

Анализ на мюонния поток в експеримента **SND@LHC**

източници и характеристики

Ивайло Дионисов

Атестационен семинар

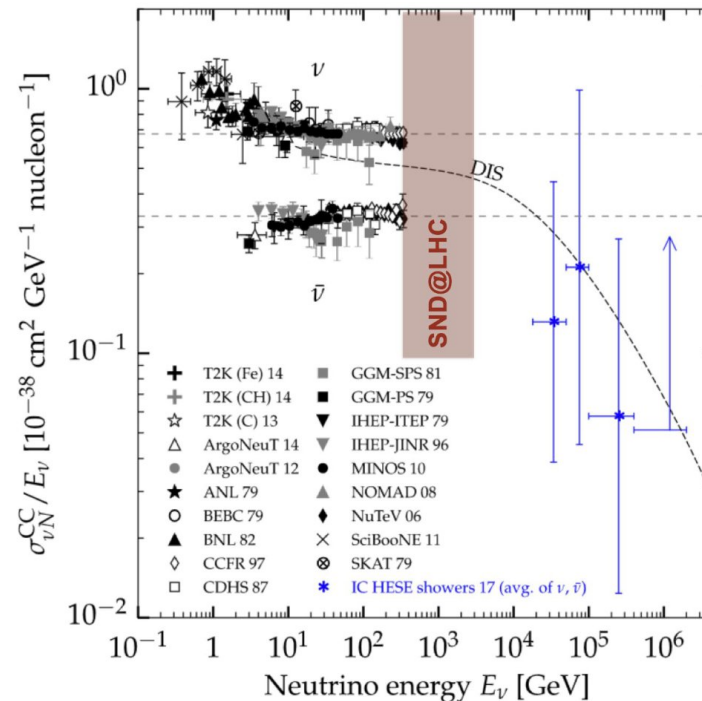
4 юни 2026

Неутрина при LHC

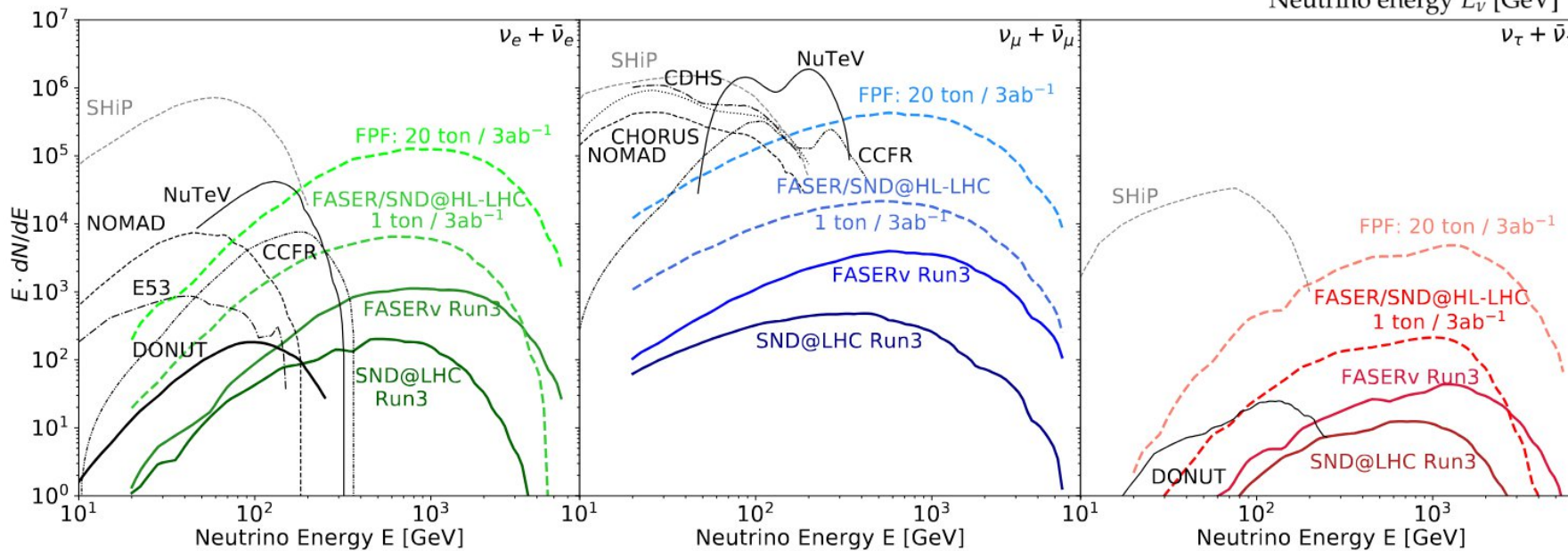
LHC произвежда най-високоенергетичните неутрина създавани от ускорител!

➤ Мост между ускорителната физика и високоенергийната неутринна астрономия.

[arXiv:2501.10078v1](https://arxiv.org/abs/2501.10078v1)



PRL 122 (2019) 041101



SND@LHC (*Scattering Neutrino Detector at the LHC*)

На 480 м от ATLAS – защитен от 100 м скала и магнитната система на LHC.

Научна програма

Неутринни взаимодействия

- Измерване ν взаимодействия в неизследван \sim TeV енергиен диапазон
- Наблюдения на ν_τ

Лептони в слабите взаимодействия

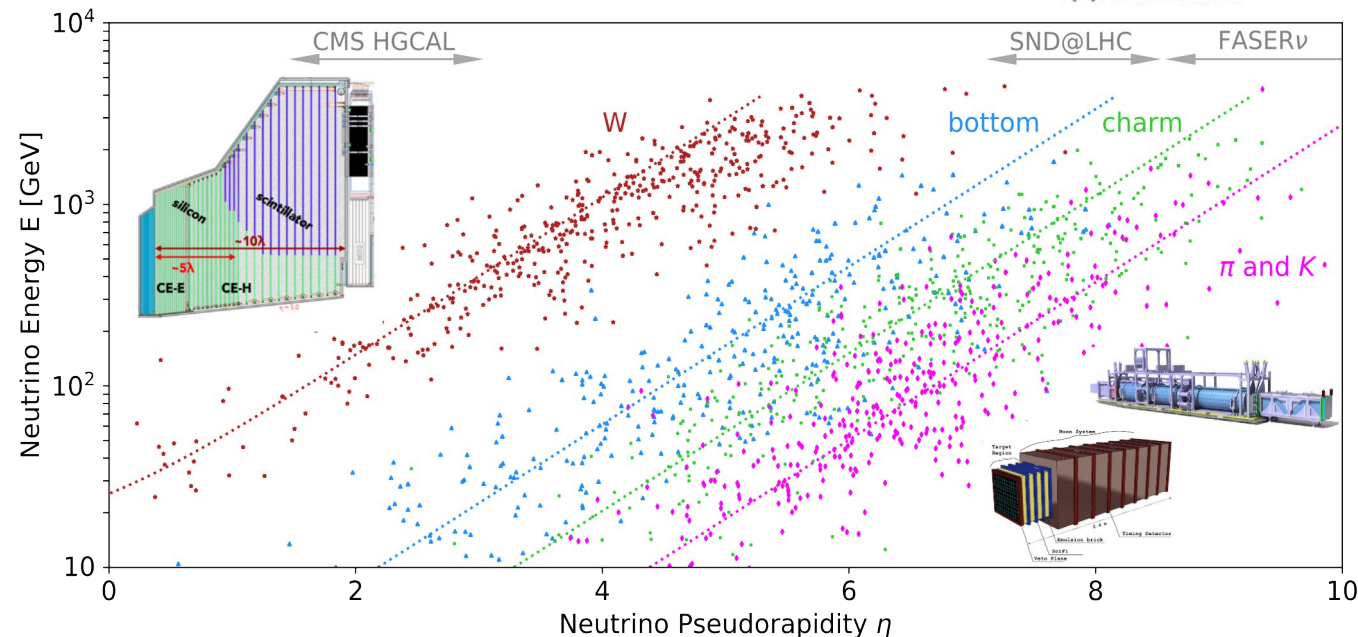
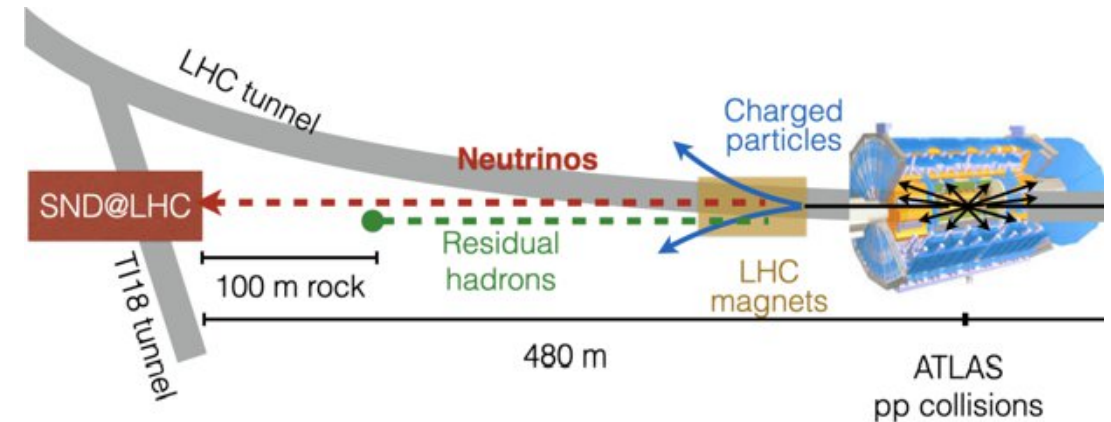
- Различаване на трите аромата \rightarrow тест на универсалността на ароматите (LFU)

Силни взаимодействия (QCD)

- Подбор на неутрина от разпади на c -кварки \rightarrow Измерване на продукцията на чаровни кварки в предно направление ν_e

Отвъд стандартен модел (BSM)

- Търсене на нови леки частици, които се разпадат или разсейват в обема на детектора.



