

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Б.П. КОНСТАНТИНОВА**

На правах рукописи

Григорьев Кирилл Юрьевич

УДК 539.128, 539.188

**Создание поляризованной водорододейтериевой газовой мишени
для эксперимента ANKE на внутреннем пучке
накопительного кольца ускорителя COSY**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук

А.А. Васильев

доктор философии

Ф. Ратманн

доктор технических наук

Н.Н. Чернов

Гатчина

2007

Содержание

Введение	9
Глава 1.	
Источники поляризованных атомарных пучков	14
1.1. Введение.....	14
1.2. Описание конструкции и принцип работы.....	15
1.3. Сравнение источников поляризованных атомов.....	21
Глава 2.	
Внутренние газовые мишени для ускорителей заряженных частиц.....	24
2.1. Введение.....	24
2.2. Струйные мишени	25
2.3. Мишени с использованием накопительных ячеек	26
Глава 3.	
Поляризованная внутренняя газовая мишень для эксперимента ANKE	31
3.1. Ускоритель COSY	31
3.1.1 Краткое описание ускорителя COSY	31
3.1.2 Методы охлаждения пучков заряженных частиц	32
3.1.3 Многократная инжекция.....	35
3.2. Эксперимент ANKE.....	37
Глава 4.	
Подготовка к экспериментам на ускорителе COSY	39
4.1. Измерение профиля пучка COSY.....	39
4.1.1 Описание измерительной установки.....	39
4.1.2 Измерение профиля пучка на этапе инжекции	42
4.1.3 Измерение профиля ускоренного пучка	44
4.1.4 Выводы	47
4.2. Магнитные поля в районе эксперимента ANKE.....	48
4.2.1 Магнитные поля вокруг источника на эксперименте ANKE	48
4.2.2 Магнитное поле вдоль оси источника.....	52
4.2.3 Выводы	55
4.3. Система подачи неполяризованного газа.....	56
4.3.1 Введение.....	56
4.3.2 Калибровка устройства измерения интенсивности	59
4.3.3 Измерение интенсивности атомарного пучка.....	61
4.3.4 Выводы	63

Глава 5.

Эксперименты с накопительной ячейкой на ускорителе COSY 64

5.1. Мишень с накопительной ячейкой..... 64

5.1.1 Приборы и методика измерений 64

5.1.2 Эксперименты с накопительной ячейкой 65

5.1.3 Выводы..... 68

5.2. Неполяризованная газовая мишень с накопительной ячейкой 68

5.2.1 Приборы и методика измерений 68

5.2.2 Эксперимент с неполяризованной газовой мишенью 70

5.2.3 Выводы..... 73

5.3. Поляризованная струйная газовая мишень 74

5.3.1 Приборы и методика измерений 74

5.3.2 Проведение измерений с неполяризованной газовой мишенью..... 78

5.3.3 Выводы..... 80

5.4. Эксперимент с двойной поляризацией..... 80

5.4.1 Подготовка и проведение эксперимента..... 80

5.4.2 Интенсивность ускорительного пучка 82

5.4.3 Измерение поляризации мишени 85

5.4.4 Измерения поляризации пучка COSY..... 91

5.4.5 Определение фоновых событий 92

5.4.6 Плотность газовой мишени 94

5.4.7 Достигнутые результаты..... 98

5.4.8 Выводы..... 106

Глава 6.

Перспективы использования109

Заключение111

Список литературы116

Список иллюстраций

Рис. 1. Принципиальная схема источника поляризованных атомарных пучков (пояснения даны в тексте).....	16
Рис. 2. Зависимость интенсивности пучка от входного потока водорода.....	17
Рис. 3. Зависимость интенсивности пучка от радиочастотной мощности разряда.....	17
Рис. 4. Диаграмма энергетических уровней атома водорода в магнитном поле B , выраженная в единицах «критического» поля ($B_C^H = 507 Г$). Энергия измерена в единицах ΔW	18
Рис. 5. Ядерная поляризация уровней сверхтонкого расщепления атома водорода, как функция внешнего магнитного поля	19
Рис. 6. Принципиальная схема струйной мишени	25
Рис. 7. Накопительная ячейка для поляризованного источника.....	26
Рис. 8. Распределение давления в накопительной ячейке.....	28
Рис. 9. План ускорителя COSY	31
Рис. 10. Упрощенная схема работы стохастического охлаждения на ускорителе COSY.....	34
Рис. 11. Пример многократной инжекции с последующим ускорением до энергии эксперимента. 28 инжекций с интервалом в 2 секунды для электронного охлаждения. Жирной линией отмечено количество частиц в накопительном кольце, тонкой – напряжение на выходе преобразователя числа частиц в COSY	36
Рис. 12. Спектрометр ANKE	37
Рис. 13. Вакуумная камера ускорителя COSY для установки мишеней в эксперименте ANKE	40
Рис. 14. Рамка с системой диафрагм. Слева – основная диафрагма ($50 \times 25 \text{ мм}^2$), правее – диафрагма с размерами $30 \times 10 \text{ мм}^2$, далее – две диафрагмы $30 \times 10 \text{ мм}^2$, расположенные одна за другой прототип накопительной ячейки с внутренним сечением $30 \times 10 \text{ мм}^2$	40
Рис. 15. Схема установки дистанционного управления перемещением рамки с диафрагмами.....	41
Рис. 16. Принцип измерения профиля пучка COSY.....	42
Рис. 17. Принципиальная схема измерителя тока пучка.....	43

Рис. 18. Измерение числа частиц в накопительном кольце при горизонтальном перемещении рамки с диафрагмами	44
Рис. 19. Время жизни ускоренного пучка COSY	45
Рис. 20. Размеры пучка ускорителя COSY. На этапе инжекции кластерная мишень не использовалась. При работе с ускоренным пучком: наружный эллипс – размер пучка с использованием кластерной мишени, внутренний – без нее	45
Рис. 21. Восстановленный профиль пучка на этапе инжекции в ускоритель. Максимум соответствует плотности пучка, инжектированного в ускоритель без использования диафрагм, начало координат – геометрическому центру вакуумной камеры	46
Рис. 22. Двумерная карта магнитного поля на расстоянии 1250 мм от центра магнита D2. Начальные координаты – оптический центр пучка ускорителя, ось OX – направлена внутрь зазора магнита	49
Рис. 23. Проверка на стабильность работы ABS в изменяющемся магнитном поле. Сплошная линия – давление в камере ускорителя, создаваемое пучком атомов в состояниях $ 1\rangle$ и $ 2\rangle$, штрих пунктирная – только состояние $ 1\rangle$, штриховая – фоновые измерения без пучка	51
Рис. 24. Магнитное поле вдоль оси источника. Начало координат соответствует нижней точке центрального фланца ABS	54
Рис. 25. Частота прецессии атома, скорость изменения магнитного поля и коэффициент R в области пролета поляризованных атомов вдоль оси источника ANKE-ABS	55
Рис. 26. Устройство для измерения интенсивности пучка ABS – компрессионная трубка	56
Рис. 27. Упрощенная схема системы подачи газа для калибровки потока	58
Рис. 28. Уменьшение давления в калибровочном объеме (верхняя кривая) и в объеме вакуумной камеры (нижняя кривая) при калибровке с использованием водорода	58
Рис. 29. Калибровочные кривые зависимостей потока водорода, дейтерия и азота от давления в системе подачи неполяризованного газа	60
Рис. 30. Фотография нижней вакуумной камеры ABS с компрессионной трубкой, размещенной на трехкоординатном столе и датчиками давления для измерения интенсивности пучка	61
Рис. 31. Зависимость интенсивности пучка атомарного водорода от давления в компрессионном объеме	62
Рис. 32. Измерительная диафрагма и две накопительные ячейки в рамке для первого теста с использованием установки удаленного перемещения	65

Рис. 33. Накопительная ячейка из алюминиевой фольги, покрытой черным политетрафторэтиленом для уменьшения деполяризации атомов.....	69
Рис. 34. Многократная инжекция в накопительную ячейку с последующим ускорением.....	71
Рис. 35. Реконструкция вершины реакции («точечная» пленочная мишень – CH_2).....	75
Рис. 36. Реконструкция вершины реакции с газовой мишенью и накопительной ячейкой заполненной атомарным неполяризованным (вертикальная штриховка) и поляризованным (горизонтальная штриховка) водородом. Без штриховки – фоновые счета	76
Рис. 37. Фотография крио-ловушки для газовой струи ABS в камере для установки мишеней.....	77
Рис. 38. Восстановленное распределение плотности вершин реакции $pp \rightarrow d\pi^+$	79
Рис. 39. Система поддержки и перемещения накопительной ячейки в камере ускорителя после проведения эксперимента. Дополнительные трубки использовались для подачи неполяризованного газа для калибровок во время эксперимента	81
Рис. 40. Многократная инжекция в накопительную ячейку без газа с последующим ускорением, пояснения даны в тексте	84
Рис. 41. Схема установки для измерения поляризации пучка	85
Рис. 42. Зависимость числа $\text{Lu-}\alpha$ фотонов от магнитного поля в спин-фильтре.....	87
Рис. 43. Измеренное распределение $\text{Lu-}\alpha$ фотонов с помощью ФЭУ. Слева показано распределение измеренных фотонов при включенном блоке MFT (состояние $ 1\rangle$), справа – включены оба блока сверхтонких переходов MFT и WFT (состояние $ 3\rangle$)	89
Рис. 44. Асимметрия поляризации, измеренная с помощью поляриметра. Положительные значения соответствуют отрицательной поляризации, в отрицательные – положительной.....	90
Рис. 45. Спектр недостающей массы. Закрашенная область – фоновые измерения с азотной мишенью, незакрашенная – измерения с поляризованной мишенью с атомарным водородом.....	93
Рис. 46. Восстановленная вершина реакции в накопительной ячейке с учетом фоновых событий.....	93
Рис. 47. Сдвиг основной частоты во внутреннем кольце COSY для разных типов мишени. Слева – без мишени, справа – поляризованная водородная мишень созданная с помощью ABS.....	97
Рис. 48. Спектр недостающей массы процесса $\bar{d}\bar{p} \rightarrow dX$. Слева показаны распределение с учетом всех детектируемых частиц в переднем детекторе, справа – только тех,	

которые были получены в совпадении с трековым детектором. Закрашенная область – фоновые измерения с азотной мишенью, незакрашенная – измерения с поляризованной мишенью	99
Рис. 49. Окончательное распределение недостающей массы для реакции $\bar{d}p \rightarrow ppn$.	100
Рис. 50. Слева – вертикальное двумерное распределение траекторий частиц в детекторе (область первых двух слоев силиконовых датчиков выделена прямоугольником). Справа – проекция этих частиц на ось, перпендикулярную направлению распространения пучка ускорителя. Сплошная линия – без использования, прерывистая – с использованием скреперов после ускорения	101
Рис. 51. Слева – распределение восстановленных траекторий протонов в горизонтальной плоскости. Справа – интенсивность счетов, описывающая плотность газовой мишени	102
Рис. 52. Угловая зависимость квадрата недостающей массы реакции $\bar{d}p \rightarrow dp_{sp}X$ с использованием неполяризованного пучка ускорителя и поляризованной водородной мишени.....	104
Рис. 53. Слева – распределение восстановленных траекторий протонов в горизонтальной плоскости. Справа – интенсивность счетов, описывающая плотность газовой мишени	105

Список таблиц

Табл. 1. Сравнительные характеристики PABS	21
Табл. 2. Характеристика методов охлаждения, применяемых на ускорителе COSY	35
Табл. 3. Магнитное поле около компонент ABS, подверженных его влиянию	50
Табл. 4. Количество частиц в накопительном кольце на разных этапах работы	67
Табл. 5. Количество частиц в накопительном кольце на этапе инжекции в ускоритель	72
Табл. 6. Количество частиц в накопительном кольце после ускорения протонного пучка.....	73
Табл. 7. Количество частиц в накопительном кольце после ускорения протонного пучка.....	88
Табл. 8. Поляризация дейтронного пучка COSY	91
Табл. 9. Моделирование интенсивности атомарного потока.....	95
Табл. 10. Различный подход к определению плотности газовых мишеней	98
Табл. 11. Зависимость поляризации от угла вершины реакции.....	103
Табл. 12. Угловая зависимость анализирующей способности протона	106
Табл. 13. Сравнительные характеристики существующих источников поляризованных атомарных пучков с накопительными ячейками.....	114

Введение

В настоящее время одним из перспективных направлений в ядерной физике является изучение структуры и различных свойств ядерной материи на расстояниях порядка или меньше радиуса нуклона. Многообразие ускорителей по всему миру позволяет провести ряд экспериментов, направленных на изучение свойств элементарных частиц при взаимодействии их в довольно широком диапазоне импульсов. Создание ускорительного пучка определенной поляризации (т.е. с упорядоченным направлением спина частицы) и возможность использования в области взаимодействия пучка поляризованных мишеней расширяет круг возможных исследований. Так, например, на одном ускорителе заряженных частиц RHIC¹ проводятся два больших совершенно независимых эксперимента, одной из задач которых является изучение поляризационных наблюдаемых спина. В эксперименте STAR² [1], измеряются спин-зависимые структурные функции нуклонов и ядер с использованием продольно поляризованных протонных пучков с энергией в системе центра масс порядка 200 и 500 ГэВ. В настоящее время этот эксперимент является одним из самых больших в мире по физике элементарных частиц, посвященном исследованиям в области фундаментальной ядерной физики. Расположенный в том же научном центре эксперимент PHENIX³ [2] использует твердую поляризованную (продольно и поперечно) мишень и направлен на исследование соударений тяжелых ядер. С его помощью было обнаружено сильное подавление выхода адронов при больших поперечных импульсах.

В эксперименте pp2pp⁴ [3] изучается полное сечение и сечение упругого протон-протонного поляризованного и неполяризованного рассеяния в диапазоне высоких энергий. После столкновения протоны почти не отклоняются, оставаясь в узком телесном угле вблизи центра пучка, и не покидают камеры ускорителя, что создает дополнительные сложности при детектировании продуктов реакции. Однако сцинтилляционные детекторы, расположенные внутри камеры, позволяют измерять поляризацию сталкивающихся «желтого» и «синего» пучков коллайдера RHIC и

¹ Relativistic Heavy Ion Collider.

² Solenoidal Tracker at RHIC.

³ Pioneering High Energy Nuclear Interaction Experiment.

⁴ Изучение упругого взаимодействия двух высокоэнергетичных протонов.

отбирать совпадения, которые потом позволяют восстановить дифракционный конус в рассеянии протонов и значение его наклона.

Целью эксперимента COMPASS⁵ [4] в Церне является изучение реакций ассоциативного рождения адронов, т.е. изучается рассеяние поляризованных мюонов на легких ядрах. Кроме этого можно исследовать продольную поляризацию, наблюдаемую в процессе глубоко-неупругого рассеяния. В настоящее время этот эксперимент находится на стадии сбора статистики и анализа полученной информации.

В области средних и низких энергий известны несколько больших экспериментов, изучающих спиновую структуру. Одним из них является эксперимент EDDA [5], расположенный на накопительном кольце ускорителя COSY. При энергиях протонного пучка $0.5 \div 2.5$ ГэВ проводится эксперимент с поляризованной струйной мишенью. Полученные результаты в диапазоне углов центра масс рассеянных протонов $30 \div 90^\circ$ с шагом 5° демонстрируют некоторое несоответствие с теоретическими результатами из базы данных SAID [6]. Это еще раз подтверждает, что в настоящее время нет единой теоретической модели, полностью описывающей все результаты, полученные в поляризованных экспериментах, поэтому пополнение любыми новыми результатами может помочь в дальнейшем развитии.

Для более детального описания нуклон-нуклонных взаимодействий, классическим примером которых является эксперимент по развалу дейтрона при моменте относительного импульса движения нуклонов внутри ядра $q = 0.3 \div 0.5$ ГэВ/с, можно использовать существующую систему детекторов эксперимента ANKE на ускорителе COSY. Для этого необходимо создать поляризованную мишень высокой плотности и использовать ее области пересечения с пучком ускорителя заряженных частиц. Примером может служить двойной поляризационный эксперимент с использованием поляризованной газовой водороднодейтериевой мишени и поляризованного пучка COSY.

Одним из возможных способов создания газовых мишеней является использование источника атомарных пучков (ABS⁶). Изначально такие источники, производившие поляризованный пучок атомов водорода, разрабатывались для создания поляризованных протонных пучков на ускорителях. Но было замечено, что их можно использовать как мишень, бомбардируя сфокусированный пучок атомов газа пучком ускорителя. В силу конструкции источников, описанной в главе 1.2, можно создавать

⁵ COmmon Muon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy.

⁶ Atomic Beam Source.

газовые мишени с плотностью порядка 10^{11} см^{-3} для ускоренного пучка ускорителя диаметром 1 см. Такие мишени получили название струйных.

Дальнейшее развитие газовых мишеней потребовало увеличения их плотности, что было достигнуто с использованием накопительной ячейки, предложенной Хаберли в 1966 году [7]. Стандартная накопительная ячейка представляет собой Т-образную трубку, в которой создается облако газа источника ABS. Открытая с обеих сторон трубка для ускорительного пучка не разрушает его и позволяет проводить измерения с циркулирующим от нескольких минут до нескольких часов пучком, в зависимости от плотности мишени и размеров трубки. Такой подход к созданию газовой мишени позволяет увеличить ее плотность на два порядка по сравнению со струйной мишенью того же источника.

Впервые накопительная ячейка была установлена и использовалась в эксперименте на электронном ускорителе ВЭПП-3 (Новосибирск) [8], для определения тензорной анализирующей способности T_{20} электрон-дейтронного упругого рассеяния. Применение накопительной ячейки увеличило плотность мишени в 15 раз, а специальное силиконовое покрытие стенок «Drifilm» [9] и слабое магнитное поле вокруг ячейки, созданное дополнительными катушками вокруг ячейки, позволило поддерживать тензорную поляризацию дейтериевого пучка источника. Во время проведения эксперимента после множественных столкновений атомов со стенками ячейки наблюдаемая поляризация дейтериевой мишени составляла $P_{ZZ} = 0.572 \pm 0.053$, тогда как в лабораторных условиях для струйной мишени она была выше и превышала $P_{ZZ} > 0.9$.

После первого успешного использования накопительной ячейки началось ее применение и в других экспериментах на ускорителях заряженных частиц, одним из них является эксперимент HERMES [10], [11] на позитронном пучке HERA ускорителя DESY (Гамбург, Германия). Для создания поляризованных газовых мишеней использовались водород, дейтерий, гелий, тритий. За время эксплуатации источника на эксперименте были проведены исследования спиновых структур нуклона. В данный момент источник поляризованных атомов, использовавшийся в этом эксперименте на протяжении десяти лет, демонтирован [12] и планируется его использование в рамках эксперимента PAX⁷ [13].

Спектрометр ANKE⁸ расположенный на накопительном кольце ускорителя COSY⁹ (научно-исследовательский центр г. Юлих, Германия) на данный момент

⁷ Polarized Antiproton eXperiments.

⁸ Apparatus for studies of Nucleon and Kaon Ejectiles.

является единственным в мире, где возможно проведение двойного поляризационного эксперимента ($\vec{d}p \rightarrow ppn$ [14], [15]) с использованием поляризованной мишени и поляризованного пучка заряженных частиц ускорителя. В рабочем диапазоне энергий COSY, можно определить векторную и тензорную анализирующие способности и спин-корреляционные параметры протонов и дейтронов. Также этот эксперимент позволит получить новую информацию о структуре волновой функции дейтрона, поскольку поляризационные наблюдаемые ($A_y^p, A_y^d, A_{yy}^d, C_{yy}, C_{yyy}$) зависят от отношения S - и D -компонент волновой функции. Принимая во внимание особенности спектрометра ANKE [16], эксперимент можно провести в условиях коллинеарной геометрии: протоны, испущенные назад, близко к 180° будут регистрироваться в совпадении с протонами, испущенными вперед под малыми углами (близко к 0°). В такой геометрии S - и D -волновые функции дейтрона могут быть изучены вплоть до внутреннего момента 0.5 ГэВ/с.

Эффективное использование ускорительного времени – одна из основных задач при подготовке и проведении эксперимента. Для ее выполнения необходима не только мишень с высокой плотностью и низкой деполяризацией атомов вдоль накопительной ячейки, но и хорошо сфокусированный интенсивный пучок ускорителя. Оптимизация этих параметров позволит обеспечить высокую светимость в эксперименте.

Основной задачей данной работы являлось создание поляризованной водороднодейтериевой газовой мишени с накопительной ячейкой для экспериментов на спектрометре ANKE с использованием источника поляризованных атомов и поляризованного пучка ускорителя COSY. Помимо создания поляризованной газовой мишени необходимо было провести серию работ, направленных на оптимизацию параметров пучка ускорителя в секции эксперимента ANKE.

В процессе подготовки к созданию накопительной ячейки был проведен ряд экспериментов на ускорителе в районе установки мишени на эксперимент ANKE. В результате была значительно улучшена интенсивность и повышена плотность ускорительного пучка при использовании накопительной ячейки. Также была проведена оптимизация поперечного сечения накопительной ячейки, что позволило создать мишень максимальной плотности с высоким коэффициентом поляризации и провести первый в мире эксперимент на поляризованном дейтроном пучке с использованием поляризованной водородной газовой мишени.

⁹ COoler SYnchrotron, Forschungszentrum Jülich, Germany.

В работе рассматривается создание установки и ее использование в экспериментах, направленных на определение характеристик пучка ускорителя COSY в камере установки мишеней на эксперимент ANKE. Также описывается проведение исследования магнитных полей в районе установки мишени, его влияние на компоненты ABS, свойства создаваемого пучка и измерительную систему поляриметра (LSP¹⁰) [17], работающего на эффекте лэмбовского сдвига. Объясняется калибровка существующей системы подачи неполяризованных газов (H_2 , D_2 , N_2 , He), и ее использование, в процессе создания неполяризованной газовой мишени с накопительной ячейкой по плотности эквивалентной поляризованной мишени, создание и использование в эксперименте поляризованной газовой мишени.

Основными результатами подготовительной работы является проведение экспериментов на ускорителе COSY в районе установки мишеней для эксперимента ANKE. В ходе подготовки к проведению двойного поляризационного эксперимента с использованием поляризованного пучка ускорителя и поляризованной газовой внутренней мишени, были проведены исследования профиля пучка в месте установки мишени. Это позволило сделать количественную оценку предполагаемой плотности мишени и ввести коррективы в прототипы накопительных ячеек. Для предварительных экспериментов с различными ускорительными пучками было создано несколько отличающихся по геометрической форме, внутреннему покрытию и использованному типу газа мишеней. Окончательный прототип был использован в эксперименте с поляризованным протонным пучком COSY и поляризованной водородной мишенью, созданной с помощью ABS. Создание поляризованной мишени для ускорителя COSY открывает дополнительные возможности для проведения экспериментов со спектрометром ANKE.

¹⁰ Lamb-Shift Polarimeter.

Глава 1.

Источники поляризованных атомарных пучков

1.1. Введение

В настоящее время источники поляризованных атомарных пучков (PABS¹¹), получившие бурное развитие в конце XX века, активно используются на накопительных кольцах ускорителей заряженных частиц по всему миру. Идея создания таких источников была выдвинута Норманом Ф. Рамзеем в работе [18]. В ее основе заложено пространственное разделение сверхтонких компонент пучка атомов в неоднородном магнитном поле с последующим индуцированием переходов между уровнями сверхтонкого расщепления. В качестве исходного материала для создания пучка могут использоваться такие газы, как водород, дейтерий, гелий или тритий. Полученный с помощью PABS пучок может использоваться для создания мишеней на внутренних кольцах ускорителей заряженных частиц.

Долгое время для поляризованных экспериментов использовались твердотельные мишени. Однако, обладая большой плотностью, они могут применяться исключительно на выведенных пучках, так как необратимо разрушают пучок ускорителя. Плотность поляризованной газовой мишени существенно ниже твердотельной, но светимость в эксперименте с внутренней газовой мишенью повышается за счет многократного прохождения пучка ускорителя. К тому же поляризованные газовые мишени, по сравнению с твердотельными, обладают рядом преимуществ:

- низкое радиационное повреждение. Мишень не изменяет своих свойств и не разрушается под действием пучка ускорителя любой интенсивности;
- однородность материала (газа). Для создания газового потока используется один тип газа (водород или дейтерий) без дополнительных примесей, усложняющих анализ полученных данных;
- высокий коэффициент поляризации. Поляризация, получаемая с помощью современных источников PABS, достигает 90 % по сравнению с 40 – 50 % поляризацией протонных твердотельных поляризованных мишеней [19];

¹¹ Polarized Atomic Beam Source.

- быстрое изменение знака поляризации мишени (положительная или отрицательная) и, в случае работы с дейтерием, типа поляризации (векторная или тензорная).

Однако, одним из недостатков струйных газовых мишеней является их низкая плотность ($10^{11} \div 10^{12}$ ат/см²). Это может компенсироваться за счет многократного взаимодействия пучка ускорителя с поляризованной струей атомов. Такие мишени, устанавливаемые на накопительных кольцах ускорителей, принято называть внутренними. Для создания более плотной мишени можно использовать накопительную ячейку, через которую будет пропускаться пучок ускорителя. В зависимости от геометрических размеров, линейная плотность мишени с использованием накопительной ячейки может более чем на два порядка превосходить плотность струйной мишени, полученной с помощью того же источника.

1.2. Описание конструкции и принцип работы

Важнейшими характеристиками источника поляризованного водорода или дейтерия, определяющими в дальнейшем качество создаваемой мишени, являются:

- интенсивность;
- поляризация;
- степень диссоциации;
- пространственное распределение плотности;
- и скорость атомов в пучке.

В зависимости от условий, в которых будет использоваться ABS, на каждый из параметров могут накладываться дополнительные требования. Например, для источника, который планируется использовать только как струйную мишень, важными параметрами являются распределение атомов по скоростям и объемная плотность пучка, т.к. от этого зависит время и область взаимодействия с пучком ускорителя. А для источника, работа которого предусматривает использование накопительной ячейки, более важными являются интенсивность и параллельность создаваемого пучка.

Принципиальная схема источников поляризованных атомарных пучков показана на Рис. 1. Можно выделить несколько основных частей источника:

- система подачи молекулярного газа (1) с регулятором потока и радиочастотным диссоциатором;
- система формирования газовой струи (2), состоящая из сопла, скиммера и коллиматора;

- магнитная система формирования пучка (3) и (5);
- система создания поляризации (4) и (6);
- мишень (7), взаимодействующая с находящимися в ускорителе частицами.

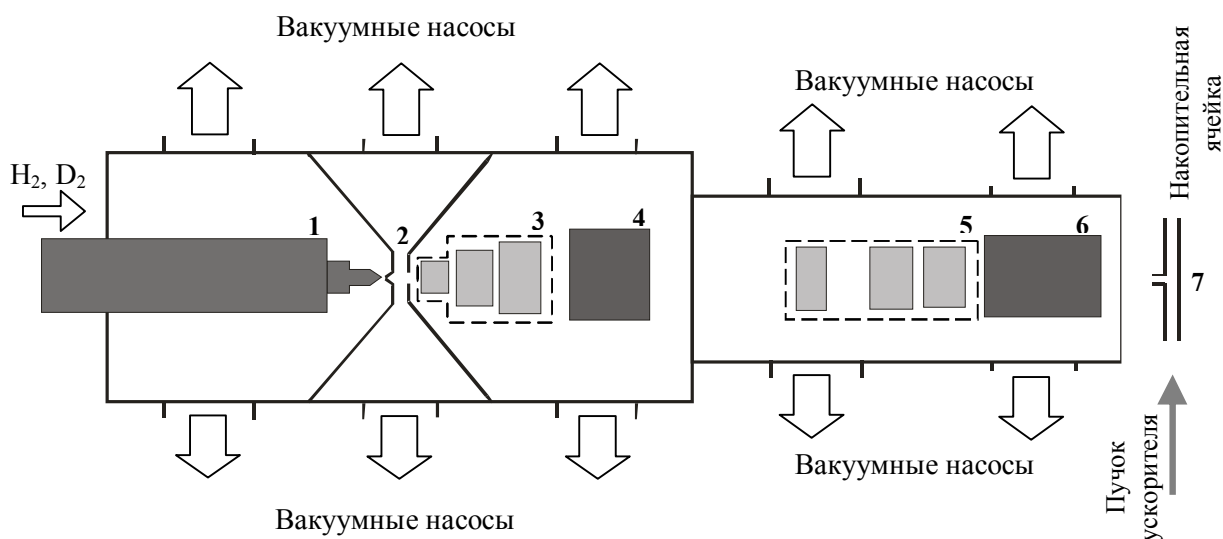
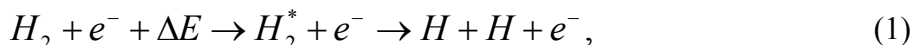


Рис. 1. Принципиальная схема источника поляризованных атомарных пучков (пояснения даны в тексте)

Для создания атомарного пучка водорода или дейтерия обычно применяется радиочастотный диссоциатор, в котором, под действием электромагнитного поля высокой частоты, свободные электроны ускоряются и возбуждают колебательные уровни молекул водорода. Этот процесс может быть представлен следующим образом:



где $\Delta E = 8.8$ эВ – энергия возбуждения колебательных уровней молекулы водорода и дейтерия.

Рассмотрим формирование поляризованного пучка атомов водорода в источнике. Обычно исходный поток газа варьируется от 0.5 до 2 мбар·л/с. Нижняя граница этого диапазона обусловлена тем, что при более низком давлении в диссоциаторе невозможно сформировать газовую струю, а также электроны за длину свободного пробега успевают набрать энергию, достаточную для ионизации атомов и молекул, что необходимо избежать. Верхняя граница определяется условиями зажигания плазмы, когда электроны за длину свободного пробега не успевают набрать достаточной энергии для диссоциации молекул. На Рис. 2 изображена характерная зависимость интенсивности атомарного пучка водорода при постоянной температуре сопла и изменяющимся входным потоком. Давление в компрессионной трубке ¹²,

¹² Методика измерений описана подробнее в главе 4.3.

использовавшейся в измерениях, пропорционально интенсивности пучка. С уменьшением интенсивности при высоких потоках также уменьшается степень диссоциации α , которая рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{\text{поток}(H)}{\text{поток}(H) + 2 * \text{поток}(H_2)}, \quad (2)$$

где α – часть молекул, диссоциировавших на атомы.

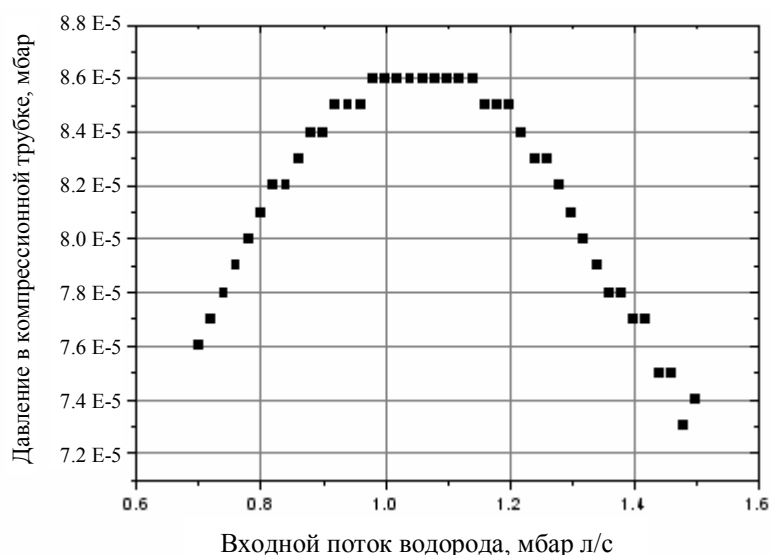


Рис. 2. Зависимость интенсивности пучка от входного потока водорода

Для получения более интенсивного пучка атомарного водорода или дейтерия кроме изменения потока в диссоциатор можно варьировать радиочастотную мощность разряда. С ее увеличением (Рис. 3) при постоянном потоке газа растет интенсивность пучка и в определенный момент достигает насыщения [21].

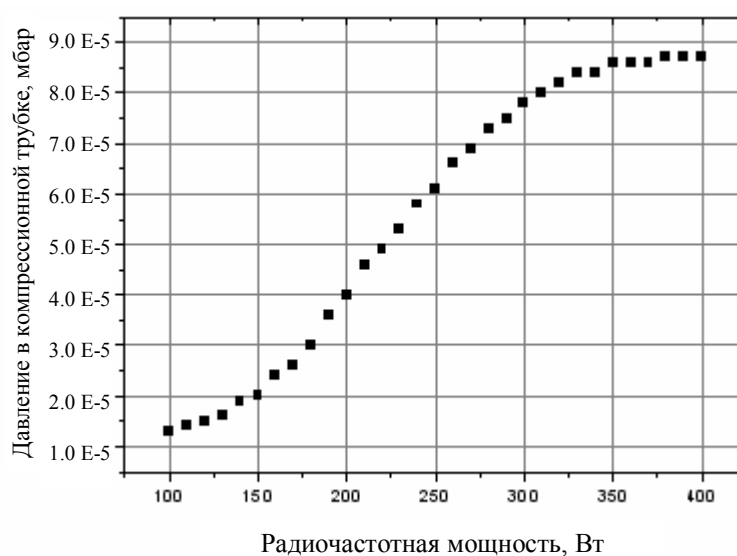


Рис. 3. Зависимость интенсивности пучка от радиочастотной мощности разряда

Атом водорода в основном состоянии обладает электронным спином $S = 1/2$ с проекцией $m_j = \pm 1/2$ и протонным спином $I = 1/2$ с проекцией $m_I = \pm 1/2$. Полный спин атома, равный сумме электронного и протонного спина $\vec{F} = \vec{S} + \vec{I}$, имеет проекции $m_F = 0$ ($F = 0$) и $m_F = 0, \pm 1$ ($F = 1$). В отсутствии внешнего магнитного поля энергетическая разность между уровнями $F = 0$ и $F = 1$ составляет $\Delta W = h \times 1420.4$ МГц [22].

Согласно эффекту Зеемана во внешнем магнитном поле в результате воздействия на магнитный момент атома уровень с $F = 1$ расщепляется, как показано на Рис. 4. Выражение для энергии тонкого расщепления выглядит следующим образом:

$$W = -\frac{\Delta W}{2(2I+1)} + g_I \mu_B m_F B_c \chi + (-1)^{F+1} \frac{\Delta W}{2} \sqrt{1 + \frac{4m_F}{2I+1} \chi + \chi^2}, \quad (3)$$

где $\chi = B/B_c$ – отношение величины внешнего магнитного поля к «критическому», в единицах которого чаще всего выражают энергию расщепления. Эта величина определяется так:

$$B_c = \frac{\Delta W}{(g_I - g_j) \mu_B}, \quad (4)$$

где $g_I = -3.04 \times 10^{-3}$, $g_j = 2.002$ – соответственно g -фактор протона и электрона в единицах магнетона Бора $\mu_B = -0.927 \cdot 10^{-20}$ эрг/Гс.

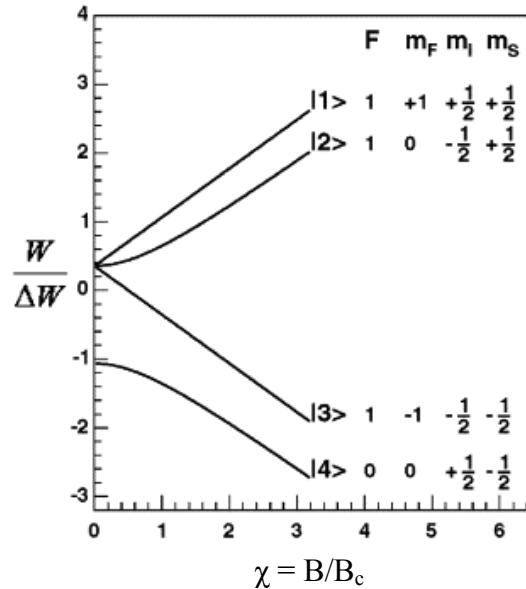


Рис. 4. Диаграмма энергетических уровней атома водорода в магнитном поле B , выраженная в единицах «критического» поля ($B_c^H = 507$ Г). Энергия измерена в единицах ΔW

Состояния водорода $|1\rangle$ и $|3\rangle$ являются «чистыми», т.е. их поляризация не зависит от величины внешнего магнитного поля. Атомы, находящиеся в состояниях $|2\rangle$

и $|4\rangle$ могут изменять величину своей поляризации. В этих состояниях спины протона и электрона направлены противоположно и в сильных полях следуют направлению поля, но, как только величина поля снижается ниже критической (B_c), магнитные моменты начинают прецессировать друг относительно друга. В слабых магнитных полях или в их отсутствии средняя по времени поляризация состояний $|2\rangle$ и $|4\rangle$ будет стремиться к нулю, как показано на Рис. 5.

