

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



СЗУ5Г1
Д-321

8/IX-25
Р9 - 8798 e

А.В.Демьянов, В.П.Джелепов, Б.И.Замолотчиков,
А.А.Кропин, В.С.Роганов

3356/2-75

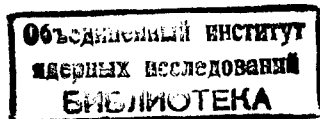
ПРОЕКТИРУЕМЫЕ КАНАЛЫ ПУЧКОВ
НУКЛОНОВ ФАЗОТРОНА
С ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1975

Р9 - 8798

А.В.Демьянов, В.П.Джелепов, Б.И.Замолотчиков,
А.А.Кропин, В.С.Роганов

ПРОЕКТИРУЕМЫЕ КАНАЛЫ ПУЧКОВ
НУКЛОНОВ ФАЗОТРОНА
С ВАРИАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ



I. Введение

В работах /1/ были сообщены основные параметры сильноточного фазотрона ОИЯИ с вариацией магнитного поля и некоторые принципы построения системы его пучков. Описание системы каналов, элементов ионной оптики содержится в работах /2 - 5/.

Настоящее сообщение посвящено проектируемым нуклонным пучкам фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. На рис. I приведена схема пучков фазотрона. Нуклонные пучки формируются в каналах IV, V, VI, VII, IX. Через эти каналы в экспериментальные помещения выводятся неполяризованные, поперечно- и продольно-поляризованные пучки нейтронов и протонов, пучки нейтронов и протонов с хорошим энергетическим разрешением. Потоки нуклонов образуются как от мишеней, расположенных внутри ускорителя, так и от мишеней на пучке протонов, выводимом из ускорителя. Временная структура нуклонных пучков практически повторяет временную структуру пучка протонов, на котором располагаются мишени.

2. Канал VII протонов, выведенных из фазотрона

Канал VII (рис. I) предназначен для фокусировки выведенного пучка протонов на мишени $M_2 - M_6$ и для транспортировки этого пучка до ловушки ДГ. Требования к системе формирования выведенного пучка протонов в значительной степени определяются его эмитансом, энергией и монохроматичностью, а также необходимостью согласования с другими каналами и расположением радиа-

ционных защит. Важным обстоятельством является и наличие мишеней на пути транспортируемого протонного пучка. Этим обусловлен выбор схемы фокусировки пучка в канале УП с несколькими промежуточными изображениями. В качестве фокусирующих элементов использованы дублеты квадрупольных магнитов типа 15K50-1300 /2/. Мишени $M_3 - M_6$ устанавливаются в промежуточных фокальных плоскостях ионно-оптической системы канала.

Основные параметры пучка выведенных из фазотрона протонов даны в таблице I. Значения эмитанса взяты из работы /4/. В этой же таблице приведены параметры пучков протонов для других строящихся ускорителей в области энергий до 1 ГэВ: ЛАМФ /6/, СИП /7/, ТРИУМФ /8/, ЦЕРН /9/, МФ АН СССР /10/. Как видно, эмитанс пучка протонов на выходе из фазотрона ЛЯП ОИЯИ довольно большой. Это затрудняет его транспортировку (особенно после мишеней) и эффективное образование вторичных пучков. Однако, если сравнить пучок выведенных протонов из фазотрона с существующим в настоящее время пучком синхротрона ЛЯП ОИЯИ, то в результате реконструкции достигается рост по крайней мере в 150 раз интенсивности выведенного пучка и значительное улучшение остальных его параметров.

Расположение элементов канала УП видно из рис. I, а в таблице 2 приведены типы этих элементов /2/. При транспортировке протонов до ловушки ЛГ магнит типа СП-024 (элемент 3) не используется. Его основное назначение - направить через каналы IV или V пучок неполяризованных протонов в тех случаях, когда необходимо в

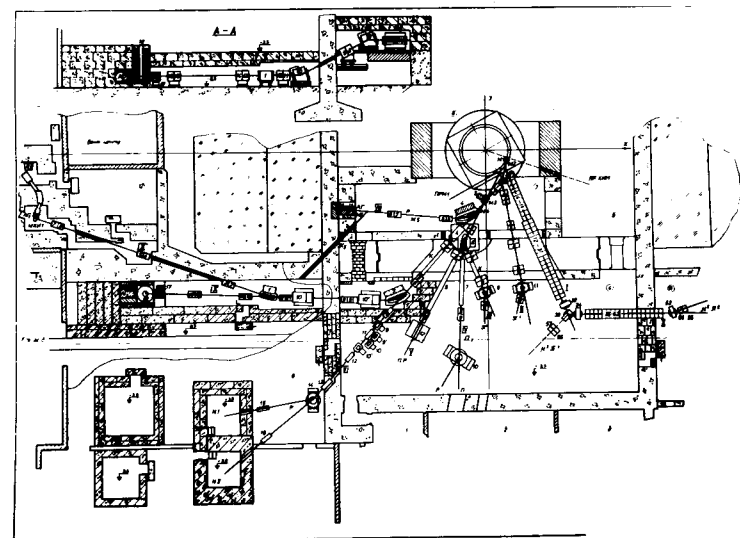


Рис. I. Система каналов пучков фазотрона с вариацией магнитного поля.