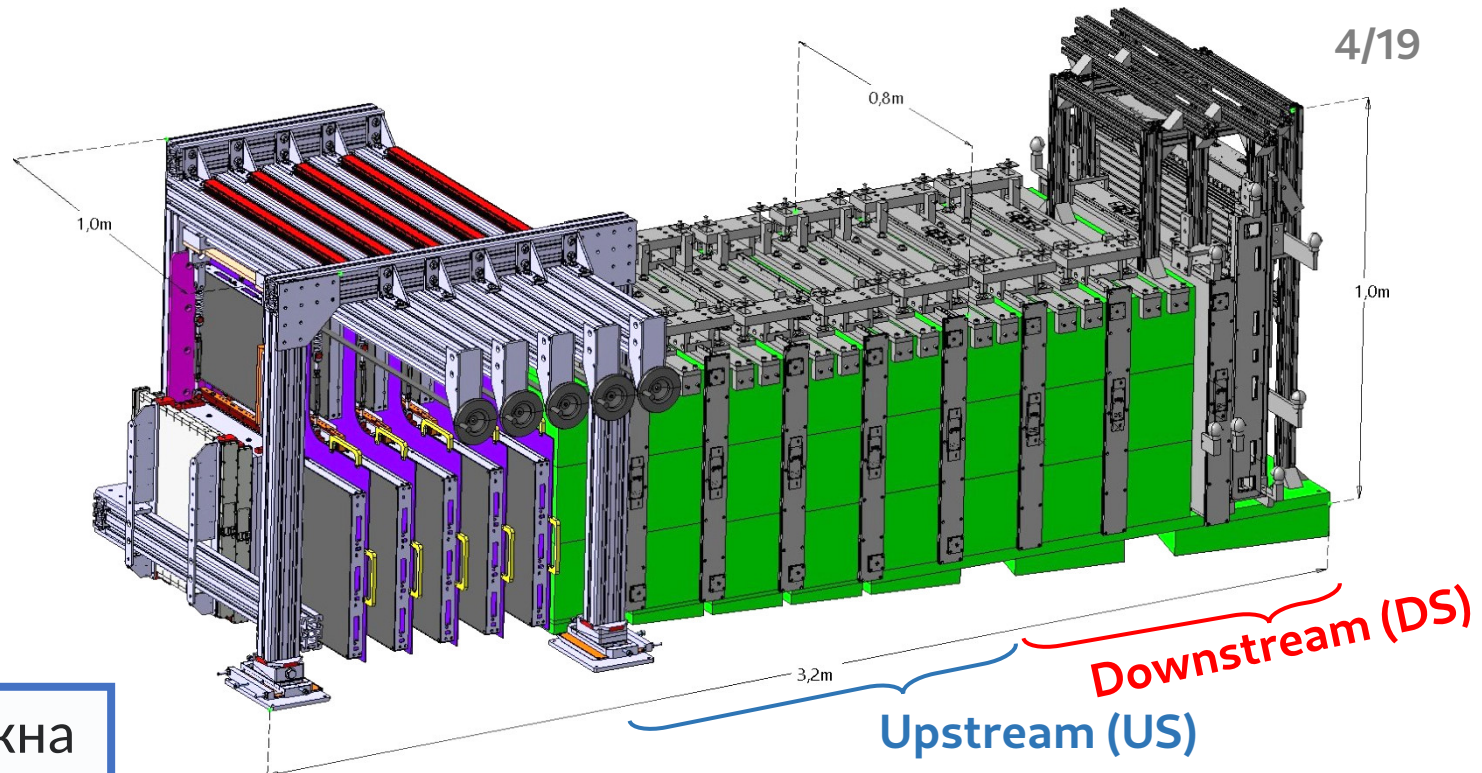
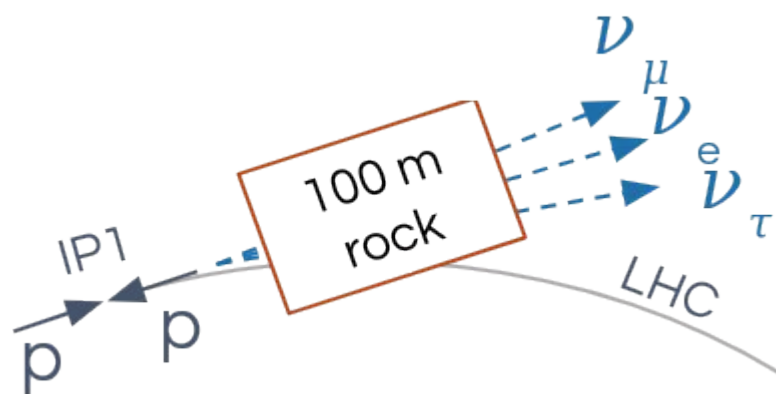
Детектор

Вето система [JINST 20 P07011](#)

— 2 (2022 - 2023) / 3 (2024 -)
сцинтилационни равнини.

Мишена, vertex детектор и ECAL

- 830 кг волфрамова мишена
- Пет стени x 59 слоя емулсии
- + пет станции от сцинтилационни влакна
- $84 X_0$, $3 \lambda_{int}$



Off-axis: $7.2 < \eta < 8.4$

Подбор на неутринен поток с чаровен произход.

HCAL и мюонна система

- Осем 20 см Fe блока + сцинтилационни равнини.
- Последни 3 равнини с по-финна разделимост.
- $9.5 \lambda_{int}$

НОВО от 2025: Равнина от дрейфови тръби.

Измерване на мюонния поток

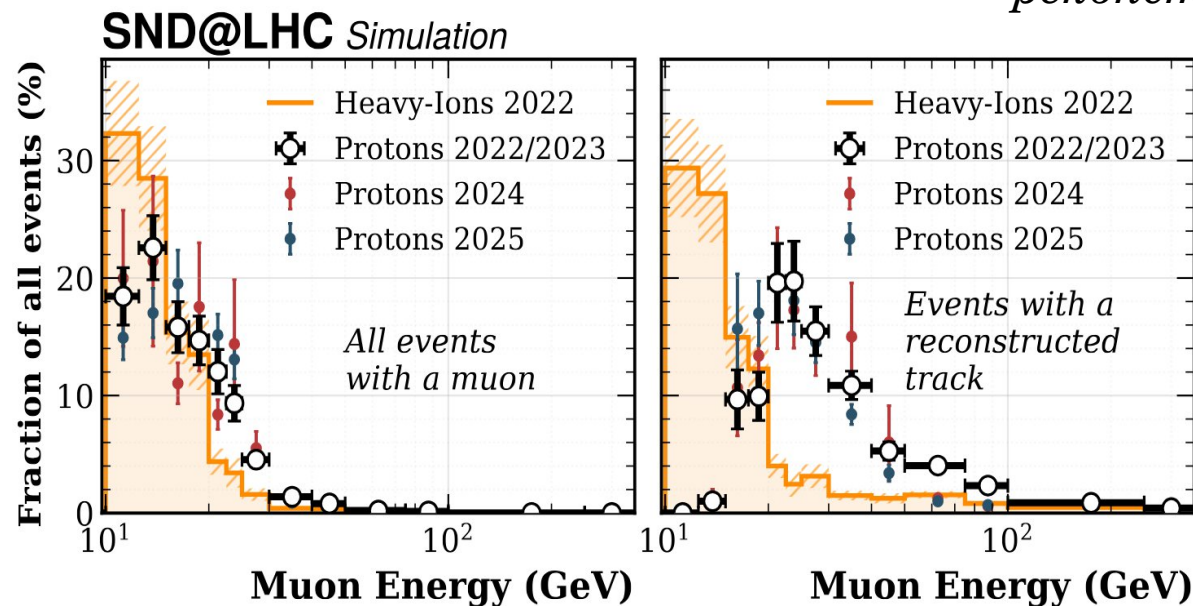
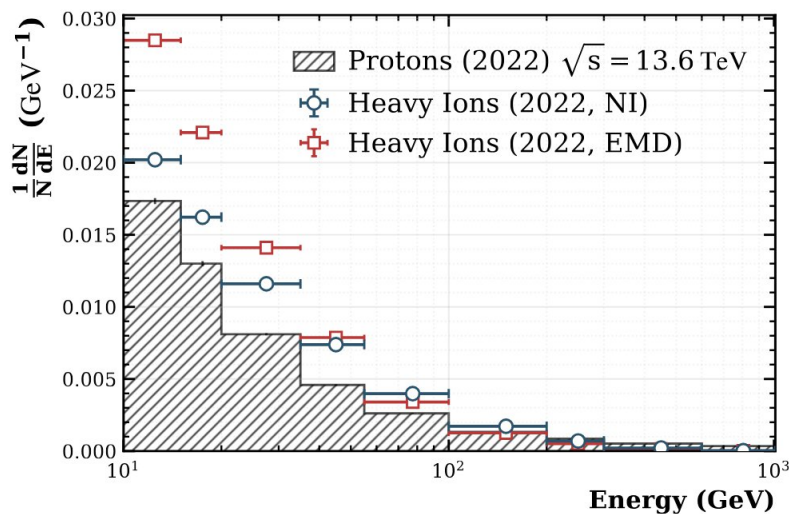
Повечето събития в SND са на преминаващи мюони

