

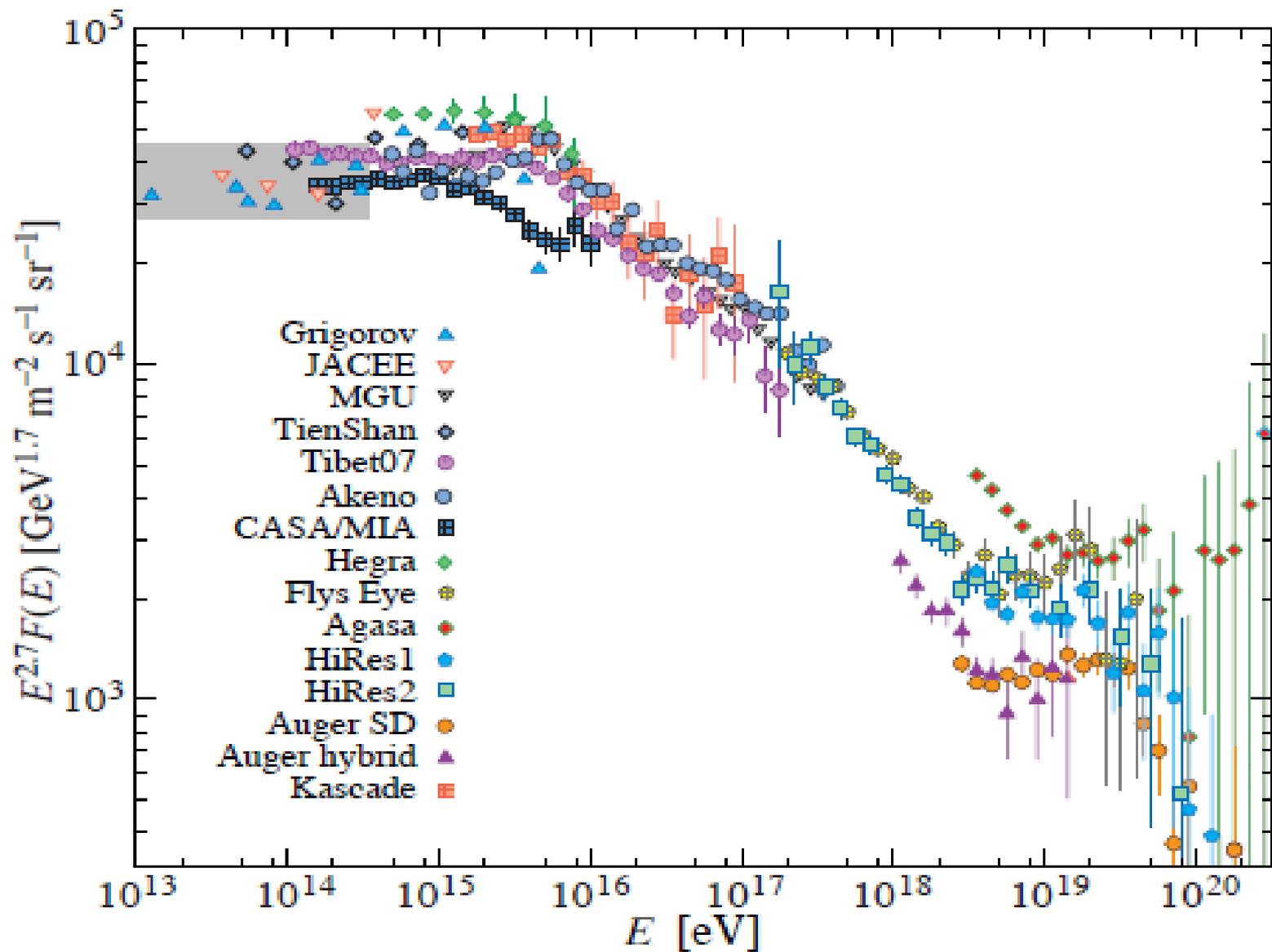
**«НЕЙТРОНИЙ» - крупномасштабная  
установка для исследований космических  
лучей на долговременной лунной станции**



Главной целью данной работы является изучение фундаментальных астрофизических проблем происхождения космических лучей высоких энергий (включая область «колена»), их ускорения и распространения в Галактике, а также природы темной материи.

### Основные научные задачи

1. Решение проблемы происхождения «колена» космических лучей с помощью прямых измерений спектра и химического состава до энергий  $10^{17}$  эВ
2. Изучение межзвездного пространства Галактики при помощи моделей распространения ядер КИ
3. Изучение анизотропии КЛ
4. Исследование зарядового и изотопного состава тяжелых и сверхтяжелых ядер низких энергий ( $\sim 1$  МэВ/н)



Спектр космических лучей. В области высоких энергий – пока только косвенные методы на основе измерений ШАЛ.

## Интегральные спектры КЛ (м<sup>2</sup>ср год)

(>E)

10<sup>14</sup>

10<sup>15</sup>

10<sup>16</sup>

10<sup>17</sup>

2100

46

0.8

0.0054

**Нуклон** - исследования КЛ при 10<sup>11</sup> - 10<sup>15</sup> эВ)

Фактор экспозиции 2/0.75 м<sup>2</sup>ср (ядра ПКИ)

**ОЛВЭ** - исследования КЛ при 10<sup>12</sup> – 10<sup>16</sup> эВ)

Фактор экспозиции ~20 м<sup>2</sup>ср (ядра ПКИ)

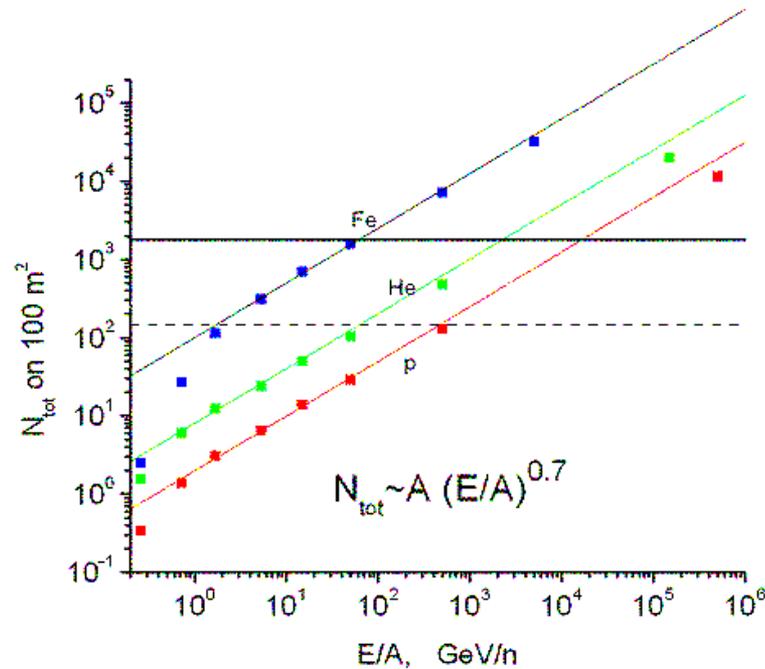
**Нейтроний** - исследования ПКИ при 10<sup>14</sup> – 10<sup>17</sup> эВ  
с помощью аппаратуры размещенной на поверхности  
Луны)

