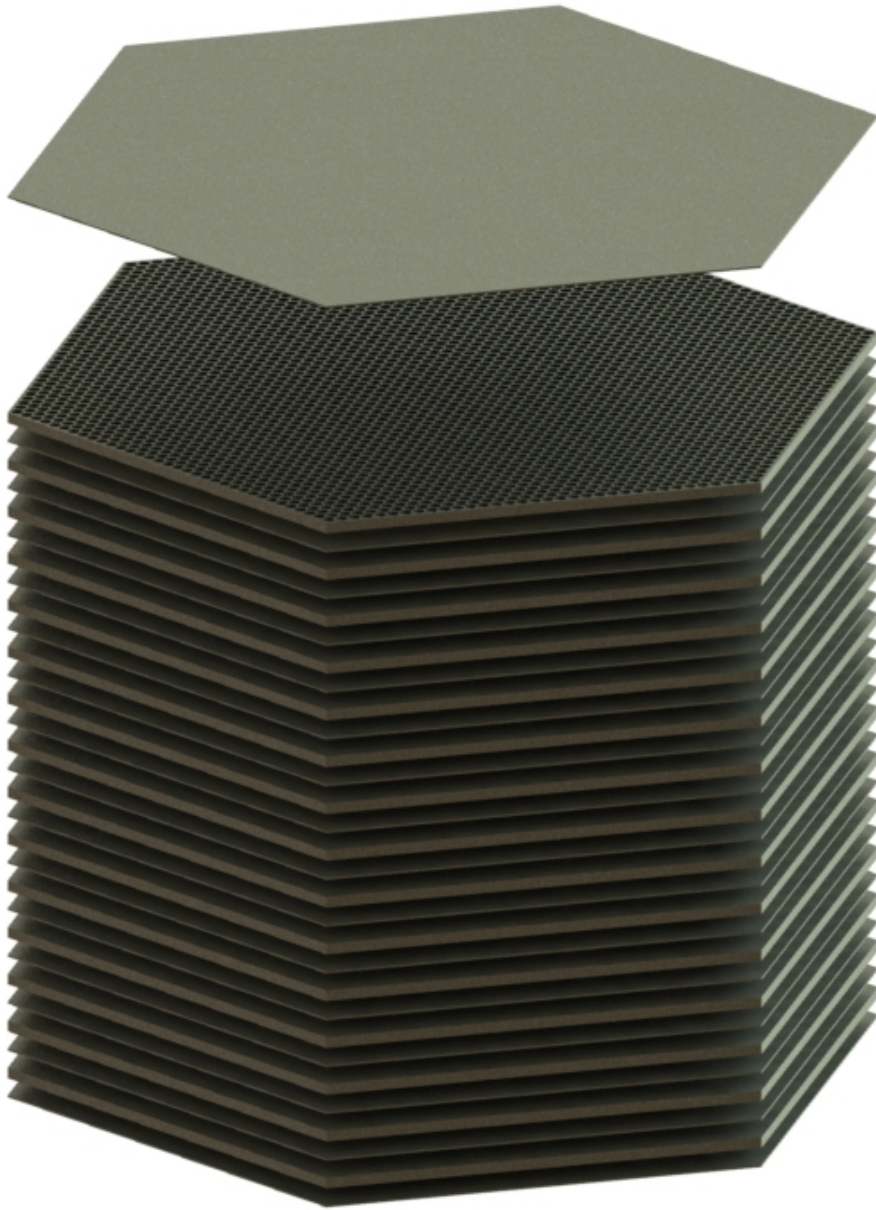
- возможность восстановления 3D-формы каскада для обеспечения требуемого уровня режекции адронных каскадов при регистрации  $\gamma$  и  $e^\pm$ .

➤ Дополнительное усиление режекции достигается регистрацией нейтронной компоненты ядерных и электромагнитных каскадов.

Поставленные задачи определяют требования по точности измерений:

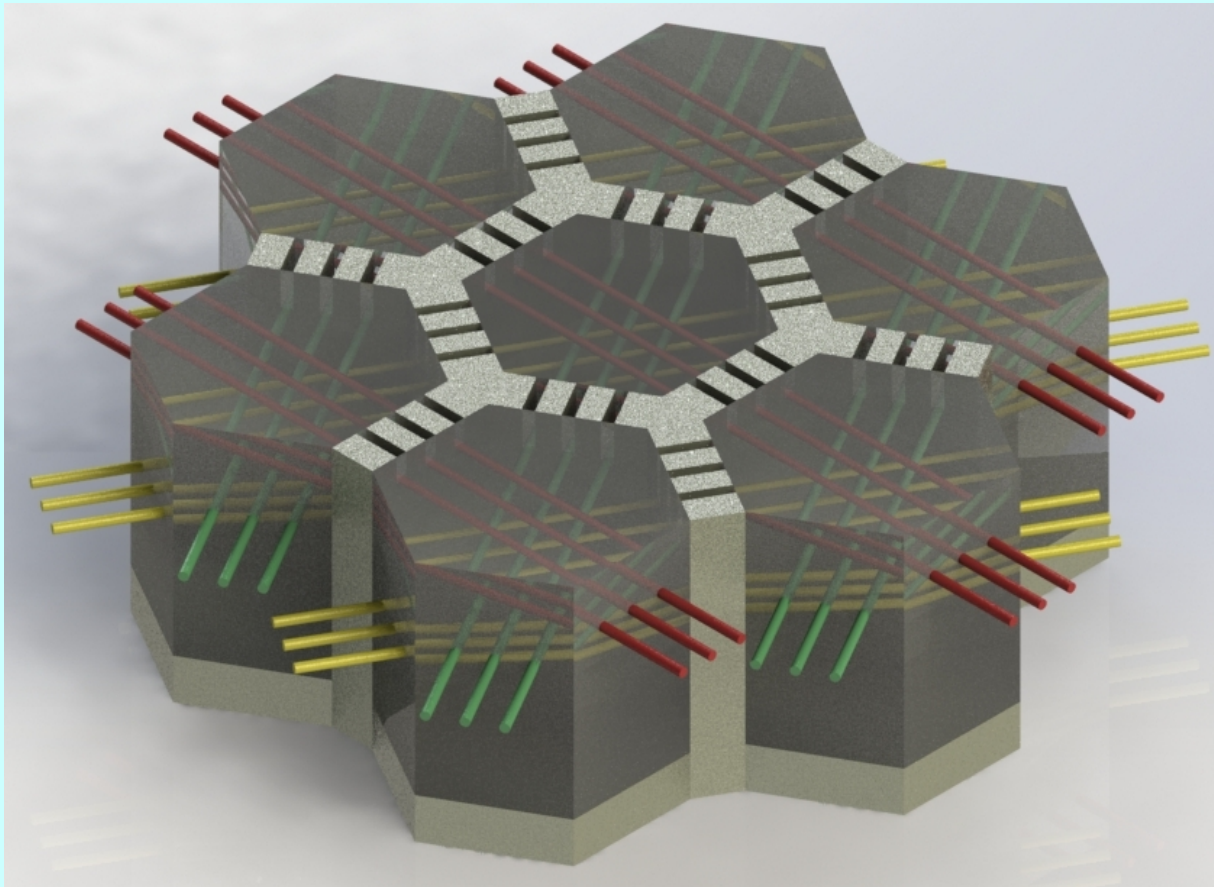
- энергетическое разрешение:
  - не хуже 25% для всех типов ядер (для восстановления тонкой структуры энергетических спектров);
  - не хуже 5% для электромагнитной компоненты,  $e^\pm$  и  $\gamma$ -квантов (для обнаружения возможных особенностей спектра);
- зарядовое разрешение
  - не хуже 0.2 (для разделения ядер по элементам);
- уровень режекции протонов по отношению к электромагнитной компоненте
  - $> 10^4$  для энергетической области  $10^{11}$ - $10^{12}$  эВ,
  - $> 10^5$  для энергетической области  $10^{12}$ - $10^{13}$  эВ;
- уровень режекции гамма-квантов по отношению к электронам
  - $> 10^2$  для всего исследуемого диапазона энергий.





Предлагается ионизационный калориметр (ИК), состоящий из 15 идентичных слоев.

- Каждый слой состоит из шестигранной плоскости толщиной 25 мм и диаметром описанной окружности 2025 мм,
- активная среда в слое – сцинтиллятор на основе полистирола ( $\rho \sim 1.0 \text{ г/см}^3$ ),
- поглотитель – вольфрам-медно-никелевый сплав ( $\rho \sim 16.0 \text{ г/см}^3$ ).