- Оценка на фона — Доминиращият фон за неутринните СС взаимодействия в SND.
- Оптималния цикъл за подмяна на емулсионните филми.
- Реконструкция на мюонни следи при различни енергии
- Анализ на LHC средата

Брой мюонни следи

$$\Phi_{\mu} = \frac{N_{tracks}}{A \cdot \mathcal{L}_{int} \cdot \epsilon}$$

Работна площ → A
 Интегрирана светимост → \mathcal{L}_{int}
 Ефективност на реконструкция → ϵ



Използвани данни

- От протонни (pp) и йонни (PbPb) сблъсъци през 2023–2025.
 - **Времева зависимост на потока**
 - Промяна в **настройките на операция на LHC** през годините
- Референтни pp данни (ppRef) от 2024
 - $\sqrt{s} = 5.36 \text{ TeV}$ и настройки на ускорителя като на Pb-Pb
 - **Сравнение PbPb-to-ppRef** за по-добро разбиране от къде идва разликата в мюонния спектър
 - **Сравнение pp-to-ppRef** за по-добро разбиране на разликата в енергията на сблъсъците и различните настройки на LHC

Реконструкция на мюонни следи в SND@LHC

Намиране на следи (Hough Transform)

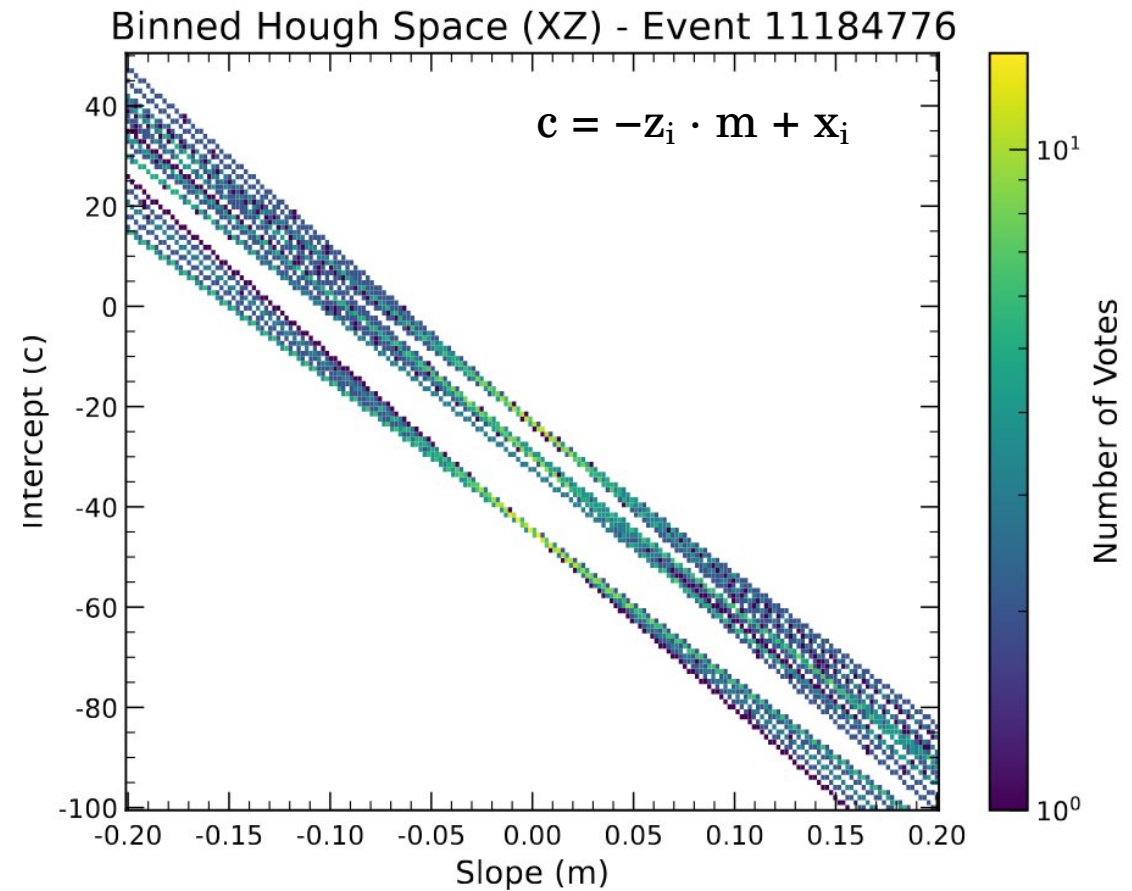
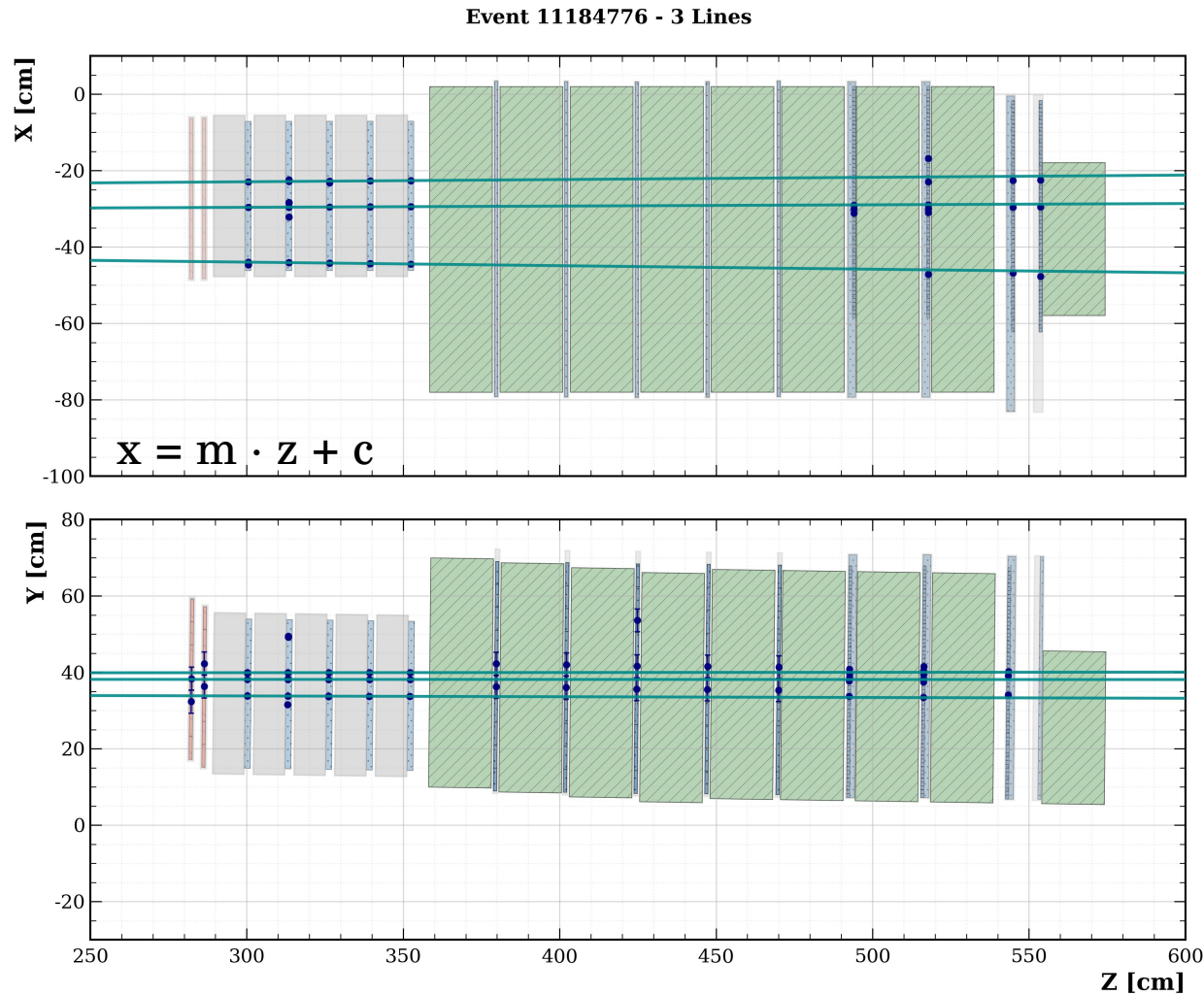
- **Трансформация** — Всеки “hit” от детектора се картографира като крива в параметричното пространство (Hough space).
- **Гласуване** — Всяка крива дава вот за всички клетки (bins) от Hough пространството, през които преминава.
- **Идентификация** — Клетките с най-много натрупани гласове индикират наличието на права линия, а хитовете, допринесли за тях, се групират в кандидат-трак.

