

Двойные продольные спиновые асимметрии в рождении чармониев на коллайдере NICA

А. В. Карпишков^{1,2}, В. А. Салеев^{1,2}

¹ Самарский университет

² Объединённый институт ядерных исследований

13.03.2026

Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»

Содержание

- ▶ Основной формализм НРКХД
- ▶ Продольные асимметрии A_{LL}
- ▶ p_T -распределение A_{LL} для J/ψ на NICA
- ▶ x_F -распределения A_{LL} для J/ψ на NICA
- ▶ x_F -распределения A_{LL} для χ_{c1} и χ_{c2} на NICA
- ▶ Заключение

Основной формализм НРКХД

Модель НРКХД [G. T. Bodwin, E. Braaten, and G. P. Lepage, Phys. Rev. D **51**, 1125 (1995)] описывает тяжёлые кварконии в терминах разложений по фоковским состояниям.

В случае ортокваркония волновая функция может быть записана в виде степенного ряда по параметру скорости $v \sim 1/\ln M_Q$:

$$|\mathcal{H}\rangle = \mathcal{O}(v^0)|Q\bar{Q}[{}^3S_1^{(1)}]\rangle + \mathcal{O}(v)|Q\bar{Q}[{}^3P_J^{(8)}]g\rangle + \mathcal{O}(v^2)|Q\bar{Q}[{}^1S_0^{(8)}]g\rangle \quad (1)$$

$$+\mathcal{O}(v^2)|Q\bar{Q}[{}^3S_1^{(1,8)}]gg\rangle + \dots \quad (2)$$

В НРКХД динамика на больших и малых расстояниях систематически разделяется, и тогда сечение рождения тяжёлого кваркония в партонном процессе $a + b \rightarrow \mathcal{H} + X$ может быть представлена в факторизованной форме:

$$d\hat{\sigma}(a + b \rightarrow \mathcal{H} + X) = \sum_n d\hat{\sigma}(a + b \rightarrow Q\bar{Q}[n] + X) \times \langle \mathcal{O}^{\mathcal{H}}[n] \rangle, \quad (3)$$

где n обозначает набор квантовых чисел пары $Q\bar{Q}$, а её переходы в \mathcal{H} описываются непертурбативными матричными элементами (НМЭ) $\langle \mathcal{O}^{\mathcal{H}}[n] \rangle$.

В общем случае партонное сечение рождения кваркония из пары $Q\bar{Q}$ в фоковском состоянии $n = {}^{2S+1}L_J^{(1,8)}$ имеет форму:

$$d\hat{\sigma}(a + b \rightarrow Q\bar{Q}[{}^{2S+1}L_J^{(1,8)}] \rightarrow \mathcal{H}) = d\hat{\sigma}(a + b \rightarrow Q\bar{Q}[{}^{2S+1}L_J^{(1,8)}]) \times \frac{\langle \mathcal{O}^{\mathcal{H}}[{}^{2S+1}L_J^{(1,8)}] \rangle}{N_{col}N_{pol}},$$

где $N_{col} = 2N_c$ для синглетного по цвету состояния, $N_{col} = N_c^2 - 1$ для октетного состояния, а $N_{pol} = 2J + 1$.

Двойные спиновые асимметрии

Двойные продольные спиновые асимметрии определены, как

$$A_{LL} = \frac{\sigma_{++} - \sigma_{+-}}{\sigma_{++} + \sigma_{+-}} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma}.$$

В ЛП коллинеарной партонной модели (КПМ) + ЛП НРКХД-факторизации:

$$\Delta\sigma = \sum_n \langle \mathcal{O}^X[n] \rangle \sum_{i,j} \Delta f_i \otimes \Delta f_j \otimes \Delta \hat{\sigma}_{ij}[n],$$

$$\sigma = \sum_n \langle \mathcal{O}^X[n] \rangle \sum_{i,j} f_i \otimes f_j \otimes \hat{\sigma}_{ij}[n].$$

Неполяризованные партонные сечения $\hat{\sigma}_{ij}[n]$ хорошо известны в ЛП (например, [P.L. Cho, A.K. Leibovich (1996)] и [R. Gastmans, W. Troost and T. T. Wu, Phys. Lett. B **184**, 257-260 (1987)]).

