Конкурс на соискание грантов и стипендий молодых ученых и специалистов ОИЯИ и стипендий им. М.Г. Мещерякова и Н.Н. Говоруна на 2027 год

Разработка алгоритмов на базе нейронных сетей для реконструкции траекторий заряженных частиц в эксперименте SPD на NICA

Соискатель

Дидоренко Алексей Викторович, младший научный сотрудник, НОВФ. Аспирант ГУ «Дубна».

Руководитель

Войтишин Николай Николаевич, к. ф.-м. наук, заместитель директора по научной работе ЛИТ

Консультант

Ососков Геннадий Алексеевич, д. ф.-м. наук, гл. науч. сотр., ЛИТ

Актуальность работы

Реконструкция траекторий является необходимым этапом для измерения характеристик элементарных частиц.

Требования к алгоритмам:

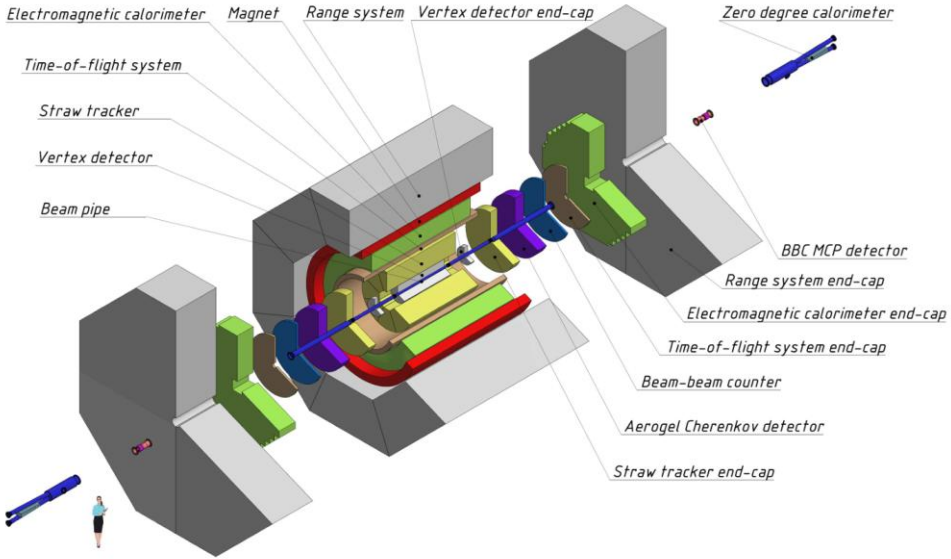
- быстродействие;
- эффективность;
- устойчивость к шуму;
- устойчивость к высокой загрузке в детекторах.

Нейронные сети позволяют:

- обрабатывать различные форматы входных данных;
- распараллеливать операции линейной алгебры.

В рамках выполнения диссертационной работы планируется развить\разработать методы трекинга с использованием нейросетевого подхода.

Установка SPD



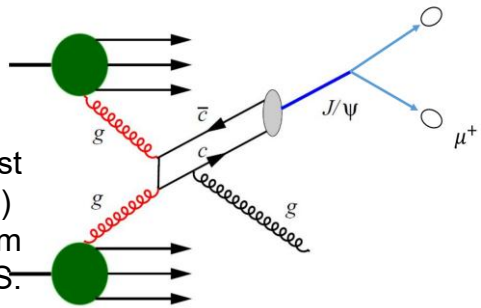
V. Abazov et al. (SPD Collaboration) - Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA - Natural Sci. Rev. - 2024 - Vol. 1, No. 1, pp. 1–325 - DOI: 10.54546/NaturalSciRev.100101

Результаты за 2026 год

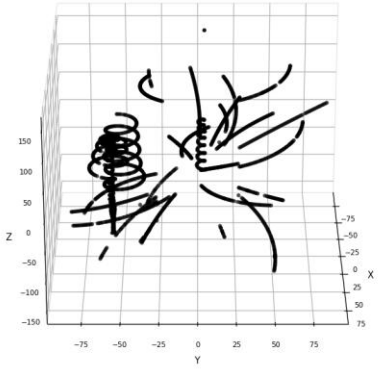
Реконструкция траекторий заряженных частиц в таймслайсах SPD с использованием графовой нейронной сети с контрастивным обучением