Реконструкция

- **Процес** — Дефинира се прозорец около кандидат-линията за включване на допълнителни хитове.
- **Калман Филтър** (чрез пакета Genfit)

Реконструкция на мюонни следи в SND@LHC

Разпознаване на събития с три мюона чрез Хъф трансформации



Ефективност на реконструкция

Tag-and-Probe — Предсказване на очаквани следи в единия тракер (event tagging for SciFi/DS) чрез екстраполация от другия (DS/SciFi).

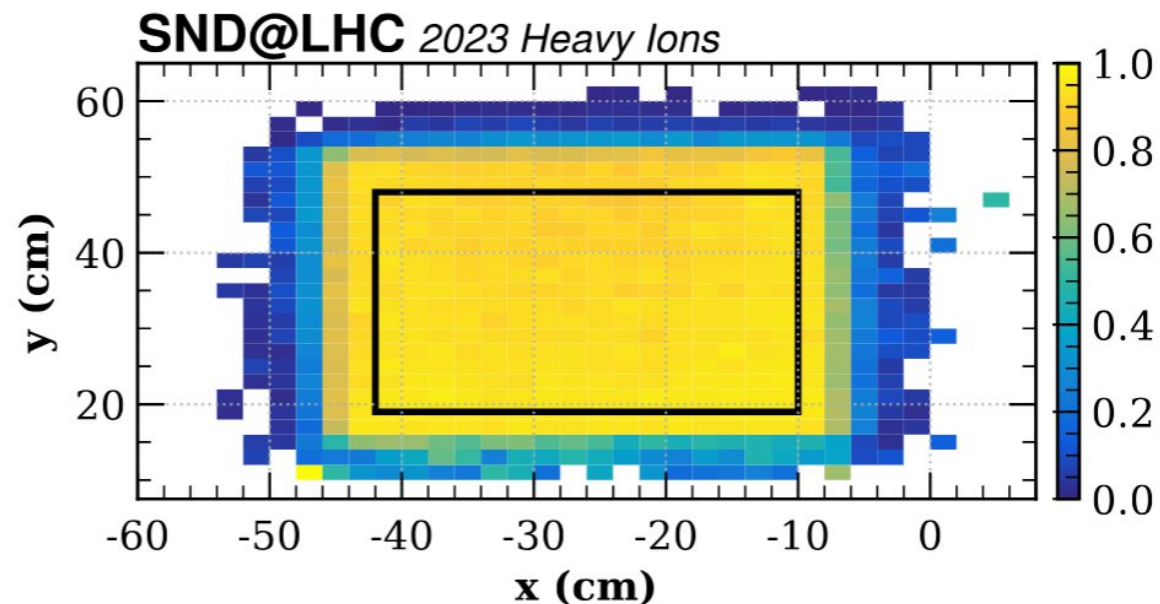
Критерий за съвпадение (Matching) — Успешно сдвояване на тракове (SciFi и DS) се дефинира при пространствено разстояние ≤ 3 cm в предефинирана референтна равнина.

Работна площ — Отговаря на централната $31 \times 31 \text{ cm}^2$ площ с равномерна ефективност от референтната равнина.

Ефективност на реконструкция — Среднопретеглена стойност спрямо локалната плътност на траковете в работната площ.

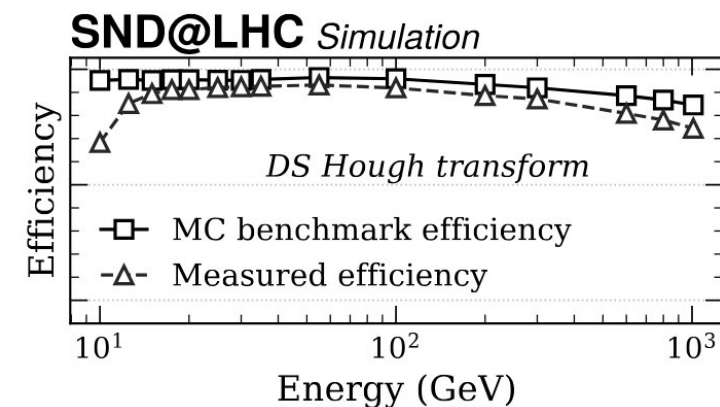
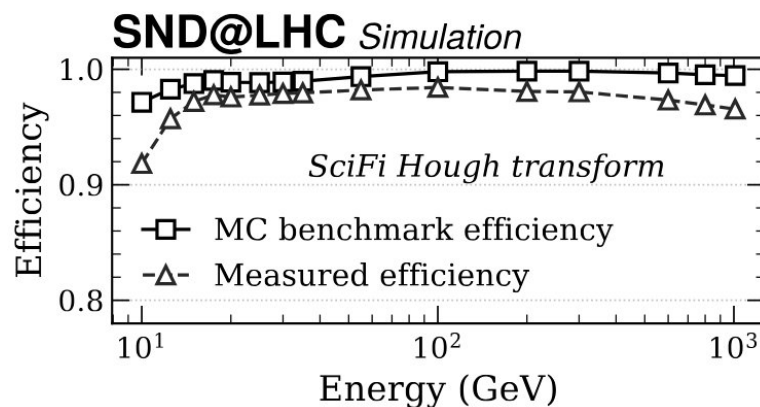
Ефективност на реконструкция

	SciFi Efficiency	DS Efficiency
<i>2023 Data</i>		
Protons	0.949 ± 0.009	0.932 ± 0.012
Heavy Ions	0.929 ± 0.018	0.894 ± 0.029
<i>2024 Data</i>		
Protons	0.911 ± 0.011	0.922 ± 0.013
Heavy Ions	0.857 ± 0.016	0.853 ± 0.021
<i>2025 Data</i>		
Protons	0.922 ± 0.008	0.924 ± 0.014
Heavy Ions	0.898 ± 0.018	0.881 ± 0.031

