

**Научно-Исследовательский
Институт Ядерной Физики**
имени Д.В. Скобелкина

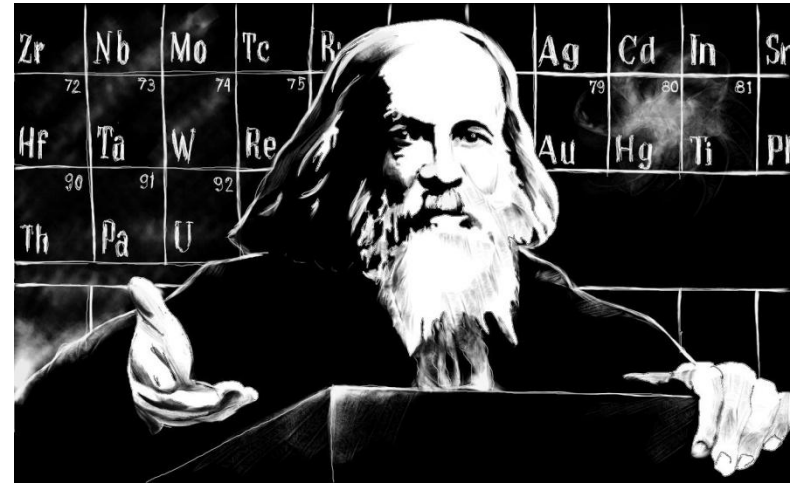


Изучение космических лучей высоких энергий на спутниках

Астрофизический эксперимент НУКЛОН 2

Наиболее актуальными задачами физики космических лучей (КЛ) в настоящее время являются **определение химического состава обильных КЛ с максимально возможным продвижением вверх по энергетической шкале и регистрация зарядового (изотопного) состава сверхтяжелых ядер КЛ за пиком железа**. Обе эти компоненты КЛ рождены в наиболее катастрофических процессах Галактики и именно по ним стоятся современные модели.

В данном эксперименте планируется изучение космического происхождения всех элементов периодической таблицы. В этой связи, и с учетом юбилея **Д.И.Менделеева** (8 февраля 2024 г. будет **190** лет со дня рождения первооткрывателя периодического закона химических элементов), предлагается присвоить научной аппаратуре и эксперименту имя великого ученого Д.И.Менделеева.



Основные **задачи** эксперимента **НУКЛОН 2**:

- определение зарядового состава КЛ вплоть до границ известного списка стабильных (114 ?);
- исследование изотопного состава сверхтяжелых ядер КЛ за пиком железа, до $Z \sim 60$
- Область энергии 0.3-1.0 ГэВ/нуклон



Основные направления исследований

1. Исследование локального окружения: локальный коэффициент диффузии, локальные источники. Радиоизотопные часы и вторичные ядра.
2. Исследование механизмов нуклеосинтеза: в r- и s- процессы в области гs-пика $N=82$. Изотопный состав в области гs-пика.
3. Физика локального пузыря. Изотопные аномалии, связанные со взрывом сверхновых в гетерогенную среду суперпузырей, обогащенную тяжелыми элементами.
4. Физика ускорения КЛ на обратной ударной волне. Особенности состава состава КЛ в области сверхтяжелых ядер, связанные с обратной ударной волной.
5. Особенности инъекции ядер различного типа в процесс ускорения. Корреляция распространенности сверхтяжелых ядер с первым потенциалом ионизации и летучестью элементов.

Ожидаемые результаты

За 5 лет работы будет получен уникальный материал для различных ядер с $Z = 26 - 66$.

Будет исследовано «белое пятно» изотопного состава в области $Z = 32 - 66$.

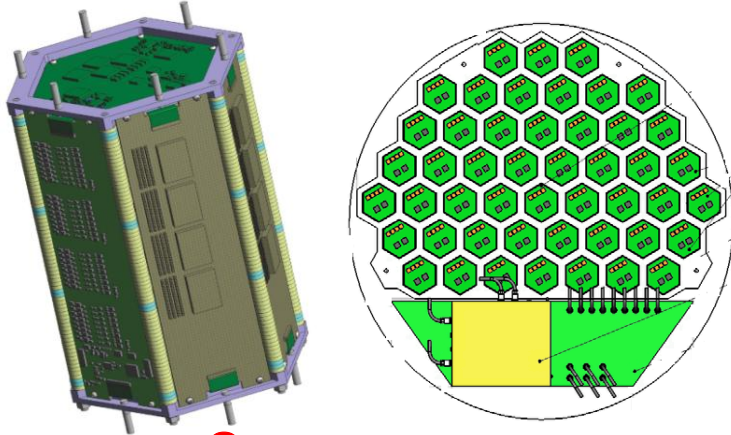
Статистика по зарядовому составу, полученная в наилучших экспериментах HEAO-3-C3 и SuperTIGER, тоже будет превышена приблизительно в пять раз

| Ядро, Z | N | Ядро, Z | N |
|--------------|------------------------------------|--------------|------------|
| Fe 26 | $3 \cdot 10^7$ | Ru 44 | 100 |
| Co 27 | $1.4 \cdot 10^5$ | Ag 47 | 140 |
| Ni 28 | $1.1 \cdot 10^6$ | Cd 48 | 120 |
| Cu 29 | $1.6 \cdot 10^4$ | Sn 50 | 120 |
| Zn 30 | $1.6 \cdot 10^4$ | Te 52 | 140 |
| Ga 31 | 2000 | Xe 54 | 80 |
| Ge 32 | 2300 | Ba 56 | 180 |
| As 33 | 350 | Ce 58 | 50 |
| Se 34 | 1400 | Nd 60 | 40 |
| Br 35 | 200 | Dy 66 | 180 |
| Kr 36 | 830 | | |
| Rb 37 | 250 | | |
| Sr 38 | 1000 | | |
| Y 39 | 250 | | |
| Zr 40 | 500 | | |
| Nb 41 | 150 | | |
| Mo 42 | 230 | | |

Регистрирующая аппаратура НУКЛОН 2 состоит из 48 шт. идентичных модульных кремниевых калориметров СТИКЛ (спектрометр тяжелых изотопов космических лучей). Каждый СТИКЛ представляет собой автономный регистрирующий прибор.

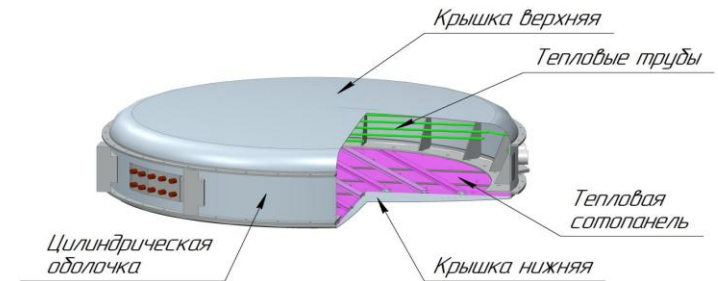
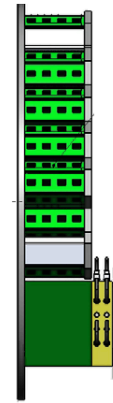
Конструктивно научная аппаратура представляет собой рамную конструкцию. Модульный состав позволяет увеличивать или уменьшать количество СТИКЛ в соответствии с габаритными и массовыми ограничениями.

Научная аппаратура размещена в гермоконтейнере. НУКЛОН 2 может быть размещен на серийном космическом аппарате народнохозяйственного назначения в качестве дополнительной полезной нагрузки, либо на малом космическом аппарате целевого использования. Режим функционирования КНА - непрерывный мониторинг.



Основные характеристики.

| № | Требование | Допустимые значения |
|----|---------------------------------|--|
| 1 | Диапазон регистрируемых ядер | $Z=6-94$ |
| 2 | Точность измерения заряда | 0.2 зарядовых единицы $Z=6-94$ |
| 3 | Точность измерения массы | 0.3 массовых единицы $Z=9-60$ |
| 4 | Рабочий энергетический диапазон | 300-1000 МэВ/нуклон |
| 6 | Срок экспонирования | Не менее 5 лет |
| 7 | Габаритные размеры НА и ГК | высота – не более 350 мм, диаметр – не более 1500 мм; |
| 8 | Масса НА и ГК | Масса не более 360 кг; |
| 9 | Энергопотребление НА | не более 1000 Вт. |
| 10 | Суточный объем информации | не более 10 ГБ |

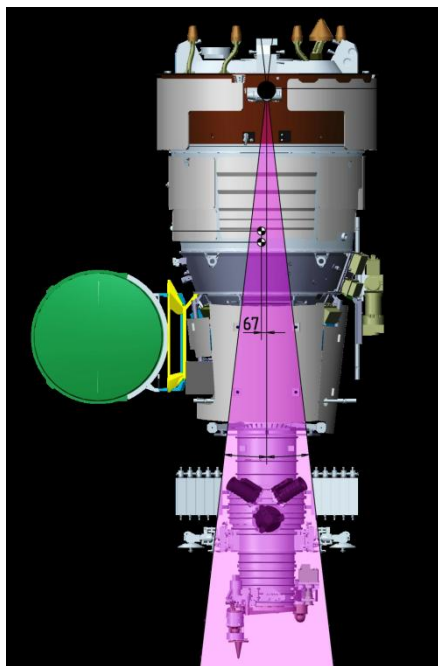


Ожидаемые результаты.