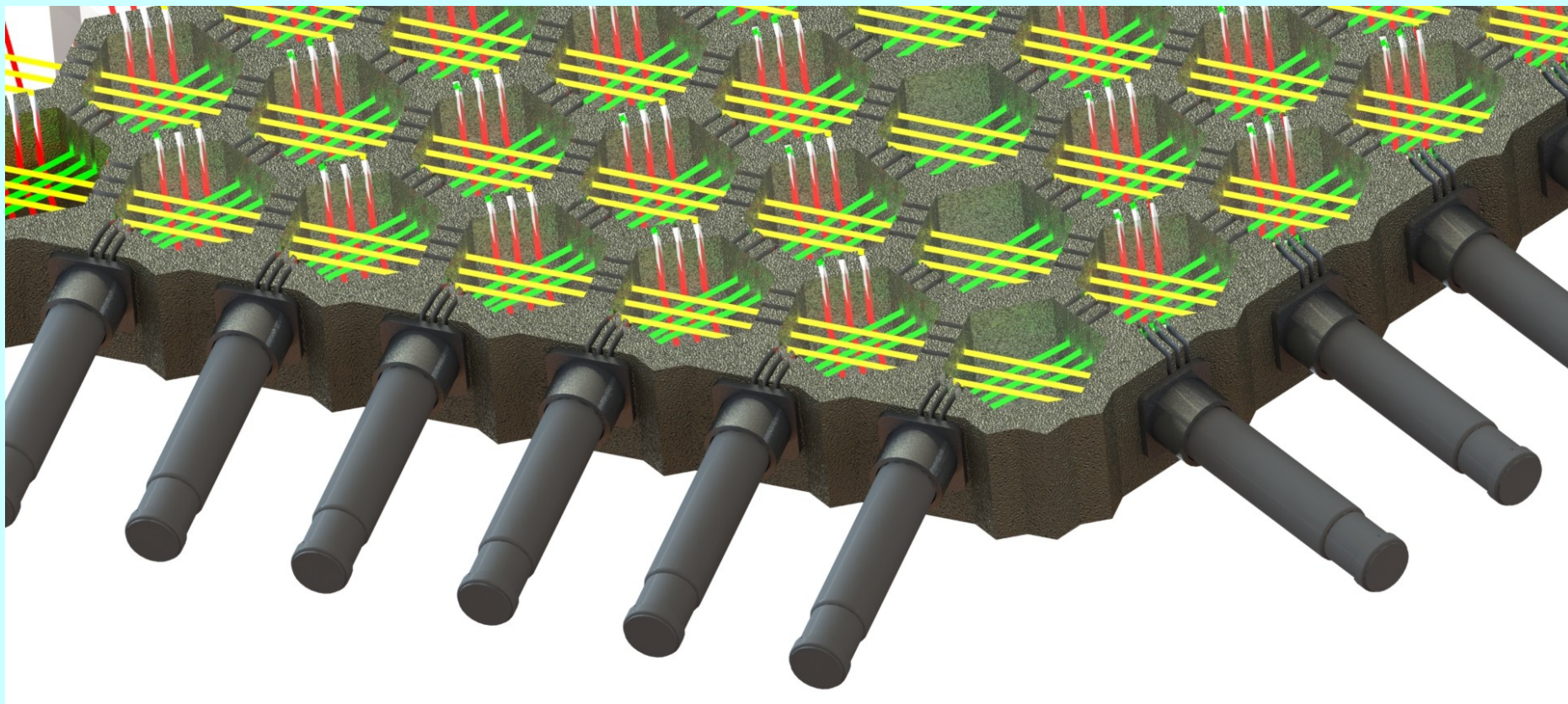


➤ Слой: состоит из 6-гранных ячеек ( $h = 25$  мм,  $\varnothing 25$  мм вписан. окружности) для сцинтиллятора и перегородками поглотителя (толщиной 5 мм  $\sim 1 X_0$ ).

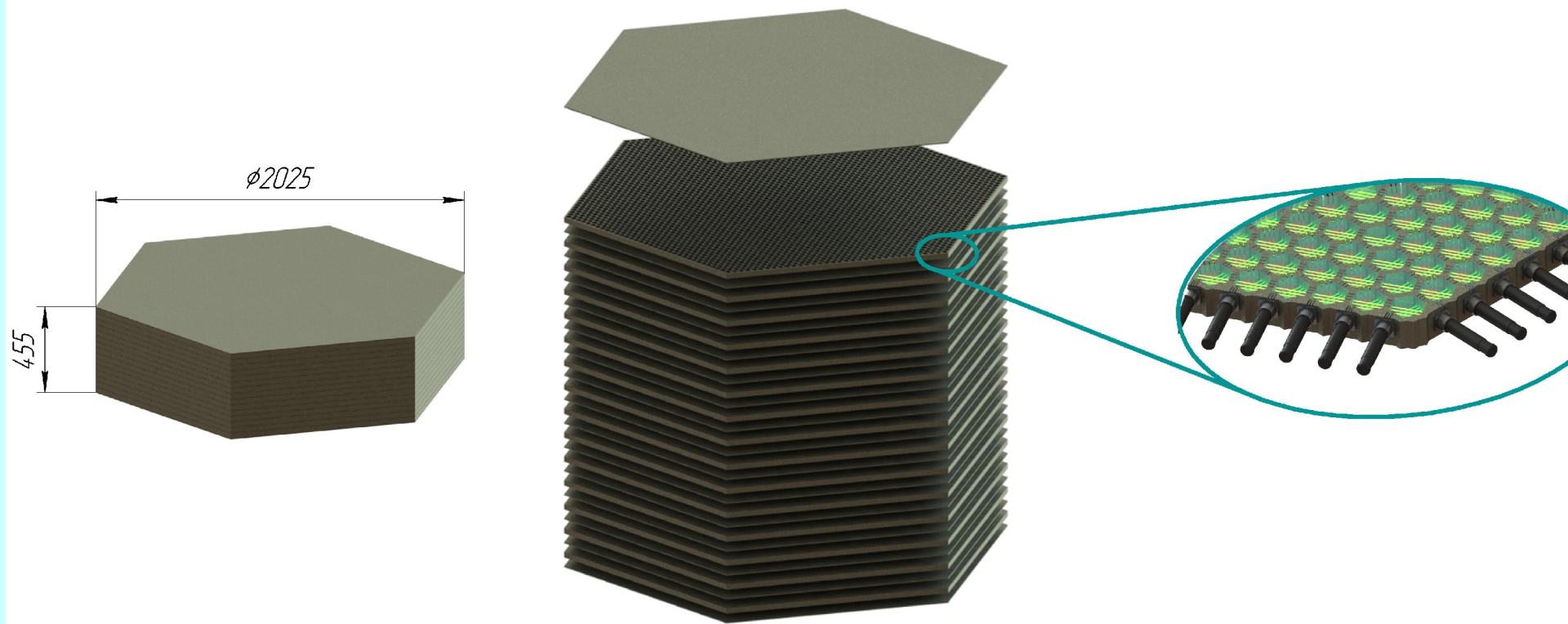
➤ Между слоями ИК расположен лист поглотителя ( $h = 5$  мм  $\approx 1 X_0$ )

➤ Световой сигнал регистрируется при помощи светосмещающих световодов, размещенных в линейках сцинтилляционных ячеек на разной глубине в трех измерениях ( $X=0^\circ$ ,  $Y=60^\circ$ ,  $U=120^\circ$ )

## Технические характеристики



- В каждом направлении в линейках проложено по 3 световода
- Световой сигнал каждой линейки регистрируется отдельным ФЭУ
- Противоположный от ФЭУ торец световодов отполирован с нанесением зеркального покрытия.
- Количество регистрационных каналов 3060.