одной экспериментальной установке иметь поляризованные и неполяризованные пучки. Кроме того, этот магнит служит для дополнительной очистки пучка нейтронов, вылетающих из мишени M_3 , от заряженных частиц и для направления в канал Ш мезонов, образованных в мишени M_3 под 0° .

Установка мишеней на пучок протонов изменяет его параметры следующим образом: 1. Из-за многократного рассеяния в мишени увеличивается расходимость пучка и изменяются координаты частиц, т.е. возрастает эмитанс пучка после мишени. 2. Потери энергии уменьшают энергию протонов. 3. Часть протонов взаимодействует с ядрами мишени, поглощается, и продукты этого взаимодействия активируют окружающие материалы и дополнительно нагревают мишень. 4. Возрастает монохроматичность пучка.

При транспортировке протонного пучка до ловушки ЛГ основное значение имеет многократное рассеяние в мишенях M_3 , M_4 , M_5 . Поэтому допустимые толщины и материал мишеней выбирались из условия согласования эмитанса пучка после мишени с аксептансом последующей части канала. Эмитанс после мишени определялся эмитансом пучка на мишени и углом рассеяния в каждой фазовой плоскости, в пределах которого оставалось 95% частиц из каждой точки на выходе мишени. Доля протонов, теряемых в действительности из-за рассеяния в мишени, будет несколько меньше.

Выбор материала мишеней для получения вторичных пучков определяется рядом факторов /3/, в частности, сечением образования мезонов. С другой стороны, толщина мишени, допускаемая

Таблица 1. Параметры выведенных пучков протонов

Ускоритель	Вывод	E (МэВ)	I (мкА)	Эмитанс (мм.мрад)		Размер пучка на мишени (см)	
				гориз.	вертик.	гориз.	вертик.
ЛЯП ОИЯИ	0,5	680 \pm 2	25	70	20	4,4	0,4
ЛАМФ	I	800 \pm 3	1000	3	3	0,2	0,2
СИН	I	590 \pm 6	100	4,5	4,5	0,3	0,3
ТРИУМФ	I	500 \pm 0,6	100	1,9	3,0	0,1	0,3
ЦЕРН	0,5	600 \pm 0,5	5	15	25	0,2	1,2
МФ АН СССР	I	600 \pm 5	500	15	15		

Таблица 2. Элементы канала УП выведенных протонов

№	Т и п	Апертура (см)	Длина полюса (см)	Кол-во	Мощность (кВт)
1, 2	15K50-1300	ϕ 15	50	2	139
3	СП-024	30x15	70	1	-
M_3-M_6	Мишени			4	
4	СП-027	40x15	235	1	195
5 - 8	15K50-1300	ϕ 15	50	4	278
ЛГ	Ловушка			1	
Мощность электропитания канала					612

Таблица 3. Допустимые толщины мишеней в точке M_3 (или M_4) и доля протонов η , прошедших мишень без взаимодействия

Мишень	Be	C	H ₂ O	Al	Cu	W	Pb
Толщина (см)	8,2	5,0	8,6	1,2	0,38,	0,084	0,137
η	0,76	0,85	0,87	0,93	0,96	0,99	0,99

условиями транспортировки пучка до ловушки, также зависит от материала мишени (таблица 3).

В таблице 4 приведены размеры пучка протонов в канале УП в различных точках расположения мишеней для разных вариантов фокусировки^{/4/} без мишеней и с ними. Из этих данных видно, что плотность пучка протонов в точках M_4 и M_5 достигает 10^{14} с.⁻¹см⁻². Из таблицы 4 также следует, что для получения пучков вторичных частиц могут использоваться мишени из графита толщиной до 10 г/см². В таких мишенях около 15% протонов испытывают ядерные взаимодействия и уменьшается интенсивность первичного пучка.

В ряде экспериментов возможно использование одновременно всех 4 мишеней, причем, если на суммарную толщину мишеней M_3 , M_4 , M_5 накладывает ограничение система транспортировки, то для M_6 это ограничение отсутствует.

Транспортировка протонов в канале УП происходит в воздухе. Однако это приводит к незначительным (около 4%) потерям протонов и некоторому увеличению фона. Прохождение пучка в воздухе на участке до мишени M_3 эквивалентно уменьшению толщины мишени в этой точке примерно на 6%. Необходимо отметить, что обеспечение вакуума на тракте пучка привело бы к существенным трудностям в создании системы каналов пучков.

