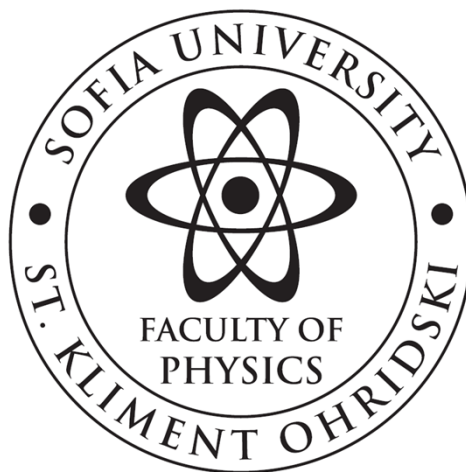




ИЗУЧАВАНЕ НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА НА ДЕТЕКТОРА AMS-02 КЪМ АНТИДЕУТРОНИ, РОДЕНИ В ПРОЦЕСА НА АНИХИЛАЦИЯ НА НЕУТРАЛИНО

Георги Василев, докторант по направление ФЕЧ-ВЕ

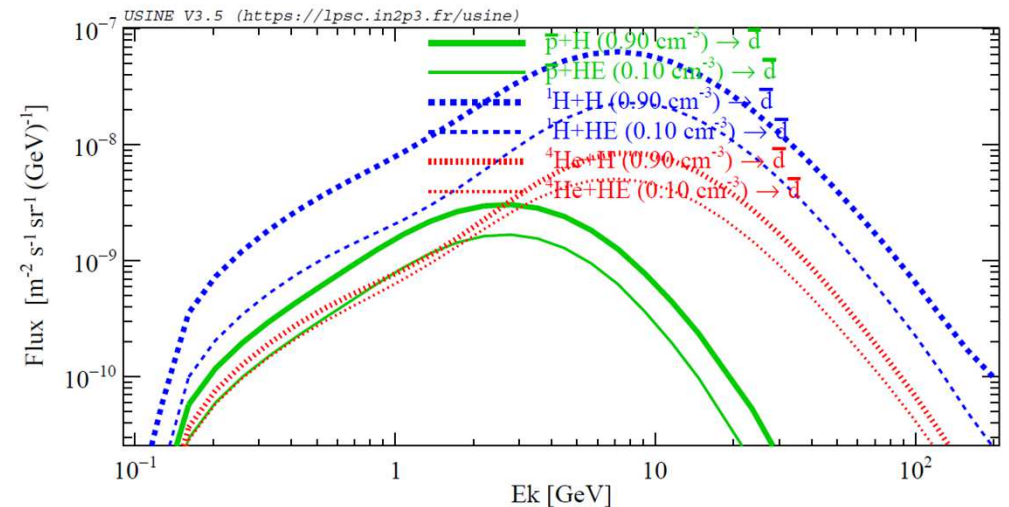
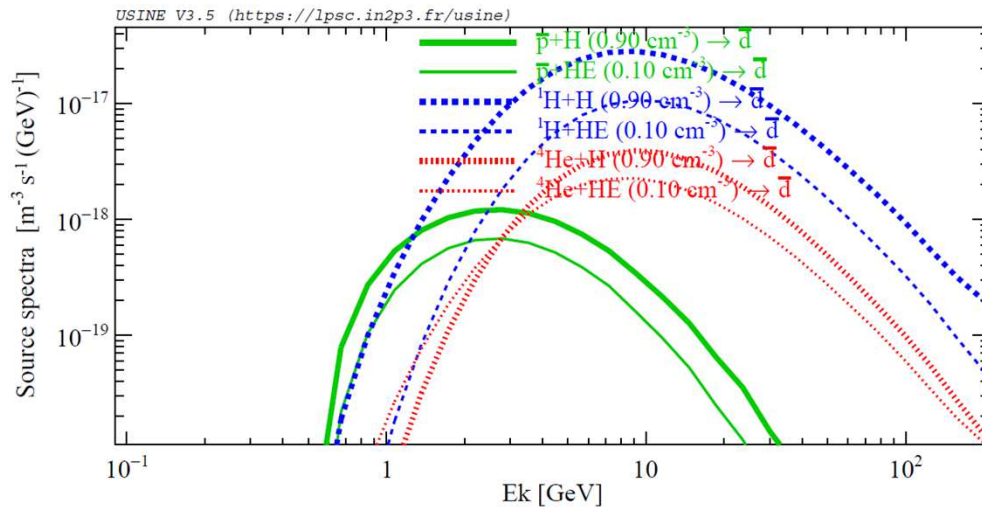
06.2025

СЪДЪРЖАНИЕ

- 1. Характеристики на космическите антидеутрони**
- 2. Детекторът на космически лъчи AMS-02**
- 3. Анализ на данни от AMS-02**
- 4. Резултати**

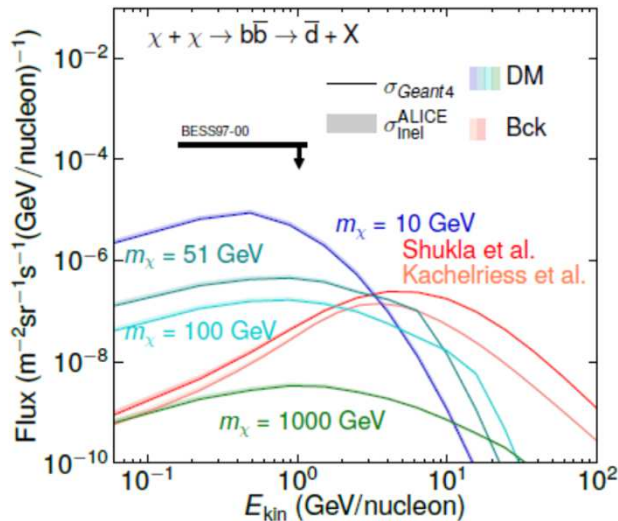
Характеристики на космическите антидеутрони

Космическите антидеутрони се раждат в процеси на взаимодействие на космически лъчи с междузвездната среда – **техният произход е изцяло вторичен**;
Характеристиките на потока антидеутрони са предмет на изучаване:



Антидеутроните с кинетична енергия под 1-2 GeV са изключително редки.

Характеристики на космическите антидеутрони

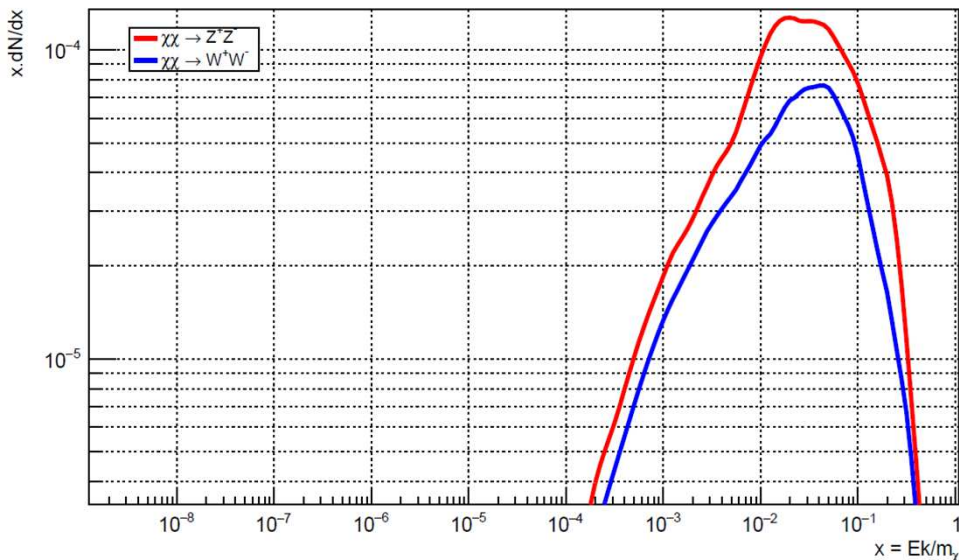


Serksnyte et al, 2022, Phys. Rev. D 105, 083021

Един от кандидатите за частица на тъмната материя е суперсиметричното неутрино;

Аниhilацията на неутрино може да доведе до формиране на първични антидеутрони;