Фактор экспозиции >1000 м<sup>2</sup>ср (ядра ПКИ)

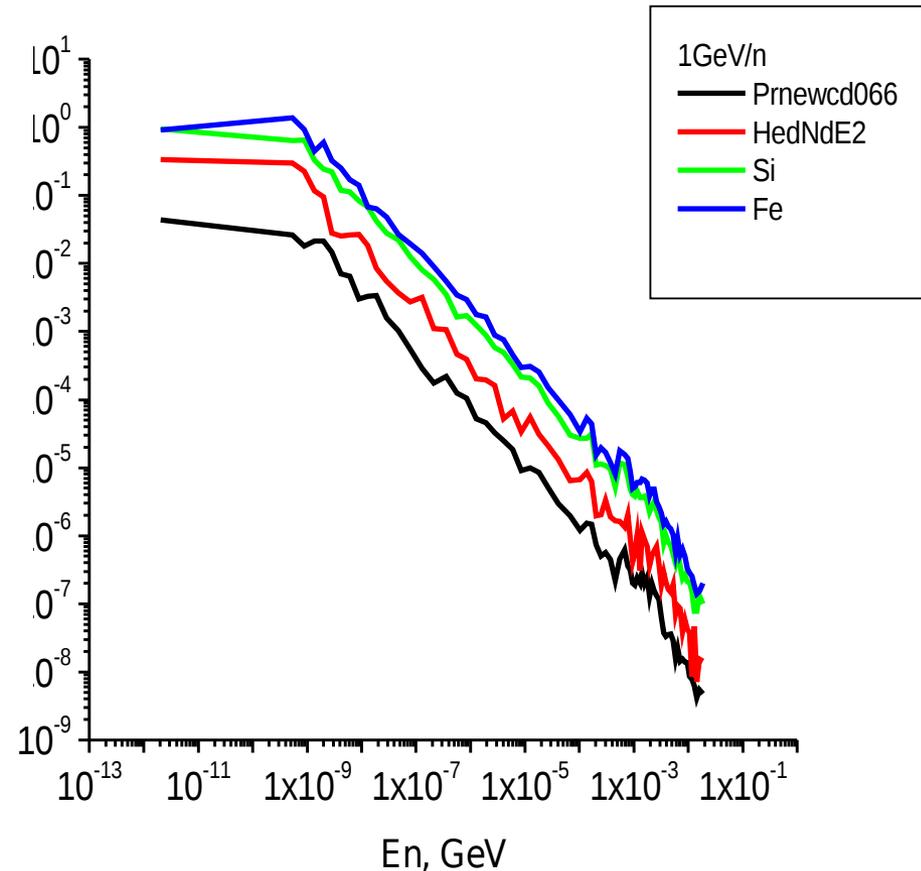
Проведенное предварительное моделирование и анализ его результатов показали принципиальную возможность определения энергии частиц космического излучения по обратному току от каскадов, инициированных частицей в реголите, по нескольким компонентам: нейтронам, гамма-излучению, радиоизлучению.

- Нейтроны альбеда из каскадов в лунном грунте
- Гамма-кванты альбеда из каскадов в лунном грунте
- Альбеда радиоизлучения каскадов из каскадов в лунном грунте

# Восстановление энергии первичной частицы по нейтронам альbedo



Энергетическая зависимость потока нейтронов альbedo от каскада в реголите (горизонтальные линии – фон при разных размерах детекторов)

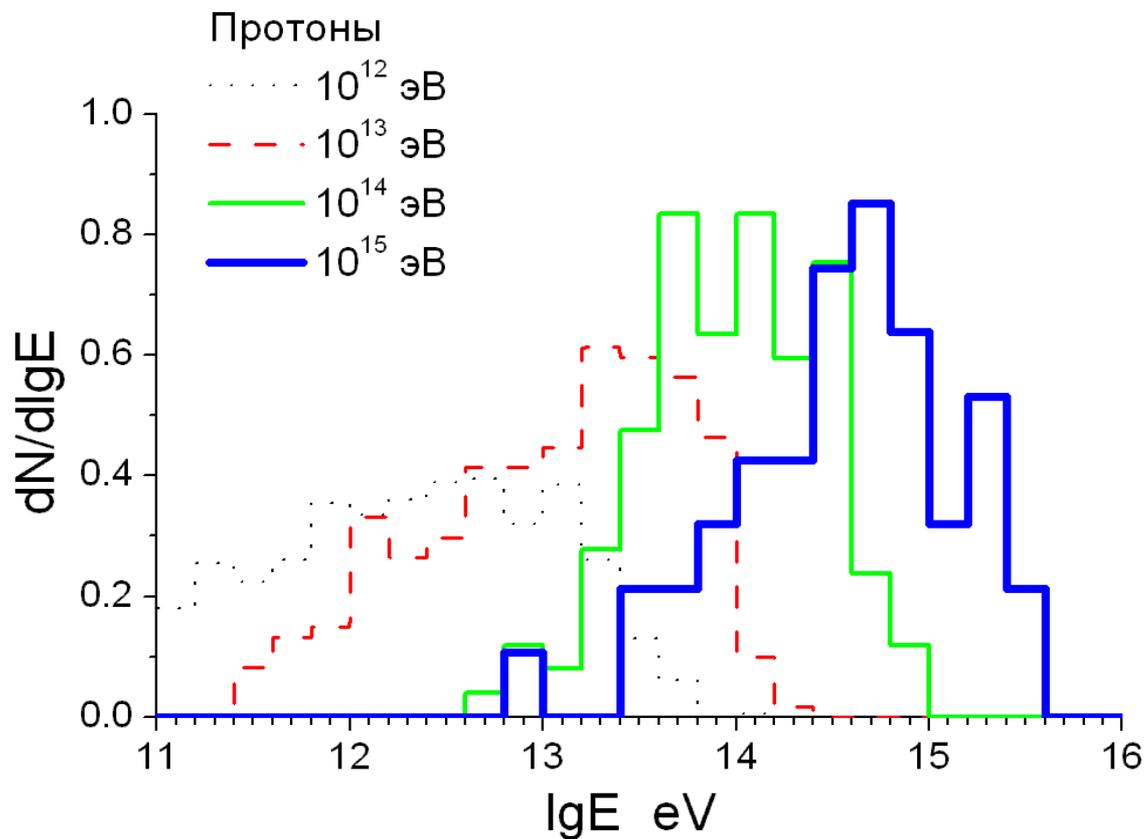


Спектры нейтронов на поверхности Луны от первичного протона, ядра гелия, кремния и железа с энергией 15 ГэВ/нуклон

# Выводы по нейтронам

- Число нейтронов, пересекающих детекторы, установленные на поверхности Луны, при прохождении первичного ядра через реголит, растет с ростом энергии как  $E_n^{0.7}$ , и пропорционально массе первичного ядра. Флуктуации выхода нейтронов зависят от массы ядра. RMS составляет 20% для ядер железа, 50 % для ядер гелия и 70% для протонов при энергиях  $> 10^{14}$  эВ.
- Средний размер 'пятна', на котором регистрируется 95% нейтронов – составляет около  $30 \text{ м}^2$ , а 70% энергии – около  $8 \text{ м}^2$ .
- Время сбора сигнала – около 300 мкс.
- Общий фон на поверхности позволит детектировать частицы с энергией не менее 300 ТэВ.
- Наличие водородосодержащих пород в месте размещения аппаратуры улучшает замедление нейтронов и упрощает регистрацию каскада.