3. Каналы IX и IX' транспортировки протонов

Основное назначение канала IX состоит в транспортировке без потерь интенсивности выведенных из фазотрона протонов до

мезонной мишени M_{π} (эл.18), от которой с помощью соленоидальной линзы большой апертуры образуются пучки пионов с энергией 50 ± 10 МэВ с большими углами сходимости^{/11/}.

Особенностью транспортировки частиц по каналу IX является то, что после защитной стены элементами 7, 10, 10' (магнитами СП-027 и СП-09) пучок отклоняется в горизонтальной и вертикальной плоскостях, переводится на уровень первого этажа и по защитному тоннелю транспортируется к ловушке ЛГ₁ или магнитом СП-09 (эл.1) отклоняется в канал IX'.

Назначение других элементов (таблица 5) понятно из рис.1. Магнит СП-024 (эл.17) корректирует положение пучка на мишени при изменении полярности тока или его величины в соленоидальной пионной линзе ПМЛ (эл.18)^{/2,11/}.

Защита тоннеля допускает транспортировку пучка в вакууме с интенсивностью 10 мкА. Мишень из вольфрама устанавливается в непосредственной близости от ловушки, и поэтому толщина ее практически не ограничивается. На мишени пучок протонов имеет сечение около 5 см² и плотность $1,2 \cdot 10^{13}$ 1/см².с.

По каналу IX' транспортируется пучок выведенных протонов до мишени МХИ-1 и ловушки ЛГ₂. Основное назначение канала - вывести протоны в отдельное экспериментальное помещение (12), предназначенное для проведения исследований по программе ЯСНАШ на масс-сепараторе (канал УШ')^{/5/}.

Таблица 4. Размеры пучка протонов в канале УП для различных точек расположения мишеней

Плоскость	Ширина пучка (см)				Вариант транспортировки пучка
	М ₃	М ₄	М ₅	М ₆	
Горизонт.	3,4	4,4	3,4	3,6	Фокусировка в М ₄
Вертикальн.	3,2	0,4	2,9	2,3	(без мишеней)
Горизонт.	2,4	3,9	1,6	4	Фокусировка в М ₅
Вертикальн.	4,0	0,8	0,8	2,6	(без мишеней)
Горизонт.	3,4	4,4	2,2	1,6	Фокусировка в М ₆
Вертикальн.	3,4	0,4	2,6	2,2	(без мишеней)
Горизонт.	3,2	7,4	6,4	7,2	10 г/см ² графита
Вертикальн.	3,2	3,2	3,2	2,0	в М ₃
Горизонт.	3,4	4,4	8,8	4,4	10 г/см ² графита
Вертикальн.	3,2	0,4	5,8	8,4	в М ₄

Таблица 5. Элементы канала IX выведенных протонов

№ элем.	Тип	Кол-во	Мощность (кВт)
1, 2, 5, 6, 8, 9, 11-16	I5K50-I300	12	834
3, 17	СП-024	2	136
4	Замедлитель	1	-
5', 6'	20K25(I)-1000	2	123
К	Коллиматор	1	-
7	СП-027	1	195
10, 10'	СП-09	2	390
18	ШМЛ	1	1000
ЛП ₁	Ловушка	1	-
Мощность электропитания канала			2618

Элементы канала IX' выведенных протонов

№ элем.	Тип	Кол-во	Мощность (кВт)
1	СП-09	1	195
2 + 7	I5K50-I300	6	417
ЛП ₂	Ловушка	1	-
Мощность электропитания канала			612

4. Канал У1 заторможенных протонов

Основное назначение канала - формирование пучка медленных протонов и транспортировка его в помещение для медико-биологических исследований или в зал экспериментальных установок (№ 4) для проведения на этом пучке физических исследований. Расположение элементов канала на пучке видно из рис.1, а в таблице 6 указаны типы элементов^{/2/}. В качестве триплетов будут применяться триплеты МЛПК, используемые в настоящее время на подобном канале^{/12/} синхроциклотрона.

Выведенный из вакуумной камеры фазотрона протонный пучок фокусируется дублетом линз I5K50 (эл.1,2) на замедлитель из воды варьируемой толщины (эл.4) для получения протонов разных энергий. Заторможенные протоны фокусируются дублетами линз 20K25 (эл.5',6'), I5K50 (эл.5, 6) и триплетами МЛПК (эл.8) на вход системы отклоняющих магнитов (эл.9, 9', 10, 10'). Четыре магнита СП-024 (эл.9, 9', 10, 10') предназначаются для получения вдвойне ахроматического пучка протонов, в котором положение и угол наклона выходящих частиц не зависят от их импульса^{*}). Система симметрична относительно средней плоскости между магнитами. Отклонение пучка вторым и третьим магнитами противоположно отклонению первым и четвертым магнитами. Каждый отклоняющий магнит ориентирован на симметричный вход и выход пучка. В конструкции из 4-х отклоняющих магнитов по сравнению с другими ахроматическими системами можно удобно расположить в плоскости симметрии импульсный щелевой коллиматор особой конструкции. Эта система позволяет получить заданное импульсное распределение пучка и целенаправленно формировать пик Брэгга по ширине и заднему фронту.

