Общие особенности односпиновой асимметрии инклюзивного рождения π-мезонов в экспериментах с фиксированной мишенью.

А. Н. Васильев В. В. Мочалов

Институт Физики Высоких Энергий, Протвино, Россия

В работе проведен анализ результатов различных экспериментов по измерению односпиновой асимметрии в инклюзивном рождении π-мезонов в диапазоне энергий от 13 до 200 ГэВ. Обнаружен экспериментальный факт, что односпиновая асимметрия начинает возрастать при одном универасальном значении энергии π-мезона в системе центра масс.

ВВЕДЕНИЕ.

В эксперименте ПРОЗА-М в ИФВЭ были проведены измерения односпиновой асимметрии A_N в реакциях $\pi^- + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ и $\pi^- + d_\uparrow \to \pi^0 + X$ при энергии пучка 40 ГэВ в центральной области при значении скэйлинговой переменной Фейнмана $|x_\mathrm{F}| < 0.15$ [1]. Было обнаружено, что при поперечном импульсе $p_T < 1.6$ ГэВ/с асимметрия сравнима с нулем, тогда как при $p_T > 1.6$ ГэВ/с асимметрия линейно возрастает по абсолютной величине и достигает -40% при $p_T \approx 2.5$ ГэВ/с (**рис. 1** (слева)). Если фитировать асимметрию линейной функцией, то прямая пересекает ось абсцисс при значении поперечного импульса $p_T^0 \approx 1.7$ ГэВ/с [1]. Асимметрия в реакции $\pi^- + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ была также измерена в области фрагментации поляризованной мишени [2] (**рис. 1** (справа)). Обнаружено, что асимметрия при $-0.8 < x_\mathrm{F} < -0.4$ и p_T в диапазоне от 1 до 2 ГэВ/с значительна, тогда как при малых значениях $|x_\mathrm{F}|$ и p_T асимметрия сравнима с нулем. Оказалось, что асимметрия начинает возрастать при значении энергии π^0-мезона в системе центра масс $E_0^{cms} \approx 1.7$ ГэВ [2]. Аналогичное поведение асимметрии было обнаружено и в реакции $p + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ при энергии 70 ГэВ [3]. Таким образом, можно предположить, что до некоторого порогового значения асимметрия не возникает, потом линейно растет и, наконец, может выходить на насыщение на некотором уровне, хотя бы потому, что асимметрия не может превышать 100%.

Тогда можно описать зависимость асимметрии от энергии функцией

$$A_N = \begin{cases} 0 & \text{, если } E < E_0 \\ k \cdot (E - E_0) & \text{, если } E \geq E_0 \end{cases} \tag{1}$$

где E - энергия рожденного π^0-мезона в системе центра масс, E_0 - пороговое значение. π^0-мезоны регистрируются в достаточно узком угле относительно оси пучка, поэтому для каждого эксперимента зависимость асимметрии от энергии отражает на самом деле зависимость от поперечного импульса (в экспериментах в центральной области) или зависимость от x_{F} для экспериментов в области фрагментации поляризованной частицы. Насыщение достигается при больших значениях поперечного импульса или x_{F}, где ошибки измерений достаточно высоки, поэтому эти точки не сильно меняют результат. Так как нет критерия, позволяющего определить в какой момент асимметрия начинает выходить на насыщение, при фитировании использовались все точки.

В результате фитирования по формуле (1) значения точки E_0, в которой асимметрия начинает возрастать, соответственно равны $E_0^{cms} = (1.67 \pm 0.11)$ ГэВ в центральной области и $E_0^{cms} = (1.76 \pm 0.16)$ ГэВ в области фрагментации поляризованной мишени. Заметим, что реальные ошибки несколько выше, так как не учтены точность определения энергии, и для каждой точки происходит интегрирование по поперечному импульсу и x_{F}. Изменение среднего значения переменной x_{F} на 0.01 приводит при 200 ГэВ, например, к изменению значения точки излома на 0.1 ГэВ.

Таким образом в реакции $\pi^- + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ асимметрия начинает расти при одной и той же энергии π^0-мезона в системе центра масс в двух различных кинематических областях. Однако, данный результат не дает ответа на вопрос, от какой кинематической переменной поведение асимметрии универсально. Большинство существующих моделей рассматривает асимметрию как функцию x_{F} или p_T в зависимости от кинематической области, в которой проведены измерения.

В данной работе проанализированы результаты измерения односпиновой асимметрии инклюзивного образования π^+, π^0, π^--мезонов во всех поляризационных экспериментах с фиксированной мишенью в разных кинематических областях при энергиях пучка от 13 до 200 ГэВ, при этом рассматривались только результаты измерений при значениях поперечного импульса p_T больше 0.5 ГэВ/с.

