



Учреждение Российской  
академии наук  
Физический институт  
им. П.Н. Лебедева РАН



РОСКОСМОС



---

# Регистрация космических лучей ультравысоких энергий в эксперименте ЛОРД (Лунный Орбитальный Радиодетектор)

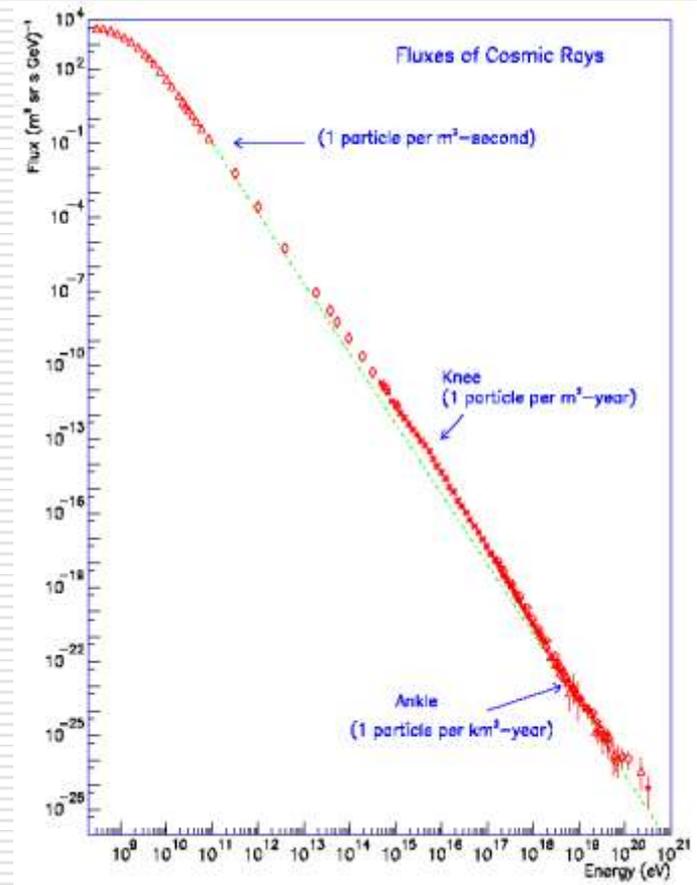
**Рябов В.А.**

**Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН**

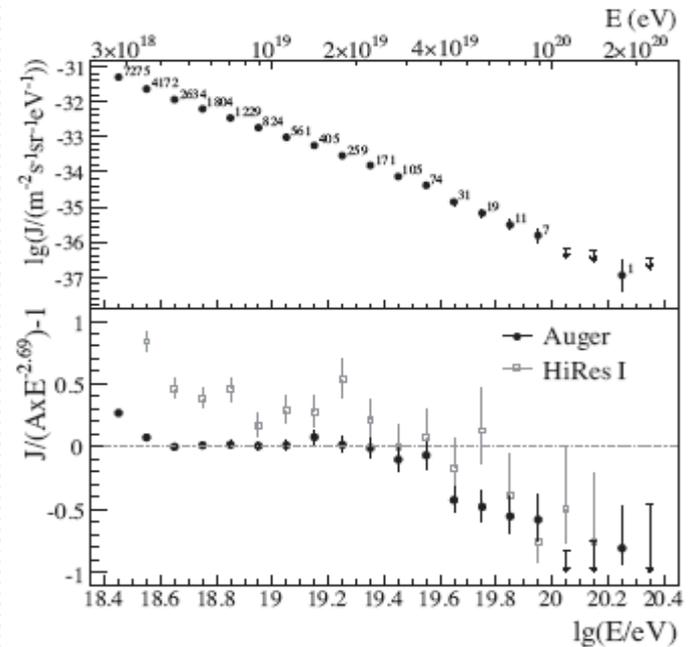
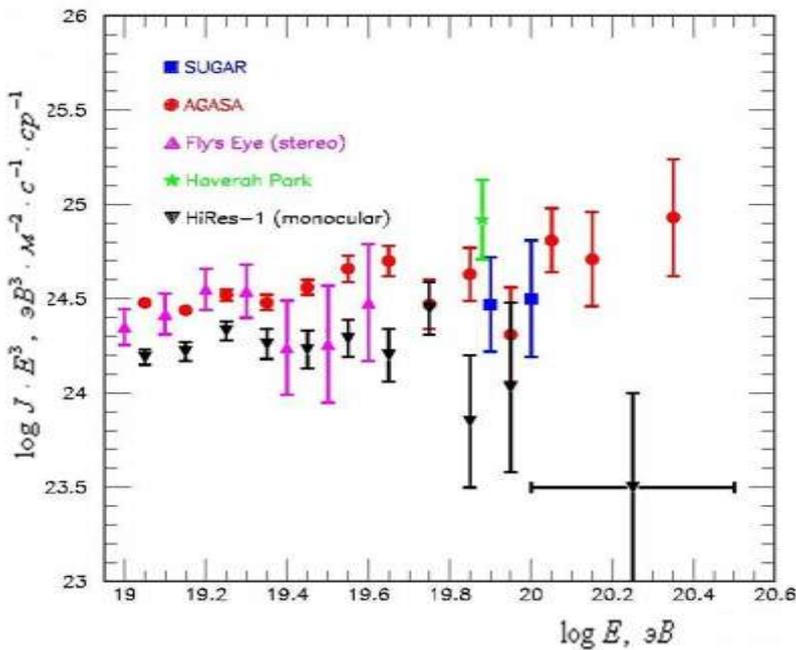
# Основная научная задача

## Регистрация космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий

Информация об этих частицах важна для решения фундаментальных проблем астрофизики и физики элементарных частиц, касающихся источников и механизмов ускорения космических лучей, природы темной материи, и возможно, нарушения основополагающих принципов теории относительности.



# Существующие экспериментальные данные (КЛ)

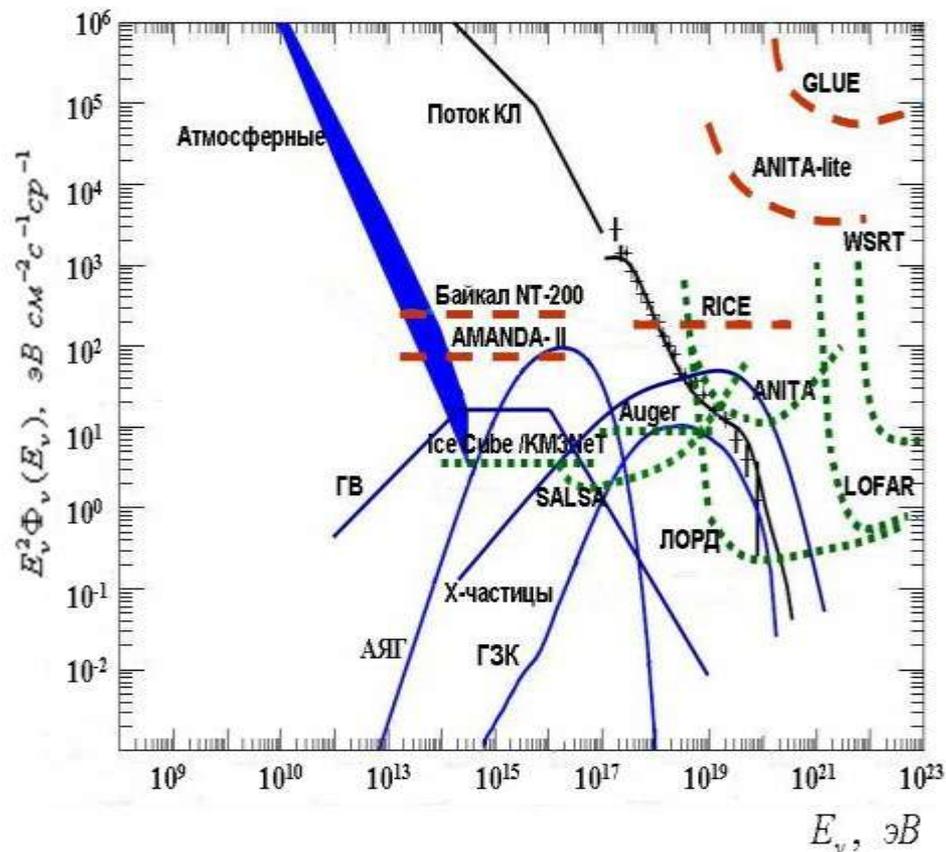


**Каковы же наибольшие энергии частиц во Вселенной?**  
**Каковы источники частиц ультравысоких энергий?**  
**Существует ли обрезание спектра космических лучей?**

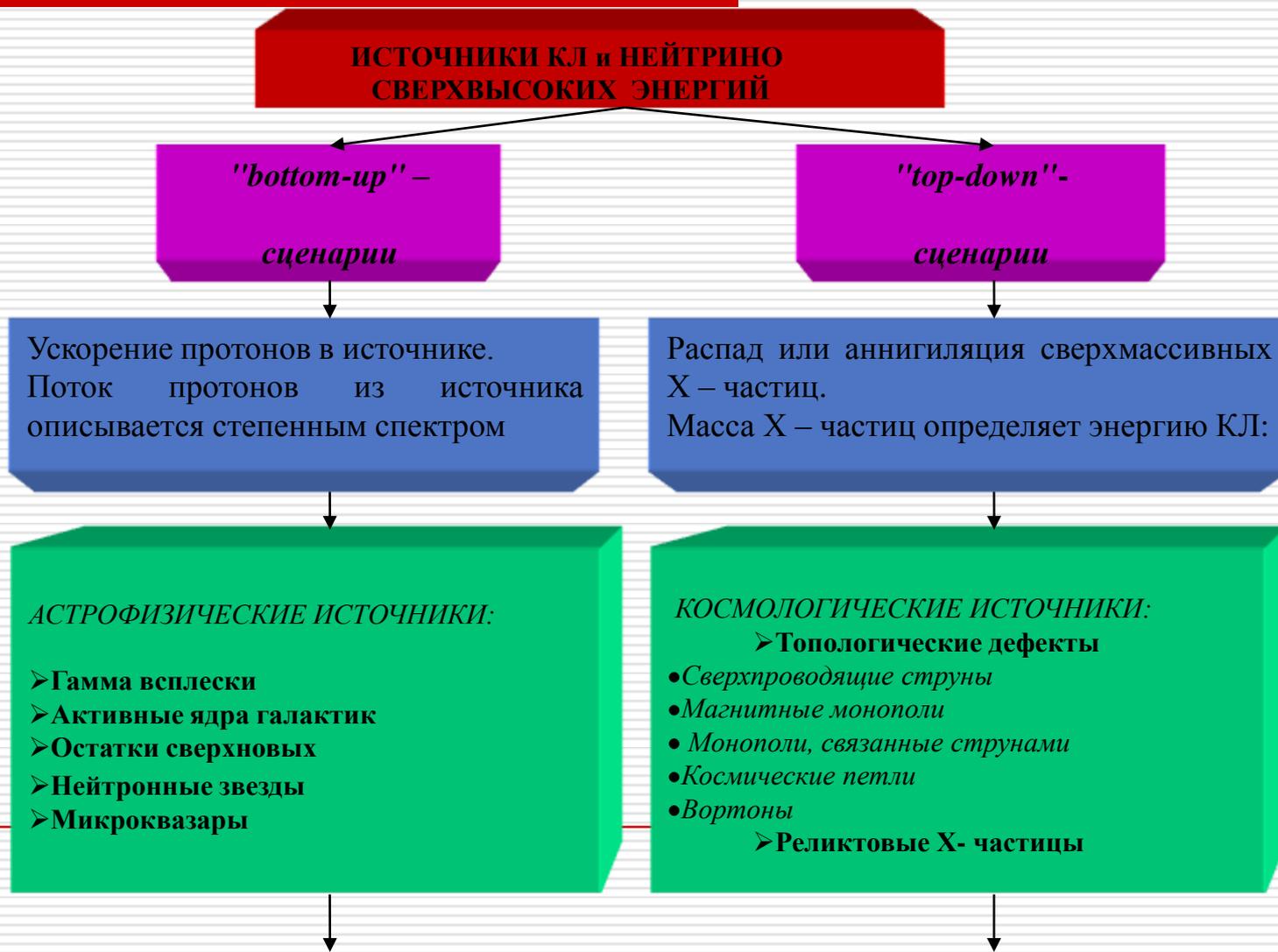
# Существующие экспериментальные данные (нейтрино)