*) Использование системы из 4 прямоугольных магнитов СП-024 на канале У1 предложено О.В.Савченко.

Далее ахроматический пучок триплетами линз МЛПК (эл. I2, I3, I5, I6) и магнитом СП-57 (эл. I4) направляется в одно из двух помещений, где проводятся медико-биологические эксперименты или лечение больных раком. Если пучок не отклонять магнитами СП-024, то качественно он не будет отличаться от существующего в настоящее время /I2/. В этом случае диаметр пучка в фокальной плоскости триплета (эл. I5 или I6) около 4 см, а разброс пробегов протонов с энергиями I85 и 90 МэВ составляет 4 и 3 г.см⁻², что соответствует энергетической дисперсии II МэВ (+6%) и I6 МэВ (+18%).

Начиная с триплета (эл. 8') в канале VI создается вакуум - для уменьшения потерь протонного пучка. Интенсивность пучка протонов после замедлителя падает примерно в I000 раз.

Ожидаемые интенсивности пучка составляют 10^{11} с⁻¹ с плотностью частиц 10^{10} см⁻² с⁻¹, но используемая интенсивность может быть несколько ограничена радиационной обстановкой в проводимых экспериментах.

5. Канал IV поляризованных протонов

Основное назначение канала - формирование пучка протонов с различным направлением вектора поляризации - от поперечного до продольного, а также пучка неполяризованных протонов. Пучок неполяризованных протонов, выходящий из фазотрона, фокусируется дублетом линз I5K50 (эл. I, 2) на мишень M₃ из графита или бериллия (рис. I). Протоны, рассеянные на угол I2° в горизонтальной плоскости, будут поляризованы в вертикальной плоскости. Величина угла рассеяния выбирается близкой к оптимальному значению, определяемому произведением интенсивности рассеянных частиц на величину поляризации (~ 40%).

После мишени пучок рассеянных протонов фокусируется дублетом линз 20K25-II (эл. 4, 5), отклоняется магнитом СП-025 (эл. 6) на вход соленоида типа МС8 (эл. 7) с магнитным полем вдоль пучка, фокусируется дублетом линз I5K50 (эл. 8, 9) и отклоняется магнитом (эл. I2) на местную защиту.

В зависимости от режима работы магнитов (6 и I2) и соленоида (7) пучок в месте расположения экспериментальной аппаратуры получается с разным направлением вектора поляризации. Если соленоид выключен, пучок протонов имеет поперечную поляризацию, направленную перпендикулярно горизонтальной плоскости; если соленоид включен, но магнит (I2) выключен, то поляризация остается поперечной, а вектор поляризации лежит в горизонтальной плоскости. Включение магнита (I2) позволяет получать продольно-поляризованный пучок. С помощью магнита СП-024 (эл. 3) по каналу IV может быть направлен и неполяризованный пучок протонов (мишень M₃ удалена).

Размеры магнитов и соленоида, а также напряженность магнитного поля H, необходимые для поворота вектора поляризации, определяются из известных /I3/ соотношений для скорости изменения угла поляризации во времени в лабораторной системе координат. Надо заметить, что для относительной точности в величине поляризации ~ I% требуется определение величины магнитного поля с такой же точностью /I4/.

Наибольший угол захвата протонов из мишени M₃ в канал (около 0,5·10⁻³ ср) получается при фокусировке первым дублетом (эл. 5) примерно в середину соленоида. Энергия поляризованных протонов в пучке составляет около 640 МэВ, энергетический разброс примерно ±8 МэВ, а интенсивность - 2·10¹⁰ с⁻¹ для мишени из бериллия толщиной 8,6 см. Размер пучка на выходе из последнего дублета (эл. 8, 9)

Таблица 6. Элементы канала У1 заторможенных протонов

№ элем.	Т и п	Кол-во	Мощность (кВт)
1, 2, 5, 6	I5K50-I300	4	278
3, 9, 9', 10, 10'	СП-024	5	270
4	Замедлитель	1	-
5, 6	20K25(I)-I000	2	123
К	Коллиматор	1	-
7	СП-027	1	-
8, 11, 12, 13, 15, 16	МЛК	4	192
14	СП-57А	1	90
Мощность электропитания канала			953