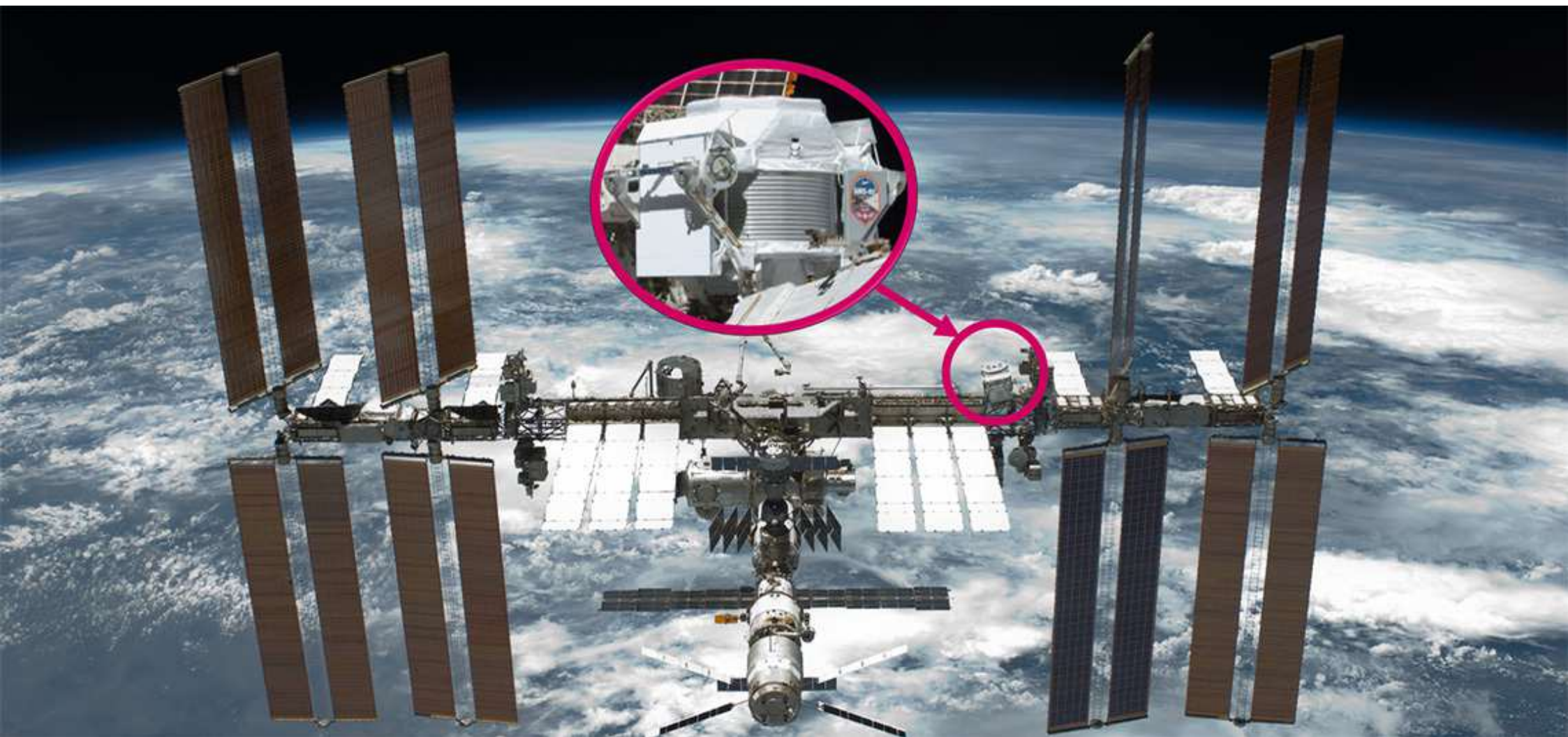
Аниhilацията се случва в покой, поради което антидеутрони биха се формирали в енергетичен диапазон под 1-1.5 GeV, където вторичният фон е слаб.



Следователно, откриването на дори само един антидеутрон в този енергетичен диапазон би бил силен довод за произхода му като продукт на аниhilация на неутрино, и оттам за същността на тъмната материя.

AMS-02 има чувствителност, позволяваща детектиране в този обхват.

Детекторът AMS-02



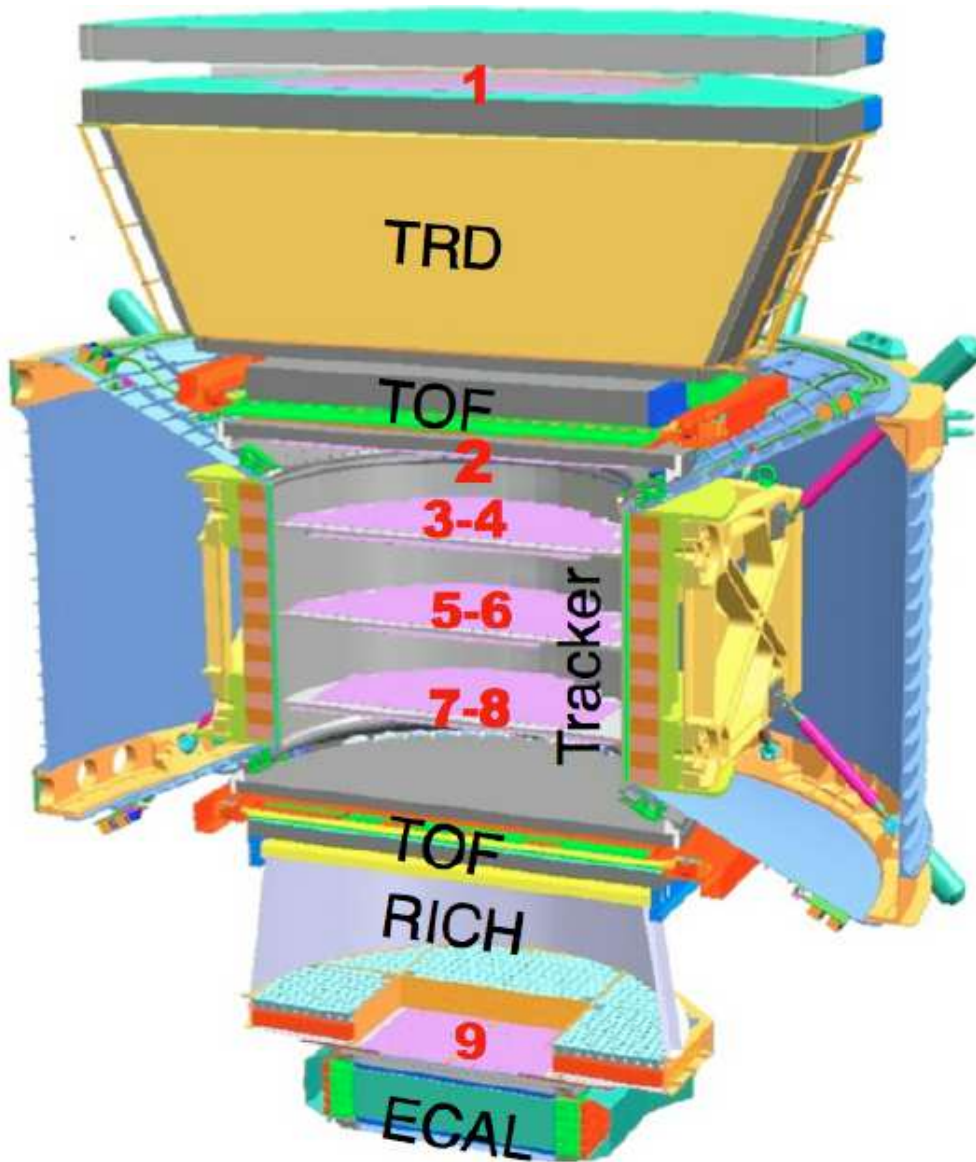
AMS-02 на борда на Международната космическа станция (ISS)
Източник: Колаборацията AMS