До настоящего времени нейтрино регистрировалось только от двух астрофизических источников: Солнца и сверхновой *SN 1987A*.

Имеются серьезные основания для существования других астрофизических и космологических источников нейтрино.

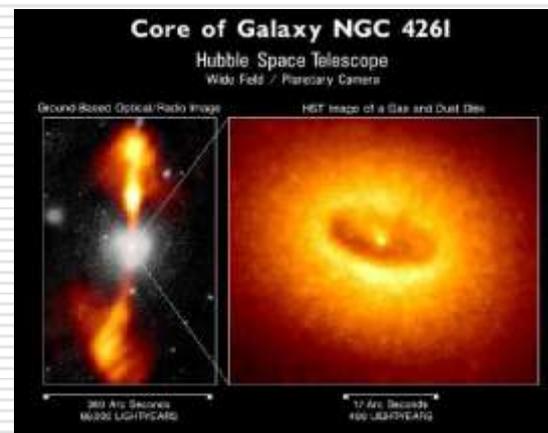
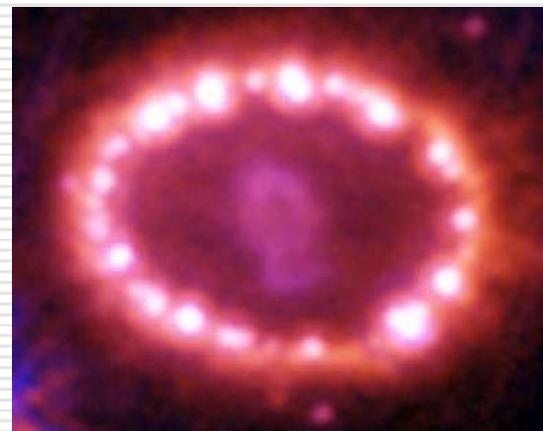
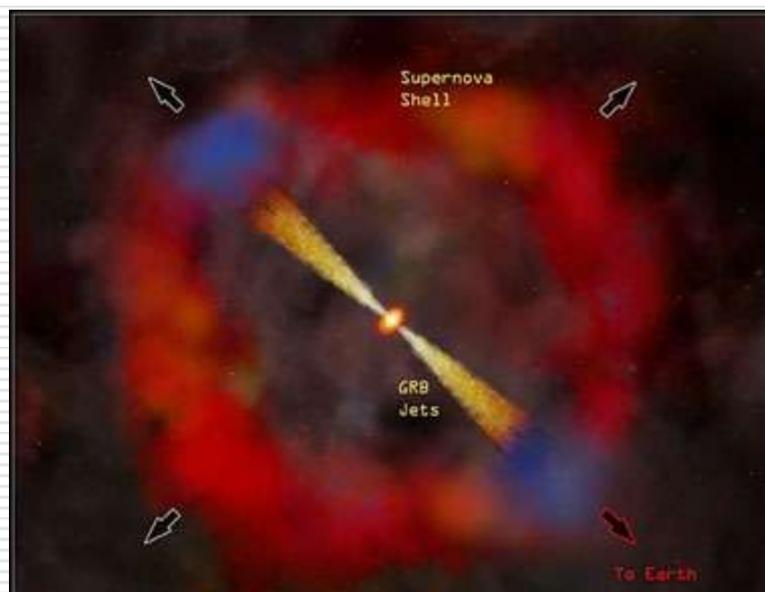


# Две возможные схемы генерации КЛ и нейтрино ультравысоких энергий



# Генерация КЛ и нейтрино ультравысоких энергий

---



# Проблемы регистрации КЛ и нейтрино ультравысоких энергий

---

- **Теоретически: большое разнообразие источников**
- **Экспериментально: редкость событий**

Поток КЛ при энергиях  $E_{\text{КЛ}} > 10^{20}$  эВ составляет 1/км<sup>2</sup>/столетие.

В нейтринных телескопах объемом 1 км<sup>3</sup> ожидается регистрация одного нейтрино раз в три года.

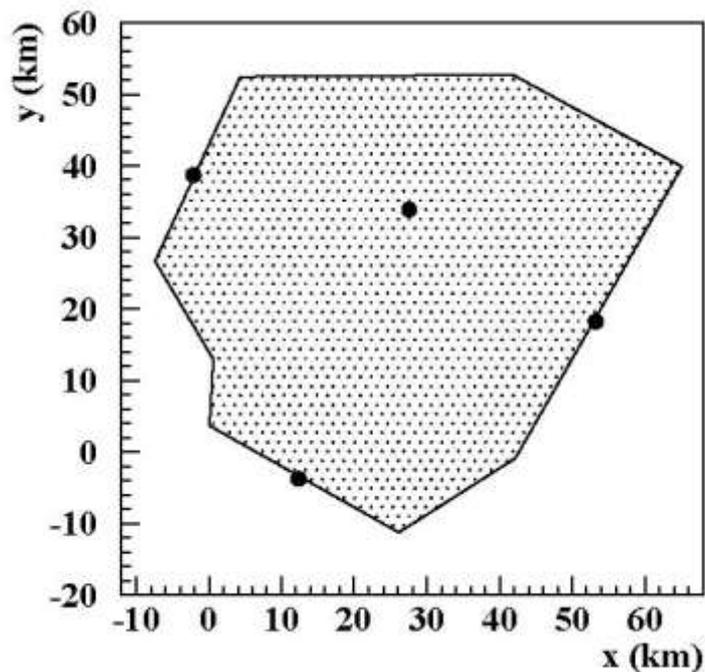
---

# Проблемы регистрации КЛ и нейтрино ультравысоких энергий

---

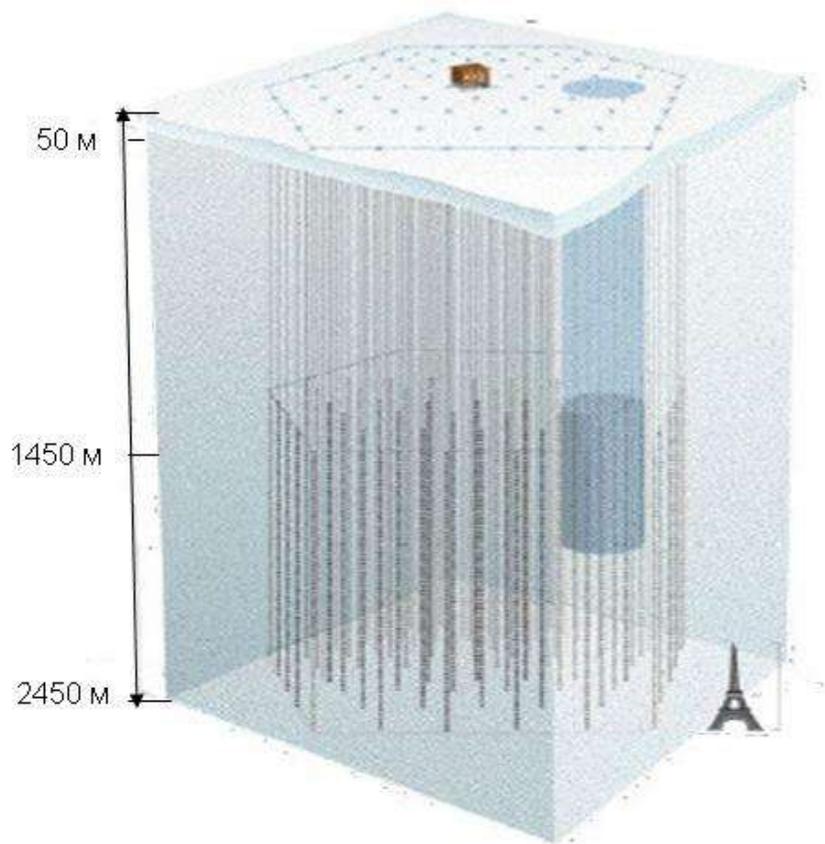
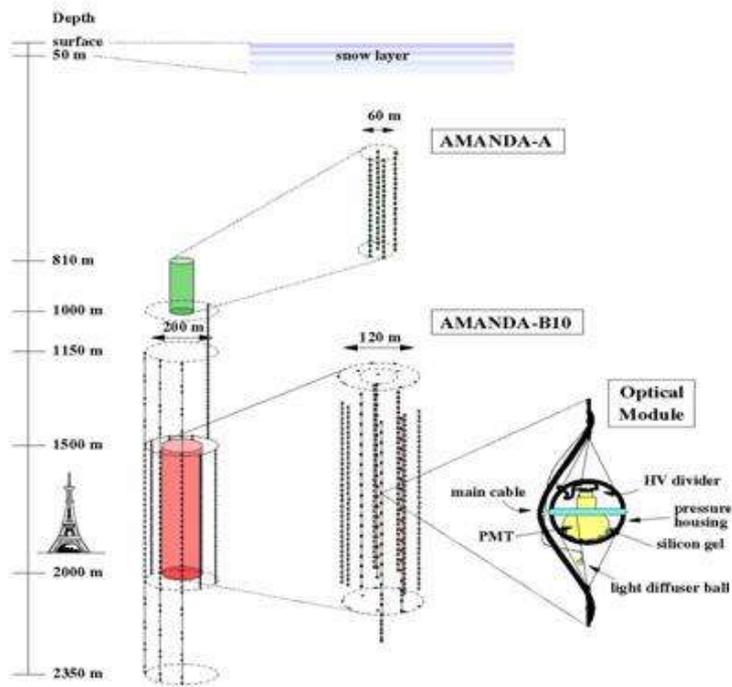
- Необходимы детекторы с огромными объемами и площадями.
  - В последние годы для изучения КЛ строятся гигантские наземные детекторы, располагающиеся на площади в несколько тысяч км<sup>2</sup>.
  - Существуют проекты по регистрации ливней от частиц ультравысоких энергий в атмосфере Земли оптическими методами со спутников.
  - Строятся нейтринные телескопы объемом 1 км<sup>3</sup>.
  - **Для создания детекторов очень больших масштабов традиционные методы становятся неадекватными.**
-