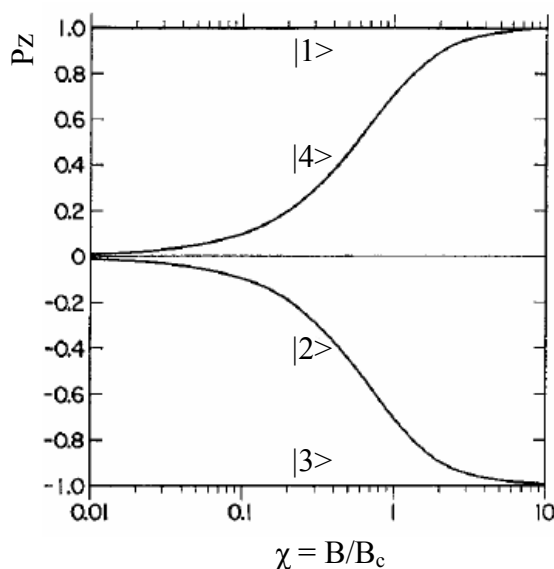


Рис. 5. Ядерная поляризация уровней сверхтонкого расщепления атома водорода, как функция внешнего магнитного поля

Таким образом, для создания атомарного пучка с определенной поляризацией, необходимо произвести отбор из всех возможных сверхтонких состояний только тех, которые имеют данную поляризацию.

Находясь в основных состояниях, атомы газа попадают в систему формирования пучка. Эта короткая область (на Рис. 1 она обозначена цифрой 1) обладает усложненной газовой динамикой из-за одновременных эффектов расширения, быстрого изменения средней длины пробега, а также столкновения между атомами и молекулами. Проходя через охлажденное алюминиевое сопло, температура которого стабилизируется в интервале $60 \div 80$ К, сформировавшийся пучок дополнительно обрезается скиммером и коллиматором. Газ, попадающий в секступольные магниты, имеет довольно широкое распределение по скоростям, которое зависит от температуры алюминиевого сопла. Изменение температуры позволит подобрать параметры пучка, соответствующие пропускной способности магнитов, которая определяется их свойствами и конструкцией. Дополнительная настройка фокусировки возможна путем взаимного перемещения секступольных магнитов друг относительно друга вдоль оси источника.

После формирования, пучок попадает в магнитную систему источника, где происходит разделение атомов по ориентации электронного спина. Таким образом, состояния с разными проекциями электронного спина пространственно разделяются в сильном неоднородном магнитном поле. В результате на атомы, находящиеся в состояниях $|3\rangle$ и $|4\rangle$, электронный спин которых равен $m_j = -1/2$, действует сила, направленная от центра оси источника. Они выбывают из формирования пучка и откачиваются вакуумными насосами в соответствующих секциях источника. На оставшиеся атомы с компонентой $m_j = 1/2$ (состояния $|1\rangle$ и $|2\rangle$) действует сила, направленная к оси источника. Т.о. правильно подобранные магнитные поля позволят получить хорошо сфокусированный пучок на выходе из источника.

Для создания векторной или тензорной, в случае использования дейтерия, поляризации, т.е. создания определенной заселенности уровней сверхтонкого расщепления, применяется техника возбуждения переходов в радиочастотных полях [23]. Суть этой методики заключается в следующем. При прохождении пучка атомов через область магнитного поля и радиочастотного поля с частотой, соответствующей энергии перехода между уровнями сверхтонкого расщепления, возбуждаются переходы между заданными уровнями. Поскольку эти переходы двунаправлены, необходимо исключить возможность обратных (индуцированных) переходов, приводящих к уменьшению поляризации пучка. Эта цель достигается при индуцировании переходов в градиентном магнитном поле. При этом для атома, движущегося в таком поле, условия для перехода складываются лишь в ограниченной области пространства, где частота соответствует величине магнитного поля для данного перехода. Важно, что при движении атома в этой области взаимодействие с фотоном было однократным. Это достигается выбором амплитуды высокочастотного поля, определяющей плотность фотонов, и величиной градиента магнитного поля для данной скорости атомов.

Источники поляризованных атомарных пучков широко применяются в качестве внутренних газовых мишеней на ускорителях заряженных частиц по всему миру. Типичными параметрами PABS, на сегодняшний день, являются: интенсивность пучка $\sim 5 \cdot 10^{16}$ ат/с и поляризация 90 % и более. При использовании PABS в качестве струйной мишени ее эффективная плотность составит $\sim 5 \cdot 10^{11}$ ат/см². В случае инъекции пучка поляризованных атомов ABS в накопительную ячейку можно добиться увеличения плотности мишени на два порядка по сравнению с газовой струей [1], [24].

1.3. Сравнение источников поляризованных атомов

На сегодняшний день существует несколько источников поляризованных атомарных пучков, участвующих в физических экспериментах на ускорителях по всему миру. Все они появились сравнительно недавно, во второй половине прошлого века, и развивались параллельно друг другу, поэтому для более удобного рассмотрения параметров ABS они были объединены в одну таблицу (Табл. 1). Все источники используют сходные принципы получения поляризации и конструктивно похожи. Однако, каждый из них уникален тем, что создавался для решения сугубо определенных физических задач на разных ускорителях. Сравнивая источники поляризованных атомов надо обязательно учитывать особенности эксперимента, в котором предполагалось его использование. Особенно важно учесть внешние факторы, такие, как магнитное поле или ограничение в размерах установки, что делает каждый из источников уникальным.

Табл. 1.
Сравнительные характеристики PABS

Ускоритель			Эксперимент	Тип газа	Интенсивность, 10^{16} ат/с	Поляризация
Название	Сорт частиц	Энергия, ГэВ				
COSY	$p, \vec{p}, d, \vec{d}$	0.5 – 3.0	ANKE [25]	Водород	7.5	0.89
				Дейтерий	4	0.89
NIKHEF	$e^{+/-}$	0.25 – 0.9	AmPs [26][8]	Водород	7.6	0.58
				Дейтерий	4.5	0.78
MIT	$e^{+/-}$	0.3 – 1.0	BLAST [27]	Водород	7.6	0.37
				Дейтерий	4.5	-
IUCF-Cooler	$p, \vec{p}$	0.1 – 0.5	PINTEX [28]	Водород	6.7	0.80
				Дейтерий	-	-
Heidelberg	α, p	0.023 – 0.1	FILTEX [29]	Водород	8.1	0.45
				Дейтерий	-	-
HERA	$e^{+/-}$	27.5	HERMES [30]	Водород	6.5	0.88
				Дейтерий	5.2	0.84
ВЭПП-3	$e^{+/-}$	0.3 – 2.0	ДЕЙТРОН [8]	Водород	7.9	-
				Дейтерий	8.2	0.397
RHIC	p	100 – 250	RHIC-ABS [31]	Водород	12.5	0.92

Из приведенной таблицы видно, что средняя интенсивность источников для неполяризованного атомарного водородного пучка находится в пределах $7 \div 8 \cdot 10^{16}$ ат/с, что на данный момент является пределом для источников газовых атомарных пучков. Исключение составляет источник RHIC–ABS [31], который изначально создавался только для работы как струйная мишень. Размеры пучка линейного коллайдера RHIC в районе установки мишени в несколько раз меньше, по сравнению с размерами пучков в накопительных кольцах ускорителей, и составляют $\sigma_{RHIC} \sim 1\text{ мм}$. Следовательно, подход к фокусированию атомов пучка в источнике RHIC совершенно иной, по сравнению с остальными мишенями. В данном случае, угол схождения пучка может быть больше, чем у источников с накопительной ячейкой, что обязательно сказывается на размерах пучка ABS в точке пересечения с пучком. Так, например, для источника в эксперименте RHIC размер пучка $\sigma_{ABS_RHIC} \sim 1.9\text{ мм}$, а для эксперимента ANKE – $\sigma_{ABS_ANKE} \sim 2.85\text{ мм}$.

Более важным параметром, характеризующим источник атомарных пучков, является поляризация создаваемого пучка. Как видно из Табл. 1, почти все источники позволяют получить 90 %-ную поляризацию водородного пучка. Эта цифра определяется несколькими параметрами. Выделим наиболее важные из них:

- производительность диссоциатора. Она никогда не достигает 100 %. В оптимальных условиях около 90 % молекул диссоциируют на атомы;
- не полная сепарация атомов магнитной системой и недостаточная откачка в области первой группы секступольных магнитов;
- не 100 % эффективность блоков сверхтонких переходов. Для различных блоков и переходов она отличается, но в среднем ее вклад в общую деполяризацию не превышает 5 %;
- из-за рекомбинации атомов на стенках при использовании накопительной ячейки наблюдается снижение поляризации, которое можно удерживать на уровне $3 \div 5$ %, применяя современные материалы с низким коэффициентом поверхностной рекомбинации [33].

Кроме перечисленных причин уменьшения поляризации создаваемой мишени существуют и другие, вклад от которых гораздо меньше. Также существует возможность временной нестабильности функционирования определенных блоков источника (например, обмерзание и закупоривание сопла, которое может быть решено регенерацией – нагревом до комнатной температуры с последующим охлаждением до

рабочей температуры). Поэтому при создании источников важное внимание уделяют каждому блоку источника в отдельности.

Сравнивая существующие эксперименты с газовыми мишенями на ускорителях заряженных частиц, можно выделить два – ANKE и PINTEX, расположенные на протонных накопительных кольцах. Второй эксперимент был завершен в 90^х годах и на данный момент существует только одна возможность для проведения двойного поляризационного эксперимента по развалу дейтрона в диапазоне энергий около 1 ГэВ. Эта область интересна тем, что одна из поляризационных наблюдаемых – векторная анализирующая способность A_y при энергии поляризованного протонного пучка 500 МэВ достаточно велика, а при 800 МэВ она близка к нулю.

Плотность поляризованной водородной струйной мишени ANKE-ABS достигает значения $\sim 5 \cdot 10^{11}$ ат/см², поэтому было решено создать накопительную ячейку, которая позволит добиться более высокой плотности мишени.

Глава 2.

Внутренние газовые мишени для ускорителей заряженных частиц

2.1. Введение

В середине прошлого века появление накопительных колец с циркулирующими пучками заряженных частиц поставило задачу создания совершенно нового типа мишеней – внутренних. Такое название они получили из-за своего расположения, т.к. пучки, циркулирующие в ускорителях, а также сами накопительные кольца называются внутренними. Время жизни внутреннего пучка может варьироваться от минут до нескольких дней. Одним из факторов, определяющим время жизни пучка, является уровень откачки в накопительном кольце. Сверхвысокий вакуум в ускорительном кольце является одним из важных требований ко всем установкам на ускорителе.

Несмотря на малую плотность мишени необходимо обеспечить высокую светимость в экспериментах на внутренних кольцах ускорителя. Это может достигаться за счет многократного прохождения пучка сквозь мишень. Светимость определяется по формуле

$$\mathcal{L} = n_{beam} \cdot f \cdot n_{target}, \quad (5)$$

где n_{beam} – наполнение кольца [частиц], f – частота обращения [Гц] и n_{target} – эффективная плотность мишени [ат/см²].

Особый интерес из-за низкого радиационного повреждения мишени, однородности материала (газа), высокого коэффициента поляризации и быстрого изменения знака поляризации представляют газовые водородные или дейтериевые мишени. При этом на суммарную плотность мишени накладываются противоречивые требования:

- мишень должна быть достаточно плотной, чтобы обеспечить высокую светимость эксперимента;
- мишень должна быть достаточно разреженной, чтобы загрузка детекторов не превышала допустимых пределов;

- мишень не должна ухудшать вакуумные условия в накопительном кольце и снижать время жизни пучка из-за рассеяния на остаточном газе.

2.2. Струйные мишени

В настоящий момент существует несколько типов газовых водородно-дейтериевых мишеней, используемых на внутренних пучках ускорителей заряженных частиц. Наиболее просты в использовании – струйные мишени (Рис. 6). С помощью сопла и системы коллиматоров с дифференциальной откачкой в источнике формируется достаточно плотный поток нейтральных частиц со сравнительно узким угловым распределением. Струя пересекает ускорительный пучок в накопительном кольце под углом 90 градусов (или меньшим – для увеличения суммарной плотности мишени) и попадает в ловушку, где и откачивается. Такая мишень может иметь сравнительно небольшие размеры вдоль пучка заряженных частиц. Из-за хорошей коллимации струи загрязнение ускорительного вакуума частицами мишени минимально. Тем не менее, плотность мишени чаще всего находится в пределах $10^{10} \div 10^{11}$ ат/см², что является сравнительно низкой величиной.

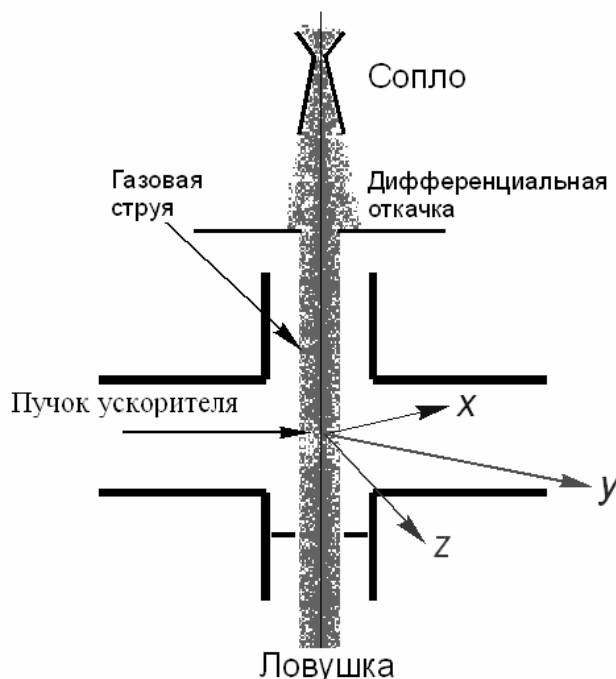


Рис. 6. Принципиальная схема струйной мишени

Анализирующая способность и поперечное сечение взаимодействия двух протонов малы, поэтому необходимо, чтобы вертикальная поляризация и плотность мишени были максимальными. Ширина струи газовой мишени в области пересечения с

пучком ускорителя должна быть минимальной, и атомы должны пересекать циркулирующий пучок, не создавая большой нагрузки на систему откачки ускорительного кольца. В случае использования ANKE-ABS в качестве внутренней газовой поляризованной мишени струйного типа, а также использованием криогенной ловушки в вакуумной камере ускорителя была измерена интегральная плотность мишени, которая составила $\sim 1.6 \cdot 10^{11}$ ат/см² [25] и, принимая во внимание интенсивность протонного пучка, достигнутую во время этого экспериментов на накопительном кольце COSY, светимость в эксперименте может составлять $\mathcal{L} \sim 6.0 \cdot 10^{27}$ см⁻²·с⁻¹ (подробнее об этом описано в главе 5.3).

2.3. Мишени с использованием накопительных ячеек

Увеличение плотности газовой мишени может быть достигнуто за счет использования накопительной ячейки. Это позволит повысить плотность мишени примерно на два порядка по сравнению с простой газовой струей. Предложение использовать такую ячейку, в качестве внутренней мишени, было выдвинуто Уильямом Хаберли в работе [24]. Идея накопительной ячейки состоит том, что на пути пучка ускорителя заряженных частиц располагается Т-образная трубка (Рис. 7), в которую попадает параллельный поток атомов из источника PABS.

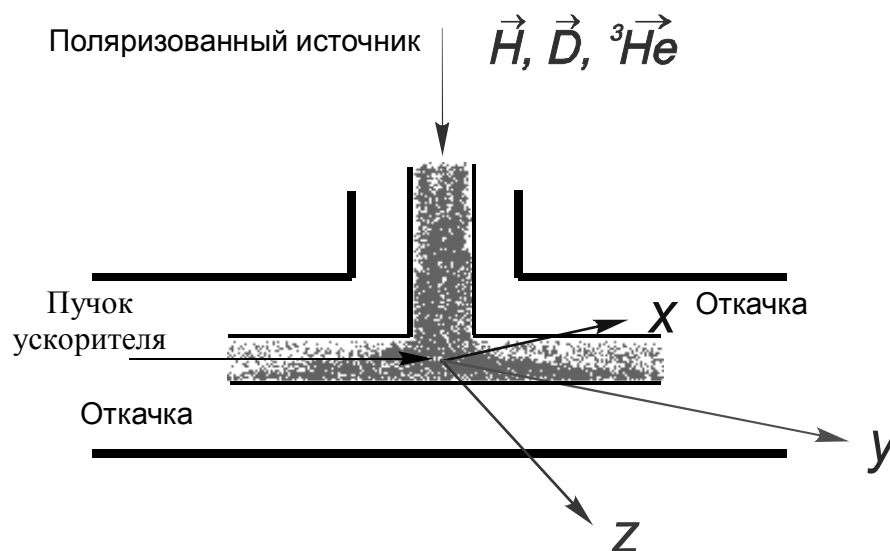


Рис. 7. Накопительная ячейка для поляризованного источника

Рассеиваясь в центре сопряжения трубок накопительной ячейки, газ растекается в трех направлениях. При этом в центре плотность газа максимальна и уменьшается по мере приближения к краям трубки. Таким образом, плотность мишени вдоль пучка ускорителя является интегралом плотности газа в ускорительной трубке накопительной

ячейки и заметно увеличивается по сравнению с простой газовой струей. Важно отметить, что при высоких энергиях вторичные частицы вылетают, как правило, под малыми углами и не касаются стенок накопительной ячейки, что заметно облегчает процесс анализа данных.

Для определения плотности газа в накопительной ячейке можно предположить, что давление вне ячейки равно нулю. В действительности, в центре ячейки давление колеблется от 10^{-3} до 10^{-4} мбар, а снаружи оно определяется вакуумом накопительного кольца, верхним пределом которого является 10^{-6} мбар в районе мишени. Таким образом, предположение, что внешнее давление очень низкое, не сильно влияет на величину плотности мишени, получающейся в результате следующих вычислений.

Поток частиц во входную трубку накопительной ячейки I [ат/с] растекается из центра ячейки в обоих направлениях. Объемный поток выражается формулой:

$$Q_v = RT \frac{M}{\mu} I, \quad (6)$$

где M – молекулярная масса (для молекулярного водорода $2 \times 1.61 \cdot 10^{-27}$ кг), μ – молярная масса [кг/моль], R – газовая постоянная, T – температура газовой ячейки.

Считается, что газ термализован уже при входе в ячейку. Проводимость цилиндрического участка трубки при свободномолекулярном течении газа (длина свободного пробега молекул много больше характерных размеров системы) можно представить как

$$U = 3.81 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{D^3}{L}, \quad (7)$$

где D – диаметр трубки [мм], L – длина трубки [мм].

После того, как атом газа достигает поверхности накопительной ячейки, он «забывает» о направлении своего движения до столкновения и дальнейшее направление его движения равновероятно. Поэтому использование прямоугольной трубки с острыми углами значительно увеличит количество столкновений атома со стенками ячейки в углах, а значит, повысит вероятность деполяризации. Следовательно, накопительная ячейка должна состоять из трубок более сложной формы. Одним из приемлемых вариантов является прямоугольник со скругленными углами. Для такой формы трубки формула (7) приобретет вид:

$$U = 2.85 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{D^3}{D + 0.75L}, \quad (8)$$

Три плеча газовой ячейки соединены параллельно для газового потока из центра ячейки, значит давление в этой точке мишени можно выразить следующим образом:

$$P_{\max} = \frac{Q_V}{U_{total}} = 35.08 \cdot R \sqrt{T \cdot M^3} \cdot I \cdot \frac{D + 0.75L}{D^3}, \quad (9)$$

Поскольку проводимость для свободномолекулярного течения газа обратно пропорциональна длине цилиндрического трубопровода, давление в накопительной ячейке линейно уменьшается от $P_{\max}$ в центре до нуля по краям (Рис. 8):

$$P(x) = P_{\max} \left| 1 - \frac{2x}{L} \right|, \quad (10)$$

где x принимает значение нуля в центре накопительной ячейки и $L/2$ на ее краях.

Плотность в каждом сечении, перпендикулярном оси, считается однородной, т.к. длина ячейки существенно превышает диаметр, поэтому она может быть выражена следующим образом:

$$n(x) = \frac{P(x)}{kT} = \frac{P_{\max}}{kT} \left| 1 - \frac{2x}{L} \right|, \quad (11)$$

Суммарная линейная плотность мишени [ат/см²] вдоль пучка определяется как

$$n_{lin} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} n(x) dx = \frac{P_{\max} L}{2kT} = 17.54 \cdot \frac{R}{k} \sqrt{\frac{M^3}{T}} \cdot I \cdot \frac{(D + 0.75L)L}{D^3}, \quad (12)$$

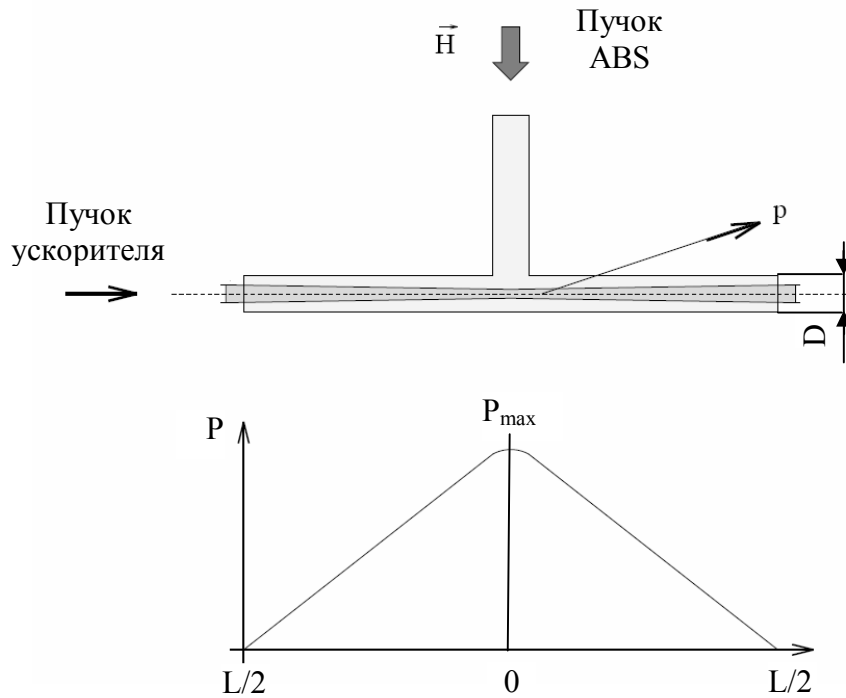


Рис. 8. Распределение давления в накопительной ячейке

Из выражения (12) видно, что наибольшее влияние на плотность мишени оказывает диаметр накопительной ячейки ($n_{lin} \propto D^{-3}$), поэтому его стремятся сделать минимальным. Диаметр накопительной ячейки определяется, как правило, диаметром пучка ускорителя, размеры которого не одинаковы на разных стадиях формирования пучка. В момент инжекции он имеет размеры больше, чем в режиме накопления, и его орбита может быть неустойчивой. Именно это и определяет предельные размеры поперечного сечения трубки накопительной ячейки. Длина L определяется возможностями разрешения детектирующей системы. Зависимость от температуры достаточно слабая – $n_{lin} \propto T^{-1/2}$, но она может позволить увеличить плотность мишени, без изменения линейных размеров, путем перехода в криогенные области температур.

Первая в мире накопительная ячейка была установлена на ускорителе ВЭПП-3 (Новосибирск, Россия) [8]. Размеры трубки вдоль пучка ускорителя составляли 940 мм и в поперечном сечении 24 x 46 мм². Выбранные размеры позволяли не уменьшить интенсивность электронного пучка ускорителя в момент инжекции. Первый эксперимент проводился без охлаждения накопительной ячейки и с достаточно большими поперечными размерами было достигнуто увеличение плотности мишени в 15 раз, по сравнению со струйной. Тензорная поляризация газовой мишени с накопительной ячейкой была ниже, чем без нее ($P_{zz} = 0.58 \pm 0.05$ по сравнению с $P_{zz} > 0.9$), но на протяжении всего времени измерений была постоянной.

На сегодняшний день техника охлаждения, фокусирования и проведения пучков ускорителей через накопительную ячейку достигла рекордных высот и становится возможным сделать намного более плотную мишень, сохранив при этом маленькие размеры трубок. Самая маленькая накопительная ячейка, круглое поперечное сечение которой было 8 мм в диаметре (Табл. 13), использовалась для экспериментов на ускорителе IUCF, а созданная нами накопительная ячейка, для одного из сеансов с неполяризованным протонным пучком накопительного кольца COSY, имела следующие размеры: $L = 390$ мм, $H = 20$ мм, $W = 20$ мм, $R = 2$ мм, $T = 300$ К. Подставив их в выражение (12) и взяв максимальную интенсивность источника атомарного пучка водорода из ABS $I = (7.5 \pm 0.2) \cdot 10^{16}$ ат/с, можно оценить эффективную плотность мишени. С учетом возможных механических деформаций линейная плотность мишени должна быть $(1.9 \pm 0.1) \cdot 10^{13}$ ат/см². В результате анализа данных реакции $pp \rightarrow d\pi^+$, полученная плотность мишени хорошо соотносилась с расчетной и составила $(2.1 \pm 0.1) \cdot 10^{13}$ ат/см².

Среднее значение степени диссоциации пучка ABS, измеренной в плоскости компрессионной трубки, составляет $\alpha = 0.82$. При использовании накопительной ячейки в качестве мишени, потоком H_2 , определяемым отношением телесных углов¹³ ($\Omega_{CT}/4\pi$), можно пренебречь. Поэтому, принимая во внимание тот факт, что распределение плотности молекулярного водорода изотропно, то плотность молекулярного водорода будет определяться, в основном, рекомбинацией атомов на поверхности трубки. Использование современных материалов с низким коэффициентом поверхностной рекомбинации, таких как политетрафторэтилен¹⁴ или «Drifilm», позволяет достичь значений степени диссоциации внутри накопительной ячейки $\alpha = 0.95 \div 0.97$ [33]. Интенсивность ускоренного протонного пучка в накопительном кольце COSY составляет $\sim 2 \cdot 10^{12}$ частиц/с [34]. Интенсивность поляризованного пучка, однократно инжектируемого в ускоритель, на один порядок ниже интенсивности неполяризованного, поэтому, при проведении предварительных тестов с неполяризованными пучками, будет необходимо имитировать интенсивность поляризованного пучка с помощью технологии «micropulsing» – обрезание части пучка, инжектируемого в ускоритель. Применение накопительной ячейки позволит обеспечить светимость эксперимента на уровне $\mathcal{L} \sim 10^{29} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [35].

¹³ Здесь Ω_{CT} – телесный угол, определяемый площадью сечения вертикальной трубки накопительной ячейки.

¹⁴ Одним из самых известных политетрафторэтиленов (PTFE) является Тефлон.

Глава 3.

Поляризованная внутренняя газовая мишень для эксперимента ANKE

3.1. Ускоритель COSY

3.1.1 Краткое описание ускорителя COSY

Ускоритель COSY, расположенный в научно-исследовательском центре (Юлих, Германия), представляет собой накопительное кольцо (Рис. 9) с возможностью создания поляризованных и неполяризованных протонных и дейтронных пучков средней энергии. Для протонного пучка импульсы ускоренных частиц находятся в пределах $600 \div 3700$ МэВ/с, что соответствует диапазону энергий $175 \div 2880$ МэВ.

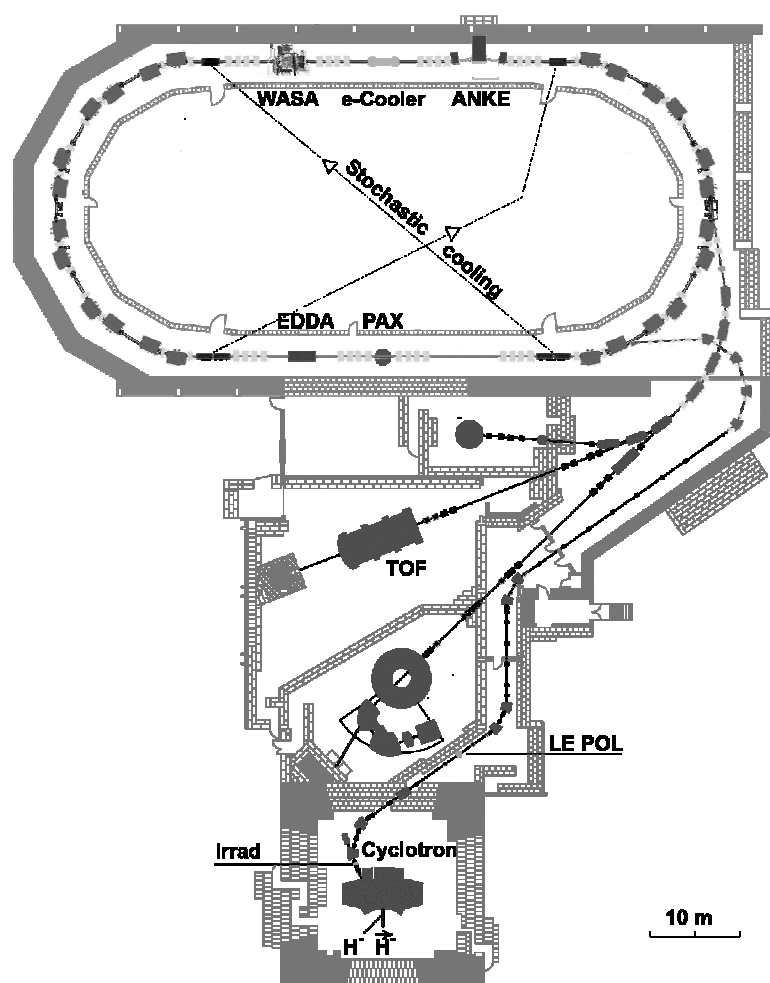


Рис. 9. План ускорителя COSY

На начальном этапе работы ускорителя, заряженные частицы с низкой энергией (45 МэВ) инжектируются из циклотрона (на Рис. 9 он обозначен «cyclotron») во внутреннее кольцо ускорителя. После окончания процесса инжекции (при необходимости она может быть многократной) с помощью электрического поля частицы ускоряются до заданной энергии, а магнитное поле позволяет фокусировать и удерживать их в накопительном кольце. Ускоренный пучок может циркулировать в кольце или быть выведенным из него, поэтому выделяют два типа экспериментов, проводимых на COSY:

- внутренние – с циркулирующим пучком;
- внешние – с выведенным пучком.

3.1.2 Методы охлаждения пучков заряженных частиц

Основным понятием физики ускорителей является фазовое пространство – множество всех состояний системы в фиксированный момент времени. Каждому возможному состоянию системы соответствует точка в этом пространстве. Согласно теореме Лиувилля, функция распределения в фазовом пространстве постоянна вдоль траекторий системы. Беря в рассмотрение динамическую систему частиц с координатами q_i и импульсами p_i , где $i = 1, \dots, d$, можно утверждать, что распределение в фазовом пространстве $\rho(p, q)$ определяет вероятность обнаружения частицы в малом объеме $d^d q d^d p$. Таким образом, теорема Лиувилля может быть записана следующим образом:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^d \left(\frac{\partial \rho}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial \rho}{\partial p_i} \dot{p}_i \right) = 0, \quad (13)$$

где точками обозначены производные по времени, оцениваемые согласно уравнениям Гамильтона для системы.

Полное число частиц в системе определяется интегралом по всему фазовому пространству от функции распределения:

$$N = \int d^d q d^d p \rho(p, q) \quad (14)$$

Из выражения (13) становится ясно, что без дополнительного возмущения системы фазовый объем может только деформироваться, а пучок, соответственно, расширяться или сжиматься. При этом изменяются значения поперечного импульса частиц. Охлаждение пучка означает введение трения, уменьшающего разброс по импульсам, что в конечном итоге приведет к уменьшению его поперечного размера

(эмиттанса) и разброса частиц по продольному импульсу. Так фокусирующая система накопителя может эффективно сжать пучок.

Увеличение плотности ускорительного пучка в месте его взаимодействия с мишенью является одной из задач оптимизации использования ускорительного времени и обеспечения наибольшей светимости в экспериментах. Поэтому во время подготовки к экспериментам необходимо максимально точно фокусировать ускорительный пучок на мишени и уменьшать его поперечные размеры. Одним из способов увеличения интенсивности пучка является его «охлаждение». Под этим термином понимают понижение эффективной температуры пучка, т.е. уменьшение его эффективного размера и снижение разброса по импульсам. Существуют следующие методы¹⁵ охлаждения пучка заряженных частиц:

- электронное [36] – [38] (на этапе инжекции);
- стохастическое [39], [40] (после ускорения; импульс пучка должен превышать 1.5 ГэВ/с);
- лазерное [41] (не используется).

Метод электронного охлаждения был предложен Г.И. Будкером в работе [36] и в данный момент успешно применяется на ускорителях. Его идея состоит в том, что на прямом участке ускорительного кольца (на Рис. 9 эта секция обозначена «e-Cooler») параллельно протонному пучку по направлению его движения пропускается хорошо сфокусированный пучок электронов со средними скоростями, равными скоростям частиц основного пучка. Благодаря этому равенству, сечение взаимодействия электронов и ионов при кулоновских столкновениях резко возрастает. Это приводит к возникновению эффективного трения и быстрому их охлаждению пучка частиц. Медленные ионы «подхватываются» облаком электронов и ускоряются, а быстрые – тормозятся. В результате кулоновского взаимодействия, на общем участке траектории происходит «охлаждение» протонного пучка и «нагрев» электронного. Эта процедура может повторяться до того момента, пока температура протонов в системе центра масс не станет равной температуре электронов.

Вторым методом охлаждения пучка заряженных частиц на ускорителе COSY является стохастическое охлаждение, предложенное С. Ван Дер Меером [40] и применяемое к ускоренным в накопительном кольце частицам. Суть этого метода состоит в корректировке орбит частиц, отклонившихся от идеальной траектории пучка. При прохождении группы частиц через детектор (Рис. 10) определяется их среднее

¹⁵ В скобках указаны режимы, при которых применяется тот или иной метод на ускорителе COSY.

отклонение от центра масс пучка. Выработываемый сигнал корректировки передается по диагонали исполняющему устройству – корректору. Конечно, траектория случайно взятой частицы может становиться хуже, но общая температура этой группы станет ниже. Эффективность такого охлаждения очень быстро падает с увеличением количества частиц в ускорителе, но очень слабо зависит от энергии частиц.

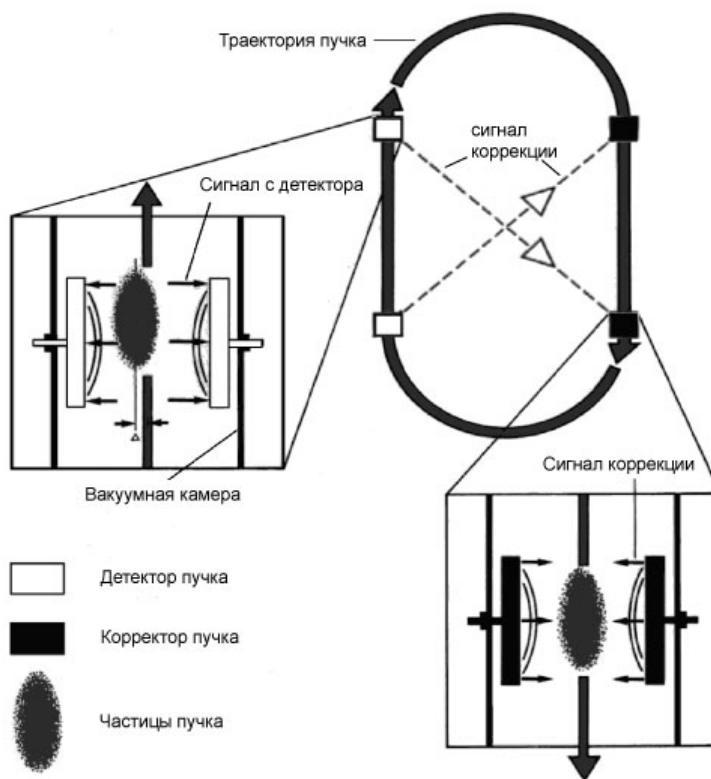


Рис. 10. Упрощенная схема работы стохастического охлаждения на ускорителе COSY

Последним из методов охлаждения ускорительного пучка является лазерное охлаждение [41]. Этот метод был предложен П. Шаннеллем в 1981г и основывается на эффекте Доплера. Охлаждаемая частица поглощает фотон из лазерного пучка, направленного вдоль пучка ускорителя и излучает его в своей системе изотропно. Средний по времени импульс направлен вдоль пучка ускорителя, что приводит к его охлаждению. Этот метод не используется на ускорителе COSY, потому что обладает следующими отрицательными сторонами:

- воздействие направлено на ту составляющую скорости частицы пучка, вдоль которой направлено лазерное излучение;
- применение ограничено несколькими сортами ионов, для которых есть лазеры с требуемыми длинами волн;
- метод эффективен только для пучков с низким разбросом по скоростям.

Использование стохастического и электронного охлаждения на ускорителе COSY (область их применения указана в Табл. 2) позволяет достигать высокоинтенсивных пучков заряженных частиц.

Табл. 2.

