

P2-2009-10

Р. Я. Зулкарнеев*

ОБ АЗИМУТАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ АДРОНОВ,
РОЖДЕННЫХ В РЕАКЦИЯХ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ
ЧАСТИЦАМИ И СОУДАРЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА **RHIC**

Направлено в журнал «Письма в ЖЭТФ»

*E-mail: zulr@sunse.jinr.ru

Зулькарнеев Р. Я.

P2-2009-10

Об азимутальных распределениях адронов, рожденных в реакциях с поляризованными частицами и соударениях тяжелых ядер в экспериментах на RHIC

В работе показано, что азимутальное распределение бесспиновых адронов, инклюзивно рожденных в соударениях двух протонов с противоположно направленными, но равными по модулю поляризациями частиц (с «выстроенными» спинами), оказывается анизотропным относительно оси выстроенности спинов в начальном состоянии. Автор обращает внимание также на следующую аналогию, которая обнаруживается в связи с этим обстоятельством. А именно, форма азимутальных распределений адронов, рождающихся в реакциях с поляризованными частицами (спин $1/2$), совпадает с той, что имеет место при образовании адронов в нецентральных AuAu- и CuCu-столкновениях при энергиях коллайдера RHIC. По мнению автора, такое сходство могло бы указывать на возникновение углового момента у файерболов, рожденных в процессе соударения отмеченных ядер.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Zulkarneev R. Ya.

P2-2009-10

On Azimuthal Distributions of Hadrons Produced in Reactions with Polarized Particles and Heavy Nuclei Collisions in Experiments at RHIC Energies

The goal of the work is to show that an anisotropy of the azimuthal distribution of inclusive spinless particles can appear if these particles were produced at two proton collisions with oppositely directed but equal on module polarizations (the state with «aligned» spins). The author draws the attention to the following analogy which happens due to that circumstance. Namely a full set of azimuthal distributions of particles produced in the collisions of two fermions (state with spin $s = 1/2$), is practically identical to the one which was found in non-central AuAu- and CuCu-collisions at the energies of RHIC experiments. Author believes that one of explanations of the impressive similiarity of the distributions of particles produced in absolutely different dynamical processes, could be if the fireballs obtain at AuAu-, CuCu-collisions an angular moment while being produced.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

Хорошо известно, что азимутальные распределения вторичных частиц в реакции изотропны относительно оси соударения начальных неполяризованных пучков частиц в этой реакции. Столкновение пучков с противоположно направленными, но равными по модулю поляризациями (выстроенными спинами) должно стать, вообще говоря, анизотропным. Нарушение изотропии, например, при инклюзивном образовании частиц проявит себя в том, что их распределения могут стать анизотропными относительно вылета частиц вдоль и поперек оси выстроенности спинов. Такой анизотропией можно воспользоваться для поиска коллективных эффектов во взаимодействиях адронов. В последние годы интерес к подобным поискам возрос в связи с проблемами изучения кварк-глюонной плазмы. Цель настоящей работы — показать, что обсуждаемая анизотропия действительно может возникнуть при соударении двух фермионов, и отметить факт совпадения форм азимутальных распределений частиц, рождаемых в адрон-адронных и ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях. Конкретные расчеты выполнены для соударения протонов со спинами, выстроенными перпендикулярно оси соударения пучков.

Найдем общий вид сечения неупругого процесса $pp \rightarrow h + \dots$ с инклюзивным образованием бесспинового адрона h в с.ц.м. начальных протонов, пользуясь феноменологическими соображениями. Для этого построим из импульсов падающего нуклона \mathbf{p} и вторичного адрона \mathbf{p}' ортонормированную тройку базисных векторов

$$\mathbf{n} = [(\mathbf{p}/p) \times (\mathbf{p}'/p')]/\sin \theta, \quad \mathbf{m} = (\mathbf{p}/p - \mathbf{p}'/p')/2 \sin \theta/2, \\ \mathbf{l} = (\mathbf{p}/p + \mathbf{p}'/p')/2 \cos \theta/2.$$

Потребуем, чтобы сечение было скалярной функцией \mathbf{p} , а также поляризаций \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_2 сталкивающихся пучков. Необходимо также, чтобы сечение процесса было инвариантным относительно инверсии системы отсчета и перестановок нуклонов местами. Пользуясь трансформационными свойствами относительно этих операций упомянутых выше величин, нетрудно показать, что простейший общий вид искомого сечения, удовлетворяющего этим условиям, будет следующим:

$$I(pp \rightarrow h + \dots) = I_0 + I_1(\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2)\mathbf{n} + I_2(\mathbf{P}_1\mathbf{n})(\mathbf{P}_2\mathbf{n}) + I_3(\mathbf{P}_1\mathbf{m})(\mathbf{P}_2\mathbf{m}) + \\ + I_4(\mathbf{P}_1\mathbf{l})(\mathbf{P}_2\mathbf{l}) + I_5((\mathbf{P}_1\mathbf{m})(\mathbf{P}_2\mathbf{l}) + (\mathbf{P}_1\mathbf{l})(\mathbf{P}_2\mathbf{m})). \quad (1)$$

Здесь коэффициенты $I_0 - I_5$ являются функциями скалярных величин p^2 , p'^2 и pp' , отражающих зависимость найденного сечения от энергий частиц и угла испускания вторичного адрона.