# Детектор Auger, регистрирующий ШАЛ и флуоресценцию в атмосфере

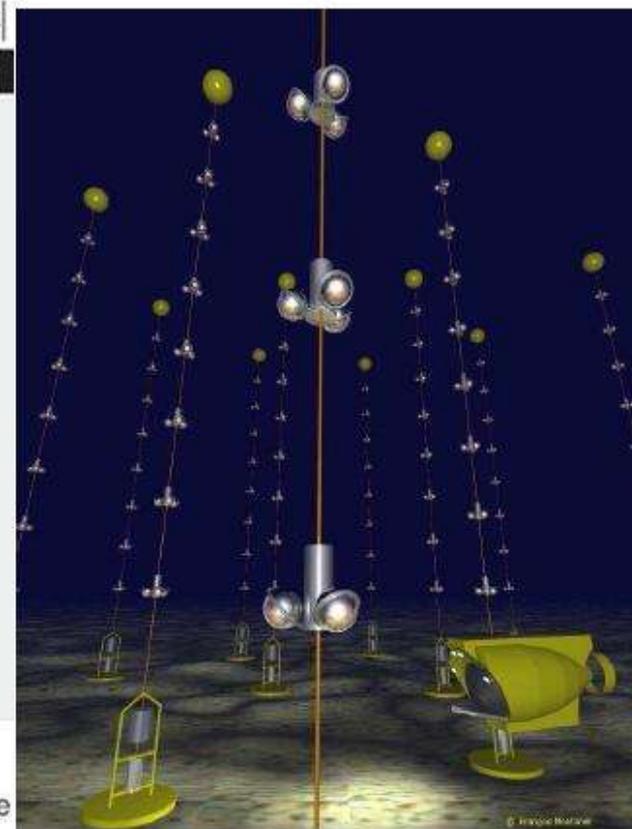
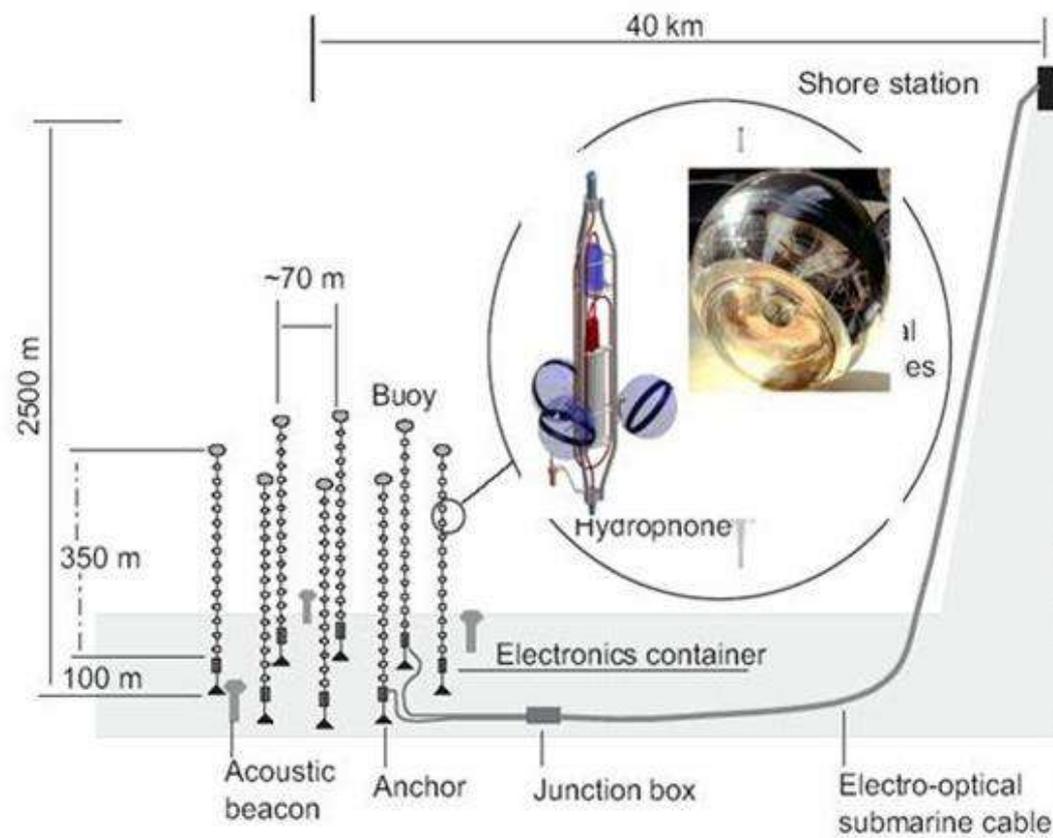


Южная часть обсерватории Оже  
Общая площадь Оже – 6000 км<sup>2</sup>

# Нейтринные телескопы Amanda и IceCube в Антарктиде



# Телескоп ANTARES в Средиземном море



# **Традиционные методы регистрации неадекватны при ультравысоких энергиях?**

---

**Может оказаться, что апертуры установок AUGER, Telescope Array и даже EUSO будут недостаточно велики, чтобы надежно регистрировать КЛ с энергиями  $E > 10^{20}$  эВ (если такие существуют в Природе).**

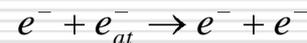
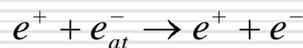
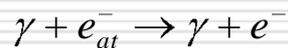
**Тоже самое можно сказать и о возможностях нейтринных телескопов с чувствительными объемами 1 км<sup>3</sup>, если потоки космических нейтрино окажутся меньше, чем предсказывается в наиболее распространенных моделях.**

---

# РАДИОМЕТОД РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И НЕЙТРИНО УЛЬТРАВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

---

- При движении заряженной частицы в среде со скоростью  $v$ , превышающей фазовую скорость света в этой среде ( $v > c / n$ ), возникает черенковское излучение электромагнитных волн.
- Поскольку процессы рождения пар и тормозного излучения в кулоновском поле атомных ядер, которые определяют развитие каскадов при высоких энергиях ливневых частиц, симметричны по зарядам, то в первом приближении ливень является электрически нейтральным. Поэтому можно ожидать, что ливень не должен излучать в радиодиапазоне.
- Как было впервые замечено Аскарьяном, значительное число ливневых частиц имеют энергии порядка  $30 \text{ МэВ}$  и ниже, при которых существенно не только взаимодействие с ядрами, но также взаимодействие с атомными электронами



Это взаимодействие приводит к "вытягиванию" электронов из окружающего вещества в ливень.

Возникает зарядовая асимметрия ШАЛ – избыток отрицательных зарядов в ливневом диске составляет 20 – 30%.

---

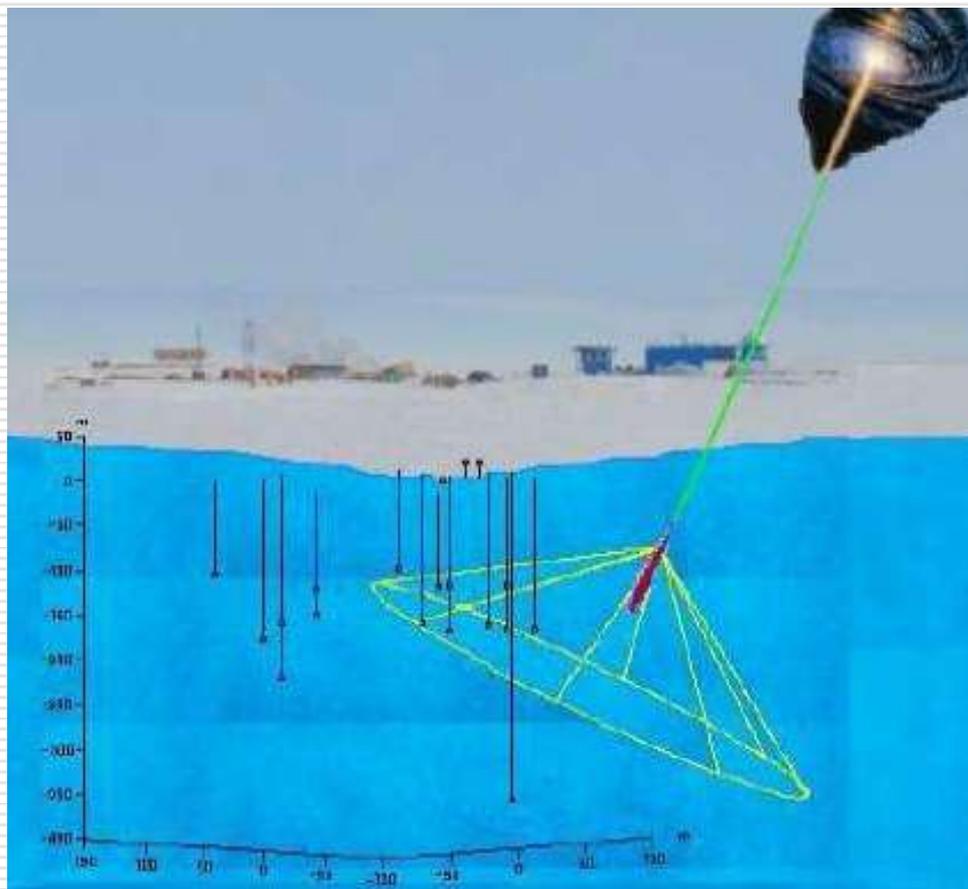
# Преимущества радиометода при ультравысоких энергиях

