

Научно-Исследовательский
Институт Ядерной Физики
имени Д.В. Скобельцына

Секция ядерной физики Отделения физических наук РАН,
посвященная 70-летию В.А.Рубакова

**Лунная обсерватория
НЕЙТРОНИЙ для изучения
галактического
космического излучения
высоких и сверхвысоких
энергий.**



270 МГУ
1755 2025

**Д.М.Подорожный Д.М, И.М.Ковалев, А.А.Курганов, А.Д.Панов,
А.Н.Турундаевский
ИИЯФ МГУ**

Наиболее актуальной задачей в экспериментальных прямых исследованиях КЛ является определение химического состава с продвижением вверх по энергетической шкале. Основная особенность исследования КЛ - крутопадающий энергетический спектр

Интегральный спектр КЛ (м²ср год)

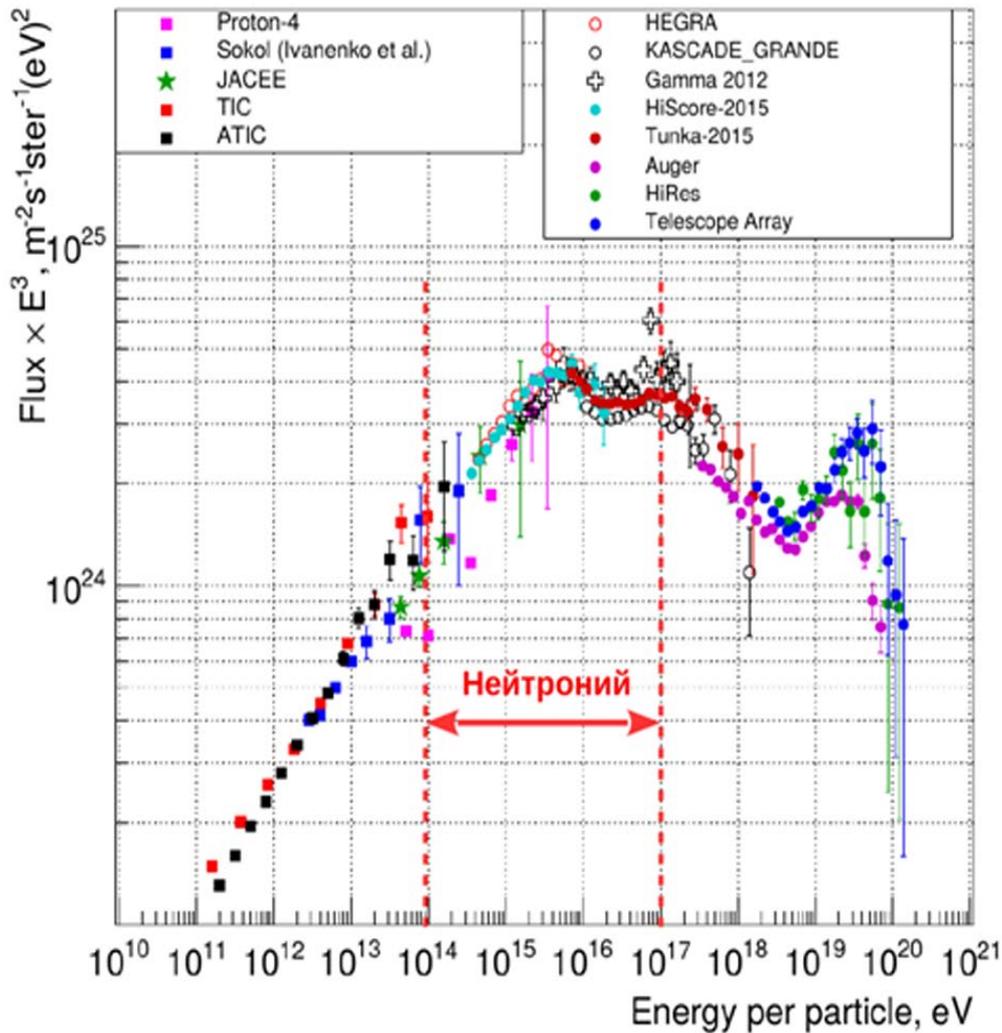
(>E)	10 ¹⁴	10 ¹⁵	10 ¹⁶	10 ¹⁷
	2100	46	0.8	0.0054

Основные характеристики проведенных и запланированных космических экспериментов

Название	Годы	м ² ср.год	Диапазон эВ
PAMELA	До 2008	0.02	<2*10 ¹¹ эВ/н
CREAM	До 2012	0.5	10 ¹¹ -10 ¹⁴ эВ/ч
НУКЛОН	До 2018	2.4	10 ¹¹ -5*10 ¹⁴ эВ/ч
CRIS	С 1997	0.38	10 ⁷ -10 ⁸ эВ/н
Fermi	С 2008	10	2*10 ⁷ -3*10 ¹² эВ/ч
AMS02	С 2011	5	<2*10 ¹² эВ/н
Calet	С 2015	0.5	10 ⁹ -2*10 ¹³ эВ/ч
Dampe	С 2015	1	10 ¹¹ -10 ¹⁵ эВ/ч
HERD	~2027	10	10 ¹¹ -5*10 ¹⁵ эВ/ч
ОЛВЭ	>2030	>200	10 ¹¹ -10 ¹⁶ эВ/ч

Эффективный фактор экспозиции для 200 частиц с энергией >E

Энергия	м ² ср.год
> 10 ¹⁴	~0.1
> 10 ¹⁵	~5
> 10 ¹⁶	~250
> 10 ¹⁷	~35000



Космические эксперименты «нового поколения» (НУКЛОН, CALET, ISS-CREAM, DAMPE,) имеют фактор экспозиции не выше $3 \text{ м}^2\text{ср год}$, что дало возможность провести исследования (энергетические спектры и химический состав) космических лучей до энергий $\sim 5 \cdot 10^{14}$ эВ/частица.

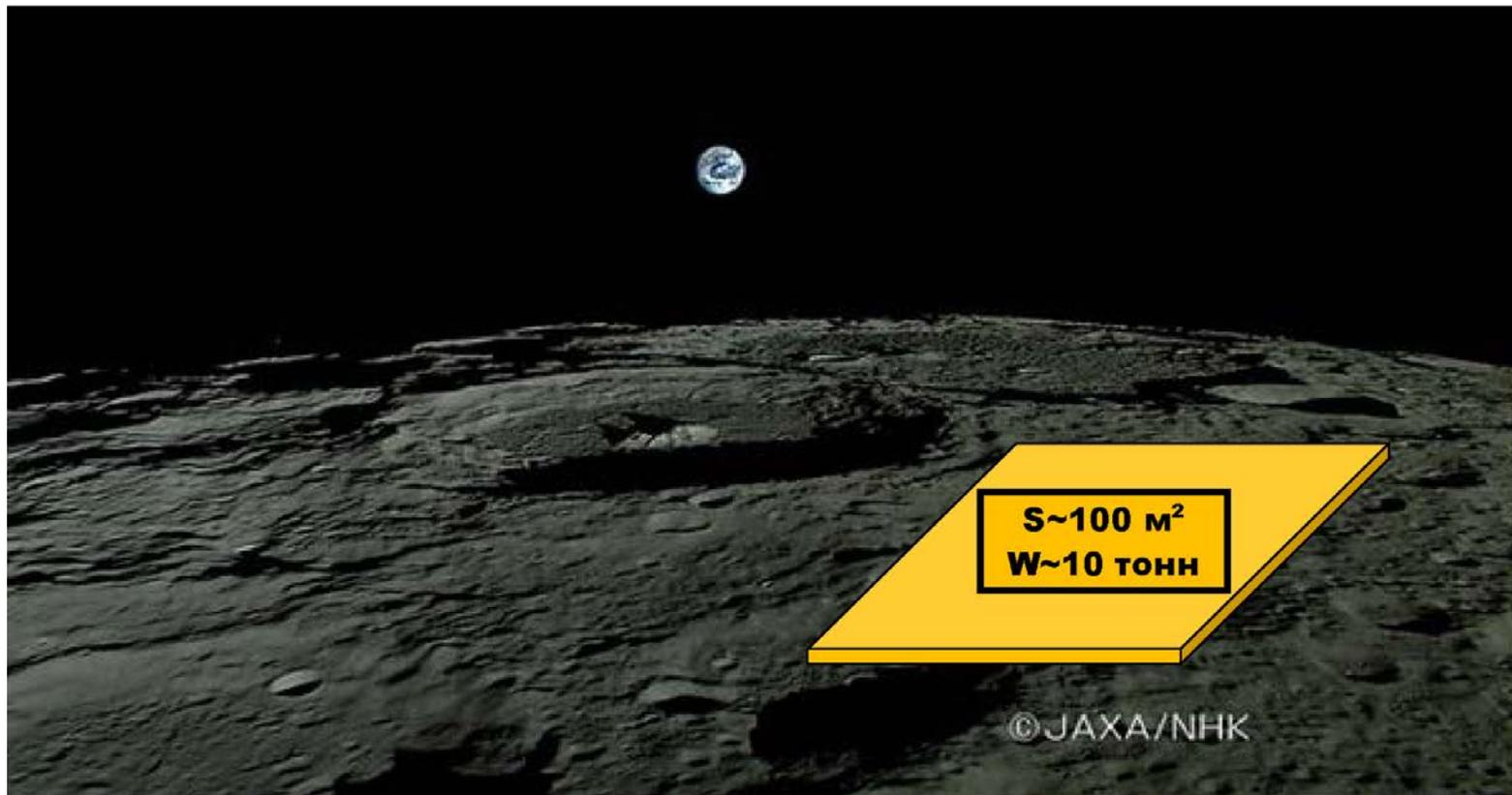
Запланированные эксперименты дают надежду довести исследование до границы $\sim 10^{16}$ эВ/частица.

Однако дальнейшее продвижение по энергетической шкале традиционными методами исследования предполагает использование аппаратуры массой в сотни тонн, что на сегодняшний день недостижимо.

Освоение Луны предоставляет уникальные возможности для продолжения экспериментов в данной области, выполнение которых невозможно в земных условиях и на космических аппаратах

Предложен проект НЕЙТРОНИЙ

В проекте НЕЙТРОНИЙ предложена оригинальная идея определения первичной энергии. На поверхности Луны регистрируется излучение, рассеянное в обратном направлении по отношению к направлению прихода частицы (нейтроны, гамма-кванты, заряженные частицы, радиоизлучение) от адронных и электромагнитных каскадов, создаваемых первичной частицей в лунном реголите. В отличие от традиционной массивной аппаратуры регистрирующая аппаратура НЕЙТРОНИЙ – это относительно легкая ($\sim 7\text{-}10$ г/см²) и плоская (толщиной не более 30 см) поверхность. Развертывание комплекса НЕЙТРОНИЙ предлагается поэтапно, размещением независимых модулей площадью порядка одного м² каждый и массой не более 100 кг.