Таблица 7. Элементы канала У2 поляризованных протонов

№ элем.	Т и п	Кол-во	Мощность (кВт)
1, 2, 8, 9	I5K50-I300	4	278
3	СП-024	1	68
4, 5	20K25B-I000(П)	2	123
6	СП-025	1	170
7	МС-8	1	285
10	СП-37М	1	54
Мощность электропитания канала			978

Таблица 8. Элементы канала У3 поляризованных или неполяризованных нейтронов

№ элем.	Т и п	Апертура	Длина полюса (см)	К-во	Мощность (кВт)
1, 2, 10, 11	I5K50-I300	∅ 15	50	4	278
3	СП-024	30x15	70	1	68
4, 5, 7, 8	20K25B-I000(П)	∅ 20	25	2	246
6	СП-025	32x20	110	1	170
9	МС-9	∅ 55/50	686	1	360
12	СП-026	52x10	200	1	165
Мощность электропитания канала					1227

в точке D_2 для поперечно-поляризованного пучка равняется 4 см^2 , а для продольно-или поперечно-поляризованного пучка на выходе из магнита (I2) - около 10 см^2 . Использование длинного соленоида усложняет траектории частиц, движения в горизонтальной и вертикальной плоскостях становятся зависимыми друг от друга, изображение мишени или ограничивающего коллиматора увеличивается и поворачивается^{/15/}.

Интенсивность пучка неполяризованных протонов, отклоняемых магнитом (6) в канал У2, ограничивается условиями радиационной защиты зала экспериментальных установок (№ 4) и составляет 10^{11} с^{-1} . Размер пучка в точке D_2 - примерно 4 см^2 .

Аналогичный пучок неполяризованных протонов можно получить также через канал У, который в основном предназначается для экспериментов с нейтронами. Элементы канала У приведены в таблице 8. Пучок протонов, выведенный из ускорителя, направляется магнитом (3) вдоль оси канала, фокусируется тремя дублетами линз (4, 5, 7, 8, 10, 11), соленоид (9) и магнит (I2) при этом не включаются.

Через канал У может выводиться также пучок поперечно-поляризованных протонов с интенсивностью $1,7 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$, вектор поляризации которых лежит в вертикальной или горизонтальной плоскостях в зависимости от того, выключен или включен соленоид МС-9 (эл. 9). Для вывода продольно-поляризованных протонов через канал У включаются соленоид (9) и магнит (I2), который при этом разворачивается на угол 25° и обеспечивает необходимый поворот вектора поляризации. Однако отсутствие второго отклонения протонов при наличии мишени M_3 приводит к загрязнению пучка нейтронами и ограничивает возможности использования поляризованных протонов, получаемых через этот канал.

6. Пучки нейтронов от внутренней мишени через канал У

Пучки нейтронов получают путем квазиупругого зарядовообменного рассеяния протонов на мишенях преимущественно из веществ с легкими ядрами. В схеме пучков фазотрона (установка "Ф") через канал У могут быть получены пучки неполяризованных нейтронов, образованных от внутренней мишени из бериллия под углами к протонной орбите, близкими к 0° .

Элементы канала У приведены в таблице 8. Однако при получении неполяризованных нейтронов используются только магниты для очищения пучка от заряженных частиц. При этом можно включать как все три магнита (3, 6, 12), так и некоторые из них. Если ось канала У направить под углами $10 - 20^\circ$ к максимальной орбите протонов в ускорителе, то можно от внутренней мишени через один и тот же канал У получать также и поляризованные нейтроны^{/13/}. Однако это приведет к некоторому уменьшению интенсивности нейтронных пучков, так как сечение нейтронообразования заметно падает с ростом угла.

Если иметь в виду эксперименты, не требующие поляризации, то оценка показывает, что хотя телесный угол для нейтронов от внешней мишени M_3 в 1,8 раза больше, чем от внутренней, интенсивность от внутренней мишени будет примерно вдвое выше (с учетом кратности прохождения: толщины мишени, угла вылета нейтронов и коэффициента вывода протонов из камеры). Использование внутренней мишени позволяет при этом получать одновременно и мезонные пучки в трактах I или II с полной интенсивностью для некоторых энергий.

Интенсивность потока нейтронов от внутренней мишени через канал У составит $7 \cdot 10^7$ с⁻¹ на площадь около 20 см² после магнита (12) в интервале энергий от 500 до 650 МэВ. Спектр нейтронов, обра-

зованных под 0° протонами с энергией 680 МэВ^{/16/}, показан на рис. 2, на котором виден четкий максимум около 600 МэВ, а также большой вклад нейтронов низких энергий, обусловленный рождением пионов, многократным рассеянием в ядре и реакциями, в которых третий нейтрон уносит значительную часть энергии. Фон нейтронов низких энергий может быть уменьшен водородосодержащим фильтром на пучке нейтронов^{/17/}, а примеси γ -квантов (10^{-3} от потока нейтронов) – свинцовым поглотителем.