1. ОДНОСПИНОВЫЕ АСИММЕТРИИ ИНКЛЮЗИВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ π^+ МЕЗОНОВ.

Измерения A_N инклюзивного рождения π^+-мезонов были проведены в БНЛ при энергии пучка 13.3, 18.5 и 22 ГэВ, в ИФВЭ при 40 ГэВ и в Фермилабе при 200 ГэВ.

Сначала проанализируем результаты двух экспериментов, E925 при энергии пучка 22 ГэВ[4] и E704 [5] при 200 ГэВ, в области фрагментации поляризованного пучка в реакции $p_\uparrow + p \to \pi^+ + X$ в одинаковых кинематических областях в переменных поперечного импульса p_T и $x_{\rm F}$, но при существенно разных энергиях пучка. В обоих экспериментах при значениях $p_T > 0.7$ ГэВ/с и $x_{\rm F} > 0.7$ асимметрия достигает 40%. В то же время асимметрия начинает возрастать при существенно разных значениях переменной $x_{\rm F}$. При фитировании экспериментальных данных по формуле (1), зависимостью от $x_{\rm F}$, получаем, что точка начала роста асимметрии в эксперименте E925 равна $x_{\rm F}^0 = 0.46 \pm 0.01$, а в эксперименте E704 $x_{\rm F}^0 = 0.16 \pm 0.02$. (см. **рис. 2**, верхний ряд). В области фрагментации поляризованного пучка асимметрия практически во всех моделях зависит, в основном, от $x_{\rm F}$ (см. например [6]), что противоречит экспериментальным данным.

Ранее во введении и в работе [2] было отмечено, что в реакции $\pi^- + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ для двух разных кинематических областей (в области фрагментации поляризованной частицы и в центральной области при $x_{\rm F} \approx 0$) абсолютное значение асимметрии начинает возрастать при одном и том же значении энергии π^0-мезона в системе центра масс. Для каждого эксперимента найдем зависимость асимметрии от энергии в системе центра масс E^{cms} (см. **рис. 2**, нижний ряд). Точки начала роста асимметрии $E_0^{cms} = (1.57 \pm 0.04)$ ГэВ для эксперимента E925 и $E_0^{cms} = (1.68 \pm 0.22)$ ГэВ для E704 совпадают в пределах ошибок между собой. Удивительно, но это значение совпадает и с результатами, полученными ранее для π^0-мезона.

Для всех остальных экспериментов далее сразу анализировалась зависимость асимметрии от полной энергии π-мезона в системе центра масс функцией (1), тогда как в оригинальных работах асимметрия изучалась как функция поперечного импульса p_T или скэйлинговой переменной Фейнмана $x_{\rm F}$.

1.1. Измерения в БНЛ при 13.3 и 18.5 ГэВ

Асимметрия в БНЛ при энергии поляризованного протонного пучка 13.3 и 18.5 ГэВ исследовалась при $< x_{\mathrm{F}} >= 0.2$ в зависимости от поперечного импульса. Результаты, взятые из работы [7], приведены на **рис. 3**. Асимметрия начинает возрастать при $E_0^{cms} = (1.26 \pm 0.04)$ ГэВ при энергии 13.3 ГэВ, и в точке $E_0^{cms} = (1.46 \pm 0.08)$ ГэВ при 18.5 ГэВ.

1.2. Измерения в ИФВЭ при 40 ГэВ

Асимметрия инклюзивного рождения π^+-мезонов была также измерена в эксперименте ФОДС, Протвино [8]. Авторы сделали вывод, что асимметрия пересекает ноль при фитировании данных прямой линией при $x_T = 0.37 \pm 0.02$, что соответствует при $x_{\mathrm{F}} \equiv 0$ значению энергии (1.62 ± 0.1) ГэВ в системе центра масс. К сожалению в работе не приведено значения x_{F} для каждого интервала по поперечному импульсу. В то же время в работе указано, что среднее значение x_{F} менялось от 0.02 до 0.1. Значение $x_{\mathrm{F}} = 0.1$ для каждого интервала по продольному импульсу означает пересечение оси при $E_0^{cms} = 1.66$ ГэВ. Поэтому с хорошей точностью получаем $E_0^{cms} = 1.64 \pm 0.15$ ГэВ.

2. ОДНОСПИНОВЫЕ АСИММЕТРИИ ИНКЛЮЗИВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ π^0-МЕЗОНОВ.

Асимметрия инклюзивного рождения π^0-мезонов исследовалась в ЦЕРН при 24 ГэВ в $pp_\uparrow$-рассеянии, в Протвино в реакции $\pi^- + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ при 40 ГэВ и реакции $pp_\uparrow \to \pi^0 + X$ при 70 ГэВ, а также в Фермилабе при 200 ГэВ в $p_\uparrow p$ и $\bar{p}_\uparrow p$ взаимодействиях. Результаты анализа асимметрии в реакции $\pi^- + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ при 40 ГэВ рассмотрены ранее.

