



ИНСТИТУТ КОСМОФИЗИКИ НИЯУ МИФИ



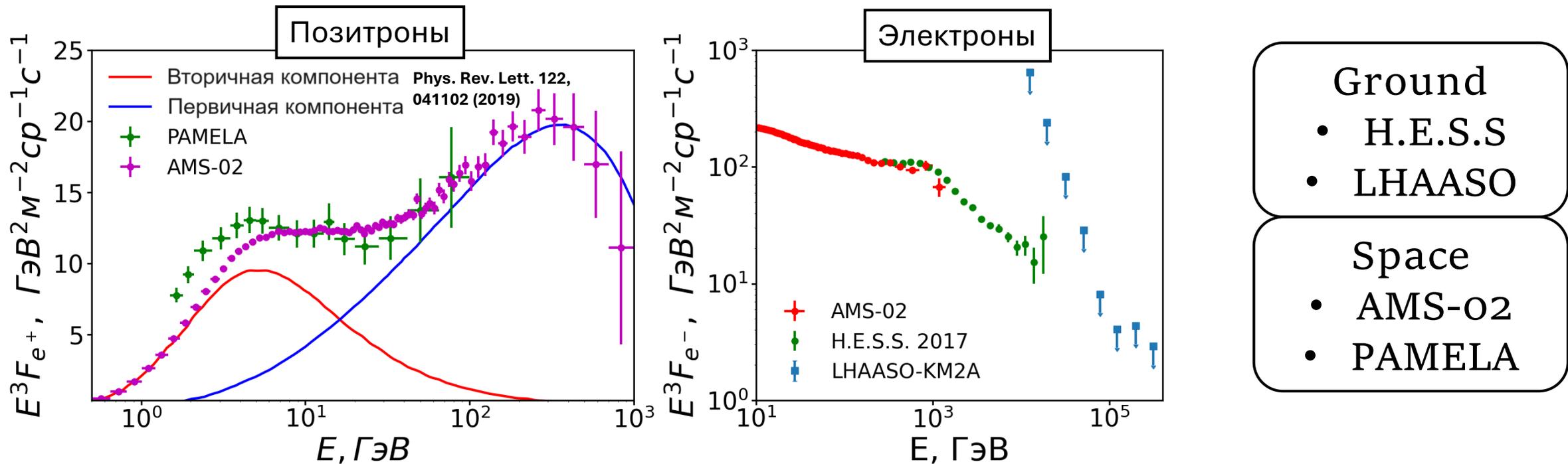
Метод идентификации ТэВных электронов и позитронов в эксперименте СОНЯ

А.П. Стужин, В.В. Михайлов

ВККЛ-2024, Москва

Актуальность

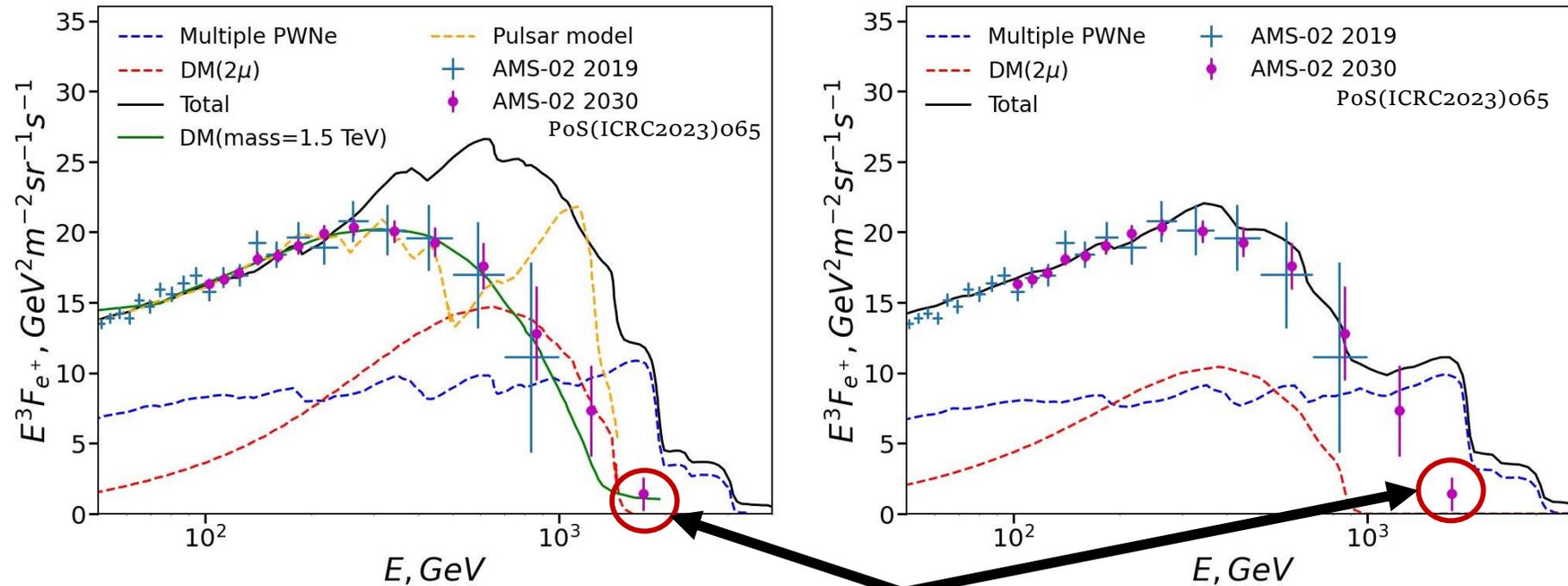
Актуальной проблемой астрофизики высоких энергий является измерение потоков электронов и позитронов ГКЛ в области энергий 1-20 ТэВ и выше.



Потоки позитронов (а) и электронов (б) по результатам наземных и космических экспериментов

Потенциальные источники позитронов

Данные эксперимента AMS-02 в сравнении с различными моделями первичных источников позитронов



DM vs Astrophys
PoS(ICRC2023)065

Гипотезы:

- Остатки сверхновых
- Пульсары/PWNe
- Аннигиляция или распад DM

- Ilias Cholis, Thressay Hoover // Phys. Rev. D. March 2023. 107, №6
- Yu-Chen Ding, Nan Li // Phys. Rev. D. 2021. 103. №11
- Benedikt Schroer, Carmelo Evoli, and Pasquale Blasi // Phys. Rev. D 107, 123020 – June 2023
- Haoxiang. Zhan. // arXiv:2305.01992 [astro-ph.HE] 2023

Схема регистрации

Prilutskiy O. ZhETF. 1972. Vol. 16, no. 8. P. 452–454.

Синхротронные фотоны
испускаются в узком конусе с
углом раствора

$$\theta \sim \frac{mc^2}{E} \approx \frac{0.5 \text{ MeV}}{1 \text{ TeV}} \sim 10^{-7} \div 10^{-8} \ll 1$$

Линейное
расположение
фотонов

Синхротронные фотоны – прямая линия
Фон – случайное расположение

- ❑ Можно отличить электроны и позитроны от других частиц
- ❑ Используя координату e^- или e^+ в ECAL заряд частицы может быть определен

Необходимое условие
разделения позитронов
и электронов

Детектор должен
позволять регистрировать
позитрон(электрон) и не
менее 2^{yx} синхротронных
фотонов, испущенных им

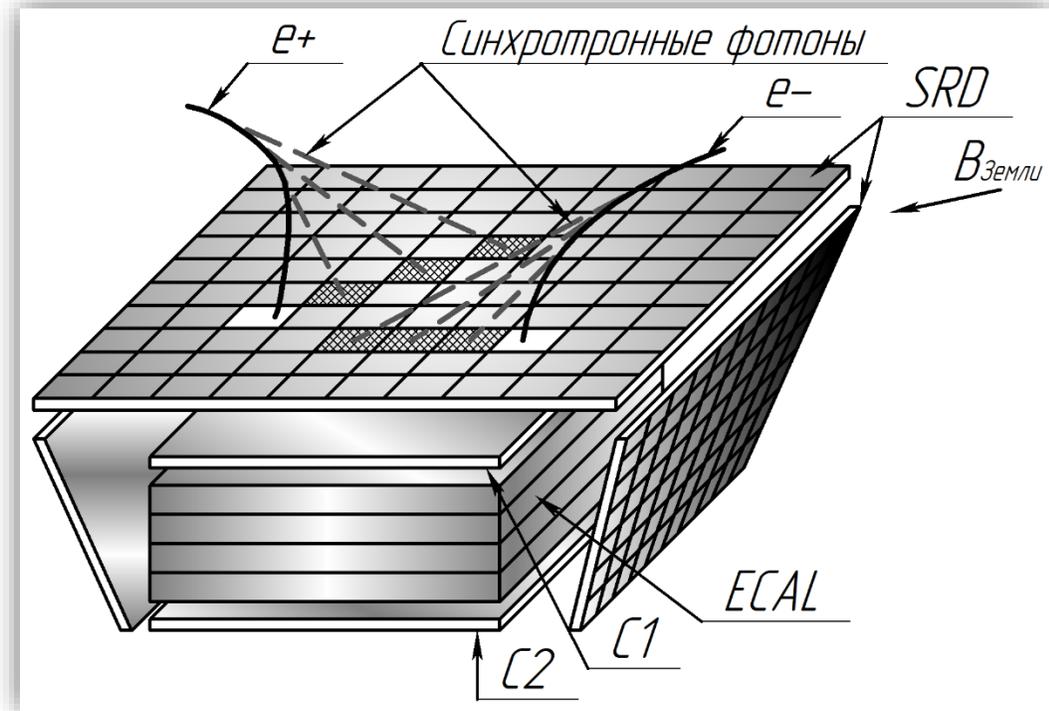


Схема регистрации частицы по ее
синхротронным фотонам

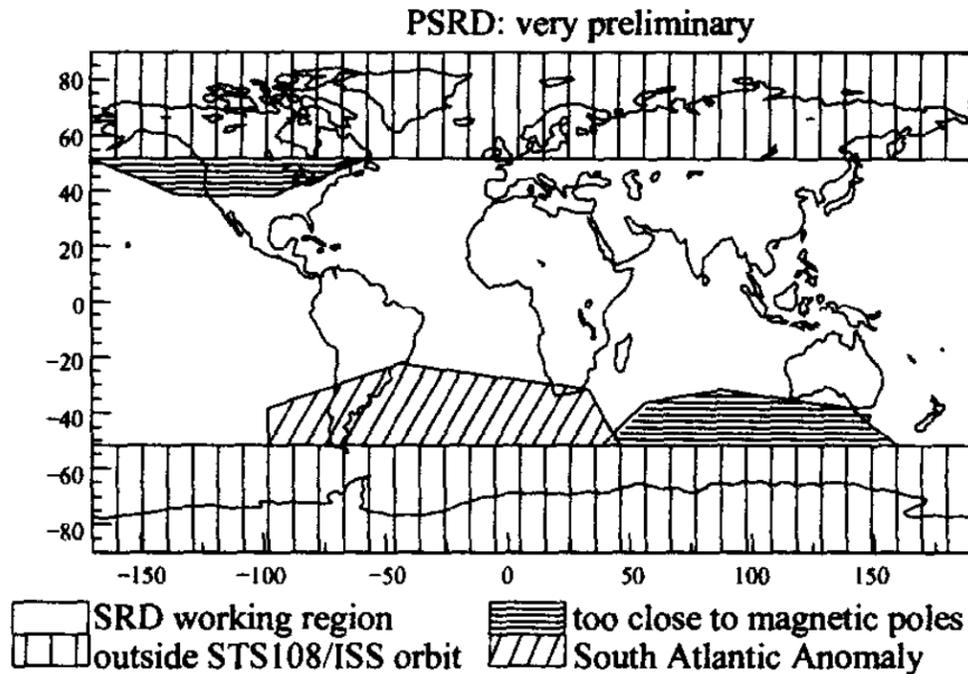
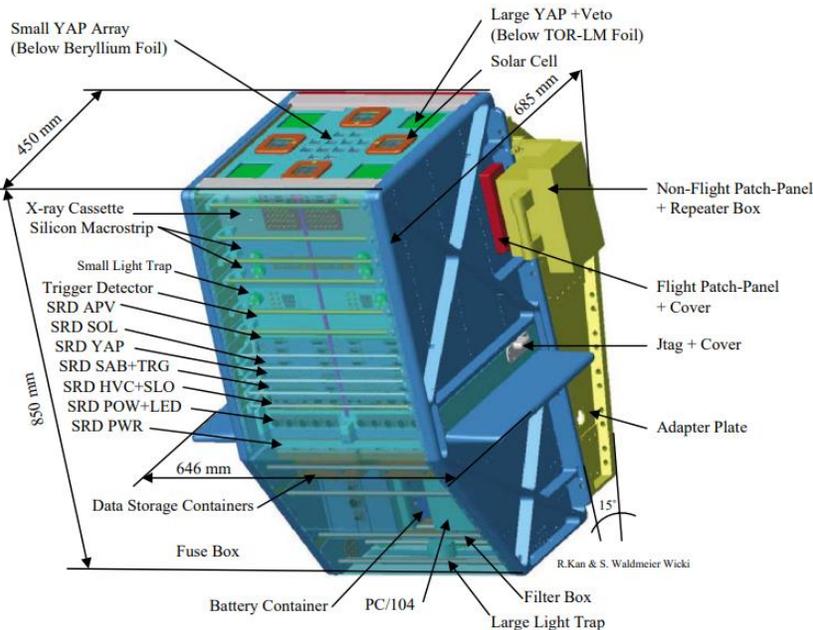
Galper A., Koldashov S., Mikhailov V., Prilutskii O. Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Jan. — Vol. 798. — P. 012176.