---

- Важнейшим преимуществом радиометода является возможность использования очень большой длины распространения радиоволн. Как результат, можно обеспечить просмотр огромных объемов атмосферы или других прозрачных для радиоизлучения сред, и регистрировать с высокой статистической обеспеченностью редкие события при ультравысоких энергиях.
  - Применение радиометода целесообразно при ультравысоких энергиях, поскольку мощность когерентного радиосигнала растет квадратично с энергией ливня, и при высоких энергиях мощность излучения в радиодиапазоне превосходит мощность излучения в оптической области.
-

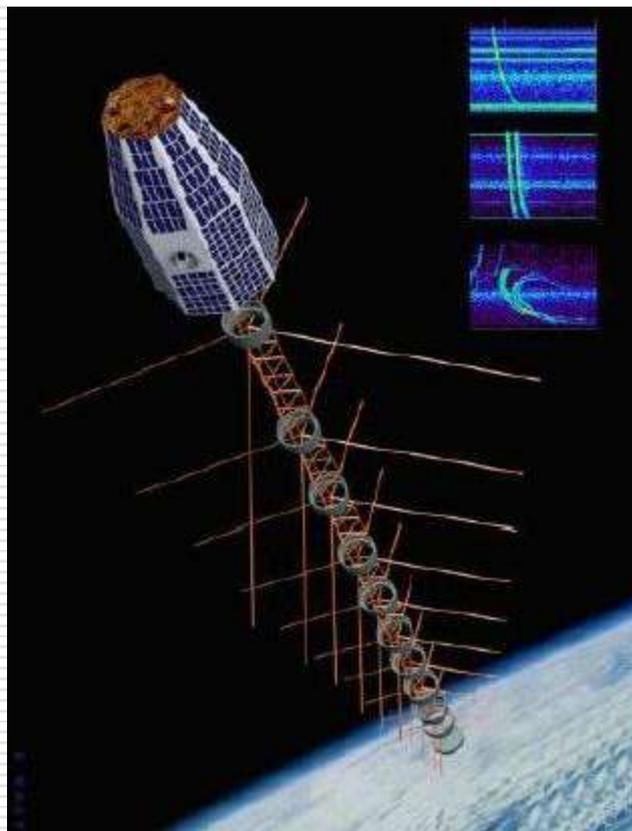
# Радиомассив антенн RICE в Антарктиде

---

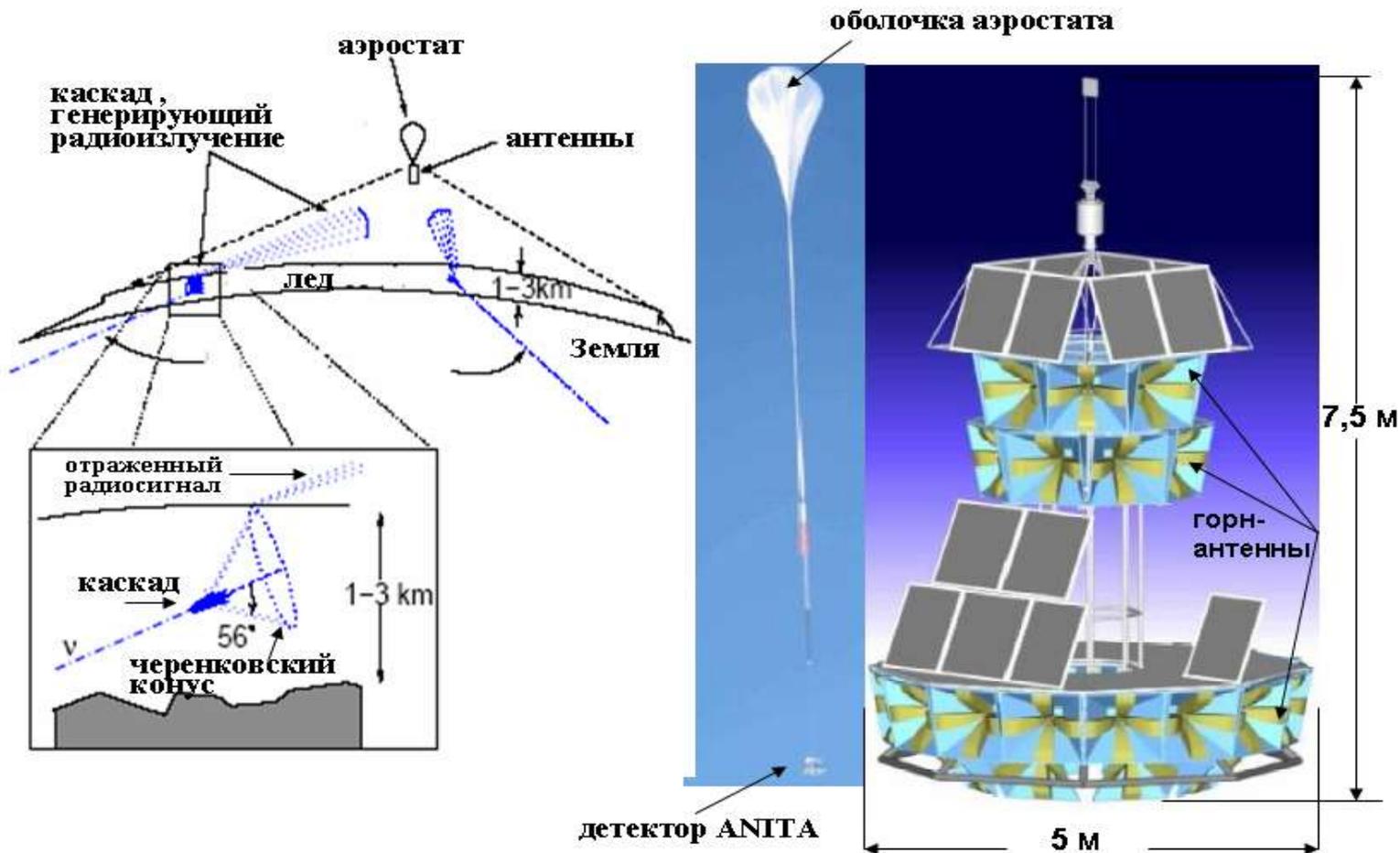


# Радиодетектор на спутнике FORTE, просматривающий лед Гренландии

---

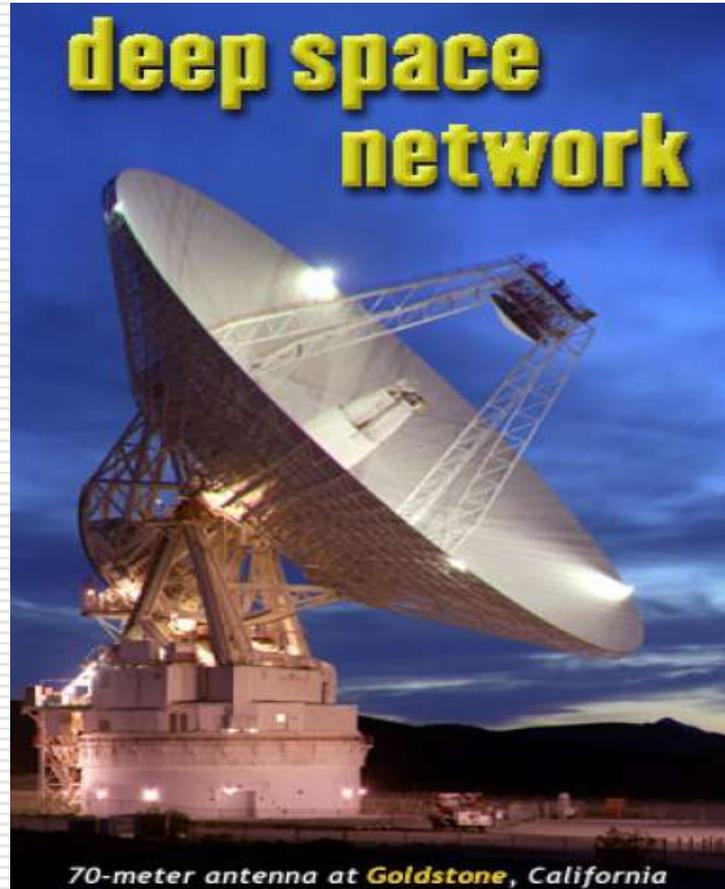


# Радиодетектор ANITA на аэростате, просматривающий лед Антарктиды



# Радиотелескоп GLUE, просматривающий лунный реголит

---



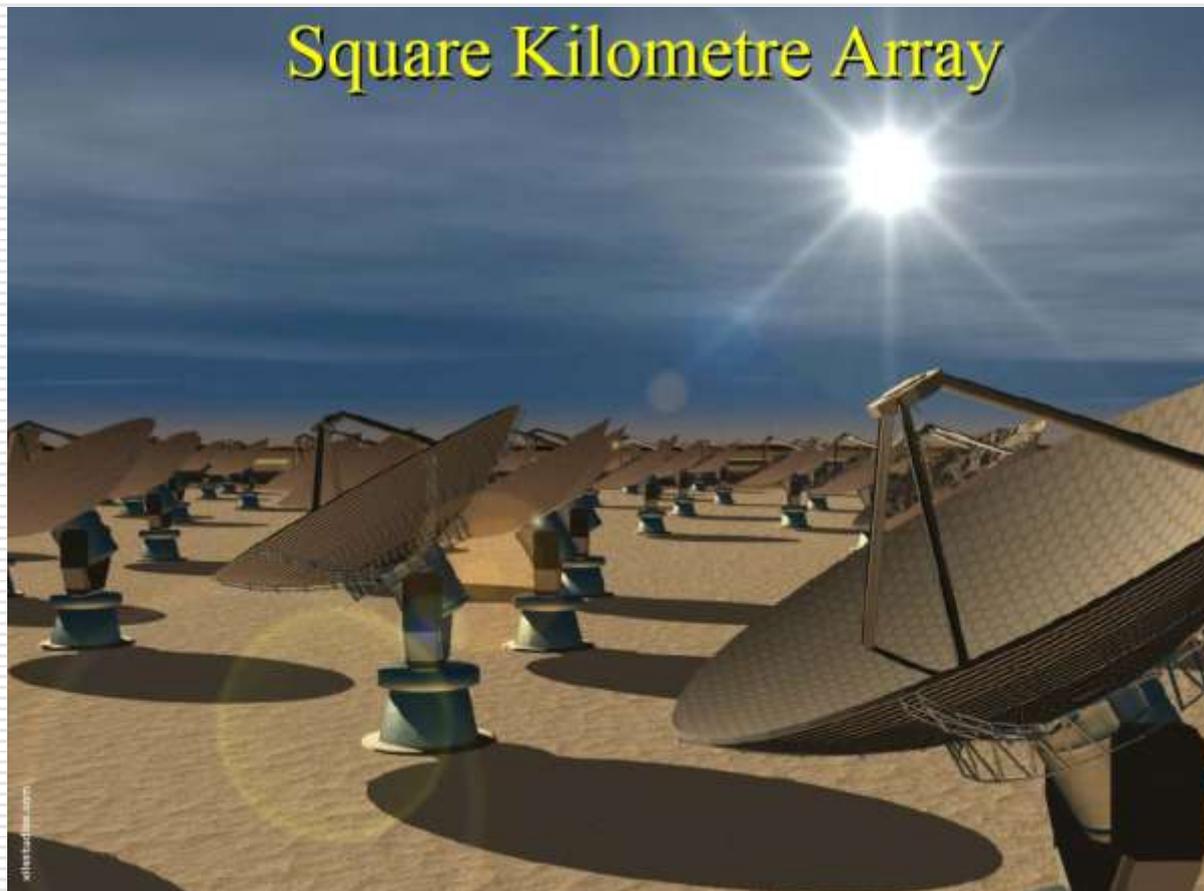
# Радиомассив АТСА, просматривающий лунный реголит