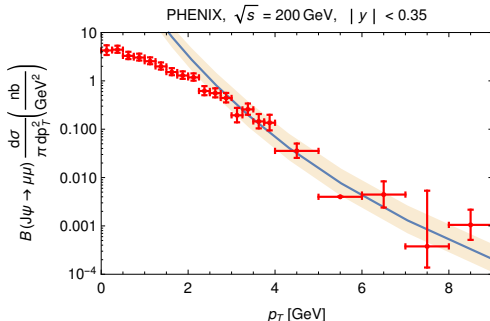
Детали вычислений $\Delta \hat{\sigma}_{ij}[n]$ в ЛП можно найти в работе [Klasen, Kniehl, Steinhauser, Phys.Rev.D **68** (2003) 034017, hep-ph/0306080].

ПФР и октетные НМЭ

В наших вычислениях использовались НМЭ в ЛП [Braaten, Kniehl, Lee, Phys.Rev.D62 (2000) 094005] с наборами неполяризованных NNPDF30_nlo_as_0119_nf_6 и поляризованных NNPDFpol11_100 ПФР. В рамках НРКХД фиты в ЛП определяют только линейную комбинацию октетных НМЭ:

$$\mathcal{M}_8 = \left\langle \mathcal{O}^{J/\psi} \left[{}^1S_0^{(8)} \right] \right\rangle + \frac{r}{m_c} \left\langle \mathcal{O}^{J/\psi} \left[{}^3P_0^{(8)} \right] \right\rangle, \quad r = 3.5, \quad m_c = 1.5$$

Спектр по поперечному импульсу p_T J/ψ на ускорителе RHIC (учтены вклады прямого и распадного рождений) имеет вид:



Двойные продольные спиновые асимметрии в рождении J/ψ

Продольные асимметрии на PHENIX при $\sqrt{s} = 510$ ГэВ и $1.2 < |y| < 2.4$

Результаты для нескольких реплик Δg в сравнении с данными PHENIX:

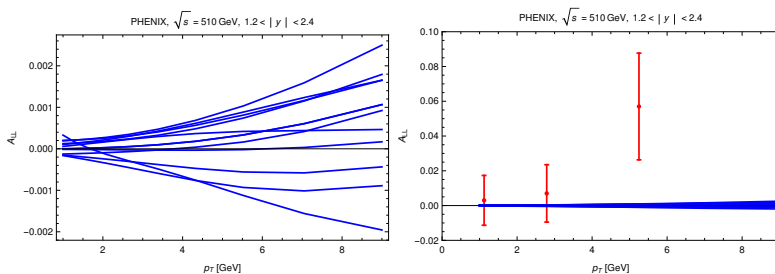
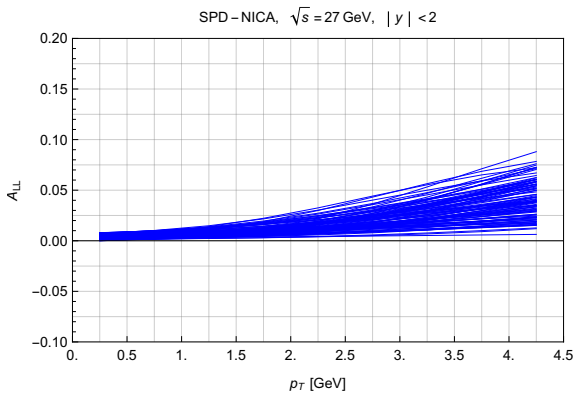
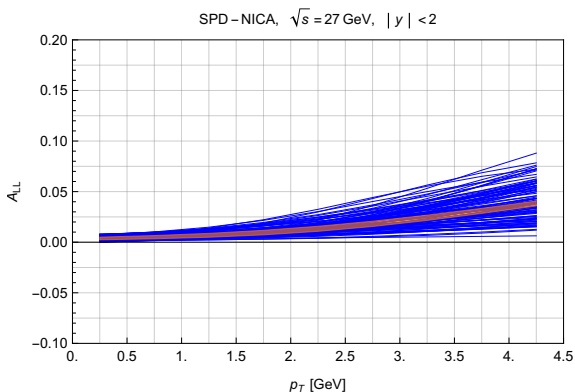