Детекторът AMS-02

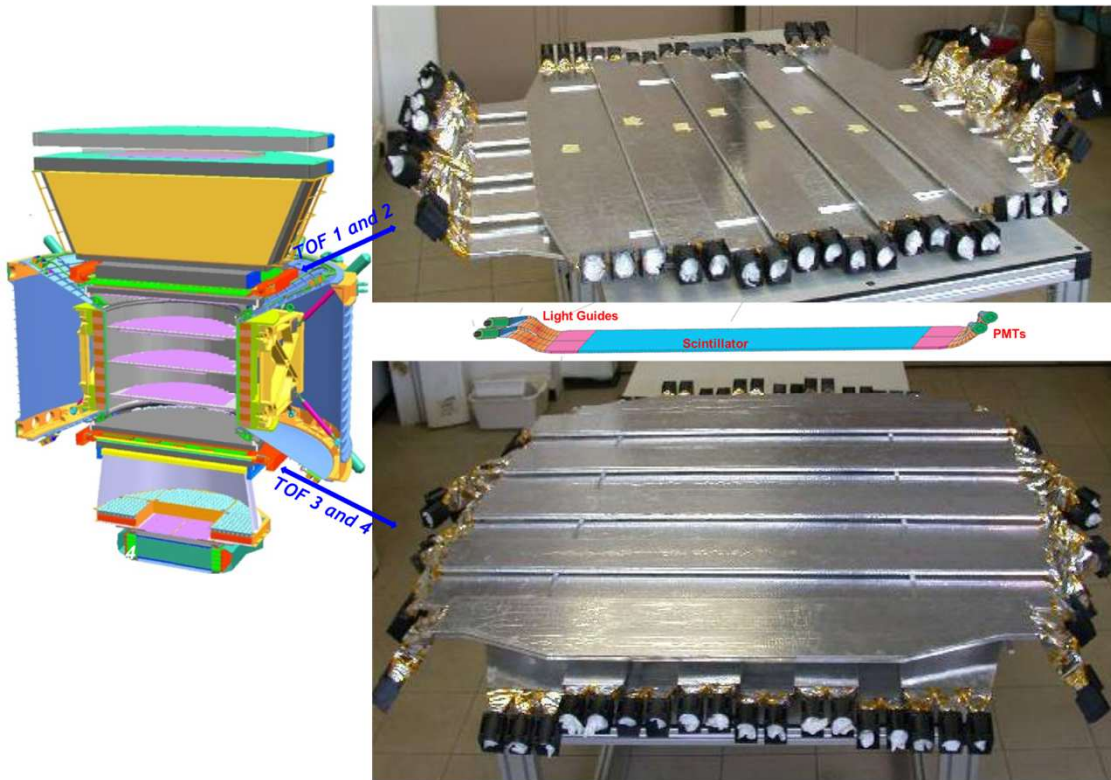
Високоточен магнитен спектрометър, инсталиран на ISS, за детектиране на космически лъчи в GeV-TeV диапазона

Основни компоненти:

- 1) Цилиндричен магнит (NdFeB)
- 2) Силициев тракер
- 3) Броячи на антисъвпадение (ACC)
- 4) Детектор на време на прелитане (TOF)
- 5) Детектор на преходна радиация (TRD)
- 6) Пръстенов Черенковски детектор (RICH)
- 7) Електромагнитен калоримертър (ECAL)



AMS-02 TOF

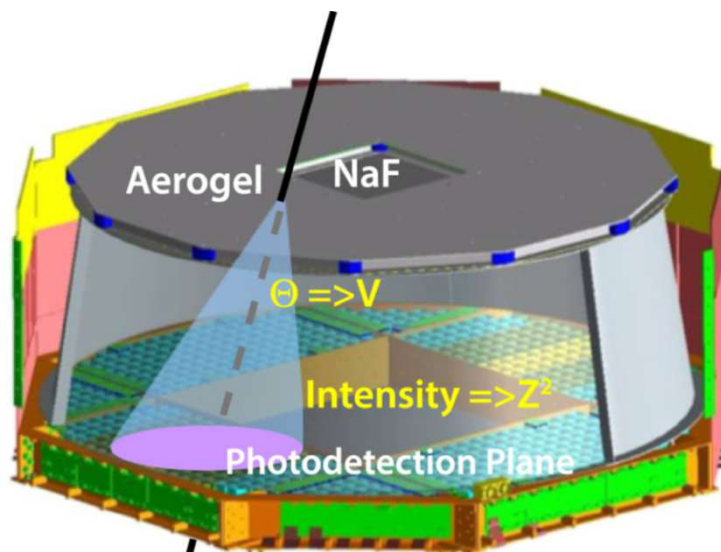


Определя посоката на движение, скоростта и заряда на частицата

- Състои се от 4 TOF равнини – 2 горе (UTOF), 2 долу (LTOF), непосредствено над и под постоянния магнит;
- Всяка се състои от съответно 8, 8, 10 или 8 сцинтилаторни броячи с 0.5cm надлъжно припокриване;
- Всеки брояч се състои от сцинтилаторна плоскост, отчитана от всеки край от по 2 или 3 фотоумножителя.

TOF системата дава тригерния сигнал за целия детектор.

Средната разделителна способност на всеки брояч е 160ps, съответстваща на прецизност 4% при реконструкцията на скоростта на $Z=1$ частици.



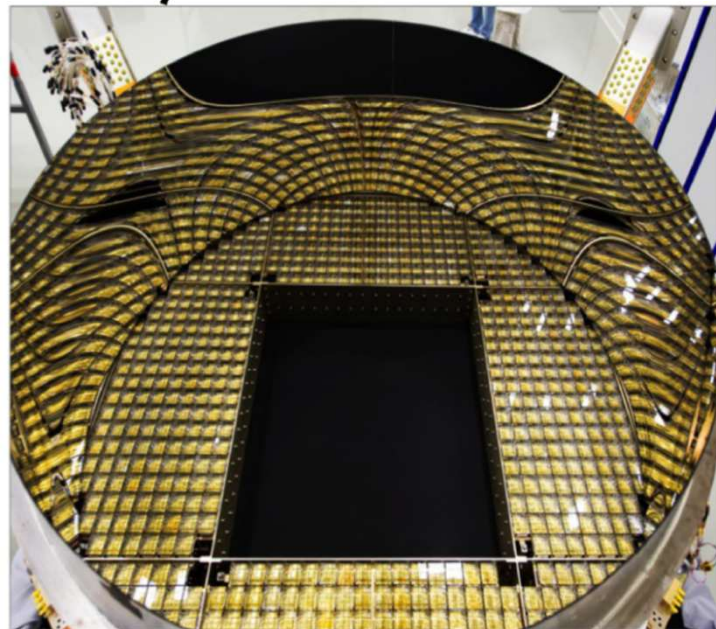
AMS-02 RICH

Определя скоростта и заряда на частиците

- Състои се от два радиатора – NaF и аерогел, обем за разпространение, обграден от високоотражателно огледало, и фотодетекторна равнина;
- Разположен непосредствено под LTOF и над слой L9 на тракера;
- Двата радиатора покриват различни диапазони на скоростта: NaF ($n=1.33$, за $\beta > 0.75$), Aerogel ($n=1.05$, за $\beta > 0.953$);

От конфигурацията на детектираните Черенковски фотони се постига реконструкция на скоростта с прецизност 1-2% за $Z=1$ частици.

Особеностите на антидеутронния сигнал го правят детектируем в RICH (NaF) и TOF.



Анализ на данни от AMS-02

Написан е код, анализиращ данни директно от /eos/;

Кодът за анализ работи както за реални, така и за симулирани данни;

Текуща статистика: ~6000 файла AMS събития; AMS MC за p/p- d/d-, e+/e

Резултати: .root файлове, събитията от които са преминали селекция, и съдържащи TTree само с нужните за анализа величини;