---



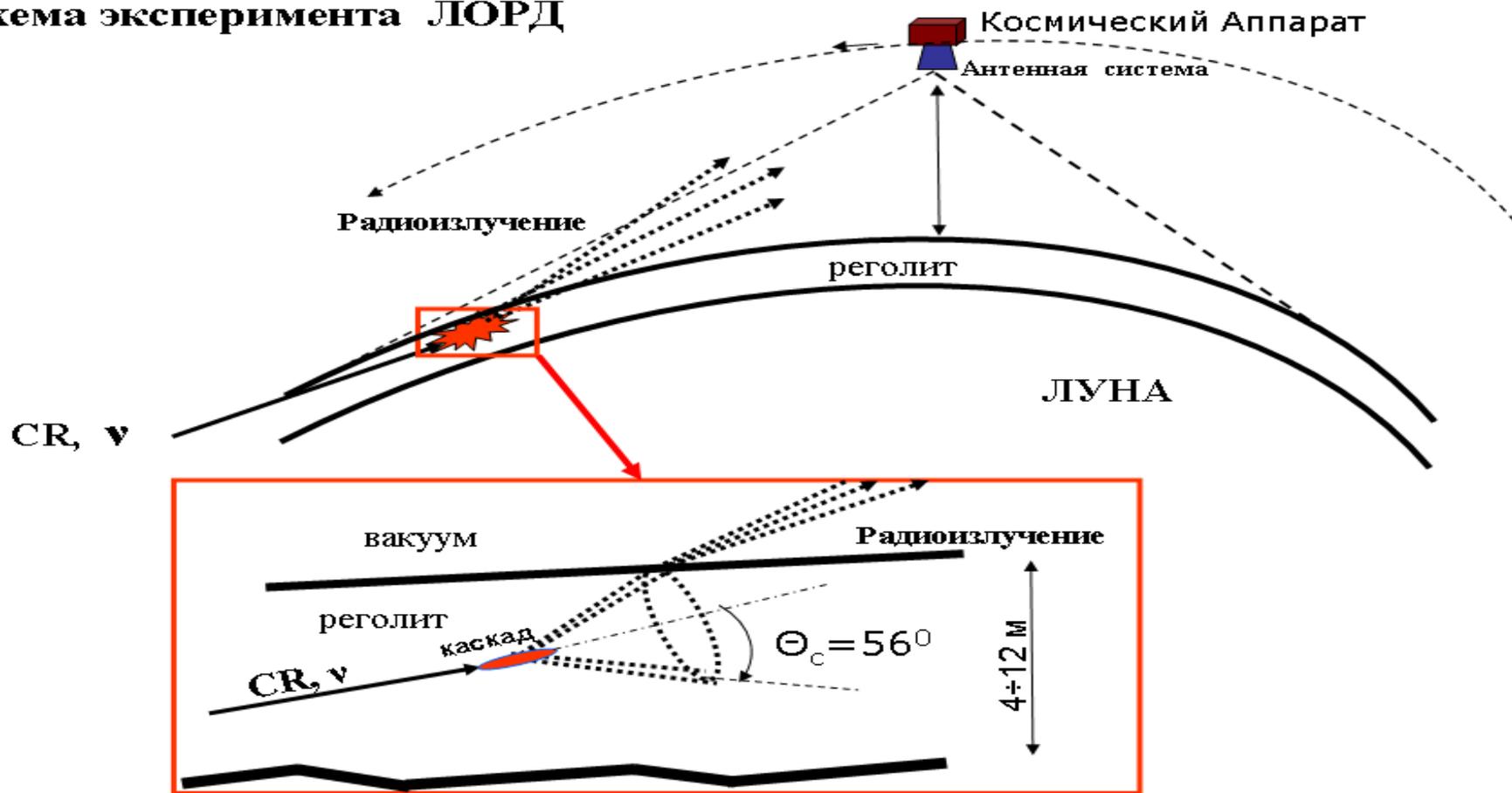
# Радиомассив SCA, просматривающий лунный реголит

---



# Эксперимент ЛОРД

Схема эксперимента ЛОРД



Эксперимент ЛОРД – Лунный Орбитальный РадиоДетектор

# Луна как мишень для регистрации КЛ и нейтрино

---

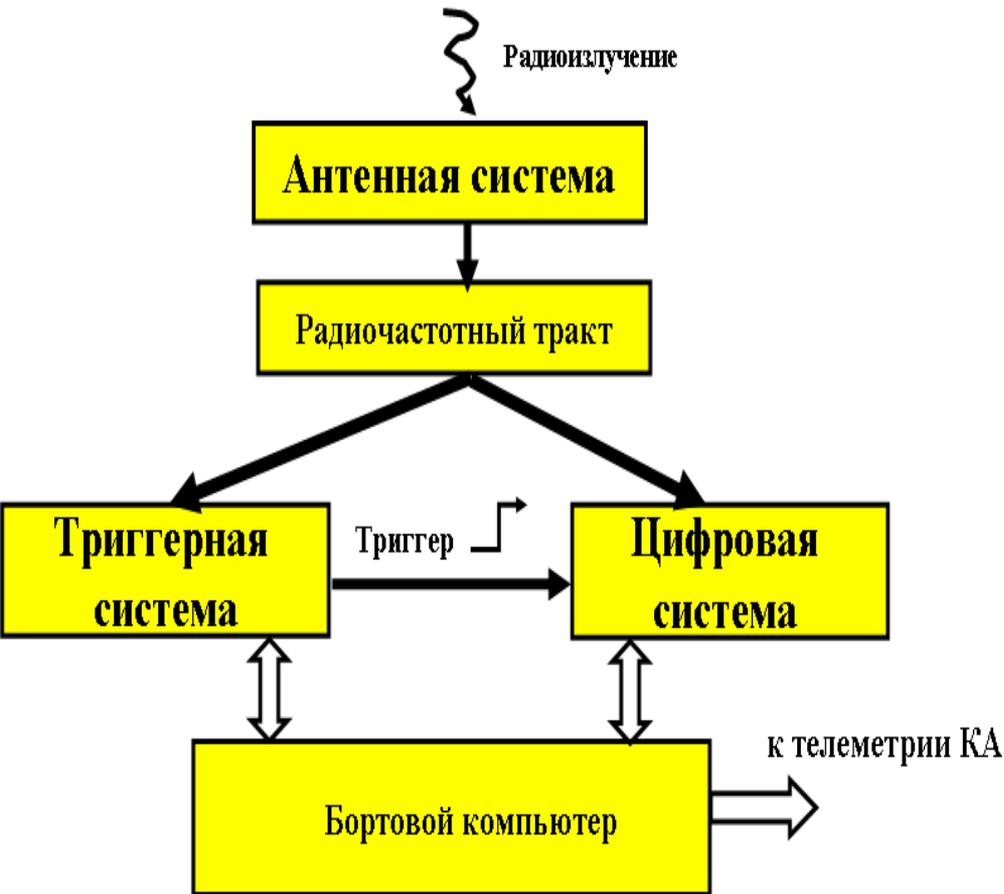
- $R_{\text{moon}} = 1740$  км;
  - Реголит:  
плотность  $\rho \approx 1.7$  г / см<sup>3</sup>
  - глубина 10÷20 м,
  - диэлектрическая постоянная  $\epsilon \approx 3$
  - затухание  $\Lambda \sim 20$  м / f (ГГц);
  - эффективный объем  $V^{\text{eff}} \sim 2 \cdot 10^5$  (km.w.e.)<sup>3</sup>;
  - средняя температура поверхности:  
от 107 С до -153 С
-

# Концепция эксперимента ЛОРД

---

- В процессе реализации программы НИР был проделан значительный объем работ, связанных с теоретическими расчетами, математическим моделированием и конструированием прототипов регистрирующей аппаратуры.
  - Были предложены **варианты аппаратуры** для эксперимента ЛОРД, которые могут быть вписаны в рамки космических платформ, проектируемых НПО им. Лавочкина.
  - **Как показал детальный анализ, эксперимент «ЛОРД» может сочетать в себе относительную простоту конструкции детектирующей системы с высоким научным потенциалом, делающим этот эксперимент вполне конкурентоспособным по сравнению с другими экспериментами и проектами в данной области.**
-

# Структурная схема радиодетектора ЛОРД



- **Антенная система** (с малошумящими антенными усилителями) предназначена для приема радиоизлучения, предварительного усиления и передачи радиосигналов по кабелям в систему регистрации.
- Радиочастотный тракт осуществляет фильтрацию и программно управляемое усиление сигналов для последующей оцифровки (дискретизации и квантования).
- Триггерная система предназначена для обнаружения выполнения заданного условия отбора (превышения сигналов над порогами, совпадение во временном окне и т.д.) и формирования триггерного сигнала.
- Цифровая система предназначена для преобразования аналоговых сигналов в непрерывный поток цифровых данных для записи в конвейерную память и передачи их в память бортового компьютера.
- Бортовой компьютер реализует алгоритмы управления радиодетектором, анализирует уровень шумов и устанавливает пороги детектирования, обеспечивает сбор цифровых данных и их передачу по каналу телеметрии КА.