Рис. 1: Результаты вычислений Нефёдова М.А.

p_T -распределение A_{LL} J/ψ при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ A_{LL} для сотни реплик $\Delta g(q)$:

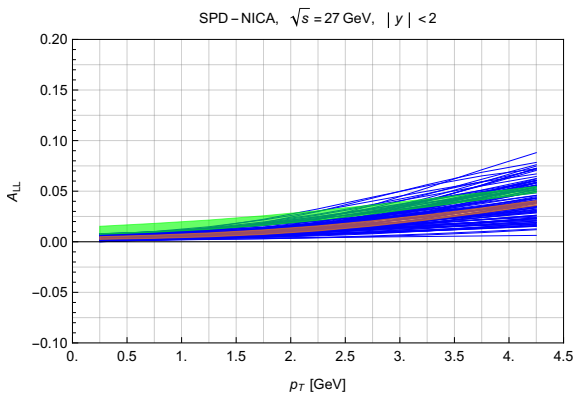
p_T -распределение $A_{LL} J/\psi$ при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ

A_{LL} для сотни реплик $\Delta g(q)$, полоса – вариация жёсткого масштаба для средней по всем репликам:



p_T -распределение $A_{LL} J/\psi$ при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ

A_{LL} для сотни реплик $\Delta g(q)$, полосы – вариации масштаба и НМЭ:



x_F -распределения асимметрии J/ψ в ЛП при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ

A_{LL} для средней по всем репликам $\Delta g(q)$, оранжевая полоса – вариация масштаба:

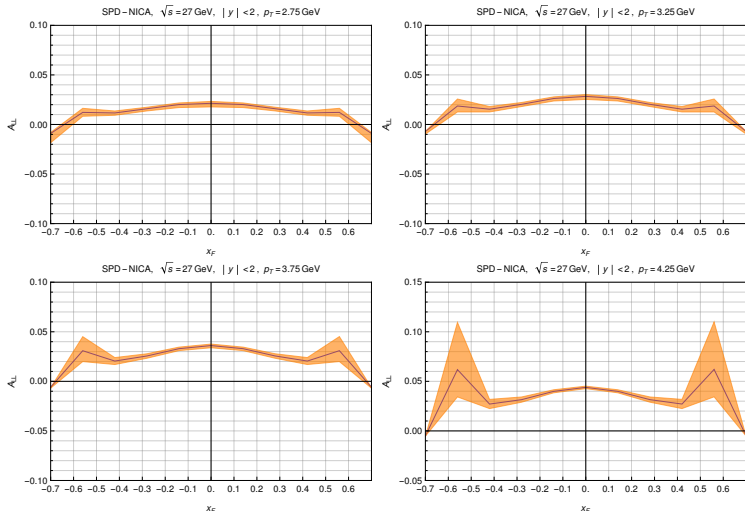
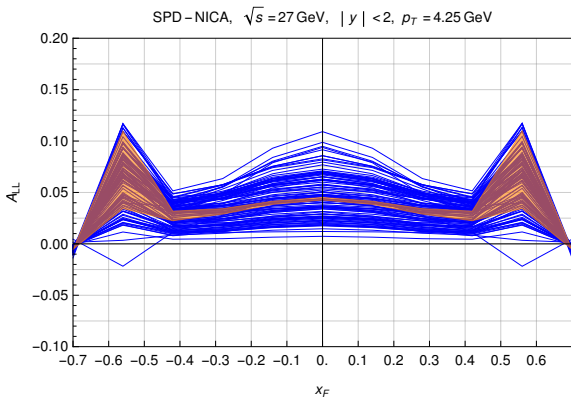