2.1. Измерения в реакции $pp_\uparrow \to \pi^0 + X$.

Результаты измерения асимметрии в реакции $p + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ при энергии 24 ГэВ [9] приведены на **рис. 4** (слева). Асимметрия возрастает, начиная с $E_0^{cms} = (1.70 \pm 0.07)$ ГэВ.

Предварительные результаты измерения A_N в реакции $pp_\uparrow \to \pi^0 + X$ при энергии 70 ГэВ опубликованы в работе [3]. В центральной области измеренная асимметрия близка к нулю, тогда как в области фрагментации мишени “сырая асимметрия” A_N^{raw} достигала -3%, что соответствует величине -30% физически наблюдаемой A_N (**рис. 4**, (справа)). Точка начала роста асимметрии $E_0^{cms} = (1.93 \pm 0.12)$ ГэВ.

2.2. Измерения в реакции $p_\uparrow(\bar{p}_\uparrow) + p \to \pi^0 + X$ при 200 ГэВ.

A_N в реакции $p_\uparrow(\bar{p}_\uparrow)+p \to \pi^0+X$ при 200 ГэВ измерена в эксперименте E704 [10] (**рис. 5**). Асимметрия в реакции $p_\uparrow+p \to \pi^0+X$ начинает расти при $E_0^{cms} = (2.16 \pm 0.26)$ ГэВ, а в реакции $\bar{p}_\uparrow + p \to \pi^0 + X$ при $E_0^{cms} = (0.9 \pm 0.6)$ ГэВ.

В центральной области в реакции $p_\uparrow + p \to \pi^0 + X$ асимметрия совпадает с нулем во всем диапазоне измерений [11].

3. ОДНОСПИНОВЫЕ АСИММЕТРИИ ИНКЛЮЗИВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ π^--МЕЗОНОВ.

Подобные же исследования были проведены для реакции $p_\uparrow + p \to \pi^- + X$ при 22 [4] и 200 ГэВ [5]. Асимметрия начинает возрастать при $E_0^{cms} = (1.95 \pm 0.02)$ ГэВ для эксперимента E925 и при $E_0^{cms} = (2.9 \pm 0.2)$ при 200 ГэВ для эксперимента E704 (**рис. 6**).

Асимметрия π^--мезона в реакции $p_\uparrow + p \to \pi^- + X$ в центральной области во всех проведенных экспериментах при 13.3 и 18.5 ГэВ в БНЛ [7] и при 40 ГэВ в ИФВЭ [8] совместима с нулем.

4. ОДНОСПИНОВЫЕ АСИММЕТРИИ В РЕАКЦИИ $\bar{p}_\uparrow p \to \pi^\pm + X$ ПРИ 200 ГЭВ

A_N в реакции $\bar{p}_\uparrow p \to \pi^\pm X$ при 200 ГэВ приведена на **рис. 7**. Для π^+-мезонов точка начала роста асимметрии равна $E_0^{cms} = 3.1 \pm 0.5$ ГэВ. Для π^--мезонов $E_0^{cms} = 1.0 \pm 2.2$ ГэВ, однако ошибки измерений велики.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.

В **табл. 1** и на **рис. 8** приведены все обсуждавшиеся результаты. В ошибках учтены как собственно ошибки фитирования, так и разрешение по кинематическим переменным. В таблице также приведены значения χ^2/N и наклон $k \cdot (\sqrt{s} - E_0^{cms})$, характеризующий асимптотическую асимметрию на границе фазового объема при ее дальнейшем описании линейной функцией и отсутствии насыщения. В таблице не приведены эксперименты, в которых асимметрия равна нулю.

При этом, равна нулю асимметрия инклюзивного рождения π^0 и π^--мезонов в $p_\uparrow p$ взаимодействии в центральной области. Данный факт можно объяснить следующим образом. Если в области фрагментации π^--мезон рождается, в основном, от валентного d-кварка, поляризация которого считается противоположной направлению поляризации протона и u-кварка (по SU(6) и из данных по структурным функциям для продольно поляризованного протона, см. например [13]), то в центральной области вклад в образование π^--мезона дают и другие каналы с разными значениями поляризации кварков и глюонов. Поэтому в области фрагментации поляризованной частицы асимметрии π^--мезона, рождающегося от d-кварка, и π^+-мезона, рождающегося от u-кварка, противоположны, тогда как в центральной области асимметрия π^--мезона размывается, просто из-за того, что в протоне один валентный d-кварк и два u-кварка. В случае $\pi^- p_\uparrow$ взаимодействия большая асимметрия π^0-мезона может возникнуть при образовании π^0-мезона из валентных $\overline{u}$-кварка от падающего π^-мезона и u-кварка из поляризованного протона, тогда как вклад валентного d-кварка из протона при больших поперечных импульсах в данном случае существенно подавлен относительно указанного канала.