Характеристика методов охлаждения, применяемых на ускорителе COSY

Метод	Тип частиц	Время охлаждения ¹⁶ , с	Наиболее удобная начальная температура для охлаждения пучка	Рабочий диапазон энергий
Электронное охлаждение	$p, \vec{p}, d, \vec{d}$	$1 \div 10^{-2}$	низкая	до 100 МэВ
Стохастическое охлаждение	$p, \vec{p}, d, \vec{d}$	$N \cdot 10^{-8}$	высокая	от 1.5 ГэВ

3.1.3 Многократная инжекция

Охлаждение инжектированного и ускоренного пучка COSY не единственный способ повышения интенсивности. Совершенно иным методом является многократная инжекция, способная увеличить количество заряженных частиц, циркулирующих в накопительном кольце. До начала ускорения можно произвести дополнительные инжекции частиц в ускоритель с небольшими интервалами, используемыми для электронного охлаждения.

Количество инжектируемых в накопительное кольцо частиц, при работе с неразрушающими пучок мишенями в эксперименте ANKE, достигает предела после первой инжекции. Многократная инжекция не увеличит число частиц, а лишь компенсирует их потери за время, потраченное на электронное охлаждение пучка. Поэтому необходимость в повторной инжекции возникает только при работе с накопительной ячейкой и обусловлена тем, что часть пучка вместе с гало задевает стенки мишени и выбывает из дальнейшего формирования пучка. Целесообразность использования такого метода для повышения интенсивности пучка наглядно проиллюстрирована на Рис. 11.

В результате использования многократной инжекции количество накапливаемых в ускорителе частиц может быть увеличено на порядок, по сравнению с однократной

¹⁶ N – количество частиц, циркулирующих в накопительном кольце ускорителя.

инжекцией. В примере, изображенном на Рис. 11, процесс инжекции, занимавший одну минуту, можно разделить на два этапа:

- накопление (первые 20 инъекций, т.е. около 40 секунд);
- насыщение (потери на стенках мишени становятся эквивалентны добавляемому количеству частиц).

Очевидно, что в данном эксперименте для более эффективного использования ускорительного времени необходимо прекращать процесс накопления частиц в ускорителе и переходить к их ускорению до энергии эксперимента после первых 20-ти инъекций.

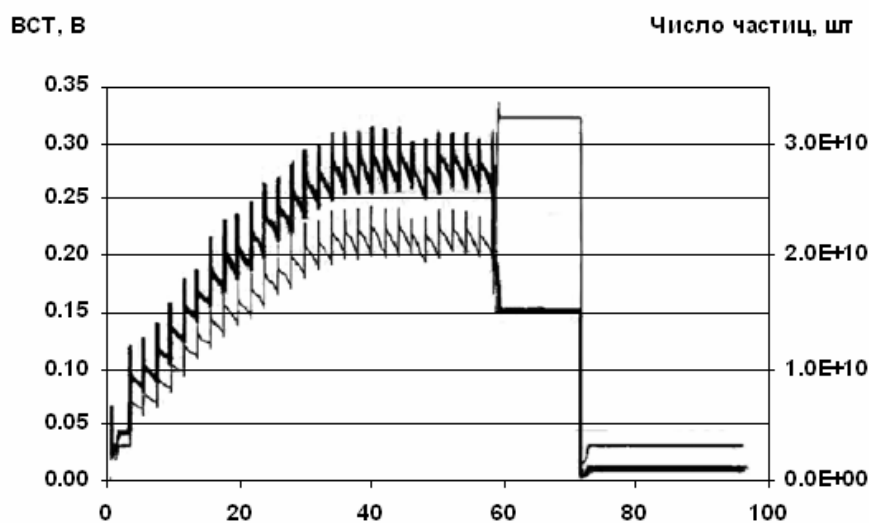


Рис. 11. Пример многократной инжекции с последующим ускорением до энергии эксперимента. 28 инъекций с интервалом в 2 секунды для электронного охлаждения. Жирной линией отмечено количество частиц в накопительном кольце, тонкой – напряжение на выходе преобразователя числа частиц в COSY

Плохая согласованность изменения магнитного поля в момент увеличения частоты обращения может приводить к резкому снижению количества частиц в накопительном кольце. Это хорошо заметно на Рис. 11 (жирная кривая) – в момент ускорения интенсивность снижается в два раза. Дальнейшая оптимизация проведения пучка может проводиться до достижения равенства количества частиц по окончании инжекции с количеством частиц, ускоренных в кольце.

Продолжительность этапа инжекции необходимо выбирать с учетом плотности используемой мишени. Если поперечное сечение накопительной ячейки мало по сравнению с размерами пучка ускорителя, как в случае Рис. 11, то насыщение частицами внутреннего кольца ускорителя будет явно выражено после нескольких десятков инъекций. В противном случае, интенсивность пучка будет медленно расти, но при малом времени жизни пучка, вызванным с высокой плотностью мишени,

эффективная длительность рабочего цикла будет низкая. Поэтому выбор оптимальной продолжительности инжекции должен основаться на поддержании высокой светимости в эксперименте.

3.2. Эксперимент ANKE

В одной из прямых секций внутреннего кольца ускорителя COSY (Рис. 9) расположен магнитный спектрометр ANKE (Рис. 12). Он включает в себя три магнита:

- D1 и D3, изменяющие траекторию пучка ускорителя, отклоняя его на определенный угол от 0° до 10.6° ;
- D2 – главный спектрометрический магнит.

Благодаря гибким тарельчатым сильфонам большого внутреннего диаметра камера для установки мишеней также может сдвигаться вместе с основным магнитом, вокруг которого размещена система детекторов.

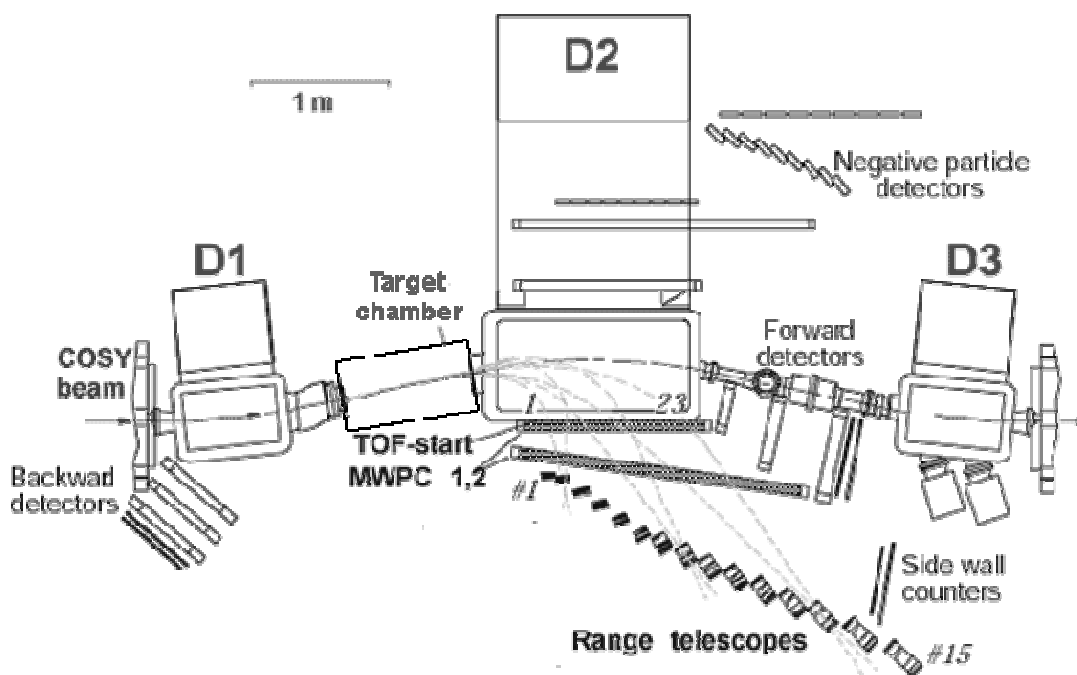


Рис. 12. Спектрометр ANKE

Многообразие экспериментов, проводимых на спектрометре ANKE, предполагает наличие большого набора различных мишеней при одной и той же системе детекторов. Для этого была создана и установлена специальная вакуумная камера (Рис. 13) с возможностью размещения:

- поляризованной газовой струйной мишени;
- поляризованной газовой мишени с накопительной ячейкой;
- неполяризованной газовой мишени с накопительной ячейкой;

- кластерной мишени [42], [43];
- пленочной мишени [44], [45].

Основными элементами, входящими в состав внутренней поляризованной газовой мишени в эксперименте ANKE, являются:

- источник ANKE-ABS, производящий пучок поляризованных атомов водорода или дейтерия с интенсивностью $7.8 \cdot 10^{16}$ ат/с [46] для двух сверхтонких состояний водорода и возможной ядерной поляризацией атомарного пучка водорода $P_z = +0.89 \pm 0.01$ и $P_z = -0.96 \pm 0.01$;
- вакуумная камера с большим количеством фланцевых соединений в стандарте UHV¹⁷, позволяющая размещать мишени, кремниевые детекторы, системы перемещения ячейки, вакуумные элементы, криопоглотители и т.д.;
- накопительная ячейка, устанавливаемая в вакуумную камеру, позволяющая на два порядка увеличить плотность газовой мишени по сравнению со струйной газовой мишенью. В зависимости от материала ячейки получаемая поляризация может изменяться за счет столкновений атомов со стенками мишени;
- устройство, измеряющее поляризацию – поляриметр, работающий на эффекте лэмбовского сдвига (LSP) [47], который позволяет оперативно измерять поляризацию газа мишени.

¹⁷ Ultra High Vacuum.

Глава 4.

Подготовка к экспериментам на ускорителе COSY

4.1. Измерение профиля пучка COSY

Создание газовой мишени с использованием накопительной ячейки требует проведения измерений, направленных на определение профиля ускорительного пучка в районе установки мишени. Это позволит оценить минимальные размеры ячейки без потери интенсивности пучка ускорителя. Из формулы (12) видно, что зависимость плотности мишени от поперечных размеров трубок накопительной ячейки кубическая. Принимая во внимание, что распределение плотности пучка ускорителя зависит от расстояния, как функция гаусса, можно найти оптимальные размеры мишени при которых снижение интенсивности пучка в момент инжекции будет восполняться более высокой плотностью и светимость эксперимента будет оставаться на том же уровне.

4.1.1 Описание измерительной установки

Максимальную светимость при использовании газовой поляризованной мишени с накопительной ячейкой в эксперименте ANKE можно достичь только после детальных измерений и оптимизации профилей обоих пучков: источника и ускорителя. Для измерения профиля пучка COSY в месте установки мишени была создана и использовалась в измерениях специальная система, размещенная на одном из боковых прямоугольных фланцев вакуумной камеры (Рис. 13). Эта установка состоит из двух координатных столов¹⁸, поддерживающих систему диафрагм разного внутреннего сечения (Рис. 14). Вакуумная изоляция выполнена с помощью гибкого тарельчатого сильфона, допускающего многократные деформации. В направлении, перпендикулярном ускорительному пучку, рамка может свободно передвигаться на расстояние 150 мм. Это позволяет выдвигать систему с траектории пучка, чтобы другие эксперименты могли продолжить работу без потери времени на демонтаж установки.

¹⁸ Требования к вакууму на ускорителе очень высокие (10^{-10} мбар), поэтому использовались координатные столы Vacuum Generators с медным вакуумным уплотнением (оборудованные модулями HPT Translator, MRXMOTX и MRXMOTZ, производитель Vacuum Generators Ltd, UK).

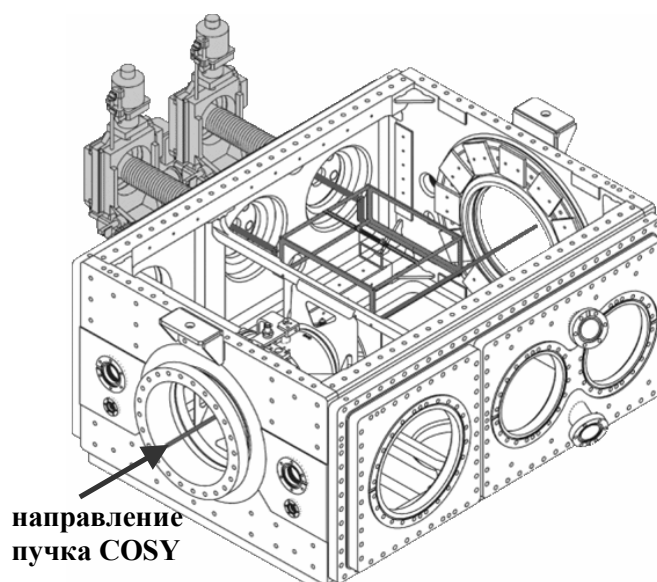


Рис. 13. Вакуумная камера ускорителя COSY для установки мишеней в эксперименте ANKE

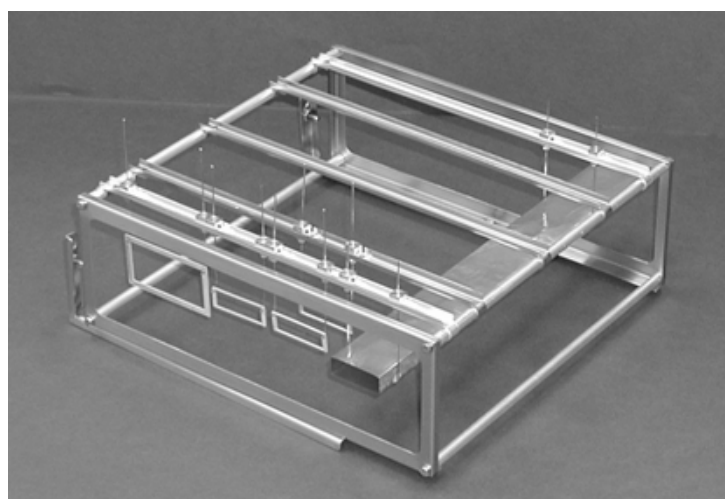


Рис. 14. Рамка с системой диафрагм. Слева – основная диафрагма ($50 \times 25 \text{ мм}^2$), правее – диафрагма с размерами $30 \times 10 \text{ мм}^2$, далее – две диафрагмы $30 \times 10 \text{ мм}^2$, расположенные одна за другой прототип накопительной ячейки с внутренним сечением $30 \times 10 \text{ мм}^2$

Основная диафрагма, использованная в измерениях (слева на Рис. 14), не должна препятствовать прохождению ускорительного пучка, проведенного через ее центр. Размеры этой диафрагмы заведомо превышали ожидаемый размер пучка ускорителя в месте установки мишени и составили 50 мм в горизонтальной плоскости и 25 мм в вертикальной. Правее основной была расположена диафрагма с меньшим внутренним сечением $30 \times 10 \text{ мм}$. Она позволила сделать качественную оценку возможностей ускорителя по проведению пучка в накопительную ячейку (справа на Рис. 14). Две размещенные друг за другом диафрагмы меньшего сечения помогали определить отклонение орбиты пучка ускорителя от идеальной и правильно расположить

протяженную накопительную ячейку в объеме вакуумной камеры. Материал используемых в измерениях диафрагм должен быть немагнитным, поэтому использовался алюминиевый профиль толщиной 1 мм.

Плавное передвижение рамки внутри камеры и точное определение координат обеспечивалось специальными прецизионными шаговыми двигателями¹⁹ с шагом 1.25 мкм и поступательным движением за полный оборот 0.25 мм. Каждый двигатель оснащен модулем²⁰, подключенным к системе управления по шине ProfiBUS²¹ DP. Дистанционное управление осуществлялось с помощью компьютера с программным обеспечением WinCC²². Принципиальная схема установки показана на Рис. 15.

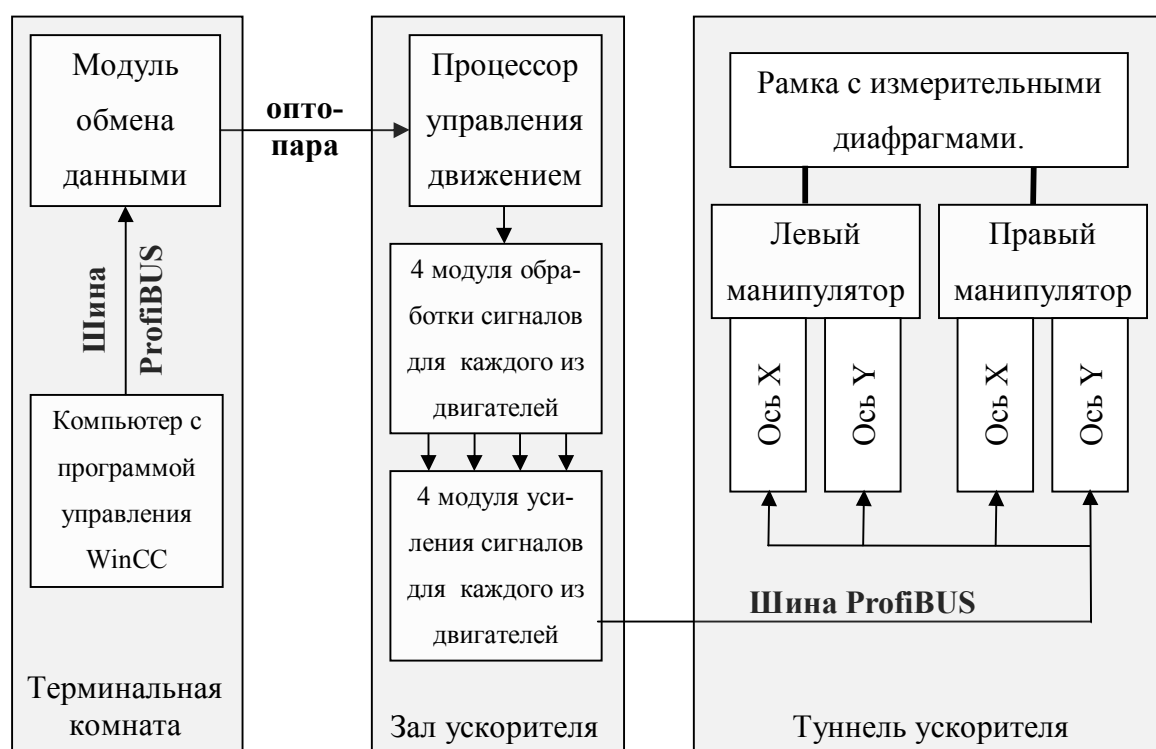


Рис. 15. Схема установки дистанционного управления перемещением рамки с диафрагмами

Из соображений безопасности, установка оснащена двумя датчиками крайнего положения, ограничивающими перемещение рамки с диафрагмами внутри вакуумной камеры. Отрегулированные определенным образом, они позволяют избежать повреждения вакуумного сильфона, а также устройств, размещенных в камере ускорителя. В одном из экспериментов, с использованием данной системы перемещения, с противоположной стороны вакуумной камеры была установлена

¹⁹ Производитель Mclellan Servo Supplies Ltd., United Kingdom.

²⁰ DP encoder. Производитель HEIDENHAIN, Germany.

²¹ Международный стандарт IEC 61158.

²² Программный комплекс SIEMENS для работы с системами управления модулями SIEMENS SIMATIC и создания графического интерфейса.

плёночная мишень, держатель которой находился внутри и мог быть поврежден, если рамка была вдвинута в камеру слишком глубоко.

Подготовка к эксперименту проводилась в камере, идентичной установленной на эксперименте ANKE. Была проведена юстировка относительного расположения измерительных диафрагм в рамке, изображенной на Рис. 14, с помощью лазера, имитировавшего прохождение пучка ускорителя через геометрический центр тестовой камеры. В ходе юстировки были определены координаты центров диафрагм и оптимизировано их взаимное расположение, что позволило максимально эффективно использовать пространство в поддерживающей рамке. Последующая подготовка включала в себя масс-спектрометрические тесты для определения чистоты установки, после которых она была установлена в камеру ускорителя эксперимента ANKE.

Во время сеанса использовался неполяризованный дейтронный пучок с энергией 2.1 ГэВ. Тесты проводились на разных этапах его формирования:

- во время инжекции пучка в ускоритель (45 МэВ);
- после ускорения до заданной энергии (2.1 ГэВ).

4.1.2 Измерение профиля пучка на этапе инжекции

На этапе инжекции центр пучка ускорителя проходил через центр основной измерительной диафрагмы. После окончания инжекции диафрагма смещалась на определенное расстояние от исходного положения, и фиксировалось количество частиц, оставшихся в ускорителе (Рис. 16). Для этого использовался преобразователь (ВСТ²³), конвертирующий величину тока пучка ускорителя в напряжение. Принципиальная схема преобразователя показана на Рис. 17



Рис. 16. Принцип измерения профиля пучка COSY

При прохождении пучка, на расположенную в вакуумной камере катушку индуцируется ток, который передается широкополосному усилителю, преобразуется в напряжение, и может быть измерен с помощью вольтметра. Зная частоту обращения

²³ Beam Current Transmitter.

пучка в накопительном кольце, можно конвертировать напряжение на выходе преобразователя в количество частиц в ускорителе по следующей формуле:

$$N = \frac{I}{f \cdot e}, \quad (15)$$

где N – количество частиц в ускорителе, I – ток на входе в измеритель (А), f – частота обращения частиц (Гц), e – элементарный заряд (Кл).

Ток на входе в измеритель получается из калибровки:

$$I = \frac{U_{BCT}}{100}, \quad (16)$$

где U_{BCT} – напряжение на выходе измерителя (В).

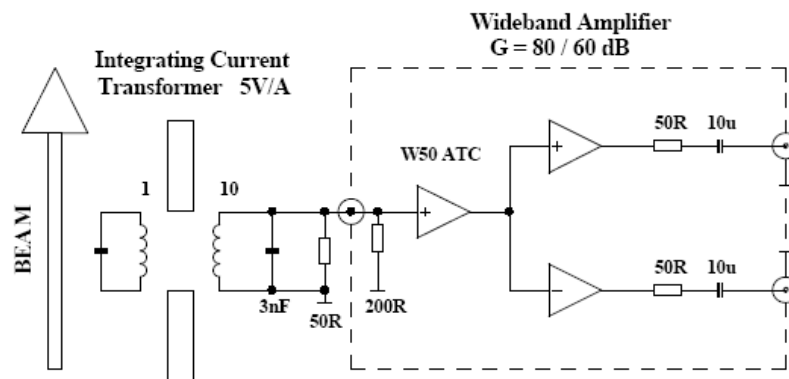


Рис. 17. Принципиальная схема измерителя тока пучка

Зависимость количества частиц в накопительном кольце от положения диафрагмы показана на Рис. 18. После окончания измерения, рамка возвращается в исходное положение, проводится следующая инжекция и рамка передвигается на новую позицию. При смещении диафрагмы часть частиц выбывает из накопительного кольца, а при полном перекрытии пучка частиц в накопительном кольце не остается (правое и левое положение диафрагмы на Рис. 18).

Сравнивая координаты положения диафрагмы в начале уменьшения числа частиц в накопительном кольце можно с уверенностью заявить, что в момент инжекции центр пучка находился не в центре диафрагмы, а был смещен с геометрического центра вакуумной камеры. Наши предположения о размере инжектируемого пучка, сделанные при выборе размеров измерительной диафрагмы, были верными, т.к. количество частиц в накопительном кольце в случае, когда система диафрагм выведена из пучка (верхняя горизонтальная линия на Рис. 18), и когда пучок проведен через центр диафрагмы, одинаково.

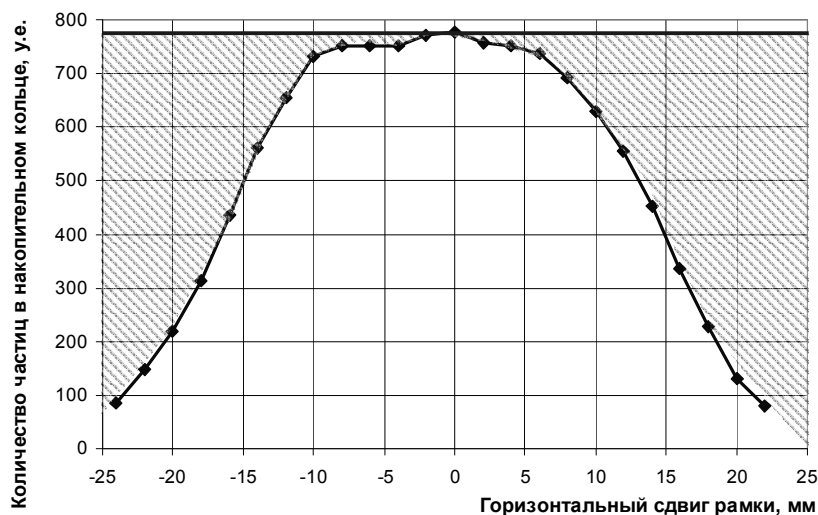


Рис. 18. Измерение числа частиц в накопительном кольце при горизонтальном перемещении рамки с диафрагмами

Касание пучка диафрагмой при ее перемещении в горизонтальном направлении обрезает вертикальную часть пучка. Заштрихованная область на Рис. 18 отражает количество выбывших частиц из пучка при смещении диафрагмы в одном из направлений сканирования. Она позволила восстановить истинный профиль пучка ускорителя. Полученные в результате сканирования результаты обрабатывались по закону двумерного распределения Гаусса для получения реального профиля пучка ускорителя (Рис. 21).

4.1.3 Измерение профиля ускоренного пучка

Измерение профиля ускоренного пучка проводилось на протяжении десяти минут, в течение которых проведенный через рамку пучок циркулировал в накопительном кольце ускорителя. Инжекция заряженных частиц производилась через центр измерительной диафрагмы. После завершения этого процесса частицы ускорялись до энергии эксперимента, рамка смещалась в новое положение, и проводилось измерение аналогичное проведенному на этапе инжекции. В течение десяти минутного цикла, с интервалом в 60 секунд фиксировалось число частиц, оставшихся в накопительном кольце. Таким образом, после смещения диафрагмы одновременно с измерением интенсивности проводилось измерение времени жизни пучка.

Полученные результаты показывают, что при горизонтальном смещении диафрагмы на 22 мм (не доходя центром пучка ускорителя 3 мм до стенки диафрагмы) время жизни пучка практически не меняется. Перемещение, несомненно, сказывается на интенсивности пучка, но магнитная система ускорителя в состоянии удерживать

оставшиеся частицы в накопительном кольце. Как только центр пучка приближается к стенке диафрагмы ближе, чем на 3 мм, время жизни пучка заметно снижается (Рис. 19). Это объясняется тем, что в процессе фокусирования и удержания частиц, оставшихся в накопительном кольце после взаимодействия с диафрагмой, пучок почти не изменяет своих размеров. При следующем прохождении через рамку пучок снова задевает ее, поэтому наблюдается значительное уменьшение времени жизни пучка.

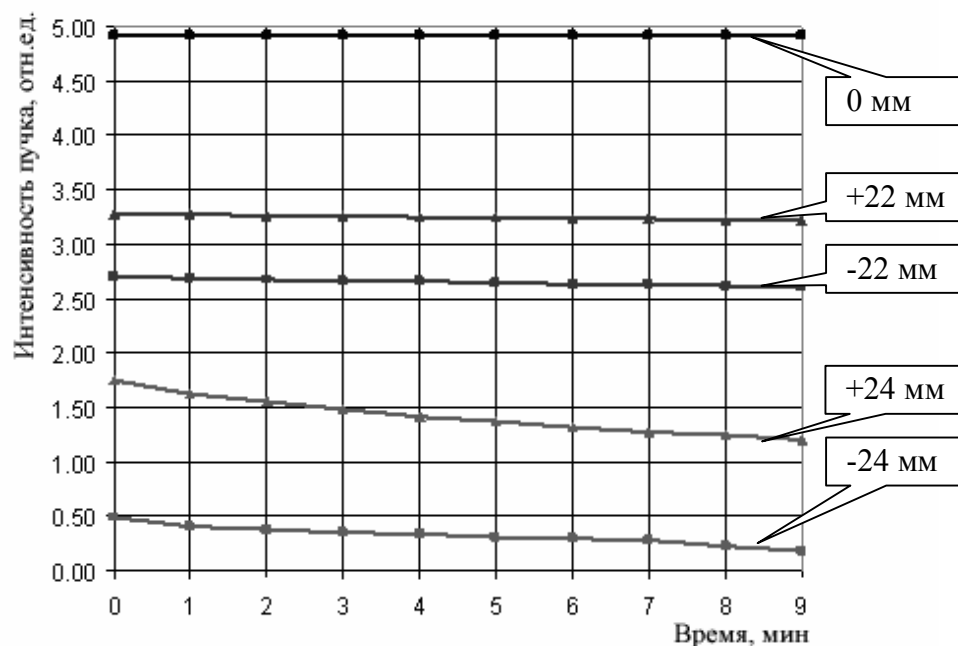


Рис. 19. Время жизни ускоренного пучка COSY

При работе с ускоренным пучком для имитации работы с будущей мишенью использовалась кластерная водородная мишень с плотностью $\sim 10^{14}$ атомов/см², что на порядок выше предполагаемой плотности газовой мишени ABS с накопительной ячейкой. Полученные результаты представлены на Рис. 20.

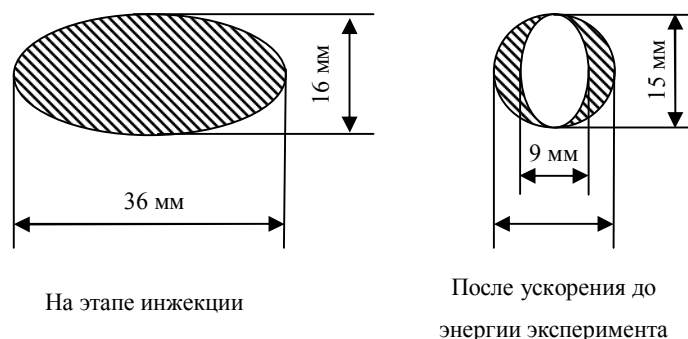


Рис. 20. Размеры пучка ускорителя COSY. На этапе инжекции кластерная мишень не использовалась. При работе с ускоренным пучком: наружный эллипс – размер пучка с использованием кластерной мишени, внутренний – без нее

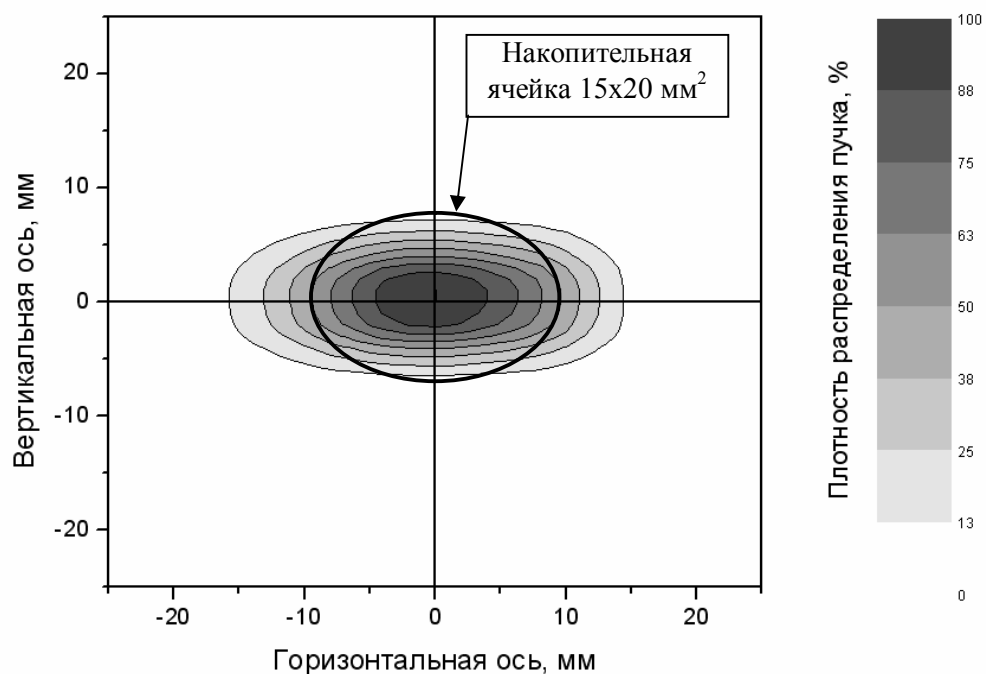
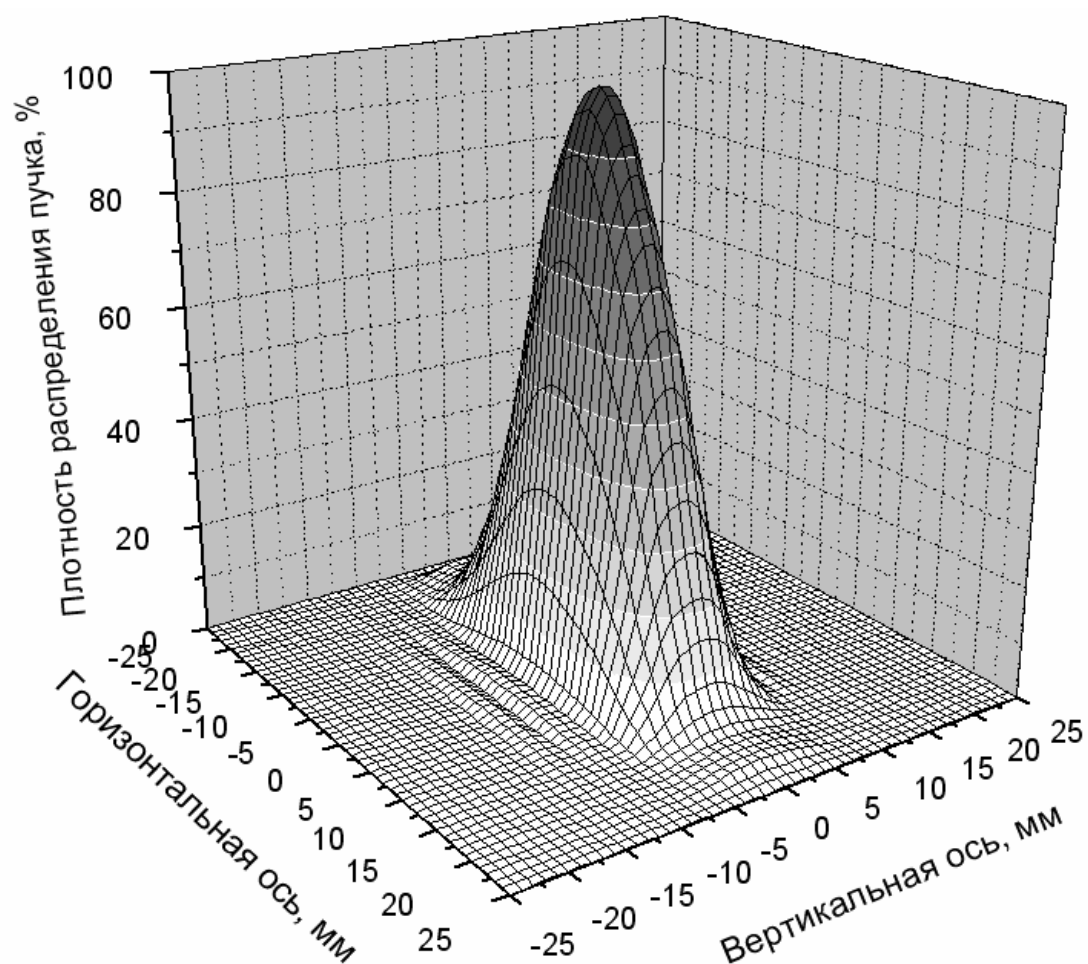


Рис. 21. Восстановленный профиль пучка на этапе инжекции в ускоритель. Максимум соответствует плотности пучка, инжектированного в ускоритель без использования диафрагм, начало координат – геометрическому центру вакуумной камеры

В момент инъекции горизонтальные размеры пучка составляют 36 мм, что в совокупности с размерами ускоренного пучка – 15 мм и 9 мм (в случае использования кластерной мишени и без нее), делает невозможным установку накопительной ячейки с поперечным сечением $15 \times 15 \text{ мм}^2$, т.к. однократная инъекция приведет к очень низкой интенсивности пучка ускорителя (не более 10 % от интенсивности при свободной инъекции в накопительное кольцо). С другой стороны, пучок практически не изменяет своих вертикальных размеров после инъекции, что позволяет зафиксировать ее вертикальный размер.

Сравнение формы и поперечных размеров ускоренного пучка без кластерной мишени и с ее использованием позволило оценить горизонтальные размеры для следующего прототипа накопительной ячейки и позволило найти оптимальное соотношение между потерями интенсивности пучка ускорителя и увеличением плотности газовой мишени. Таким образом, при проведении поляризационных экспериментов поперечное сечение накопительной ячейки необходимо использовать не менее $20 \times 15 \text{ мм}^2$.

