

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С 3450
Г-621

31/VI - 78

P9 - 11432

3184/2 - 78

С.Л.Голубев, Ф.Ф.Губер, А.Д.Кириллов,
А.Б.Курепин, Ю.Л.Обухов, М.Д.Шафранов

КАНАЛ И СПЕКТРОМЕТР

ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

ПИОН-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

ПРИ ЭНЕРГИЯХ ДО 1 ГЭВ

1978

P9 - 11432

С.Л.Голубев,* Ф.Ф.Губер,* А.Д.Кириллов,
А.Б.Курепин,* Ю.Л.Обухов, М.Д.Шафранов

КАНАЛ И СПЕКТРОМЕТР
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПИОН-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
ПРИ ЭНЕРГИЯХ ДО 1 ГЭВ

* ИЯИ АН СССР, Москва.

Голубев С.Л. и др.

P9 - 11432

Канал и спектрометр для исследования пион-ядерных взаимодействий при энергиях до 1 ГэВ

Рассмотрены проектируемый канал и спектрометр на энергию до 1000 МэВ, предназначенные для формирования и анализа пучков пионов от внешней мишени синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ. Поток π -мезонов на выходе канала составляет около $1,8 \cdot 10^6 \pi^+ / \text{с}$ при энергии 1 ГэВ. Систему предполагается использовать для исследования пион-ядерных взаимодействий и ядерных реакций, вызванных пионами промежуточных энергий при ожидаемом энергетическом разрешении около $5 \cdot 10^{-4}$ и угловом разрешении 10 мрад.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Golubev S.L. et al.

P9 - 11432

The Pion Channel and the Spectrometer for Investigating the Pion-Nuclear Interactions at the Energies up to 1 GeV

The pion channel and the spectrometer under construction are described. They are to be used for producing and analysing pions of energies up to 1000 MeV from the external target of the Dubna synchrophasotron. The total intensity of 1000 MeV pions is about $1,8 \cdot 10^6 \pi^+ / \text{s}$ at the channel exit. This system is supposed to be used for investigating the pion-nuclear interaction and nuclear reactions with pions of intermediate energies. The expected energy resolution is $5 \cdot 10^{-4}$ and the angle resolution is 10 mrad.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

Развитие ядерной физики в последние годы показывает перспективность использования широкого набора частиц различных энергий для исследования свойств атомного ядра. Пионы промежуточных энергий до 1 ГэВ занимают особое место среди проникающих частиц. В отличие от электронов, мюонов и гамма-квантов пионы участвуют в сильных взаимодействиях, что позволяет изучать неэлектромагнитные свойства ядра. Однако это взаимодействие существенно менее сильное, чем взаимодействие нуклонов средних энергий с ядрами. Поэтому для пионов представляется возможным более простое теоретическое описание взаимодействия с ядром и, следовательно, появляется надежда на получение детальных сведений о структуре ядра. С увеличением энергии различия в механизме взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами сглаживаются. Однако при энергиях налетающих частиц выше 1 ГэВ сечения изучаемых реакций меньше зависят от структуры ядра, и при описании реакции ядро может быть представлено как набор слабосвязанных нуклонов. Наличие пионов двух знаков и изотопический спин пиона, равный единице, позволяют существенно расширить набор возможных реакций и возбуждаемых в реакциях состояний ядер.

Исследования взаимодействия пионов промежуточных энергий с ядрами являются одним из основных направлений работ на мезонных фабриках^{/1,2/}. Значительное число экспериментов выполняется также на давно работающих ускорителях. Последние результаты были представлены на Международную конференцию по физике высоких энергий и структуре ядра в Санта Фе^{/3/} и на I Между-

народную конференцию по мезонной ядерной физике в Питтсбурге /4/.

Одним из основных достижений последних лет является хорошее теоретическое описание данных по упругому рассеянию пионов с энергией 100–300 МэВ в области Δ_{33} – резонанса с помощью оптической модели с потенциалом Кисслингера и резкое расхождение теории с экспериментом при энергиях ниже 100 МэВ. Оказывается, что в области Δ_{33} – резонанса вследствие сильного поглощения пионов ядром рассеяние пионов мало чувствительно к деталям взаимодействия /5/. Таким образом, наиболее информативными оказываются исследования, выполненные в области энергий, удаленной от Δ_{33} – резонанса. В то время как много экспериментов запланировано при малых энергиях, практически нет предложений при энергиях около 500 – 1000 МэВ.