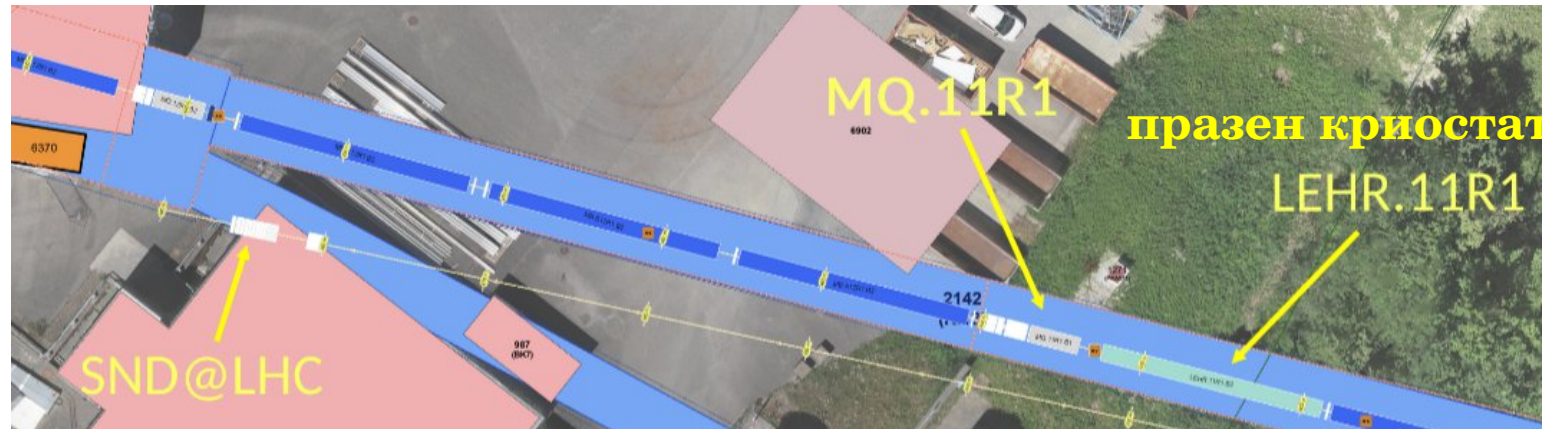
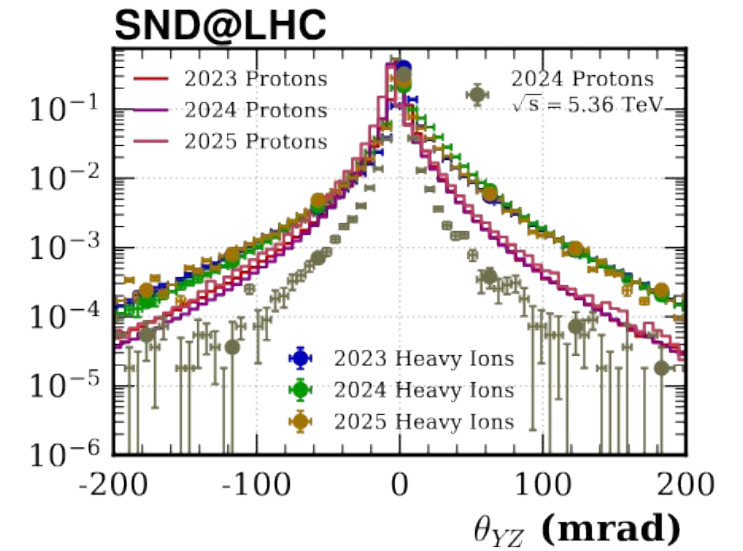
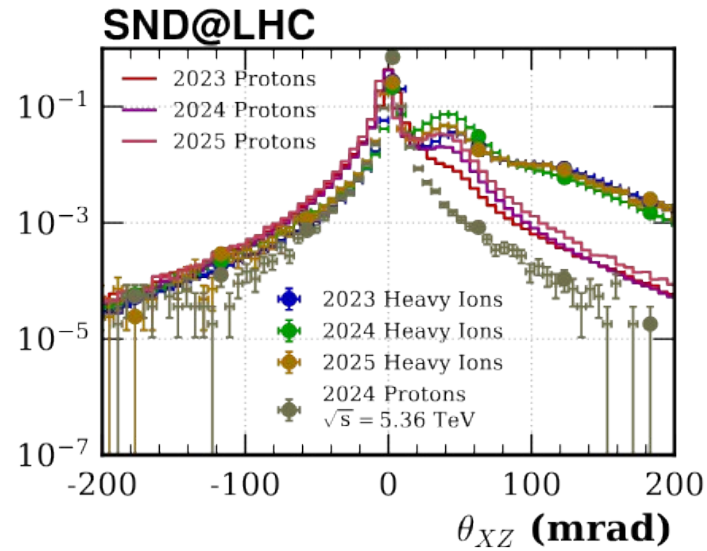
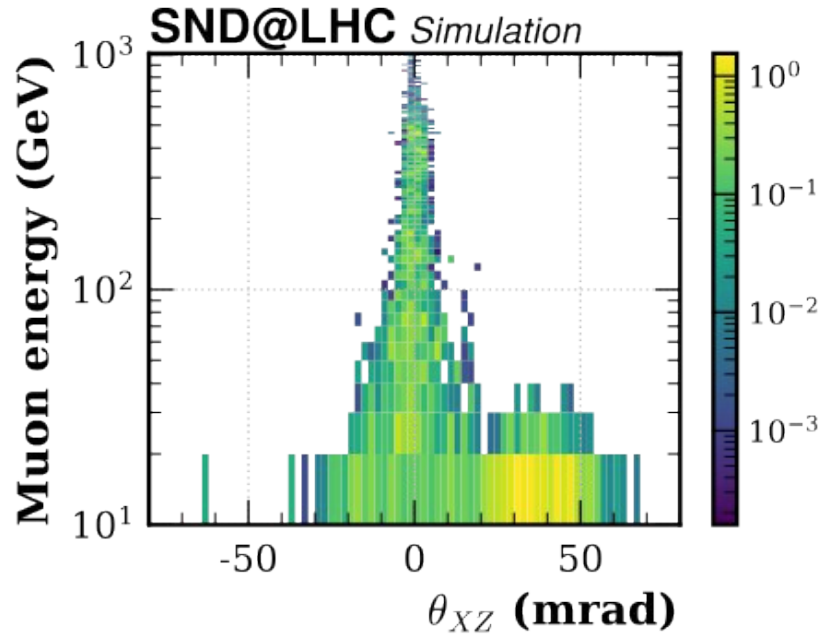


Несигурности включват статистически и систематични компоненти.

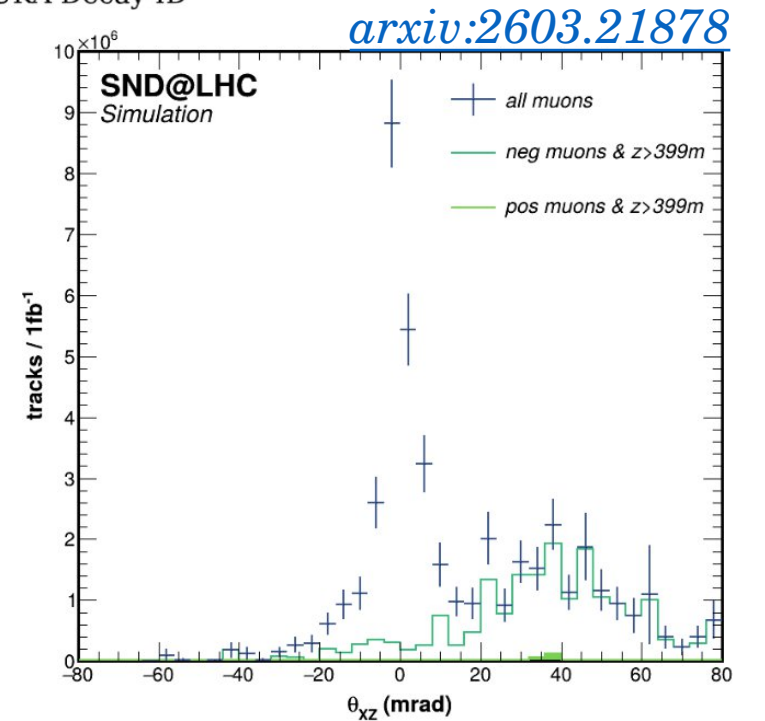
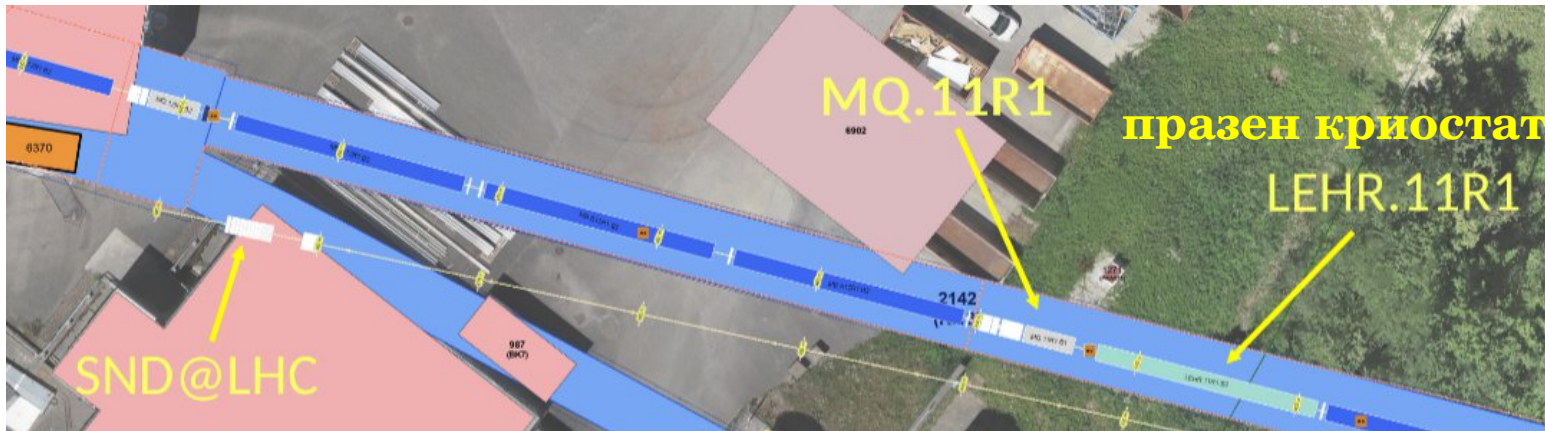
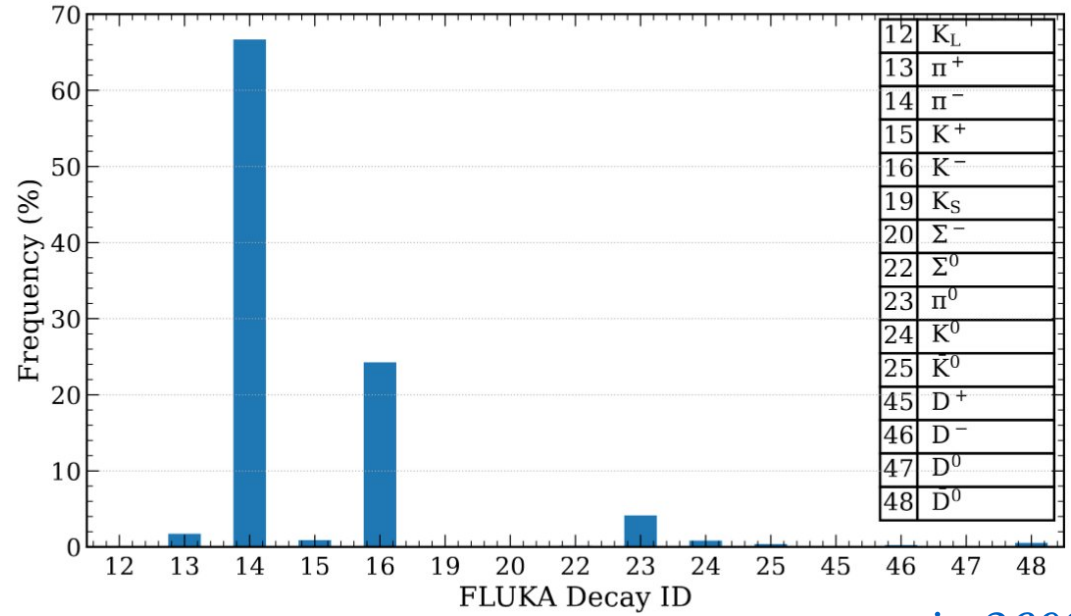
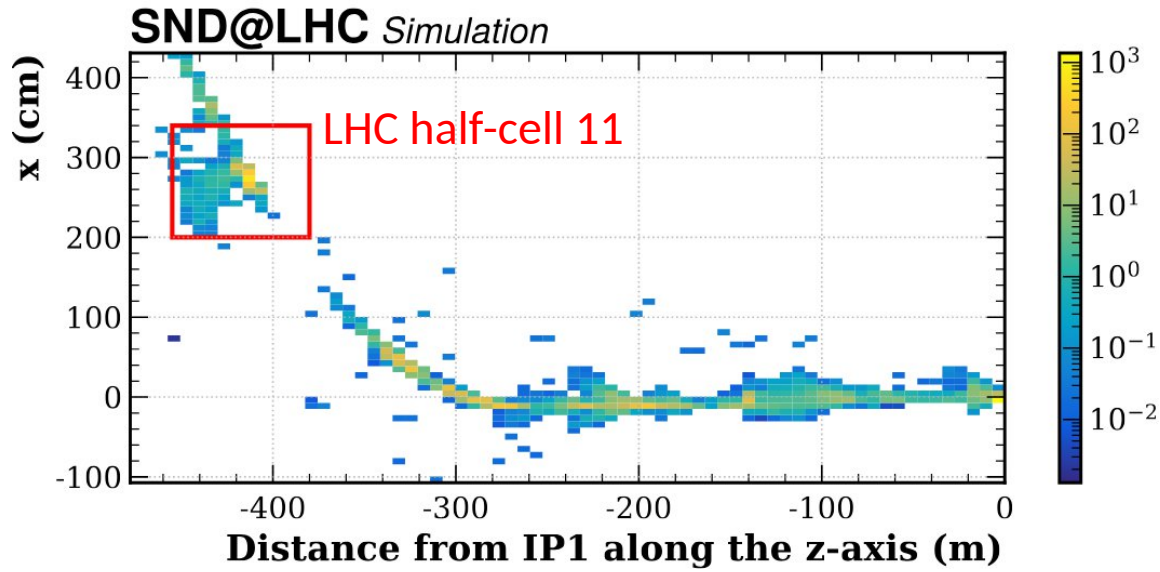
Систематичната грешка произтича от вариациите в ефективността в рамките на работната площ, а статистическата е пренебрежима (под 0,1%).