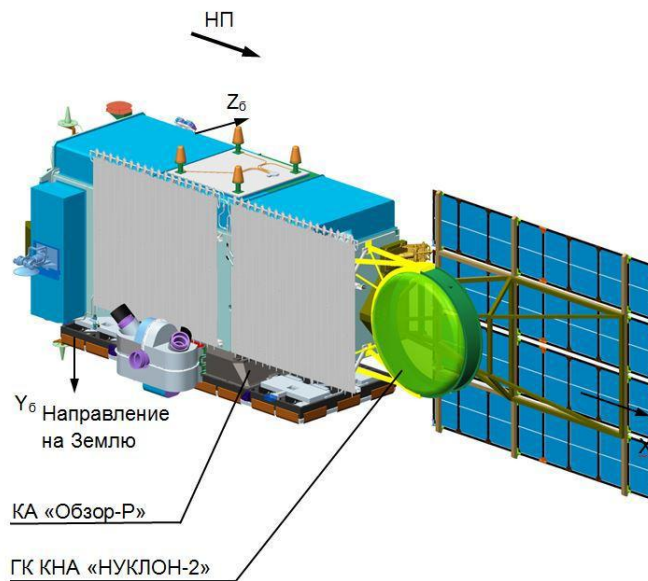
Современные данные по изотопному составу ядер КЛ относятся к Z не более 32 (Ge). За этим диапазоном изотопный состав является в настоящее время сплошным белым пятном. Нуклон 2 продлит область исследования до $Z \sim 60$. Статистика по зарядовому составу $Z = 6-114$, будет превышена приблизительно на порядок. Используя метод «изотопных часов» будут исследованы важнейшие параметры галактического пространства в ближней от солнечной системы области.

В ноябре 2017 г. был выполнен и защищен эскизный проект
«Комплекс научной аппаратуры «Нуклон-2»
ГК № 544-8529/16/231 от 22 ноября 2016г.

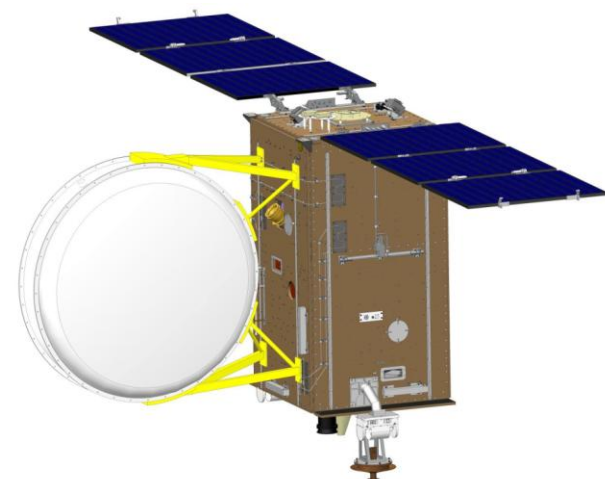
Нуклон 2 в
составе КА
«Ресурс-П»



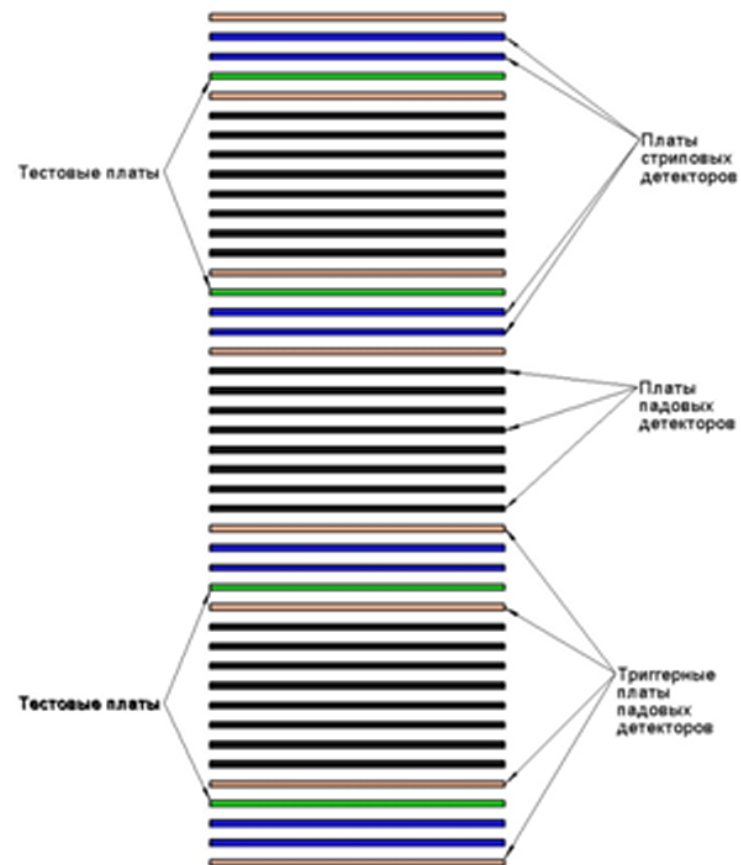
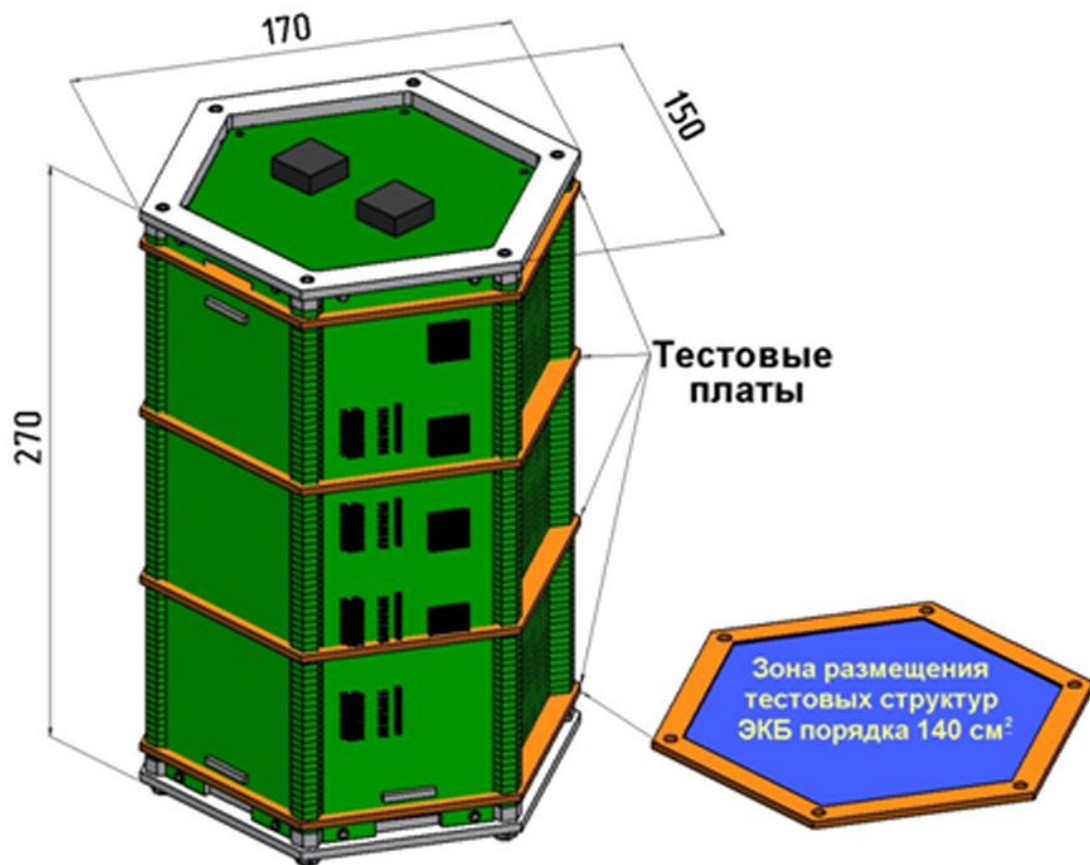
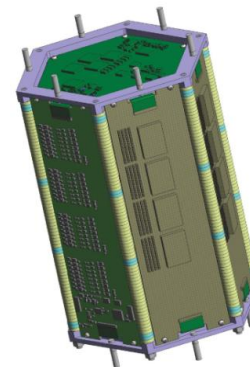
Нуклон 2 в
составе КА
«Обзор-Р»



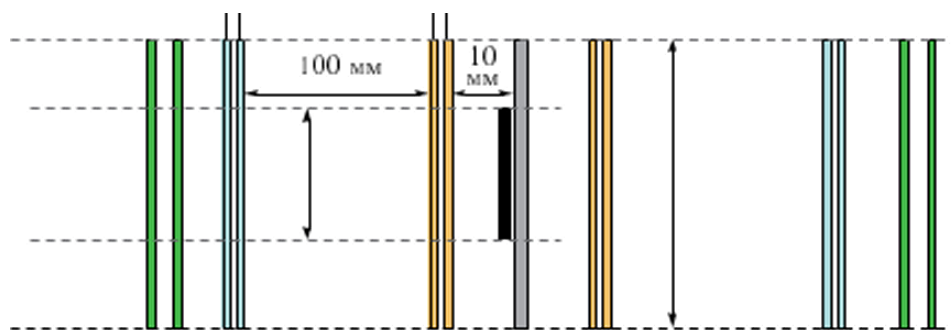
Нуклон 2 в
составе МКА
«АИСТ»



Усиление проекта предложением по совместному летному научно-методическому эксперименту по изучению зарядового (изотопного) состава сверхтяжелых ядер КЛ за пиком железа и воздействия ТЗЧ на ЭКБ космического применения