Official SpdRoot 4.1.6 simulation:

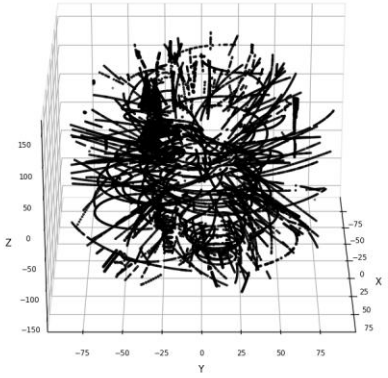
- Process: $J/\psi \rightarrow \mu\mu$
- Detector: Straw Tracker
- Events: 70,000
- Split: 80% train / 10% val / 10% test (Pipeline evaluation - on time slices)
- Time slices: constructed from separate events (thanks to S. Omelyanchuk)



	event_id	hit_id	x	y	z	pt	track_id
0	0	0	15.8763	23.6250	-31.1806	0.034518	64
1	0	1	16.3640	24.4789	-33.2149	0.034518	64
2	0	2	16.7795	25.4657	-35.4291	0.034518	64
3	0	3	17.0848	26.5011	-37.6680	0.034518	64
4	0	4	17.2635	27.6266	-40.0423	0.034518	64



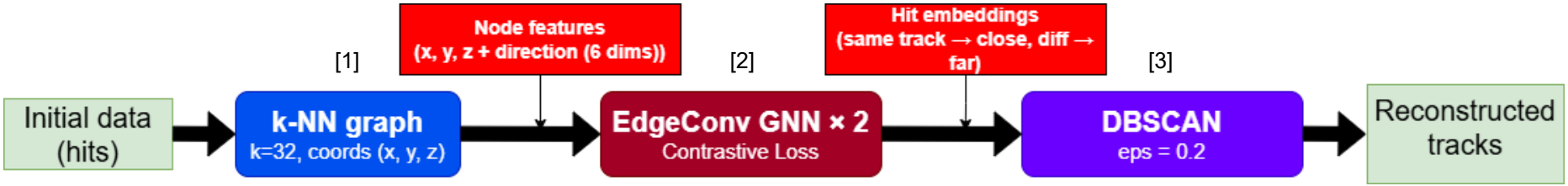
MC - событие



Таймслайс

Результаты за 2026 год

Реконструкция траекторий заряженных частиц в таймслайсах SPD с использованием графовой нейронной сети с контрастивным обучением



Контрастивное обучение нейронных сетей — это метод самоконтролируемого обучения, в котором модель учится распознавать объекты, сближая «похожие» данные в пространстве признаковых векторов и отдаляя «непохожие» данные с помощью Contrastive Loss.

Нейронная сеть была обучена на **MC – событиях (не на таймслайсах)**

[1] Jon Louis Bentley. 1975. Multidimensional binary search trees used for associative searching. Commun. ACM 18, 9 (Sept. 1975), 509–517. https://doi.org/10.1145/361002.361007

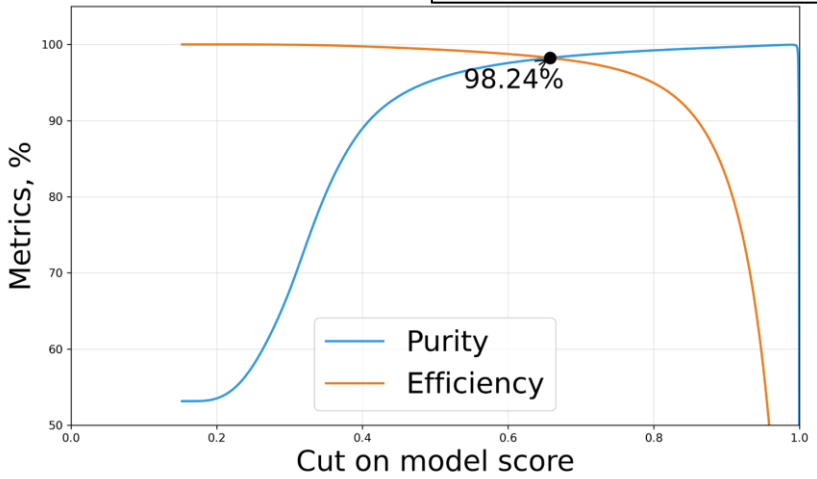
[2] Y. Wang, Y. Sun, Z. Liu, S. E. Sarma, M. M. Bronstein, J. M. Solomon. Dynamic Graph CNN for Learning on Point Clouds. ACM Trans. Graph., Vol. 38, No. 4, Article 146, 2019. DOI: 10.1145/3326362