4.1.4 Выводы

В процессе определения геометрии накопительной ячейки для газовой поляризованной внутренней мишени для эксперимента ANKE были проведены исследования профиля ускорительного пучка на разных этапах его формирования. В ходе работы была создана система передвижения измерительных диафрагм, которая в дальнейшем может быть использована для поддержки и перемещения накопительной ячейки. Была разработана методика измерения профиля пучка и программное обеспечение для удаленного управления системой перемещения. Систематические измерения профиля пучка ускорителя позволяют сделать несколько выводов:

- размеры пучка ускорителя в камере для установки мишеней на этапе инъекции определяются качеством проведения пучка сквозь диафрагму;
- размеры пучка после ускорения в большей степени зависят от плотности мишени, чем от энергии эксперимента;
- в экспериментах с накопительной ячейкой необходимо использовать дополнительные способы повышения интенсивности ускоренного пучка, такие, как многократная инъекция, электронное и стохастическое охлаждение.

Полученный профиль пучка ускорителя в камере для установки мишеней в эксперименте ANKE определил размеры накопительной ячейки для внутренней газовой мишени.

4.2. Магнитные поля в районе эксперимента ANKE

Создание источника поляризованных атомов в лаборатории института ядерной физики научно-исследовательского центра г.Юлих (Германия) завершилось в 2003 году. В слабых магнитных полях были получены основные параметры производимого источником пучка – поляризация, интенсивность, профиль пучка. Результаты были опубликованы в работах [25], [46], [55] и представлены на конференциях [35], [65] и др. Дальнейшее использование источника предполагалось на ускорителе COSY в эксперименте ANKE, который, как описано в главе 3.2, состоит из трех дипольных магнитов. Максимальное поле внутри центрального спектрометрического магнита D2 (Рис. 12) достигает 1.5736 Тесла и неоднократно изменяет свою величину во время проведения эксперимента с минимальных (в рабочем состоянии ток не полностью выводится из магнита) до максимальных значений. В таких условиях, все движущиеся части установки, такие как турбомолекулярные и криогенные насосы, а также измерительные приборы, могут выйти из строя. Поэтому, до введения источника в эксплуатацию, было необходимо провести измерения магнитного поля вокруг источника и, по возможности, защитить их от влияния магнитного поля.

4.2.1 Магнитные поля вокруг источника на эксперименте ANKE

Установка источника поляризованных атомов ANKE-ABS для экспериментов с использованием газовой мишени планировалась между первым отклоняющим магнитом D1 и главным спектрометрическим магнитом D2 (Рис. 12). В целях уменьшения времени, необходимого для установки на ускоритель, а также для фиксации положения оси источника относительно вакуумной камеры ускорителя была создана специальная поддержка, располагаемая между магнитами и крепящаяся к ним. С ее использованием облегчалось смещение всей системы источник – вакуумная камера на определенный угол, необходимый для проведения эксперимента.

Предварительная оценка результирующего магнитного поля и отдельных его компонент для всех деталей источника была сделана на основе расчетной трехмерной карты магнитного поля. Величина магнитного поля между отклоняющим магнитом D1 и спектрометрическим магнитом D2 была получена с помощью моделирования с

использованием программы MAFIA²⁴ [48]. Проведенные ранее измерения показали хорошее совпадение полей, полученных в результате моделирования, с измеренными значениями. Единственным недостатком при использовании этой модели для расчета полей вокруг ABS являлось то, что при установке источника линии магнитного поля могут отклоняться, что приведет к искажению общей картины поля. Несмотря на это, исходную карту магнитного поля можно использовать для качественной оценки и предсказания областей, где могут возникать проблемы с движущимися частями компонент источника поляризованных атомов.

Предварительные исследования проводились с использованием сечения (Рис. 22), перпендикулярно направлению распространения пучка ускорителя, на расстоянии 1250 мм от центра магнита D2, являющейся вертикальной осью источника.

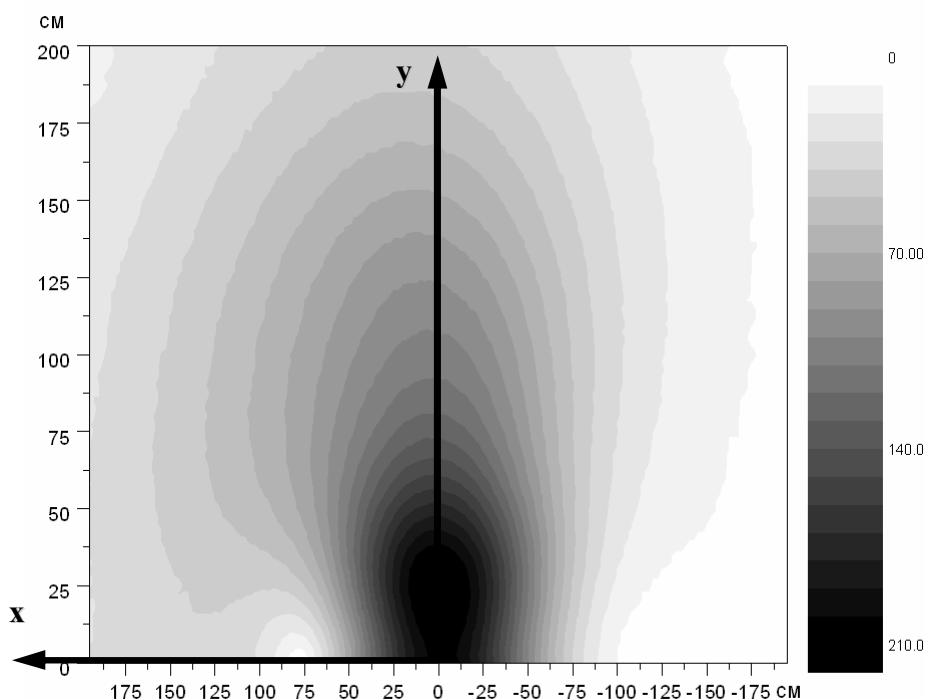


Рис. 22. Двумерная карта магнитного поля на расстоянии 1250 мм от центра магнита D2. Начальные координаты – оптический центр пучка ускорителя, ось OX – направлена внутрь зазора магнита

Одновременно с двумерным сечением карты поля, выбирались отдельные точки в пространстве, соответствовавшие расположению криогенных и турбомолекулярных насосов, датчиков давления и прочих частей источника, работоспособность которых зависит от величины магнитного поля. В этих областях были проведены измерения трех компонент магнитного поля. Результаты, объединенные в Табл. 3, показали, что

²⁴ Многоцелевая программа трехмерного компьютерного моделирования электромагнитных полей.

оценка магнитного поля с помощью расчетных величин по мере удаления от оптического центра пучка ускорителя сильно занижена и отличается от аналитической в два-три раза в самых удаленных от точек. Но, по мере приближения к центру (координата $X=0$, $Y=0$ на Рис. 22), разница между измеренными и посчитанными с помощью программы MAFIA значениями становится меньше. Например, для турбомолекулярных насосов, расположенных в верхней части источника поляризованных атомов, измеренное поле было в полтора раза больше расчетного значения и превышало допустимую для работы величину.

Табл. 3.
Магнитное поле около компонент ABS, подверженных его влиянию

Устройство	Расположение	Магнитное поле, Г		
		Допустимое	Карта поля	Измеренное
Турбомолекулярный насос #1 первой ступени	При повороте системы располагается ближе к магниту D2	135	47 – 150	32 – 85
Турбомолекулярный насос #2 первой ступени	При повороте системы располагается дальше от магнита D2	135	23.6 – 25	30 – 35
Турбомолекулярный насос второй ступени	Самая дальняя точка источника от D2	135	31 – 130	35 – 77
Криогенное охлаждение сопла	Самая верхняя точка источника	300	26 – 35	34
Криогенный насос #3 (ближайший к магниту)	400мм от горизонтального центра магнита D2	300	102	56
Центр пересечения пучка ABS и пучка ускорителя	Координата (0;0)	-	318	-

В результате выполненных измерений были определены компоненты источника поляризованных атомов, которые необходимо защитить от магнитного поля с помощью магнитных экранов. Кроме этого, все датчики давления²⁵ находятся в областях с высоким магнитным полем (измеренное поле превышало 35 Г и достигало 100 Г для датчиков, расположенных ближе к магниту D2) и также требует экранировки. После

²⁵ Pfeiffer HPT100, датчик давления совмещенного типа, рабочий диапазон 1 бар – 10^{-10} мбар.

установки соответствующей защиты на источник и датчики давления был проведен первый тестовый запуск ABS на ускорителе при выключенных магнитах спектрометра ANKE.

Дальнейшим испытанием источника была проверка стабильности формирования поляризованного водородного пучка. Как описано в главе 1.2, для создания поляризации необходимо использовать блок сверхтонких переходов (SFT). При выключенном блоке в камеру ускорителя для установки мишени попадают атомы водорода в состояниях $|1\rangle$ и $|2\rangle$. Если включен блок сверхтонких переходов, то атомы, находящиеся в состоянии $|2\rangle$, будут переходить в состояние $|3\rangle$ и откачиваться источником до попадания в камеру ускорителя. Таким образом, переключением блока SFT можно достигнуть уменьшения потока атомов в вакуумную камеру. Изменение давления должно быть в 2 раза, т.к. эффективность работы этого блока сверхтонких переходов превышает 96 %, но не достигает 100 %. Если магнитное поле будет влиять на датчики давления, то это будет сказываться только в момент изменения поля, но не повлияет на измерения. К тому же, для проверки на стабильность необходимо, чтобы отношение давлений при повышении магнитного поля D1 и D2 было постоянным. Результаты проведенного измерения показаны на Рис. 23.

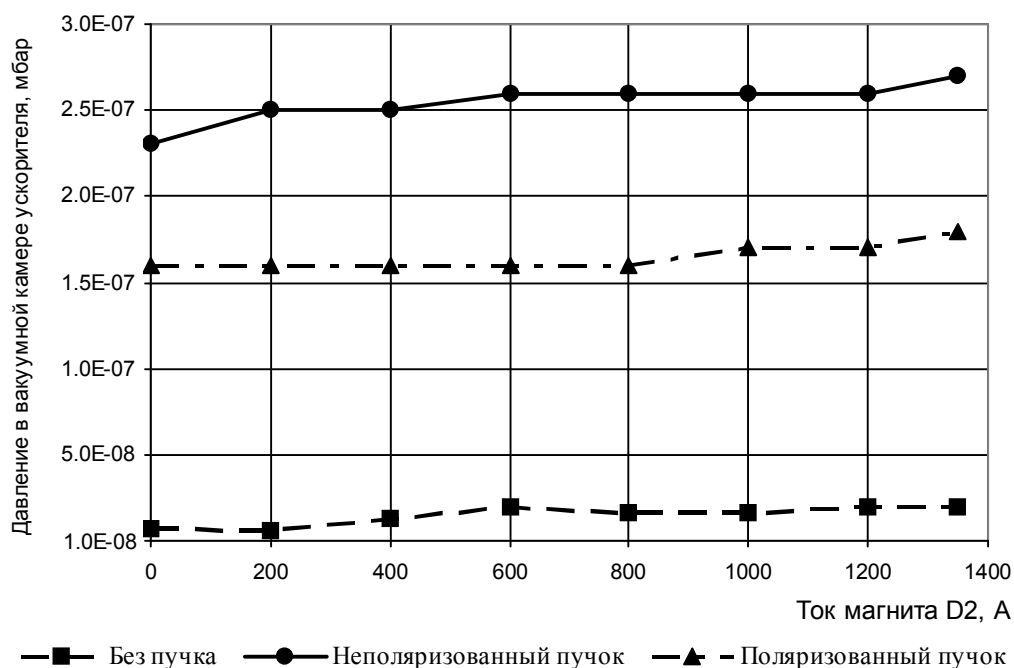


Рис. 23. Проверка на стабильность работы ABS в изменяющемся магнитном поле. Сплошная линия – давление в камере ускорителя, создаваемое пучком атомов в состояниях $|1\rangle$ и $|2\rangle$, штрихпунктирная – только состояние $|1\rangle$, штриховая – фоновые измерения без пучка

Изменение тока основного спектрометрического магнита с шагом 200 А не привело к значительному уменьшению поляризации и отношение давлений в

вакуумной камере при переключении блока сверхтонких переходов оставалось постоянным. Для достижения низких начальных значений давления необходима длительная откачка вакуумной камеры ускорителя в процессе измерения. Это значительно увеличило время между отдельными измерениями. Кроме того, дополнительные ошибки в измерения могла внести нестабильность пучка источника. Поэтому, во время проведения тестов, был найден оптимальный промежуток времени, необходимый для нормализации давления между измерениями. Следует отметить, что фоновое давление в камере ускорителя при выключенном потоке газа из источника (штриховая кривая на Рис. 23) медленно повышалось.

Анализ результатов, полученных во время измерений с поляризованным водородным пучком источника ABS в изменяющемся магнитном поле, показал стабильность работы спин-сепарирующих магнитов и блоков сверхтонких переходов в максимальном магнитном поле, создаваемом в районе установки. Недостаточная защита датчиков давления позволяет использовать их только при постоянном магнитном поле, т.к. дополнительные наводки на сигнальные кабели между датчиками и системой сбора и обработки информации вносят дополнительные ошибки в измерение. Это не является критическим недостатком для функционирования системы, потому что при постоянном сколь угодно большом магнитном поле показания датчиков совпадают со значениями, полученными при выключенных магнитах.

4.2.2 Магнитное поле вдоль оси источника

Кроме прямого влияния магнитного поля на производительность и работоспособность отдельных составляющих источника, что в конечном итоге может снижает поляризацию атомарного пучка, существует деполяризация атомов при прохождении областей с нулевым магнитным полем.

Согласно теореме Лармора, при наличии внешнего постоянного магнитного поля, внутреннее движение электронов атома не изменяется, но, в целом, атом получает дополнительное вращение с угловой скоростью ω_L (формула (17)), называемой ларморовской частотой прецессии электрона. Вектор угловой скорости совпадает по направлению с вектором магнитной индукции и не зависит от направления скорости движения электрона по орбите.

$$\vec{\omega}_L = \frac{e}{2mc} \vec{B}, \quad (17)$$

где e и m – заряд и масса электрона, c – скорость света, $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции.

Теорема Лармора верна, если ω_L мала по сравнению с собственными частотами ω обращения частиц в отсутствие магнитного поля. Для электронов даже в очень сильных магнитных полях ($B \sim 10^7 \text{ Гс}$) она достигает значений 10^{13} Гц , тогда как частота обращения электрона в атоме имеет порядок:

$$\omega \sim \frac{4Z^2}{n^3} \cdot 10^{16} \text{ Гц}, \quad (18)$$

где Z — заряд ядра, n — главное квантовое число.

Если на пути движения поляризованного атома есть область с изменяющимся магнитным полем, то вектор спина атома будет следовать изменению вектора поля. Таким образом, при смене знака внешнего магнитного поля, может измениться поляризация. Особенно важно время прохождения частицей этой области, т.к. если атом будет находиться в ней длительный период времени, то может произойти деполяризация. Для качественного описания этого эффекта введем коэффициент R , определяемый по формуле (19). Экспериментально было доказано [49], что при значениях $R > 100$ эффект деполяризации атомов, вылетающих из источника не наблюдается.

$$R = \frac{\omega_L}{\omega_B}, \quad (19)$$

где ω_B — скорость изменения магнитного поля B .

Для определения скорости изменения каждой компоненты магнитного поля вдоль оси источника ANKE-ABS была подготовлена специальная система надстраиваемых трубок. Необходимость использования нескольких трубок была продиктована небольшим отверстием бокового фланца центральной (третьей) камеры источника. Свободное расстояние внутри камеры, при условии демонтажа блока сверхтонких переходов SFT, ограничивалось центральным фланцем источника, разделяющим третью и четвертую камеры, и нижней точкой опоры первого блока спин-сепарирующих секступольных магнитов. Каждая трубка, длиной 10 см, имела сантиметровую шкалу и вкручивалась одна в другую, чтобы обеспечить жесткость конструкции и правильность положения датчика Холла. Суммарная длина всех трубок была рассчитана на проведение измерений вдоль всего источника до нижнего фланца вакуумной камеры ускорителя и равна 1.5 м. Три компоненты магнитного поля измерялись от точки создания поляризации (блок сверхтонких переходов SFT) до входа в камеру для установки мишеней. В центре первой трубки был жестко закреплен держатель трехмерного датчика Холла. Измерение трех компонент магнитного поля

вдоль оси ABS было необходимо, для определения областей, в которых оно изменяет знак. Расположение измерительной области датчика Холла на оси источника поляризованных атомов с хорошей точностью обеспечивалось внешней трубкой, в которой перемещался датчик.

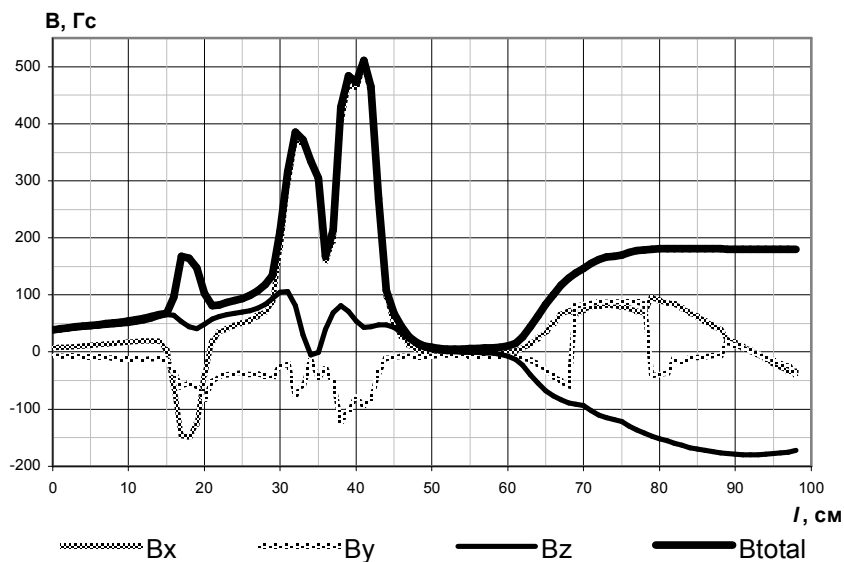


Рис. 24. Магнитное поле вдоль оси источника. Начало координат соответствует нижней точке центрального фланца ABS

На Рис. 24 показано распределение всех компонент и суммарного магнитного поля вдоль оси источника ANKE-ABS. Можно выделить несколько характерных областей: вторую группу спин-сепарирующих секступольных магнитов (15 – 20 см, 30 – 35 см, 35 – 45 см) и область блоков сверхтонких переходов SFT и WFT (50 – 60 см). Из полученных данных видно, что на всем протяжении второй части источника поляризованных атомов есть несколько областей с низким магнитным полем, а также несколько раз отдельные его компоненты меняют знак. При установке одной из измерительных трубок, использованной на участке 68 – 78 см, она не была закручена до конца, т.е. горизонтальные оси были повернуты на неизвестный угол. При добавлении следующей трубки положение направляющей оси вернулась в исходное. Эта ошибка не сказалась на результате измерений, т.к. суммарное поле на этом промежутке изменялось плавно.

Для сохранения поляризации атомов было необходимо, чтобы на всей длине распространения поляризованного пучка коэффициент R , рассчитываемый по формуле (19), превышал 100 (Рис. 25).

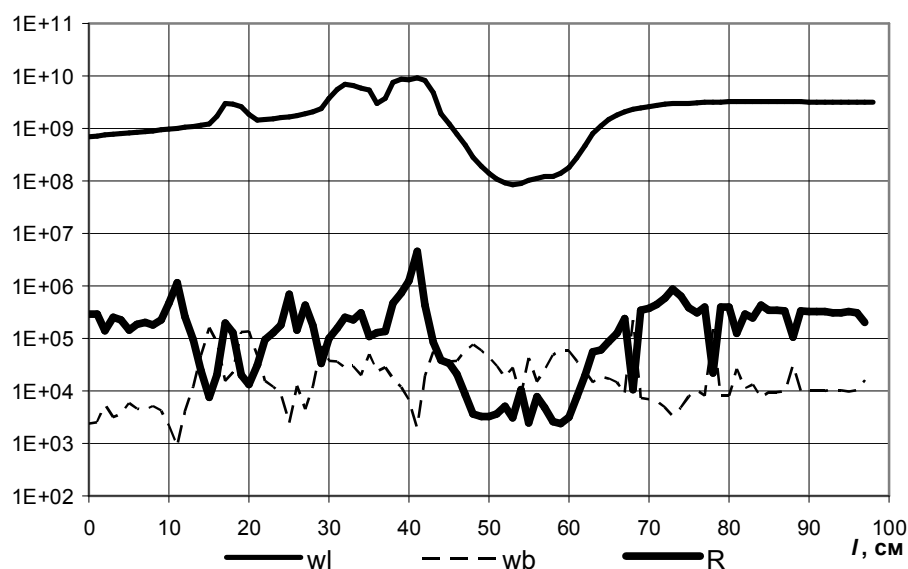


Рис. 25. Частота прецессии атома, скорость изменения магнитного поля и коэффициент R в области пролета поляризованных атомов вдоль оси источника ANKE-ABS

4.2.3 Выводы

Первым этапом подготовки источника поляризованных атомов к использованию в эксперименте ANKE была проверка стабильности его работы в сильных магнитных полях, создаваемыми магнитами D1 и D2 в районе установки. Немаловажным фактором являлось сохранение поляризации атомов в создаваемом пучке.

Проведенные измерения показали:

- стабильность работы источника ANKE-ABS во всем диапазоне магнитного поля, создаваемого спектрометрическим магнитом D2 и отклоняющим магнитом D1;
- стабильность изменения давления в камере ускорителя при переключении блика сверхтонких переходов SFT. Это является подтверждением перехода атомов водорода из состояния $|2\rangle$ в состояние $|3\rangle$, а значит и работоспособности блока в магнитных полях, создаваемых в районе установки;
- на всей длине распространения поляризованного пучка есть несколько областей, в которых магнитное поле меняет знак, но это не приводит к деполяризации пучка атомов.

4.3. Система подачи неполяризованного газа

4.3.1 Введение

Одним из основных параметров атомарных пучков является плотность струи и распределение интенсивности атомов в пучке. Самым простым и наиболее точным способом определения плотности газовой струи является использование компрессионной трубки (Рис. 26). Для качественного объяснения принципа работы, это устройство можно разделить на три основных части:

- компрессионный объем, в котором измеряется давление;
- калибровочный объем, использующийся для абсолютной калибровки давления в компрессионном объеме к потоку атомов;
- компрессионная трубка, расположенная на компрессионном объеме, в которую направляется пучок атомов из источника.

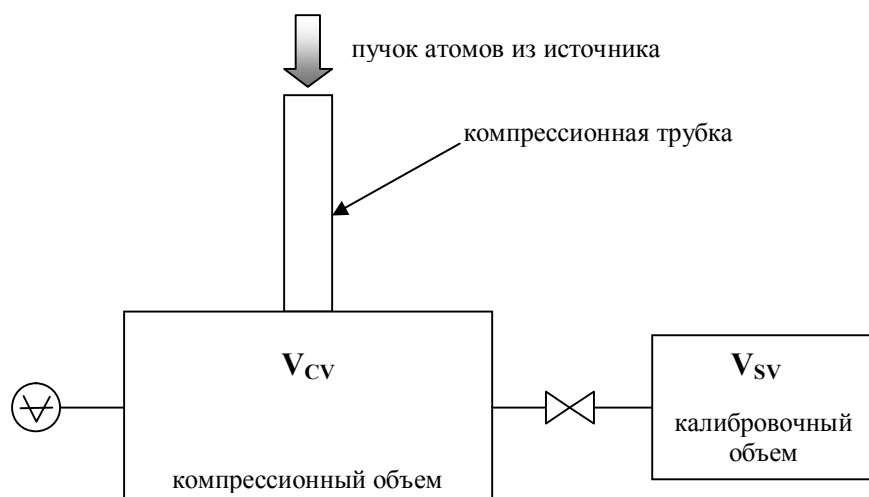


Рис. 26. Устройство для измерения интенсивности пучка ABS – компрессионная трубка

Вылетающие из источника атомы газа, сфокусированные во втором блоке секступольных магнитов, распространяются под малыми углами к оси ABS, поэтому большую часть атомов, влетевших в компрессионную трубку, можно считать достигающими компрессионного объема без столкновений со стенками. Некоторое количество частиц все же испытывает соударение с трубкой. Останавливаясь на поверхности, такие частицы забывают первоначальное направление своего движения, и слетают с нее в равновероятно случайном направлении. Проводимость компрессионной трубки определяется формулой свободномолекулярного режима течения газа (8). Частицы, влетевшие в объем компрессионной трубки перерассеиваются, что приводит

к эффекту увеличения давления. Величина измеряемого давления пропорциональна потоку газа в компрессионный объем, который выражается следующим образом:

$$Q_V = U \cdot (P_{CV} - P_{ABS}), \quad (20)$$

где U – проводимость трубки, P_{CV} – давление в компрессионном объеме, P_{ABS} – давление снаружи компрессионной трубки.

Интенсивность потока измеряется в атомах в секунду и выражается

$$I_{beam} = \frac{Q_V}{RT} \frac{\mu}{M}, \quad (21)$$

где T – температура компрессионной трубки, R – универсальная газовая постоянная, μ и M – молярная и молекулярная масса газа.

При проектировании устройств, измеряющих поток частиц с помощью компрессионной трубки, важным конструкционным параметром является отношение длины трубки к диаметру, определяющее проводимость. Калибровка устройства измерения интенсивности осуществляется на молекулярном водороде. Для этого применяется метод истечения водорода из калибровочного объема V_{SV} (Рис. 26).

В качестве источника для создания потока молекулярного водорода была использована система подачи неполяризованного газа – UGSS²⁶. Эта установка может использоваться для разных типов задач:

- калибровки интенсивности источника поляризованных атомарных пучков (возможно из-за наличия калиброванного объема);
- использование установки, как системы подачи калиброванного потока газа (осуществляется при помощи стабилизации давления газа в накопительном объеме UGSS с использованием регулируемого электромагнитного натекаателя с обратной связью).

Система подачи молекулярного газа состоит из нескольких известных объемов (Рис. 27), соединенных между собой системой регулируемых натекаателей и вентилях. Возможность использовать систему подачи газа кроме ручного режима в автоматическом или режиме удаленного управления облегчает работу с UGSS, в туннеле ускорителя. Электромагнитный регулируемый натекаатель EV поддерживает стабильное давление в накопительном объеме P_{SV} установки для подачи неполяризованного газа. Фиксированный поток атомов, с помощью ручного вентиля тонкой регулировки MV , заполняет накопительную ячейку, расположенную в объеме вакуумной камеры ускорителя. Зная поток газа, можно рассчитать плотность

²⁶ Unpolarized Gas Supply System.

создаваемой мишени. Таким образом, калибровка источника неполяризованных атомов заключается в определении зависимости потока в вакуумную камеру от давления в накопительном объеме. В экспериментах с накопительной ячейкой для создания неполяризованной газовой мишени планировалось использовать несколько газов (водород, азот, гелий), поэтому для каждого из них проводилась отдельная калибровка.

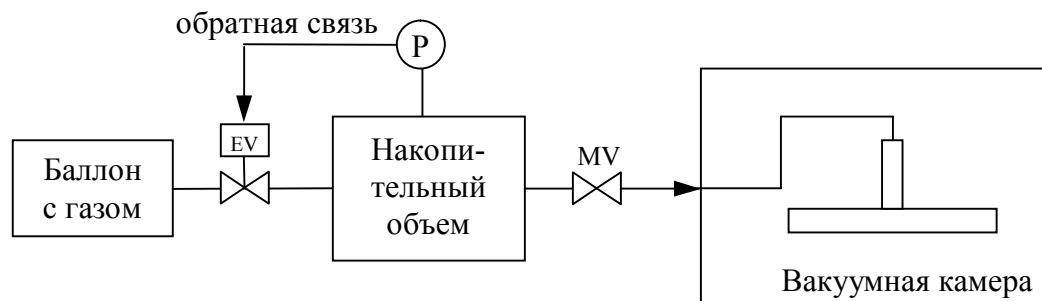


Рис. 27. Упрощенная схема системы подачи газа для калибровки потока

Внутри объема P_{CV} , в который натекал газ, давление измерялось с помощью двух разделенных датчиков, один из которых в измеряемом диапазоне давлений работал на нижнем пределе своей чувствительности, а другой – мог переключаться между встроенными измерительными датчиками разных типов. Эффект переключения режимов хорошо заметен на нижней кривой на Рис. 28, полученной с помощью датчика давления совмещенного типа.

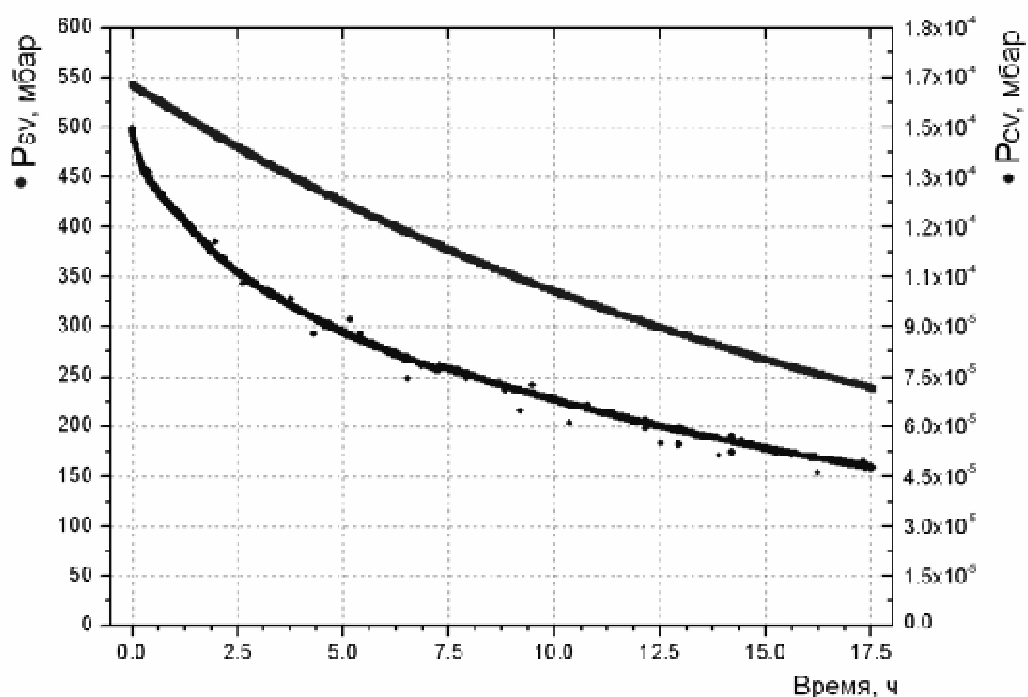


Рис. 28. Уменьшение давления в калибровочном объеме (верхняя кривая) и в объеме вакуумной камеры (нижняя кривая) при калибровке с использованием водорода

4.3.2 Калибровка устройства измерения интенсивности

Из известного объема V_{SV} при давлении P_{SV} происходит истечение газа через апертуру, сечение которой определяется ручным вентилем тонкой регулировки, в компрессионный объем V_{CV} . В общем случае

$$P_{CV} = f(P_{SV}) \quad (22)$$

В первом приближении можно считать, что давление в компрессионном объеме (P_{CV}) является линейной функцией от давления в калибровочном объеме (P_{SV}).

$$P_{CV} = A \cdot P_{SV} + B \quad (23)$$

Тогда для давления в калибровочном объеме можно написать

$$P_{SV} V_{SV} = \frac{N_{H_2} m_{H_2}}{\mu_{H_2}} RT, \quad (24)$$

где $m_{H_2} = 3.22 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ молекулярная масса водорода, N_{H_2} – количество молекул водорода в данном объеме, $\mu_{H_2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ – молярная масса.

При истечении газа из калибровочного объема, изменение числа молекул связано с изменением давления

$$\frac{\partial N_{H_2}}{\partial t} = \frac{V_{SV}}{\frac{m_{H_2}}{\mu_{H_2}} RT} \cdot \frac{\partial P_{SV}}{\partial t} \quad (25)$$

Давления в калибровочном и компрессионном объемах связаны соотношениями

$$V_{SV} \frac{\partial P_{SV}}{\partial t} = S(P_{CV} - P_{SV}), \quad (26)$$

где S – проводимость вентиля тонкой регулировки (Рис. 26).

Решением дифференциального уравнения относительно давления в калибровочном объеме является

$$P_{SV} = P_{SV0} e^{-\frac{S}{V_{SV}} t}, \quad (27)$$

где P_{SV0} – давление в начальный момент времени.

Поток молекул водорода в компрессионный объем выражается формулой

$$\frac{\partial N_{H_2}}{\partial t} = -\frac{P_{SV0} S}{\frac{m_{H_2}}{\mu_{H_2}} RT} \cdot e^{-\frac{S}{V_{SV}} t} \quad (28)$$

Экспериментально, метод калибровки состоит в одновременном измерении давлений в калибровочном и компрессионном объемах, как функции времени:

$$\begin{cases} P_{SV} = f_{P_{SV}}(t) \\ P_{CV} = g_{P_{CV}}(t) \end{cases} \quad (29)$$

С помощью системы подачи неполяризованного газа были получены калибровочные кривые (Рис. 29) зависимостей потоков молекулярного водорода и азота от давления в накопительном объеме.

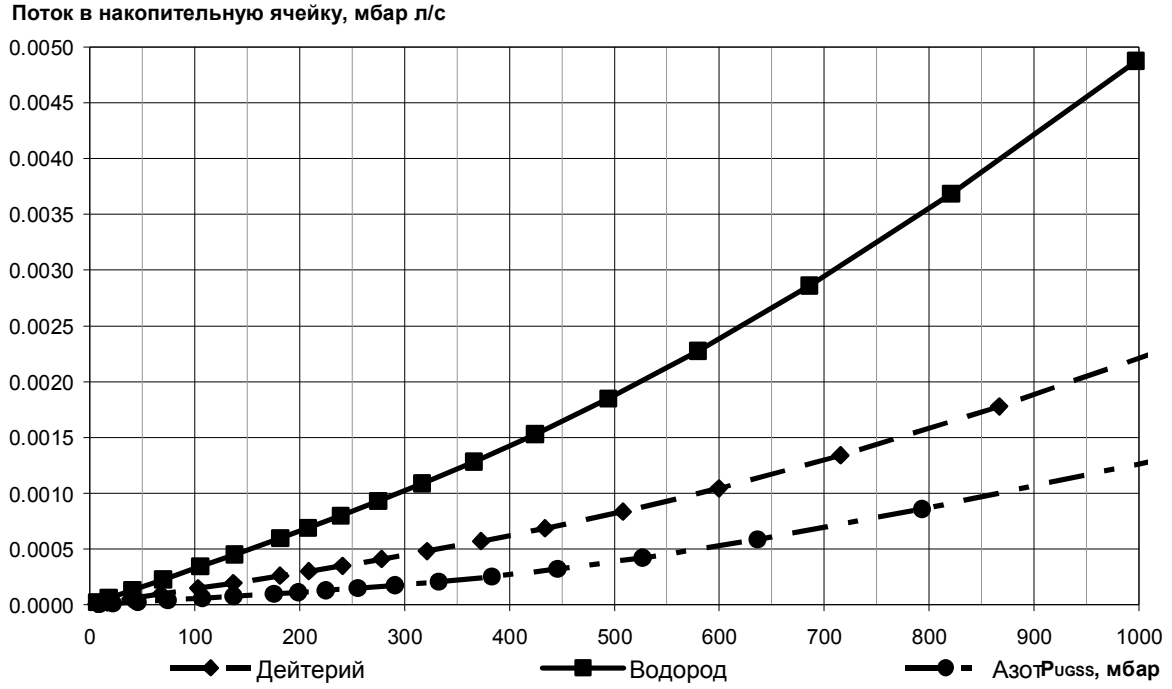


Рис. 29. Калибровочные кривые зависимостей потока водорода, дейтерия и азота от давления в системе подачи неполяризованного газа

Для определения потока, создающего в компрессионном объеме давление P_{SV0} , из калибровочной кривой находится момент времени t_0 , соответствующий данному давлению:

$$t_0 = f_{P_{CV}}^{-1}(P_{CV0}) \quad (30)$$

В этот момент времени находится

$$P_{SV}' = \left. \frac{\partial P_{SV}}{\partial t} \right|_{t=t_0} = \left. \frac{\partial g_{P_{SV}}}{\partial t} \right|_{t=t_0} \quad (31)$$

Окончательно поток молекулярного водорода соответствующий давлению P_{SV0} в компрессионном объеме выражается формулой

$$\frac{\partial N_{H_2}}{\partial t} = \frac{V_{SV}}{\frac{m_{H_2}}{\mu_{H_2}} RT} \cdot \left. \frac{\partial g_{P_{SV}}}{\partial t} \right|_{t=t_0} \quad (32)$$

Величина калибровочного объема входит в конечную формулу в качестве множителя. Следовательно, погрешность определения потока определяют погрешности измерения объема и давления.