В таблице 9 приведены данные об интенсивности неполяризованных пучков нейтронов на ускорителях ЛЯП ОИЯИ, СИН^{/17/} и ЛАМФ^{/18/}. Из таблицы видно, что интенсивности этих пучков близки друг к другу. Для сравнения интенсивность пучков рассчитана для одной и той же площади 100 см², т.е. в канале У соленоид заменен коллиматором с сечением 100 см².

7. Канал У поляризованных нейтронов от внешней мишени

Назначение канала У (помимо получения пучка неполяризованных нейтронов от внутренней мишени, см. раздел 6) – формировать пучки поляризованных нейтронов с разным направлением вектора поляризации. Пучок поляризованных нейтронов получается от мишени M_3 , расположенной на выведенном пучке протонов. Нейтроны, вылетающие под углом к направлению протонного пучка, будут поляризованы, причем их поляризация независимо от вещества мишени^{/12/} будет примерно такой же, как и в случае свободного р-рассеяния. Вектор поляризации, возникающий в процессе рассеяния, направлен вертикально, так как он всегда перпендикулярен плоскости рассеяния. Мишень M_3 устанавливается в такой точке, чтобы пучок поляризованных нейтронов (под углом 15°) проходил через канал У. Интенсивность потока нейтронов

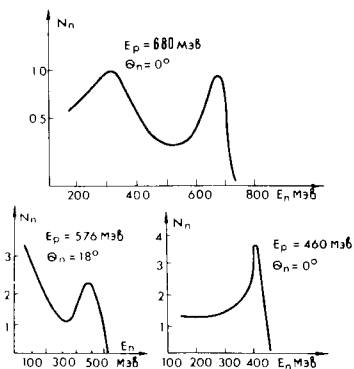


Рис. 2. Спектр нейтронов, образованных протонами с энергией 680 МэВ /15/, 576 МэВ /19/, 460 МэВ /20/ на мишени из бериллия.

через канал У составляет около $3 \cdot 10^7$ с⁻¹ на площадь примерно 20 см² от мишени М₃ из Ве толщиной 8 см.

Возможны три режима работы канала для пучков нейтронов от мишени М₃. Нейтроны с вектором поляризации, перпендикулярным оси пучка и лежащем в вертикальной плоскости, получают, если включены только магниты (6) и (12) для очистки пучка от примеси заряженных частиц. Нейтроны с вектором поляризации, лежащем в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси пучка, получают, если включен соленоид (9) с продольным магнитным полем, а магнит (12) не включен. Продольно-поляризованный пучок нейтронов образуется, если, кроме соленоида (9), включить также магнит (12) с такой величиной вертикального магнитного поля, которая повернет спин нейтрона на 90°.

Размеры магнитов и соленоидов, напряженность магнитного продольного и поперечного поля для поворота вектора поляризации на 90° определяются из формул /13/. Магнит СМ-026 и соленоид МС-9 обеспечивают /2/ необходимый поворот.

Спектр поляризованных нейтронов близок к спектру /16/, показанному на рис. 2. Величины поляризации, полученные при квазисвободном рассеянии протонов на нейтронах дейтрона для разных углов в системе центра масс, суммированы в /13, 19/. Для канала У величина поляризации нейтронного пучка ожидается равной ~0,25. Характеристики поляризованных нейтронных пучков СИН /17/, ЛАМФ /18/ и ЛЯП ОИЯИ даны в таблице 10. Интенсивность указана на площадь 20 см². Значения E_p , I_p , t приведены в таблице 9. Поляризованные нейтроны на ускорителях ЛАМФ и СИН образуются под углами 28° и 30° соответственно.

8. Пучок нейтронов с хорошим разрешением

Для получения нейтронов можно использовать реакцию $p(\alpha, 2p)n$, применяя жидкий дейтерий в качестве мишени на пучке протонов, выведенных из ускорителя (см., например, /13/). Эта реакция дает почти моноэнергетический пучок, направленный под углом 0° к пучку протонов. Для пучка протонов 680 ± 2 МэВ от дейтериевой мишени ожидается поток нейтронов с энергией 676 ± 4 МэВ. Другим преимуществом этой реакции, по сравнению с образованием нейтронов на бериллии или углероде, является относительно меньшая примесь нейтронов малых энергий.

Применение мишени из жидкого дейтерия на пучках протонов высокой интенсивности вызывает технические трудности, связанные с обеспечением взрывобезопасных концентраций в помещении при эксплуатации и в аварийных случаях, радиационным разрушением тонких пленок на окнах мишени, криогенным обеспечением мишени, в которой выделяемая тепловая мощность порядка сотни ватт. В схеме каналов пучков (рис. I) наиболее целесообразно было бы размещать дейтериевую мишень либо перед элементом 4 канала У с применением магнита СП-025 для отклонения из пучка заряженных частиц, либо после элемента 6 на канале У I с использованием магнита СП-027 (эл. 7). Предпочтительный выбор расположения мишени определяется также возможной интенсивностью протонов на мишени и расстоянием до детектора нейтронов.