Асимметрия инклюзивного рождения π^+-мезонов начинает возрастать при одном и том же значении E_0^{cms} в диапазоне $\sim 1.5 \div 2.$ ГэВ. Такое же поведение наблюдается и для π^0-мезонов. В то же время, для π^--мезонов данное утверждение не выполняется. Это может быть связано с тем, что π^+-мезоны образуются от валентных u-кварков, поляризация которых совпадает с поляризацией протона и их число больше, чем других кварков. Напомним, что мы рассматриваем только данные с $p_T > 0.5$ ГэВ/с. При образовании π^--мезонов, как уже отмечалось ранее, вклад могут давать и другие каналы, при этом соотношение вкладов каналов может зависеть от x_R, то есть не только от энергии вторичной частицы в системе центра масс, но и от энергии системы центра масс $\sqrt{s}$. Поэтому асимметрия π^--мезонов в $p_\uparrow p$ взаимодействии во всех случаях начинает возрастать при больших значениях E^{cms}, чем для π^+-мезонов и это приводит к разному значению точки возникновения асимметрии π^--мезонов при разных энергиях. Если указанное предположение верно, то в $\bar{p}_\uparrow p$-взаимодействии асимметрии π^+- и π^--мезонов должны по отношению к $p_\uparrow p$ взаимодействию поменяться местами. Именно такое поведение и наблюдается — асимметрия π^+-мезона начинает возрастать при том же самом значении E_0^{cms}, что и асимметрия π^--мезона в $p_\uparrow p$ взаимодействии, а поведение асимметрии в реакции $\bar{p}_\uparrow + p \to \pi^- + X$ аналогично поведению асимметрии в реакции $p_\uparrow + p \to \pi^+ + X$.

Отметим также, что для восьми экспериментов в области фрагментации поляризованной частицы, в которых измерялась асимметрия заряженных π-мезонов, значения $k \cdot (E_{max}^{cms} - E_0^{cms})$ близки.

5.1. Выводы

В работе проведен анализ данных по односпиновой асимметрии инклюзивного образования π-мезонов в экспериментах с фиксированной мишенью в диапазоне энергий пучка от 13 до 200 ГэВ. Обнаружен экспериментальный факт, что для π-мезона, родившегося от кварков, число которых в адроне больше и поляризация которых совпадает с поляризацией адрона, асимметрия начинает возрастать при одном и том же значении энергии π-мезона в системе центра масс E_0^{cms} и не зависит от начальной энергии пучка.

5.2. Благодарности

Авторы глубоко признательны Ю.А. Матуленко, Л.В. Ногач, П.А. Семенову, Л.Ф. Соловьеву, К.Е. Шестерманову, и также А.М. Зайцеву и В.В. Киселеву за полезные обсуждения.

Работа поддержана грантом РФФИ 03-02-16919.

---

1. Н.С. Амаглобели *и др.*, ЯФ **50**, 695 (1989); V.D. Apokin *et al*, Phys. Lett. B **243**, 461 (1990).
2. А.Н. Васильев *и др.*, Препринт 2003-21, ИФВЭ (Протвино, 2003); направлено в ЯФ.
3. N. Belikov *et al.*, Preprint 1997-51, IHEP (Protvino, 1997); N. Belikov *et al.*, in *Proc. of 13th International Symposium on High-Energy Spin Physics (SPIN 98)*, 465, Protvino, 1998.
4. C.E. Allgower *et al.*, Phys. Rev. D **65**, 092008 (2002).
5. D.L. Adams *et al.*, Phys. Lett. B **264**, 462 (1991).
6. M. Anselmino and F.Murgia Phys. Lett. B **442**, 470 (1998); hep-ph/9808426.

7. S. Heppelmann *et al.*, in *Proc. 8th International Symposium on High-energy Spin Physics*, vol.1, 157, Minneapolis 1988.

8. V.V. Abramov *et al.*, Preprint 96-82, IHEP (Protvino, 1996); Nucl. Phys. B **492**, 3 (1997); hep-ex/0110011.

9. J. Antille *et al.*, Phys. Lett. B **94**, 523 (1980).

10. D.L. Adams *et al.*, Preprint 91-014-E, (FERMILAB, 1991); Preprint 91-50, IHEP (Protvino, 1991); Phys. Lett. B **276**, 531 (1992).