Поэтому создание канала и спектрометра пионов на выведенном пучке с энергией протонов 10 ГэВ предоставляет широкие возможности для исследования пион-ядерных взаимодействий в энергетическом диапазоне выше области Δ_{33} -резонанса. Использование стандартных магнитных элементов для конструирования канала и спектрометра с высоким разрешением позволяет проводить эксперименты при энергиях пионов до 1 ГэВ.

Другой особенностью канала и спектрометра, предназначенных для целей ядерной физики, должна быть высокая разрешающая способность по энергии. Действительно, сейчас нельзя представить себе достаточно подробные исследования ядерных реакций, вызванных пионами, без разделения возбужденных уровней конечных ядер. В зависимости от вида ядер и энергии пионов разрешение по энергии должно составлять 10^{-3} – 10^{-4} . Для измерения угловых распределений продуктов ядерных реакций необходимо обеспечить высокое угловое разрешение по углу рассеяния. По-видимому, для проведения большинства измерений достаточно угловое разрешение порядка 10 мрад.

При использовании проектируемого канала и спектрометра пионов для исследования пион-ядерного взаимодействия планируется провести измерения упругого

и неупругого рассеяния пионов с энергией 100– 1000 МэВ на широком наборе ядер. Далее будут изучены реакции с вылетом нуклонов и легких ядер с целью получения информации о таких свойствах ядер, как импульсное распределение нуклонов, распределение протонов и нейтронов, и о корреляциях нуклонов. При теоретическом анализе этих реакций будут использованы данные об упругом и неупругом рассеянии пионов.

Одним из первоочередных экспериментов будет исследование пи-конденсации в ядрах – явления, на возможность которого впервые обратил внимание А.Б.Мигдал /6/. Наличие пи-конденсата в ядрах должно изменить эффективную деформацию несферических ядер при взаимодействии с пионами /7/. Деформацию можно определить по измерению неупругого рассеяния пионов на деформированных ядрах редкоземельной области с возбуждением низколежащих вращательных уровней. Эти измерения, требующие разрешений около 100 кэВ, могут быть проведены только с помощью системы высокого разрешения.

Канал и спектрометр предполагается смонтировать на выведенном пучке протонов синхрофазотрона в районе первой тонкой милиени /8/. Предполагается, что вся система будет построена из стандартных элементов: магнитов СП-94 и квадрупольных линз МЛ-17.

Схема предлагаемой системы показана на рис.1. Пионы, рожденные в мишени Т1 и вылетающие из нее под углом около 10° , попадают в магнитный канал. Дублет линз Л1–Л2 и магнит М1 создают горизонтальное изображение мишени Т1 около импульсного коллиматора ИК1, который выделяет требуемый интервал импульсов. Дублет Л3–Л4 и магнит М2 проводят пучок на мишень Т2 и одновременно служат анализатором пучка по импульсам. Для улучшения разрешающей способности по импульсу дублет Л3–Л4 и магнит М2 формируют горизонтальное изображение плоскости детекторов Д2 на плоскости детекторов Д3. В качестве детекторов частиц в анализаторе канала предусмотрено использовать пропорциональные или дрейфовые камеры /9/, которые будут установлены в плоскостях Д1–Д3.