- Геометрические размеры калориметра:
  - диаметр описанной окружности 2025 мм
  - высота 455 мм
- Масса ~ 10 тонн
- Количество регистрационных каналов 3060.

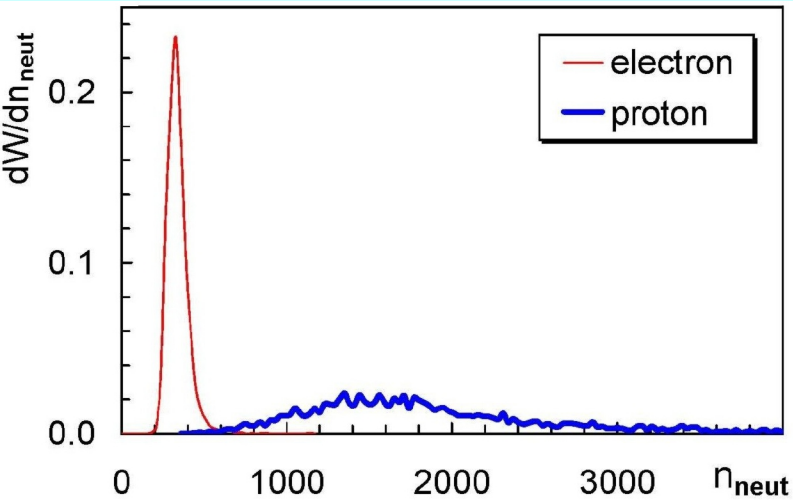
➤ Структура ИК позволяет восстанавливать 3D форму каскада с точностью  $\sim 1 X_0$  и обеспечить режекцию протонного фона на уровне  $10^4$

## Технические характеристики

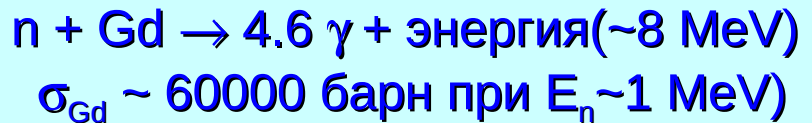
➤ Дополнительная режекция достигается путем регистрации нейтронов, генерация которых в ЭМ каскаде в ~20 раз ниже, чем в адронном. С ростом энергии нейтронный выход растет ( $Y_n \sim E_0^{0.8}$ ).

➤ Нейтроны и ионизационные потери регистрируются теми же детекторами. Для этого в сцинтиллятор введен гадолиний Gd (~0.3%).

➤ После прохождения каскада (~2 нс) ФЭУ включаются в режим счета ( $t_{\text{meas}} \sim 200 \mu\text{s}$ ) нейтронов, более 90% которых за время  $\tau_{\text{therm}} \sim 100 \mu\text{s}$  термализуется и захватывается гадолинием, либо покидает активную часть спектрометра. Gd излучает несколько  $\gamma$ -квантов, которые в тяжёлом поглотителе конвертируются в  $e^+e^-$ -пары и детектируются



Распределение нейтронного выхода каскада для электрона и протона при  $E=10^{11}$  эВ.

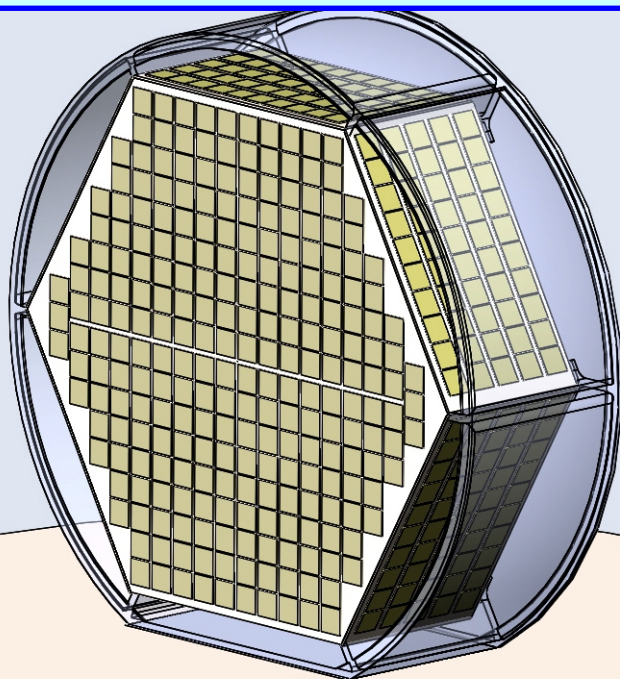


➤ Регистрация нейтронной компоненты увеличивает режекцию на ~2 порядка

➤ При  $E_0 > 10^{14}$  эВ и регистрации ~10% нейтронов точность определения энергии первичной частицы  $E_0$  по нейтронам и ионизационной компоненте одинаковы

## Технические характеристики

- ИК со всех сторон окружен кремниевой четырехслойной системой измерения заряда (СИЗ) с перекрытием  $\sim 95\%$  площади в угле обзора  $\sim 2\pi$ .
- Система измерения заряда состоит из независимых сборок (ледеров), размещённых на несущих плоскостях и включающих от 3 до 16 детекторов с размерами  $100 \times 100 \times 0.5 \text{ мм}^3$ .
- Каждый детектор разделен на 100 независимых сегментов (падов).