Выясним, как зависит найденное нами сечение от азимутального угла испускания рожденного адрона φ . Азимутальный угол определим общепринятым образом как угол между векторами \mathbf{P}_1 и \mathbf{n} . Угол φ положителен, если движение вектора \mathbf{P}_1 к нормали по кратчайшему пути происходит против часовой стрелки. При $\mathbf{P}_1 = -\mathbf{P}_2$ расчет φ -зависимости вылета адрона приводит к выражению вида

$$I(\vartheta, \varphi) = I_0 - I_2 P^2 \cos^2 \varphi - (I_3 \cos^2 \vartheta/2 + I_4 \sin^2 \vartheta/2 + I_5 \sin^2 \vartheta) P^2 \sin^2 \varphi, \quad (2)$$

где P — модуль поляризаций пучков.

Из (2) видно, что ожидаемая нами азимутальная анизотропия сечений вылета адрона относительно оси выстроенности спинов, в самом деле, имеет место. Ее форма, однако, отличается от уже известных аналогичных форм (для частиц со спином $1/2$), для которых характерна зависимость вида $\cos \varphi$ [1], не сводящаяся к (2). Таким образом, к двум уже известным ее формам (обязанным вектору поляризаций) добавляется еще одна, связанная с существованием оси выстроенности спинов*. Сам по себе этот факт понятен и не удивителен.

Однако автор обращает внимание на следующую аналогию, которая появляется в связи с этим результатом. Набор форм азимутальных распределений частиц, рождающихся при соударениях адронов со спином $1/2$, оказывается практически идентичным тому, который проявляет себя в нецентральных ядро-ядерных соударениях при сверхвысоких энергиях [2] (см. табл.1). Принято считать, что наблюдаемые в последнем случае частицы вылетают, в основном, из объема фajerбола — плотной и горячей материи. Асимметрия их вылета определяется коллективными силами, действующими между конститuentами этого фajerбола в самый ранний период его эволюции. Согласно [3] коллективные силы, однако, отсутствуют во взаимодействиях двух адронов. Возникает вопрос: в чем же причина впечатляющей схожести азимутальных распределений частиц, рождающихся в совсем разных по динамике процессах взаимодействия?

На взгляд автора, один из ответов общего характера может быть связан со свойствами симметрии вращательно-поступательного (винтового) типа движений. Известно, что в процессах с участием адронов именно эти свойства

*Сечение (1) представлено минимальным набором линейных членов, удовлетворяющих \mathcal{P} -инвариантности и принципу Паули. Оно не включает в себя выражения, являющиеся степенными функциями членов, содержащихся в (1), хотя первые удовлетворяют этим требованиям также. Учет таких нелинейных выражений приводит к появлению в азимутальной зависимости дополнительного вклада от членов, пропорциональных более высоким степеням $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$, чем в выражении (2).

частиц со спином определяют характер угловых распределений вторичных частиц в реакциях [1, 4, 5]. При соударении тяжелых ядер подобные же свойства, очевидно, появятся и у фибролов, если они (или их какие-то части) в процессе своего образования получают вращательный момент (со всеми другими последствиями, вытекающими из этого).

Альтернативные попытки объяснения причины обсуждаемой аналогии на основе идей о коллективных механизмах во взаимодействии двух адронов в настоящее время не имеют достаточного экспериментального обоснования. Поэтому дальнейшие исследования в этом направлении целесообразны. Один из таких экспериментов мог бы состоять в проверке формы азимутальной зависимости (2) и поиске отклонений от нее. Обнаружение члена $\cos 2\varphi$ в инклюзивном рождении частиц при pp - или ee -столкновениях с выстроенными спинами могло бы явиться серьезным указанием на вклад коллективных механизмов в сечения этих элементарных процессов.

Автор благодарит В. Л. Любошица, О. Теряева и А. Ефремова за обсуждение вопросов, затронутых в работе.

Форма азимутальных распределений частиц, рождающихся при соударении двух фермионов (адронов со спином 1/2) и тяжелых ядер между собой. A, B, a, b, c не зависят от азимутального угла

Неполяризованные пучки $\mathbf{P} = 0$	Поляризованные пучки $\mathbf{P}_{1,2} \neq 0$	Соударение с выстроенными спинами $\mathbf{P}_1 = -\mathbf{P}_2$	Бесструктурные адроны
Изотропия	$\sim (1 + a \cos \varphi)$	$\sim (1 + b \cos^2 \varphi + c \sin^2 \varphi)$	
Радиальный поток	Направленный поток	Эллиптический поток	Наличие структуры,
Изотропия	$\sim (1 + A \cos \varphi)$	$\sim (1 + B \cos^2 \varphi + B \sin^2 \varphi) = (1 + B \cos 2\varphi)$	конstituенты фиброла

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lepore J.* // Phys. Rev. 1950. V. 79, P. 137;
Bethe H., Morrison P. Elementary Nuclear Theory. New York, J. Wiley&Sons Inc., London, Chapman & Hall, 1956.
2. *Adams J. et al. (STAR Collaboration)* // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 102;
Adcox K. et al. (PHENIX Collaboration) // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 184.
3. *Artykov I. Z., Barashenkov V. S., Eliseev S. M.* // Nucl. Phys. Ser. B. 1966. V. 3. P. 87; V. 6. P. 11;
Барашенков В. С. и др. // УФН. 1973. Т. 109. С. 91.

4. Blatt J. V., Biedenharn L. C. // *Rev. Mod. Phys.* 1954. V. 24. P. 258;
Ахиезер А. И., Берестецкий В. Б. *Квантовая электродинамика*. М.: Наука, 1968.
5. Берестецкий В. Б., Лифшиц И. М., Питаевский Л. П. *Релятивистская квантовая теория*. Ч. 1. М.: Наука, 1969.

Получено 28 января 2009 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 24.04.2009.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,43. Уч.-изд. л. 0,54. Тираж 415 экз. Заказ № 56579.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/