

Двойная продольная спиновая асимметрия легких псевдоскалярных мезонов, J/ψ и прямых фотонов

рожденных в столкновениях продольно поляризованных протонов



Я.А. Бердников, Д.В. Круашивили
kruashvili.dv@edu.spbstu.ru

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого) для коллаборации SPD

Изучение двойной продольной спиновой асимметрии напрямую связано с получением партонных функций распределения, которые в свою очередь дают информацию о спиновой структуре протона. Спин протона можно представить по формуле Манохараж – Джаффе:

$$S_N = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L$$

В данной формуле $\Delta\Sigma$, ΔG – вклады от спиральностей кварков и глюонов, соответственно; L – вклады от орбитальных моментов кварков и глюонов. Вклады от спиральностей вычисляются с помощью спиральных партонных функций распределения:

$$\Delta\Sigma = \sum_q \int \Delta f_q(x, Q^2) dx \quad \Delta G = \int \Delta g(x, Q^2) dx$$

Спиральные партонные функции распределения представляют собой разность функций распределения партонов с положительной и отрицательной спиральностями:

$$\Delta f_q(x, Q^2) = f_q^+(x, Q^2) - f_q^-(x, Q^2) \quad \Delta g(x, Q^2) = g^+(x, Q^2) - g^-(x, Q^2)$$

Двойная продольная спиновая асимметрия – физическая величина, которая характеризует отличие выходов частиц в столкновениях протонов с одинаковой и разной спиральностями:

$$A_{LL} = \frac{d\sigma^{(++)} - d\sigma^{(+-)}}{d\sigma^{(++)} + d\sigma^{(+-)}}$$

Сечения с определенными конфигурациями спиральностей протонов выражаются следующим образом:

$$d\sigma^{(++)} = f_{a+}^+ \otimes f_{b+}^+ \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(++) \rightarrow cd} + f_{a+}^+ \otimes f_{b-}^+ \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(+-) \rightarrow cd} + f_{a-}^+ \otimes f_{b+}^+ \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(+-) \rightarrow cd} + f_{a-}^+ \otimes f_{b-}^+ \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(--) \rightarrow cd}$$

$$d\sigma^{(+-)} = f_{a+}^+ \otimes f_{b-}^- \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(++) \rightarrow cd} + f_{a+}^+ \otimes f_{b-}^- \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(+-) \rightarrow cd} + f_{a-}^+ \otimes f_{b-}^- \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(+-) \rightarrow cd} + f_{a-}^+ \otimes f_{b-}^- \otimes D_c^M \otimes d\sigma^{ab(--) \rightarrow cd}$$

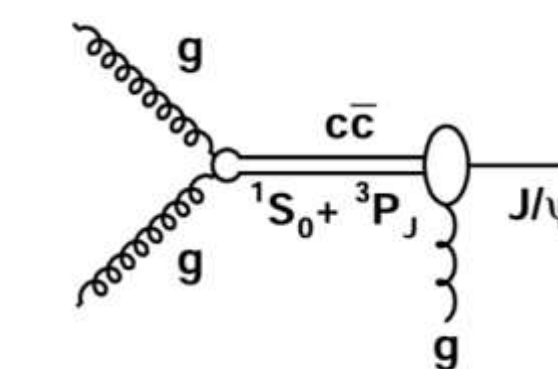
Монте-Карло генератор Pythia8 позволяет рассчитать сечения рождения частицы в протон-протонных столкновениях без учёта спиральностей. Для учёта конфигураций спиральностей протонов, была проведена модификация Pythia8. В Pythia8 были добавлены партонные сечения, учитывающие спиральности начальных партонов, а так же функции распределения, партонов с определенной спиральностью. Благодаря данным изменениям, при расчёте жесткого процесса в Pythia8, мы можем получить сечения $d\sigma^{++}$ и $d\sigma^{+-}$, необходимые для вычисления асимметрии.