Прототип детектора синхротронного излучения в миссии STS-108

Цель

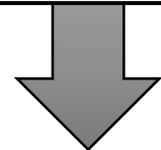
Измерения гамма-фона диффузных космических лучей и низкоэнергетических электронов в окрестностях Земли

Для измерения фонового спектра в PSRD использовался массив $18 \times 18 \times 1 \text{ mm}^3$ YAP(Ce) сцинтилляционных кристаллов в паре с ФЭУ R5900U



Потенциально возможные области работы SRD

Успешная работа SRD при отсутствии в поле зрения рентгеновских всплесков от Солнца



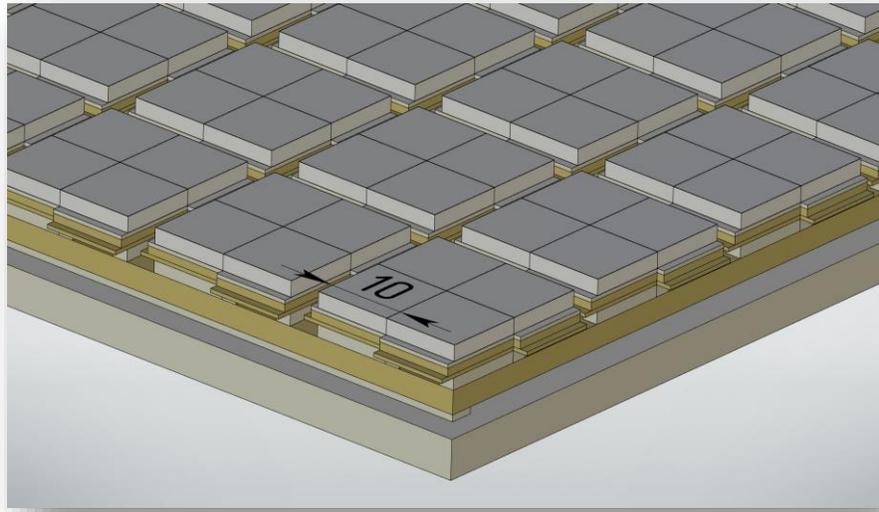
Минимумы солнечной активности:
 [White box] 2005-2009
 [White box] 2030-2035 ?

Конструкция детектора

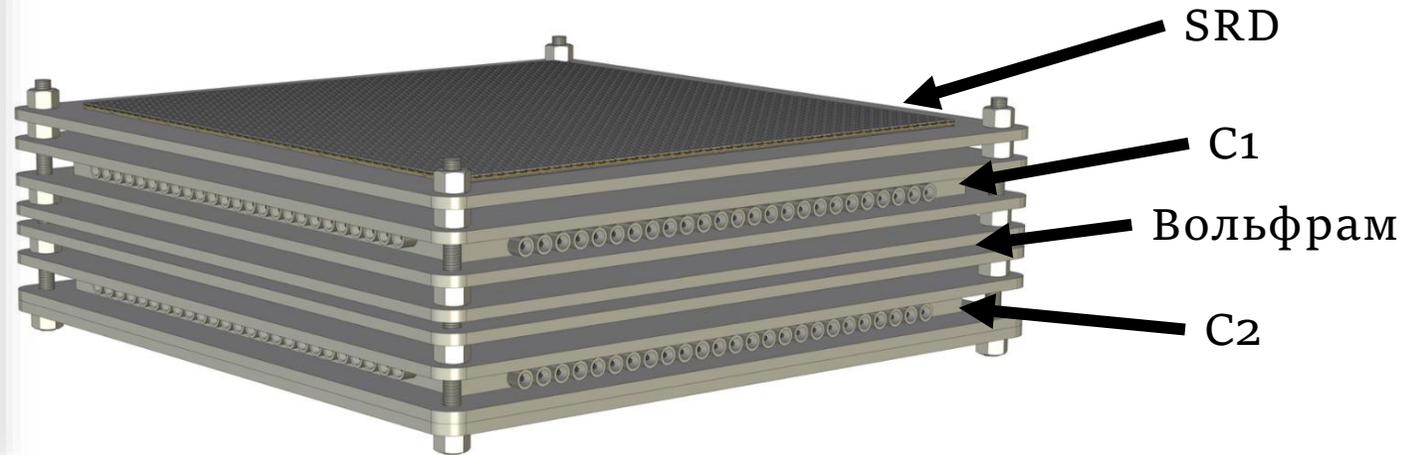
5

Детектор	Материал
SRD	CdZnTe
ECAL (триггерные C11, C12, C21, C22 и поглотитель)	Полистирол
	Вольфрам

Размер: $\sim 136 \times 136 \times 48 \text{ см}^3$
Угловое разрешение: $\lesssim 6^\circ - 7^\circ$
Поглотитель: $8X_0^W$



Модель детектора SRD на основе CdZnTe

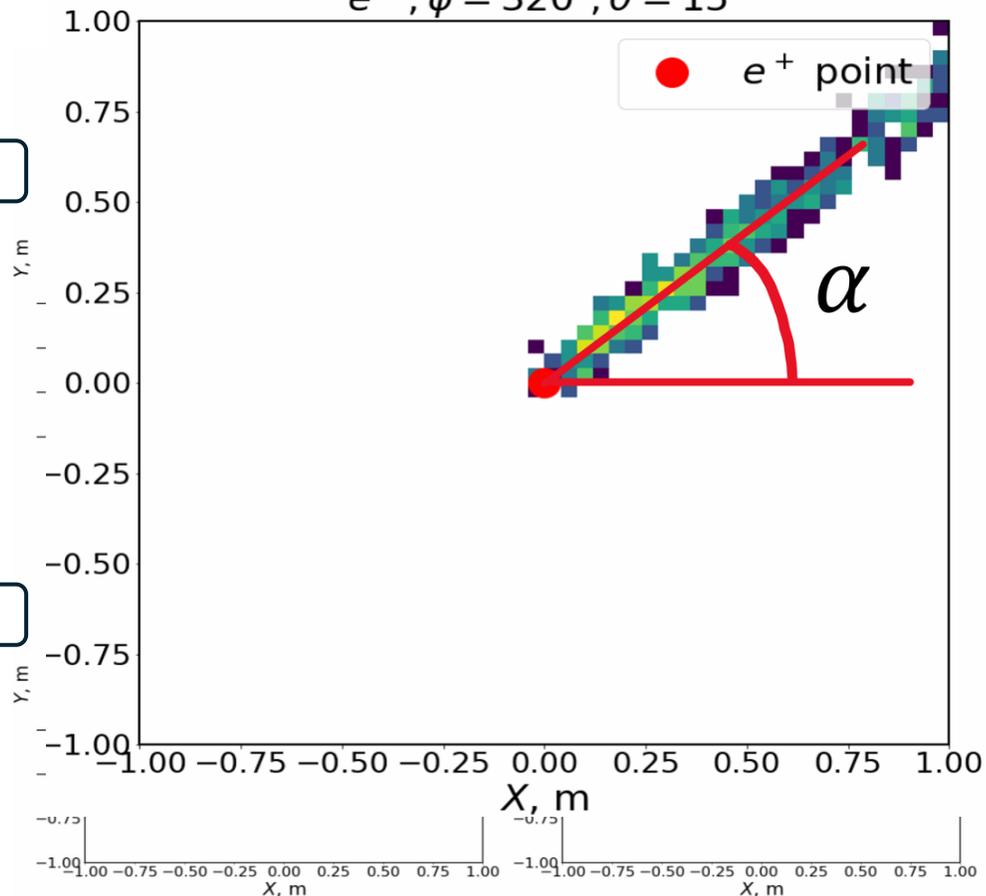


Модель детектора СОНЯ

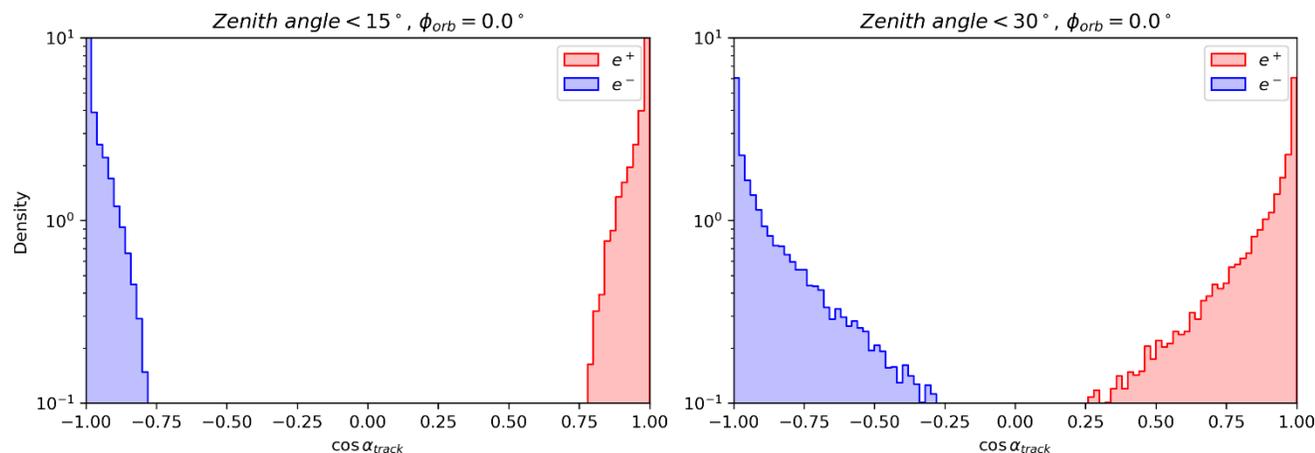
Локализация фотонов от электронов и позитронов в SRD

$E = 1 \div 50 \text{ ТэВ}$

$e^+, \phi = 320^\circ, \theta = 15^\circ$



Расположение синхротронных фотонов в SRD чувствительно к магнитному полю в точке регистрации на орбите и заряду частицы (электрона или позитрона)

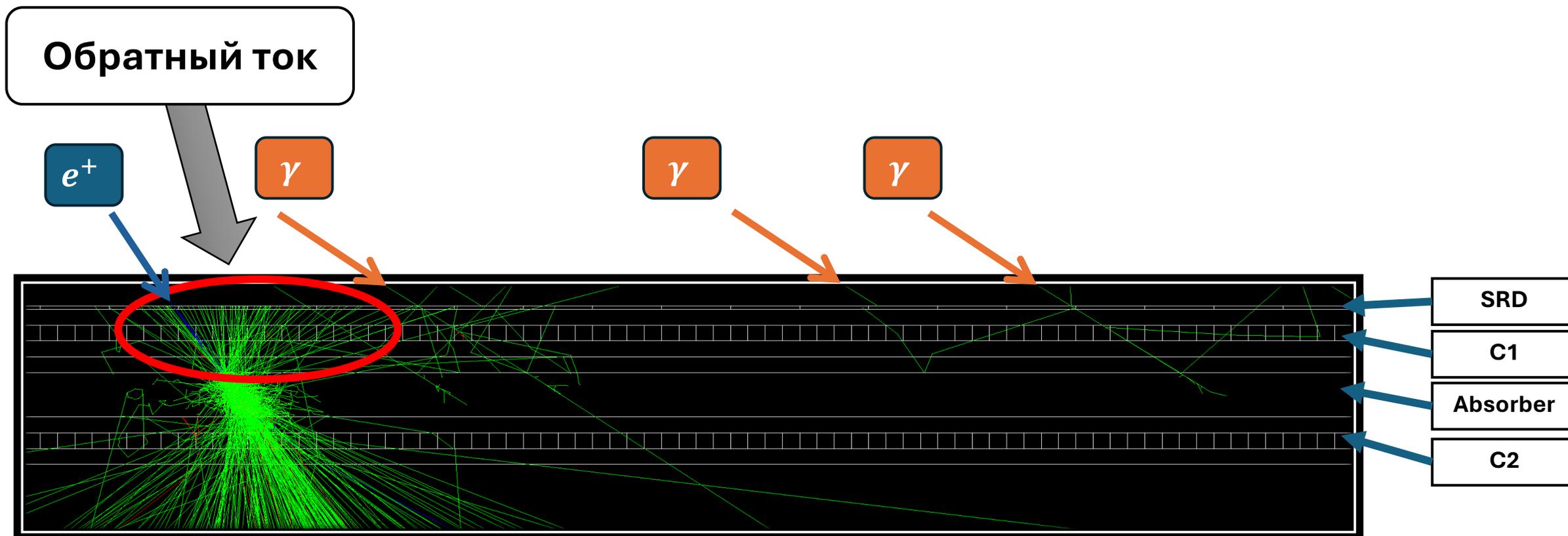


Распределения направлений локализации фотонов в плоскости SRD для расположения детектора на высоте 400 км, $i = 51.6^\circ, \varphi = 0^\circ$

Пространственное распределение фотонов в плоскости SRD в зависимости от азимутального угла прилета электронов и позитронов

