

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МИФИ

Усовершенствование метода поиска антипротонов в космических лучах с использованием лунной тени



Челидзе К.С.
KSChelidze@mephi.ru

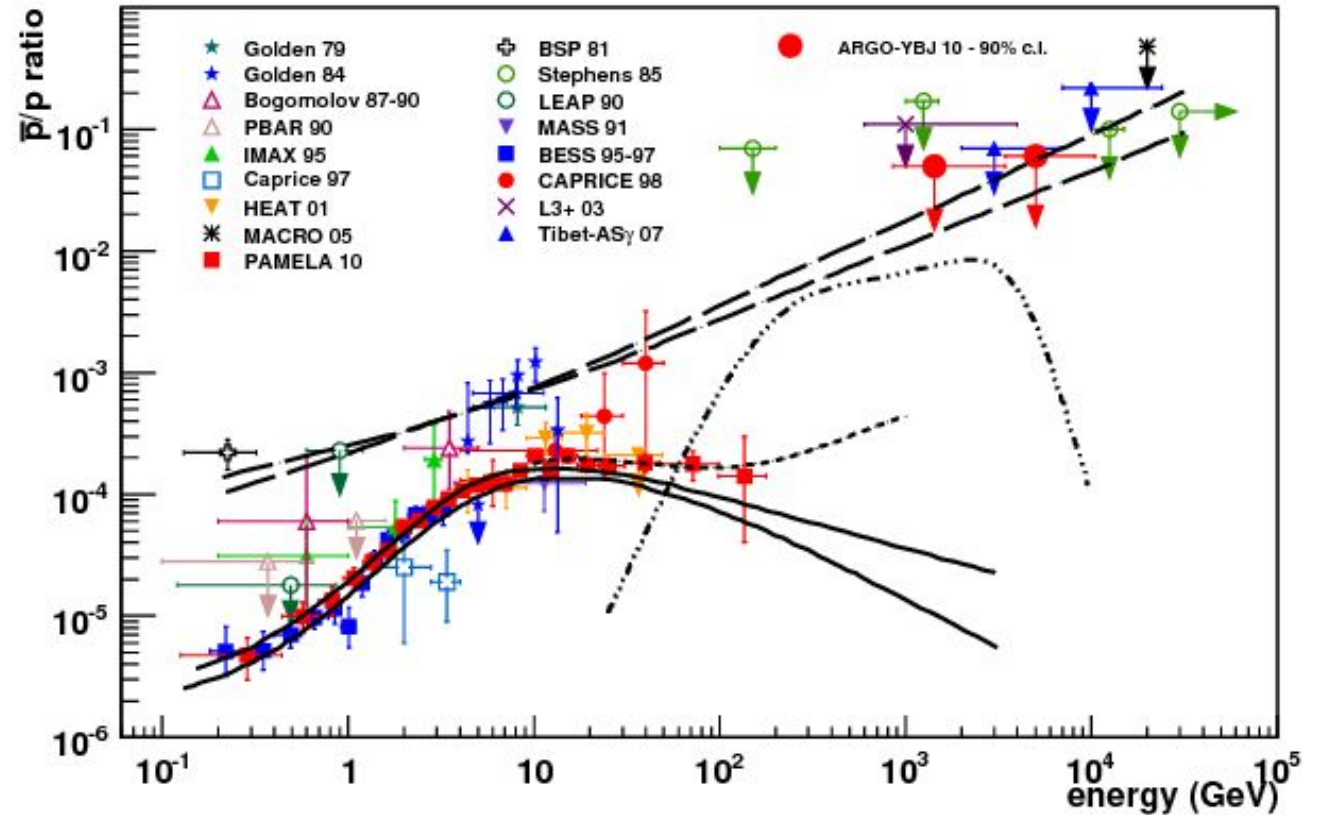
Цель и задачи работы

Цель

- Исследование методики тени Луны для её оптимизации

Мотивация

- Энергетическая зависимость отношения антипротонов к протонам в галактических космических лучах несёт информацию о происхождении антипротонов.
- Прямые измерения при высоких энергиях не обладают достаточной статистической точностью для измерения характеристик галактических антипротонов.



- Продвинуться в область высоких энергий можно с помощью ШАЛ, для разделения частиц и античастиц использовать метод тени Луны.

Тень Луны в космических лучах

Истоки: Джордж В. Кларк 1957 в введении своей статьи, посвящённой вычислению направления первичных частиц ШАЛ, предположил, что в подобных потоках должны быть заметны "тени" Луны и Солнца, из-за поглощения ими частиц космических лучей.

Видимый размер Луны: $29'40''$ (0.49°) - $33'45''$ (0.56°)

Видимый размер Солнца: $31'59''$ (0.53°)

Результат: тень Луны, после предположения в 1957 году, использовалась для калибровки телескопов

Метод тени Луны позволяет разделять частицы и античастицы

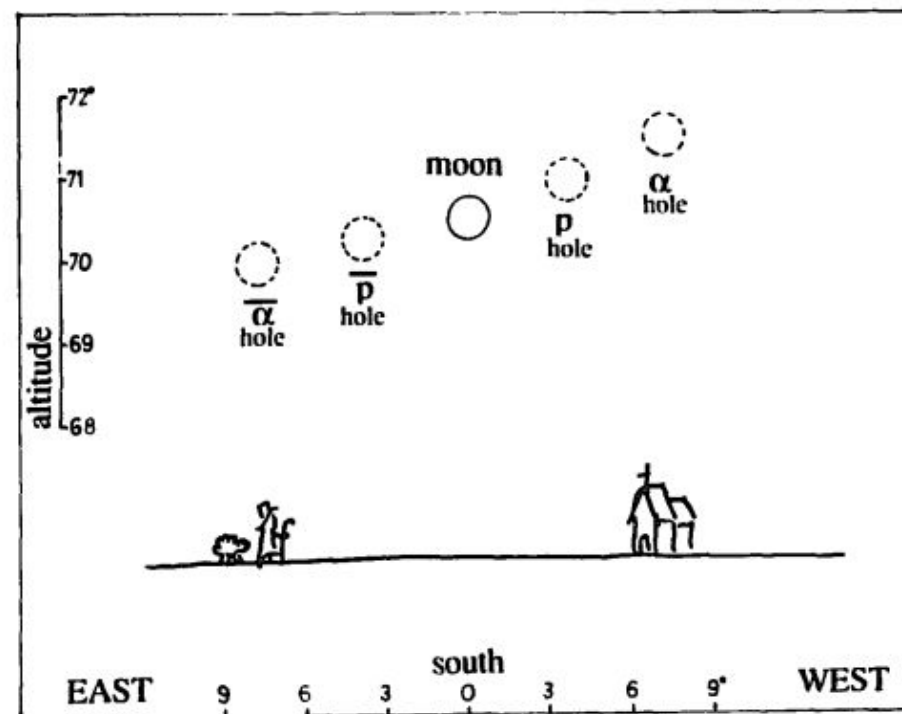


Схема неба заполненного космическими лучами при энергии 1 ТэВ, без учёта погрешностей.