Расчёт сечений и асимметрии в Pythia8 проводился следующим образом:

$$E \frac{d^3\sigma^{+-}}{dp^3} = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2N^{+-}}{dp_T dy} \frac{\sigma^{+-}_{tot}}{N_{events}}$$

$$E \frac{d^3\sigma^{++}}{dp^3} = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2N^{++}}{dp_T dy} \frac{\sigma^{++}_{tot}}{N_{events}}$$

$$A_{LL} = \frac{E \frac{d^3\sigma^{++}}{dp^3} - E \frac{d^3\sigma^{+-}}{dp^3}}{E \frac{d^3\sigma^{++}}{dp^3} + E \frac{d^3\sigma^{+-}}{dp^3}}$$



Для J/ψ мезонов рассматривались следующие подпроцессы:

$$gg \rightarrow (c\bar{c}) + g \rightarrow J/\psi + g$$

$$qg \rightarrow (c\bar{c}) + q \rightarrow J/\psi + q$$

$$q\bar{q} \rightarrow (c\bar{c}) + g \rightarrow J/\psi + g$$

Кроме того, вычисления проводились в рамках NRQCD модели, которая подразумевает, что пара с анти-с может образоваться в одном из промежуточных состояний: $^3S_1^{(1)}$, $^3S_1^{(8)}$, $^1S_0^{(8)}$, $^3P_0^{(8)}$, $^3P_1^{(8)}$, $^3P_2^{(8)}$

Для псевдоскалярных мезонов мы учитывали следующие партонные подпроцессы:

$$gg \rightarrow gg$$

$$gg \rightarrow qq$$

$$\bar{q}q \rightarrow gg$$

$$qq \rightarrow qq$$

$$qg \rightarrow qg$$

Использовались неполяризованные функции распределения NNPDF31_nnlo_as_0118. Поляризованные: NNPDFpol11_100.

Функции распределения, учитывающие конкретную спиральность партонов вычислялись из системы уравнений:

$$f_{a(b)} = f_{a(b)+}^+ + f_{a(b)-}^+ = f_{a(b)-}^- + f_{a(b)+}^- \quad \Delta f_{a(b)} = f_{a(b)+}^+ - f_{a(b)-}^+ = f_{a(b)-}^- - f_{a(b)+}^-$$

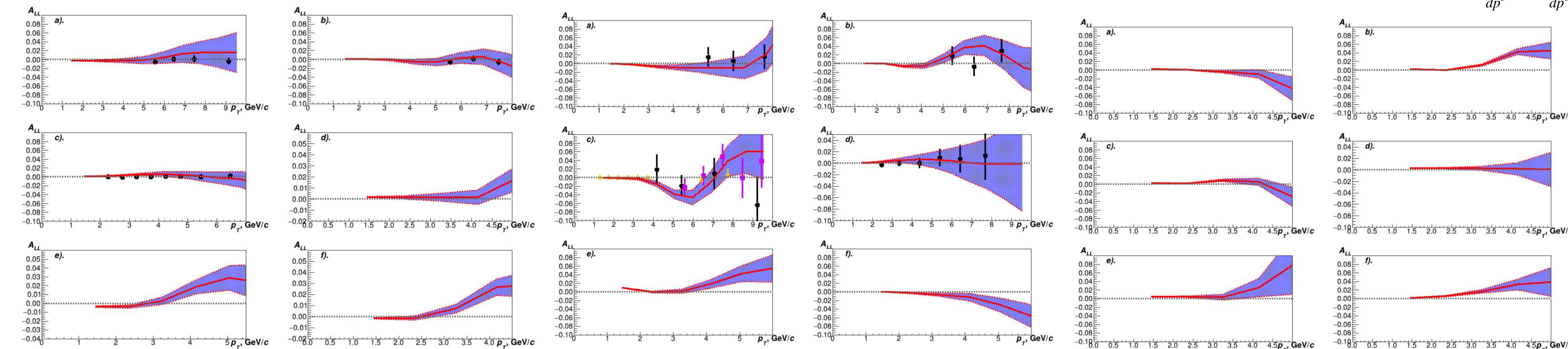
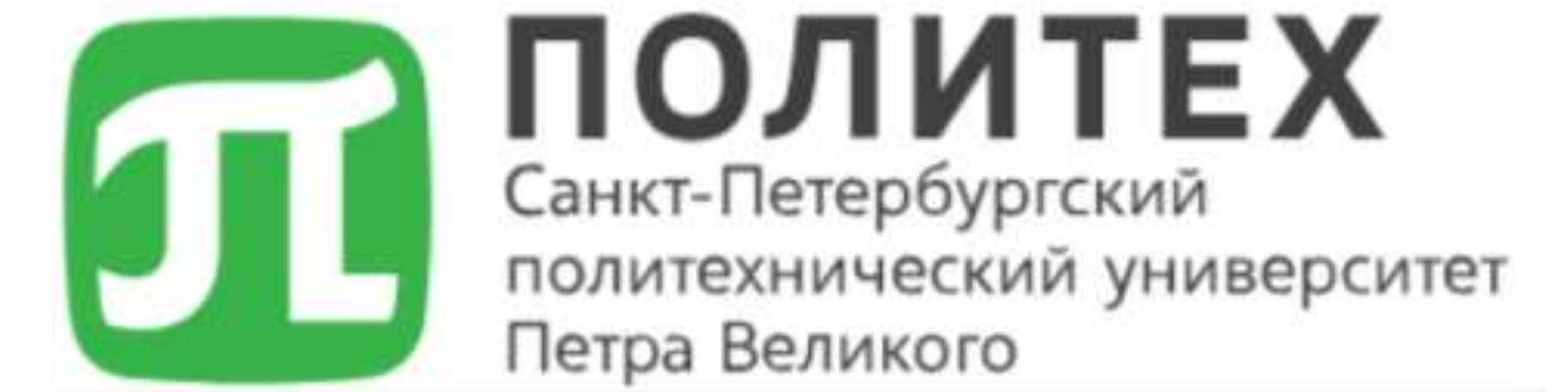