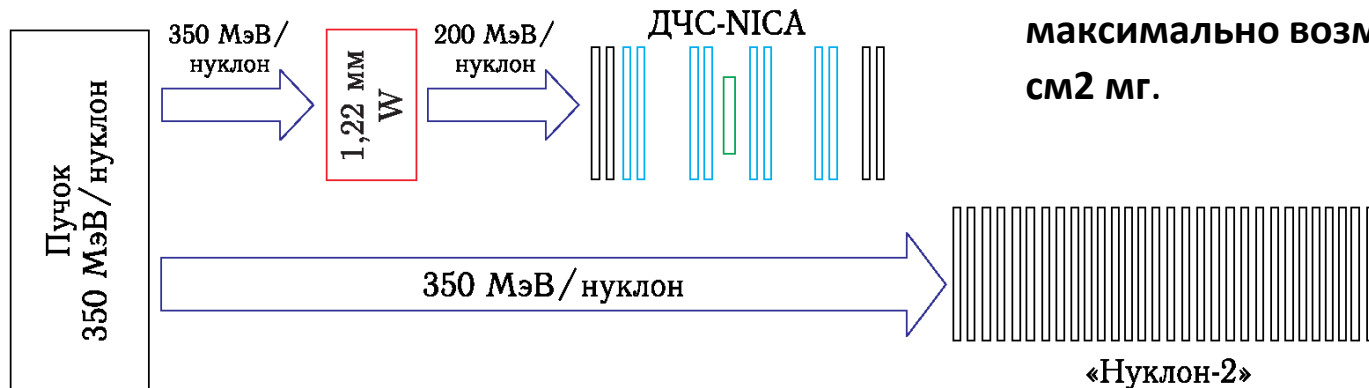


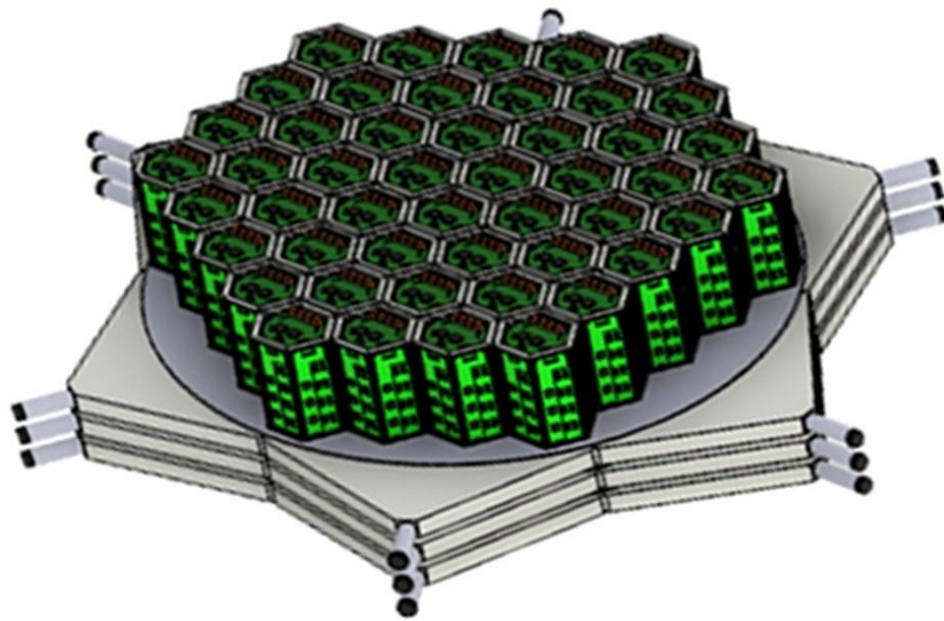
ДЕТЕКТОРНАЯ ЧАСТЬ СТАНЦИИ (ДЧС) ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБЛУЧЕНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ ПУЧКАМИ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ (В рамках мегапроекта «НИКА»)



В предлагаемом подходе:

- индивидуально фиксируется прохождение каждой ТЗЧ, с одновременным анализом функционирования тестовой структуры;
- частица ТЗЧ локализуется при прохождении через активную зону тестовой структуры с доступной на сегодняшний день точностью (порядка 30 мкм) с целью выявления наиболее чувствительных зон исследуемой структуры;
- при заданных параметрах выведенного пучка в предлагаемом подходе заложена возможность прецизионного выведения в заданную область тестовой структуры ионизационных потерь ТЗЧ при значениях линейной потери энергии от 1 МэВ см² мг до максимально возможных порядка 80 МэВ см² мг.

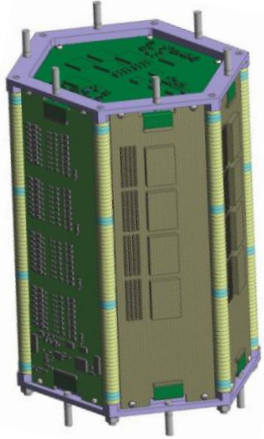




Нуклеосинтез тяжелых ядер возникает в S (slow) и R (rapid) процессах, детали протекания которых известны плохо. Такие процессы имеют место в цефеидах, а также на разных этапах взрыва сверхновых звезд.

Таким образом, исследуя спектральные индексы и распространенность тяжелых ядер, можно получить важную информацию о процессах нуклеосинтеза, проходящих в цефеидах, при взрывах сверхновых звезд. Учитывая малую распространенность сверхтяжелых ядер, ожидаемый спектр таких КЛ в обозримой перспективе можно надеяться получить только для не слишком больших магнитных жесткостей, порядка 50 ГВ. Предлагается дополнить аппаратуру пороговыми черенковскими детекторами.

Предложение



Основные характеристики **СТИКЛ**:

Габаритные размеры - шестигранная колонна 243x167x145 мм

Масса - 4,3 кг.

Электропитание - напряжением $12 \pm 0,1$ В

Потребляемая мощность не более 5 Вт.

Совместный летный и наземный научно-методический эксперимент по изучению зарядового (изотопного) состава сверхтяжелых ядер КЛ за пиком железа и воздействия ТЗЧ на ЭКБ космического применения при помощи микроспутников.

Преимущества:

- Наземная отработка методики для космического эксперимента по исследованию тяжелых ядер КЛ
- Летное подтверждение вводимых методик по определению радиационной стойкости
- Гибкая структура совместного эксперимента

Эксперименты КЛ области

($10^{12} - 10^{15}$ эВ/частица)

- **Proton (4 satellites) – 60' USSR (MSU)**
 - **CRN (Space station) – 80', US**
 - **Mubee (balloon) - 80' USSR (MSU)**
 - **SOKOL (2 satellites) -80' USSR (MSU)**
 - **TIC (balloon) - 1994, Russia (MSU)**
 - **JACEE (balloons) - 90', US, Japan.....**
 - **RUNJOB (balloons) - 80' -90', Russia (MSU), Japan**
 - **AMS 1 (Space Shuttle) -1998 Intern. Collaboration**
 - **ATIC (balloon) - 2001, 2004, 2008 US, Russia (MSU),...**
 - **TRACER (balloon) – 2003, 2006 US**
 - **BESS (balloon) - 2004 US, Germany, Japan,...**
 - **CREAM (balloon) - 2005, 2008 US, Korea, ...**
 - **PAMELA (satelite) - 2006 Italy, Russia, Sweden, Germany**
 - **AMS 2 (ISS) -2011 Intern. Collaboration**
 - **NUCLEON (satelite) - 2015 Russia (MSU)**
 - **CALET (ISS) -2015 Japan, Italy...**
 - **DAMPE (satelite) - 2015 China**
 - **ISS-CREAM (ISS) -2017 US, Intern. Collaboration**
- Спутник история
— Аэростат
— Спутник современность

Интегральный спектр КЛ (м²ср год)

(>E)

10¹⁴

10¹⁵

10¹⁶

10¹⁷

2100

46

0.8

0.0054

Для д-на 10¹⁵ - 10¹⁶ необходим фактор экспозиции > 125 м²ср год

Основные характеристики проведенных и запланированных космических экспериментов

| Название | Годы | м ² ср.год | Диапазон эВ |
|-----------|---------|-----------------------|--|
| НУКЛОИ | 2015 | 2.4 | 10 ¹¹ -5*10 ¹⁴ эВ/ч |
| CREAM | До 2012 | 0.5 | 10 ¹¹ -10 ¹⁴ эВ/ч |
| ISS-CREAM | С 2017 | ~5 | 10 ¹² -10 ¹⁵ эВ/ч |
| CRIS | С 1997 | 0.38 | 10 ⁷ -10 ⁸ эВ/ч |
| PAMELA | С 2006 | 0.02 | <2*10 ¹¹ эВ/ч |
| AMS02 | С 2011 | 5 | <2*10 ¹² эВ/ч |
| Calet | С 2015 | 0.5 | 10 ⁹ -2*10 ¹³ эВ/ч |
| Dampe | С 2015 | 1 | 10 ¹¹ -10 ¹⁵ эВ/ч |
| HERD | С 2020 | 10 | 10 ¹¹ -10 ¹⁶ эВ/ч |
| Fermi | С 2008 | 10 | 2*10 ⁷ -3*10 ¹² эВ/ч |
| Гамма-400 | С 2020 | 4 | 10 ⁸ -3*10 ¹⁵ эВ/ч |
| ОЛВЭ | До 2030 | >125 | 10 ¹¹ -5*10 ¹⁶ эВ/ч |

Необходим «прорывной» эксперимент, который на ближайшие десятилетия определит направления исследований в астрофизике высоких энергий. Основным критерий – высокий фактор экспозиции и высокая точность энергетического и зарядового разрешения

«Обсерватория Лучей Высокой Энергии» (ОЛВЭ)

по прямому исследованию космических лучей вплоть до 10¹⁶ эВ

С использованием перспективного отечественного ракетносителя тяжелого (сверхтяжелого) классов - масса КНА 16-70 т.