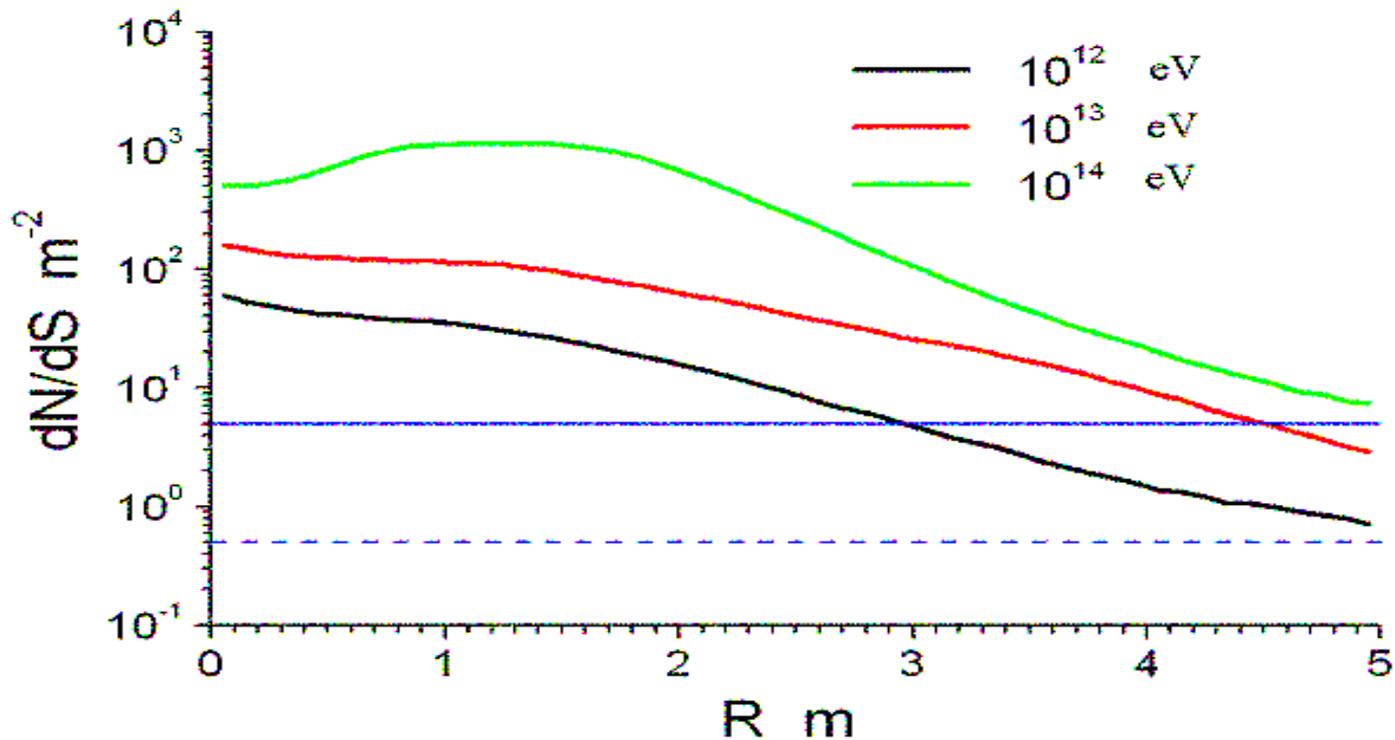
# Восстановление энергии первичной частицы по гамма-квантам альбедо



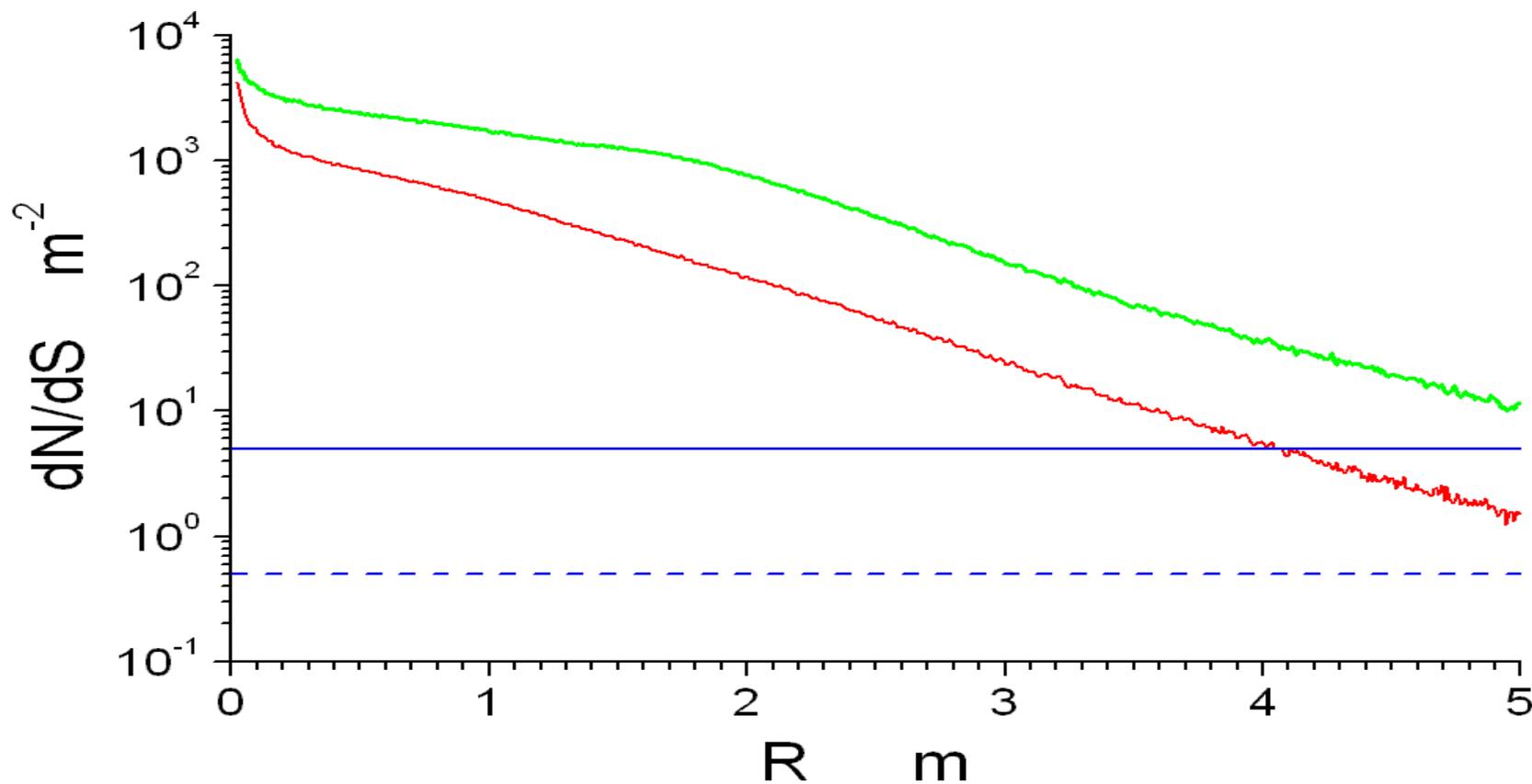
Распределение по восстановленной энергии (по гамма-альбедо)  
 $\delta = 200\%$  ( $10^{12}$  эВ),  $150\%$  ( $10^{13}$  эВ),  $100\%$  ( $10^{14}$  эВ),  $70\%$  ( $10^{15}$  эВ)