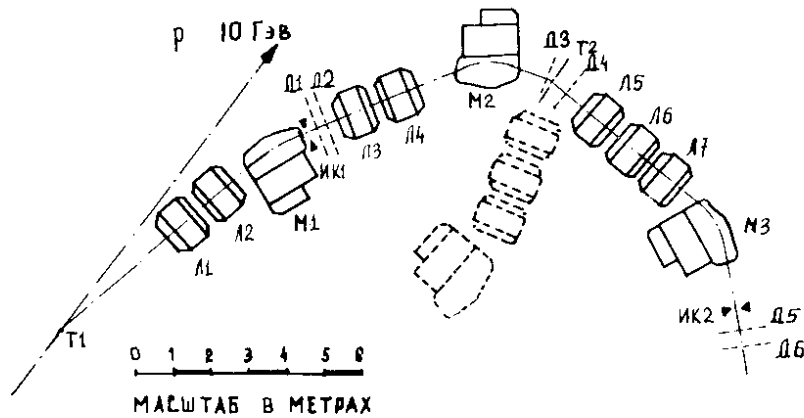


Рис.1. Схема канала и спектрометра пионов. Л1 ÷ Л7 – квадрупольные линзы МЛ-17. М1 ÷ М3 – электромагниты СП-94. ИК1, ИК2 – импульсные коллиматоры. Д1 ÷ Д6 – позиционные детекторы. Т1, Т2 – пионообразующая и исследуемая мишени.

Аналогично анализатору канала рассчитан спектрометр пионов – триплет Л5–Л7 и магнит М3. Спектрометр создает горизонтальное изображение мишени Т2 на импульсном коллиматоре ИК2 (для выделения импульсного интервала спектрометра) и одновременно формирует изображение плоскости детекторов Д4 на плоскости Д5. В спектрометре предполагается установить дрейфовые камеры по плоскостям Д4–Д6.

Расчет канала и спектрометра проведен по программе TRANSPORT^{/10/} на ЭВМ CDC-6500. Эффективные длины линз и магнитов брались равными 0,715 и 1,34 м соответственно. Краевые эффекты (коэффициенты K_1 и K_2 в^{/10/}) брались для прямоугольных полюсов: $K_1 = 0,5$, $K_2 = 3$. Рассчитанный вариант системы исследовался по программе DECAY TURTLE^{/11/}. В табл.1 приведены некоторые параметры рассчитанной системы.

Выход пионов из канала (на мишени Т2) и счет в спектрометре оценен по сечениям рождения пионов из работы^{/12/}. С учетом размеров пионопроизводящей латунной мишени (\varnothing 0,5 см, длина 5 см) и распада пионов выходы пионов на мишени Т2 составят *:

		$\times 10^6 \pi^+ / \text{с}$	$\times 10^6 \pi^- / \text{с}$
импульс	1000	1,8	1,2
пиона,	820	1,5	1,2
МэВ/с	500	0,6	0,4

Счет положительных пионов на выходе спектрометра при облучении медной мишени Т2 размером $8 \times 8 \text{ см}^2$ и толщиной ~ 60 мкм (100 кэВ для импульса 500 МэВ/с) составит 0,5 част для сечения взаимодействия 10 мб/ср. Светосила канала и спектрометра рассчитывалась с учетом апертур линз (\varnothing 24 см) и магнитов ($30 \times 12 \text{ см}^2$), а также ширии коллиматоров ИК1 и ИК2 (1,9 и 16,8 см). На рис.2 представлены огибающие пучков в канале и спектрометре.

Импульс частицы в канале или спектрометре будет определяться по измерениям ее координат при прохождении плоскостей детекторов Д1–Д6. При этом в линейном приближении горизонтальная координата частицы на плоскости Д3 есть

$$x_3 = Mx_2 + D\delta.$$

Здесь x_2 – координаты, М и D – коэффициент линейного увеличения и дисперсия тракта между Д2 и Д3, δ – относительный импульс. Тогда

$$\delta = \frac{x_3 - Mx_2}{D}.$$

*Для номинального значения аксептанса.

С учетом aberrаций линз и магнита становятся недостаточными измерения только координат частиц в плоскости дисперсии. Необходимо определять также углы входа частиц в плоскость Д2 по горизонтали и координаты и углы по вертикали. Для этого предполагается использовать информацию с камер Д1*.

Для оценки разрешения системы и определения необходимой точности измерения координат частиц было смоделировано прохождение пучка в канале, а также в спектрометре через 2 узкие щели, что имитирует измерение координат позиционным детектором. Ширина щелей была равна 300 мкм. Щели были смещены от оси пучка на величину стандартных отклонений распределений частиц по соответствующей координате. Регистрировался спектр прошедших обе щели частиц. В одном варианте горизонтальный угол входа частиц в щель не лимитировался (в пределах соответствующего фазового объема), в другом - отклонения величины этого угла от некоторого выбранного среднего значения не превышали ± 2 мрад.