Рис. 2: A_{LL} в прямом рождении J/ψ при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ и $|y| \leq 2$ при различных p_T : 2.75, 3.25, 3.75 и 4.25 ГэВ. Учтены вклады начальных партонов $gg + qq$.

x_F -распределение асимметрии J/ψ в ЛП при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ и $p_T = 4.25$ ГэВ

x_F -распределение асимметрии A_{LL} в ЛП для сотни реплик $\Delta g(q)$, полоса – вариация масштаба:



Двойные продольные спиновые асимметрии в рождении χ_{c1} и χ_{c2}

x_F -распределения асимметрии в ЛП χ_{c1} -мезона при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ

A_{LL} для средней по всем репликам $\Delta g(q)$, оранжевая полоса – вариация масштаба:

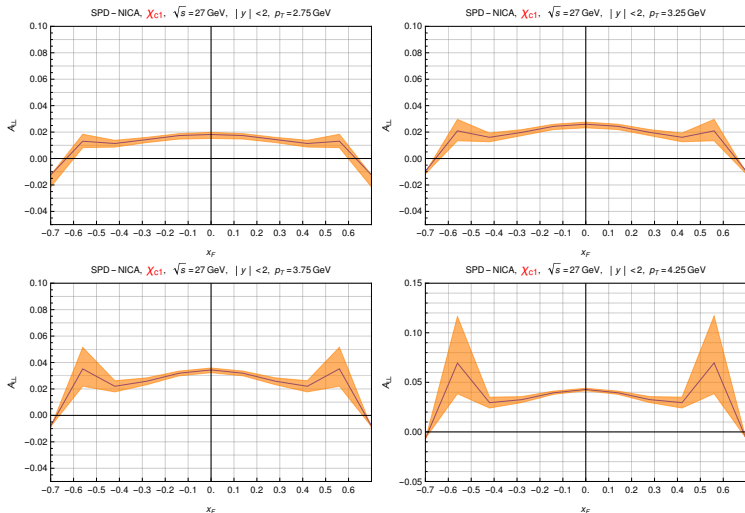


Рис. 3: A_{LL} в рождении χ_{c1} при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ и $|y| \leq 2$ при различных p_T : 2.75, 3.25, 3.75 и 4.25 ГэВ. Учтены вклады начальных партонных $gg + qq$.

x_F -распределения асимметрии в ЛП χ_{c2} -мезона при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ

A_{LL} для средней по всем репликам $\Delta g(q)$, оранжевая полоса – вариация масштаба:

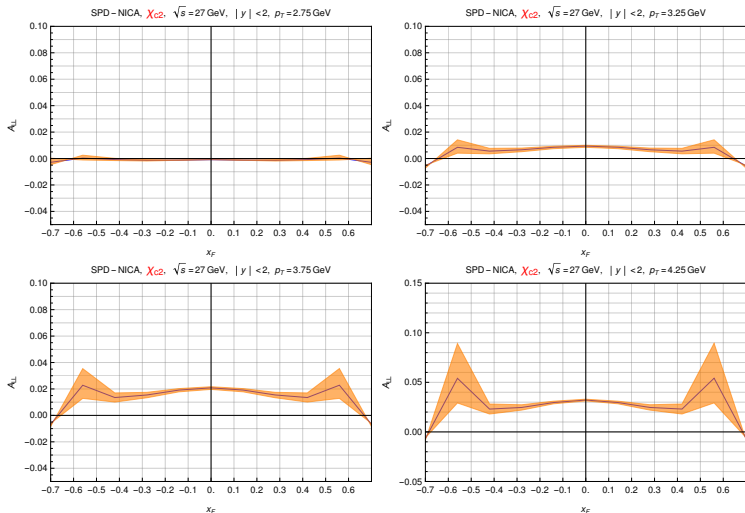
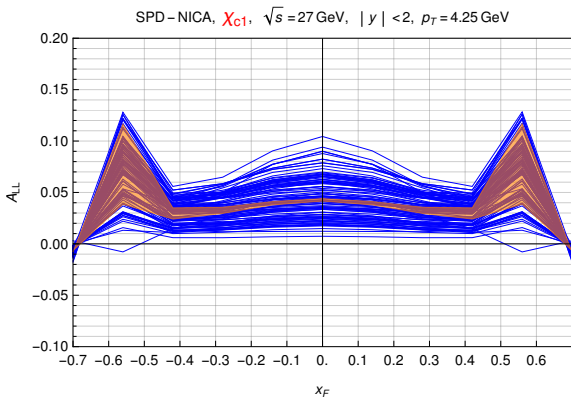