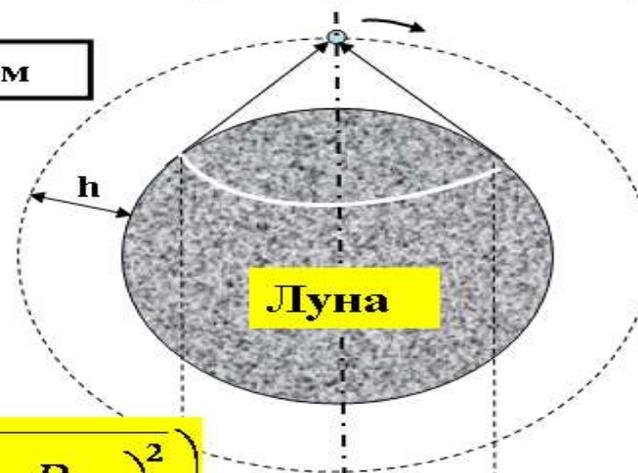
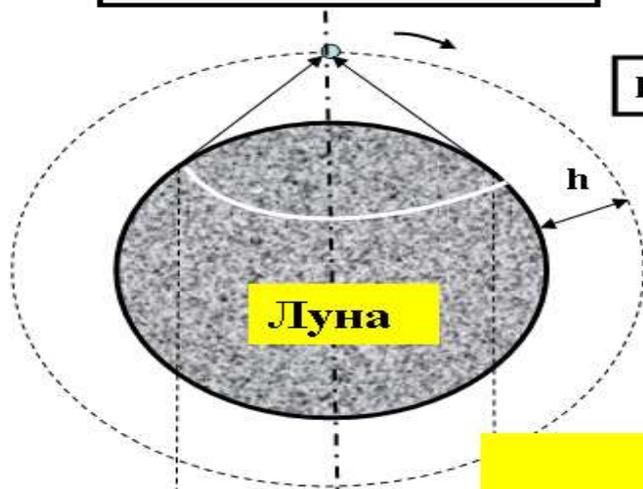
# Антенная система

## ВАРИАНТЫ АНТЕННЫХ СИСТЕМ РАДИОДЕТЕКТОРА

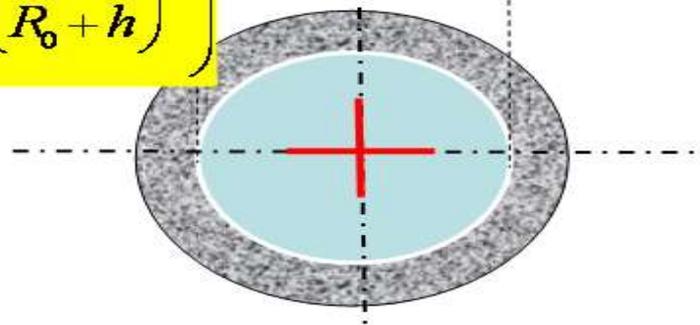
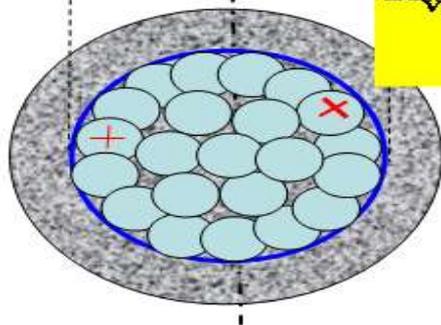
МНОГОЛУЧЕВЫЕ

ОДНОЛУЧЕВЫЕ

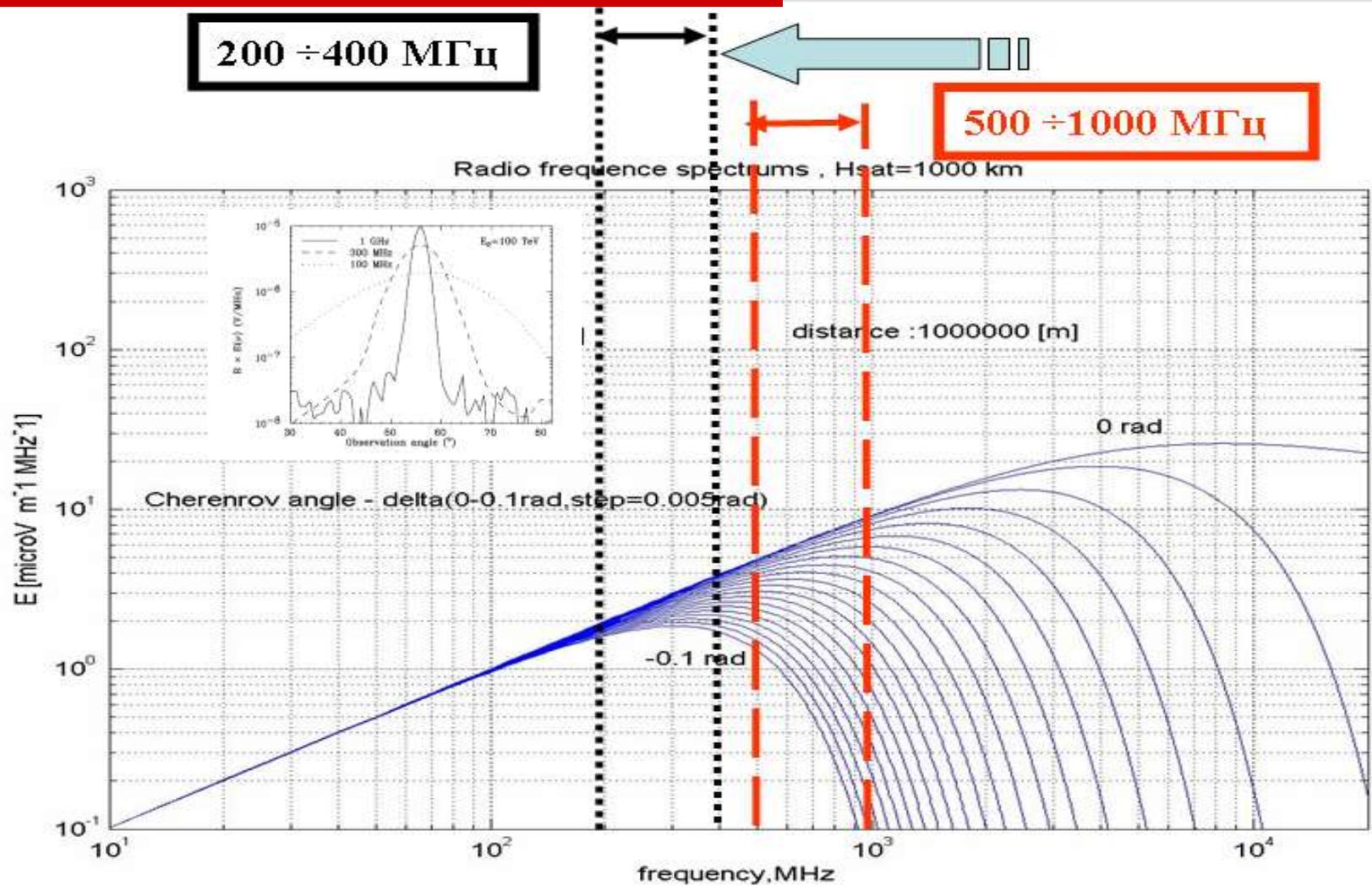
$h=100 \div 10000$  км



$$\Omega_{\text{view}} = 2\pi \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{R_0}{R_0 + h} \right)^2} \right)$$



# Частотный диапазон регистрации



# МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫ

---

- Частотный интервал вблизи максимума спектра излучения
  - Высокая чувствительность – низкий порог – перекрытие с данными наземных измерений
  - Максимальная апертура для получения высокой статистики
-

# МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫ

---

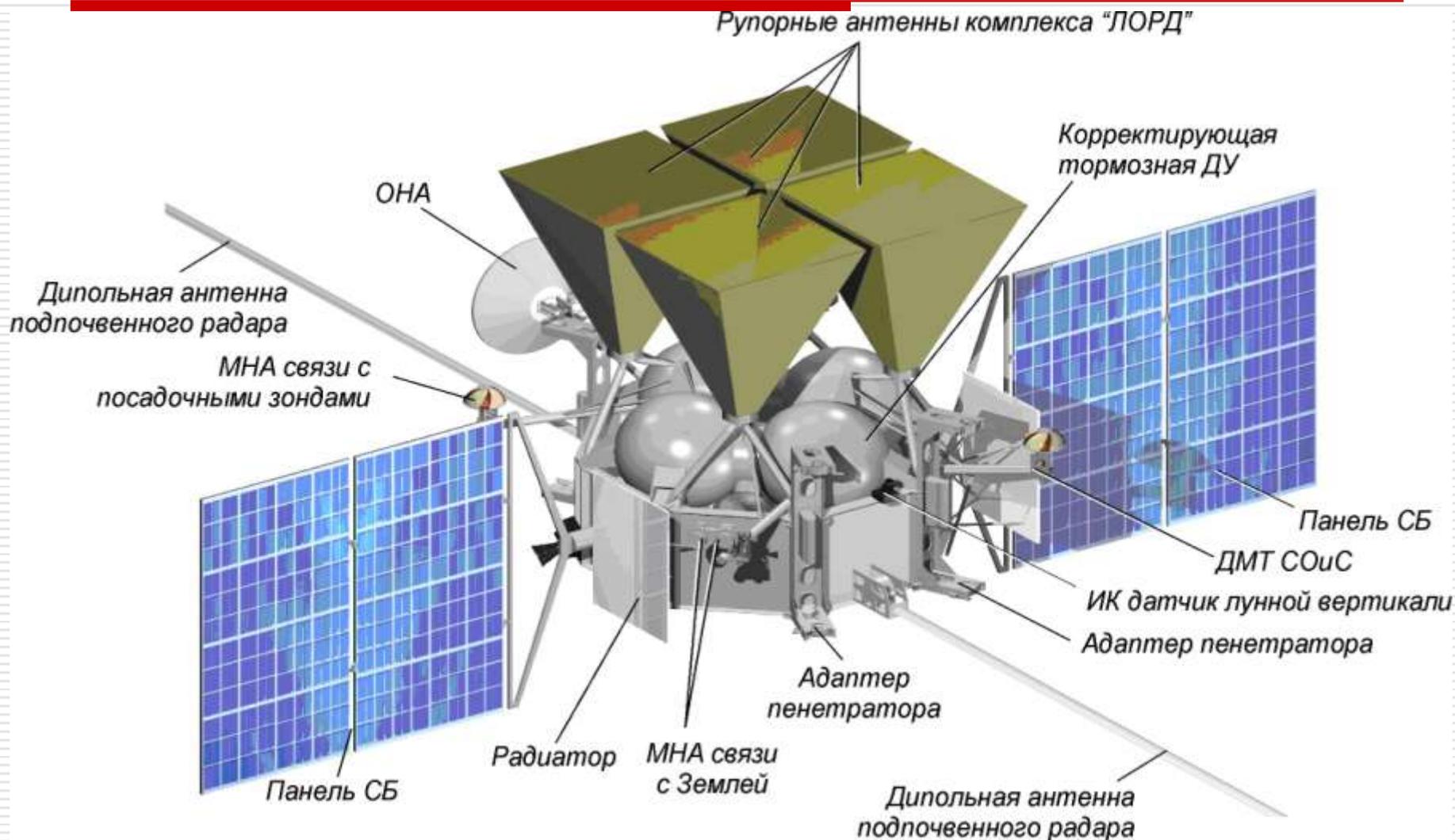
- **В первоначальный период наших исследований мы в основном интересовались многолучевыми антенными системами. Затем постепенно пришло понимание того, что такие конструкции не могут быть реализованы в ближайшее время по целому ряду причин:**
  - -из-за отсутствия технологий их изготовления в России;
  - -большого веса и размеров;
  - -большого количества облучателей и сложности механизмов развертывания
  - -высокой стоимости их изготовления (Пример: надувной разворачиваемый параболоид диаметром 14 м. Пока осуществлен лишь один запуск, который обошелся в 20 млн. долларов. Ни одной реально работающей антенны пока не сделано).
-