Основные цели миссии ОЛВЭ

- Химический состав космических лучей с разрешением по элементному заряду в области "колена КР Кристиансена-Куликова" (энергия 1-100ПэВ);**
- Точное определение состава КЛ в диапазоне энергий от нескольких ТэВ до 1 ПэВ (высокая статистика и энергетическое разрешение);**
- Исследование спектра электронов от сотен ГэВ до мультиТэВного диапазона**
- Спектры гамма-излучения и электронов в широком диапазоне энергий со сверхвысоким энергетическим разрешением (моноэнергетические линии от аннигиляции темной материи);**
- Состав КЛ тяжелых и сверхтяжелых ядер за пиком железа**
- Изучение анизотропии космических лучей**

Main Requirements: Weight

Modern Russian launch vehicles, Existing, and under development

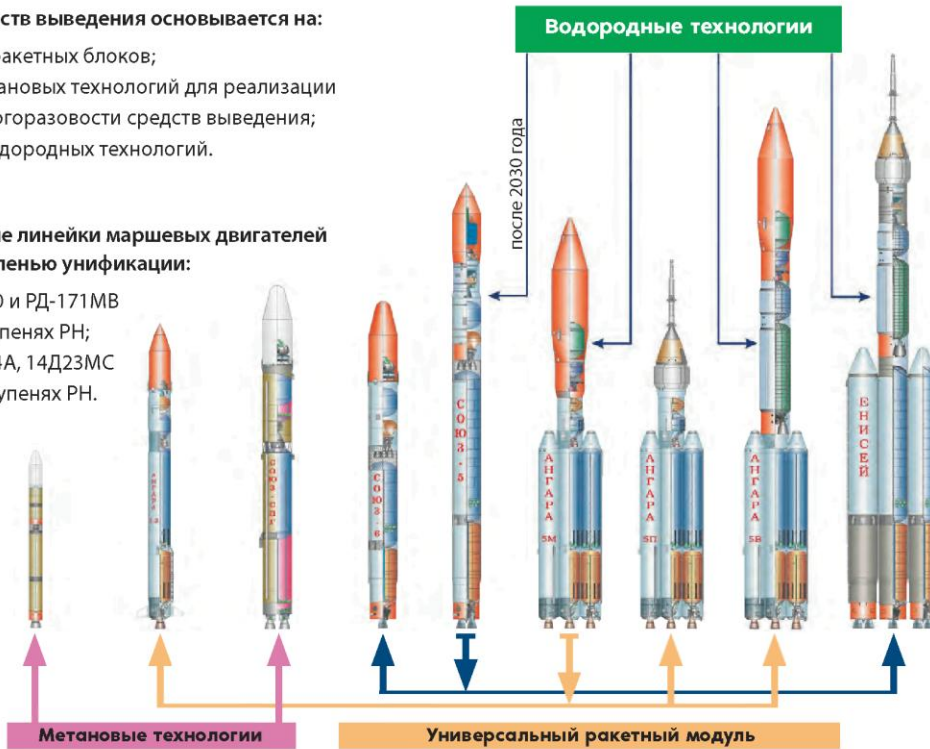
ПЕРСПЕКТИВНАЯ СИСТЕМА СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ

Развитие средств выведения основывается на:

- унификации ракетных блоков;
- освоении метановых технологий для реализации принципа многоразовости средств выведения;
- внедрении водородных технологий.

Использование линейки маршевых двигателей с высокой степенью унификации:

- РД-191, РД-180 и РД-171МВ на первых ступенях РН;
- 14Д23, РД0124А, 14Д23МС на верхних ступенях РН.



Графика В. Штангина

By R&D specification
Three versions of HERO
calorimeter were considered

10 tons
30 tons
70 tons

| Ракета-носитель | Сверхлегкий класс | «Ангара-1.2» | «Союз-СПГ» | «Союз-6» | «Союз-5» | «Ангара-А5М» | «Ангара-А5В» | Сверхтяжелый класс |
|--------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Разгонный блок | – | Агрегатный модуль | «Фрегат» | «Фрегат» / ДМ | ДМ | ДМ / КВТК | КВТК | КВТК+ типа ДМ |
| Масса ПГ на НОО, т | 1.0 | 3.5 | 10.5 | 9.3 | 17.4 | 27 | 38 | 103 |
| Масса ПГ на ССО, т | 0.6 | 2.4 | 4.7 | 5.5 | 9.0 | – | – | – |
| Масса ПГ на ГПО, т | – | – | 2.6 | 2.3 | 5.0 | 7.0 / 8.0 | 12 | До 27 |
| Масса ПГ на ГСО, т | – | – | 1.2 | – | 2.5 | 3.9 / 5.1 | 7.0 | на орбите Луны |
| Компоненты топлива | O ₂ +СПГ | O ₂ +керосин | O ₂ +СПГ | O ₂ +керосин | O ₂ +керосин | O ₂ +керосин | O ₂ +керосин | O ₂ +керосин |

Технологии:

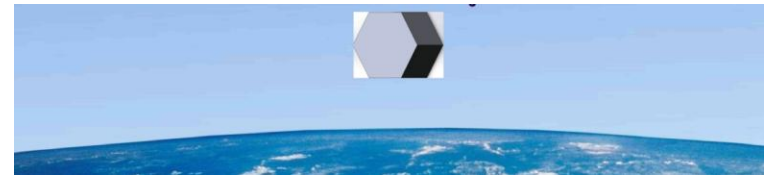
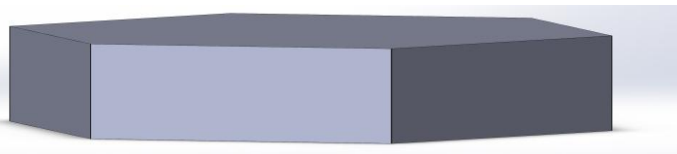
энергетический спектрометр - ионизационный калориметр

детектор заряда - многослойная кремнивая матрица

Оптимизация формы ИС

После симуляций наиболее оптимальная форма – 3D ИС в виде призмы, расположенной боковой поверхностью к Земле.

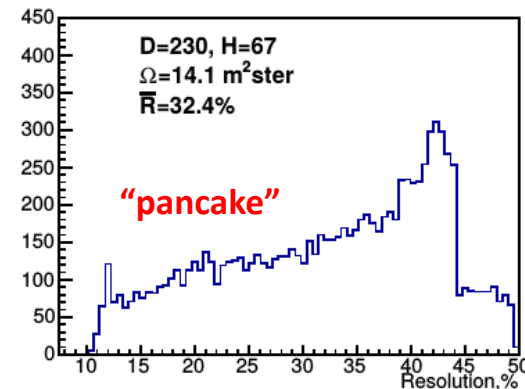
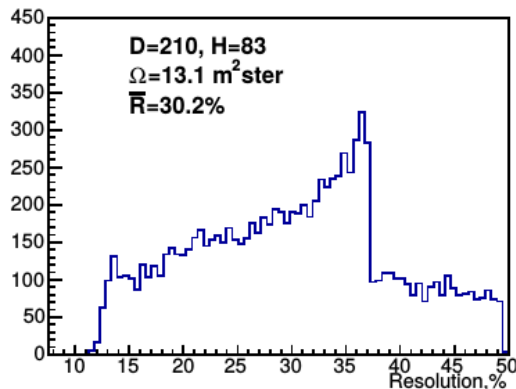
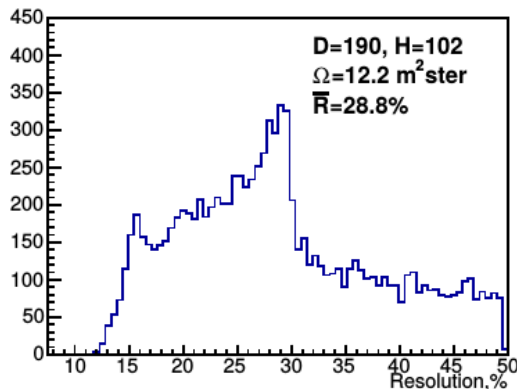
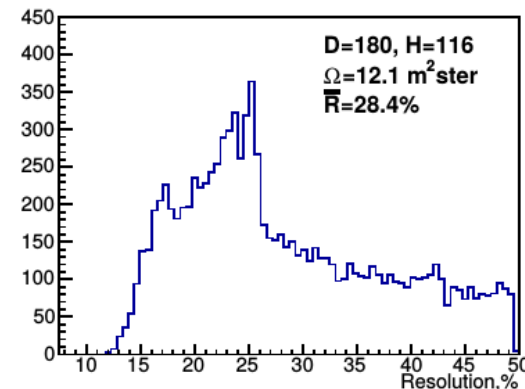
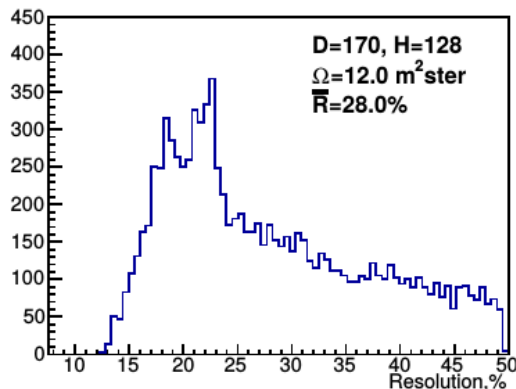
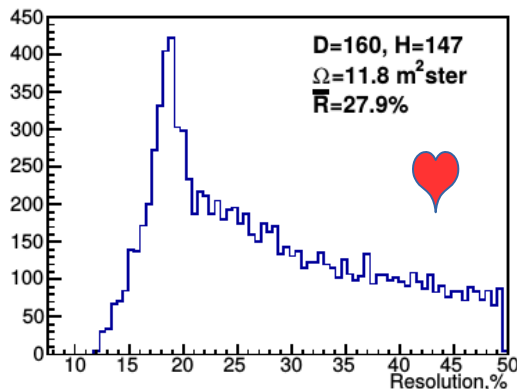
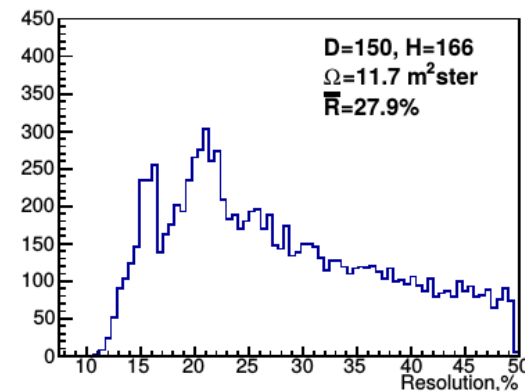
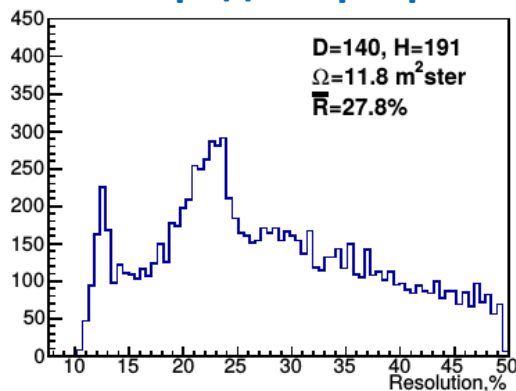
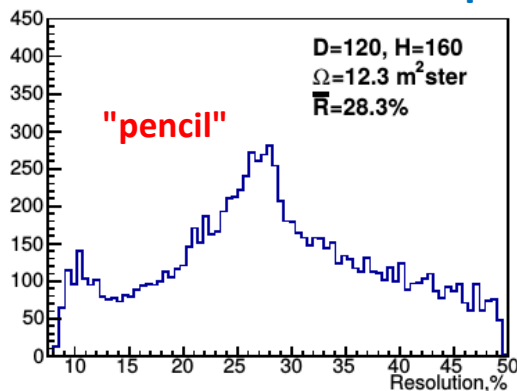
две предельные формы призмы: «блин», «карандаш»