Как было уже отмечено в /2/, размещение необходимых количеств жидкого дейтерия в зале 7 около ускорителя или непосредственно на канале У I невозможно и потребуются разработка системы снабжения мишени жидким дейтерием из сосудов, расположенных во взрывобезо-

пасных помещениях, с учетом высокой радиоактивности в местах установки мишени. В схеме пучков (рис. I) пока предусмотрено размещение дейтериевой мишени в точке D_2 на канале IV. Ожидаемые потоки нейтронов приведены в таблице II. При этом учитывается, что допустимая интенсивность по условиям радиационной защиты в канале IV составляет 0,02 мкА, а в канале У I при наличии дейтериевой мишени — 3 мкА.

Как видно из рис. I, расположение дейтериевой мишени на У I канале менее удобно для размещения физических установок, чем на канале IV, и требует удаления некоторых магнитов СП-024 на время проведения экспериментов с нейтронами. Однако, помимо 30-кратного увеличения интенсивности нейтронов от мишени на канале У I, имеющийся на пучке замедлитель (эл. 4) позволяет также изменять энергию нейтронов в максимуме спектра, как это видно из рис. 2, для энергии протонов $576 \text{ МэВ}^{/20/}$ и $460 \text{ МэВ}^{/21/}$ из бериллиевой мишени. Для дейтериевой мишени спектр значительно уже и при энергии нейтронов около 200 МэВ соответствует разбросу примерно ± 13 МэВ. Интенсивность пучка нейтронов следует за интенсивностью пучка протонов при использовании замедлителя (см. раздел 4).

9. Заключение

Система пучков фазотрона обеспечивает возможности для проведения широкого круга экспериментов на пучках поляризованных протонов и нейтронов.

Нуклонные пучки можно получить не только теми способами, которые описаны выше. Например, нейтроны от внутренней мишени могут получиться и под углом ψ около 90° к направлению протонов через каналы I и II при расположении мишени M_I на оси канала I и II. Эти пучки могут использоваться и в режиме деления интенсивности с другими каналами.

Таблица 9. Параметры неполяризованных пучков нейтронов от ускорителей ОИЯИ, ЛАМПФ, СИН

Ускоритель	E_p МэВ	I_p мкА	Мишень	t (см)	$E_n \pm \Delta E_n$ МэВ	L (м) до мишени	N_n 1/с
ЛЯП ОИЯИ	700	50	Ве	4	600±50	16	$3,5 \cdot 10^8$
ЛАМПФ	750	84	D ₂	15	745±5	10	$6,1 \cdot 10^8$
СИН	580	100	Ве	5	545±15	10	$3 \cdot 10^8$

Значения E_p и I_p относятся к пучку протонов, который попадает на мишень толщиной t для образования пучка нейтронов.

Таблица 10. Параметры поляризованных пучков нейтронов от ускорителей ОИЯИ, ЛАМПФ, СИН

Ускоритель	$E_n \pm \Delta E_n$ (МэВ)	N (с ⁻¹)	Поляризация
ЛЯП ОИЯИ	600±50	$3 \cdot 10^7$	0,25
ЛАМПФ	530±30	$4 \cdot 10^7$	0,35
СИН	400±60	$8 \cdot 10^7$	0,30

Таблица 11. Пучки нейтронов из каналов фазотрона ОИЯИ

Канал	$E_n \pm \Delta E_n$ (МэВ)	N (с ⁻¹)	S (см ²)	Поляризация ^{ж)}
IУ	676±4	$3 \cdot 10^5$	100	0
У	600±50	$7 \cdot 10^7$	20	0
	600±50	$3 \cdot 10^7$	20	$P_I = 0,25$
	600±50	$3 \cdot 10^7$	20	$P_{II} = 0,25$
УI	676±4	$8 \cdot 10^6$	100	0
	580±6	$6 \cdot 10^6$	100	0
	200±13	10^5	100	0

ж) P_I или P_{II} - поперечная или продольная поляризация пучка.

Еще больше возможностей при работе с нейтронами от внешних мишеней. Нейтроны могут получаться от мишени M₃ также через канал УI ($\varphi \sim 0^\circ$). Кроме того, они образуются в замедлителе (эл.4 канала УI), используемом в качестве мишени, и проходят через канал II ($\varphi \sim 60^\circ$) и через канал IУ ($\varphi \sim 45^\circ$). Хотя диапазоны интенсивностей нейтронов в этих каналах весьма различны, большое разнообразие комбинаций работы каналов, которые при этом потребляют незначительную дополнительную мощность электропитания, существенно расширяет фронт работ, проводимых с нейтронами.