11. D.L. Adams *et al.*, Preprint 91-49; IHEP (Protvino, 1991); Z.Phys. C**56**, 181 (1992).

12. A. Bravar *et al.*, Phys. Rev. D **55**, 1159 (1997).

13. D. Adams *et al.* (By Spin Muon Collaboration), CERN-PPE-97-022; CERN-PPE-97-22; DAPNIA-SPHN-97-27; Phys. Rev. D **56**, 5330 (1997); hep-ex/9702005.

Таблица 1. Сводная таблица. Точка начала роста асимметрии E_0^{cms} для разных экспериментов. $E_{max}^{cms} = \sqrt{s}/2$; асимметрия для экспериментов с поляризованной мишенью взята с противоположным знаком.

Реакция	Энергия	E_0^{cms}, ГэВ	χ^2/N	$k \cdot (E_{max}^{cms} - E_0^{cms})$, %	ссылка
$p_\uparrow + p \to \pi^+ + X$	13.3	1.26 ± 0.1	0.9	52 ± 6	[7]
$p_\uparrow + p \to \pi^+ + X$	18.5	1.46 ± 0.15	0.85	63 ± 16	[7]
$p_\uparrow + p \to \pi^+ + X$	21.92	1.57 ± 0.1	0.9	68 ± 6	[4]
$p_\uparrow + p \to \pi^+ + X$	40	1.64 ± 0.15			[8]
$p_\uparrow + p \to \pi^+ + X$	200	1.68 ± 0.25	1.1	52 ± 5	[5]
$\pi^- + p_\uparrow \to \pi^0 + X$	40	1.67 ± 0.15	1.5	107 ± 26	[1]
$\pi^- + p_\uparrow \to \pi^0 + X$	40	1.76 ± 0.2	0.7	36 ± 14	[2]
$p + p_\uparrow \to \pi^0 + X$	24	1.7 ± 0.15	0.6	334 ± 165	[9]
$p + p_\uparrow \to \pi^0 + X$	70	1.9 ± 0.2	0.85	208 ± 70	[3]
$p_\uparrow + p \to \pi^0 + X$	200	2.1 ± 0.3	0.5	26 ± 5	[10]
$\bar{p}_\uparrow + p \to \pi^0 + X$	200	0.9 ± 0.6	0.5	13 ± 4	[10]
$p_\uparrow + p \to \pi^- + X$	21.92	1.95 ± 0.1	0.5	-87 ± 11	[4]
$p_\uparrow + p \to \pi^- + X$	200	2.9 ± 0.2	<0.1	-51 ± 6	[5]
$\bar{p}_\uparrow + p \to \pi^+ + X$	200	3.1 ± 0.5	<0.1	-59 ± 16	[12]
$\bar{p}_\uparrow + p \to \pi^- + X$	200	1.0 ± 2.2	0.1	25 ± 15	[12]

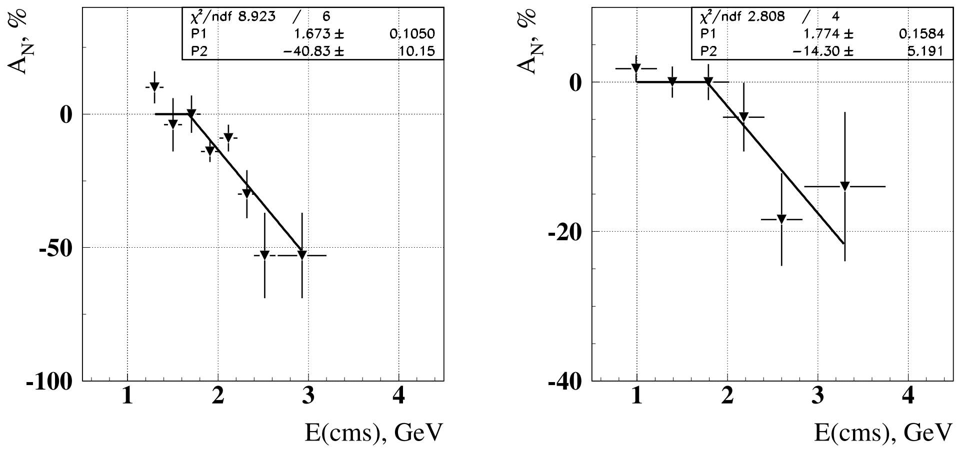

Рис. 1. Зависимость A_N от энергии π^0-мезона в системе центра масс в реакции $\pi^- + p_\uparrow \to \pi^0 + X$ в в центральной области (слева) [1] и в области фрагментации мишени (справа) [2] при импульсе пучка 40 ГэВ/с.