Наблюдения CASA

Установка: CASA

Тип детектора: 1089 сцинтилляционных детекторов, расположенных по квадратной сетке, охватывающими общую площадь 230 000 квадратных метров.

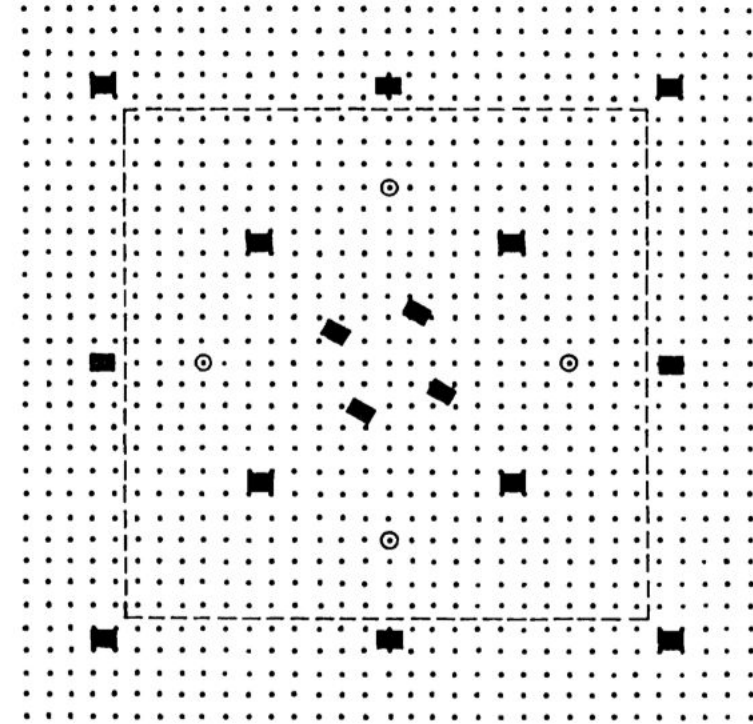
Разрешение: 0.7° , улучшаясь до 0.25° при больших энергиях

Период наблюдения: март 1990 – апрель 1991

Результат: наблюдение влияния магнитного поля Солнца

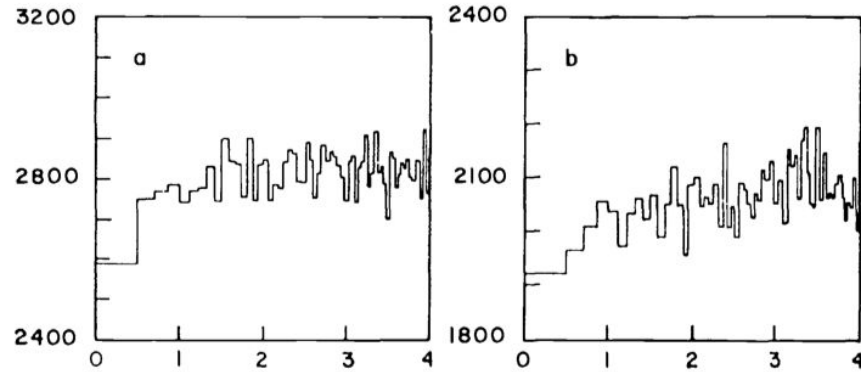
Это первое прямое наблюдение формы тени и Луны, и Солнца

	Number of events in first bin	Number of background events	Significance of first bin deficit
Moon	195	244.0	3.1σ
Sun	184	213.8	2.0σ

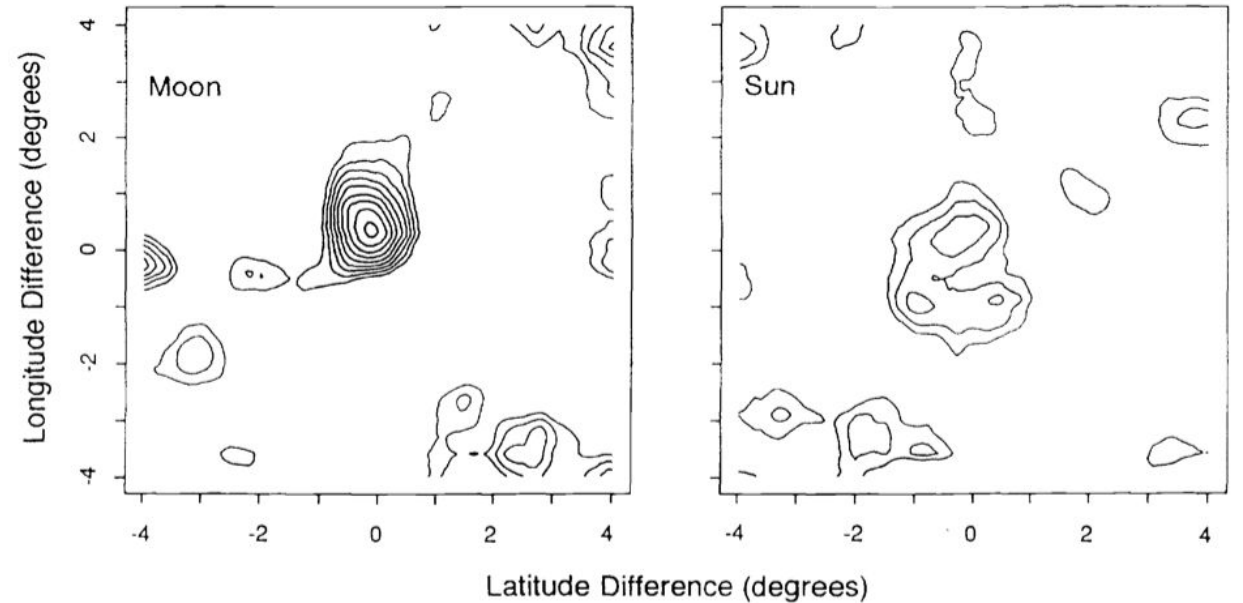


Схематичное расположение установок CASA-MIA. Каждая точка представляет собой сцинтилляционный счётчик, круг - Черенковский детектор, закрашенные области - подземные мюонные сцинтилляционные детекторы

Наблюдения CASA



Количество событий в постоянном плоском угле. По оси абсцисс - угол между осью ШАЛ и наблюдаемом объектом. а и б для Луны и Солнца соответственно.