# Новая концепция эксперимента ЛОРД

---

- Переход в область более низких частот – «расширение» черенковского конуса, существенное увеличение апертуры
  - Учет отраженного сигнала – увеличение амплитуды сигнала и статистики
  - Новые экспериментальные данные
-

# Радиодетектор ЛОРД на борту КА



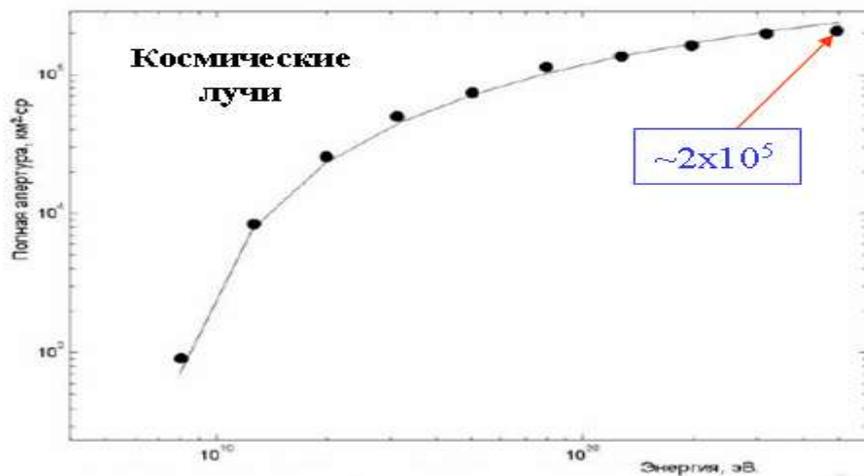
# Основные выводы

---

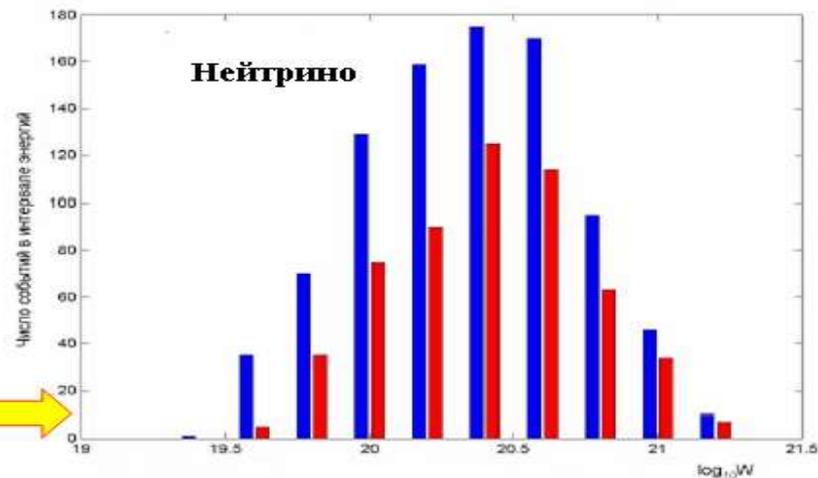
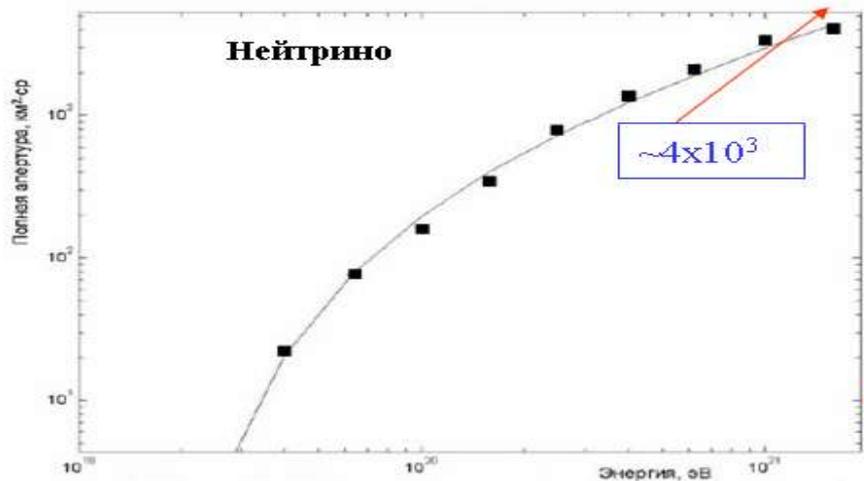
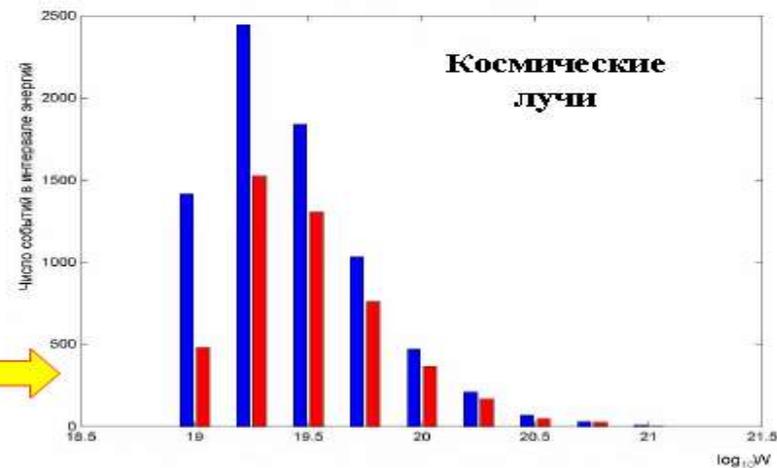
- Количество зарегистрированных событий растет с расширением полосы частот:  $\Delta f = 200$  МГц – 600 событий; 100 МГц – 450 событий; 50 МГц – от 90 до 300 в зависимости от нижней границы диапазона.
  - Количество зарегистрированных отраженных сигналов больше, чем прямых, как минимум вдвое (геометрия прохождения для отраженного сигнала лучше, чем для прямого).
  - При одинаковой полосе регистрации равной 50 МГц, число регистрируемых событий увеличивается при снижении нижней границы диапазона от 350 МГц к 200 МГц почти в 3 раза (за счет расширения черенковского конуса при понижении частоты).
-