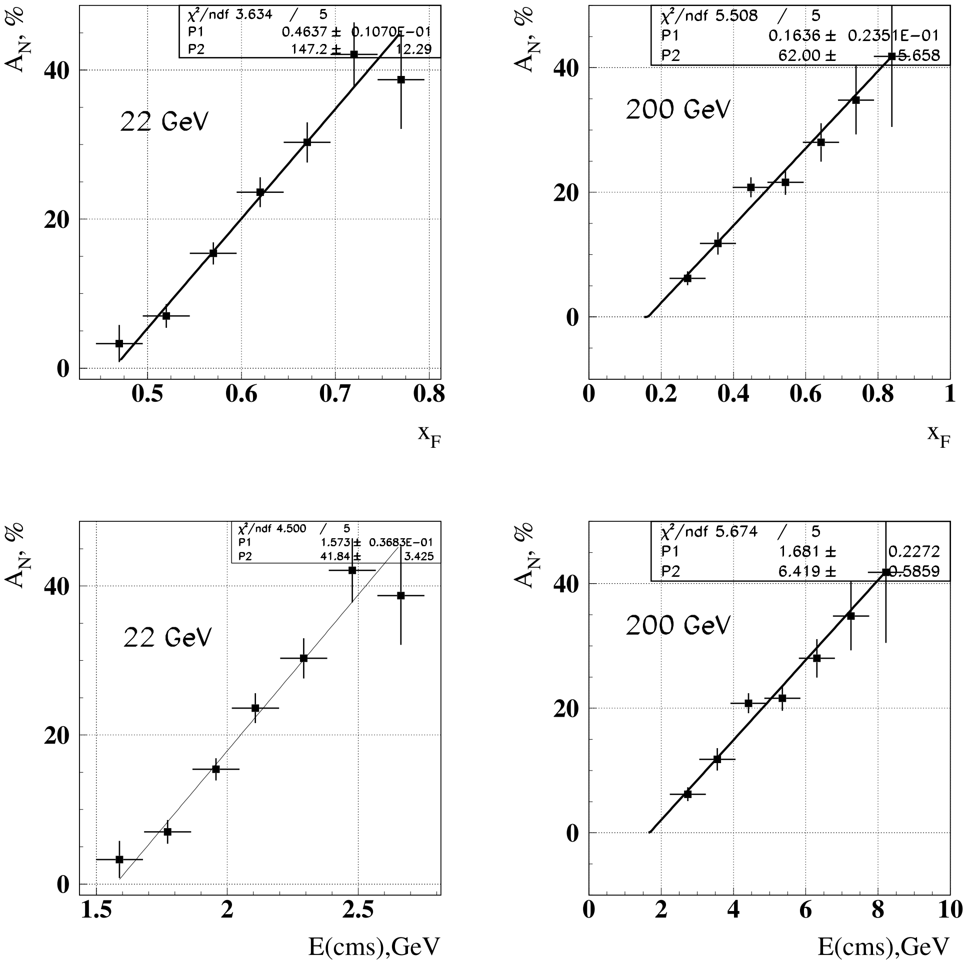

Рис. 2. Зависимость A_N от $x_{\rm F}$ (верхний ряд) и энергии в системе центра масс (нижний ряд) в реакции $p_\uparrow + p \to \pi^+ + X$ в области фрагментации поляризованного пучка в экспериментах E925 при 22 ГэВ [4] (слева) и E704 при 200 ГэВ [5].

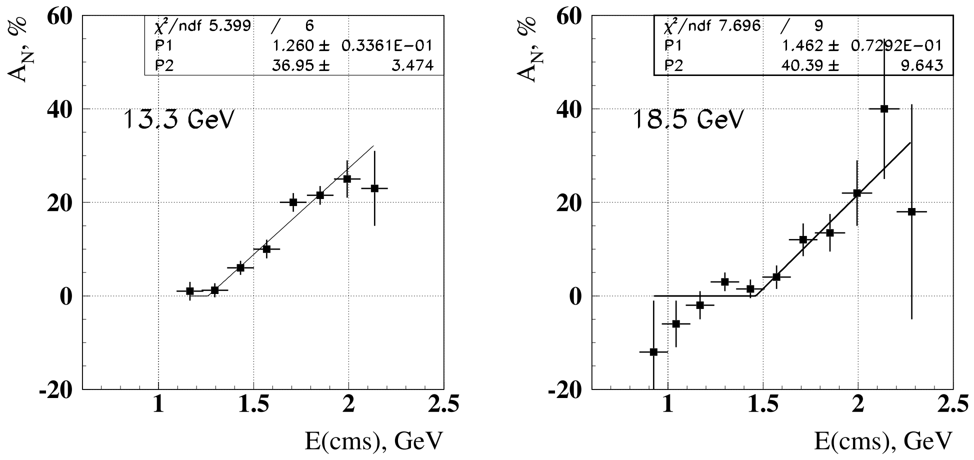

Рис. 3. Зависимость A_N от E^{cms} в реакции $p_{\uparrow} + p \to \pi^+ + X$ при импульсе пучка 13.3 (слева) и 18.8 ГэВ/с и $x_{\mathrm{F}} \approx 0.2$ [7].