Контурное распределение дефицита космических лучей от Луны(слева) и Солнца(справа). Ось абсцисс - разница широт в градусах между осью ливня и положением объекта, ось ординат - разница долгот в градусах между осью ливня и положением объекта.

Последние результаты, полученные на эту тему, HAWC

Установка: HAWC

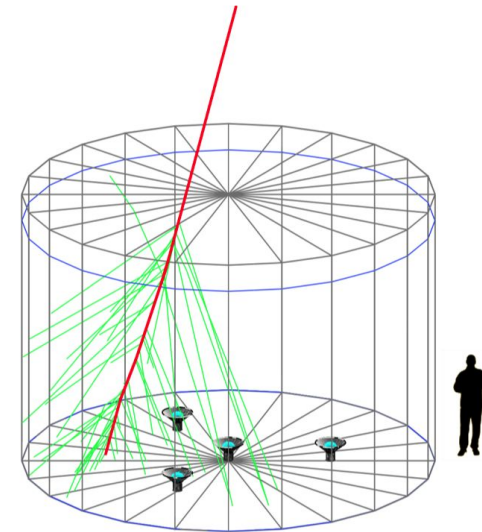
Тип детектора: 300 черенковских детекторов, охватывающих площадь 22 000 м²

Разрешение: угловое разрешение $< 0,5^\circ$ для $E > 1$ ТэВ и $0,25^\circ$ для $E > 10$ ТэВ. HAWC чувствителен к ливням, создаваемым первичными космическими лучами с энергиями от 100 ГэВ до 50 ТэВ

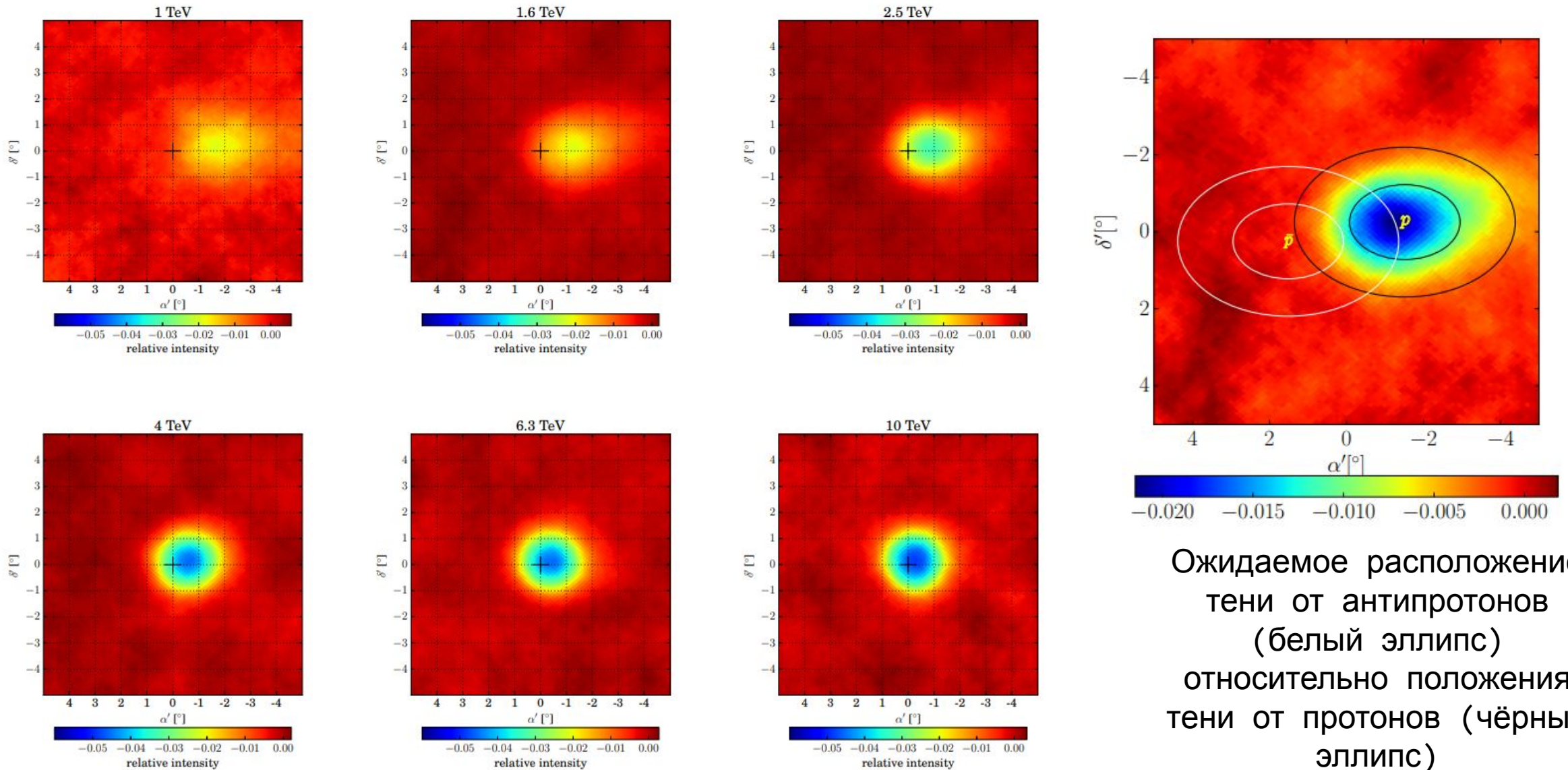
Период наблюдения: 33 месяца наблюдений

Результат: самые жесткие доступные ограничения $\sim 1\%$ доли антипротонов с энергией от 1 до 10 ТэВ.