Результаты моделирования представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что ограничение (а, значит, и измерение) горизонтального угла входа в детектор с точностью ± 2 мрад существенно улучшает разрешение как канала, так и спектрометра. Такое улучшение является показателем довольно большого вклада aberrаций 2-го порядка. Например, связанные с углом aberrационные коэффициенты T_{122} и T_{126} (см. /13/) для канала равны $7.19 \cdot 10^{-5}$ и $7.43 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Для частицы, имеющей угол входа 30 мрад и импульс $+1\%$, соответствующие aberrации будут равны ~ 650 и 220 мкм при средней точности дрейфовых камер $\sigma \sim 90$ мкм. Для достижения желаемой точности определения импульса

*Для переопределения задачи и уменьшения возможных просчетов из-за конечной эффективности детекторов можно установить добавочный детектор между Д1 и Д2.

частиц (около $5 \cdot 10^{-4}$) требуемая угловая точность должна лежать в пределах ± 2 мрад. Достигнуть такой величины, по-видимому, можно, т.к. искажения траектории на базе измерения угла (0,2 м между Д1 и Д2) невелики: при импульсе 500 МэВ/с параметр многократного рассеяния $\Theta_{пр}^{1/e}$ составляет 0,31 мрад для 100 мкм майлара и 0,45 мрад для 0,2 м воздуха.

С другой стороны, необходимо детальное знание магнитных полей линз и магнита СП-94, которое может быть достигнуто при прецизионном измерении топографии магнитных полей в этих элементах. Исходя из топографии поля можно рассчитывать aberrационные коэффициенты или коэффициенты разложения в ряд Фурье и т.п., позволяющие быстро и точно определить импульс.

Для уменьшения рассеяния пучка в системе отдельные части ионопровода предполагается вакуумировать. Использовать мешки с гелием в области анализатора канала или в спектрометре, по-видимому нельзя, так как среднее смещение частицы из-за многократного рассеяния в гелии (длина 6,5 м) составляет около 2,4 мм, что значительно хуже нужной точности измерения координат.

Отметим некоторые особенности предложенной системы. При расчете канала и спектрометра никаких условий на вертикальную фокусировку не накладывалось. Ставилась задача только провести пучок, захваченный линзой Д1 (в канале), и максимальный пучок в спектрометре.

Рабочие площади позиционных детекторов в канале составляют ($x \times y$): 4×11 см² (Д1, Д2), 5×8 см² (Д3). Детекторы в спектрометре должны быть больше: 7×7 см² (Д4) и 25×20 см² (Д5, Д6). Эти площади соответствуют указанным светосилам канала и спектрометра, определяемым апертурами и импульсными коллиматорами. Максимальная загрузка частицами, попадающими в рабочий фазовый объем системы, на детекторе Д2 доходит до $4 \cdot 10^{-6}$ част/с (π^+ , p, d, t...) для положительно заряженных частиц. Загрузка других детекторов ниже. Площадь полезного пучка на мишени укладывается в 6×8 см². При уменьшении площади до 6×6 см² теряется только 10% пучка, до 4×4 см² - 31%. Вес

вещества, необходимого для изготовления мишеней таких площадей, составит 2 - 4 г (энергетическая толщина мишени - 100 кэВ для пионов с импульсом $500 \frac{\text{МэВ}}{c}$).

Предполагается, что спектрометр будет иметь возможность вращаться вокруг мишени T2.

Основной составляющей фона является значительное (такого же порядка, как в пионном пучке) число протонов низкой энергии. Однако использование для их отбора время-пролетной системы на базе 15 м (от плоскости D1 до плоскости D6) позволит надежно выделить пионы при временном разрешении порядка 2 - 4 нс, так как минимальная разница времен пролета при импульсе $1000 \frac{\text{МэВ}}{c}$ между протонами и пионами составляет около 20 нс.

Фон, обусловленный мюонами при пионном распаде, как показал расчет по программе DECAU TURTLE, составляет примерно 9% от пионного пучка на выходе канала. Однако из-за большего пространственного размытия мюонов в области мишени, занятой пионным пучком ($6 \times 8 \text{ см}^2$), примесь мюонов равняется 3,9%. При уменьшении мишени фон от мюонов еще больше падает: для мишени размером $6 \times 6 \text{ см}^2$ - до 2,8%, для мишени размером $4 \times 4 \text{ см}^2$ - до 2,2%. При помощи математической обработки регистрируемых актов рассеяния (определение принадлежности падающей и рассеянной частиц к соответствующим фазовым объемам канала и спектрометра), по-видимому, возможно достигнуть дальнейшего снижения мюонного фона.