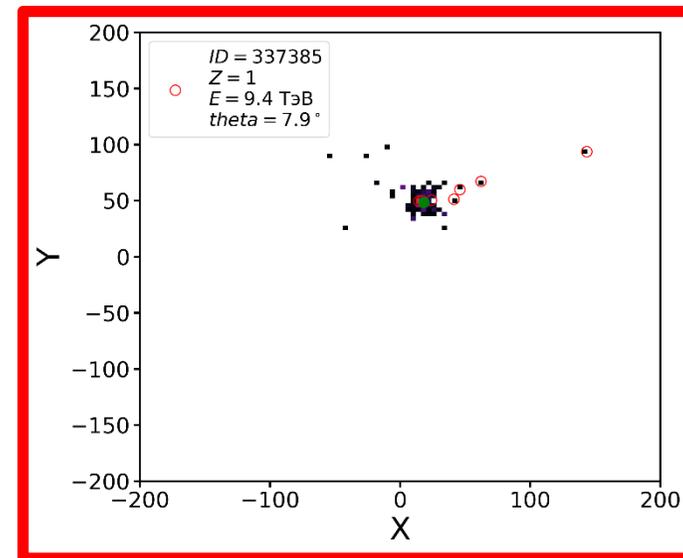
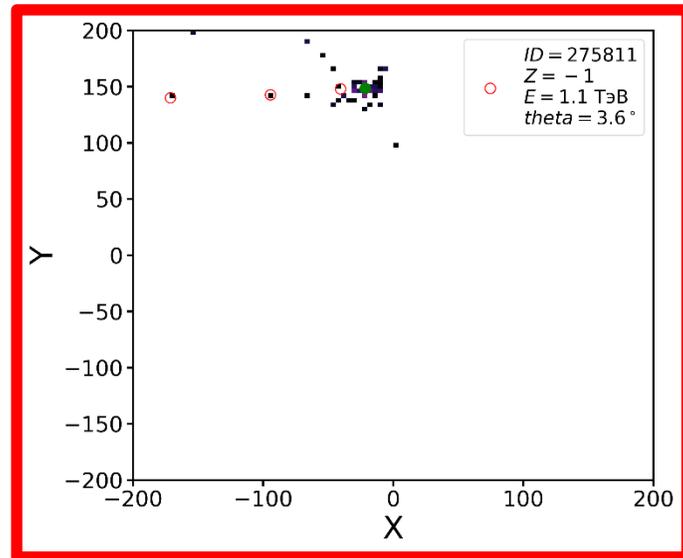
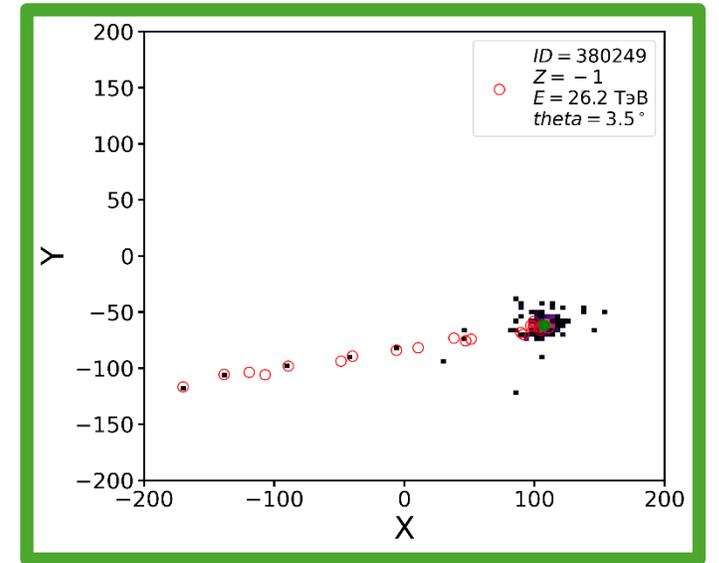
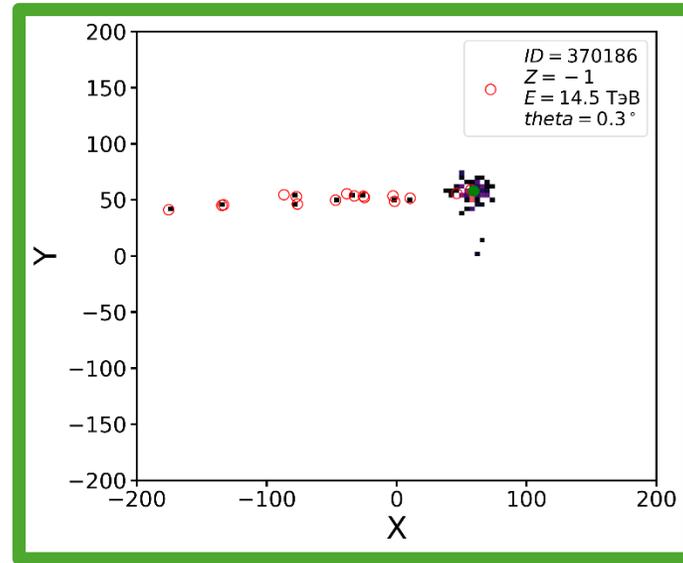
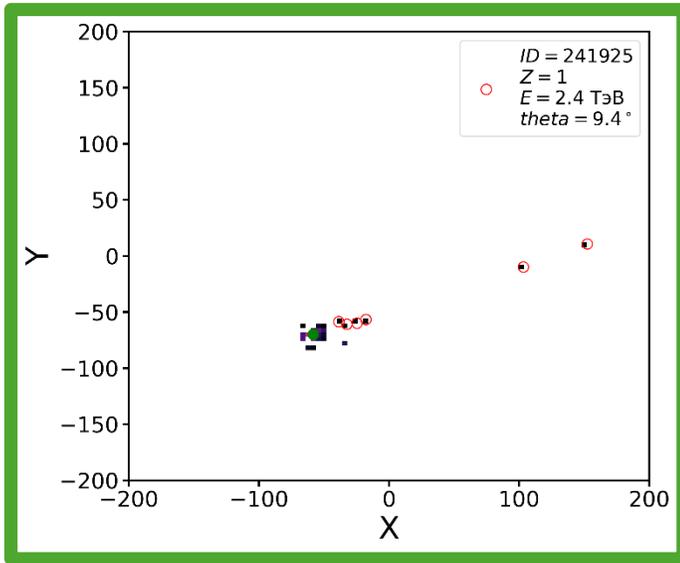
Фон обратного тока

7



Визуализация позитронного события в Geant4

Примеры событий

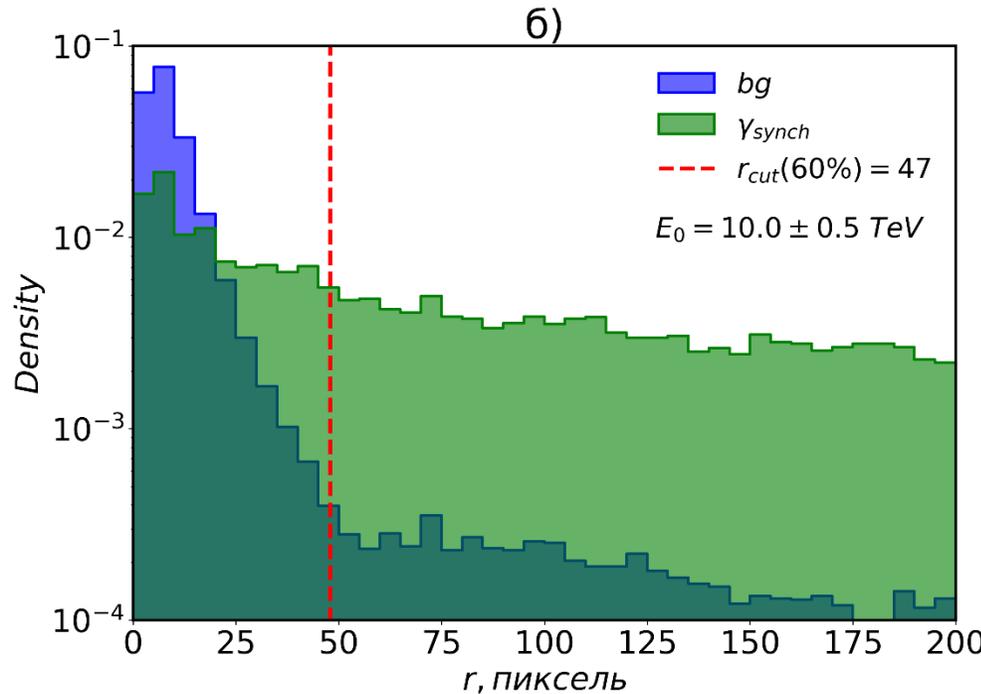
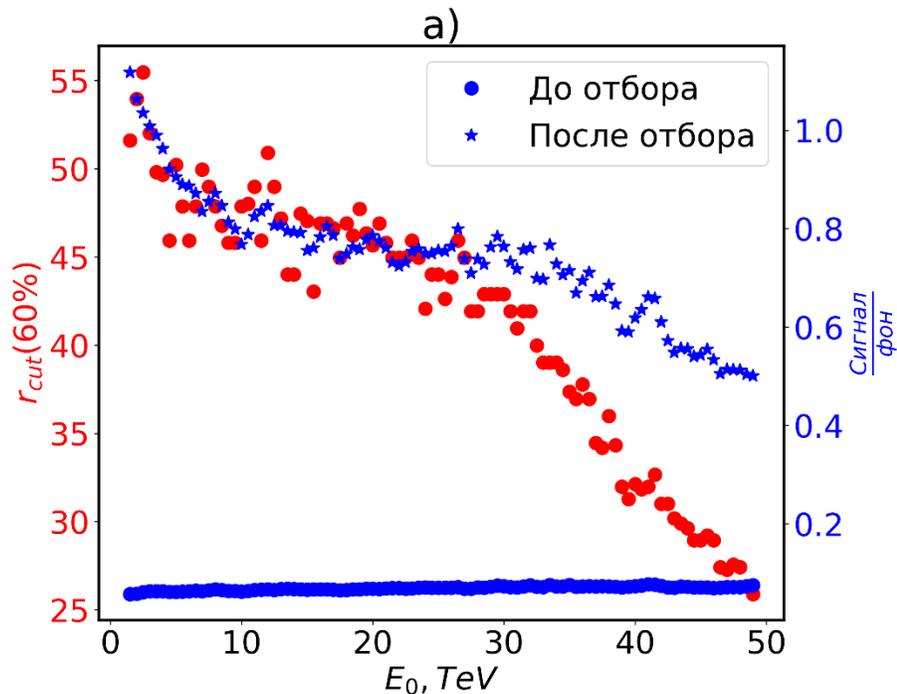


Пространственный критерий r_{cut}

Обратный ток сосредоточен в ограниченной области вокруг точки попадания частицы



Можно использовать ограничение на расстояние от точки попадания заряженной частицы до пикселя SRD $r > r_{cut}$



Улучшение
отношения $\frac{\text{сигнал}}{\text{фон}}$
в 5 – 20 раз

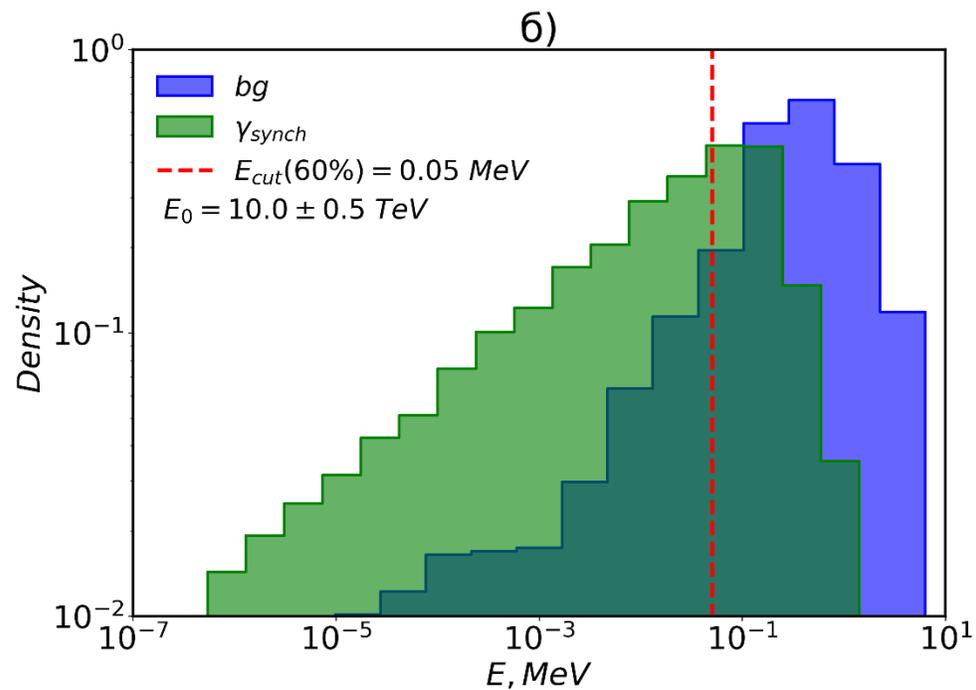
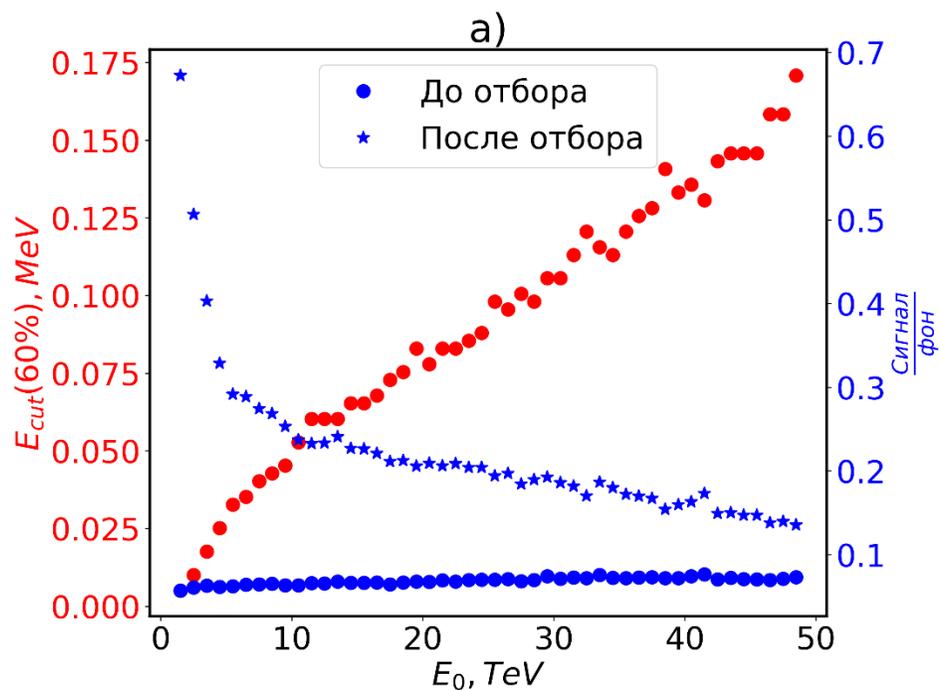
Распределения расстояний между точкой регистрации заряженной частицы и энерговыведениями в SRD от синхротронных фотонов и обратного тока