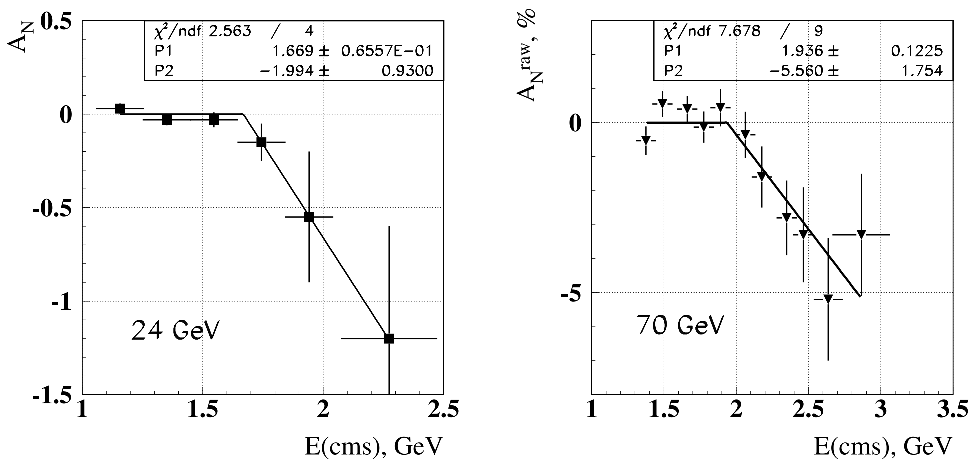

Рис. 4. Зависимость A_N от E^{cms} в реакции $pp_{\uparrow} \to \pi^0 + X$ в центральной области при 24 ГэВ [9] (слева) и в области фрагментации поляризованной частицы при 70 ГэВ [3] (справа).

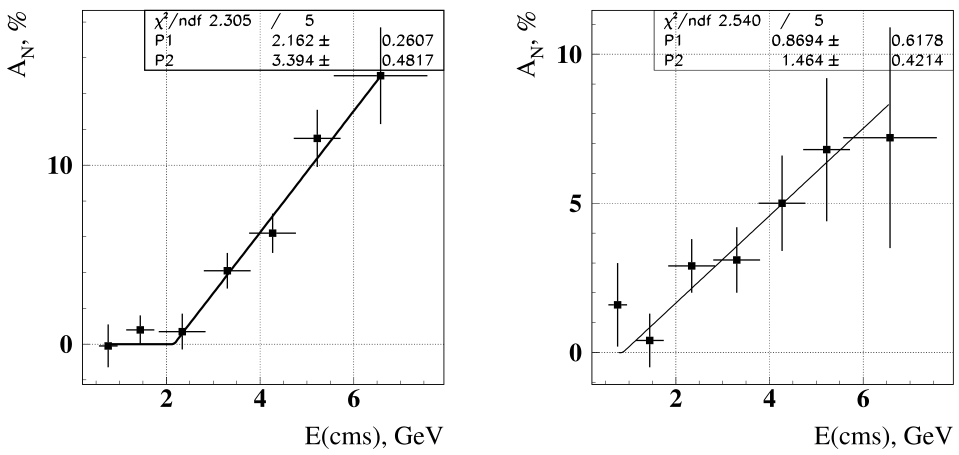

Рис. 5. Зависимость асимметрии A_N π^0-мезонов от E^{cms} в $p_\uparrow p$ (слева) и $\bar{p}_\uparrow p$ (справа) взаимодействии в области фрагментации пучка при 200 ГэВ (ФНАЛ) [10].

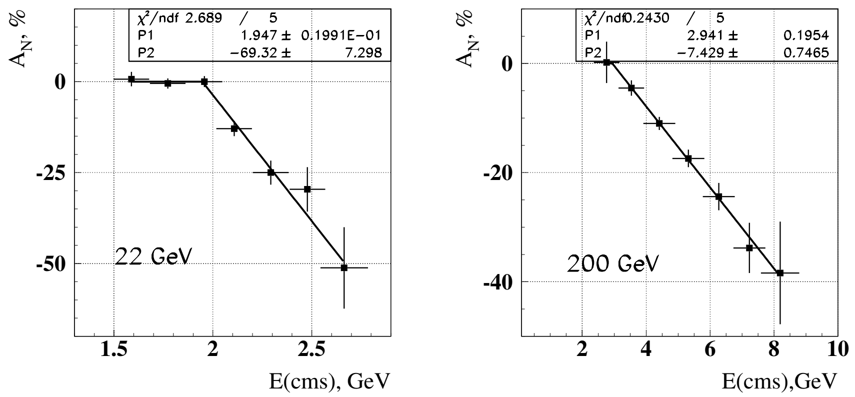

Рис. 6. Зависимость A_N от E^{cms} в реакции $p_\uparrow + p \to \pi^- + X$ в области фрагментации мишени при импульсе пучка 22 ГэВ/с [4] (слева) и 200 ГэВ/с [5] (справа).