Рис.1. ДПСА в зависимости от поперечного импульса при энергии 510 ГэВ. а). ДПСА π^- мезона, б). ДПСА π^+ мезона, в). ДПСА π^0 мезона, д). ДПСА η мезона, е). ДПСА K^- мезона, ф). ДПСА K^+ мезона. Экспериментальные данные PHENIX отмечены черными точками

Рис.2. ДПСА в зависимости от поперечного импульса при энергии 200 ГэВ. а). ДПСА π^- мезона, б). ДПСА π^+ мезона, в). ДПСА π^0 мезона, д). ДПСА η мезона, е). ДПСА K^- мезона, ф). ДПСА K^+ мезона. Экспериментальные данные а). б). отмечены черными точками [4], в). - черные точки [1], оранжевые точки [5], фиолетовые точки [6]

Рис.3. ДПСА в зависимости от поперечного импульса при энергии 27 ГэВ. а). ДПСА π^- мезона, б). ДПСА π^+ мезона, в). ДПСА π^0 мезона, д). ДПСА η мезона, е). ДПСА K^- мезона, ф). ДПСА K^+ мезона.



NICA Complex

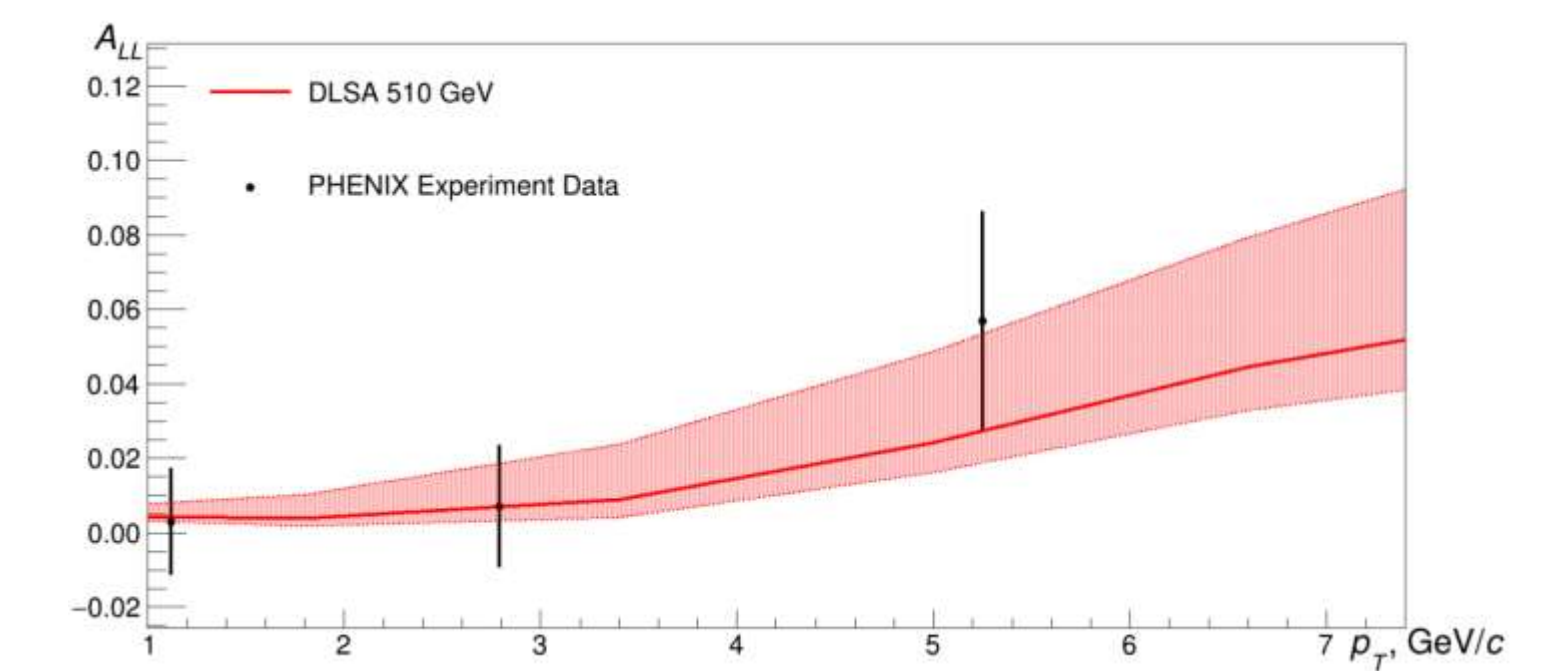
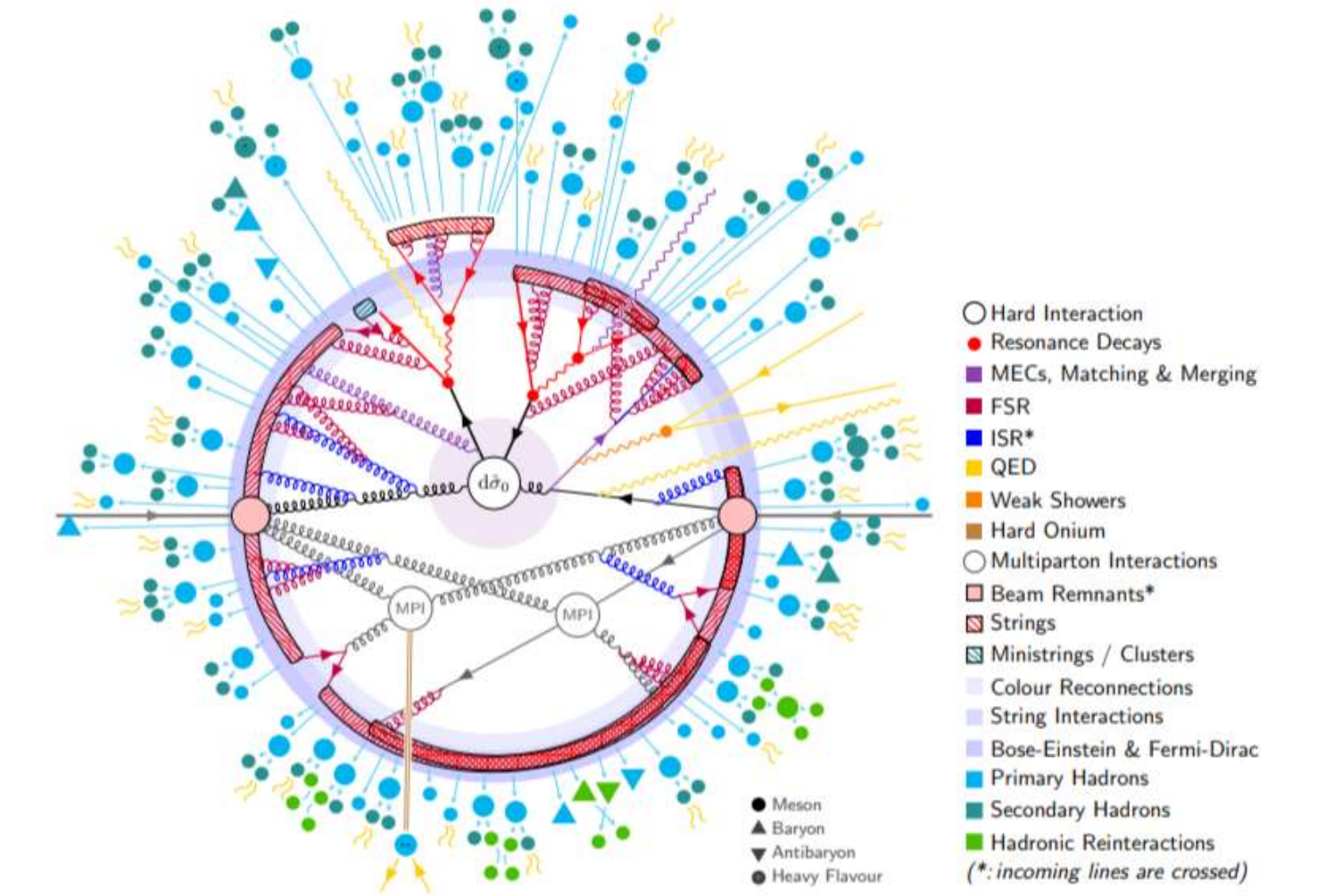
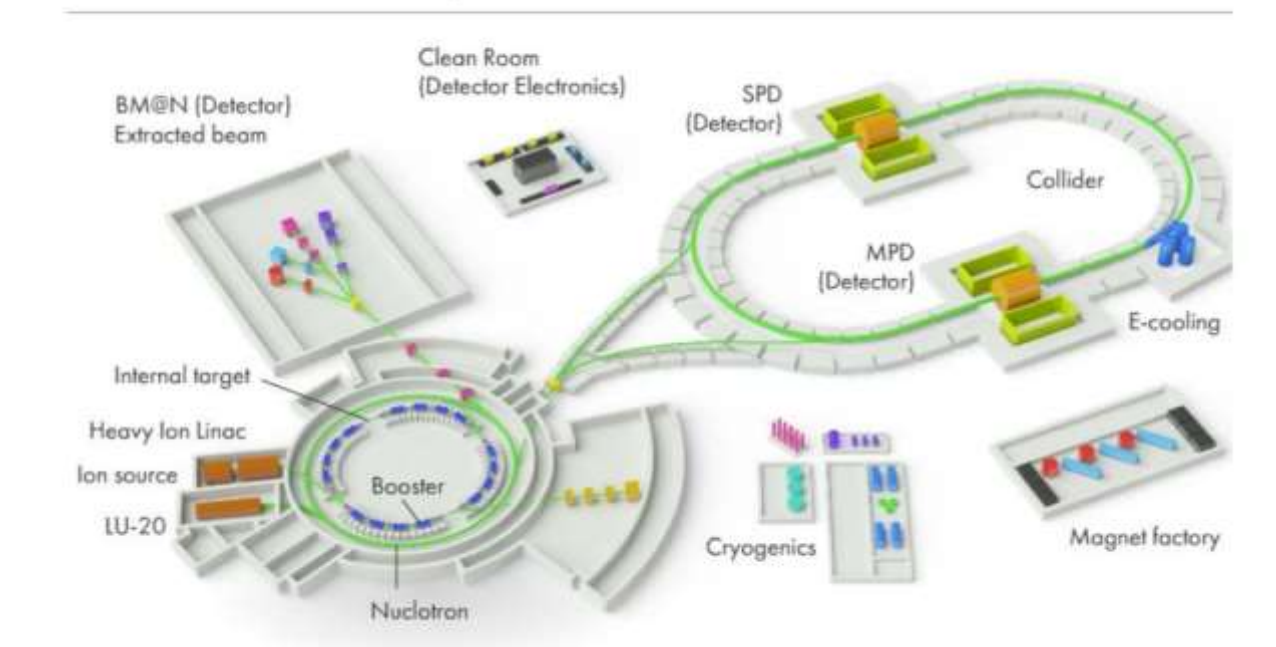