Энергетический критерий E_{cut}

Спектры синхротронных фотонов и обратного тока не совпадают



Можно использовать ограничение на энерговыделение в пикселе SRD $E < E_{cut}$



Улучшение
отношения $\frac{\text{сигнал}}{\text{фон}}$
в 2 – 15 раз

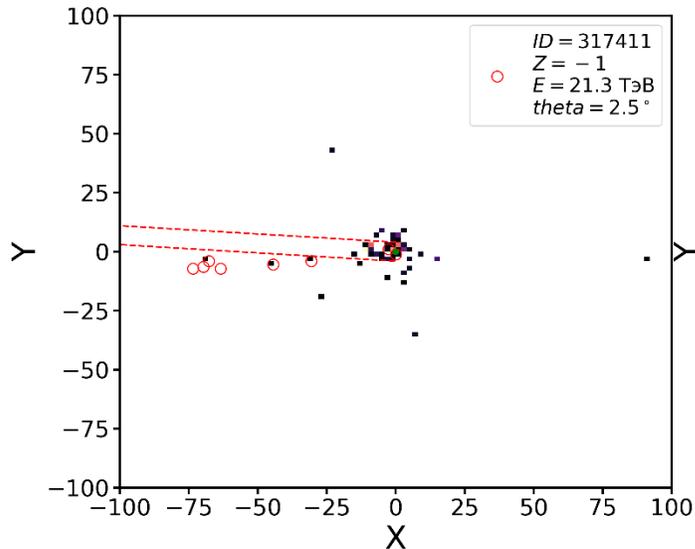
Распределение энерговыделений в SRD от синхротронных фотонов и обратного тока

Идентификация синхротронных треков

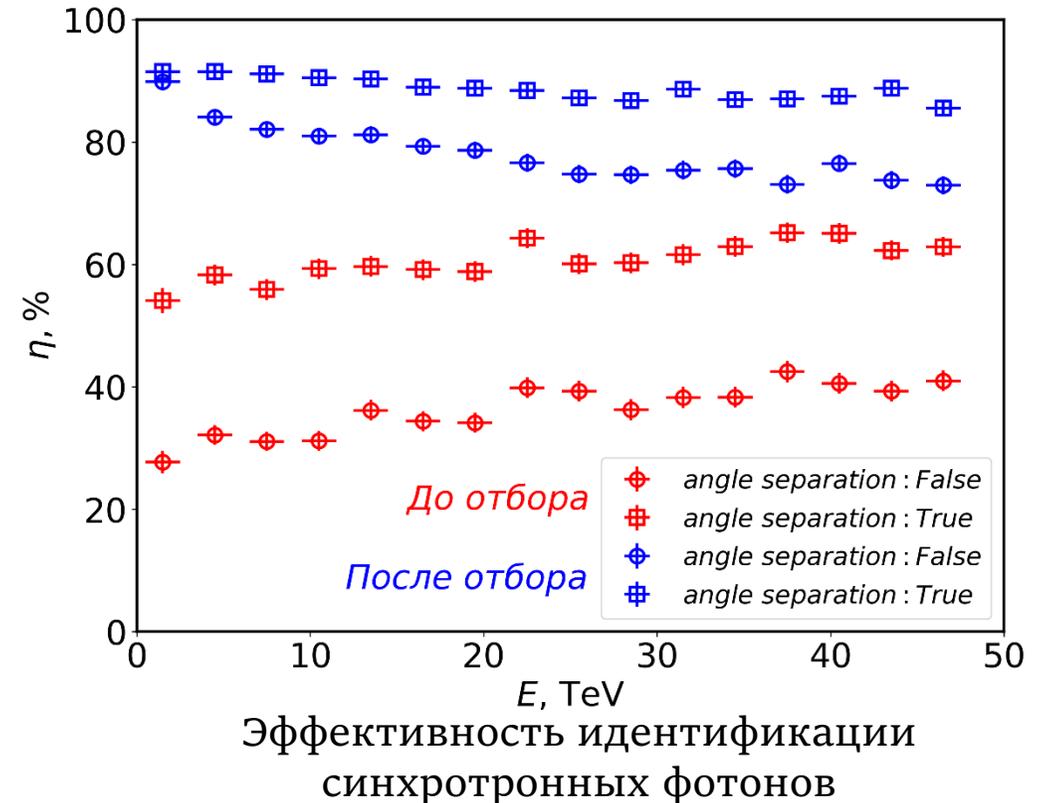
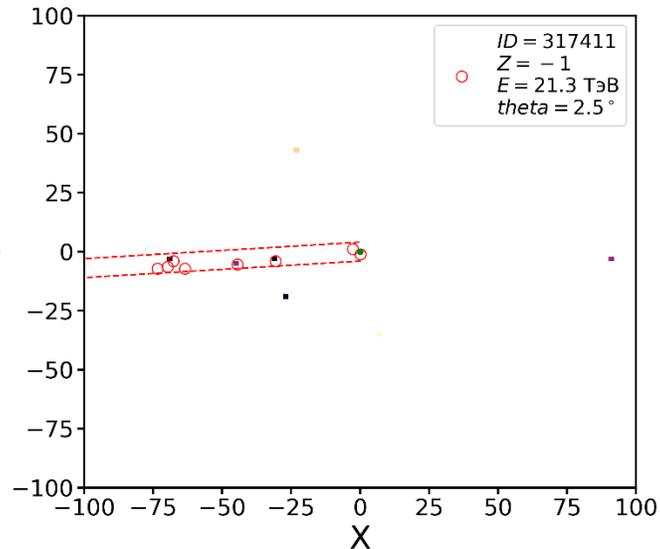
Toy Model

1. Сканирующая полоса ширины d вокруг точки $e^+/e^- (x_0, y_0)$;
2. С малым шагом $\Delta\alpha \leq 1^\circ$, полоса вращается относительно (x_0, y_0) и записывается число N энерговыделений внутри;
3. Определяется угол $\alpha_{max(N)}$ полосы, замещающей наибольшее число событий

До отбора

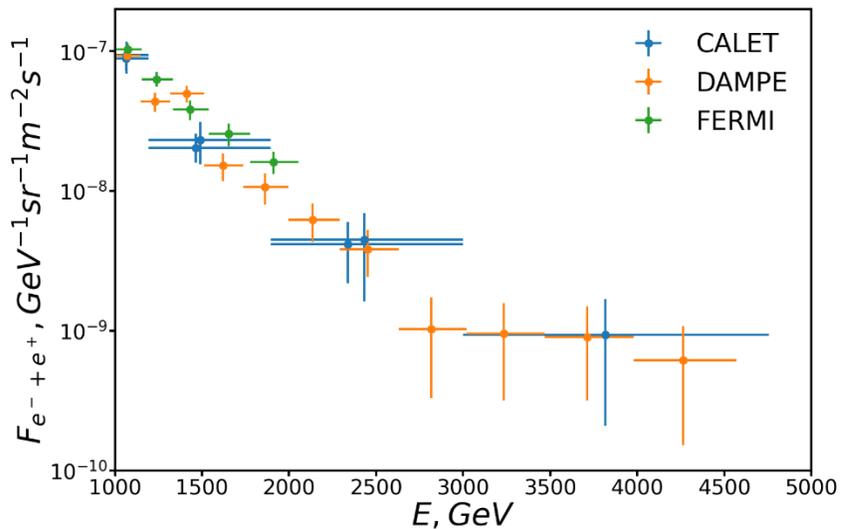


После отбора



Ожидаемый темп счета

Экспериментальные данные CALET, DAMPE и FERMI о суммарном электрон-позитронном потоке ГКЛ

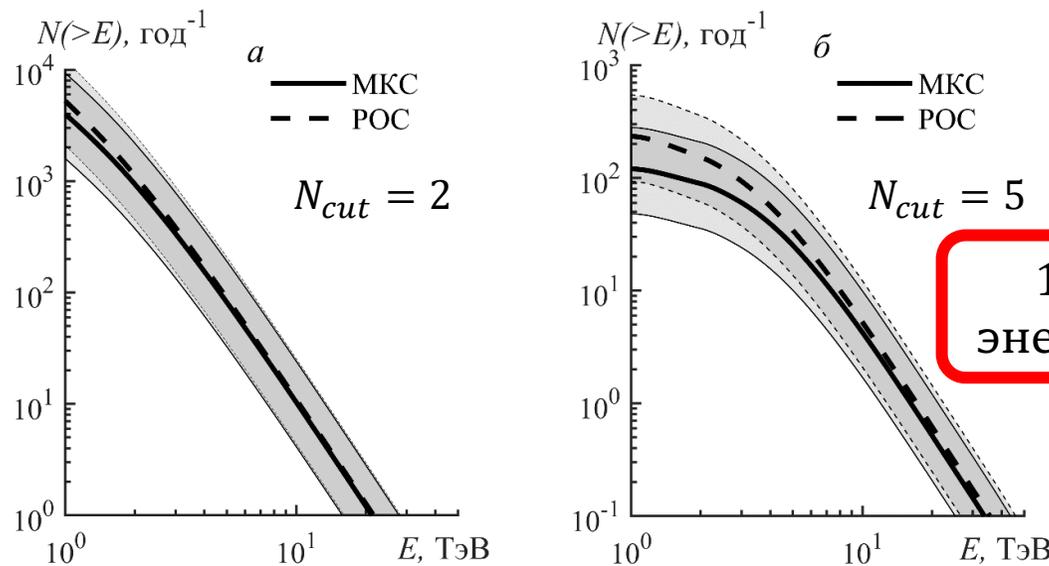


Высота	400 км
Наклонение ISS	51.6°
Наклонение ROSS	97 – 98°
Эффективность SRD	80 % (CdZnTe)
Размер пикселя	1 × 1 см ²
Геометрический фактор	10 м ² ср

Tang J., Kislak F., Krawczynski H. *Astroparticle Physics*. – 2021

Thomas G.R., Willis D.M. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 5, N 3. 260. (1972)

Энергетические зависимости годового интегрального темпа счета



10² – 10³ событий с энергией E > 1 ТэВ в год

Stuzhin, A.P., Mikhailov, V.V. The Possibility of Detecting TeV Electrons and Positrons of Galactic Cosmic Rays Using the Earth's Magnetic Field. *Phys. Atom. Nuclei* 87, 160-164 (2024).

- DAMPE Collaboration // *Nature*. – 2017.
- Abdollahi S., Ackermann M., Ajello M., [et al.]. // *Physical Review D*. – 2017.
- Adriani O., Akaike Y., Asano K., [et al.]. // *Phys. Rev. Lett.* – 2018.