В таблицах II и I2 суммированы интенсивности пучков нуклонов из каналов фазотрона с вариацией магнитного поля. Сравнение с пучками синхротрона /I2/, действующего в настоящее время, показывает, что интенсивности поляризованных и неполяризованных пучков, после завершения реконструкции, возрастут на два-три порядка.

Таблица 12. Пучки протонов из каналов фазотрона

Канал	$E_p \pm \Delta E_p$ (МэВ)	N_p (с ⁻¹)	S (см ²)	Поляризация
IУ	680±2 640±8 640±	10^{II} $2 \cdot 10^{IO}$ $2 \cdot 10^{IO}$	4 4 10	0 $P_I = 0,4$ $P_{II} = 0,4$
У	680±2 640±8	10^{II} $1,7 \cdot 10^{IO}$	4 10	0 $P_I = 0,4$
УI	680±2 200±11 100±16	10^{II} 10^{II} 10^{II}	10 10 10	0 0 0
УII	680±2	$1,5 \cdot 10^{14}$	8	0
IХ	680±2	$0,6 \cdot 10^{14}$	10	0

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить многих сотрудников лаборатории за помощь в работе и ценные обсуждения, особенно Ю.Н.Денисова, В.П.Дмитриевского, Н.Л.Заплатаина, В.Г.Зинова, Ю.М.Казаринова, М.М.Комочкова, Л.И.Лапидуса, А.И.Мухина, В.И.Сатарова, О.В.Савченко, С.И.Чеснову.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, Н.Л.Заплатин, В.В.Кольга, М.М.Комочков, А.А.Кропин, Л.И.Лапидус, А.И.Мухин, В.С.Роганов. ОИЯИ 9-32II, Дубна (1967); ОИЯИ 9-395I, Дубна (1968).
2. А.В.Демьянов, В.П.Джелепов, Б.И.Замолодчиков, А.А.Кропин, В.С.Роганов. ОИЯИ P9-8222, Дубна (1974).
3. А.В.Демьянов, В.П.Джелепов, Б.И.Замолодчиков, А.А.Кропин, В.С.Роганов. ОИЯИ 9-8270, Дубна (1974).
4. В.П.Дмитриевский, Н.Л.Заплатин, А.А.Кропин, В.С.Роганов, С.И.Чеснова. ОИЯИ 9-7505, Дубна (1973).
5. Р.Арльт, Г.Байер, В.С.Бутцев, К.Я.Громов, Б.И.Замолодчиков, Н.Г.Зайцева, В.Г.Калинников, В.В.Кузнецов, А.Потемпа, В.И.Райко, В.С.Роганов, А.Н.Синаев, Х.Тыррофф, М.Фингер, В.А.Халкин, В.М.Цупко-Ситников, В.Г.Чумин. ОИЯИ БЗ-6-7256 (1973).
6. L.E.Agnew, K.H.Narpeg. LASL, LA-4586-MS(1971).
7. G.Guignard. SIN TM-09-17 (1970).
8. P.F.Meads, E.L.Oster. TRI-70-1 (1970).
9. E.G.Michaelis. CERN PHIII-72/36 (1972).
10. Г.И.Бацких, Е.Г.Комар, А.А.Кузьмин, В.Г.Кульман, Б.П.Мурин, А.П.Федотов. Труды РАИАН, 16, 9, Москва (1974).
11. О.В.Савченко. ОИЯИ Б1-13-6255 (1972); В.М.Абазов, В.П.Джелепов, Е.С.Кузьмин, А.Т.Молоканов, О.В.Савченко, Г.П.Решетников, Е.П.Череватенко. ОИЯИ P13-8079, Дубна (1974).
12. В.С.Роганов. ОИЯИ Б1-9-4707 (1969).
13. Р.Вильсон. Нуклон-нуклонные взаимодействия. Изд. "Мир", Москва, 1965.

14. O.Aselund, J.Björkman, G.Trumpy. Nucl. Instr. Meth. 36, № 2, 245 (1965).
15. D.N.Edwards, B.Rose. Nucl. Instr. Meth. 7, № 2, 135 (1960).
16. В.С.Киселев, К.О.Оганесян. Р.Позе, В.Б.Флягин. ЖЭТФ 35, 812 (1958).
17. SIN. Tätigkeitsbericht (1971).
18. LAMPF, Users Handbook LASL LA-4586-MS (1971).
19. D.Chang, B.Macdonald, J.A.Helland, P.M.Ogden. Phys.Rev. 102, 1470 (1967).
20. T.J.Ypsilantis. CERN MSC Handbook, P 2, p.1 (1970).
21. G.B.Yodh. Phys.Rev. 98, 1330 (1955).

Рукопись поступила в издательский отдел
17 апреля 1975 г.