Наблюдение зависимости смещения тени Луны разных энергиях



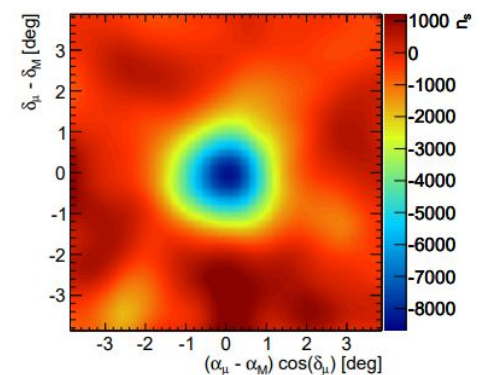
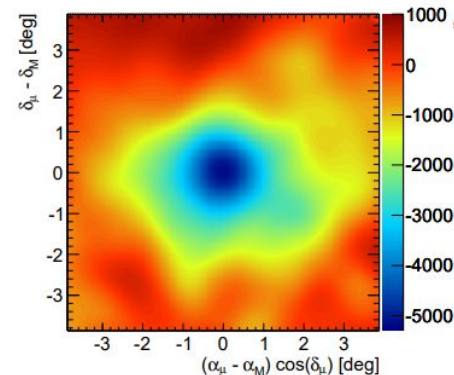
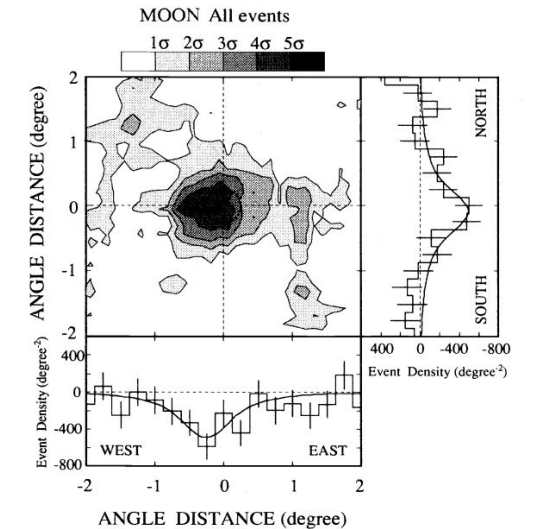
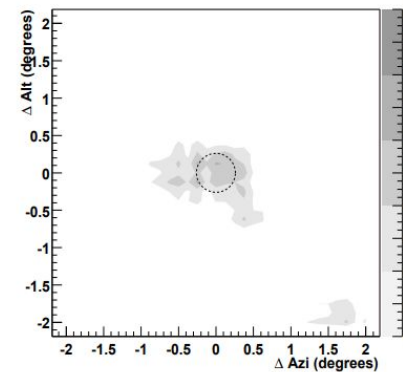
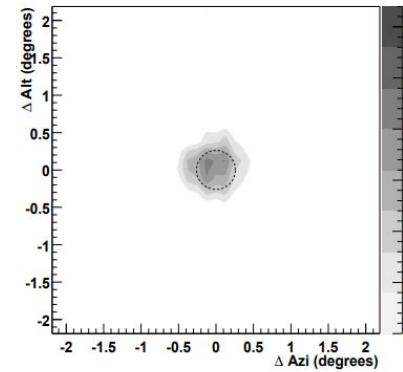
Последние результаты, полученные на эту тему, HAWC



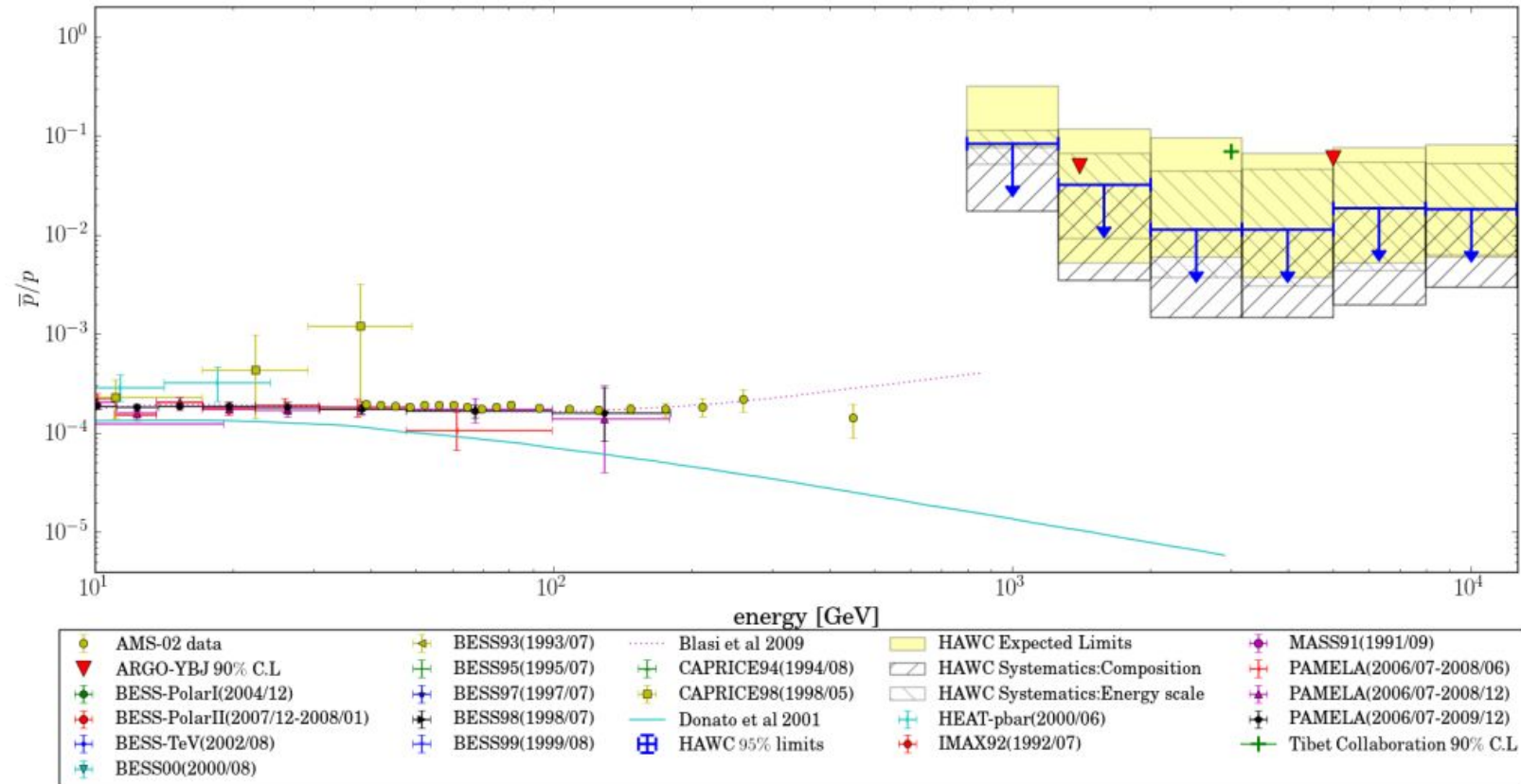
Ожидаемое расположение
тени от антипротонов
(белый эллипс)
относительно положения
тени от протонов (чёрный
эллипс)