Заключение

В настоящей работе проведено Монте-Карло моделирование детектора СОНЯ с использованием инструментария Geant4

В ходе работы:

- ❑ Построена модель детектора СОНЯ в Geant4
- ❑ Проведено моделирование прохождения частиц через детектор СОНЯ и получены энерговыделения в SRD
- ❑ Определены критерии для уменьшения фона обратного тока ECAL в SRD
- ❑ Получена оценка эффективности идентификации событий

Выводы:

- Компактная локализация частиц обратного тока позволяет выделять синхротронные треки
- С использованием пространственных, энергетических и угловых критериев отбора возможно повысить эффективность идентификации синхротронных треков в SRD на 45 – 65 %
- Электроны и позитроны в эксперименте СОНЯ могут быть разделены на основании локализации их синхротронных фотонов

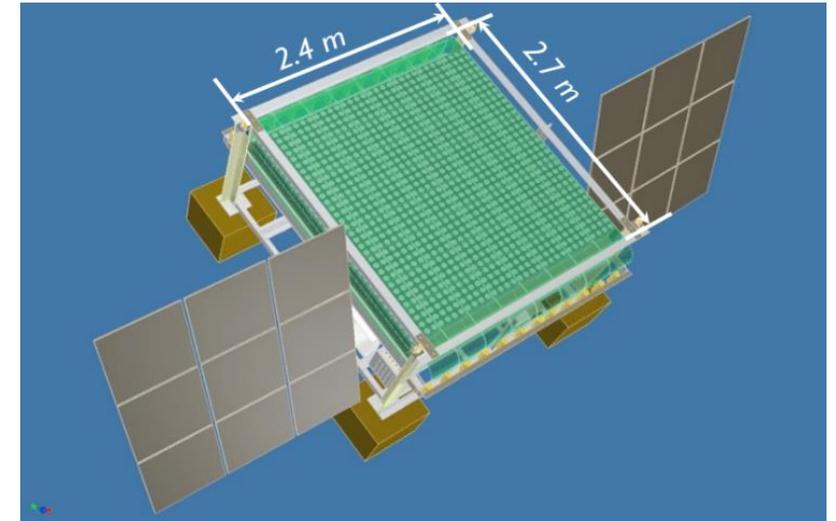
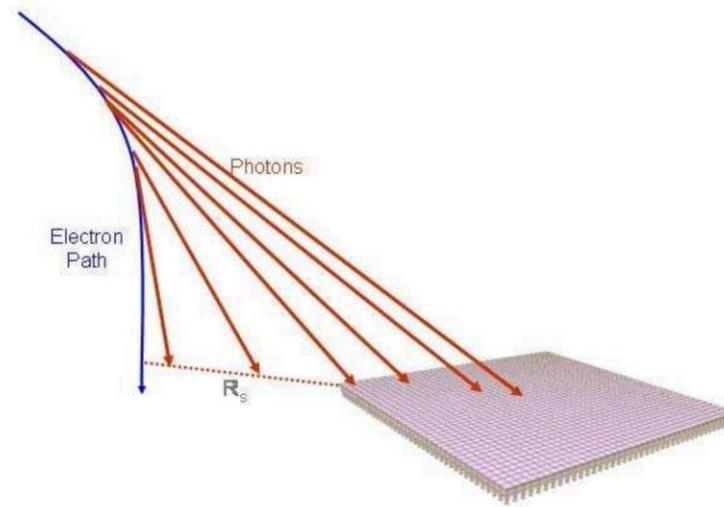
Планы дальнейшей реализации:

- Моделирование космического фона
- Разработка конструкции детекторов для эксперимента СОНЯ
- Исследование альтернативных CdZnTe материалов

Эксперимент CREST

5

CREST (Cosmic Ray Electron Synchrotron Telescope) – балонный эксперимент в Антарктике 2011/2012



Bower C., Coutu S., Gennaro J. et al. // Proceedings of Science. 415. (2015)

Результаты:

$Flux < 7.11 \times 10^{-3} m^{-2} sr^{-1} s^{-1}$ (with 90% confidence level for $E > 15$ TeV)

Уровень фона слишком высок при проведении экспериментов на земле или воздушном шаре

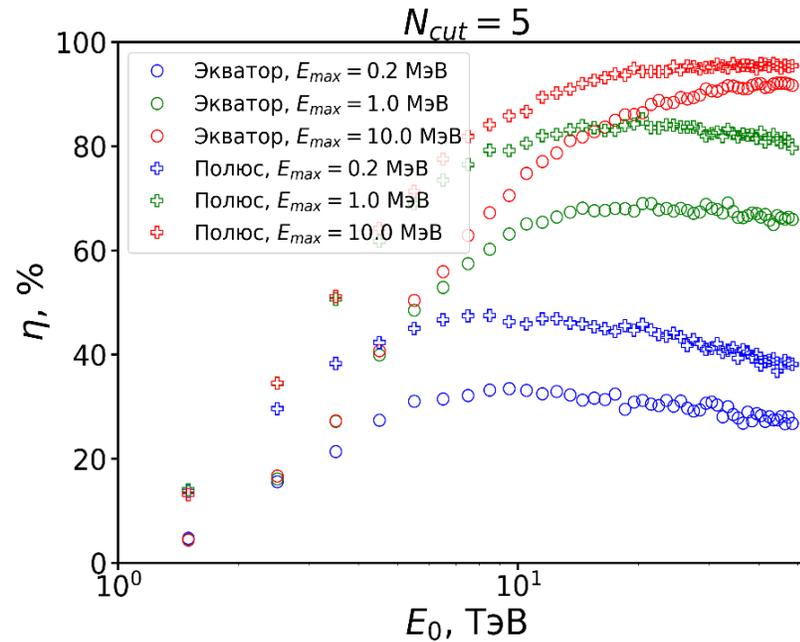
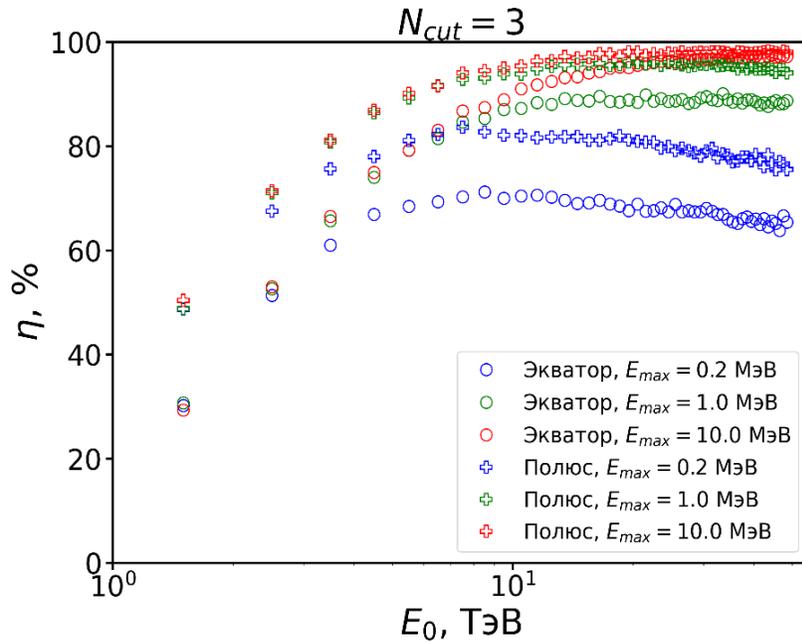


Некоторые особенности космического расположения:

- Меньше поток вторичных частиц
- Космические лучи альbedo все еще остаются проблемой

Эффективность регистрации

Эффективность: $\eta = \frac{N(N_g \geq N_{cut})}{N_0}$



Энергетические зависимости эффективности регистрации позитронов и электронов для различных верхних порогов регистрации фотонов $E_{max} \cdot E_{min} = 2$ кэВ

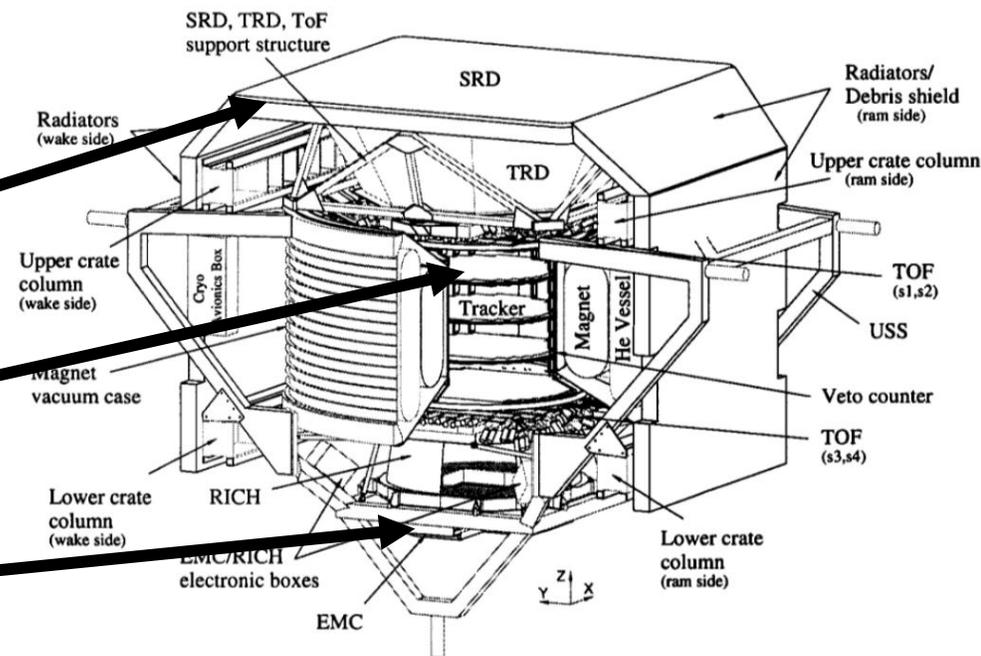
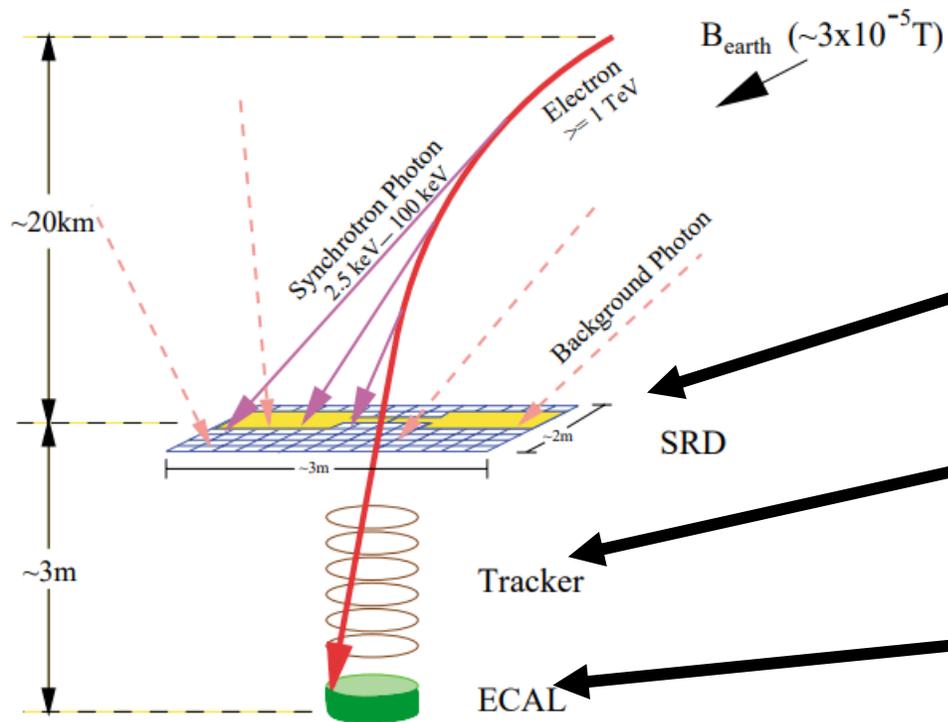
Высота	400 км
Эффективность SRD	80 % (<i>CdZnTe</i>) Tang J., Kislat F., Krawczynski H. <i>Astroparticle Physics</i> . — 2021.
Размер пикселя	1×1 см ²
Число пикселей	200×200

- Эффективность регистрации в полярной области выше на (10 – 20)%, чем на экваторе
- Максимум эффективности зависит от ширины энергетического диапазона регистрации γ_{synch}

