

Моделирование геометрии BBC и реконструкция плоскости реакции для SPD на коллайдере NICA

Левков Анатолий Александрович

НИЯУ МИФИ, ИЯФИТ, каф. №40

Научный руководитель: доц., к-ф.м.н. Тетерин П. Е.

2025

План доклада

1. Контекст: NICA, SPD, роль BBC
2. Новая геометрия BBC и карта загрузки
3. Реалистичная физическая модель BBC
4. Реконструкция плоскости реакции
5. Интеграция: SPDGeoModel/GeoModel и SAMPO
6. Публикации и планы
7. Итоги

Коллайдерный комплекс NICA: физическая мотивация

- NICA (ОИЯИ, Дубна) — коллайдерный комплекс для:
 - спиновой физики на поляризованных pp/pd ,
 - (перспективно) тяжёлых ионов: коллективные эффекты, анизотропный поток v_n .
- В режиме тяжёлых ионов важны:
 - азимутальные анизотропии: v_1, v_2, v_3, \dots ,
 - реконструкция плоскости реакции / плоскости события Ψ_n .

[1, 2, 11, 12]

SPD: задачи и подсистемы

- SPD — детектор для измерения спин-зависимых наблюдаемых.
- Подсистемы:
 - трекинг/вершинный детектор, PID, ЭМ калориметр,
 - форвардные подсистемы: BBC.
- Спиновая программа включает TMD-наблюдаемые и связанные функции (Сиверса, Бура–Малдерса, трансверсити, Коллинза и др.).

[3, 4, 13, 14, 15, 16]

BBC в составе SPD: цели и задачи

- BBC — форвардные счётчики на больших $|\eta|$.
- Основные функции:
 - локальная поляриметрия, мониторинг светимости,
 - триггер/стартовое время,
 - оценка плоскости события Ψ_n по азимутальному распределению сигнала.

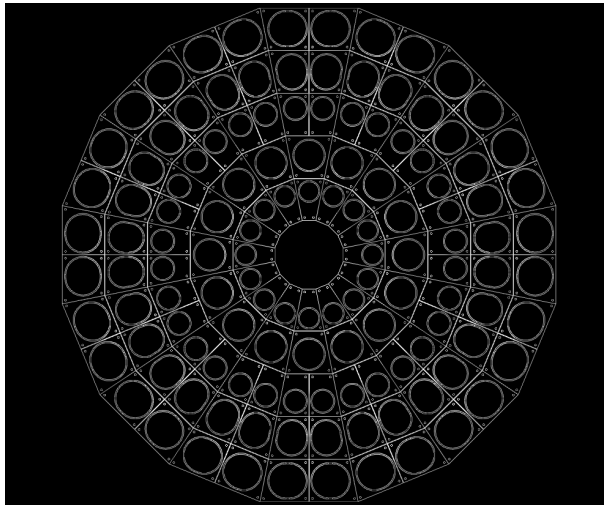
[7, 8, 5, 6, 9]

Цель геометрического моделирования

- Создать параметрическую новую геометрию BBC:
 - концентрические кольца + азимутальная сегментация,
 - центральное отверстие под пучок.
- Сегментация (текущий вариант SPD):
 - два внутренних кольца: 16 секторов на кольцо,
 - внешние кольца: 32 сектора на кольцо.
- Цели:
 - оценка углового покрытия и загрузки,
 - подготовка базы для реконструкции Ψ_n ,
 - задел под реалистичную оптику и оцифровку сигнала (digitization).

[5, 4, 10]

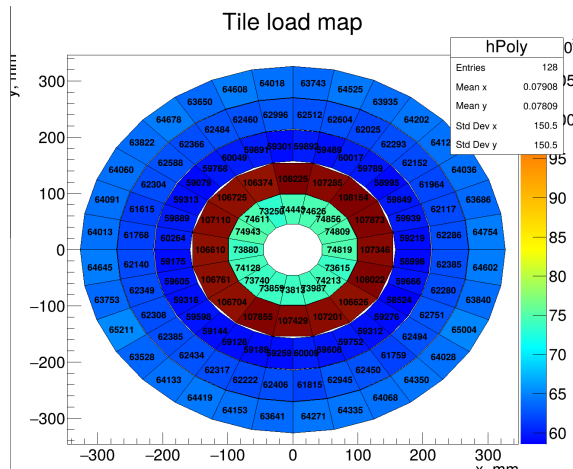
Визуализация новой геометрии BBC



Кольца, сектора, центральное отверстие.