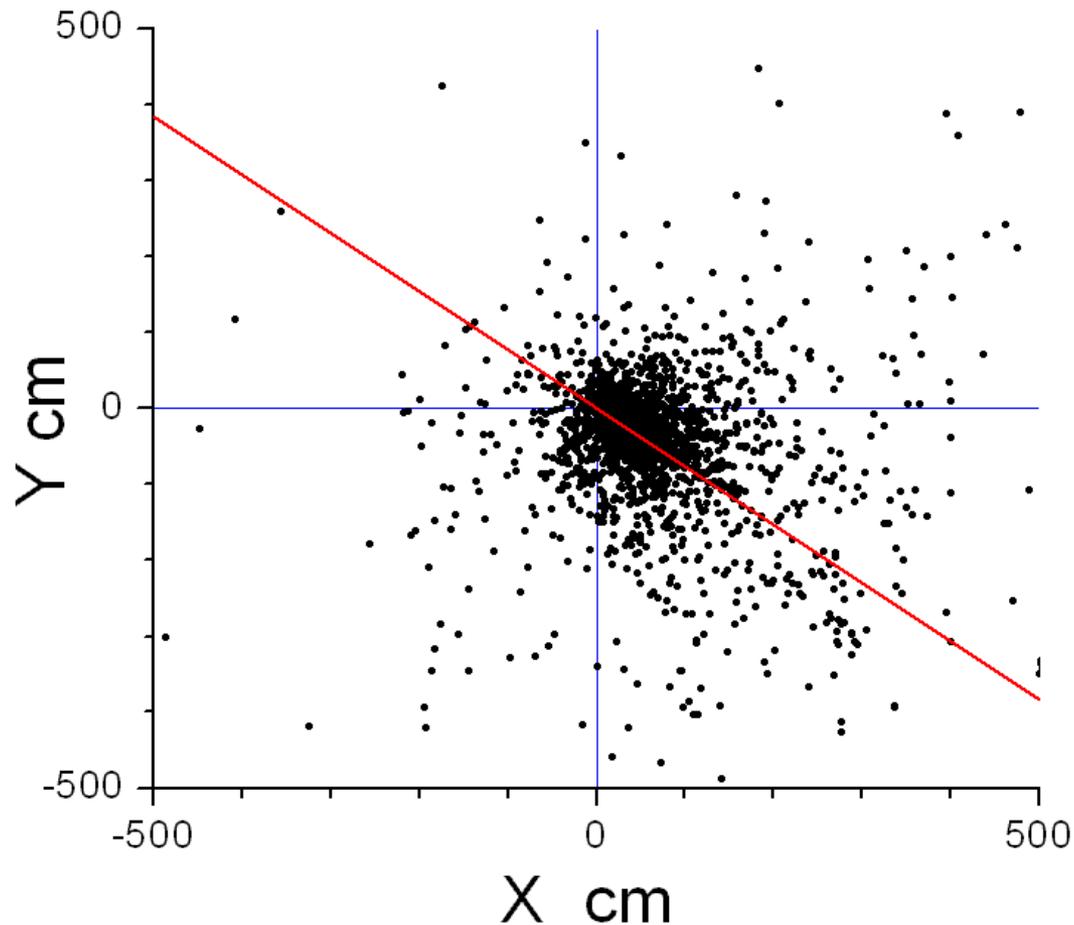
# Усредненные по направлениям трека первичной частицы пространственные распределения гамма-квантов альбеда (первичные протоны)

Горизонтальные линии - фон (по данным Igor V. Moskalenko & Troy A. Porter *Astrophys. J.* 670, 1467-1472 (2007)). Время сбора принималось 100 мкс (сплошная) и 10 мкс (пунктир). При необходимости его можно еще уменьшить.



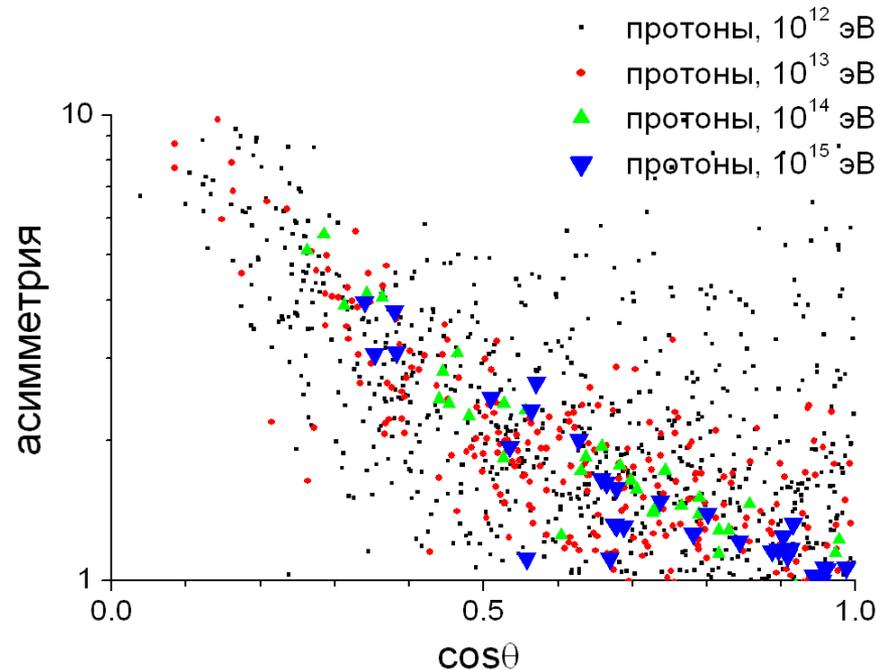
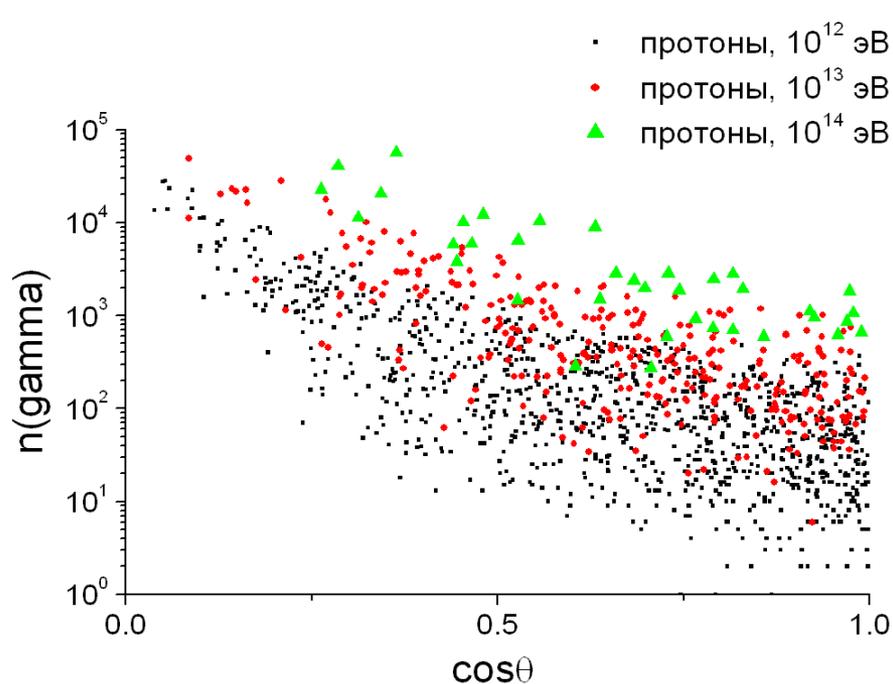
# Усредненные по направлениям трека первичной частицы пространственные распределения гамма-квантов альbedo (ядра Fe)





Более узкое, по сравнению с нейтронами, пространственное распределение гамма-альbedo позволяет локализовать ось каскада с точностью 0.2-0.5 м.