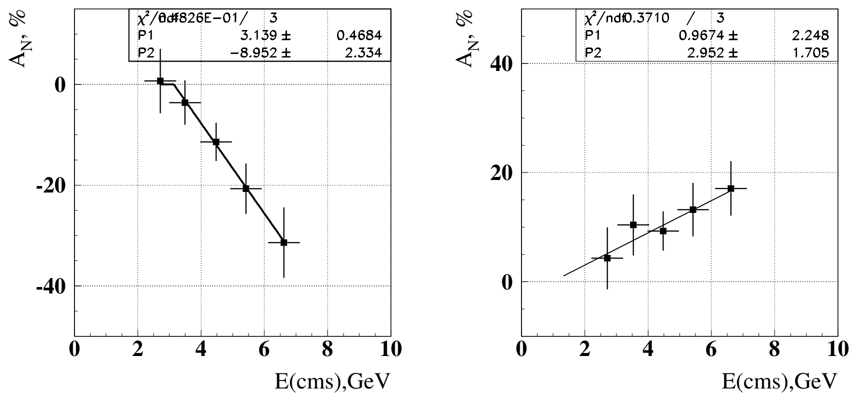

Рис. 7. Зависимость A_N π^+-мезонов (слева) и π^--мезонов (справа) от E^{cms} в $\bar{p}_{\uparrow}p$ взаимодействии при энергии 200 ГэВ [12].

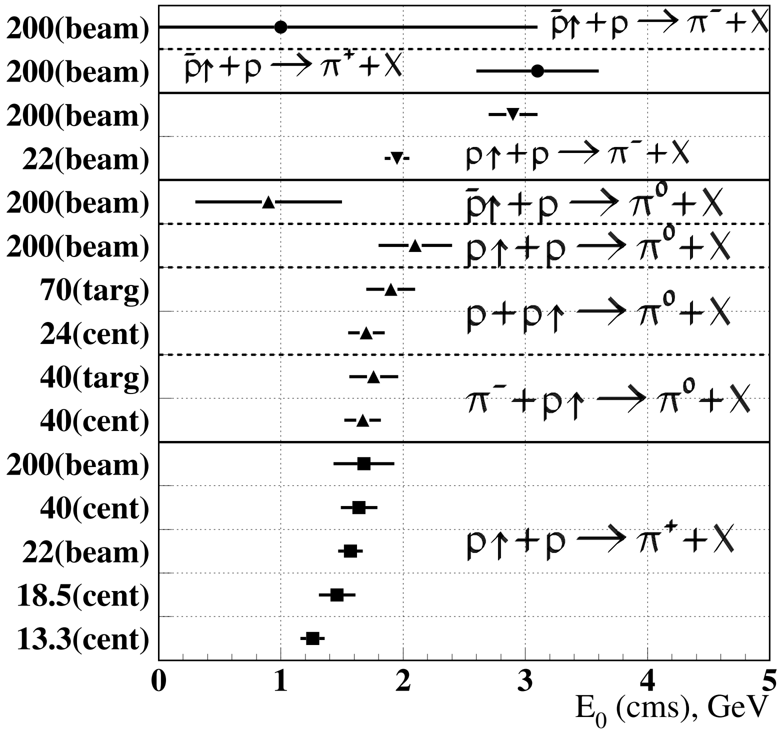

Рис. 8. Точки начала появления асимметрии для разных экспериментов. Единица энергии – ГэВ; *cent*– эксперименты в центральной области (при $x_f \approx 0$), *targ* –в области фрагментации мишени, *beam* –в области фрагментации пучка.

СПИСОК РИСУНКОВ

GENERAL FEATURES IN SINGLE SPIN ASYMMETRY OF π-MESON INCLUSIVE PRODUCTION IN FIXED TARGET EXPERIMENTS .

V. V. Mochalov and A. N. Vasiliev

The analysis of inclusive π-meson single spin asymmetry measurements was done. It was found that the single spin asymmetry starts to grow up at the same value of the π-meson energy in the center of mass system for fixed target experiments at the beam energy range from 13 to 200 GeV.