Рис. 4. Зависимость двойной продольной спиновой асимметрии (DLSA) (J/ψ)-мезонов, рожденных в продольно-поляризованных протон-протонных столкновениях при энергии 510 ГэВ, от поперечного импульса.

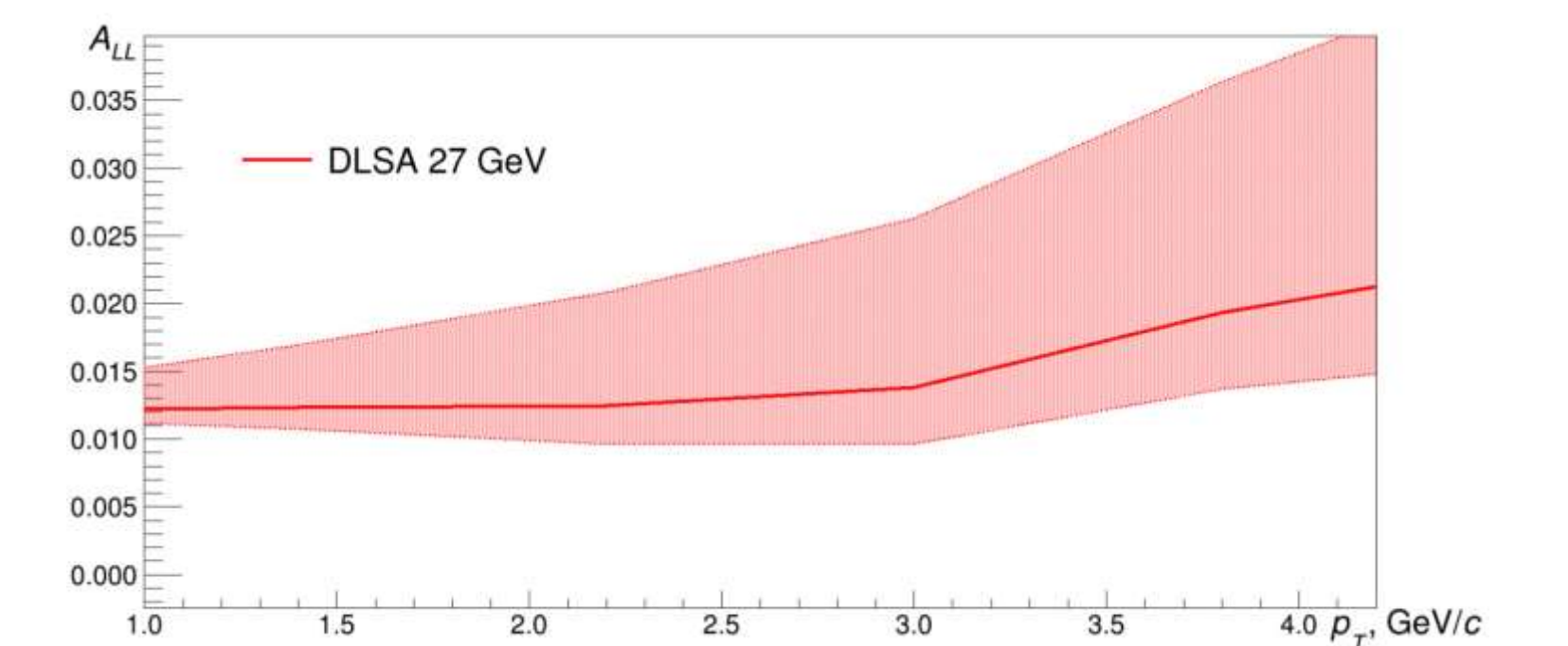


Рис. 5. Прогнозирующая зависимость DLSA (J/ψ)-мезонов, рожденных в продольно-поляризованных протон-протонных столкновениях, от поперечного импульса p_T .

Заключение. Была проведена модификация программного пакета Pythia8, позволяющая вычислять двойную продольную спиновую асимметрию. Были получены результаты, хорошо совпадающие с экспериментальными данными, а так же выполнены прогнозы на энергии NICA.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).