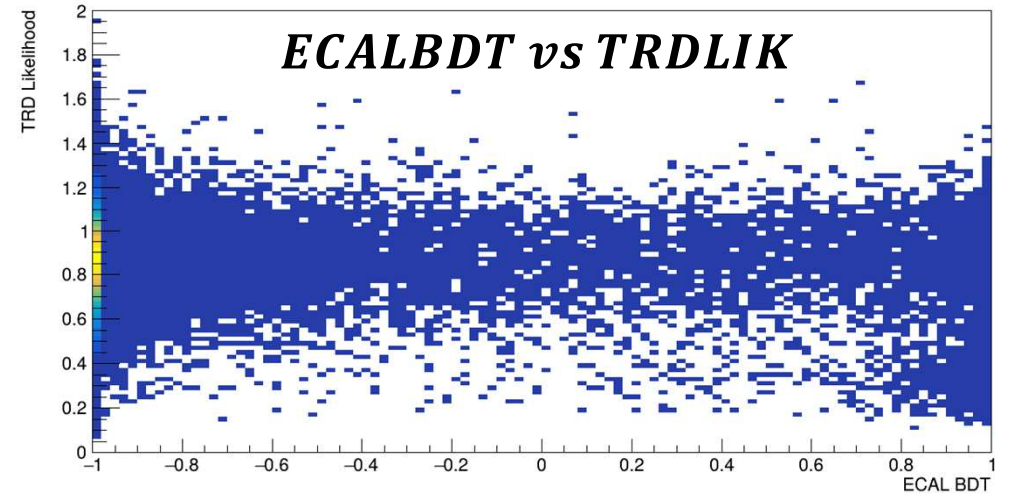
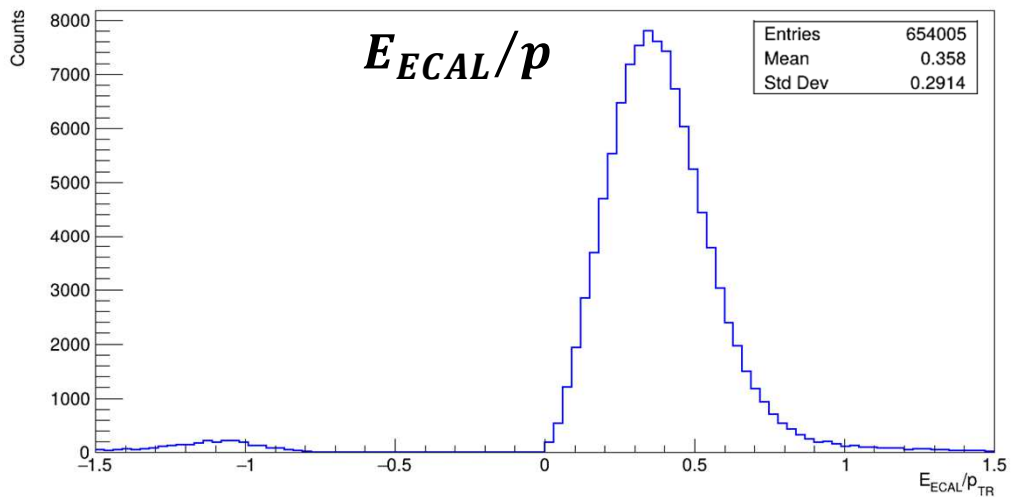
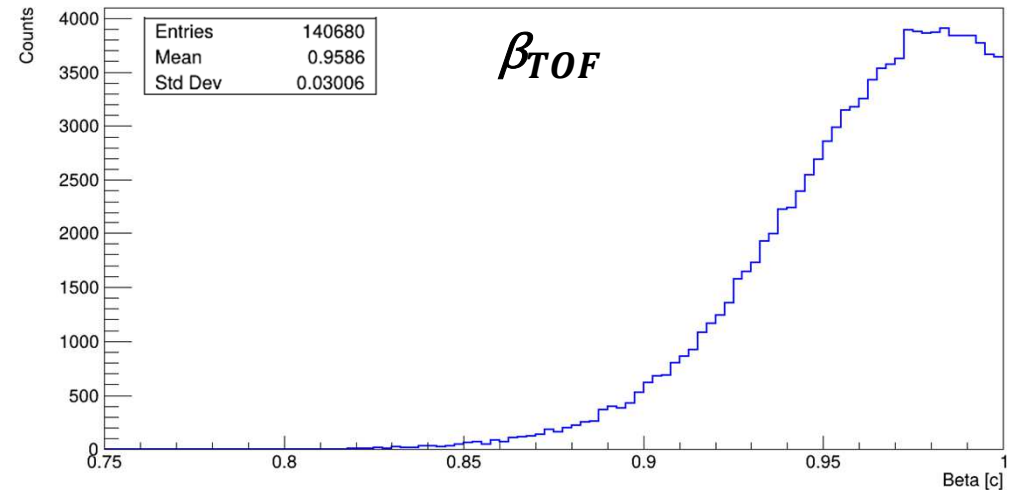
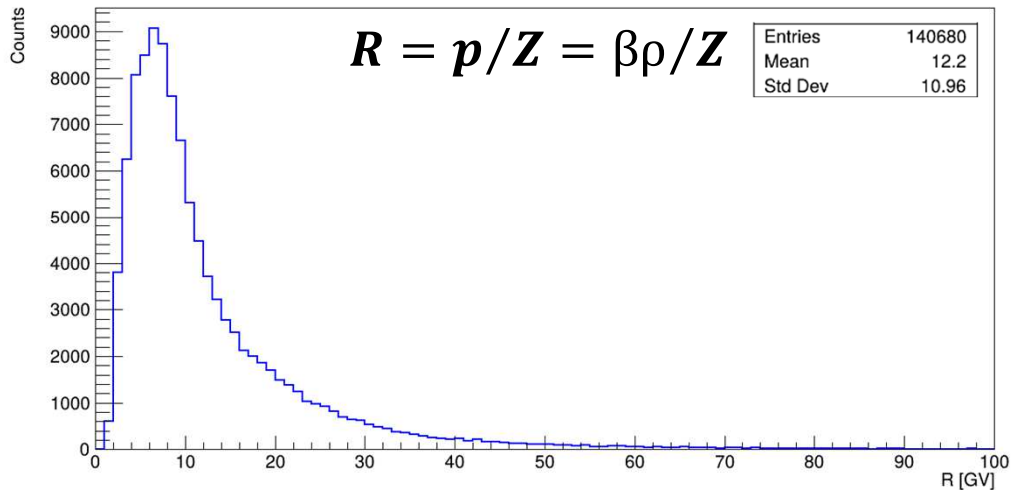
Стандартни селекционни критерии:

- RTI селекция: показатели на AMS детектора в текущата секунда – пространствена ориентация, местоположение, геомагнитен праг и т. н.
- Преминат Level1 тригер – активирани 4/4 TOF равнини;
- Незадействани ACC;
- *Алгоритъм на реконструкция на траекторията GBL Full-span: последователност от свързани прави, от L1 до L9;*
- Само надолу-движещи се частици с добре реконструирана скорост: $\beta > 0.4$ & $\beta < 1.0$ от TOF и RICH;
- Удари само по изолирани TOF броячи;
- Удари само в неприпокриващите се области на TOF броячите.

Тези стандартни критерии отбират само добре реконструирани събития и елиминират много от вторичните частици, породени при взаимодействие с материалите на детектора.

Резултати

За набор от 6000 файла реални данни:



Анализ на данни от AMS-02

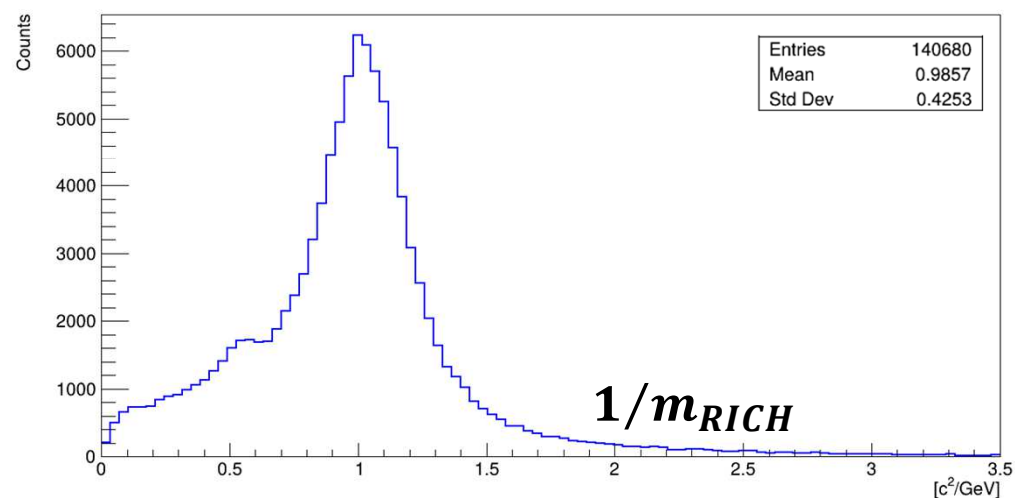
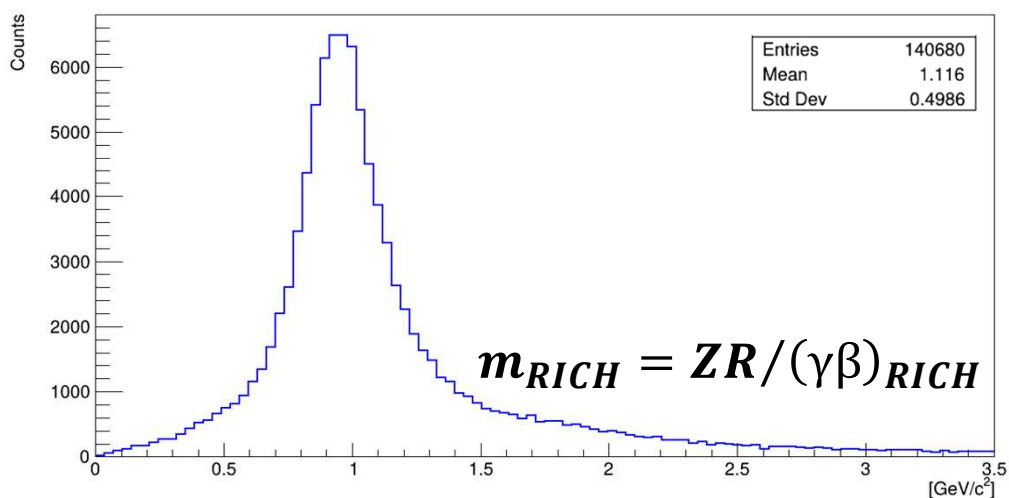
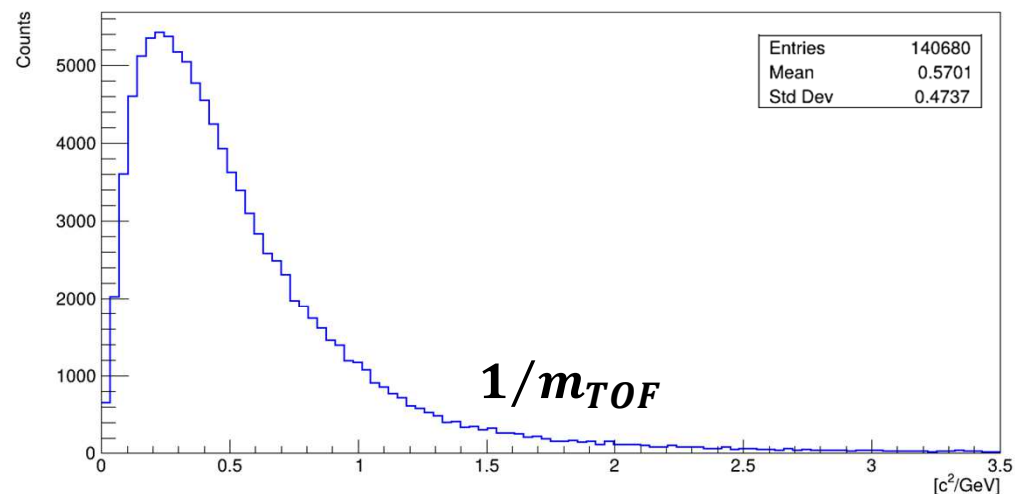
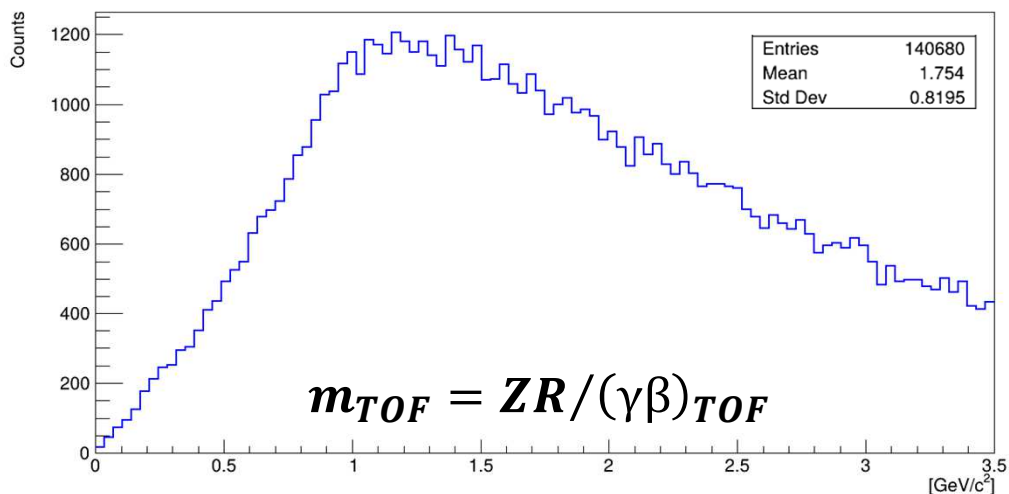
Следва селекция за $Z=1$ частици и елиминиране на вторични частици:

- Селекция по заряд: данни от TOF и тракера, вкл. от отделните им слоеве - L1, L9, UTOF, LTOF;
- Сегменти на траекторията през TRD track: най-много 4;
- Реконструкция на скоростта в RICH по два алгоритъма: RichRing и RichRingB; съответствие между получените резултати ($\text{BetaConsistency} < 0.1$);
- Поне 3 RICH PMT, формиращи пръстена за събитието;
- Пръстенът да е далеч от неизползвани задействани PMT ($\text{UDist} < 0.3$);
- Вероятност на Колмогоров за качество на пръстена $\text{KP} > 0.01$;
- Време на прелитане през TOF $< 6\text{ns}$.
- $\text{ECALBDT} < -0.6$ && $\text{TRDLIK} > 0.6$

* TRDLIK не работи за симуирани антипротони и антидеутрони.