4.3.3 Измерение интенсивности атомарного пучка

Измерение интенсивности пучка атомов, создаваемом источником ANKE-ABS, может быть произведено установкой, включающей в себя компрессионную трубку, датчик измерения давления и систему подачи неполяризованного газа, для калибровки компрессионной трубки. Вся система размещалась на нижней камере источника поляризованных атомов. Юстировка положения центра компрессионной трубки в горизонтальной и вертикальной плоскости производилась с помощью трехкоординатного стола (Рис. 30).

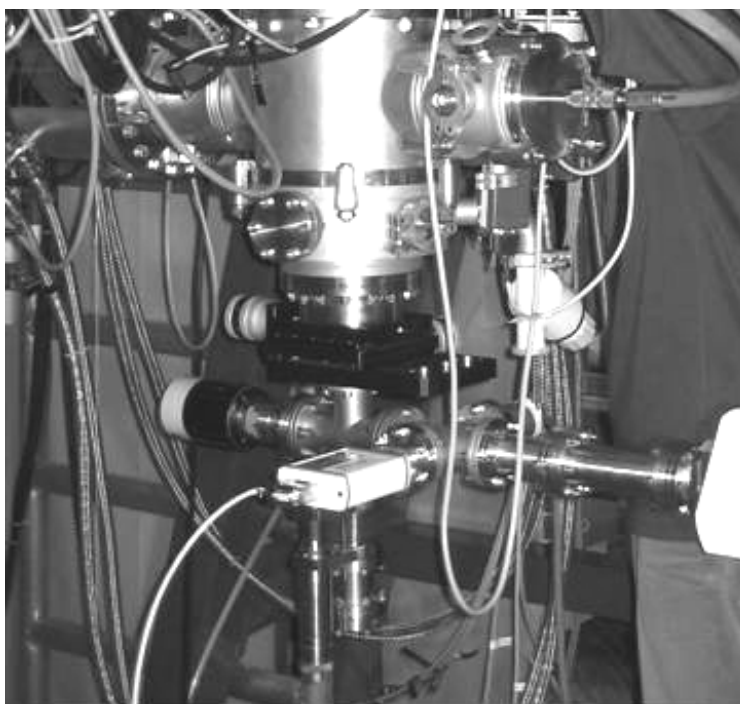


Рис. 30. Фотография нижней вакуумной камеры ABS с компрессионной трубкой, размещенной на трехкоординатном столе и датчиками давления для измерения интенсивности пучка

Положение измерительной трубки длиной 100 мм и диаметром 10 мм для проведения калибровки выбиралось в соответствии с предполагаемым положением верхней трубки накопительной ячейки, размещенной на расстоянии 354 мм от последнего секступольного магнита. Это позволило измерить поток частиц из источника в условиях, приближенных к реальной геометрии эксперимента ANKE.

Используя калибровочные кривые UGSS (Рис. 29), можно определить плотность газовой струйной мишени или мишени с накопительной ячейкой, создаваемую потоком Q из калибровочного объема системы. Ось сопла источника поляризованных атомов

может не совпадать с оптической осью системы, поэтому измерением давления в компрессионной трубке с включенным потоком газа из ABS в первую очередь можно осуществить тонкую подстройку положения сопла. Верхний фланец, поддерживающий диссоциатор и сопло, соединен с главной камерой источника гибким вакуумным соединением и опирается на три регулировочных винта, оснащенных микрометрами. С их помощью можно найти оптимальное расположение системы формирования пучка без прерывания вакуума. Центр измерительной трубки должен быть расположен на оптической оси источника, но с помощью координатного стола может быть смещен, что позволит провести сканирование в горизонтальной плоскости и определить максимум интенсивности пучка ABS.

Давление в компрессионном объеме, создаваемое источником поляризованных атомов, однозначно определяет интенсивность пучка (Рис. 31) и может быть использовано для расчетов плотности мишени, в зависимости от ее типа (струйная мишень или мишень с накопительной ячейкой).

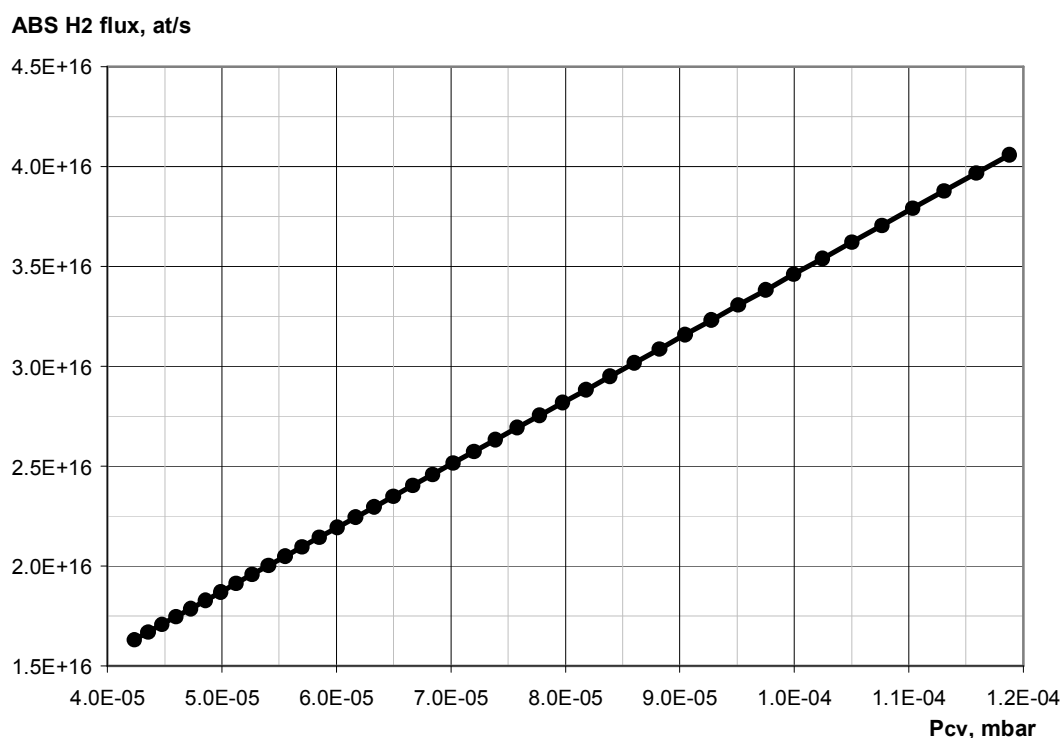


Рис. 31. Зависимость интенсивности пучка атомарного водорода от давления в компрессионном объеме

При использовании источника в качестве струйной мишени, важна область пересечения с пучком ускорителя. Опираясь на полученные ранее профили пучка ABS, проделанные в лаборатории [46], и пучка ускорителя в вакуумной камере для установки мишени, описанные в главе 4.1, можно ожидать эффективную плотность

струйной мишени в пределах $1.5 \cdot 10^{11}$ ат/см² при условии, что размеры ускоренного пучка COSY не превышают 1 см².

В случае работы источника с накопительной ячейкой важна не только интенсивность пучка, но и геометрические размеры накопительной ячейки. Используя оптимальное поперечное сечение горизонтальной трубки, полученное в результате измерений профиля пучка COSY в камере для установки мишеней, по формуле расчета линейной плотности мишени (12) можно получить несколько различных конфигураций трубок ячейки, позволяющих достичь высокой плотности поляризованных атомов водорода, превышающей 10^{13} ат/см².

4.3.4 Выводы

В рамках подготовки к созданию накопительной ячейки для газовой мишени были проведены калибровки системы подачи неполяризованного газа для молекулярного водорода, дейтерия и азота. Основываясь на полученных зависимостях, были созданы и использованы в физических экспериментах на ускорителе COSY водородные и азотные газовые мишени необходимой плотности.

Результаты калибровки и измерение интенсивности источника поляризованных атомов позволили с хорошей точностью предсказать плотности струйной мишени и мишени с накопительной ячейкой.

Исследования влияния магнитных полей на турбомолекулярные и крио-насосы, а также остальные элементы ABS которые подвержены воздействию магнитных полей в районе установки источника поляризованных атомов на эксперимент ANKE позволили успешно ввести источник в эксплуатацию и подготовить его к проведению экспериментов. Анализ трех компонент магнитного поля вдоль оси пучка до точки входа в накопительную ячейку подтвердил отсутствие областей, в которых возможна деполяризация атомарного пучка.

Глава 5.

Эксперименты с накопительной ячейкой на ускорителе COSY

5.1. Мишень с накопительной ячейкой

5.1.1 Приборы и методика измерений

Создание накопительной ячейки для внутренней газовой мишени в эксперименте ANKE требует проведения исследований, направленных на определение возможностей ускорительной техники по проведению пучка COSY через длинную накопительную ячейку, а также свойств получаемой мишени. Для этого была усовершенствована система поддержки диафрагм, использовавшаяся во время измерений профиля ускорительного пучка на разных этапах его создания (глава 4.1). Дополнительные модификации также были внесены и в программное обеспечение для удаленного управления системой поддержки и перемещения мишени: добавлена возможность непараллельного смещения одной из осей движения. Из соображений безопасности, чтобы не повредить прототип накопительной ячейки, введен дополнительный параметр, разрешающий относительное смещение в каждой плоскости движения не более 5 мм. С одной стороны, это максимальное расстояние, на которое можно сдвинуть длинную накопительную ячейку, не задев при этом стенки камеры или окружающие жесткие конструкции. С другой – свободного хода трубки накопительной ячейки достаточно для проведения оптимизации положения центров входного и выходного отверстий трубки, вдоль которой распространяется пучок ускоренных частиц.

Внутри поддерживающей рамки (Рис. 32) были установлены две накопительные ячейки с размерами $30 \times 20 \times 220 \text{ мм}^3$ и $15 \times 15 \times 220 \text{ мм}^3$, а также диафрагма с внутренним сечением $40 \times 25 \text{ мм}^2$, подобная использовавшейся в эксперименте по определению профиля пучка ускорителя. До установки системы в камеру ускорителя была сделана предварительная юстировка осей обеих накопительных ячеек относительно центра измерительной диафрагмы. Также были определены координаты положения горизонтальных трубок для ускорительного пучка, проведенного через оптический центр камеры для установки мишеней.

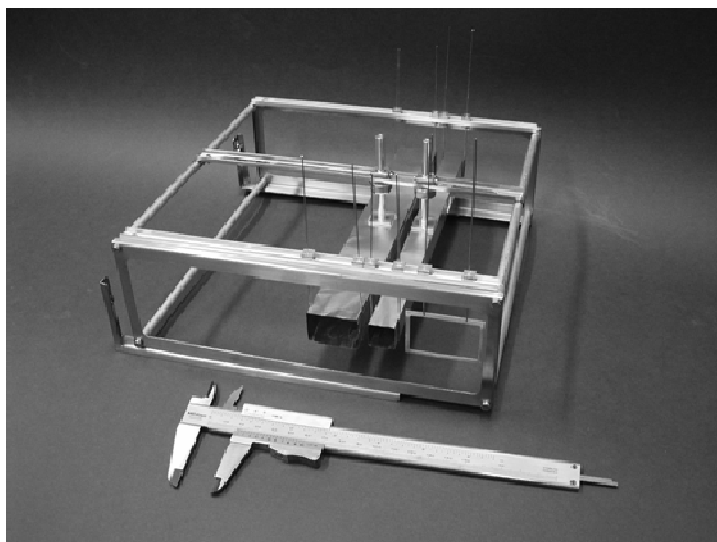


Рис. 32. Измерительная диафрагма и две накопительные ячейки в рамке для первого теста с использованием установки удаленного перемещения

В процессе измерений пучок COSY проводился через накопительную ячейку при нулевом положении спектрометрического магнита D2, что существенно облегчало процесс оптимизации. На начальном этапе работы измерительная диафрагма располагалась в ожидаемом центре пучка ускорителя. После оптимизации орбиты пучка COSY и уменьшения его размеров при помощи варьирования параметров ускорителя, было найдено положение центра ускорительного пучка.

Каждая установленная накопительная ячейка имела дополнительную трубку для подачи газа, соединенную с внешним фланцем вакуумной камеры гибкой тefлоновой трубкой. С другой стороны камеры через систему вентилях с промежуточной откачкой к фланцу была подключена установка для создания постоянного потока молекулярного газа (UGSS), с помощью которой в накопительной ячейке создавалась газовая мишень определенной плотности.

5.1.2 Эксперименты с накопительной ячейкой

Первый эксперимент на накопительном кольце ускорителя COSY с использованием накопительной ячейки проводился для определения возможностей ускорительной техники по проведению ускоренных пучков через протяженную мишень, а также определения оптимальных параметров накопительной ячейки для использования в двойном поляризованном эксперименте. Основываясь на результатах, полученных при измерении профиля ускорительного пучка в камере для установки мишеней, были созданы две алюминиевые накопительные ячейки с разными поперечными сечениями (Рис. 32). Из формулы (12) следует, что плотность создаваемой газовой мишени кубически зависит от диаметра входящих в ее состав

трубок, поэтому размеры меньшего прототипа составляли $15 \times 15 \times 220 \text{ мм}^3$. Необходимо было определить, какая часть пучка ускорителя, инжектируемая в меньшую накопительную ячейку, обрезается ее стенками, по сравнению с большей ячейкой и полным отсутствием мишени на пути прохождения пучка. Размеры второй накопительной ячейки ($30 \times 20 \text{ мм}^2$ в поперечном сечении) были выбраны с расчетом, что инжектированный в нее пучок COSY при последующем ускорении не должен задевать стенок. Кроме того, с помощью смещения одного из концов накопительной ячейки можно определить положение его центра на входе и выходе из горизонтальной трубки на разных этапах формирования пучка.

До этого эксперимента в районе спектрометра ANKE никогда не производилось проведение пучка через протяженную накопительную ячейку, ограничивающую размеры ускорительного пучка. Исходя из этого в самом начале измерений использовалась диафрагма для настройки фокусирующих систем и определения поперечных размеров ускорительного пучка. На этапе инжекции пучок смещается намного больше в горизонтальной плоскости, чем в вертикальной. Это является лимитирующим фактором и требует снижения поперечных размеров именно в горизонтальной плоскости. В процессе оптимизации размеры пучка составляли $38 \times 18 \text{ мм}^2$, что очень близко к результатам, полученным во время измерения профиля пучка. Дальнейшее улучшение могло потребовать много времени, и было решено использовать дополнительные устройства для обрезания пучка – скреперы²⁷. С их помощью размер пучка в момент инжекции был существенно уменьшен без значительной потери интенсивности после ускорения. Инжектированный пучок с размерами $28 \times 17 \text{ мм}^2$ без потерь был проведен через большую накопительную ячейку. Дальнейшая оптимизация процесса ускорения пучка проводилась в накопительной ячейке без предварительных тестов с диафрагмой до тех пор, пока размеры ускоренного пучка превышали размеры меньшей из накопительных ячеек. С помощью горизонтальных скреперов удалось уменьшить размер пучка COSY до $14 \times 12 \text{ мм}^2$. Дальнейшие попытки проведения пучка через меньшую из ячеек показали теоретическую возможность инжекции пучка в трубку с поперечными размерами $15 \times 15 \text{ мм}^2$, но при этом интенсивность снижалась почти на порядок. Результаты измерений объединены в Табл. 4 и отражают реальную картину улучшений, сделанных ускорительной группой, направленных на увеличение интенсивности

²⁷ Скрепер (англ. - scrapers) – устройство в виде заслонки,двигающееся в пучок, чтобы обрезать гало или сам пучок. На ускорителе COSY скреперы расположены парами (отдельно горизонтальные и отдельно вертикальные) и могут перемещаться независимо друг от друга.

пучка COSY. Количество частиц в накопительном кольце выражено в процентах от максимально возможного в случае использования большей накопительной ячейки.

Табл. 4.
Количество частиц в накопительном кольце на разных этапах работы

	Максимальное количество поляризованных дейтронов в накопительном кольце, $\cdot 10^{10}$ частиц		
	Без мишени (диафрагма 40 x 25 мм ²)	С большей накопительной ячейкой 30 x 20 x 220 мм ³	С меньшей накопительной ячейкой 15 x 15 x 220 мм ³
<u>Первый этап:</u> Инжекция пучка в большую ячейку (без скреперов).	1.41 110 %	1.28 100 %	-
<u>Второй этап:</u> Ускорение при проведении через большую ячейку.	1.4 150 %	0.9 100 %	-
<u>Третий этап:</u> Инжекция пучка в меньшую ячейку (со скреперами).	1.44 115 %	1.28 100 %	0.17 13 %

Сравнение результатов, полученных на разных этапах оптимизации проведения пучка, позволяет сделать несколько выводов:

- количество частиц, циркулирующих в накопительном кольце во время первого и третьего этапа измерений на этапе инжекции в ускоритель, в пределах погрешности измерений одинаково. Это отражает хорошую оптимизацию проведения пучка через меньшую накопительную ячейку. К тому же это свидетельствует о постоянном количестве частиц при инжекции без скреперов и с их использованием, что подтверждает стабильность и воспроизводимость проведения пучка ускорителя на этапе инжекции;
- снижение количества частиц на 30 % при ускорении через большую накопительную ячейку на втором этапе работы говорит о несогласованности изменения магнитных полей в процессе ускорения. Следствием этого может являться небольшое смещение центра масс пучка относительно оптического центра камеры, что приводит к существенным потерям. Поэтому, наблюдается значительное уменьшение интенсивности при инжекции в меньшую накопительную ячейку.

Также необходимо отметить, что попытки ускорить 10^9 частиц, оставшиеся в накопительном кольце после инжекции в меньшую ячейку на третьем этапе работ, не увенчались успехом. Слишком маленькое поперечное сечение трубки даже при небольшом смещении пучка моментально обрезало все частицы в пучке.

5.1.3 Выводы

Использование первого прототипа протяженной накопительной ячейки в экспериментах на накопительном кольце ускорителя COSY позволило оценить снижение интенсивности при использовании накопительных ячеек с разным поперечным сечением без газовой мишени.

Результаты измерений, представленные в Табл. 4, позволили определить минимальные размеры основной трубки накопительной ячейки для дальнейших тестов, а также сделать предположение об оптимальных размерах располагающейся вдоль ускорительного пучка трубки, исходя из которых, был создан следующий прототип для тестов с неполяризованной газовой внутренней мишенью.

5.2. Неполяризованная газовая мишень с накопительной ячейкой

5.2.1 Приборы и методика измерений

Второй эксперимент с накопительной ячейкой проводился с использованием протонного пучка с энергией 600 МэВ. Предварительное моделирование реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ для данной энергии показало, что детектирование продуктов реакции в системе координат ANKE будет иметь максимальный аксептанс при смещении спектрометрического магнита D2 на угол 9.2° . Основываясь на результатах предыдущих измерений, поперечное сечение накопительной ячейки для этого эксперимента (Рис. 33) было выбрано квадратным с размерами $20 \times 20 \text{ мм}^2$ и скругленными углами ($R_{\text{скругл}} = 2 \text{ мм}$). Для повышения плотности мишени, длина трубки вдоль пучка ускорителя была увеличена до максимально возможной для установки в камеру. С одной стороны это ограничивалось свободным пространством фланца для установки мишени, составлявшим 410 мм по горизонтали, а с другой – неэффективностью дальнейшего увеличения трубки, направленной в сторону магнита D2 и детекторов, из-за значительного уменьшения аксептанса. В конечном итоге длина накопительной ячейки равнялась 400 мм.

Алюминиевая фольга толщиной 25 мкм, из которой были сделаны все трубки накопительной ячейки, была покрыта специальным составом из политетрафторэтилена черного цвета²⁸, который должен был препятствовать деполяризации атомов газа, поступающих из источника. В процессе подготовки этого прототипа был использован опыт создания накопительных ячеек в IUSF, описанным в работе [51]. Чтобы избежать деполяризации атомов после большого количества столкновений со стенками ячейки в зазорах, края фольги соединялись стык в стык. Тем самым плотность мишени снизится не более чем на процент, т.к. суммарная площадь разреза не велика, а при попадании частица в зазор, она либо выбывает из формирования газовой мишени, либо возвращается в накопительную ячейку, испытав только пару столкновений со стенками.

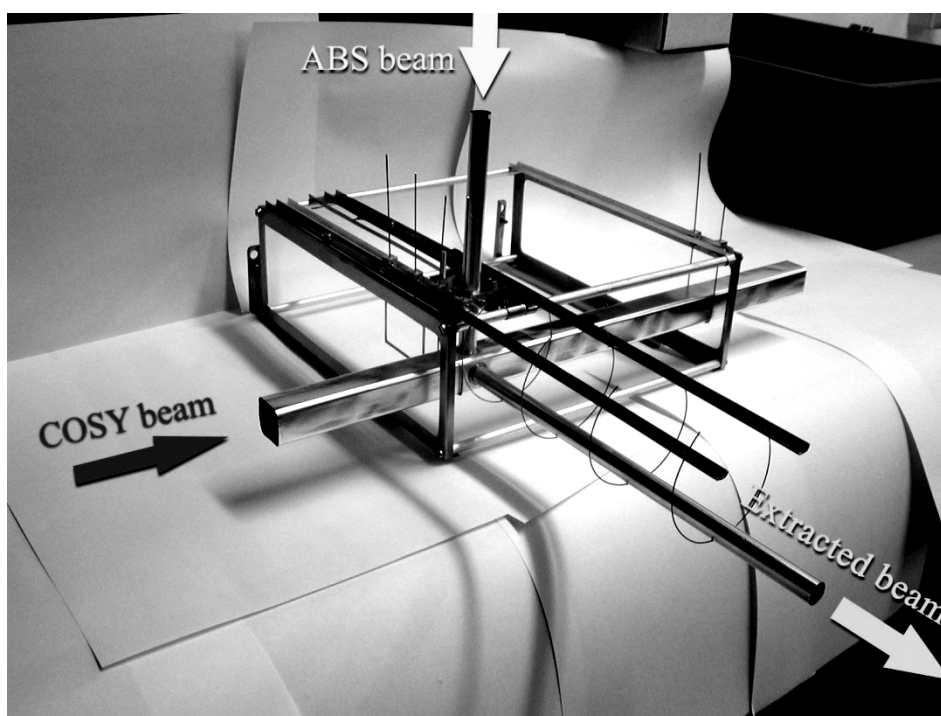


Рис. 33. Накопительная ячейка из алюминиевой фольги, покрытой черным политетрафторэтиленом для уменьшения деполяризации атомов

Скругленные углы трубки, расположенной вдоль пучка ускорителя, позволяют минимизировать число соударений частиц газа со стенками, а за счет уменьшения поперечного сечения до 300 мм^2 , что соответствует трубке с круглым сечением диаметром 19.5 мм, была увеличена плотность создаваемой мишени. Вертикальная трубка диаметром 10 мм и длиной 120 мм использовалась для заполнения ячейки атомарным водородом из источника. Из Рис. 33 видно, что накопительная ячейка, по сравнению с предыдущими прототипами (Рис. 14 и Рис. 32), кроме трубки для

²⁸ В данном случае использовался Тefлон с добавлением органических примесей, которые, как выяснилось после химического и спектрометрического анализа, адсорбировали водород во время нанесения и обжига, что отрицательно сказывалось на коэффициенте деполяризации.

поступления пучка атомов из ABS, имеет дополнительную горизонтальную трубку диаметром 10 мм, направленную перпендикулярно распространению обоих пучков. Она предназначена для извлечения части газа, создающего мишень, в поляриметр для последующего контроля поляризации во время проведения эксперимента. Длина этой трубки выбрана максимально возможной (230 мм), чтобы большая часть поступающего в нее газа передавалась для анализа поляризации в LSP. С противоположной стороны трубки, направленной к поляриметру, был расположен адаптер для подключения системы подачи неполяризованного газа, с помощью которой создавалась молекулярная газовая мишень для калибровки и проведения измерений.

5.2.2 Эксперимент с неполяризованной газовой мишенью

Протяженные мишени на ускорителе COSY всегда устанавливались в прямых секциях ускорителя параллельно пучку. В районе эксперимента ANKE, где возможно изменение траектории частиц в области спектрометра, до этого момента ни разу не осуществлялось проведение пучка через протяженную накопительную ячейку под ненулевым углом спектрометрического магнита. Для облегчения процесса проведения пучка ускорительной группой было предложено оптимизировать инжекцию без сдвига магнита (т.е. установить все три магнита на одной оси), и только после достижения высокой интенсивности ускоренного пучка через накопительную ячейку сместить систему магнитов на угол 9.2° .

Определение положения ускорительного пучка во время проведения эксперимента производилось при помощи диафрагмы с поперечным сечением $40 \times 25 \text{ мм}^2$. Измерения, сделанные в ходе инжекции в диафрагму, позволили определить размеры ускорительного пучка, которые не сильно отличались от полученных ранее. Для проведения пучка через накопительную ячейку с размерами $20 \times 20 \text{ мм}^2$ необходимо было уменьшить его размеры во время инжекции. Использование скреперов позволило добиться оптимальных размеров пучка в момент инжекции (16 мм в горизонтальном и 15 мм в вертикальном направлении) и достаточной интенсивности для последующего ускорения заряженных частиц через накопительную ячейку. Однако, даже при этих настройках, замена диафрагмы на ячейку при сохранении настроек фокусировки пучка ускорителя очень сильно сказывается на интенсивности пучка. Потеря частиц после однократной инжекции в накопительное кольцо составляла около 90 %. Использование электронного охлаждения на этапе инжекции позволило не только уменьшить размеры пучка, доведя

их до 13 мм по горизонтали и 11 мм по вертикали, но и значительно повысить его интенсивность.

Дополнительное увеличение количества частиц в накопительном кольце проводилось с помощью повторной многократной инжекции в ускоритель (Рис. 34). Сплошной линией на диаграмме показано количество частиц в кольце, посчитанное по формуле (15) с учетом разных частот обращения в момент инжекции и после ускорения, а пунктирной – напряжение на преобразователе тока.

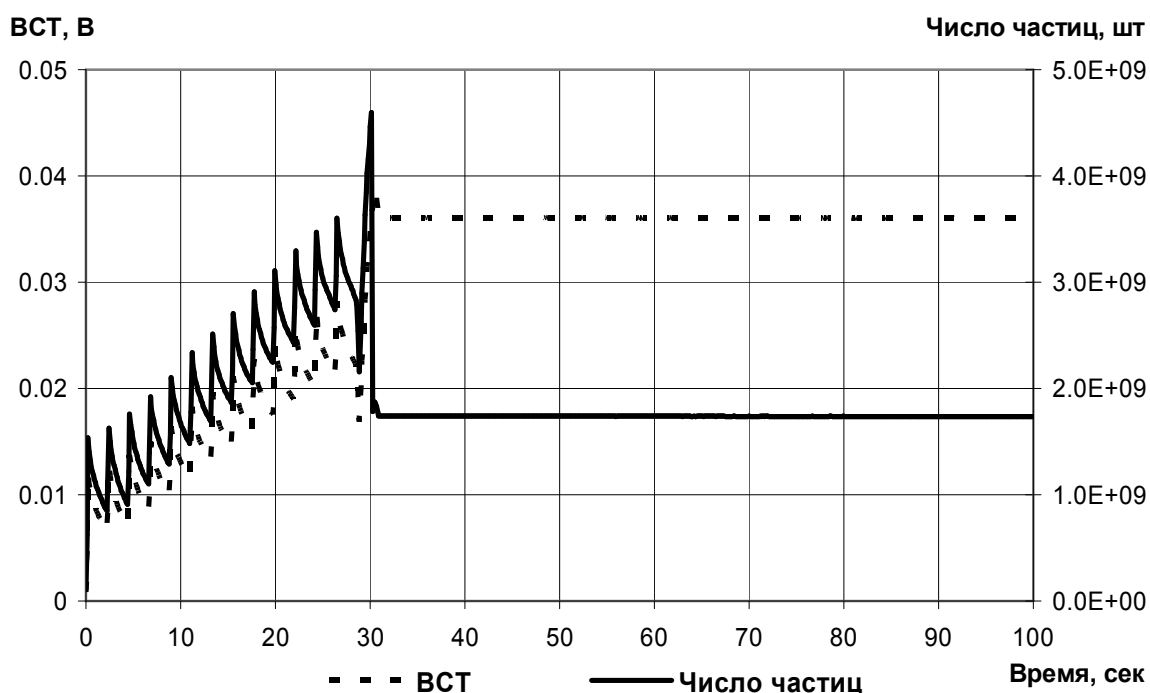


Рис. 34. Многократная инжекция в накопительную ячейку с последующим ускорением

Количество частиц, оставшихся в накопительном кольце при проведении через накопительную ячейку без газа и смещенном спектрометрическом магните D2 на угол 9.2°, уменьшается за счет искривления траектории пучка в длинной трубке мишени. Это может компенсироваться за счет использования повторной инжекции. Минимальное время между отдельными инжекциями, равное двум секундам, может использоваться для электронного охлаждения пучка.

Следует заметить, что при подаче калиброванного потока молекулярного водорода, создающего мишень с аналогичной создаваемой источником поляризованных атомов плотностью, количество частиц в накопительном кольце в момент окончания многократной инжекции не только не уменьшается, но и возрастало. Это может являться следствием более эффективной работы электронного охлаждения ускорительного пучка при инжекции в газовую мишень.

Результаты достигнутые во время оптимизации проведения пучка на этапе инжекции объединены в Табл. 5. В случае использования повторной инжекции в нулевом положении спектрометрического магнита D2 было зафиксировано наибольшее количество частиц, проведенных через накопительную ячейку. К сожалению, проблемы с ускорителем в тот момент заставили начать исследование сначала и детального рассмотрения этот этап не получил.

Табл. 5.

Количество частиц в накопительном кольце на этапе инжекции в ускоритель

Положение магнита D2	Проведение пучка	Количество протонов в накопительном кольце, $\cdot 10^9$ частиц		
		Диафрагма	Накопительная ячейка без газа	Накопительная ячейка с газом
0°	Электронное охлаждение	83	6.6	-
9.2°	Электронное охлаждение + Повторная инжекция	-	8.5	8.8

Из Рис. 34 видно, что после ускорения большая пучка часть выбывает из формирования. Не смотря на это, оптимизация процесса инжекции в накопительную ячейку позволила получить более $8.5 \cdot 10^9$ частиц во внутреннем кольце ускорителя COSY. Дальнейшие улучшения были направлены на снижение потерь в момент ускорения до энергии эксперимента. Как результат, наблюдалось уменьшение поперечного сечения пучка во время работы с ускоренным пучком. В Табл. 6 приведены максимальные значения количества частиц в накопительном кольце после ускорения протонного пучка до энергии 600 МэВ.

При нулевом положении спектрометрического магнита использование повторной инжекции позволило почти в шесть раз увеличить число ускоренных через накопительную ячейку частиц, по сравнению двукратным увеличением в случае использования одиночной инжекции. Из этого следует, что применение длительной повторной инжекции с одновременным электронным охлаждением позволяет избавиться от гало пучка, которое является одним из составляющих потерь при ускорении. Также эта процедура позволяет сформировать достаточно плотное ядро пучка, которое почти не смещается со своей траектории в процессе ускорения и позволяет ускорить до 80 % частиц, инжектируемых в накопительное кольцо.

Табл. 6.

Количество частиц в накопительном кольце после ускорения протонного пучка

Положение магнита D2	Проведение пучка	Количество протонов в накопительном кольце, $\cdot 10^9$ частиц		
		Диафрагма	Накопительная ячейка без газа	Накопительная ячейка с газом
0°	Электронное охлаждение	14	3.5	-
0°	Электронное охлаждение + Повторная инжекция	26	20	-
9.2°	Электронное охлаждение + Повторная инжекция	-	6.0	6.4

Проведение пучка с отклонением в области спектрометрического магнита на угол 9.2°, при использовании подхода, аналогичного проведению при нулевом положении, возможно искривление траектории пучка. Это непременно сказываться на его интенсивности из-за протяженной трубки мишени. Но даже в этом случае использование многократной инжекции с накопительной ячейкой увеличивает количество частиц в два раза, по сравнению с однократной инжекцией без смещения.

5.2.3 Выводы

Во время подготовки к сеансу на ускорителе был использован новый прототип накопительной ячейки для внутренней газовой мишени. Его размеры выбирались с учетом профиля инжектированного и ускоренного пучка в области установки мишени на ускоритель. За время проведения эксперимента с неполяризованной газовой водородной мишенью с накопительной ячейкой были выявлены следующие аспекты работы с ускорителем и достигнуты следующие результаты:

- использование многократной инжекции совместно с электронным охлаждением позволяет в 2 раза увеличить количество частиц, ускоренных во внутреннем кольце ускорителя COSY без мишени и в 6 раз с накопительной ячейкой без газа, установленной на пути пучка;
- при измерениях с ненулевым положением спектрометрического магнита протяженная мишень обрезает больше половины инжектируемых частиц, что

делает обязательным использование многократной инъекции для повышения интенсивности пучка ускорителя в последующих экспериментах;

- при смещении спектрометрического магнита использование газовой мишени не изменяет соотношения между количеством инжектируемых и ускоренных заряженных частиц по сравнению с мишенью не заполненной газом.

5.3. Поляризованная струйная газовая мишень

5.3.1 Приборы и методика измерений

Использование источника поляризованных атомарных пучков для создания струйной мишени является самым простым способом создания поляризованной газовой водороднодейтериевой мишени для эксперимента ANKE. Такой тип мишени, как и любой другой, обладает своими преимуществами и недостатками. Плюсами использования струйной газовой мишени являются:

- отсутствие дополнительных механизмов для позиционирования мишени (максимальная плотность находится на оптической оси источника);
- отсутствие держателей или стенок мишени;
- инжектируемые атомы, не испытывавшие взаимодействия с пучком ускорителя могут быть легко удалены из вакуумной камеры с помощью дополнительных вакуумных насосов или ловушек пучка.

Единственным недостатком струйной мишени, по сравнению с накопительной ячейкой, является низкая эффективная плотность мишени, создаваемой газовой струей. Это один из важных параметров, определяющий качество создаваемой мишени. Наряду с поляризацией и степенью диссоциации важно получать высокую плотность струйной мишени. Так, например, во время предыдущего сеанса на ускорителе COSY с неполяризованной газовой мишенью и накопительной ячейкой было проведено несколько пробных циклов с накопительной ячейкой, заполненной газом из источника поляризованных атомов. Это являлось первым шагом на пути к проведению физических исследований с использованием ABS.

Согласно описанию в главе 2.3, распределение плотности газа в накопительной ячейке имеет вид треугольника с вершиной, расположенной на оси источника поляризованных атомов. Соответственно эта область в создаваемой газовой мишени будет являться вершиной большей части детектируемых частиц после взаимодействия пучка ускорителя с атомами мишени. Чтобы провести калибровку системы детекторов в область максимальной плотности газовой мишени была помещена узкая вертикальная

полосковая полиэтиленовая мишень. Результаты проведенной калибровки (Рис. 35) показали, что вершину реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ для такой мишени система детекторов эксперимента ANKE может восстановить с точностью $\sigma \sim 3.5 \div 4$ см по оси Z (параллельно пучку ускорителя) и $\sigma \sim 0.8$ см в перпендикулярной плоскости.

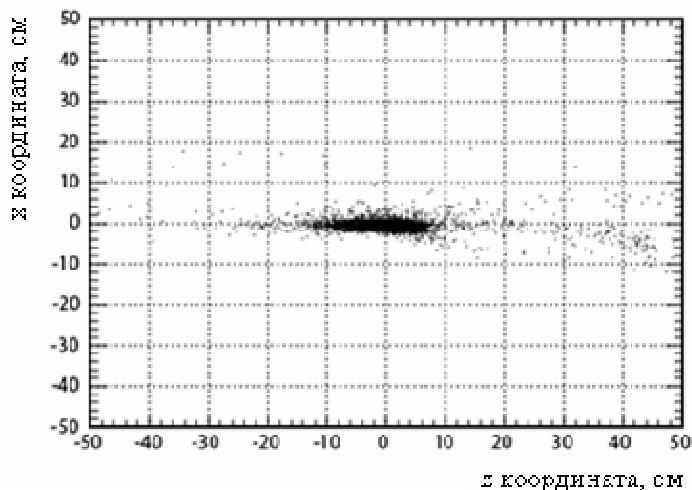


Рис. 35. Реконструкция вершины реакции («точечная» пленочная мишень – CH_2)

Калибровка детекторов, проведенная с «точечной»²⁹ пленочной мишенью, позволила уменьшить загрузку системы сбора и обработки информации. Это позволило снизить детектирование фоновых событий, но не решило всех проблем с мишенью. При работе с накопительной ячейкой атомы, вылетают из нее во всех возможных направлениях – вверх, и в обе стороны вдоль ускорительного пучка. Ухудшающаяся откачка по мере приближения к спектрометрическому магниту (внутри него невозможно разместить вакуумные насосы) одновременно с увеличивающимся акцептансом вызывало дополнительное повышение фоновых событий при удалении от мишени. В верхней части Рис. 36 показано распределение реконструированной вершины реакции для протяженной газовой мишени. Поверхностный анализ полученной зависимости плотности распределения вершин событий позволил выделить две области. Первая из них, расположенная слева, является результатом взаимодействия пучка ускорителя с газом, заполняющим мишень. Для этого случая является характерным более широкое распределение по оси X , обусловленное более плотной газовой мишенью по сравнению с вакуумом ускорительного кольца вокруг мишени. Вторая область, расположенная справа, обусловлена взаимодействием остаточных частиц мишени, вылетевших в направлении магнита D2, с ускорительным

²⁹ Точечная по оси Z (вдоль распространения пучка). Полоска была расположена вертикально в координате $Z = 0$.