- Всего в СИЗ входит  $\sim 2000$  детекторов, итого  $\sim 2 \times 10^5$  независимых каналов
- Герметичность аппаратуры ОЛВЭ обеспечивается размещением ИК и системы измерения заряда в цилиндрический гермоконтейнер, усеченный по нижней грани калориметра, и установленным на несущей платформе КА.

## Технические характеристики

Точность измерения заряда определяется следующими факторами.

1. Физические флуктуации сигнала в детекторе.
2. Наложение сигнала от обратного тока каскада из калориметра.
3. Наложение фона от частиц низких энергий радиационных поясов.

Для оценки степени искажения в зарядовых измерениях моделировались взаимодействия частиц ПКИ с аппаратурой ОЛВЭ при предположениях:

1. Высота орбиты 400 км, наклонение  $51.6^\circ$ .
2. Рассчитывался усредненный поток электронов и протонов
3. Геометрия детектора заряда – механическая структура ДЗ НУКЛОН.
4. Обратный ток моделировался в калориметре с выбранной структурой.
5. Триггерный сигнал вырабатывается за время  $t_{tr} \sim 0.3$  мкс.
6. Локализация трека первичной частицы в область системы измерения заряда определяется с точностью не хуже  $1 \text{ см}^2$ .

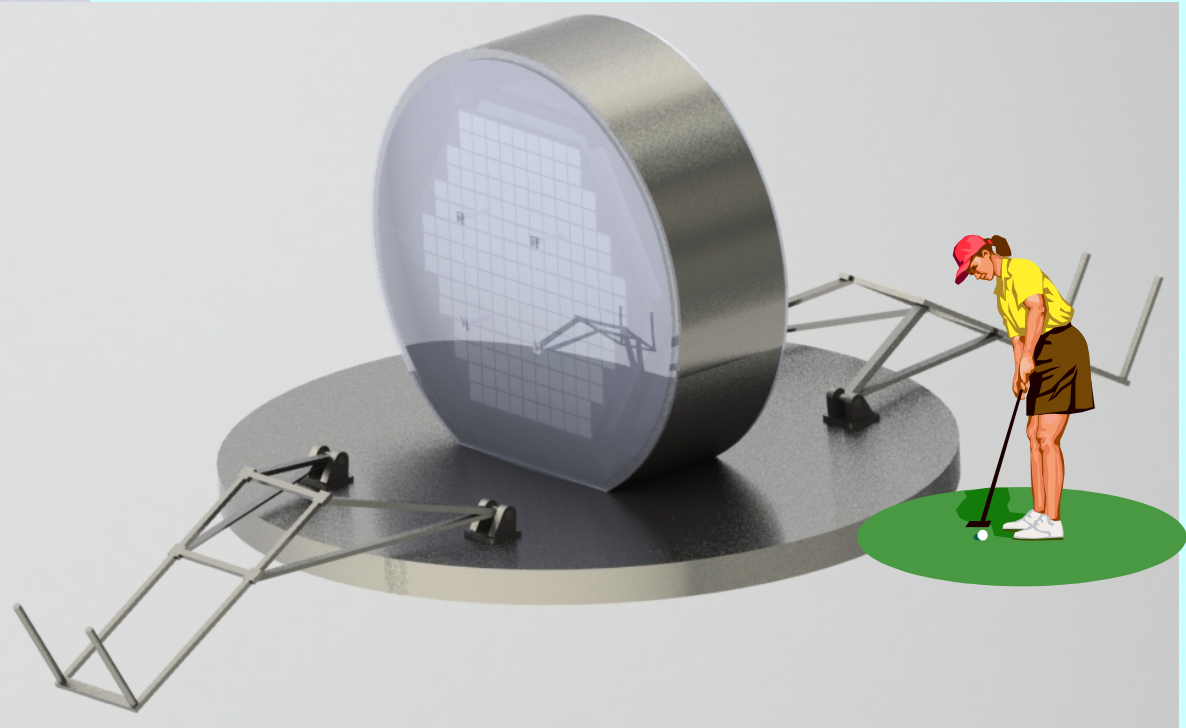
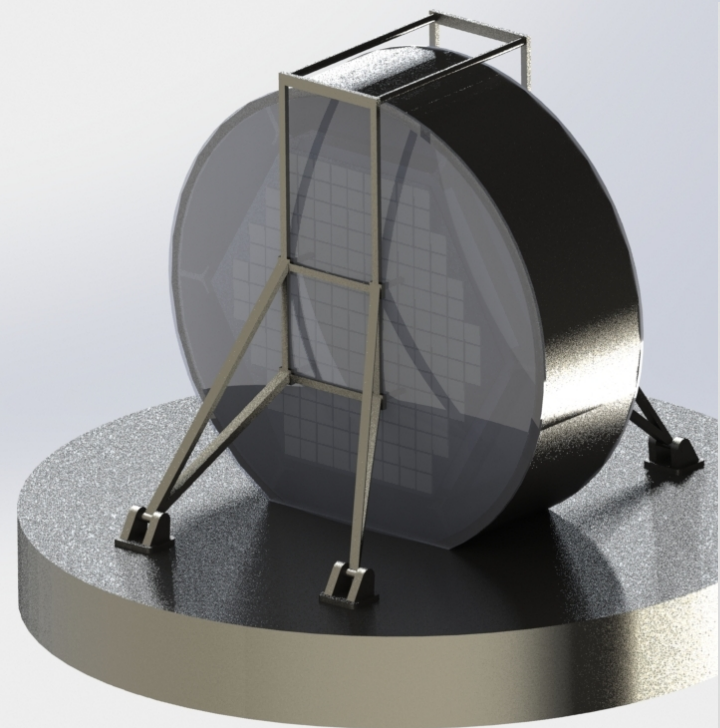
Показано, в частности, что