Перечень экспериментов, использовавших метод тени Луны

Установка	Год	Угловое разрешение
EAS 1990	1990	0.75°
Tibet air-shower	1993	0.87° (~7 ТэВ) 0.54° (~35 ТэВ)
Chicago Air Shower Array	1994	0.49°
L3+C muon spectrometer at CERN	2004	0.28°
Tibet-III	2007	0.92°
ARGO-YBJ	2012	0.31°
HAWC	2018	0.5° (>1 ТэВ) 0.25° (>10 ТэВ)



Верхний предел на отношение потоков антипротонов к протонам в КЛ по данным эксперимента HAWC

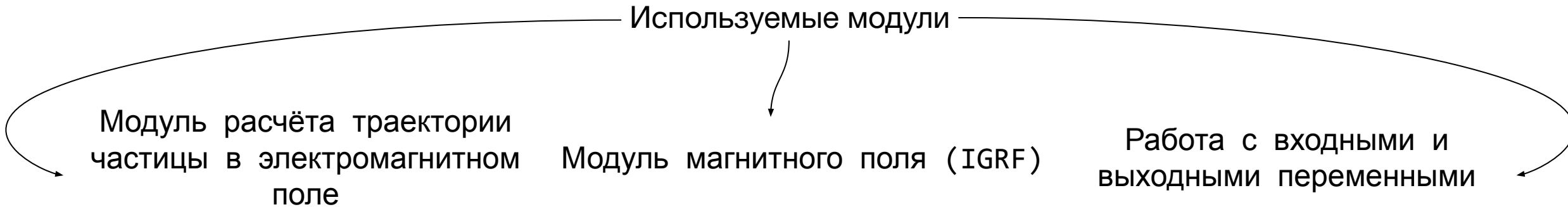


Измерение соотношения \bar{p}/p и его верхние пределы при энергиях порядка ТэВ. Сплошная голубая линия показывает ожидаемое соотношение для вторичной природы антипротонов. Пунктирная линия – первичные антипротоны.

Что необходимо сделать, чтобы понизить этот предел на несколько порядков?

Пакет программ GT 8.0.

Инструментарий состоит из отдельных модулей, каждый из которых отвечает за свой физический процесс или представляет собой экспериментальные данные или модели.



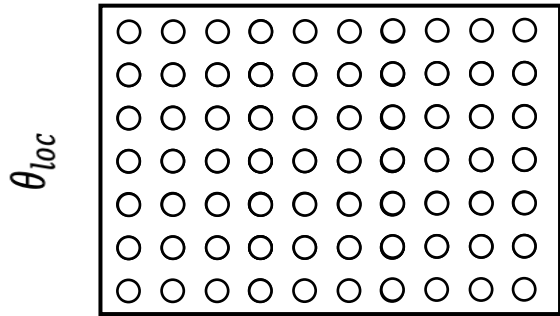
Модель IGRF - это эмпирическая модель, описывающая собственное магнитное поле Земли, которая основана на наблюдательных данных.

Задание начальных условий

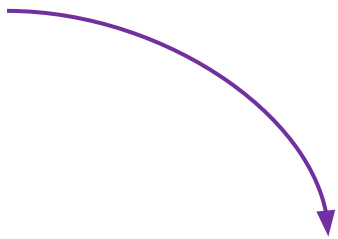
Параметры	Используемые значения
Начальные координаты частицы	Географическая широта и долгота Тибета
Система координат, в которой записаны начальные данные и независимо от них система координат для вывода траектории	GEO: центр находится в центре Земли, оси OX и OY лежат в плоскости экватора, за единицу принят радиус Земли
Компоненты вектора начальной скорости частицы	Вектора внутри конуса $\theta = 45^\circ - 90^\circ$ и $\varphi = 0^\circ - 360^\circ$ в локальной системе координат
Тип частицы	Протон и антипротон
Энергия частицы	100 ГэВ - 5 ТэВ
Модель магнитного поля	IGRF
Условия прерывания расчёта	Достижение частицы орбиты Луны

Схема расчета

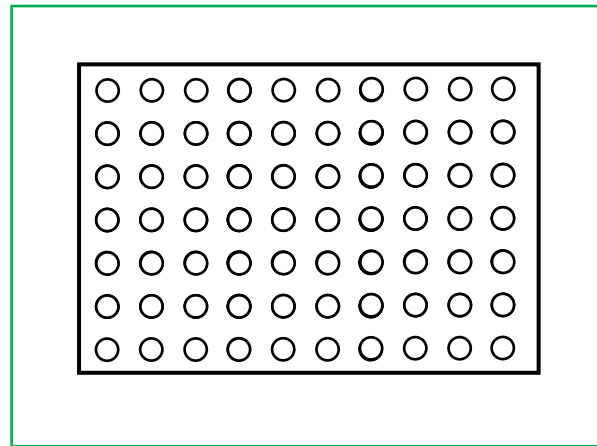
Задание равномерного распределения скоростей по двум углам в локальной системе координат, привязанной к точке запуска частицы и с осью Z перпендикулярной плоскости планеты в данной точке