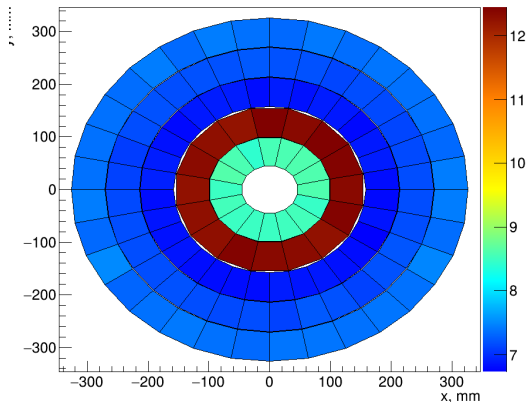
Карта загрузки элементов новой геометрии

- Построена карта средней загрузки элементов по моделированию.
- Рост нагрузки во внутренних кольцах (малые θ , большие $|\eta|$).
- Использование:
 - динамический диапазон,
 - контроль азимутальной равномерности,
 - выбор весов/порогов в реконструкции.



Сравнение загрузки: новая модель vs SPD-ROOT

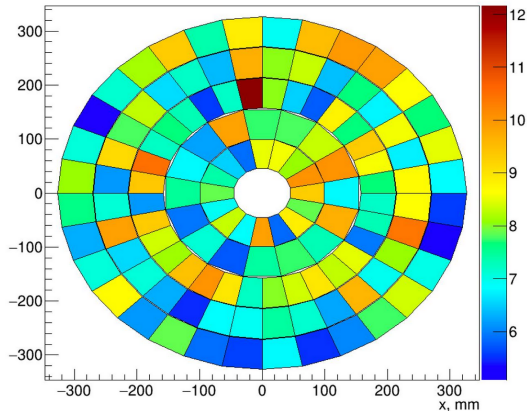
Tile load map



Загрузка тайлов (GEANT4, новая геометрия)

Новая модель даёт более детализированное и параметрически контролируемое описание сегментации, что обеспечивает более физически интерпретируемую структуру загрузки и напрямую используется при выборе весов/порогов.

Tile load map



Загрузка тайлов в геометрии SPD-ROOT

Зачем нужна реалистичная физика (оптика + считывание)

- Модель только по E_{dep} подходит для геометрии/загрузки, но недостаточна для:
 - временного разрешения,
 - амплитуды сигнала,
 - сопоставления с измерениями прототипов.
- моделирование полной цепочки формирования сигнала:
 1. сцинтилляция ($dE/dx \rightarrow N_\gamma$),
 2. движение и распределение фотонов,
 3. WLS-волокно (шифтер): поглощение/переизлучение/затухание,
 4. фотодетектор (QE, время),
 5. оцифровка сигнала: пороги, шум, насыщение, ADC/TDC.

[10, 5]

Оптика в GEANT4: что реализованно

- Материальные свойства (таблицы по λ):
 - показатель преломления $n(\lambda)$,
 - длина поглощения,
 - спектр эмиссии сцинтиллятора,
 - параметры WLS (поглощение/переизлучение/спектр).
- Границы и поверхности:
 - отражение (зеркальное/диффузное), свойства обёртки,
 - интерфейсы «сцинтиллятор–волокно», «волокно–фотодетектор».
- будет реализовано сравнение с реальными данными

[10]

Event plane и коэффициенты потока v_n (режим тяжёлых ионов)

- Азимутальное распределение:

$$\frac{dN}{d\varphi} \propto 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos [n(\varphi - \Psi_n)] .$$

- Ψ_n — плоскость n -й гармоники (плоскость события).
- BBC на больших $|\eta|$ удобен для оценки Ψ_n и подавления non-flow.

[11, 12]

Q-вектор и оценка Ψ_n

- Для элемента i известен угол φ_i и сигнал w_i .
- Весовая схема: w_i по E_{dep} .
- Q-вектор:

$$Q_{n,x} = \sum_i w_i \cos(n\varphi_i), \quad Q_{n,y} = \sum_i w_i \sin(n\varphi_i).$$

- Оценка плоскости:

$$\Psi_n^{\text{rec}} = \frac{1}{n} \arctan 2(Q_{n,y}, Q_{n,x}).$$

[11]

Выбор весов

- На текущем этапе веса w_i формируются по **энерговыделению в тайле**:

$$w_i \equiv E_{\text{dep}}^{(i)}.$$

- При необходимости используется нормировка по кольцам для компенсации радиальной неравномерности нагрузки:

$$w_i = \frac{\max\left(0, E_{\text{dep}}^{(i)} - E_{\text{thr}}\right)}{\langle E_{\text{dep}} \rangle_{\text{кольцо}}}.$$

- Переход к весам по сигналу электроники планируется после реализации оцифровки.