- наиболее чувствительные к искажениям ядерные частицы КЛ - протоны
- вероятность искажения спектра протонов при  $10^{15} - 10^{16}$  эВ за счет имитации протонами  $\alpha$ -частиц из-за воздействия обратного тока.
  - За счет небольших размеров падов и сужения зоны искажающего воздействия обратного тока, эффект может быть снижен до  $\sim 5\%$ .
  - Влияние остальных факторов значительно меньше

## Технические характеристики

➤ Оптимизация размещения ИК на низкой околоземной орбите требует ориентировать прибор одной из шести боковых поверхностей к Земле. Это дает ~50% увеличения геометрического фактора, по сравнению с ориентацией ИК параллельно Земле

➤ Устойчивость гермоконтейнера при выведении на орбиту обеспечивается с помощью опорной рамы, установленной на шарнирные опоры, и закрепленной сверху устройством, обеспечивающим раскрытие при экспонировании

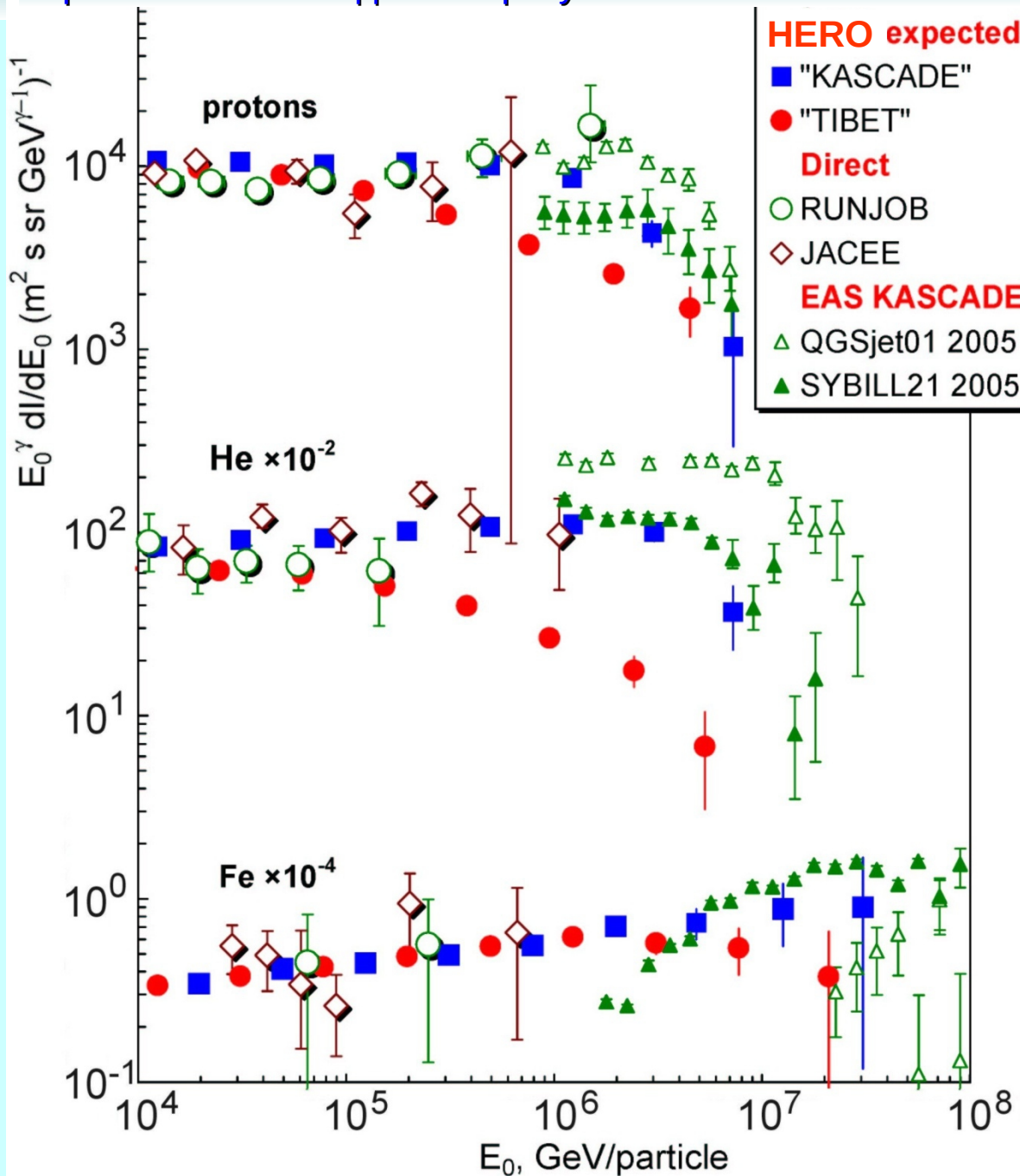




## Технические характеристики

|  |                                |                             |
|--|--------------------------------|-----------------------------|
| Эффективный<br>геом.фактор:<br>( $L_{\text{cascade}} > 25 X_0$ ) | протоны                        | ~ 9 м <sup>2</sup> ср       |