пучком. Судить об этом позволяет сравнение счетов в этой области с газом в накопительной ячейке и без газа (нижнее распределение на Рис. 36). Похожая картина должна ожидаться при использовании источника поляризованных атомов как струйной мишени. В этом случае, качественным отличием будет резкое снижение количества зарегистрированных событий в области мишени на два порядка из-за отсутствия накопительной ячейки. Это сделает невозможным прямое исследование без дополнительного подавления фоновых событий и улучшения вакуума в камере ускорителя.

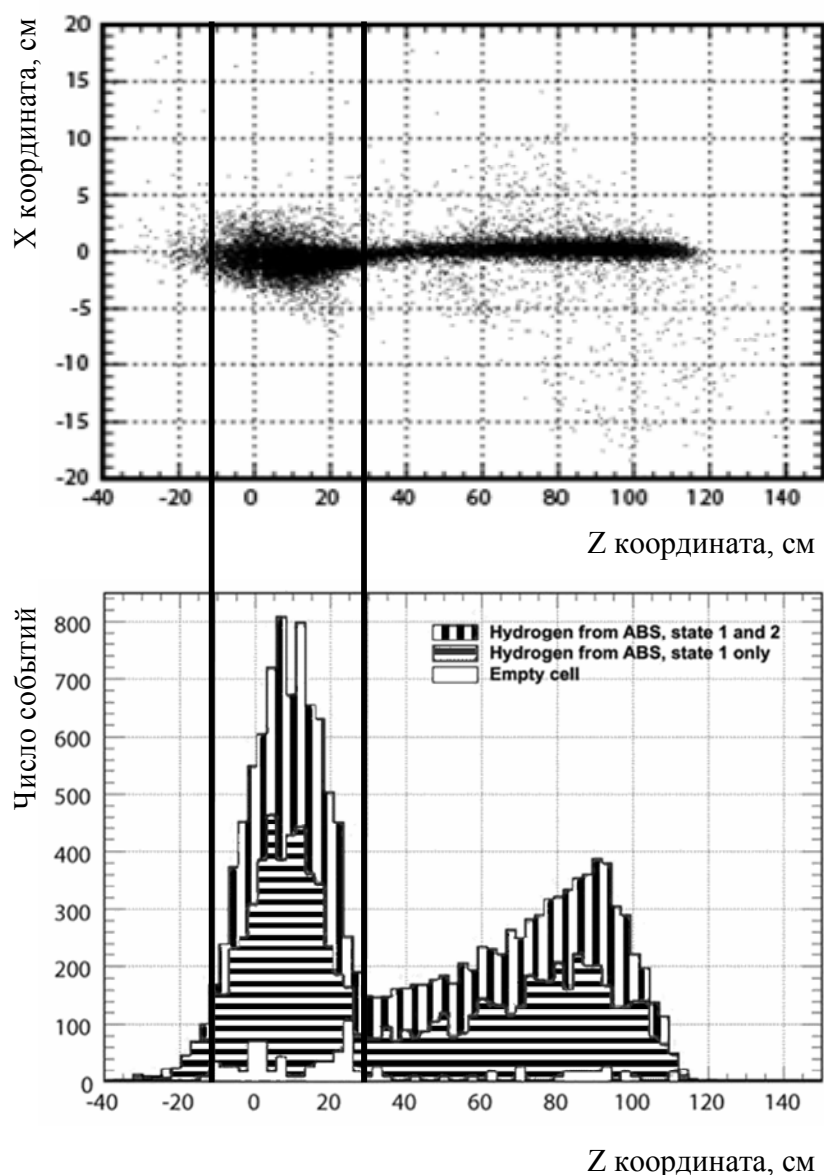


Рис. 36. Реконструкция вершины реакции с газовой мишенью и накопительной ячейкой заполненной атомарным неполяризованным (вертикальная штриховка) и поляризованным (горизонтальная штриховка) водородом. Без штриховки – фоновые счета

Вторым тестом с накопительной ячейкой и источником поляризованных атомов являлось сравнение распределения плотности событий вдоль оси распространения

ускорительного пучка. Для этого использовался поляризованный (состояние $|1\rangle$) и неполяризованный (состояния $|1\rangle + |2\rangle$) водородный пучок. Ранее было показано (см. главу 4.2.1), что эти изменения должны повлиять на общее давление в камере ускорителя. Если пучок источника хорошо сфокусирован, то пропорции должны сохраняться для разных случаев заполнения мишени. Действительно, как показано в нижней части Рис. 36 соотношение между поляризованным и неполяризованным случаем приблизительно равно двум в обеих областях. Поэтому можно сделать вывод о необходимости улучшения откачки в вакуумной камере ускорителя для того, чтобы в эксперименте со струйной мишенью не появлялся «хвост» от частиц, создающих фон.

Для решения проблем с дополнительной откачкой пучка ABS была создана специальная крио-ловушка (Рис. 37). Она представляла собой медную коробку размерами $72 \times 138 \times 189.5 \text{ мм}^3$ с отверстием диаметром 20 мм, расположенным на оси источника.

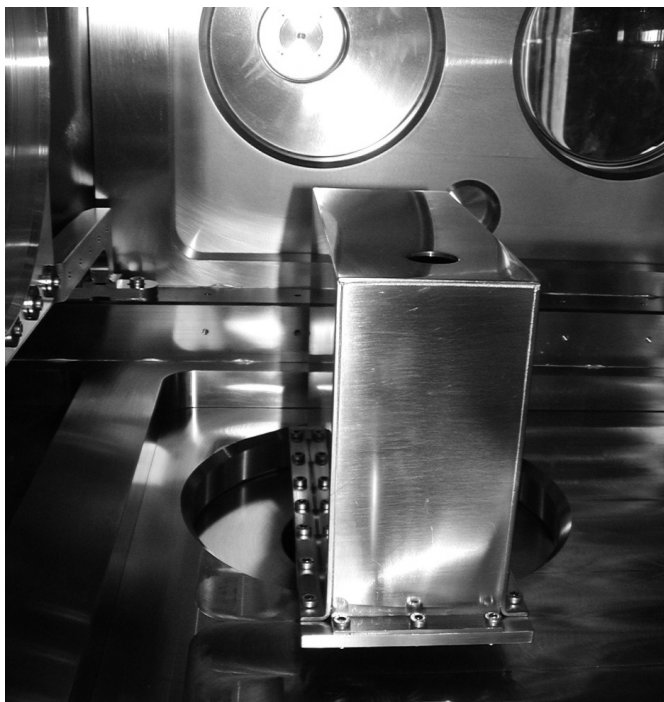


Рис. 37. Фотография крио-ловушки для газовой струи ABS в камере для установки мишеней

Снаружи крио-ловушка, отполированная и покрытая тонким слоем золота для уменьшения дополнительного радиационного нагрева стенок, опиралась на первую ступень крио-охладителя. Таким образом, температура внешней коробки поддерживалась при 70 К. Внутри нее по краям были расположены две крио-панели, аналогичные используемым в крио-насосах Leybold COOLVAC 800. С одной стороны, обращенной внутрь, панели плотно покрыты адсорбирующим углем, способным удерживать попадающие на него атомы водорода. В рабочем диапазоне температур

крио-панелей нагрев на один градус вызывает уменьшение скорости откачки для водорода на порядок, поэтому крио-панели размещались на медном тепловом мосту, соединяющем их со второй ступенью охладителя для поддержания температуры крио-панелей около 10 К. Единственное отверстие в медной коробке, для прохождения пучка источника, имело размеры 20мм, рассчитанные на попадание в него 85 – 90 % пучка атомов ABS.

5.3.2 Проведение измерений с неполяризованной газовой мишенью

Первыми физическими исследованиями, проведенными с использованием источника ABS в эксперименте ANKE на ускорителе COSY, были измерения с поляризованной струйной водородной газовой мишенью и неполяризованным протонным пучком с энергией 600 МэВ. Давление остаточного газа в камере ускорителя при проведении пучка заряженных частиц и отключенном источнике поляризованных атомов находится на уровне $4.0 \cdot 10^{-9}$ мбар. Открытие прерывателя пучка ABS ухудшает давление в камере для установки мишеней на два порядка, т.к. поток атомов в одном сверхтонком состоянии водорода достигает $3 \cdot 10^{16}$ ат/с. Предварительный анализ данных предыдущих экспериментов показал, что без дополнительных улучшений вакуума в камере ускорителя фоновые счета в детекторах будут полностью перекрывать данные, полученные от взаимодействия частиц ускорительного пучка со струйной мишенью, и прямые измерения невозможны.

Использование крио-ловушки позволяет снизить давление в камере для установки мишеней при включенном источнике атомарного пучка на один порядок до $3.7 \cdot 10^{-8}$ мбар, т.е. на один порядок по сравнению с работой без нее. Это позволит идентифицировать продукты реакции, получившиеся в результате взаимодействия пучка ускорителя со струей поляризованного газа из источника.

Из распределения плотности восстановленной вершины реакции (Рис. 38) видно, что плотность детектируемых вершин реакции распада, полученная в результате взаимодействия с пучком ABS, всего лишь в пять раз превышает фон. По оси Z, ноль которой совпадает с оптической осью источника поляризованных атомов, отложена координата вдоль направления распространения пучка ускорителя. Просуммировав события в области мишени, за вычетом стабильного уровня фоновых событий, можно получить интегральную плотность струйной мишени. В данном случае, она равнялась $(1.5 \pm 0.1) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

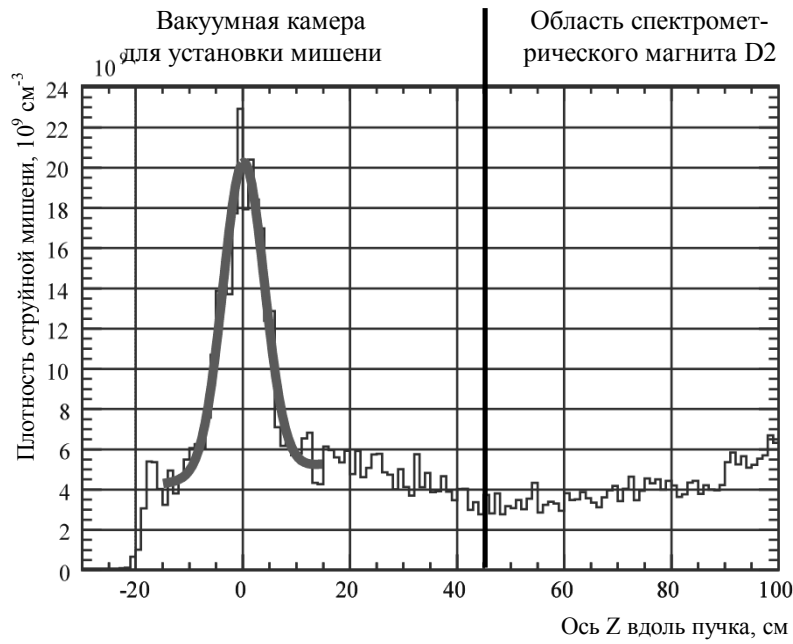


Рис. 38. Восстановленное распределение плотности вершин реакции $pp \rightarrow d\pi^+$

Оценку плотности струйной мишени в эксперименте можно провести, используя следующую формулу:

$$t_{\tilde{H}_{jet}} = \frac{4 \cdot I_{\tilde{H}}}{\pi \cdot \bar{v}} \cdot d_{jet}, \quad (33)$$

где I – интенсивность пучка, d_{jet} – диаметр пучка, $\bar{v}$ – средняя скорость атомов в пучке.

Воспользовавшись калибровочной кривой (Рис. 31), полученной с помощью системы подачи неполяризованного газа и компрессионной трубки, можно оценить интенсивность создаваемого источником пучка поляризованных атомов водорода. Известно, что средняя скорость атомов водорода в пучке при температуре сопла 60 К равна $1.5 \cdot 10^5$ см/с [50], а его диаметр в месте пересечения с пучком ускорителя имеет те же размеры, что и протонный пучок COSY с энергией 600 МэВ – 1.8 ± 0.1 см. Подставив эти значения в формулу (33) вместе с текущей интенсивностью источника $(3.4 \pm 0.1) \cdot 10^{16}$ ат/с, получим эффективную плотность поляризованной водородной струйной мишени равную $(1.6 \pm 0.1) \cdot 10^{11}$ ат/см².

Полученная интегральная плотность мишени, в пределах погрешности измерений хорошо соотносится с расчетной. Небольшое различие между предсказанной и реальной эффективной плотностью струйной мишени может быть вызвано не полным перекрытием обеих пучков в точке их взаимодействия, а также смещенной траектории пучка ускорителя от идеальной оптической оси.

5.3.3 Выводы

С целью проведения первого физического эксперимента с поляризованной газовой водородной мишенью на ускорителе COSY были выполнены следующие задачи:

- проведена калибровка детекторов эксперимента ANKE для нового положения центра мишени;
- улучшена методика анализа данных, позволившая снизить систематические ошибки и частично избавиться от фонового счета;
- разработана и создана крио-ловушка для пучка ABS, с помощью которой были улучшены вакуумные условия в камере для установки мишеней на эксперимент ANKE.

Произведенные улучшения позволили выделить от фоновых события, полученные в результате взаимодействия пучка с газовой струей. Полученная в результате эксперимента интегральная плотность газовой струйной мишени хорошо соотносилась с расчетной и составляла $(1.5 \pm 0.1) \cdot 10^{11}$ ат/см².

5.4. Эксперимент с двойной поляризацией

5.4.1 Подготовка и проведение эксперимента

Проведение двойного поляризационного эксперимента на ускорителе COSY было разделено на четыре части, из которых первые три являлись подготовительными и заключались в следующем:

- проведение ускоренного пучка через протяженную накопительную ячейку при сдвиге спектрометрического магнита на угол 5.5°;
- определение оптимальных настроек для получения максимальной интенсивности ускоренного пучка;
- использование поляризованного дейтронного пучка ускорителя и неполяризованной газовой мишени, определение поляризации в результате анализа полученных данных и сравнение со значениями, полученными путем прямого измерения с помощью поляриметра для частиц с низкой энергией (обозначен LEP³⁰ на Рис. 9);

³⁰ Low Energy Polarimeter.

- использование неполяризованного ускорительного пучка и поляризованного атомарного пучка, предварительный анализ полученных данных и калибровка системы детекторов.

Кроме основных задач на протяжении всего сеанса на ускорителе совместно с имеющейся детекторной системой эксперимента ANKE был использован силиконовый детектор траекторий частиц (STT³¹), разработанный и созданный в лаборатории института ядерной физики научно-исследовательского центра г. Юлих. С его помощью появилась возможность наблюдать медленные протоны, вылетающие под прямым углом к оси пучка ускорителя.

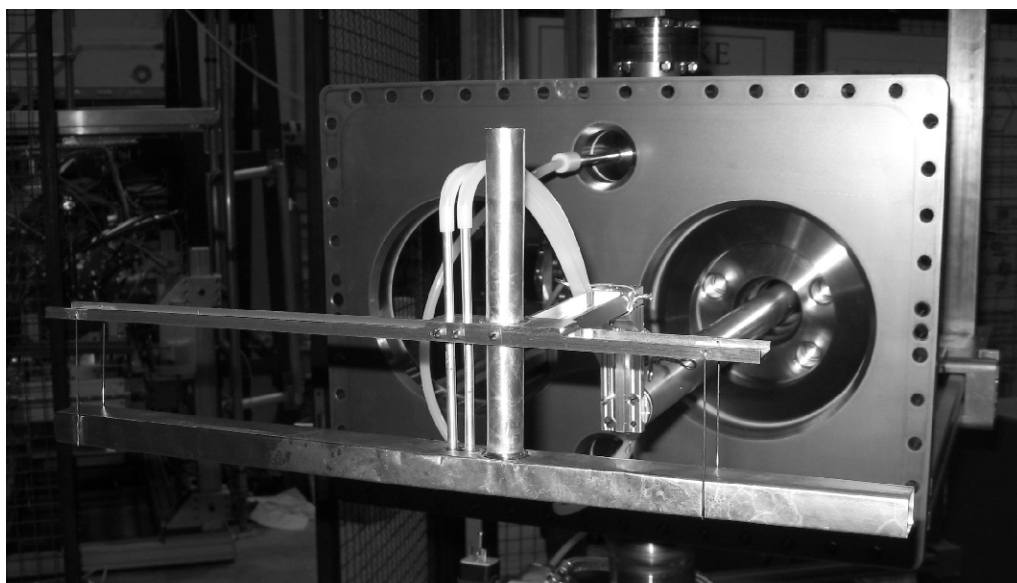


Рис. 39. Система поддержки и перемещения накопительной ячейки в камере ускорителя после проведения эксперимента. Дополнительные трубки использовались для подачи неполяризованного газа для калибровок во время эксперимента

Измененная система передвижения накопительной ячейки (Рис. 39) не предполагала наличия диафрагмы для юстировки положения пучка, как в ранних экспериментах. Достоинств у этой поддержки было несколько:

- простота юстировки начального положения накопительной ячейки вне камеры ускорителя, что позволило подготовить мишень к установке на ускоритель в более короткие сроки;
- наличие возможности максимально выдвинуть всю систему поддержки из области прохождения пучка, тем самым сохранить время для переключения к использованию кластерной мишени. Длинный конец накопительной ячейки, находившийся ближе к спектрометрическому магниту D2 чем ось

³¹ Silicon Tracking Telescope.

кластерной мишени, в полностью выдвинутом из вакуумной камеры положении не препятствовал детектированию частиц.

Из опыта предыдущих экспериментов по проведению ускорительного пучка через накопительную ячейку был сделан вывод, что нет необходимости в вертикальном смещении ячейки при постановке на пучок, а все неточности при проведении пучка могут быть скомпенсированы магнитной системой ускорителя. Поэтому система перемещения в вертикальной плоскости была модифицирована для использования в горизонтальной плоскости вдоль оси распространения пучка ускорителя. Две степени свободы в горизонтальной плоскости позволили при первой установке мишени в камеру ускорителя определить положение максимума интенсивности пучка ABS, т.к. интенсивность счета в переднем детекторе должна увеличиваться с повышением плотности мишени, а перемещение вдоль пучка ускорителя не сказывается на настройках проведения пучка. Недостатком данной системы поддержки является отсутствие диафрагмы для оптимизации, что делает процесс настройки параметров ускорителя с последующей установкой накопительной ячейки на пути пучка более сложным.

5.4.2 Интенсивность ускорительного пучка

Достижение максимальной светимости в эксперименте с поляризованной газовой мишенью может производиться не только за счет увеличения плотности создаваемой мишени, но и повышением интенсивности пучка ускорителя. При энергии дейтронного пучка в 1.2 ГэВ уже невозможно использовать электронное охлаждение, но еще нельзя использовать стохастическое охлаждение. Это делает невозможным улучшение параметров пучка после ускорения до энергии эксперимента, поэтому вся оптимизация производилась до этого момента.

С другой стороны, в камере для установки мишени на расстоянии 10 мм от ближней стенки ячейки и 20 мм от центра распределения плотности газа в мишени был расположен трековый силиконовый детектор. Это накладывало дополнительные ограничения на интенсивность инжекции в накопительную ячейку. Во время оптимизации проведения пучка и первом использовании мишени, пучок ускорителя должен иметь очень низкую интенсивность. Это необходимо для того, чтобы уровень фоновых событий, вызванный столкновениями со стенками ячейки, не создавал большой нагрузки детекторной системы. Последовательное увеличение интенсивности до уровня одиночной инжекции достигалось использованием метода микропульсаций, позволяющим контролировать, какая часть пучка в момент инжекции будет оставаться

в накопительном кольце. Оптимизация проведения пучка через накопительную ячейку была завершена, когда количество дейтронов в кольце после одиночной инжекции составляло 10^9 . Такой интенсивности не достаточно для достижения необходимой светимости, которая позволит провести эксперимент. Поэтому, для дополнительного повышения интенсивности пучка использовалась многократная инжекция.

Основной проблемой при ускорении пучка после нескольких инжекций в ускоритель с установленной накопительной ячейкой является сохранение числа частиц на уровне, с которого начиналось ускорение. После одиночной инжекции и электронного охлаждения пучок, даже если он не идеально располагается на оптической оси ускорителя, смещается к ее центру. С использованием многократной инжекции количество частиц в накопительном кольце растет, и, до начала ускорения, они формируют пучок, занимая все свободное пространство, ограниченное стенками накопительной ячейки. Отсутствие возможности хорошо компенсировать орбиту всех частиц в момент ускорения может приводить к сильному горизонтальному смещению центра пучка и, как следствие, выбыванию частиц из-за столкновений со стенками.

Оптимизацией процесса многократной инжекции является корректировка скорости наращивания частоты путем внесения индивидуальных поправок в магнитную систему ускорителя. В этих целях для каждого магнита, участвующего в процессе удержания частиц на оптимальной орбите на всем протяжении работы ускорителя, были внесены поправки в скорость изменения магнитного поля и его величину. Это позволило добиться минимальных потерь при ускорении. На Рис. 40 сплошной линией показано количество частиц, пересчитанное для частоты вращения на каждом этапе работы ускорителя, а пунктирной – напряжение, измеренное на преобразователе тока пучка. В процессе оптимизации ускорения было установлено, что при наличии газа в накопительной ячейке (включенный атомарный пучок ABS или молекулярная мишень, созданная с помощью UGSS) максимальная интенсивность пучка после 20 минут инжекции составляла 50 % от интенсивности, которую можно было получить при выключенной мишени. А если включать подачу газа в мишень только после ускорения, интенсивность упадет не более чем на 5 %, что очень сильно скажется на протяжении 30-ти минутного цикла работы с мишенью. Окончательный цикл работы выглядел следующим образом: вначале на протяжении 20-ти минут проводились повторные инжекции в накопительное кольцо с интервалом 10 секунд для электронного охлаждения, и после ускорения через минуту включалась подача газа в накопительную мишень, после чего на протяжении почти 30-ти минут происходил набор данных.

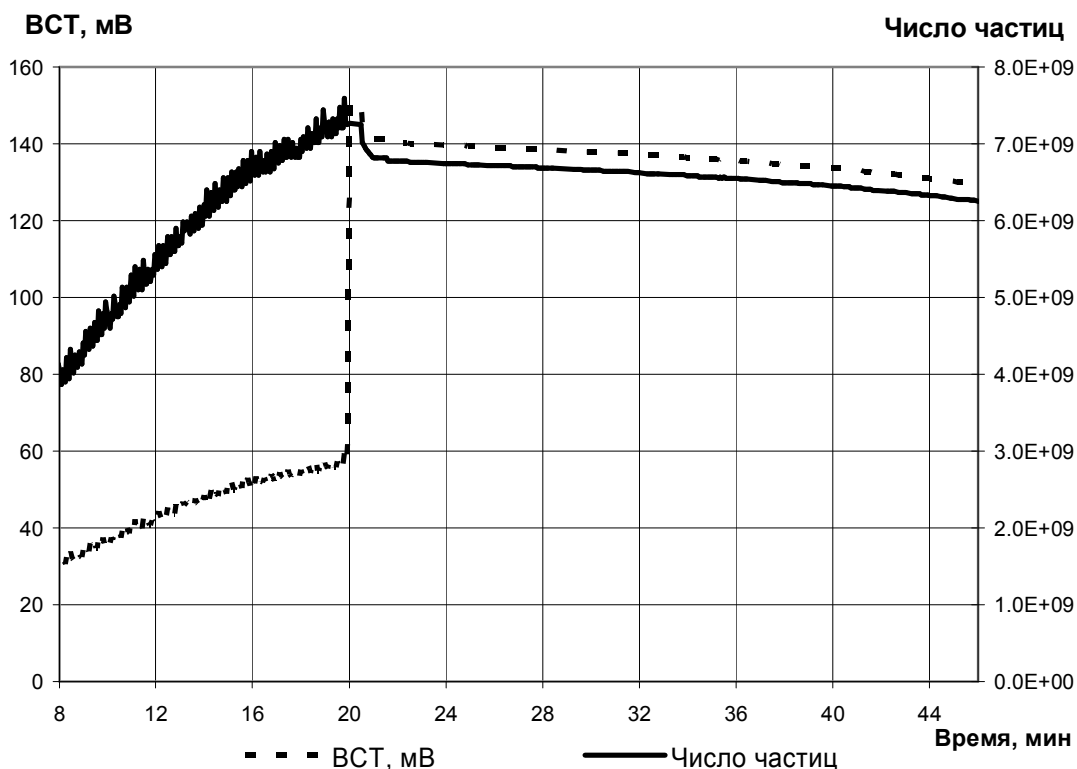


Рис. 40. Многократная инжекция в накопительную ячейку без газа с последующим ускорением, пояснения даны в тексте

Время до включения подачи газа использовалось для обрезания гало пучка ускорителя, снижая тем самым уровень фоновых событий в получаемых данных. После окончания ускорения в направлении оптического центра пучка двигались скреперы, расположенные в других секциях ускорителя. Кроме того, во время инжекции заряженных частиц в ускоритель все детекторы эксперимента ANKE находятся в режиме ожидания и переводятся в рабочий режим только после получения специального сигнала, отправляемого системой управления ускорителем после того, как частицы были ускорены до заданной энергии.

В результате совместного использования всех возможных методик повышения интенсивности ускоренного пучка было получено $7 \cdot 10^9$ поляризованных протонов во внутреннем кольце COSY. Эта величина является рекордной даже для обычной работы ускорителя с поляризованным пучком без накопительной ячейки и смещением спектрометрического магнита.

5.4.3 Измерение поляризации мишени

5.4.3.1 Методика измерения с использованием поляриметра

Одним из способов измерения поляризации пучка атомарного водорода или дейтерия является использование поляриметра [47], работающего на эффекте лэмбовского сдвига. В лабораторных условиях в отсутствии сильных внешних магнитных полей измерения можно провести не только на качественном уровне, но и количественном. Результат таких измерений можно получить в течении нескольких минут, что очень удобно для настройки блоков сверхтонких переходов и проверки работоспособности источника поляризованных атомов.

Принцип работы такого поляриметра (Рис. 41) заключается в следующем. Пучок атомов из источника попадает в ионизатор, где происходит ионизация электронным ударом. Сильное магнитное поле, создаваемое соленоидом внутри ионизационной колонны, позволяет сохранить направление ядерного спина в процессе ионизации, а также служит для увеличения эффективности ионизации.

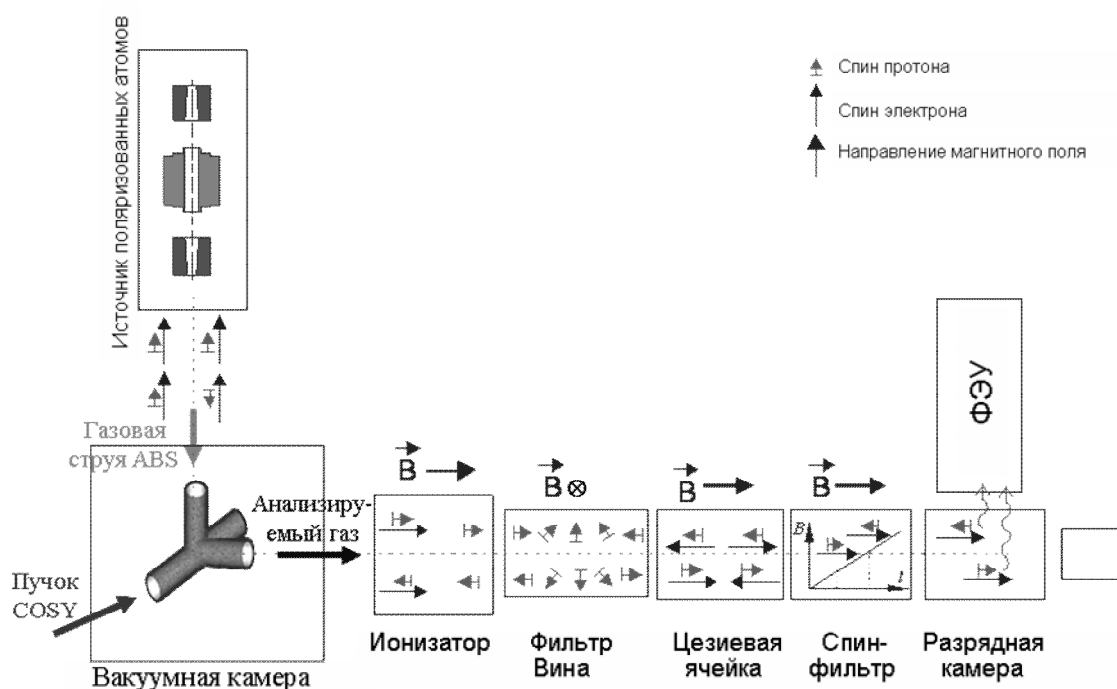


Рис. 41. Схема установки для измерения поляризации пучка

Существует несколько вариантов использования поляриметра для анализа поляризации вылетающих атомов из ABS:

- поляриметр разделен на две части вакуумной камерой и ионизатор установлен сразу после источника поляризованных атомов;

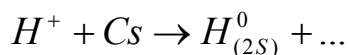
- все компоненты поляриметра расположены друг за другом, как показано на Рис. 41, и ионизатор установлен после вакуумной камеры.

Первый вариант может использоваться для измерения поляризации атомов, вылетающих из источника, т.к. в этом случае хорошо сфокусированный пучок атомов сразу попадает в ионизатор. Интенсивность при таком измерении будет намного выше, чем во втором случае, когда в ионизатор попадает только небольшая часть анализируемого газа мишени и, в зависимости от внутреннего покрытия накопительной ячейки, величина поляризации может уменьшаться за счет деполяризации на стенках мишени. Для работы с вертикально установленным ионизатором вместо накопительной ячейки необходимо использовать электростатический дефлектор для поворота вертикального пучка ионов на 90° .

Поскольку при повороте пучка в электрическом поле направление спина остается неизменным, то поляризация пучка изменяется с продольной на поперечную. Известно [52], [53], что конструкция цезиевой ячейки, необходимой для образования атомов в 2S метастабильном состоянии, требует горизонтального расположения компонент поляриметра. Таким образом, необходимо совершить поворот спина ионов на 90° чтобы поляризация пучка оставалась продольной.

Для этого в конструкцию поляриметра был включен фильтр Вина, представляющий собой систему ортогональных электрического и магнитного полей. Помимо вращения плоскости поляризации фильтр Вина действует и как скоростной фильтр, что позволяет существенно подавить фон, создаваемый ионами H_2^+ , образовавшимися в результате рекомбинации атомарного водорода на поверхности конструктивных элементов ионизатора.

Продольно поляризованные ионы, попадая в цезиевую ячейку, в ходе реакции обмена зарядами с атомами цезия образуют нейтральные атомы в 2S метастабильном состоянии:



Затем пучок проходит через спин-фильтр, который, в зависимости от величины магнитного поля, пропускает атомы с $m_j = +1/2$ и определенным m_l , а атомы с $m_j = -1/2$ при этом разряжаются в основное состояние. Попад в неоднородное электрическое поле в разрядной камере, метастабильные атомы переходят в основное состояние, испуская фотон (линия Ly- α). Таким образом, измерив число испущенных фотонов как функцию магнитного поля в спин-фильтре (Рис. 42), которое пропорционально

заселенности уровней с определенным m_I можно определить поляризацию пучка на входе в ионизатор [54].

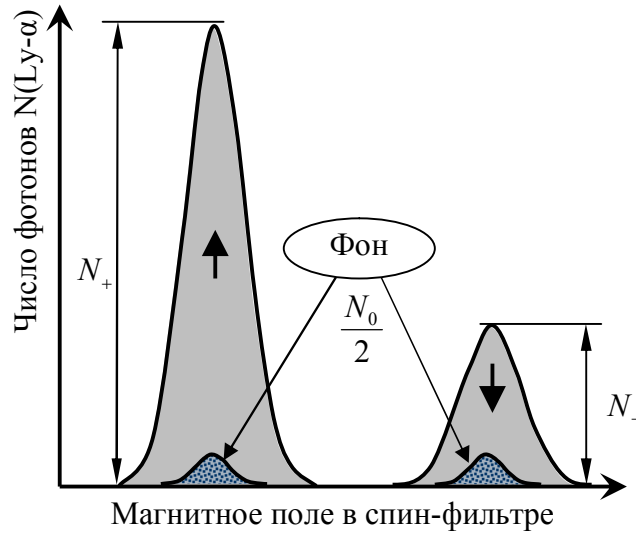


Рис. 42. Зависимость числа Ly-α фотонов от магнитного поля в спин-фильтре

В общем случае, поляризация пучка атомного водорода находится следующим образом:

$$P = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}, \quad (34)$$

где N_+ – количество фотонов, испущенных атомами водорода в состоянии $|1\rangle$ ($m_j = +1/2$, $m_I = +1/2$), а N_- – в состоянии $|2\rangle$ ($m_j = +1/2$, $m_I = -1/2$).

Определение поляризации атомарного пучка должно проводиться с учетом неполяризованного фона, присутствие которого обусловлено наличием остаточного газа. С этой целью пучок останавливался прерывателем, расположенным в последней камере ABS, и производились фоновые измерения. В этом случае левый и правый пики (Рис. 42) будут иметь одинаковую амплитуду ($N_0/2$). Тогда поляризация атомарного водорода будет определяться так

$$P = \frac{(N_+ - N_0/2) - (N_- - N_0/2)}{(N_+ - N_0/2) + (N_- - N_0/2)} = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_- - N_0} \quad (35)$$

Следует отметить, что максимальная эффективность каждого отдельного элемента поляриметра не достигает 100 %, поэтому измеренная поляризация пучка метастабильных атомов может отличаться от исходной поляризации атомарного пучка на входе в ионизатор на 10 ÷ 15 %. Тем не менее, в результате метрологических измерений были определены поправочные коэффициенты, позволившие уточнить

полученные значения поляризации для различных состояний атомарного водородного и дейтериевого пучка. Полученные результаты [55] объединены в Табл. 7.

Табл. 7.

Количество частиц в накопительном кольце после ускорения протонного пучка

Газ	Тип поляризации	Переходы	Состояния	Величина
водород	векторная	MFT 2→3	$ 1\rangle$	$P_z = +0.89 \pm 0.01$
		MFT 2→3, WFT 1→3	$ 2\rangle$	$P_z = -0.96 \pm 0.01$
дейтерий	векторная	MFT 3→4, SFT 2→6	$ 1\rangle$	$P_z = +0.73 \pm 0.05$
		MFT 3→4, WFT 1→4, WFT 2→3	$ 3\rangle$	$P_z = -0.82 \pm 0.06$
	тензорная	WFT 1→4, SFT 2→6	$ 1\rangle + 3\rangle$	$P_{zz} = +0.77 \pm 0.06$
		WFT 1→4, SFT 3→5	$ 2\rangle$	$P_{zz} = -1.17 \pm 0.08$

Установка источника поляризованных атомов на эксперимент ANKE предусматривает наличие вакуумной камеры с установленной в ней накопительной ячейкой между ионизатором и источником атомарного пучка. В таком случае поляриметр можно использовать в разной конфигурации. Расположив все компоненты поляриметра в горизонтальной плоскости, как показано на Рис. 41, можно анализировать только часть газа, вылетающего из мишени в ионизатор, но данные измерения можно производить постоянно без прерывания эксперимента. Иным способом является частично вертикальное расположение компонент поляриметра. В таком случае в ионизатор будет попадать большее количество частиц, т.к. если убрать накопительную ячейку, то до входа в ионизатор будет долетать до 30 % атомов, тогда как при горизонтальном расположении из ячейки входа в ионизатор достигает только 5 % частиц мишени.

В эксперименте было решено использовать второй вариант установки компонент поляриметра. Это потребовало создания дополнительной дефлекторной камеры с фокусирующими и отклоняющими линзами.

5.4.3.2 Измерение поляризации во время проведения эксперимента

Распределение магнитных полей вблизи спектрометрического магнита D2 во время проведения эксперимента не соответствовало расчетной карте магнитного поля, поэтому для корректной работы поляриметра и сохранения поляризации были необходимо экранировать некоторые его компоненты. Однако суперпозиция полей внутри ионизатора и на его выходе, где практически невозможно установить магнитную защиту из-за отсутствия свободного места, искажала траекторию прецессии спина атома и, результат, полученный при включенном спектрометрическом магните, кардинально отличался от предсказанного.