Проект эксперимента AMS-02

Используется слабое, но протяженное магнитное поле Земли

Tracker и EMC определяют точку пролета e^+ или e^-

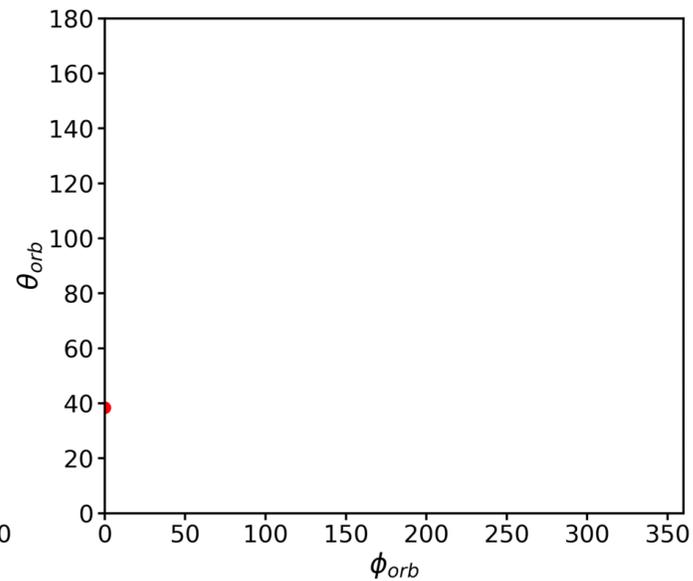
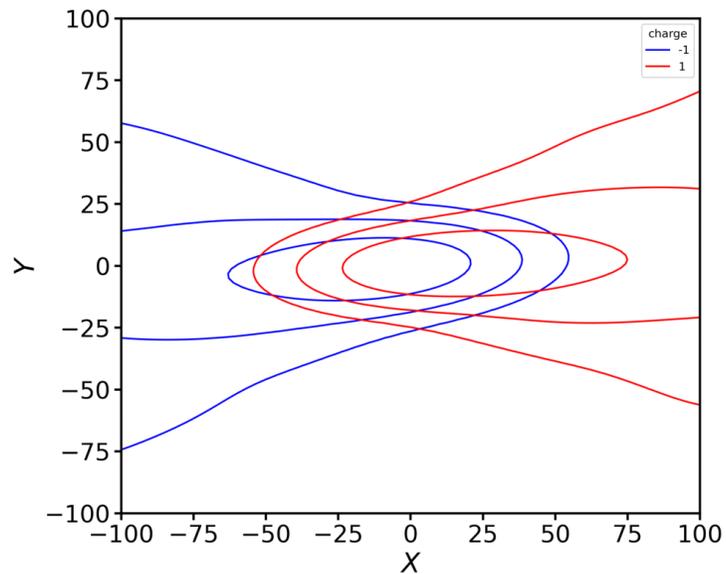
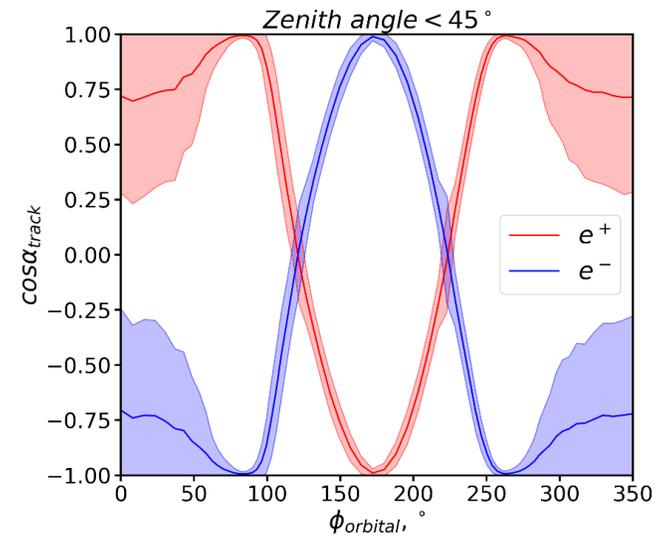
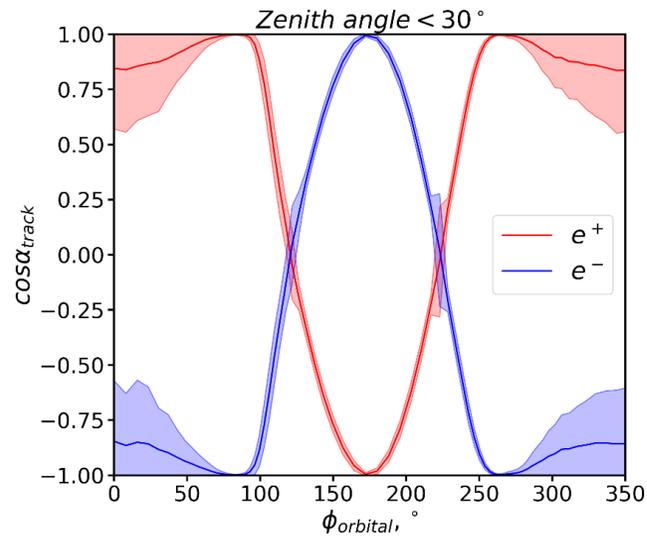
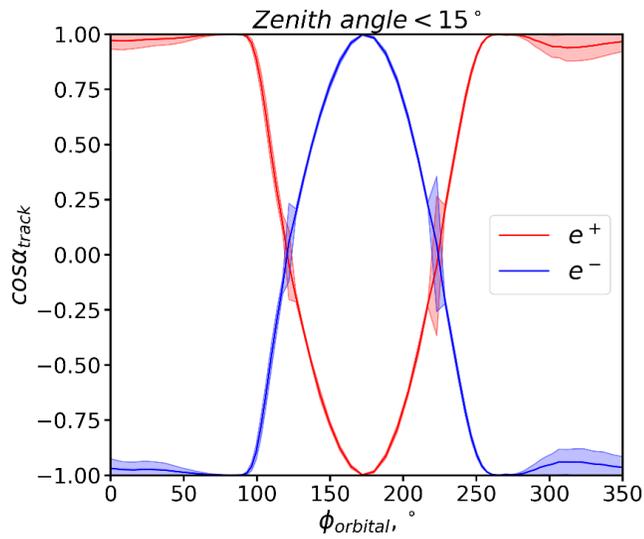


18. H. Anderhub et al., Nucl. Inst. & Meth. A 478 (2002) 123.

SRD в составе эксперимента AMS-02

O. Grimm, Design and construction of the prototype synchrotron radiation detector, Ph.D. Thesis (No. 14576), ETH Zurich, 2002.

Разделение e^- и e^+ . Угловой критерий



Распределения направлений на треки фотонов в плоскости SRD для e^- и e^+ в зависимости от азимутального угла орбиты с наклоном 51.6° (МКС). При различных пороговых зенитных углах прилета.

Monte Carlo Simulation

Python

Initial data: charge, energy and direction of the particle; location and orientation of the detector

Modeling the trajectory of a particle in a IGRF geomagnetic field (backtracking of particles, fourth—order Runge-Kutta method)

Fortran

Simulation of the emission of synchrotron photons taking into account the energy of positrons/electrons and the perpendicular component of the geomagnetic field B_{\perp}

Python
ROOT CERN C++

Yes

Particle is registered

The number of photons in the detector plane \geq N_{cut} ?

No

Particle is not registered

Emission of synchrotron photons

The direction of photon emission in a cone

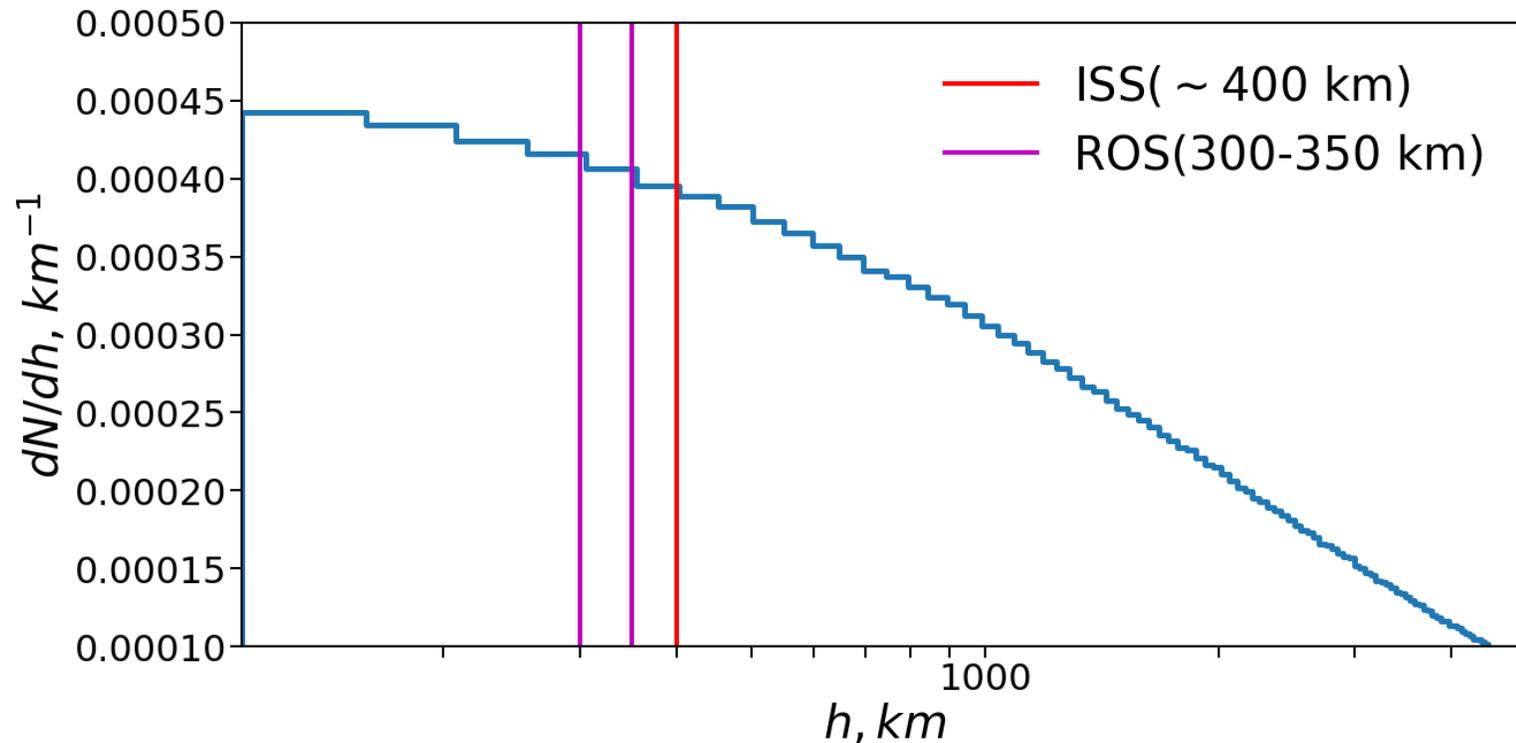
$$\theta \sim \frac{mc^2}{E} \ll 1$$

The average distance passed by a positron or electron between two synchrotron photon emissions

Prilutskiy O. ZhETF. 1972. Vol. 16, no. 8. P. 452–454.

$$l = \frac{1.6 \times 10^5 \text{ cm}}{H(\text{G})}$$

ISS - International Space Station
ROS – proposed Russian Orbital Station



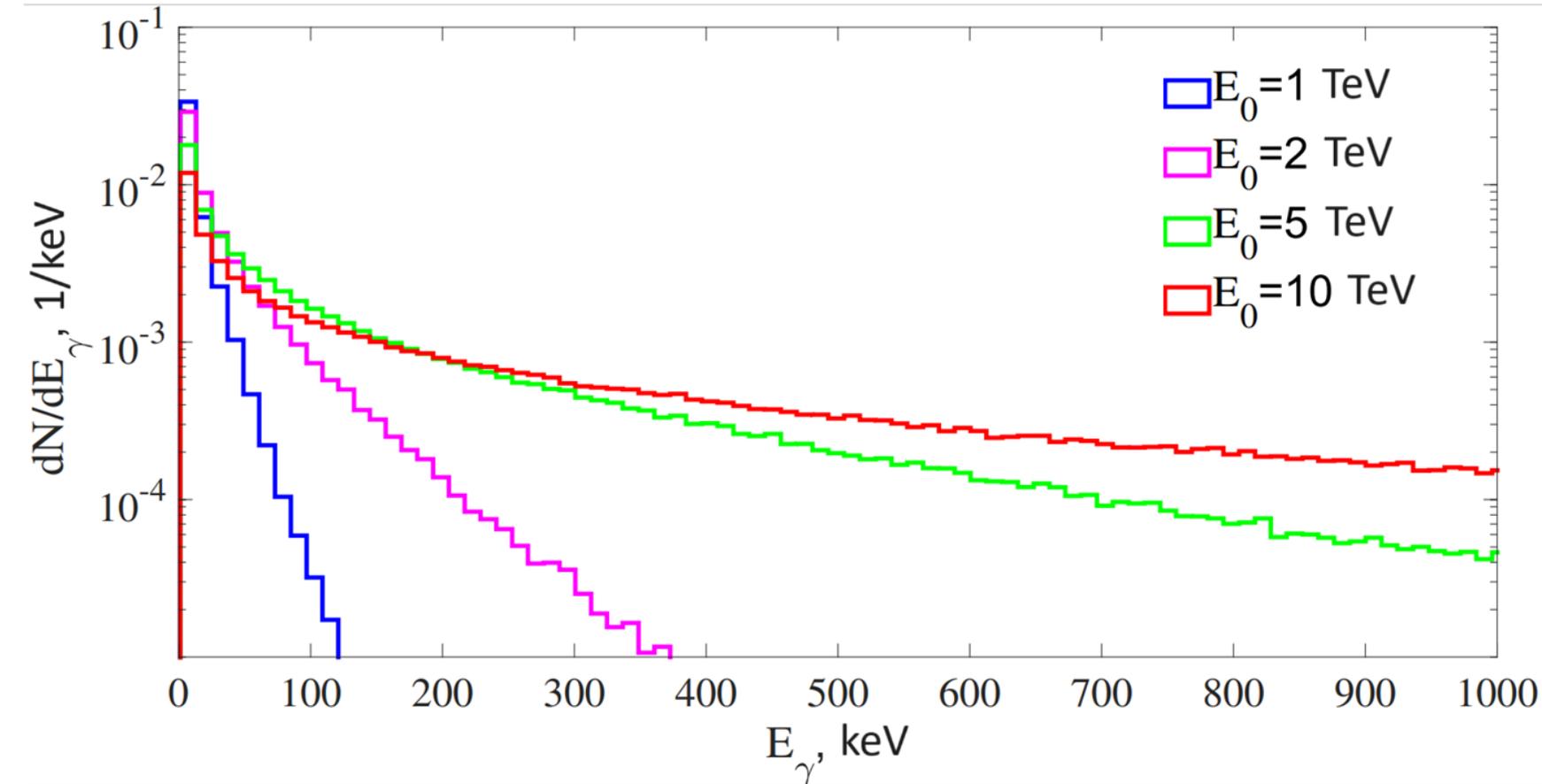
High-altitude distribution of synchrotron photons from electrons with an energy $> 1 \text{ TeV}$.