## Асимметрия распределения используется при определении наклона трека

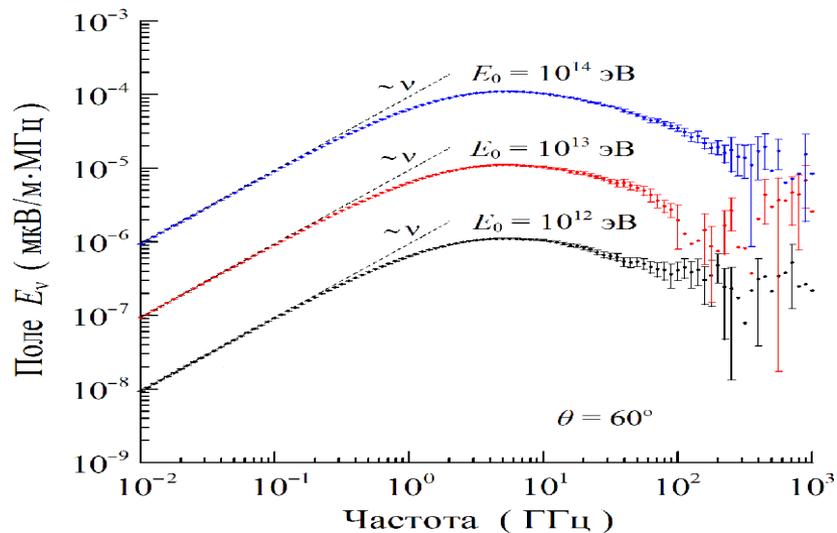
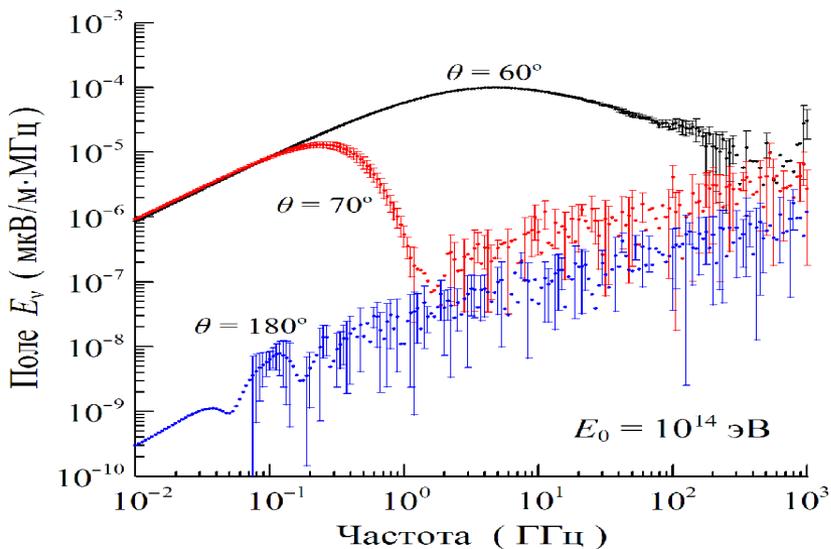


Учет асимметрии пространственного распределения гамма-альbedo ( $k=(\sigma(X_l)/\sigma(X_t))^2$ ,  $X_l$  – расстояние от трека частицы до малой оси области рассеяния,  $X_t$  - расстояние от трека частицы до большой оси области рассеяния) позволяет ввести поправку на угол наклона трека и перейти к приведенной множественности  $n_v$ .

# Выводы по гамма-альбедо

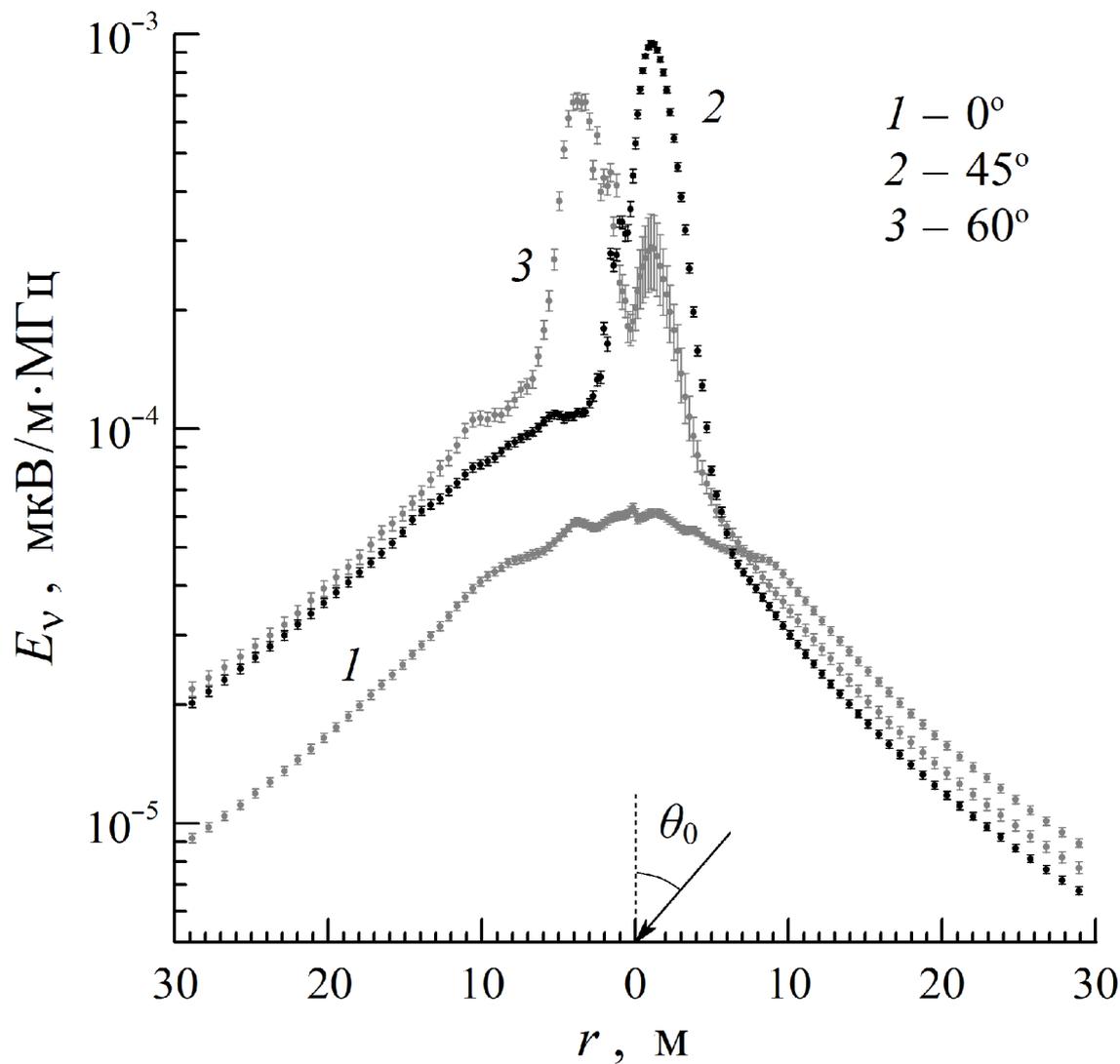
- Основная часть фотонов альбедо сосредоточена вблизи трека (в радиусе  $\sim 2$  м). Это позволяет локализовать трек с точностью  $\sim 0.2-0.5$  м.
- Угловую зависимость выхода квантов удастся учесть с помощью анализа асимметрии пространственного распределения.
- Погрешность в определении энергии в области энергий  $\sim 10^{14}$  эВ составляет  $\sim 100\%$ , в области энергий  $\sim 10^{15}$  эВ составляет  $\sim 70\%$ .