Что планируется сделать: оцентровка и выполаживание

- Отцентровка (Recentering): устранение систематического смещения Q-вектора

$$Q_{n,x}^{\text{rec}} = Q_{n,x} - \langle Q_{n,x} \rangle, \quad Q_{n,y}^{\text{rec}} = Q_{n,y} - \langle Q_{n,y} \rangle.$$

- Выполаживание (Flattening, Shift): приведение распределения Ψ_n к равномерному

$$\Psi_n^{\text{flat}} = \Psi_n + \Delta\Psi_n,$$

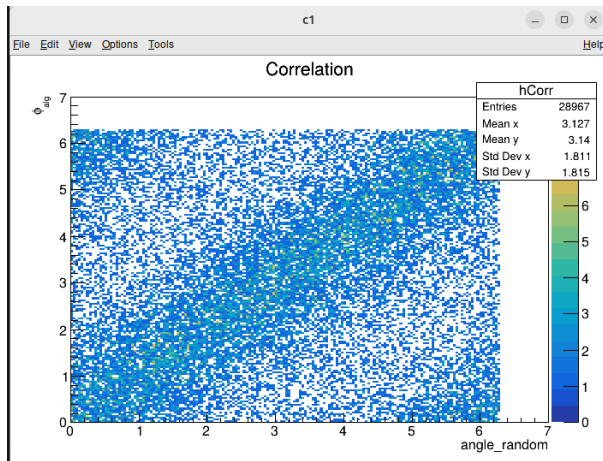
$$\Delta\Psi_n = \sum_{k=1}^K [A_k \cos(k\Psi_n) + B_k \sin(k\Psi_n)],$$

$$A_k = -\frac{2}{k} \langle \sin(k\Psi_n) \rangle, \quad B_k = \frac{2}{k} \langle \cos(k\Psi_n) \rangle.$$

[11, 12]

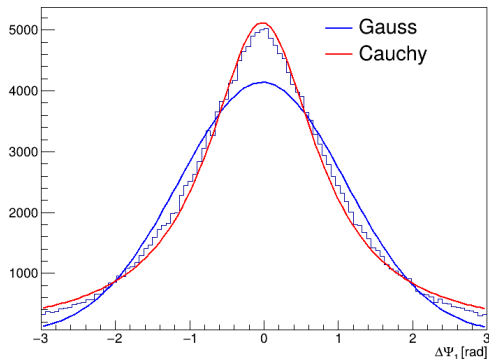
Контроль качества: корреляция углов

- Проверка согласованности восстановления угла.
- Ось X: `angle_random` (эталон/входной угол).
- Ось Y: φ_{alg} (восстановленный угол).
- Диагональная структура указывает на корректную корреляцию и работоспособность процедуры восстановления.



Результаты: $\Delta\Psi_1$ и $\Delta\Psi_2$

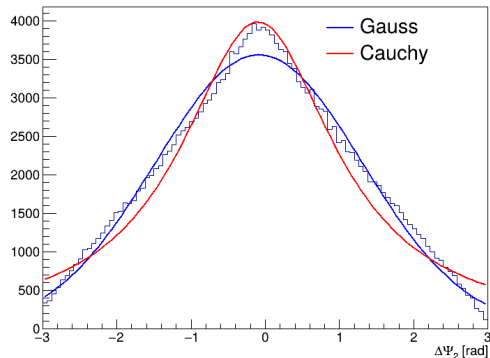
delta of calculated angle vs random_angle (n=1)



$\Delta\Psi_1$: Гаусс/Коши

Анализ хвостов и зависимостей от весов/порогов.

delta of calculated angle vs random_angle (n=2)



$\Delta\Psi_2$: Гаусс/Коши

Почему нужен SPDGeoModel/GeoModel

- Единый источник геометрии для:
 - симуляции (GEANT4),
 - реконструкции (SAMPO),
 - визуализации/верификации.
- Цели для BBC:
 - фиксировать ID и сегментацию,
 - обеспечить воспроизводимость симуляция \leftrightarrow реконструкция,
 - подготовить базу под оцифровку сигнала и условия (conditions).