Simulation of synchrotron photon energies

10

$$\frac{dN_\gamma(E_\gamma)}{dE_\gamma} = \frac{3.53 \times 10^5}{E_\gamma} \left(\frac{E_\gamma}{E_c}\right) \times \int_{E_\gamma/E_c}^{\infty} K_{5/3}(\chi) d\chi \quad E_c = 6.56 \times 10^{-2} B_\perp E_0^2 \text{ MeV}$$

Stephens S.A., Balasubrahmanyam V.K. *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* — 1983.



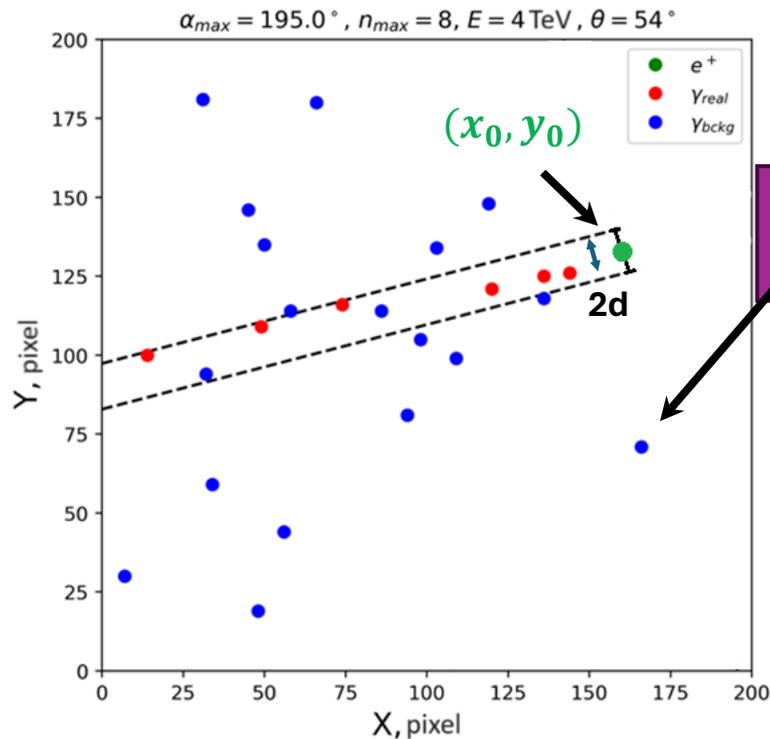
Monte Carlo simulation results of the energy spectrum of synchrotron photons in a magnetic field $B_\perp = 0.25 \text{ G}$

Photons in the X-ray and gamma-ray regions

Selection algorithm

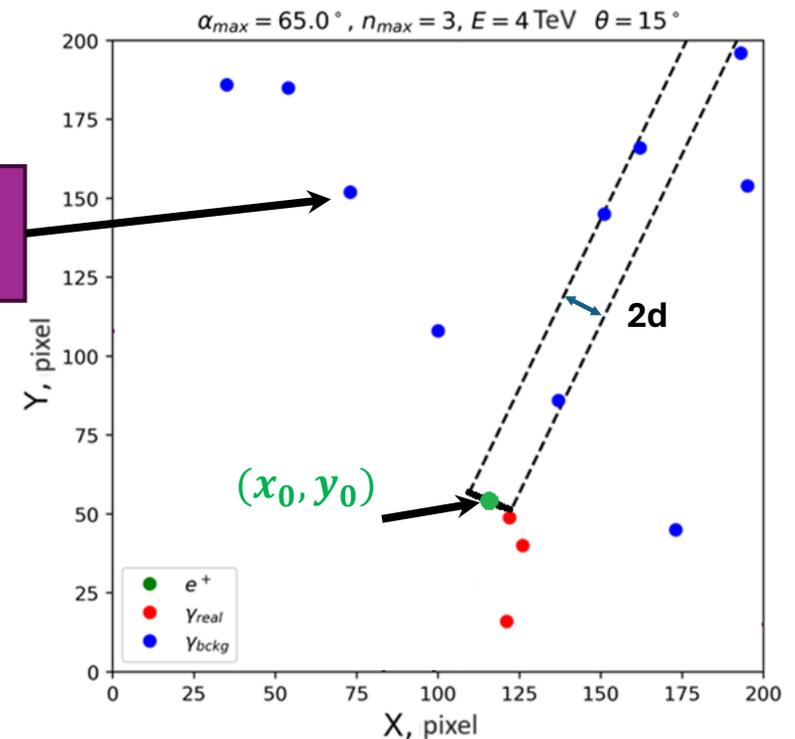
1. A scanning strip is formed from parallel lines at a distance d from the point (x_0, y_0) ;
2. With a small step $\Delta\alpha \leq 1^\circ$, the strip rotates relative to the point (x_0, y_0) and counts the number of photons trapped inside;
3. The angle $\alpha_{max(N)}$ of the band with the maximum number of photon events is remembered

Correct selection



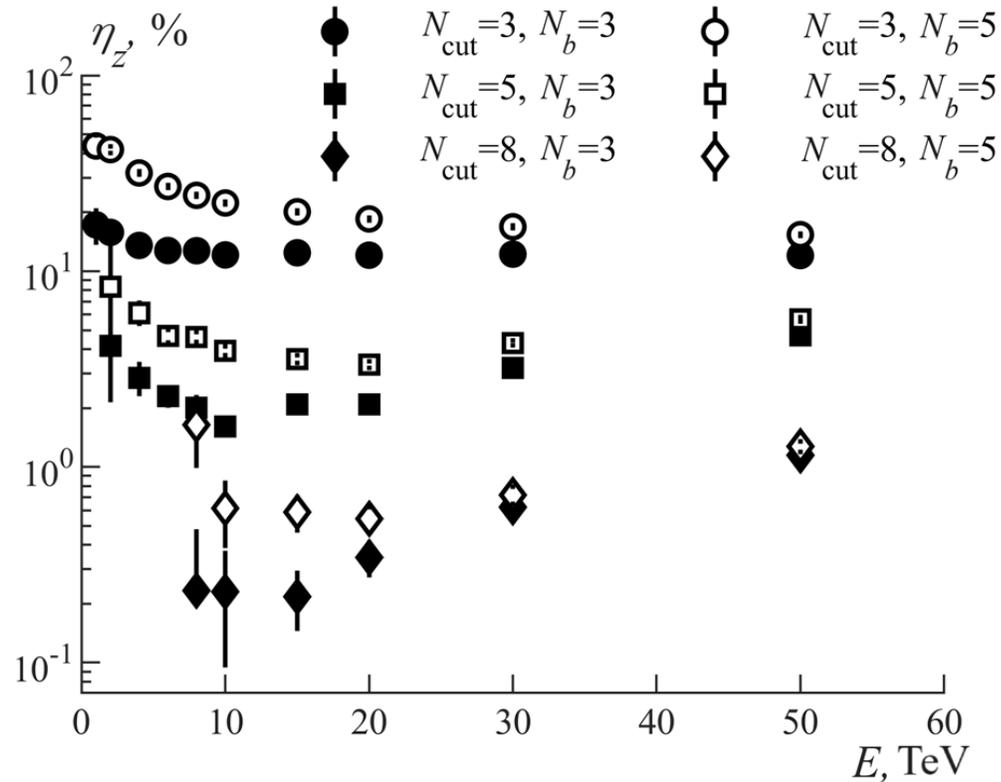
Uniform Poisson background

Incorrect selection



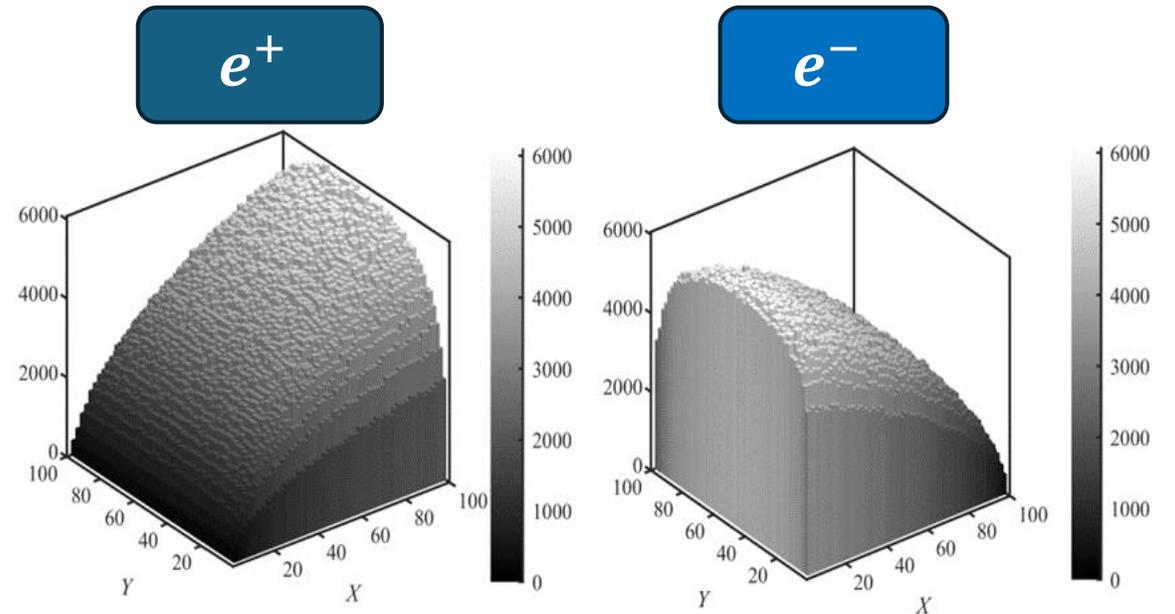
Separation of electrons and positrons with toy model 14

Without measuring the direction



Dependence of the electron-positron confusion probability estimate on the particle energy. The detector is 200×200 pixels

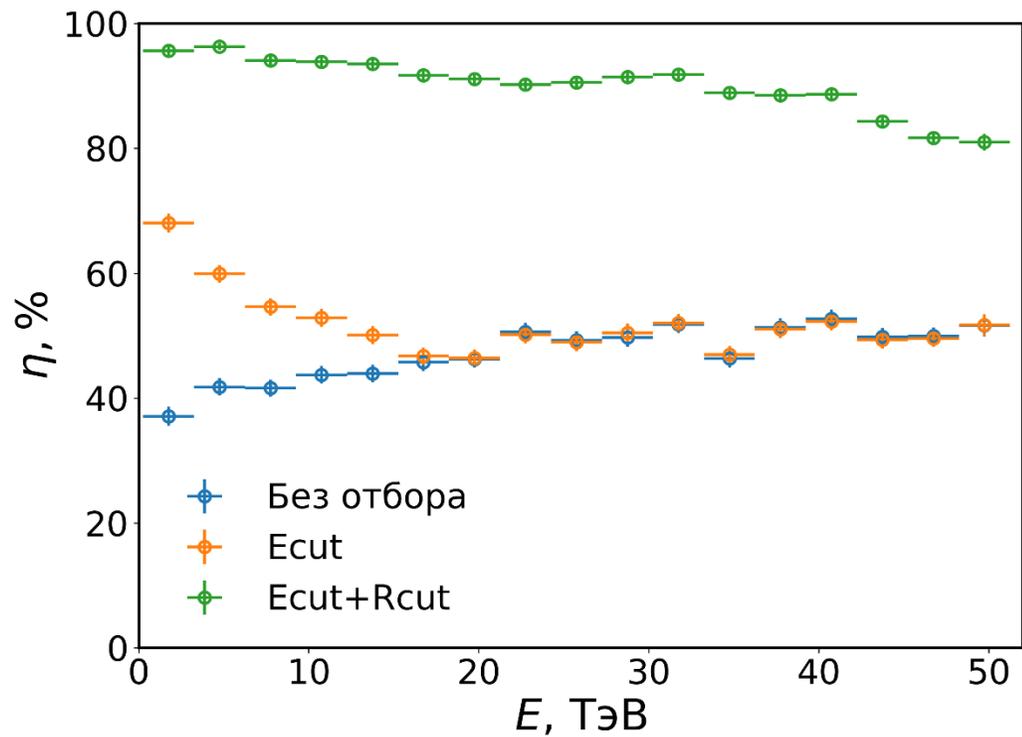
For isotropic flux



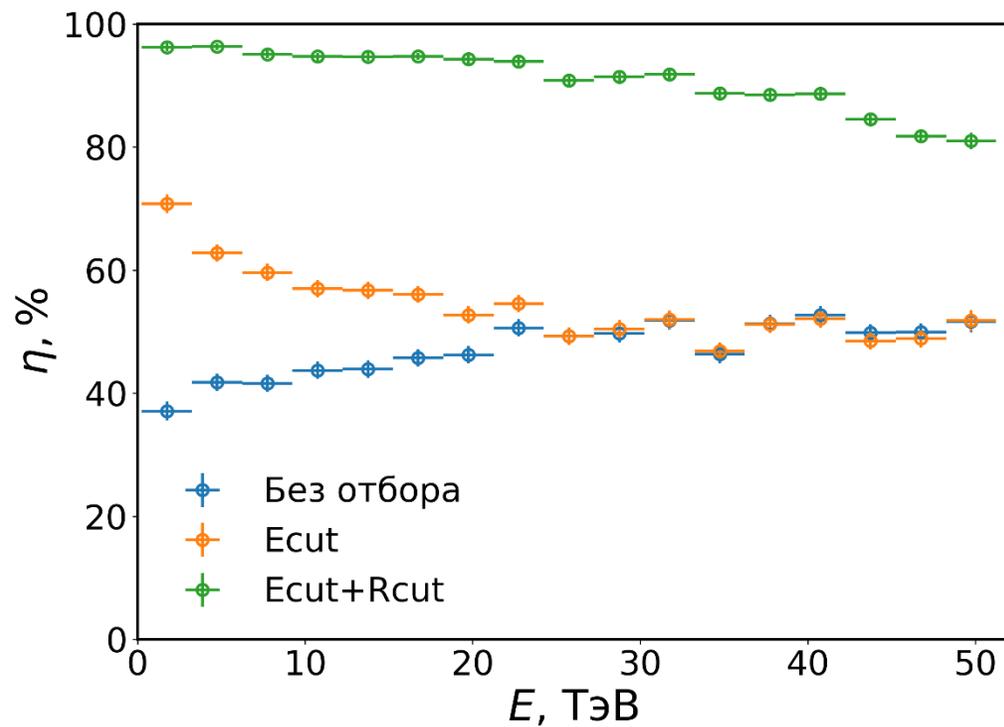
The charge of a particle can be determined with low accuracy ($\eta_z \gtrsim 1\%$) without measuring its arrival direction