# Использование радиоизлучения от каскадов в реголите



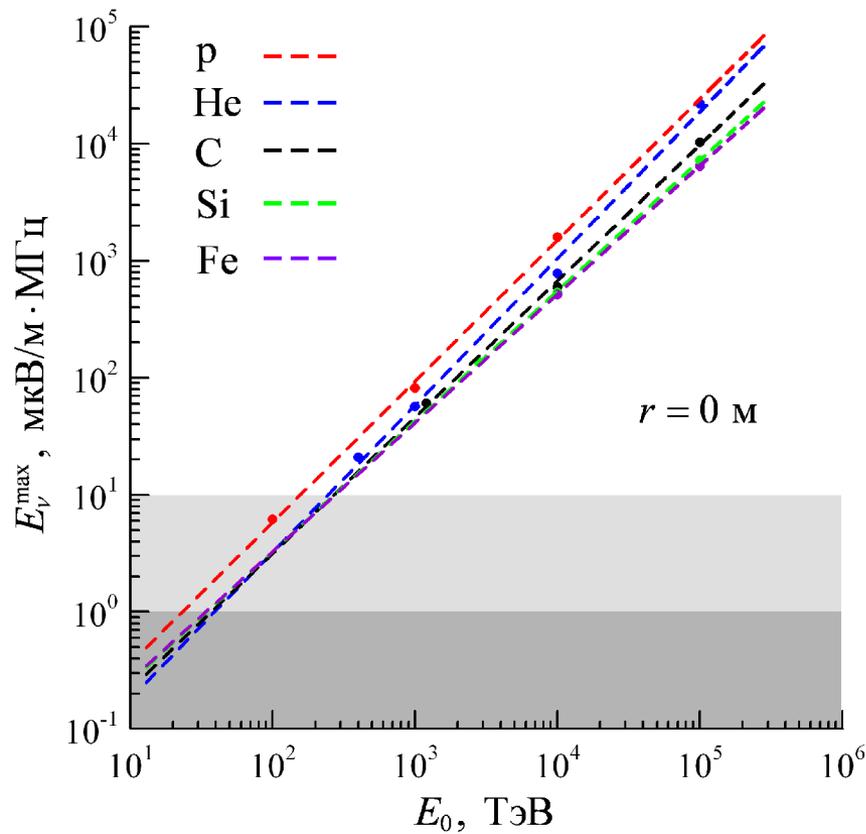
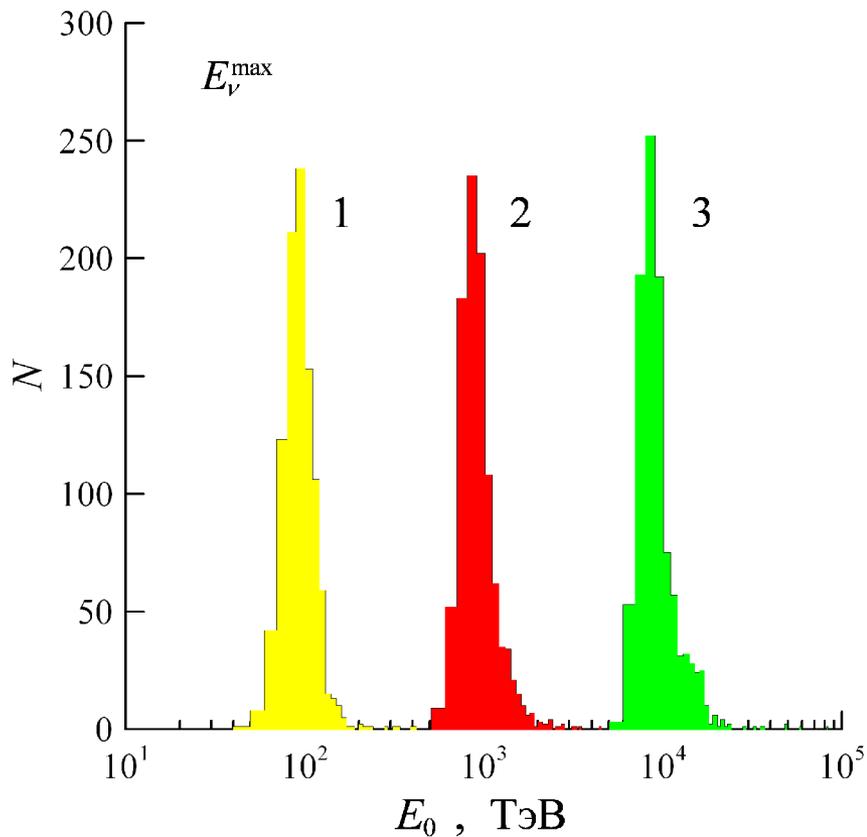
Возможна регистрация первичных космических лучей по когерентному (на частотах ниже  $\sim 10$  ГГц) радиоизлучению от ливней в приповерхностном слое реголита. Математическое моделирование позволило получить частотные спектры при разных энергиях и углах наблюдения радиоизлучения.

Функция пространственного распределения (ФПР) напряженности  
полного поля радиоизлучения, наблюдаемого на поверхности Луны, на  
частоте 1 ГГц от ливней, образованных протонами с энергией  $E_0 = 10^{13}$  эВ  
при различных углах входа в поверхность  $\theta_0$



# Энергетическая зависимость радиосигнала и распределения по восстановленным энергиям протонов

1 –  $10^{14}$  эВ ( $\delta = 50\%$ ), 2 –  $10^{15}$  эВ ( $\delta = 40\%$ ), 3 –  $10^{16}$  эВ ( $\delta = 40\%$ ),



# Что дает совместная регистрация разных компонент обратного тока из реголита?

- Определение параметров трека по гамма-компоненте позволяет резко повысить точность восстановления первичной энергии по радиоизлучению до ~50%.
- Регистрация нейтронов дает возможность разделять адронные и электромагнитные каскады.