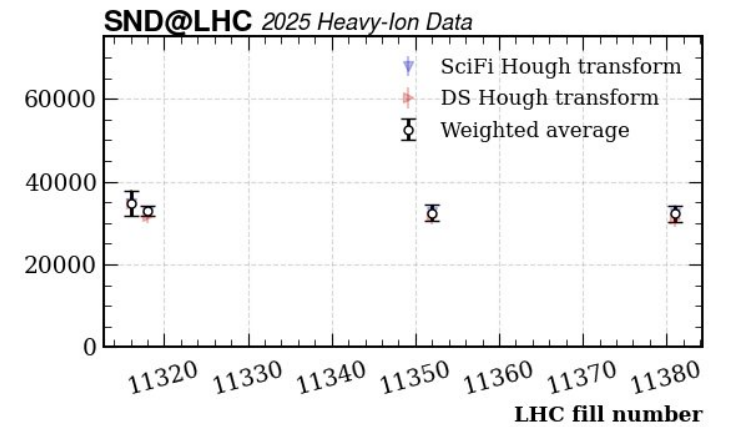
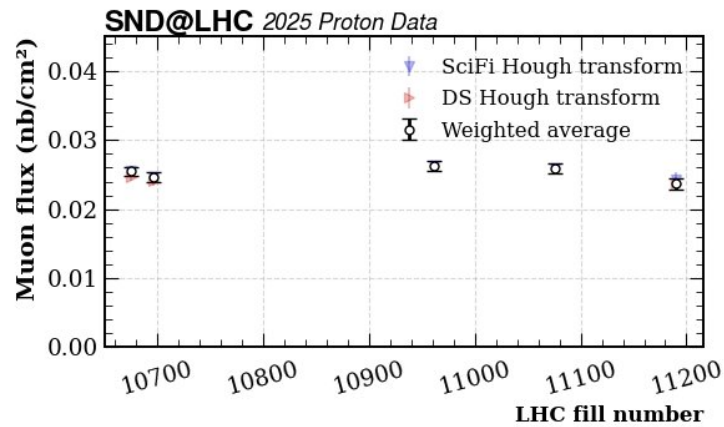
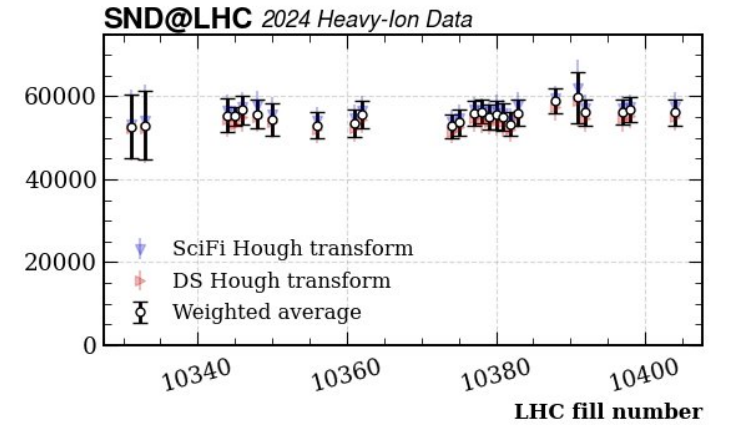
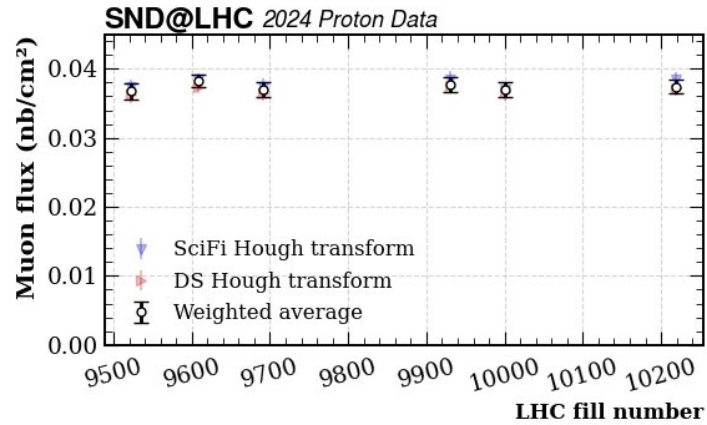
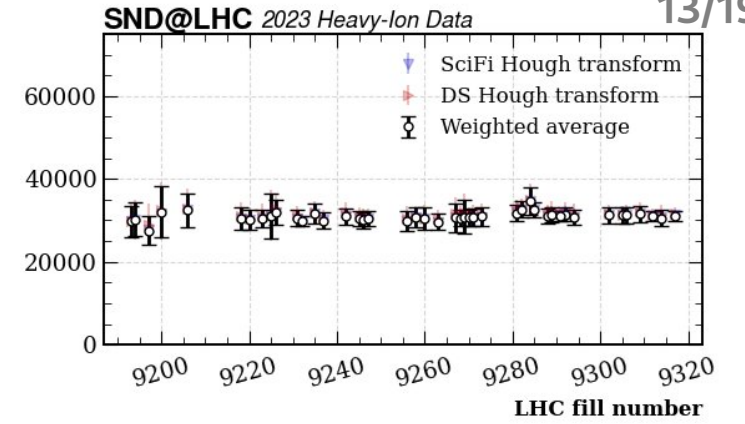
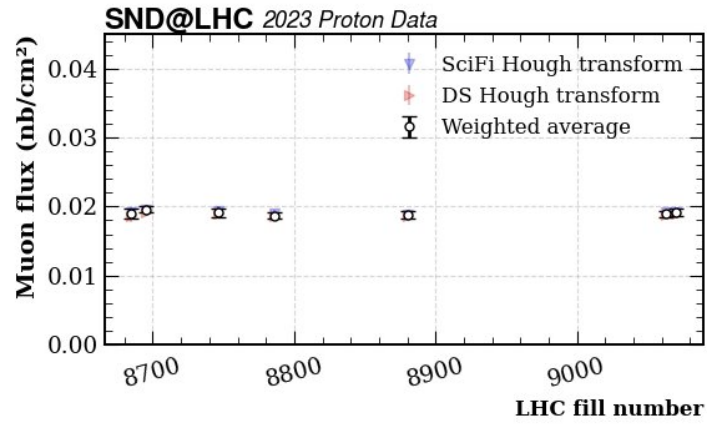
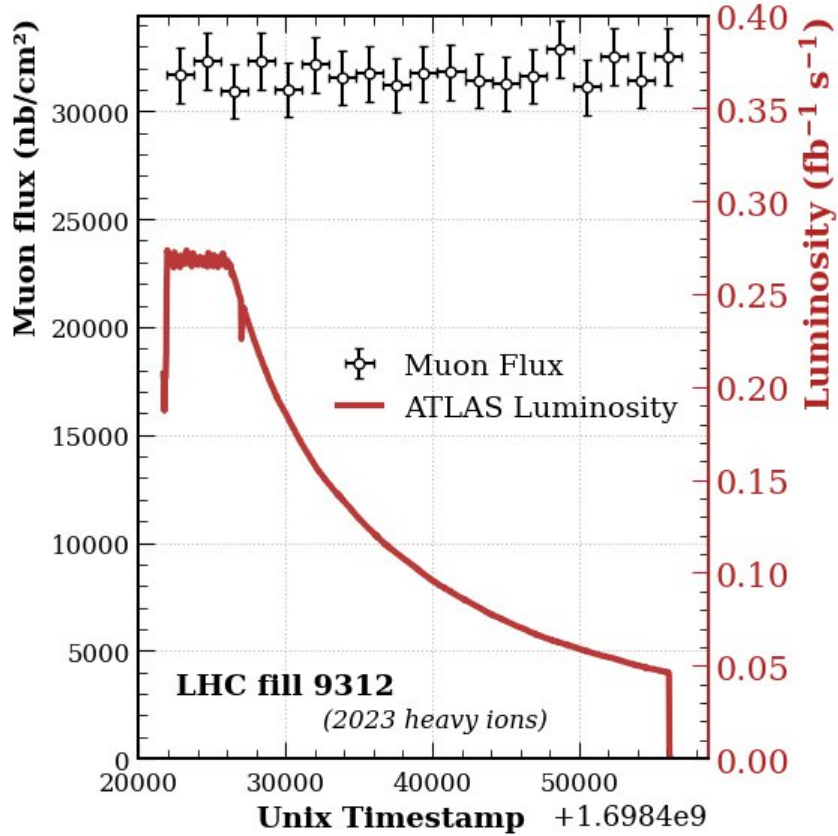
Ъглово пазределение