В заключение отметим, что для проведения измерений, не требующих высокого разрешения по энергии, можно использовать только канал пионов в сочетании с каким-либо детектором продуктов реакции. При этом возможно значительное увеличение интенсивности пучка пионов за счет расширения интервала импульсов, захватываемых каналом.

Таблица 1

Параметры системы

Максимальный пропускаемый импульс канала и спектрометра *	$1000 \frac{\text{МэВ}}{c}$
Номинальный аксептанс** канала спектрометра	6,11 мср % 27,59 мср %
Максимальный телесный угол канала спектрометра	1,45 мср 3,0 мср
Номинальный импульсный захват канала спектрометра	4,2 % P_0 9,8 % P_0
Длина канала спектрометра	15,4 м 9,0 м
Угол рождения пионов	10°

* Определялся по максимальным значениям градиентов поля линз ($650 \frac{\text{Гс}}{c}$) и полей в магнитах (17 кГс).

** Максимальный аксептанс в несколько раз превосходит указанные величины за счет увеличения импульсного захвата как в канале, так и в спектрометре.

Таблица 2

Оценка импульсного разрешения

Импульсное разрешение (стандартное отклонение), в % от P_0	канал	спектрометр
а) без ограничения по углу	0,039	0,23
б) $\Delta\theta = \pm 2$ мрад	0,011	0,029

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев С.Л. и др. Препринт ИЯИ АН СССР П-0034, 1976.
2. Thiessen H.A., Sobottka S. 1970, LA-4534-MS.
3. In: High-Energy Phys. Nucl. Str., AIP Conf. Proc. No. 4, No. 26, 1975.
4. In: Proc. Int. Conf. on Meson-Nuclear Phys. Pittsburg, 1976.
5. Hüfner J. Phys.Rep., 21C, No. 1, 1975.
6. Мигдал А.Б. ЖЭТФ, 1971, 61, 2209; 1972, 63, 1993.
7. Kurepin A.V., Markin O.A. Phys.Lett., 1977, 68B, p. 136.
8. Кириллов А.Д. и др. ОИЯИ, 9-9303, Дубна, 1975.
9. Водопьянов А.С. и др. В кн.: Международное совещание по методике проволочных камер, ОИЯИ, Д13-9164, 28, Дубна, 1975.
10. Brown K.L. et al. CERN 73-16 (1973).
11. Brown K.L., Iselin C. CERN 74-2, (1974).
12. Marmer C.J. et al. Phys.Rev., 1969, 179, p.1294.
13. Brown K.L. SLAC Rep., No.75, 1967.

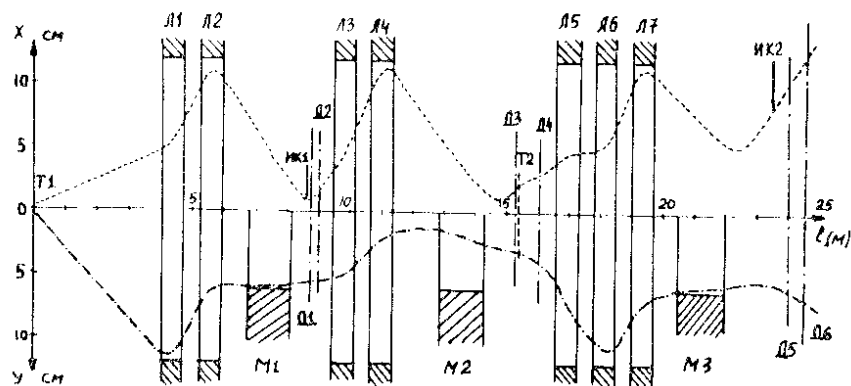


Рис. 2. Огибающие пучков в канале и спектрометре для номинальных значений аксептансов. X - размер по горизонтали, Y - по вертикали.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 марта 1978 года.