φ_{loc}



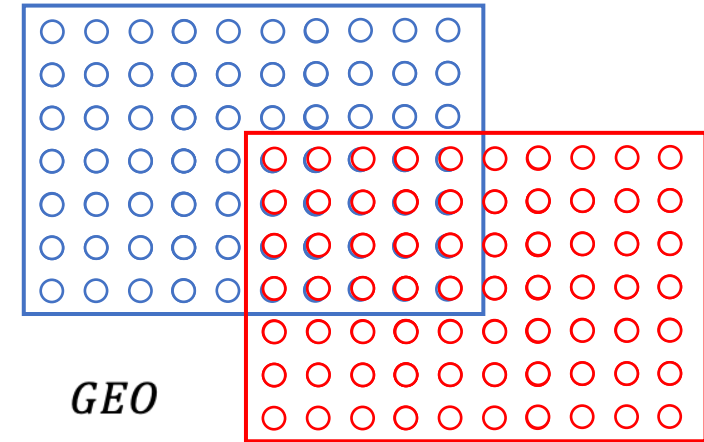
θ_{GEO}



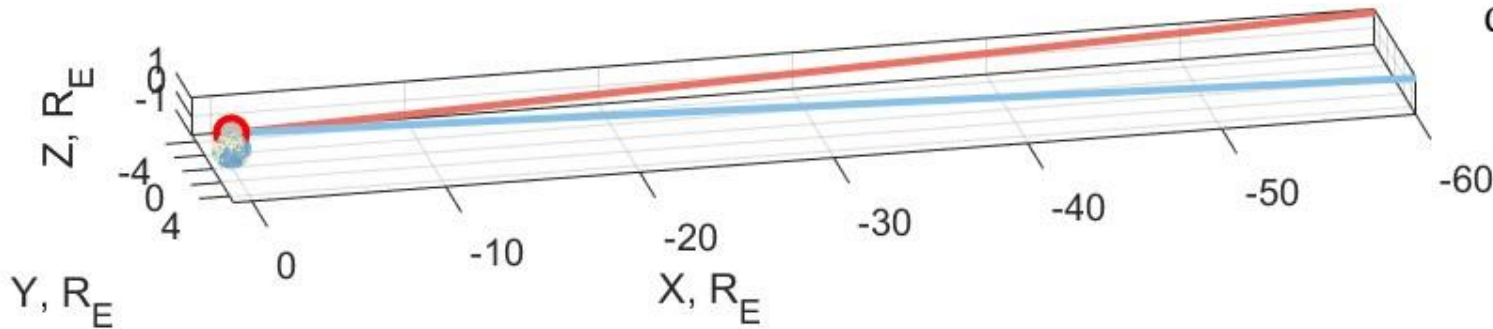
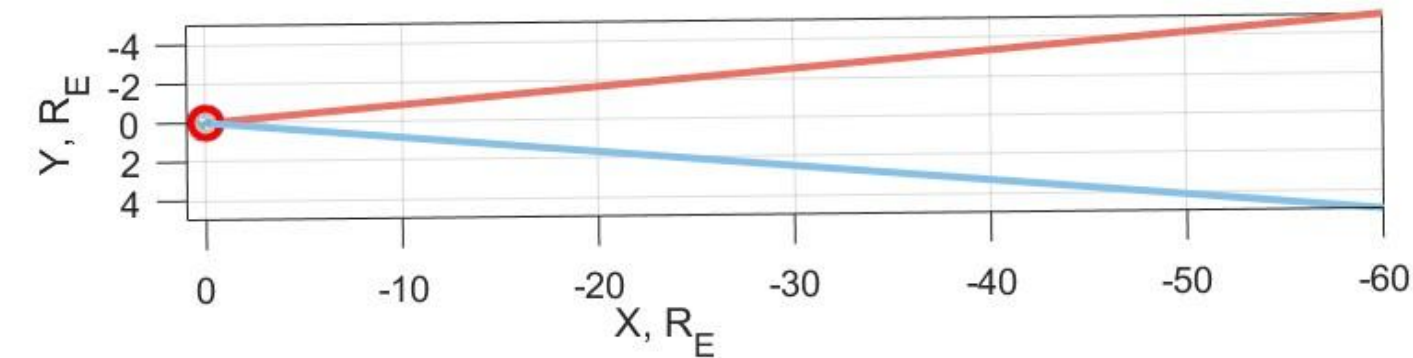
φ_{GEO}

Перевод направлений в GEO

Получение смещения распределений, вызванное влиянием магнитного поля Земли



Восстановление тени Луны с помощью пакета программ GT 8.0.



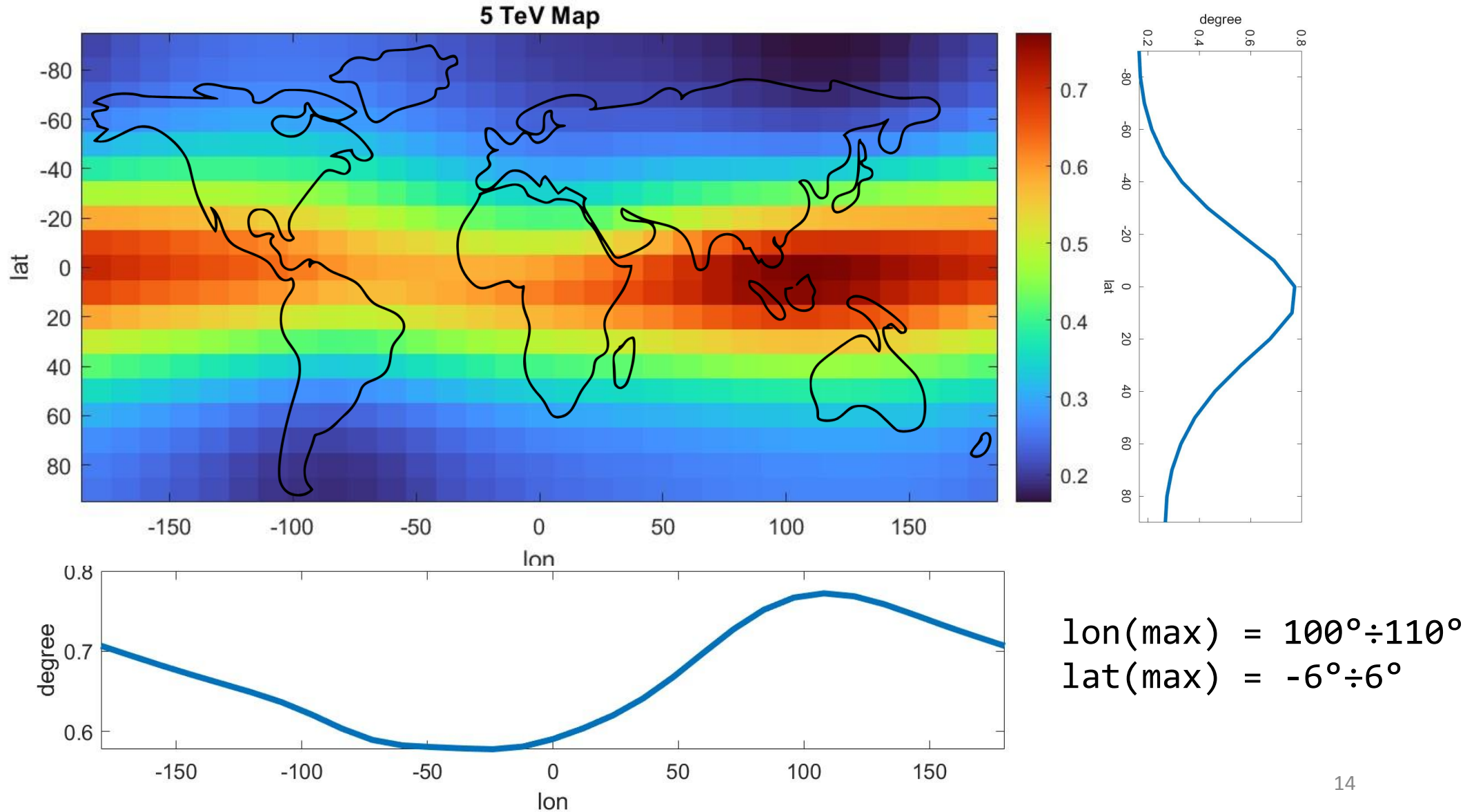
Угол между частицами в плоскости магнитного экватора:

$$\alpha_{\text{теор}} = 2 \arcsin \left(\frac{2ZeB_3}{c\gamma\mu\sqrt{1-1/\gamma^2}} R_3 \right) = 2.82^\circ$$

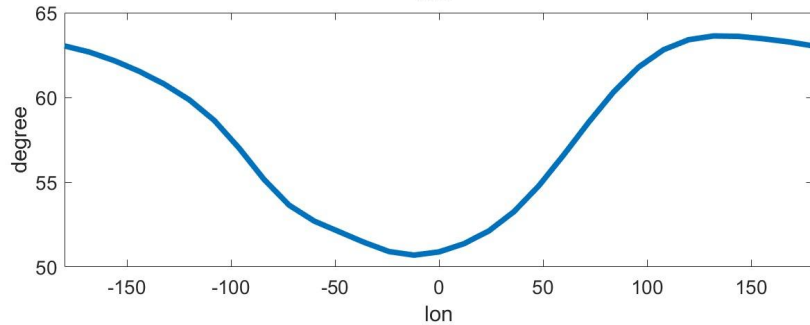
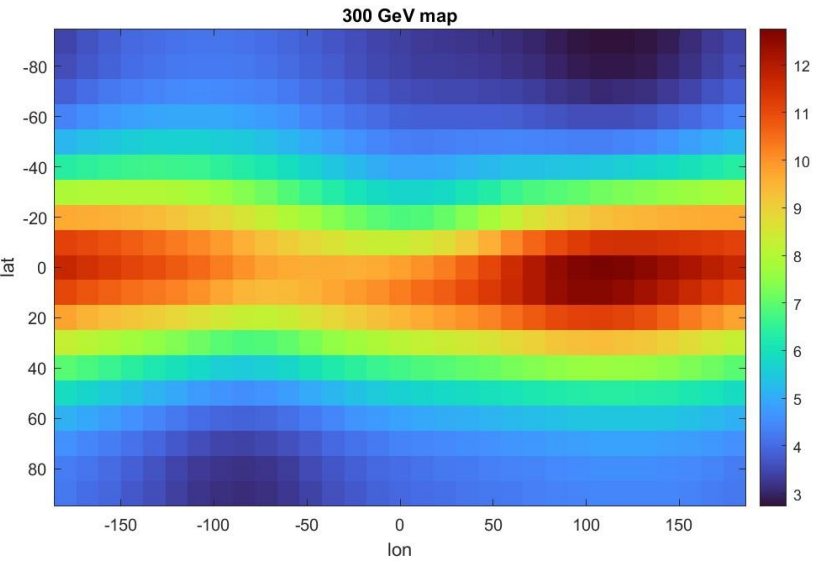
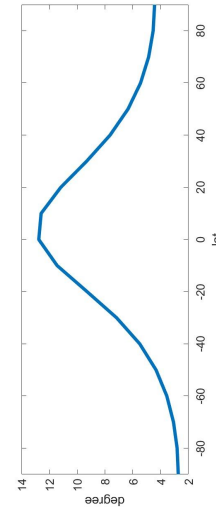
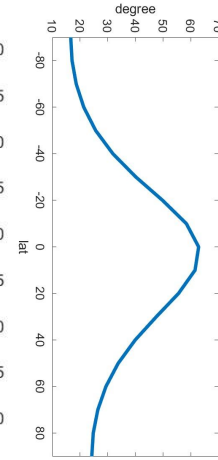
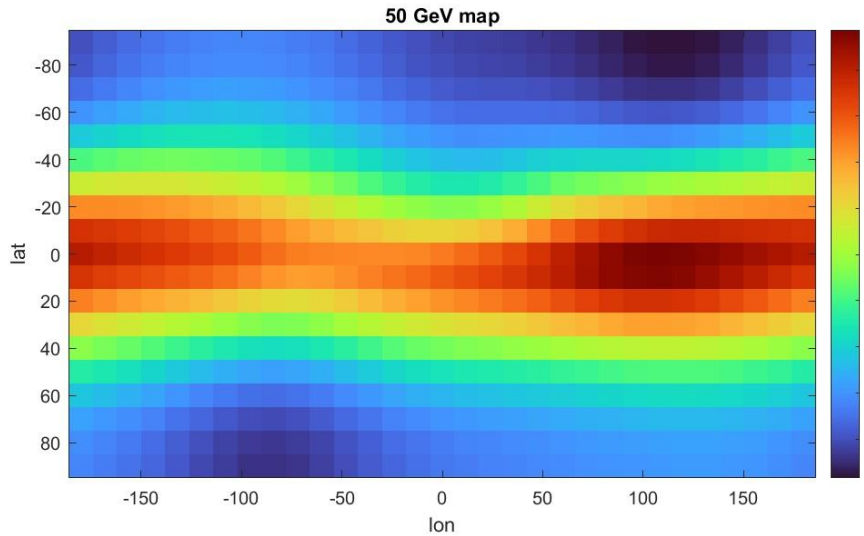
$$\alpha_{\text{мод}} = 2 \arctg \left(\frac{Y}{2X} \right) = 3.82^\circ$$

Траектории для протона (красная) и антипротона (синяя) в направлении Земля - орбита Луны, полученные в результате моделирования с использованием пакета программ GT 8.0.