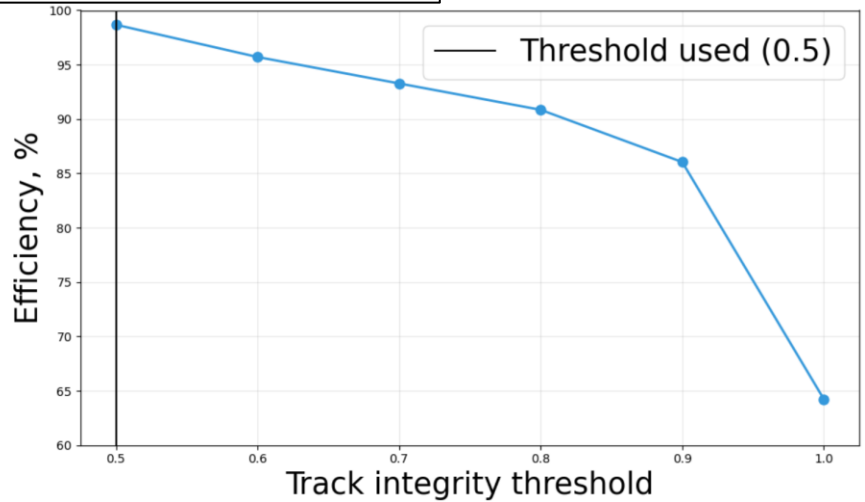
[3] Ester, Martin et al. “A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise.” Knowledge Discovery and Data Mining (1996).

Результаты за 2026 год

Реконструкция траекторий заряженных частиц в таймслайсах SPD с использованием графовой нейронной сети с контрастивным обучением

Пайплайн был протестирован на **таймслайсах**





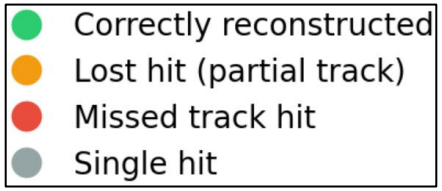
Эффективность реконструкции траекторий — это стандартная метрика в физике высоких энергий, измеряющая, насколько хорошо алгоритм реконструирует смоделированные треки. Она определяется как:

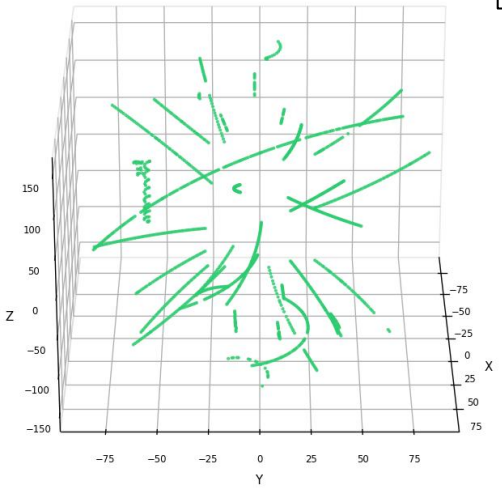
$$Eff = \frac{N_{reco\ tracks}}{N_{sim\ tracks}} * 100\%,$$