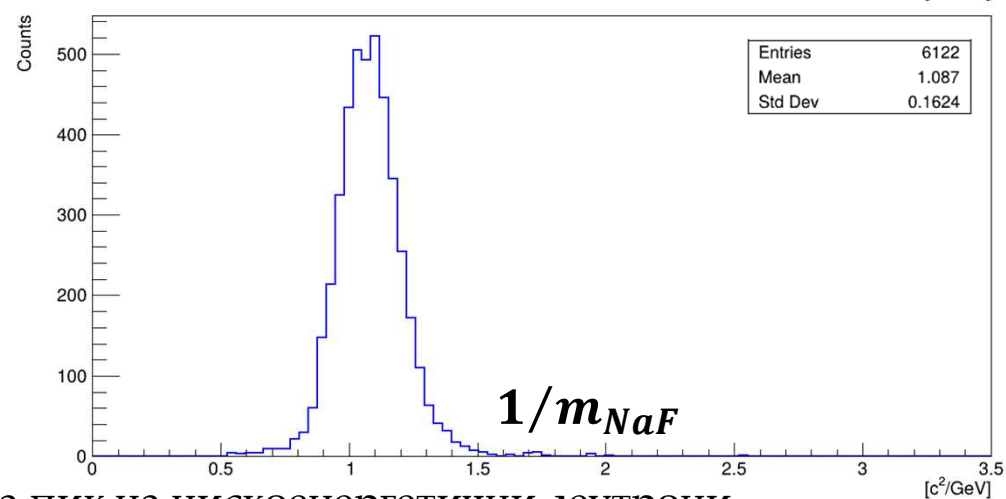
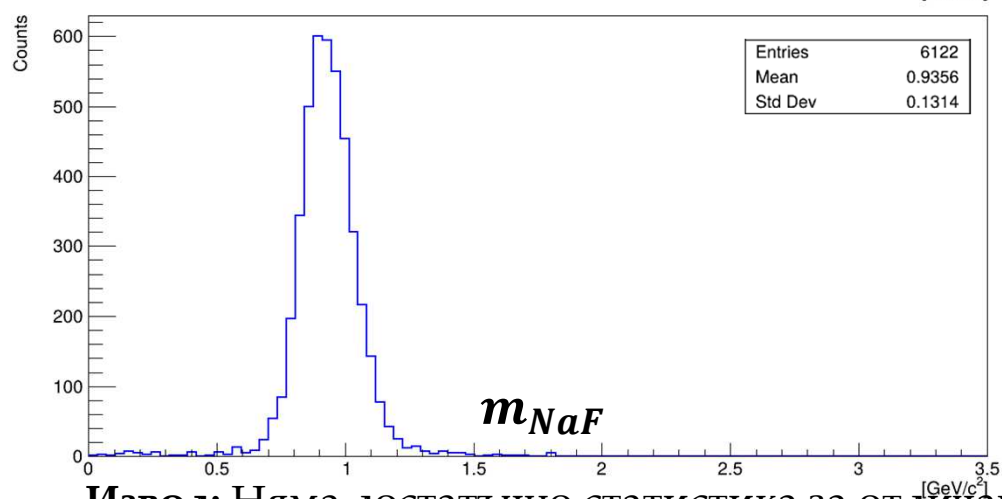
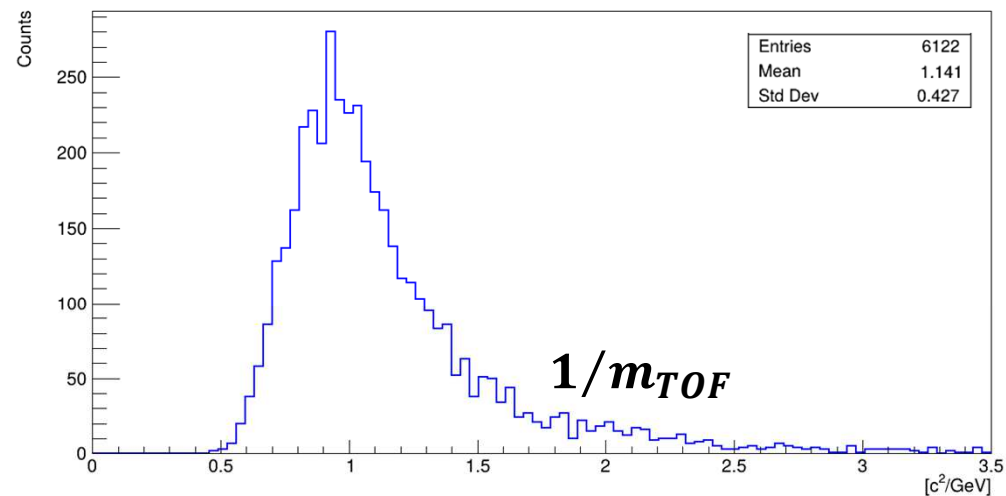
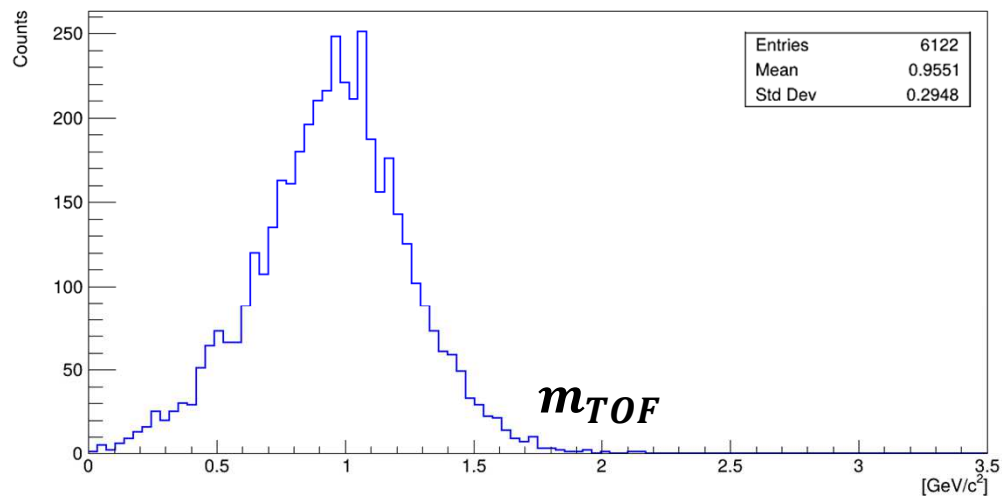
Резултати

Тъй като античастиците са много по-редки, статистиката за $R < 0$ е твърде малка. Поради това тук резултати са показани само за $R > 0$.



Резултати

При ограничаване на импулса до $<3\text{GeV}$:



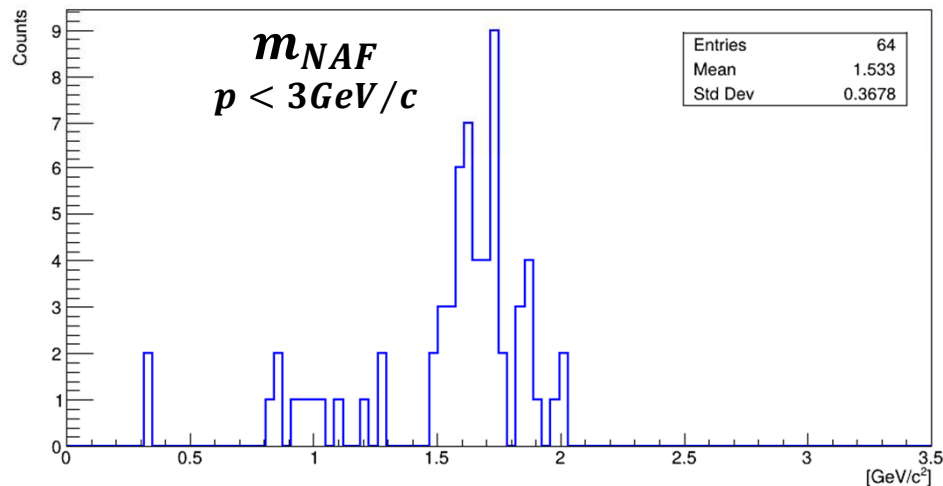
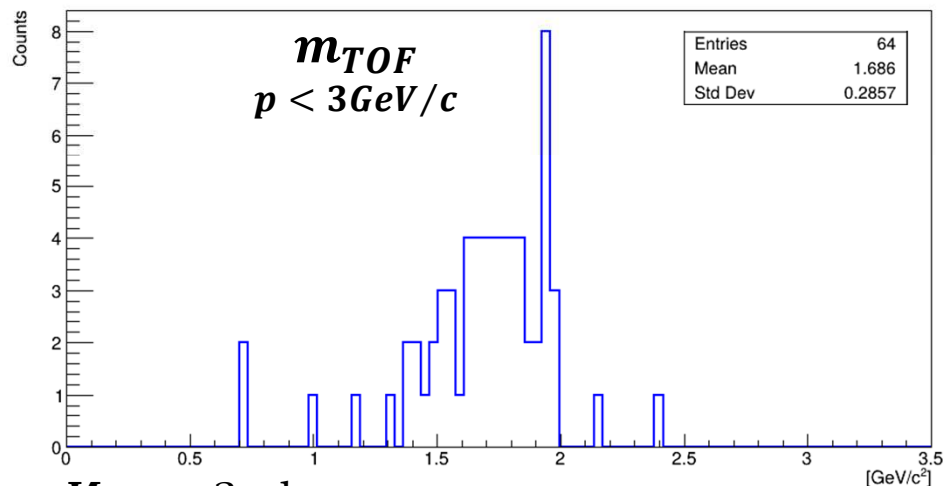
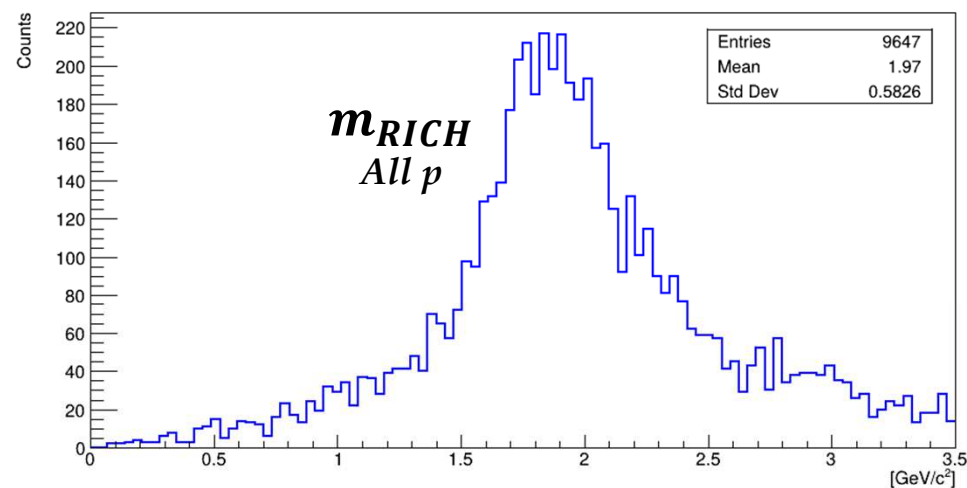
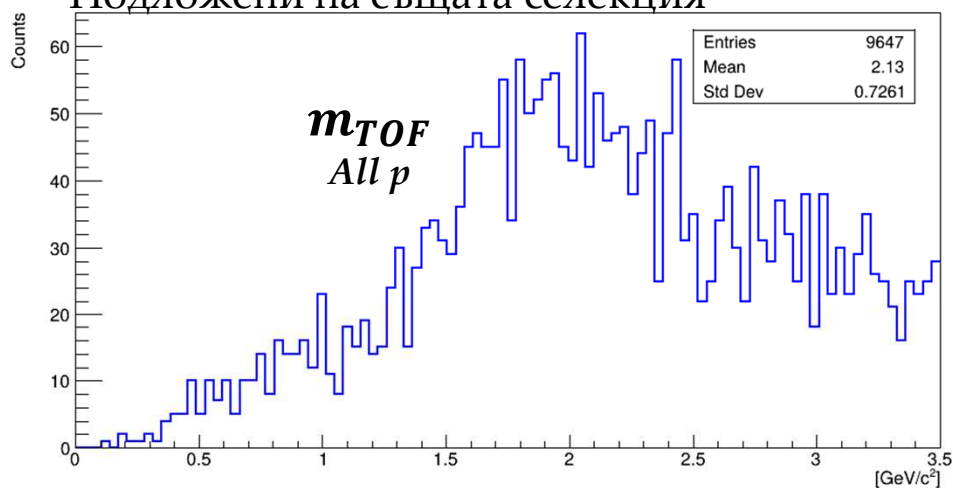
Извод: Няма достатъчно статистика за отличаване на пик на нискоенергетични деутрони.