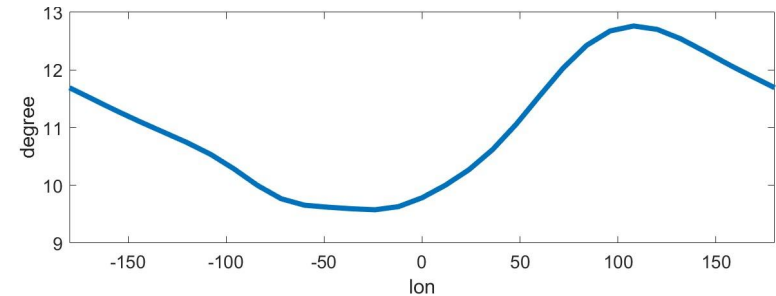
Карта угловых расстояний, построенная в географической системе координат, между протоном и антипротоном. Цветная шкала справа показывает величину расстояния в углах.



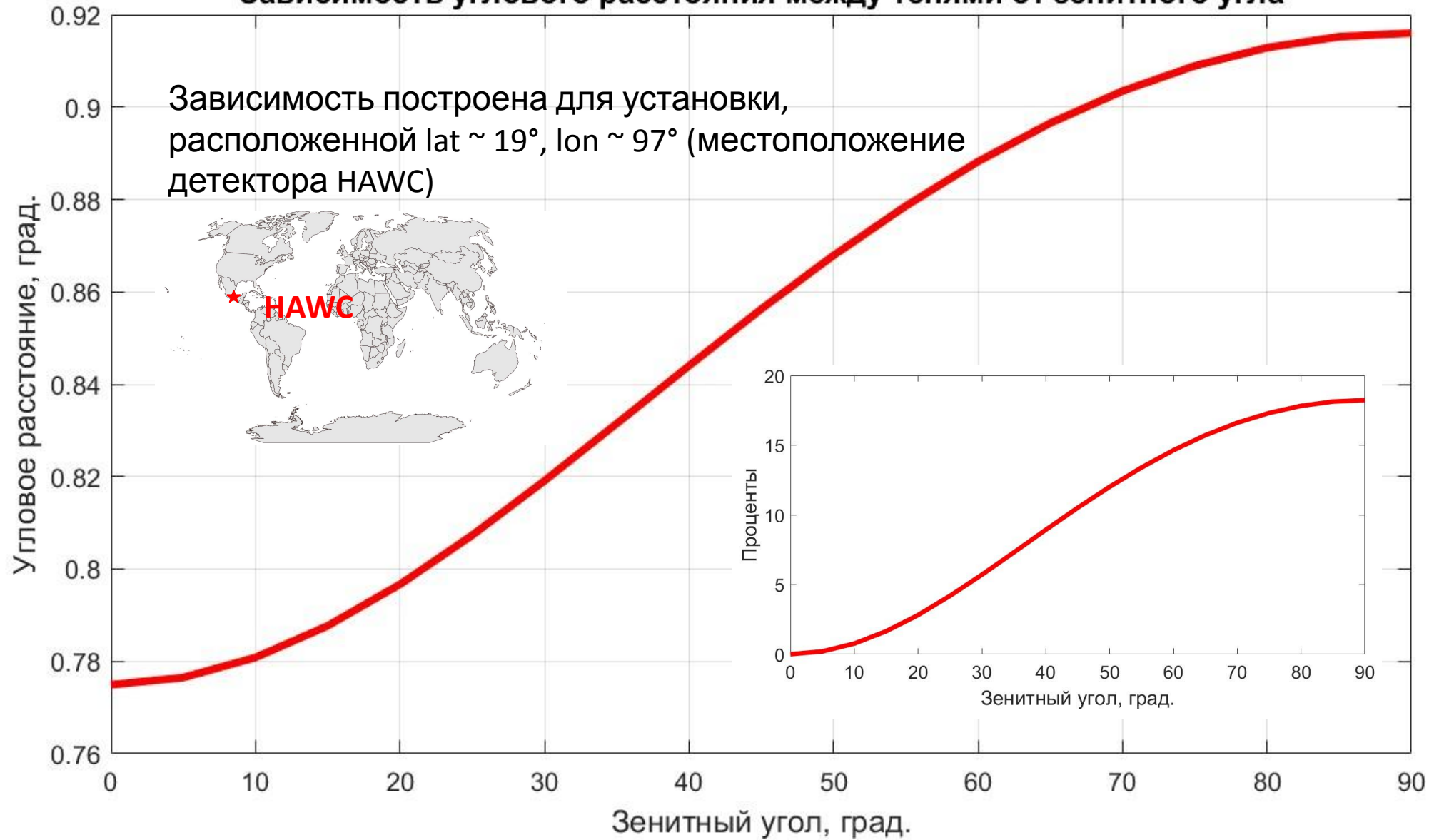
Карты угловых расстояний между протоном и антипротоном, построенные в географической системе координат, моделируемых с поверхности Земли по нормали вверх. Цветная шкала справа показывает величину расстояния в углах.



lon(max) = $100^{\circ} \div 110^{\circ}$
 lat(max) = $-6^{\circ} \div 6^{\circ}$



Зависимость углового расстояния между тенями от зенитного угла



Зависимость углового расстояния между тенями от времени



Заключение

В работе реализовано моделирование траекторий заряженных частиц в магнитосфере Земли с помощью пакета программ GetTrajectory.

По результатам моделирования построены:

- распределение углового расстояния между центрами теней Луны от протонов и антипротонов для разного расположения регистрирующей установки;
- зависимость углового расстояния от зенитного угла, под которым расположена Луна;
- временная зависимость углового расстояния.

Результаты позволяют определить наилучшее географическое расположение установки, которая наблюдала бы тень Луны. Получены указания под какими зенитными углами наиболее эффективно наблюдать тень Луны. Временная динамика эффекта незначительна; установки, созданные в ближайшие 30-50 лет будут работать в тех же геомагнитных условиях.