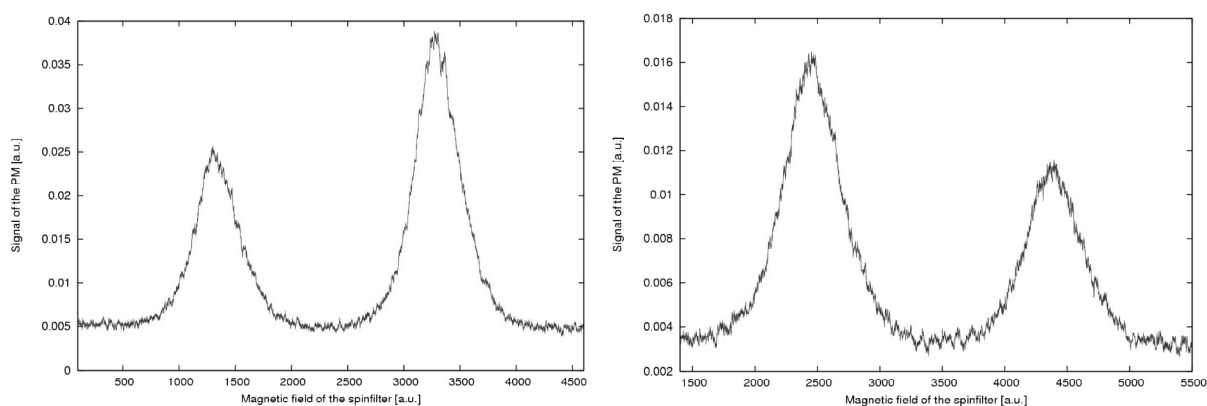


Рис. 43. Измеренное распределение Ly- α фотонов с помощью ФЭУ. Слева показано распределение измеренных фотонов при включенном блоке MFT (состояние $|1\rangle$), справа – включены оба блока сверхтонких переходов MFT и WFT (состояние $|3\rangle$)

На Рис. 43 видно, что при включении блоков сверхтонких переходов в источнике таким образом, чтобы получить положительную поляризацию атомов на выходе из источника, наблюдалась картина, ожидаемая в случае отрицательной поляризации. Это происходило потому, что спин атома сильным внешним магнитным полем поворачивался более чем на 90° в противоположную сторону, и, без использования второго фильтра Вина было невозможно изменить направление оси вращения на необходимый угол. К тому же максимальная поляризация, измеренная в таких условиях, не превышала 25 %. Поэтому было решено использовать поляриметр в качестве устройства, контролирующего стабильность работы источника и измеряющего асимметрию поляризации. Данные измерения проводились ежедневно на протяжении всего эксперимента. Достигнутые результаты представлены на Рис. 44.

Из-за невозможности прямых измерений с поляриметром анализ поляризации проводился из экспериментальных данных. Для того, чтобы достичь оптимального соотношения начальной интенсивности пучка и затраченного на инъекцию времени,

процесс инжекции поляризованных дейтронов в накопительное кольцо с использованием многократной инжекции и электронного охлаждения занимал 20 минут. Поэтому продолжительность одного рабочего цикла ускорителя приближалась к одному часу, чтобы повысить коэффициент использования ускорительного времени. С одной стороны это позволило достигнуть высокой интенсивности, но с другой – требовало большей стабильности от источника поляризованных атомов. Чтобы снизить погрешность, вызванную нестабильностью ABS, поляризация создаваемого пучка менялась каждые 5 секунд при помощи переключения блока сверхтонких переходов WFT. Это уменьшило использование времени с ускоренным пучком на 10 %, но изменение интенсивности и дополнительные погрешности, вносимые в измерения источником атомарного газового пучка, не сказывались на полученных результатах и были меньше статистической ошибки в эксперименте.

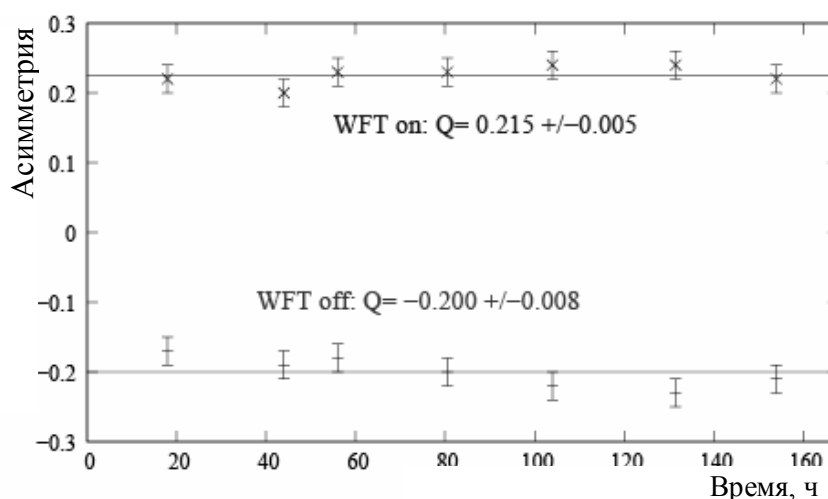


Рис. 44. Асимметрия поляризации, измеренная с помощью поляриметра. Положительные значения соответствуют отрицательной поляризации, в отрицательные – положительной

Представленная методика позволяет сделать быстрый анализ и, основываясь на полученных данных одного цикла работы ускорителя, с хорошей точностью оценить поляризацию, полученную на этапе подготовки и настройки ускорителя, а также во время проведения эксперимента. Используя моментальный анализ поляризации можно судить о достигнутых результатах и, если результат не оправдывает ожиданий, до завершения эксперимента можно предпринимать попытки повышения поляризации источника или иные улучшения.

5.4.3.3 Выводы

Подготовка к проведению эксперимента с двойной поляризацией показала, что поляриметр, работающий на эффекте лэмбовского сдвига, в условиях сильного

внешнего магнитного поля спектрометрического магнита не способен измерить абсолютную поляризацию пучка атомов ABS. С его помощью можно измерять только относительное изменение поляризации. В эксперименте поляриметр использовался для ежедневного контроля асимметрии поляризации мишени, и на протяжении всей работы с поляризованной мишенью были получены следующие результаты:

$$Q_+ = -0.200 \pm 0.005;$$

$$Q_- = +0.215 \pm 0.005.$$

Смена поляризации пучка ABS каждые 5 секунд позволила минимизировать статистическую ошибку в эксперименте и сделала возможным быстрый анализ данных уже во время проведения эксперимента.

5.4.4 Измерения поляризации пучка COSY

Во время проведения эксперимента дейтронный пучок ускорителя COSY изменял поляризацию каждый цикл. Из всех возможных комбинаций векторной и тензорной поляризации использовались пять, одна из которых была неполяризованной и, соответственно, имела максимальную интенсивность. Именно она использовалась для настройки проведения частиц в ускорителе. Предварительно, используя расположенный в районе циклотрона поляриметр для частиц низкой энергии, была измерена поляризация в каждом отдельно взятом случае (Табл. 8).

Табл. 8.
Поляризация дейтронного пучка COSY

№	Относительная интенсивность	Поляризация		Измеренная векторная поляризация	
		векторная	тензорная	с помощью LEP	из данных
1	1	0	0	$+0.008 \pm 0.008$	0
2	1	$-2/3$	0	-0.545 ± 0.006	-0.33 ± 0.084
3	1	$+1/3$	-1	$+0.257 \pm 0.008$	$+0.15 \pm 0.083$
4	$2/3$	-1	+1	-0.723 ± 0.006	-0.66 ± 0.087
5	$2/3$	+1	+1	$+0.597 \pm 0.004$	$+0.63 \pm 0.089$

Предварительный анализ показывает, что суммарная векторная поляризация пучка ускорителя $\langle P_z^{LEP} \rangle = 0.66 \pm 0.003$, полученная с помощью поляриметра низких энергий (энергия дейтронов при измерении с LEP равнялась 75.6 МэВ) превышает

полученную из анализа данных среднюю векторную поляризацию $\langle P_Z^{ANKE} \rangle = 0.51 \pm 0.04$.

Разницу в полученных значениях можно объяснить длиной накопительной ячейки, потому что до сих пор не существует точного инструмента для определения вершины реакции распада. Только установка силиконового детектора рядом с накопительной ячейкой позволит увеличить точность расчетов.

5.4.5 Определение фоновых событий

Одной из важных особенностей проведения экспериментов с использованием мишеней с накопительной ячейкой является наличие фоновых событий в данных, являющихся результатом взаимодействия ускоренного пучка заряженных частиц со стенками мишени. От этого физически невозможно избавиться полностью, потому что при увеличении поперечного сечения трубки вдоль пучка ускорителя плотность мишени будет уменьшаться в кубической зависимости от диаметра трубки. Единственным удобным для использования способом отсева фоновых событий является правильное определение возможного фона в анализируемых данных, полученных в эксперименте, и наложение соответствующих ограничений при отборе событий. Таким образом, необходимо точно определить природу полученных данных, связаны ли они со стенками накопительной ячейки или получены в результате взаимодействия с газом мишени.

Использование электронного и стохастического охлаждения на протяжении всего цикла работы ускорителя позволяет снизить нагрев пучка и повысить его плотность, тем самым увеличить светимость в эксперименте. Это также снижает уровень фоновых событий, полученных при взаимодействии со стенками мишени, но не исключает их полностью. Поэтому было проведено измерение с использованием молекулярного азота в качестве газа мишени. Азот был выбран исходя из того, что его молярная масса (28) близка к атомной массе алюминия (26.98) и, соответственно, при использовании этой мишени будет найдено распределение событий, характерное для взаимодействия заряженных частиц ускорителя со стенками накопительной ячейки.

Для создания азотной газовой мишени использовалась система подачи неполяризованного газа. Величина калиброванного потока в накопительную ячейку была выбрана таким образом, чтобы созданная с его помощью азотная мишень разогревала пучок ускорителя аналогично водородной мишени, создаваемой источником поляризованных атомов. Величина разогрева определялась смещением

основной частоты³², с которой циркулирует пучок в накопительном кольце. В обоих случаях, при использовании водородной и азотной мишени, после десятиминутного цикла основная частота, с которой циркулируют частицы в накопительном кольце, смещалась на $80 \div 85$ Герц.

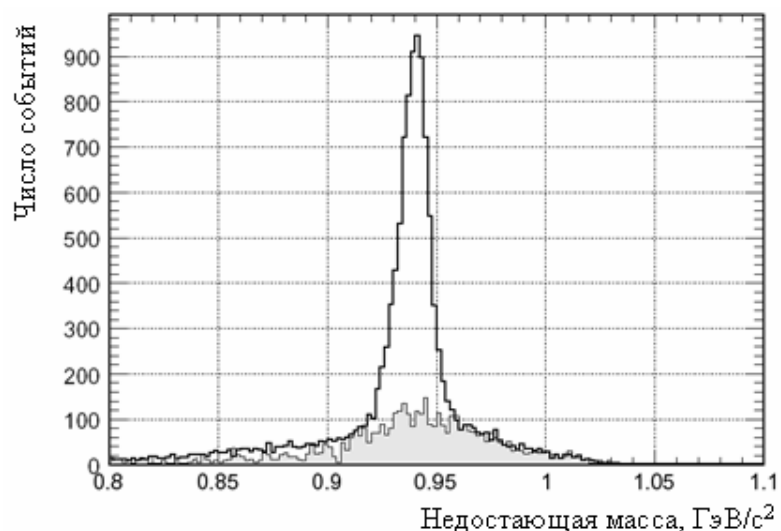


Рис. 45. Спектр недостающей массы. Закрашенная область – фоновые измерения с азотной мишенью, незакрашенная – измерения с поляризованной мишенью с атомарным водородом

При сравнении спектров недостающих масс атомной водородной и молекулярной азотной мишеней (Рис. 45) можно выделить область, которая принадлежит фоновым событиям, вызванным столкновениями частиц ускорительного пучка со стенками накопительной ячейки.

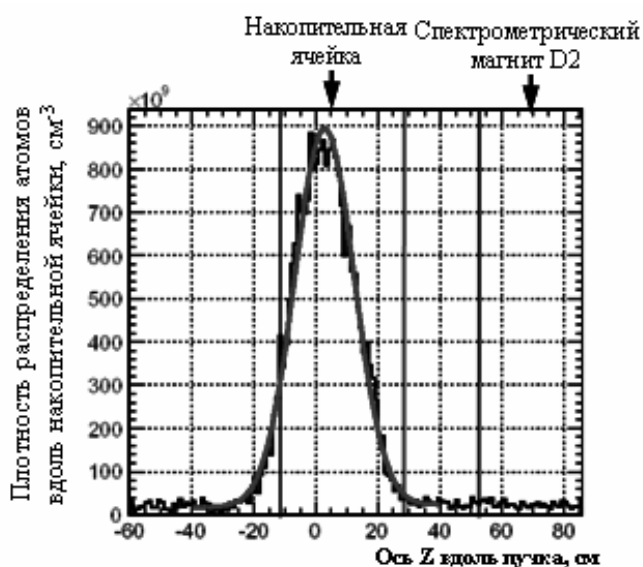


Рис. 46. Восстановленная вершина реакции в накопительной ячейке с учетом фоновых событий

³² Также этот метод – метод Шоттки – использовался как альтернативный для определения плотности мишени.

Применение полученных результатов к измерениям с неполяризованной газовой мишенью позволило с хорошей точностью выделить фоновые события из анализируемых данных (Рис. 46). Использование подобных измерений во время других сеансов на ускорителе позволит очистить полученные данные от фоновых событий и свести к минимуму время, необходимое для набора достаточной статистики для экспресс-анализа поляризации.

5.4.6 Плотность газовой мишени

Предварительная калибровка интенсивности источника поляризованных атомов до установки на ускоритель показала, что из-за проблем со стабилизацией температуры адсорбирующих панелей в крио-насосах снижается эффективность работы источника. Полученный результат был взят в виде контрольной точки для последующего подсчета интенсивности создаваемого поляризованного водородного пучка. Проведенные моделирования показали, что изменение параметров инжекционной трубки накопительной ячейки может создать более плотную газовую мишень (Табл. 9). Дополнительное вертикальное смещение трубки, ближе или дальше от источника, также влияло на интенсивность потока неполяризованных атомов водорода (состояния $|1\rangle$ и $|2\rangle$). В результате моделирования с использованием метода Монте-Карло была найдена лучшая геометрия инжекционной трубки и расположение накопительной ячейки в камере для установки мишени (случай 5, Табл. 9). В процессе моделирования, с использованием других параметров накопительной ячейки, была получена аналогичная интенсивность, например в варианте 11, но длина трубки для инъекции достигала критических размеров для установки в камеру ускорителя, поэтому было решено использовать геометрию трубки из варианта 5.

Следующим этапом в определении формы накопительной ячейки был расчет плотности мишени. В качестве исходных данных использовалась интенсивность неполяризованного водородного пучка и фиксированная геометрия всех трубок накопительной ячейки. Необходимо было вычислить оптимальное поперечное сечение трубки накопительной ячейки, расположенной вдоль ускорительного пучка, а также длину каждой из частей продольной трубки. Ограничения, накладываемые на длину накопительной ячейки и ее положение относительно оси источника, были механическими, т.к. ограничивались отверстием во фланце камеры, а длина горизонтальных участков трубки – установленными внутри приборами и стенками вакуумной камеры.

Поперечное сечение и длина продольной трубки остались неизменными, по сравнению с последним экспериментом – 15 мм в вертикальной и 20 мм в горизонтальной плоскости со скругленными углами. Дополнительное уменьшение поперечных размеров могло вызвать большие потери при инъекции, а максимальная длина в 390 ÷ 400 мм позволяла создавать плотную мишень из-за уменьшения проводимости трубки. Более сложным, с механической точки зрения, являлось положение оси источника ABS относительно краев трубки.

Табл. 9.
Моделирование интенсивности атомарного потока

№	Размеры инъекционной трубки		Расстояние до последнего магнита, мм	Поток * 10 ¹⁷ , ат/с	
	Длина, мм	Диаметр, мм		моделирование	измерение
1	100	10	543	0.385	
2	100	10	384	0.602	
3	100	10	300	0.696	0.69±0.03 ³³
4	130	13	354	0.776	
5	130	15	354	0.847	
6	130	10	354	0.614	
7	100	10	354	0.641	0.57±0.03 ³⁴
8	100	13	384	0.764	
9	100	15	384	0.844	
10	135	13	349	0.778	
11	135	15	349	0.846	
12	135	10	349	0.616	

В текущей конфигурации приборов, установленных в вакуумной камере, свободное расстояние в сторону отклоняющего магнита D1 составляло 104 мм. Для увеличения свободного пространства и создания более симметричной накопительной ячейки относительно оси ABS были внесены изменения в конструкцию вакуумной камеры и демонтировано поддерживающее кольцо на ближайшем к мишени фланце монитора положения пучка COSY. Эти изменения не повлияли на работу устройств, а длина первой части продольной трубки накопительной ячейки могла составлять 160 мм.

³³ Интенсивность источника в лабораторных условиях до перемещения в зал ускорителя. Эта величина была заявлена, как максимально возможная интенсивность неполяризованного водородного пучка атомов в состояниях $|1\rangle$ и $|2\rangle$ [46].

³⁴ Интенсивность источника в ускорительном зале до установки на эксперимент ANKE.

Расчетная плотность создаваемой водородной мишени в данной конфигурации накопительной ячейки для неполяризованного атомарного пучка водорода равнялась $2.68 \cdot 10^{13}$ ат/см². Для создания газовой мишени использовался не только источник поляризованных атомов, но и система подачи неполяризованного газа. Калиброванный поток молекулярного водорода или азота поступал в накопительную ячейку с помощью специальной линии подачи газа (Рис. 39). Величина потока определялась калибровками UGSS (см. главу 4.3) и выбиралась таким образом, чтобы эффект разогрева ускорительного пучка был на том же уровне, как при использовании источника поляризованных атомов.

Во время проведения эксперимента плотность газовой мишени можно было определить последующей формуле, зная тип мишени и сдвиг основной частоты циркуляции частиц за определенный промежуток времени:

$$N_{target} = \frac{1+\gamma}{\gamma} \frac{1}{\eta} \frac{1}{(dE/dx)m} \frac{T_0}{f_0^2} \frac{\Delta f}{\Delta t}, \quad (36)$$

где f_0 – частота обращения частиц в накопительном кольце, T_0 – кинетическая энергия пучка, γ – Лоренц фактор, η – коэффициент зависимости частоты от импульса, определяющейся по формуле:

$$\eta = \frac{1}{\gamma^2} - \alpha, \quad (37)$$

где α определяется экспериментально, путем измерения смещения основной частоты вращения при изменении магнитного поля в эксперименте ANKE:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \alpha \frac{\Delta B}{B_0}. \quad (38)$$

Величину ионизационных потерь можно рассчитать по формуле Бете-Блоха:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right], \quad (39)$$

где n – число электронов в 1 см³ вещества мишени, m – масса электрона, $\beta = v/c$ – (v – скорость частицы), e и z – заряд и атомный номер частицы, I – средний потенциал ионизации атомов мишени.

Для основных типов атомов существуют таблицы значений ионизационных потерь [56], которыми можно воспользоваться для упрощения расчетов. Таким образом, используя данные из спектров Шоттки, позволяющие судить о смещении основной частоты обращения частиц во внутреннем кольце ускорителя, и зная потери энергии

для каждого цикла можно определить плотность мишени. Поскольку поляризация среды прямо пропорциональна плотности электронов n , то этот эффект сильно зависит от плотности вещества.

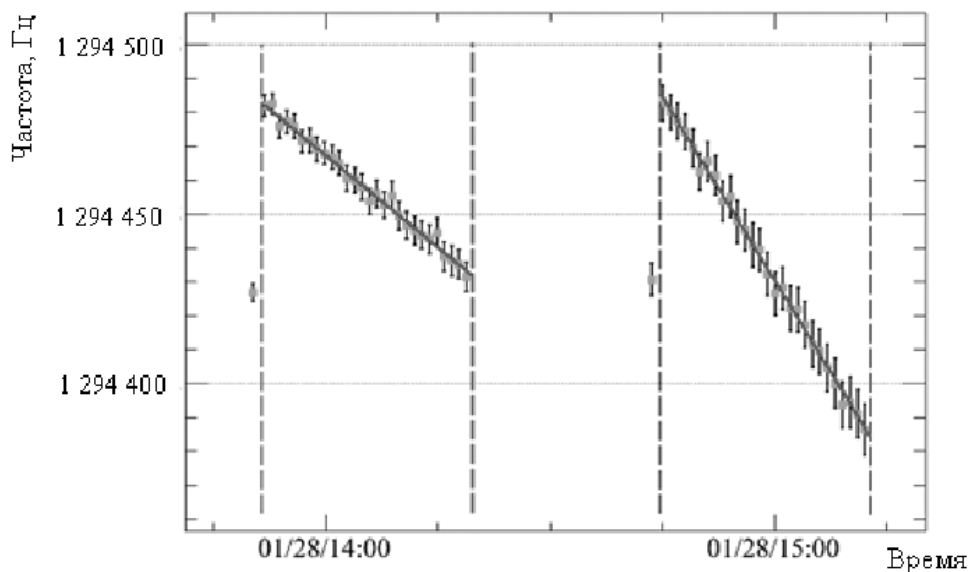


Рис. 47. Сдвиг основной частоты во внутреннем кольце COSY для разных типов мишени. Слева – без мишени, справа – поляризованная водородная мишень созданная с помощью ABS

Анализ смещения частоты был проделан для случаев использования поляризованной атомарной водородной мишени и неполяризованных молекулярных водородной и азотной мишеней различной плотности. На Рис. 47 показаны смещения основной частоты ускорительного пучка в случае работы с источником поляризованных атомов (справа), когда сдвиг достигал 100 Гц, и отсутствием мишени (слева), сдвиг частоты из-за остаточного газа в ускорителе составлял 50 Гц.

Формулы (39) и (36) также справедливы и для сложного вещества. Ионизационные потери для такой среды вычисляются как сумма ионизационных потерь для различных элементов, составляющих данную среду. Поэтому можно определять потери на остаточном газе в накопительном кольце, зная содержание основных составляющих. Плотность газовых мишеней (Табл. 10), полученная в результате калибровки системы подачи неполяризованного газа и расчетов ионизационных потерь по методу Шоттки, хорошо соотносится друг с другом.

Табл. 10.
Различный подход к определению плотности газовых мишеней

Тип мишени		Калибровка UGSS		Потери энергии	
		Давление в объеме UGSS, мбар	Плотность мишени, ат/см ²	Сдвиг частоты, Гц	Плотность мишени, ат/см ²
Без мишени		-	-	50	$1.8 \cdot 10^{13}$
Атомарный водород из ABS		420	$1.3 \cdot 10^{13}$	85	$1.6 \cdot 10^{13}$
Молекулярный водород из UGSS	С мишенью	450	$3.2 \cdot 10^{13}$	95	$2.3 \cdot 10^{13}$
	Без мишени	450	-	46	$1.6 \cdot 10^{13}$
Молекулярный азот из UGSS	С мишенью	100	$4.0 \cdot 10^{12}$	100	$2.4 \cdot 10^{13}$
	С мишенью	200	$8.2 \cdot 10^{12}$	169	$5.9 \cdot 10^{13}$
	Без мишени	200	-	44	$1.6 \cdot 10^{13}$

5.4.7 Достигнутые результаты

В процессе подготовки к проведению эксперимента с поляризованным дейтериевым пучком ускорителя энергией 1.2 ГэВ было произведено моделирование реакции взаимодействия с поляризованной протяженной протонной мишенью, создаваемой в накопительной ячейке. Это было необходимо не только для оценки временных затрат на получение необходимого количества данных для анализа, но и позволяло указать заранее в каких областях детекторов должны быть зафиксированы продукты распада. С использованием ряда ограничений на время между одновременным детектированием частиц, а также на области переднего детектора, где физически невозможно было зарегистрировать вылетающие после столкновения с мишенью протоны, уменьшилась нагрузка на систему предварительного анализа.

Наличие в непосредственной близости от накопительной ячейки силиконового трекового детектора, расположенного на расстоянии 20 мм от центра и перекрывающего максимум распределения плотности газовой мишени, позволило регистрировать медленные протоны, вылетающие почти под прямыми углами по отношению к направлению распространения ускорительного пучка. Расположенный таким образом детектор с правильно выставленными временными задержками использовался в качестве триггера для переднего детектора при определении совпадений. В этом режиме работы отсеивалась большая часть детектируемых фоновых событий, которые не являлись продуктами реакции $\bar{d}p \rightarrow ppp$ с участием поляризованной газовой мишени. На Рис. 48 наглядно показано, насколько хорошо

можно избавиться от фона при включении триггера совпадений. Слева показаны распределения недостающих масс для всех данных, собранных в переднем детекторе, а справа – распределения с учетом триггера совпадений с силиконовым детектором. Число событий, отраженное на этих графиках по вертикали, показывает реальное количество частиц, посчитанных передним детектором в случае использования поляризованной водородной мишени (незакрашенные распределения).

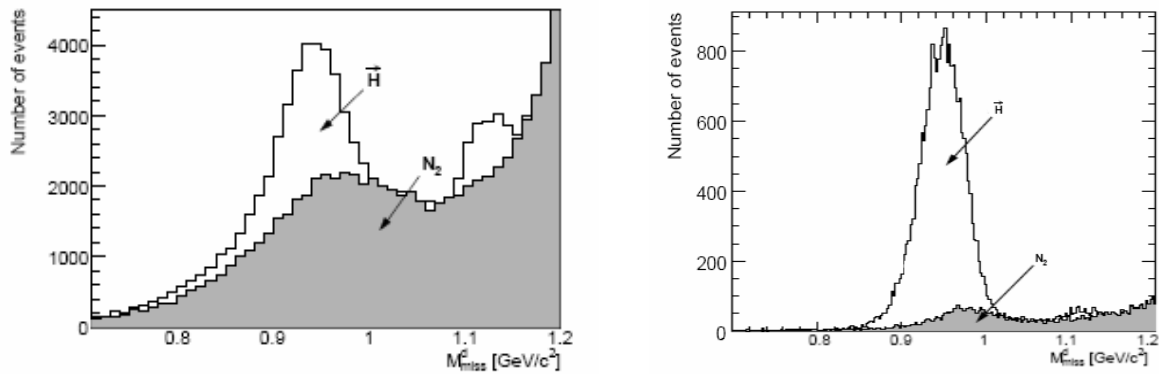


Рис. 48. Спектр недостающей массы процесса $\bar{d}p \rightarrow dX$. Слева показаны распределение с учетом всех детектируемых частиц в переднем детекторе, справа – только тех, которые были получены в совпадении с трековым детектором. Закрашенная область – фоновые измерения с азотной мишенью, незакрашенная – измерения с поляризованной мишенью

Сравнение двух незакрашенных распределений, показанных на Рис. 48, подтверждает эффективность использования силиконового детектора частиц для предварительного отбора нежелательных событий во время накопления информации. Но существуют фоновые события, избавиться от которых можно только на этапе обработки информации. Одним из источников таких событий являются столкновения частиц пучка ускорителя со стенками накопительной ячейки.

Используя методику, описанную в этой главе в пункте 5.4.5, при аналогичных настройках ускорителя COSY были проведены измерения с использованием азота в качестве мишени. Для этого в накопительную ячейку через систему подачи неполяризованного газа поступал поток молекулярного азота с более низкой плотностью, чтобы время жизни ускорительного пучка в этих условиях не сильно отличалось от времени жизни с поляризованной мишенью. Полученные результаты подвергались аналогичной обработке и, вследствие разных интенсивностей счета, нормировались к данным, полученным с поляризованной мишенью. Применение такого метода анализа позволило внести существенные улучшения в отбор данных и, как показано на Рис. 49, избавившись от связанных со стенками мишени событий, получить чистое распределение масс по энергиям и практически полностью убрать фон.

Наличие небольшого пика от дейтронов в области больших энергий связано с невозможностью полного разделения реакции $\vec{d}p \rightarrow ppn$ от $\vec{d}p \rightarrow dX$. Недостающая масса на Рис. 49 соответствует массе пропущенного нейтрона со средним значением $0.938 \text{ ГэВ}/c^2$ и шириной пика $\sigma = 14 \text{ МэВ}/c^2$.

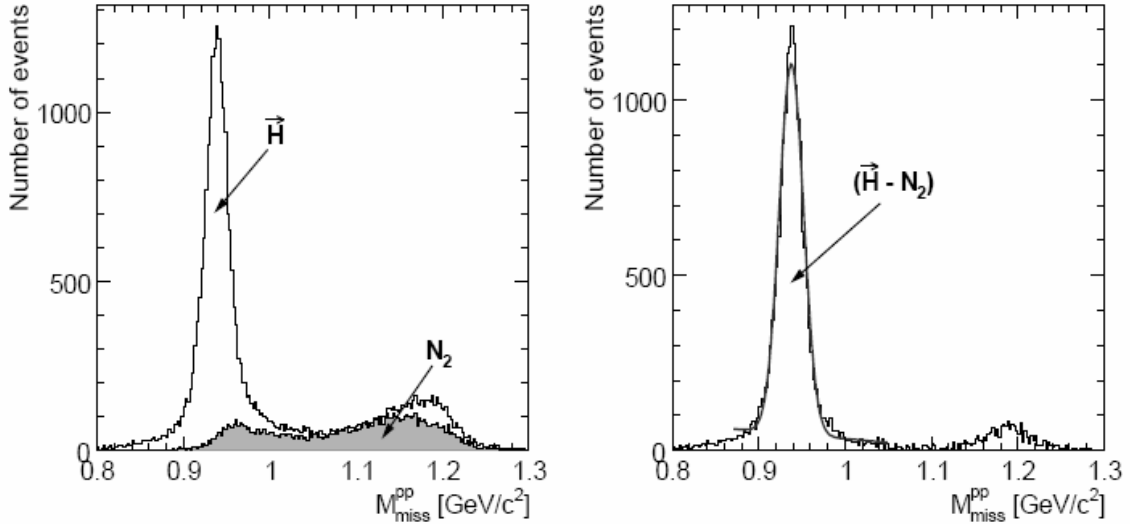


Рис. 49. Окончательное распределение недостающей массы для реакции $\vec{d}p \rightarrow ppn$

Наличие трех слоев датчиков в силиконовом детекторе позволяет произвести реконструкцию траектории пролета частицы, получившейся в результате взаимодействия пучка ускорителя с мишенью. В то же время его расположение (10 мм от стенки ячейки и 20 мм от центра мишени) и большая площадь рабочей поверхности (первый и самый меньший из трех слоев имел размеры $62 \times 51 \text{ мм}^2$) повышает точность восстановления вершины реакции в области максимальной плотности поляризованной газовой мишени. На Рис. 50 показано распределение траекторий протонов в вертикальной плоскости, зарегистрированных в первых двух слоях силиконового детектора. Максимальная интенсивность пересекающихся линий, согласно ожиданиям, расположена вблизи центра накопительной ячейки (в этом сечении ширина ячейки составляет 20 мм) и убывает при смещении к краям вдоль оси ОУ (ось распространения ускорительного пучка). В правой части Рис. 50 показано распределение числа событий без скреперов (сплошная кривая) и с их использованием (прерывистая линия). Определение оптимального положения скреперов для обрезания гало пучка состоит в том, чтобы количество частиц в накопительном кольце после их сдвигания не изменялось. Кроме того, использование скреперов должно снижать количество частиц, взаимодействующих со стенками накопительной ячейки, т.к. пучок увеличивается в поперечных размерах и, соответственно, должно расти число таких событий.

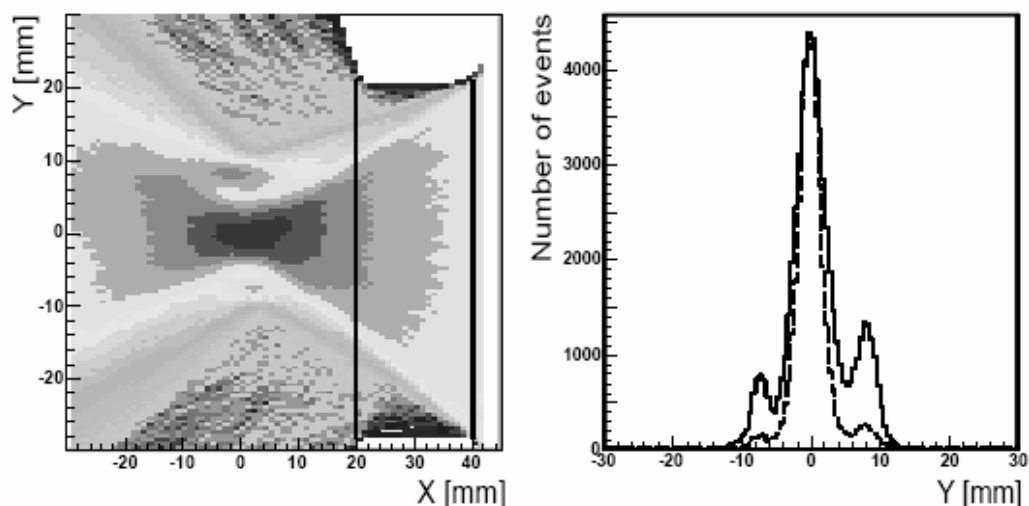


Рис. 50. Слева – вертикальное двумерное распределение траекторий частиц в детекторе (область первых двух слоев силиконовых датчиков выделена прямоугольником). Справа – проекция этих частиц на ось, перпендикулярную направлению распространения пучка ускорителя. Сплошная линия – без использования, прерывистая – с использованием скреперов после ускорения

Проведенный анализ полученных данных в результате восстановления траекторий вылетающих протонов, позволил сделать несколько важных выводов:

- с помощью трекового детектора определено положение верхней и нижней стенки накопительной ячейки и получено расстояние между ними, составлявшее 15 мм;
- использование скреперов позволяет не только снизить загрузку детекторов, но и избавиться от взаимодействия ускорительного пучка со стенками мишени.

В силу конструктивных особенностей вакуумной камеры горизонтальная ось источника поляризованных атомов располагалась не в геометрическом центре первого слоя детектора, а была смещена на несколько миллиметров от его центра. Этот сдвиг хорошо виден в левой части Рис. 51. Ось источника ABS расположена в нуле по оси OZ, а пучок ускорителя распространяется в сторону положительных значений. Как предполагалось [7], продольное распределение плотности частиц в накопительной ячейке имеет треугольную форму, но, из-за того, что размеры детектора существенно меньше размеров накопительной ячейки, можно наблюдать только часть этого распределения с вершиной в нуле и спадом в сторону положительных значений оси OZ.

Во время работы блоков сверхтонких переходов источника ABS, поляризованная газовая водородная мишень находилась в «чистых» состояниях сверхтонкого расщепления водорода $|1\rangle$ и $|3\rangle$. Это позволило более легко удерживать поляризацию создаваемой мишени без обеспечения высокого постоянного магнитного

поля на пути распространения пучка. Смена знака поляризации с частотой 5 секунд на всем протяжении измерений позволила избавиться от погрешности, вносимой нестабильностями ускорителя и источника.

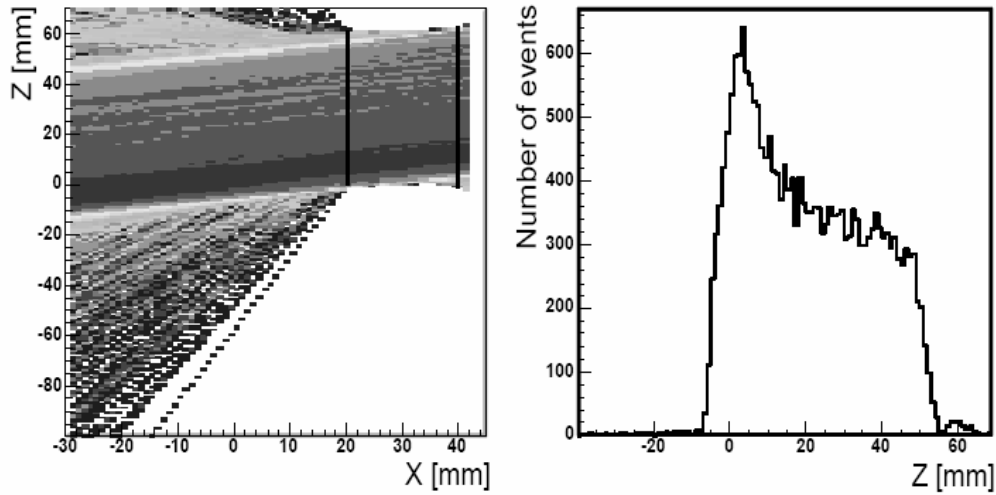


Рис. 51. Слева – распределение восстановленных траекторий протонов в горизонтальной плоскости. Справа – интенсивность счетов, описывающая плотность газовой мишени

Исходя из технических особенностей источника, при создании поляризации в используемых сверхтонких состояниях атома водорода можно полагать, что величина поляризации будет одинаковой:

$$|Q_y^+| = |Q_y^-| = Q_y, \quad (40)$$

где Q_y^+ – положительная поляризация (состояние $|1\rangle$, когда спин ядра направлен вверх), а Q_y^- – отрицательная поляризация (состояние $|3\rangle$, когда спин ядра направлен вниз).