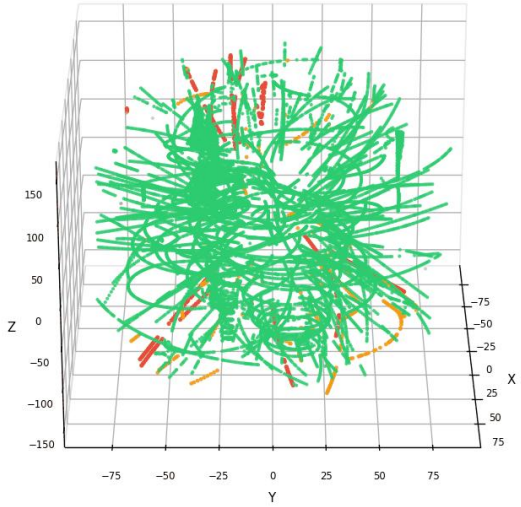
где $N_{reco\ tracks}$ — число реконструированных траекторий, а $N_{sim\ tracks}$ — число смоделированных траекторий. Пайплайн достигает эффективности **98,67%** при среднем времени обработки **0,65 с** на таймслайс.

Результаты за 2026 год

Реконструкция траекторий заряженных частиц в таймслайсах SPD с использованием графовой нейронной сети с контрастивным обучением







Лучший реконструированный таймслайс (Eff=100%)

Худший реконструированный таймслайс (Eff=94.3%)

План работ на 2027 год

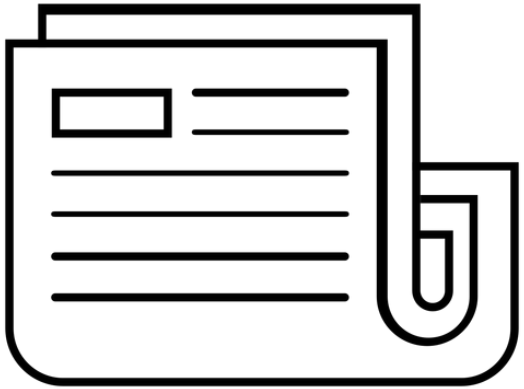


- **Переход на новый датасет PROD2026-009** (кампания SPD MC 2026, процесс Minimum Bias). Для анализа из общей выборки в 40 млн событий будут использоваться только 700 000 событий из Straw Tracker (TS).
- **Оптимизация производительности метода**:
  - Перенос вычислений на GPU: Перевод всех ресурсоемких этапов (построение графа k-NN и кластеризация DBSCAN) полностью на GPU.
  - Large-batch стратегия: Пересмотр стратегии инференса для обработки больших батчей за раз.
  - Перенос кода метода с Python на C++ с целью дальнейшей интеграции в официальное программное обеспечение эксперимента SPD.
- **Алгоритмические улучшения**:
  - Исследование более масштабируемых архитектур графовых нейронных сетей (GNN).
  - Переобучение модели непосредственно на данных таймслайсов для повышения эффективности.
  - Валидация подхода на физических процессах за пределами J/ψ → μμ и сравнение с классическими методами реконструкции.

Публикации (2022-2026 гг)

Публикации в научных цитируемых журналах:

1. Дидоренко А. В., Прогулова Т. Б. Построение и исследование структуры сложной сети YouTube - ка налов// Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. 2022. № 1. С. 77–90. URL : http://sanse.ru/download/462
2. Дидоренко А. В., Прогулова Т. Б. Изучение процессов распространения информации в социальной сети видеохостинга YouTube // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. 2023. № 2. С. 1-20. EDN: SEKZE. URL : https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/574/528
3. Дидоренко А.В., Прогулова Т.Б. Исследование особенностей распространения информации в социальной сети видеохостинга YouTube // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. Выпуск 31. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2024. С. 59–74. DOI: 10.20537/mce2024econ05
4. **Didorenko A. V., Voytishin N. N. - Search for Bottlenecks in SpdRoot Code - Phys. Part. Nucl. - 2026 - Vol. 57, No. 4, pp. 648–650 - DOI: 10.1134/S1063779626700401**
5. **A. Didorenko, N. Voytishin, S. Omelianchuk, «Track Reconstruction in SPD Time Slices Using a Graph Neural Network with Contrastive Learning», принято к печати в журнал ЭЧАЯ по итогам конференции ММСР'2026**