Произход на мюони



Мюонен поток



Мюонен поток

Dataset	Muon Flux	Uncertainty Breakdown (% variance)		
		Statistics	Tracking Efficiency	Luminosity
<i>Heavy-Ion Collisions (10^4 nb/cm²)</i>				
2023 Data	3.11 ± 0.12	< 0.01	22.06	77.94
2024 Data	5.53 ± 0.22	< 0.01	22.80	77.20
2025 Data	3.24 ± 0.13	0.06	20.48	79.46
2022 Simulation	2.99 ± 0.09	96.70	3.30	–
<i>Proton Collisions (10^{-2} nb/cm²)</i>				
2023 Data	1.90 ± 0.04	0.02	16.94	83.04
2023 Simulation	1.67 ± 0.05	94.71	5.29	–
2024 Data	3.76 ± 0.09	0.01	27.62	72.37
2024 Data (Reference Fill) ^a	4.21 ± 0.14	1.33	64.50	34.16
2024 Simulation	3.34 ± 0.12	87.88	12.12	–
2025 Data	2.48 ± 0.05	0.03	12.64	87.33
2025 Simulation	3.13 ± 0.14	87.21	12.79	–
2022 Data ^b	2.06 ± 0.12	8.33	91.67 (Combined Systematics)	

^a LHC fill 10310, measured at $\sqrt{s} = 5.36$ TeV.

^b 2022 proton flux results are taken from Ref. [2].

Dataset	Muon Flux	Uncertainty Breakdown (% variance)		
		Statistics	Tracking Efficiency	Luminosity
<i>Heavy-Ion Collisions (10^4 nb/cm²)</i>				
2023 Data	3.11 ± 0.12	< 0.01	22.06	77.94
2024 Data	5.53 ± 0.22	< 0.01	22.80	77.20
2025 Data	3.24 ± 0.13	0.06	20.48	79.46
2022 Simulation	2.99 ± 0.09	96.70	3.30	–
<i>Proton Collisions (10^{-2} nb/cm²)</i>				
2023 Data	1.90 ± 0.04	0.02	16.94	83.04
2023 Simulation	1.67 ± 0.05	94.71	5.29	–
2024 Data	3.76 ± 0.09	0.01	27.62	72.37
2024 Data (Reference Fill) ^a	4.21 ± 0.14	1.33	64.50	34.16
2024 Simulation	3.34 ± 0.12	87.88	12.12	–
2025 Data	2.48 ± 0.05	0.03	12.64	87.33
2025 Simulation	3.13 ± 0.14	87.21	12.79	–
2022 Data ^b	2.06 ± 0.12	8.33	91.67 (Combined Systematics)	

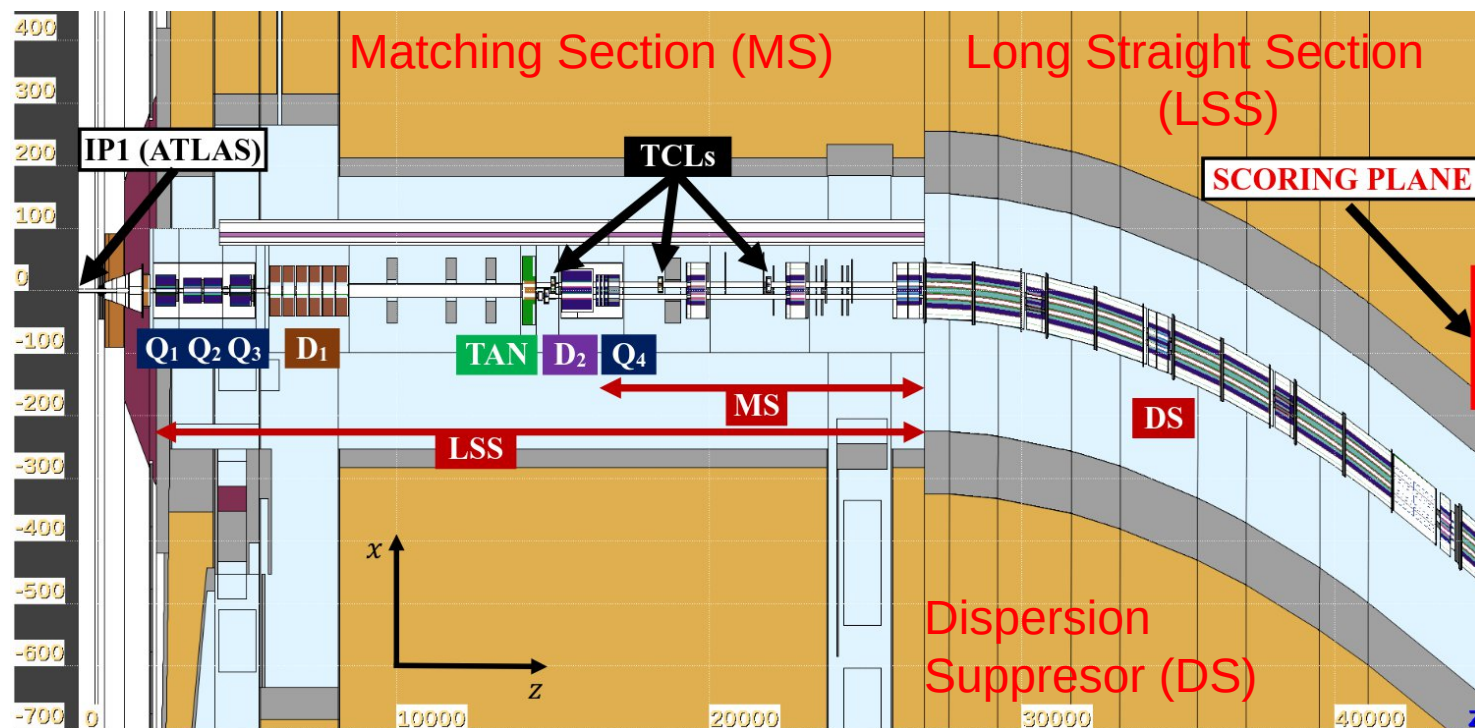
^a LHC fill 10310, measured at $\sqrt{s} = 5.36$ TeV.