Вещество ИК - сочетание очень тяжелого (вольфрам) и очень легкого (полистирол) для оптимизации развития электромагнитных и адронных каскадов

Энергетическое разрешение Монте-Карло Моделирование 3D ИК весом 10 тонн.

Орбита 500 км. Среднее разрешение <30%



Другие требования:

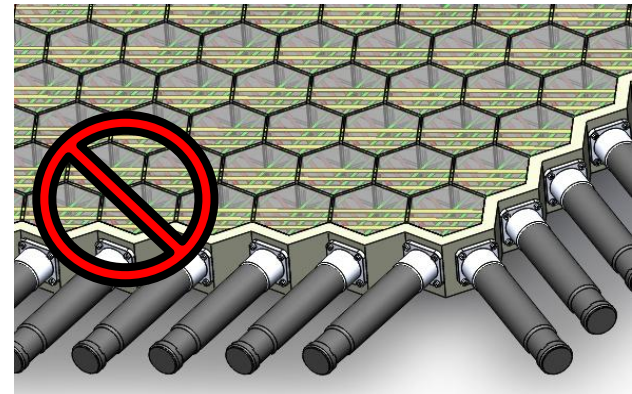
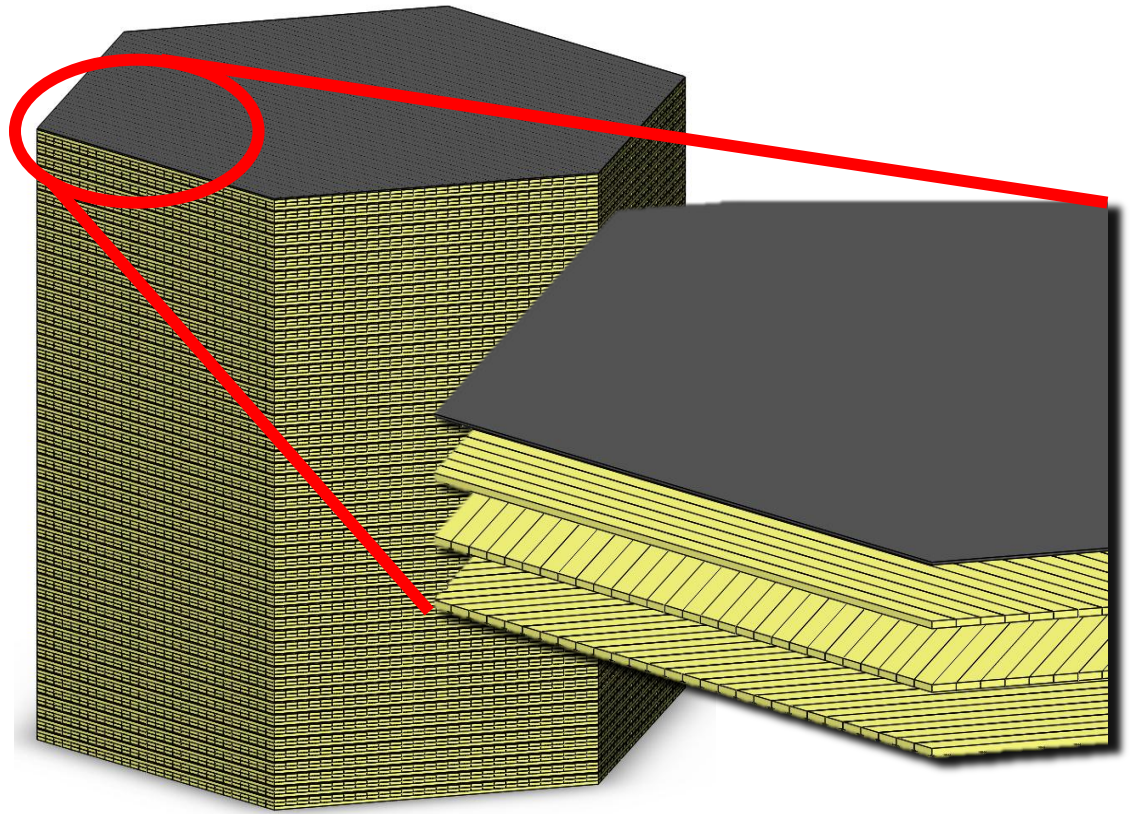
- **относительно быстрое развитие аппарата (менее 5 лет)**
- **относительно дешевая продукция**
- успех миссии (высокая надежность)**

Не использовать новые технологии

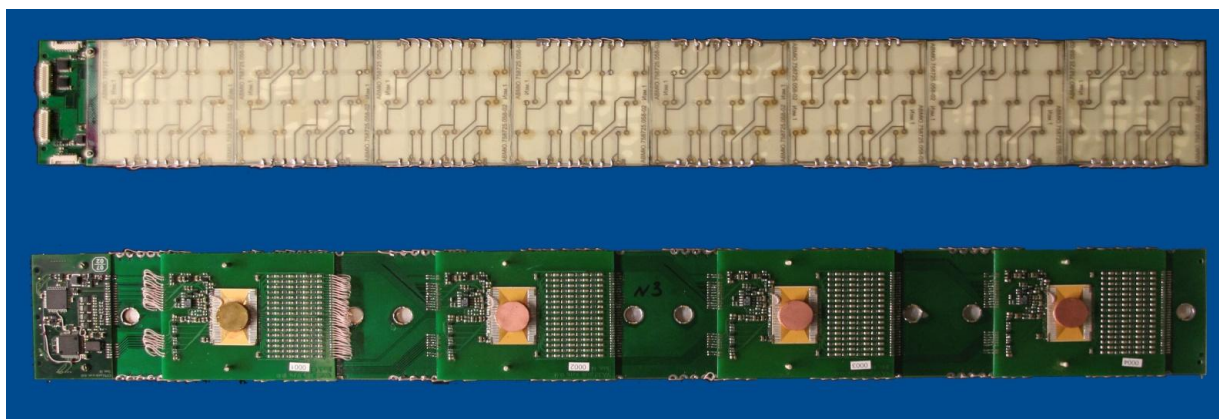
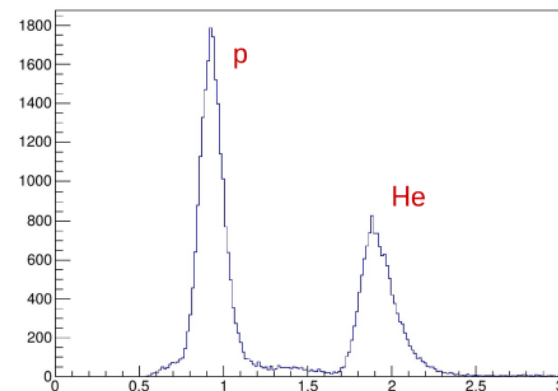
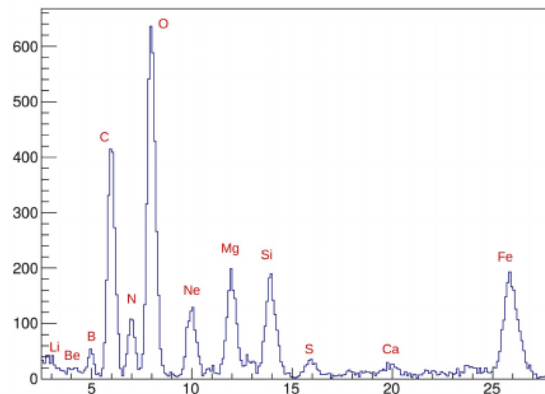
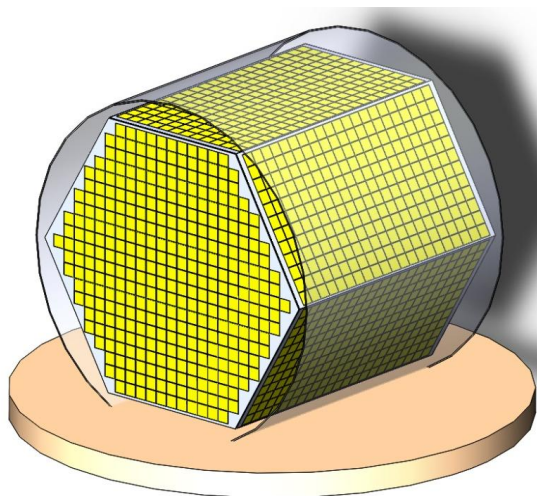
**Только те, которые надежно работали в космосе
на несколько лет**