Правомерность такого утверждения подтверждается величиной асимметрии поляризации, измеренной с помощью поляриметра (см. главу 5.4.3). Значение поляризации можно получить, используя отношение счетов в детекторах при создании разных сверхтонких состояний, т.к. в зависимости от анализирующей способности количество зарегистрированных событий выражается следующим образом:

$$\frac{N^+}{N^-} = \frac{1 + Q_y^+ A_y(\theta) \cos \varphi}{1 - Q_y^- A_y(\theta) \cos \varphi} \quad (41)$$

Анализирующая способность изменяет свое значение для разных интервалов углов. Особенностью эксперимента ANKE является то, что с его помощью можно зарегистрировать события в районе малых углов от 0 до 40 градусов и в области больших углов от 150 до 180 градусов. Величина асимметрии поляризации рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-} \quad (42)$$

Используя полученную асимметрию и стандартные значение анализирующей способности для протонов, взятые из базы данных SAID [6], можно использовать для вычисления поляризации, как функции угла:

$$Q_y = \frac{\varepsilon}{A_y \cos(\varphi)} \quad (43)$$

Полученная угловая зависимость квадрата недостающей массы реакции $d\bar{p} \rightarrow dp_{sp} X$ с использованием неполяризованного дейтронного пучка ускорителя и поляризованной водородной мишени показана на Рис. 52. Пунктирной линией обозначена положительная, а сплошной – отрицательная поляризация, полученная с учетом фоновых счетов (измерения с азотной мишенью). Очевидно, что увеличивающаяся в области малых и уменьшающаяся в области больших углов анализирующая способность сильно влияет на значение квадрата недостающей массы для обоих состояний. Дальнейший расчет асимметрии и анализирующей способности для разных углов, объединенный в Табл. 11, позволяет определить среднюю величину поляризации, равную $\langle Q_y \rangle = -0.794 \pm 0.077$.

Табл. 11.
Зависимость поляризации от угла вершины реакции

θ	N^+	N^-	Асимметрия	A_y	$\cos(\varphi)$	Поляризация
11.2	1286.5	1030.4	0.111 ± 0.044	0.179	-0.826	-0.747 ± 0.297
19.5	1817.4	1239.4	0.189 ± 0.044	0.293	-0.860	-0.750 ± 0.173
25.8	1855.1	1045.1	0.279 ± 0.050	0.361	-0.894	-0.866 ± 0.154
32.7	1747.8	879.4	0.331 ± 0.053	0.416	-0.902	-0.881 ± 0.140
161.5	1222.6	1523.1	-0.109 ± 0.040	0.186	0.896	-0.655 ± 0.237
167.9	1095.8	1230.3	-0.058 ± 0.038	0.127	0.864	-0.526 ± 0.345
172.7	926.7	988.0	-0.032 ± 0.042	0.078	0.852	-0.483 ± 0.640

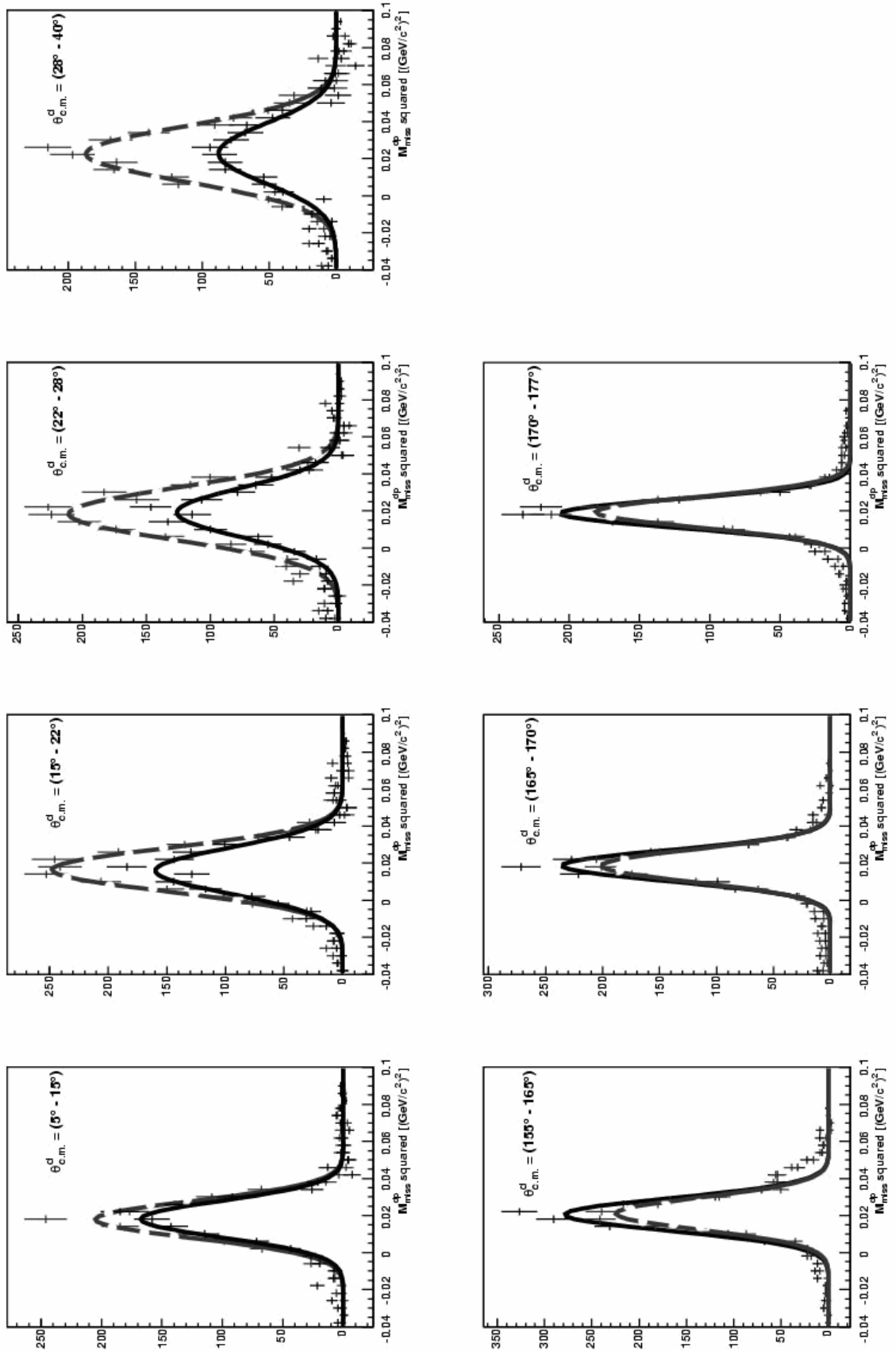


Рис. 52. Угловая зависимость квадрата недостающей массы реакции $\bar{d}p \rightarrow dp_{sp} X$ с использованием неполяризованного пучка ускорителя и поляризованной водородной мишени

Значение поляризации получено из экспериментальных данных в результате анализа, в основе которого заложена модель точечной мишени. В реальности, при использовании накопительной ячейки, поляризованная газовая мишень распространялась на всю длину, составлявшую 390 мм, поэтому окончательное значение поляризации может превышать полученное с использованием этой модели.

Проверка метода определения поляризации была проведена с использованием $d\vec{p}$ упругого взаимодействия. Используя реакцию $n\vec{p} \rightarrow d\pi^0$ можно измерить величину анализирующей способности A_y^p из упругого дейтрон-протонного взаимодействия. В левой части Рис. 53 показано угловое соотношение между протоном, зарегистрированным в трековом детекторе, и дейтроном в переднем детекторе. Как видно, эта зависимость хорошо соотносится с теоретически ожидаемой (сплошная линия) при упругом взаимодействии дейтронного пучка с протонами мишени. В правой части Рис. 53 сплошной линией обозначено количество счетов в детекторах, когда поляризованная водородная мишень была в состоянии $|1\rangle$ (спин ядра направлен вверх), а пунктирной – когда мишень была в состоянии $|3\rangle$ (спин ядра направлен вниз). Полученные значения анализирующей способности дейтрона хорошо соотносятся с результатами, опубликованными ранее в статье [57] учитывая, что энергии в этих экспериментах отличаются друг от друга.

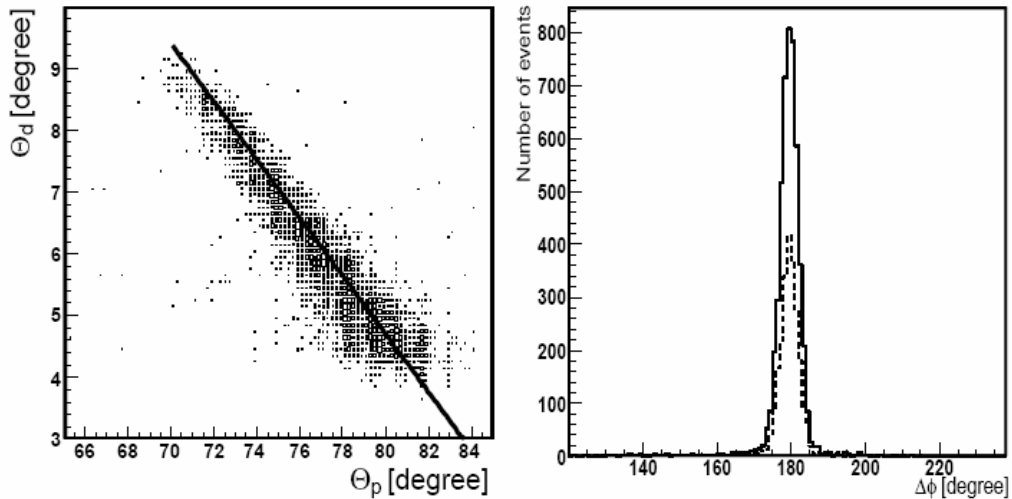


Рис. 53. Слева – распределение восстановленных траекторий протонов в горизонтальной плоскости. Справа – интенсивность счетов, описывающая плотность газовой мишени

Угловая зависимость анализирующей способности протона, полученной из реакции взаимодействия дейтрона с поляризованной протонной мишенью представлена в Табл. 12. При расчетах использовалось усредненное значение поляризации $\langle Q_y \rangle = 0.79 \pm 0.07$.

Табл. 12.
Угловая зависимость анализирующей способности протона

$\cos(\theta^d)$	N^+	N^-	Асимметрия	$\langle \cos(\varphi) \rangle$	A_y^p
$0.97 \div 0.95$	970	2003	-0.348 ± 0.017	-0.955	0.486 ± 0.037
$0.95 \div 0.93$	699	1431	-0.344 ± 0.021	-0.975	0.470 ± 0.040
$0.93 \div 0.90$	501	1063	-0.359 ± 0.024	-0.980	0.488 ± 0.044
$0.90 \div 0.85$	233	462	-0.329 ± 0.039	-0.979	0.448 ± 0.059

5.4.8 Выводы

Для проведения двойного поляризационного эксперимента были выполнены следующие работы:

- проведены исследования различных способов покрытия тефлоном алюминиевой фольги для уменьшения коэффициента депolarизации на стенках мишени;
- создана новая система поддержки накопительной ячейки. Оборудованная специальным механизмом, она позволила легко изменять во всех трех координатах положение трубок при юстировке, не выдавалась перед накопительной ячейкой и служила дополнительной поддержкой для трубки, расположенной вдоль пучка ускорителя;
- модернизированная система перемещения мишени, позволила провести более точную юстировку положения центра инжекционной трубки непосредственно в камере ускорителя, что повысило плотность создаваемой с помощью ABS газовой мишени;
- поляриметр, работающий на эффекте лэмбовского сдвига, установленный под камерой для мишеней, в процессе измерений позволил контролировать асимметрию поляризации пучка ABS.

В процессе подготовки программ для оперативного анализа данных были проведены моделирования и определены основные параметры для детекторов, которые планировалось использовать во время этого сеанса на ускорителе. Это позволило получать предварительные результаты после нескольких часов набора статистики и вносить некоторые изменения в настройки временных задержек для отсекаания тех или иных фоновых событий.

Использование неполяризованной газовой водородной мишени позволило провести калибровку детекторов и подтвердить правильность анализа поляризации в

сравнении с данными, полученными с использованием поляриметра низкой энергии, измеряющим поляризацию создаваемого пучка ускорителя COSY до инжекции его в накопительное кольцо. Средняя величина векторной поляризации, измеренная с помощью поляриметра низких энергий, равнялась $\langle P_z^{LEP} \rangle = 0.66 \pm 0.003$, а полученная из анализа данных – $\langle P_z^{ANKE} \rangle = 0.51 \pm 0.04$. Заполнение накопительной ячейки молекулярным азотом позволило во время анализа данных, сделанного после окончания эксперимента, отбросить события, связанные с взаимодействием ускорительного пучка со стенками накопительной ячейки, тем самым уменьшив распределение фоновых событий в данных.

Метод Шоттки, использованный во время проведения эксперимента с двойной поляризацией, позволил сделать оценку плотности создаваемой поляризованной газовой водородной мишени, подтвердив предварительные расчеты плотности и калибровки потока из источника ABS. Плотность мишени без учета остаточного газа в накопительном кольце составляла $1.6 \cdot 10^{13}$ ат/см², тогда как из калибровки она должна составлять $1.3 \cdot 10^{13}$ ат/см². Принимая во внимание 20-ти процентную точность метода Шоттки, полученные значения хорошо соотносятся друг с другом.

Силиконовый детектор траекторий частиц, расположенный в непосредственной близости от максимальной плотности газовой мишени в накопительной ячейке, в результате анализа полученных данных позволил:

- значительно снизить загрузку всей детекторной системы при использовании сигнала о регистрации в нем частицы как триггер для включения слежения переднего детектора;
- распределение восстановленных траекторий частиц в вертикальной плоскости позволило определить области взаимодействия пучка ускорителя со стенками накопительной ячейки. Расстояние между ними составляло 15 мм, что в точности повторяет геометрию мишени;

Перекрестная проверка метода определения поляризации с использованием данных взаимодействия поляризованного дейтронного ускорительного пучка и неполяризованной водородной газовой мишени с накопительной ячейкой показала хорошее соответствие полученного результата с предыдущими измерениями на других энергиях пучка COSY. Измеренная анализирующая способность для разных углов детектирования вела себя согласно теоретическим предсказаниям и не сильно отличалась по величине от полученных результатов при энергии 800 МэВ (на 200 МэВ превышающей энергию в эксперименте).

Поляризации газовой водородной мишени с использованием накопительной ячейки составляла $P_z = 0.79 \pm 0.07$. Эта величина была получена с использованием модели точечной мишени, поэтому окончательное значение поляризации может превосходить полученное с ее использованием. На данный момент все еще ведется разработка модели протяженной мишени, которая должна будет использоваться в следующих экспериментах.

Глава 6.

Перспективы использования

Внутренняя газовая поляризованная мишень, созданная для эксперимента ANKE совместно с поляризованным пучком ускорителя COSY позволила провести первый в мире эксперимент по развалу дейтрона с использованием двойной поляризации. Протяженная газовая поляризованная водородная мишень с плотностью порядка $1.3 \cdot 10^{13}$ ат/см² в одном сверхтонком состоянии с использованием поляризованного пучка ускорителя с высокой интенсивностью может позволить провести эксперименты со светимостью превышающей 10^{29} см⁻²с⁻¹. При высоких энергиях ускорительного пучка (от 1.5 ГэВ) может быть использовано стохастическое охлаждение пучка, что позволит дополнительно увеличить светимость в эксперименте.

Во время проведения сеанса на ускорителе COSY в январе 2007 года впервые в эксперименте ANKE была использована поляризованная мишень с накопительной ячейкой. В дальнейшем планируется доработка существующего программного обеспечения, которое позволит:

- оперативно получать информацию о текущих измерениях состояния;
- сделает гибкой систему обработки информации, что позволит на этапе подготовки ускорителя вносить изменения в проведение ускорительного пучка;
- произвести анализ протяженной мишени, уменьшив погрешность определения поляризации и других измеряемых величин.

Кроме доработки математической модели для восстановления вершины реакции при использовании протяженной мишени, способной повысить точность измерений, в дальнейшем планируется провести комплекс работ, направленных на повышение светимости в экспериментах с поляризованной газовой мишенью. Для этого можно использовать накопительную ячейку с меньшим поперечным сечением. В этом случае повышение плотности создаваемой мишени будет происходить за счет кубической зависимости от диаметра трубки вдоль пучка ускорителя. Одним из таких вариантов может быть раскрывающаяся накопительная ячейка, разделенная, как минимум, на две части. Как было установлено, пучок COSY во время ускорения смещается в горизонтальной плоскости, снижая свою интенсивность за счет взаимодействия со стенками мишени. Поэтому, расположив заведомо раскрытую накопительную ячейку

вне пучка, легко добиться увеличения интенсивности в накопительном кольце в момент инжекции. При хорошей оптимизации процесса ускорения частиц, полученный пучок не изменит положение своего центра и интенсивность остается прежней. Поэтому, накопительную ячейку можно сдвигать после завершения ускорения и располагать ее стенки намного ближе, чем в случае использования трубки из одной части. Это позволит сделать поперечное сечение накопительной ячейки как минимум в два раза меньше, что увеличит плотность создаваемой газовой мишени почти на порядок.

Созданная и использованная в экспериментах внутренняя поляризованная газовая водородно-дейтериевая мишень высокой плотности позволит в ближайшем будущем провести ряд экспериментов по развалу дейтрона, таких как $\bar{d}\vec{p} \rightarrow p p n$ при других энергиях, а также $\bar{d}\vec{p} \rightarrow {}^3\text{He } \pi^0$, $\bar{d}\vec{p} \rightarrow d p$ и других.

Заключение

Основной задачей данной работы являлось создание накопительной ячейки для внутренней газовой поляризованной водородно-дейтериевой мишени и использование ее в экспериментах ANKE на накопительном кольце ускорителя COSY. Наиболее значимым из проведенных экспериментов являлся двойной поляризационного эксперимент с поляризованным дейтронным пучком с энергией 1.2 ГэВ и поляризованной газовой водородной мишенью.

Для создания накопительной ячейки был проведен следующий комплекс работ на ускорителе COSY:

- создание системы поддержки и позиционирования накопительной ячейки внутри камеры ускорителя в районе эксперимента ANKE, которая использовалась во всех тестах и сеансах на ускорителе COSY;
- измерение профиля ускорительного пучка в камере для установки мишеней на различных этапах его формирования, использованного для оценки минимальных размеров накопительной ячейки;
- оптимизация параметров пучка ускорителя на этапе инжекции и после ускорения через протяженную накопительную ячейку;
- совместное использование всех возможных способов охлаждения пучка ускорителя COSY во время работы с газовой мишенью позволило достичь высокой интенсивности пучка после инжекции;
- проведение измерений со струйной поляризованной газовой мишенью, создаваемой источником ABS;
- проведение измерений с калиброванными молекулярными водородными и азотными мишенями, позволившее снизить фоновые загрузки и сделать проверку метода определения поляризации для протяженной мишени.

Результаты экспериментов, направленных на измерение профиля пучка COSY, и одновременное применение различных методов для увеличения плотности пучка позволили найти оптимальные настройки магнитной системы ускорителя, повысив тем самым на порядок интенсивность пучка не только в экспериментах с внутренней газовой мишенью, но и в других экспериментах, проводимых на ускорителе.

Кроме создания накопительной ячейки для экспериментов было необходимо установить на ускоритель источник поляризованных атомов и провести с ним тестовые

измерения. Сложность заключалась в том, что сильные поля в районе эксперимента ANKE, создаваемые отклоняющим и спектрометрическим магнитами могли не только снизить поляризацию, но и сделать невозможным использование источника атомарного поляризованного пучка. Для этого была проведена серия измерений магнитных полей вдоль оси распространения пучка в источнике поляризованных атомов и камере для установки мишеней (от точки создания поляризации до пересечения с пучком ускорителя COSY). Они показали, что при максимально возможном поле в районе эксперимента ANKE отсутствует возможность деполяризации атомов за счет прохождения через область с нулевым полем.

Во время разработки накопительной ячейки, использованной в эксперименте с двойной поляризацией, использование первых прототипов проводилась с применением системы подачи неполяризованного газа. Во время этих экспериментов были выполнены следующие задачи:

- оптимизация системы передвижения накопительной ячейки и набора измерительных диафрагм;
- создание программы оперативной обработки информации, которая облегчила процедуру настройки и оптимизации ускорителя;
- определение величины фоновых событий от взаимодействия пучка ускорителя со стенками мишени и поиск возможных способов уменьшения этого эффекта;
- проведение эксперимента с молекулярной водородной мишенью с поляризованным пучком ускорителя для нормировки системы детекторов и проверки эффективности метода реконструкции вершины реакции и определения поляризации.

Комплекс работ по взаимной оптимизации пучка и мишени позволил впервые в мире провести эксперимент с двойной поляризацией ($\vec{d}\vec{p} \rightarrow ppn$). Необходимо заметить, что в анализе данных был использован метод реконструкции вершины реакции для точечной мишени, что может снижать полученные значения поляризации, а также вносить дополнительные погрешности в определение поляризационных наблюдаемых.

Полученные из предварительного анализа данных величины поляризации внутренней газовой водородной мишени на данный момент являются наивысшими среди газовых мишеней с использованием источника поляризованных атомов (Табл. 13). Это позволит при проведении будущих экспериментов более эффективно

использовать ускорительное время, а создаваемая модель для протяженной мишени позволит сделать измерения поляризационных наблюдаемых более точными.

Таким образом, подводя итог, можно сказать, что в результате успешного создания накопительной ячейки для внутренней газовой мишени был проведен эксперимент с двойной поляризацией с энергией дейтронного пучка ускорителя 1.2 ГэВ, в результате чего была получена поляризация атомов водорода в накопительной ячейке 0.79 ± 0.07 , а плотность газовой мишени составляла $1.3 \cdot 10^{13}$ ат/см².

Основные результаты опубликованы в работах: [25], [35], [47], [55], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65].

Табл. 13.

Сравнительные характеристики существующих источников поляризованных атомарных пучков с накопительными ячейками

Источник (ускоритель) Параметры		ANKE (COSY)	AmPs (NIKHEF) / BLAST (MIT)	PINTEX (IUCF-Cooler)	FILTEX (Heidelberg) / HERMES (HERA)	ДЕЙТРОН (ВЭПП-3)
Накопительная ячейка	Размеры впускной трубки, мм	Ø15 x 130	Ø12 x 123	Ø5 x 130	Ø10 x 147	24 x 13 x 342 овальная
	Размеры трубки вдоль пучка ускорителя, мм	15 x 20 x 390 прямоугольная	Ø15 x 600	Ø8 x 254	10 x 20 x 400 овальная	13 x 24 x 400 овальная
	Температура, К	300	70 – 130	300	60 – 100	100
Интенсивность источника, 10^{16} ат/с	Водород	7.5	6.4 / 5.5	6.7	8.1 / 6.5	7.9
	Дейтерий	4	4.5 /	-	5.2	8.2
Плотность мишени, 10^{13} см ⁻²	Водород	2.8*	11**	3.5*	9,6** / 11**	-
	Дейтерий	-	12	-	21	8
Поляризация в накопительной ячейке	Водород	0.79±0.07	0.65±0.08 (векторная)	0.740±0.013	0.78±0.05	-
	Дейтерий	-	0.78±0.07 (векторная)	-	0.845±0.028 (векторная)	0.397±0.013(стат)± 0.018(сист) (тензорная)

* – для одного сверхтонкого состояния водорода.

** – для двух сверхтонких состояний водорода.

*** – для струйной мишени без накопительной ячейки.

Благодарности

Мне хотелось бы выразить огромную благодарность своим научным руководителям – Александру Анатольевичу Васильеву и Франку Ратманну, стоявшим у истоков создания ABS, за помощь в процессе работы, внимательное руководство и всестороннюю поддержку.

Хочется поблагодарить всех сотрудников лаборатории за доверие, возможность заниматься любимым делом, конструктивные советы и неоценимую помощь в подготовке всей системы в целом. Благодарю Максима Сергеевича Микиртычянца, Петра Андреевича Кравцова, Виктора Алексеевича Трофимова за внимание к работе, дружескую обстановку и плодотворные дискуссии.

Отдельно хотелось поблагодарить коллег из института ядерной физики научно-исследовательского центра г.Юлих (Германия) – Хельмута Зайферта, Франка Ратманна, Ральфа Энгельса и Ханса Штроера за их гостеприимство и поддержку в работе. Также отдельную благодарность хотелось бы выразить коллегам из ускорительного отдела – Дитеру Празуну, Берндту Лоренцу, Ральфу Гебелю за совместные ночные смены, посвященные настройке и восстановлению ускорителя после сбоя.

Список литературы

- [1] B.I. Abelev, J. Adams, M.M. Aggarwal *et al.* Strange particle production in p+p collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV // Phys. Rev. C **75** (2007) 064901, 21 pp.
- [2] S. Afanasiev, C. Adia, N.N. Ajitanand *et al.* Elliptic flow of phi meson and deuteron in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys.Rev.Lett. 0703024 6p.
- [3] S. Bültmann, I.H. Chiang, R.E. Chrien *et al.* Double Spin Asymmetries A_{NN} and A_{SS} at $\sqrt{s} = 200$ GeV in Polarized Proton-Proton Elastic Scattering at RHIC // Phys.Lett. B647 (2007), pp. 98 – 103.
- [4] V. Yu. Alexakhin, Yu. Alexandrov, G.D. Alexeev *et al.* Double spin asymmetry in exclusive ρ^0 muonproduction at COMPASS // Phys. Lett. B647 (2007) 330.
- [5] W. Scobel, pp Elastic Scattering: New results from EDDA (COSY) // Fourth International Conference – STORI99, AIP Conference Proceedings, Volume 512, pp. 3 – 17 (2000).
- [6] Virginia Tech Partial – Wave Analysis Facility (SAID), internet site – <http://gwdac.phys.gwu.edu/>.
- [7] W. Haeberli, Proc. 2nd Int. Symp. On Polarization Phenomena, eds. P. Huber and H. Schopper, Experientia Suppl. 12, 64 (Birkhauser, Basel, 1966).
- [8] D.K. Toporkov, M.V. Dyuga, L.G. Isaeva *et al.* Internal polarized deuterium target with cryogenic atomic beam source. // Nucl. Instr. and Meth. A 495, (2002) pp. 8 – 19.
- [9] D.R. Swenson and L.W. Anderson, Relaxation rates for optically pumped Na vapor on silicone surfaces. // Nucl. Instr. and Meth. B 29, (1988) pp. 627 – 642.
- [10] K. Ackerstaff, A. Airapetian, N. Akopov *et al.* The HERMES Spectrometer. // Nucl. Instr. and Meth. A **417**, (1998) pp. 230 – 265.
- [11] G. van der Steenhoven, The HERMES experiment. // Progr. Part. and Nucl. Phys. **55** (2005) pp. 181 – 197.
- [12] E. Steffens, The HERMES polarized gas tareget. // CERN Courier, Volume 46, Number 3, April – 06.
- [13] P. Lenisa, F. Rathmann, Antiproton–Proton Scattering Experiments with Polarization // Technical Proposal, January 2006, <http://www.fz-juelich.de/ikp/pax/>.
- [14] S.V. Dshemuchadze, M.A. Ivanov, V.I. Komarov *et al.* Exclusive deuteron break-up study with polarized protons and neutrons at COSY. // COSY Exp Proposal #20, (1992), 20 p.
- [15] V.I. Komarov, Exclusive deuteron break-up study with polarized protons and neutrons at COSY. // Proc. 105th Int.WE-Heraeus-Seminar, Bad Honef, Feb.1 – 3, 1993 pp. 281 – 292.
- [16] S. Barsov, U. Bechstedt, W. Bothe *et al.* ANKE, a new facility for medium energy hadron physics at COSY-Jülich. // Nucl. Instr. and Meth. A **462**, (2001) pp. 364 – 381.
- [17] R. Engels, Entwicklung eines universellen Lamb-shift Polarimeter für polarisierte Atomstrahl-Targets wie an ANKE/COSY // PhD-thesis, Universität zu Köln, Jül – 3976, ISSN 0944 – 2952, (2002).
- [18] Norman F. Ramsey, MOLECULAR BEAMS // Oxford, at the clarendon press, 1956.

- [19] T. Uesaka, T. Wakui, S. Sakaguchi *et al.* Polarized Proton Target for RI Beam Experiments // Proc. "Radioactive Nuclear Beams" (RNB7), Cortina d'Ampezzo, Italy, 2006.
- [20] T. Wise, A.D. Roberts and W. Haeberli, A high-brightness source for polarized atomic hydrogen and deuterium // Nucl. Instr. and Meth. **A 336** (1993) 410.
- [21] N. Koch, E. Steffens, High intensity source for cold atomic hydrogen and deuterium beams // Rev. Sci. Instrum. **70** (1999) pp. 1631 – 1639.
- [22] D.E. Nagle, R.S. Julian, and J.R. Zacharias. The Hyperfine Structure of Atomic Hydrogen and Deuterium. // Phys. Rev. **72**, (1947) p. 971.
- [23] Abragam and J.M. Winter. Proposal for a Source of Polarized Protons. // Phys. Rev. Lett., **1**, (1958) pp. 374 – 375.
- [24] W. Haeberli, AIP Conf. Proc. 128 (1985), p. 251.
- [25] М.С. Микиртычянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев и др. Источник поляризованного атомарного водорода и дейтерия для внутренней газовой мишени спектрометра ANKE. // Препринт ПИЯФ-2491, Гатчина (2002) 33 с.
- [26] L.D. van Buuren, D. Szczerba, J.F.J. van den Brand *et al.* Performance of a hydrogen/deuterium polarized gas target in a storage ring. // Nucl. Instr. and Meth. **A 474**, (2001) pp. 209 – 223.
- [27] E. Tsentalovich, D. Cheever, E. Ihloff *et al.* A highly polarized hydrogen/deuterium internal gas target embedded in a toroidal magnetic spectrometer. // Nucl. Instr. and Meth. **A 556**, (2006) pp. 410 – 420.
- [28] W. Haeberli, B. Lorentz, F. Rathmann *et al.* Proton-proton spin correlation measurements at 200 MeV with an internal target in a storage ring, // Phys. Rev. **C 55**, (1997) pp. 597–613.
- [29] K. Zapfe, B. Braun, H.-G. Gaul *et al.* High density polarized hydrogen gas target for storage rings, // Rev. Sci. Instrum. **66**, (1995) pp. 28 – 31.
- [30] E.C. Aschenauer, P. Lenisa, A. Airapetian *et al.* The HERMES polarized hydrogen and deuterium gas target in the HERA electron storage ring. // Nucl. Instr. and Meth. **A 540**, (2005) pp. 68 – 101.
- [31] T. Wise, M.A. Chapman, W. Haeberli *et al.* An optimization study for the RHIC polarized jet target. // Nucl. Instr. and Meth. **A 556**, (2006) pp. 1 – 12.
- [32] D.M. Nikolenko, Elastic and inelastic electron scattering on tensor polarized deuteron at vepp-3 storage ring. // Relativistic nuclear physics and quantum chromodynamics, volume II, Dubna 2000, pp. 49 – 53.
- [33] P. Lenisa, The Gaseous Polarized H-D Target of the HERMES Experiment. // Proc. 9th Int. Workshop on Polarized Sources and Targets (PST-01), 30 Sept. – 4 Oct. 2001, Nashville, Indiana, USA, eds. V.P. Derenchuk, B.von Przewoski, World Scientific Publishing, ISBN 981-02-4917-9, (2001) pp. 26 – 31.
- [34] D. Prasuhn, Status of the Cooler Synchrotron COSY-Jülich // Proceedings of the 2003 Particle Accelerators Conference, PAC 2003, Portland, Oregon, USA, May 12–16, 2003, p. 3428.
- [35] K. Grigoryev, R. Engels, B. Lorentz *et al.* The polarized internal target at ANKE: first results. // Proc. of the 17th International Spin Physics Symposium (SPIN06), Kyoto, Japan, October 2006 // AIP Conference Proceedings, Volume 915, pp. 979 – 982.
- [36] Г.И. Будкер, Proceedings of the Intern. Symposium on Electron and Positron Storage Rings, Saclay, 1966, p. II-1-1; АЭ 22, 346 (1967).

- [37] А.Н. Скринский, В.В. Пархомчук, Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1981. Т. 12. С. 557.
- [38] И.Н. Мешков, Электронное охлаждение: статус и перспективы. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1994. Т. 25. С. 1478.
- [39] D. Mohl, CERN Accelerator School Report No. 87 – 03. 1987.
- [40] S. van der Meer, Stochastic Damping of Betatron Oscillations // preprint CERN/ISR-PO/72-31 (1972).
- [41] H.-J. Miesner, R. Grimm, M. Grieser *et al.* Efficient, Indirect Transverse Laser Cooling of a Fast Stored Ion Beam. // Phys. Rev. Lett. **77**, 627 – 630 (1996).
- [42] R. Santo *et al.* The Münster cluster target for internal storage ring experiments // Nucl. Instr. and Meth. A **386** (1997) 228.
- [43] A. Khoukaz, T. Lister, C. Quentmeier *et al.* Systematic studies on hydrogen cluster beam production // Eur. Phys. J. D **5** (1999) 275.
- [44] R. Esser, Proc. First Experience with ANKE in COSY // XXXVII Int. Winter Meeting on Nucl. Phys., Bormio, Italy, Jan. 25 – 30 1999.
- [45] H.R. Koch, Luminosities in ANKE experiments with heavy nuclear targets // Forschungszentrum Juelich annual report, 2001.
- [46] М.С. Микиртычянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев и др. Измерения интенсивности пучка источника поляризованного атомарного водорода и дейтерия. // Препринт ПИЯФ-2481, Гатчина (2002) 36 с.
- [47] R. Engels, R. Emmerich, K. Grigoryev *et al.* Nuclear polarization measurement of H/D atoms extracted from a storage cell with a Lamb-shift polarimeter, // Nucl. Instr. Meth. A **536** (2005) 334 – 337.
- [48] CST GmbH - Büdinger Str. 2a - 64289 Darmstadt – Germany.
- [49] B. Lorenz, T. Wise, F. Rathmann, Mapping of static magnetic fields along cell // Madison, 1995.
- [50] B. Lorentz, Diploma Thesis, MPI Heidelberg, 1993.
- [51] K. Zapfe, W. Brückner, H.-G. Gaul *et al.* Detailed studies of a high density polarized hydrogen gas target for storage rings, // Nucl. Instr. Meth. A **368** (1996) pp 293 – 306.
- [52] Е.К. Завойский, ЖЭТФ, **32**, (1957) с. 731 – 735.
- [53] P. Pradel, F. Roussel, A.S. Schlachter. Formation of H($n=2$) atoms by the nearly resonant process H^+ in Cs. Multiple collision processes. // Phys. Rev. A **10**, (1974) pp. 797 – 812.
- [54] R. Engels, R. Emmerich, M. Mikirtychians *et al.* Precision Lamb-shift polarimeter for polarized atomic and ion beams, // Rev. Sci. Instrum. **74** (2003) pp. 4607 – 4615.
- [55] М.С. Микиртычянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев и др. Блоки сверхтонких переходов для создания ядерной поляризации в источнике поляризованного атомарного водорода и дейтерия ANKE ABS. // Препринт ПИЯФ-2481, Гатчина (2002) 36с.
- [56] National Institute of Standards and Technology, Stopping power tables for protons and alpha particles – <http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/programs.html>.
- [57] E. Winkelmann, P.R. Bevington, F.H. Cverna *et al.* Proton-deuteron elastic scattering at 800 MeV, // Phys. Rev. C **21** (1980) 2535 – 2541.

- [58] К.Ю. Григорьев, А.А. Васильев, П.А. Кравцов и др. Измерения профиля пучка ускорителя COSY. // Препринт ПИЯФ-2713, Гатчина (2007) 20с.
- [59] K. Grigoryev, R. Engels, *et al.* Cell tests at ANKE // IKP+COSY Annual Report 2004, p. 9.
- [60] R. Engels, K. Grigoryev *et al.* First Polarization Measurement of Hydrogen Atoms Effusing from a Storage Cell into the Lamb-Shift Polarimeter and the Removal of the Components of the Polarized Target to COSY // IKP+COSY Annual Report 2004, p.108.
- [61] K. Grigoryev *et al.* Storage cell tests and commissioning of the Polarized Internal Gas Target // IKP+COSY Annual Report 2005, pp.20 – 21.
- [62] R. Engels, K. Grigoryev *et al.* The Polarized Internal Target at ANKE // IKP+COSY Annual Report 2005, p. 19.
- [63] R. Engels, K. Grigoryev *et al.* The Polarized Internal Target at ANKE // IKP+COSY Annual Report 2004, pp.11 – 12.
- [64] R. Engels, K. Grigoryev *et al.* Background reduction by a getter pump around the ionization volume of a Lamb-shift polarimeter and possible improvements of polarized ion sources // Review of Scientific Instruments, 76 (2005), 053305.
- [65] K. Grigoryev *et al.* The polarized internal gas target of ANKE at COSY // Proceedings of the 16th International Spin Physics Symposium and Workshop on Polarized Electron Sources and Polarimeters (SPIN 2004), Trieste, Italy, 2004, pp. 800 – 803.