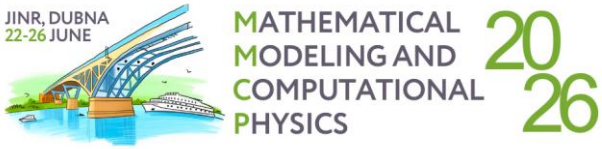


Прочие публикации:

1. Дидоренко А. В., Прогулова Т. Б. Исследование структуры и динамики сложной сети YouTube – каналов // Сборник тезисов «Математика. Компьютер. Образование-2022», выпуск 29, г. Дубна, 24-28 января 2022 г. С. 149
2. Дидоренко А. В., Прогулова Т. Б. Изучение процессов распространения информации в социальной сети видеохостинга YouTube // Сборник тезисов «Математика. Компьютер. Образование-2024», выпуск 31, г. Дубна, 22-27 января 2024 г. С. 165, 180
3. V. Abazov et al. (SPD Collaboration) - Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA - Natural Sci. Rev. - 2024 - Vol. 1, No. 1, pp. 1–325 - DOI: 10.54546/NaturalSciRev.100101

Участие в мероприятиях (2022-2026 гг)





- Математика. Компьютер. Образование 2022 - Исследование структуры и динамики сложной сети YouTube – каналов – Дубна – Государственный университет «Дубна» – 2022 – Устный доклад – онлайн *(Сертификат участника)*
- Осенняя школа по информационным технологиям ОИЯИ – Без доклада – Дубна – ЛИТ ОИЯИ – 2023 – Без доклада – очно
- Математика. Компьютер. Образование 2024 – Изучение процессов распространения информации в социальной сети видеохостинга YouTube – Дубна – Государственный университет «Дубна» – 2024 – Устный доклад – очно *(Сертификат участника)*
- VIII SPD collaboration meeting - Possible bottlenecks detection in SpdRoot code – Dubna – VBLHEP JINR – 2024 – Устный доклад – очно
- 11-я международная конференция Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education" (GRID'2025) - Search for bottlenecks in SpdRoot code – Дубна – ЛИТ ОИЯИ – 2025 – Устный доклад – очно
- HybriLIT WORKSHOP 2025: Towards Efficient Scientific Computing - Дубна - ЛИТ ОИЯИ - 2025 - Без доклада - очно.
- **64-я сессия Программно-консультативного комитета по физике частиц - постерный - Track Reconstruction in SPD Time Slices Using Graph Neural Networks with Contrastive Learning - Дубна, ДМС ОИЯИ - 2026**
- **International Conference "Mathematical Modeling and Computational Physics" (MMCP'2026) - устный - Track Reconstruction in SPD Time Slices Using Graph Neural Networks with Contrastive Learning - Дубна, ЛИТ ОИЯИ - 2026**
- **XII SPD collaboration meeting - устный - Track Reconstruction in SPD Time Slices Using Graph Neural Networks with Contrastive Learning - Дубна, ЛФВЭ ОИЯИ - 2026**
- **HybriLIT WORKSHOP 2026: From infrastructure to discovery - Дубна - ЛИТ ОИЯИ - 2026 - Без доклада - очно.**

Прочие мероприятия:

Доклады на совещаниях рабочих групп в ЛИТ и коллаборации SPD по тематике исследований

Педагогическая деятельность за 2026 год

Проведение семинаров и руководство курсовыми проектами студентов в Государственном университете «Дубна» по курсу: «Проектирование информационных систем».

Институт системного анализа и управления

Достижения за последние пять лет

- Удостоверение о повышении квалификации - «Искусство педагогического общения в вузе» - Государственный университет «Дубна» - 2022
- Сертификат участника - Математика. Компьютер. Образование 2024 (доклад: «Изучение процессов распространения информации в социальной сети видеохостинга YouTube») - Дубна, Государственный университет «Дубна» - 2024
- Удостоверение о повышении квалификации - «Моделирование ядерных излучений и детекторов в физике частиц и космических лучей» - НИЯУ МИФИ - 2026





Благодарю за внимание!