[17, 18, 19]

План внедрения в SAMPO: слои и шаги

- Геометрия: перенос новой геометрии BBC в SPDGeoModel/GeoModel.
- Модель данных:
 - hits (энерговывделение/время/ID),
 - оцифрованные сигналы (ADC/TDC, пороги, шум, насыщение),
 - reco (Q-вектор, Ψ_n , QA).
- Алгоритмы:
 - вычисление $\Psi_{1,2}$, веса и пороги,
 - коррекции и QA-мониторинг.

[20, 21, 19]

Полный план, планируемых работ: от генерации до реконструкции и QA

- Единая цепочка обработки данных для BBC и всего SPD:

Generator / Event source \rightarrow GEANT4 transport + geometry \rightarrow Hits
(energy/time + ID) \rightarrow Оцифровка (ADC/TDC) \rightarrow Reconstruction
(Q-vector, Ψ_n) \rightarrow QA/Monitoring

- Generator/source: типы событий и кинематика (pp/pd, HI).
- GEANT4: транспорт, энерговыделение; далее — оптика + WLS.
- Hits: E_{dep} , время, координаты, ID элемента новой геометрии.
- Оцифровка: пороги, шум, насыщение; перевод в ADC/TDC.
- Reconstruction: Q_n , Ψ_n , коррекции; оценка качества.
- QA: карты загрузки, $\Delta\Psi_n$, корреляции, стабильность отклика, маски каналов.

Цепочка реализуется в SAMPO; геометрия берётся из SPDGeoModel/GeoModel.

- Статья: геометрия + физическая модель BBC
 - параметрическая геометрия, карта загрузки,
 - сцинтилляция + WLS + фотодетектор,
 - сведение модельных и экспериментальных данных (мюонный телескоп + рентгеновский сканер),
 - подготовка и портирование в SAMPO.
- Статья: реконструкция плоскости реакции
 - Q-вектор, пороги/веса, коррекции,
 - совместно с группой ОИЯИ (лабораторная часть и валидация).
- Опубликованные результаты по шифтерам используются как база для экспериментальной проверки:
 - F. A. Dubinin, A. A. Levkov *et al.* Study of Wave Length Shifters for SPD BBC Scintillation Tiles Readout.

Итоги работы за семестр

- Реализована новая геометрия BBC (16/32 сегментация).
- Построены карты загрузки и выполнено сравнение с геометрией SPD-ROOT.
- Подготовлена база для реалистичной физики (оптика, WLS, оцифровка сигнала).
- Реализована реконструкция Ψ_n (Q-вектор, $n = 1, 2$), выбор весов/порогов.
- Сформирован план развития:
 - перенос в SPDGeoModel/GeoModel,
 - интеграция в SAMPO (geo/data/algorithms/QA),
 - подготовка публикаций.

Список литературы

- V. D. Kekelidze *et al.* Phys. Part. Nucl. **48**, 727 (2017).
- V. D. Kekelidze *et al.* Nucl. Phys. News **27**, 19 (2017).
- V. P. Ladygin *et al.* JPS Conf. Proc. **37**, 011012 (2022).
- V. Abazov *et al.* Natural Sci. Report **7**, 1 (2024).
- A. V. Tishevsky *et al.* Phys. Atom. Nucl. **85**, 1497 (2022).
- A. V. Tishevskiy *et al.* J. Phys. Conf. Ser. **1690**, 012051 (2020).
- M. Allen *et al.* NIM A **499**, 549 (2003).
- C. A. Whitten Jr. AIP Conf. Proc. **980**, 390 (2008).
- E. Abbas *et al.* JINST **8**, P10016 (2013).
- S. Agostinelli *et al.* NIM A **506**, 250 (2003).
- A. M. Poskanzer, S. A. Voloshin. Phys. Rev. C **58**, 1671 (1998).
- S. A. Voloshin *et al.* arXiv:0809.2949.
- D. W. Sivers. Phys. Rev. D **41**, 83 (1990).
- D. Boer, P. J. Mulders. Phys. Rev. D **57**, 5780 (1998).
- R. L. Jaffe, X. Ji. Nucl. Phys. B **375**, 527 (1992).
- J. C. Collins. Nucl. Phys. B **396**, 161 (1993).
- Indico: indico.jinr.ru/event/5710/.
- cern.ch/geomodel.
- Indico: indico.jinr.ru/event/5675/....
- Indico: indico.jinr.ru/event/5170/....
- spd.jinr.ru/.../Sampo-software-platform-for.pdf.