Антидеутроните биха били още по редки -> преминава се към симулации.

Резултати

Симулирани събития: Антидеутрони в импулсен диапазон $p > 0.2$; $p < 1000$ GeV;

Подложени на същата селекция

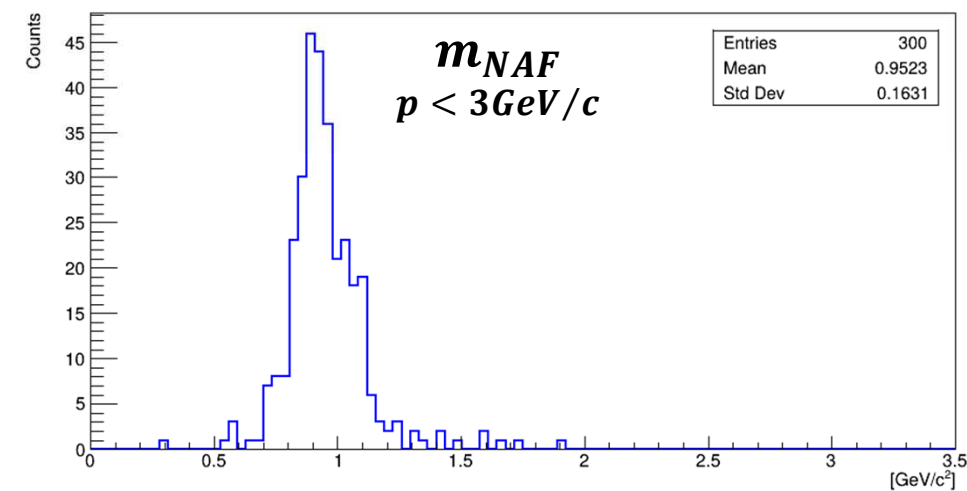
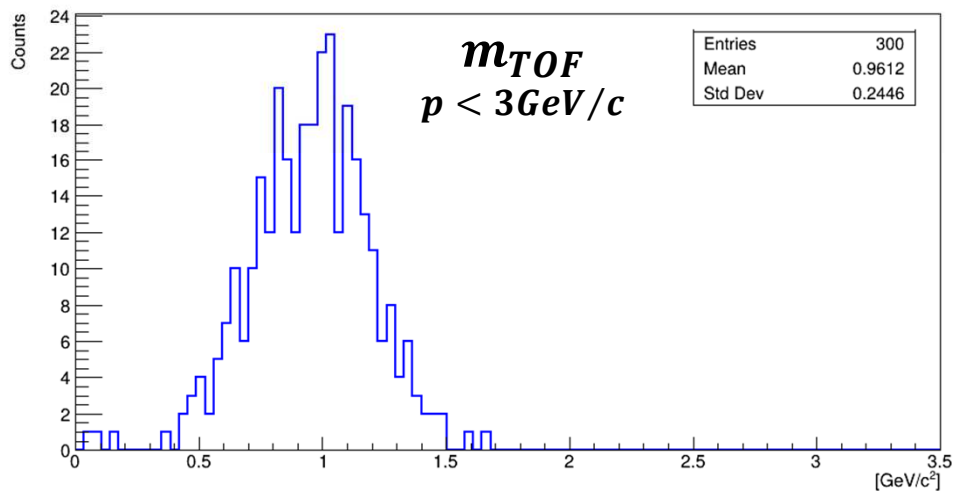
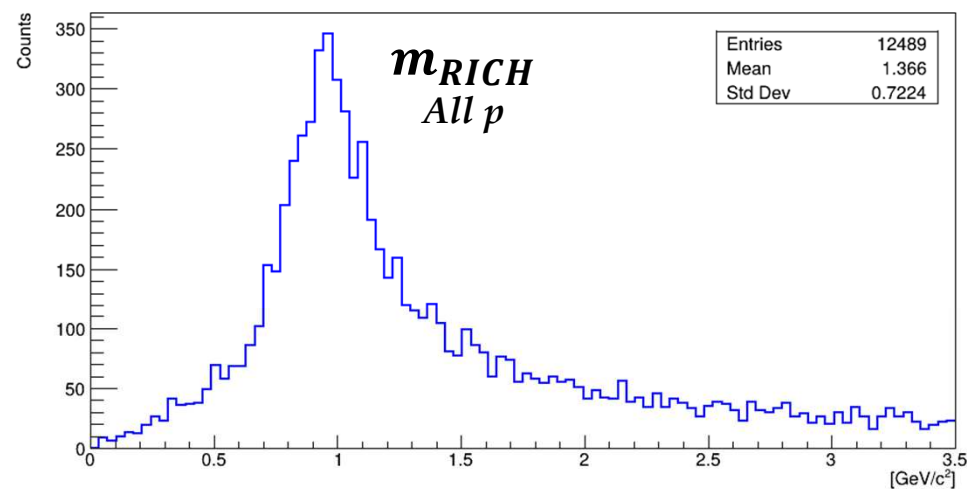
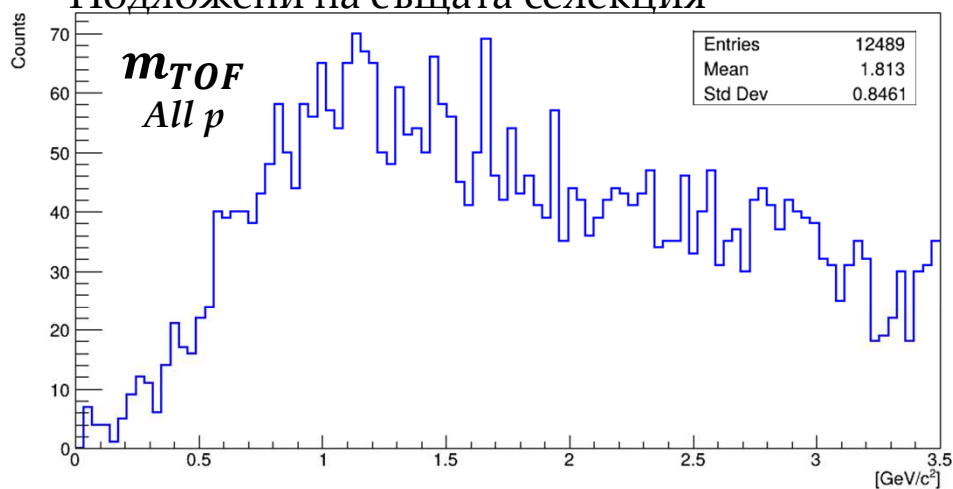


Извод: За формиране на по-ясни пикове трябва да се проведе отделна симулация само за нискоенергетични антидеутрони.