НУКЛОН - база

ИС состоит из N одинаковых слоев. Каждый слой представляет собой шестигранную плоскость толщиной $24+3$ мм, с тремя слоями полистирольного сцинтиллятора ($\rho \sim 1,0$ г/см³, $h=8$ мм) с 56 полосками шириной 2,5 см, ориентированными под углом 60° друг к другу, и вольфрамово-медной пластиной. -поглотитель из никелевого сплава ($\rho \sim 16/5$ г/см³, $h=3$ мм)

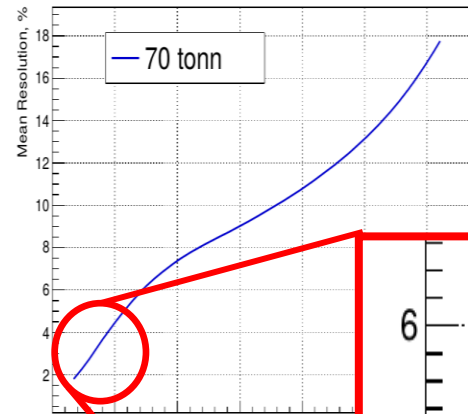
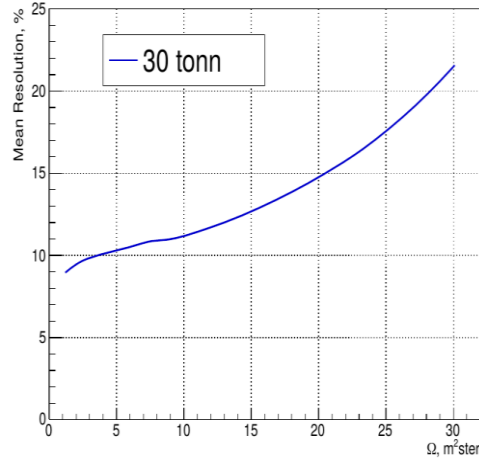
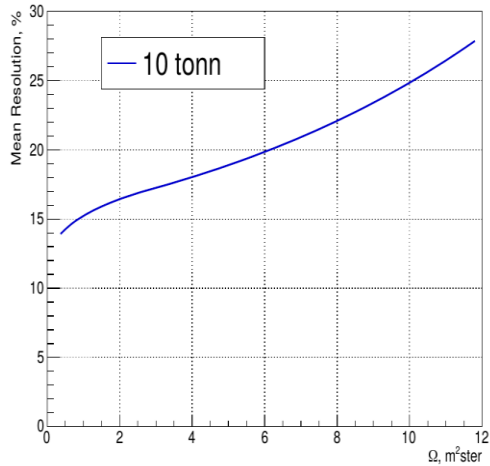
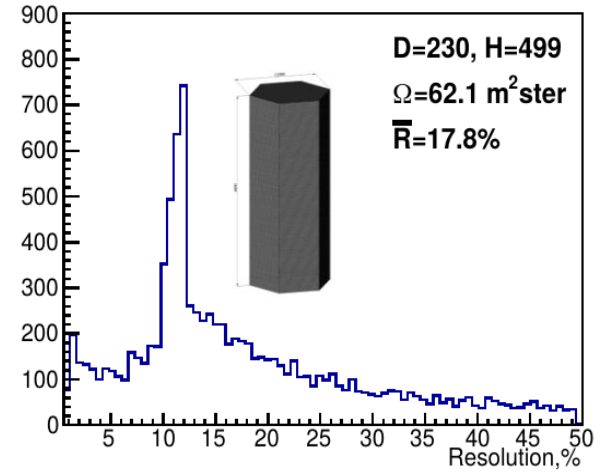
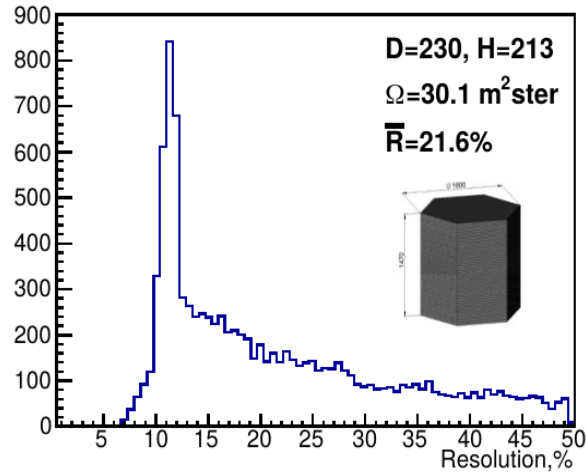
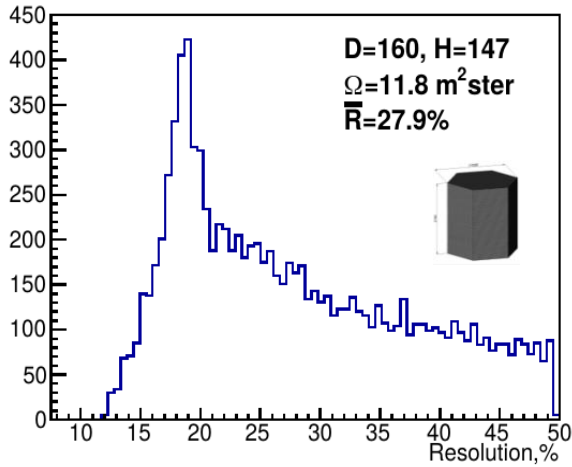


Вокруг ИК расположена система измерения заряда, состоящая из кремниевых детекторов (площадь пада около 1 см²). Четыре слоя

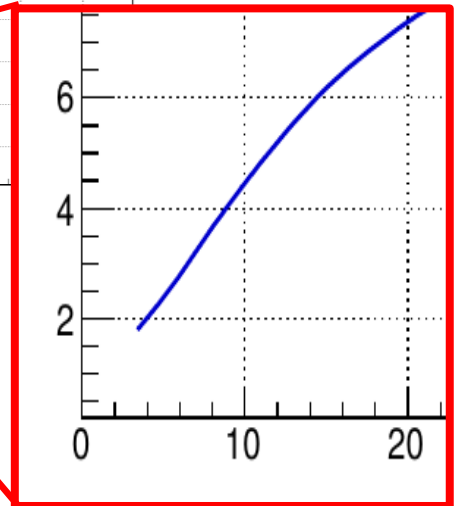


Конструкция ледера аналогична конструкции НУКЛОН. Ожидаемое разрешение заряда лучше, чем 0,2 з.е.(Пады в ОЛВЭ в три раза меньше, чем в NUCLEON)

Geometry optimization and energy resolution



Energy resolution of **4%** at 10 m²ster geom. factor!



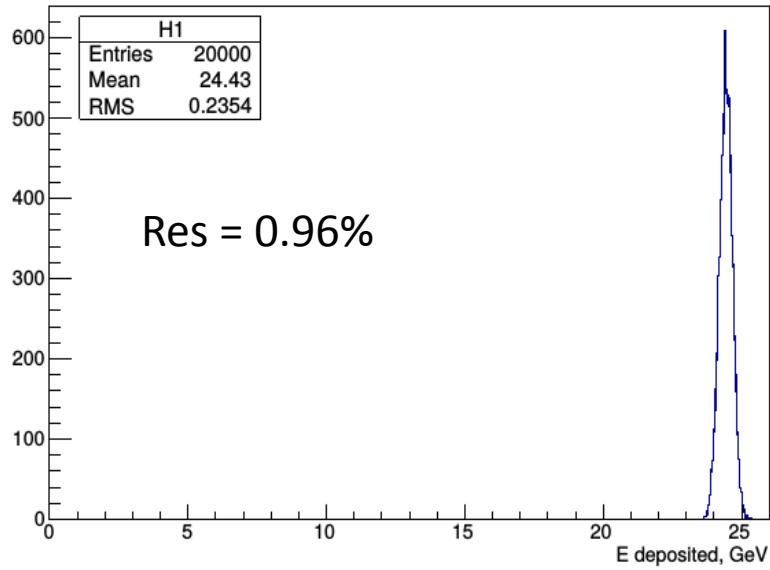
10 tons
 6700+2700
 00 Readout
 channels

30 tons
 14.000+5700
 00 Readout
 channels

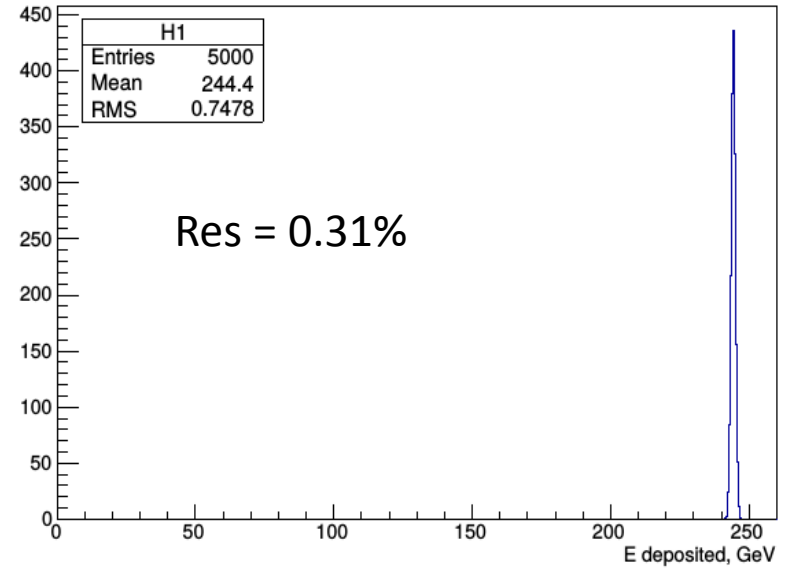
70 tons
 32.700+10500
 00 Readout
 channels

Energy Resolution for gamma quanta, IC of 3λ , $52 X_0$

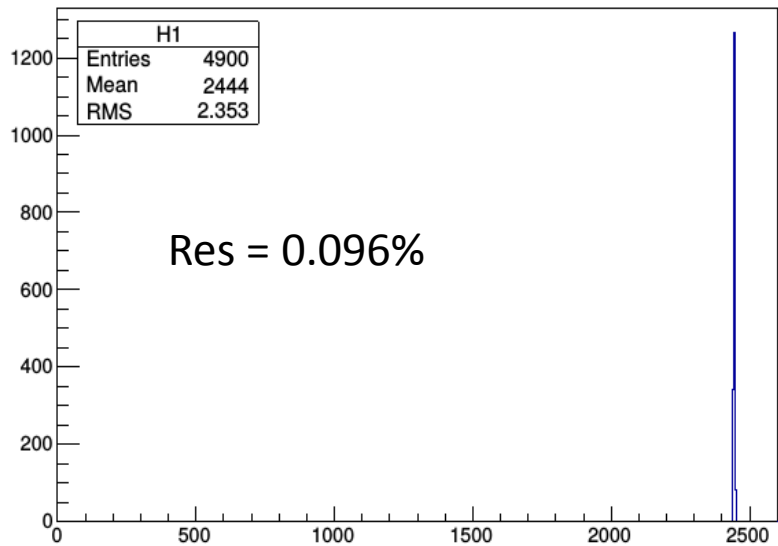
Gamma, 100 GeV



Gamma, 1000 GeV



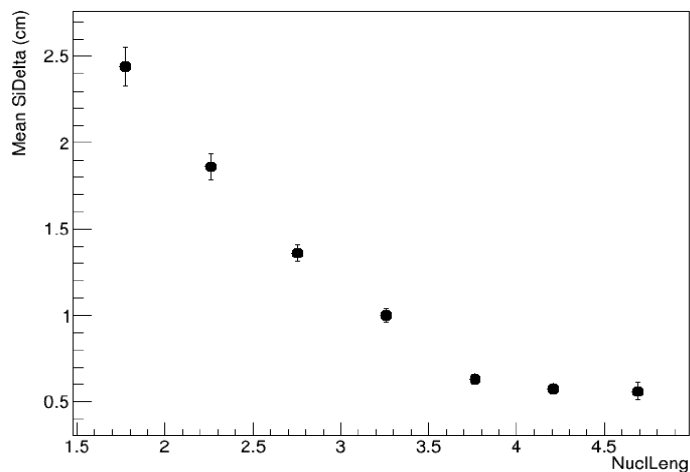
Gamma, 10000 GeV

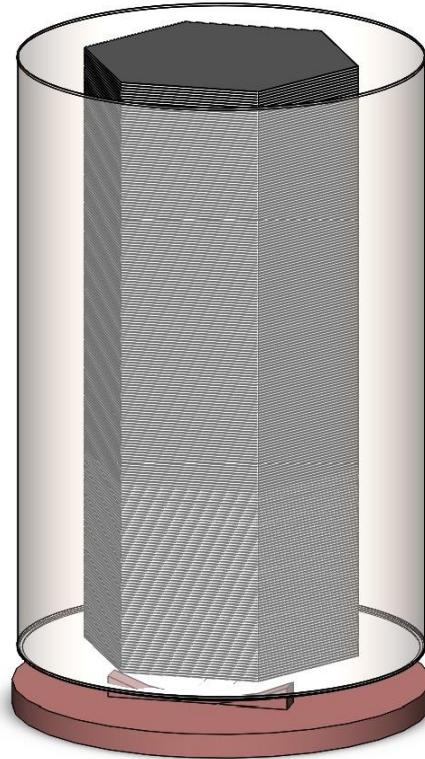
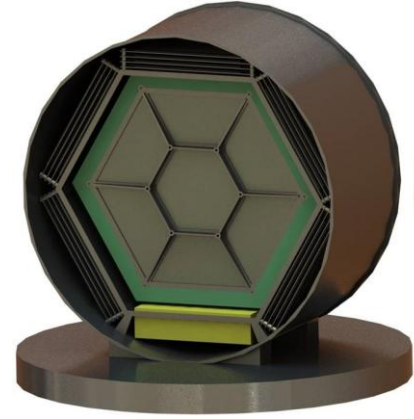
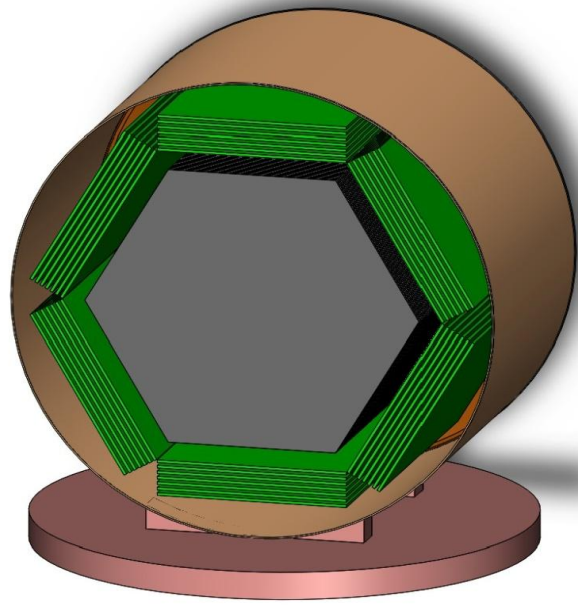


only physical fluctuations !

Средняя ошибка реконструкции угла (градусы) для 10-тонной конфигурации

| Particle | Strip width 1.25 cm | Strip width 2.5 cm | Strip width 5.0 cm |
|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| p, 1 TeV | 0.57 +- 0.01 | 0.56 +- 0.01 | 0.75 +- 0.02 |
| p, 10 TeV | 0.29 +- 0.01 | 0.30 +- 0.01 | 0.49 +- 0.01 |
| p, 100 TeV | 0.22 +- 0.01 | 0.24 +- 0.01 | 0.43 +- 0.01 |
| γ , 100 GeV | 1.17 +- 0.02 | 1.38 +- 0.02 | 2.20 +- 0.03 |
| γ , 300 GeV | 1.07 +- 0.02 | 1.21 +- 0.02 | 1.97 +- 0.03 |
| γ , 1000 GeV | 0.94 +- 0.02 | 1.07 +- 0.02 | 1.80 +- 0.02 |
| γ , 3000 GeV | 0.92 +- 0.02 | 1.03 +- 0.02 | 1.65 +- 0.02 |





Проект прошел все стадии НИР.

Подготовлено и принято «Роскосмосом» ТЗ на аванпроект

Даны предложения по технической реализации (только отечественные технологии).

Определены требования к КА

Дано предварительное ТЭО

В ФКП старт 2021 г. (секвестирован), перенесен на 2023

Что дальше?

Дальнейшее продвижение по энергетической шкале ($> 5 \cdot 10^{16}$ эВ) традиционными методами исследования, дает требования по массе для орбитального калориметра ~ 1500 т, что на сегодняшний день недостижимо.