|  | ядра (в среднем)               | ~ 14 м <sup>2</sup> ср      |
|  | $\gamma$ и $e^{\pm}$           | ~ 16 м <sup>2</sup> ср      |
| Фактор экспозиции при<br>эксплуатации 10 лет                     | протоны                        | ~ 90 м <sup>2</sup> ср·год  |
|  | ядра (в среднем)               | ~ 140 м <sup>2</sup> ср·год |
|  | $\gamma$ и $e^{\pm}$           | ~ 160 м <sup>2</sup> ср·год |
| Точность измерений<br>энергии:                                   | протоны                        | ~ 20%                       |
|  | ядра                           | ~ 10-15%                    |
|  | $\gamma$ & $e^{\pm}$           | ~ 5%                        |
| <u>Точность измерений заряда:</u>                                |                                | ~ 0.2 един.заряда           |
| Уровень режекции:  | протоны к $\gamma$ & $e^{\pm}$ | $10^5 - 10^6$               |
|  | $\gamma$ к $e^{\pm}$           | $>10^3$                     |

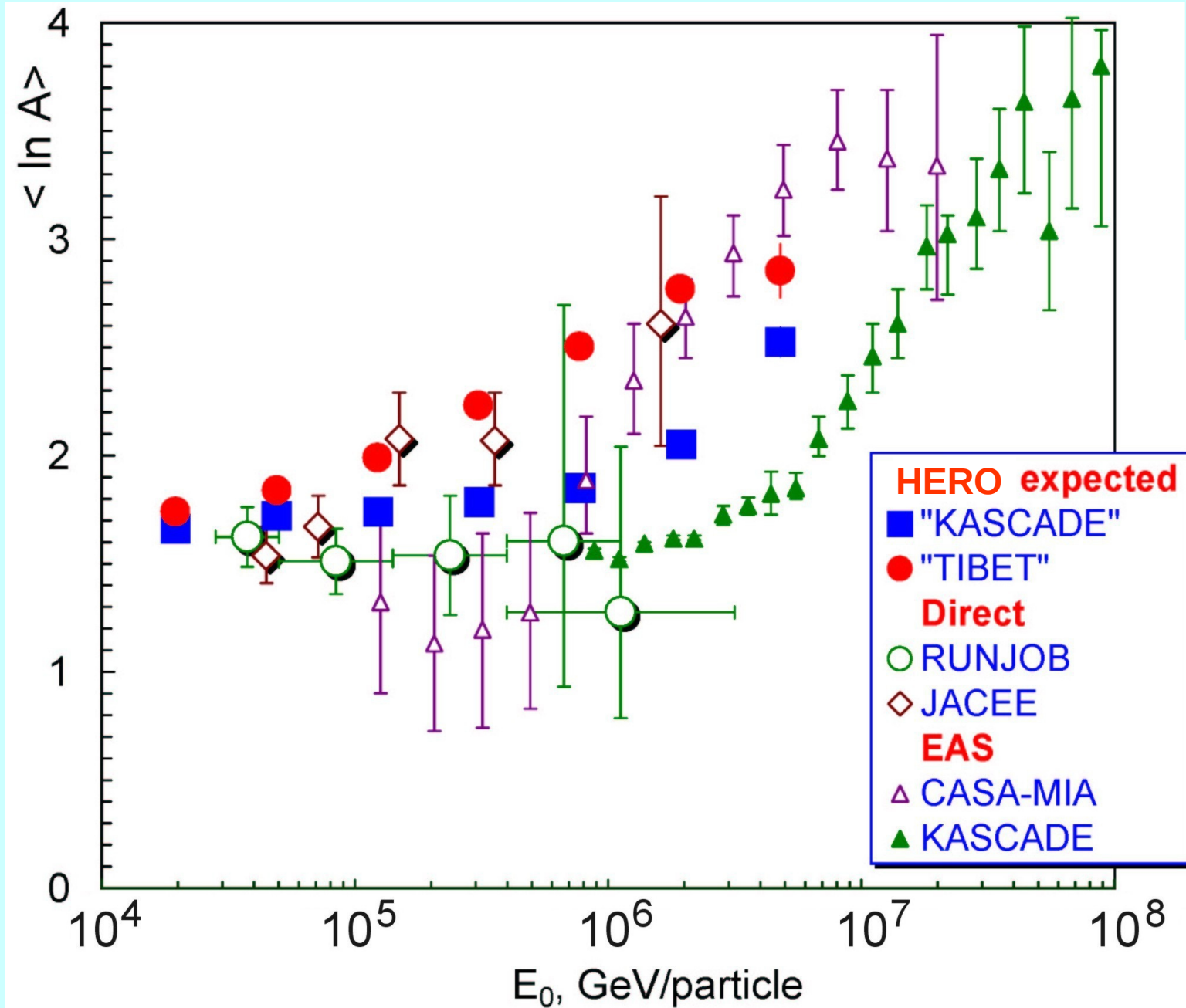
|                     |   |
|---------------------|---|
| Общая масса ОЛВЭ    | 10 тонн   |
| Энергопотребление   | не более 3500 Вт  |
| Габаритные размеры: | в транспортном положении не<br>выходят за габарит цилиндра<br>$\varnothing 2.5$ м и $h=2.5$ м |