# Выводы по радиоизлучению

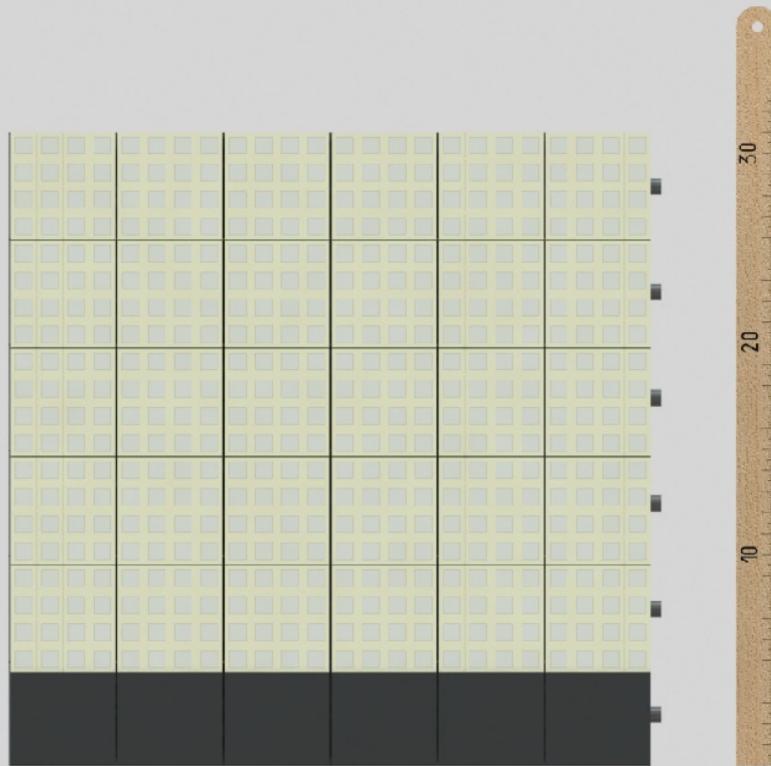
- Наиболее рациональным является размещение приемных устройств на поверхности Луны непосредственно над «ионизационно-нейтронным калориметром». Это обеспечивает сравнительно низкий порог регистрации ( $10^{15}$  эВ).
- Оптимальный (с учетом поглощения реголитом) частотный диапазон для регистрации когерентного радиоизлучения от «лунных» ливней  $\approx 2-10$  ГГц
- Погрешность в измерениях энергии первичной частицы составляет  $\sim 40-100\%$  в зависимости от условий регистрации радиосигнала

# Детектирование гамма и нейтронов

Детектор должен представлять собой «ковёр» из множества модулей, каждый из которых оснащен собственной считывающей электроникой.

В состав модуля входят (сверху вниз):

- 1) 4 слоя кремниевых падовых детекторов заряда.
- 2) сцинтилляционные детекторы обратного тока с добавкой гадолиния (для регистрации нейтронов).
- 3) радиоантенны, прилегающие к реголиту.

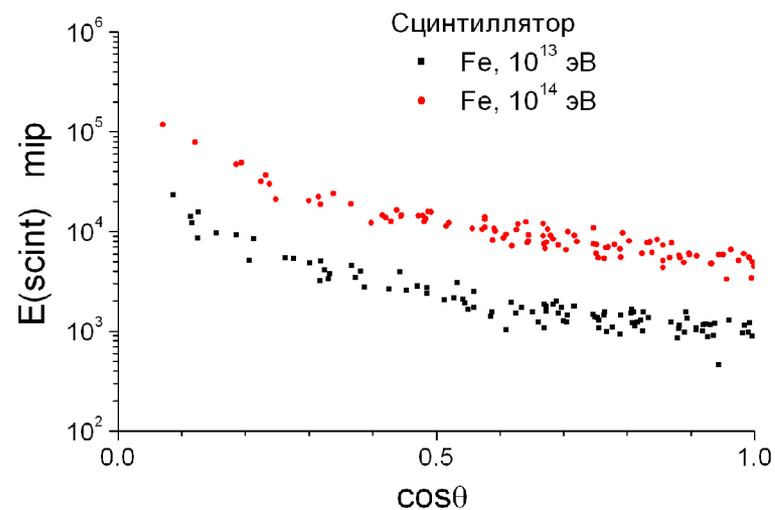
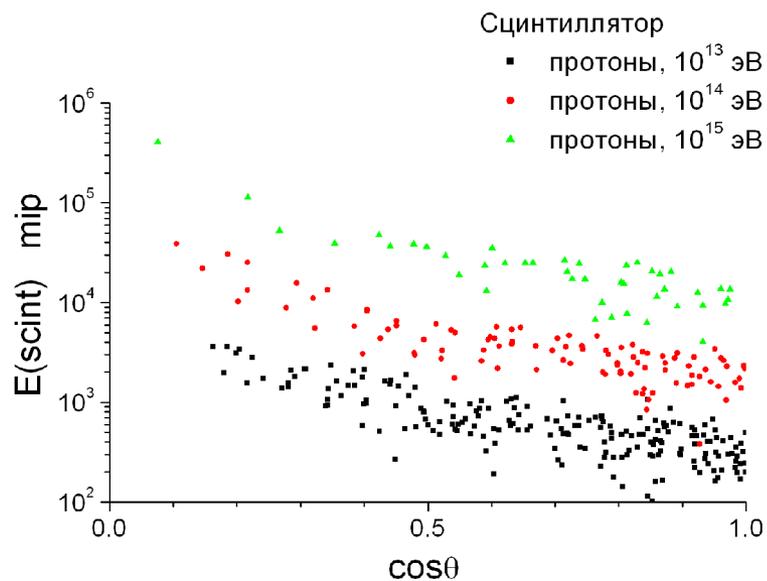