Луна

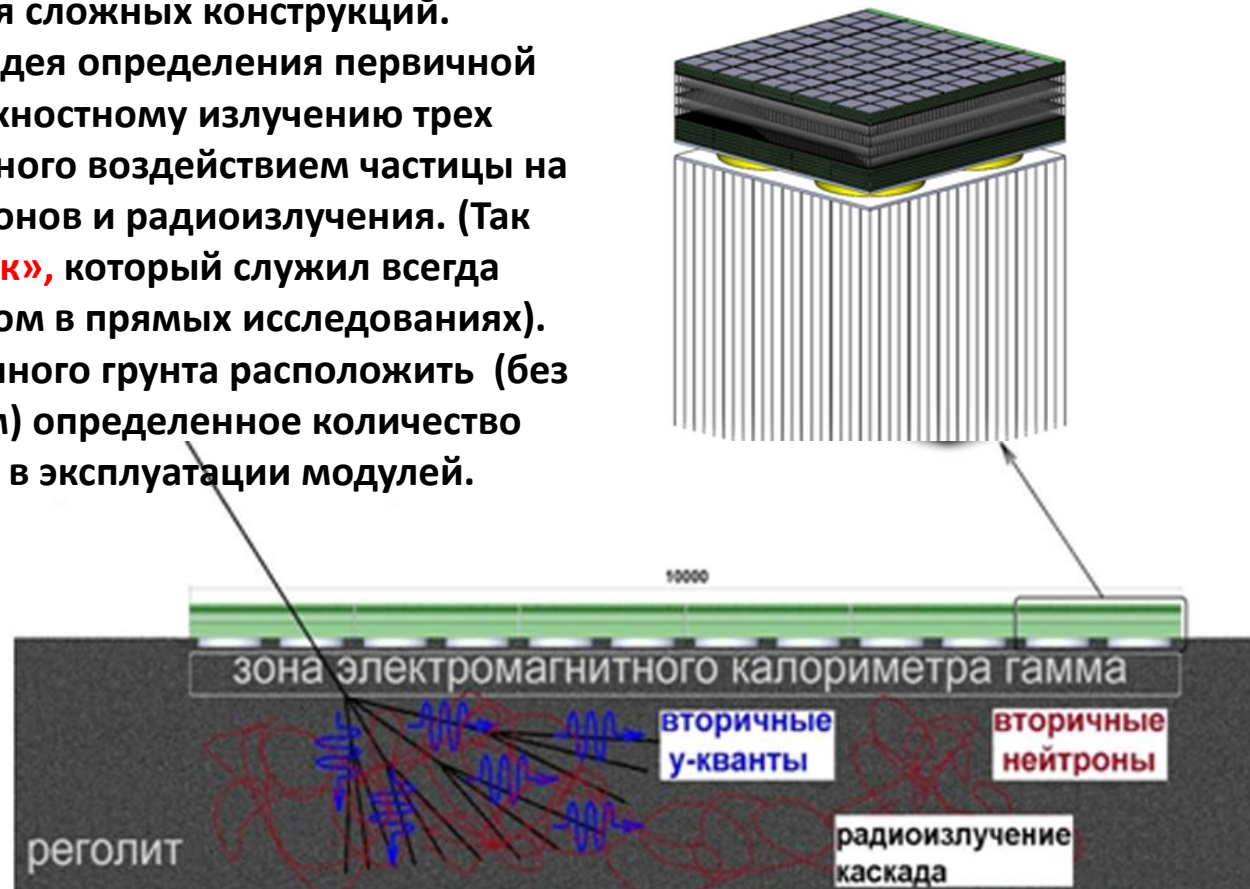
**предоставляет уникальные
возможности для проведения
экспериментов, выполнение
которых невозможно в земных
условиях и на космических
аппаратах**

НЕЙТРОНИЙ

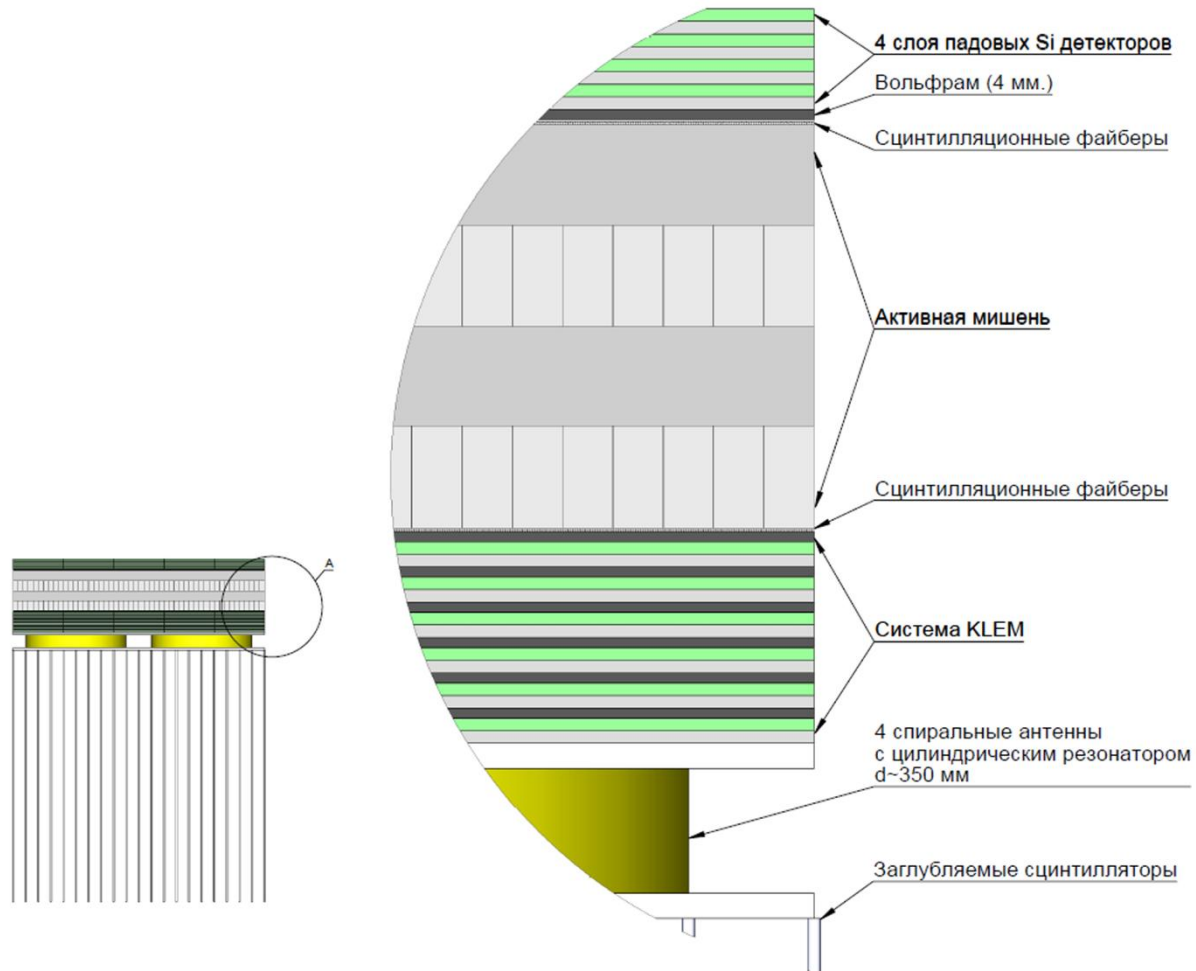
для Российской Лунной Научной Обсерватории

Идея использования грунта Луны в качестве поглотителя ИК не новая, но все предыдущие проекты требовали колоссальных ресурсов для построения сложных конструкций.

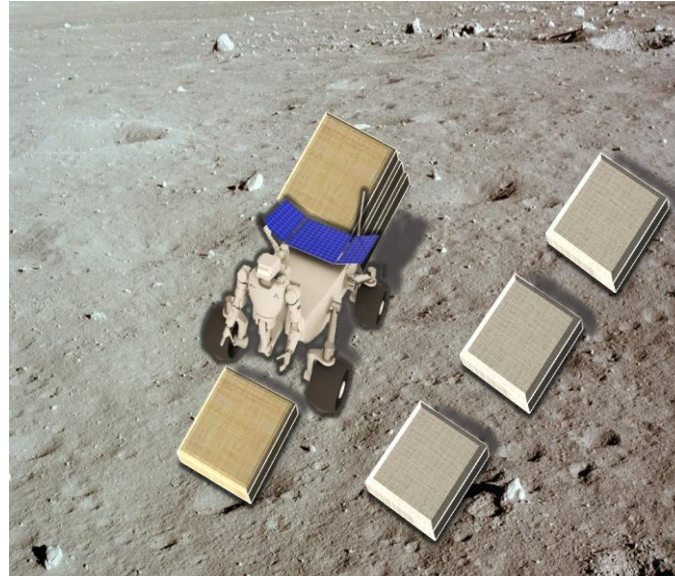
Предложена оригинальная идея определения первичной энергии частицы по поверхностному излучению трех компонент из каскада рожденного воздействием частицы на лунный грунт : гамма, нейтронов и радиоизлучения. (Так называемый **«обратный ток»**, который служил всегда дестабилизирующим эффектом в прямых исследованиях). Предлагается на площадке лунного грунта расположить (без «земляных» работ с грунтом) определенное количество идентичных, автономных в эксплуатации модулей.



Внутренняя структура каждого модуля имеет довольно сложную структуру по отработанным технологиям современного эксперимента физики высоких энергий (кремневые детекторы, сцинтилляционные волокна, «активная мишень», система КЛЕМ, радиоантенны, заглубленные в реголит сцинтилляторы...)



Модульный принцип компоновки обсерватории **НЕЙТРОНИЙ** позволяет поэтапное ее построение по мере наращивания ресурсов в развитии **Российской Лунной Научной Обсерватории**. Предполагается роботизированная сборка установки «под ключ» из модулей, доставляемых грузовиками с Земли. Работа установки полностью в автоматическом режиме. Привлечение труда человека только для проведения необходимых сложных работ.



Космический научный комплекс **НЕЙТРОНИЙ** дает безальтернативные возможности:

- прямого исследования КЛ в области энергий с индивидуальным разрешением по заряду частиц вплоть до 10^{14} - 10^{17} эВ;
- повышение чувствительности в исследовании гамма-астрономии почти на два порядка выше существующих и запланированных проектов вплоть до $(1-2) \times 10^{-13}$ эрг см⁻² сек⁻¹ (~ 0.001 Краба).