^b 2022 proton flux results are taken from Ref. [2].

Двойно увеличение в потока от 2023 до 2024

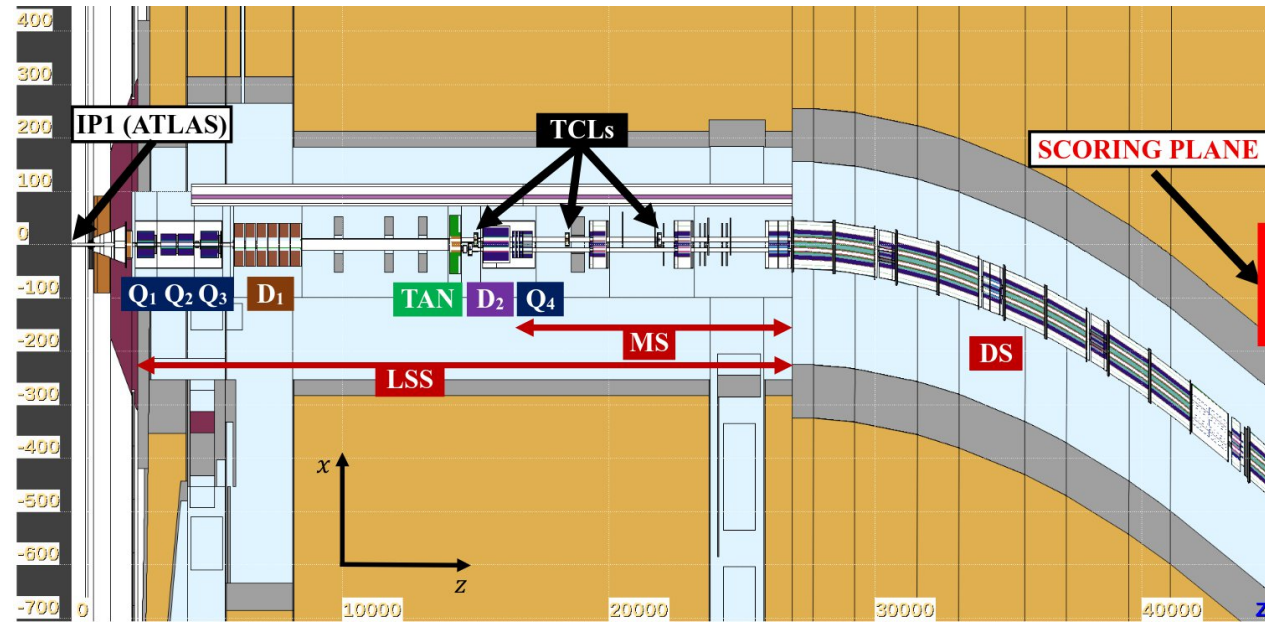
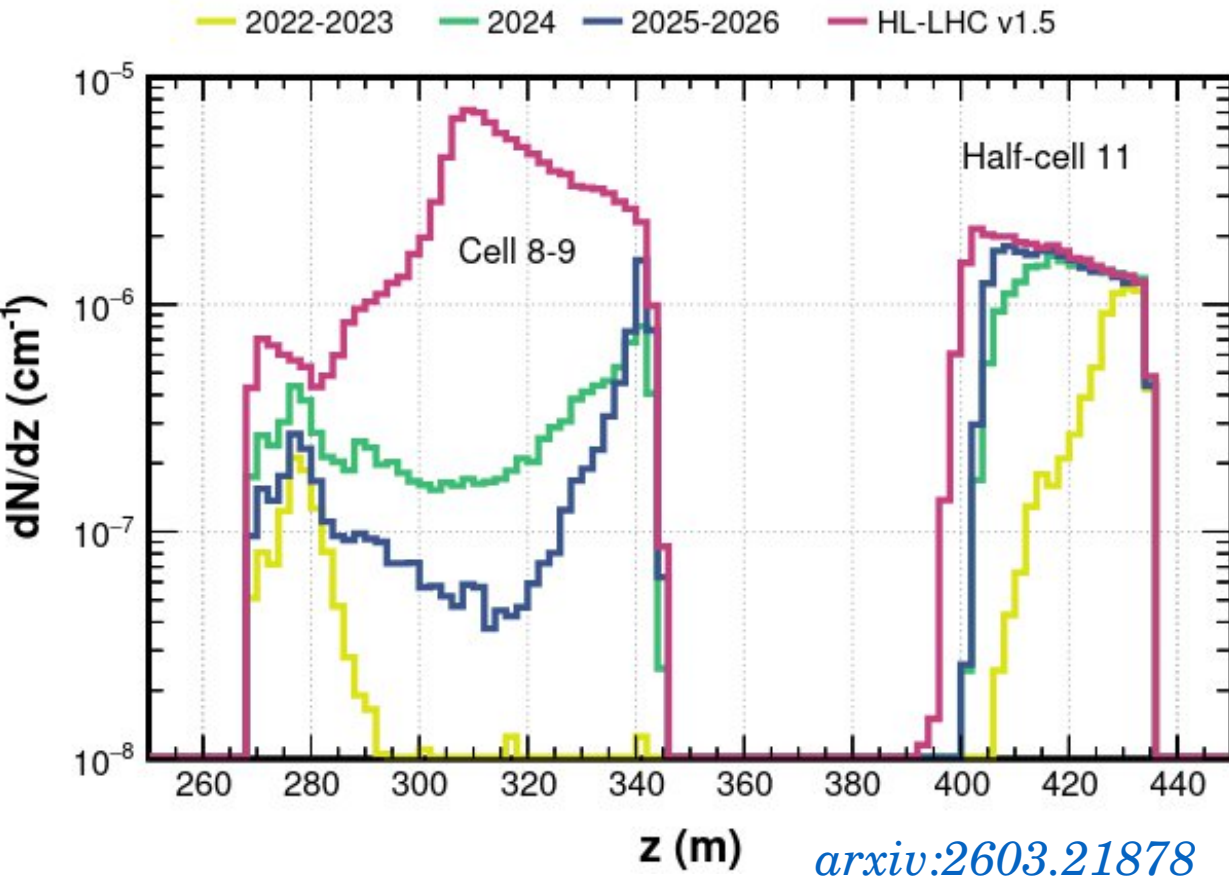
- През 2022–2023: LHC работеше с номинална оптика (downward vertical crossing $-160 \mu\text{rad}$)
 - Крайните фокусиращи квадруполни магнити (Q1, Q2 и Q3), в близост до ATLAS, бяха конфигурирани в последователност focus–defocus–focus (FDF).
- **Оптиката за 2024:** — обърната последователност DFD
 - Reverse-polarity (RP) optics
 - Upward vertical crossing ($+160 \mu\text{rad}$).
 - За оптимизация на за удължаване на експлоатационния живот на ускорителя.
- **Оптиката за 2025** — Същата като през 2022-2023, но с хоризонтално пресичане на бънчовете

[arxiv:2603.21878](https://arxiv.org/abs/2603.21878)



Двойно увеличение в потока от 2023 до 2024

Симулирани протонни загуби за различни настройки



ppRef данни

Сравнение ppRef-to-PbPb

- Еднакви настройки на LHC
- По-тясно ъглово разпределение за ppRef
- Въпреки еднаквите енергии на сблъсъците, мюоните от ppRef се разсейват по-малко
- **EMD компонентата е основен принос за по-ниските енергии при PbPb спрямо pp**

Сравнение ppRef-to-pp

- Въпреки по-ниските енергии, потокът е по-голям и ъгловото разпределение по-тясно при ppRef
- По-широки TCL колиматори при ppRef
 - **pp**: Полуширини от **12.3, 14.5, 1.585 mm** за TCL4, TCL5 и TCL6
 - **ppRef**: Полуширина от **25 mm**
- По-широк фокус (de-squeezed optics) с амплитудна функция β^* от 3,0 m, за разлика от 0,5 m при pp

Публикации, доклади и други дейности

Подготвени за публикуване

- **Measurement of the Muon Flux at SND@LHC: Results from the 2023-2025 Proton and Heavy-Ion Periods** (в процес на рецензия от *EPJC*)
- **Hidden Particle Searches at SND@LHC** (в процес на рецензия от *Journal of Physics (JoP): Conference Series*)

Устни доклади

- **Hidden Particle Searches at SND@LHC** (*NAFSKI-VI, Sofia*)
- **Recent Neutrino Results and Prospects for FIP searches at SND@LHC** (*LHCP 2026, Paris*)
- **Статут и перспективи пред експеримента SND@LHC** (Юбилейна конференция “Атомна физика на 80 години”, *Sofia*)

Постерни доклади

- **High-Energy Neutrino Searches with SND@LHC** (*Summer School on Neutrino Physics Beyond the Standard Model, Strasbourg*)
- **Recent Results from SND@LHC** (*LHCC Open Session, CERN*)

Други

- Участие с лекция “Физика на неутриното” по програма “Български учители в ЦЕРН”
- Лекции и семинари за “**Detectors of Ionizing Radiation**”