Методика измерений в эксперименте НЕЙТРОНИЙ

Оценки сделаны Монте-Карло моделированием кодами GEANT и FLUKA

Оценка альbedo нейтронов

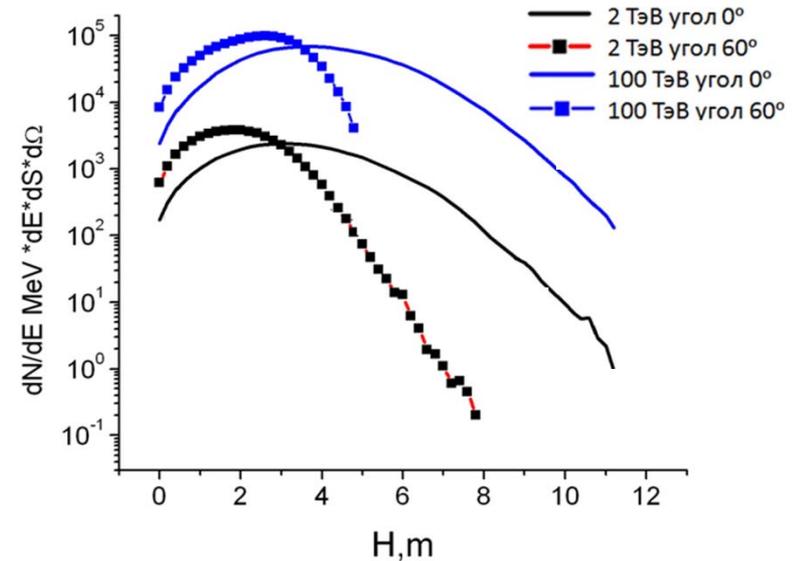
Число нейтронов на поверхности Луны из каскада пропорционально массовому числу A первичного ядра при фиксированной энергии на нуклон. Время диффундирования нейтронов до поверхности Луны составляет сотни микросекунд.

В зависимости от энергии количество нейтронов растет пропорционально энергии по закону $N_{\text{tot}} \propto E_0^{0.8}$. В начале исследуемого диапазона (10^{14} эВ/частица) число нейтронов несколько десятков тысяч, в области «колена» КЛ ($3 \cdot 10^{15}$ эВ/частица) более четверти миллиона. Поток медленных нейтронов на порядок меньше.

Точность энергетических измерений зависит от массы ядра. Например, для $E_0 = 3 \cdot 10^{14}$ эВ/частица RMS составляет 20% для ядер железа, 50% для ядер гелия и 70% для протонов.

Протоны $E_0 = 3 \cdot 10^{14}$

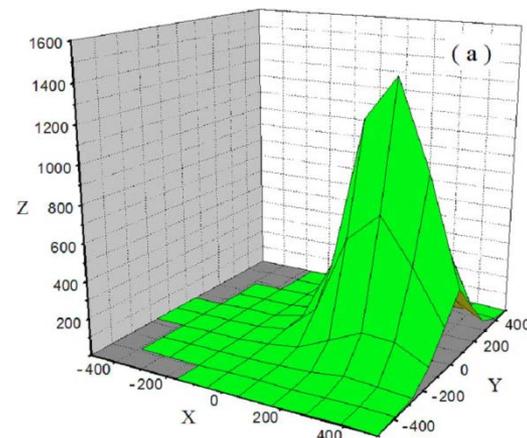
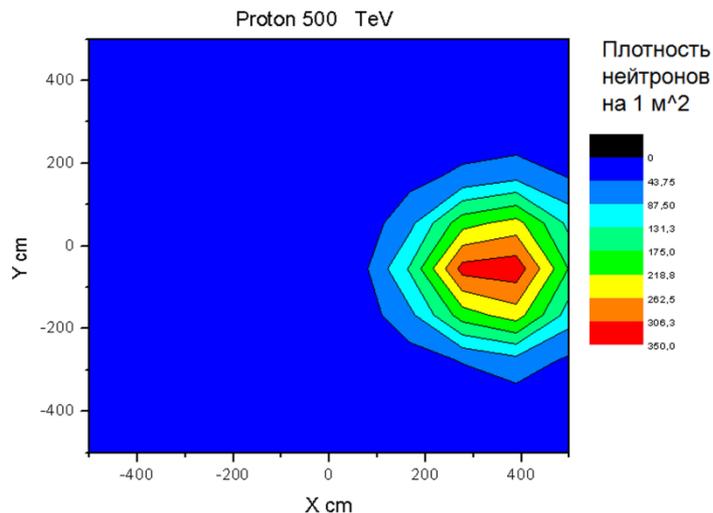
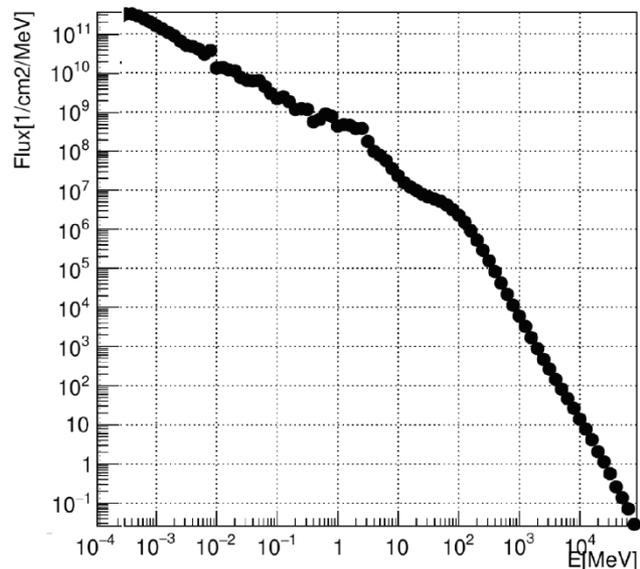
Выход нейтронов альbedo средних каскадов протонов в реголите в зависимости от глубины каскада



Средний размер 'пятна', на котором регистрируется 95% нейтронов – составляет около 30 м², а 70% энергии – около 8 м².

Время сбора сигнала – около 300 мкс.

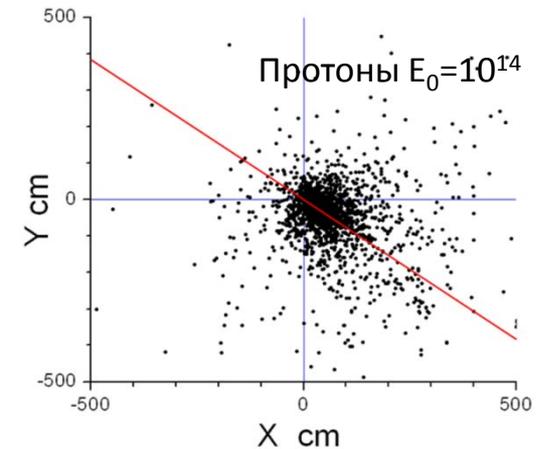
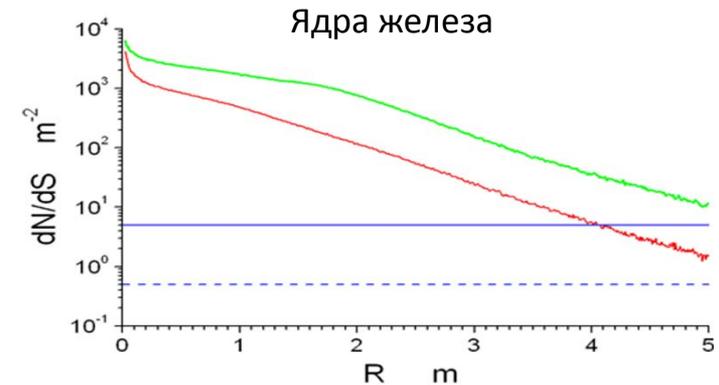
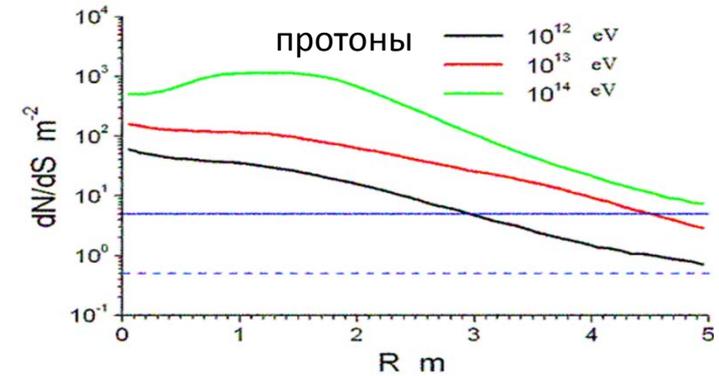
Выполнен расчет фоновых нейтронов на поверхности Луны за один год. При временных воротах регистрации 300 мкс количество фоновых нейтронов будет составлять не более нескольких тысяч, что при достаточно высоких энергиях ($>10^{14}$ эВ/частица) практически не вносит искажений.



Оценка альbedo гамма-излучения и заряженных частиц

Альbedo заряженных частиц, в подавляющем числе релятивистских электронов с энергиями >150 кэВ, при рождении пар от альбедного гамма-излучения, в значительной степени зависит от типа налетающего ядра. Так, при энергиях $> 10^{14}$ эВ/частица для протонов это несколько тысяч, для ядер железа несколько десятков тысяч.

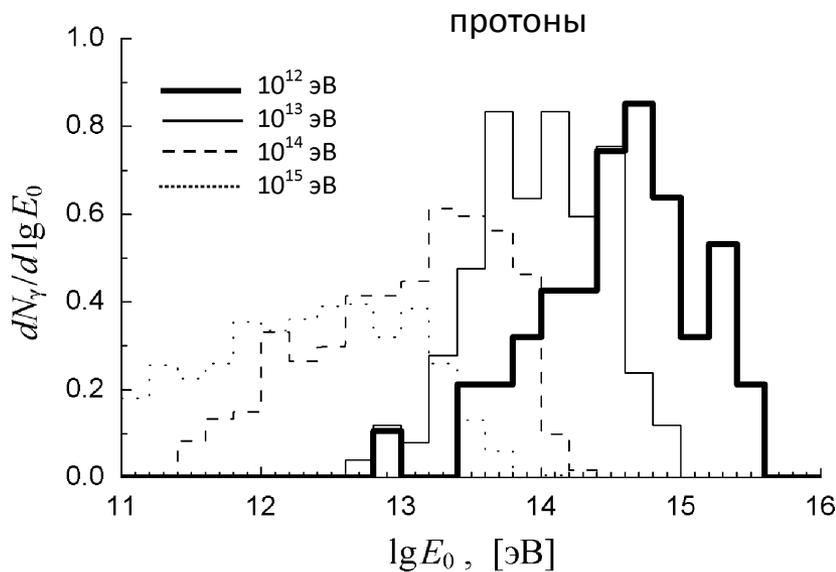
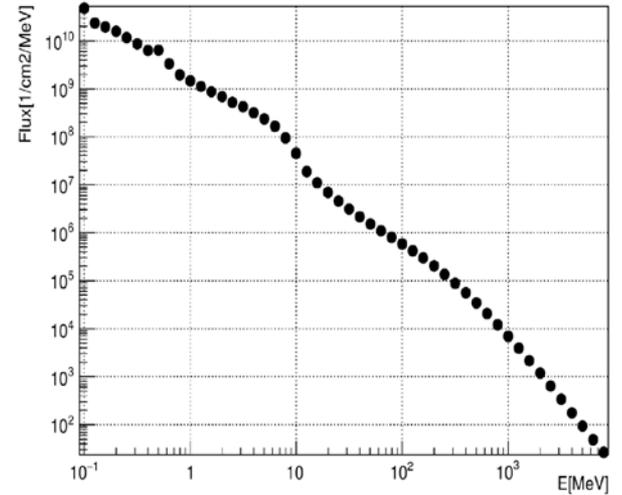
Форма пятна альbedo сильно зависит от угла наклона каскада ϑ_0 . Таким образом ось каскада можно определить по асимметрии пространственного распределения. Среднеквадратичная ошибка в определении $\cos\vartheta_0$ составляет 16% при 10^{13} эВ и 12% при 10^{15} эВ для протонов.



Выполнен расчет фоновых релятивистских заряженных частиц на поверхности Луны за один год. При временных воротах регистрации 1 мкс влияние фона на измерения ничтожно.

Точность метода невысокая, наименьшая точность для протонов. По мере увеличения энергии точность определения E_0 повышается, но даже при самых высоких энергиях для протонов не превышает 70%

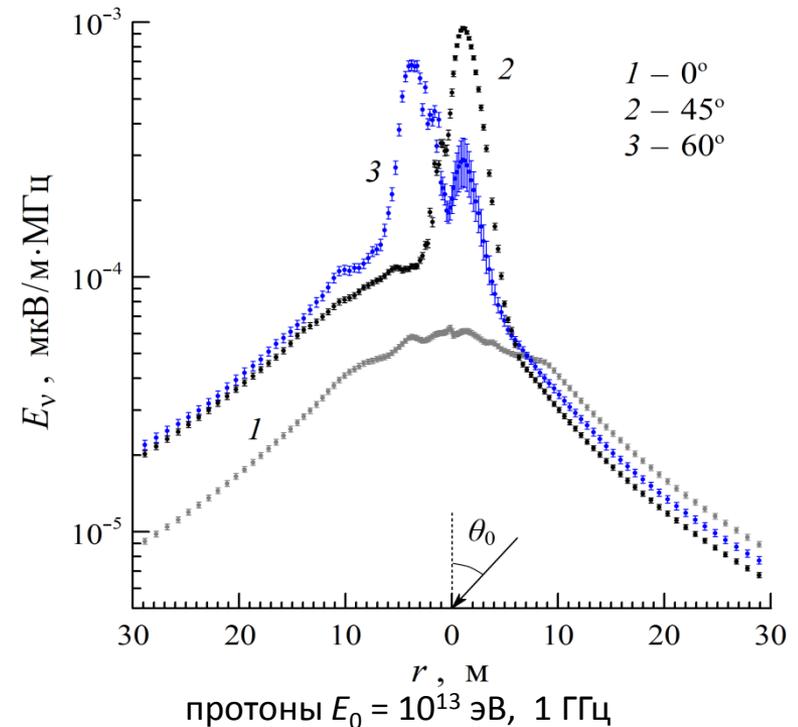
Фон заряженных частиц



Оценка альbedo радиоизлучения

Физической основой такой регистрации является образование избытка электронов в ливне ($\sim 20\%$ в максимуме ливня), вследствие чего каскад в целом оказывается отрицательно заряженным, что и приводит к всплеску излучения в когерентной области частот. По результатам моделирования было определено, что на частотах >1 ГГц напряженность поля растет с увеличением частоты, поскольку имеет место когерентный режим излучения. На частотах от 10 до 100 ГГц спад поля радиоизлучения обусловлен главным образом нарушением условий когерентного излучения, хотя существенный вклад в уменьшение поля дает уже и поглощение. На частотах выше 100 ГГц спектр падает в основном за счет поглощения. Оптимальный диапазон оказывается 1–10 ГГц.

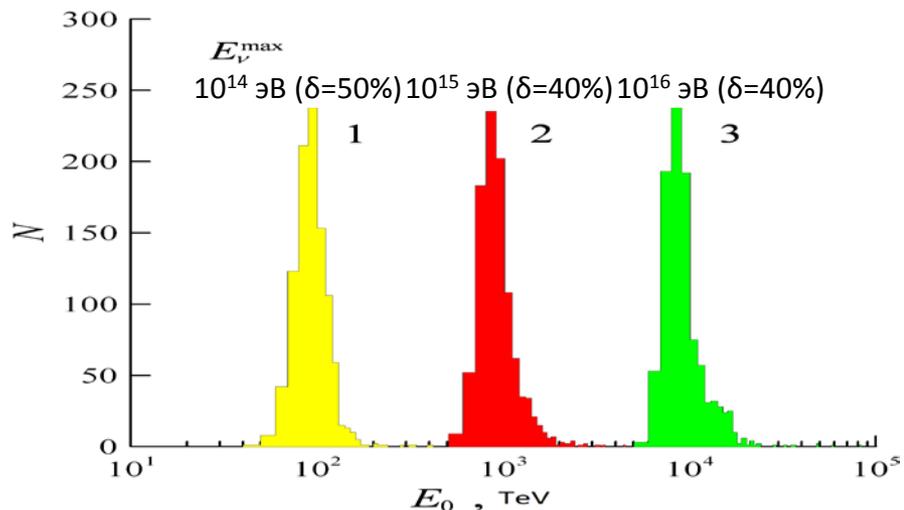
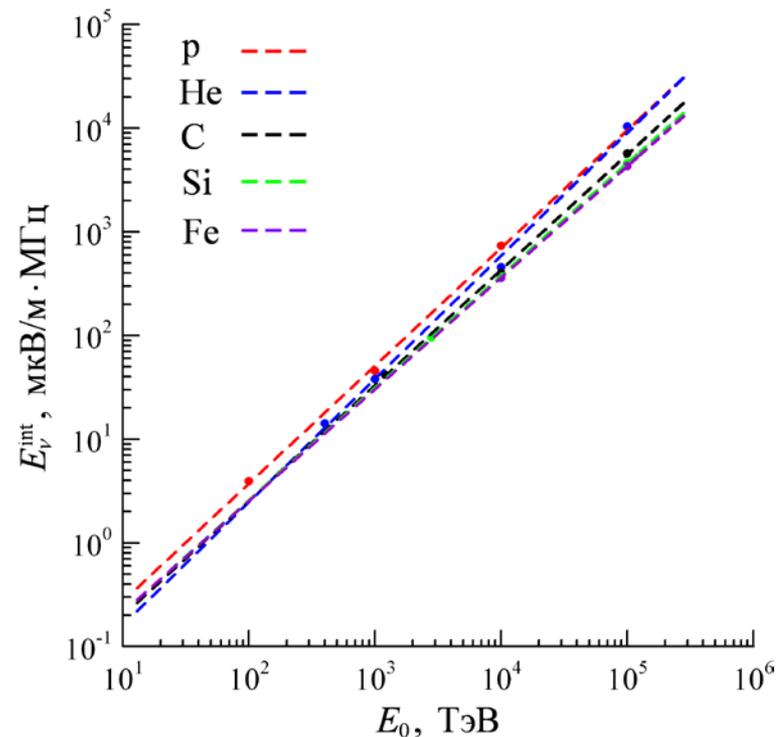
Сигнал существенно зависит от траектории каскада. Радиоизлучение (черенковское) направленное и зависит от угла попадания на внутренние границы в реолите. Поэтому в случае регистрации альbedo радиоизлучения необходимы корректирующие коэффициенты в зависимости от угла траектории, полученные при регистрации другими методами (нейтронами и гамма-излучением).



Радиоизлучение, при определенном угле оси каскада, практически линейно зависит от энергии первичной частиц и слабо от массового числа налетающего ядра.

Главными источниками шума на поверхности Луны являются излучение самой Луны и собственные шумы приемника. По литературным данным при полосе пропускания $\Delta\nu = 1$ МГц уровень радишумов составляет $\sim 1\text{--}10$ мкВ/м·МГц, что определяет порог измерений $>10^{14}$ эВ/частица.

Сигнал состоит из двух импульсов (прямой и отраженный) с длительностью от 10 до 50 нс и разделенных во времени интервалом в 30–50 нс (в зависимости от первичной энергии). Для восстановления энергии первичной частицы E_0 используется суммарный сигнал, выделившийся в антенне. Точность восстановления E_0 в этом случае оказывается $\sim 40\%$ и слабо зависит от энергии.



Анализ методики в эксперименте **НЕЙТРОНИЙ** показал принципиальную возможность регистрации частиц космических лучей сверхвысоких энергий по обратному току от каскадов, развивающихся в реголите. Наиболее перспективно проводить исследование по нескольким компонентам: нейтронам, гамма, радиоизлучению, эти компоненты взаимодополняют друг друга. что дает повышение точности и достоверности в исследованиях. Эти измерения базируются на регистрировании частиц рожденных в индивидуальном каскаде, поэтому отражает его флуктуации в каждом случае. Однако корреляции выхода частиц разной природы не абсолютная, поэтому для повышения точности регистрации перспективна разработка математического аппарата по поиску единого функционала при использовании трех компонент одновременно.

Проектный облик научной аппаратуры НЕЙТРОНИЙ

Для регистрации частиц космических лучей сверхвысоких энергий в состав научной аппаратуры **НЕЙТРОНИЙ** должны входить, как минимум, две системы – система измерения заряда и система измерения энергии. В качестве системы измерения энергии предлагается использование трех видов частиц из альбеда каскада, каждый вид требует для регистрации свой детектор. Таким образом, в состав аппаратуры необходимо включение не менее, чем четырех детекторов регистрации.

Детектор заряженных частиц

В качестве детектора заряженных частиц предлагается использовать многослойную (не менее 4 слоев) мелкосекционную падовую матрицу кремниевых детекторов. Исходя из высокой вероятности имитации альфа-частицы протоном размер пада должен составлять не более $1 \times 1 \text{ см}^2$, что значительно снижает вероятность имитации. Каждый пад - это независимый датчик ионизационных потерь. В качестве считывающей электроники используется высокоинтегральная многоканальная микроэлектроника, таким образом, на 1 м^2 будет использовано порядка 40 тыс. амплитудных каналов. При регистрации полезного события происходит компрессия, и в запись идут только те каналы, где сигнал выше порога, которой определяется сигналом от одной релятивистской частицы. По сделанной оценки на площади 1 м^2 это количество не превышает нескольких тысяч каналов. Подобная техника успешно применяется в технике космического эксперимента

Детектор гамма-квантов

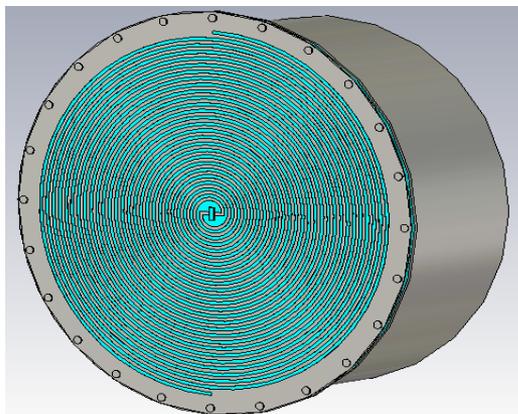
При использовании традиционных методик для гамма спектрометров, в которых необходимо применение неорганических сцинтилляторов с высокой плотностью вещества, требуется спектрометр значительной массы. Это требование нарушает общую концепцию построения аппаратуры - максимально легкий модуль. Однако в задачах космического эксперимента НЕЙТРОНИЙ не ставится задача спектрального разрешения потока гамма-квантов, т.е. не требуется определение энергии спектра гамма-альbedo - только их количества. Поэтому в качестве спектрометра гамма-квантов предлагается использование детектора заряженных частиц. Основная часть альбедного гамма-излучения сконцентрирована в области 0.1-10 МэВ. Предлагается перед слоями кремниевой матрицы размещение слоев вольфрама разной величины, со стороны поверхности Луны.. В указанной области энергий, в вольфраме, основной эффект взаимодействия гамма-излучения это комптон-эффект (до $E \sim 5$ МэВ) и образование электронно-позитронных пар (при $E > 5$ МэВ). Таким образом, слои должны чередоваться по толщине от 100 мкм до нескольких мм для того, чтобы позволить выйти из поглотителя и зарегистрироваться в слоях кремниевой матрицы (каждый толщиной 300 мкм) максимальному количеству электронов/позитронов. Общая толщина суммы вольфрамовых поглотителей должна быть не менее 3.5 мм (каскадная единица).

Детектор нейтронов

Количество медленных нейтронов (с энергией менее 0.1 МэВ) составляет порядка 10% от общего количества нейтронов выходящих из каскада на поверхность Луны. При введении в состав аппаратуры поглотителя с высоким содержанием водорода (например полистирол) с толщиной порядка 2 см, большее количество медленных нейтронов затормозятся до энергий тепловых нейтронов. При введении в состав поглотителя материала с высоким сечением захвата, например В-10, в процессе захвата выделяется энергия ионизационных потерь в строгой линии (для В-10 - 2.31 МэВ) практически в одной точке, порядка нескольких мкм. Используя эти свойства в аппаратура НЕЙТРОНИЙ предлагается использовать органический сцинтиллятор с добавкой В-10. При использовании в светосборе сцинтилляционного свечения светопередающих волокон и невысокой толщине детектора (1 см) потери незначительны, и практически все тепловые нейтроны испытывают захват В-10. Таким образом предлагается использовать два слоя сцинтилляционных стрипов с толщиной 1 см и шириной порядка 2-3 см для определения количества пространственного распределения нейтронов.

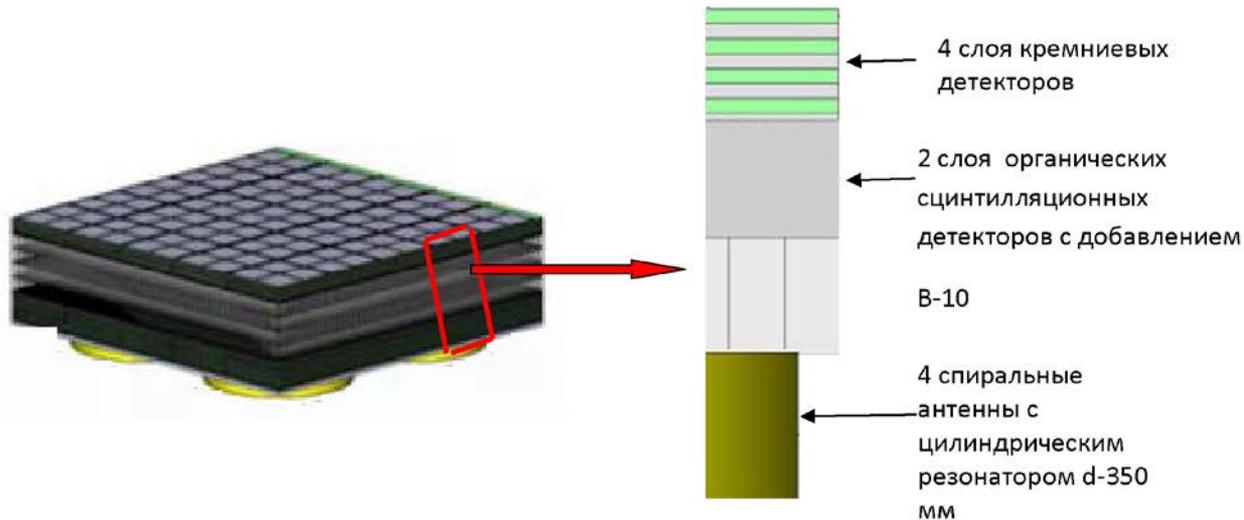
Детектор радиоизлучения

Анализ заряженных частиц и гамма из альбедо позволяет определить направление трека первичной частицы, и при известном наклоне параметры радиосигнала достаточно жестко зависят от энергии. При измерении необходимо избежать ослабления принимаемой мощности из-за несовпадения поляризационных характеристик антенны и падающей электромагнитной волны. Поэтому необходимо иметь антенну, работающую на любой поляризации. Для этого применяются антенны круговой поляризации.



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

Проектный облик модуля аппаратуры НЕЙТРОНИЙ



Оценка характеристик модуля $S=1 \text{ м}^2$

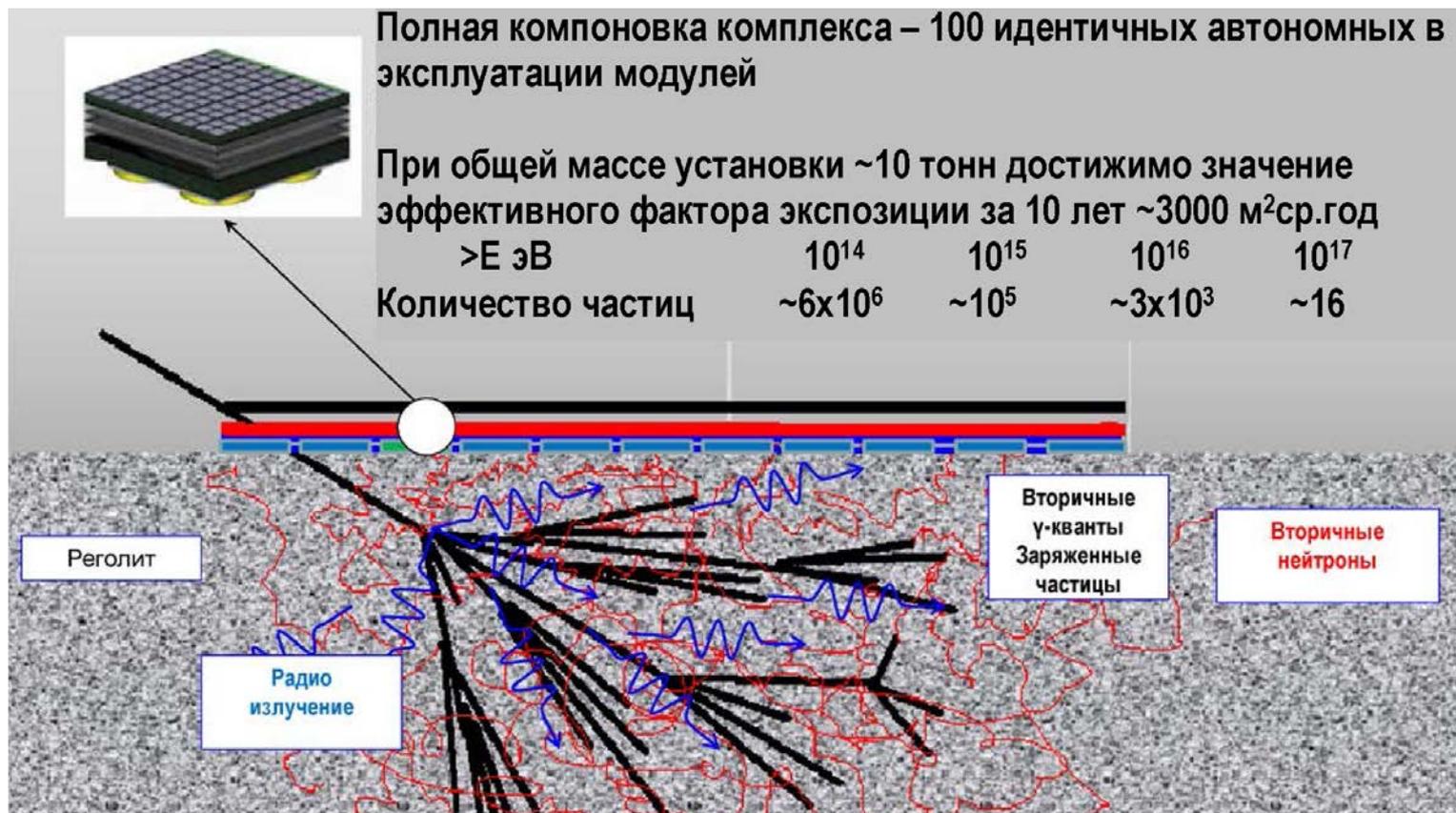
Масса; ($\sim 10 \text{ г/см}^2$) -100 кг

Количество каналов $\sim 5 \cdot 10^4$

Энергопотребление менее 100 Вт

При оценке характеристик модуля был учтен опыт построения аналогичной аппаратуры для космических экспериментов с использованием только доступных и отработанных в ходе работ технологий.

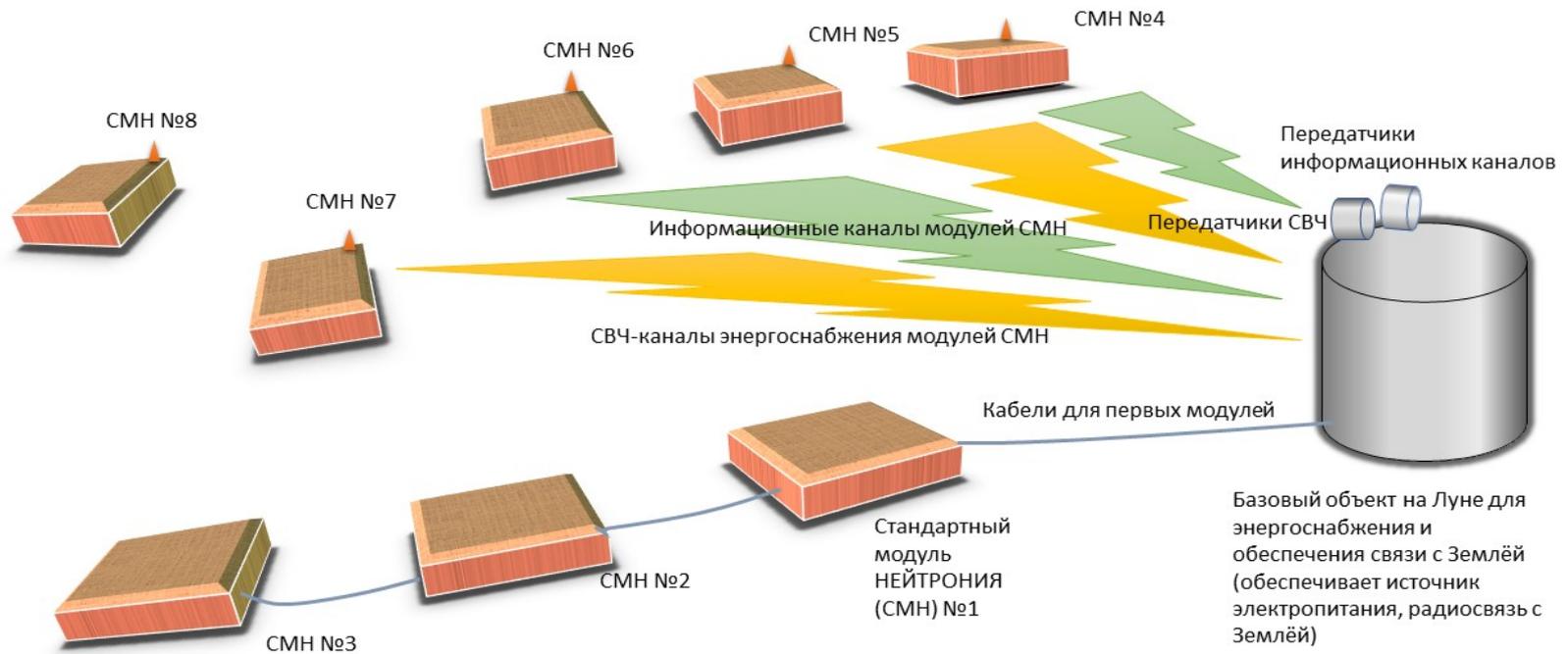
Упрощенная схема аппаратуры **НЕЙТРОНИЙ** размещения на лунной поверхности



Помимо детекторной части в состав научного оборудования должны также входить интерфейсные блоки для бескабельной передачи данных на базовые объекты лунной инфраструктуры, а также для обеспечения энергоснабжения каждого модуля электроэнергией.

Транспортировка и установка модулей СМН на поверхность Луны обеспечивается в ходе развития лунной станции.

Коммуникационное обеспечение стандартных модулей установки НЕЙТРОНИЙ



Научный комплекс **НЕЙТРОНИЙ** определяет безальтернативное продвижение прямых измерений космических лучей с поэлементным разрешением в область выше 10^{16} эВ, что открывает возможности для решения самых фундаментальных проблем астрофизики высоких энергий.