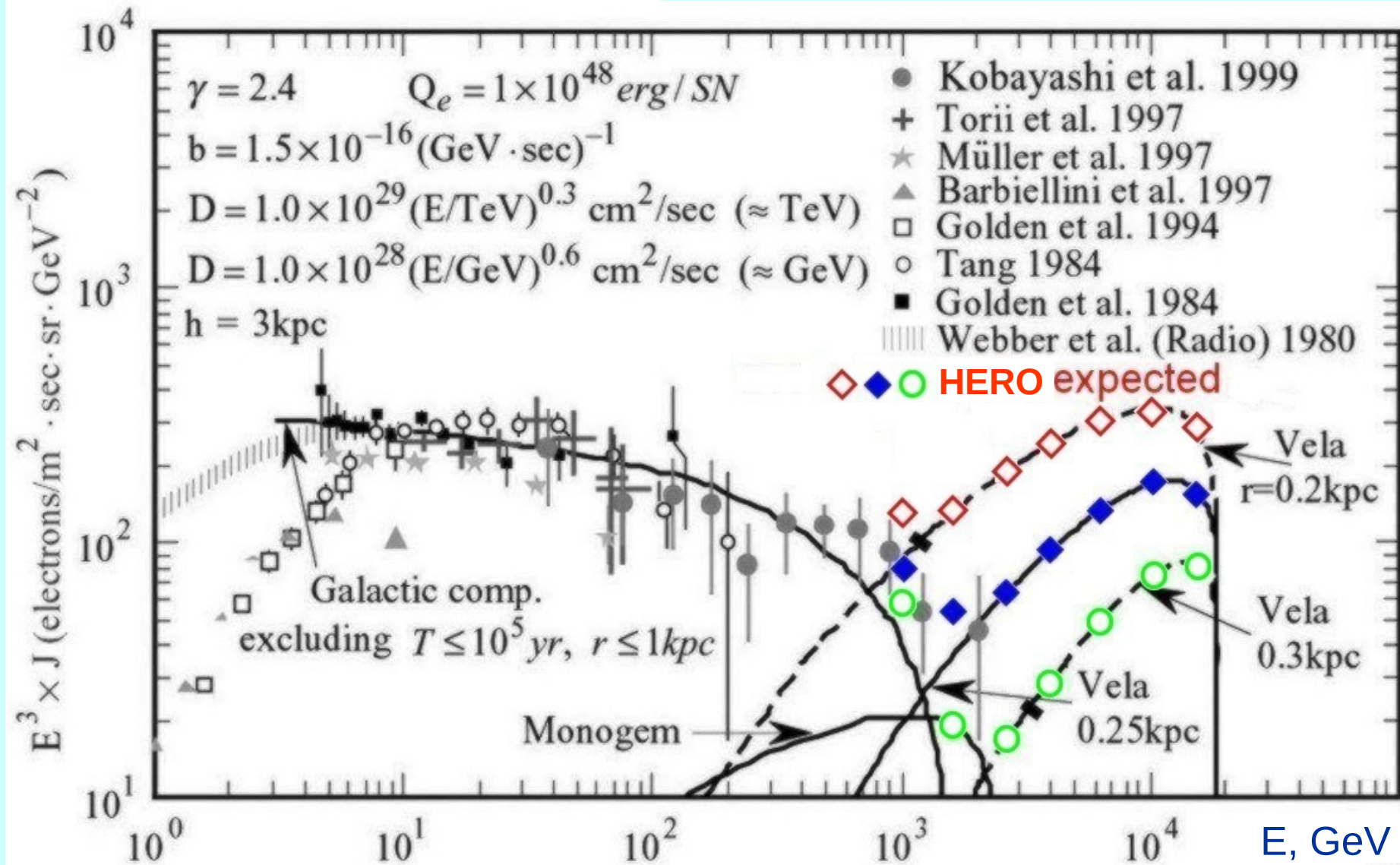
## Composition & spectra

### Expected results:

- PCR nucleus number at  $T_{\text{exp}} = 10$  years &  $\Gamma = S\Omega \geq 10 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$ :
  - $N(E_0 \geq 10^{16} \text{ eV}) \geq 100$
  - $N(E_0 > 10^{15} \text{ eV}) \geq 5000$
- determination of
  - PCR components in the “knee” range
- choice between
  - “KASCADE” and “TIBET” spectra
  - QGSjet and SYBILL models, e.g.



- choice between "KASCADE" and "TIBET" spectra



Expected electron number ( $T_{\text{exp}} = 4 \text{ years}$  &  $\Gamma = 16 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$ ):

- PCR electrons number  $N(E_0 > 10^{12} \text{ eV}) \sim 2 \cdot 10^4$

***Спасибо***  
***!***