# Требования к модульной структуре

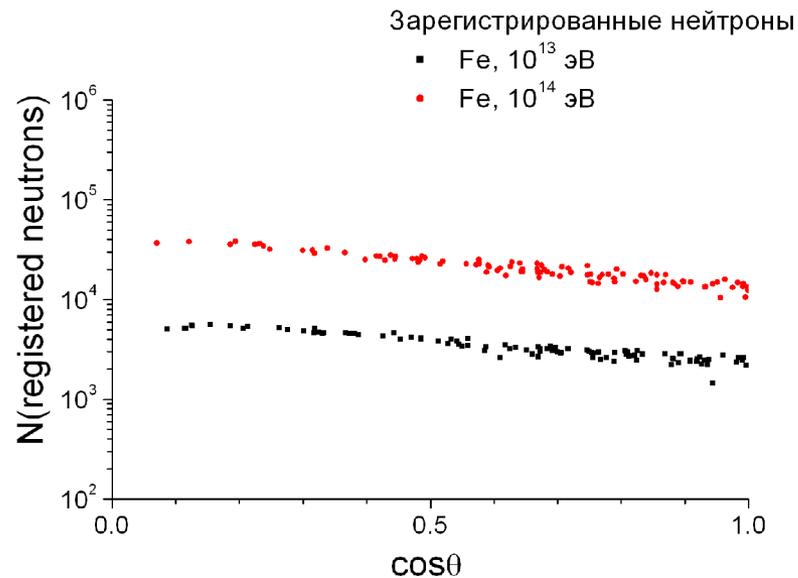
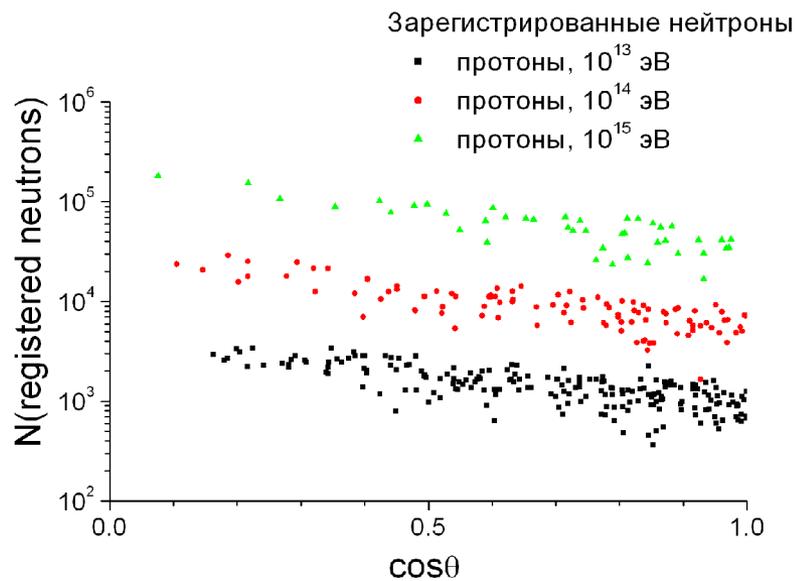
- Модульная структура должна обеспечить возможность перестройки комплекса научной аппаратуры в процессе эксплуатации в случае появления новых возможностей или новых научных задач.
- На начальной стадии отдельные модули должны использоваться для мониторинга радиационной обстановки.
- Каждый модуль должен быть оснащен собственной считывающей электроникой

# Отклик сцинтилляционного детектора (заряженный обратный ток и гамма-излучение) при разных наклонах трека.

Толщина сцинтиллятора 2 см.



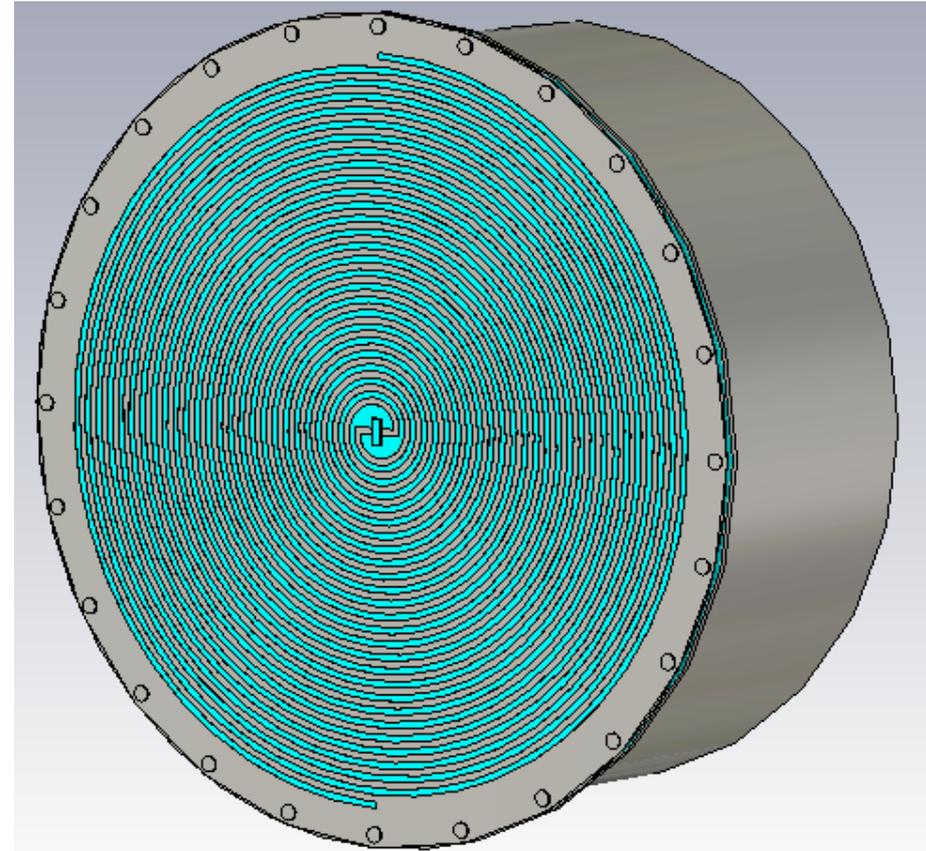
# Число зарегистрированных нейтронов (эффективность регистрации $\sim 0.3$ ) при разных наклонах трека.



## Антенна для регистрации радиоизлучения, идущего снизу из реголита.

При неизвестной поляризации принимаемых электромагнитных волн может быть значительное ослабление принимаемой мощности из-за несовпадения поляризационных характеристик антенны и падающей электромагнитной волны. Поэтому в данном случае необходимо иметь антенну, работающую на любой поляризации. Для этого применяются антенны круговой поляризации.

Одна из разновидностей антенн подобного класса – спиральная антенна с цилиндрическим резонатором



# Схема эксперимента

## Схема модуля радиоантенны

4 круглых плоских  
вибратора диаметром  
0.15 м соединенных  
параллельно через  
согласующую цепь. На  
каждый модуль  
малозоумящий усилитель

Детектор  
заряда

Детектор  
вторичных  
нейтронов  
и  $\gamma$ -квантов

Свинец/Вольфрам  $1 \div 2 \lambda$   
Сцинтиллятор

Вторичные  
нейтроны

Вторичные  
 $\gamma$ -кванты

Реголит

Общая глубина регистрирующей аппаратуры  $10-20 \text{ гр/см}^2$ , т.е.  $\sim 100-200 \text{ кг/м}^2$

Возможно поэтапное развитие установки.

При общей массе установки  $\sim 10$  тонн достижимо значение геометрического фактора  $150-300 \text{ м}^2 \text{ ср}$

# Зарубежные аналоги

Полноценных аналогов нет.

Существующие и проектируемые орбитальные установки (AMS02, Fermi-LAT, ISS-CREAM, HERD) имеют геомфактор не более  $2 \text{ м}^2\text{ср}$ .

Наземные установки (AKENO, Tibet, Haverah park, KASCADE, «Якутск» и др.) имеют достаточный геомфактор, но не позволяют измерять заряд первичной частицы, а данные модельно зависимы.

# Общие выводы по НИР НЕЙТРОНИЙ



Математическое моделирование позволило оценить возможности восстановления энергии по трем компонентам альбедо.

Точность определения энергии по каждой компоненте альбедо составляет 70-100%. Проведен анализ корреляций между измерениями независимых компонент. Из предварительных результатов следует возможность значительного уменьшения ошибки в энергетических измерениях при одновременной регистрации трех компонент до ~50%.

Конструкция установки должна включать в себя кремниевые падовые детекторы заряда, сцинтилляционные детекторы обратного тока и плоские антенны для регистрации радиоизлучения.

Суммарный геометрический фактор составит не менее  $300 \text{ м}^2\text{ср}$  на первом этапе