Рис. 4: A_{LL} в рождении χ_{c2} при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ и $|y| \leq 2$ при различных p_T : 2.75, 3.25, 3.75 и 4.25 ГэВ. Учтены вклады начальных партонных $gg + qg$.

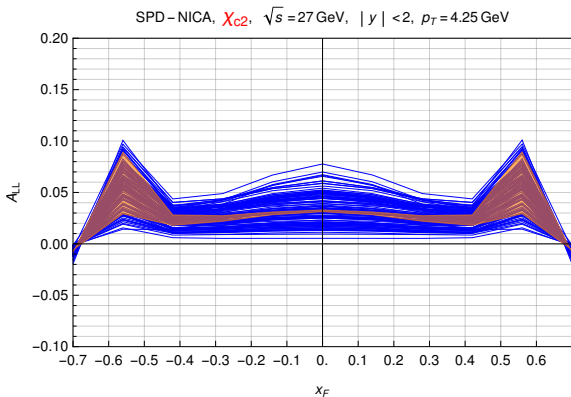
x_F -распределение асимметрии χ_{c1} -мезона в ЛП при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ и $p_T = 4.25$ ГэВ

x_F -распределение асимметрии A_{LL} в ЛП для сотни реплик $\Delta g(q)$, полоса – вариация масштаба:



x_F -распределение асимметрии χ_{c2} -мезона в ЛП при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ и $p_T = 4.25$ ГэВ

x_F -распределение асимметрии A_{LL} в ЛП для сотни реплик $\Delta g(q)$, полоса – вариация масштаба:



Заключение

- ▶ Рассчитаны продольные асимметрии A_{LL} в ЛП КПМ и модели НРКХД в прямом рождении J/ψ с учётом распадов вышележащих состояний, а также отдельно в рождении P -волновых состояний χ_{c1} и χ_{c2} . Учтены вклады начальных состояний gg и qq .

Заключение

- ▶ Рассчитаны продольные асимметрии A_{LL} в ЛП КПИМ и модели НРКХД в прямом рождении J/ψ с учётом распадов вышележащих состояний, а также отдельно в рождении P -волновых состояний χ_{c1} и χ_{c2} . Учтены вклады начальных состояний gg и qg .
- ▶ Мы видим, что A_{LL} не превышает значения в 10% для $p_T \in [0, 4.25]$ ГэВ почти для всех реплик $\Delta g(q)$ как для J/ψ , так и для χ_{c1} и χ_{c2} . В среднем она не превышает 5%.

Заключение

- ▶ Рассчитаны продольные асимметрии A_{LL} в ЛП КИМ и модели НРКХД в прямом рождении J/ψ с учётом распадов вышележащих состояний, а также отдельно в рождении P -волновых состояний χ_{c1} и χ_{c2} . Учтены вклады начальных состояний gg и qg .
- ▶ Мы видим, что A_{LL} не превышает значения в 10% для $p_T \in [0, 4.25]$ ГэВ почти для всех реплик $\Delta g(q)$ как для J/ψ , так и для χ_{c1} и χ_{c2} . В среднем она не превышает 5%.
- ▶ Стоит также отметить, что продольные асимметрии убывают при переходе от χ_{c1} к χ_{c2} приблизительно на множитель $1.3 \div 2$.

Предсказания A_{LL} для фотонов:

V. A. Saleev and A. V. Shipilova, "Double Longitudinal-Spin Asymmetries in Direct Photon Production at NICA," Phys. Part. Nucl. Lett. **20** (2023) no.3, 400-403.

Спасибо за внимание!