# Потенциал эксперимента ЛОРД

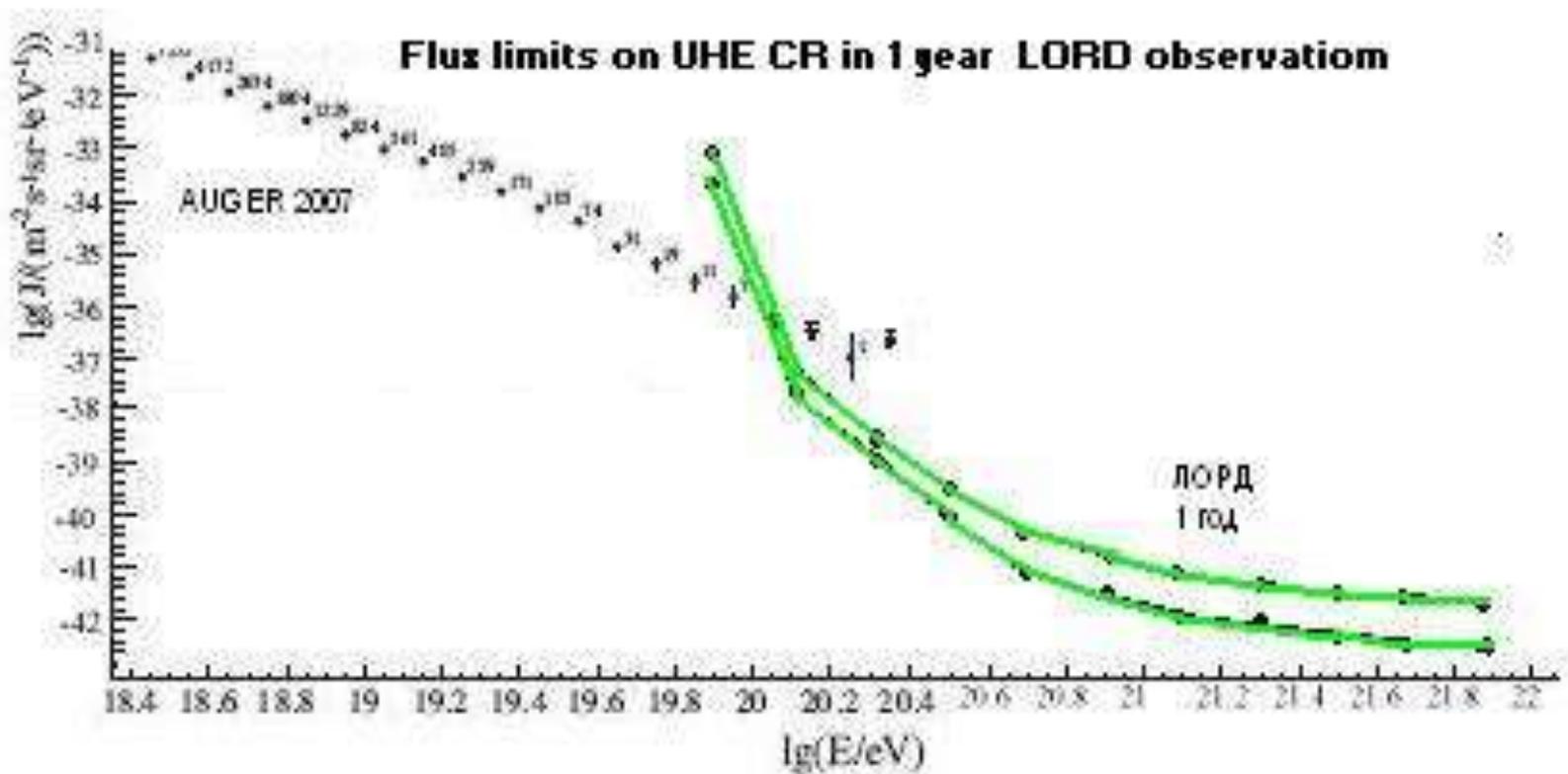
Полная апертура



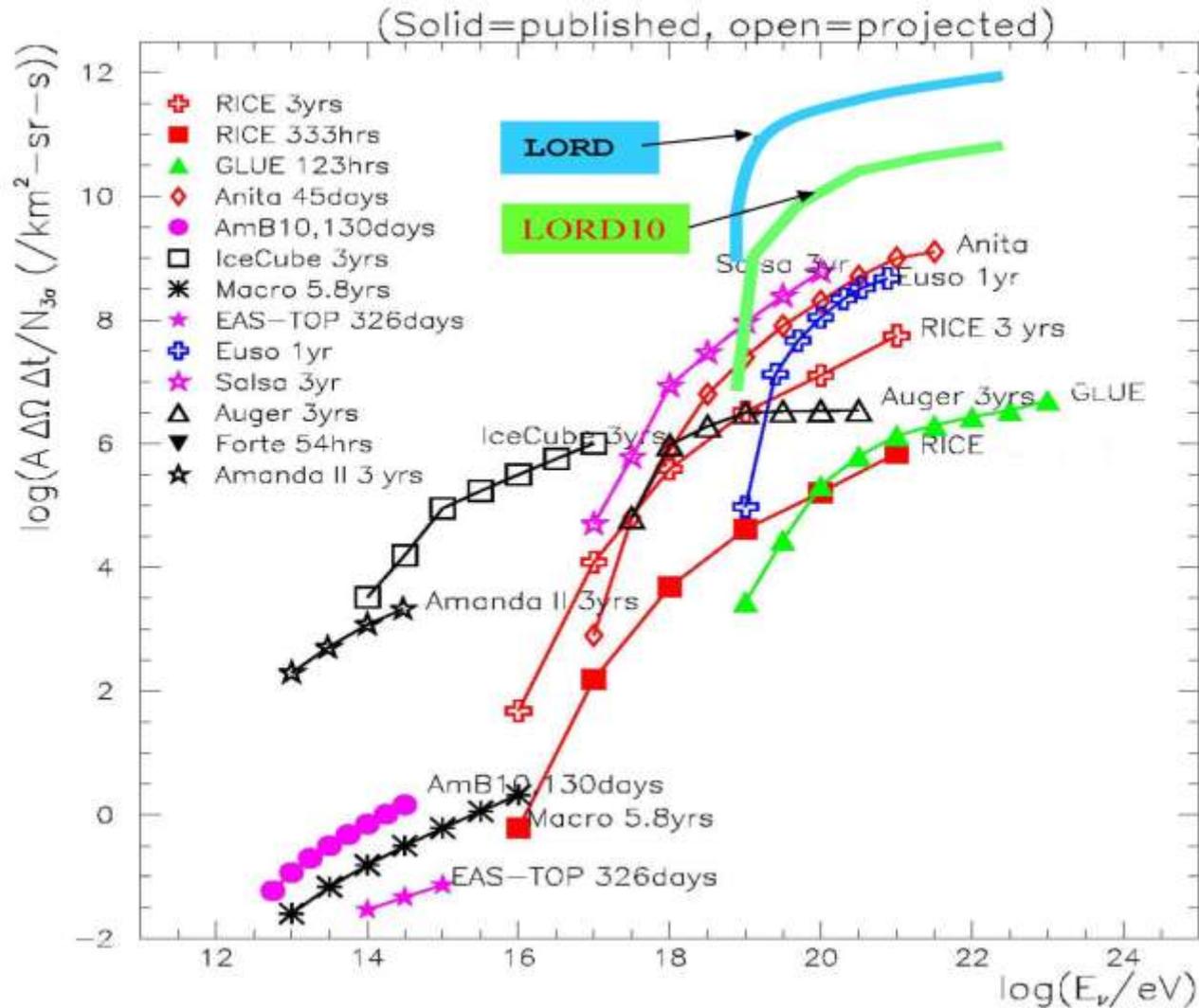
Дифференциальный счет событий



# Чувствительность к потоку КЛ



# Сравнение с регистрацией нейтринных потоков в других экспериментах





## УНИФИЦИРОВАННАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ



ФГУП «НПО ИМ. С.А.ЛАВОЧКИНА»

### УНИФИЦИРОВАННАЯ ПЛАТФОРМА



Конструкция платформы выполнена без гермоотсека. В состав бортовых систем унифицированной платформы входят все необходимые системы, обеспечивающие работу и контроль служебной и целевой аппаратуры платформы и МКА в целом:

- энергопитание;
- радиолиния;
- телеметрия;
- двигательная установка;
- управление движением и навигацией;
- терморегулирование.

Унифицированная платформа с размещенными на ней гидразиновой ДУ коррекции орбиты и термостабилизированной сотовой панелью со служебной аппаратурой является конструктивной основой МКА

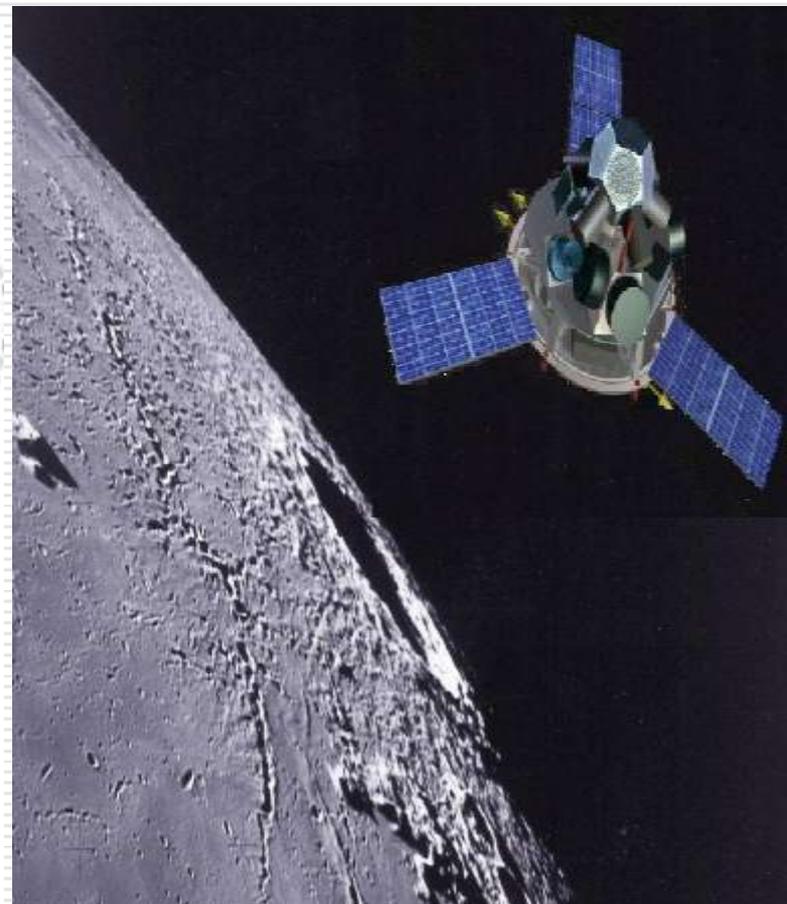
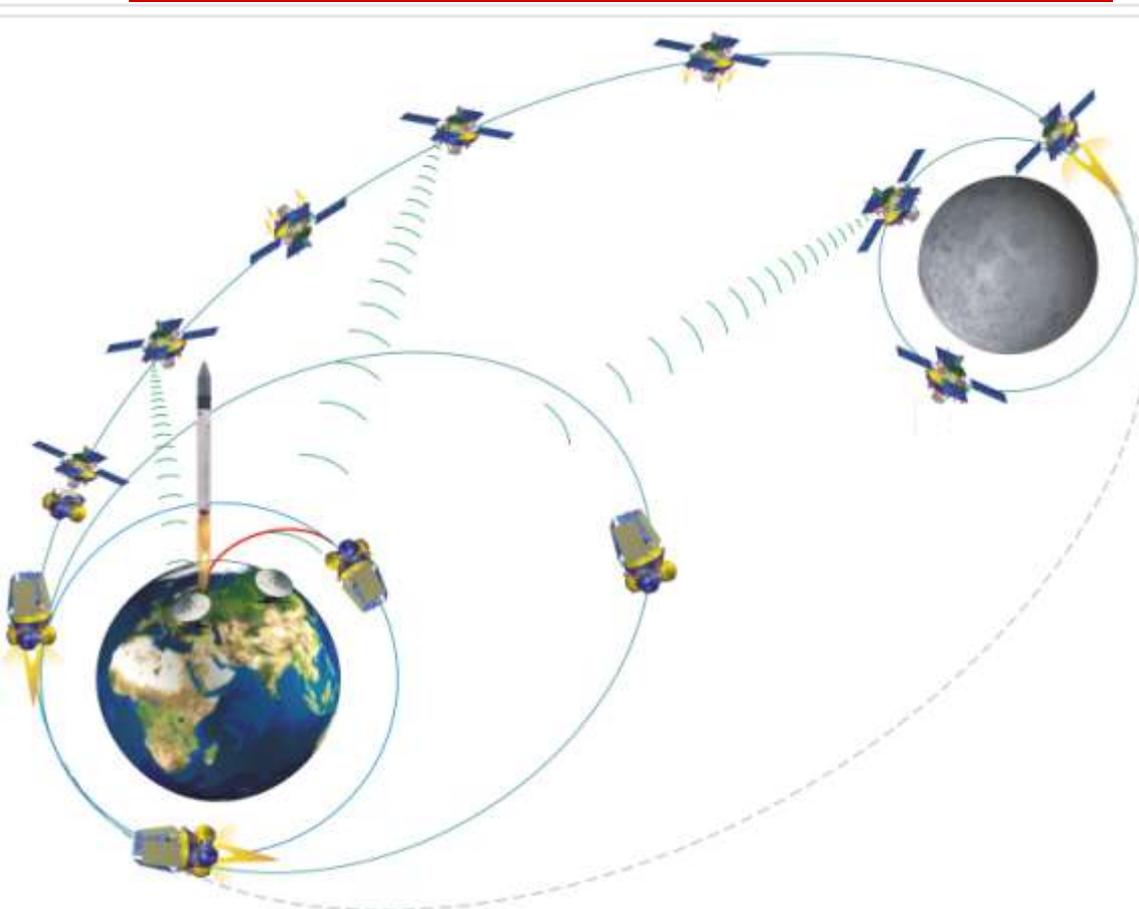
Конструкция платформы позволяет устанавливать различные виды панелей солнечных батарей.

Масса платформы 120 кг

Масса полезной нагрузки не менее 40 кг (в зависимости от целевой задачи и характеристик рабочей орбиты)

# Выведение на орбиту Луны

---



---

2012 год !