Arrival direction measurement required

$\eta_\gamma > 70\%$



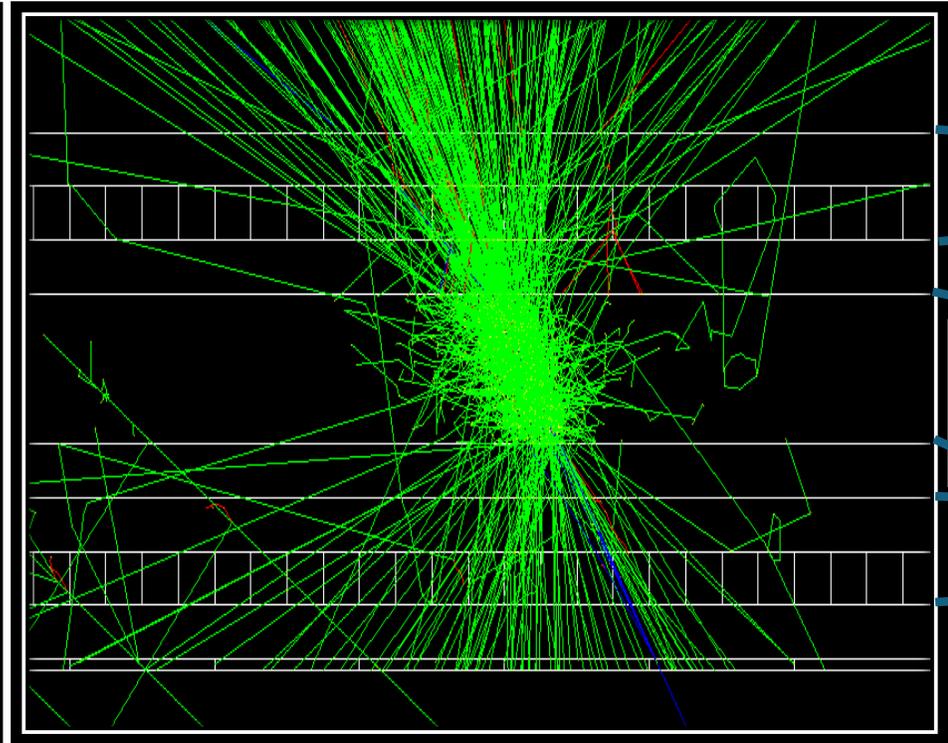
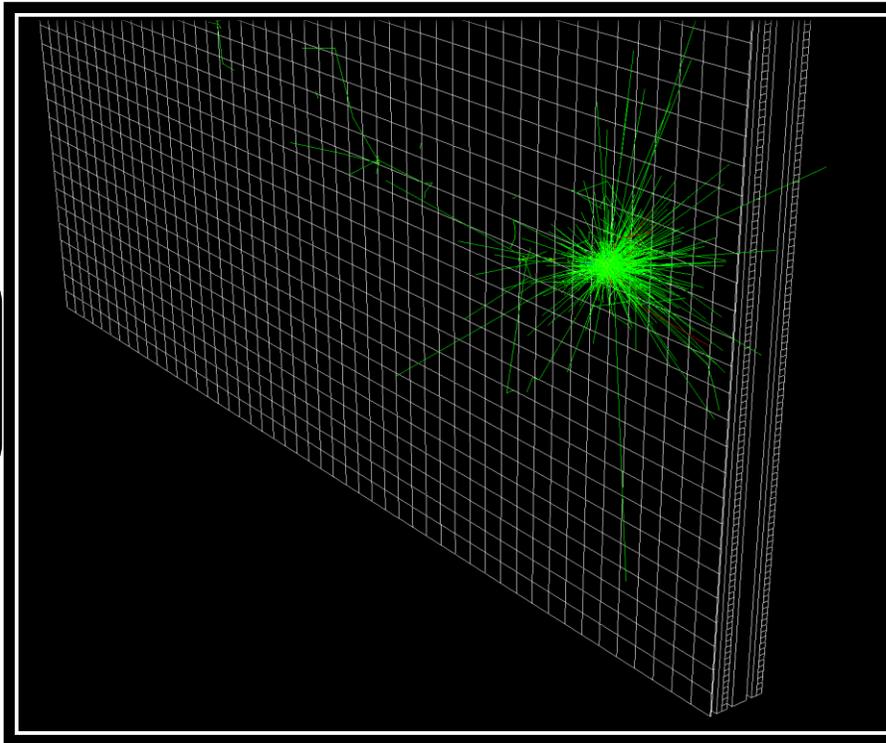
$\eta_\gamma > 90\%$



PRELIMINARY GEANT4 MODELLING

17

$E_e = 1 \text{ GeV}$

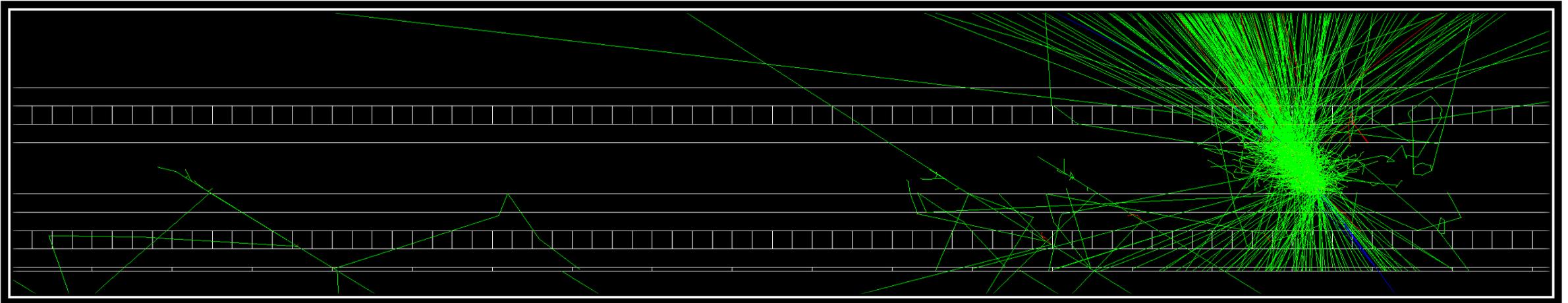


C2

Abso
rber

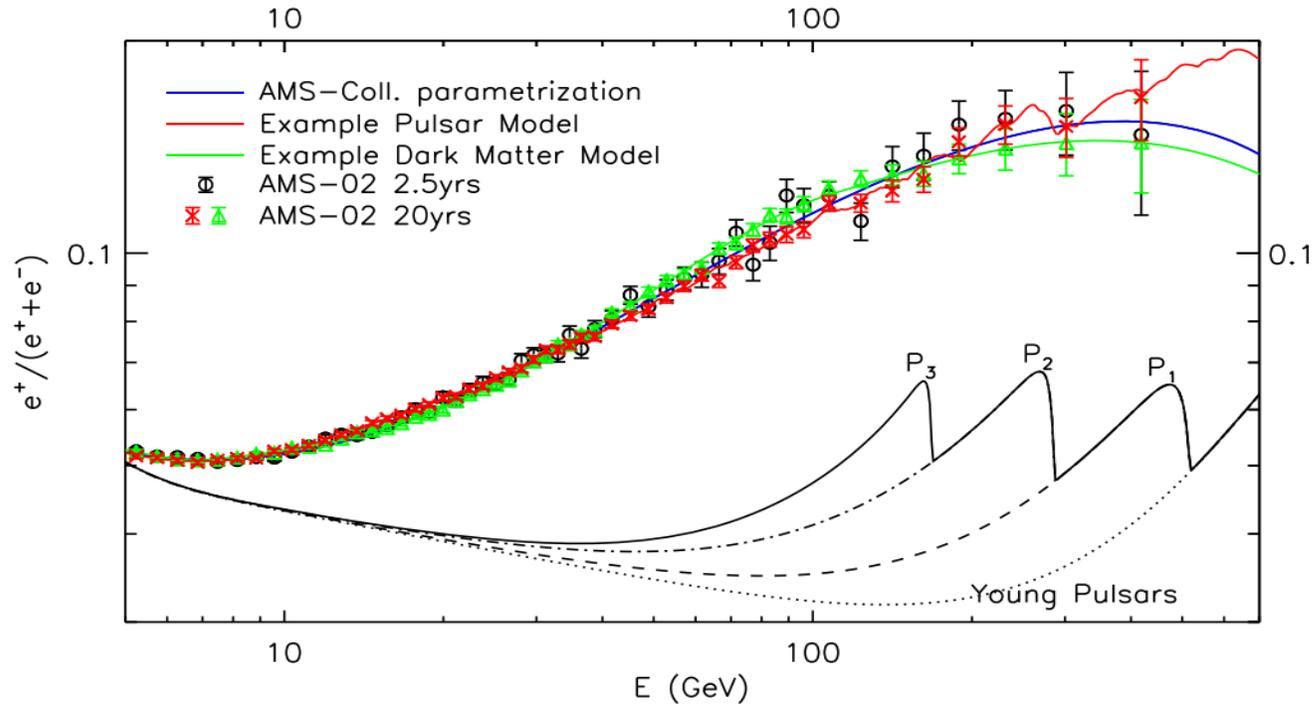
C1

SRD



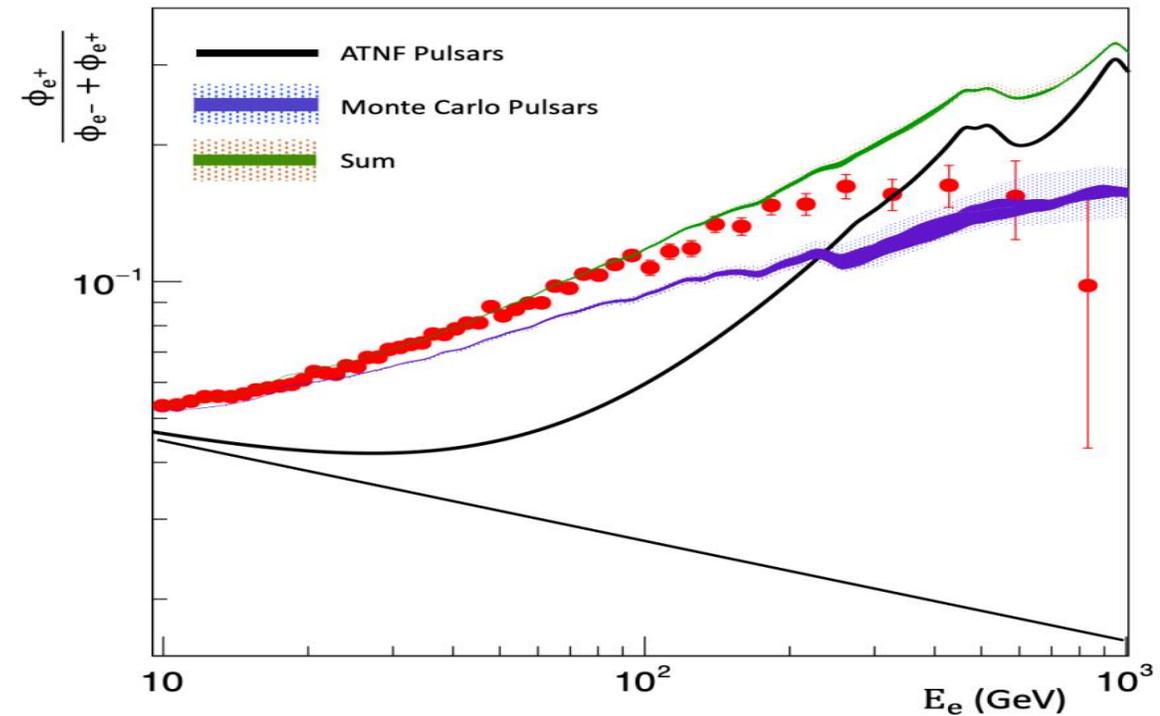
Some models

PHYSICAL REVIEW D 97, 123011 (2018)



Measurement of the proportion of positrons in the AMS-02 experiment and two example models: the Pulsar Model and the Dark Matter Model

arXiv:2205.05200v2 [astro-ph.HE] 16 Feb 2023



Proportion of positrons of cosmic radiation from pulsars

Photon spacing