Резултати

Симулирани събития: Антипротони в импулсен диапазон $p > 0.2$; $p < 1000$ GeV;

Подложени на същата селекция



Резултати

Допълнително се работи по обучаването на многослоен персептрон (MLP) за разграничаване на частици със заряд $Z=1$.

Такъв вече е обучен за разделяне на протони от деутрони:

Georgi Vasilev, Galina Vankova-Kirilova, Galina Bozhkova,

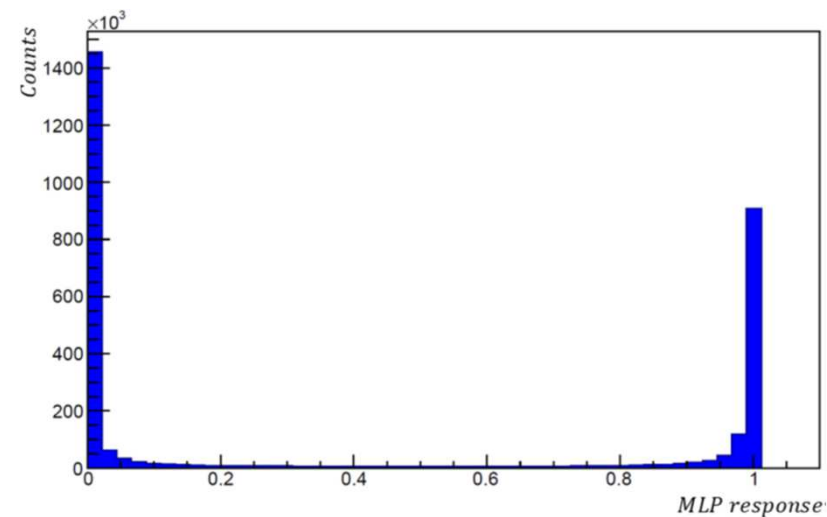
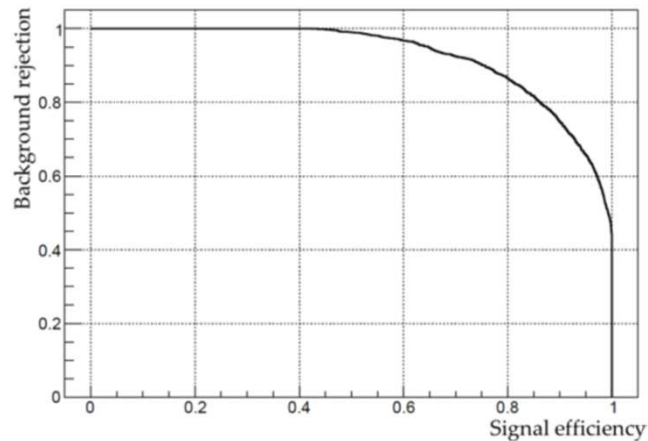
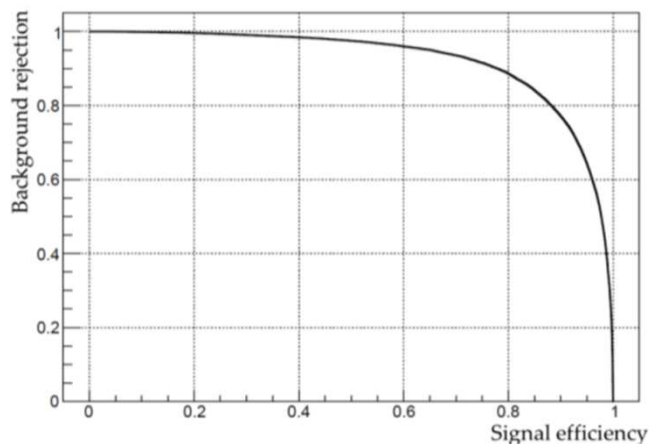
Optimization of singly-charged particles identification with the AMS02 RICH detector by a machine learning method,

Astroparticle Physics, Volume 171, September 2025, 103134

Метод на работа:

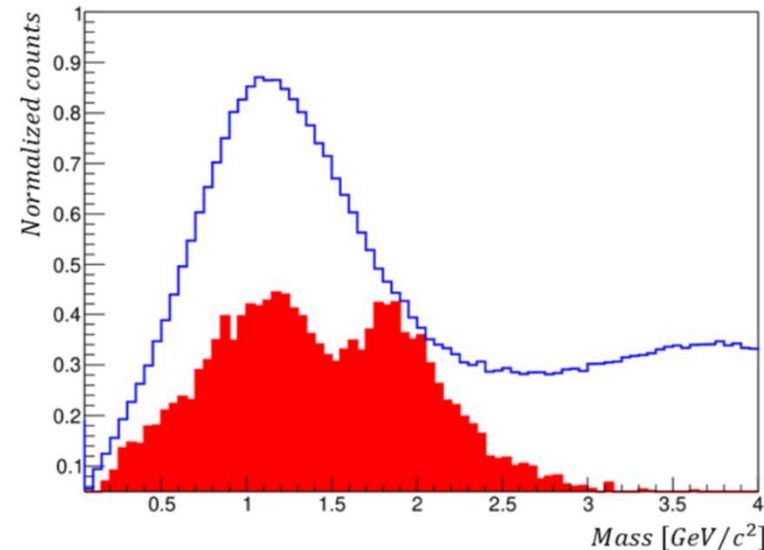
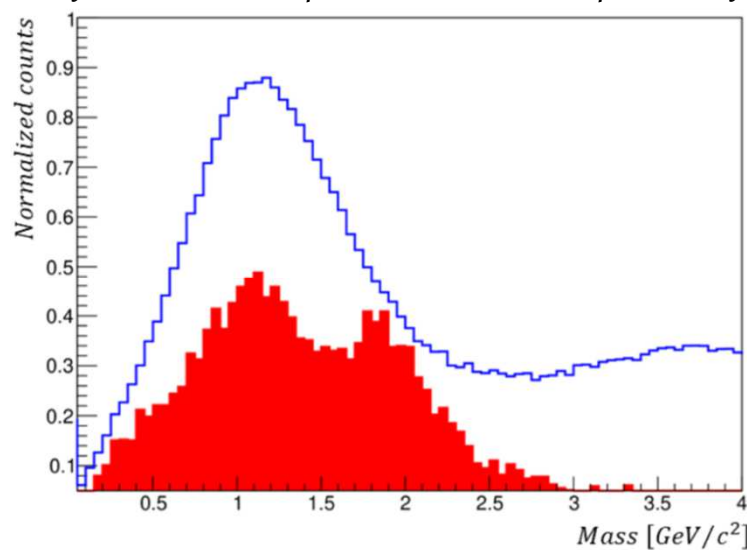
- За обучението е използван набор от симулационни данни – протони и деутрони, създадени от колаборацията;
- Направена е селекция на променливи, чувствителните на източниците на фон и сигнал – скорост и време на прелитане, качество на реконструкция на траекторията, енергетични загуби и др.;
- От обучението е получен трениран модел – файл, съдържащ архитектурата на MLP, променливите, активационните функции и други вътрешни параметри;
- Тренираният модел е приложен върху извадка от реални данни без наложена селекция.

Резултати

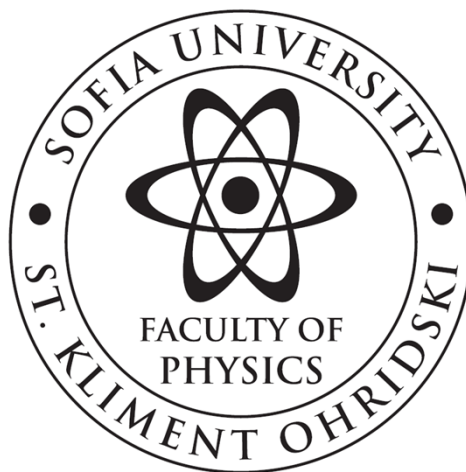


Криви на ефективност за NaF и RICH
>80% ефективност при >80% елиминирание на фона

Разпределение на сигнал и фон (NaF)



Резултати от прилагането на класификатора: оформяне на ясен деутронен пик в масовото разпределение



БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО!