

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Представляется работа

“Наблюдение Холодной Сверхплотной Барионной Компоненты ядерной материи”

Раздел: Экспериментальные научно-исследовательские работы

Коллектив соавторов:

1. Балдин Антон Александрович
2. Галоян Аида Сергеевна
3. Ставинский Алексей Валентинович
4. Шиманский Степан Степанович – Stepan.Shimanskiy@jinr.ru

В представленный цикл работ входят 8 публикаций:

1. Measurement of the Yields of Positively Charged Particles at an Angle of 35° in Proton Interactions with Nuclear Targets at an Energy of 50 GeV;

V. V. Ammosov, N. N. Antonov, A. A. Baldin, V. A. Viktorov, V. A. Gapienko, G. S. Gapienko, A. A. Golovin, V. N. Gres, A. A. Ivanilov, V. I. Koreshev, V. A. Korotkov, A. I. Mysnik, A. F. Prudkoglyad, Yu. M. Sviridov, A. A. Semak, V. I. Terekhov, V. Ya. Uglekov, M. N. Ukhanov, B. V. Chujko, and S. S. Shimanskii; Physics of Atomic Nuclei, 2013, Vol. 76, No. 10, pp. 1213–1218.

2. PRODUCTION OF HIGH-PT CUMULATIVE PARTICLES IN PROTON-NUCLEUS INTERACTIONS AT 50 GeV;

V. V. Ammosov, N. N. Antonov, V. A. Viktorov, V. A. Gapienko, G. S. Gapienko, V. N. Gres', V. A. Korotkov, A. I. Mysnik, A. F. Prudkoglyad, Yu. M. Sviridov, A. A. Semak, V. I. Terekhov, V. Ya. Uglekov, M. N. Ukhanov, B. V. Chuiko, A. A. Baldin, S. S. Shimanskiy; Yadernaya Fizika I Inzhiniring 4 (2013) 773–778 (RUS) & nucl-ex_ arXiv.1410.5582 (ENG)

3. Production of Cumulative Particles and Light Nuclear Fragments at High pT Values beyond the Fragmentation Region of Nuclei in pA Collisions at a Proton Energy of 50 GeV;

N. N. Antonov, V. A. Viktorov, V. A. Gapienko, G. S. Gapienko, V. N. Gres', M. A. Ilyushin, V. A. Korotkov, A. I. Mysnik, A. F. Prudkoglyad, A. A. Semak, V. I. Terekhov, V. Ya. Uglekov, M. N. Ukhanov, B. V. Chuiko and S. S. Shimanskii; JETP Letters, 2015, Vol. 101, No. 10, pp. 670–673.

4. Spectra of Double-Cumulative Photons in the Central Rapidity Region at High Transverse Momenta;

I. G. Alekseev, A. A. Golubev, V. S. Goryachev, G. B. Dzubenko, A. G. Dolgolenko, N. M. Zhigareva, S.M. Kiselev, K. R. Mikhaylov, E. A. Morozova, P. A. Polozov, M. S. Prokudin, D. V. Romanov, D. N. Svirida, A. V. Stavinsky, V. L. Stolin, and G. B. Sharkov; Physics of Atomic Nuclei, 2015, Vol. 78, No. 8, pp. 936–942.

5. Knockout of Deuterons and Tritons with Large Transverse Momenta in pA Collisions Involving 50-GeV Protons;

N. N. Antonov, A. A. Baldin, V. A. Viktorov, V. A. Gapienko, *, G. S. Gapienko, V. N. Gres', M. A. Ilyushin, V. A. Korotkov, A. I. Mysnik, A. F. Prudkoglyad, A. A. Semak, V. I. Terekhov, V. Ya. Uglekov, M. N. Ukhanov, B. V. Chuiko and S. S. Shimanskii; JETP Letters, 2016, Vol. 104, No. 10, pp. 662–665.

6. DENSE COLD BARYONIC MATTER;

A.V. Stavinskiy, D.Yu. Kirin, N.M. Zhigareva, K.R. Mikhailov, V.S. Goryachev, P.A. Polozov, M.S. Prokudin, D.V. Romanov, G.B. Sharkov, V.L. Stolin, O.A. Chernishov, A.A. Baldin, A.V. Konstantinov, A.I. Malakhov, S.S. Shimanskiy; Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl. 9, 325 (2016).

7. Observation of the Independence of the p/π Ratio from the Nuclear Size for Hadrons Knocked out with Large Transverse Momenta from a Nuclear Target by 50-GeV Protons;

N. N. Antonov, A. A. Baldin, V. A. Viktorov, A. S. Galoyan, V. A. Gapienko, G. S. Gapienko, V. N. Gres', M. A. Ilyushin, A. I. Mysnik, A. F. Prudkoglyad, D. S. Pryanikov, V. A. Romanovskii, A. A. Semak, V. I. Terekhov, V. Ya. Uglekov, M. N. Ukhanov and S. S. Shimanskii; JETP Letters, 2018, Vol. 108, No. 12, pp. 783–786.

8. Scaling Behavior of Spectra of Protons, Deuterons, and Tritons Produced with High Transverse Momenta in pA and 12CA Collisions;

N. N. Antonov, A. A. Baldin, V. A. Viktorov, A. S. Galoyan, V. A. Gapienko, G. S. Gapienko, V. N. Gres', M. A. Ilyushin, A. F. Prudkoglyad, D. S. Pryanikov, V. A. Romanovskii, A. A. Semak, I. P. Solodovnikov, V. I. Terekhov, M. N. Ukhanov, and S. S. Shimanskii; JETP Letters, 2020, Vol. 111, No. 5, pp. 251–254.

Выдвинутая на конкурс работа представляет собой цикл статей, опубликованных с 2013 г. по 2020 г. в научных журналах и материалах конференций в рамках темы № 02-1-1087-2009/2023 теме “Исследования по физике релятивистских тяжелых и легких ионов на ускорительных комплексах Нуклотрон-NICA ОИЯИ и SPS ЦЕРН”.

Представленный цикл работ направлен на выяснение природы кумулятивных процессов. В результате проведенных исследований, получены доказательства

существования холодной сверхплотной компоненты ядерной материи – в обычных ядрах наблюдаются ядра меньшей массы (дейтроны и тритоны) в сильно сжатом состоянии. А также подготовлена физическая программа для проведения исследования свойств нового состояния ядерной материи в планируемых экспериментах.

Д.И.Блохинцев в 1957г., анализируя экспериментальные данные по протон-ядерным столкновениям, полученные на синхроциклотроне ЛЯП ОИЯИ, пришел к выводу, что наблюдавшееся группой, под руководством М.Г.Мещерякова, квазиупругое рассеяние протонов на дейтронах (находящихся в составе ядер) можно описать если предположить существование в ядрах ядер меньшей массы в сжатом состоянии. Т.е. в обычных ядрах присутствует барионная компонента с плотностью значительно больше, чем средняя плотность ядерной материи. Такие эксперименты продолжались после 1957г. в ЛЯП ОИЯИ и ИТЭФ. Однако, огромный всплеск интереса к исследованиям многонуклонных (многокварковых) систем инициировала статья А.М. Балдина появившаяся в 1971г. и предсказавшая существование «кумулятивных процессов», которые, в том же году, были обнаружены в экспериментах с пучком ускоренных дейтронов в ЛВЭ ОИЯИ.

Исследования кумулятивных процессов, в последующие годы, обнаружили много необычных эффектов, такие как: сильную A -зависимость; изотопическую симметрию частиц, рождающихся в кумулятивной кинематической области; повышенный выход барионов и ядерных фрагментов по сравнению с мезонами, и скейлинговое поведение сечений. Большая часть экспериментальных данных по кумулятивным процессам была получена в области фрагментации ядер и поперечными импульсами меньше 1 ГэВ/с. Эти экспериментальные данные стимулировали появление множества теоретических моделей, которые рассматривали различные многонуклонные (многокварковые) конфигурации в ядрах для объяснения природы кумулятивных процессов. Одни рассматривали различные варианты многонуклонных (многокварковых) систем - флуктоны, другие считали, что в ядрах есть точечные нуклоны с большими относительными импульсами, находящимися на малых расстояниях (например, короткодействующие корреляции - SRC).

В 2000-х годах ИТЭФ НИЦ «Курчатовский институт» были проведены исследования по поиску возможного глубоконеупругого флуктон-флуктонного слияния с излучением жестких фотонов вблизи угла 90 градусов в системе центра масс нуклон-нуклонных взаимодействий. Это совершенно новый механизм образования ядер в центральной области в pA - и AA -взаимодействиях. Эксперименты в ИТЭФ были прекращены в 2012 году после выхода из строя ускорителя.

С 2004г. в ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» проводятся исследования с релятивистскими ядрами. На установке СПИН с 2009г. начаты исследования особенностей рождения частиц в кинематической области вне области фрагментации ($p > 2$ ГэВ/с) и с большими поперечными импульсами ($p_T > 1$ ГэВ/с). В этой кинематической области подавлены взаимодействия в начальном и конечном состояниях. Исследования проводятся в области до кинематической границы и за кинематической границей нуклон-нуклонных взаимодействий, т.е. в предкумулятивной и кумулятивной областях. Проведенный цикл исследований, в новой кинематической области, позволил подтвердить основные особенности кумулятивных процессов, наблюдавшихся при исследованиях в области фрагментации ядер. А также, получить доказательства прямого выбивания из ядер легчайших ядерных фрагментов (дейтерия и трития) с передачей энергии до 6 ГэВ. Беря в расчет, что передаваемая энергия в ~ 10 раз больше, чем наблюдавшаяся в 1957 г. в ЛЯП ОИЯИ, можно констатировать о наблюдении сверхсжатых лёгких ядер, а следовательно, холодной сверхплотной барионной компоненты. Эти результаты заставляют по-новому взглянуть на свойства ядерной материи, находящейся в центре массивных звёзд, её свойства и законы эволюции.

Совместной группой из ОИЯИ и ИТЭФ подготовлены программы для исследований свойств холодной сверхплотной компоненты в кумулятивных процессах на ускорителях ОИЯИ, ИФВЭ и других центров.

Основные результаты, полученные в рамках представленного цикла работ:

1. Основные результаты, полученные при исследовании предкумулятивных и кумулятивных процессов на установке СПИН (ИФВЭ, НИЦ «Курчатовский институт»). Подтверждены закономерности, обнаруженные при исследовании кумулятивных процессов в области фрагментации мишени.

1.1. Подтверждена сильная A -зависимость рождения кумулятивных частиц и показана невозможность описать относительный выход частиц на разных ядрах в стандартных МК генераторах [1].

В кумулятивных процессах наблюдается сильная зависимость сечений рождения частиц от атомной массы. Можно представить зависимость сечений рождения частиц в виде $\sigma \sim A^\alpha$. В pA – столкновениях, при отсутствии сильного вклада от взаимодействий в начальном (ВНС) и конечном состояниях (ВКС), наблюдается зависимость с $\alpha=2/3$. Что говорит о пропорциональности сечения столкновению поперечной площади ядра, которая зависит от атомной массы как $A^{2/3}$. Если наблюдается такая A -зависимость в pA -столкновениях, значит наблюдаются нуклон-нуклонные взаимодействия, в которых нуклоны ядра размазаны по поперечной площади ядра. Если есть значительный вклад ВНС и ВКС (например, многократные вторичные взаимодействия) зависимость от атомной массы может быть $\alpha \geq 1$. Исследования на установке СПИН проводятся в кинематической области, где ВНС и ВКС подавлены. Пучок протонов с импульсом 50 ГэВ/с и интенсивностью $\sim 5 \times 10^{12}$ протонов за цикл взаимодействовал с тонкими (0.6 - 0.8 г/см²) ядерными мишенями из углерода, алюминия, меди и вольфрама. Данные работы [1] получены при угле регистрации 35° (лаб.сист.). Регистрировались положительно заряженные частицы с импульсами от 1 ГэВ/с до 6.6 ГэВ/с, что соответствует интервалу поперечных импульсов от 0.57 ГэВ/с до 3.76 ГэВ/с. Т.е. наблюдение сильной A -зависимости $\alpha \geq 1$ на установке СПИН является указанием на взаимодействие с многонуклонной (многокварковой) конфигурацией. На Рис.1 показана [1] A -зависимость для положительно заряженных частиц. Во время набора этих данных на установке не использовалась время-пролётная система идентификации частиц.

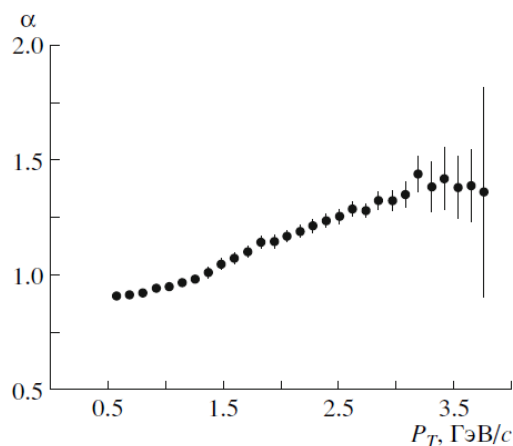


Рис.1 Зависимость показателя степени А-зависимости от поперечного импульса.

На Рис.2 показано сравнение полученных данных с предсказаниями МК генераторов. Видно, что МК генераторы без специальной модификации плохо описывают полученные данные в предкумулятивной кинематической области и не имеют предсказаний для кумулятивной области, где во взаимодействии участвуют многонуклонные (многокварковые) конфигурации.

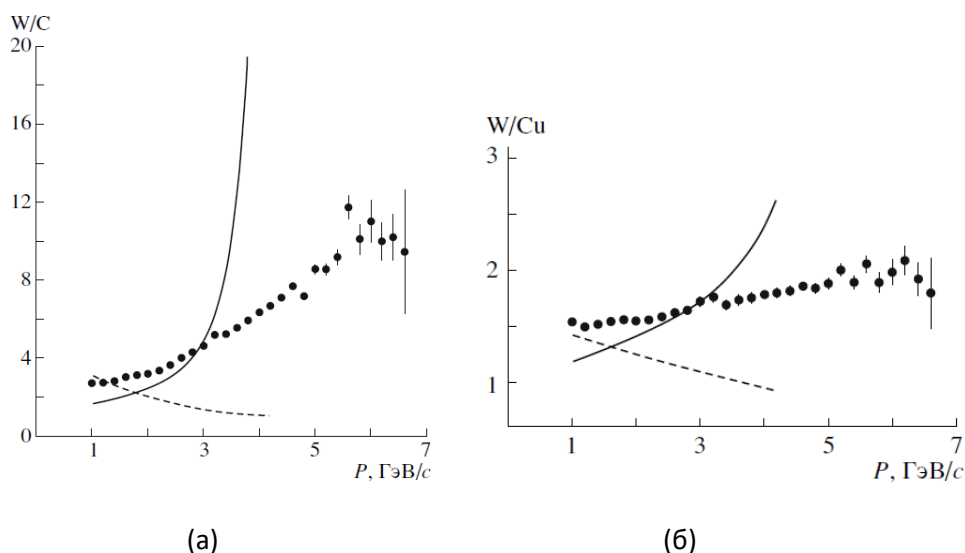


Рис.2 Отношение выходов положительно заряженных частиц во взаимодействиях протонов с вольфрамом и углеродом (а), а также вольфрамом и медью (б). Точки — эксперимент; кривые: штриховая — МК генератор UrQMD, сплошная — МК генератор HIJING.

1.2. Подтверждено доминирование барионной компоненты по сравнению с мезонной, получено указание на локальность процессов рождения положительно заряженных частиц и подтверждена универсальность описания сечений для отрицательных пионов, предложенная в работе [А].

Измерение выхода отрицательных частиц на установке СПИН, позволило провести дополнительные исследования [2]. На Рис.3 показаны отношения выхода положительно и отрицательно заряженных частиц.

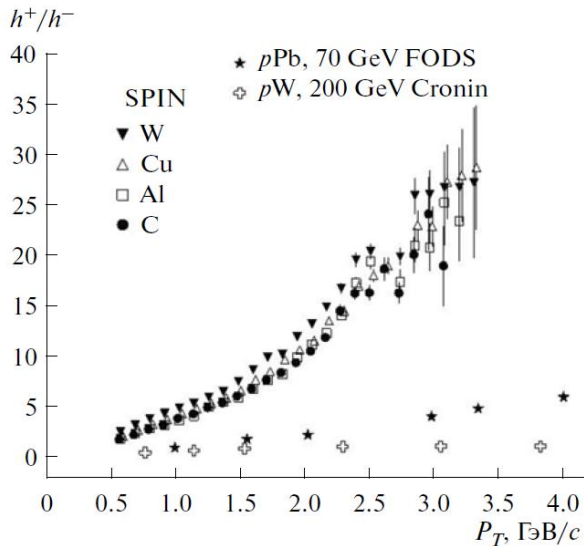


Рис.3 Отношение выходов положительных и отрицательных частиц, h^+/h^- , на разных мишенях как функция поперечного импульса. Для сравнения приведены данные по отношению выходов протонов и π^- - мезонов, p/π^- , для pPb при 70ГэВ [В] и для pW при 200ГэВ [С]. Измерения двух последних экспериментов проведены при угле регистрации 90° в системе центра масс для столкновений свободных нуклонов.

Измерения в работах [В, С] проводились в близком диапазоне исследуемых поперечных импульсов, но в кинематической области нуклон-нуклонных взаимодействий и при больших энергиях пучков протонов. Данные, полученные на установке СПИН, демонстрируют значительно больший относительный выход, что как раз, и наблюдалось при «классических» исследованиях кумулятивных процессов.

Анализ большого набора инклюзивных данных по рождению частиц в предкумулятивной и кумулятивной областях, а также в процессах подпорогового рождения частиц в инклюзивных процессах позволил [А], используя свойства самоподобия, предложить описание инвариантных сечений рождения частиц в виде:

$$f = E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = C_1 \cdot A_1^{\frac{1+X_I}{3}} \cdot A_2^{\frac{1+X_{II}}{3}} \cdot e^{-\frac{\Pi}{C_2}} \quad (1)$$

здесь C_1 и C_2 - константы, A_1 и A_2 - атомные веса сталкивающихся ядер, $\Pi = \frac{\sqrt{s_{\min}}}{2m_N}$, s_{\min} -

квадрат минимальной энергии, необходимой для образования наблюдаемой частицы, m_N - масса нуклона. X_I и X_2 массы, в нуклонных массах, сталкивающихся участников взаимодействия. На Рис.4 показано, что при замене констант в А-зависимости с $1/3$ на $(2.5)/3$ наблюдается блестящее совпадение для отношений сечений отрицательных пионов.

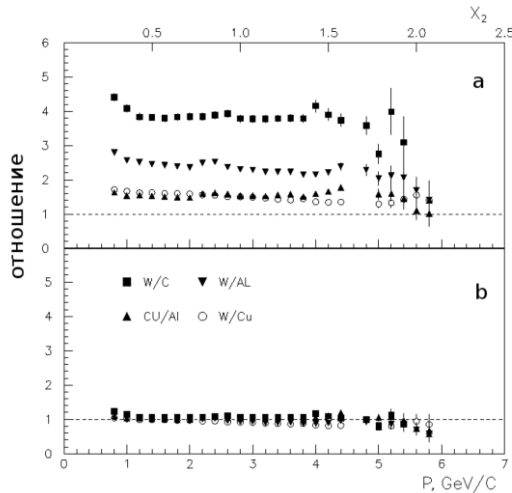


Рис.4 Отношение инвариантных сечений рождения отрицательных пионов умноженных на обратную А-зависимость. На нижней горизонтальной шкале приведены значения импульса, на верхней - величины X_2 . а) отношения получены при использовании А-зависимости в виде [А] $A^{(1+X_2)/3}$, б) А-зависимость взята как $A^{(2.5+X_2)/3}$.

1.3. В работах [3, 5, 8] проведено детальное исследование особенностей образования протонов, дейтронов и тритонов. Получены подтверждения процессов прямого выбивания дейтронов и трития.

В работе [3], с помощью времени пролёта частиц, проведена идентификация частиц. На Рис.5 показаны спектры протонов, дейтронов и трития образующихся на углеродной и вольфрамовой мишенях. Наблюдается резкое падение относительного выхода пионов по отношению ко всем ядерным фрагментам. Также, наблюдается рост относительного выхода дейтронов и трития по отношению к протонам. Знание практически всех (кроме нейтронов) адронов, образующихся в рА-столкновениях, даёт возможность определить среднее число образующихся барионов $\langle B \rangle$. Такая характеристика позволяет оценить вклад различных механизмов, предложенных теоретическими моделями. Например, механизм короткодействующих корреляций (SRC) должен приводить к среднему числу барионов около 1. Горячие флуконы будут давать среднее число барионов меньше 1. В то же время, механизмы прямого выбивания ядерных фрагментов в возбуждённом и невозбужденном состояниях будут приводить к среднему числу барионов больше единицы. Среднее число барионов, образующихся в рА-столкновениях, показано на Рис.6. Видна тенденция к росту $\langle B \rangle$ с увеличением импульса регистрируемой частицы превышение 1 уже в предкумулятивной области.

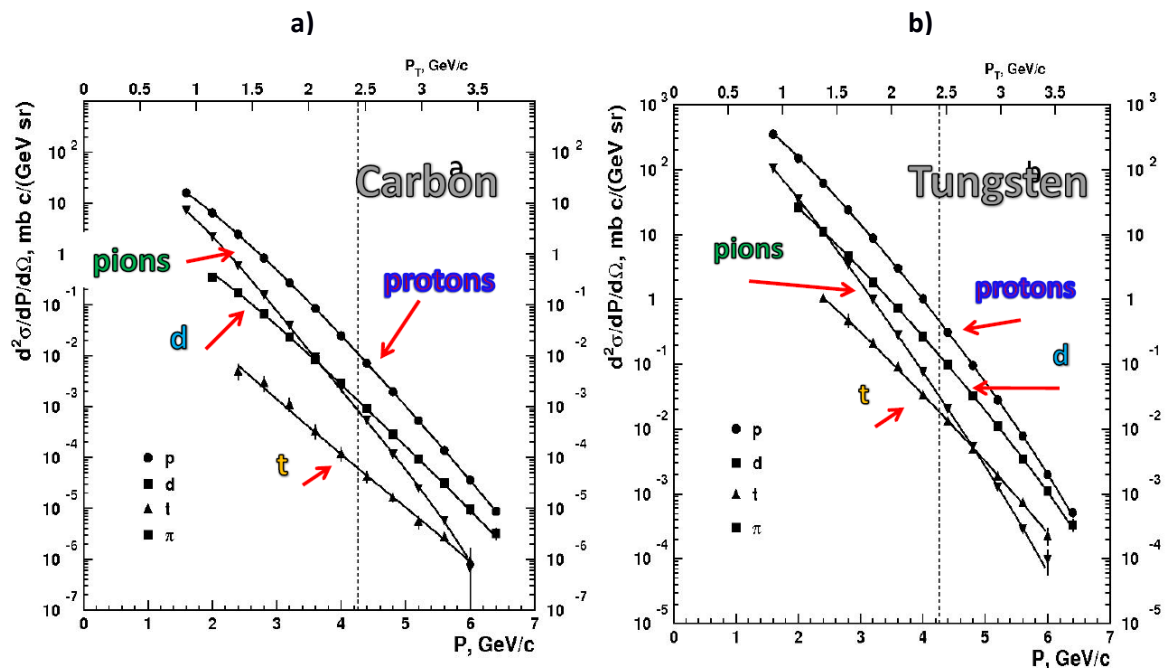


Рис.5 Импульсные спектры положительно заряженных пионов, протонов, дейтронов и тритонов для: а) углеродной и б) вольфрамовой мишеней. На верхней горизонтальной шкале приведены значения поперечного импульса. Вертикальная пунктирная линия соответствует пределу для упругого нуклон-нуклонного рассеяния.

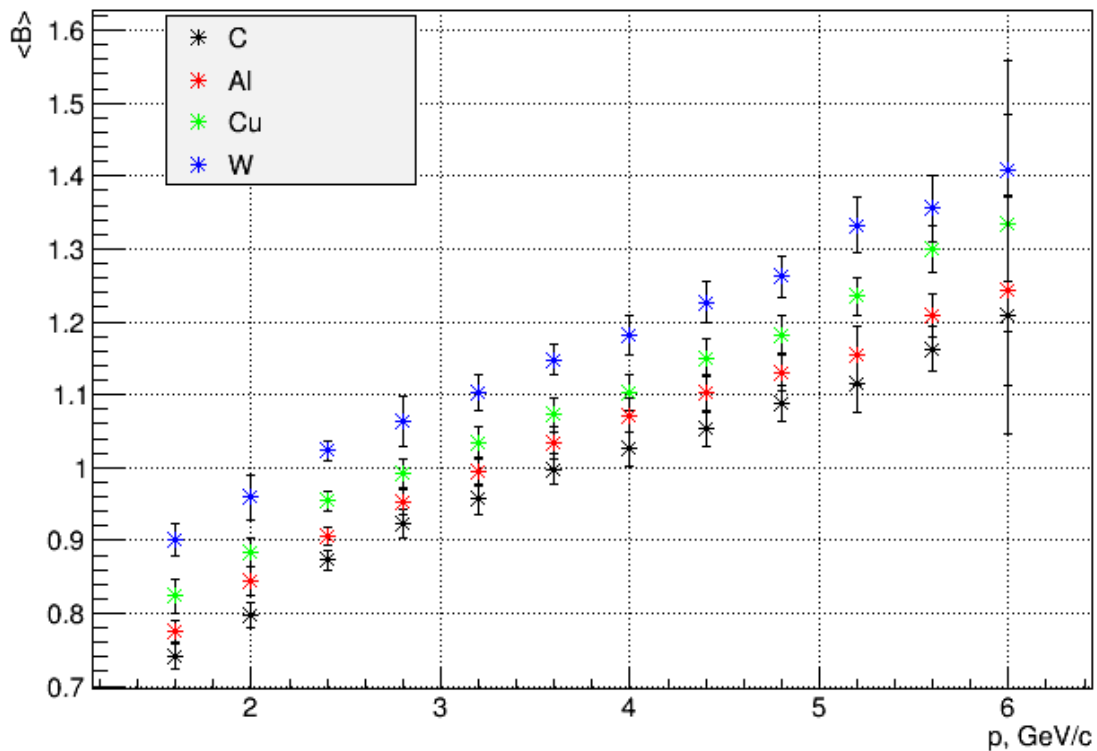


Рис.6 Среднее число барионов $\langle B \rangle$ в зависимости от импульса зарегистрированных частиц под углом 35° в pA-взаимодействиях при импульсе протонов 50 ГэВ/с.

Данная оценка среднего числа барионов является нижней границей, так как магнитный спектрометр СПИН регистрирует только одну частицу с определенным импульсом. Нейтроны и группы несвязанных барионов не регистрируются. Однако, данные позволяют сделать вывод о доминировании процессов прямого выбивания дейтронов и трития.

Для определения размеров области образования ядерных фрагментов были использованы коэффициенты коалесценции. Результаты этих исследований представлены в работе [5]. В Таблице 1 показаны средние значения коэффициентов коалесценции B_2 для образования дейтронов. Отсутствие A-зависимости B_2 является прямым указанием на локальный механизм образования дейтронов т.е. на прямое выбивание ядерного фрагмента.

Таблица 1. Средние значения параметра B_2

Мишень	C	Al	Cu	W
$B_2 \cdot 10^2 \text{ ГэВ}^2/\text{с}^3$	1.41 ± 0.10	1.56 ± 0.08	1.51 ± 0.07	1.41 ± 0.06

В работе [8] представлены первые данные по рождению легчайших ядерных фрагментов p, d, t с большими поперечными импульсами (p_T) под углом 40° (лаб. сист.) во взаимодействиях протонов с импульсом 50 ГэВ/с и ядер углерода с импульсом 20 АГэВ/с с разными ядерными мишенями. На Рис.7а показаны спектры ядерных фрагментов.

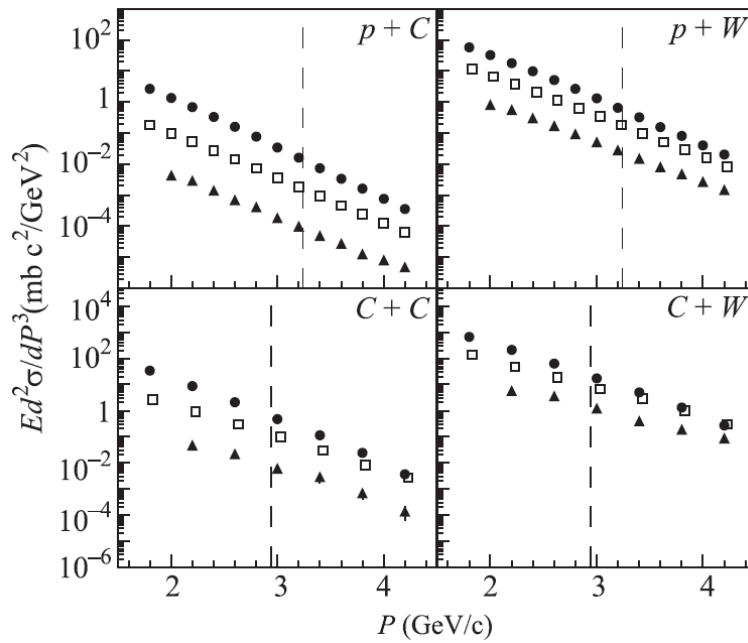


Рис. 7а Спектры протонов (кружки), дейтронов (прямоугольники) и тритонов (треугольники) в четырех разных взаимодействиях. Вертикальные линии соответствуют кинематическому пределу упругого нуклон-нуклонного рассеяния на 40° (лаб. сист.).

Во всех случаях с ростом импульса наблюдается рост относительного выхода дейтронов и тритонов. В кумулятивной области в С + А взаимодействиях выход дейтронов при больших p_T становится сопоставимым с выходом протонов.

На Рис.7б для спектров p, d, t частиц из $p + A$ и $C + A$ взаимодействий представлены распределения по безразмерной величине $g(\Pi)$

$$g(\Pi) = E \frac{d^3\sigma}{dp^3} \bigg/ (C_1 \cdot A_1^{\alpha(X_1)} \cdot A_2^{\alpha(X_2)}).$$

Определения переменных смотрите в (1). При расчете $g(\Pi)$ во всех случаях бралось $\alpha(X) = (2.4+X)/3$. Отметим, что для $p+A$ взаимодействий $A_1^{\alpha(X_1)} = 1$. Константы C_1 , задающие размерности сечений, находились заранее при подгонке выражения (1) к экспериментальным данным. Пунктирная прямая на всех квадрантах рис. 7б описывает функцию $\exp(-\Pi/C_2)$ при значении $C_2 = 0.172$. Рис.7б демонстрирует схожесть в поведении $g(\Pi)$ для всех частиц и для всех взаимодействий. Параметризация (1) справедлива, только если отсутствует вторичное перерассеяние продуктов квазибинарной реакции на нуклонах ядра.

Спектры p, d, t частиц с большими p_T в $p + A$ и $C+A$ процессах можно описать выражением (1) с одной и той же формой зависимости от массы участвующих в столкновении ядер и при схожих параметрах наклона C_2 . Поскольку параметризация (1) призвана описать рождение частиц через жесткие квазибинарные столкновения, то хорошее согласие эксперимента с этой параметризацией можно рассматривать как подтверждение сделанного нами ранее заключения о наблюдении прямого выбивания из ядра дейтронов и тритонов в кумулятивных процессах с большими p_T .

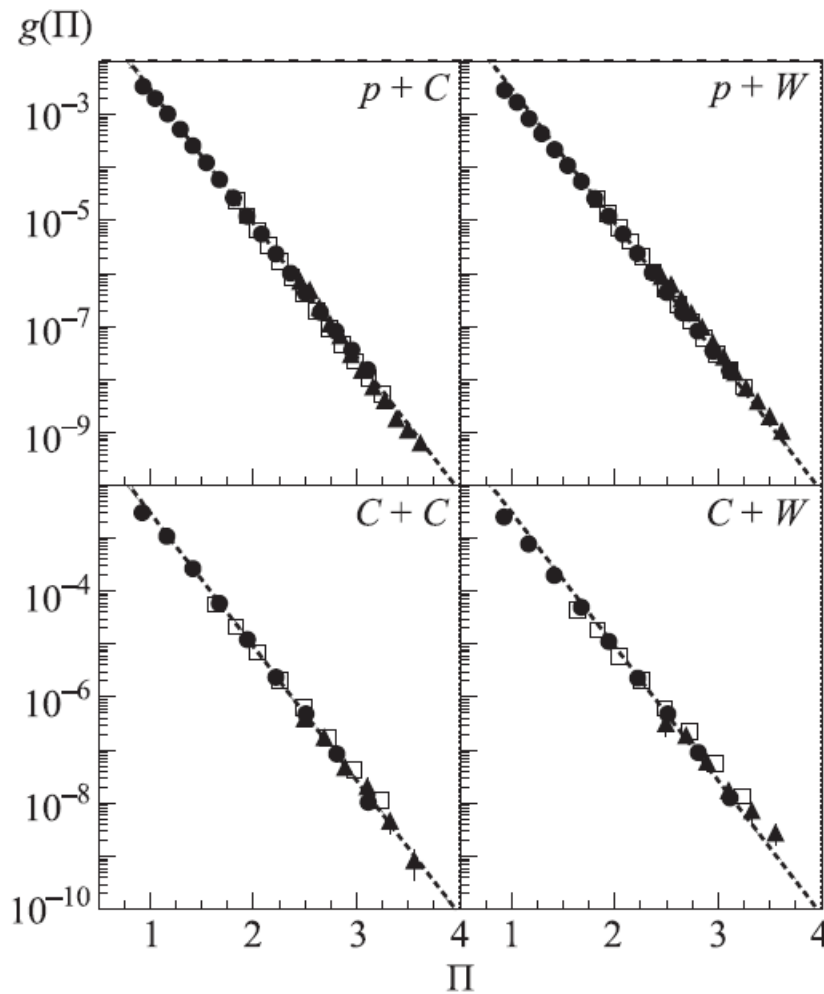


Рис.76 Экспоненциальная зависимость сечений от Π . Круги – протоны, квадраты – дейтроны, треугольники – тритоны. Диагональными пунктирными линиями показана функция $\exp(-\Pi/0.172)$.

3. Образование макросистем из холодной сверхплотной барионной компоненты и подготовка программы исследования свойств холодной плотной барионной компоненты на базу ускорителей ОИЯИ [4, 6].

3.1 Глубоконеупругий синтез холодной плотной барионной материи.

В конце 90-х годов прошлого века в группе Г.А. Лексина ИТЭФ НИЦ «Курчатовский институт» была предложен механизм образования макросистемы из холодной плотной барионной материи. На Рис.8 представлена иллюстрация этой идеи.

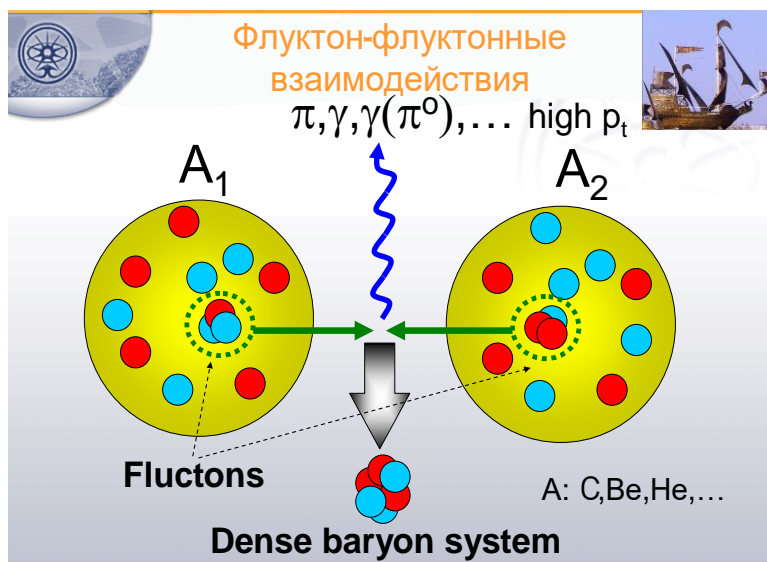


Рис.8 Флуктон-флуктонный глубоконеупругий синтез холодной плотной барионной компоненты.

При столкновении нуклонов и ядер, возможно столкновение флуктонов. Образовавшаяся система будет возбуждённой. Сбросить возбуждение система может через излучение фотона или адрона. Тогда в системе центра масс можно будет наблюдать тесную группу барионов, летящих в одну сторону, и фотон или мезон с энергией, компенсирующей отдачу многобарионной (многокварковой) системы. Такие фотоны и адроны будут рождаться в кумулятивной кинематической области. В ИТЭФ были проведены исследования по регистрации такие фотоны в ядро-ядерных столкновениях [4]. Регистрировались фотоны, соответствовавшие образованию области отдачи с более чем 4-мя нуклонами. На Рис.9 показаны примеры спектров фотонов, наблюдавшихся в ИТЭФ. Эти данные являются прямым указанием на возможность синтеза макросистем холодной сверхплотной компоненты ядерной материи и изучения её свойств в корреляционных экспериментах на экспериментальных установках ОИЯИ [6].

Представленный цикл работ является важным этапом исследований кумулятивных процессов длящихся на протяжении 50 лет, начало которым положила статья А.М. Балдина [D]. Нельзя ни отметить гипотезу Д.И. Блохинцева [E] которая предсказала существования в ядрах ядер с меньшей массой в сжатом состоянии, т.е. холодной плотной компоненты в ядерной материи. Эти результаты заставляют по-новому взглянуть на свойства ядерного взаимодействия как непертурбативной части КХД и свойства ядерной материи, расположенной в центре массивных звезд, а также, законы эволюции звезд.

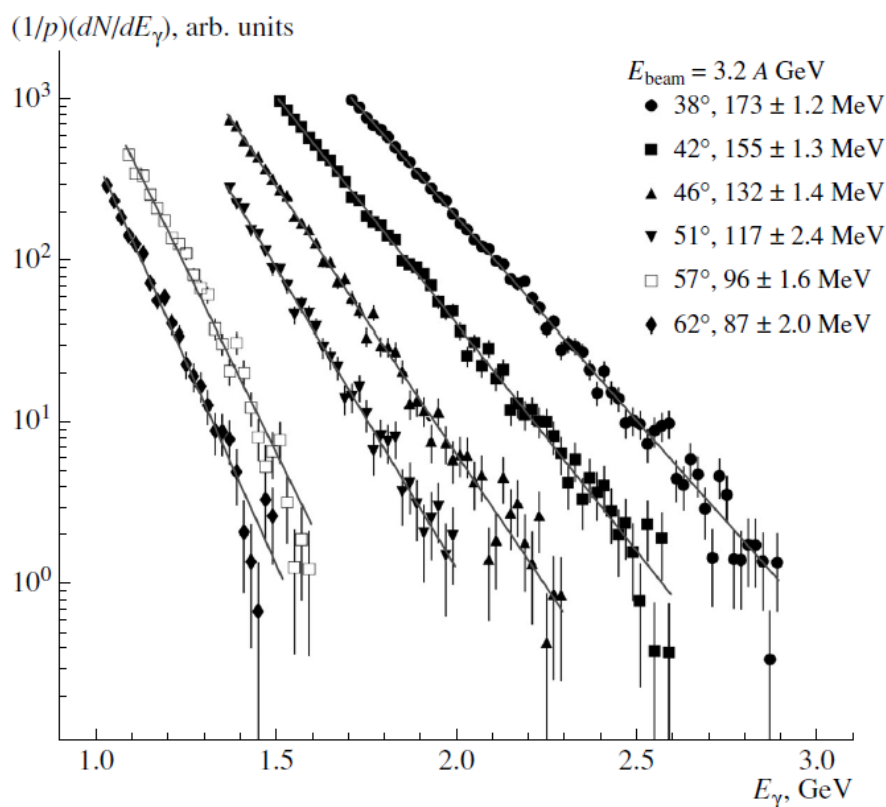


Рис.10 Спектр фотонов в реакции $C + \text{Be} \rightarrow \gamma + X$ при энергии пучка углерода с энергией 3.2 AGeV для разных углов вылета фотонов.

Литература

- [A] Балдин А.А., Краткие Сообщения ОИЯИ, № 3-92, 1992, С. 27-37; № 4-96, 1996, С. 185 61-68; № 2-99, 1999, С. 20-29.
- [B] Абрамов В.В. и др., ЯФ, 1985, Т. 41, вып.2, С. 357-370.
- [C] Cronin J.W. et al., Phys. Rev. V. D11, 1975, P. 3105-3123.
- [D] Baldin A.M., "Bulletin of the Lebedev Physics Institute" LPI RAS, N1, p.35, 1971.
- [E] Blokhintsev D.I., Sov.Phys.JETP 6 (1958) 5, 995-999,
Zh.Eksp.Teor.Fiz. 33 (1957) 5, 1295-1299.

Председатель НТС ЛФВЭ

Е.А.Строковский

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ

С.П.Мерц